特集

解説

環境に配慮した生産システム

素材産業における環境配慮と資源循環*

Environmental Consideration and Resource Circulation in Industrial Materials Manufacturing

鈴木章黄**

Akihiro SUZUOKA

Key words

environmental business, sustainable growth, recycling, value evaluation, LCA, zero emission, polyester material

1. はじめに

世界の人口は1800年には6億人、2000年は61億人、2050年には93億人と推定され、爆発的に人口が増加している。人口増加と生活水準の向上に伴い、大量生産・大量消費並びに大量廃棄が行われ、地球温暖化・化学物質環境汚染・資源の枯渇などをもたらし、森林の減少・砂漠化の進行など地球上の動植物にかつてない深刻な影響を与えている。

21世紀は人口爆発の世紀・環境の世紀・水の世紀・食糧危機の世紀といわれている。地球環境の保全と貢献・製品の利便性の追求・健康安全の追求・個性の伸長を実現するために、効率の高い物質循環型社会の形成が求められており、製造業も含めたビジネスパラダイムの変更が必要になっている。

急増する人類のためにも大量生産・消費を達成し、ストックからフローに転換して、低い環境負荷で資源循環することが重要になっている(図1)。素材レベル・部品レベル・最終製品レベルのあらゆる段階で、従来の品質・価格・納期・ファッション性・機能性などを低下することなく、環境負荷の軽減の視点も加えて商品を再設計・再評価することである。

特に、素材レベルでは性能・機能性といった素材の持つ特質以外に、環境に対して優しい素材か否かが重要な位置を占めるようになってくる。具体的には、製造時のエネルギー負荷・廃棄量の抑制・廃棄焼却時の毒性ガス発生の抑制・温暖化ガスの抑制・有害化学物質の不使用・資源の循環リサイクル使用等々が課題として挙げられる。特に弊社

は、資源枯渇の抑制と、環境負荷低減(温暖化抑制など)を同時に達成できるよう目指している。たった一回だけほかの用途にリユースすることをリサイクルと称していることがあるが、資源から製品の流れに物質循環として戻す本質的な資源循環のサイクルと峻別すべきである。

帝人グループは1992年に地球環境憲章を制定し、CO₂・有害化学物質の排出削減・非有効活用廃棄物削減・エネルギー効率改善の数値目標を設定し、環境関連ビジネスの推進などの環境経営を進めてきた。

特に弊社の主力素材であるポリエステル(PET)は原料モノマーのテレフタル酸(TPA)とエチレングリコール(EG)との重縮合反応で合成され、逆に解重合反応で原料モノマーに分解することも可能で、容易に出発原料にまでケミカルリサイクルすることが可能であり、再びPETを合成することができる。素材製造工程の製造工程から発生する純粋なPET廃棄物のリサイクルは、約40年前から操業化している。しかし、天然素材・合成高分子・染料・顔料・各種添加剤・処理剤・改質剤が混入すると、回収原料の着色、純度の低下、異物混入などが回避できず、回収原料の循環利用ができなかった。この積年の課題を解決できる技術開発を行い、ポストコンシューマのPET製品(ほかの物質も混合使用)を、工程の中で混入物質を分離しつつ解重合し、極めて低い環境負荷でかつ高効率に完全物質

地球規模での環境劣化の進行
人口の急増
生活水準の向上

資源の枯渇
地球温暖化
化学物質管理
廃棄物処理
食料・水問題

世界人口
1800 : 6億人
1900 : 20億人
1950 : 25.2億人
2000 : 60.6億人
2050 : 93.2億人

環境問題の源は人口の急増：ストック社会からフロー社会を目指す

基本姿勢：人類の進歩と利便性の追求、ならびに環境保全の共存

低エネルギー、物質汚染回避、温暖化回避を達成する高効率システム追及
市場ニーズに合致する高価値製品に循環再利用し、環境保全市場の創出

図1 環境問題の認識

*原稿受付 平成17年6月10日

**帝人(株)、帝人ファイバー(株)(東京都千代田区内幸町2-1-1)

鈴木章黄

帝人(株)グループ執行役員 CTO 補佐(環境リサイクル担当)、帝人ファイバー(株)取締役営業企画室長。

1972年帝人(株)入社、1998年原料重合事業部長、2001年繊維技術統括室長、2002年帝人理事、帝人ファイバー取締役、2003年帝人執行役員、2004年現職。

