

「石油化学」から「天然資源化学」へ (2016年版)

シェール革命、現代的石炭化学、石油価格下落のインパクト

シェール革命、現代的石炭化学、バイオマス化学の発展により、世界は石油を原料とする「石油化学」から、石油、天然ガス、石炭、バイオマスなどの幅広い天然資源を統合的に利用する「天然資源化学」の時代になった。また、最近の石油価格下落がこれにどんな影響を与えるかを考察した。

2 0 1 6 年 1 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

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)

まとめ

◆2005 年の世界のエチレン生産能力は、米国がトップで、日本が第 2 位であった。しかし、2014 年には米国、中国、サウジアラビア、韓国に次いで日本は第 5 位と順位を下げた。2005 年から 14 年にかけて、実に中国は約 1,300 万トン、サウジアラビアは 900 万トンの増能力を達成している。2019 年までに米国がシェールガス革命による積極的な投資で約 1,000 万トンの増能力を行い、中国は MT0/MTP 法などによる 1,100 万トンの増能力を行なうものと予想されている。上記増能力がなされると、世界で米国、中国の 2 カ国が抜きんで大きな生産能力を有することになる。 (p. 3-5)

◆日本はもっぱらナフサ・クラッキングの石油化学であるが、世界は石油、天然ガス、石炭、バイオマスなどの天然資源を統合的に利用する「天然資源化学」の時代になった。有機化学工業の出発原料のエチレン、プロピレン（以下、軽質オレフィン）をいずれの資源からも工業的につくれるようになった。その主要な 6 つの製法は、ナフサ・クラッキング、エタン・クラッキング、プロパン脱水素法（PDH）、現代的石炭化学の MT0 (Methanol to Olefins) と MTP (Methanol to Propylene)、バイオエタノール脱水法である。各製法の技術内容、強みと弱み、課題についてまとめた。

(p. 6-22, 58-65)

◆米国ではトウモロコシを、ブラジルではサトウキビを原料とする発酵法バイオエタノールの生産が急拡大した。米国ではガソリンの 10% に相当する量になっている。課題であった非食料のセルロース系原料からのバイオエタノールの工業生産が 2013-15 年に開始された。

(p. 17-22)

◆合成ガスやメタノールを原料とする新しい化学が発展している。中国は安価な石炭を原料にして、合成ガス、メタノールを経て軽質オレフィンをつくる新しいプロセスを大規模に工業化し、これを全国に拡大している。その技術の詳細と工業化の実績をまとめた。半面、中国は旧来のアセチレン法で有毒な塩化水銀触媒を使用して塩化ビニルモノマーをつくっている。これを金のナノ粒子触媒に代替する開発を Johnson Matthey が進めている。

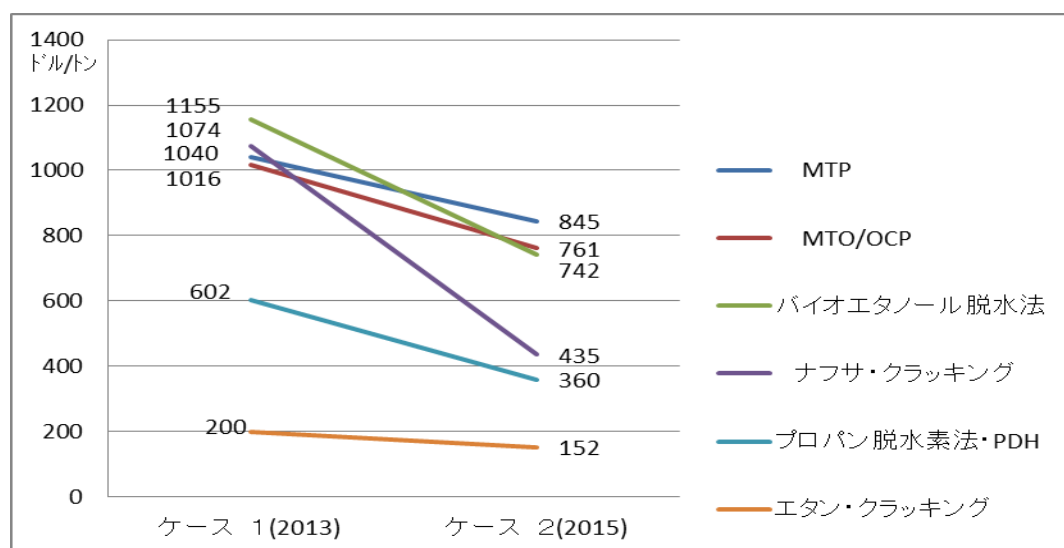
(p. 23-37)

◆米国はシェール革命により 2013 年に天然ガス、原油ともに世界第一の産出国になったと発表した。2016 年から LNG 輸出が本格化し、2017 年には天然ガスの輸入国から輸出国に転換する。原油価格の下落により天然ガス・原油のリグ総数（採掘装置数）は半減したが、天然ガス・原油の生産量は維持された。このことは原油が 50 ドル/バレルでも、コスト競争力をもった生産が可能なことを示している。

安価なシェールガスを原料とするエタン・クラッカーを6社が建設中である。2018 年末までにすべてが完成の予定で、エチレンの総生産能力は1000万トンである。また新たに2015年4月、信越化学の子会社シンテックがルイジアナ州でエタン・クラッカー（エチレン生産能力 50万トン）を建設することを決定した。（p. 38-57）

◆軽質オレフィン（エチレンとプロピレン）を製造する6つのプロセスについて技術評価を行い、またコストの大部分を占める原料費を見積もった。2013年の原油価格が100ドル/バレルのときと、2015年の50ドル/バレルのときの二つのケースについて行った。結果を下図に示す。原油価格下落によりナフサ・クラッキングのコスト競争力回復が顕著であるが、米国エタン・クラッキング優位は変わらない。（p. 58-65）

図 軽質オレフィンのケース別、製法別原料費



注：ケース 1 はナフサ 970 ドル/トン、エタン 220 ドル/トン（約 4.3 ドル/百万 Btu）、プロパン 500 ドル/トン（約 10.5 ドル/百万 Btu）、メタノール 400 ドル/トン、エタノール 700 ドル/トンとした。

ケース 2 はナフサ 500 ドル/トン、エタン 160 ドル/トン（約 3.2 ドル/百万 Btu）、プロパン 300 ドル/トン（約 6.3 ドル/百万 Btu）、メタノールは 300 ドル/トン、エタノール 450 ドル/トンとした。

出典：旭リサーチセンター作成

◆石油の高価格と将来の枯渇問題から、できるだけ石油を使用しない“脱石油”の取組が各方面でなされきた。合成ガソリン（合成燃料）の製造、再生可能エネルギーの利用、石油化学から「天然資源化学」への転換、電力用燃料に石油を極力使用しないこと、自動車の燃費節減などである。（p. 66-71）

◆化学工業の主要な製品であるエチレン誘導品、プロピレン誘導品、芳香族化合物の世界の生産能力、生産、需要をまとめ、各国・各地域の特徴を明らかにした。中国は化学品とポリマーの大生産国、大需要国でありかつ大輸入国であるが、自給体制を強めている。サウジアラビアをはじめとする中東は生産品の多くを輸出するので、中東の増能力は欧州やアジアの市場にとっては影響が大きい。

米国の安価なシェールガスを原料にするエタン・クラッキングからはコスト競争力のあるエチレンが得られる。安価なエチレンを使用するポリエチレンは競争力があり、その他ポリビニルアルコール、EVA、ポリ塩化ビニルなども競争力が高まる。同じくシェールガス由来のメタノールとその誘導品（化学品やポリマー）も競争力を増すであろう。主要な化学品・ポリマーのエチレン（またはメタノール）の原単位から米国誘導品の競争力を評価し、その影響を推定した。（p. 72-78）

◆日本の石油化学は厳しい状況にあり、不採算輸出をカットして生産能力を縮小し、収益を改善する方向に向かっている。すでに三つのエチレンプラントの停止計画が決定し、実施されている。幸い原油価格の下落があり、ナフサ・クラッキングの競争力が改善された。それにしても、独自の高付加価値品を中心とした強い事業内容への再構築や海外展開が求められる。（p. 79-82）

目次

【注意書きと略語・用語集】	1
はじめに	2
1 大きく変わる世界の化学工業	3
1.1 主要国のエチレン生産能力推移——拡大する米国と中国	3
1.2 地域別エチレン生産能力推移と予測	3
2 発展する「天然資源化学」	6
2.1 天然資源化学とは	6
2.2 石油化学と石油精製の基本	8
2.3 天然ガス化学	9
2.4 合成ガス・メタノール化学と現代的石炭化学	12
2.5 世界各地域のエチレン、プロピレン、ブタジエン、芳香族化合物の製法	15
2.6 バイオマス化学	17
3 詳論：合成ガス・メタノール化学と MT0&MTP	23
3.1 合成ガス・メタノール化学	23
3.2 MT0 と MTP	30
3.3 アセチレン法塩化ビニル（VCM）とポリ塩化ビニル（PVC）	37
4 米国シェール革命と原油価格下落の影響	38
4.1 拡大する米国シェールガス・オイルの生産	38
4.2 復活する米国化学工業	43
4.3 米国天然ガス価格の特殊性	45
4.4 原油価格下落とシェールガス・オイル生産への影響	47
4.5 原油価格と天然ガス価格の予測	56
5 軽質オレフィンの製法・コストの比較(原油価格下落の影響)	58
5.1 軽質オレフィン（エチレンとプロピレン）の各種製法比較	58
5.2 各種製法の原料費試算のための前提	59

5.3	各種製法の原料費の試算結果.....	60
5.4	CTO と GTO のコスト比較	64
5.5	エチレンコストの試算——日本経済新聞と IHS	64
6	脱石油の取り組み	66
6.1	合成ガソリンの大規模工業化.....	66
6.2	バイオマス利用技術の進歩.....	68
6.3	化学品の原料転換	68
6.4	燃料の転換—発電の電源別比率の例.....	68
6.5	自動車燃料の節減	69
7	代表的化学品（誘導品）とコスト	72
7.1	基礎化学品（エチレン、プロピレン、芳香族化合物）からの誘導品と需要 ..	72
7.2	米国エチレン系誘導品のコスト競争力.....	75
7.3	メタノール・アンモニア系誘導品のコスト競争力.....	76
7.4	ポリマー種類別のコストダウンの大きさ.....	77
8	シェール革命、中国石炭化学、中東石化が日本の石油化学に与える影響.....	79
8.1	日本の石油化学の厳しい状況.....	79
8.2	厳しい状況に対する方策	80
8.3	日本の競争力ある製品、高付加価値品は?.....	81
8.4	海外展開	82
8.5	原油価格の下落の影響.....	82
	おわりに	83
	参考・引用文献	84

【注意書きと略語・用語集】

(1) 本リポートで使用する生産能力や需要はすべて年間ベースである。単位の記述は“万トン／年”を“万トン”と略した。為替レートは、特に記載がない場合は、前リポート²⁾に合わせて1 US\$=100 円、1 ユーロ=138 円とした。

(2) 本リポートでは次の用語と略号を使用した。

エタン・クラッキング：エタン（主）、プロパン、ブタンを原料にした水蒸気分解。

軽質オレフィン：本リポートでは、エチレンとプロピレンを軽質オレフィンとよぶ。

合成ガス：一酸化炭素（CO）と水素（H₂）との混合ガス。

接触改質（リフォーミング）：石油精製でナフサから芳香族化合物を製造する方法。

接触分解（FCC）：石油精製でガスオイルからガソリン成分を製造する方法。

シェールガス：頁岩から採取される天然ガス。組成は、従来の天然ガスと変わらない。

ナフサ・クラッキング：ナフサ（またはガスオイル）を原料とする水蒸気分解。

リグ(rig)：原油や天然ガスを掘削する装置。シェールには水平掘りのリグを使用する。

CTO：Coal to Olefin、石炭を原料にエチレン、プロピレンを製造する一貫製法。

CTL：Coal to Liquid、石炭から合成液体燃料（ガソリンなど）を製造する方法。

DMTO：中国科学院大連化学物理研究所（DICP）が開発した Dalian MT0 法。

EG、MEG：EG はエチレングリコール、MEG は単量体エチレングリコール。

FCC：Fluid Catalytic Cracking（流動接触分解）、本リポートでは、接触分解と同義語とした。

GTO：Gas to Olefin、メタンを原料とするエチレン、プロピレンの一貫製法。

GTL：Gas to Liquid、天然ガス（メタン）から合成液体燃料（ガソリンなど）を製造する方法。

MT0：Methanol to Olefins、メタノールからエチレン、プロピレンを製造する方法。

MTP：Methanol to Propylene、メタノールからプロピレンを製造する方法。

PDH：Propane Dehydrogenation Process、プロパン脱水素によるプロピレン製造法。

SMT0：Sinopec（中国石化）が開発した Sinopec MT0 法。

SNG：Synthetic Natural Gas。合成ガスから製造した天然ガス（メタン）。

はじめに

本リポートは、2014年3月に発行したARCリポート「“石油化学”から“天然資源化学”へ」²⁾の2016年版である。過去約2年間のトピックスと最新データを追加し、全体を改訂した。この間の最大の出来事は、2014年年央からの原油価格の下落である。

従来の「石油化学」から、世界は石油、天然ガス、石炭、バイオマスなどの天然資源を幅広く利用する「天然資源化学」に拡大している。その代表は、米国のシェールガス革命による天然ガス化学の復興であり、中国の現代的石炭化学の台頭である。本リポートでは、シェール革命と現代的石炭化学について詳細にまとめた。

「天然資源化学」の言葉をあえて使用したのは、日本はすべて石油原料とするナフサ・クラッキングの一本足打法であるが、世界を見れば天然ガス、石炭、バイオマスを原料とするエチレン、プロピレンの製造が発展しているからである。

エチレン、プロピレンをつくる6つの製法をリストアップして、その特徴を比較するとともにコストを試算した。2013年の原油高のケースと、2015年の原油価格が下落後のケースの二つを計算して、原油価格など原料単価がコスト競争力にどう影響するかを評価した。

安価なシェールガスを原料にするエタン・クラッキングからはコスト競争力のあるエチレンが得られる。安価なエチレンを使用するポリエチレンは競争力があり、その他ポリビニルアルコール、EVA、ポリ塩化ビニルなども競争力が高まる。同じくシェールガス由来のメタノールとその誘導品（化学品やポリマー）も競争力を増すであろう。主要な化学品・ポリマーのエチレン（またはメタノール）の原単位から誘導品の競争力を評価し、その影響を推定した。

本リポートでは、関連する合成ガス・メタノール化学とバイオマス化学の発展やエネルギー・資源の動向についても触れた。

1 大きく変わる世界の化学工業

1.1 主要国のエチレン生産能力推移——拡大する米国と中国

表1に示すように、2005年の世界のエチレン生産能力（年産）は、米国（2,830万トン）がトップで、日本（740万トン）が第2位であった。しかし、2014年には米国（2,810万トン）、中国（1,940万トン）、サウジアラビア（1,520万トン）、韓国（827万トン）に次いで日本（720万トン）は第5位と順位を下げた。2005年から14年にかけて実に中国は約1,300万トン、サウジアラビアは900万トンの増能力を達成している。

2019年には、米国がシェールガス革命による積極的な投資で約1,000万トンの増能力を行って3,770万トンに、中国はMT0/MTP法やナフサ・クラッキング法による1,100万トンの増能力により3,040万トンになると予測されている。世界で、米国と中国が抜きんできた大きな生産能力をもち、ついでサウジアラビアが大きな生産能力をもつ(図1)。

一方、日本は生産能力削減の方向であり、地位低下が顕著である。

1.2 地域別エチレン生産能力推移と予測

表2に示すように、北中南米地域は2013年の3,950万トンが2019年には5,080万トンになる予想で、この間の増能力は1,130万トンである。そのうち、北米の増能力が1,000万トンなのでほとんどを占める。

アジアは2013年の5,460万トンが2019年には7,070万トンになる予想で、この間の増能力は1,610万トンである。中国の増能力が1,100万トンで、その他アセアンなどの増能力が510万トンある。

中東は2013年の2,830万トンが2019年には3,440万トンになる予想で、この間の増能力は610万トンである。サウジアラビアの増能力は180万トンで、それ以外の中東諸国の増能力が430万トンと多い。中東は輸出主体なので、増能力は欧州とアジアの市場にとって影響が大きい。

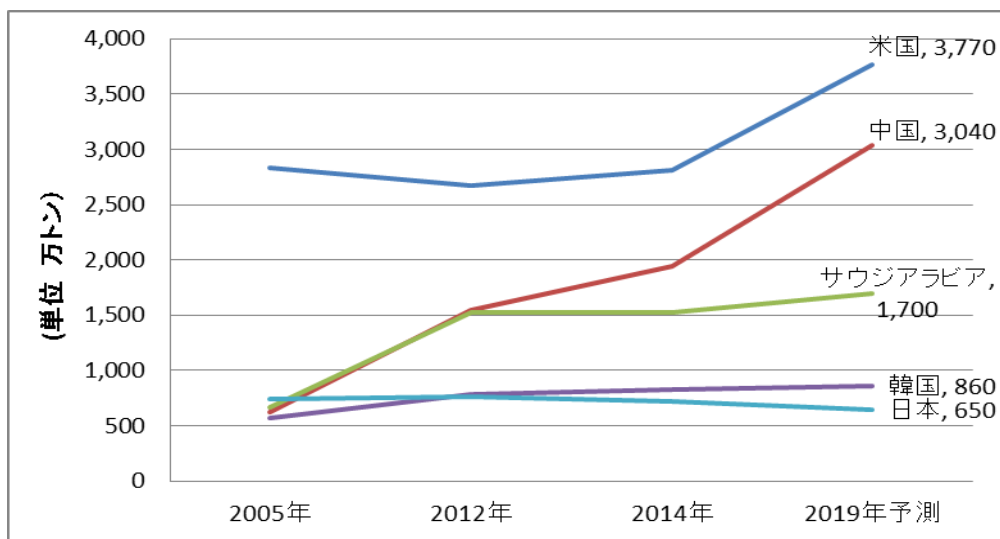
欧州は2013年の2,560万トンが2019年には2,490万トンに減少の予定である。日本と事業環境は類似しているが、設備の減少幅は日本より小さい。

表1 世界のエチレン生産能力推移と予測（単位 万トン）

国名		2005年		2012年		2014年	2019年予測
	順位	エチレン 生産能力	順位	エチレン 生産能力	順位	エチレン 生産能力	エチレン 生産能力
世界合計		11,500		15,036		15,796	19,180
米国	1	2,832	1	2,670	1	2,812	3,770
中国	4	623	2	1,551	2	1,940	3,040
サウジアラビア	3	670	3	1,520	3	1,520	1,700
韓国	5	576	4	783	4	827	860
日本	2	741	5	761	5	721	650
ドイツ	6	552	6	574	7	576	
カナダ	7	528	7	560	8	560	520
イラン	26	72	8	532	6	632	
タイ	17	198	9	444	9	444	460
台湾	12	285	10	405	10	405	440
ブラジル	11	293	11	403	12	403	400
オランダ	8	392	12	397	13	397	
インド	14	264	13	370	11	404	930
ロシア	9	367	14	349	15	349	
フランス	10	337	15	337	16	337	
英国	13	284	16	286	17	286	
シンガポール	18	190	17	280	14	380	400
カタール	22	103	18	252	18	252	
ベルギー	15	218	19	246	19	246	
イタリア	16	217	20	217	20	217	
1-20の合計				12,935		13,708	

出典：2005-14年のデータは武田 眞 世界化学工業白書⁶⁾、2019年データは経済産業省資料(2015)⁵⁾に基づき旭リサーチセンター作成。

図1 主要国のエチレン生産能力推移と予測



出典：表1に基づき旭リサーチセンター作成。

表2 地域別エチレン生産能力の推移と予測 (単位 万トン)

	2013年	2019年予測	2019-2013 増減量
北中南米	3,950	5,080	1,130
〔内 米国〕	〔2,760〕	〔3,770〕	〔1,000〕
アジア	5,460	7,070	1,610
〔内 中国〕	〔1,940〕	〔3,040〕	〔1,100〕
中東	2,830	3,440	610
欧州	2,560	2,490	▲70
CISその他	620	1,100	480
世界合計	15,420	19,180	3,760

出典：経済産業省資料(2015) ⁵⁾ の2013年と2019年（予測）の
データに基づき旭リサーチセンター作成。

2 発展する「天然資源化学」

2.1 天然資源化学とは

石油を原料とする「石油化学」から、世界は石油、天然ガス、石炭、バイオマスなどの幅広い天然資源を統合的、融合的に利用する「天然資源化学」の時代になった²⁾。資源枯渇の順を考えれば、石油化学→天然ガス化学→石炭化学→バイオマス化学の順に重点をシフトする必要がある。各国は、その時々によりその国に最適な天然資源ミックスを考えて、競争力のある化学工業を構築することに迫られている。

(1) 石油化学

石油化学は石油成分のナフサを水蒸気分解（以下、ナフサ・クラッキング）して、エチレン、プロピレン、C4留分（ブタジエンなど）、分解ガソリンを製造する。日本、アジア、西ヨーロッパはナフサ・クラッキングが中心である。

(2) 天然ガス化学

米国は安価なシェールガス由来¹⁾のエタンなどを水蒸気分解（以下、エタン・クラッキング）してエチレンを製造する比率が増加している。既存クラッカー（分解炉）をナフサ原料よりエタン原料にシフトしてきたためである。さらに、6つの新プラントを全くの更地から建設している。計画中のものを含めると、合計の生産能力は1,000万トンに上る。

中東は、以前より非常に安価な石油随伴の天然ガスを利用したエタン・クラッキングの比率が高い。なお、エタン・クラッキングではプロピレンが不足するため、天然ガスの一成分のプロパンを脱水素してプロピレンを製造するPDHプラントが建設されている。

(3) 石炭化学³⁾

中国は安価な石炭由来のメタノールを原料にエチレンとプロピレンを合成するMTO法（methanol to olefin）とメタノールからプロピレンを合成するMTP法（methanol to propylene）の大規模工業化を進めている。また、石炭原料から軽質オレフィンを製造する一貫プロセスは、CTO法（coal to olefin）とよばれる。

¹ シェールガスは非在来型天然ガスであるが、組成的に在来型天然ガスと異なるものではない。

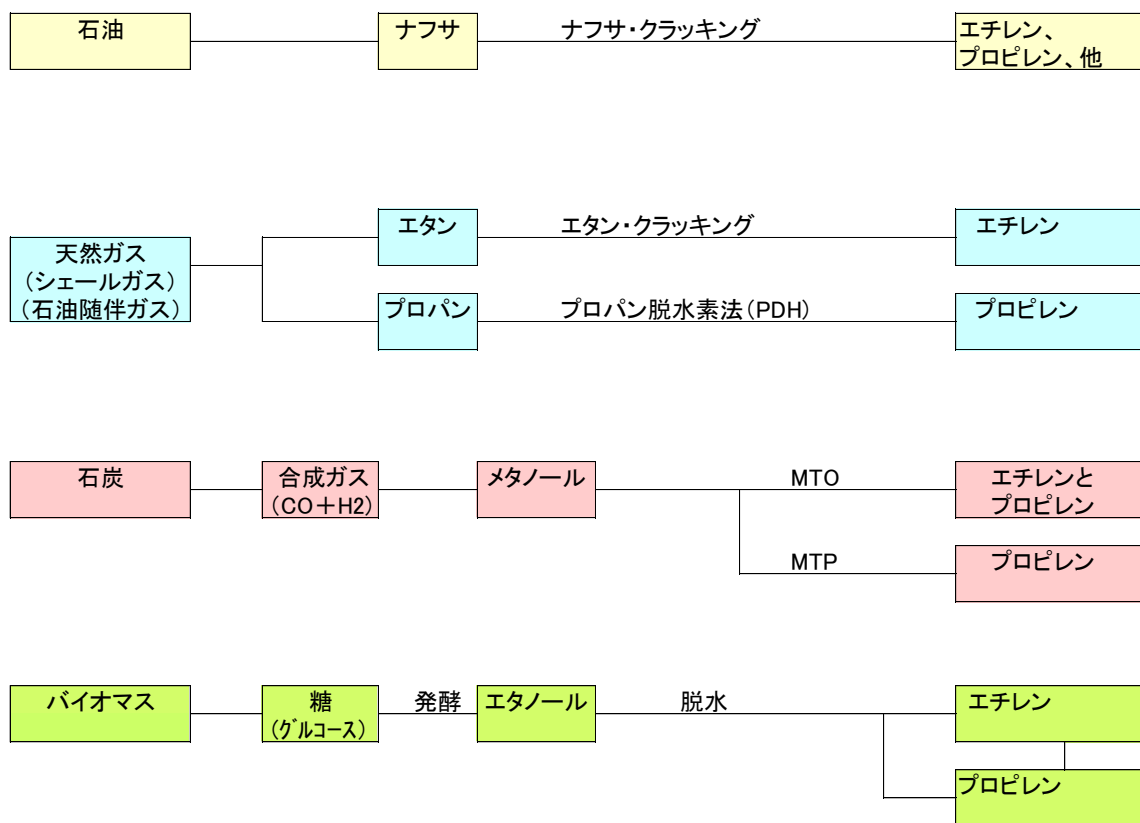
(4) バイオマス化学⁴⁾

バイオマス由来のエタノール（以下、バイオエタノール）を脱水してエチレンをつくり、これを重合してポリエチレンを製造することができる。ブラジルの化学会社であるBraskemがこのプロセスを最初に事業化した。

以上のように、有機工業化学の出発原料であるエチレンとプロピレンを石油、天然ガス、石炭、バイオマスのいずれの原料からも工業的につくることのできる時代になった（図2）。

図2 石油化学、天然ガス化学、石炭化学、バイオマス化学による

エチレン、プロピレンの製造ルート



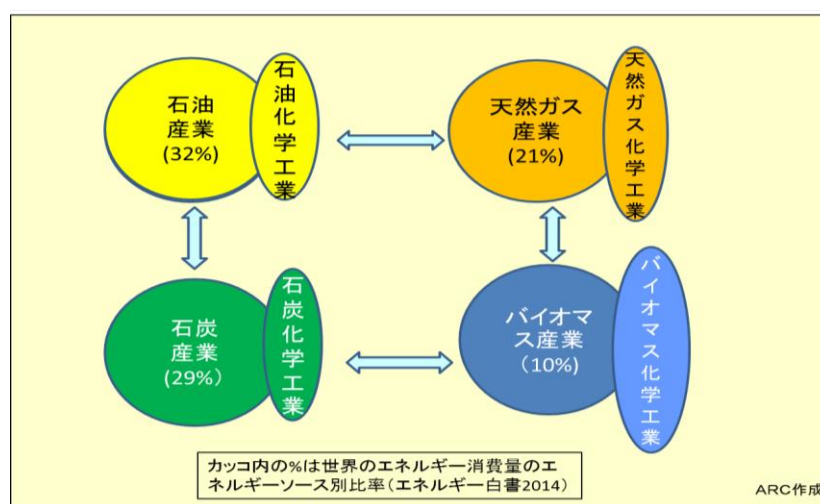
注：天然ガス—合成ガス—メタノール—MTO/MTPのルート（GT0）は複雑になるのでこの図では省略した。
出典：旭リサーチセンター作成。

(5) エネルギー産業と化学工業

図3に示すように、石油化学工業、天然ガス化学工業、石炭化学工業、バイオマス化学工業には、それぞれの関連した巨大なエネルギー産業が存在している。そして、たとえば石油化学工業は、石油（精製）産業と深く関係している。また、各エネルギー産業と各化学工業はお互いに深く関係している。

石油（精製）産業の原油使用量は石油化学工業の原油油使用量の10倍以上で規模が大きい。他の産業も同様である。エネルギー産業の動向は化学業界にとって影響が大きい。

図3 エネルギー産業と化学工業



出典：旭リサーチセンター作成。

2.2 石油化学と石油精製の基本

日本の石油化学は、ナフサの水蒸気分解のいわゆるナフサ・クラッキングがほとんどである。韓国、台湾、アセアン、西ヨーロッパもナフサ・クラッキングが主流である。これによりエチレンを主製品として、プロピレン、C₄留分（ブタジエン、ブテン類）、C₅留分、分解ガソリン（ベンゼン、トルエンなどの芳香族化合物）が副産品として得られる。エチレンの生産量を100としたときの副産品の生産量は表3に示す通りである。副産品の需要量が生産量より多い場合は、他の製造ルートで生産して補うことが必要となる。

通常、不足するプロピレンは石油精製（リファイナリー）の接触分解（FCC）から、また不足する芳香族化合物（特にキシレン）は同じ石油精製の接触改質（リフォーミン

グ) で生産される。日本、韓国、台湾、アセアン、西ヨーロッパはいずれもこの形である (本リポート2章5節参照)。

なお、接触分解はプロピレン供給源としてみると、プロピレン収率が5%あるいはそれ以下と低いのが欠点である。プロピレン収率を6-11%に高めたプロセス (Enhanced FCC とよばれる) が開発されている。

