

## 論文

## エネルギー収支比の概念を用いた製造技術の評価方法

後藤 敏晴<sup>1</sup>、天野 治<sup>2</sup>、岡島 いくみ<sup>3</sup>、佐古 猛<sup>4</sup>

投稿受付：2009年1月6日 受理日：2009年4月14日 WEB公開日：2009年5月23日

## 要旨

近年になって持続可能な社会を形成する必要性が強く認識されるようになった。製造メーカーにとっても環境や資源枯渇というキーワードが重要な世の中になっている。一方で、メーカーが創り出す新しい環境技術を正しく評価しなければ、誤った方向に技術開発を進めてしまう可能性がある。環境面のみならず人材資源の面からも、もったいない結果を招きかねない。

エネルギーは依然として石油資源に頼る割合が高い。その石油資源は有限である。したがって、次々に新しく創造される技術はエネルギーを節約できるかどうか正しく評価したうえで社会に普及していく必要がある。そこで、本稿ではエネルギーの質の評価に用いられる EPR(Energy Profit Ratio)の概念を用いて、一般的な製造業におけるプロセスの質を評価する方法を提案する。EPR の概念を用いれば、新しい技術を導入したり既存のプロセスに変更を加える際、エネルギー使用効率などがどのように変化したのかを定量化することが可能になる。また、どのような工程に着目してプロセスを改善していけばいいのかを明確にすることができる。

【キーワード】：EPR, 製造プロセス, エネルギー資源, 評価方法, もったいない

## 1. はじめに

近年、資源の枯渇問題や環境問題などが大きく取り上げられるようになり(Kerr,2007)、資源リサイクルや環境適合性製品の開発は重要性が増している。一方で、一部のリサイクル技術や環境適合製品の採用は、エネルギーをさらに使用することになって資源を無駄遣いしてしまう可能性を指摘する議論も起きている(武田,2008)。

このような状況の中、新しい環境技術により何がどの程度改善されたのかを客観的に評価する技術が必要とされている。EPR は、エネルギーの使用効率を定量的に評価できるので、上記のような要求に答えるための有効な

手法の一つと考えられる。そこで、本稿ではエネルギー評価の手法である EPR の考え方を製造技術に適応する方法について提案する。

## 2. 評価指標の定義

EPR はエネルギーの質を評価する方法として提案されているもので、エネルギー収支比と訳され以下のように定義されている(天野,2008)

$$EPR = \frac{\text{得られるエネルギー (出力)}}{\text{取り出すためのエネルギー (入力)}} \quad \dots (1)$$

<sup>1</sup>後藤敏晴  
静岡大学・工学部・  
博士後期課程、日立  
電線株式会社所属



<sup>2</sup>天野 治  
電力中央研究所  
もったいない学会  
EPR 部会長



<sup>3</sup>岡島いくみ：  
静岡大学・工学部  
助教



<sup>4</sup>佐古猛  
静岡大学・工学部  
教授



EPR が 1 以下の場合、得られる以上に取り出すためのエネルギーが大きいためエネルギーの利得が無いことを示す。また、EPR が大きいほど小さなエネルギーを使って大きなエネルギーが得られることを示している。すなわち、自然界に存在するエネルギーを使える状態として採取する過程において、消費されるエネルギーが小さいほど収支が良いことを示している。

ところで、新しい製造技術やリサイクル技術によって環境に対する影響を削減する度合いを評価する場合、必ずしもエネルギーを採取するケースを評価するわけではない。しかし、エネルギー採取の過程と同様に、製造工程で消費されるエネルギーが小さいほどエネルギーを効率良く利用していることになる。

ここで、新規技術によって得られた製品が従来技術によって得られた製品と同等の性能を持つ場合を仮定してみる。例としては、廃棄物を廃棄される前の製品に戻す水平リサイクルや、製造工程に新技術を導入して生産性を上げる場合などがあげられる。このような場合も、新しい技術を導入することにより節約できるエネルギーの量を従来の EPR の定義で評価することが難しい。そこで、節約できるエネルギーの量を示す指標として、式(2)に示す消費エネルギー比 Energy Consumption Ratio (ECR) を定義する。

$$ECR = \frac{\text{従来技術によって製品を製造するためのエネルギー}}{\text{新規技術によって製品を製造するためのエネルギー}} \quad \dots (2)$$