表1 環境関連技術・素材・製品

技術・製品	環境効果	環境効果	環境効果	環境効果	環境効果
ボトル to ボトルリサイクル 繊維 to 繊維リサイクル ポリカーボネートリサイクル PLA リサイクル 重金属リサイクル	エコサークル 易リサイクル繊維 (ウレタン塩ビ代替など) 汚染土壌浄化 廃水から酢酸回収	PEN ボトル	モルフォテックス	温暖化ガス削減 (CDM 化など)	
油吸着フィルタ 化学物質排出削減	HFC 破壊処理 脱硫・脱硝装置	生ゴミ生成 PLA 生・光分解樹脂 (PET ベース)	ウレタン代替 ELK 塩ビ代替エラストマー	温暖化ガス削減	
TULK 缶 人工皮革 フィルタ	炭素繊維浄化器	土壌汚染修復	近自然河川護岸	処分場アセスメント ダイオキシン分析	
省エネ繊維 熱線反射フィルム	小型焼却炉	繰返し使用繊維	天然ガスボンベ 風力発電部材 燃料電池部材		
屋上緑化対策	エコベット使用 選挙用ボード	間伐材フェンス			
ダイオキシン対策土木資材 紫外線反射フィルム 重金属フリー PET 制菌、健康、安全繊維			アスベスト代替 アラミドバルブ	環境ホルモン シックハウス分析

図2 徳山事業所での排出量の推移

図3 PETの重縮合と解重合反応

循環できる技術を世界で初めて開発、工業化し事業化した。

2. 資源循環型社会形成に関する事業展開

弊社は環境先端企業として、下記4件の地球環境保全目標を設定して推進中である。

- ① ネルギー効率 1%/年 向上
 - ② CO₂ 排出量 2010年 国内15%削減(1990比)
 - ③ 有害化学物質の排出量 2005年 半減(1998比)
 - ④ 非有効利用廃棄物の排出量 2005年 半減(1998比)
- ①に関しては、省エネプロジェクト発掘努力の継続を行いほぼ目標通り進展中である。②についても目標通り進展中で、海外も10%削減を目標に推進している。③については2001年にすでに目標の半減化を達成し、さらなる削減に努力している(60%削減を既に達成)。④についても計画通り進展中であり、徳山事業所(山口県)では2003年に化学・繊維工場として数少ないゼロエミッションを達成し、他の事業所でも同様に取り組んでいる。

徳山事業所では5R: Recycle(再資源化する)・Return(購入元に戻せる物は戻す)・Reuse(再使用する)・Reduce(ゴミを減らす)・Refuse(ゴミになるものを買わない)を基準に、分別システムの構築を行ってゼロエミ

ッションを達成した(図2)。

環境関連ビジネスについても着実に伸びており、年15%の売上げ成長率となっている。使用済みPET含有製品の原料リサイクル(ボトルtoボトル、繊維to繊維、フィルムtoフィルム)、ポリカーボネート、光・分解性ポリ乳酸樹脂などの永久物質循環を目指すと共に、リターナブルポリエチレンナフタレートボトル、バイオマス発電、アスベスト代替、汚染土壌浄化、クリーンディベロップメントメカニズム(CDM)推進、環境関係分析、環境教育啓蒙活動など多岐にわたる分野で環境配慮の事業経営を行っている(表1)。

3. ポリエステル(PET)原料リサイクル技術

不純物が全く混在しない回収PETの原料リサイクルは、弊社がPETの技術導入した1958年の4年後には技術確立しプラントの稼動を開始した。基本反応スキームを図3に示した。その後、プラントの効率向上を進めてきたが、1992年の地球環境憲章制定に従い、PETを含むポストコンシューマ製品の回収に技術開発のターゲットを変更した。天然繊維やポリエステル以外のナイロンやポリエチレン・ポリプロピレン・ポリスチレン・塩ビなどの合成樹