表3 ナフサ・クラッキングとエタン・クラッキングの生産品比率と需要比率

製法と生産量比率 (重量比)	エチレン (C2)	プロピレン (C3)	ブタジエン (C4)	その他 C4留分	芳香族化合物
ナフサ・クラッキング	100	50-60	15	25	75(分解ガソリン)
エタン・クラッキング	100	9.1	3.5	2.6	5.6(分解ガソリン)
世界の需要(2011年)	100	70	8.4	n.a.	93(ベンゼン、トルエン、キシレン)

出典：各種資料より、旭リサーチセンター作成。

2.3 天然ガス化学

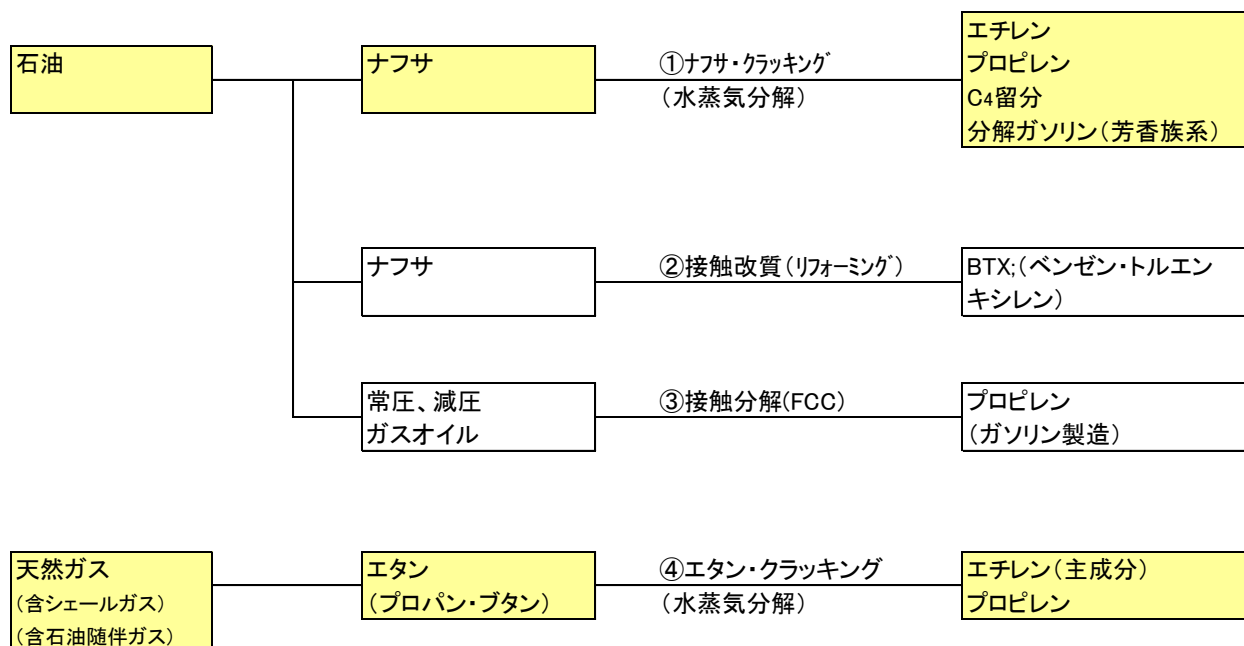
(1) エタン・クラッキング

天然ガス原料² [エタン (主成分)、プロパン、ブタン] の水蒸気分解であるエタン・クラッキングによってエチレンが製造される。米国ではシェールガスが安価になったことから、ナフサ・クラッキングからエタン・クラッキングへのシフトが進みエタン・クラッキングの比重が急激に高まっている (2章5節参照)。そして、米国のエチレンは高いコスト競争力をもつに至り、アジアと西ヨーロッパのナフサ・クラッカーは大きな脅威に感じている。2014年年央からの原油価格下落後 (100ドル/バレルから40-60ドル/バレルに低下) も米国のシェールガス原料のエチレンのコスト優位は変わらない (5章参照)。半面、表3に示すようにエタン・クラッキングは、エチレン以外のプロピレン、ブタジエン、芳香族化合物などの副産品がナフサ・クラッキングに比べはるかに少なく、需要を満たすことができない。このため歴史的に、前記の接触分解 (FCC) や接触改質 (リフォーミング) からの供給に大きく依存してきた (2章5節参照)。

² シェールガスの組成：パーネット [テキサス州] の例 (容量%)]

メタン 80.3-93.7%、エタン 2.6-11.8%、プロパン 0-5.2%、CO₂ 0.3-2.7%、N₂ 1.0-7.9%

図4 石油化学&石油精製、天然ガス化学のフロー



出典：旭リサーチセンター作成。

表4 石油化学&石油精製、天然ガス化学の反応条件と生成物

番号	名称	原料	生成物	反応	反応温度	反応圧力	触媒
①	ナフサ・クラッキング	ナフサ	C ₂ ～C ₄ 、BTX	水蒸気分解	800℃	低圧	無触媒
②	接触改質	ナフサ	BTX	接触改質	400～500℃	25～35気圧	Pt(Re)-アルミナ
③	接触分解	常圧、減圧 ガスオイル	プロピレン	接触分解(FCC)	500℃	常圧～少し加圧	Y型ゼオライト
④	エタン・クラッキング	エタン、プロパン、 ブタン	C ₂ 主体	水蒸気分解	900℃	低圧	無触媒

番号	名称	生成物
①	ナフサ・クラッキング	エチレン100、プロピレン50-60、ブタジエン15、他C ₄ 25、 分解ガソリン75(ベンゼン15、トルエン15)
②	接触改質	C ₅ +改質油 83%(内訳 ベンゼン9、トルエン21、キシレン24、C ₉ 芳香族17: 芳香族計71(%))
③	接触分解	プロピレン3.2、ブテン類5.8、イソブタン3.3、ガソリン(C ₅ +分岐)36.5、ガスオイル15、 残渣・炭素29(%)
④	エタン・クラッキング	エチレン100、プロピレン9.1、ブタジエン3.5、他C ₄ 2.6、分解ガソリン5.6

注：エタン・クラッキングの原料はエタン76%、プロパン19%、ブタン5%と仮定した。

出典：工業有機化学（東京化学同人、2015）¹⁾を基に旭リサーチセンター作成。

(2) プロパン脱水素法 (PDH)

副産品のプロピレンが少ないエタン・クラッキングが増加したことから、バランス上プロピレンが不足する。その対策として、天然ガスの一成分であるプロパンを脱水素してプロピレンをつくるプロパン脱水素法 (PDH) のプラントが世界で大規模に建設されている。

複数のエンジニアリングメーカーがPDH技術をライセンスしている。実績が多いのはUOPのOleflex法¹³⁾、LummusのCatofin法¹⁴⁾、UhdeのSTAR (Steam Active Reforming) 法¹⁵⁾である。

Oleflex法は触媒にPt-Sn/Al₂O₃を使用した移動床断熱反応器を使用し、水素ガスで希釈して、580–650℃で反応する。触媒は連続的に再生する。プロパンの脱水素反応は吸熱反応なので原料を予備過熱して熱供給をする。プロパンのワンパス転化率は30–35%、プロピレン収率86–90%である。

Catofin法は触媒にCr₂O₃/Al₂O₃を使用した固定床断熱反応器を使用し、570–650℃で反応する。触媒は定期的に再生する。吸熱反応なので原料を予備過熱して熱供給をする。プロパンのワンパス転化率は48–65%、プロピレン収率86%以上である。

Oleflex法とCatofin法のいずれも、反応圧力を2気圧以下に下げ、平衡反応が生成系に進むようにしている。



STAR法は、Oleflex法やCatofin法と異なり、酸化的脱水素法によりプロピレンを製造する。プロパン脱水素反応で発生した水素を酸素で酸化して水にすることにより、上記の脱水素反応の平衡を右にずらすことにより反応圧力を5気圧まで上げることができる。これによりワンパスの転化率を脱水素法より約10%高くすることができる。水蒸気をプロパンの4.2倍加えて反応する水蒸気改質方式である。触媒は水蒸気にも酸素にも強い亜鉛・カルシウム/アルミナ担体である。反応系はスチーム改質反応器 (反応温度510–580℃) とそれと直結する酸化反応器 (580℃) からなる連続式である。酸化反応器に酸素が供給される。両反応器はいずれも管型で、そこに同じ触媒を充填する。スチーム改質反応器に

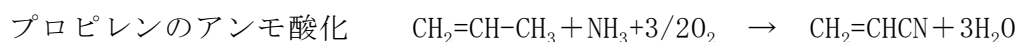
供給する原料は予備加熱され、反応器は外部加熱される。酸化反応器は断熱反応器である。7時間運転後、1時間酸素による触媒再生を行なう。

PDHの欠点はワンパス転化率が低く、未反応原料をリサイクルする必要があることである。

DOWが米国に大規模プラントを完成し、Formosa Plastics(台湾)は米国湾岸にPDHプラントを建設する予定で、UhdeのSTAR法の採用を決定した。中国、中東、アセアンにも大型PDHプラントが建設された。PDHプラントが中国で完成し、Ineosのプロパン専用船が米国より中国に到着し、プロパンをフィードして工場の運転を開始した。

(3) プロパン法アクリロニトリル (AN)

通常、アクリロニトリル (AN) はプロピレンのアンモ酸化反応で製造される。新たに天然ガスの一成分のプロパンを原料に一段でANを製造する技術が開発された。反応は同じアンモ酸化で、触媒はMo-V系の複合酸化物が研究された。2013年に旭化成ケミカルズとPTTとの合弁会社であるPTT Asahi Chemicals Company Ltdは、タイに生産能力20万トンの新プラントを稼働した。天然ガス成分の飽和炭化水素(プロパン)より化学品 (AN) を直接製造する技術で、天然ガス化学の新展開である。



2.4 合成ガス・メタノール化学と現代的石炭化学

(1) 合成ガス→メタノールの基幹ルート

新たな動きとして、合成ガス→メタノールを基幹ルートとする化学が発展している。合成ガスは石炭、天然ガス、あるいはバイオマス(表6参照)からつくられる。中国は主として石炭から、中東や米国などでは天然ガスからつくっている。そのため、合成ガス→メタノール基幹ルートは石炭化学と天然ガス化学の共通の基幹ルートになる。

合成ガスとは一酸化炭素(CO)と水素(H₂)の混合ガスで、用途に応じてその組成を調製する。メタノール合成には、モル比がCO:H₂=1:2のものが用いられる。

(2) メタノールの合成と用途

合成ガス ($\text{CO} : \text{H}_2 = 1 : 2$) を触媒存在下、 200°C で反応させるとメタノールができる。近年、大型のメタノール製造設備（メガメタノールプラント、生産能力が百万トン以上）が建設されている。メタノールの2013年の世界需要は6,700万トンで、主用途は化学品原料53%（ホルマリン30%、酢酸9%、MT0/MTP軽質オレフィンの12%、メタクリル酸メチル（MMA）2%）、燃料31%[ガソリンブレンド用・燃料・DME（ジメチルエーテル）が22%、MTBE（メチル t-ブチルエーテル）が9%]、その他16%である（出典：世界化学工業白書2015⁶⁾）。

（3） MT0・MTPとCT0・GT0

最近の動きとして特に注目すべきは、メタノールから軽質オレフィン（エチレン、プロピレン）をつくるMT0（Methanol to Olefin）法とメタノールからもっぱらプロピレンをつくるMTP（Methanol to Propylene）法である。

MT0はモレキュラーシーブの一種であるSAPO-34（アルミノホスフェート）触媒を使用し、エチレンとプロピレンを約1：1でつくる方法である。米国のUOPがSAPO-34を最初に発見し、MT0プロセスを開発した¹⁶⁾。UOPはセミコマーシャルプラントで実証した後、中国に技術をライセンスした。一方、中国科学院大連化学物理研究所（DICP）も古くから独自技術を開発し工業化している¹⁷⁾。DICPと洛陽石化工程公司が開発した方法はDMTO（Dalian MT0）法とよばれ、Sinopec（中国石化）が開発した方法はSMT0（Sinopec MT0）法とよばれる¹⁸⁾。

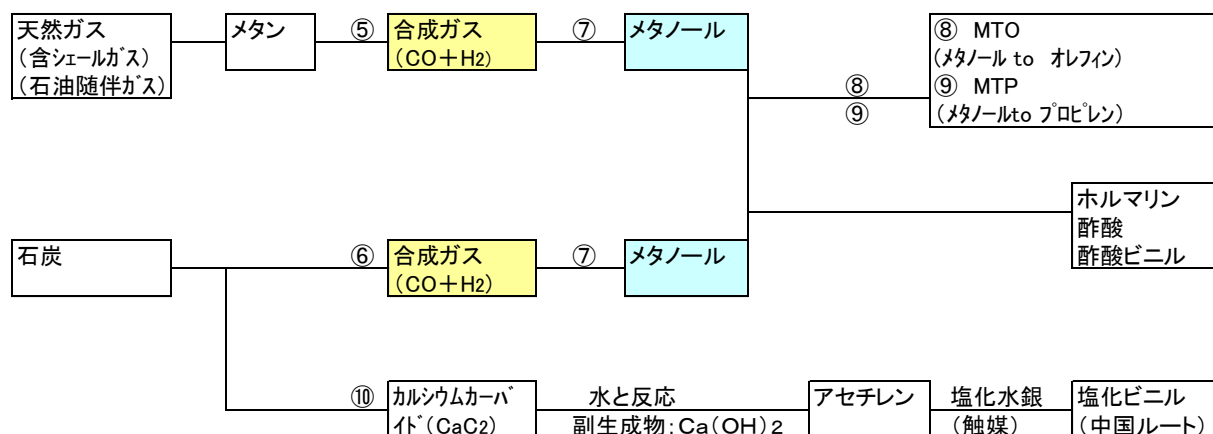
一方、MTP法は、ゼオライト系のHZSM-5を触媒に使用し、もっぱらプロピレンを生成する。Lurgiが開発した技術¹⁹⁾で、中国に技術ライセンスされている。

中国では、2015年末にはMT0/MTPプラントが18か所程度稼働し、軽質オレフィン総生産能力は約1,000万トンになる。それ以外に多数のMT0/MTPプラントが全国的に計画され、建設中である。中国では、原料には石炭を使う場合が多く、石炭からメタノールを経由して軽質オレフィンをつくる一貫プロセスをCT0（Coal to Olefin）とよんでいる。

一方、天然ガスのメタンを原料にメタノールを経由して軽質オレフィンをつくるプロセスはGT0（Gas to Olefin）とよばれる。中国には購入（輸入）メタノールを使用するMT0プラントもある。

以上のように、工業的に石炭やメタンから軽質オレフィンが製造される新時代になった。

図5 合成ガス・メタノール化学と石炭化学のフロー



出典：旭リサーチセンター作成。

表5 合成ガス・メタノール化学と石炭化学の反応条件と生成物

番号	名称	原料	生成物	反応	反応温度	反応圧力	触媒
⑤	メタン→合成ガス	メタン:水蒸気=1:2.5~1:3.5	合成ガス(COとH ₂ の混合ガス)	水蒸気改質	800℃	35気圧	ニッケル-アルミナ(助触媒アルカリ)
⑥	石炭→合成ガス	石炭、水蒸気	合成ガス(COとH ₂ の混合ガス)	水蒸気改質	1000℃	常圧~加圧	
⑦	メタノール合成	合成ガス(CO:H ₂ =1:2)	メタノール	平衡反応	240-260℃	50-100気圧	銅・亜鉛触媒 アルミナ担体
⑧	MTO(UOP)	メタノール:水=1:0.4	エチレン:プロピレン=1:1	脱水反応	435℃	0.3気圧	SAPO-34
⑨	MTP(Lurgi)	メタノール	プロピレン	脱水反応	425℃	1.5気圧	Zeolite(H-ZSM5)
⑩	カーバイド合成	石炭、石灰石	カルシウムカーバイドと一酸化炭素	(電気炉加熱)	2000℃		無触媒

出典：工業有機化学（東京化学同人、2015）¹⁾を基に旭リサーチセンター作成。

一方、中国は旧来の石炭化学を用いてアセチレン経由で塩化ビニルをつくり、ポリ塩化ビニルを大規模に生産している（図5と表5）。この方法は水酸化カルシウム（Ca(OH)₂）の副生が多く、触媒に有毒な塩化水銀を使用することから環境に望ましくない方法である。

2.5 世界各地域のエチレン、プロピレン、ブタジエン、芳香族化合物の製法

(1) エチレン

日本、アジア（中国を除く）、欧州ではナフサ・クラッキング（原料は主にナフサで、それよりも高沸点のガスオイルも使用される）によるエチレン生産が主流である。ナフサ・ガスオイルの比率が日本は97%、他の地域は約80%である。

米国はシェールガス革命でナフサ・クラッキングからエタン・クラッキングに大きくシフトした。2008年はナフサ33%、ガスオイル9%で、エタン34%、プロパン・ブタン24%であったものが、2011年にはナフサ11%、ガスオイル4%で、エタン65%、プロパン・ブタン20%と軽質原料に大きくシフトした。また、エタン・クラッキング原料の中で、エタンの比率が増えていることが注目される。エタンがプロパンやブタンに比べクラッキングのエチレン収率や全体収率が高いためか、エタンのパイプラインが整備されているためであろう（5章1節参照）。

中東は安価な石油随伴ガス（天然ガス）を原料にするエタン・クラッキングが主体であるが、ナフサ・クラッキングもある。2008年は、ナフサ・ガスオイル18%で、エタン・プロパン・ブタン82%であった。

中国はナフサ・クラッキングが主体であったが、MTO/MTPプラントが増えている。

(2) プロピレン

日本、アジア（中国を除く）、欧州ではナフサ・クラッキングによるプロピレン生産が主流で、不足分は接触分解(FCC)から供給される(2008年のデータではクラッキング70%、接触分解30%の比率であった)。

一方、米国は歴史的にエタン・クラッキングの比率が高いのと、ガソリン製造用の巨大な接触分解設備があるため接触分解からの供給が多い。(2008年はナフサとエタンのクラッキングから35%、接触分解から60%が供給された)。シェールガス革命によるエタン・クラッキングへのシフトや大規模な新設計画（エチレン年産1,000万トンが2018年末の完成予定）により、プロピレン不足が予想されている。このため天然ガス成分の安価なプロパンを利用した脱水素法（PDH）プラントの新設で対応しようとしている。PDHは中東、中国でも採用されている。

また、中東ではエチレンとブテンを原料とするメタセシス法、中国ではMTPが採用されている。いずれもプロピレンのオン・パーパス生産（目的生産）法である。また、MT0からもプロピレンがエチレンとともに生産される。

今後、中国ではナフサ・クラッキングの副生品に加えて、PDHやMTP/MT0からのプロピレンが増加する。

（3） ブタジエン

世界的に、ブタジエンの主要供給源はナフサ・クラッキングの副生品である。プロパン、ブタンを含む原料のエタン・クラッキングからも副生品として得られるが、ナフサ・クラッキングに比べ生成量は少ない（表 3）。

水蒸気分解原料の軽質化（ナフサからエタンへのシフト）により、副生品であるブタジエンの不足が予想される。この対応として、ブタジエン目的生産プラントの新設が考えられている。目的生産技術としては、日本の三菱化学や旭化成ケミカルズが開発中のブテンの酸化的脱水素法によるブタジエン製造が有望である。立地としては、ブタジエンが不足する米国かブタジエンの大消費地であるアジアに建設されると見られている。ただし、現在はプラント建設の具体的計画がない。天然ゴム価格が下落して、ブタジエンの市況が悪いためである。

ブタジエンはアジアの需要が大きく、アジアではブタジエンの60%が合成ゴム（SBR、BR）に、20%弱がABSに使用されている。

（4） 芳香族化合物（BTX）

エタン・クラッカーの比率が増えると芳香族化合物も相対的に不足するので、不足分は石油精製の接触改質（リフォーミング）からの供給が増えるとみられる。2009年は米国では、ナフサ・クラッキングからの供給が47%で、接触改質からの供給が53%であった。同時期に、欧州はナフサ・クラッキングからが75%で、接触改質からが25%であった。なお、キシレン類はナフサ・クラッキングの分解ガソリンからは分離しにくく、主に接触改質でつくられる。

2.6 バイオマス化学

再生可能資源を最大限活用すべく、発酵技術はもとより従来の有機合成技術が動員され、それらを統合したバイオマス化学が構築されつつある。

(1) バイオエタノールとバイオディーゼル油⁴⁾

バイオマスを原料としてバイオエタノールやバイオディーゼル油が大量につくられ、バイオ燃料として使用されている。バイオエタノールはトウモロコシやサトウキビを原料にして発酵でつくられる。バイオディーゼル油は菜種油などの天然脂肪酸グリセリドをメタノールとエステル交換反応させ、脂肪酸メチルにしたものである。副生物としてグリセリンが大量に発生するため、その用途開発が進められている。

バイオマス化学で、量的に一番多いのは、このバイオエタノールとバイオディーゼル油である。米国はすでにガソリンの10%に近い容量のバイオエタノールを生産している。米国ではバイオエタノールはガソリンブレンド用以外(例、化学用途)の使用は禁止されている。バイオエタノールは含酸素のオクタン価向上剤の一種で、環境問題から使用が禁止されたMTBE(メチル *t*-ブチルエーテル)の代替物である。

米国と同様に、ブラジルではサトウキビ由来のバイオエタノールがガソリンにブレンドして使用されている。

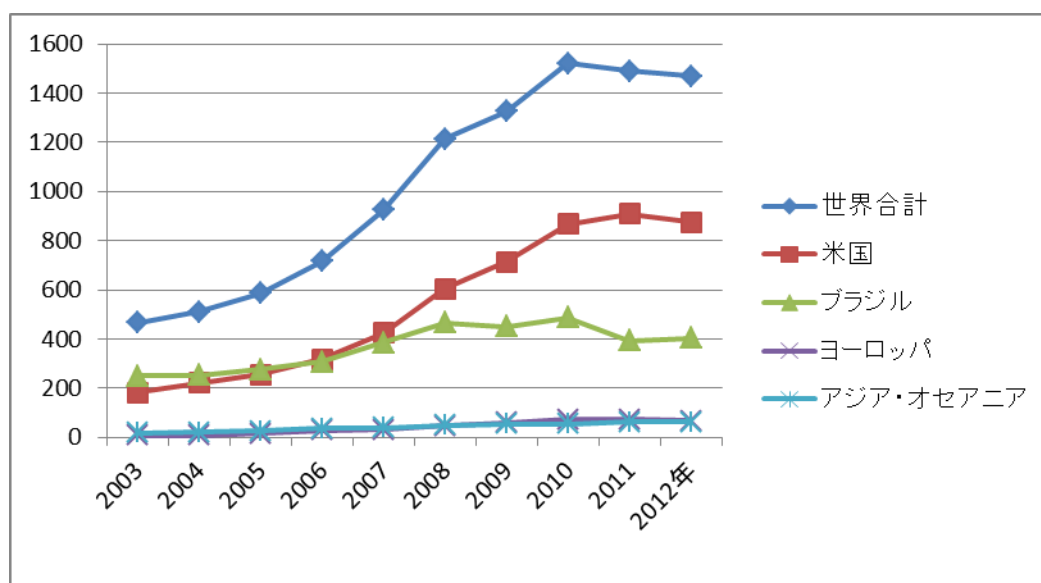
バイオエタノールとバイオディーゼル油の生産量推移をそれぞれ図6、7に示す。いずれも2003年頃より急激に増加しているのがわかる。バイオエタノールは2003年の46.5万バレル/日(71億ガロン/年)から2011年には149.3万バレル/日(228億ガロン/年)と8年間で約3.2倍に増加した。2012年の生産量は147.0万バレル/日(224億ガロン/年)で、地域別内訳をみると、米国が90.9万バレル/日(62%)³でブラジルが39.2万バレル(27%)である。両国で世界の生産量の89%を占めている。米国は2007年に定めた再生可能燃料基準(RFS)に基づきほぼ計画通りにトウモロコシ原料のバイオエタノールの生産を拡大してきた。ただし、食料を原料とするバイオエタノールの生産については根強い批判があり、

³米国の2012年のバイオエタノール生産量は90.9万バレル/日(約4,150万トン/年)であり、仮にこれを脱水すると、約2,500万トンのエチレンができる。これは2012年の米国のエチレン生産量2,670万トンに匹敵するものである。

米国政府は非食料のセルロース原料のバイオエタノールの開発に力を入れているが、工業技術の確立が難しく生産量はRFS計画の0.6%にもならない。

日本のバイオエタノール導入目標量は2012年が21万kl、2017年が50万klとなっているが、米国の2011年の90.9万バレル／日（5,200万kl）に比べると1%程度できわめて少ない。日本では、バイオエタノールをETBE（エチル t-ブチルエーテル）に化学変換して使用している。ETBEはバイオエタノールよりも腐食性が少ないためである。

図6 バイオエタノールの世界、国・地域別生産量推移（単位 千バレル／日）

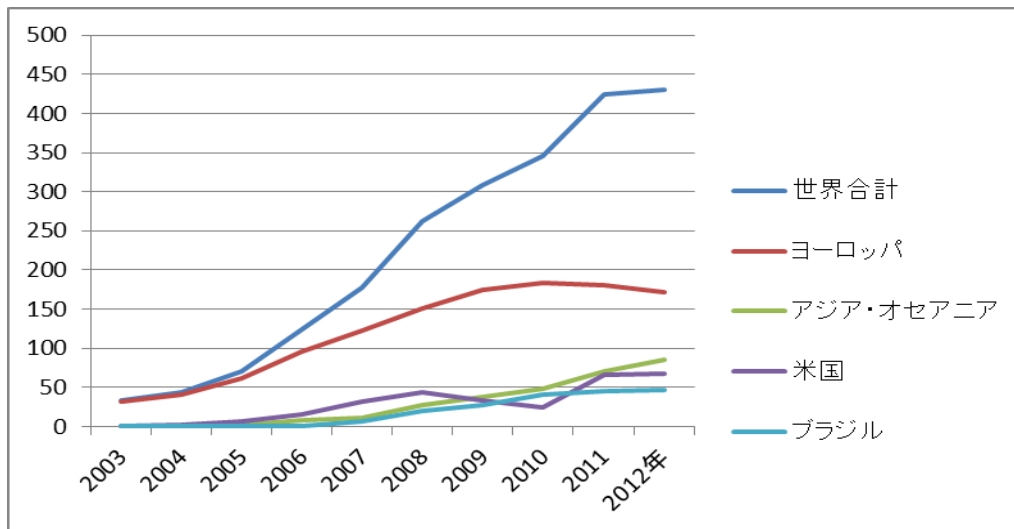


出典：EIA 資料⁷⁾を基に旭リサーチセンター作成。

バイオディーゼル油の生産量は、図7に示すように2003年の3.4万バレル／日（5.2億ガロン／年）から2011年には42.5万バレル／日（65億ガロン／年）へと12.5倍に増加した。2012年は43.1万バレル／日で、地域別生産量をみると、ヨーロッパの比率が40%と一番高い。ヨーロッパはディーゼル車が主流になっているため、バイオディーゼル油の増産に力を入れている。その他、アジア・オセアニアが20%、米国16%、ブラジル11%である。

EUは輸送部門の再生可能エネルギー比率を2020年までに10%にすることを目標にしており、現時点の再生可能エネルギー比率は5%である。食料由来のバイオ燃料には批判が多いことから、2014年にEUは食料由来の再生可能エネルギー比率を上限7%にすることに同意した。

図7 バイオディーゼル油の世界、国・地域別生産量推移（単位 千バレル／日）



出典：EIA 資料⁷⁾を基に旭リサーチセンター作成

(2) 非食料のセルロース系原料からのバイオエタノールの製造

① 始まった工業化

表6にセルロース系バイオエタノールの工業化例をまとめた。セルロースを糖化した後発酵してエタノールをつくる製法が主流である。この方法で、イタリアのBeta Renewablesが世界で初めて2013年に工業化に成功した。それを追って、米国ではPoet-DSMが2014年9月に、Abengoa Bioenergyが2014年10月に、DuPontが2015年10月に相次いでプラントを稼働した。これらの会社のプロセスは類似している。

例外はIneos Bio（米）が2013年に工業化した方法で、いったんバイオマスを熱分解して合成ガス（一酸化炭素と水素の混合ガス）をつくり、これを発酵してエタノールをつくるというものである。合成ガスはバイオマスの分解からも得られることは、注記すべきである。

2013-14年は、セルロース系バイオマスからバイオエタノールを工業的に製造することが始まった記念すべき年になるであろう。

なお、各社は政府からの手厚い資金援助や債務保証をもとに開発と工場建設を行い、できた製品のバイオエタノールには政府の補助金が付く。したがって、現状では工業化といっても採算が合っているとは限らない。

日本では独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）や地球環境産業技術研究機構（RITE）が開発を進めているが、事業化にはまだ時間がかかりそうである。

② Beta Renewablesの技術

Beta Renewablesは1.4億ユーロ（約200億円）を投じて固有技術のProesa法を開発した。

そして、世界最初の本格的商業プラントをイタリアのCrescentinoに建設した。エタノール生産能力は4万トン/年で、副生リグニンを燃料とする発電所（発電能力13MW）を併設する。年間20万トンのリグノセルロース系原料[麦やコメの茎やarundo donex（暖竹：背の高い草）]が投入される。工場の水は100%リサイクルされるので、水の補給はいらない。