この場合、新規技術を用いて製造した製品が、従来技術を用いた場合と同じ価値を持っていることが前提となる。式(2)における分母分子の各エネルギーの値は EPR 評価を行う際に求める入力エネルギーと同じ方法で求めることができる。

(2)式は、製造工程の違いによって生じるエネルギー消費量の差を表す指標である。これを用いれば、一般的な製造プロセスを変更する際にエネルギー効率を評価することが可能となる。例えば、この定義を用いて新しいリサイクル技術を評価する場合は以下のように定義できる。

$$ECR = \frac{\text{バージン材料を用いて製品を製造するためのエネルギー}}{\text{リサイクル材料を用いて製品を製造するためのエネルギー}} \quad \dots (3)$$

以下、製造技術のエネルギー使用効率の ECR による評価方法について述べる。

### 3. エネルギーの評価方法

はじめに評価の目的と評価対象を設定した

後、その製品の工程分析を行い評価の範囲を決める。次に評価範囲内の各工程で使用するエネルギーを求める。得られたエネルギーを足し合わせて製品を製造するためのエネルギーとする。以下に詳しく説明する。

式(2)における新規技術、あるいは従来技術を用いて製品を製造するためのエネルギー (E) は、式(4)に示すように各調達原料の原単位 (U<sub>m</sub>) と各工程で使用するエネルギー原単位 (E<sub>n</sub>) の和で表せる。

$$E = \sum_m U_m + \sum_n E_n \quad \dots (4)$$

計算に用いる各原料の原単位は EPR 評価に用いられている文献値(天野, 2008)を用いることができる。計算の際には、原単位を単位製品あたりに換算する。たとえば、ケーブルのリサイクルの場合は、ケーブル 1m あたりのエネルギー U<sub>m</sub> を kcal/m とする方法などの例があげられる(後藤・他, 2009)。

また、各工程のエネルギー E<sub>n</sub> は、式(5)により求めることができる。

$$E_n = E_n' + E_n'' \quad \dots (5)$$

各パラメータは以下の通りである。

E<sub>n</sub>' : 加工時に使用する単位製品あたりのエネルギー(電力エネルギーやボイラーで使用する燃料など)

E<sub>n</sub>'' : 設備の製造に必要な単位製品あたりのエネルギー

ここで n は各工程番号を示す整数である。加工に必要な電力エネルギーは実測値を用いることが好ましいが、スケールアップを想定した理論値などを用いてもよい。また、設備の製造に必要な単位製品あたりのエネルギーについては式(6)を用いて求める。

$$E_n'' = \frac{E_n'''}{V_n \times D_n \times Y_n \times R_n} \quad \dots (6)$$

E<sub>n</sub>''' : 設備製造のためのエネルギー

V<sub>n</sub> : 製造速度 (kg/時)

D<sub>n</sub> : 年間稼働時間(時/年)

Y<sub>n</sub> : 設備寿命(年)

R<sub>n</sub> : 該当製品の製造に設備を用いている時間の割合(占有率)

ここで、

$$E_n''' = \sum_T U_T W_T \quad \dots (7)$$

$W_1$ : 設備を構成する各部の重量 (kg)  
 $U_1$ : 設備を構成する各部の主な素材の原単位 (kcal/kg)

一般に製造設備に用いられる主な素材は鉄なので、特に加工度が高いものや特殊な材料を用いている場合を除いて  $U_1$  の値は鉄の原単位を用いてもよい。

式(5)～(7)より求めた  $U_m$  についても  $U_m$  と同じ単位製品あたりの単位に換算し、式(4)から製品を製造するために必要なエネルギーが求められる。新規技術、従来技術それぞれについて製品を製造するために必要なエネルギーを求めて、式(2)から ECR を算出する。すなわち、エネルギー消費の効率によって製品を製造するプロセス技術の評価を行うには、まずパラメータとして  $E_n'$ ,  $U_n$ ,  $V_n$ ,  $D_n$ ,  $Y_n$ ,  $R_n$ ,  $W_1$ ,  $U_1$  を調査する必要がある。

#### 4. 結果の解釈

ECR の値はエネルギーの効率を評価する際に求める EPR と同様に解釈することができる値である。すなわち、ECR が 1 以下の場合、従来技術によって製品を製造するよりもエネルギー効率が低いことを示す。また、ECR が大きいほど従来技術に比べてエネルギー効率が低い技術であると言える。

