

二軸押出機 TEX の技術変遷と将来展望

Technological Transition and Future Prospect of Twin Screw Extruder “TEX”



山澤 隆行
Takayuki Yamazawa



木村 嘉隆
Yoshitaka Kimura



佐賀 大吾
Daigo Saga

要 旨

樹脂のコンパウンディングプロセスは1970年代から急速に伸長し、1979（昭和54）年にTEX初号機を市場に投入した。その後、約40年の間にTEXは世代交代を繰り返し、溝深さやトルクなどの性能向上を図ることで、時代に応じた最先端の性能を維持してきた。現在は制御やAI/IoTなどソフトウェアの高度化も進んでおり、ファクトリーオートメーション（FA）への支援機能搭載を推進している。

— Synopsis —

The compounding process of polymer has rapidly expanded since the 1970s, and the first machine of “TEX” was put on the market in 1979. Over the next 40 years or so, TEX has maintained cutting-edge performance in keeping with the times by repeatedly changing generations and improving performance such as screw depth and torque. At present, software such as control and AI/IoT are becoming more sophisticated, and support functions for factory automation (FA) are being added.

1. 緒 言

戦後の石油化学の幕開けとともに、弊社は押出機メーカーとしての第一歩を踏み出した。1950（昭和25）年代に国内で石油化学コンビナートが稼働を始めた当初から、造粒機の納入を行ってきた。当初は単軸押出機の造粒機であったが、年々増加する処理能力に対する要求に応えるため、1963（昭和38）年から二軸スクリュ型の造粒機を手がけるようになった。造粒機から始まった弊社の二軸スクリュ押出機は、コンパウンディング市場が生まれた1970年代の後半にコンパウンド専用機“TEX”を開発した。コンパウンディングは樹脂どうしの混練から無機フィラーの混練、さらには反応や脱揮など非常に幅が広く、それらの需要に応えるべくTEXは常時開発が進められ世代交代が図られてきた。本報では、TEX開

発の経緯と世代交代が進められた技術変遷、そして付帯機器などの特殊装置開発などについて解説を行い、将来展望について述べる。

2. TEX 開発の変遷

表1にTEXシリーズの開発変遷を示す。本節では、これらTEXシリーズの開発の歴史について述べる。

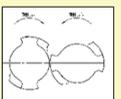
2.1 TEXの誕生

石油化学コンビナートが発展した時代は造粒機の需要が高まっていたが、1970年代半ば頃からは樹脂製品の機械強度向上による高機能化の需要が生まれ、樹脂どうしのアロイ化やブレンド化、あるいはフィラー等を添加するコンポジット化のニーズが出てきた。この当時、弊

社の二軸混練押出機は、非かみ合い型異方向回転方式のインテンシブ・ミキサー“IM”、かみ合い型異方向回転方式の二軸混練押出機“DSM”、非かみ合い型異方向回転方式の高速二軸連続ミキサ“CIM”、かみ合い型異方向回転式バルク・モールドリング用連続ミキサ“BCM”など、多種のラインナップを有していた。ただ、これらは

主に造粒用途であったため、多様なコンパウンディングへの適用には万能では無く、課題が明確化してきた。そのため、コンパウンド専用押出機を開発する考えが芽生え、1978（昭和53）年にコンパウンド用二軸スクリュ押出機“TEX”の開発に着手した。図1に当社の樹脂機械製品の中でのTEXシリーズの位置づけを示す。TEXの開

