

## ま え が き

環境破壊・温暖化・気候変動・地球崩壊を回避して生命力溢れる地球を取り戻すためには、化石燃料依存型社会から一刻も早く脱皮し、原子力エネルギー依存から大きく方針転換して、無限に存在するクリーンな自然エネルギーを最大限活用する「太陽エネルギー社会」の実現を目指さねばならない。

「太陽エネルギー社会」は、旭硝子財団が主催する地球環境問題を考える懇談会（名古屋大学名誉教授・森島昭夫，日本学術会議元会長・近藤次郎，東京大学元総長・吉川弘之，理化学研究所理事長・野依良治，京都大学元総長・西島安則，東京工業大学元学長・相澤益男，JT生命誌研究館館長・中村桂子ら多数の有識者で構成（敬称略））が，約3年にわたって議論した内容をまとめた報告書「生存の条件—生命力溢れる太陽エネルギー社会へ」（旭硝子財団，2010. <http://www.af-info.or.jp/>）で提唱された，われわれが目指すべき未来の社会像である。この報告書は，2011年3月に発生した東日本大震災・原発事故の大惨事の前に公開され，“生命力溢れる地球を回復するには，太陽により創造され，維持されている自然を尊重し，太陽起源エネルギーを主たるエネルギー源とする「太陽エネルギー社会」を構築していくことが唯一の道です”と高らかに謳った。まさに先見の明のある提言であった。

「太陽エネルギー社会」は「低炭素社会」あるいは「再生可能エネルギー利用社会」と同義語に近いが，未来に明るい希望を与えてくれる素晴らしい造語である。「太陽エネルギー社会」は一国だけの社会ではなく，真のグローバル社会である。そこに行くまでには多くの課題を克服しなければならないが，未来の「太陽エネルギー社会」の構築に向けて具体的な方向を早急に確立して，実現のための努力を始める必要がある。

名古屋大学大学院工学研究科材料バックキャストテクノロジー研究センター（MBTセンターと略称）では，「バックキャスト視点に基づく材料テクノロジー」の開拓を目指している。これまでのテクノロジーが「フォーキャスト（forecast）」すなわち現状技術を延長して未来技術を予測してきたのに対し，「バックキャスト（backcast）」テクノロジーは未来ビジョンから現状技術の方向性を決める。われわれは，「太陽エネルギー社会」を未来ビジョンに掲げ，

これを実現するために、バックキャストの視点に立っていまなにをすべきかを、材料科学・技術の立場から模索している。これまで、“人間活動をオール電化し、それに必要な電気はすべて太陽起源エネルギー（太陽光、太陽熱、風力、水力、バイオマス等の再生可能エネルギー）から得る”社会を「太陽エネルギー社会」と定義し、それを築き支えていくための材料、デバイス、製造技術の開拓を目指して、つぎの四つの理念・目標を掲げて研究開発を先導してきた。

1. 太陽起源エネルギー（再生可能エネルギー）の最大利用
2. 太陽起源エネルギーを効率的に利用する産業の実現
3. 太陽起源エネルギーを効率的に利用するライフスタイルの創出
4. 自然・生物との共生

本書は、名古屋大学大学院工学研究科 MBT センターの進取の気性に富む研究者が中心になって、「太陽エネルギー社会」を実現するための新材料、代替材料、材料製造プロセス等の研究開発について最新の研究成果を採り入れた解説をおこない、未来の材料テクノロジーのあり方、目指すべき方向等を展望したものである。

「太陽エネルギー社会を築く材料テクノロジー（Ⅱ）—材料プロセス編—」では、太陽起源エネルギーを効率的に利用するためにさまざまな観点からの材料プロセス技術について解説した。第Ⅰ部では、低環境負荷型の材料製造プロセスとして、省エネルギー製造技術、高圧高温技術、表面処理技術、塑性加工技術、さらに使用後の材料リサイクル技術を取り上げて、各技術の現状と将来展望を最新の研究成果を盛り込んで解説した。第Ⅱ部では、未来のライフスタイルの創出や自然・生物との共生を目指して、光を利用した物質変換技術、光応答マテリアル技術、バイオマスの利用技術、新材料創出に利用できる薄膜技術を取り上げて、これら新技術をわかりやすく解説し、将来の太陽エネルギー社会に向けた可能性を解説した。

2巻で構成される本書は、大学・研究機関・民間企業の研究者、技術者、大学院生のほか、グリーン・ライフイノベーションに関わる行政官、NPO 法人関係者など、多くの人に役立つ最新の専門書である。