Beta RenewablesはProesa法をライセンスすることをビジネスモデルにしている。最初のライセンス先は、ブラジルのGraalBioである。米国にもすでにライセンスしており、アジアにはライセンスのチャンスがあるとして、シンガポールに駐在員を置いている。

Proesa法は、a. バイオマス原料をスチーム処理により、主要三成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニンに分ける“Smart cooking”工程、b. ヘミセルロースよりC5糖を、またセルロースよりC6糖を得るための、酵素による粘度低下と加水分解工程（糖化工程）、c. エタノールを得るための微生物・酵素（Cellic Ctec3 酵素）による発酵工程、d. エタノールとリグニンの分離工程、エタノールと水の分離工程から成り、全体が連続生産プロセスとなっている。

固体を含む物質の連続的処理技術、独自の酵素・微生物⁴などが特徴で、またプロセスに化学物質を使わないことなどからコストが安いといっている（キャッシュ コスト 0.4ドル/1）。このバイオエタノールを、ガソリン燃料の代わりに使用すると温室効果ガス発生量が80-90%削減される。

⁴ ライセンス先には、Novozymes が酵素・微生物を供給する。

表6 非食料のセルロース原料からのバイオアルコールの工業生産

会社 (親会社)	立地	生産能力(年) 百万ガロン [千Kl] [千トン]	プラントの 生産開始 (設備投資)	原料 年間投入量 (発電量)	技術 (開発期間 開発費用)	備考
Abengoa Bioenergy (Abengoaはスペイン のエネルギー会社)	米カンサス州 Hugoton	24 [90] [72]	2014年1Q	350千トン (21MW)	自社 (開発10年)	2G Hugoton project Abengoaは世界で7アルコールを 728百万ガロン生産
DuPont	米アイオワ州 ネバダ	30 [114] [90]	2014年後半 (>200億円)	トウモロコシ茎葉 375千トン	自社 (開発10年)	
Ineos Bio (親会社 Ineos)	米フロリダ州 ベロビーチ	8 [30] [24]	2013年3Q (約130億円 プラント外含む)	野菜・木の 廃棄物 (6MW)	自社	バイオエタノールを分解して 合成ガスを作り、これを 発酵してエタノールを作る
Poet-DSM (Poet 米・アルコール生産) (DSM オランダ)	米アイオワ州 Emmetsburg	25 [95] [75]	2014年前半 (250億円)	農業残渣 (リグ/セルロース) 285千トン	自社	C5、C6の糖を同時に発酵で きる技術をDSMが開発
Beta Renewables (BiochemtexとTPG (米投資会社)の合併)	イタリア Crescentino	13 [50] [40]	2013年10月 (100- 150億円)	麦や米の茎 200千トン (13MW)	Proesa法 (開発費200億 円を投じる)	酵素の供給はNovozymes
GraalBio	ブラジル Alagos	21 [81] [65]	2014年2Q [着工は 2013年2月]	energy cane (サトウの茎) 350千トン	Proesa法 技術採用	酵素の供給はNovozymes

注1：生産能力は下線の数字が公表値。注2 1ドル=100円で換算。

出典：旭リサーチセンター作成。

(3) バイオ化学品

バイオ技術により、グルコースなどの糖質原料からエタノール、ブタノール、エチレングリコール、乳酸（ポリ乳酸）、コハク酸、ブタンジオールなどがつくられる。

発酵法によるコハク酸の工業的生産が、米国、カナダ、イタリア、スペインの4ヵ国でほぼ同時期に始まった。また、米国ベンチャーが開発した独自の微生物を利用した1,4-ブタンジオールの発酵生産が近々開始される。その他、バイオリファイナリーの構築をめざして、各種バイオ化学品の開発が盛んに行われている。ARCレポート⁴⁾では、炭素数2から10（C2-C10）のバイオ化学品24種について、その開発と工業化の状況を紹介しているので参照されたい。

(4) バイオプラスチック⁴⁾

バイオプラスチックは、生分解性（Biodegradable）を特徴とする第一世代のPHA、ポリ乳酸、ポリブチレンサクシネートに加え、公知のプラスチックであるが再生可能資源からつくられていることを特徴とする第二世代のバイオポリエチレンやバイオPETが登場した。バイオポリエチレンはバイオエタノールを脱水してつくったバイオエチレンを重合して製造される。またバイオエチレンからつくられたバイオエチレングリコールを使用したポリエステルはバイオPET30とよばれる。現在、100%バイオベースのバイオPET100を目指して、バイオ由来のテレフタル酸の開発が精力的に進められている。

また、第一世代の生分解性を必要とする用途は限られることから、需要の多い第二世代が今後主流になるものと予想される。Coca-Colaなど多くの消費者ブランド企業が、バイオPET製のボトルや容器を積極的に採用している。

バイオ固有のビルディングブロック（骨格）を含む新規ポリマーとして、ポリエチレンフタレート（PEF）が注目される。これは100%バイオベースで、ガスバリア性、強度がPETよりも優れている。またイソソルバイド骨格を導入したポリカーボネートが三菱化学によって工業化された。これは従来の芳香族ポリカーボネートよりも表面硬度が高いことが特徴である。

非食料のセルロース系バイオマス原料から、バイオエタノールや化学品を安価に製造できるかどうか、バイオマス化学が成功するかどうかの鍵である。

3 詳論：合成ガス・メタノール化学と MTO&MTP

3.1 合成ガス・メタノール化学

(1) 合成ガスの製造

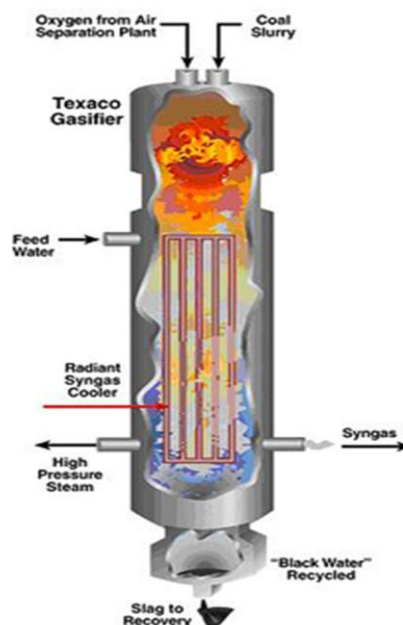
① ガス化炉

合成ガスは石炭、天然ガス（メタン）、バイオマスからつくられる。中国では、石炭から合成ガスをつくり、次いで合成ガスよりメタノールが製造されてきた。したがって、石炭から合成ガスをつくるプロセスには多くの工業的実績がある。ただし、固体の石炭を高温で扱うこと、石炭が不純物を多く含むためスラグが大量に生成すること、またガスの精製が必要なことから、ガス化炉を中心とするガス化工程の設備費は非常に高い。

ガス化炉には噴流層方式、流動床方式、固定床方式などがあり、欧米のエンジニアリングメーカーが技術をライセンスしている。中国も独自のガス化炉を開発している。

図8に代表的なGE法（旧Texaco法）の噴流層ガス化炉を示す。石炭は水スラリーの形で、酸素

図8 石炭のガス化炉



出典：GE²⁰⁾

素と一緒に炉の上部より、石炭の燃焼とガス化が起こっている高温部（約1000℃）に供給される。炉の中部より冷却用の水が供給され、熱交換器で合成ガスを冷却し、水は高圧スチームに変わる。冷却された合成ガスは下部より連続的に取り出される。石炭の燃えカス（スラグ）は固体状態で最下部より取り出される。

② 合成ガスの組成と調製

合成ガスは一酸化炭素（CO）と水素（H₂）の混合ガスである。

合成ガス製造の基本反応（化学量論式）は、天然ガス（CH₄）では、 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ 、

石炭（組成はCH～C）では組成によるが、 $\text{CH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3/2\text{H}_2$ から $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ 、の範囲になる。メタノール合成には $\text{CO} + 2\text{H}_2$ のガスが必要なので、天然ガス原料の合成ガスは H_2 過剰であり、石炭原料の合成ガスは H_2 不足である。

反応後に別の反応器でシフト反応： $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ （または、逆反応： $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ ）を起こすことができる。平衡反応であるシフト反応をうまく利用すると、COと H_2 の比率を必要な組成に調製できる。

図9と図10に石炭とメタンをそれぞれ原料とする合成ガスを製造するフローを示す。

図9 石炭から合成ガスを製造するフロー

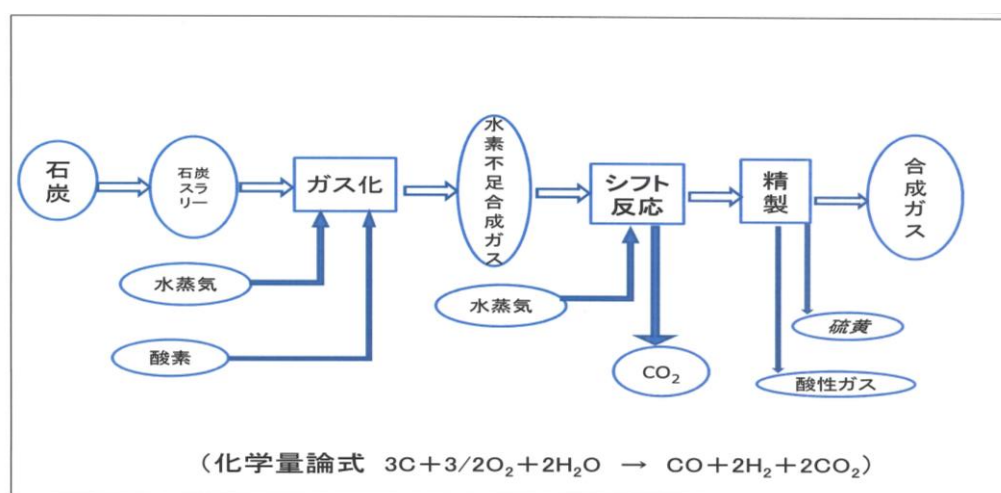


図10 メタンから合成ガスを製造するフロー

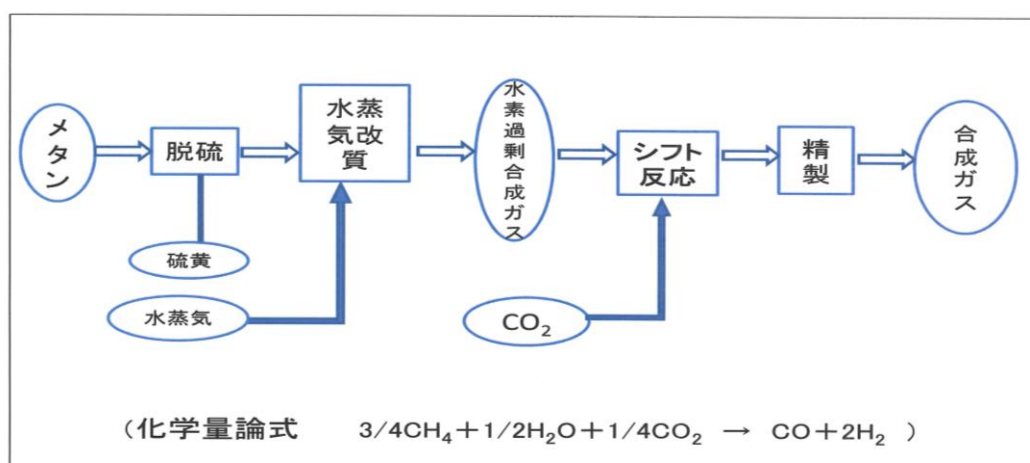


図9と図10の出典：Orbichem資料²¹⁾を基に旭リサーチセンター作成。

石炭（C）の場合は1モルの合成ガス（ $\text{CO}+2\text{H}_2$ ）を製造するのに2モルの CO_2 （二酸化炭素）が発生する。一方、メタン原料では、1モルの合成ガス（ $\text{CO}+2\text{H}_2$ ）を製造するのに CO_2 の発生はなく、逆にシフト反応で1/4モルの CO_2 を消費する。石炭は天然ガスに比べ燃焼時の CO_2 の発生が多いのと同様に、メタノール合成時も CO_2 の発生が多い。

（2）メタノールの合成

合成ガスからメタノールをつくる方法は、ICIが開発した低圧法技術が代表的である。表5に示すようにアルミナ担持の銅・亜鉛触媒を用い、240-260℃、50-100気圧の条件下で反応させる。平衡反応であり、新規触媒の開発により反応温度を下げることであれば、圧力を下げ、平衡を有利な方向に導くことができる。

（3）合成ガスとメタノールの用途

① 中国の合成ガスの用途（図11）

（燃料用途）

合成ガスの20.9%はSNG（代替天然ガス）合成用に、15.4%は合成ガソリン合成用に、0.8%はIGCC（石炭ガス化複合発電）などの燃料用途に使用される。これらは合成ガスの直接的燃料用途である。

SNGは合成ガスをニッケル触媒の存在下高温で反応させる方法（メタン化反応：メタネーション）で製造される。この方法で石炭から天然ガスをつくることができる。

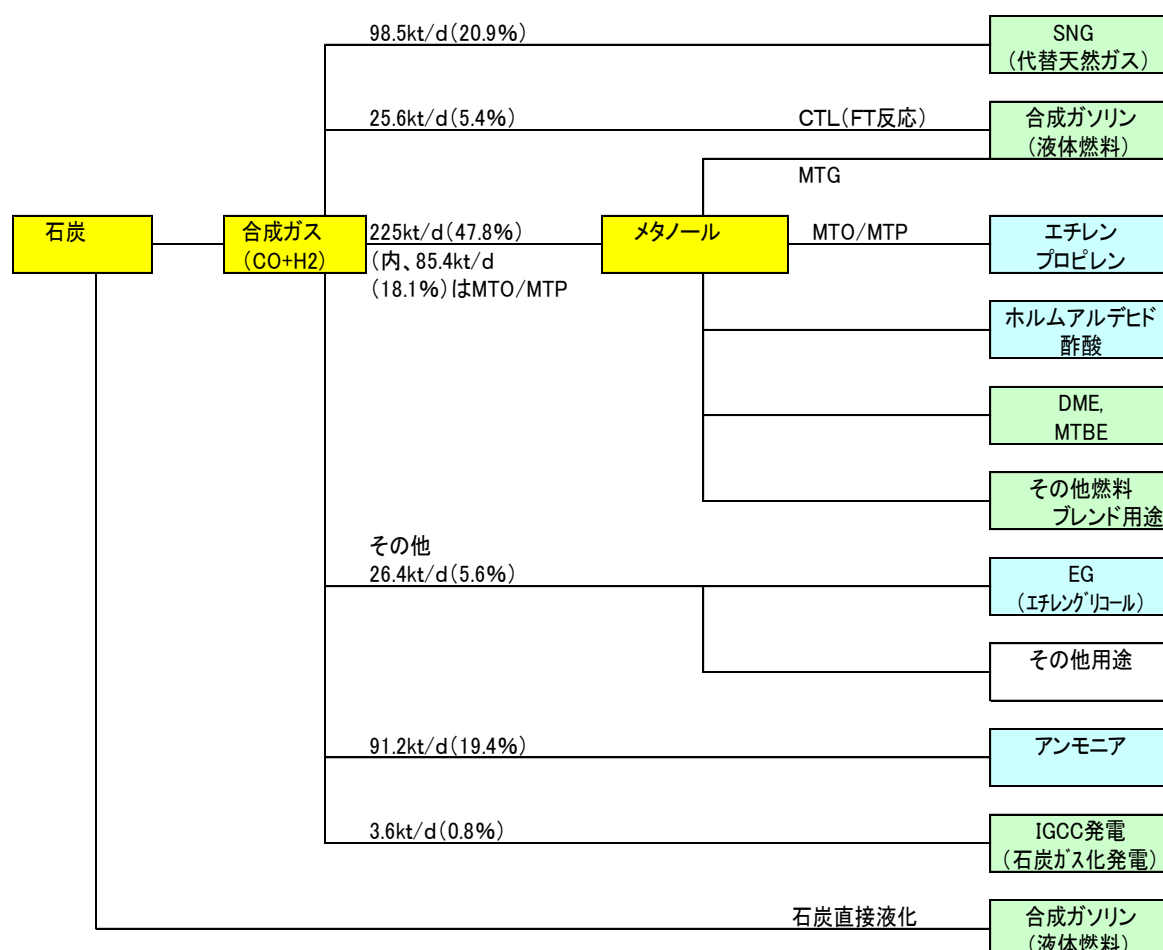
また、合成ガスをフィッシャー・トロプシュ反応（FT反応）にかけると、分子量分布の広い炭化水素（合成ガソリン）が得られる（製造条件と生成物は表17）。

IGCCは、石炭から合成ガスをつくり、これを燃焼してガスタービンで発電する方式である。従来の石炭火力より二酸化炭素の発生が25%減少し、しかも発電効率が高いため、将来の石炭火力発電方式と期待されている。日本のいわき市に国産IGCC技術の常磐共同火力（株）勿来発電所がある。2013年に実証運転を終了し、商業運転に入っている²²⁾。石炭使用量は1,700トン/日で、発電単出力は250MWである。すぐれた環境技術なので技術輸出も視野に入れている。IGCCのガス化工程は合成ガスの製造工程と基本的に同じであり、発電所から合成ガスや水素の供給を受けることができる。日本でも石炭化学をすることができる。

(化学用途)

合成ガスの47.8%はメタノール合成に使われる。そのうち、3分の1弱の18.1%はMTO/MTPの原料に使用される。メタノールからは、そのほかにホルムアルデヒドや酢酸などの化学品がつくられる。そして、メタノールからはDME（ジメチルエーテル）、MTBEなどの燃料ブレンド用化合物がつくられ、MTG(methanol to gasoline)法により合成ガソリンがつくられる（MTGの製造条件は表17参照）。メタノールそのものをガソリンにブレンドすることもある。合成ガスの19.4%はアンモニアに使用される。アンモニア合成用にはCOを含まない純水素(H₂)が使用される。

図11 中国における合成ガスを原料とする化学品と合成燃料の製造フロー（2014）



注：黄色地は素原料、青字は化学品、緑字は燃料（エネルギー）関係である。

出典：数字は石油和化学工業規画院報告書、2012，2014（林石英、原田道昭、化学経済、2014年12月号、44頁²³⁾）。図は旭リサーチセンター作成。

②メタノールの用途別需要

表7から、中国が世界のメタノール需要の50%弱を占めることと、中国のMTO/MTP用途が急成長することがわかる。

表7 世界および中国におけるメタノールの用途別需要

メタノールの用途別需要	世界	中国	
	2013年	2013年	2020年
	5,800-6,000 万トン	2,600-2,800 万トン	>7,000 万トン
ホルムアルデヒド	30%	27%	12%
酢酸	11%	6%	3%
MTBE (メチルt-ブチルエーテル)	11%	5%	2%
DME (ジメチルエーテル)	7%	18%	7%
燃料ブレンド用	12%	11%	4%
バイオディーゼル	4%		
MTO/MTP	4%	19%	64%
その他	21%	14%	8%

出典：Orbichem, APIC 2014²¹⁾

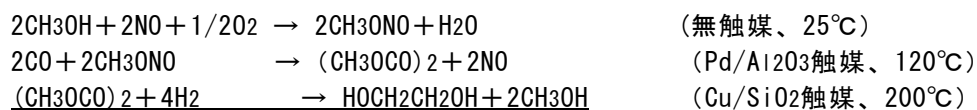
(4) 合成ガス→メタノールルートを利用した新プロセスの開発

各社より合成ガス→メタノールルートを利用した新プロセスが発表されている。

① モノエチレングリコール (MEG)

(宇部興産)

宇部興産は石炭と化学の両事業を有し、また合成ガス化学の技術蓄積のある日本では数少ない会社である。そして、独自のナイトライト法を使った合成ガスからモノエチレングリコール (MEG) を製造するプロセスを開発した。反応式は下記のとおりである。ナイトライは循環し、全体の反応式には出てこない。シュウ酸ジメチルの還元によりMEGが得られる。



宇部興産と関係会社のハイケム株式会社(日中ビジネスの化学商社であり、上記触媒の製造会社)は、積極的に中国の複数の会社にライセンスしている²⁴⁾。新疆天業集团有限公司の5万トンのプラントが2012年12月に最初に稼働した。2015年6月にハイケムは、石炭などに由来する合成ガスからMEGを製造するCTEG (Coal to EG) プロセスの技術を、天盈石油化工有限公司(中国新疆ウイグル自治区の「天盈社(てんえいしゃ)」)にライセンスした。これにより、ハイケムによる中国でのCTEG技術ライセンスの実績は9件になる。

(EastmanとJohnson・Matthey)

EastmanとJohnson・Mattheyも合成ガスからMEGをつくる新合成法を発表し、ライセンスの意向である²⁵⁾。宇部興産が使っているシュウ酸ジメチル(CH_3OCO)₂は使用していないといっている。技術の詳細は発表されていない。

(参考) モノエチレングリコール (MEG) 製造法の課題

現行のMEGの製法はエチレン酸化法であるが、エネルギー多消費型のプロセスである。まず、エチレンを酸化してエチレンオキシド (EO) をつくる時にエチレンの20%は燃えてCO₂になってしまう。次にEOを加水分解するときに、目的物の単量体(モノエチレングリコール: MEG)のほかに副生成物として二量体、三量体が副生しやすいことから、反応溶液に20倍の水を溶媒に使用する(それでも副生物はできる)。このため反応後に反応液からまずこの20倍の水を蒸留で分離する必要があり、ここで多量のエネルギーを消費する。水除去後に、蒸留でMEGを二量体、三量体から分離する。

これまで、宇部興産のナイトライト法、Shellや三菱化学が開発した方法(エチレン→エチレンオキシド→エチレンカーボネート→MEGを経る方法)、Eastman法などが提案されてきた。

さらにすぐれた省エネルギープロセス開発の可能性があるのでないかと考える。

② BPは合成ガスから酢酸を直接製造する新製法(Saabre法)を発表した²⁶⁾。実際は、三つの反応から成る。メタノールの購入が必要ないこと、またCOの精製が不要なことを特徴にしている。BPは、中東・オーマンのDuqmで10億ドル(1,000億円)を投資するDuqn

Acetic Acid Projectを計画している。Saabre法による酢酸の合成である。2019年に稼働の予定である。原料は天然ガスを使用し、従来法のメタノールのカルボニル化反応工程を必要としない。

なお、BPはオーマンで現地資本と合弁で天然ガス採掘を行い、成功した。これにより、オーマンは天然ガスの一大生産地となった。

③ Celaneseは、石炭あるいは天然ガス由来の合成ガスからつくった酢酸を水素還元してエタノールを合成するTCX法を開発し、中国で事業化した²⁷⁾。

同社は2010年11月にTCX法を発表、2012年に米国・テキサス州・クリア レイクに技術開発用プラントをスタートした。次いで2013年6月に中国・南京に生産能力27.5万トンのTCX法エタノールプラントを建設し、稼働を開始した。同工場は別に酢酸120万トン、酢酸ビニル30万トン、無水酢酸10万トンの生産能力をもっている。

また、同社は2013年1月にインドネシアのPertaminaとTCX法のライセンス契約を締結した。同年8月には中国のPetroChinaともライセンス契約を締結した。

同社は酢酸合成と酢酸の水素還元の両方にすぐれた技術をもっているので、バイオエタノールよりも安いコストでエタノールを製造できるといっている。

なお、酢酸の水素還元工程では白金一スズ触媒を使用している。エタノールは燃料用途を考えている。

(参考) 反応に必要な合成ガスの組成

- ① メタノール合成、合成ガソリン用には $\text{CO} + 2\text{H}_2$ のガスが必要である。
- ② 酢酸はメタノールのカルボニル化(CO化)でつくられるので、全体としては $\text{CO} + \text{H}_2$ のガスが必要である。オキシ法も $\text{CO} + \text{H}_2$ のガスが必要である。
- ③ 宇部興産のモノエチレングリコール合成には $\text{CO} + 2\text{H}_2$ のガスが必要である。
- ④ Celanese・TCX法は酢酸の水素還元なので、トータルで $\text{CO} + 3\text{H}_2$ のガスが必要である。
- ⑤ アンモニア合成には、純粋の水素(H_2)が必要である。シフト反応でCOをすべて H_2 に変換する。アンモニア合成には $\text{N}_2 + 3\text{H}_2$ 組成の混合ガスが必要で、この混合ガスも合成ガスとよばれる。

3.2 MT0 と MTP

(1) 開発経緯

MT0 の技術の源は、Mobil によって事業化された ZSM-5 触媒を使用する MTG 法(表 17)に遡る。ZSM-5 触媒では MT0 はうまくいかなかったが、UOP が 1980 年代に SAPO-34 を発見して、ブレイクスルーした。1990 年代初期に、UOP と Norsk Hydro(現、Ineos)は共同でプロセスを開発した。さらに、UOP と Total は 2009 年にセミコマーシャル プラントをベルギーの Feluy に建設し、技術の実証を行った。実証に成功したのち、UOP 法の技術ライセンス活動に入り、中国の数社にライセンスした¹⁶⁾。

一方、中国科学院大連化学物理研究所(DICP)は1970年代の石油不足に鑑み、1982年よりDMT0法の研究を開始した。当初はゼオライト触媒を使用していたが、後にSAPO-34を触媒とする研究にシフトした¹⁷⁾。SAPO-34触媒の発明はUOPによるものだが、開発期間が長かったため特許は失効しており問題にならない。

2010年8月に最初のDMT0法プラントが内モンゴルで稼働した。DMT0法は、UOP法やSMT0法よりも工業的実績が多く、DICPはその功績から2015年1月にChinese National Technological Invention Awardsを授与された¹⁷⁾。

(2) MT0/MTPプロセスの特徴

ナフサ分解やエタン分解は約 800–900℃と反応温度が高い。一方、MT0 や MTP は石油の接触分解(FCC)や接触改質(リフォーミング)と同じ温度領域の約 450℃と低く、エネルギー的に有利である。ナフサ分解やエタン分解は無触媒の水蒸気分解であるが、MT0 と MTP は触媒を使う。MT0 は触媒に SAPO-34 を、MTP はゼオライト触媒(HZSM-5)を使用している。ここが、技術のポイントである。

SAPO-34 の 8 員環の内部空孔(ポア)は 3.8 オングストロームで、ZSM-5 (10 員環)の 5.5 オングストロームより小さい。また、ゼオライトより酸性度が低い。触媒の空孔内に多アルキル置換ベンゼンができ、これが“有機反応センター”となり、供給されるメタノール分解物と反応してエチレンとプロピレンを生成するという反応機構が提案され、反響をよんだ。反応終了後に空孔内に多アルキル置換ベンゼンが検出されるのが一つの根拠である。

一方、MTP が使用する HZSM-5 触媒は修飾した酸型の ZSM-5 である。

MTO、MTP は軽質オレフィン生成時に大量の水が副生することが欠点である（化学量論式 $2\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_2=\text{CH}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ）。MTO ではフィードのメタノール 3 重量部に対し、1.7 重量部もの水が生成する。その分反応器を大きくする必要があり不利であるが、水蒸気はコーキングを防ぎ反応の希釈剤として働く。

MTO、MTP を含めた各種軽質オレフィン製造技術の総合比較表を表 15 に示す。

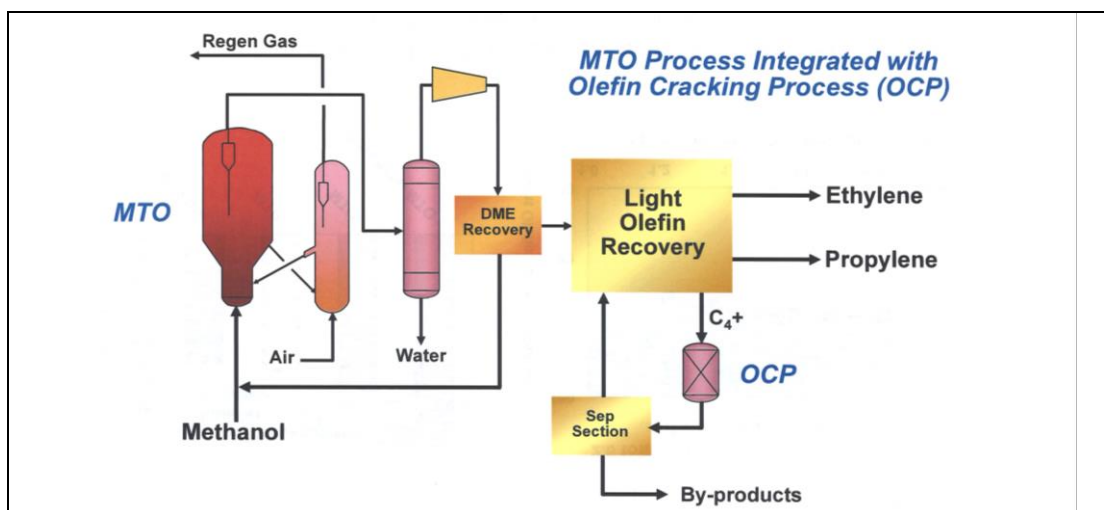
(3) MTO

ナフサ分解とエタン分解は管式反応器を用い、外部より加熱する。UOP 法 MTO¹⁶⁾ は、石油精製の接触分解（FCC）と類似の流動床を使用している。MTO は触媒のコーキング（炭素析出・付着）が起きるため、触媒の再生が必要である。MTO は接触分解に類似した再生装置を反応器に連結し、触媒の一部を反応器より連続的に取り出し、再生装置で空気を使って酸化して再生したのち、連続的に反応器に戻している。