表1 歴代TEXシリーズの各種特徴

世代・形式	第1世代 S	第2世代 SS	第3世代 C	第4世代 HCT	第5世代 XCT	第6世代 α	第7~8世代 α II (i-TEX)	新シリーズ α III
西暦年	1979-1984	1985	1986	1987-1989	1990-1993	1994-1995	1996-2011	2012-現在
減速機	異方向回転	同異切替式	同方向回転	同方向回転 HIGHトルク	同方向回転 SUPERトルク	同方向回転 SUPER HIGHトルク	同方向回転 ULTRA HIGHトルク HIGHスピード	同方向回転 ULTRA HIGHトルク HIGHスピード
スクリュ	1本物ネジ継ぎ 	浅溝2・3条 セグメント 六角軸 	浅溝2・3条 セグメント 六角軸 	深溝2条 セグメント 六角軸 	超深溝2条 セグメント 六角軸 	超深溝2条 セグメント インボリュート軸 	超深溝2条 セグメント インボリュート軸 	超超深溝2条 セグメント インボリュート軸 
シリンダ	ランダム・ロング	ブロック	ブロック	ブロック	ブロック	ブロック NIC(オプション)	ブロック NIC(オプション)	ブロック NIC(オプション)
制御	-	-	-	-	-	EXANET 重量式フィード	EXANET 重量式フィード NET100	EXANET 重量式フィード NET100
TEX65トルク(N・m) (増加率)	1911 (100)	2489 (130)	2489 (130)	3185 (167)	3499 (183)	4018 (210)	4803 (251)	6741 (353)

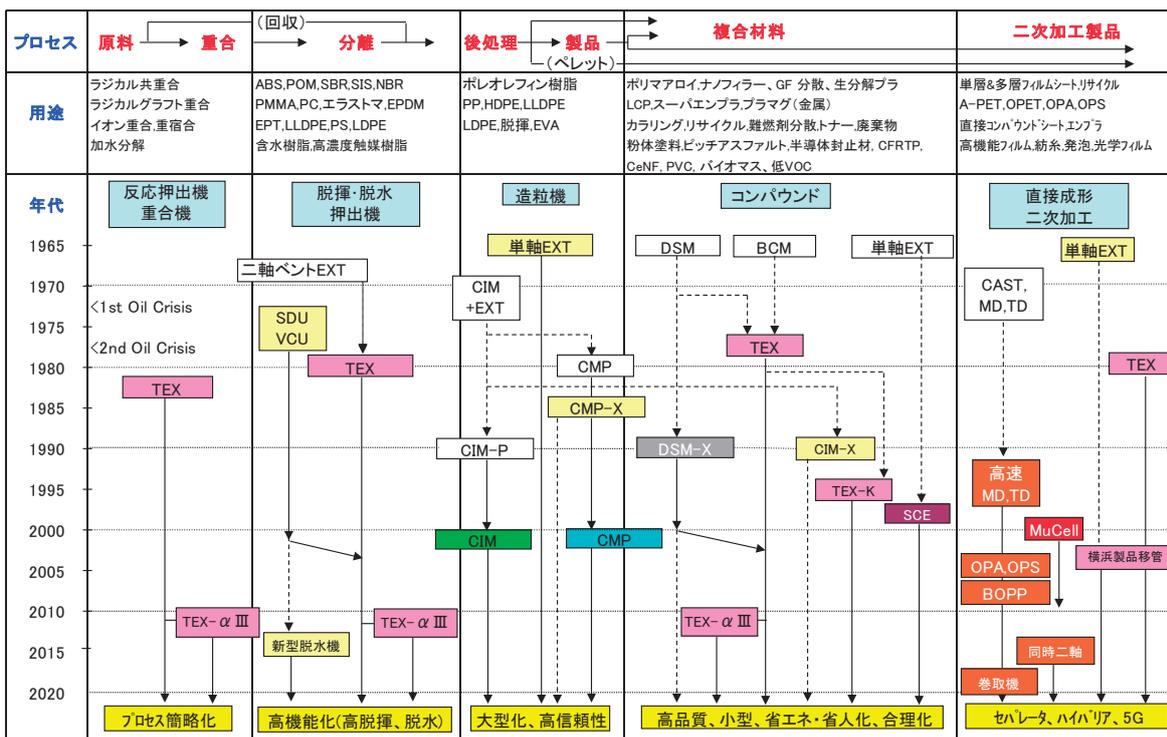


図1 樹脂機械製品の開発ロードマップ

発には、二軸スクリュ構造とその性能との関連を明確に体系化する必要があり、弊社広島製作所の機械研究所にてスクリュの混練、溶融機能および固体輸送機能などに関する一連の系統的な基礎研究を行い、TEXの基礎設計がなされた⁽¹⁾。

