

製造の全行程を考慮した資源及びエネルギー利用の 合理化指針

— アルミニウム鑄造工程のエクセルギー解析 —

北 英紀*、日向 秀樹、近藤 直樹

製造効率を高め、環境負荷を少なくするには、1つの過程を起点として全体に広がる資源やエネルギーの消費と排出の過程を知ることが必要である。本稿では、まず、アルミニウム溶湯中で使用されるヒーターチューブを鉄とセラミックスで作製した場合のエクセルギー解析とその比較を行い、次にアルミニウム鑄造の全工程についてのエクセルギー解析を行った。これらの結果から資源とエネルギーを有効に利用するための鑄造プロセスにおける合理化指針を得た。

1 はじめに

原材料を加工して有用な製品を得る「製造」とは、自然界に存在する天然資源を有用な形態の物質やエネルギーに変換する一方で、無用な物質やエネルギーを環境に排出するシステムである。製造の背後には、採掘に始まり、移動、使用、廃棄といった多くの過程が連なっていると同時に、製造そのものは個々の工程というサブシステムの集合体である。また、製品はやがて無用物となって廃棄され、長い時間を経て環境に還っていく。広く長い時空間の中で、製造に関わる全てのシステムは、相互に関連しながら各階層の周囲環境との間で物質やエネルギーのやり取りを行いつつ、環境にも影響を及ぼすこととなる(図1)。

1960年代の高度成長期、製造の志向は大量生産・大量消費であり、廃棄物は埋めてしまえば良いという時代であった。しかし環境と経済を両立させねばならない現代、個々のシステムからの消費や排出が無為に増大することが許されるはずはなく、かといって単なる最適・最小化やその統合だ

けでは問題は解決しない。個と総体が相反することは通常であり、一見小さな消費に見える製造システムであっても、背後に大きな消費と排出を伴い、総体ではかえって負荷が大きくなる場合もあれば、その逆もある。競争力を維持しつつ、総体として消費や排出を少なくするためには、個を起点として総体に広がる消費・排出の過程を知り、その大きさや意味を明らかにするとともに、それらを開発に戦略的に活かしていくことが必要である。今回、こうした評価と開発を双発的に進めるための基軸概念としてのエクセルギーについて検討することにした。エクセルギーは環境を基準としたGibbsの自由エネルギーであり、着目するシステムが環境と熱的に平衡状態になるまでに為すことのできる最大仕事と定義されている^{[1]-[3]}。

エクセルギーは、生産活動を通じて一方的に消費されており、物質とエネルギーに共通した資源消費性を定量化するために相応しい指標である。またエクセルギーを使って、循環の中で投入・排出されるモノやエネルギーのエネルギー的価値や、回収する場合の理論的限界を明らかにすることができ、それらはプロセスの合理化の指針とすることができる。エクセルギーを指標として使用し、状態を評価することはもちろん重要なことであるが、それだけでは変革をもたらすことにならない。評価結果を開発と連携させながら、環境負荷や資源消費の緩和に合理的なハードやプロセスを、広い階層における負荷低減という新しい価値とともに示していくことが必要であると考え(図2)。

エクセルギーはこれまで主に熱の有効利用の尺度としてJISにも記載されており^[4]、熱機関や建築の設計指針として使用されてきた^{[2],[5]-[7]}。製造分野では鉄鋼や化学プロセスの合理化に利用されているが、異種分野の製造を統合した

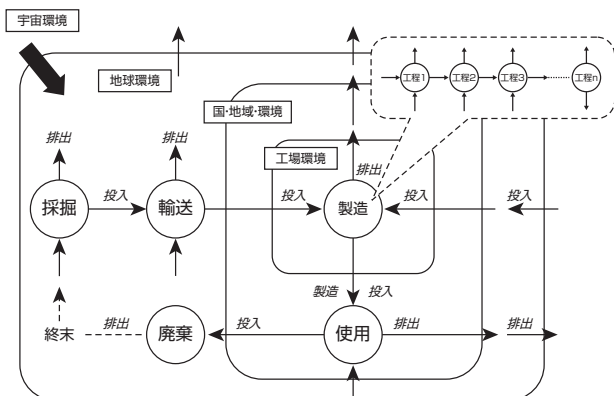


図1 製造システムと環境の関わり

システムを考察対象として資源消費の過程や、広く合理化の指針を示した例は見当たらなかった。本論文では、セラミックス部材、および鉄部材の製造、それらがエンジン部品等、アルミニウム鑄造ラインの生産部材として使用・廃棄されたという事例についてエクセルギー解析を行い、まず工程、製造、使用といった「境界」の採り方により、エクセルギーの消費や排出が相反する点に着目し、消費の過程、その意味と大きさを明らかにする。次にその解析結果をふまえ、プロセスの合理化の指針を示す。

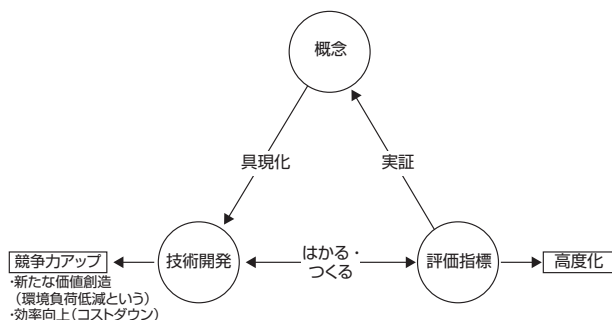


図2 技術と指標の連携の重要性

2 解析方法

2.1 エクセルギーの計算

①物質の化学エクセルギー^[1]

参照種の化合物が $X_xA_aB_b \cdots$ (X, A, B は元素、 x, a, b は組成比) という組成をもち、化学反応 (1) によって生成され、その際のGibbsの自由エネルギー変化を ΔG^0 とすると化学エクセルギー E_x^0 は、(2) 式で算出できる。



$$E_x^0 = \frac{1}{x} [-\Delta G^0 - aE_x^0(A) - bE_x^0(B) - \cdots] \quad \cdots (2)$$

