

「石油化学」から「天然資源化学」へ シェール革命と現代的石炭化学のインパクト

従来の「石油化学」から、石油、天然ガス、石炭、バイオマスなどを総合的に利用する「天然資源化学」の時代になった。米国のシェール革命をベースとする天然ガス化学の復興、中国の安価な石炭を使ったオレフィン製造技術などの「現代的石炭化学」がその代表である。

2014年4月



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)

< 本レポートのキーワード >

石油化学、シェールガス、中国石炭化学、エタン・クラッキング、MTO、MTP、PDH、
バイオマス、天然ガス化学、NGL、合成ガス、メタノール、脱石油

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

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

まとめ

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に利用する「天然資源化学」の時代になった。

日本の石油化学はすべてナフサ・クラッキングであるが、米国は安価なシェールガスを原料とするエタン・クラッキングにシフトし、高い競争力を持つようになった。高価な石油を使う世界のナフサ・クラッキングメーカーは脅威に感じている。

中国は安価な石炭を原料にして、合成ガス、メタノールを経てオレフィンを作る新しいプロセス（MTOとMTPプロセス）を大規模に工業化し、これを全国で拡大している。また石炭からアセチレンを作り、ポリ塩化ビニルを作っている。中国は国策的に石炭化学を推進していて、“現代的石炭化学”と称している。

米国のシェール革命によるエタン・クラッキングの増設と中国の自給体制推進によって、世界の石油化学は大きな影響を受けるであろう。

シェール革命により米国は2013年に天然ガス、石油ともに世界最大の産出国になった。19年には天然ガスの輸入国から輸出国に転換し、エネルギー全体の自給率が20年には94%まで高まる。

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取組が各方面でなされている。自動車の燃費節減、電気自動車・燃料電池車の導入、電力用燃料に石油を極力使用しないこと、石油化学から「天然資源化学」への転換、合成ガソリンの製造などはいずれも脱石油の動きである。

米国シェール革命によるエチレンやメタノールのコスト低下は、誘導品（化学品やポリマー製品）のコスト低下につながる。誘導品のエチレン原単位、メタノール原単位などからコストダウンを推定した。一方、今後不足するブタジエンについてはコストアップが予想され、同様に誘導品のコストアップの影響を推定した。

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発表されている。今後、独自の付加価値品を中心とした強い事業内容への再構築が求められるであろう。

国別・地域別状況の比較(まとめ)

国名・地域		日本	米国	中東	中国	西ヨーロッパ
化学工業の特徴		石油化学	シェール革命 天然ガス化学	天然ガス化学	現代的石炭化学 石油化学	石油化学
エネルギー源	石油	1)				
	天然ガス		(安価)	(安価)		
	石炭				(安価)	
化学品原料とプロセス	石油 (ナフサ・クラッキング)		(減少へ)			
	天然ガス (エタン・クラッキング)		(増加へ)			
	石炭 (アセチレン法) (MTO、MTP)				(アセチレン法) (MTO、MTP増加)	
エチレン生産能力(万トン)	2012年	761	2,670	1,520(サウジ)	1,551	2,700(欧州・CIS)
	2017年	689	3,346	1,700(サウジ)	2,693	2,800(欧州・CIS)
	新規設備		2017年末 620 (エタン・クラッカー)		ナフサ・クラッカー とMTO、MTP 2)	
エチレンコスト					~	
プロピレンの供給	クラッキング					
	石油精製	~				~
	その他新規		プロパン脱水素(P DH)の新設	メタセシス	MTP	
ベンゼン・トルエン・キシレン (BTX)の供給	クラッキング				n.a.	
	石油精製	~			n.a.	~
ブタジエンの供給						

1) 、 、 は特徴を明確にするための定性的評価

2) MTO: メタノール to オレフィン(Et&Pr) MTP: メタノール to プロピレン

3) 黄色は本レポートで特に取り上げたところ

目 次

はじめに	1
第 1 章 石油化学から天然資源化学へ	2
1.1 石油化学の基本 (図 1、表 1)	2
1.2 新たな動きー合成ガス・メタノール 化学 (図 2、表 2)	4
第 2 章 大きく変わる世界の石油化学のビジネスマップ	10
2.1 エチレン (表 4、図 4)	10
2.2 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	11
2.3 プロピレン、ブタジエン、芳香族化合物 (BTX) の製法 (表 7)	13
2.4 各国の状況	15
第 3 章 世界のエネルギー事情と化学工業への影響	20
3.1 米国シェールガス、シェールオイル	20
3.2 天然ガス価格	23
3.3 石油と天然ガスの比較	23
3.4 脱石油の動き	23
第 4 章 シェールガス革命と石油化学	27
4.1 米国でシェールガスの恩恵を受けているのは?	27
4.2 厳しい競争と限界生産者	28
4.3 天然ガスの米国と国際市場の価格差の理由	28
4.4 米国、新設エタン・クラッカーの利益の推定	29
4.5 今後も米国は天然ガス価格が安い状態が続くか?	29
4.6 エチレンコスト安の誘導品コストへの影響-競争力あるポリマーは何か?	30
第 5 章 シェールガス革命の日本の石油化学に与える影響	34
5.1 日本の石油化学の厳しい状況	34
5.2 厳しい状況に対する方策	35
5.3 日本の競争力ある高付加価値品は?	35
5.4 海外展開	36
おわりに	37
引用・参考文献	38

はじめに

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、中国の新たな石炭化学の台頭である。その技術と市場について、最近の状況をまとめた。

特に、米国は安価な天然ガス原料を使用したエチレンが高い競争力を持つようになった。高価な石油を原料とするナフサ・クラッキングのエチレンの3分の1ないし5分の1のコストでできるということで日本にとって大変な脅威である。このエチレンを使ったポリエチレンは非常に競争力があり、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。同じく天然ガス由来で安くなるメタノールを原料とする誘導体ポリマーも競争力を増すであろう。エチレンやメタノールの原単位から競争力を評価した。将来、ポリエチレンを中心に大量の樹脂が米国から輸出され、日本は大きな影響を受けるであろう。これに関連して、高い石油と安い天然ガスの大きな価格差が将来縮まるかどうかの観点から最近のエネルギー事情をまとめた。

また、米国のシェール革命以上のインパクトを与えるかもしれないのが中国の「現代的石炭化学」である。安価な石炭を武器に、カーバイド法のポリ塩化ビニルの生産を拡大するとともに、石炭から作った合成ガスをメタノールに転換し、メタノールからエチレンやプロピレンを作るMTOプロセス、MTPプロセスを世界に先駆けて工業化し、大規模工場を続々建設している。

一方、日本は米国と中国に挟まれ苦戦しており、新たなビジネスモデルが求められている。日本はナフサ・クラッキングのみで、石油化学の知識や情報がそこに限定されやすい。本レポートでは天然ガス化学と石炭化学について詳しく取りあげた。

本レポートは、図表を飛ばして文章部分だけ読んでも内容が分かるように作成した。

第1章 石油化学から天然資源化学へ

1.1 石油化学の基本 (図1、表1)

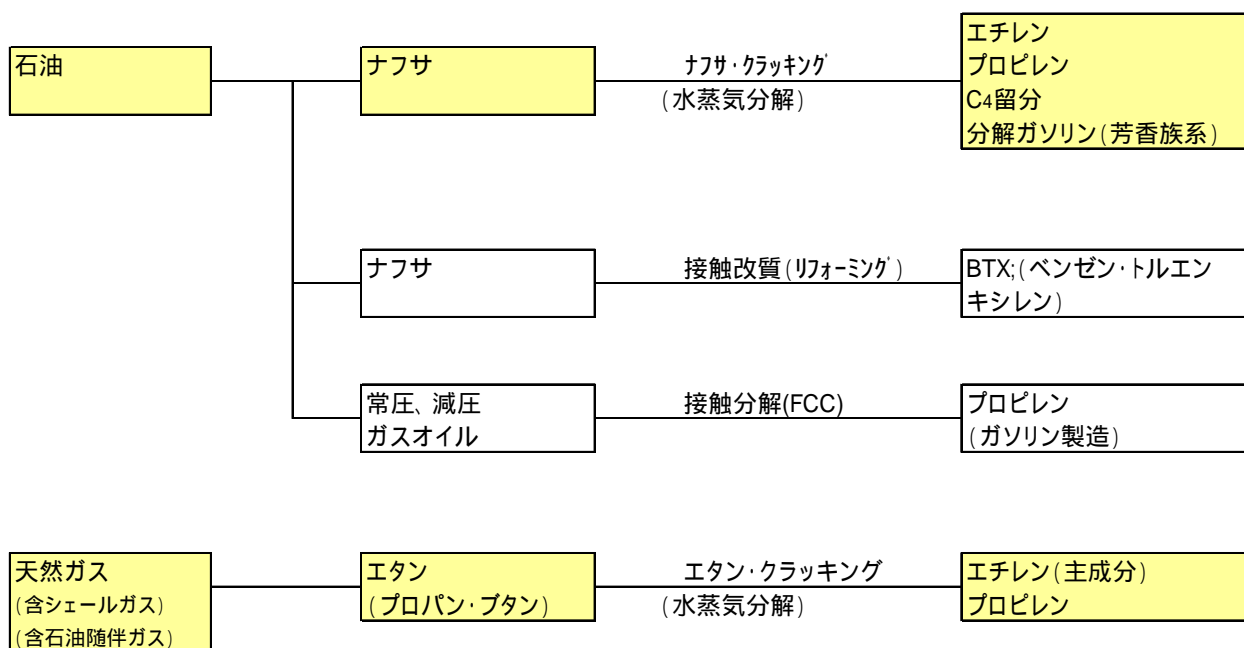
(1) 日本の石油化学の基本は、ナフサの水蒸気分解 (スチーム・クラッキング) のいわゆるナフサ・クラッキングが中心である。これによりエチレンを主製品として、プロピレン、C₄留分 (ブタジエン、ブテン類)、分解ガソリン (ベンゼン、トルエン、キシレン等芳香族化合物) が連産品として得られる。エチレンの需要量に合わせて、エチレンを生産すると、連産品の生産量は下表に示すような比率から決まってしまう。連産品の需要量が生産量がより多い場合は、他の製造方法で製造することが必要となる。通常、不足するプロピレンは石油精製 (リファイナリー) の接触分解 (FCC) から、また不足する芳香族化合物は石油精製 (リファイナリー) の接触改質 (リフォーミング) からそれぞれ調達する。韓国、台湾、西ヨーロッパは、ほぼこの形態である。