MTO の反応生成物組成は、典型的にはエチレン 100、プロピレン 100、C₄ 以上が 30 である。C₄ 以上はゼオライト触媒で分解してプロピレンに転換することが可能で、Total の OCP（オレフィン分解法）法などの技術がある。UOP と Total は共同で MTO に OCP を付け加えた統合プロセスを開発し、ライセンスしている。統合プロセスの最終生成物はエチレン 100 に対してプロピレンを 120-180 の範囲に変化できるといわれ、プロピレン収率が高くなっている¹⁶⁾。MTO/OCP 統合プロセスを図 12 に示す。また、原料と生成物のプロダクトバランスを表 15 に示す。

ポリプロピレン（PP）の成長によりプロピレンの需要が増え、ナフサ分解やエタン分解では、バランス的にプロピレン供給量が不足する。プロピレン生成量の多い MTO は、現在の需要ニーズにマッチしたプロセスといえる。

図 12 UOP/Total の MTO・OCP 統合法のプロセスフロー

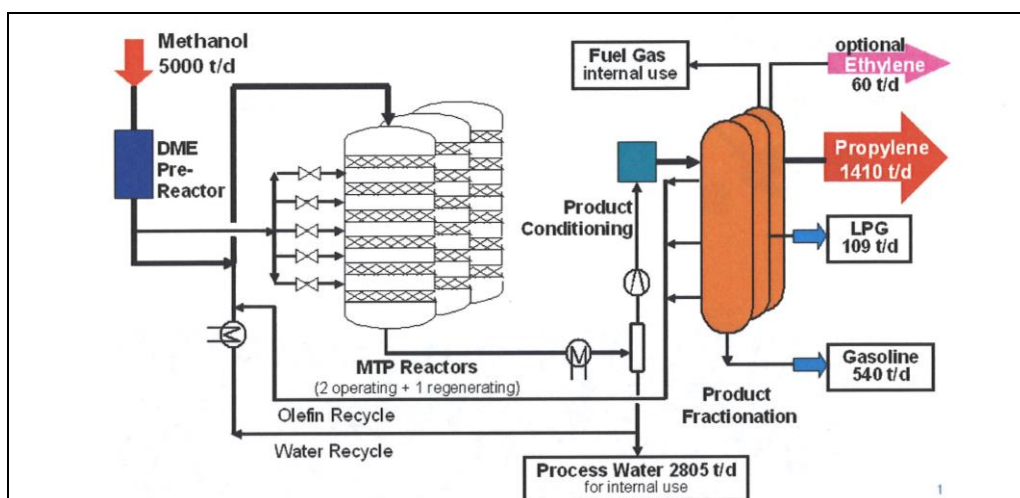


出典：UOP 資料¹⁶⁾

(4) MTP

Lurgi 法 MTP¹⁹⁾は予備反応器でメタノールを脱水して DME とし、ついで固定床反応器で断熱的に反応を行う。また、MTP は触媒のコーキング(炭素析出・付着)が起こるため、触媒の再生が必要である。MTP は定期的にバッチ再生を行っている。3 系列の反応器をもち、2 系列を反応用に 1 系列を再生用に使っている。図 13 に Lurgi 法 MTP のプロセスフローを示す。原料と生成物のプロダクトバランスが示されている（表 15 も参照）。

図 13 Lurgi 法 MTP のプロセスフロー



出典：Lurgi 資料¹⁹⁾

MTP はプロピレンのみを生成する目的生産プロセスである。副生品は LPG とガソリンである。LPG やガソリンの販売チャンネルをもたない化学メーカーには、副生品の扱いは面倒である。MTP は軽質オレフィン（エチレン＋プロピレン）の収率が MT0 より低い。同じ目的生産のプロパンの脱水素法（PDH）やメタセシス法（エチレンと 2-ブテンの反応）が直接の競合技術である。

（5） DMT0 と SMT0

DMT0 と SMT0 の技術の詳細は不明であるが、SAPO-34 触媒、連続触媒再生、流動床反応装置を使用しているものと推定される。DICP は DMT0 の反応温度は 400—550℃であると発表している。

（6） 中国での工業化実績

前リポート²⁾発行の時点では、工業化実績が少なく多くの計画が発表されていたが、どの程度実現するかが不明であった。それから 2 年経ち、2015 年末には MT0/MTP の 18 プラントが稼働し、その軽質オレフィン総生産能力は合計約 1,000 万トンになることが確実になった。今回は、信用できる技術ライセンサー（UOP、DICP、Sinopec、Lurgi）の発表データを中心に集約した（表 8-11）。これらの表では、企業名と工場所在地を英語と漢字の両方で記述した。これまでの資料は英語名か漢字名のどちらかで記載されていて、対応がわかりにくかったためである。

なお、内蒙古、寧夏回族自治区、陝西省などの石炭産地のプラントは CT0 であり、沿岸部の浙江省、江蘇省、河南省、山東省のものは MT0 が多いのであろう。

現在、中国で許可される MT0/MTP 工場は軽質オレフィン生産能力 50 万トン以上の規模で、かつメタノール原単位 3.6 以下で水原単位 10.0 以下のものである。

① UOP の MT0

UOP によれば、中国の 8 か所にライセンス済みで、既にそのうちの 4 か所が稼働している。最初の稼働は南京の Wilson Clean Energy Company のプラントである。4 か所の総生産能力は 202 万トンである。

表 8 UOP・MTO の工業化実績

会社名	プロセス	立地	軽質オレフィン 生産能力 (万トン)	誘導品 生産能力	備考
惠生（南京）清潔能源公司 (Wison(Nanjing) Clean Energy Company)	MTO (UOP) /OCP	江蘇省南京 (Nanjing, Jiangsu)	29.5	n. a.	2013年9月完成
臨沂（山東）陽煤恒通化工公司 (Shandong Yangmel Hengtong Chemical Company)	MTO (UOP) /OCP	山東省臨沂 (Linyi, Shandong)	29.5	n. a.	2014年完成予定
久泰能源（准格爾）公司 (Jiutai Energy (Zhungeer))	MTO (UOP)	内モンゴルオールドス (Ordoas, Inner Mongolia)	60	n. a.	2014年完成予定
江蘇斯爾邦石化有限公司 (Jiangsu Sailboat Petrochemical Co.Ltd.)	MTO (UOP) /OCP	江蘇省連雲港市 (Lianyungang, Jiangsu)	83.3	n. a.	2015年完成予定

出典：UOP 資料¹⁶⁾などを基に旭リサーチセンター作成。

② DICP の DMTO

2010 年 8 月に最初の DMTO プラントが内モンゴルで稼働した。それ以来 2015 年 8 月現在までに、計 8 つの DMTO プラントが稼働した。総生産能力は 456 万トンである。

表 9 DICP・DMTO の工業化実績

会社名	プロセス (ガス化— メタノール— オレフィン)	立地	軽質 オレフィン 生産能力 (万トン)	誘導品 生産能力 (万トン)	備考
神華包頭 (Shenhua Baotou)	GE—Davy—DMTO	内モンゴ包頭 (Baotou, inner Mongolia)	60	PE 30、PP 30	2010年8月完成、11年 初め稼働、13年環境 問題で操業停止処分
寧夏宝豊能源集团 (Baofeng Energy)	DMTO	寧夏回族、銀川 (Yinchuan, Ningxia)	60	PE30、PP30	2014年10月完成
中煤陝西榆林 能源化工公司 (Yanchon Petroleum Gr.)	GE—Davy—DMTO	陝西省榆林 Jingbian, Shaanxi	60	PE30、PP30	2014年6月完成
山東神達化工 (Shenda Chemical)	DMTO	山東省滕州市 (Tengzhou, Shandong)	36	PP20、EVA10、 EO誘導体12	2014年11月完成
寧波富德能源 (Ningbo Heyuan/Fund Energy)	DMTO	浙江省寧波 (Ningbo, Zhejiang)	60	PP 40、EG 30	2013年1月完成 輸入メタノールを原料
陝西延長中煤榆林 能源化工公司 (China Coal)	—LPEC—DMTO	陝西省榆林 (Yulin, Shaanxi)	60	PE 30、PP 30	2014年6月完成
蒲城清潔能源化工 (Pucheng Clean Energy)	DMTO	陝西省蒲城県 (Pucheng, Shaanxi)	60	PE 32、PP 35	2014年12月完成
浙江興興新能源科技公司 (Zhejiang Xingxing)	DMTO	浙江省嘉興 (Jiaxing, Zhejiang)	60	PE 30、PP 39	2015年4月完成

出典：DICP 資料¹⁷⁾などを基に旭リサーチセンター作成。

③ Sinopec の MT0

Sinopec の MT0 は 3 か所で稼働している。総生産能力は 200 万トンである。内蒙古オルドス是一大石炭コンビナートで、MT0 はその一部である。

表 10 Sinopec・SMT0 の工業化実績

会社名	プロセス (ガス化— メタノール— オレフィン)	立地	軽質 オレフィン 生産能力 (万トン)	誘導品 生産能力 (万トン)	備考
中天合創能源公司	GE—Lurgi—SMT0	内蒙古オルドス (Ordoas, Inner Mongolia)	120	LDPE 37 PP 70 LLDPE 30	2015年10月完成目標
中原石油化工有限公司 (Sinopec Zhongyuan)	SMT0	河南省濮陽 (Puyang, Henan)	20		2011年11月稼働 購入メタノール
Sinopec/河南煤業 化工集団	SMT0	河南省鶴壁 (Hebi, Henan)	60		2014年(予定)

出典：Sinopec 資料¹⁸⁾，松島一美（化学経済）²³⁾などを基に旭リサーチセンター作成。

④ Lurgi の MTP

Lurgi の MTP は 3 か所で稼働している。総生産能力は 152 万トンである。

表 11 Lurgi・MTP の工業化実績

会社名	プロセス (ガス化— メタノール— オレフィン)	立地	軽質 オレフィン 生産能力 (万トン)	誘導品 生産能力 (万トン)	備考
大唐内蒙古多倫煤 化工有限公司 (Datang Dulun)	Shell—Lurgi—Lurgi	内蒙古シリゴル (Xilingol, Inner Mongolia)	50	PP 46	2008年完成 2011年Q1稼働
神華寧夏煤業集團 公司 (SNCG) (Shenhua Ningxia)	Siemens—Lurgi—Lurgi	寧夏回族、銀川 (Yinchuan, Ningxia)	52	PP 52	第1期 2010年完成
	Siemens—Lurgi—Lurgi	寧夏回族、銀川 (Yinchuan, Ningxia)	50	PP 50	第2期 2014年6月完成

出典：Lurgi 資料¹⁹⁾ 松島一美（化学経済）²³⁾などを基に旭リサーチセンター作成。

(7) 米国における BASF の GT0 計画

2015 年 3 月 15 日に BASF は、米国のテキサス州・フリーポートに年産 47.5 万トンの MTP を建設する計画を発表した²⁸⁾。Lurgi の MTP プロセスを採用する予定でその準備に入った。なお、2016 年に投資の最終決定を行う。原料は天然ガスのメタンである。

BASF はフランスの Total との合弁会社 (BASF Total Petrochemicals、出資比率は BASF が 60% で Total が 40%) で、テキサス州・ポートアーサーで生産能力 100 万トンを超える水蒸気分解炉を有しており、2014 年にエタンフィードへの改造を完了した。エタン・クラッキング主体になり、プロピレンの生産量が減ることから、MTP によりプロピレンを目的生産することになった。

BASF は当初、新技術による天然ガスからのプロピレンを製造する計画を発表し注目されたが、その新技術の内容は開示されなかった。その後上記の MTP プロセス (素原料からいうと GT0 プロセス) 採用の発表があった。一段反応の PDH でなく、三段反応の GT0 をなぜ採用したかに興味がある。原料メタンの豊富な資源量と安い価格を重視したのであろうか。それとも BASF はメタノール製造技術に独自の技術を開発したのであろうか。また、最近のプロパン価格の低下は、同社の投資最終決定に影響を与えるだろうか。

(8) 中国と BP の GT0 計画の進展——米国シェールガスと中国 MT0 のドッキング

中国科学院 (CAS) は BP と組んで、BP が米国西海岸 (オレゴン州、ワシントン州にある三つの港) でシェールガスを原料にして 180 万トンのメタノールを製造し、これを中国・大連まで運び、大連長興島臨港工業区に建設する MT0 プラント (生産能力 120 万トン) に供給するプロジェクトを進めている。2013 年 7 月 16 日に発表された計画で、実行されつつあり、操業開始は 2018 年頃を予定している¹⁰⁾。

MT0 なので、シェールガスを LNG でなくメタノールとして輸送できることがメリットである。

(9) 中国企業による米国でのメタノールプラント建設

2014 年 7 月 17 日に山東玉皇化工集団が米国ルイジアナ州で、天然ガス (シェールガス) を原料とする年産 300 万トンのメタノールプラントを 3 期計画で建設すると発表した。

ほぼ同時期に、吉林康乃爾集団公司与中国人壽保險 (集団) 公司是、テキサスシティーに天然ガス (シェールガス) を原料とする年産 720 万トンのメタノールプラント建設を検討していることを発表した。生産したメタノールは、パナマ運河を経由して中国へ輸送される¹⁰⁾。

3.3 アセチレン法塩化ビニル（VCM）とポリ塩化ビニル（PVC）

中国において、旧来技術である石炭→カーバイド→アセチレン→塩化ビニル→ポリ塩化ビニルのルートのアセチレン法が工業化されている。中国のポリ塩化ビニルの生産能力は2003年に5百万トン、2006年に10百万トン、2012年に20百万トンと急成長した。生産能力の製法別内訳は、石炭原料のアセチレン法が80%、通常のエチレン法（オキシクロリネーション法）が20%である。ただしアセチレン法の稼働率は58%と低く、生産量のシェアは73%である。2014年年央からの原油安から、アセチレン法塩化ビニルは、エチレン法塩化ビニルに対してコスト競争力を失い、アジアへの輸出は相当減少した。

脚注に示すように、アセチレン法には環境上の問題点がある⁵。その一つが塩化ビニル製造用の塩化水銀触媒（ HgCl_2 ）の使用である。

現在、塩化水銀に代わる触媒として、金のナノ粒子触媒が注目されている。イギリス・Cardiff 大学の Graham J. Hutchings 教授が、金のナノ粒子がアセチレンに塩化水素を付加させて塩化ビニルを合成するための強力な触媒になることを見出したことが始まりである。カーボンに担持された金のナノ触媒である。金と他の金属との合金ナノ粒子についても研究されたが、単純な金のナノ粒子の性能を超えるものはなかった。

Johnson Matthey and Jacob 社は Graham J. Hutchings 教授と共同研究を行い、中国でこの技術の実用化を進めている²⁹⁾。パイロット研究は終了し、実用化テストの段階である。同社は塩化ビニル製造用金ナノ粒子触媒に関する特許群を取得したと発表した。

同社によれば、水銀に関する水俣会議（水俣条約）で、2017 年以降は塩化ビニルの新プラントに塩化水銀触媒を使用することを禁止すること、また 2022 年までにすべてのプラントで塩化水銀触媒を使用禁止にすることが決められた。

⁵ アセチレン法（カーバイド法）の問題点は、カーバイドとアセチレンの合成に固体の石炭や生石灰を取扱うため労働集約的であること、カーバイド製造は 2000℃ の高温反応でエネルギー多消費型であること、またアセチレン 1 トンをつくるのに副生物の水酸化カルシウム（ Ca(OH)_2 ）が 2.8 トン生成（実際は水スラリーとして 28 トン生成）するので廃棄場所の確保が必要なことである。また、アセチレンから塩化ビニルをつくる反応には、環境上問題のある塩化水銀を使用する。これらの状況から、1980 年ごろに世界的にアセチレン法はすたれ、コストの安い現在のエチレン法に転換された。

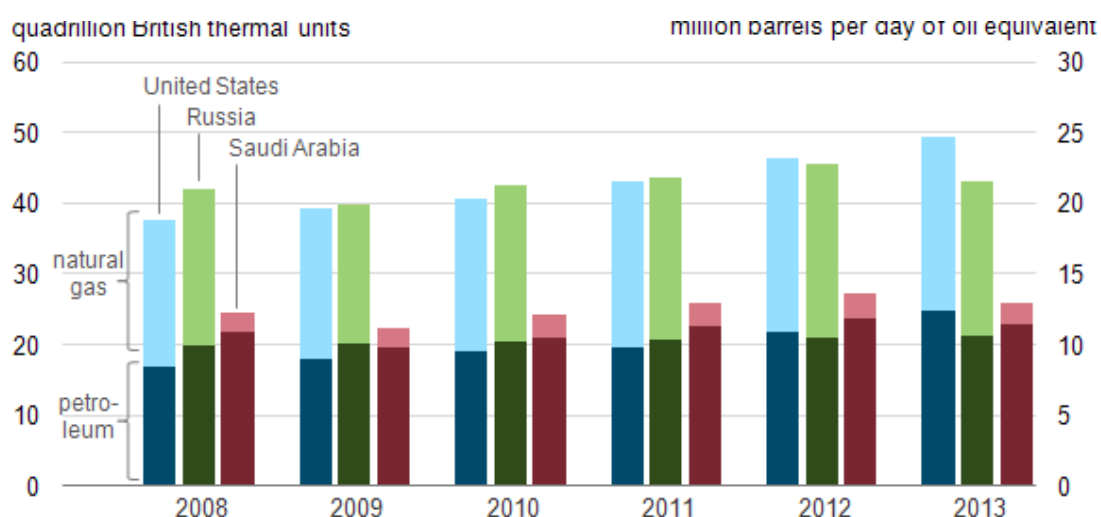
4 米国シェール革命と原油価格下落の影響

4.1 拡大する米国シェールガス・オイルの生産

(1) 米国のシェールガス、シェールオイル産出量

米国政府機関のEnergy Information Administration (EIA) は2013年12月に、米国はシェールガス（非在来天然ガス）とシェールオイル（非在来石油）の増産により、2013年にロシアを追い抜き世界第一の天然ガス産出国に、サウジアラビアとロシアを追い抜き世界第一の石油産出国になったと発表した（図14）。地政学的見地を含め、その影響は多方面にわたるであろう。

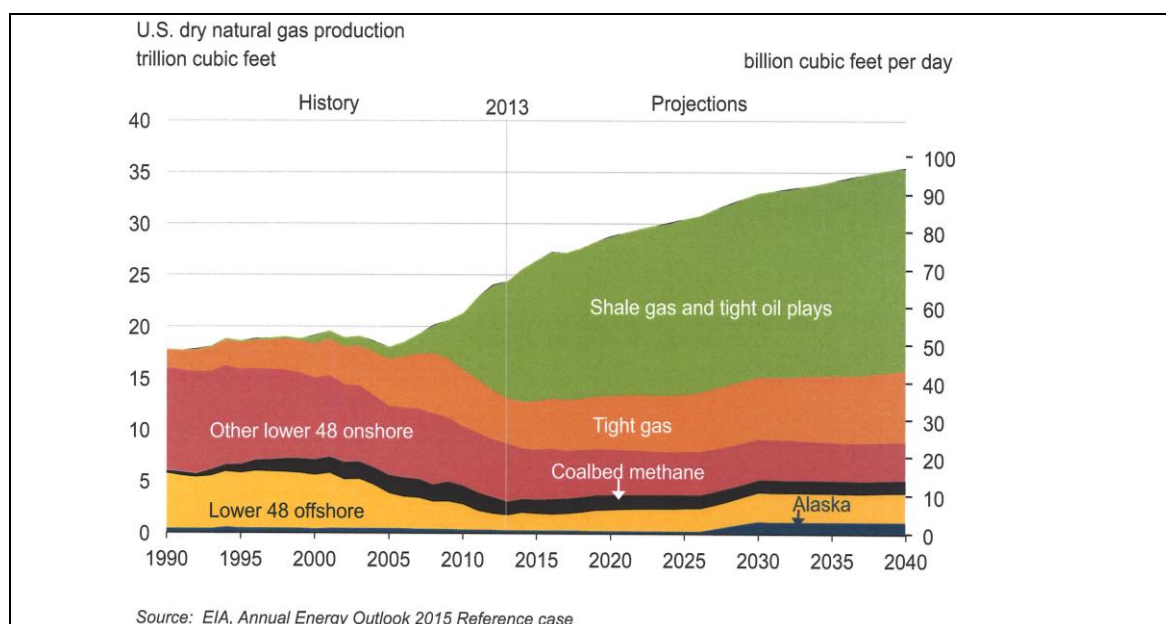
図14 米国、ロシア、サウジアラビアの石油と天然ガスの産出量



注：石油には、原油、NGL、コンデンセート、バイオ燃料などを含む。
出典：EIA資料（2013）⁷⁾。

2014年年央より原油価格が下落したが、2015年5月に発表されたAnnual Energy Outlook 2015によれば、「シェールガスは米国・天然ガス生産量増加の原動力である。」と謳っており、これまでの生産量予測をほとんど変更していない（図15）。

図15 米国天然ガスの生産量推移と予測



注：シェールガス、タイトガス、コールベッドメタン（炭層メタン）が非在来天然ガス。

Other lower 48 onshore: アラスカ州を除く48州の在来型陸上天然ガス。

Lower 48 offshore: アラスカ州を除く48州の在来型海上天然ガス。

EIAの図のコメント：シェールガスは米国・天然ガス生産量増加の原動力である。

出典：EIA, Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040 (April 2015) ⁷⁾。

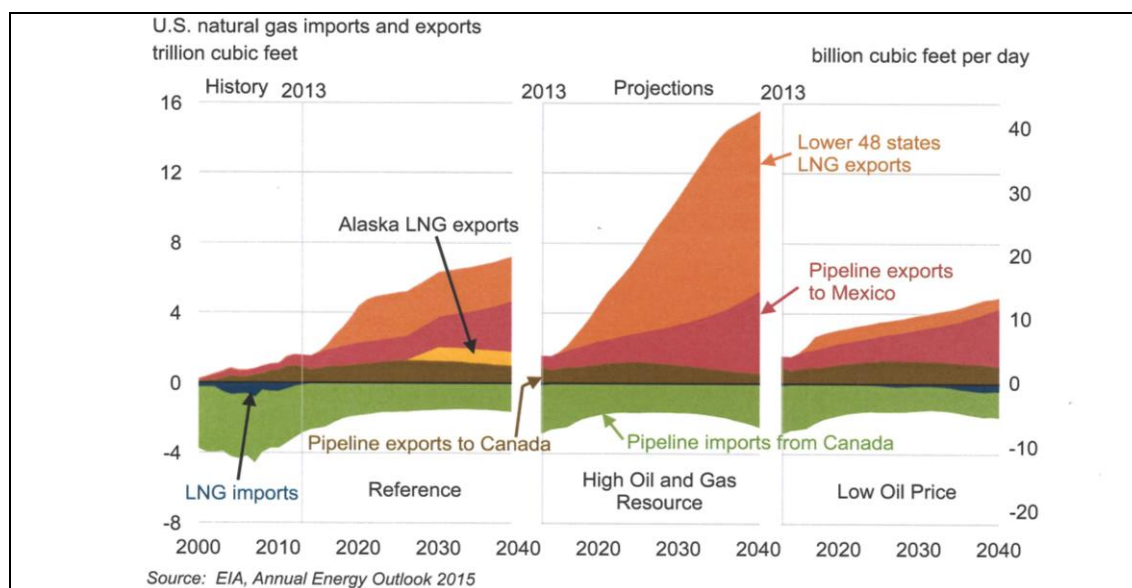
図16に、EIAのAnnual Energy Outlook 2015 ⁷⁾ 記載の米国天然ガスの輸出入の推移と予測を示す。標準ケース (reference case)、オイルとガスの大きな資源量があるケース、低オイル価格のケースの3ケースについて予測している。

標準ケースでは、米国は2017年までには天然ガスの輸入国から純輸出国に転換する。2016年ごろより輸出が増大し、一方カナダからの輸入が漸減するため2017年までにはネット（輸出－輸入の正味の輸出量）で輸出国となる。輸出の内訳を見ると、48州のLNG輸出が急増し、またメキシコへのパイプライン輸出が増加する。カナダへのパイプラインによる輸出量はほぼ従来通りである。なお、これまでカナダからのパイプライン輸入がかなりあるが、これは縮小して継続し、その後一定量になると予測している。これは、パイプラインの立地上からカナダから輸入する方が有利なところが残るためであろう。2021年には産出量の約7%、シェールガスの13-17%がLNG輸出される見込みである（2021年の全産出量は約28兆ft³、シェールガス産出量は約15兆ft³、LNG輸出は2.0～2.5兆ft³の予想）。

従来、米国は天然ガスや石油の輸出を特定国（カナダ、メキシコ）以外は法的に禁止してきたことからすると、産出量の約10%を世界にLNG輸出するという見通しを発表したことは注目に値する。EIAは国内の天然ガス価格が世界のガス価格よりも高いため、天然ガスの輸出が増加するといっている。

図16 米国天然ガスの輸出入推移と予測

（標準ケース、オイルとガスの大きな資源量があるケース、低オイル価格のケース）

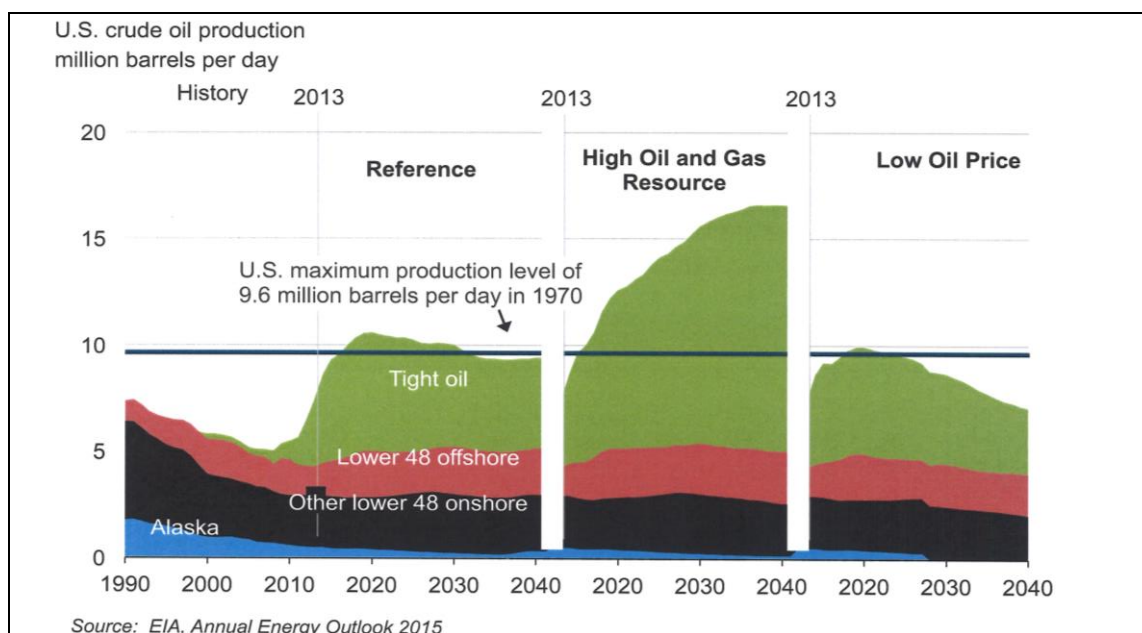


EIAの図コメント、国内のガス価格と世界のガス価格の差があるため米国の天然ガス輸出が予想される。
出典：EIA, Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040 (April 2015) ⁷⁾。

一方、非在来型のタイトオイル（シェールオイルとタイトサンドオイル）の増産も驚異的であり、2010年60万バレル／日、11年90万バレル／日、12年140万バレル／日、13年230万バレル／日と急増しており、15年には約500万バレル／日と米国原油生産量の50%に達する見込みである。

全体の原油生産量は2007年の約550万バレル／日がボトムであったが、2015年に933万バレル／日（実績）まで急回復した。天然ガスと同様に3ケースの生産予測をしているが、いずれの場合にも過去最高の原油生産量を記録した1970年の960万バレル／日を超えるとしている（図17）。

図17 米国・原油の生産量推移と予測



注 タイトオイルにシェールオイルが含まれている。

出典：EIA, Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040 (April 2015) ⁷⁾。

米国の全エネルギーの自給率は2012年の84%と13年の86%の実績から、20年に97%、30年に100%に上昇するとみている。原油と天然ガスの生産量増加があり、しかも米国国内の消費量増加が小さいことから正味のエネルギー輸入量は短期間に減少するという。