参照種とは周囲環境中において単独では化学反応を起こさない物質であり、そのエクセルギーは定義によりゼロである。参照種はJISに記載されているが^[4]、記載されていない場合には、自由エネルギーの最も小さいものを参照種とした。

②化学反応を伴うシステム^{[5][7]}

熱力学データとして入手できる自由エネルギーの値は標準状態、純粋物質1モルの値で示されている場合が多く、エクセルギー計算では補正が必要である。反応物 r_1 は周囲環境には存在しない物質、反応物 r_i ($i=2, 3, \dots, L$) と生成物 p_j ($j=1, 2, \dots, N$) は周囲環境に存在する物質とする。反応物 r_i と生成物 p_j のモル分率はそれぞれ x_{ri} 、 x_{pj} で周囲環境でのそれらのモル分率とは異なる。また n_{ri} 、 n_{pj} はそれぞれ反応物と生成物の物質質量 (mol) である。

$$\left(\sum_{j=1}^N n_{pj} RT_0 \ln \frac{1}{x_{poj}} - n_{r1} - \Delta G - \sum_{i=2}^L n_{ri} RT_0 \ln \frac{1}{x_{roi}} \right) + \sum_{i=2}^L n_{ri} RT_0 \ln \frac{x_{ri}}{x_{roi}} - S_g T_0 = \sum_{j=1}^N n_{pj} RT_0 \ln \frac{x_{pj}}{x_{poj}} \quad \cdots (3)$$

左辺第一項の [] 内は反応物 r_1 の化学エクセルギーである。左辺第二項は反応物 r_i ($i=2, 3, \dots, L$) がモル分率 x_{ri} のときにもつ分離エクセルギー、右辺第一項は生成物 p_j ($j=1, 2, \dots, N$) がモル分率 x_{pj} のときにもつ分離エクセルギーである。また S はエントロピー、 T_0 は外界温度 (K)、 R は気体定数である。

③有機物

有機物の化学エクセルギーの計算式としては、Rant^[8]やSzargut^[9]の式が知られているが、本報告ではそれらを実用的に修正した信澤らの導いた次式^[10]を使用した。

$$E_x = m \cdot H_1 \cdot \left[1.0064 + 0.1519 \frac{\phi_H}{\phi_C} + 0.0616 \frac{\phi_O}{\phi_C} + 0.0429 \frac{\phi_N}{\phi_C} \right] \cdots (4)$$

m 、 H_1 はそれぞれ対象とする有機化合物の乾燥質量 (kg)、低位発熱量 (J/kg)、また ϕ_C 、 ϕ_H 、 ϕ_O 、 ϕ_N はそれぞれ対象とする有機化合物に含まれる炭素、水素、酸素、窒素の重量分率である。

④電力、気体燃料

電力はエントロピーを含まないエネルギーであり、そのままエクセルギーの値として使用した。一方、燃料ガスのエクセルギー計算は次式で計算した^[10]。

$$e_c^0 = \sum x_i e_{ci}^0 + RT_0 \sum x_i \ln(x_i) \quad \cdots (5)$$

e_c はエクセルギーで、上つきの0印は標準温度 (25 °C) を意味し、下つきの i は成分 i に対するものを意味する。また x_i は成分 i の体積分率である。

2.2 システムの整理と入出力データ

本稿では、製造における大きな全体構成は「システム」と呼び、個々の採掘、輸送、使用、廃棄などは「過程」と呼ぶ。また過程は「工程」の集合体として捉えている。

図3に工程における物質、エネルギーの入出力フローを示す。各工程には原燃料が投入され、中間製品が生産される一方、廃物、廃熱を生じそれらは系外に排出される。得られ

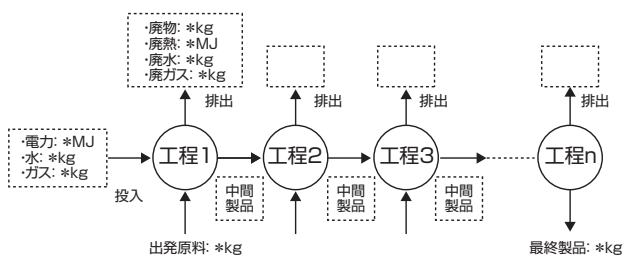


図3 工程への入出力とフロー

た中間製品は次の工程の原料となり、所定の工程を経て最終製品が得られる。

エクセルギー計算にあたっては、原料から最終製品にいたるまで工程に投入、及び排出される全ての原料やエネルギーの種類とその量を明らかにする必要がある。今回、大手製造メーカーの協力を得て、製造現場でのデータを入手することができた。大半はそのデータを使用した不明な部分もあり、それらについては経験を基にした推定値で補った。

2.3 製造効率

投入された全ての原燃料とエネルギーのエクセルギー総和に対する製品のエクセルギーの割合をエクセルギーの部材内固定率 (η) と呼ぶこととした。

$$\eta = E_X(p) / E_X(in) \quad \dots\dots (6)$$

ここに $E_X(p)$ は製品の化学エクセルギー、また $E_X(in)$ は投入されたエクセルギーの総和である。本稿では上記エクセルギーの部材内固定率、及び投入に必要なエクセルギーの両方を勘案しながら、製造効率の評価を行った。

3 事例研究

3.1 アルミニウム鑄造ラインの工程とヒーターチューブの役割

アルミニウムは熱伝導性が良く、軽量性に優れ、こうした長を活かしてエンジン部品への採用が進んでいる。またアルミニウムはリサイクル性に優れ、廃エンジンはスクラップとして回収され、諸工程を経て再びエンジンとなる。図4はアルミニウムの鑄造ラインの工程を中心とした循環システムを示す。まず回収された廃エンジン（スクラップ）は集中大型炉で溶解される。それらはいったん固められインゴット（塊）として工場内に搬送され、再び集中溶解炉で溶かされた後、保持炉に移送される。温度と成分調整が施された溶湯はダイキャストマシンに配湯され、成形され製品となる。こうした循環システムにおいて、熱損失、アルミニウム溶湯の酸化、不純物の混入といった効率を低下させる要因は多い。一