(2) 一方、軽質原料 (エタン (主)、プロパン、ブタン) の水蒸気分解のいわゆるエタン・クラッキングによるエチレン製造が、シェールガス (非在来天然ガス) が安価になったことから米国でその比重が急激に高まっている。米国のエチレンは高いコスト競争力を持つに至り、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。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連産品がナフサ・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いる。

製法と生産量比率 (重量比)	エチレン (C ₂)	プロピレン (C ₃)	ブタジエン (C ₄)	その他 C ₄ 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)

表1 とその他資料よりARC作成

図1 石油化学と石油精製の関係



ARC作成

表1 石油化学と石油精製の関係 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
	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
	接触改質	ナフサ	BTX	接触改質	400 - 500	25 - 35気圧	Pt(Re)- アルミナ
	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
	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

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。

番号	名称	生成物
	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)
	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(%))
	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(%)
	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

1. 接触分解には、プロピレン収率を20 - 25%に上げたプロセス(Enhanced FCC)もある。

2. Industrial Organic Chemicals, Wiley, 2013などをもとにARC作成

1.2 新たな動き－合成ガス・メタノール 化学（図2、表2）

（1）合成ガス メタノールを基幹ルート

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。合成ガスは石炭か天然ガスから作られる。中国は主として石炭から、中東などでは天然ガスの主成分のメタンから作っている。そのため、合成ガス メタノールルートは石炭化学と天然ガス化学の共通ルートになる。

合成ガスとは、一酸化炭素（CO）と水素（H₂）の混合物で、その組成は用途に応じて調整できる。メタノール合成には、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

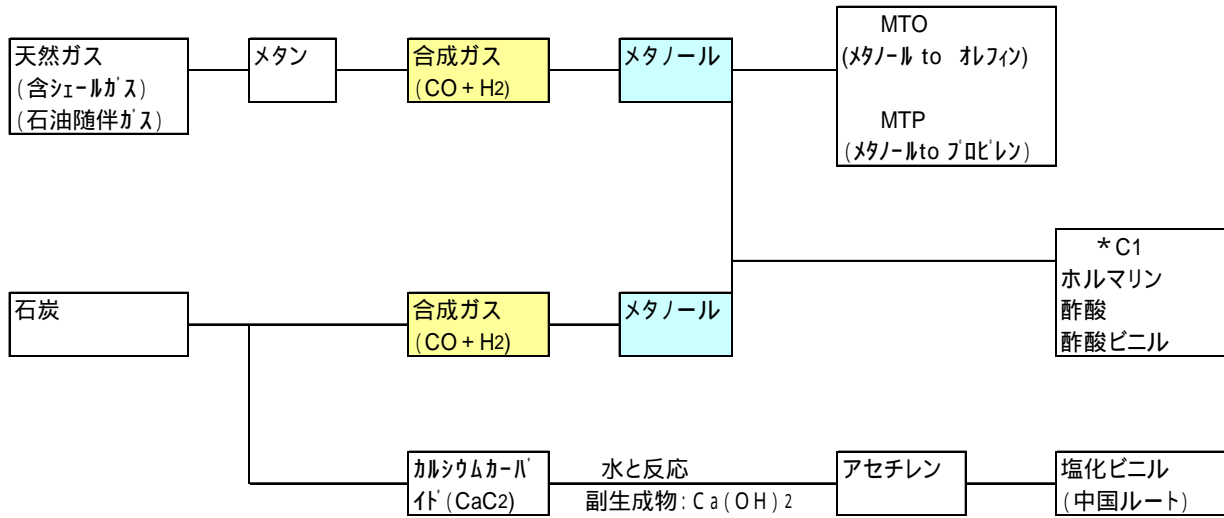
触媒を使って合成ガスを200℃で反応させるとメタノールができる。近年、大型のメタノール製造設備（メガメタノールプラント、百万トン/年以上）が建設されている。メタノールの世界需要は61百万トンで、エチレンの124百万トンの半分に当る大きな量である。メタノールの主用途は化学品原料50%（ホルマリン31%、酢酸10%、MTO/MTPなどオレフィンの9%）、燃料33%〔ガソリン・燃料・DME（ジメチルエーテル）23%、MTBE（メチルト-ブチルエーテル）10%〕、その他17%である。

（3）MTOとMTP

最近の動きとして特に注目すべきは、メタノールからエチレン、プロピレンを作るMTO（Methanol to Olefin）プロセスとメタノールからもっぱらプロピレンを作るMTP（Methanol to Propylene）プロセスである。MTOプロセスは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で作るプロセスである。最初に米国UOPが開発した技術で中国にライセンスされているが、中国も独自技術を開発し工業化している（中国科学院大連化学物理研究所のDMTO（Dalian MTO）プロセスやSinopec（中国石化）のSMT0（Sinopec MTO）プロセス）。一方、MTPプロセスは、ゼオライト系のZSM-5を触媒に使用し、もっぱらプロピレンを生成する。もともとLurgiが開発したものである

が、中国にライセンスされている。中国では、すでに大型のMTO/MTPプラントが10ヵ所程度稼働しており、また新たな工場建設が全国的にすすめられている。工場はオレフィン年産50万トンがワンユニットで、規模が大きい。工業的に石炭やメタンからオレフィンが製造される新時代になった。

図2 合成ガス化学とメタノール化学のフロー



ARC作成

表2 合成ガス化学とメタノール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
	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)
	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	
	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
	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
	MTP (Lurgi)	メタノール	プロピレン	脱水反応	425	1.5気圧	Zeolite (H-ZSM5)
	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

Industrial Organic Chemicals, Wiley, 2013などをもとにARC作成

(4) 合成ガス メタノールルートを利用した新プロセス

今後、この合成ガス メタノールルートを利用した各種のプロセスが工業化される見込みである。2013年末に各社より発表が相次いだ。

宇部興産は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中国で工業化するとともに、積極的に中国の複数の会社にライセンスをする計画を発表した。

Eastmanは同じく合成ガスからMEGを作る新合成法を発表した。

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。

Celaneseは合成ガスから作った酢酸を水素還元してエタノールを合成するTCXプロセス™ を中国で事業化することを発表した。エタノールは燃料用途を考えている。

(参考：現行のエチレングリコール (EG) の製法はエチレン酸化法であるが、エチレンオキシド (EO) を作る時にエチレンの20%は燃えてCO₂になってしまう。次にEOを水和してEGにする段階ではEGの二量体 (ジ) と三量体 (トリ) が副生し、また水との分離に多量のエネルギーを消費する。モノ (MEG) だけを作る省エネプロセスが求められている。)

(5) 合成ガソリン・合成燃料 (図3、表3)

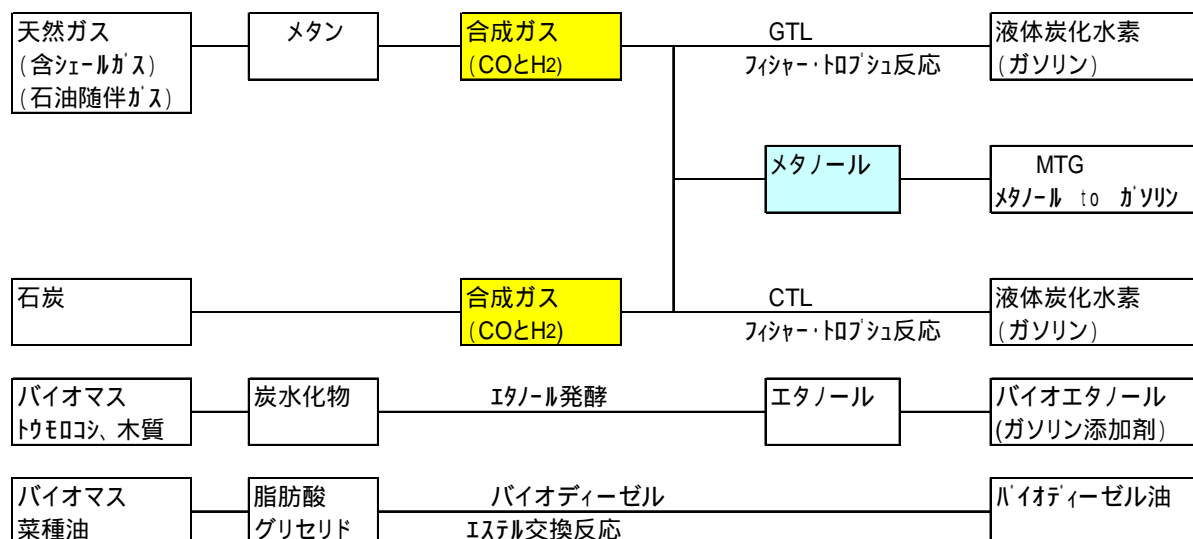
CTL (Coal to Liquid) やGTL (Gas to Liquid) と呼ばれる石炭や天然ガスより合成ガソリンを作るプロセスが、南アフリカのSasolによって開発され工業化されている。天然ガスや石炭からまず合成ガスを作り、これをフィシャー・トロプシュ反応により合成ガソリンにする。

石油が100ドル/バレルの高値にあり、天然ガスや石炭との価格差が大きくなったことから、プラント建設のインセンティブが大きくなった。Sasolはテキサス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ている。

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作るMTG (Methanol to Gasoline) プロセスのプラントを建設した。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。

また、バイオマス原料のバイオエタノールやバイオディーゼル油が大量に作られるようになっている。バイオディーゼル油は脂肪酸グリセリドをメタノールでエステル交換して作られる。

図3 合成ガソリンとバイオ燃料



ARC作成

表3 合成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
	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			
	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
	CTL	石炭由来合成ガス	同上	F.T反応(固定床)	220	大気圧	鉄
	MTG	メタノール	同上	脱水反応	380		Zeolite(H-ZSM5)
	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
	エタノール発酵	エタノール
	GTL	脂肪酸族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%
	CTL	脂肪酸族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%
	MTG	脂肪酸族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%
	バイオディーゼル	脂肪酸メチル、グリセリン(副生物)

Industrial Organic Chemicals, Wiley, 2013などをもとにARC作成

* 参考

1. MTO, MTP

メタノールの脱水で作るため、オレフィン（エチレン、プロピレン）を1.0トン作るためにMTOでは3.0トン（MTPでは3.1トン）のメタノールが必要で、副生の水が1.7トン（1.8トン）と大量に生成する。それ以外に炭化水素副生成物が0.3トン（0.4トン）発生する。

一方、エタン・クラッキングでは、オレフィン1.0トン作るためにはエタンは1.2トンですむ。大量の水の発生がMTO、MTPの弱点である。

2. 合成ガスの合成、組成、用途

合成ガス反応の基本反応（化学量論式）は、

天然ガス（ CH_4 ）では $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ 、

石炭（組成は CH ）は $\text{CH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3/2\text{H}_2$ になる。

反応後に別の反応器で $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ のシフト反応（平衡反応）を起こすことができる。この二つの反応をうまく利用すると、COと H_2 の比率（組成）を変えることができる。

用途的には、

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。

酢酸はメタノールのカルボニル化（CO化）で作られるので、トータルは $\text{CO} + \text{H}_2$ のガスが必要になる。

宇部興産やBPのモノエチレングリコール合成には $\text{CO} + \text{H}_2$ が必要である。

Celanese・TCX法は酢酸の水素還元なのでトータルで、 $\text{CO} + 3\text{H}_2$ のガスが必要となる。

アンモニア合成には、純粋の水素が必要である。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呼ぶことがある。

第2章 大きく変わる世界の石油化学のビジネスマップ

2.1 エチレン（表4、図4）

2005年の世界のエチレン生産能力（年産）は、米国（28.3百万トン）がトップで、日本（7.4百万トン）が第2位であった。しかし、12年には米国（26.7百万トン）、中国（15.5百万トン）、サウジアラビア（15.2百万トン）、韓国（7.8百万トン）に次いで日本（7.6百万トン）は第5位と大きく順位を下げた。この期間に中国、サウジアラビアはともに約10百万トンの能力アップを達成している。17年の予想では米国がシェールガス革命による積極的な投資で7百万トンの増能力を実施して33百万トンに、中国はナフサ・クラッカーやMT0プロセスによる13百万トンの増能力により27百万トンになると見込まれている。日本は能力削減の方向であり、地位低下が顕著である。

表4 世界のエチレン生産能力（2005、2012、2017年、単位千トン）

国名・地域	2005年		2012年		12年/05年 能力比	2017年 エチレン能力
	順位	エチレン能力	順位	エチレン能力		
合計	—	115,000	—	150,360	1.31	
米国	1	28,323	1	26,697	0.94	33,460
中国	4	6,230	2	15,510	2.49	26,930
サウジアラビア	3	6,700	3	15,200	2.26	17,000
韓国	5	5,735	4	7,830	1.36	8,120
日本	2	7,405	5	7,610	1.02	6,890
ドイツ	6	5,516	6	5,743	1.04	
カナダ	7	5,276	7	5,604	1.06	5,660
イラン	26	720	8	5,320	7.39	
タイ	17	1,982	9	4,436	2.24	4,440
台湾	12	2,850	10	4,050	1.42	3,920
ブラジル	11	2,925	11	4,025	1.37	5,290
オランダ	8	3,915	12	3,965	1.01	
インド	14	2,636	13	3,697	1.4	14,890
ロシア	9	3,670	14	3,490	0.95	
フランス	10	3,373	15	3,373	1.01	
英国	13	2,835	16	2,855	1.01	
シンガポール	18	1,900	17	2,800	1.47	4,000
カタール	22	1,025	18	2,520	2.45	
ベルギー	15	2,180	19	2,460	1.13	
イタリア	16	2,170	20	2,170	1.01	
1 - 20の合計				129,355		
出典	化学経済増刊号		世界化学工業白書 2013年他			経済産業省 資料(2013年)

上記資料に基づきARC作成

図4 主要国のエチレン生産能力推移と予測（単位千トン）

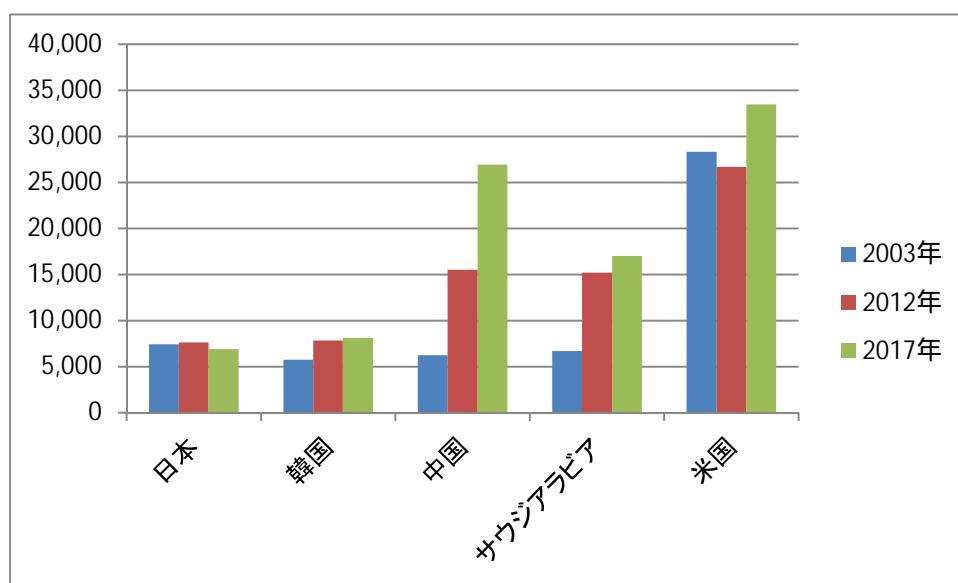


表4の資料に基づきARC作成

2.2 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

各国、各地域のエチレン、プロピレン、芳香族化合物の誘導品の生産能力と需要を表5、6に示す。エチレン需要の大部分は、ポリエチレン、ポリスチレン、ポリ塩化ビニル、エチレングリコールの5品目である。これら誘導品のエチレン換算での世界需要を見ると、ポリエチレンが約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、これだけで92%を占める。

プロピレン需要については約58%がポリプロピレンであり、上記のポリエチレンの約59%とほぼ同じくらいの比率となっている。そのほかに、アクリロニトリルやプロピレンオキシド（プロピレングリコール）、オキソアルコール、キュメンに使われる。

また、誘導品は最終的にポリマーになるものが多く、80～90%はポリマーになると推定される。

表5 世界の主要石油化学製品の生産能力 2011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	1562	777	405	2603	2697	2612
LDPE	232	555	210	78	788	1043	800
HDPE	132	470	235	67	722	637	742
スチレンモノマー(SM)	291	593	332	201	489	583	305
エチレングリコール(EG)	88	404	135	228	221	133	930
PVC	201	1630	143	170	759	777	125
その他	142	138	40	32	443	366	171
計 C2換算	749	1837	746	471	2634	2696	2491
プロピレン(C3)	676	1608	622	309	2106	1906	962
PP	318	1204	392	133	808	1096	779
アクリロニトリル(AN)	73	142	57	52	147	86	10
その他	170	673	111	122	808	745	28
計 C3換算	576	2067	577	316	1800	1968	841
ベンゼン	657	946	478	191	875	1117	390
トルエン	232	667	313	9	736	360	244
キシレン	806	1387	368	287	884	579	556
パラキシレン(PX)	402	894	525	244	410	257	378
テレフタル酸(PTA)	90	2003	668	557	398	350	118

経済産業省資料よりARC作成

表6 世界の主要石油化学製品の需要 2011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)	619	1700	690	379	2441	2263	2147
LDPE	194	1160	113	44	643	764	252
HDPE	86	735	94	32	598	569	245
スチレンモノマー(SM)	146	865	223	179	335	551	49
エチレングリコール(EG)	48	975	121	104	255	193	70
PVC	113	1310	86	58	407	521	208
その他	101	110	40	12	410	328	171
計 C2換算	512	3061	437	238	2127	2216	837
プロピレン(C3)	492	1552	489	258	1452	1572	649
PP	226	1372	155	56	505	1065	342
アクリロニトリル(AN)	45	159	47	42	61	76	32
その他	136	724	89	102	488	670	28
計 C3換算	418	2115	301	204	1075	1850	415
ベンゼン	424	728	320	222	588	895	257
トルエン	119	550	156	18	563	226	165
キシレン	493	1132	276	354	567	286	240
パラキシレン(PX)	67	789	437	350	176	208	62
テレフタル酸(PTA)	77	1753	301	234	299	215	146

経済産業省資料よりARC作成

2.3 プロピレン、ブタジエン、芳香族化合物（BTX）の製法（表7）

（1）プロピレン

米国のエタン・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620万トンが2017年末に完成する予定）により、連産品の不足が予想されている。プロピレン不足に対して、米国は天然ガス由来の安価なプロパンを利用した脱水素法（PDH）の新設で対応しようとしている。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プロセスが採用されている。いずれもプロピレンのオン・パーパス生産（目的生産）である。

（2）ブタジエン

連産品であるブタジエンの不足が特に懸念されているが、現状はすぐに利用できる工業化プロセスがない。開発中のブテンの（酸化）脱水素によるオン・パーパス製造技術が有望視され、ブタジエンが不足する米国がブタジエンの大需要地であるアジアに建設されると見られている。ブタジエンの地域別需要は特殊で、アジアの需要が大きく、米国あるいは西ヨーロッパの需要のほぼ2倍である。アジアではブタジエンの60%が合成ゴム（SBR、BR）、20%弱がABSに使用されている。

（3）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が相対的に不足するので、石油精製の接触改質（リフォーミング）からの供給が増えざるを得ないであろう（第1章1.1参照）。

表7 各地域、中国、日本の化学原料

地域 国	原料ソース (主なもの)	主たる製法	エチレン クラッキング原料の比率 Nexant Inc (2008) 石化協(2011)	プロピレン Nexant Inc (2008)	ベンゼン Nexant Inc (2009)
アジア	ナフサ主体 (除く中国)	ナフサ・クラッキング	ナフサ 76% ガスオイル 18%	クラッキング 70% FCC(接触分解) 30%	
米国	天然ガス 石油	エタン・クラッキング主体 接触分解・接触改質の 比率大きい	ナフサ 33% (11%) ガスオイル 9% (4%) エタン 34% (65%) プロパン・ブタン 24% (20%)	クラッキング 35% FCC(接触分解) 60%	ナフサ・クラッキング 47% 接触改質 53%
欧州		ナフサ・クラッキング	ナフサ・ガスオイル 82% (79%) エタン・プロパン・ブタン 18% (21%)	クラッキング 69% 接触改質 28%	ナフサ・クラッキング 75% 接触改質 25%
中東	石油 石油随伴ガス	エタン・クラッキング	ナフサ・ガスオイル 18% エタン・プロパン・ブタン 82%		
中国	ナフサ 石炭 (天然ガス) 石炭	ナフサ・クラッキング MTO、MTP 石炭化学(アセチレン)	ナフサ 2020年MTO 570万トン	化学経済 (2012年) クラッキング 49% FCC 41% MTP 7% (2020年MTP 700万トン)	
日本	ナフサ	ナフサ・クラッキング	日本 ナフサ・ガスオイル (97%) プロパン・ブタン (3%)	ナフサ・クラッキング 主 FCC(接触分解)	ナフサ・クラッキング 主 接触改質

Nexant Inc、石化協、化学経済などよりARC作成

2.4 各国の状況

ここでは日本以外の米国、中東、中国、西ヨーロッパの状況をまとめた。日本については第5章で述べる。

(1) 米国

安価なシェールガスの恩恵で、米国化学業界は活況を示している（ルネッサンスと呼んでいる）。シェールガスを利用したエタン・クラッカーの新設、誘導品のポリエチレンプラント建設、プロパン脱水素法プラント（PDH）の建設計画が具体化している。

エタン・クラッカーについては、米国環境保護庁（EPA：Environmental Protection Agency）とTCEQ（The Texas Commission on Environmental Quality）の認可を得て着工直前のものが2件（Chevron Phillips ChemicalとExxonMobil Chemical）、申請中のものが3件（Dow Chemical、Formosa Plastic（台湾資本）とOxyChem/Mexichem）、申請準備中のもの2件（Sasol（南ア資本）とShell）の7件である。すべて計画通り進むとすると、2017年末に新設のエチレン生産能力の総計は9.2百万トンと巨大な規模になる。なお、認可済みと申請中の確実な5件の合計は、年産6.2百万トンになる（表8）。

新設エチレンプラントの各々の生産能力は年産約150万トンで、日本の既存のナフサ・クラッカーの50-70万トンの2-3倍の規模である。

シェールガス関連の米国化学工業全体の設備投資は、14-17年の4年間で約454億ドル（4兆5400億円）と見積もられ、建設ラッシュの様相を示している。

プラスチック・レジンの米国生産量に占める輸出比率は06年以前の約12%から12年は約20%に増加しているが、さらに20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。また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。17年完成のエチレンプラントに合わせて、ポリエチレンプラントが新設される予定なので、完成時にはポリエチレンの輸出が急増するであろう。

表8 北米の新エタンクラッカー建設計画

会社	立地	1タンクラッカー (年産) 百万トン	誘導品	投資額	EPA 認可 (GH.gas)	TCEQ 認可 (大気)	決定	着工 予定	完成 予定
				\$ Billion (千億円)					
Braskem Idesa (ブラジル)	* 1 メキシコ	1.05	3PE プラント	3.2	2008 (メキシコ)	2008 (メキシコ)		2012	2015 工事50%完成
CPChem (Chevron Phillips)	TX Cedar Bayou	1.5	2PE 計百万トン		2013.1	2013.8	2013.1 投資決定		2017
Dow Chemical	TX Freeport	1.5	2PDH、PE、1.5MTPA-	4	最終段階	最終段階		2Q-2014	2017前半 PDHは建設中
ExxonMobil Chemical	TX Baytown	1.5	2PE 計1.3百万トン		2012	2012	early 2014	2014	late2016
Formosa Plastics (台湾)	TX Point Comfort	1.2	PDH、LDPE	2	申請中	申請中		late 2014	early2017
OxyChem/Mexichem	TX Ingelside	0.55	(既存の塩ビに使用)		申請中	仮認可		mid 2014	1Q-2017
Sasol (南アフリカ)	LA Lake Charls	1.5	EO、アルコール、PE -オレフィン、ゴム 2 GTL大型プラント	5~7 (誘導品込 16 - 21)					2017
Shell Chemical	PA	1.5	3PE 計1.5百万トン						NA.

* 1 Coatzacoalcos

IHS Chemical Week Nov. 18 / 25などをもとにARC作成

(2) 中東

中東の石油化学は安価な天然ガス原料（0.75ドル/百万Btu）を武器に輸出主体で急拡大してきたが、安価な石油随伴ガスの量的限界、米国のクラッカー新設ラッシュ、中国の自給率アップなどから拡大は一服する可能性がある。安価なエタンの供給量は既存クラッカーの使用量分で限界に近く、今後新設されるエタン・クラッカーの原料は高いものになると報じられている（IHS Chemical Week, Nov. 4/11, p-17, 2013の一節には、“Saudi Arabia doesn't have surplus cheap associated gas, Iran has sanctions-related issues, and Qatar still has a moratorium on using gas for new projects.” とある）。

(3) 中国

中国は、これまで石化原料・化学品の輸入国であったが、生産能力を急拡大し自給体制を強めている。

特筆すべきは繊維で、大量の衣料などの繊維製品が中国で作られ、世界に輸出されてきた。かつては、その原系のポリエステル繊維や合繊原料をかなりの割合輸入してきた。しかし、今やポリエステル繊維を30百万トン生産し、世界の約73%を独占するに至っている。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7.9百万トン、増設1.5百万トン）、合繊原料の自給率も高まっている。

また17年には、エチレン生産能力は約10百万トン増えて、26.9百万トンに達すると予想されている。

ナフサ・クラッキングのほかに、石炭化学が急拡大している。特に、石炭 合成ガス メタノール MTG、MTPプロセスによるオレフィン合成の拡大が注目される。これは新規な技術で注目すべきである。

また、従来技術である石炭 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による生産も急拡大した。中国のポリ塩化ビニルの生産能力は03年に5百万トン、06年に10百万トン、12年に20百万トンと急成長した。製法としては、石炭原料のカーバイド法が80%、通常のエチレン法が20%のシェアを占める。ただしカーバイド法の稼働率は58%と低く、生産量のシェアは73%である。

中国は政策的に内陸部を中心に石炭化学を推進し、“現代的石炭化学”と言っている。MTO, MTPプロセスはその名にふさわしい新技術であるが、カーバイド法は従来と同じルートであり、環境問題などがどの程度現代的に改善されているか興味がある。

旧カーバイド法（アセチレン法）ではアセチレンに、塩化水素を付加して塩化ビニルを作り、水を付加してアセトアルデヒドを作り、酢酸を反応して酢酸ビニルを作り、靑酸を反応させてアクリロニトリルを作るなど自由自在に化合物を作れる技術であった。ただし、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トンを作るのに副生成物の水酸化カルシウム（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）が2.8トン生成（実際は水スラリーとして28トン生成）するので廃棄場所確保などの環境問題があった。このため、世界的には1980年ごろにはすたれた。そして、コストの安い現在のエチレン法に転換された。また当時はアセチレン法で塩化ビニルを作る反応には、安全上問題のある水銀化合物（塩化水銀）が使用されていた。こうした課題はどのように解決しているのだろうか。

また、内モンゴル自治区で建設された石炭由来のMTOプラントが、2010年12月のスタート前から当局より環境問題で警告を受け、改善されていないということで2013年1月には操業停止命令と罰金が科せられた（引用・参考文献(7)JPEC レポート p-9 2013.3.19）。

また、中国はこれまで石炭がエネルギー源の主体であったが、今後は天然ガスの使用が増加する見込みで、化学原料としても天然ガスの使用が増加するであろう。

これに関連したニュースとして、中国はBPと組んで、BPがシェールガスを原料にしてメタノールを米国で作し、これを中国・大連まで運び、そこでMTOプロセスによりオレフィンを大規模に生産する計画を2013年7月16日発表した（BPホームページ、日経新聞2013/7/26）。天然ガスベースのMTOの計画である。

合成ガス - メタノール化学に関連した世界の新しいプロセスが盛んに中国に持ち込まれ、工業化され、また工業化されようとしていることは注目すべきである。

(4) 西ヨーロッパ

西ヨーロッパは、競争力のある中東と米国の上に挟まれ苦しい状況であり、古い小規模のナフサ・クラッカーの閉鎖が議論されている。この状況を打破すべく、ヨーロッパでもエタン・クラッキングを増やす計画や、シェールガスの開発を急ぐべきだとの主張が出ている。

ただし、シェールガス開発はドイツ、フランスでは環境問題を懸念する住民の反対があり思うように進んでいない。英国が先行して実行するかもしれない。またエネルギー自立化を目指しているポーランドが積極的である。

欧州化学工業連盟はこの厳しい事業環境の中で、「ヨーロッパの強みは、高度に洗練されまたよく統合された市場があり、かつ一級のR&Dインフラがあることである。」と語っている。また、ある化学メーカーは「かつて中東からの低コスト品がヨーロッパにあふれるといわれたが、そうはならなかった。輸送コストとヨーロッパの差別化製品が輸入にブレーキをかけた。」と述べている。

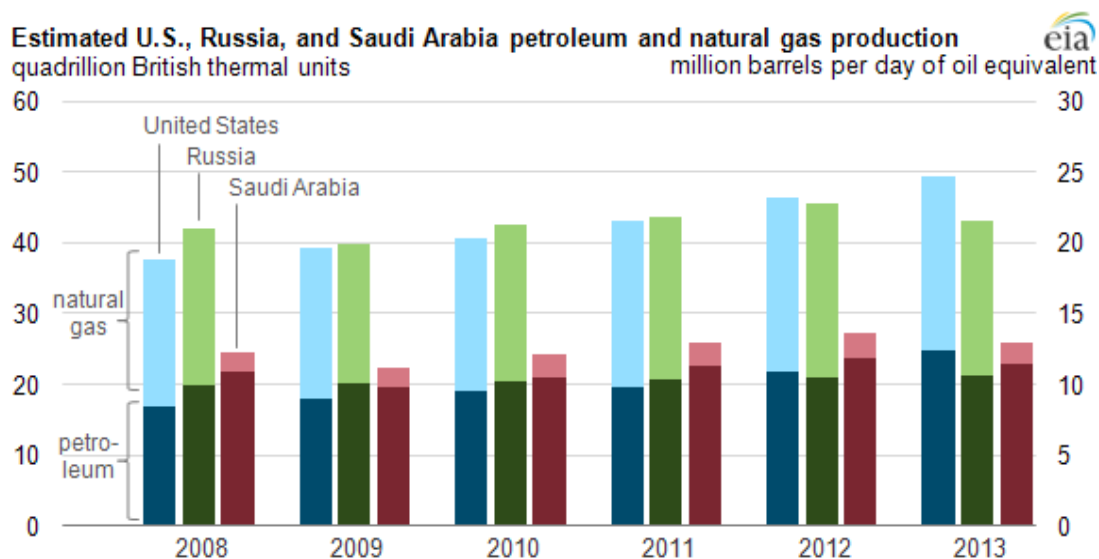
第3章 世界のエネルギー事情と化学工業への影響

3.1 米国シェールガス、シェールオイル

(1) 米国シェールガス、シェールオイル産出量の最新情報

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・タイトオイル（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5）。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。

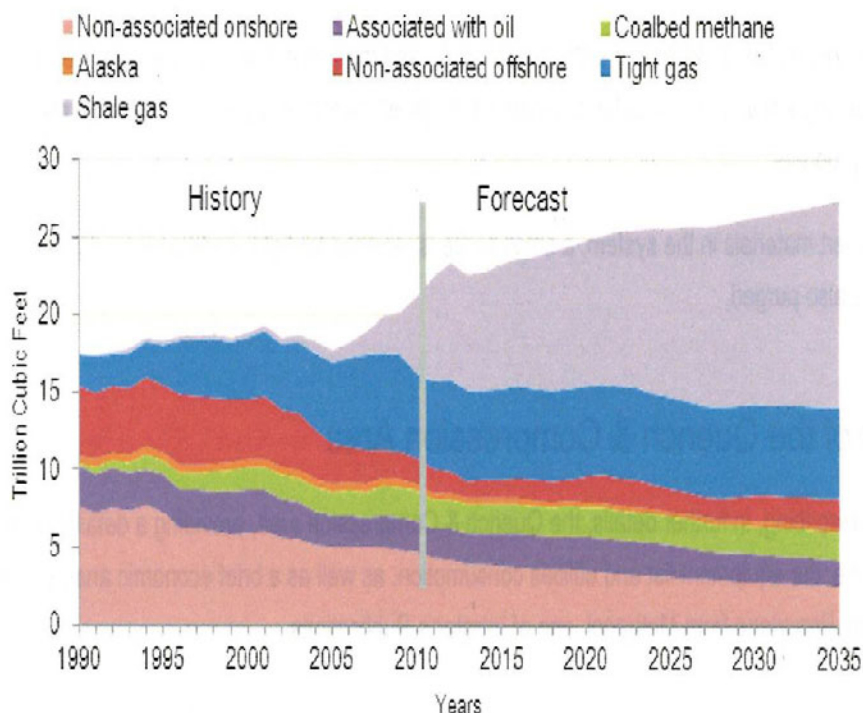
図5 米国、ロシア、サウジの石油と天然ガスの産出量（出典 EIA）



また同発表によれば、シェールガス大増産により（図6）米国は19年には天然ガスの輸入国から純輸出国に転換し、21年には産出量の約7%、シェールガスの約17%がLNG輸出される見込みである。21年の全産出量は約29兆ft³、シェールガス産出量は約12.5兆ft³、LNG輸出は2.0兆ft³である。LNG輸出は25年に2.5兆ft³まで増加し、その後一定との予測である。米国は従来、天然ガスや石油の輸出を特定国以外は法的に原則禁止してきたことからすると、産出量の約7%を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。

なお、現在はカナダからのパイプライン輸入がかなりあり、少し縮小するが継続する。
 一方で、米国からカナダ及びメキシコ向けのパイプライン輸出が増加していく。

図6 米国・天然ガスの産出量経緯と予測（出典EIA）



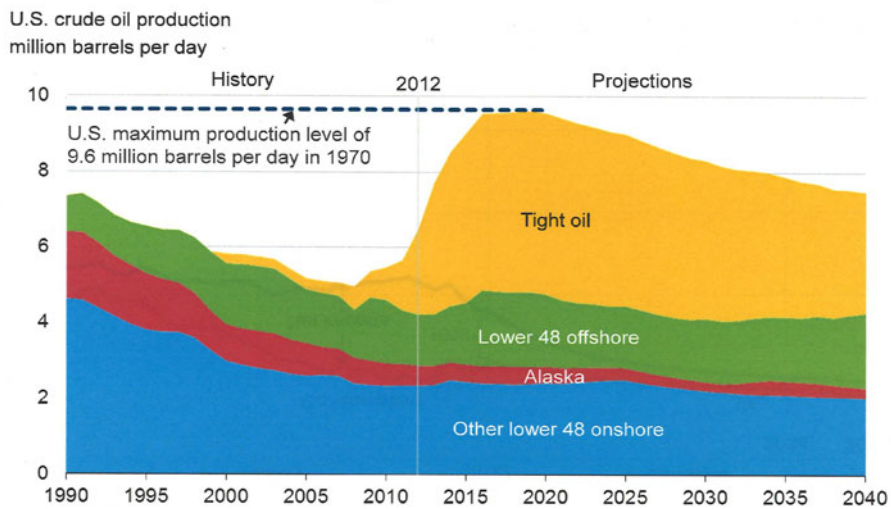
（注 シェールガスとタイトガスが非在来天然ガス）

一方、シェールオイル・タイトオイルの増産も驚異的であり、10年0.6百万バレル/日、11年0.9百万バレル/日、12年1.4百万バレル/日、13年2.3百万バレル/日と急増しており、15年には約5.0百万バレル/日と米国石油生産量の50%に達する見込みである。石油生産量は07年頃の約5.5百万バレル/日がボトムであったが、15年に9.65百万バレル/日まで急回復する。9.65百万バレル/日の値は、過去最高の生産量(70年)のレベルである(図7)。

米国の全エネルギーの自給率は12年の84%から20年に94%、35年に97%に上昇するとみている。

図7 米国・石油の産出量推移と予測（出典 EIA）

Growing tight oil and offshore crude oil production drive U.S. output close to historical high



Source: EIA, Annual Energy Outlook 2014 Early Release

（注 タイトオイルにはシェールオイルが含まれている。）

（2）世界の埋蔵量

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。

シェールガスは中国が埋蔵量トップで次いで、アルゼンチン、アルジェリア、米国、カナダ、メキシコの順であり、中国は米国の2倍となっている。一方、シェールオイルについては、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採掘の実現には重要である。中国の埋蔵量は多いが、地質、水確保の観点から開発に時間がかかると見られている。

3.2 天然ガス価格

米国ではシェールガスの発見により国内天然ガス価格が2008年のピーク時の百万Btu当り、約12ドルから急落して3分の1程度の3 - 4ドルに下がって中東に近い価格（サウジの最安値の0.75ドルからイランの3ドル）になり、西ヨーロッパの約12ドル、日本・韓国の約15 - 16ドルよりはるかに安い価格になっている。日本と韓国はもっとも高い天然ガスを買っていることになる。

パイプラインのない遠隔地への輸送には、天然ガスを液化してLNGにして輸送し、かつ消費地で気化しなければならない。仮に4ドル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、現在輸入中のカタールからの場合は、2ドルのガスを日本に運んでくると4ドルになるといわれる。ただし、日本は長期安定供給確保のため、サプライヤーと原油価格リンクの長期契約をしているため、原油高（100ドル/バレル）の現在は15-16ドルという高値になっている。

なお、15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。

3.3 石油と天然ガスの比較

石油は天然ガスに比べ、液体で取扱い安く輸送が容易なこと、また自動車用・航空機用燃料にはもっぱら石油が使われてきたこと、天然ガスがロシアや米国で相次いで大量に発見されて資源枯渇は石油の方が早いとの推測などから、石油の高値安定が続いているものと推測される。

3.4 脱石油の動き

世界的にこれまで多様かつ大規模なエネルギー政策と技術開発が実施されてきたが、その共通する動機は「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”と呼ぶべきこれらの試みには、

自動車用燃料の節減 小型化、軽自動車化、低燃費自動車（ハイブリッド、ディーゼル車）による燃費向上、ガソリンを使わない車の実用化（電気自動車（EV）、燃料電池車、圧縮天然ガス車（CNG車））

燃料の転換（電力 石油以外の燃料を使用して石油の使用を極力減らす、一般燃料は石油以外の燃料への転換）

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）

合成ガソリンの製造（天然ガス、石炭からフィシャー・トロプシュ反応による合成）などが含まれる。

シェールガスの発見はこの動きを加速するであろう。

（１）自動車燃料の節減

自動車燃料節減に向けた各種自動車の状況を比較した（表9）。

表9 各種自動車の比較

車	燃料	駆動系	その他重要機器	ステージ
ガソリンエンジン車	ガソリン	エンジン		主流
ディーゼルエンジン車	軽油(ディーゼル油)	エンジン		欧州に多い 大型車に多い
圧縮天然ガス車(CNG車)	天然ガス	エンジン	CNGポンペ	大型車に採用
ハイブリッド車	ガソリン	エンジン+モータ	(二次電池)	乗用車の 主流に
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	開発品
電気自動車	電気	モータ	二次電池	導入期
燃料電池車	水素	モータ	燃料電池 水素ポンペ	開発段階

ARC作成

EIA発表（2013年12月）による「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12年に比べて30年は約8%、40年は約5%減少する。

その内訳は、12年はガソリン59%、ディーゼル22%、エタノール4%

30年はガソリン47%、ディーゼル30%、エタノール5%

40年はガソリン44%、ディーゼル31%、エタノール5%

となっている。

ガソリンが減り、ディーゼル(軽油)が増える見通しになっていることが注目される。乗用車の走行距離が増えず、燃費が向上するためガソリンが減ると説明している。CNG/LNGの比率は現在のところ非常に少ないが、30年1%、40年3%と伸びは大きい。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り、その動向が石油消費に大きな影響を与える。なお、日本の運輸部門は震災前で約42%である。

(2) 燃料の転換 発電の電源別比率の例

世界の発電電力量の2010年の電源別比率をOECD資料で見ると、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は、石油比率は1%程度であり、日本の8.8%はきわだって高い状況であった。

さらに、エネルギー白書によれば、日本の電源別比率は12年(カッコ内は10年)に天然ガス42.5%(29.3%)、石油18.3%(7.5%)、石炭27.6%(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急増した。特に、天然ガスの増加が顕著で、貿易収支赤字の一つの原因になっている。

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ており、これまで主力の石炭を将来は天然ガスが上回る予想である。05年は石炭が2兆KWh、天然ガスが7,500億KWhであったものが、12年には石炭1.5兆KWh、天然ガス1.2兆KWhにまで近づいた。今後は少し揺り戻しがあり、その後に石炭は約1.7兆KWh一定で推移し、天然ガスは漸増で35年に石炭の発電量と同じ1.7兆KWhに達すると見込まれる。

(3) 石油化学の原料転換

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、中国は石炭など石油以外の資源を活用していて、石油依存度が低い。世界的には、今後天然ガス化学、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。日本も石油原料依存から脱却する方策が必要とされる。

(4) バイオマス利用技術の進歩

バイオマスは使用量は少ないが、バイオ技術によるエタノール、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糖質原料あるいはセルロース原料から作られている。食料と関係のないセルロース系（木質系）原料からの生産が望まれ、その開発がかなり進んできている。

バイオエタノールはガソリンに混合して燃料になるばかりでなく、ブラジルでは脱水してエチレンを作り、これを重合してポリエチレンが大規模に生産されている。

ポリマーとしては、乳酸からポリ乳酸が工業化され、その他各種バイオポリマーが発表されている。

また、再生可能原料からのバイオディーゼル油の製造は西ヨーロッパ中心に行われている。メタノールとのエステル交換で作られるので、メタノールが燃料の一部に使用されていることになる。

(5) 合成ガソリンの大規模工業化

合成ガソリン技術はSasolが長年取り組んできたもので、カタールでのGTLプラントに次いで、米国メキシコ湾岸で大規模なプラントの建設を発表している。

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の依存度は減少してきているし、米国シェールオイルやシェールガスの生産量急増は石油価格に影響を与えるであろう。

ただし、石油価格に大きなインパクトを与えるためには、ガソリン自動車の過半が電気自動車や燃料電池車に転換するくらいのイノベーションの実現が必要であろう。

高い石油価格は日本をはじめ世界のナフサ・クラッカーを苦しめているが、高価格は石油使用節減のインセンティブになるし、シェールガスやシェールオイル開発の大きな動機になっているという側面がある。

第4章 シェールガス革命と石油化学

4.1 米国でシェールガスの恩恵を受けているのは？

(1) 安いエチレンコストの恩恵

米国はシェールガスの発見より、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作ることができるようになった。

しかし、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、ポリ塩化ビニル(PVC)などの販売価格は下がっていない。ポリプロピレン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る。このため、安価なエチレンでポリエチレンやPVCを一貫で作っているクラッカーは巨大な利益を上げた。

一方で、従来価格でプラスチックを購入するユーザー（プラスチック加工業者など）は、エチレンコスト安の恩恵をまったく受けていない。

(2) 安い使用エネルギーの恩恵

天然ガスが3 - 4ドル/百万Btuと安価になったためプラスチック・レジン生産メーカーは製造に使用する用役エネルギーのコスト面で恩恵を受けていると判断される。これらメーカーが使用するエネルギーの内訳は67%が天然ガス、19%が電力である。天然ガスを使って、工場内で発電（自家発電）やスチーム製造をしていると予想され、その分はコストが安くなっていると思われる。

このため、従来通りの高いエチレンを購入してプラスチック・レジンを製造しているポリマーメーカーは、エチレンコスト面ではシェールガスの恩恵を受けることができなくともエネルギーコスト面ではシェールガスの恩恵を受けていることになる。

(3) 電力会社の電力販売価格は安くなったか？

米国の電力販売価格はあまり下がっていない。電力販売価格は地域によって異なり、

明確に下がっているのはテキサス州の業務用電力くらいであるが、値下がり幅は小さい。その年次経過をみると、2003-04年は7.0セント/KWh以下、05年は約8.0セント/KWh、ピークの08年は9.6セント/KWh、10年は約8.0セント/KWhである。コスト内訳をみると、天然ガスが安くなったので発電コストは下がったが、電力メーカーの経費や利益分が増えて、販売価格はあまり下がっていない。

4.2 厳しい競争と限界生産者

(1) エチレン

価格は生産者の中で最もコストの高い限界生産者のコストで決まるといわれる。エチレンについて言えば、かつては米国が限界生産者であったが、現在は中東に次ぐコスト競争力を持ち、一方で中国以外の東アジアのナフサ・クラッカーが一番コスト高で限界生産者になってしまった。東アジアや西ヨーロッパのナフサ・クラッカーのエチレンコストは米国のエチレンコストの3~5倍といわれている。

仮に、需要が変わらない状況でコストの安い生産者が増えれば、限界生産者は赤字になり事業から撤退しなければならない。

(2) ポリエチレン

ポリエチレンについても東アジアのメーカーが限界生産者である。米国メーカーはエチレンコストが下がっても、安売りせず国内のポリエチレン価格をキープして、高い収益を得る経営をとっている。このため、通常は利幅の小さい汎用樹脂が例外的な高収益事業になっている。

4.3 天然ガスの米国と国際市場の価格差の理由

米国の天然ガス価格が国際価格より安くキープされている理由は、

シェールガス生産が急速に伸び、過剰気味であること、

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、閉鎖された市場となっ

ていて、国際市場価格が反映されない特殊事情になっていること、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、消費地でのガス化に高いコストがかかり、生産地と消費地で大きな価格差があることなどであろう。

4.4 米国、新設エタン・クラッカーの利益の推定

仮に、シェールガス原料のエチレン年産5百万トンのエタン・クラッカーと同量のポリエチレン・年産5百万トンのプラントを建設し、全量輸出すると考える。天然ガス3ドル/百万Btu、エチレンコスト323ドル/トン、ポリエチレンコスト526ドル/トン、輸出運賃180ドル/トンとすると、輸出コストは約700ドル/トンとなる。売値を1500ドル/トンとすると800ドル/トンの利益が出ることになる。年間5百万トン进行販売すると、毎年4,000百万ドル(4,000億円)の膨大な利益が出ることになる。ラフな計算であるが、少なく見積もっても3,000億円の利益が毎年入ることになる。3-4年で投資は回収できる。

4.5 今後も米国は天然ガス価格が安い状態が続くか？

DOW Chemicalは声高に天然ガスの輸出に反対していると伝えられる。化学メーカーは天然ガスで輸出するよりも付加価値の高いポリエチレンにして輸出した方が、輸出額が増えると主張している。化学メーカーはガス輸出が始まると高い国際価格で取引されるようになり、それが国内価格に反映することを恐れているのであろう。

一方、シェールガス生産者はガスの収益性が落ちているので、ガスでも液体分多いガス田にシフトし、また価格の高いシェールオイルの採掘にシフトしている。このような状況から、天然ガス(メタン)価格はともかく、エタン・クラッキング原料のエタン、プロパン、ブタンを含むNGL(天然ガス液体)の値上げは十分考えられる。NGLは関係する産業に限られており、さらに上記のようにエタン・クラッカーが大きな利益を継続的に上げることになればNGL値上げの動きが当然出るであろう。2013年末に発表された天然ガスの輸出見通しはその引き金になる可能性がある。

4.6 エチレンコスト安の誘導品コストへの影響-競争力あるポリマーは何か？

米国は安いエチレンを武器に、ポリエチレン等その誘導品を世界に輸出していくだろう。また、まだ顕在化していないが、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作り、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。ここでは、エチレンや天然ガス価格低下により、米国のどの誘導品が競争力を持つようになるかを推定した。

まず、エチレン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・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、プロピレンコストは変わらない、不足すると予想されるブタジエンコストが高くなり、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。

原料コストの前提 コストダウンの大きい順

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

(コストダウン ←————→ コストアップ)

エチレン系 エチレンの原単位が大きい誘導品ほどコストダウンが大きい。

(a) エチレン安の影響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 0.85)

(b) エチレン安の影響を受けるもの

酢酸ビニル樹脂・酢ビモノマー (Et 0.65)

EPDMゴム (Et 60%、Pr 40%と仮定) (Et 0.60、Pr 0.40)

酢酸 (エチレン法) (Et 0.47)

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)

(天然ガスで電気代が安くなるので、塩素も安くなる。)

(c) エチレン安の影響は少なく、他の原料の影響もあるもの

ポリスチレン (PS)・スチレンモノマー (Et 0.27、ベンゼン0.75)

PET樹脂・繊維 (下記注) (Et 0.14、パラキシレン0.55)

(注 PETはエチレンの酸化で作られるエチレングリコールとパラキシレンの酸化で作られるテレフタル酸の縮合で作られる。酸化反応により分子量が増加するため、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。)

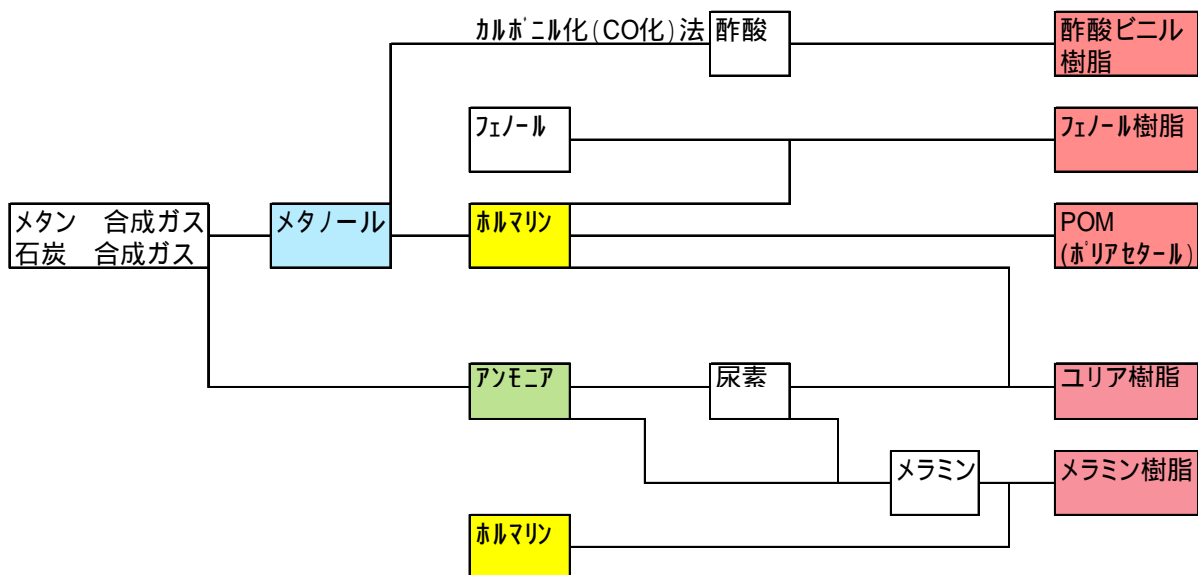
メタノール・アンモニア系 (図8)

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) やアンモニアのコストは下がる。

さらにホルマリンから作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) やメラミン樹脂 (メタノール 0.37、アンモニア 0.53) はコストが下がる。

メタノールのカルボニル化法による酢酸、酢酸ビニル樹脂もコストが下がる。

図8 合成ガス、メタノールを原料とするポリマー



ARC作成

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。

- ・汎用樹脂はPE > > PVC > > PS > PPの順でコストダウンが大きい。
- ・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。
- ・特殊樹脂はポリビニルアルコール > EVA > > PETの順である。
- ・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。
- ・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。
- ・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10に全体をまとめた。

表10 ポリマーのモノマー原単位

分類	種類	*世界 2010年需要	**日本 2012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	メタノール・他	
汎用樹脂	LDPE	41,647	1,477	エチレン	1					
	HDPE	32,783	928	エチレン	1					
	PP	48,328	2,390	プロピレン		1				
	PS	10,664	700	スチレン(St)	0.27			0.75		
	PVC	34,617	1,331	塩化ビニル	0.45				塩素 0.57	
特殊樹脂	PET		719	テレフタル酸、エチレングリコール	0.14			ハラキシ 0.55		
	PMMA	3,430	172	MMA			イソブチ 0.56		0.32	
	ABS	7,000	382	AN、St、Bd	0.16	0.2	0.15	0.44	0.1	
	AS		85	AN、St	0.18	0.27		0.5	0.1	
	エチレン酢ビ(EVA)		200	エチレン・酢ビ	0.85					
	ポリビニルアルコール酢ビ樹脂		207	酢ビポリマー	1.27				0.57	
			(モノマー 590)	酢酸ビニル	0.65					
エンジニアングプラスチック	Nylon6	合計2,120	合計 223	カプロラクタム				0.75	アンモニア 0.16	
	Nylon6,6			HMDA、アジピン酸		0.37		0.35	アンモニア 0.15	
	PC	3,000	317	BisA、ホスゲン		0.17		0.61		
	PBT	758	182	テレフタル酸、ブタンジオール			0.25	ハラキシ 0.48		
	変性PPE	300		2,6-キシレンール				0.65	0.53	
POM	900	124	ホルマリン					1.06		
熱硬化性樹脂	フェノール	3,174	274	フェノール、ホルマリン				0.72	0.3	
	ユリア		70	尿素、ホルマリン					0.30、アンモニア0.32	
	メラミン		75	メラミン、ホルマリン					0.37、アンモニア0.53	
	不飽和PET		114	フタル酸、グリコール、スチレン						
	アルキッド		66	フタル酸、グリセリン、脂肪油						
エポキシ	1,367	149	BisA、アロクロライド		0.3		0.55	塩素 0.125		
ウレタンフォーム		192	TDI、プロピレングリコール		0.69		トルエン 0.02			
合成ゴム	BR	2,200	290	ブタジエン(Bd)			1			
	SBR	2,300	651	ブタジエン、スチレン	0.07		0.75	0.19		
	EPDM		218	エチレン、プロピレン	0.6	0.4			エチレン60wt%と仮定	
繊維	ポリエステル	36,559	318	テレフタル酸、EG	0.14			ハラキシ0.55		
	Nylon6	合計 3,717	合計 98	カプロラクタム				0.75	アンモニア 0.16	
	Nylon6,6			HMDA、アジピン酸		0.37		0.35	アンモニア 0.15	
	アクリル	2,000	139	アクリロニトリル(AN)		0.79			アンモニア 0.32	
PP		120	プロピレン		1					

*化学経済 世界の化学工業 2013 単位千トン
 **化学経済 日本の化学工業 2013 単位千トン
 ARC作成

第5章 シェールガス革命の日本の石油化学に与える影響

5.1 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、輸入国ポジションから自給率を大幅に上げていくと思われる。

日本は需要の減少とコスト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年前ぐらいにも日本の石化の輸出比率が約30%あり(表11)、中国をはじめ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が、いわゆる中国特需で救われてきた(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11 エチレン系製品の輸出入推移(エチレン換算)

	単位 千トン						
	輸出 A	輸入 B	バランス A - B	エチレン 生産	内需 D = C + B - A	輸出比率 A / C	輸入比率 B / D
2003	2,238	420	1818	7,367	5,549	30	8
2004	2,206	388	1818	7,570	5,752	29	7
2005	2,269	422	1848	7,618	5,771	30	7
2006	2,295	489	1806	7,523	5,716	31	9
2007	2,390	394	1996	7,739	5,742	31	7
2008	1,829	541	1287	6,882	5,595	27	10
2009	2,940	407	2533	6,913	4,379	43	9
2010	2,435	535	1901	7,017	5,116	35	10
2011	2,192	709	1484	6,689	5,205	33	14
2012	1,909	704	1205	6,145	4,939	31	14

石化協資料よりARC作成

今回は相当厳しくなるとの認識から、現在の15のエチレンプラント(エチレン年産計720万トン)の維持は困難で年産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(14年)、住友化学は千葉のエチレンプラント休止(15年)、また旭化成と三菱化学は提携して水島の2基のエチレンプラントを1基に統合(16年)が決定している。これで年産約600万トンまで縮小されるが、年産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12）。

表12 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	周南	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	380	休止 (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	778	2基中1基(368千トン)2014年休止
	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		7,210	

石化協資料などからARC作成

5.2 厳しい状況に対する方策

これに対する方策として一般に言われるものは、

上記の一部設備休止による稼働率アップによる収益性改善

エチレン以外のプロピレン、ブタジエン、芳香族の誘導体で競争力維持

高付加価値誘導品による収益の維持

安い原料をもとめて海外展開

などである。

5.3 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、および技術を下記に列挙してみた。

このうち、溶液重合のSBRは省エネタイヤ用に設計されているもので、日本が非常に強い製品である。シンガポールで複数の日本企業が新プラントを最近稼働した。同じ溶液重合プロセスで作られる熱可塑性エラストマー（SBブロック共重合体など）は高付加価

値製品の一例である。

(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り、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。日本の石油化学を支えるに十分な大きさかどうか重要である。

(1) ブタジエン系 汎用合成ゴムの溶液重合SBR (省エネタイヤ用、日本

が高いシェアを持つ)、熱可塑性ゴム: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、エパール、ポリ塩化ビニル
(信越化学の世界展開)

(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

5.4 海外展開

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。住友化学はシンガポール進出の後、サウジのラービグで大型エチレンセンターを稼働している。旭化成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。これも天然ガス化学の一つである。多くの会社が安い原料や人件費を求めて、あるいは成長市場を求めて海外に進出している。また新たな進出計画(旭硝子によるインドネシアのポリ塩化ビニル大増産計画)が発表されている。すでに大きな成果を上げているところもあれば、期待の成果が得られていないところもある。日本と同じレベルのインフラ、プラント建設、操業が期待しにくいカントリーリスクがあり、また海外立地が原料

的に必ずしも有利とは限らないなど難しい点があるが、これらを克服して世界展開することが求められる。

日本企業による米国のシェールガスを利用したエタン・クラッキング事業への進出や中国MTO、MTP事業への参画のニュースはまだない。

おわりに

困難な状況であるが、化学工業は繊維不況、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。

かつてある団体が技術ロードマップを精力的に作ったが、4、5年後の中国の台頭をまったく予想していなかったし、その後にした化学工業の将来予測には数年後に顕在化したシェールガス革命について触れられていなかった。

また、かつて、台湾の奇美実業社は原料モノマー（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拡大して100万トン/年になり、世界のトップとなった。横型コンビナートと称された。エチレンコンビナート方式しかなかった当時、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。従来の石油化学を超えるビジネスモデルが待たれる。

最後に楽観的な予測と夢でしめくくりたい。

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。

夢： 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作ることに成功する。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。

引用・参考文献

(1) Industrial Organic Chemicals, Wittcoff, Ruben, Plotkin, Wiley, 2013

有機工業化学の教科書(単行本、全807頁)で、有機工業化学全体を詳しく知るに便利である。本リポート第1章、第2章の作成に使用した参考書である。表7のNexant Inc.のデータはこの本からの引用である。

(2) 経済産業省(資料)

経産省 世界の石油化学品の今後の需給動向 2013年4月

(表4-6のベースの詳細な統計資料である。)

(3) 化学工業日報社

化学経済(月刊)

化学経済増刊号 2013年版「化学工業白書」 2013年7月

化学経済増刊号 2013年版「世界化学工業白書」 2013年3月

化学経済増刊号 2012年版「アジア化学工業白書」 2012年12月

(上記の3つの増刊号は表4、7、10のベース資料。)

(4) U.S. Energy Information Administration (EIA)

AE02014 Early Release Overview December 2013 他

(図5-7の引用文献)

(5) 米国化学工業会

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

(6) 石油化学工業協会(略号 石化協)

ホームページをもとに表7、11、12作成

「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

て」石油化学工業協会 2013年5月23日

(7) JPEC (Japan Petroleum Energy Center): 一般社団法人 石油エネルギー技術センター

中国の石炭による石油、天然ガス代替事業 JPECレポート 2011.11.2

中国で進む石炭由来オレフィン生産事業 JPEC レポート 2013.3.19

北米シェールガス・シェールオイルの動向と我が国への影響、JPEC NEWS 2013.1

(8) 室井高城 (アイシーラボ代表)

MTOプロセス 室井高城 触媒学会ニュース Sept.1,2012

MTPプロセス 室井高城 触媒学会ニュース Feb.1, 2013

(9) 米国PWC

Shale gas, Reshaping the US chemicals industry, pwc, Oct.2012

(第4章4.4のエチレン、ポリエチレンのコスト試算の参考文献)