図4 ポリエステル製品の原料リサイクル図

図5 ポリエステル完全物質循環型プラント

図6 繊維 to 繊維のプロセス内容

脂、無機化合物等を含んだ製品をそのまま処理し、再び石油から製造したポリエステル原料（ジメチルテレフタレート：DMT）に戻してPETを再生産できる世界初・最先端の技術を開発して2002年に事業化した。図4に全体のスキームを示した。

技術開発のポイントは、製品に使われたり混入したりする夾雑物を、如何に経済的に除去するかである。濾過・蒸留・比重分離など周知の技術を組み合わせれば容易に除去できるが、過大設備となって経済的でなく環境負荷が高くなる。従来の解重合反応に工夫を加えると共に、既存の分離技術を最小限で採用し、かつ多段で機能を発揮させる事で除去技術を創り上げた。製品に混入してくる不純物が極めて多種多様であり、これらすべてを実際に除去できるかという実証が必要であった。市中から500種を超える各種

製品を入手し、除去実証を行い完全除去ができることを検証した。プラント操業以後も各種製品で試験を続けているが、今まで分離困難な例は認められていない。

この技術開発で達成できたことは、少ない環境負荷で物質の完全循環が達成でき、より価値の高い製品に作り変えることができることである。すなわち、資源枯渇の抑制と温暖化の抑制、ならびにより価値の高い製品を提供できて、人類急増の社会に対応可能になったということである。

従来のリサイクルという表現は、かなりの曖昧さを持っていた。ただ1回再利用できる方策をリサイクルと表現していた。本質的には、1回だけのリユースと位置づけるべきで、最終的には廃棄され、埋立や焼却などで地球上や大気中にストックとして蓄積される。回収品をメインストリームに戻してストックとならずにフローを形成するもの

「エコサークル®」…ポリエステル繊維製品回収システム
賛同企業でメンバーを構成し、商品の開発や商品化およびその回収・再利用を共同で推進中
現在の回収品：ユニフォーム、学生服、体育衣料、紳士服、婦人服、カーテン、選挙ボード、
定期券など

図 7 繊維製品回収システム

表 2 繊維製品回収システム

1) DMT 品質

項目	単位	回収 DMT	石油からの DMT
外観		白色個体	白色固体
凝固点	℃	140.6 以上	140.6 以上
酸価	KOH mg/g	0.01 以下	0.045 以下
パーゼン単位色数	HO (APHA)	25 以下	50 以下
硫酸化灰分	ppm	0.01 以下	100 以下
鉄分	ppm	0.5 以下	1 以下
純度	%	99.99 以上	99.98 以上

を、リサイクルと表現すべきであろう。本技術は完全資源循環のリサイクル技術である。

4. 原料リサイクル技術の展開

顧客で使用された製品を回収し、多種多様の混在物を回収工程の中で除去して、石油由来原料に比べてより高品質の原料として回収する技術を確認し工業化した（図 5）。

4.1. 繊維 to 繊維

原料リサイクル技術を用いて PET 繊維製品を回収し、標準品だけでなく特殊高機能を持つ繊維製品を作ることにも可能になった。図 6 にプロセスの内容を示した。2002 年 7 月から繊維製造工程の廃棄物と、市中で使用された繊維製品の回収品を原料としたリサイクルを開始し、販売を行っている。

2) TPA 品質

項目	単位	回収 TPA	石油からの TPA
外観		白色粉末	白色粉末
酸価	KOH mg/g	675 ± 2	675 ± 2
灰分	wt ppm	5 以下	5 以下
鉄分	wt ppm	0.1 以下	0.1 以下
全金属成分	wt ppm	0.115 以下	1 以下
アルカリ透過率	%	99.5	98 以上