ところで、今後は資源枯渇にともなってエネルギーの EPR は徐々に低下し、原単位が変化すると考えられる。しかし、ここで示したように比で示すことにより、そのような社会的影響をできる限り取り除いてプロセス技術そのものを評価できる。

さらに、各製造工程別に必要なエネルギーを求めることにより、どの工程でエネルギーが多く消費されているのかを明らかにすることができる。製造技術のエネルギー効率をあげるために、どの工程に着目すべきか明らかになるので、技術開発の方向性を定めるための手段としても有効である。一方で、この方法はプロセスの一部を評価することができるので、評価範囲と仮定条件、比較対象を明確に示した上で求めた値を利用する必要がある。

#### 5. 評価例 (後藤・他, 2009)

表 1 にケーブルの絶縁体をリサイクルする技術の評価するために行ったエネルギー分析の例(後藤・他, 2009)を示す。図 1 にこの評価で対象としたトリプレックス形 600V 架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル(600V CVT)の構造を示す。原料としてはポリ塩化ビニル(PVC)、ポリエチレン(PE)、銅からなっている。このケーブルをバージン PE およびリサイクル PE から製造する工程を図 2 に示す。調達した銅を線引きして素線とし、これを撚っ

て撚り線にして導体として用いる。この外周に PVC と PE を押し出して単芯のケーブルとし、さらにこれをより合わせて製品とする。

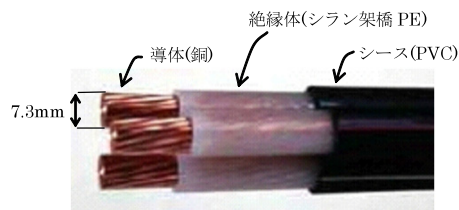


図 1 600V CVT ケーブル(後藤・他, 2009)

リサイクル PE を用いる場合は PE を調達する代わりに廃架橋 PE を回収し、これを切断・粉砕した後、リサイクル処理する。その際、超臨界メタノールを用いて架橋 PE を熱可塑性化することが本技術の新しい点である。このときの処理条件は 335°C, 10MPa である。このような高温高压のメタノールを大量に用いるとエネルギー消費も大きくなってしまい、エネルギー収支が悪くなる。そこでエネルギー効率を改善するために押出機を用いた超臨界流体用プロセスを開発した。図 3 に一般的な超臨界流体用連続処理プロセスと、押出機を用いたプロセス(後藤・他, 2005)(後藤・他, 2006)の比較を示す。

押出機を用いたプロセスでは、押出機を超臨界流体用のリアクターとして利用する。一方、従来の方法では固体をスラリー状にした後、これを送液ポンプで加圧してから加熱する。固体をスラリー状にする必要があるため、溶剤が多量に必要となる上に原料を微粉砕する必要があった。一方、押出機を利用すれば樹脂を加圧できるので、樹脂に溶剤を注入する方法が可能となる。そのため最小限の溶剤を樹脂に注入する方法が実現可能である。また、ペレット状の樹脂を直接押出機に供給できるので、微粉砕の必要がないことも特徴である。プロセスの運転実績から、エネルギー計算における押出機へのメタノール注入量はポリエチレンの 10wt% とし、そのうち 70wt% が回収できるとした。

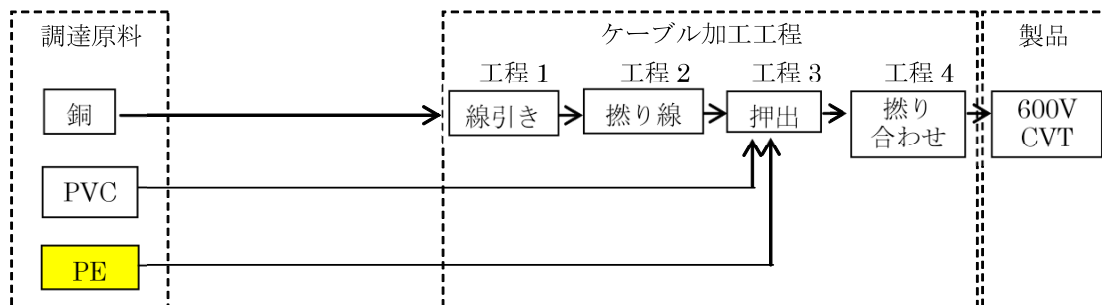
計算には単位として kcal/m を用いた。これは、図 1 に示す導体断面積 38mm<sup>2</sup> の 600V CVT を 1m 製造するために必要なエネルギーの量である。

バージン PE からケーブルを製造する場合、各工程で用いるエネルギーは表 1 に示す通りである。これらの値から、ケーブル製品としての ECR は以下のように求められる。

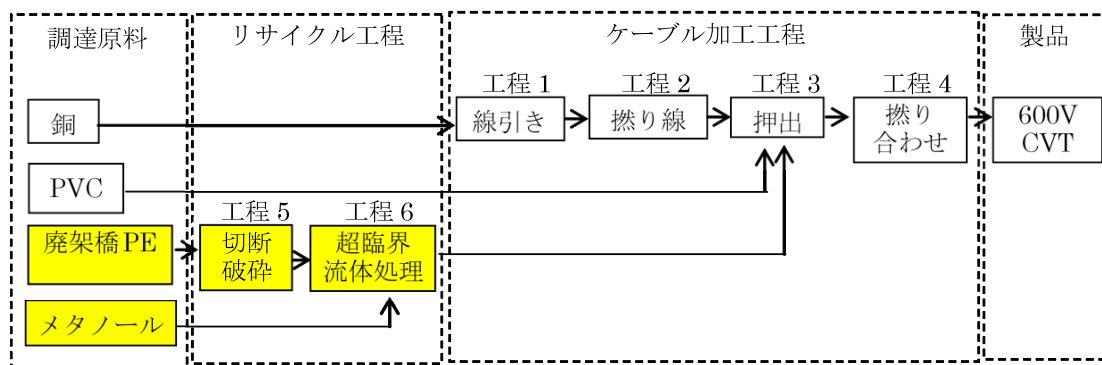
$$\begin{aligned}
 ECR &= \frac{\text{バージン PE を用いてケーブルを製造するためのエネルギー}}{\text{リサイクル PE を用いてケーブルを製造するためのエネルギー}} \\
 &= \frac{10490.4}{10078.4} = 1.04
 \end{aligned}$$

表 1 ケーブルのエネルギー分析(後藤・他, 2009)

		エネルギーの計算結果 (kcal/m)					
		リサイクル			バージン		
		加工 $E_n'$	設備 $E_n''$	計 $E$	加工 $E_n'$	設備 $E_n''$	計 $E$
調達原料	Cu	—	—	8439.9	—	—	8439.9
	PVC	—	—	1067.7	—	—	1067.7
	PE	—	—	—	—	—	621.6
	メタノール	—	—	21.5	—	—	—
	計			<b>9529.1</b>			<b>10129.2</b>
ケーブル加工工程	切断・破砕	9.2	0.6	9.8	—	—	—
	超臨界流体処理	161.1	17.2	178.3	—	—	—
	計			<b>188.1</b>			<b>0</b>
ケーブル加工工程	線引き	185.2	0.2	185.4	185.2	0.2	185.4
	撚り線	36.8	0.3	37.1	36.8	0.3	37.1
	押出工程	133.6	2.0	135.6	133.6	2.0	135.6
	撚り合せ	1.6	1.5	3.1	1.6	1.5	3.1
	計			<b>361.2</b>			<b>361.2</b>
合計				<b>10078.4</b>			<b>10490.4</b>



a) バージンPEを用いる場合



b) リサイクルPEを用いる場合

図 2 ケーブル製品の製造工程(後藤・他, 2009)

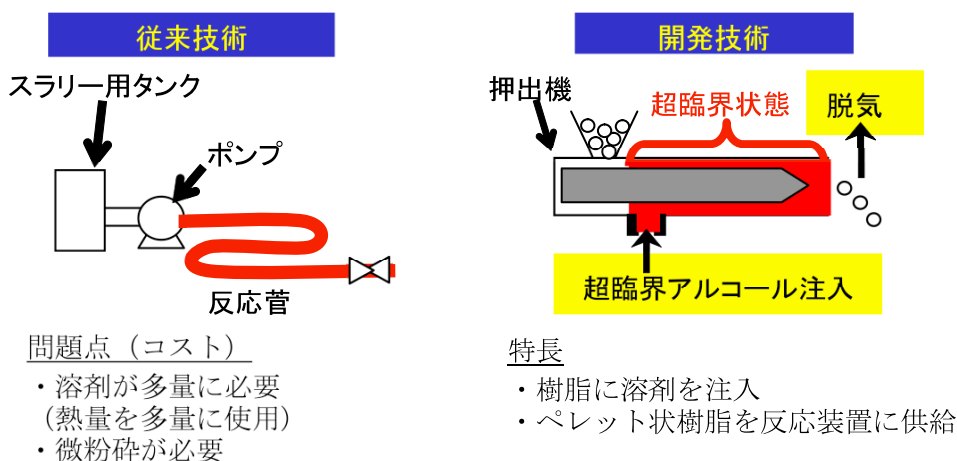


図3 一般的な流通管式連続処理装置と押出機を用いる方法の違い

ECR は 1 以上になりエネルギー的に利得があることが分かった。ここで、バージン PE とリサイクル PE を用いて 600V CVT を製造する工程を比較すると、図 3 中のハッチングした部分のみが異なっている。したがって、架橋 PE のリサイクル技術进行评估する場合、この部分に着目すればより違いが明確になるはずである。すなわち、絶縁体の材料として用いられている PE としての ECR を以下のように求めて評価した。

$$\begin{aligned}
 ECR &= \frac{\text{PE 製造に必要なエネルギー}}{\text{リサイクル工程で用いるエネルギー} + \text{メタノール製造に必要なエネルギー}} \\
 &= \frac{621.6}{188.1 + 21.5} = 2.97
 \end{aligned}$$

PE をリサイクルすることによってエネルギー効率が 2.97 倍に向上することが示された。すなわち、ここで評価したリサイクル技術はエネルギーを節約できるということを明確に示すことができた。

さらに、評価の過程で得られる各原料や各工程に必要なエネルギーに着目して結果を解釈することができる。表 1 の各項目の数値を見比べると、ケーブルにおいては原料の銅に使われるエネルギーが 8439.9kcal/m と非常に大きい。すなわち、ケーブル製造においてエネルギー効率を上げるには銅の精錬などに関わるプロセスの改善が最も重要であることがわかる。また、加工に直接用いるエネルギーと設備を製造するために必要なエネルギーを比較すると、いずれの工程でも前者の方が大きい。これはケーブル製造に用いる設備は寿命が 20 年以上と長いためである。これらの結果から、製造の際に直接用いている電力エネルギーを節約する技術開発が、さらなるエネ

ルギー節約のために重要であることが読み取れる。

## 6. 結言

以上、製造技術を EPR の概念を利用して評価することにより、製造プロセスのエネルギーの利用効率を評価する方法を提案した。この手法により得られる ECR の値は製造プロセスのエネルギー効率を定量的に比較することができるので、環境負荷や資源節約と同時にコスト削減などにも役立てられる可能性がある。また、エネルギー節約という面に着目した製造技術開発の指針をたてるための製造プロセス評価方法としても有効である。一方で、本手法は製造プロセスの一部分だけを評価していることを良く認識して用いる必要がある。部分最適を目指すあまり、全体としてはエネルギー効率が落ちるようなことがあってはならないからである。

いずれにしても、今後はこの手法を用いた具体的な製造技術評価例をさらに示して資源節約のための技術開発に貢献していきたい。

**参考文献**

Richard A.Kerr(2007):The Looming Oil Crisis Could Arrive Uncomfortably Soon, Science, 316, 351

天野 治(2008):石油ピーク後のエネルギーEPR(エネルギー収支比)から資源の有効利用を考える, 愛知出版

後藤敏晴,井上剛介, 岡島いづみ, 佐古猛, 天野治(2009): 超臨界アルコールによる架橋ポリエチレンリサイクル技術のEPRによる環境影響評価, 日立電線, 28, 23-28

<http://www.hitachi-cable.co.jp/about/publish/kenkyu/index.html>

武田邦彦 (2008):ポリマー・リサイクルの社会的・経済的側面, 日本ゴム協会誌, 81, 156-163

後藤敏晴,山崎孝則,菅田孟,岡島いづみ,岩本圭彦,柿崎淳,大竹勝人,佐古猛(2005):シラン架橋ポリエチレンの超臨界流体による連続的な熱可塑化プロセスの検討, 化学工学論文集,31,6,411-416

後藤敏晴,芦原新吾,山崎孝則,渡辺清(2006):超臨界アルコールによる架橋ポリエチレンケーブルの絶縁体リサイクル技術とその実用性評価, 電気学会論文誌, 126, 4, 400-406