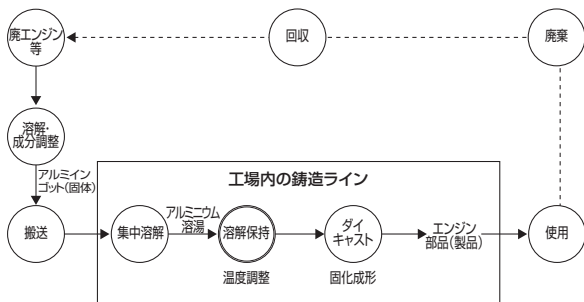


図4 アルミニウムの循環と鑄造ラインの工程

定の品質と生産量を確保するために外部からエネルギーやモノの投入は不可避であって、これらの投入を低減することが循環システムの効率を向上させるということである。

その対応の1つとして、生産部材のセラミックス化が試みられている。保持炉（図5）に使用されるヒーターチューブ（図6）もその1つであり、電熱線等を内包した保護管であって、アルミニウム溶湯の温度を一定に保持するために使用される。保存性の高い窒化ケイ素をヒーターチューブに適用することで、炉内下部に水平に固定された水平浸せき型構造が可能となり熱効率が向上する（図5）。ただし鉄製に比べてセラミックス製のチューブは格段にコストが高い。今回、ヒーターチューブ（重量19 kg）を窒化ケイ素と鉄で製造した場合について、各々、製造-運用-廃棄に関わるエクセルギーの解析を行った^{[11][12]}。

3.2 化学エクセルギーの算出

解析にあたり、まず製造に関与する全ての物質のエクセルギーを算出する必要がある。以下に重要な材料である窒化ケイ素 (Si_3N_4) を例として、そのエクセルギーの算出過程を示す。窒化ケイ素の参照種はシリカ及び空気である。

$$E_X(\text{N}_2) = RT_0 \ln(101.3/76.57) \quad \dots\dots (7)$$



$$E_X(\text{Si}) = (-\Delta G^0) + E_X(\text{SiO}_2) - E_X(\text{O}_2) \quad \dots\dots (9)$$

$$E_X(\text{Si}_3\text{N}_4) = 3(\Delta G^0) + 3E_X(\text{Si}) + 2E_X(\text{N}_2) \quad \dots\dots (10)$$

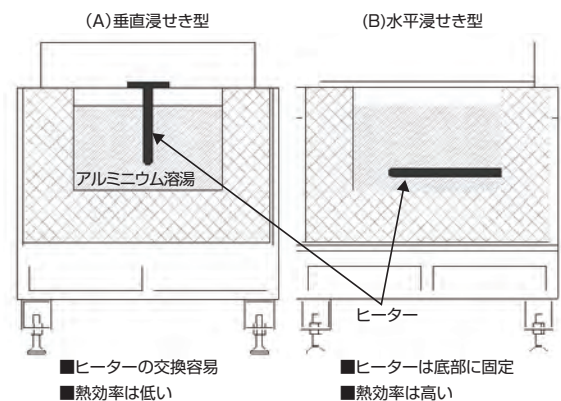


図5 保持炉の構造

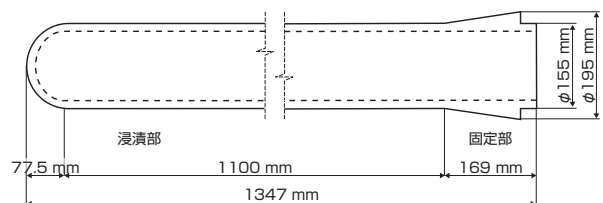


図6 ヒーターチューブの形状、寸法

$E_x(X_i)$ は物質 X_i についてのエクセルギーを示す。(8) 式の () 内は、空気的全圧と窒素の分圧の比である。以上より窒化ケイ素のエクセルギーは 1877 kJ/mol と算出された。同様にして主な原燃料のエクセルギー値を算出した(表)。

3.3 工程別消費と効率

図7には窒化ケイ素による部材製造の工程と製造全体で出入りするエクセルギーの値を示す。なお窒化ケイ素の原料は、別の工場において酸化ケイ素を熔融還元し、さらに窒素と反応させて製造された人工物として本システムに投入されている。原料のエクセルギーは製品1本あたり291 MJと算出された。粉末を出発原料として混合、造粒、成形、脱脂、焼成を経て製品となるが、工程別で見ると、造粒と焼成にそれぞれ2547 MJ、776 MJと多大なエクセルギーが投入され、これは投入エクセルギーの全体の約80%に相当する。そしてそれらは廃熱としてほぼ全てが系外に排出されていること、一方、原材料の粉末は回収され、工程間でほとんど損失はないことが判った。全体で最終製品に固定されたエクセルギーは229 MJでこれは投入されたエクセルギー(4175 MJ)のわずか5.5%に過ぎない。すなわち94.5%に相当する3946 MJを廃棄しているという極めて効率の悪いプロセスである。

一方、図8には鉄部材製造における工程別のエクセルギーの出入りを示す。鉄の場合、原料は酸化鉄 (Fe_2O_3) を出発原料としており、定義によりそのエクセルギーは0である。また還元反応等固体の反応を有効に利用して製造され、どの工程にも投入、廃棄されるエクセルギーは少なく、また平準化していることが判った。製品として固定化されたエクセルギーは126 MJで、投入されたエクセルギー(621 MJ)の20%程度であって、投入エクセルギーの量はセラミックスの約1/7程度と極めて少ない。すなわち、1本の部品を製造するというシステムで見ると、鉄に比べてセラミックス

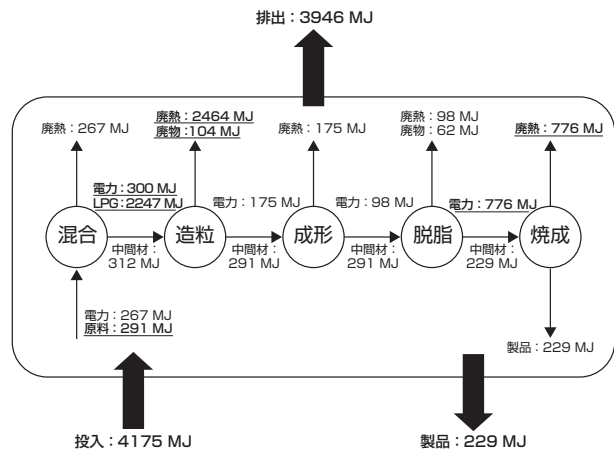


図7 セラミックス部品の工程、および製造におけるエクセルギーバランス (製品1本=重量19 kgあたり)