(2) 世界のシェールガス・オイルの埋蔵量と生産状況

EIAは2013年12月に、シェールオイルとシェールガスに関する世界の埋蔵量（改訂版）を発表した。シェールガスの埋蔵量は中国がトップで次いで、アルゼンチン、アルジェリア、米国、カナダ、メキシコの順である。中国は米国の2倍の埋蔵量である。一方、シェールオイルの埋蔵量は、ロシア、米国、中国、アルゼンチン、リビア、オーストラリアの順となっている。

シェールガス・オイルの場合は埋蔵量だけでなく、地質的に採掘しやすいかどうか、採掘に必要な水が確保できるか、環境問題が起きないか、周辺住民の同意が得られるかが重要である。シェール層の深さが深い場合や、地層が複雑で米国で開発された水平掘り（水平坑井を使った採掘法）がしにくい場合は採掘が難しくなる。中国のシェール地層

は深く複雑でこれに当たるといわれ、開発に時間がかかるというのがもっぱらの予想であったが、実際には開発が進んでいる。

2105年9月30日のEIAのToday in Energy⁷⁾によれば、中国は国の強力な支援のもとに、Sinopec、PetroChinaなど企業4社がシェールガスの開発を進めている。開発中の場所はSichuan Basin（四川盆地、重慶近郊）に集中している。政府の支援があり、シェールガス採掘の井戸のコストが2013年頃より23%削減され、2015年には1,130-1,290万ドル（11-13億円）になった。井戸は深さ11,500フィート（約3,500メートル）、横方向4,000フィート（約1,200メートル）である。現在の生産レベルは0.38Bcf/d（3.8億ft³/日）である。中国の天然ガスの生産量の3.5%に当たり、米国の約百分の1である。シェールオイルは同じ井戸からは産出しないようである。

中国は、炭層メタン（Coalbed methane）の開発をずっと進めていたが、思うような成果が上げられずシェールガスの開発にシフトした経緯がある。中国は米国のシェールガス・オイル鉱区に出資し、採掘の経験を積んでノウハウを取得している。

2015年2月13日のEIAのToday in Energy⁷⁾によればシェールガス・オイルの世界の生産国は、米国、カナダ、中国、アルゼンチンの4カ国である。

米国は、2014年の天然ガス生産が約75Bcf/日で、そのうちシェールガスが約半分の37Bcf/日である。また、原油生産が約870万バレル/日で、そのうちシェールオイルが半分の約390万バレル/日である。

カナダはシェールガスとシェールオイルを生産している。シェールガスは2011年1.9Bcf/日から2014年に3.9Bcf/日に増加している。シェールオイルは2011年に20万バレル/日であったものが、2014年には40万バレル/日になった。カナダは米国に次ぐシェールの生産国で、生産量は米国の約10分の1である。

アルゼンチンでは2万バレル/日のシェールオイルを産出している。

なお、欧州ではポーランドが有望視されてきたが、予想より埋蔵量が少ない。ドイツとフランスは住民の反対で採掘は難しいが、イギリスは前向きで開発を進めている。

4.2 復活する米国化学工業

(1) 競争力を回復し活況な米国化学業界と建設ラッシュ

安価なシェールガスの恩恵でコスト競争力を回復した米国化学業界は活況を示している（ルネッサンスとよんでいる）。そして、シェールガスを利用したエタン・クラッカー（エチレンプラント）の新設、その誘導品のポリエチレンプラントの建設、プロパン脱水素法プラント（PDH）の建設がすすめられている。

米国化学工業会の2013年の発表によれば⁸⁾、シェールガス関連の米国化学工業全体の設備投資は、2014-17年の4年間で約454億ドル（4兆5,400億円）と見積もられ、建設ラッシュになっている（2015年9月発表:2010-20年では246プロジェクトで総額1,530億ドル）。

プラスチックの米国生産量に占める輸出比率は2006年以前の約12%から2012年は約20%に増加しているが、さらに2020年には約30%に増加すると見込まれている。

現在の輸出はポリエチレンとポリ塩化ビニルがほぼ同量で、ほとんどを占めている。輸出先は南北アメリカが約55%で、残り約45%がアジア、ヨーロッパなどである⁸⁾。

2017-18年完成のエタン・クラッカー（エチレンプラント）に合わせて、総生産能力500万トン以上のポリエチレンプラントが新設される。国内需要を大幅に上回るので、完成時にはポリエチレンの輸出が増加する。

(2) 新規エタン・クラッカー（エチレンプラント）の建設

2013年に計画されていた新規エタン・クラッカー7件のうち、現在のところChevron Phillips Chemical、Dow Chemical、ExxonMobil Chemical、Formosa Plastics（台湾）、OxyChem（米）/Mexichem（メキシコ）、Sasol（南ア）の6件は着工済みである（表12）。これらは、原油価格の下落があったが、中止や延期はなく工事が進んでいる。

残り1件のShell Chemicalは着工しておらず、2015年末に最終投資決定の予定である。

以上、合わせて7件がすべて計画通り進むとすると、2017年から18年にかけてエチレン総生産能力955万トンのプラントが誕生する⁶⁾。各プラントのエチレン生産能力は150万トンと規模が大きい。

⁶⁾ なお、日本のエチレン生産能力は、2015年現在653万トンである。

表12 米国の新エタン・クラッカーの建設計画

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	2 PE、計100万トン	6,000億円	2014. 4. 02	2017
Dow Chemical	テキサス州 フリーポート	150	PE 75、エラストマー 50 計125万トン	4,000億円	2014. 6. 30	2017
ExxonMobil Chemical	テキサス州 ベイトウン	150	2PE、計130万トン		2014. 6. 19	2017
Formosa Plastics (台湾)	テキサス州 ポイント・ コンフォート	150	LDPE、VCM、EG	2,000億円	着工	2017
OxyChem/Mexichem (米) / (メキシコ)	テキサス州 インゲルサイド	55	(既存の塩ビに 使用)		2014. 12. 17 (起 工式) その数か 月前から工事)	2017
Sasol (南アフリカ)	ルイジアナ州 レークチャールズ	150	E0、アルコール、PE α-オレフィン、ゴム	8,100億円	2014. 1 最終投資決定	2018
Shell Chemical	ペンシルバニア州 モナコ	150	3 PE、計150万トン	n. a.	まもなく投資 決定 (2015年)	n. a.
シンテック (親会社 信越化学)	ルイジアナ州	50	塩ビ (VCM) 用	1,400億円	2015年4月 最終投資決定	2018年 (前半)

注：設備費は1ドル＝100円で換算した。

出典：各種資料より旭リサーチセンター作成。

原油価格の急落により、上記7件以外の新規案件の多くは延期されたが、シンテックが2015年4月に新設計画を発表した。

信越化学の米国子会社であるシンテックは、米国でポリ塩化ビニル (PVC) の主原料の一つであるエチレンを生産する工場を建設することを決定した³⁰⁾。建設するエチレンの生産能力は50万トン、工場立地はルイジアナ州の工業用地で、2018年前半の完成を目指す。投資額は14億ドル (1,400億円) の見込みである。なお、シンテックのポリ塩化ビニルの生産能力は増設中のものを含め295万トンで、信越化学全体のポリ塩化ビニルの生産能力は、シンテックを含め383万トンで世界第一位である。

シンテックのポリ塩化ビニルの工場はルイジアナ州に年産150万トン、テキサス州フリーポートに年産145万トンのプラントがある。ちなみに、今度建設するルイジアナ州のエ

チレンプラントの生産能力50万トン、ポリ塩化ビニルを約110万トン生産できる規模である。

その他に、Axiall（米）/Lotte（韓国）がルイジアナ州にエタン・クラッカー（エチレン生産能力100万トン）を建設する計画を発表した。共同会社設立についてはすでに合意しており、最終の投資決定は2015年の予定である。また、プラントは2018年末完成を予定している³¹⁾。

またPTT（タイ）/Marubeni（丸紅）がオハイオ州にエタン・クラッカー（エチレン生産能力100万トン）を建設する計画を発表した。最終の投資決定は2016年で、2020年のプラント完成を予定している³²⁾。

Formosa Plasticsはテキサス州でエタン・クラッカーを建設中であるが、これとは別にルイジアナ州に94億ドル（9,400億円）の予算でエタン・クラッカーを建設するフイージビリティスタディを開始した³³⁾。

以上のように、シェールガス原料のエタン・クラッカーを建設ないし計画しているプロジェクトが10あるが、それに米国以外の海外メーカーが6社参画していることが注目される。

4.3 米国天然ガス価格の特殊性

(1) 2013年頃の状況

シェールガスの発見により米国の天然ガス価格は2008年のピークの約12ドル／百万Btuから、3－4ドル／百万Btuに下がった。そして、中東に近い価格（サウジの最安値の0.75ドル／百万Btuからイランの3ドル／百万Btu）になり、西ヨーロッパの約12ドル／百万Btu、日本・韓国の約15－16ドル／百万Btuよりはるかに安い価格になった。日本と韓国は世界で最も天然ガス価格が高かった。

パイプラインのない遠隔地への天然ガス輸送には、ガスを液化してLNGにしてLNG船で海上輸送し、かつ消費地で気化（ガス化）しなければならない。仮に4ドル／百万Btuのガスを米国のメキシコ湾岸で入手できても日本に運んでくると2倍の8.5ドル／百万Btuになるといわれる。なお、現在は米国からの輸入は実質無い。

一方、現在日本が輸入中のカタールからの場合は、2ドル／百万Btuのガスを日本に運んでくると4ドル／百万Btuになるといわれる。ただし、日本は長期安定供給の確保のため、サプライヤーと原油価格リンクの価格契約をしている。それで、原油高（100ドル／バレル）のときは15-16ドル／百万Btuという高値になった。

米国の天然ガス価格が国際価格より安くなっているのは、

- ①シェールガス生産が急速に伸び、過剰気味であること、
- ②天然ガス輸出が国の規則で特定国以外は実質的に禁じられ、また米国にLNG輸出のための液化設備がなかったため閉じた市場となっていたこと、
- ③パイプラインのない遠隔地への輸出には積み出し地での液化、LNG船での輸送、消費地でのガス化の費用がかかるため、生産地と消費地で大きな価格差を生じることなどが理由である⁷。

米国はシェールガスの発見より、2013年ごろは安価なエタンを原料とするエタン・クラッカーにシフトして、ナフサ・クラッカーに比べ5分の1から3分の1の安いコストでエチレンをつくることができた。

しかし、米国においてエチレンコストは下がったが、エチレン誘導品であるポリエチレン（PE）、ポリ塩化ビニル（PVC）などの販売価格は下がらなかった。ポリプロピレン（PP）など他の樹脂に比べても特に下がっておらず、国際価格の範囲であった。このため、安価なエチレンでポリエチレンやポリ塩化ビニルを一貫でつくっているクラッカー（RyondellBasellやDow）は大きな利益を上げた。

⁷天然ガス成分の特性

- ①メタン：分子量16、沸点-161.5℃、臨界温度-82.6℃、臨界圧力45気圧、液体の比重0.425、海上輸送はLNG船（-162℃以下で液化）、陸上はパイプライン輸送。
 - ②エタン：分子量30、沸点-88.7℃、臨界温度32.2℃、臨界圧力49気圧、液体の比重0.546、遠路海上輸送はエタン船（-92℃以下で輸送）。
 - ③プロパン：分子量44、沸点-42.2℃、液体の比重0.580、PDH遠路輸送用は専用プロパン船（-43℃以下で輸送）、20℃、8.5気圧あるいは30℃、11気圧で液化するので圧縮液化ガスとしての輸送も可能である。
 - ④ブタン：分子量58、ノルマルブタンは沸点-0.5℃、液体比重0.605、イソブタンは沸点-11.7℃、液体比重0.950、遠路海上輸送はLPG船（LPG：プロパンとブタンの混合ガス）、ブタン単独は20℃、2.1気圧あるいは30℃、2.8気圧で液化する。
- メタンやエタンの輸送に比べ、プロパン、ブタン、LPGの輸送ははるかに容易である。

一方で、従来価格でプラスチックを購入するプラスチック成形業者（ユーザー）は、エチレンコストが大幅に下がった恩恵をまったく受けなかった。

（2） 2015年の現状

米国はLNGの輸出を許可するようになり、状況は大きく変わった。現在は、LNG輸出はほとんどないが、天然ガスの液化設備が完成する2016年からはLNG輸出が本格的に立ち上がる。LNG輸出が始まれば、米国の天然ガス価格は世界の天然ガス価格に近付き、値上がりするであろう。

2015年にパナマ運河が拡張されると、米国・メキシコ湾岸からアジアへの輸送コストは下がると予想されている。

直近では、石油価格下落を受けて天然ガス価格が下落した。2013年10月はアメリカ3.2ドル／百万Btu、ヨーロッパ10.9ドル／百万Btu、日本16.5ドル／百万Btuであったものが、2015年10月にはアメリカ2.3ドル／百万Btu、ヨーロッパ6.0ドル／百万Btu、日本9.0ドル／百万Btuに約40%低下した³⁴⁾。日本のように天然ガス価格が原油価格リンクになっているところは当然下がる。

4.4 原油価格下落とシェールガス・オイル生産への影響

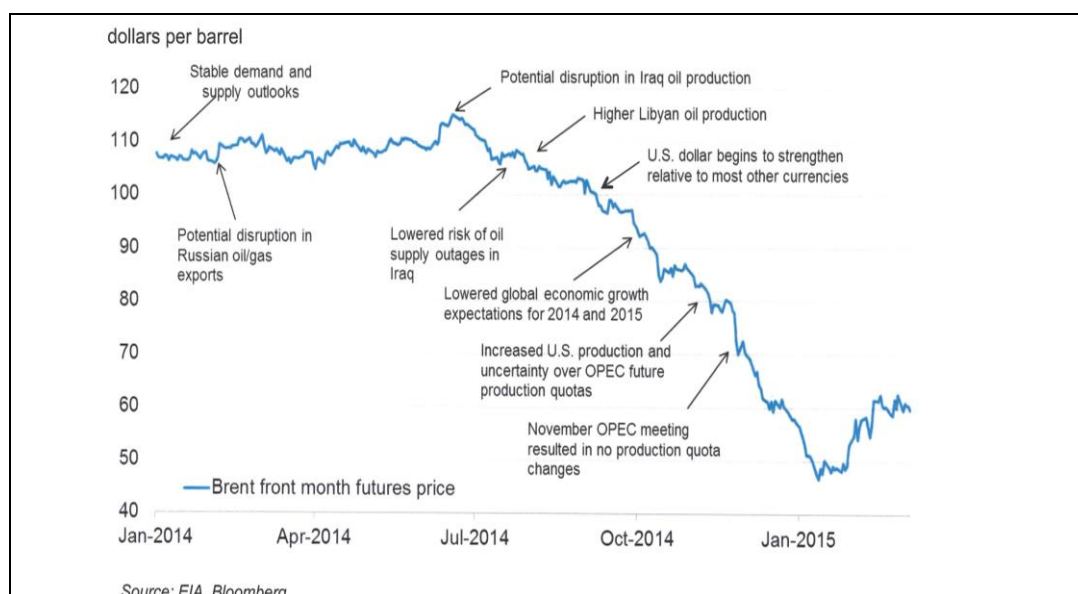
（1） 原油価格の下落

前リポート²⁾ “「石油化学」から「天然資源化学」へ” （2014年4月）のおわりに次のように書いた。「最後に楽観的な予測と夢でしめくりたい。楽観的予測： 米国が天然ガスのLNG輸出を始めたとともに価格が値上がりする。一方、安価なシェールオイルが世界中で産出して世界にあふれ、原油価格が低下する。それで幸い、ナフサ・クラッキングの競争力が回復する。」

ところが、シェールオイルが世界中で産出する前に、2014年7月ごろより原油価格は下落し始めた。米国のシェールオイル増産より市場シェアを奪われることに危機感をもったサウジアラビアはシェア確保を第一として減産しないことを2014年11月に決定した。このため、原油価格がさらに50ドル／バレルまで下落した。それから1年経過したが、50ドル／バレル前後が継続している。

原油価格は大幅に値下がりしたが、米国シェールオイルの生産量は維持された。

図18 原油（ブレント）の価格推移



EIAの図コメント：原油価格は2014年年央までは比較的安定していたが、世界的な原油供給量の増大と世界経済の成長低下の予測から2014年7月より2015年1月にかけて価格が下落した。

出典：EIA, Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040 (April 2015) ⁷⁾。

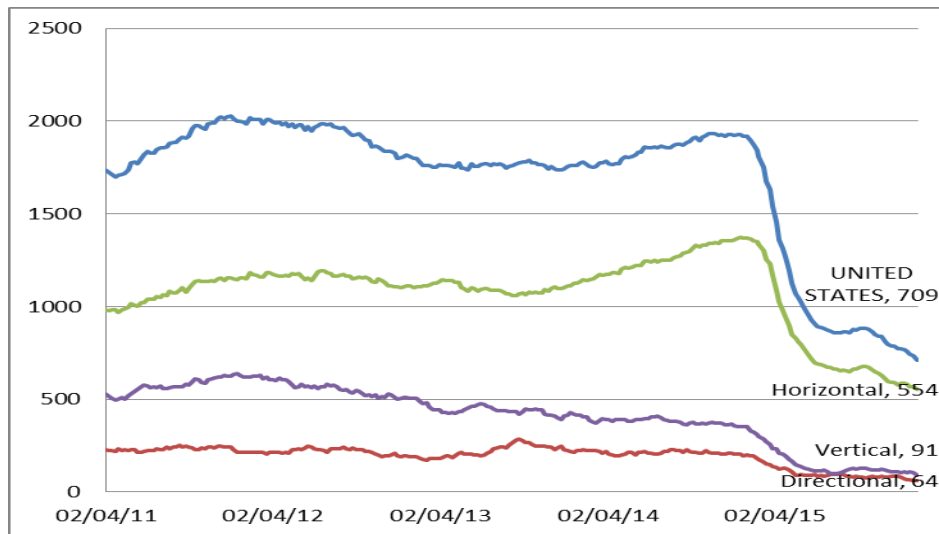
(2) 原油価格下落のシェールガス・オイル生産への影響——激減するリグ総数と維持される生産量

① 概況

米国のシェールガス・オイル掘削装置(リグ)の稼働数を図19、20に示す³⁵⁾。2014年11月のOPEC決定後の2015年初めより、リグ総数(rig count)が急激に減少した。図19に示すように、2015年12月11日現在の米国全体のリグ総数(図のUnited States)は、709基である。その内、シェールガス・オイルの採掘に使われている水平掘り(図のHorizontal)のリグ総数は554基である。その他に、垂直掘り(図のVertical)91基、Direction 64基がある。水平掘りのリグ総数の比率が増加し、全体の約80%になっている。

水平掘り(Horizontal)の2014年11月から2015年12月までのリグ総数の推移を図20に示す。リグ総数は2014年10月に最高の1,372基を記録したのち、2015年1月より急激に減少し、5月には685基に減少した。しかし、2015年のオイル生産量(シェールオイルと在来型原油の総計)は2014年を上回った。

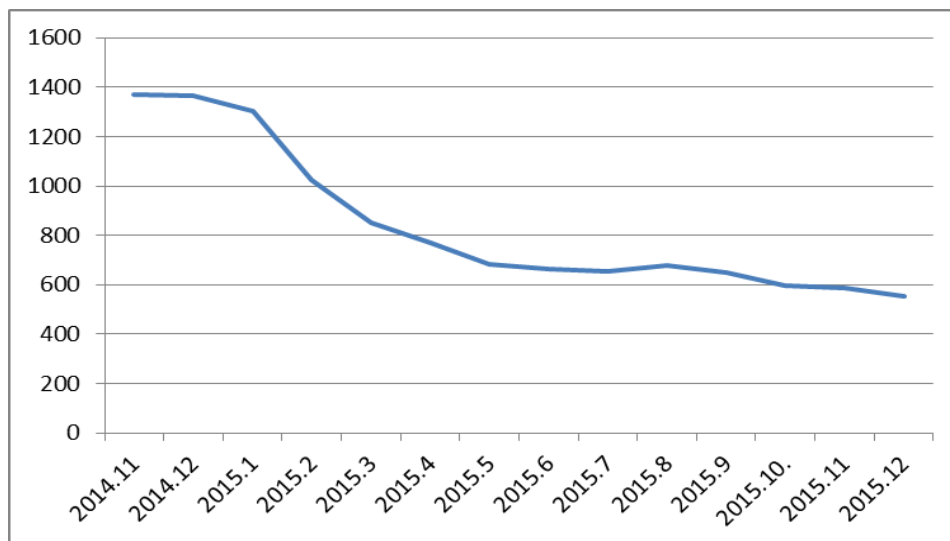
図19 米国の原油・天然ガスのリグ総数の推移



注：United Statesは全米合計、Horizontalは水平掘り、Verticalは垂直掘り、Directionalは特定方向掘り。

出典：Baker Hughesのデータを基に旭リサーチセンター作成。

図20 水平掘り（Horizontal）リグ総数の推移



出典：Baker Hughesのデータを基に旭リサーチセンター作成。

最新のEIAのSTEO(Short-Term Energy Outlook, Dec. 8, 2015)によれば、2015年の原油生産量は9.33百万バレル/日(ほぼ実績)で、2014年の8.70百万バレル/日より増加した(表13)。ただし、これまで生産量は一本調子で増加してきたが、2015年第三四半期より生産量が初めて減少した。そして、2016年は需要が弱含みなこともあり、生産は8.76百万バレル/日まで減少すると予想している。表13には原油価格の実績と予想も示す。

一方、天然ガスの生産量は、同じSTEO資料(表14)によれば、2014年の74.89 (10億ft³/日:Bcf/日)から2015年は79.58Bcf/日まで増加した。2016年もわずかに増加し、81.05Bcf/日になる見込みである。表14に天然ガス価格の実績と予想を示す。

表13 米国の原油生産量と価格 (単位: 生産量は百万バレル/日、価格はドル/バレル)

年	2011	2012	2013	2014	2015	2016
原油生産量	5.64	6.48	7.45	8.7	9.33	8.76
WTI スポット平均価格			97.98	93.17	49.08	50.89
Brentスポット平均価格			108.56	98.89	52.93	55.78

各期生産量	第一四半期	第二四半期	第三四半期	第四四半期
2014年	8.11	8.61	8.84	9.24
2015年	9.37	9.41	9.37	9.17
2016年	8.95	8.8	8.56	8.76

表14 天然ガスの生産量と価格 [単位: 生産量は10億ft³/日 (Bcf/日)、価格はドル/百万Btu]

年	2011	2012	2013	2014	2015	2016
天然ガス生産量	65.85	69.08	70.03	74.89	79.58	81.05
Henry Hub スポット価格			3.84	4.52	2.75	2.96

各期生産量	第一四半期	第二四半期	第三四半期	第四四半期
2014年	71.75	74.09	76.06	77.6
2015年	78.11	79.2	80.57	80.39
2016年	80.7	80.87	80.98	81.65

表13、14の注: 黄色地は予測。原油、天然ガスともに在来、非在来のすべてを含む。

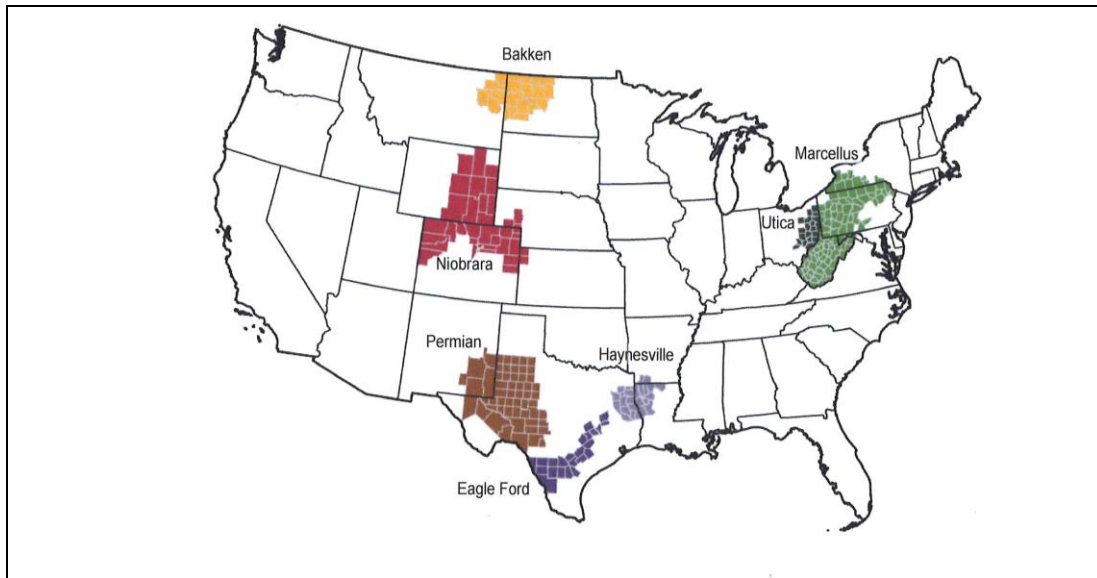
表13、14の出典: EIA Short-Term Energy Outlook, Dec. 8, 2015を基に旭リサーチセンター作成。

② 主要鉱区の状況

オイル・天然ガス⁸の最新の生産状況を7つの主要鉱区で見てみる。7つの主要鉱区とは図21に示すBakken(バックエン)、Eagle Ford(イーグルフォード)、Haynesville (ハynesビル)、Marcellus(マーセラス)、Niobrara(ニオブアラ)、Permian (パーミアン)、Utica (ウティカ)である。この7つの主要鉱区は、2011-14年にかけての国内オイルの生産の伸びの92%を占め、国内天然ガス生産の伸びの100%を占める。

⁸ EIAのDrilling Productivity Reportでは、はOil(オイル)、Natural gas(天然ガス)の言葉を使用しているの、ここではそれを使用する。なお、STEOではCrude oil(原油)の言葉を使用している。

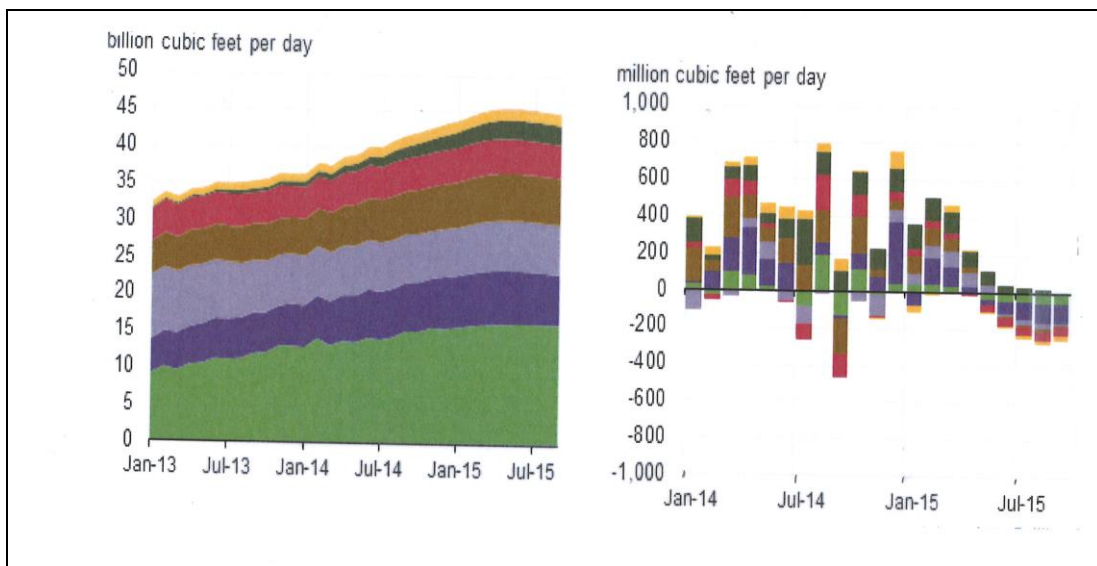
図21 天然ガスとオイルの主要鉱区



出典：EIA Drilling Productivity Report (November 2015) ⁷⁾。

図22のシェールガス生産量の前月比増減推移を見ると、それまでずっと増加してきたものが2015年6月ごろより減少に転じていることがわかる。

図22 シェールガスの生産量推移と前月比増減推移

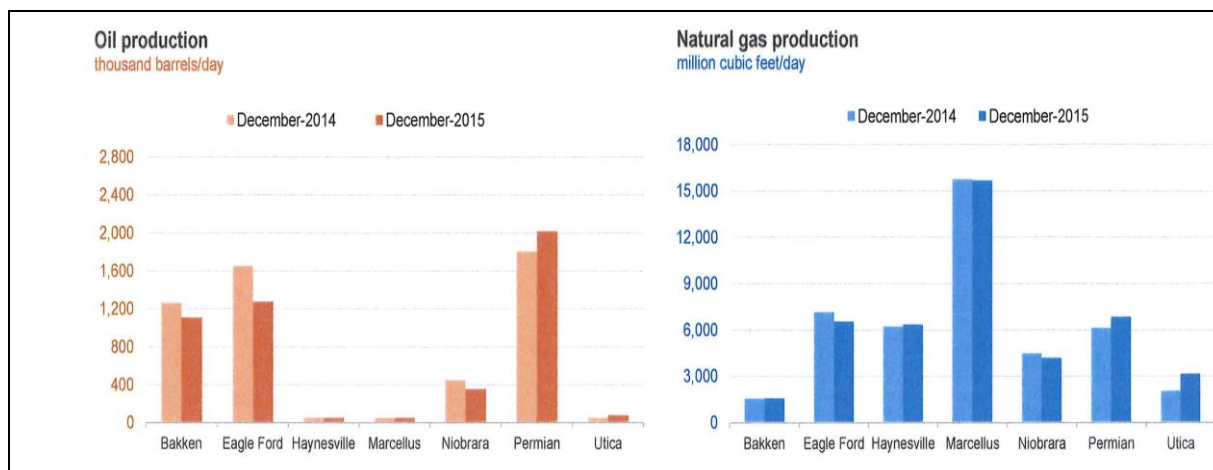


注：図の色は図21の鉱区の色を示している。下からマーセラス、イーグルフォード、ハynesビル、パーミアン、ニオブララ、ウティカ、バックケンである。

出典：EIA, Today in Energy (August 26, 2015) ⁷⁾。

また図23に示すように、オイルの生産はバッケン、イーグルフォード、パーミアンの3鉱区に、天然ガスの生産はイーグルフォード、ハynesビル、マーセラス、ニオブララ、パーミアンの5鉱区に集中している。また、オイル、天然ガスとともに2014年12月と2015年12月を比べるとほぼ同じくらいの生産量になっている（ただし、すでに述べたように、年間ベースではオイル、天然ガスともに2015年は2014年を上回った）。