このようにして1979(昭和54)年に完成した第1号機となるプロト機は、かみ合い型二軸異方向回転方式を採用し、スクリュ外径が65mmのTEX65であった。このTEXは機械研究所へ設置し、基礎実験データの取得や顧客の要求仕様に対する検証実験に活用された。図2に、その後生産機として納入した初期型のTEX65の外観を示す。

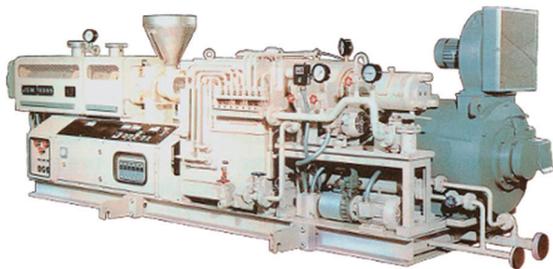


図2 初期型のTEX65

TEXシリーズは1段(単独)方式であるため、CIMと単軸押出機との2段(タンデム)方式に対し、システムのシンプル化、省スペース化、省エネルギー化などを特徴とし、さらに脱揮・脱水などの機能を付加することが可能で、プロセスの合理化に寄与できるなど多くのメリットを発揮した。具体的には、シリンダのL/D(シリンダ径Dに対するシリンダ長Lの無次元長さ)は、当時のCIMが約5~7であったのに対し、TEXシリーズは30以上で、かつバント数も2箇所以上を任意に設定することが出来た。

2.2 異方向回転方式から同方向回転方式への転換

TEXを上市した当時のコンパウンドは、ポリプロピレン(PP)やポリエチレン(PE)に向きファイラーやガラスファイバーを分散・混練させ、ストランドカットペレットを得る程度のものであった。しかし、上市から5年ほどが経過した1980年代半ばになると、二軸押出機の高いせん断エネルギーによる化学反応を伴うコンパウンディングが増えてきた。この化学反応を伴う混練処理には、押出機内の滞留時間を長くするためのロングL/Dや、押出機の途中から各種添加物を供給するサイドフィード方式の採用など、要求が多様化してきた。TEXで当初採用した異方向回転方式は、その構造上ロングL/D化や高回転化への拡張が難しい課題を有していたため、TEXはその後同方向回転と異方向回転の両方を可能にした切り替え方式を採用した⁽²⁾。異方向回転方式

に対し同方向回転方式の長所は、オペレーションの安定性とスクリュのセルフクリーニング性を有することにある。特に化学反応プロセスではスクリュ表面に樹脂が付着・滞留すると反応が過剰に進み、吐出樹脂の品質が安定しない懸念を有するため、同方向回転方式によるセルフクリーニング性は非常に有用であった。さらに、この世代からスクリュとシリンダはそれぞれセグメント化およびブロック化し、各プロセスに対してフレキシブルな対応が図られるよう設計が施された。この構造は、部分的に摩耗や腐食が生じてその部品のみを組み替えが行え、また添加剤の配合を変更した場合に混練度合いを調整するためにスクリュを任意に組み替えが行えるため、メンテナンス面でも大きなメリットを有した(図3)。その後、1986(昭和61)年に開発した第3世代のTEXでは、完全な同方向回転方式への転換が図られた⁽³⁾。この当時は各世代機が共存して販売・納入を行っていたが、1990(平成2)年頃からは同方向回転方式の納入実績が増していき、1990年代後半にはほとんどが同方向回転方式となった。



図3 六角軸を採用したセグメントスクリュピース
(第五世代TEXまで採用)