2013年7月

河本邦仁・金武直幸

# 目 次

## 第 I 部 低環境負荷型物質・材料プロセス

### 1. エクセルギーで考えるセラミックスと省エネルギー

1.1	構造用セラミックスの開発動向	1
1.2	省エネルギーとは：エクセルギーと生産消費活動	3
1.2.1	エクセルギーの工学的意味	3
1.2.2	事例1：お湯の熱エクセルギー	4
1.2.3	事例2：窒化ケイ素の化学エクセルギー	5
1.2.4	どうするのか—エクセルギーと地球環境	6
1.3	各種製造装置に使用されるセラミックス	9
1.4	窒化ケイ素プロセスの低エクセルギー化	10
1.5	大型セラミック部材の低エクセルギープロセス： ステレオフィブリック造形	13
1.6	エクセルギー解析に基づくセラミックスの無駄と効用	17
1.7	今後の展望	19
	引用・参考文献	20

### 2. 高圧力下における新物質・新結晶の創製

2.1	圧力と物質・結晶創製	22
2.2	高圧発生技術	23
2.2.1	動的高圧発生技術	23
2.2.2	静的高圧発生技術	24
2.2.3	高圧力下での評価	29
2.3	超高压超高温下での超臨界流体を用いた 無機化合物の合成と単結晶育成	32
2.3.1	LH-DACによる超臨界流体を用いた物質合成	33
2.3.2	LH-DACによる超臨界流体を用いた単結晶育成	41

2.4 ま と め	51
引用・参考文献	52

### 3. マグネシウム合金の表面処理と耐食性

3.1 マグネシウムの特性および耐食性の概要	55
3.2 マグネシウムの化学的特性	56
3.3 表面処理法	59
3.3.1 陽極酸化	60
3.3.2 化成処理	63
3.4 その他複合化処理	65
3.5 表面処理の膜厚と成膜速度	66
3.6 耐食性評価	67
3.6.1 電気化学測定法	67
3.6.2 塩水噴霧試験と大気暴露試験	70
3.7 今後の課題	70
引用・参考文献	71

### 4. ものづくり基盤技術の高度化をめざす塑性加工

4.1 塑性加工の特徴	73
4.2 塑性加工分野でのシミュレーションの進歩	74
4.3 軽量化技術	75
4.4 冷間鍛造接合	78
4.5 ネットシェイプ・高精度化技術	79
4.6 材質制御技術	82
4.7 逐次鍛造による鍛造プリフォーム成形技術	85
4.8 ま と め	88
引用・参考文献	88

## 5. リサイクル (レアメタル・レアアース)

5.1	レアメタルとは	90
5.2	レアメタルリサイクル	95
5.2.1	レアメタルリサイクルの必要性	95
5.2.2	リサイクルプロセスと課題	95
5.3	太陽電池と太陽電池リサイクル	99
5.3.1	太陽電池の現状	99
5.3.2	国内における太陽電池リサイクルの検討	100
5.3.3	国外における太陽電池リサイクルの取組み	101
5.4	インジウムリサイクル	102
5.4.1	インジウムとディスプレイ廃棄物	102
5.4.2	塩化アンモニウムを用いた非高温型乾式プロセスによる インジウムの回収	103
5.4.3	ITO 蒸着ガラスからのインジウム回収実験の概要	104
5.4.4	ガラスリサイクルへの応用の可能性	105
5.5	今後の展望	106
	引用・参考文献	107

## 第Ⅱ部 未来の物質・材料プロセッシング

### 6. 光を利用した物質変換

6.1	光による化学変換	109
6.2	光触媒の原理	110
6.3	光触媒の応用	112
6.3.1	太陽エネルギー変換 (水素製造)	112
6.3.2	人工光合成 (炭素循環)	116
6.3.3	環境対応光触媒	118
6.3.4	新規な化学合成	120
6.4	まとめ	124
	引用・参考文献	124

## 7. 光スマート応答ソフトマテリアル

7.1	フォトクロミズム研究の新たな潮流	127
7.2	表面応答機能	128
7.2.1	ぬれ性制御	128
7.2.2	液滴移動	129
7.2.3	金属蒸着性制御	130
7.3	液晶材料の光配向制御	131
7.3.1	リオトロピック液晶と有機無機ハイブリッド	131
7.3.2	表面グラフト液晶高分子膜	132
7.3.3	ブロック共重合体薄膜	133
7.4	光物質移動	135
7.4.1	光相転移に基づいた物質移動	135
7.4.2	有機無機ナノハイブリッド	136
7.4.3	階層構造を有するレリーフの形成	137
7.4.4	光誘起表面ハネ現象と構造形成	137
7.4.5	多様なフォトクロミック分子を用いた光物質移動	138
7.5	光による材料の変形	138
7.5.1	結晶	139
7.5.2	液晶フィルム	139
7.5.3	液晶ゲル	140
7.6	今後への期待	141
	引用・参考文献	142