3) PET 樹脂

項目	単位	回収 PET	石油からの PET
限界粘度	—	標準 ± 0.01	標準 ± 0.01
DEG 含有量	wt %	標準 ± 0.10	標準 ± 0.10
果物	—	0.2 mm 以上 1 ヶ/kg 以下	0.2 mm 以上 1 ヶ/kg 以下
フレーバーテスト	—	標準品と差なし	標準品と差なし

ユニフォーム・学生服・体育衣料・スポーツウェア・カーテン・選挙ボード・定期券・一般衣料などのリサイクルを行い、より高品質・高機能の長繊維として市場に提供している。

繊維に関しては、PET ボトルのようにリサイクル法が制定されておらず、製品回収にあたって廃棄物に関する法規制などが存在し回収困難な状況にある。物質循環を実現する時の最初の課題は、いかに製品を回収して原料として取扱うことができるかということにある。この点をクリアすべく回収システムとして独自の回収システムをも構築している（図 7）。

4.2. ボトル to ボトル

市中で使用された PET ボトル（炭酸飲料用、耐熱用、非飲料用や着色ボトルなどを含む）を原料とし、本リサイクル技術を用いて石油由来と同等品質の原料に再生できる。これを用いて石油由来品と同等の高品質耐熱 PET ボトル樹脂を生産している。リサイクル製造された樹脂は、

図 8 LCA 分析の範囲

<世界初のポリエステル完全循環型リサイクルシステム>

1. 大量廃棄
- 市場製品のリニューアブル（エターナルリサイクル）
循環理論収率約 100 %（現状 95 %弱）
2. 資源枯渇
- 原材料として、原油を消費せずに途切れのない資源循環の輪を構築
ナフサ消費の削減 △ 1.6 Ton / PET 1.0 Ton 循環
3. 地球温暖化
- 負荷の大幅低減
* 原油から原料（DMT：テレフタル酸ジメチル）を製造した
1. 使用エネルギーは 約 2 割
2. 炭酸ガス排出量は 約 5 割 → 廃棄・焼却を加えると約 2 割
4. 化学物質汚染
- 物質循環により、汚染化学物質を分離・除去・再使用

図 9 新原料リサイクルの効果

食品安全委員会の認可を始め各種の承認を受け 2004 年 4 月から販売を開始し市場で使用されている（表 2）。
以上 4 章で述べたように、環境に関するビジネスを行うには、技術だけでなく運営の仕組みなど多岐にわたる整備が必要である。

5. 本技術の環境負荷評価結果と新評価法

環境負荷評価は通常 LCA 評価に当って重要なことは、どの範囲を評価するかということである。LCA 評価を行うに当たっては、石油採掘から始まって、輸送・加工・製造・使用・廃棄収集・回収・埋立・焼却といった、揺り籠から墓場までをその評価範囲として、外部機関に評価いただいた（図 8）。
①今回開発した本技術の採用で、資源の完全循環使用が可能となり、PET 1 トンを循環使用するとナフサ消費を 1.

表 3 ボトル to ボトルの LCA 結果

PROCESS	CASE	ENERGY (GJ/DMT-t)	CO ₂ (CO ₂ -t/DMT-t)
BOTTLEto	現状（自家発）	30,593	2.207
BOTTLE *1	公共電力ベース	27,544	1.637
	コージェネベース	28,669	1.477
VIRGIN *2		62,742 (内 FSE: 34 818) *4	1.488
			3.688 *3

* 1 ユーティリティー原単位は、帝人ファイバー徳山事業所データ（石炭焚きボイラー）を使用。
* 2 ユーティリティー原単位は、ボトル用樹脂業界のチャンピオンデータを使用。生産能力は、数十万トン/年。
* 3 廃 PET 製品の焼却発生分 CO₂（焼却率 78 %：環境省一般廃棄物処理データより）を含む。
* 4 FSE（フィードストックエネルギーの略）という化石資源の含有エネルギーを燃やした時に消費されるエネルギーを含む。