表 関与する主な原燃料のエクセルギー計算結果

原燃料	エクセルギー
Y_2O_3	47 kJ/mol
Al_2O_3	0 kJ/mol
Si_3N_4	1877 kJ/mol
N_2	7×10^{-1} kJ/mol
Fe_2O_3	0 kJ/mol
Si	851 kJ/mol
Fe	368 kJ/mol
Al	788 kJ/mol
CO_2	20 kJ/mol
O_2	4 kJ/mol
PVA	49 MJ/kg
LPG	48 MJ/kg

は極めて多くのエクセルギーを消費し、効率も低いことが確認された。

3.4 各過程でのエクセルギー解析

3.4.1 使用

① 損耗と物質廃棄

鉄製ヒーターチューブをアルミニウム溶湯中で使用すると、アルミニウムに侵食され、時間経過 t に伴い減肉していく。減肉は下式によって進行するとの仮定をおいた。

$$D = D_0 \cdot (2 - \exp(kt)) \quad \dots (11)$$

ここに、 D : ヒーターチューブの厚さ (mm)、 D_0 : 初期厚さ (mm)、 k : 見かけの反応速度係数、 D_1 : 取替時の厚さ (mm)、である。上記に関して D_0 : 3 mm (データより)、また D_1 として: 0.5 mm を仮定し、半年毎に交換という条件から反応定数 k は 0.067578 となる。

この間の消費エクセルギーは次式で示される。

$$E = E_0 \cdot \exp(kt) \quad \dots (12)$$

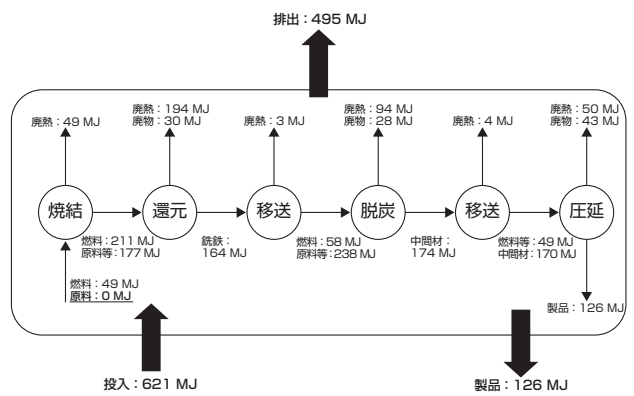


図8 鉄部品の工程および製造におけるエクセルギーバランス (製品1本=重量19 kgあたり)

鉄のエクセルギーは6.6 MJ/kg (=368 KJ/mol) であり、製品の全重量が19 kgであるから、溶損が進行してDiに達したところで廃棄されるとすると、126 MJ/本が消費されることになる。鉄製のヒーターチューブを半年に1回交換するのに対して、窒化ケイ素は安定で反応し難く、7年後に炉の寿命と合わせて交換、廃棄される。7年間のエクセルギーの消費の経時変化を図9に示す。またこの間、廃棄に伴い消費されたエクセルギーは次式の通りである。

- ・鉄使用時：126 (MJ/本) × 14 (本) = 1764 MJ
- ・窒化ケイ素使用時：229 (MJ/本) × 1 (本) = 229 MJ

鉄製ヒーターチューブを使用した場合、溶損と廃棄を繰り返す、エクセルギーの消費が階段状に増大しているのに対して、セラミックスでは7年間ほとんど消費はなく、炉の寿命と同時にエクセルギー値 (229 MJ) が排出されたことになる。なお、セラミックス使用時、鉄に比べ不純物の混入機会が少なくクリーンな溶湯が得やすいことが期待され、これもセラミックスの価値である。

②ランニング

(a) 溶解保持炉

鉄製ヒーターチューブを使用した垂直浸せき型では、運転時に9.4 kW、休止時には4.0 kWを要するのに対して、窒化ケイ素を用いた水平浸せき型の場合には、熱効率が改善され、運転時並びに休止時における消費電力はそれぞれ6.8 kW、3.8 kWとなる。1日のうち60 %運転 (40 %休止) するとして、年間で360日稼働させたとすると7年間の総消費電力、すなわち投入エクセルギーはそれぞれ以下の通りである。

- ・鉄使用時：(9.4 × 0.6 × 24 + 4.0 × 0.4 × 24) × 360 × 7 × 3.6/1000 = 1576 GJ
- ・窒化ケイ素使用時：(6.8 × 0.6 × 24 + 3.8 × 0.4 × 24) × 360 × 7

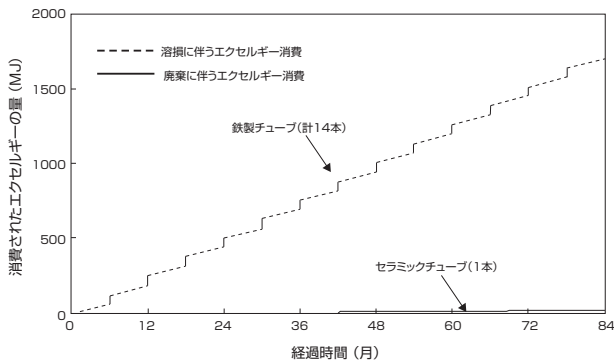


図9 使用過程での溶損と廃棄に伴うエクセルギー消費量の比較 (7年間の試算)

× 3.6/1000 = 1219 GJ

(b) ダイキャストマシン

ダイキャストマシンの消費電力を20 kW、1日のうち60 % 運転するとして、年間で360日稼働させたとすると7年間の総消費電力、すなわち投入エクセルギーはそれぞれ以下の通りである。

・ 20 × 0.6 × 24 × 360 × 7 × 3.6/1000 = 2612 GJ

3.4.2 製造・使用・廃棄

企業への聞き取りの結果、7年間の鋳造品の総製造量は約4300トンと試算された。なお、本稿では、原料ロスは考慮していない。したがって溶融アルミニウムの量も最終製品と同じく4300トンであり、そのエクセルギーは溶融した状態 (温度700 °C) で126802 GJ、また固化した状態で125582 GJと計算された。