## 8. バイオマスの資源・エネルギーへの変換

8.1	バイオマスの利用	146
8.2	触媒によるセルロースの糖化	148
8.3	固体酸塩基触媒を用いた HMF の合成	153
8.3.1	グルコースからフルクトースへの異性化反応	154
8.3.2	フルクトースの脱水による HMF 合成	158
8.3.3	グルコースから HMF へのワンポット合成	160
	引用・参考文献	162

## 9. 薄膜技術

9.1 薄膜の重要性	166
9.2 薄膜の基礎	167
9.2.1 薄膜の作製方法の概要	167
9.2.2 薄膜形成の基礎	167
9.3 薄膜の作製方法	171
9.3.1 真空蒸着法	171
9.3.2 分子線エピタキシー法	173
9.3.3 スパッタリング法	174
9.3.4 化学気相成長法	177
9.3.5 大気圧プラズマプロセス	182
引用・参考文献	182
索引	184

## 『太陽エネルギー社会を築く材料テクノロジー (I)』

### —材料・デバイス編—主要目次

#### 第I部 エネルギー変換・貯蔵技術に資する高機能材料・デバイス

##### 1. 化学的手法による量子ドット太陽電池の作製

太陽光エネルギー変換について／半導体ナノ粒子の液相合成とバンドギャップエネルギー制御／半導体ナノ粒子の積層化と粒子サイズに依存して変化する光電気化学特性／高効率太陽光変換に向けた量子ドット太陽電池の作製／未来に向けて

##### 2. 熱電変換材料・デバイス

熱電変換の原理と応用／太陽の熱から電気を生み出すデバイス／熱電変換材料の開発／今後の展望

##### 3. ミクロチューブ固体酸化物型燃料電池 (SOFC) の開発

固体酸化物形燃料電池／ミクロチューブ型固体酸化物形燃料電池／炭化水素燃料の利用／非接触印刷法の利用と高機能化

##### 4. 次世代蓄電池

電気エネルギーと蓄電池について／LIBの概略／電気自動車用次世代蓄電池／電力貯蔵用次世代蓄電池／次世代蓄電池の今後

##### 5. パワー半導体材料

パワー半導体／シリコン／シリコンカーバイド／窒化物半導体／今後の動向

#### 第II部 高機能代替材料・新材料

##### 6. 超軽量多機能ポラス金属

ポラス金属の分類と特徴／ポラス金属の製造法／ポラス金属の特性例と工業利用

##### 7. ミクロ・ナノ組織制御による材料設計

ミクロ・ナノ組織とその変化／ミクロ組織形成における原子拡散の重要性／実用合金におけるミクロ組織の重要性／ミクロ・ナノ組織制御の今後

##### 8. 植物由来のポリマー材料

バイオベースポリマーについて／テルペン類 (オレフィン系)／フェニルプロパノイド類 (スチレン系)／アクリル類縁体 (アクリル系)／バイオベースポリマーの今後

##### 9. 組織再生を支援する生体材料

生体を修復するための材料／骨組織再生のための生体材料／関節再建のための生体材料／骨組織再生のための新しい材料／生体材料開発の展望

##### 10. ナノ環境に優しい光応答性 DNA の設計

DNAの高機能化／光応答性 DNA の設計／メカニカルな動作が可能な光駆動型 DNA ナノマシンの設計／RNAを切断する光駆動型 DNA マシンの設計／光応答性 DNA の利用と展望



# 第 I 部 低環境負荷型物質・ 材料プロセス



### 1.1 構造用セラミックスの開発動向

窒化ケイ素や炭化ケイ素をはじめとする構造用セラミックスは、軽量かつ耐熱・耐食性に優れ、1970年代以降、さらなる特性向上や新機能創出、ならびに応用に関して活発に研究開発が実施された。しかし、当初の期待どおりに実用化は進んでいるとは言い難く、特に期待の大きかったエンジン部品ではグロープラグやターボチャージャーはブームの火付けとなったものの、その後実用化に成功した製品は中・小型品を中心に限定的である。

製品の機能は材料の特性と設計で決まり、実用化は製品の持つ機能に見合うコストで安定的に製造できるかどうかにかかっている。セラミックスの優れた特性はユーザーや設計者にとって魅力的であったが、実際には扱ってみると設計に示された形状、精度、サイズを持つ製品をその性能に見合うコストで製造するのが困難であるという問題が顕在化することとなった。