2.3 高トルク型TEXの開発

コンパウンディング業界では1990年代以降も高能力化への要求は高まる一方であり、高吐出に有利なスクリュの深溝化と押出機の高トルク化の開発が進められた。1990年代半ばごろからは、高能力化に加え吐出樹脂の品質を高めるために低温押出の要求も高まり、さらなる高トルク化への流れが続いた。このようにして、TEXは1994(平成6)年に第6世代のTEX-aを、1996(平成8)年には第7世代となるTEX-aIIを開発した。納入台数は2000(平成12)年には1000台を越え、同年には脱揮押出機としてTEX400を納入した(図4)。これはスクリュ径が443mm、スクリュの全長は17mを超える、現在でも世界最大級の二軸スクリュ押出機である。2005(平成17)年には年間受注100台の大台を突破、更に2006(平成18)年には納入台数1500台に達した⁽⁴⁾。



図4 世界最大級のTEX400の外観

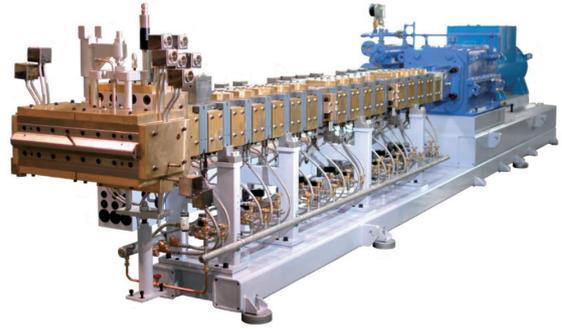


図6 TEX54aIII

2.4 TEX-aIIIシリーズの開発

図5にTEX65におけるオレフィンコンパウンドの代表的処理量の世代別推移を表す。1997（平成9）年頃から2000（平成12）年にかけて小型TEXシリーズの処理量は飛躍的に向上した。市場ニーズにより、ダウンサイジングや高能力化の要求が高まり、現在では同口径で比較した場合、第一世代の約10倍に匹敵するほどの処理量にまで進化した。多品種少量生産に対応するための操作性の向上と大容量化への要望は急速に高まっていた。これらニーズに対応するため、2011（平成23）年にさらなる数々の新しい設計製造技術を導入した新シリーズの開発に着手し、2012（平成24）年には世界最高水準のトルクを有する第9世代TEX-aIIIの販売を開始した（図6）⁽⁵⁾。

TEX-aIIIトルクは、第1世代機と比較すると350%以上、TEX-aIIよりも36%向上させた世界最高水準の高トルクコンパウンド用二軸押出機である。これは、高負荷環境下でも耐えうるスクリュ・シリンダ素材の開発、3D化に伴い綿密化された設計技術さらには機械加工の精密化など、長年にわたって蓄積・発展を遂げた技術の賜物によって開発された最新のTEXである。

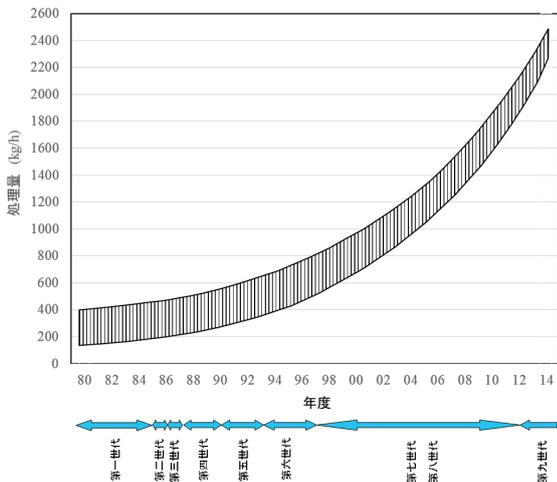


図5 TEX65のオレフィンコンパウンド処理量の推移

TEX-aIIIのターゲットプロセスは、エンプラやスーパーエンプラへのフィラー、GF、CFなどのコンパウンディングや、TPVのような高トルク運転を要求するコンパウンディングである。汎用樹脂も含めたこれらプロセスはサイドフィーダ(SF)を併用することが多いが、図7に示すSFD (Side Feed Deaerator)の活用により、高濃度フィラーコンパウンドが可能になっており、低吐出温度も達成可能なプロセス構築が達成出来ている。