図23 オイルと天然ガスの2014、2015年の12月の地域別生産量



出典：EIA Drilling Productivity Report(November 2015) ⁷⁾。

EIAのDrilling Productivity Reportでは毎月の生産量、リグ総数とリグ当たりの新井戸オイル（天然ガス）生産量などが報告されている（図24、25）。当月の生産量は、次の式で求められる。当月生産量＝前月の生産量－既存の井戸の生産減少量＋新井戸オイル（天然ガス）生産量である。ここで注意すべきことは、新井戸生産量とは新井戸生産開始1ヶ月分だけを指すことである。また、リグ総数(rig count)は稼働しているものを指す。リグ総数とリグ当たりの新井戸オイル（天然ガス）生産量を掛け合わせれば、その月の新井戸オイル（天然ガス）生産量を計算できる。

（オイル）

図24の左側に主要3鉱区のオイルの生産量推移を、また右側にそれらのリグ総数とリグ当たりの新井戸オイル生産量の推移を示す。

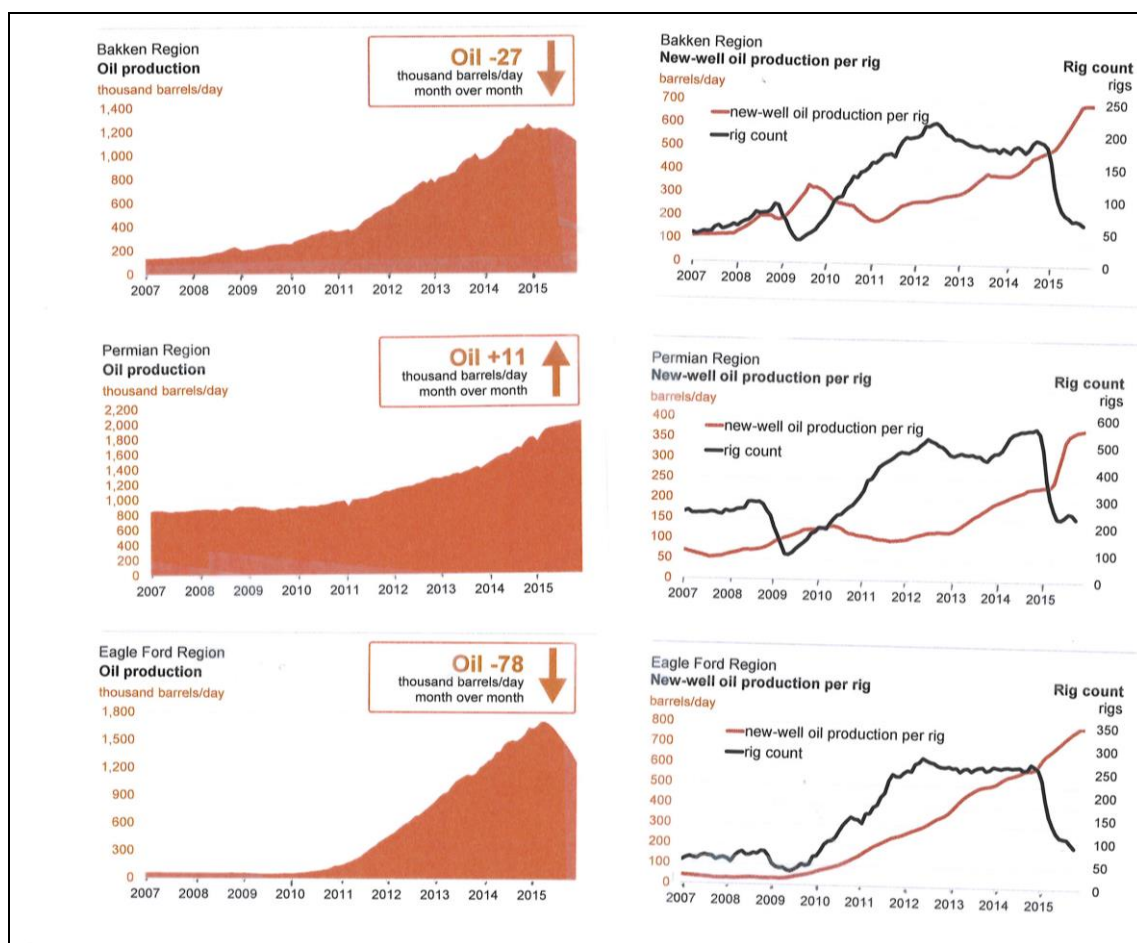
バッケンとイーグルフォードはシェールオイルの開発により2010年頃より生産量が急増してきたが、2015年中ごろより生産量が減少した。一方、最大のオイル生産鉱区であるパーミアンは昔からオイルの生産が多く、ほぼ一定の生産量を維持してきた。その後、

2011年頃からシェールオイルの開発により生産量が増加し、現在は以前の約2倍の生産量になった。そして、パーミアンは2015年12月現在、生産量増加が継続している。

パーミアンのリグ総数は2014年12月の548基から2015年12月の204基まで減少した。半面、リグ当たりの新井戸オイルの生産量が2014年12月の約250バレル/日が2015年12月には約370バレル/日まで向上したので（生産性約1.5倍）、新井戸オイル生産量は2014年12月の137,000バレル/日から2015年12月には75,000バレル/日になったと計算される。この1年間で、リグ総数は63%減少したが、新井戸オイル生産量は46%の減少にとどまったことになる。

同様な傾向がバッケンとイーグルフォードでも見られる。バッケンのリグ総数は2014年12月の158基が2015年12月に52基まで減少している。イーグルフォードのリグ総数は2014年12月の204基が2015年12月に76基まで減少している。しかし、この期間に両鉱区ともリグ当たりの新井戸オイル生産量（リグの生産性）は、1.5倍以上になっている。

図24 オイル主要鉱区の生産量、リグ数、リグ当たりの新井戸オイル生産量の推移



出典：EIA, Drilling Productivity Report (November 2015) ⁷⁾。

オイル全体として見ると、原油価格下落により生産性の悪い井戸⁹が閉鎖され、また採算性の高い井戸は技術革新により生産性がさらに向上したものと思われる。生産性の向上やリグ総数の減少による経費の削減などにより、原油価格が50ドル/バレルに下がっても十分採算に合うようになった。それで生産量が維持されたものと考えられる。

サウジアラビアは原油価格下落を容認し、米国のシェールオイルをつぶそうとしたがその目論見（もくろみ）は成功しなかった。

（天然ガス）

図25の左側に主要4鉱区の天然ガスの生産量推移を、また右側に各鉱区のリグ総数とリグ当たりの新井戸天然ガス生産量の推移を示す。

イーグルフォードとマーセラス（天然ガス最大の生産地）はシェールガスの開発により2010年以来生産量が急増したが、2015年中ごろより生産量が減少している。ニオブララは以前から天然ガスの生産が多くほぼ一定の生産量を維持してきたが、ここも減少傾向がみられる。一方、パーミアンは増加傾向にある（パーミアンはオイルと同じ傾向である。なお、パーミアンのオイルと天然ガスのリグは共通なのでリグ総数は同じである）。

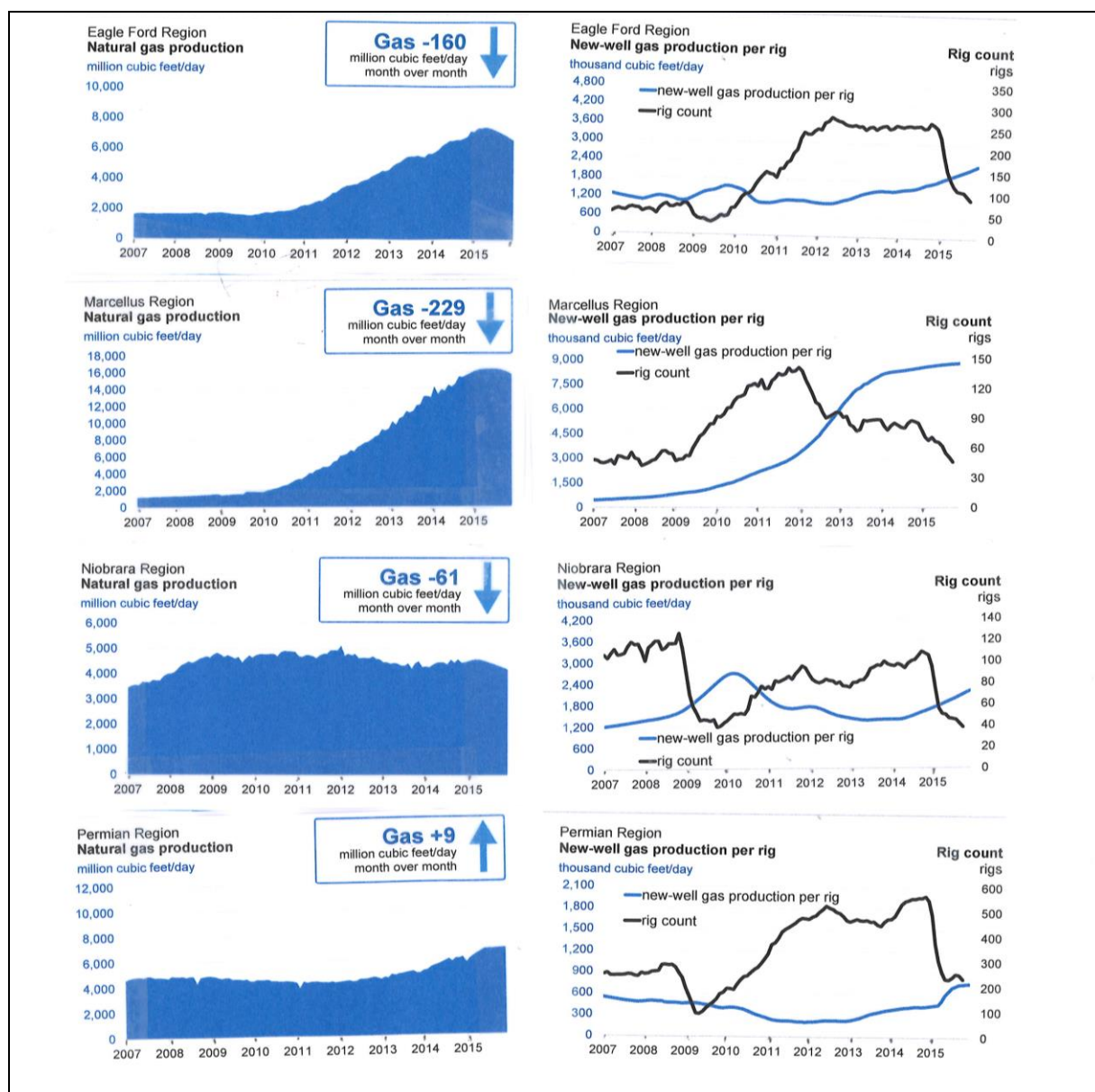
リグ総数は、どの鉱区でも急激に減少している。2014年12月と2015年12月のリグ総数を比較すると、イーグルフォードは204基が76基に、マーセラスは83基が42基に、ニオブララは60基が23基に、パーミアンは548基が204基にいずれも半分以下に減少している。一方、どの鉱区もリグ当たりの新井戸天然ガス生産量（リグの生産性）は向上している。特にマーセラスのリグの生産性向上が顕著である。

マーセラスの2015年12月の新井戸天然ガス生産量を計算してみると $42 \times 8,700 = 365,000$ 千ft³/日（365百万ft³/日）となる。この月のマーセラスの天然ガス生産量は16,000百万ft³/日なので、新井戸天然ガスの比率は2.3%となる。新井戸天然ガスとして扱うのは定義から1ヶ月だけなので少ない数字となる。6か月間は新井戸天然ガスとして

⁹ IEA（International Energy Agency）のMTOMR（中期オイル・マーケットリポート）・2014によると、2013年の米国原油の損益分岐点は、40-60ドル/バレルが68%で一番多く、40ドル/バレル以下が13%、60ドル/バレル以上が18%である。

扱い、かつ新井戸天然ガス生産量が毎月同じと仮定すれば、新井戸天然ガスの比率は6倍の14%となり、新井戸の比率がかなり高いことがわかる。

図25 天然ガスの主要鉱区の生産量、リグ総数、リグ当たりの天然ガス生産量の推移



出典：EIA, Drilling Productivity Report (November 2015) ⁷⁾。

(3) 原油価格下落の化学工業（天然資源化学）への影響

原油価格下落の化学工業(天然資源化学)への影響は定性的に次のように考えられる。

- ① 石油化学のナフサ・クラッキングのコスト競争力が回復する。

- ② 天然ガス化学のエタン・クラッキングとプロパン脱水素法（PDH）のコスト競争力は相対的に低下する。
 - ③ 石油精製の接触分解（FCC）のプロピレンと接触改質（リフォーミング）の芳香族化合物のコストは下がる。
 - ④ 石炭化学は相対的に競争力を減ずる。特に、アセチレン法のポリ塩化ビニル（PVC）のコストは、ナフサ・クラッキングのエチレン法のポリ塩化ビニルのコストを上回った。中国からアジアへのPVCの輸出が減少した。
 - ⑤ 4章6節で述べる脱石油の動き、特に合成ガソリン（合成燃料）の製造や再生可能エネルギーの開発には逆風となる。
- 詳細なコスト比較は次の5章を参照してほしい。

4.5 原油価格と天然ガス価格の予測

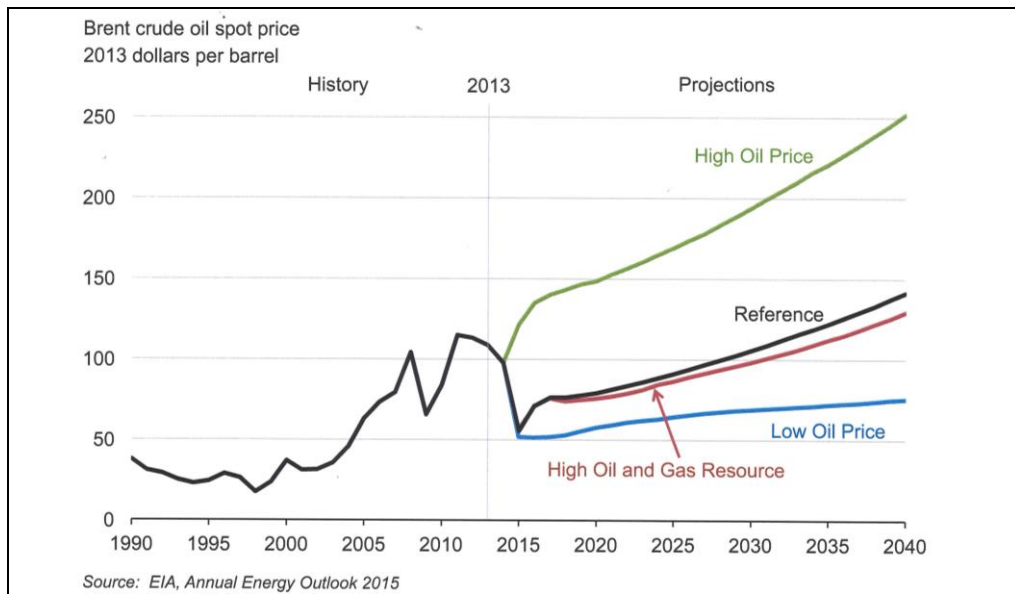
EIAは原油価格と天然ガス価格の予測を4つのケースで発表している（図26, 27）。いずれのケースでも、現在が最低価格で今後上昇すると予測している。

原油の標準ケース（Reference）では、2028年頃に100ドル/バレルに戻ると予想している。

EIAの予測のように、現在の原油低価格は長続きしないという見方が多い。現在の低価格では、産油国の財政が長くはもたないというのが一つの理由である。

なお直近では、OPECが原油の減産をしないことを再度決めたことから、2015年12月に原油価格が40ドルを割った。しばらく、図26のLow Oil Priceのケースになる可能性もある。

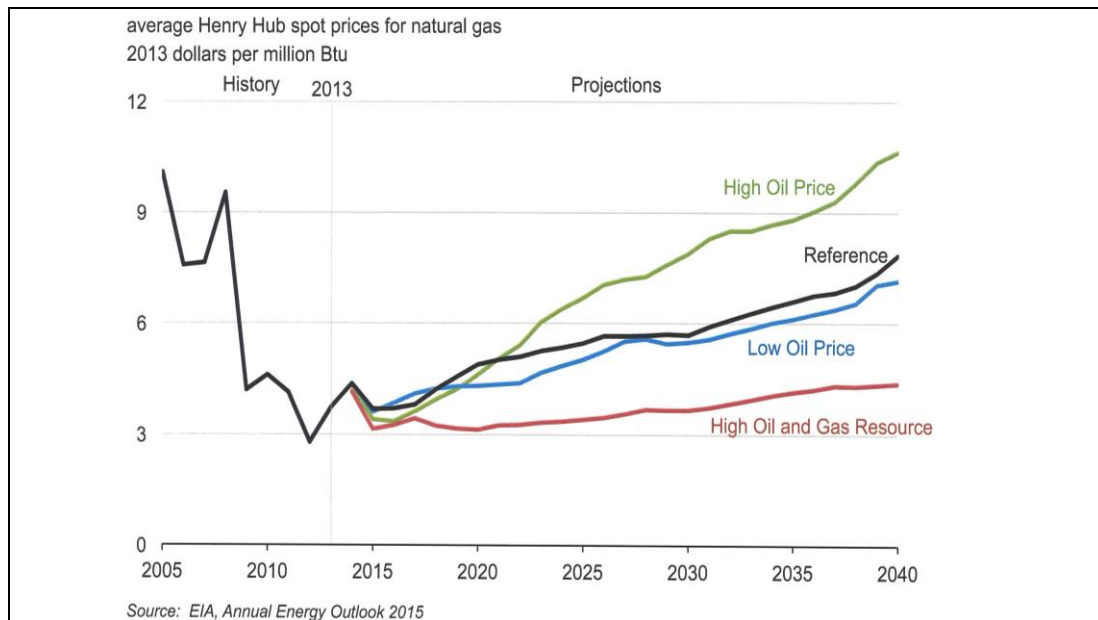
図26 原油（ブレント）の価格推移と予測（単位 ドル/バレル）



出典：EIA, Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040 (April 2015) ⁷⁾。

天然ガスは今後なだらかに今後上昇する予想である。標準ケースでは2020年ごろに5ドル/百万Btuになると予想している。

図27 天然ガスの価格推移と予測



EIAの図のコメント：将来の米国国内の天然ガス価格は、世界の原油価格と国内資源の供給力に依存する

出典：EIA, Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040 (April 2015) ⁷⁾

5 軽質オレフィンの製法・コストの比較(原油価格下落の影響)

5.1 軽質オレフィン（エチレンとプロピレン）の各種製法比較

これまで述べてきた軽質オレフィンの6つの製法をリストアップし、その製造条件、原料、プロダクトバランスを表15にまとめた。

6つの製法とは、石油化学のナフサ・クラッキング、天然ガス化学のエタン・クラッキングとプロパン脱水素法（PDH）、石炭化学のMTOとMTP、バイオマス化学のエタノール脱水法である。前述のように、MTOとMTPは天然ガス原料由来のメタノールを使用すれば、天然ガス化学になる。

このうち、エチレンをつくる方法としては、ナフサ・クラッキング、エタン・クラッキング、MTO、エタノール脱水法があり、プロピレンをつくる方法としてはナフサ・クラッキング、PDH、MTO、MTPがある。

各製法の長所と短所を簡単にまとめると、

- ① ナフサ・クラッキングは価値ある副生品（C2—C4、アロマ）を併産するが、副生品を含めた化学品成分がフィード原料の約60—65%と低い¹⁰。
- ② エタン・クラッキングはエタンを原料に使用したときには、エチレン収率が約86%と高いが、副生品がほとんどない。

一方、原料にプロパンを使用したときは、エチレン収率42%、プロピレン収率15%、ブタジエン収率4%程度である。ブタンを使用した場合は、エチレン収率40%、プロピレン収率15%、ブタジエン収率4%程度である。いずれもエチレン収率と全体収率が下がる。

¹⁰水蒸気分解プロセスと接触分解プロセス

ナフサ・クラッキングとエタン・クラッキングは触媒を使用しない水蒸気分解で反応温度は 800-900℃と高い。一方、石油精製の接触分解（FCC）と接触改質（リフォーミング）は触媒反応で、反応温度は 400-500℃と低い。ナフサを水蒸気分解でなく、触媒を使って分解すれば反応温度が下がり、プロピレン収率が上がるのではないかと考えられる。ゼオライト触媒を用いたナフサの接触分解の研究は、日本の石油化学メーカーや NEDO で長年研究されてきた。このなかで、新規なゼオライト触媒が見いだされたが、実用化には至っていない。

世界的には、韓国の SK エネルギー社とエンジニアリング会社の KBR が共同で、韓国で工業化したのが唯一の例であり、エチレン：プロピレン＝1：1.2 が得られている。KBR は 2011 年に陝西延長石油延安能源化工有限責任公司にこの技術をライセンスした。建設場所は中国陝西省富県富城鎮洛陽村で、オレフィン生産量（エチレンおよびプロピレン）は、約 20 万トンである³⁶⁾。

現在は、エタン・クラッキング原料中のエタンの比率がかつての34%から65%に増加している（2章5節参照）。

- ③ MT0は軽質オレフィンの収率は90%と高いが、大量の水が副生するのが欠点である。
- ④ MTPはプロピレンだけが得られること、またプロピレンと副生のLPGとガソリンを合わせれば収率が高いことが特徴である。欠点は、水を大量に副生することである。
- ⑤ PDHは収率85%以上の工業技術であるが、ワンパス転化率が低くいために未反応原料をリサイクルする必要がある。原料のプロパンが、メタンやエタンよりも価格が高い。
- ⑥ バイオエタノールの脱水によるエチレン製造の収率は高い³⁷⁾。欠点は、MT0/MTPと同様に水が副生することである。ブラジルのサトウキビは米国のトウモロコシより、効率的にバイオエタノールをつくることができる。サトウキビは糖質含量が高く、トウモロコシのようなデンプンを糖化する工程が不要なためである。

5.2 各種製法の原料費試算のための前提

軽質オレフィンの製造費に占める原料費の比率は大きいことから、キャッシュコストの代わりに簡便に原料費を試算した¹¹⁾。軽質オレフィン1トンを製造するのに必要な原料費は原料原単位とプロダクトバランスより計算できる（表15）。

また、エチレンとプロピレンを併産する製法が二つ（ナフサとMT0）あるので、エチレン製造の原料費でなく軽質オレフィン（エチレン+プロピレン）の原料費を試算した。通常、エチレンとプロピレンが併産するときのエチレン製造コストは、プロピレンを副生品として扱い副生品控除する。この場合、プロピレンの取引価格（または市場価格）を使うことになり、コスト計算に異質な価格が入ってくる。価格は変動しやすく、恣意的になりやすいのが欠点である。またこの方法では副生品の控除額が大きくなることも望ましくない点である。

¹¹⁾ キャッシュコストは償却と金利を含まない製造コストである。原料費に用役費、労務費、設備の修繕費を加えたものである。用役、労務費、設備の修繕費の合計を α とすると、キャッシュコストは原料費+ α となる。表15に示す6つの製法は、いずれも一段階の反応工程と分離工程から成るので、大雑把に言えば各製法の α は同じ程度の費用と考えることができる。したがって、製法間のキャッシュコストの差はほぼ原料費の差となる。

今回は軽質オレフィンとして計算したので、副生品控除額が小さくなることが特徴である。計算された軽質オレフィンの原料費は、エチレンとプロピレンの平均原料費とみなすことができる。

そして、計算は次の二つのケースについて行った。ケース1は2013年の原油100ドル/バレルのときのもの、ケース2は現在の原油50ドル/バレルのときのものである。原油の価格低下に伴い、各種原料の価格が低下したのでケース2ではそれを織り込んだ。

ケース1(2013年)の原料単価は、2013年当時の原油100ドル/バレル対応のナフサ970ドル/トン、エタン220ドル/トン(約4.3ドル/百万Btu)、プロパン500ドル/トン(10.5ドル/百万Btu)、メタノール400ドル/トン、バイオエタノール700ドル/トンとした。

ケース2(2015年)の原料単価は、現在の原油50ドル/バレルに対応するナフサ500ドル/トンとして、エタン160ドル/トン(約3.2ドル/百万Btu)、プロパン300ドル/トン(約6.3ドル/百万Btu)、メタノールは300ドル/トン、バイオエタノール450ドル/トンとして計算した。なお、メタノール価格は300ドル/トンまで下がっていないが、メタノール価格依存性を明らかにするため300ドル/トンのケースを計算してみた。

副生品単価は、ガスはメタン価格、液体燃料はナフサ価格、化学品はケース1では1,300ドル/トン、ケース2では870ドル/トンにした。、870ドル/トンは1,300ドル/トンの約66%(2/3)である。

5.3 各種製法の原料費の試算結果

各種製法の原料費の試算結果を図28、図29、表15に示す。

(ケース1、2013年)

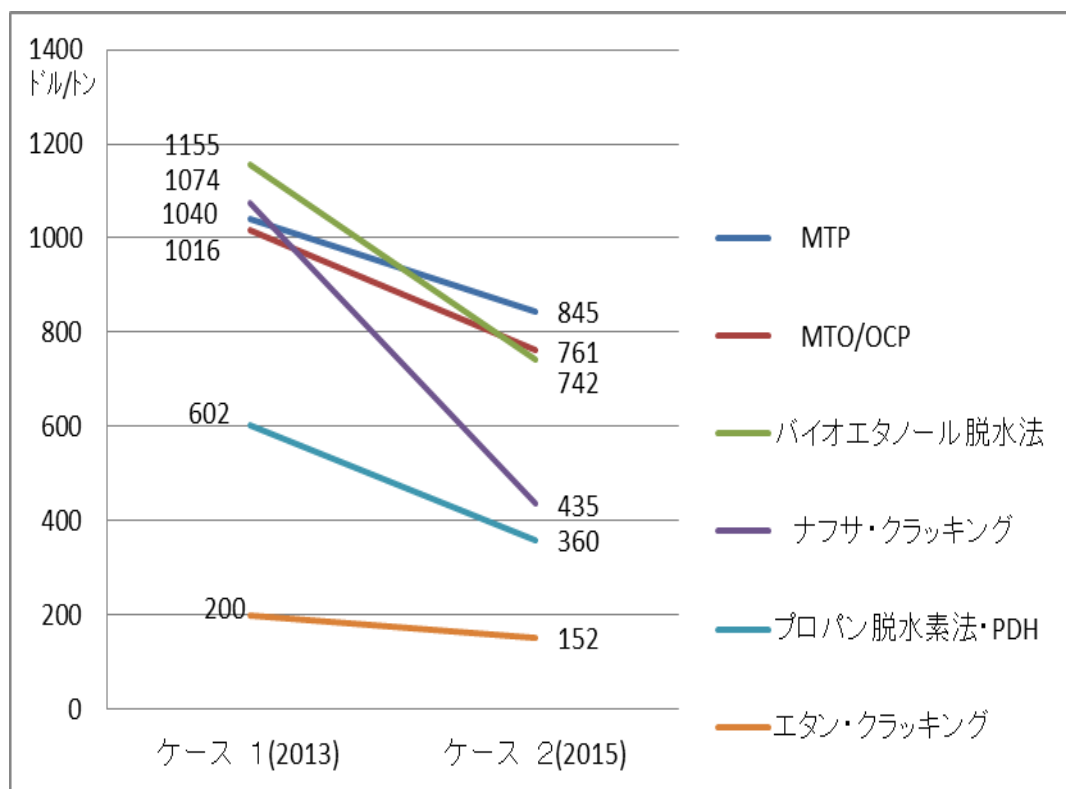
ケース1では、軽質オレフィン1トン当たりの原料費は、エタン・クラッキングが200ドル/トンで圧倒的に安く、次いでPDH 602ドル/トン、MTO 1,016ドル/トン、MTP 1,040ドル/トン、ナフサ・クラッキング 1,074ドル/トン、エタノール脱水法 1,155ドル/トンである。ナフサ・クラッキングとエタン・クラッキングの間には874ドル/トンの大きな差がある。また、MTOやMTPはナフサ・クラッキング並みの高い原料費である。国際価格のメタノールを使用しでは、MTOやMTPは採算が合わないといわれる。