金属やプラスチックは溶かして型内で固めることで形状が付与され、機械加工と接合が容易なうえ、塑性変形も可能であり、ときに驚くような精度、形状、サイズを持つ製品を目にする。それに対してセラミックスは微粒子を出発

## 2 1. エクセルギーで考えるセラミックスと省エネルギー

原料として、圧粉体を作製し、炉内で莫大なエネルギーを投じて焼成され、しかも投入エネルギーの大半は廃熱として捨てられる。また機械加工や接合は困難であり、これは材料としての優れた耐摩耗性や安定性の裏返しともいえる。特に大型で複雑な形状を持つセラミック製品の場合、外観上完全と見えても製造過程で不可避免的に生じる微細な欠陥や傷が製品の品質を支配し、ばらつきの一因となる。

数メートルサイズの大型部材をトップダウン型のプロセスで製造する場合、 $10^{18}$  個レベルの微粒子を、流動しやすいスラリーなどの形に一旦変えたのち、大量の微粒子を隙間なく均一に充填し、各部の熱応力差を小さくするため、炉内でできるだけ均質な温度場を作ることが鍵となる。こうした先達らによる地道な研究の積み重ねにより、セラミックスの製造技術は進歩を遂げた。

一方、トップダウン型プロセスでは、製品サイズが大きくなるほど、サイズに応じて焼成炉をはじめ、設備が大型化することは避けられない。よって投資リスクは大きく、またエネルギー消費とコストアップの問題は解決できない。

省エネルギー化を前提としたスケールアップを含めた形状付与自由度の拡大に関する研究は不可欠である。省エネ・省資源と環境問題が深刻化しつつある現在、著者らは、大型のセラミックスは各種分野で使用される製造装置システムや太陽熱発電等の再生可能エネルギー利用システムにやはり必要と考え、そのプロセス開発に取り組んできた。ターゲットとする部材はいずれも数メートルから数十メートルと大型であり、コストと設備投資、製造に必要なエネルギー消費を考えると、一体品からのトップダウン型プロセスも重要であるが、精密な小型ユニットを接合し、一体化するというボトムアップ型アプローチを進化させることが、省エネ性や設計自由度の拡大に有利と考えた。幸いにも、こうした考え方が企業、国に広く受け入れられ、経済産業省ならびに NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) の支援を受けて平成 21 年度より 5 年間の計画で「革新的省エネセラミックス製造技術開発」プロジェクトが開始された<sup>†1), 2)</sup>。同プロジェクトではおもに材料機能の追求より、むしろ局所加熱による接合やニアネット成形を基軸とする省エネ化に向けた形状付与プロセス

に重点をおいた開発に軸足を置いた。またセラミックスの特徴である保存性が高いということの環境上の意義を明確にするため、ライフサイクルを通じた資源性消費をエクセルギー概念に基づく解析も実施している。本章ではその一部を紹介する。

## 1.2 省エネルギーとは：エクセルギーと生産消費活動

### 1.2.1 エクセルギーの工学的意味

そもそも省エネルギーとはなにか、という自らへの問いかけから研究を始めたエクセルギーについて説明する。熱力学第一法則、ならびに質量保存則によれば、孤立した系の中でエネルギー・質量はともに保存され、消費されることはない。そしてもう一つの重要な法則として熱力学第二法則（エントロピーの増大則あるいはエクセルギー低減則）があり、省エネルギーの議論はこの第二法則を念頭において進める必要がある。

**エクセルギー**とは環境を基準とした Gibbs の自由エネルギーであり、着目する系が環境と熱的に平衡状態になるまでになすことのできる最大仕事、として定義されている<sup>3), 4)</sup>。いわばエクセルギーは拡散力、あるいはポテンシャルであり、われわれはそのエクセルギーを使って生産・消費活動を行っていると考えてよいだろう。われわれが通常使用している電力や、高度に精製された製品、また鉄やアルミは人工物であり、環境に対してポテンシャルを持っている（**図 1.1**）。

われわれは生産や消費活動により、エネルギー自体を消費しているのではなくポテンシャルを消費して、エネルギーの質を低級化させていると考えることができる。熱力学第二法則におけるエントロピーの増大はエネルギーのポテンシャルの消費を意味している。