図10はセラミックス及び鉄製のヒーターチューブの製造、及びそれらが溶解保持炉に使用され、7年間鋳造が行われた場合の投入・排出されるエクセルギー量とその流れを示した図である。上述した通り、炉を7年間運転した場合、鉄製チューブは溶損により14本を必要とする。したがって、その製造過程において投入、あるいは排出されるエクセルギーは下記の通りである。

- ・投入：621(MJ/本) × 14(本) = 8694 MJ
- ・排出：495(MJ/本) × 14(本) = 6930 MJ

一方、窒化ケイ素製チューブは同期間で1本のみであり、投入と排出に伴うエクセルギーは図7を参照して、それぞれ4175 MJ、3946 MJとなる。次に、使用時の溶損と廃棄に伴うエクセルギーは、下記の通りである。

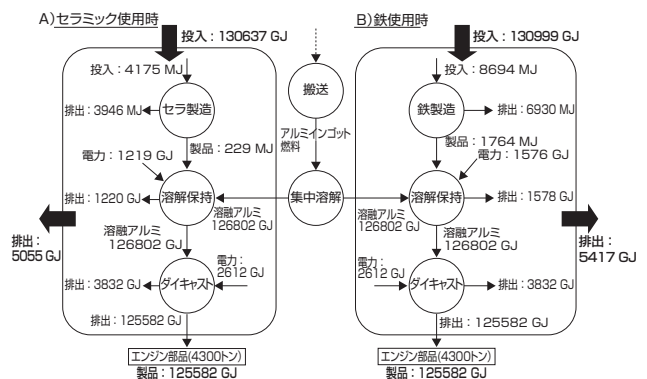


図10 アルミニウム製エンジン部品鋳造におけるエクセルギーバランス (7年間)

- ・鉄使用時：126(MJ/本)×14(本)=1764 MJ
- ・窒化ケイ素使用時：229(MJ/本)×1(本)=229 MJ

全ての過程を通してみると、投入されるエクセルギーは、鉄、窒化ケイ素使用時にそれぞれ130999 GJ、130637 GJ、また排出されるエクセルギーは同じく5417 GJ、5055 GJとなり、窒化ケイ素を使用することにより鉄に比べて投入・排出されるエクセルギーは362 GJ低減できることが判った。

以上の検討結果から、窒化ケイ素製チューブは製造過程において1本当たりでみると、約7倍ものエクセルギーを消費するが、保存性の高さから交換頻度が減り、効率の高い構造の炉が実現し、その結果消費電力が小さくできるために、製造、運用、廃棄のライフサイクルを通じた総量ではエクセルギーの消費量が鉄に比べて小さくなっていることが明らかとなった。

3.5 合理化の検討

まず、現状のシステムを前提として、セラミックス、鉄の各部材を使用した場合それぞれの合理化の指針を示し、次に鑄造システムの合理化の現状や方向性をまとめた。

3.5.1 鉄部材

経済性に優れた鉄部材はヒーターチューブの主流である。鉄部材を使うことを前提とした場合には、寿命を延ばすために溶けたアルミニウムに侵食され難い材料、あるいはコーティング技術の開発が必須である。またリサイクル性も鉄の優れた点であり、その効率を高めることも重要である。

3.5.2 セラミックス部材

セラミックス製造の合理化をはかるには前述した通り、全工程の中で特に消費の大きい造粒と焼成工程を中心とした効率向上が不可欠である。こうした改善は環境負荷低減と同時に、経済性において優位な鉄部材への対抗手段としての意味合いが強い。

①造粒

鉄鋼をはじめ金属のプロセスが、高温化することで原料を熔融させ、液体自身のもつ拡散能力により混合や反応を生じやすくしているのに対して、セラミックスでは重力場において拡散能力のない固体粉末を使用している。そのため混合時には固体粒子間に最終製品に残らない水やバインダーを介在させ、それらを除去するため更にエネルギーを要するという、本質的に非効率となる要素を含んだプロセスである。

水を介在させると粒子間距離が小さくでき、混合が容易になるが、後工程の乾燥造粒の工程ではスラリー中の水分を揮発させるのに多量の潜熱を消費することになる。投入されたエネルギーは水分に熱として伝わり、揮発し、水蒸気としてエントロピーとともに系外に排出されている。したがっ

て、造粒時のエクセルギー消費を抑えるには解こう材の選定や粒度配合の調整も含めた水分量の低減が必要であるが、その場合、前工程である混合の時間が増加することも考えられる。造粒工程でのエクセルギー消費を低減するには、前後の工程への影響を考えた水分量の最適化が必要である。

また造粒にはLPGを燃料として使用している。LPGを使用した場合、投入されたエクセルギーはスラリーの乾燥・造粒以外に、燃焼に伴い不可避免的に水や二酸化炭素を生成することになり、その系外への排出にもエクセルギーが消費されることになる。LPGに換えて電力を使用すると見かけ上、投入エクセルギーは低減できる。その場合、工場内でのエクセルギー消費は低減されても、実際には外界（発電所）でエクセルギーが消費されることになる。今回、造粒工程でLPGを使用したのはコストが優先されたためと考えられる。

②焼成

図11はプロセスの合理化に向けて、原料、製品、ならびに投入エクセルギーの関係を整理した概念図である。参照種（エクセルギー=0）と原料とは、化学エクセルギー、および表面エネルギーに由来するエクセルギーがあり、さらに原料と製品（焼結体）とは、表面・界面に由来、および配置に由来するエクセルギーの違いがあると仮定をおいた。

窒化ケイ素のような共有結合性の高い安定な物質では、特に活性化エネルギーの障壁に相当するエクセルギーに加えて、さらに炉の運転や炉材の加熱に多大なエクセルギーを必要とする。これらは不可避免的に廃エクセルギーとなり、廃熱回収の検討を行うことになる。

エクセルギー消費を低減するには、低エクセルギー原料を使用し、固体の有するエネルギーを利用して投入と排出を小さくすることができる。窒化ケイ素の化学エクセルギーは、1877 kJ/molと高い。さらに窒化ケイ素粉末はケイ素の窒化、得られた窒化ケイ素の焼成という分離された工程をとり、それぞれの工程で廃熱がある。

一方、ケイ素の化学エクセルギーは851 kJ/molと算出され、窒化ケイ素の約半分である。エクセルギー消費を低減するには、ケイ素から窒化ケイ素への転化、その後の焼結をひとつの工程で行う事は有効である。このプロセスは既知であるが、窒化過程での発熱の制御が困難であることや、ケイ素自体活性であるため、水を媒体にした混合が困難であるといった理由で普及するにはいたっていない。今後、実用的なプロセスにするには、水を媒体として短時間で混合し、粗いケイ素粒子を使用して低温で窒化できる触媒の開発が必要である。その他、効率を向上させるには乾燥炉や焼成炉の大きさを大きくして単位時間あたりの生産量を増

加するため、焼成温度を上昇させることが考えられるが、設備投資や生産個数を考慮しながら、全体システムの最適化を図っていくことになる。

なお、熱工学より生まれたエクセルギーは有効エネルギーとして物質との共通項として捉えられているが、上述したような界面や表面の扱いといった物理学的な視点での体系化は十分ではないように思われ、指標の高度化を図る上でも今後の課題であろう。

③設計、その他

前述したようにセラミックスがアルミニウム溶湯中で極めて安定であることから中実体である必要はない。中空構造を前提とした設計・プロセスは原料使用量が低減するだけでなく、薄肉化により、熱応力が低減され、焼成時間の短縮も可能となるため効率向上に極めて有効な手段である。

一方、セラミックスはリサイクルに不向きである。多大なエクセルギーを投入して製造されたセラミックス部材をできる限り長く使うという意識をもつことが生産者と消費者に必要であり、技術開発においては、セラミックスのこうした特徴を考慮し、壊れても部分的に交換、修理が可能な構造の設計やプロセス開発が必要と考える。

3.5.3 鋳造システムの革新

鋳造工程全体でみると、固体を溶解させる工程が2回あり、搬送過程で熱を相当放散することが考えられる（図4）。固体を溶解させるために要するエクセルギーは約19000

GJ（4300トン当たり）と試算された。これを減らすため現在、外部で溶解されたアルミニウム溶湯を断熱容器に入れ、溶湯のまま直接工場内に搬送し、保持炉による温度調整、成形という溶湯搬送といわれるシステムの開発が大手自動車会社を中心に進められている。溶解-固化という工程が1回減るため、効率が向上することが期待されている。しかし現状、搬送容器の断熱性が十分でなく、搬送過程で外部ヒータを使って加熱していることや、容器自体が重量物であるため、搬送過程での燃料消費が多いといった課題がある。溶湯搬送は原理的に効率の高いシステムであり、その普及が期待されるが、それには軽量で断熱性に優れた搬送容器の開発が鍵となっている。

上記搬送システムにおいて大本となる集中大型溶解炉では、いったん炉内でアルミニウムを溶解すると、熔融状態を維持するため、連続操業となる。必要量に関係なくエネルギーを投入し続ける必要があることを考えると、究極は、固体のまま工場内まで搬送し、必要なときに、必要な量を溶かして製品とするシステムではないだろうか。このシステムを実現するためには、瞬間的に溶解する加熱源や、同システムの構成要素となる断熱性に優れ、溶湯が付着しない大型のセラミック管や容器、さらに分解性を更に高めたエンジンの設計、そして廃エンジンの回収システムが社会的に定着させることなど、多方面にわたる課題があり、全体のエクセルギーバランスを考えつつ、個々の解決を図ることが必要である。

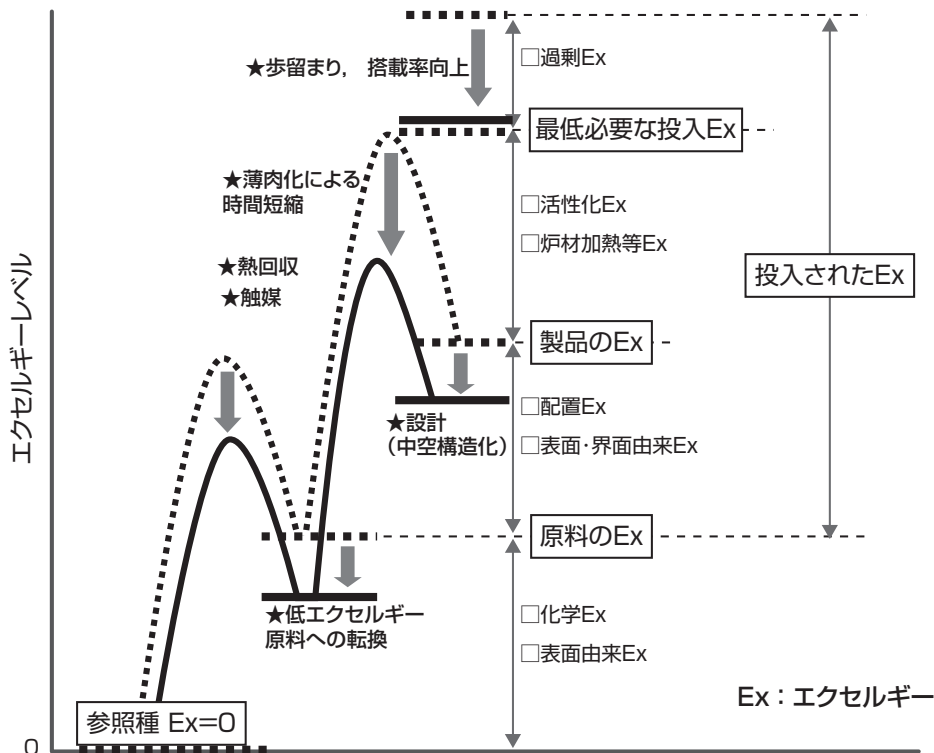


図11 セラミックスプロセスの合理化の検討

4 まとめ

4.1 製造の評価

セラミックスと鉄で部材を製造し、それらをアルミニウム製エンジン部品の鋳造ラインにおいて生産部材として7年間使用、そして廃棄されたというケースのエクセルギー解析を行った。

- ①製品1本当たりに投入されるエクセルギーはセラミックス製が4175 MJ、鉄製が621 MJであって、鉄に比べてセラミックスは極めて多くのエクセルギーを消費している。
- ②セラミックスに固定されたエクセルギーは229 MJ、でこれは投入されたエクセルギーの5.5 %であり、大半を系外に排出している。
- ③工程別では、造粒と焼成で投入全体の80 %を消費している。
- ④しかし多大なエクセルギーを投入した結果、セラミックスは高い保存性を得る。この特徴を活かして熔融アルミニウム中で使用されると、7年間で鉄を使用した場合に比べ、エクセルギー消費を362 GJ小さくできる。

4.2 合理化検討

現状のシステムを前提として、セラミックス、鉄の各部材を使用した場合の合理化の指針、ならびに鋳造システム全体の合理化を図る上で必要な技術をまとめた。

①鉄

・アルミニウム溶湯に侵食され難い材料やコーティング技術の開発。

②セラミックス

セラミックスの製造効率向上には全工程の中で特に消費の大きい造粒と焼成の合理化が不可欠である。

- ・造粒工程における解こう材の選定や粒度配合の調整等、前後の工程への影響を考えた水分量の最適化。
- ・粗いケイ素粒子を使用して低温で窒化できる触媒、また窒化と焼結の同時化プロセス。

・中空構造を前提とした設計：原料の使用量の低減と焼成時間の短縮化。

・多大なエクセルギーを投入して製造されたセラミックス部材を長く使うため、部分的に交換、修理して使用できるための技術開発。

③鋳造システム

・溶湯搬送システムの効率を高めるためには、軽量で断熱性に優れた搬送容器の開発が鍵。

・固体のまま工場内に搬送し、必要な量を処理して製品とするシステム。瞬間的に溶解する加熱源や、断熱性に優れた、溶湯が付着しない大型のセラミックス管や容器、さらに分解性を更に高めたエンジンの設計、そして廃エンジンの分別回収システムを社会的に定着させることなど、多方面にわたる課題の解決を図ることが必要。

5 今後の展望

以上の検討をふまえ、エクセルギー解析の有効性と課題についてまとめた。

5.1 エクセルギー解析の有効性

①通常の環境負荷評価は製造段階で実施され、その内容は上位計画で既に決められているため、負荷低減に向けた対応の選択肢は限られる。製造に移行する前の段階、すなわち企画、研究開発、設計といった段階で、幅広い階層に渡るシステムについて資源消費や環境負荷を予測し、その結果を技術や製造にフィードバックすべきである。モノとエネルギーを結び付けるエクセルギーは性質上、事前評価に適した指標であり、その有効活用が望まれる。

②循環システムは持続性の外殻である。循環システムを稼働させるために必要な外部からの資源・エネルギー投入を少なくするために、エクセルギーを適用したシステムの合理化設計は急務である。

③本稿ではセラミックスや金属の事例を取り上げたが、エクセルギーは特定の分野や対象に限定されるものではない。最終目標は、製造（マイクロな要因）とグローバルなレベルでの持続性（マクロな結果）を結びつけることにある。排出に関わる国家レベル等マクロな入出力データを使ってエクセルギーの消費速度を算出することは原理的に可能であり、それを持続性への重心移動の指標とできないだろうか。

5.2 改良すべき課題

①粉末粒子とそれを原料として作製された焼結体を同じ化学エクセルギーで評価している。

今後、表面や界面エネルギー等を考慮した状態の違いを表す指標とする必要がある。

②希少性、有害性を評価する上でエクセルギーは不適であり、他の指標とも組み合わせながら多面的な評価を行うことが必要である。

謝辞

本稿は産総研内部の分野横断的メンバーによるミニマルマニュファクチャリングワーキングでの議論の一部をヒントにしながらとりまとめたものであり、同ワーキングの関係各位に感謝の意を表す。

用語説明

用語1：エクセルギー：他のエネルギーに変換可能な有効エネルギー。

キーワード

エクセルギー、環境、製造、システム（系）、効率、合理化

参考文献

- [1] 唐木田健一：エクセルギーの基礎，オーム社（2005）。
- [2] 宿谷昌則，西川竜二，高橋達，斉藤雅也，浅田秀男，伊澤康一：エクセルギーと環境の理論，*流れ・循環のデザインとは何か*，北斗出版（2004）。
- [3] Rant：Exergie, Ein neues Wort fur Technische Arbeits-fahigkeit, *Forsch. Ing.-Wes* 22, 36-37 (1956) 。
- [4] 有効エネルギー評価方法通則：日本工業規格，Z 9204 (1991) 。
- [5] 森花朋弘，高橋達，宿谷昌則：コンクリートの生産と運用におけるエクセルギー消費の試算，*日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 環境工学II*, 495-496 (1997) 。
- [6] 八木順一郎，村松淳司，埜上洋：地球環境から製鉄技術を考える エクセルギー概念によるエネルギー有効利用，CO₂排出量の評価，*金属*, 6月号, 23-32 (1993) 。
- [7] 高橋達，宿谷昌則：化学変化を伴うエクセルギー・エントロピー過程の計算方法の検討，*建築学会大会学術講演梗概集*, 465-466 (1996) 。
- [8] Rant, Z: Zur Bestimmung der spezifischen Exergie von Bnennstoffen, *Allg. Warmetech.* 10, 9, S172 (1961) 。
- [9] J. Szargut und T. Styrylska: Brennst.-Warme-Kraft, 16, 12, 589-596 (1964) 。
- [10] 信澤寅男：燃料及び燃焼, 43, 11, 49-79 (1976) 。
- [11] 北英紀，日向秀樹，近藤直樹，高橋達：セラミックス製造プロセスにおけるエクセルギー解析, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 115, No.12, 987-992 (2007) 。
- [12] H. Kita, H. Hyuga, N. Kondo, and T. Ohji: Exergy consumption through the life cycle of ceramic parts, *Intl. J. App. Ceram. Tech.* (in print)

(受付日 2008.6.11, 改訂受理日 2008.7.9)

執筆者略歴

北英紀(きた ひでき)

東京工業大学大学院修了。企業勤務を経て2004年4月産総研入所。企業においてエンジンフリクション、セラミックス材料、プロセス、DPF（ディーゼルパティキュレートフィルター）等に関わる研究ならびに生産のマネジメントに従事。産総研入所後は、新規造形プロセスや、熱力学に基づく環境負荷の評価手法について研究。本論文では解析と全体構想のとりまとめを行った。

日向 秀樹(ひゅうが ひでき)

大阪大学大学院工学研究科プロセス工学専攻課程修了。同年、(株)いすゞセラミックス研究所(現(株)いすゞ中央研究所)入社。窒化ケイ素セラミックスの開発に従事。1999年ファインセラミックス技術研究組合に出向、2004年復職。2005年産総研先進製造プロセス研究部門高温部材化プロセス研究グループに所属、窒化ケイ素セラミックスの応用に関する研究に従事、現在に至る。本論文では主にデータ収集とセラミックスプロセス合理化に関する検討を行った。

近藤 直樹(こんどう なおき)

1993年4月工業技術院名古屋工業技術試験所入所、2000年1月博士(工学)取得。2007年4月～2008年3月在籍出向(経済産業省)。セラミックスの超塑性変形、高強度セラミックス、高温用セラミックス、低コストセラミックスなど、構造用セラミックスの研究に従事。本論文では主にデータ収集と金属プロセスの合理化に関する検討を行った。

査読者との議論

議論1 「図2技術と指標の連携の重要性」について

質問・コメント(村山 宣光)

図2は、構成学的研究アプローチにおける評価指標の重要性を示す

もので、本論文のメッセージの核心です。技術開発と新たな評価指標の間で、「つくる」は何をつくるのでしょうか。また、指標から技術開発への矢印は「はかる」ではないのでしょうか。逆に技術開発から新たな評価指標への矢印は「高度化」ではないのでしょうか。

回答(北英紀)

「つくる」対象は、技術開発という過程の中で得られた1つの製品やプロセスです。評価指標と技術開発の結果を相互に反映させながら向上・発展させていくという意味で、両者を双方向の矢印で結んでおります。「概念」-「開発」-「評価」のサイクルを廻すアクションの結果として、指標は「高度化」され、技術開発は「競争力」が向上すると考え、それらは三角形の外に出しました。

議論2 製造効率について

質問・コメント(村山 宣光)

例えば、100%アルミナの焼結プロセスを想定すると、アルミナは参照種であるので、エクセルギーはゼロであり、焼結体に固定化されるエクセルギーもゼロです。したがって、投入された全エクセルギーが異なっても、「製造効率」は常にゼロとなり、プロセスの違いが表現されません。「製造効率」と表現するよりは、例えば「エクセルギーの部材内固定化率」と表現するのが妥当ではないでしょうか。また、「エクセルギーの部材内固定化率」と投入全エクセルギーの2つの値を並記することにより、製造プロセスの全体性能をよりの確に表現することができるのではないかと思います。

回答(北英紀)

エクセルギーは熱工学にはじまり、それを物質にも適用しているわけですが、粉と塊では結合状態が違って同じエクセルギーとしている点など、私の理解する限り、エクセルギーを物質に応用する場合、表面や界面エネルギーの扱いなど物理学的な視点での体系化はまだ十分ではないように思います。製造の指標としては課題の1つであり、本文中第5章にもその旨記述しました。

議論3 部材の耐久性を考慮した製造プロセスの性能評価について

質問・コメント(村山 宣光)

投入全エクセルギーは、自然界の安定な状態からどれだけ離れているかを示しており、いわばコストの科学的表現と言えます。さらに、論文ではセラミックス部材の耐久性の議論を展開していますが、投入全エクセルギーを耐用年数で除いた値が、その効果を加味した製造プロセス全体の性能を表現する指標に成りうるのではないのでしょうか。

回答(北英紀)

投入全エクセルギー/耐用年数の値は性能を表現する1つの指標だと思います。一方、環境負荷を考慮する場合、耐用年数(耐久性)自体も重要な目安です。たとえば、投入全エクセルギー/耐用年数の値が同じであっても、耐久性の長い製品の方が、廃棄物の量は少なくなります。

議論4 エクセルギーを活用した評価方法の将来方向性について

質問・コメント(水野 光一)

今回得られたセラミックスと鉄を材質とするヒーターチューブの比較から、将来的にどのような発展が具体的に示唆できるか、という視点をお考えになつては如何でしょうか?

方向は2つあります。1つは、ヒーターチューブ以外の工程まで広げる考え方で、査読者には助言はできません。＜横への広がり＞

もう1つは、ヒーターチューブをさらに深掘りした発展系ですく縦への深掘り＞。たとえば、さらにエクセルギー効率を上げるために、鉄の場合リサイクルすることで効率を上げる技術への展望、並びにアルミニウム浴場への溶解を防止する鉄合金の技術などが期待されます。また、セラミックスの場合、製造工程の内エネルギー消費の高い造粒工程や焼成工程をさらに省エネ化する技術展望などがあります。後者

では、高温焼成(焼結)を避けるセラミックスの製造研究として、「ソフト溶液プロセス」などが技術開発されております。

回答（北 英紀）

ご指摘の主旨をふまえ、本文中、3.5に、まず、現状のシステムを前提として、セラミックス、鉄の各部材を使用した場合それぞれの合理化の指針を示し、次に鑄造システムの合理化の現状や方向性をまとめました。なお、5.展望についてはあくまでもまとめという形式をとらせて

いただいております。

第2の方向性については、3.5に合理化の検討として、鉄、セラミックスそれぞれについて合理化指針を追加記述しました。とくにセラミックスについては製造工程の中でエネルギー消費の高い造粒工程や焼成工程をさらに省エネ化する技術展望を図11とともに記述しました。なお、ソフト溶液プロセスは軽量小型部材、あるいは薄膜には有効な手段と考えますが、本件のような大型窒化ケイ素の焼結体には不向きなプロセスと考え、反映しておりません。