(ケース2、2015年)

ケース2では、軽質オレフィン1トン当たりの原料費は、エタン・クラッキングが152ドル/トンが圧倒的に安く、次いでPDH 360ドル/トン、ナフサ・クラッキング 435ドル/トン、エタノール脱水法 742ドル/トン、MTO 761ドル/トン、MTP 845ドル/トンである。ナフサ・クラッキングとエタン・クラッキングの原料費差が283ドル/トンまで縮まっていること、またナフサ・クラッキングとPDHの原料費差が75ドル/トンまで縮まっていることが注目される。

そしてナフサ・クラッキングの原料費は300ドル/トンのメタノールを使ったMTOとMTPの原料費よりも安くなる。なお、MTOとMTPはメタノール単価が200ドル/トンに下がると、原料費が約500円となり、ナフサ・クラッキングの435ドル/トンに近い値になる。

図28 軽質オレフィンのケース別、製法別原料費



注：ケース1はナフサ970ドル/トン、エタン220ドル/トン（約4.3ドル/百万Btu）、プロパン500ドル/トン（10.5ドル/百万Btu）、メタノール400ドル/トン、エタノール700ドル/トンとした。

ケース2はナフサ500ドル/トン、エタン160ドル/トン（約3.2ドル/百万Btu）、プロパン300ドル/トン（約6.3ドル/百万Btu）、メタノールは300ドル/トン、エタノール450ドル/トンとした。

出典：旭リサーチセンター作成。

図29 各製法の原料費の原料単価依存性（単位はいずれもドル/トン） ARC作成

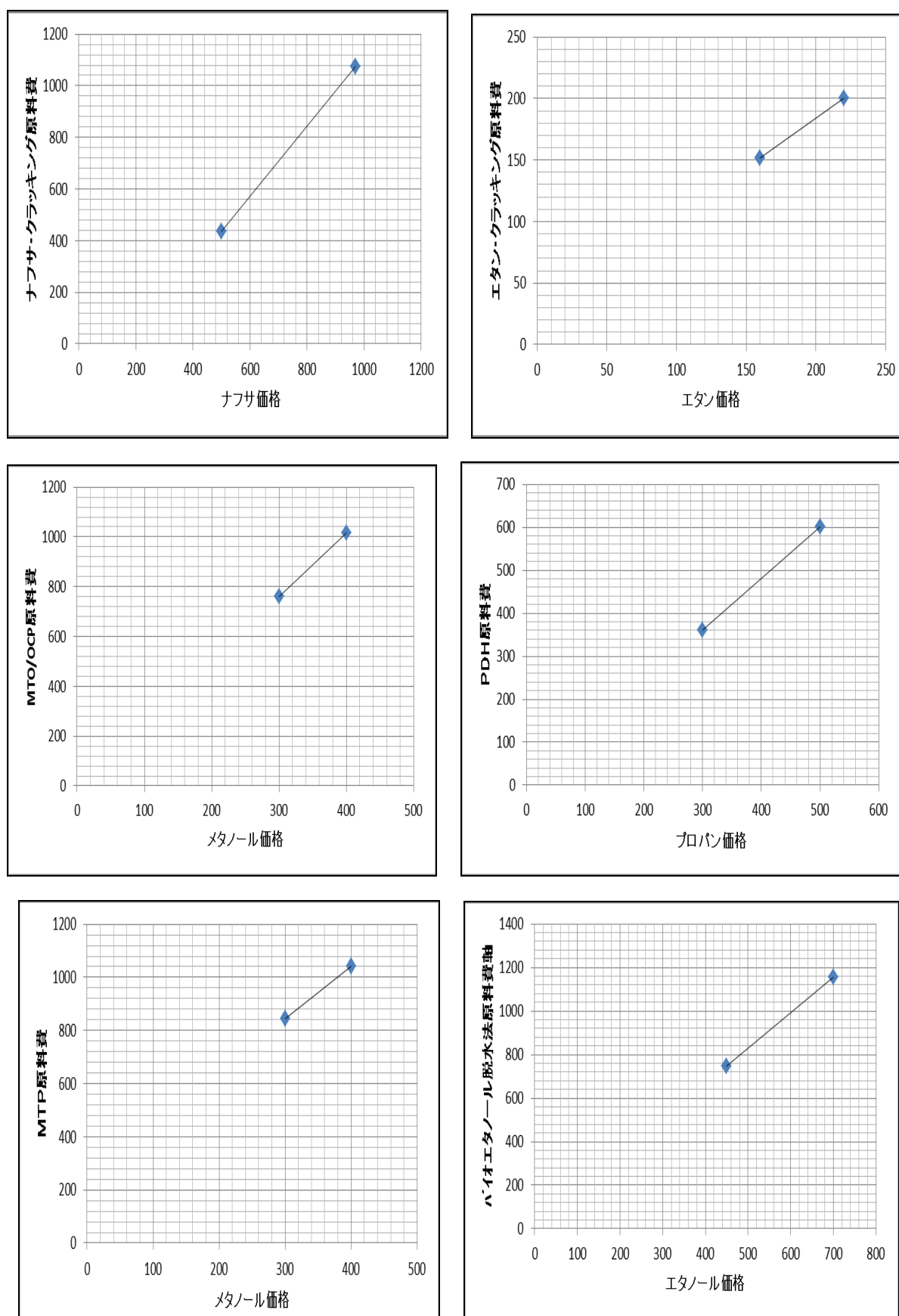


表15 軽質オレフィンの各種製法の製造条件と原料費の比較

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	MTG/OCF (統合プロセス)	MTP	プロパン脱水素法 (PDH)	バイオエタノール 脱水法
製造条件	反応 触媒 温度 反応器 原料	水蒸気分解 なし 約800℃ 管型 ナフサ	水蒸気分解 なし 約900℃ 管型 エタン	UOP法 接触分解 SAPO-34 350-500℃ 流動床 メタノール	Lurgi 法 接触分解 HZSM-5 420-490℃ 管型の固定床 メタノール	Lummus 法 脱水素 Cr2O3-Al2O3 520-680℃ 固定床 プロパン	脱水 HZSM-5 240℃ 固定床 エタノール
プロダクトバランス	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	エタノール 165
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	エチレン	67(31)	97(8.3)	41(37)	100(65)	100	100
	プロピレン	33(16)	3(2.3)	59(53)			
	ブタジエン	10(5)	2(1.5)	その他 12(9)	LPG 12(8)	水素 4	
	その他C4 ベンゼン・トルエン 燃料ほか 軽質分 水	17(8) 17(8) 40(19) H2, CH4, 30(14)	1(0.5) 1(0.5) 1(0.5) H2, CH4 6(13.6)		ガソリン 38(25) 燃料ガス 5(3) 水 199		水 65
原料費内訳 (ドル/トン)	原料 ケース	ナフサ 2 1	エタン 2 1	メタノール 2 1	メタノール 2 1	プロパン 2 1	エタノール 2 1
	原料単価	500 970	160 220	300 400	300 400	300 500	450 700
	原料原単位 (トン/トン)	2.13 2.13	1.17 1.17	2.6 2.6	3.54 3.54	1.22 1.22	1.65 1.65
	原料費	1065 2066	187 257	780 1040	1062 1416	366 610	742 1155
	副生ガス控除 (160, 200)	48 60	10 12	19 24	27 34	6 8	
軽質オレフィン1トン当たりの原料費	副生燃料控除 (500, 900)	200 360	25 45		190 342		
	化学品控除 (870, 1300)	382 572					
	副生品控除合計	▲630 ▲992	▲35 ▲57	▲19 ▲24	▲217 ▲376	▲6 ▲8	
軽質オレフィン1トン当たりの原料費		435 1074	152 200	761 1016	845 1040	360 602	742 1155

出典：各種資料より旭リサーチセンター作成。

5.4 CT0 と GT0 のコスト比較

UOP は、MT0（原料メタノール 400ドル/トン）、GT0（原料天然ガス 6ドル/百万Btu=300ドル/トン）、CT0（原料石炭 60ドル/トン）の経済性評価を発表した¹⁶⁾（表16）。それによると、生産能力100万トンの軽質オレフィンプラントのキャッシュコスト（償却費・金利を除いた製造コスト）は、MT0が1,040ドル/トン、GT0が580ドル/トン、CT0が370ドル/トンである。安価な石炭を原料に使用するCT0が一番安い。プラント設備費は、MT0が9.9億ドル、GT0が22億ドル、CT0が33億ドルとCT0が断然高い。石炭から合成ガスをつくる工程の設備費が高い。エチレン取引価格1,300ドル/トンの前提で、CT0のNPV（正味現在価値）は42億ドル、IRR（内部収益率）は23%と十分採算が取れる数字になっている。生産能力を60万トンに下げると、NPV 20億ドル、IRR 18%に低下する。

軽質オレフィンの原料費を計算して、表のARC試算の欄に記載した。ここで、CT0の石炭原単位6.8には、石炭がエネルギーとして使用される分を含んでいる。

表16 MT0、GT0、CT0のコスト試算

		MT0	GT0	CT0
	原料	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) (ドル/トン)	1040	580	370
	設備費 (億ドル)	9.9	22	33
	NPV (億ドル)	16<7>	49<26>	42<20>
	IRR (%)	26<21>	32<26>	23<18>
ARC 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
	原料費 (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：生産規模 軽質オレフィン年産100万トン、エチレン価格 1,300ドル/トン
< >内は年産60万トン

出典：UOP 試算はUOP資料¹⁶⁾。ARC 試算は旭リサーチセンター作成。

5.5 エチレンコストの試算——日本経済新聞と IHS

日本経済新聞は2015年3月20日の「原油安 揺れる石化市場」と題するIHS(米国調査会社)と旭リサーチセンターの取材記事³⁸⁾を載せた。そのなかで、日本経済新聞は数社からのヒアリング結果としてエチレンコストのイメージを掲載した。これによれば、エタン・クラッキング法200ドル/トン、中国の石炭原料のMT0法550ドル/トン、ナフサ・ク

ラッキング法は原油安で 1,000 ドル/トンから 700 ドル/トンに低下するというものであった。
ナフサ・クラッキングに対するエタン・クラッキングの優位は変わらないとしている。

また、IHS は 2015 年に地域別のエチレンのキャッシュコスト(単位はドル/トン)を試算している³⁹⁾。それによれば、

米国のエタン・クラッキングは、2011 年 710、2015 年(現在)200、2019 年(予測)590、
中国の CT0 は、2011 年 540、2015 年(現在)410、2019 年(予測)510、
北東アジアのナフサ・クラッキングは、2011 年 1,150、2015 年(現在)545、2019 年(予測)954
である。試算のベースの原料価格については明らかにされていないが、2019 年は原料の
エタン、石炭、ナフサのいずれもが値上がりする前提であろう。

6 脱石油の取り組み

これまで世界的に多様な（省）エネルギー政策が実施されてきたが、その最優先課題は「いかに石油を使わないようにするか」だと考えるとよく理解できる。“脱石油”とよぶべきこれらの試みには、

① 合成ガソリンやバイオ燃料の製造、② 化学原料の転換（石油化学から天然ガス化学、石炭化学、バイオマス化学へ）、③ 電力の石油以外の燃料への転換、④ 自動車用燃費向上やガソリンを使わない車の実用化（電気自動車、燃料電池車）、などが含まれる。

6.1 合成ガソリンの大規模工業化

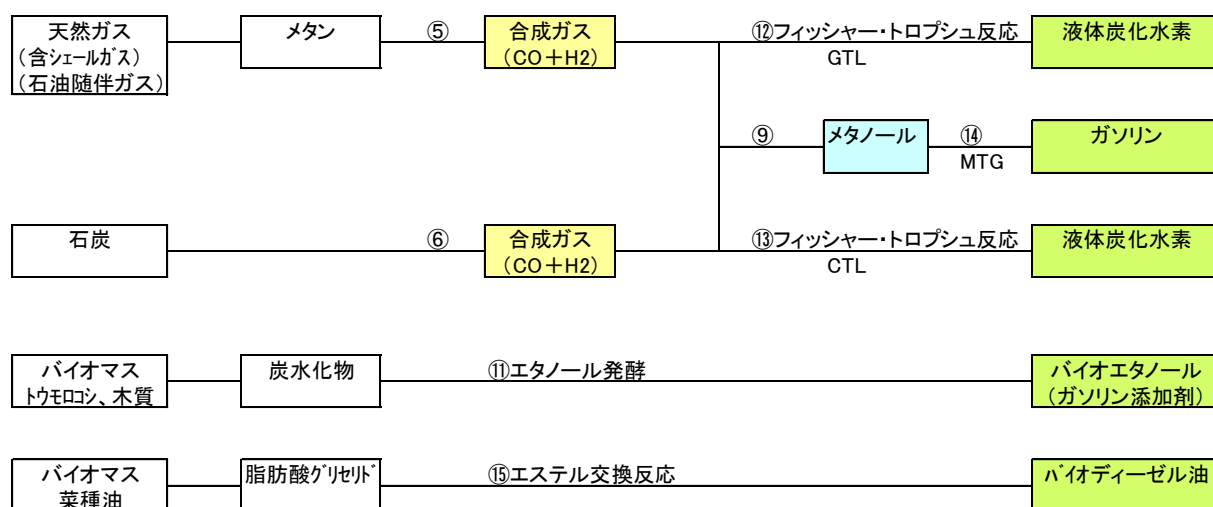
歴史的に原油高と資源の枯渇の恐れから、石油以外の天然資源から合成ガソリンや液体燃料を製造することに多くの努力が払われてきた（図30と表17）。

まず、CTL（Coal to Liquid）やGTL（Gas to Liquid）とよばれる石炭や天然ガスより合成ガソリン（液体炭化水素燃料）をつくるプロセスが、南アフリカのSasolによって開発され、工業化された。天然ガスや石炭からまず合成ガスをつくり、これをフィッシャー・トロプシュ反応により合成ガソリンにする。

さらに、Sasolは米国・ルイジアナ州でシェールガスを原料とする大規模なGTLプラントの建設を計画した（生産能力は400万トンで、投資額は110-140億ドル（1兆1,000億円—1兆4,000億円）。しかし、2015年1月に、プラント投資決定を延期することを発表した⁴⁰⁾。原油価格が下落したことがその理由である。一方、エチレンプラントと誘導品プラントの新設は実行する（立地はルイジアナ州・ウエストレイク、投資額は81億ドル（8,100億円））。

またMobilは、ニュージーランドでメタノールからガソリンをつくるMTG（Methanol to Gasoline）法のプラントを最初に建設した。ゼオライトのZSM-5を触媒に使用する方法で、アルキル多置換芳香族化合物を多く含むガソリンが得られる。中国でも実用化されている（図11）。

図30 合成燃料とバイオ燃料の製造ルート



出典：旭リサーチセンター作成。

表17 合成燃料とバイオ燃料の製造条件と生成物

番号	名称	原料	生成物	反応	反応温度	反応圧力	触媒
⑪	エタノール発酵	コーン スターチなど	エタノール	エタノール発酵			
⑫	GTL	随伴ガス由来合成ガス	液体炭化水素(ガソリン)	F. T反応(流動床)	325℃	大気圧	鉄
⑬	CTL	石炭由来合成ガス	同上	F. T反応(固定床)	220℃	大気圧	鉄
⑭	MTG	メタノール	同上	脱水反応	380℃		Zeolite(H-ZSM5)
⑮	バイオディーゼル	脂肪酸トリグリセリド、メタノール	脂肪酸メチル、グリセリン(副)	エステル交換反応	70℃	1-8時間	水酸化ナトリウム

番号	名称	生成物
⑪	エタノール発酵	エタノール
⑫	GTL	脂肪酸C ₁ -C ₄ 13%、C ₅ -C ₁₁ (ガソリン)18%、C ₁₂ -C ₁₈ (ディーゼル油)14%、C ₁₉ +52%
⑬	CTL	脂肪酸C ₁ -C ₄ 43%、C ₅ -C ₁₁ (ガソリン) 40%、C ₁₂ -C ₁₈ (ディーゼル油) 7%、C ₁₉ + 4%
⑭	MTG	脂肪酸C ₁ -C ₄ 29%、C ₅ + 34%、Bz 1%、Tol5%、Xy12%、芳香族 C ₉ 12%、芳香族C ₁₀ 7%/芳香族計37%
⑮	バイオディーゼル	脂肪酸メチル、グリセリン(副生物)

出典：工業有機化学（東京化学同人、2015）¹⁾ を基に旭リサーチセンター作成。

6.2 バイオマス利用技術の進歩

既に2.6で述べたように、バイオマス由来のバイオエタノールが米国、ブラジルを中心に生産され、ガソリンにブレンドして使用されている。また、バイオマス由来のバイオディーゼル油が欧州を中心に生産され、ディーゼル油にブレンドして使用されている。バイオディーゼル油はメタノールとのエステル交換でつくられるので、メタノールが燃料の一部に使用されていることになる。

6.3 化学品の原料転換

日本は石油の約20%を石油化学原料に使用しているが、米国は約6%と少なく、その他の国も8%を超えるところは少ないといわれる。

日本は石油原料のナフサ・クラッキングの一本足打法であるが、米国はシェールガス、中東は石油随伴ガス(天然ガス)、中国は石炭、ブラジルはバイオマスなど石油以外の資源を活用しているので、石油の依存度が低い。今後世界的には天然ガス化学、石炭化学、バイオマス化学の体系が強化されていくであろう。資源枯渇の順を考えれば、石油化学→天然ガス化学→石炭化学→バイオマス化学の順に重点をシフトする必要がある。

日本も石油原料依存から脱却する方策が必要である。

6.4 燃料の転換—発電の電源別比率の例

2010年の発電の電源別比率に関するOECD資料によれば、日本の石油使用比率は8.8%である。一方、カナダ、米国、フランス、ドイツ、英国、ロシア、中国など主だった国の石油使用比率は1%程度である。2010年は震災前であるが、日本の8.8%はきわだって高い。

さらに、エネルギー白書 2015¹²⁾によれば、日本の電源別比率は2013年(カッコ内は震災前の2010年)に天然ガス43.2% (29.3%)、石油14.9% (7.5%)、石炭30.3% (25.0%)となり、原子力発電の停止により天然ガスと石油の使用比率が増加した。特に、天然ガスの増加が顕著で、貿易収支が赤字になる原因になった。

一方、米国では安い天然ガスを電力に使用する比率が急激に増加した。2005年は石炭が2兆KWh、天然ガスが7,500億KWhであったものが、2012年には石炭1.5兆KWh、天然ガス1.2兆KWhにまで近づいた。少し揺り戻しがあり、EIA、Annual Energy Outlook 2015⁷⁾によれば2013年は天然ガス27%、石炭39%、原子力19%、再生可能エネルギー13%、石油など液体燃料1%であった。これが、2025年には天然ガス27%、石炭38%、原子力18%、再生可能エネルギー16%、石油など液体燃料1%になる見込みである。さらに、2040年には天然ガス31%、石炭34%と両者は近い比率になると予測されている。

2013年の米国の再生可能エネルギーの発電量は約5,000億KWhでその半分が従来の水力発電で、残りが風力発電、バイオマス発電、太陽電池などである。後者の新再生エネルギーによる発電のうちの60%が風力発電であり、次に多いのがバイオマス発電である。

6.5 自動車燃料の節減

自動車燃費改善に向けて開発された各種自動車と既存自動車を比較した（表18）。

表18 各種自動車の比較

車	燃料	駆動系	重要機器	燃費	二酸化炭素 (温室効果 ガスの発生)	排ガス処理	ステージ
ガソリンエンジン車	ガソリン	エンジン			発生する	必要	主流
ディーゼルエンジン車	ディーゼル油 (軽油)	エンジン			発生する	特に必要	欧州に多い
圧縮天然ガス車 (CNG車)	天然ガス	エンジン	CNGボンベ		発生する	必要	大型車
ハイブリッド車	ガソリン	エンジン+モータ	(二次電池)	ガソリン車 よりすぐ れる	発生する (ガソリン車 より少ない)	必要	主流
プラグイン・ ハイブリッド車	ガソリン+電気	エンジン+モータ	二次電池	ガソリン車 よりすぐ れる	発生する (ガソリン車 より少ない)	必要	開発品
電気自動車	電気	モータ	二次電池		発生しない	排ガスなし	導入期
燃料電池車	水素	モータ	燃料電池、 水素ボンベ		発生しない	排ガスなし	導入期

出典：旭リサーチセンター作成。

ガソリン車はハイブリッド車にシフトして、ハイブリッド車が主流になった。ディーゼル車はガソリン車より燃費がいいと宣伝されていたが、フォルクスワーゲンのディー

ゼル車の排ガスデータ改ざん事件以来データの信頼性が失われた。ディーゼル車の販売に大きなブレーキをかけることになった。

次世代車の燃料電池車と電気自動車は、自動車メーカーにとっては二酸化炭素も排ガスも発生しない夢の車である。二酸化炭素と排ガスの両方の厳しい排出規制に永年苦しめられてきた自動車メーカーはこの重い責任から解き放されるからである。そして、利用者はエコカーに乗って環境に貢献していると満足する。

しかし、多くの人がわかっているように、水素も電気も一次エネルギーではなく、一次エネルギーを加工してつくられた二次エネルギーである。つくるときに二酸化炭素と排ガス（NO_xやSO_xなど）が工場から発生する。水素は天然ガス、石油、石炭からつくられるが、その際の炭素分は二酸化炭素になる。天然ガス、石油、石炭などの化石燃料を使用する火力発電では燃焼方程式に従って二酸化炭素が発生する。発生する二酸化炭素と排ガスを自動車のような分散した形でなく、工場で集中的に処理するのは適切な方法である。ただし、排ガス処理は既によい方法があるが、問題は二酸化炭素処理で、現在のところよい方法がない。CCS（Carbon dioxide Capture and Storage：二酸化炭素の貯留）は、実現するとしても相当先である。現状では、自動車が排出していた二酸化炭素を工場が排出することになり、温室効果ガスの問題は解決しない。この“不都合な真実”をよく説明してから、自動車の将来を語るべきだろう。

EIAのAnnual Energy Outlook 2015⁷⁾の「米国の運輸部門の燃料使用見通し」によれば、全燃料の使用量は2013年に比べて2030年は約4%、2040年は約3%減少する。

そして、全燃料使用量（発熱量ベース）の内訳は、
2013年はガソリン58%、ディーゼル油24%、ジェット燃料10%、エタノール4%
2030年はガソリン48%、ディーゼル油31%、ジェット燃料13%、エタノール4%
2040年はガソリン44%、ディーゼル油31%、ジェット燃料14%、エタノール5%
となっている。

ガソリンが減り、ディーゼル油とジェット燃料が増える見通しになっている。乗用車の走行距離が増えず、乗用車の燃費が向上するためガソリンは減ると説明している。天然ガス車（CNG/LNG）の比率は現在のところ非常に少ないが、2030年に1%、2040年に3%

になると予想され、伸びは大きい。米国では運輸部門が石油使用の約79%を占める最大用途であるため、その動向が石油消費に大きな影響を与える。なお、日本の運輸部門の石油使用比率は震災前で約42%である。

以上のように、脱石油のための政策や技術開発により石油依存度は減少してきた。現在は原油価格が下落しているが長続きせず、2028年ごろには100ドル/バレルに戻ると予測されている。脱石油の取り組みは継続すべきである。

7 代表的化学品（誘導品）とコスト

7.1 基礎化学品（エチレン、プロピレン、芳香族化合物）からの誘導品と需要

各国（各地域）のエチレン、プロピレン、芳香族化合物とその誘導品の生産能力、生産量、需要量を表19-21に示す。表中の“計 C2換算”は、低密度ポリエチレン（LDPE）、高密度ポリエチレン（HDPE）、スチレンモノマーなどのエチレン誘導品の生産量をエチレン換算（エチレンの必要量に換算）したものの合計を指す。“計 C3換算”も同様である。

エチレンの主な用途は、ポリエチレン（約59%）、ポリ塩化ビニル（約12%）、エチレングリコール（ポリエステル原料、約14%）、ポリスチレン（約7%）である。カッコ内は、エチレン換算した需要の比率である。4品目で92%を占める。

また、プロピレンについては、その需要の約58%がポリプロピレンであり、上記のポリエチレンの約59%とほぼ同じ比率である。そのほかに、アクリロニトリル、プロピレンオキシド（プロピレングリコール）、オキシアルコール、キュメンに使われる。

また、誘導品は最終的に80～90%はポリマーになっていると推定される

表19 世界の主要石油化学製品の生産能力（2013年）（単位 万トン）

	日本	中国	韓国	台湾	米国	欧州	中東
エチレン（C2）	761	1,940	838	442	2,760	2,560	2,832
LDPE	237	696	218	78	829	951	880
HDPE	119	530	260	67	721	641	852
スチレンモノマー（SM）	267	678	326	203	489	548	305
エチレングリコール（EG）	88	620	136	228	217	135	930
PVC	200	1,864	143	187	759	751	129
その他	142	154	50	32	490	301	166
計 C2換算	733	2,138	789	480	2,717	2,524	2,681
プロピレン（C3）	671	1,989	678	389	1,870	1,807	962
PP	297	1,521	419	135	786	1,093	819
アクリロニトリル（AN）	72	146	85	52	149	86	10
その他	170	947	111	122	667	494	50
計 C3換算	555	2,673	635	318	1,638	1,713	905
ベンゼン	625	1,054	523	212	858	1,056	404
トルエン	235	993	280	11	736	306	244
キシレン	812	1,426	389	287	884	616	472
パラキシレン	395	1,074	613	242	396	262	385
テレフタル酸（PTA）	90	4,013	668	572	369	413	151

注：欧州は西欧と東欧を含みトルコを含まない。

出典：経済産業省資料⁵⁾に基づき旭リサーチセンター作成。

次に、各国（各地域）の生産能力、生産量、需要量の特徴を簡単に述べる。

① 日本はこれまで国内需要と輸出に見合う生産を続けてきたが、国内需要の縮小、輸出競争力の低下、輸入量の増加から生産能力の削減を始めた。

② 中国は、これまで化学品やポリマーの大生産国、大需要国であるとともに大輸入国であったが、生産能力を拡大して自給体制を強化している。一方で、中国経済の成長率は低下するという見方もあり、需要が予想より少なくなると自給率がさらに高まる恐れがある。

なお、中国の生産能力は生産量よりかなり大きい場合が多い（表19と表20の中国欄の黄色地を比較参照）。一例としてメタノールは稼働率50%、アセチレン法ポリ塩化ビニルは稼働率58%といわれる。

中国はエチレンやプロピレンなど基礎化学品レベルでも、エチレングリコールやテレフタル酸などの化学品レベルでも、また最終のポリエチレン、ポリプロピレン、PETなどのポリマーレベルでも需要が生産を上回る輸入国である。表21の中国の需要が表20の生産量をすべて上回っている（特に黄色地比較参照）。また、表21の需要で“計 C2換算”がエチレンを大きく上回っていることからわかる。同様に“計 C3換算”需要がプロピレン需要を大きく上回っている。

しかし、現在設備能力の増強を図り、急速に自給力を高めている。そして国策で、原料を自国の石炭にすることにより、原油の輸入量増加を抑えようとしている。

特筆すべきは繊維（特にポリエステル）である。大量の衣料（繊維製品）が中国でつくられ、世界に輸出された。かつては、その原糸のポリエステル繊維や合繊原料をかなりの割合で輸入した。しかし、今やポリエステル繊維を3,000万トン生産し、世界の約73%を独占するに至った。また2012年、原料のテレフタル酸の巨大プラントを稼働させ（新設3プラント計790万トン、増設150万トン）、合繊原料の自給率も高まった。

③ 韓国は、生産と需要を比較すると、生産が需要を大きく上回る輸出国であることがわかる。韓国は石油化学以外の電機産業などでも日本に比べ輸出比率が数倍高いことが知られている。