すべてのエネルギーの源である太陽エネルギーのポテンシャルは高く、大気

---

† 肩付き数字は、章末の引用・参考文献の番号を表す。

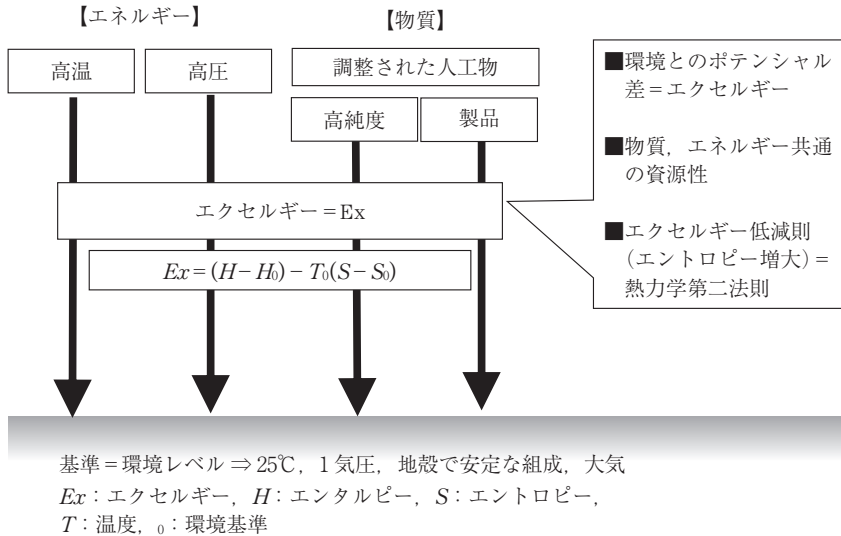


図 1.1 エクセルギーの工学的意味と重要性

温度に近い熱はポテンシャルの低いエネルギーである。枯渇しようとしているのはエネルギーの量ではなく、エネルギーのポテンシャルであり、省エネルギーの本質はエネルギーのポテンシャルの消費、あるいは質の劣化速度をいかに抑えるかである。

石油等の化石燃料も高いエクセルギーを有するが、産業革命以降、その消費量は飛躍的に大きくなり、枯渇が懸念されている。同時かつ不可避的に生じるエントロピーの生成速度が速すぎる、あるいはエクセルギーを持った化学物質が環境に廃棄され生態系では処理できず分解できないまま蓄積されつつあるのが環境・エネルギー問題である。

### 1.2.2 事例 1: お湯の熱エクセルギー

エクセルギーとエネルギーの違いを理解するためのわかりやすい例として、お湯を例にしてエネルギーとエクセルギーの関係について考えてみる。完全な断熱容器を想定し、内部に 100℃のお湯 1 L と 25℃のお湯 49 L を混ぜると、質量保存則とエネルギー保存則から 26.5℃のお湯 50 L ができる。この場合、

理屈上、混ぜる前後においてお湯の有する熱エネルギーはともに 314 kJ である。

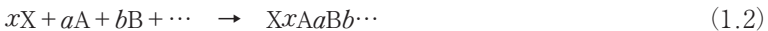
しかし同じエネルギーを持っていても外部からエネルギーを投入しない限り 26.5°C のお湯 50 L を元の状態に戻すことはできない。すなわち、なにかが失われたのである。そこで、エクセルギーを算出すると、混ぜる前には 33.9 kJ、そして混ぜた後は 0.8 kJ となり、その差 33.1 kJ が失われたことになる。一般には熱のエクセルギー  $Ex$  は以下の式で算出できる。

$$Ex = m \cdot Cp \cdot \{(T - T_0) - T_0 \cdot \ln(T / T_0)\} \quad (1.1)$$

ここに  $m$  は重量 [kg]、 $Cp$  は定圧モル比熱（水の場合 4.186 kJ/kg·K）、 $T$  は温度 [K]、 $T_0$  は環境温度 [K] であり、ここでは 298 K とした。

### 1.2.3 事例 2：窒化ケイ素の化学エクセルギー

物質の持つエクセルギーについても基本的な考え方は同様である。人工物の場合、人工物が構成元素に分解され、さらにそれらが地球環境中において最も安定な物質状態に至るまでになすことのできる最大仕事となる<sup>3), 4)</sup>。物質のエクセルギー（化学エクセルギーともいう）を算出する場合、元素 X の参照種が  $XxAaBb\cdots$  という組成の化合物であって、下記反応で生成されるとする。



上記反応の標準自由エネルギー変化を  $\Delta G^0$  とする。そして元素 X のエクセルギーを  $Ex(X)$  とすると次式に従って算出できる。

$$Ex(X) = (1/x) \times (-\Delta G^0 - aEx(A) - bEx(B) - \cdots) \quad (1.3)$$

ここに参照種とは、25°C、1 気圧において地殻で安定な組成と定義されており  $XxAaBb\cdots$  のエクセルギー  $Ex(XxAaBb\cdots)$  は 0 である<sup>3)</sup>。

