

(解説)

ポリプロピレン／ポリエチレンプラント用DH型遠心圧縮機

Centrifugal Compressor, Model DH, for Polypropylene and Polyethylene Plants



田中宏明*1
Hiroaki TANAKA



井出 聡*2
Satoshi IDE



岩田卓也*2
Takuya IWATA

To cope with the continually increasing demand for polypropylene and polyethylene (PP/PE) in recent years, many plants have been, or are being, constructed, and they are becoming larger in size. This paper outlines cycle gas compressors, the equipment particularly important for PP/PE plants, focusing on the measures taken by Kobe Steel in response to the requirements for larger sizes.

まえがき = 世界における Low Density Polyethylene (以下, LDPE という), High Density Polyethylene (以下, HDPE という) および Polypropylene (以下, PP という) のプラスチック生産量は, 2013年には1.2億トンを超えており¹⁾, 原油価格低位安定の影響は免れられないものの, 発展途上国を中心に今後も着実な成長が見込まれている。汎用(はんよう)ポリオレフィン系樹脂である LDPE, HDPE および PP の需要は, 引き続き成長が見込まれる中国, インド, 発展途上国, そして, 従来の樹脂消費大国である欧米諸国における需要の伸びに支えられ, 長期的には堅調に推移していくものと思われる。こうした状況から中国やインド, 中近東を中心にした産油国で大型の LDPE, HDPE, および PP 製造プラントの建設が続いており, 2017年以降も多くのプラントが操業を開始する予定になっている。図1¹⁾にポリオレフィン系樹脂である LDPE, HDPE および PP の世界における生産動向を示す。

これら PE および PP プラントにおいては, リアクタでの重合反応により得られた粒状ポリマを1次加工品であるペレットにするために混練造粒装置が使用される。また, 気相重合プロセスにおいて循環ガス圧縮機が用いられている。当社はこれらの装置や機器の製造, 販売を行っており, 10年以上にわたり中国向けを筆頭に, 東南アジアや中東などにも多くの圧縮機を納入してきている。図2²⁾に代表的なポリオレフィンプラントのプロセスを示す。また, 表1は同プラント用循環圧縮機DHシリーズの納入実績を示す。さらに当社が納入した圧縮機の流量の推移を図3に示す。旺盛な需要とプラントの効率化の観点より, 近年はプラントの大型化が進められてきている。そうしたニーズに応えるべく当社では, 大容量に対応できるシリーズの拡大や, 同じ機器構成で対応するためのさらなる高比速度インペラの開発などに取り組んできた。本稿では, まずDHシリーズ圧縮機の特徴を簡単に紹介し, ついでプラントの大型化への対応と今後の展望を述べる。

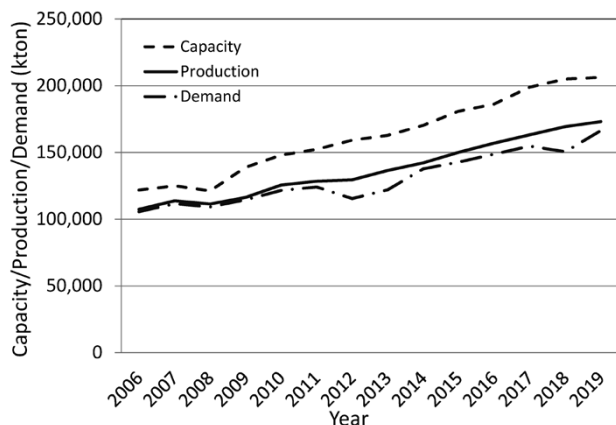


図1 LDPE, HDPE および PP の世界生産動向¹⁾
Fig. 1 World production trends of LDPE, HDPE and PP¹⁾

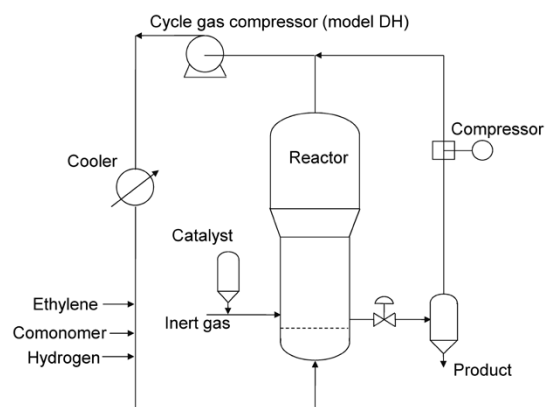


図2 代表的なポリオレフィンプラントのプロセス²⁾
Fig. 2 Process of typical polyolefin plant²⁾

*1 機械事業部門 回転機本部 回転機技術部 *2 機械事業部門 開発センター 技術開発部

表1 ポリオレフィンプラントへの当社圧縮機納入実績例
Table 1 Reference list of Model DH for polyolefin plant