④ 台湾も韓国と同様な輸出比率の大きい国である。

表20 世界の主要石油化学製品の生産量（2013年）（単位 万トン）

	日本	中国	韓国	台湾	米国	欧州	中東
エチレン (C2)	670	1,547	833	393	2,503	2,027	2,483
LDPE	169	616	218	59	751	711	746
HDPE	91	477	224	56	662	523	757
スチレンモノマー (SM)	259	444	272	204	441	470	251
エチレングリコール (EG)	72	358	117	211	210	105	890
PVC	149	1,477	137	162	683	568	91
その他	95	123	50	13	460	291	166
計 C2換算	553	1,711	721	408	2,491	2,021	2,389
プロピレン (C3)	565	1,569	614	305	1,394	1,494	742
PP	225	1,218	404	121	702	946	640
アクリロニトリル (AN)	52	111	70	46	134	68	9
その他	131	549	70	113	544	400	50
計 C3換算	419	1,925	563	287	1,413	1,508	719
ベンゼン	469	708	490	173	571	806	298
トルエン	168	478	229	8	598	237	207
キシレン	666	825	313	248	796	372	330
パラキシレン	387	726	582	219	356	211	253
テレフタル酸 (PTA)	76	2,143	587	293	332	286	47

注：欧州は西欧と東欧を含みトルコを含まない。

出典：経済産業省資料⁵⁾に基づき旭リサーチセンター作成。

表21 世界の主要石油化学製品の需要（2013年）（単位 万トン）

	日本	中国	韓国	台湾	米国	欧州	中東
エチレン (C2)	582	1,717	735	399	2,494	2,123	2,389
LDPE	176	1,018	125	40	644	754	277
HDPE	88	941	88	31	584	545	277
スチレンモノマー (SM)	143	820	241	192	304	517	58
エチレングリコール (EG)	45	1,182	117	110	258	161	84
PVC	108	1,510	72	58	417	480	218
その他	94	123	40	13	438	289	166
計 C2換算	484	3,190	437	241	2,165	2,091	908
プロピレン (C3)	419	1,833	536	277	1,413	1,507	719
PP	221	1,575	156	57	609	890	384
アクリロニトリル (AN)	43	166	50	38	94	76	34
その他	110	758	81	113	523	460	50
計 C3換算	384	2,561	296	213	1,274	1,459	483
ベンゼン	405	794	347	244	677	843	279
トルエン	134	563	141	38	612	215	170
キシレン	574	841	373	206	756	357	330
パラキシレン (PX)	55	1,613	366	189	222	200	48
テレフタル酸 (PTA)	67	2,405	292	243	365	248	177

注：欧州は西欧と東欧を含みトルコを含まない。

出典：経済産業省資料⁵⁾に基づき旭リサーチセンター作成。

⑤ 米国は、現在は生産と輸出が比較的バランスが取れているが、2017年以降に新エタン・クラッカーと誘導品の新ポリエチレンプラントが稼働すると、輸出国に転ずる。経済産業省資料⁵⁾の2019年予測では、米国の低密度ポリエチレン (LDPE) の輸出量は191万トン (生産量に対する輸出比率は20%)、高密度ポリエチレン (HDPE) の輸出量は207万トン (同輸出比率は24%)、ポリ塩化ビニル (PVC) の輸出量は210万トン (輸出比率は31%) である。

⑥ 中東は大きな生産設備を有するが、中東内にはこれに見合う大きな市場はない。製品の多くが欧州とアジアに輸出される (表20と表21の黄色地を比較参照)。中東は最も安い天然ガス0.75ドル/百万Btuが最大の武器であったが、この安い天然ガス生産量は頭打ちで既存プラントに供給するだけで精一杯になった。それ以降に建設されたエタン・クラッカーのエタンは米国並みの3-4ドル/百万Btuであった。最近、原油価格下落により中東のエタン・クラッカー建設計画の一つが取りやめになった。

7.2 米国エチレン系誘導品のコスト競争力

上述のように、米国は安いエチレンを武器に、2017年頃よりポリエチレン、ポリ塩化ビニルなどその誘導品を世界に輸出していくと予想される。また、天然ガスの主成分のメタンを原料に安価なメタノールをつくり、メタノールそのものあるいはメタノール誘導体を世界に輸出する可能性がある。この項では、エチレンや天然ガス価格低下により、どの誘導品が競争力をもつようになるかを推定した。

まず、エチレン (Et) のコストが下がったので、エチレン系誘導品の原料コストはエチレン原単位に応じて下がる。また、天然ガスが安くなったので、合成ガスやメタノールを原料とする誘導品のコストも原単位に応じて安くなる。一方、プロピレン (Pr) コストは変わらない、不足すると予想されるブタジエンのコストは高くなり、BTXも不足気味でコストは少し高くなる。そういう前提で、誘導品 (ポリマーなど) についてコストダウンの大きさを比較した (総合表の表22参照)。

(1) 原料コスト

コストダウンの大きい順 (コストダウン ←————→ コストアップ)

エチレン、メタノール>アンモニア>プロピレン>BTX>>ブタジエン

(2) エチレン系誘導品

エチレン (Et) の原単位が大きい誘導品ほどコストダウンが大きい。

① エチレン安のメリットを直接的に受け大きくコストが下がるもの

ポリビニルアルコール	(Et原単位 1.27 メタノール原単位0.57)
ポリエチレン (PE)	(Et 1.00)
エチレン・酢酸ビニル共重合体 (EVA)	(Et 0.86、メタノール 0.14)
(EVAは酢酸ビニル含有量20%と仮定した)	

② エチレン安のメリットを受けるもの

酢酸ビニル樹脂・酢ビモノマー	(Et 0.32、メタノール0.70)
EPDMゴム (Et 60%、Pr 40%と仮定)	(Et 0.60、Pr 0.40)
エチレングリコール (下記注)	(Et 0.47)
ポリ塩化ビニル (PVC)・塩ビモノマー	(Et 0.45、塩素 0.57)
(安価な天然ガスで電気代が安くなるので、電解塩素も安くなる。)	

③ エチレン安のメリットは少なく、他の原料の影響が大きいもの

ポリスチレン (PS)・スチレンモノマー	(Et 0.27、ベンゼン0.75)
ポリエステル (PET) 樹脂・繊維 (下記注)	(Et 0.14、パラキシレン0.55) ¹²

7.3 メタノール・アンモニア系誘導品のコスト競争力

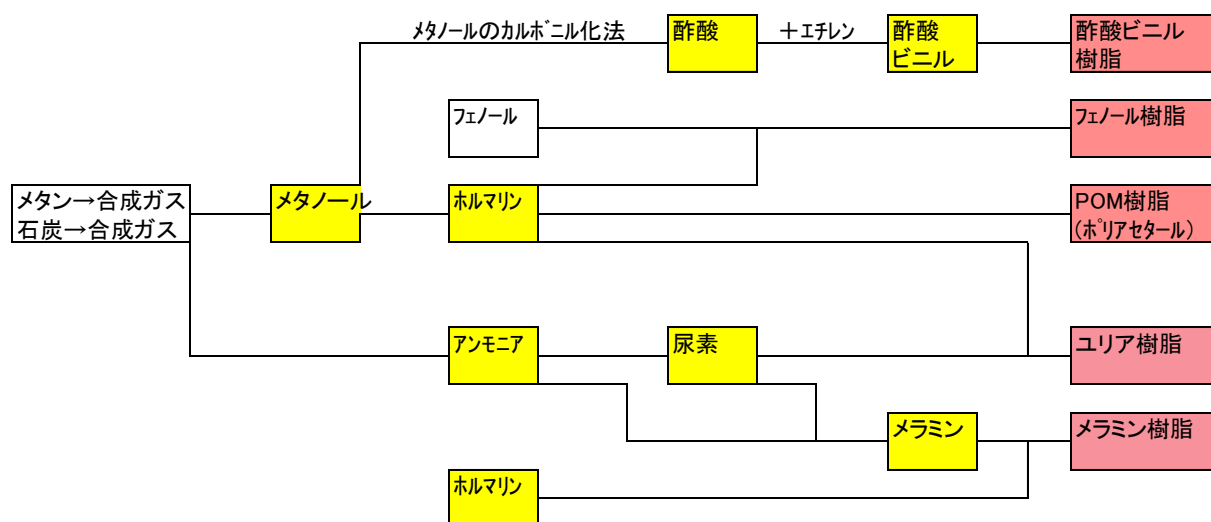
まず、天然ガス主成分のメタンを原料とする基礎化学品のメタノール、ホルマリン (メタノール原単位 1.06)、酢酸 (メタノール 0.53、CO 0.47) やアンモニアのコストは下がる。

さらにホルマリンからつくられるポリアセタール (メタノール 1.06) や、ホルマリンとアンモニアが原料の尿素樹脂 (メタノール 0.30、アンモニア 0.32) やメラミン樹

¹² PETはエチレンの酸化でつくられるエチレングリコールとパラキシレンの酸化でつくられるテレフタル酸の縮合でつくられる。いずれも酸化反応により化合物の分子量が増加するため、素原料のエチレンとパラキシレンの原単位が小さいのが特徴である。

脂（メタノール 0.37、アンモニア 0.53）はコストが下がる。

図31 合成ガス、メタノールを原料とする化成品・ポリマー



出典：旭リサーチセンター作成

7.4 ポリマー種類別のコストダウンの大きさ

ポリマー種類別のコストダウン状況（下線はコストダウンの大きいもの）は以下の通りである。

- ① 汎用樹脂はPE > PVC >> PS > PPの順でコストダウンが大きい。
- ② エンジニアリングプラスチックは、ポリオキシメチレン（ポリアセタール） > PPE > ナイロン6、ナイロン66 > ポリカーボネート（PC） > PBTの順である。
- ③ 特殊樹脂はポリビニルアルコール > EVA >> PETの順である。
- ④ 熱硬化性樹脂はメラミン樹脂 > 尿素樹脂 > フェノール樹脂 >> エポキシ樹脂の順である。
- ⑤ 繊維はポリエステル（PET）、アクリル、ナイロン66、ナイロン6で差がない。
- ⑥ 合成ゴムはEPゴム >> SBR > BRでSBRとBRのコストアップが大きい。

表22にポリマーの種類別のモノマー原単位を示す。

表22 各種ポリマーのモノマー原単位

分類	種類	世界(注1) 2013or14年需要	日本(注2) 2014年生産	主原料	理論原単位				備考
					エチレン	プロピレン	ブタジエン	ベンゼン	
汎用樹脂	LDPE	44,334	1,599	エチレン	1				メタノール・他
	HDPE	37,952	824	エチレン	1				
	PP	52,815	2,349	プロピレン		1			
	PS	10,027	730	スチレン (ST)	0.27			0.75	
	PVC	40,448	1,477	塩化ビニル	0.45			塩素 0.57	
特殊樹脂	PET		671	テレフタル酸、エチレン・グリコール	0.14			パ・ラキレン 0.55	
	PMMA	3,300	150	メタクリル酸メチル (MMA)			イソブチレン 0.56		メタノール 0.32
	ABS	7,500	356	AN、BD、ST	0.13		0.26	0.37	アノモニ 0.08
	AS		75	AN、ST	0.18			0.5	アノモニ 0.1
	エチレン酢ビ (EVA)		215	エチレン・酢酸ビニル	0.86				メタノール 0.14
エンプラ	ポリカーボネート		225	酢ビポリマー	1.27				酢ビ20wt%と仮定
	酢ビ樹脂		(モノマー 575)	酢酸ビニル	0.32				メタノールはメタノールに使用
	Nylon6	合計 2,360	合計 228	カプロラクタム					酢酸はメタノールの加水分解
	Nylon6, 6			ヘキサメチレンジアミン、アジピン酸				0.75	アノモニ 0.16
	PC	3,100	304	BisA、ホスゲン		0.37		0.35	アノモニ 0.15
熱硬化性樹脂	PBT	758	174	テレフタル酸、ブタジエン		0.17		0.61	
	変性PPE	300		2,6-キシレノール			0.25	パ・ラキレン 0.48	ブタジエン法ブタジエン
	POM	1,000	116	ホルマリン				0.65	メタノール 0.53
	フェノール	3,174	284	フェノール、ホルマリン				0.72	メタノール 0.3
	エポキシ		63	尿素、ホルマリン					メタノール 0.30、アノモニ 0.32
合成ゴム	メラミン		81	メラミン、ホルマリン					メタノール 0.37、アノモニ 0.53
	不飽和ポリエステル		103	フタル酸、グリコール、アクリル		0		0	
	アルキド		66	フタル酸、グリセリン、脂肪油				0	
	エポキシ	1,367	124	BisA、アリルグリセロール		0.3		0.55	塩素 0.125
	カルタフォーム		192	TDI、ブタジエン・グリコール		0.69		トルエン 0.02	軟質フォーム
繊維	BR	3,380	290	ブタジエン (BD)			1		
	SBR	4,800	640	ブタジエン、アクリル	0.07		0.75	0.19	
	EPDM		235	エチレン、ブタジエン	0.6				
	ポリエステル	47,934	282	テレフタル酸、エチレン・グリコール	0.14				エチレン60wt%と仮定
	Nylon 6	合計 4,651	合計 98	カプロラクタム				0.75	アノモニ 0.16
	Nylon 6, 6			ヘキサメチレンジアミン、アジピン酸		0.37		0.35	アノモニ 0.15
	アクリル	1,920	140	アクリロニトリル (AN)		0.79			アノモニ 0.32
	ポリプロピレン		129	プロピレン		1			

注1：化学経済 世界の化学工業2015 (PVC、ABS、繊維は2014年需要、その他は2013年需要)。 注2：化学経済 日本の化学工業2015 (2014年需要)。

出典：注1、2以外は旭リサーチセンター作成。

8 シェール革命、中国石炭化学、中東石化が日本の石油化学に与える影響

8.1 日本の石油化学の厳しい状況

2017-18年に完成すると予想される米国のエタン・クラッカーとその結果として起こるポリマーの輸出拡大は、世界の石油化学に大きな影響を与えるであろう。また、これと同時期に中国も大幅なエチレン増産計画を持ち、輸入国から自給率を上げていくと思われる。一方で、中東の増能力は、コスト競争力のある製品のアジア市場と欧州市場への輸出増加を意味する。

日本は需要の減少と輸出競争力の低下により、事業規模を縮小しなければならない厳しい状況にある。10年前にも日本の石油化学の輸出比率が約30%あり、中国をはじめアジア各国が自給体制を整えていく段階で、その分はゆくゆく縮小しなければならないという認識があった。ところが、幸いにもいわゆる中国特需で救われた（今回も世界の需要の伸びで吸収できれば幸いであるが）。

表23の2004年と10年後の2014年を比較すると、エチレン生産量が約100万トン減少していることがわかる。内需の減少と輸入量の増加がその原因である。

表23 エチレン系製品の生産と輸出入推移（エチレン換算）

年	単位 千トン、%						
	輸出 A	輸入 B	バランス A-B	エチレン 生産 C	内需 D=C+B-A	輸出比率 A/C	輸入比率 B/D
2003	2,238	420	1,818	7,367	5,549	30	8
2004	2,206	388	1,818	7,570	5,752	29	7
2005	2,269	422	1,848	7,618	5,771	30	7
2006	2,295	489	1,806	7,523	5,716	31	9
2007	2,390	394	1,996	7,739	5,742	31	7
2008	1,829	541	1,287	6,824	5,595	27	10
2009	2,940	407	2,533	8,912	4,379	43	9
2010	2,435	535	1,901	7,017	5,116	35	10
2011	2,192	709	1,484	6,689	5,205	33	14
2012	1,909	704	1,205	6,145	4,939	31	14
2013	2,398	672	1,726	6,696	4,970	36	14
2014	2,192	737	1,456	6,647	5,191	33	14

出典：石油化学工業会資料⁹⁾に基づいて旭リサーチセンター作成。

そして、今回は相当厳しくなるとの認識から、現在ある15のエチレンプラント（生産能力合計 720万トン）の維持は困難で、生産能力500万トン体制への移行が検討されている。すでに、三菱化学は鹿島一号機休止（2014年）、住友化学は千葉のエチレンプラント休止（2015年）を実施した。また旭化成ケミカルズと三菱化学は水島の2基のエチレンプラントを1基に統合（2016年）する。これで生産能力は約600万トンまで縮小されるが、生産能力500万トン体制にするためには、さらに2基のエチレンプラントの休止が必要となる（表24）。

最近の原油価格の下落によりナフサ・クラッキングの競争力が回復したので、しばらく新たな休止はないであろう。

表24 日本のエチレン・クラッカー生産能力

メーカー名	立地	エチレン 生産能力 (千トン)	出資割合、休止計画
旭化成ケミカルズ	水島	443	三菱化学・水島と統合（2016年）
出光興産	千葉 徳山	374 623	
大阪石油化学	大阪	455	三井化学100%
京葉エチレン	千葉	690	丸善石化55%、住友化学 22.5%、三井化学22.5%
JX日鉱日石エネルギー	川崎	404	
昭和電工	大分	615	
住友化学	千葉	0	380千トン休止済み（2015年）
東ソー	四日市	493	
東燃化学	川崎	491	
丸善石油化学	千葉	480	京葉エチレンと一体運営
三井化学	千葉	553	
三菱化学	鹿島	479	2基中1基（368千トン）2014年休止済み
	水島	431	旭化成ケミカルズと統合 （2016年に2基を1基に統合）
合計		6,531	

出典：石油化学工業会資料⁹⁾に基づいて旭リサーチセンター作成。

8.2 厳しい状況に対する方策

厳しい事業環境に対する方策として、一般にいわれるものは、

- ① 上記の一部設備休止による不採算輸出のカットと稼働率アップによる収益性改善、
- ② エチレン以外のプロピレン、ブタジエン、芳香族の誘導品で競争力アップ、

- ③ 高付加価値誘導品による収益の維持、
- ④ 安い原料をもとめて海外展開などである。

8.3 日本の競争力ある製品、高付加価値品は？

日本の競争力のある製品や高付加価値品、および技術を下記の①～⑤に列挙してみた。

- ① ブタジエン系：汎用合成ゴムの末端変性溶液重合SBR（低燃費タイヤ用）、熱可塑性ゴム[水素添加SBS（SIS）ブロック共重合体]。
- ② C₄留分のシクロペンタジエン系：環状ポリオレフィン。
- ③ エチレン系：メタロセン触媒系LLDPE、（超）高分子量PE、ポリビニルアルコール、エバール、ポリ塩化ビニル。
- ④ プロピレン系：アクリロニトリル（AN）とプロパン法AN技術、ポリプロピレン（PP）技術、PPコンパウンド、アクリル酸—吸水性ポリマー（SAP）、アクリル繊維→カーボンファイバー。
- ⑤ 合成ガス系：エチレングリコール、ジメチルカーボネート（DMC）。

このうち、末端変性溶液重合SBRは低燃費タイヤ用に開発されたもので、日本が強い製品で、世界のリーダーである。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、稼働した¹²⁾。汎用石油化学製品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。

また、日本の化学工業の強みは液晶用フィルムのような機能性ポリマー加工品である。日本企業がこのような各種機能性ポリマー加工品を、世界の電気・自動車・医療産業に供給していることはよく知られている。

当然のことながら、製品Kg当りの付加価値の大きさとともにその市場規模が重要である。その掛け算が付加価値の大きさの絶対額になる。日本の化学工業を支えるに十分な高付加価値製品の開発が待たれる。

8.4 海外展開

以下に、日本メーカーの海外進出の一例を挙げた。

信越化学はポリ塩化ビニル事業を米国中心に展開して、世界トップのシェアを獲得している。今回子会社のシンテックがルイジアナ州にエチレン工場の建設を決定したことは特筆される。

住友化学はシンガポールに次いで、サウジアラビアに進出しラービグで第1期の大型エチレンセンターを稼働している。第2期工事も完成し、2016年に稼働する。

旭化成ケミカルズはアクリロニトリルで韓国、タイに進出した。タイでは天然ガス由来のプロパンを原料にして、一段でアクリロニトリルを合成する方法を工業化した。

旭硝子はインドネシアでポリ塩化ビニルの大型プラントを建設中である。

日本企業のMT0、MTP事業への進出も間近かもしれない。

8.5 原油価格の下落の影響

高コスト構造に悩む日本の石油化学にとって、原油価格の下落は慈雨であった。日本の石油化学（ナフサ・クラッキング）の競争力が回復した。米国のエタン・クラッキングの優位は変わらないが、その差は相当縮まった（5章参照）。すでに述べたように中国のアセチレン法ポリ塩化ビニルよりもエチレン法ポリ塩化ビニルの競争力が高くなり、中国からの輸出が減少した。中国のCT0（MT0/MTP）とのコスト差も縮まった。

タイ、マレーシアなど東南アジアは自国の天然資源を一部使用しているので、日本、韓国、台湾の東北アジアよりエチレンのコスト競争力があるが、その差も縮まった。

慈雨が続く間に、日本の体質強化が進むことが期待される。

おわりに

本リポートは、天然資源化学の基本技術、応用、最近の動向について、できるだけグローバルに、かつ定量的に説明することに努めた。この分野に興味のある方に役に立てば幸いである。調査をして、世界の化学工業がダイナミックに変化していることをあらためて感じた。

日本の化学工業は困難な状況であるが、過去に繊維不況、2回にわたるオイルショック、バブル崩壊と失われた10年、リーマンショックなどを経験し克服してきた。今回も課題先進国的取り組みで解決することが期待される。

かつて、台湾の奇美実業は原料モノマー（スチレン、ブタジエン、アクリロニトリル）をすべて外部購入して、ABS樹脂の生産に専念して生産能力を100万トン/年まで拡大して世界のトップとなった。これは、横型コンビナートと称された。縦型のエチレンコンビナートしか無かった当時、このビジネスモデルは非常に新鮮であり、衝撃的であった。既存のものにとらわれない自由な発想が重要である。

最後に新年の初夢を語っておわりにしたい。

一富士：かつての「C1ケミストリー研究」以来、未踏の技術であったメタンから直接オレフィンをつくることに成功する¹³。特定のX化合物存在下に新規な触媒を使う。不安定な反応中間体を特定のX化合物がキャッチし、反応中間体が分解することを防止し、次のオレフィン合成に導く。これがブレイクスルーのポイントである。そうこうするうちに、メタンハイドレートが日本の海底から経済的に採取できるようになり、メタンが自給できるようになる。

二鷹：セルロースを簡単に分解して糖をつくるスマートな酵素が、シロアリからつくられた。シロアリは木材から糖をつくる名人である。

三茄子：化学反応式（ $2\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ）通り、合成ガスからエチレングリコールを一段でつくる触媒が見つかった。合成ガス中の酸素がエチレングリコールに残る。

¹³ 現在は工業的にメタンから直接エチレン、プロピレンをつくることはもとより、エタンやプロパンをつくることもできない。また、工業的にメタンから直接メタノールをつくることもできていない。

参考・引用文献

- 1) 「工業有機化学」、田島慶三、府川伊三郎訳、東京化学同人、(上)2015年10月、(下)2016年5月(予定)：原著は、Industrial Organic Chemicals, Wittcoff, Reuben, Plotkin, Wiley, 2013である。工業有機化学を体系的に知るのに役にたつ。
- 2) 府川伊三郎、ARCレポート(RS-970)“「石油化学」から「天然資源化学」へ”、2014年4月、www.asahi-kasei.co.jp/arc/service/pdf/970.pdf
- 3) 府川伊三郎、“石炭由来オレフィンの技術と競争力”、化学経済 2014年12月、36頁
- 4) 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
- 5) 経済産業省：世界の石油化学製品の需給動向(対象期間2006～2019年)、2015.6.12
- 6) 化学工業日報社、化学経済(月刊)、2015年版「化学工業白書」 2015年7月、2015年版「世界化学工業白書」2015年3月、 2015年版「アジア化学工業白書」2015年12月
- 7) U.S. Energy Information Administration (EIA) 資料
 - ・ Drilling Productivity Report(November 2015)
 - ・ Short-Term Energy Outlook(STEO)(December, 2015)
 - ・ Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040 (April, 2015)
 - ・ AE02014 Early Release Overview(December, 2013)
 - ・ Today in Energy (30 September 2015, 13 February 2015, 26 August 2015)
- 8) 米国化学工業会(American Chemistry Council)資料
 - ・ Shale Gas, Competitiveness, and New US Chemical Industry Investment, American Chemistry Council, May 2013
 - ・ Plastic Resins in the United States, American Chemistry Council, Jul. 2013
- 9) 石油化学工業協会(略号 石化協)のホームページ
 - ・ 「シェールガスが我が国石油化学産業に及ぼす影響に関する調査研究結果について」、石油化学工業協会、2013年5月23日
- 10) JPEC (Japan Petroleum Energy Center：石油エネルギー技術センター) レポート
 - ・ 北米への本格進出を開始した中国石油各社、2014. 11. 25

- ・プロピレン増産に向け中国で相次ぐプロパン脱水素計画、2014. 2. 25
- 11) 府川伊三郎、
 - ・ARCリポート (RS-985)、“低燃費シリカタイヤと溶液重合SBR&BR”、2015年2月、www.asahi-kasei.co.jp/arc/service/pdf/985.pdf、
 - ・ARCリポート (RS-989)、“溶液重合ゴムのイノベーション”、2015年6月、www.asahi-kasei.co.jp/arc/service/pdf/989.pdf
 - ・化学経済、“低燃費タイヤ用ゴムの日本初イノベーション”、(上) 2015年9月号 56頁、(下)2015年10月号 92頁
- 12) エネルギー白書 2015、経済産業省・資源エネルギー庁
- 13) UOP Oleflex: www.uop.com/processing-solutions/petrochemicals/olefins/
- 14) Lumuss Catofin: www.cbi.com/images/uploads/.../CatofinDehydrogenation-12.pdf
- 15) Uhde STAR: www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/.../uhde_b...
- 16) UOP MTO:UOP ホームページ、www.uop.com/
 - “Methanol to Olefins “, IOCL, Conclave, Feb. 7, 2014,
 - “MTO/OCP: a strategic research project - Total Refining & Chemicals”
 - www.totalrefiningchemicals.com/.../brochure_mto_en.pdf
- 17) DICP DMT0 : www.dmt0.dicp.ac.cn/english/doshow1.php?id=10
 - ・CEN, 30, August 31, 2015
- 18) Sinopec SMT0 : newsheadlinenews.blogspot.com/.../sinopec-to-build-t...
- 19) Lurgi MTP: Air Liquide (Lurgi 親会社) ホームページ (www.airliquide.com/)
 - ・H. Koempel, W. Liebner, M. Wargner “Lurgi’s Gas To Chemicals (GTC)” , Gastech 2005, Bilbao, Spain, 14-17 March 2005
- 20) GE : www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/.../ge
- 21) www.orbichem.com/.../APIC%202014/APIC2014_02_Gillian_Tweddle.pdf
- 22) 石橋喜孝、IGCC 商用設備の最近の運転状況、課題と今後の展開、
www.joban-power.co.jp/igccdata/.../201402_Nipponkeikakukenyuujo.pdf
- 23) ・松島一美、拡大する石炭由来オレフィン生産、化学経済 2014 年 12 月号、25 頁

- ・林石英、原田道昭、中国における石炭高度利用の現状と展望、化学経済、2014 年 12 月号、44 頁
- 24) 宇部興産、ハイケム(株):・highchem.co.jp/business/technologylicense.html
 ・highchem.co.jp/global-data/2015070816100554.pdf?20150708161008 (2015. 7. 8)
- 25) Eastman: www.eastman.com/.../Eastman_Develops_New_MEG_Technology.aspx
- 26) BP: www.2blstconsulting.com/bp-mulls-over-world-scale-chemical-complex-in-oman/ 2014/4/24
- 27) Celanese: www.petrochemconclave.com/presentation/.../Mr.PBroussard.pdf, 2014
- 28) BASF:・www.hydrocarbonprocessing.com/.../BASF-picks-Air-Liquide-technology-for-new-Texas-methane-to-propylene-unit.html,
 ・www.basf.com/en/company/news-and.../p-15-176.html (2015 3 19)
- 29) P. Jhonston(Johnson Matthey), N. Carthey (Johnson Matthey), G. J. Hunchinngs, J. Am. Chem. Soc., 2015 137 (46), 144548-144557
- 30) 信越化学: <https://www.shinetsu.co.jp/jp/news/archive.php?id=1087> (2015 4 23)
- 31) www.businesswire.com/.../Axial-Lotte-Chemical-Final (2015 6 17)...
- 32) www.kagakukogyonippo.com/headline/2015/03/18-19503.html
- 33) Formosa: IHS Chemical Week, September 7/14, 9, 2015
- 34) 天然ガスや原油の価格: ecodb.net
- 35) Baker Hughes: phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?...rigcountsovervie
- 36) KBR:・www.businesswire.com/news/home/20111018005772/ja/,
 ・www.beta.kbr.com/.../Naphtha-Cracking-for-Light-Olefins-P
- 37) Denise Fan, Ethylene Formation by Catalytic Dehydration of Ethanol with Industrial Considerations, Materials 2013, 6, 101-115
- 38) 日本経済新聞 “原油安 揺れる石化市場” 2015年3月20日
- 39) IHS: IHS Chemical insight&Consulting Bulletin 2015 issue 2, page10
- 40) Sasol: www.ogj.com/.../citing-lower-oil-prices-sasol-delays-louisiana-gtl-plant-investment.html 28 Jan 2015

<本レポートのキーワード>

石油化学、シェールガス・オイル、石炭化学、石油価格下落、エチレン製造コスト、バイオエタノール、MTO、PDH、メタノール、合成ガス

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

注：内容の無断転載を禁じます。