化学エクセルギーの実際の例として、後項で窒化ケイ素セラミックス ( $Si_3N_4$ ) を採り上げる。 $Si_3N_4$  は自然界に存在しない人工物であり、そのエクセルギーの算出はやや複雑である<sup>5), 6)</sup>。窒化ケイ素の参照種は、 $SiO_2$  と大気中に存在する窒素 ( $N_2$ ) とした。ベースとなる基本式は式 (1.4)、(1.5) であり、各反応の標準自由エネルギーの値とともに示す。酸素、窒素はともに大気中に存在している状態を基準とするため純粋な状態の 1 モルの酸素、窒素のエクセルギー

は、環境に対して拡散する能力を持つことから、大気中の各気体の分圧を使ってエントロピー項の補正が必要となる（式 (1.6), (1.7)）。 $\text{SiO}_2$  のエクセルギー  $Ex(\text{SiO}_2)$  は定義により 0 である。また R は気体定数であり、 $8.314 \text{ J/K}\cdot\text{mol}$  とした。

$$\text{Si(s)} + \text{O}_2(\text{g}) = \text{SiO}_2(\text{s}) \quad \Delta G^0 = -856.67 \text{ kJ/mol} \quad (1.4)$$

$$\text{Si(s)} + (2/3)\text{N}_2(\text{g}) = (1/3)\text{Si}_3\text{N}_4(\text{s}) \quad \Delta G^0 = -225.46 \text{ kJ/mol} \quad (1.5)$$

$$Ex(\text{O}_2) = RT \cdot \ln(101.3/20.61) \quad (1.6)$$

$$Ex(\text{N}_2) = RT \cdot \ln(101.3/76.57) \quad (1.7)$$

$$Ex(\text{SiO}_2) = 0 \quad (1.8)$$

式 (1.4) ~ (1.8) と式 (1.3) を使って、式 (1.10), 式 (1.12) が導かれる。

$$\Delta G^0 = Ex(\text{SiO}_2) - (Ex(\text{Si}) + Ex(\text{O}_2)) \quad (1.9)$$

$$Ex(\text{Si}) = (-\Delta G^0) + Ex(\text{SiO}_2) - Ex(\text{O}_2) \quad (1.10)$$

$$\Delta G^0 = (1/3)Ex(\text{Si}_3\text{N}_4) - Ex(\text{Si}) - (2/3)Ex(\text{N}_2) \quad (1.11)$$

$$Ex(\text{Si}_3\text{N}_4) = 3(\Delta G^0) + 3Ex(\text{Si}) + 2Ex(\text{N}_2) \quad (1.12)$$

以上の計算結果から窒化ケイ素の化学エクセルギー  $Ex(\text{Si}_3\text{N}_4)$  は  $1883 \text{ kJ/mol}$  と算出された。後述するが、実際のプロセスでは窒化ケイ素を得るためにその数十倍ものエクセルギーを投入し、その大部分は熱の形で、有効利用されることなく環境中に廃棄していることになる。

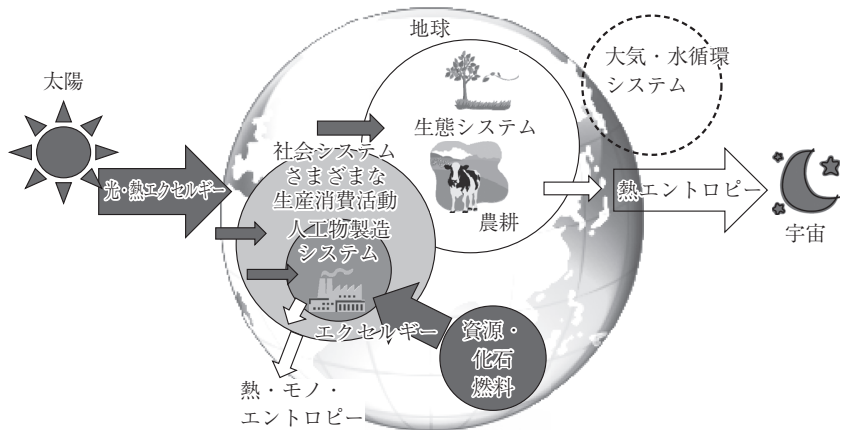
その他、エクセルギー損失は、例えば化学工学プロセスの分野で見ると、伝熱、燃焼、摩擦、摩耗のほか混合、分離といったプロセスにより生じるが、これらの損失はエネルギー保存則では現れてこない。しかし純度の高い金属と不純物を多く含む金属では、高純度化には大量のエネルギー投入が必要である。つまり価値が異なることは明白であり、物質 - 機能 - 製品 - プロセス、そしてエネルギーはエントロピー（エクセルギー）で繋がっている。