TEXシリーズは、上流から下流までのエンジニアリングを含めたTurn-Keyでのシステム化を推進している。また、特に海外においてニーズが高まっている据付作業の効率化と、低コスト化が図れるモジュールスキッド方式を開発した。図8にTurn-Keyシステム対応の概念図を示す。

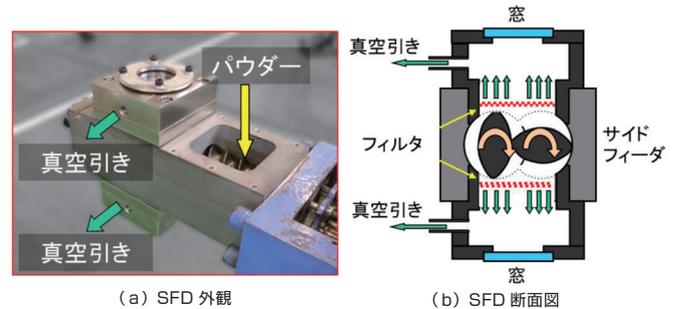


図7 SFD (Side Feed Deaerator)

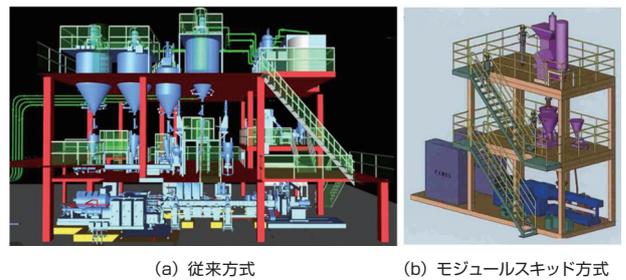


図8 Turn-Keyシステム対応の概念図

3. 各種特殊装置の開発⁽⁶⁾

1993（平成5）年、バブル期崩壊後の経済停滞時期による一時的な受注減少が見られたが、この時期に様々な差別化技術を開発した。そのひとつにTEXの混合分散性能を従来以上に向上できる特殊混練シリンダの開発が挙げられる。これはNICシリンダと称する独自の混練シリンダであるが、図9に示す様にシリンダの内面に特殊な形状の溝を加工することで、樹脂に伸張流などの変化に富んだ流れを付与することで、混合分散性能を向上させるものであった。この技術は粘度比が大きな二成分以上の樹脂原料を混練分散するポリマーアロイ、ポリマーブレンドや、微粒子フィラーを樹脂に混合分散するマスターバッチ分野などで多くの実績を上げている。

2005（平成17）年には、フィラーコンパウンドにおいてフィラーの混合分散性能と搬送能力を向上させるTKD（ツイストニーディングディスク）を開発した。これは、従来のニーディングエレメントのチップ部にリードを持たせたもので、ディスク間の流れ（リークフロー）が従来のニーディングエレメントに比べ低下するため、高い搬送能力が得られることを特徴としている（図10）。

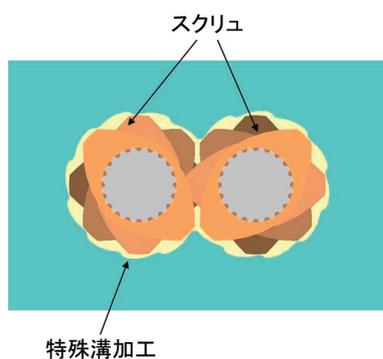


図9 NICシリンダの断面形状

その高い搬送能力が混練領域の樹脂圧力上昇を抑制できるため、フィラーの二次凝集の発生が抑えられる。また、漏れ流（リークフロー）の発生により樹脂が繰り返し受けるせん断作用が低減されるため、樹脂温度が低下し粘度が高く維持された状態でのフィラーとの混練が可能となり、良好な混練分散効果を得ることができる。