Delivery	Area	Model	Product*	Driver rating (kW)
2014	China	DH7JM	PP	3,000
	India	DH9M	LLDPE	8,500
	Egypt	DH9M	LLDPE	3,150
2015	China	DH9M	PP	1,400
	China	DH7JM	PP	3,000
	China	DH9M	LLDPE	4,700
	China	DH9M	PP	1,400
	China	DH7JM	PP	3,000
	USA	DH9M	LLDPE	6,700
2016	Turkmenistan	DH4M	PP	420
	China	DH7JM	PP	5,100
	China	DH9M	LLDPE	6,500
	Korea	DH7JM	PP	760
	Korea	DH7JM	PP	2,200
	USA	DH9M	LLDPE	6,800
	Thailand	DH9M	LLDPE	4,550
	Russia	DH9M	LLDPE	4,800
2017	USA	DH9M	LLDPE	6,768
	USA	DH9M	PE	4,890
	USA	DH9M	PE	5,190
	USA	DH9M	PE	5,900
	Oman	DH7JM	PP	1,100
	Oman	DH9M	LLDPE	6,900
	USA	DH7JM	PP	2,000
2018	USA	DH7JM	PP	4,100
	China	DH9M	PP	2,050
	China	DH9M	LLDPE	6,600

*PP: Polypropylene, LLDPE: Lenear Low Density Polyethylen, PE: Polyethylene

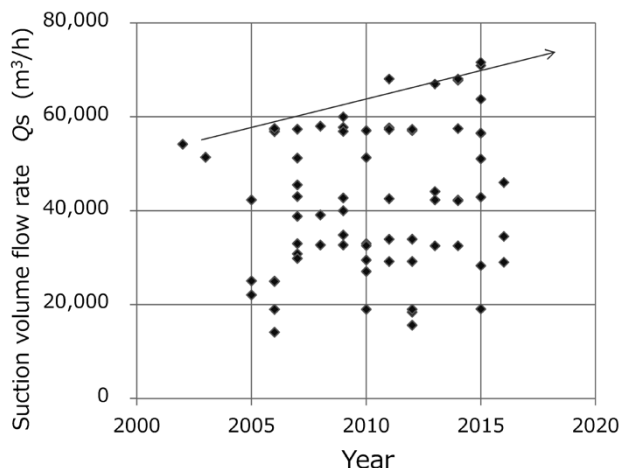


図3 当社が納入した圧縮機の流量の推移
Fig. 3 Trend of flow rate Kobe Steel's compressor

1. DHシリーズ圧縮機の概要

ポリオレフィンプラント用途（以下、本用途という）の圧縮機には、圧力比が小さく、圧力も中圧であることが要求されることから、単段バレル型構造の圧縮機が採用される。多くの圧縮機ユニットは、圧縮機およびカップリングを介して駆動する電動機のみで構成される。図4に圧縮機外観例を示す。本圧縮機は、American Petroleum Institute（以下、APIという）のAPI STANDARD 617 Part2で規定される構造である。また、本用途の適用機種である当社モデルDH機の本体構造例を図5に示す。ジャーナル軸受の外側でロータの軸端にインペラが設置されるオーバハング単段型であるため、軸シールは一つで済む。そのためメンテナンスは両持の一軸型圧縮機に比べて容易である。また、容量調整装置として、容量調整が効率良くできる入口案内翼装置を標準的に採用している。