		ENERGY 削減率	CO ₂ 削減率
エネルギー削減率 (対 VIRGIN *5)	現状（自家発）	▲ 51 %	+ 48 %
	公共電力ベース	▲ 56 %	+ 10 %
	コージェネベース	▲ 54 %	▲ 1 %
CO ₂ 削減率 (対 VIRGIN)	現状（自家発）		▲ 33 % *6
	公共電力ベース		▲ 55 % *6
	コージェネベース		▲ 60 % *6

* 5 VIRGIN に含フィードストックエネルギー
* 6 VIRGIN に含焼却（* 3 焼却率 78 %）時の発生炭酸ガスを加えた値をベースとする

6 トンを削減することが可能となる。このときの環境負荷に関しては、
②繊維 to 繊維は石油から DMT を生産するのに対し、消費エネルギーは 16 %で、また二酸化炭素排出量は 23 %（廃棄焼却による発生分を含む）で生産ができると評価された（図 9）。「繊維製品の LCA 調査報告書（経済産業省「繊維製品 3R 推進会議」（2003 年 10 月）
③ボトル to ボトルでは、PET ボトル協議会の「PET ボトルのインベントリー分析報告書」（2004 年 8 月）について、

リサイクル製品とバージン製品から得られる全利益の差で、リサイクル価値を判断する

$$V_{\text{Ary}} = [(PR_{\text{ry}} - PR_{\text{v}}) - (MT_{\text{ry}} - MT_{\text{v}}) - (CS_{\text{ry}} - CS_{\text{v}}) - (EL_{\text{ry}} - EL_{\text{v}}) + RL_{\text{ry}}] * Q$$

品質等価値格差
原材料コスト格差
製造加工コスト格差
環境負荷格差
推進インセンティブ
販売量

PR 指標：流通価格（競合品、用途、市場規模、成長性、利便性、品質、ブランドなど）

CS 指標：製造コスト（規模、稼働率、比例費、固定費、物流費、技術、インフラなど）

EL 指標：資源枯渇（エネルギー資源、鉱物、天然物、水など）、温暖化、異常気象、環境汚染（大気、海洋、湖沼、飲料、土壌など）、化学物質汚染、生態系破壊（酸性雨、砂漠化、塩土流出、生物など）、廃棄・焼却・埋立での排出・汚染など

図 10 循環型社会を形成するときの価値評価方法

消費エネルギーが 44 %、CO₂ 排出量は 45 % で生産できると評価された（表 3）。

環境評価法は種々存在するが、環境会計（外部不経済）と企業会計（内部経済）の評価を独立して議論する場合はほとんどである。筆者は事業そのものが持続可能な成長をもたらすことが環境保全維持の前提であり、事業の持つ意味を評価するにはこれらを同時評価するべきではないかと考えている。すなわち、地球環境に与えるインパクトを環境負荷の修復費用という視点で金額評価を行い、企業会計

と同次元で評価して、資源循環とリサイクル製品価値と総計してリサイクルする価値を評価する（図 10）。

リサイクルすることの価値を高くすれば、推進インセンティブ（環境保全のための補助支援金など）の低減が可能となり、リサイクルが常態化に向かう。環境保全を行うにはこのように総合的な視点で評価するのが望ましいと考えている。

6. お わ り に

帝人グループは 1992 年に地球環境憲章を制定し、地球環境との共存を目指して循環型社会形成を目指してきた。環境経営のためのガバナンス制定、環境目標の設定と実行、環境ビジネスの創出と推進など精力的に進めてきた。これらの中で「新原料リサイクル技術」を事業化し、循環型社会の実現に向けて大きな一歩を踏み出した。これらのリサイクルの特徴は、資源枯渇を抑制し温暖化ガスを削減して環境負荷を大幅に低下させるとともに、より高い価値を持つ製品に循環できることである。現在の課題は、PET 製品（PET 繊維製品、ボトル）をいかに効率よく集めるかということとともに、消費者関係先と一緒に事業を持続的に発展させ環境保全を進めることである。

また、この世界初の完全物質循環型プラントを、CDM などの活用も含めて地球環境保全のために世界への普及展開をも視野に入れ検討している。