4. ソフトウェア技術の発展

4.1 押出機制御システム

TEXのコンパウンディングシステムは、押出機を中心に原料供給用重量式フィーダをはじめ、センターホットカット装置、サイドホットカット装置、オーバル型スクリーンチェンジャ、サイドフィーダ、ベントスタッファ、遠心乾燥機など様々な周辺機器が設備化される。弊社では、これら装置を一貫生産設備として提供できるシステム化を充実させた。これらの周辺機器類と押出機を一括して操作を行うシステムコントローラ“EXANET”を開発し、第5世代TEXから標準搭載を始めた。EXANETは、その後も画面のカラー化、処理速度の高速化、マルチタッチパネル化と進化を遂げてきた。図11にEXANETコントローラの変遷を示す。



図10 TKDスクリュ外観



図11 EXANETコントローラの変遷

4.3 AI / IoT

ここ最近のソフトウェアトレンドとして、AI（人工知能）とIoT（もののインターネット）がある。弊社では、“J-WiSe”と称したIoTソリューションの開発を推進しており、押出機への搭載計画を順次進めている⁽¹¹⁾。J-WiSeでは、①生産管理“NET-100EX”、②サービス・保全“Abnormal Diagnosis”、③運転支援“Assist Mode”、④生産自動化“Automatic Starting up Function”との4種のコネクトを定めており、当社製品を購入いただいたお客様が安心して操業できることを目的に、早期実用化に向けた開発を遂行中である(図14)。

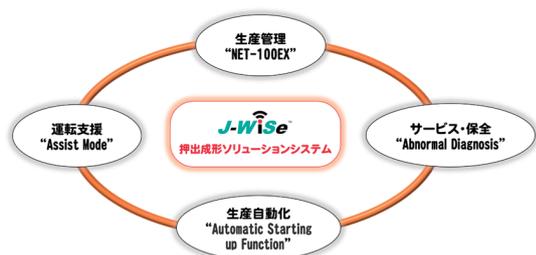


図14 J-WiSe 押出成形ソリューションシステム

このうち、“Abnormal Diagnosis”は、減速機をはじめとする駆動システムの軸受け部品の消耗度合いを監視し、その故障を予知することで保全を促すシステムである(図15)。ベアリングをはじめとする消耗部品の摩耗度合いを異常検知するシステムは各社で対策が練られ、また開

発が進められているが、潤滑油に常時浸された部品の状態監視を直接的に行うことは困難性が伴う。本システムの大きな特徴は、FEM解析によって求めた減速機のケーシングに伝播される共振点へ振動センサを装着し、各所のベアリングの異常状態を検知することにある。これらによって、センサが検知する振動波形から異常が生じるベアリングの位置を特定し、弊社独自開発のAIによってその損傷頻度を判定するシステムである。このシステムを搭載することで、不慮の故障を未然に予防できるばかりか、大規模メンテナンス時期の計画が立てやすくなるため、無駄の少ない保全が可能になる。

“Assist Mode”は、あらかじめ操作パネルで生産運転の条件を入力するだけで、押出機の起動時はボタンを1度タッチするだけで生産運転まで自動で押出機を起動できるシステムである(図16)。

図17に Assist Mode のシステム概略を示す。まず、所定プロセスのフィーダとスクリュ回転数などの生産条件を入力する。その入力が完了すると、コントローラ内で押出機起動時から生産条件までの理想的な立上げ曲線が自動演算により生成される。その後、操作パネル上の起動ボタンをクリックすると、運転曲線に従って機器の自動起動が開始される。このシステムの特徴は、通常の手作業による立上げではフィーダとスクリュ回転数を徐々に高負荷へ設定する、いわゆるステップ起動を行うことに対し、最適化された関数に従ってこれら機器の負

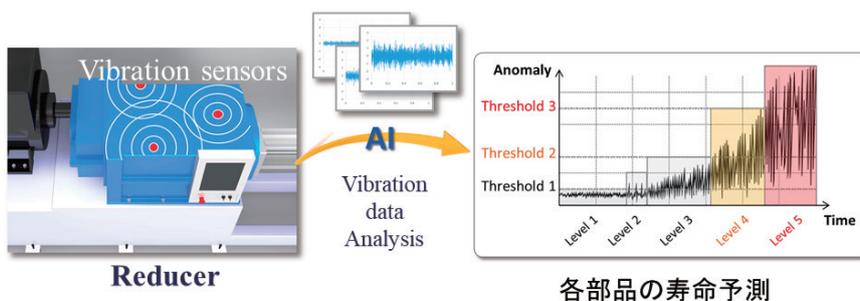


図15 Abnormal Diagnosis による減速機の予防・保全システム



図16 運転支援システム “Assist Mode”

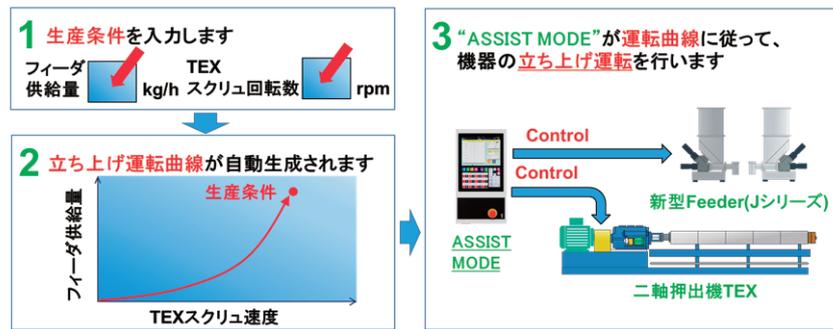


図17 Assist Mode の概略

荷を連続的に高めることにある。この連続起動による恩恵は、装置起動時に頻発しやすいイベントアップやフィードネックの発生リスクを排除できることにあり、本システムが完成し上市を始めた2018年度以降これまでにこれらのトラブルが発生した事例がないことが大きな利点といえる。

5. これからのTEX； コンパウンドプロセスの将来像

世界的な環境意識の高まりを契機とし、サステイナブル社会を実現するための手段として押出機を利用した様々なリサイクルプロセス技術が注目されている。

その一つが、二軸押出機TEXを使用したPMMAの連続式解重合(モノマー化)プロセスである。当社の欧州子会社であるJapan Steel Works Europe GmbHでは、EUにおいて2022年に最初の商業設備を建設することを目的とするMMAtwoコンソーシアムに参画しており、活動を行っている。原料のPMMAは、自動車のテールランプ用レンズ、食品用密封容器、照明板、水槽プレート、コンタクトレンズなどの産業廃棄物や使用済廃棄物と多岐にわたるが、MMAtwoでは二軸押出機を用いて解重合させ高品質なMMAモノマーにリサイクルし、最終的に高品質なPMMAに再生することであり、二軸押出機TEXはリサイクルプロセスの主幹装置として高いパフォーマンスを示していることからサステイナブル社会の実現に貢献する事が期待されている。

また、地球温暖化や資源枯渇、有限な資源の有効利用の観点から、カーボンニュートラルである家畜糞尿や汚泥をはじめとするバイオマスなどの有機性廃棄物が、新資源・新エネルギー固体燃料として位置づけられ、マテリアルリサイクルやサーマルリサイクルなどの試みが世界中で積極的に行われている。当社では、二軸押出機TEXの特徴のうち、押出機内でのスクリュによるせん断発熱とヒータによる外部加熱という相乗効果を生かした、有機性廃棄物の熱分解プロセスという新しいケミカ

ルリサイクルプロセスについても検討を行っている。これまでのラボスケールの検討結果より既存のプロセスと比較し二軸押出機を適用する事で高い生産性と処理コストが得られる事が示唆されており、こちらも強い関心と期待を集めている。

このように、これまでのプラスチック混練機としての二軸押出機の多彩な用途に加え、高効率高品質な連続式ケミカルプロセス装置としての用途は着実に拡大しており、人類がサステイナブル社会を実現するために当社の二軸押出機TEXが重要な役割を担うものと期待している。

6. 結 言

樹脂をコンパウンディングして機械強度などの機能性向上を目指すプロセスは、1970年代から急速に伸長し、TEXも1979年に初号機を市場に投入したことから実績のスタートを切った。その後、約40年の間に樹脂原料の開発も進められ、多種多様なコンパウンディング材料が日常的に多く使われるようになってきたが、これに合わせて押出プロセスでも多様な補機類が開発・装着されるようになり、装置構成は非常に複雑化してきた。これらを一括制御するためのソフトウェアも高度化が進み、それと同時にシミュレーション技術やAI/IoT技術も普及を見せてきた。今後はプロセスの合理化がますます強く要求されることになり、我々機械メーカーはそのユーザーの声に応えるべく、ハード・ソフト両面での開発をさらに加速・深化させ、価値を高めた押出機の提供を継続していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 牧淑樹, 織田典聖: “二軸混練押出機 TEX による複合樹脂の混練押出し”, 日本製鋼所技報, 41 (1982), P.17
- (2) 白土達, 水口英樹, 橋本憲明, 溝口光明, 花木公康, 織田典聖: “異方向・同方向回転二軸押出機 TEX の性能”, 日本製鋼所技報, 42 (1986), P.56
- (3) 織田典聖, 柿崎淳, 今村幸生, 上田正信: “コンパウンド用二軸混練押出機 TEX の進歩”, 日本製鋼所技報, 44 (1990), P.58
- (4) 水口英樹, 清水信明, 岩井淳一, 井上茂樹, 石橋正通, 宮内直孝, 大下真雄, 福田秀昭: “樹脂機械の技術の変遷と将来展望”, 日本製鋼所技報, 57 (2007), P.31
- (5) 住田克己, 友光健二, 佐賀大吾, 東定誠, 清水陽平, 小館一浩, 石橋正通, 柿崎淳, 井上茂樹: “二軸スクリュ押出機 SUPERTEX- α III の開発”, 日本製鋼所技報, 64 (2013), P.56
- (6) 岩本圭彦, 新谷浩昭, 小館一浩, 高本誠二, 石橋正通, 井上茂樹: “二軸スクリュ押出機 TEX の技術開発と将来展望”, 日本製鋼所技報, 58 (2008), P.22
- (7) 富山秀樹: “押出成形の IT 化”, 成形加工, 15, 11 (2003), P.730
- (8) 富山秀樹, 石橋正通, 井上茂樹: “二軸スクリュ押出機内の樹脂挙動解析ソフトウェア「TEX-FAN」の開発”, 日本製鋼所技報, 55 (2004), P.32
- (9) 高本誠二, 富山秀樹, 新谷浩昭, 井上茂樹: “二軸スクリュ押出機における脱揮表面更新のモデル化と脱揮予測技術の開発”, 日本製鋼所技報, 57 (2006), P.62
- (10) 富山秀樹, 高本誠二, 新谷浩昭, 井上茂樹: “”, 成形加工, 19, 9 (2007), P.565
- (11) 富山秀樹, 戸田賢二, 沖本翼, 小岩哲也, 吉井佳介, 松下英和, 仁井貴文, 山澤隆行: “J-WiSe 押出成形機の IoT ソリューション”, 日本製鋼所技報, 70 (2019), P.51