### 1.2.4 どうするのか—エクセルギーと地球環境

地球環境の保全には材料・プロセス技術の進化・発展は不可欠である。その中で金属に比べて製造に莫大なエネルギーを消費するセラミックスの価値はな

んだろうか。複雑系としての環境問題に立ち向かう材料・プロセス技術の目標設定や影響力を科学的に表現する方法は確立していない。

さまざまな生産・消費活動，そして環境問題に熱学的視座は重要である。特に第二法則（エントロピー増大，あるいはエクセルギー低減の法則）の重要性が浮き彫りになる。太陽から地球が受け取るエクセルギーは， $1.28 \times 10^{19}$  GJ/年と試算された。地球上ではエクセルギーは，植物の光合成，大気や水の循環，農耕などに消費された後，エントロピーとして宇宙に廃棄され定常状態が維持される，いわゆる能動的な定常開放系を形成している（図 1.2）。



- ・資源や化石燃料の枯渇問題が懸念
- ・生態系システムと乖離しつつある人工物システム

図 1.2 定常開放系としての地球，そして各システム

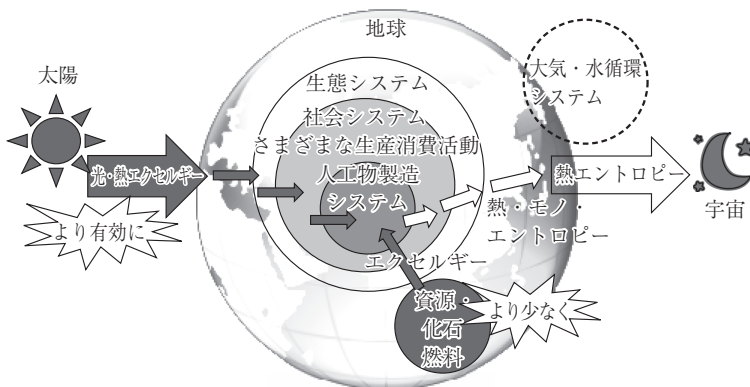
一方，人工物としての工業製品を生産，およびそれに続く消費，廃棄するという行為は，現状，化石燃料や原子力に大きく依存している。2011 年における世界の一次エネルギー消費をエクセルギー換算してみると  $4.47 \times 10^{11}$  GJ/年と算出された。こうした化石燃料や原子力依存は資源の枯渇だけでなく，地球温暖化や生態系の破壊をもたらすことに繋がる。

エクセルギーの観点から環境・エネルギー問題を捉えると，エクセルギーは生産や経済活動に必要な経済エネルギーとして生産活動をするたびに一方的に

消費される。いわばエクセルギーはエネルギーと物質の資源性を示す共通の指標と考えることができる。

また、エクセルギーはエネルギーのポテンシャルを示す指標であると同時に、外界（＝環境）に対する仕事は時に環境に対する影響の大きさとも捉えることができる。環境に廃棄された物質や製品がエクセルギーを有していると自発的反応が生じ、環境に悪影響を及ぼすという仕事をすることになる。

持続可能な社会の実現には、化石燃料等の使用をできるだけ減らし、太陽熱・光、地熱、工場廃熱等の再生可能エネルギーの利用率を高めることが重要である（図 1.3）。と同時に大量生産大量消費型ではなく、消費者には製品に愛着を持って無駄なく使い切ることが、重要になってくる。



- ・生態系システムと人工物システムの調和
- ・各階層間での循環型システムを目指す
- ・化石燃料使用低減→再生可能エネルギー利用技術の加速

図 1.3 持続性の実現に向けて

われわれが熱力学第一、第二法則から学ぶべきことは、原料やエネルギーをたくさん使えば、その分多くの廃物が排出され、元に戻すためにもエネルギーが必要であるということである。エミッションゼロを目指すのは永久機関を目指すのと同じである。リサイクルについても元に戻すには必ず外部からのエクセルギー投入は必ず必要である。マクロな産業間連携やカスケードネットワーク構築も同様である。こうした省エネの指針としてエクセルギーは重要な役割