図4 DH機の外観
Fig. 4 Appearance of model DH

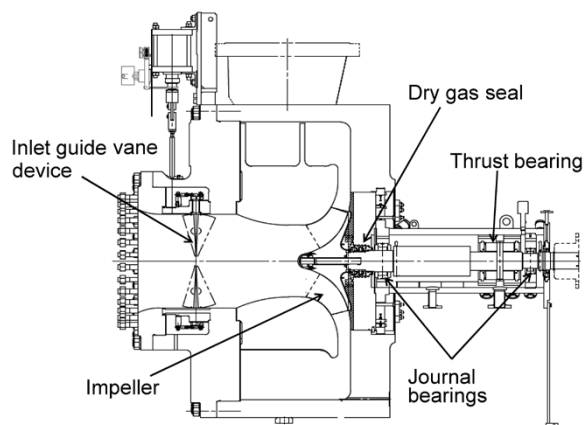


図5 DH機の本体構造
Fig. 5 Main body structure of model DH

2. プラント大型化への対応

2.1 従来の遠心インペラでの制約

本用途では、圧縮機は重合プロセスにおいてガスを循環させるために用いられる。このため、一般的な圧縮機に比べて大容量かつ低圧力比の仕様となり、大容量の処理に適した高比速度タイプのインペラが採用される。そこで当社では、このような低圧力比においても安定した運転を可能にするよう、サージングまでの圧力上昇の大きな特性を持つインペラを開発し適用してきた。

図6に従来適用してきたインペラの外観を示す。これまで当社では、本用途には遠心式のインペラを採用してきた。しかしながら、プラントの大型化の進展とともに遠心式での比速度上限を超えるケースが増えてきたため、インペラの設計点比速度を上限値近くに抑え、実際の運転はインペラ設計点より大流量の効率の低い点で行う対応を行っていた。図7に比速度制限による圧縮機設計点と実際の運転点の関係を示す。

いっぽうで、プラントの大型化が進展する中、現行のインペラでは対応できる流量に限界があり、ユーザの要求に合致しないケースが散見されるようになってきた。表2に従来並びに近年需要が多くなってきた大型機の圧縮機仕様を示す。そこで当社は、そうした市場のニーズに応えるべく、同じ機器構成で対応するためのさらなる高比速度インペラの開発を進め、大容量に対応できるシリーズの拡大に取り組んだ。



図6 従来インペラの外観例
Fig. 6 Appearance of conventional impeller

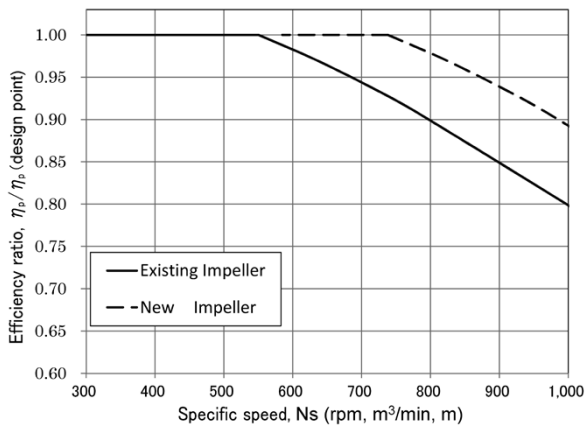


図7 比速度制限による圧縮機設計点と実際の運転点における効率の関係

Fig. 7 Relationship of compressor efficiency between at design point and at actual operating point due to N_s applicable range

2.2 大容量対応斜流式インペラの開発

上述の状況を踏まえ、さらに大きな比速度においても対応が可能な斜流式インペラを開発を行うこととした。表2に示すように、2009年と2016年を比較すると近年要求される圧縮機流量は30%近く増加している。今後もプラントの大型化の傾向は変わらないと想定されるため、開発仕様はそうした傾向を踏まえて決定した。インペラの開発においては、本用途で実績を積み重ねてきたパウダ対応へのオープンインペラの知見を加味しながら効率を維持し、斜流インペラによる高比速度化を行った。図8に遠心式および斜流式インペラにおける子午面でのブレード形状を比較した。この図から分かるように、高比速度化によってインペラブレードが従来の遠心式より高くなる。このため、要求される性能を維持しながら運転回転数全域にわたって問題ないようにブレード形状を工夫し、固有値を含む強度を評価することによってブレード形状を決定した。図9にインペラのFE解析による応力解析結果(a)および固有振動解析結果(b)を、また、図10にケーシングを含めた流体解析結果を示す。これまでに培ってきたオープンインペラ開発の手法が生かされ、従来よりも短時間で開発を完了させて試験に移行できたことも成果の一つとして挙げることができる。

開発したインペラは、58%縮小モデルを試験用として

表2 2009年および2016年の典型的な圧縮機仕様の比較
Table 2 Comparison of specifications of typical compressors in 2009 and 2016

Model	DH9M (2009)	DH9M (2016)
GAS	Hydrocarbon, Hydrogen, Nitrogen	Hydrocarbon, Hydrogen, Nitrogen
Suction volume (m ³ /h)	57,290	72,600
Suction pressure (MPaA)	2.50	2.30
Suction temperature (°C)	85.00	84.00
Discharge pressure (MPaA)	2.67	2.52
Rated speed (rpm)	2,977	2,980
Driver type	Induction motor	Induction motor
Driver rated output (kW)	5,100	7,800
Shaft seal	Tandem dry gas seal	Tandem dry gas seal
Capacity control method	Inlet guide vane device	Inlet guide vane device

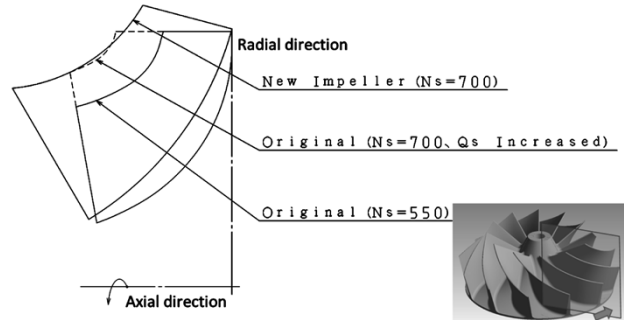
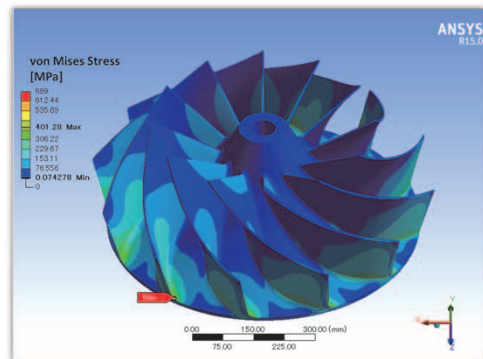
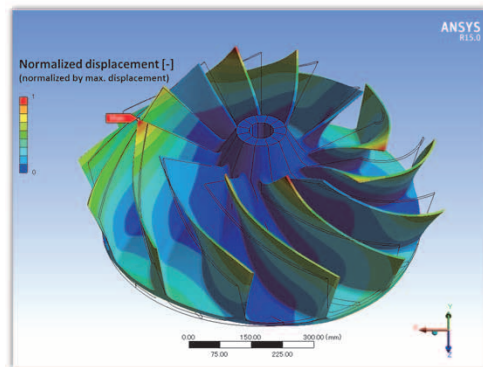


図8 遠心式 (original) および斜流式 (new) インペラの子午面形状の比較

Fig. 8 Comparison of meridional view between centrifugal (original) and mixed flow (new) impeller



(a) Static stress distribution by centrifugal force



(b) Shape of natural vibration mode

図9 斜流インペラのFEM解析結果

Fig. 9 Results of FEM analyses for mixed flow impeller

製作の上、業界で認知されているASME PTC10に基づく試験とその評価を行った。

候補として4種類の異なるインペラを製作し、対応可能比速度、効率、および大流量域から小流量域における特性を確認の上、本用途に適切なインペラを選定した。図11に開発したインペラの外観を示す。本開発により、

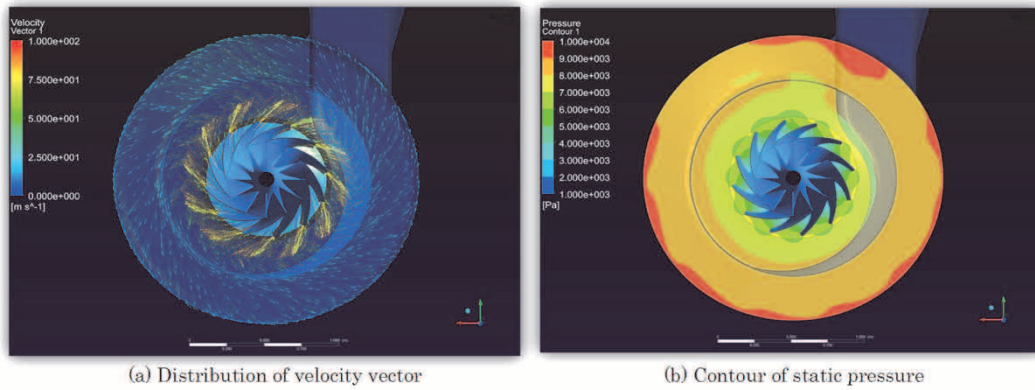


図10 ケーシングを含めた流体解析結果
 Fig.10 Results of fluid analyses for mixed flow impeller with considering compressor casing

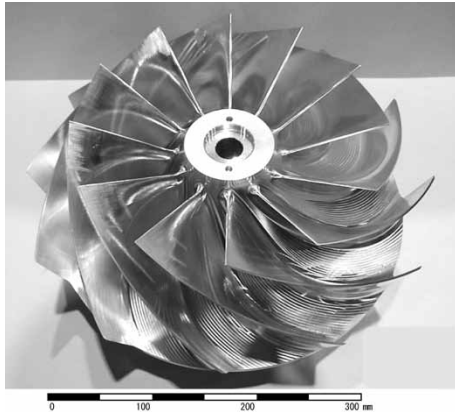


図11 開発した斜流インペラの外観
 Fig.11 Appearance of developed impeller for mixed flow compressor

表3 開発した4種類のインペラのテスト結果
 Table 3 Test results of 4 developed impellers

Impeller No.	Number of blades	Polytropic efficiency ratio ($\eta_{ptest}/\eta_{pplan}$)	Ns [rpm, m ³ /min, m]
#1	12	0.998	679
#2	16	0.976	688
#3	12	0.999	729
#4	12	1.001	755

Impeller size: ϕ 340 mm

目標を超える高比速度範囲での適用を可能にするとともに効率も目標を超え、プラントの大型化の要求に応えることができるようになった。

表3に開発した4インペラの試験結果を示す。

2.3 実機への適用

大容量斜流式インペラの開発によって、これまで対応してきた50,000 m³/hに加えて、圧縮機設計点において80,000 m³/hレベルまで対応できるようになった。また、大型プラント仕様への要求に対応できるようになったことから、既に本インペラを適用した圧縮機（以下、本圧縮機という）を製作しており、プラントでの運転を待つ状況となっている。

3. DHシリーズ圧縮機の特徴

本圧縮機においても、これまでのDH機に適用してきた構造およびシステムを全範囲にわたって適用できるよ

う設計している。本章ではその特徴を概説する。

3.1 インペラの開発にあたってのパウダ対策

LDPE, HDPEおよびPPなどのプロセスでは、ガス中に重合したパウダを含むケースがほとんどであり、圧縮機はパウダへの対応が必須となる。当社では過去の教訓を踏まえてオープンタイプのインペラ開発に取り組み、多くの実績を積み重ねてきた。このたびの斜流インペラの開発においてもその経験を生かしてパウダへの対応を行っている。

3.2 入口案内翼装置

圧縮機吸込部に設置して容量調整を行う入口案内翼装置（図5）においても、ガス通路部の外側にチャンバを設けて二重構造とし、入口案内翼軸を通じて常に少量のガスをプロセス系内に流す構造とした。この構造によってガスの滞留が避けられてパウダが堆積しないようにするなど、これまでと同様な思想によって大流量に対応している。

3.3 シールガスシステム

軸封には、ガス用途の遠心圧縮機に通常適用されるタンデムドライガスシールを用い、API614 Part4に規定された仕様をベースにプロセスライセンサの要求を加味したシールガスシステムを採用することが多い。たとえば本用途では、プロセスガス中に含まれるパウダが原因となってドライガスシールに異常が発生することを避ける必要がある。このため、シールガスシステムに対しては、バッファガスとして用いることが多い圧縮機吐出ガスを用いず、プロセスに混入しても問題のないエチレンまたはプロピレンなどをバッファガスとして用いるなど、本プロセスに特有のトラブルを避けるための要求が盛り込まれたシステムが適用される。

3.4 メンテナンス性

本圧縮機では大容量を処理するため、入出口の配管口径が大きく、メンテナンスには多大な労力と時間が必要になってくる。そこで当社では、インペラや軸シールを含むロータ組立品を圧縮機の吸込側とは反対側に分解できる構造とした。これにより、プロセス配管を一切分解することなく、軸受、軸シールおよびインペラを含む重要部品の点検を行うことができる。斜流インペラ適用機においても同様な構造を採用し、メンテナンスの容易な圧縮機を提供していく予定である。図5に示したDH

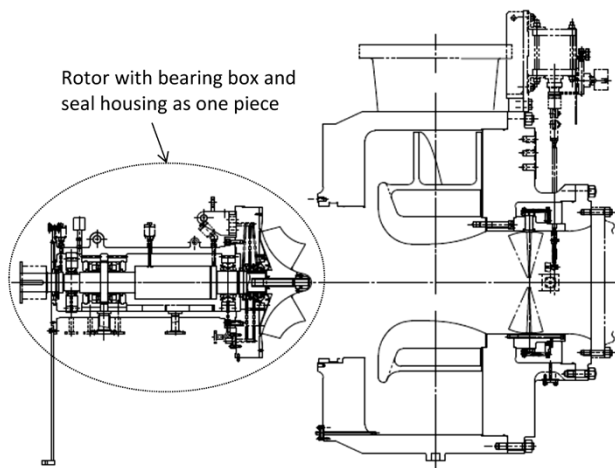


図12 ロータ組立品分解図
Fig.12 Exploded view of rotor assembly

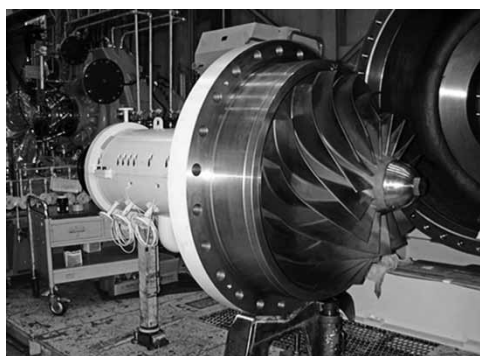


図13 ロータ組立品の外観
Fig.13 Appearance of rotor assembly

機のロータ組立品の分解図を図12に、またロータ組立品の外観を図13に示す。

3.5 プラントトリップ時の対応

本用途では、重合反応を行っているプラントが緊急停止した場合にはリアクタ内に重合したパウダが残る。プラントの再起動にあたっては、そのパウダの除去が必要になるため、多大な労力と時間が必要になる。したがって、可能な限り圧縮機を停止させることなく運転を継続したいという要求が強い。そのため、電源の瞬時停電後にも直ちに再起動できるシステム、あるいは、一部プロセスでは、電動機停止後にプロセス系内に残留するガスのエネルギーを利用して起動するタービンによって圧縮

機を継続運転し、重合反応を緩やかに停止させるシステムを構築するなど、ユーザのニーズに応じた個別の対応を行っている。

4. 今後の展望

4.1 ケーシングのシリーズ化

安定した品質を維持し、ユーザの要求に合致した納期で圧縮機を提供するためには、全適用範囲においてその性能を維持しつつスムーズな設計・製作ができるようケーシングのシリーズ化を行うことが欠かせない。本DH機においても、現在その取り組みを進めている。

4.2 電動機ロータ危険速度の検討

プラントの大型化に伴って圧縮機処理容量が増大し、電動機出力も増大していく傾向にある。いっぽうで、機器構成をシンプルにする要求は依然として強く、電動機直結構造を要求されるケースがほとんどである。とくにPEプロセスで使用する2極電動機は弾性ロータとなる。プラントトリップ時にタービンを使用するプロセスの場合、電動機ロータの危険速度がタービン運転時の回転数範囲に入らないよう設計を行うなど、これまでには考慮していなかった検討を行う必要がでてきており、今後の課題である。

むすび = PEおよびPPプラントの気相重合プロセスに用いられる循環圧縮機は、構造的には非常にシンプルな機械である。しかしながら、ガスがパウダを含むという特殊な条件で使用されるため、プラントを安定して操業するためにはその信頼性がとくに重要になる。当社は、これらのプロセスにおいて豊富な運転実績を有する数少ないメーカーであり、今後予想されるプラントの大型化に合わせた技術開発と製品メニューの拡充を行い、引き続き需要家の要求に応じていきたい。

参考文献

- 1) 経済産業省製造産業局化学課. 世界の石油化学製品の今後の需給動向. A 能力・生産・需要. 平成27年6月, <http://www.meti.go.jp/press/2015/06/20150612001/20150612001>, (参照2017-06-23).
- 2) 佐伯泰治ほか編著. 工業調査会. 新ポリマ製造プロセス (1994), p.110.