# 索 引

<b>【あ・え】</b>		<b>【く】</b>		<b>【す】</b>	
アゾベンゼン	128	クヌードセン型セル	172	水 素	112
液晶配向	131	クリティカルマテリアル	90	水素過電圧	68
エクセルギー	3	グリーンケミストリー	120	ステップ・フロー過程	169
エピタキシー	170	グルコース	147	ステレオファブリック	
塩化揮発	103	クロモニック	132	造形	13
				スパッタリング法	174
<b>【お】</b>		<b>【け】</b>		<b>【せ】</b>	
大型油圧プレス	24	結晶成長時間	49	制御圧延	82
オートクレーブ	24	ゲル材料	140	制御鍛造	83
				精 製	95
<b>【か】</b>		<b>【こ】</b>		精 錬	95
解 碎	96	合成ガス	117	ゼオライト	156
回 復	83	高張力鋼板	76	析 出	83
化学気相成長	167	固体塩基触媒	155	セラミックス	1
化学合成	112	固体触媒	148	セルロース	147
核生成過程	169	コモンメタル	90	遷移金属窒化物	34
加工熱処理	84	混成電位	68	選 鉱	95
可視光	119				
化成処理	55	<b>【さ】</b>		<b>【た】</b>	
カーボン系固体酸	149	再結晶	82	ダイヤモンド	
カーボンナノチューブ	50	再生可能資源	114	アンビルセル	27
カーボンニュートラル	147	サーボプレス	80	大気圧プラズマプロセス	182
ガラスリサイクル	105	酸化チタン	118	大強度陽子加速器施設	31
環境対応	112			耐食性	55
含水ニオブ酸	161	<b>【し】</b>		太陽エネルギー変換	112
		ジアリールエテン	129	太陽電池	98
<b>【き】</b>		紫外光	119	担持金属触媒	148
希土類金属窒化物	38	常温メタン水蒸気改質	114	単層上核生成過程	169
金属シリケート	156	シリカ光触媒	123	単層成長過程	169
金属窒化物	33	真空蒸着法	171	鍛造接合	78
		人工光合成	112, 116	単分子膜	65
		人工資源	96		

<b>【ち】</b>	破 碎	96	<b>【ま・み】</b>		
地球温暖化	116	バターニング	132	マイクロ波プラズマ CVD	180
逐次鍛造	86	ハロゲン系難燃剤	96	マグネトロン	
チタニア	136	ハンマー鍛造	88	スパッタリング	176
窒化ケイ素	10	<b>【ひ】</b>		摩擦攪拌接合	78
中空角柱状結晶	46	光 CVD 法	178	水分解	112
超親水性	119	光触媒	110	<b>【め】</b>	
超微細粒鋼	82	非調質鋼	83	メカノケミカル反応	105
超臨界二酸化炭素流体	50	ヒドロキシメチルフル		メソ構造体	132
<b>【て】</b>		フラール	153	メソポーラスシリカ	156
ディスプレイ	102	表面エネルギー	49	メタン	114
デュアルイオンビーム		表面処理	55	<b>【や・ゆ】</b>	
スパッタリング	177	<b>【ふ】</b>		ヤングの式	169
テーラードブランク	78	フォトクロミズム	127	有限要素解析	74
デンドリマー	137	物理気相成長	167	誘導結合型	180
<b>【な・に】</b>		不働態皮膜	56	<b>【よ】</b>	
ナノ粒子	123	プラスチック	96	溶解度積	59
二酸化炭素	116	プラスチックモータ	140	陽極酸化	55
<b>【ね】</b>		プラズマ CVD 法	178, 179	容量結合型	180
熱 CVD 法	178	分子線エピタキシー法	173	<b>【る・れ】</b>	
ネットシェイプ	79	<b>【へ】</b>		ルチル型酸化物	
ネットプロパティ	82	平均自由行程	168	中空角柱状結晶	44
<b>【は】</b>		平行平板型	180	レアメタル	90
バイオガス	114	ヘキサアリアル		レーザー加熱	27
バイオマス	114, 146	ビスイミダゾール	138	レリーフ形成	128
ハイテン	76	ヘキソース	153	<b>【わ】</b>	
ハイドロタルサイト	155	ベースメタル	90	ワンポット合成	160
ハイブリッド光触媒	124	ヘテロポリ酸	151		
		変 態	83		

---

biomass	146	GaN	41	LASER-DAC	27
CAE	74	HMF	153	TMCP	82
DAC	27	ITO	102	3d 遷移金属窒化物	36
FSW	78	J-PARC	31		

# 太陽エネルギー社会を築く材料テクノロジー（Ⅱ）

——材料プロセス編——

Materials Technology for Solar Energy-based Society II

——Materials Processes——

©Kunihito Koumoto, Naoyuki Kanetake 2013

2013年11月8日 初版第1刷発行

検印省略

編 者 名古屋大学大学院工学研究科  
材料バックキャスト  
テクノロジー研究センター  
発 行 者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印 刷 所 萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

**発行所** 株式会社 **コ ロ ナ 社**

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06628-9 (森岡) (製本：牧製本印刷)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします