

人体の仕組みに学ぶ持続可能な社会 ～物質循環とエネルギー利用の視点から～

伊 藤 等

1. はじめに

我々の社会は科学技術を基盤に、便利で豊かな暮らしを求めて努力してきた。現在、その実を味わう一方で、大量生産・大量消費・大量廃棄型の生活様式が人類や環境へ及ぼす負の側面も明らかになっている。目指すべき持続可能な社会の姿は、「低炭素社会」「循環型社会」「自然共生社会」という各分野が統合的に達成される社会とされ、これに東日本大震災と福島原発事故の状況を踏まえて、「安全」の確保がその前提として付け加えられた¹⁾。

いま改めて人体の仕組みを見ると、特に体内に取り入れた物質の高度な循環利用や効率の良いエネ

ギー利用システムを知るとき、生命体は究極の持続可能な社会を営んでいるように思える。

この稿では生命科学に疎いモノづくり技術屋の気ままな自己研鑽として、人体の仕組みと産業社会の技術との類似性やヒントをつまみ食いの的に考察した。

2. 人体のつくりと生命の営み

まずは人体がどのようにつくられていて、生命活動がいかにして営まれているかの基本を大まかに押さえておきたい。

図1に人体のつくりのイラストを示す。この説

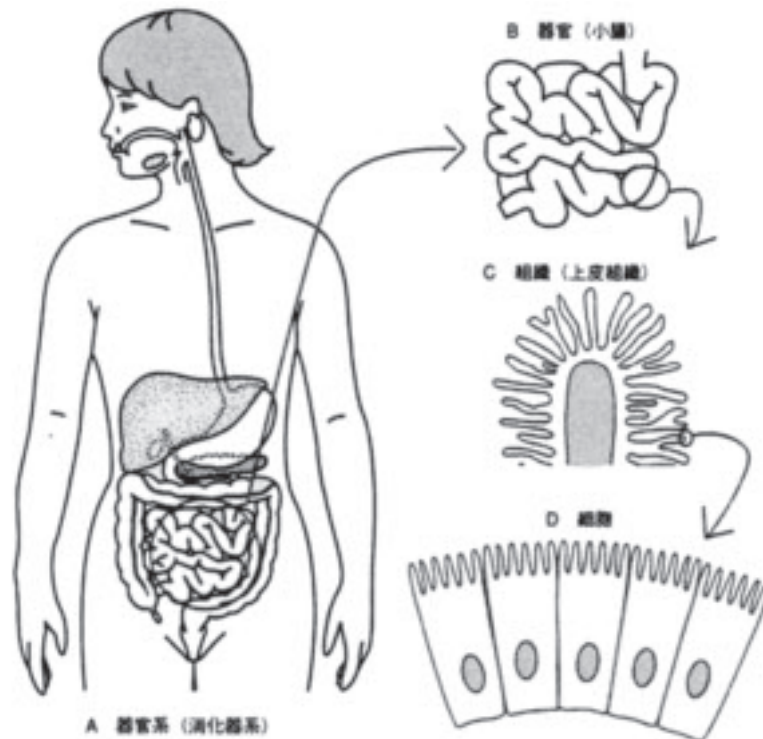


図1. 人体のつくり
(文献2より)

明²⁾によると、人間の身体はおよそ 60 兆個の細胞から構成され、同じ種類の細胞が集合して組織を構成する。組織には上皮組織、支持組織、筋組織、神経組織がある。これらの組織が一定の配列のもとに組み合わせられて、一つの機能を営む器官を構成する。例えば、胃や心臓や小腸は一つの器官である。さらに幾つかの器官が集まって、ある目的のために協調して働く器官系を構成する。器官系には消化器系や循環器系などがある。これらの各々独特の役割を持つ器官系が協調的に働くことによって、多数の細胞が 1 個の生体としての生命現象を営むことができる。

次に、細胞が生きてゆく基本原理について成書³⁾の記述から要約すると以下の通り。宇宙の万物は無秩序で乱雑な状態に向かう(熱力学第 2 法則：エントロピーの増大)。これに対して、細胞は環境からエネルギーを取り出して利用しやすい形に変え、それを用いて生物の秩序をつくり続ける(エントロピーを低く保つ)。すなわち細胞は生命を維持するために、食物を細胞の構成素材とエネルギー源の両方に転化する小さな化学工場である。組織を構成する細胞は様々なパターンと速度で分裂してつくり替えられる。ちなみに、小腸は数日間で表面の細胞が腸管内に脱落して入れ替わり、皮膚は剥がれ落ちて垢となり下層の細胞と約 2 カ月で、赤血球は約 4 カ月で、骨は約 10 年ですっかり入れ替わるとされ、人は増大したエントロピーを体外に捨てることで生きている。

3. 人体の仕組みと産業社会の技術

人体の仕組み・働きの特定の部分を抜き出してみると、産業社会における技術・システムと類似しているところが多々ある。これらの対応する例を挙げて表 1 に示し、以下に順に述べる。

3-1. 地産地消の分散型エネルギーとスマート化

食物の主要成分である多糖、タンパク質、脂肪は巨大分子なので、先ず細胞の外で消化酵素によってグルコース、アミノ酸、脂肪酸などの小分子に分解される。これら栄養分と O₂ が動脈血で細胞に運ばれると、細胞内のミトコンドリアにおいて主に酸化

的分解を受け、分解熱が放出されると同時に電子の受け渡しも起きて、いわばコージェネ(熱電併給)が行われる。その上に ATP(アデノシン三リン酸、図 2)というエネルギー貯蔵物質が大量に合成される。ATP は末端のリン酸基の 1 ~ 2 個を切り離す時に 11 ~ 13kcal/mol の有効なエネルギーが得られるため、必要に応じて運動エネルギーや化学エネルギーに変換できる。ATP は「エネルギー通貨」と呼ばれて自分の細胞内では様々な用途に使えるが、他の細胞と融通し合っては使えないようである。このように、60 兆個ある細胞の多くは、それぞれの持ち場でエネルギーを地産地消している。

今までのエネルギー社会では、大規模発電所で発電した電力を上流から下流へ送るだけであった。最近では、スマートグリッドといった新たなエネルギーインフラへの関心が高くなっている。一つの刮目すべき提言⁴⁾では、太陽光・風力発電やバイオマ

表 1. 人体と産業社会の対応例

	人体の仕組み	産業社会の技術
①	細胞でのエネルギーと ATP の生成	地産地消の分散型エネルギーとスマート化
②	食物分子の水溶液中における酸化反応	エネルギー効率の高い水中燃焼での温水製造
③	心臓という 2 段階式ブースターポンプ	プラントの流体輸送やビルの送配水システム
④	静脈・リンパ系と肝臓・腎臓の協働	下水道～終末処理場とゴミ収集～清掃工場
⑤	筋収縮は無酸素と有酸素の 2 系統動力	車などのハイブリッドエンジン
⑥	廃棄物をリン酸カルシウムの骨に利用	石炭灰や鉄鋼スラグの建設資材などへの利用
⑦	腸内細菌など微生物との共生	微生物を利用する技術と食品や製品

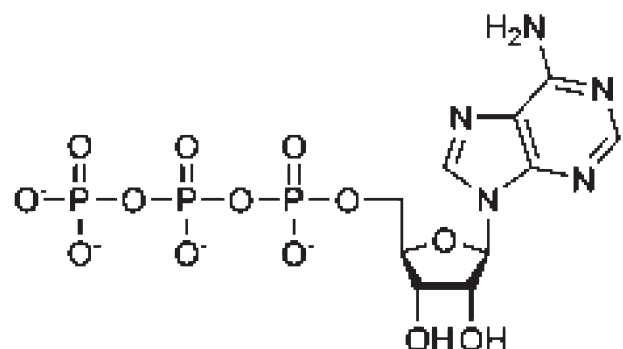


図 2. ATP の分子構造

ス(コージェネ)などの分散型エネルギーは地産地消するとともに、既存の大規模発電所を含めた送配電網に取り込む現状から先に進んで、将来は各住宅団地(家庭)に発電所の機能が付与され、余剰電力が他の地域に回る社会を想定する。さらに、電力・熱の供給だけでなく、燃料電池を見据えた融通物質(例えば水素)も併給する統合型インフラの構築を主張している(東京工業大学・柏木研究室)。

このようなスマート化は社会の望ましい方向であり、今後、エネルギー分野でのビジネスチャンスと捉えて関連する技術・製品の開発が大きく進展することを期待したい。

3-2. エネルギー効率の高い水中燃焼での温水製造

細胞重量の約70%は水であり、体内に取り入れた食物分子の酸化的分解(燃焼)や各種細胞・組織を構成する材料の生合成反応はほとんどが水溶液中で行われる。酵素で触媒される生体内での反応は概してエネルギー効率がよく、ミトコンドリアで有機物を燃やしてATPがつくられる際のエネルギー効率は70%以上とされる。

これに比較して、自動車などの燃焼エンジンのエネルギー効率は約20%、原発30%台、火発40%台(コンバインドサイクル発電は50~60%程度)と高くはない。

LNG(液化天然ガス)は貯蔵温度約 -162°C (メタンの沸点)であり、ガス供給にあたっては常温まで気化するため、通常はLNG基地で大量の海水と熱交換している(冷熱が捨てられる)。寒冷地では凍結の恐れがあるため(海水の氷点が約 -2°C)、水槽で加熱する方法もとられており、燃料ガスを水中バーナーで燃焼して温水をつくる装置の一例を図3に示す。

水中燃焼では、水への伝熱効率を高めて排気に伴う熱損失を少なくでき、それに加えて燃焼反応で生成する水蒸気の凝縮熱(540kcal/kg)も利用できるのでエネルギー効率が高くなる。発電しない 100°C 以下の温水製造だけならば、エネルギー効率の高い水中燃焼技術を業務用・家庭用の給湯などの製品にもっと広く適用しても良いと思われる。

ただし、水中で直接燃焼した場合は排ガス CO_2

の水への溶解も起きるため、温水の用途によっては長短が出よう。ちなみに、お湯の中の CO_2 は皮膚から組織や血管に入るので人の体は O_2 不足と判断し、新鮮な血液を送り込もうとして血管を拡張する働きを高めることになり、これが温泉の効用の一つとされる。

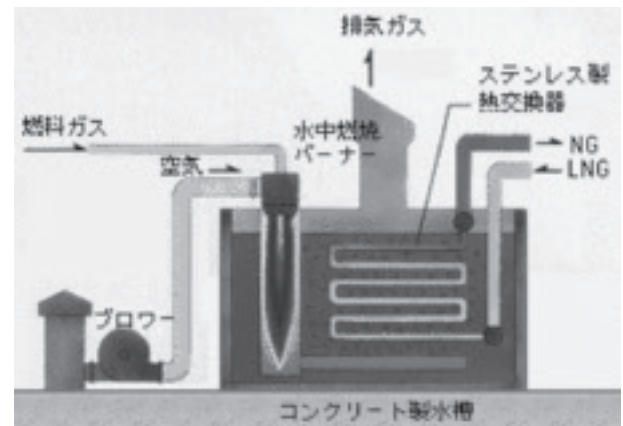


図3. サブマージドコンバッション式気化器
(住友精密工業のHPより)

3-3. プラントの流体輸送やビルの送配水システム

心臓は動脈血で栄養分と O_2 を送り出し、静脈血で老廃物と CO_2 を回収する循環系の重要器官である。近接する肺へは比較的低い圧力で送り、 O_2/CO_2 ガス交換して戻ってきた血液をさらに加圧して体の隅々にまで送り出す2段階ブースターポンプとなっている。このように、目的に応じて低圧系(肺循環、右心室から吐出)と高圧系(体循環、左心室から吐出)とを使い分けることによって(圧力の比は約6倍)、心臓と血管を構成する材料を節約するとともに駆動力の省エネを図っている。

我々の社会でもブースターポンプは広く用いられており、例えば各種製造プラントの流体輸送やビル・マンションの送配水システムなどにも設置され活用されている。これからも暮らしや産業の様々な分野において、ブースターポンプの原点(省資源・省エネ)を忘れることなく、合わせて安全工学の視点(事故防止はもちろん、過剰性能も避けた)を考慮した技術・製品の普及を進めたいものである。

3-4. 下水道~終末処理場とゴミ収集~清掃工場

人体は細胞の様々な活動によりできる老廃物を回

収、処理するために合理的な仕組みを用意している。老廃物の処理場までの輸送は、静脈の他にリンパ系という清掃専用システムを加えた 2 系統の回収網を体内に張り巡らせて行う。リンパ管は血管から滲み出た血漿とともにタンパク質などを回収し、流れの要所に配置したリンパ節は異物(病原菌など)を食細胞が攻撃して破壊する場である。これは汚水を下水道の終末処理場まで送る途中の浄化槽に似る(病院排水はほとんどが未処理⁵⁾)。

肝臓は栄養分の貯蔵と供給を行う基地の面とアルコールの解毒、アンモニアの尿素への転換、古くなった赤血球を破壊して排泄するなど静脈産業の面を併せ持つ。また、化学反応に伴う発熱は体温の調節に役立つ。腎臓は老廃物を受け入れ、グルコースや必要な無機塩類・水の再吸収と不要な尿素などの分離、排泄を行う。このように、肝臓と腎臓は協働しながら資源化工場(兼)終末処理場(兼)清掃工場(兼)熱供給施設の役割を担う。

我々の社会も日々の暮らしで出るゴミや糞尿の処理のため、下水道～終末処理場とゴミ収集～清掃工場という 2 系統のインフラを整備してきた。このシステムを活用すべく近年、ゴミの運搬・焼却に必要なエネルギー削減による低炭素社会への貢献や資源の再生利用による循環型社会の構築などの観点から、生ゴミを下水系に直接投入して処理するディスポーザーを普及させる取り組み⁶⁾が行われている(図 4)。これによると、旧歌登町(現枝幸町)での先駆的な社会実験の例を始め、国内外において実績

データが集積されつつあることをもとに、社会の合意形成に向けた努力がなされている。

人口減少と超高齢社会を考慮し、老朽化する公共インフラ(下水・ゴミ処理場)をどう活用・維持するのかという全体像を視野に据えて、各地域毎の特性を踏まえたディスポーザー導入への具体的な検討を進めるべきと考える。

3-5. 車などのハイブリッドエンジン

筋収縮のエネルギーは ATP の分解によってもたらされる。短時間の瞬発的運動では筋繊維内の ATP が利用されたり、グルコースが乳酸に分解される際のエネルギーが利用されて O_2 の供給を必要としない(無酸素運動)。長時間の持久性運動になると、グルコース(直接取り込みまたは貯蔵しているグリコーゲンからの分解補給)燃料と O_2 の連続的な供給が必要となる(有酸素運動)。

このように、筋肉の運動は無酸素と有酸素の 2 系統で行われ、車に例えればハイブリッドエンジンで駆動していると言える。激しい運動が続くとグルコースの消費により多量の乳酸が筋に蓄積して筋疲労を起こし、この回復には時間がかかる。

同様に現状では、バッテリーの充電～再生に時間を要するが、車のエンジン自体の燃費向上とともに自然エネルギーで発電した不安定な電力の取り込み・活用など新たな時代的要請がある。ハイブリッドエンジンは性能やコストの課題を克服しつつ、陸上の車だけでなく、鉄道や船舶なども含めて広く普及して行くであろう。

3-6. 石炭灰や鉄鋼スラグの建設資材などへの利用

筋細胞が収縮する反応は、 Ca^{2+} イオンが細胞内に流入することが引き金となって起こり、収縮時には ATP が分解される。この使用済みの Ca^{2+} と ATP から切り離されたリン酸が細胞から外に排出されると別の用途に使われる。すなわち、廃棄物と思しき 2 種類の材料の再利用により、リン酸カルシウムが主成分である骨の形成に預かる。これが、筋肉を鍛えるスポーツマンは骨も頑丈になる理由である。

なお、廃棄物の循環・再利用の点では、食物の分解(多段燃焼)の結果、最終的に生成する CO_2 も全

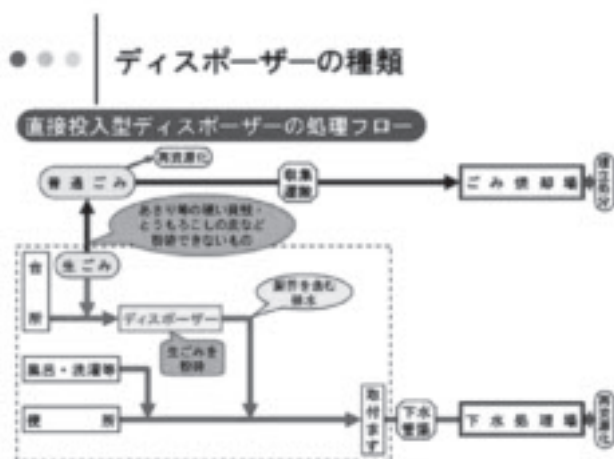


図 4. 直接投入型ディスポーザー
(文献 6 より)

量が直ちに捨てられることはない。一部は DNA を構成する塩基をつくる材料として、また一部は体液の pH を調節する緩衝剤などに用いられ、余剰となった CO₂ が呼気とともに肺から排出される。

廃棄物と骨の関連として、石炭には土砂類似の不純物が 12% 程度含まれ、燃焼後に残る石炭灰はセメント原料や固形化して路盤材など建設資材に再利用される。また、鉄鉱石の場合も同様に、高炉スラグは約 290kg/ 銑鉄トンの発生がある。これもセメントやコンクリート骨材などに再利用され、新たな用途への技術開発も続けられている。

3-7. 微生物を利用する技術と食品や製品

細菌が世界を支配する、という一見衝撃的なタイトルの本が出版された⁷⁾。細菌は結核、O-157 など病原菌の悪いイメージが強いが、読み進むと、細菌から受ける恩恵は害よりも大きいことがわかる。現在、世界の人口は約 70 億人に達したが、この総重量の 2,000 倍以上に及ぶ重さの細菌群が地球に住んでいるらしい。人の体にも数千種類の常在菌が住むとされ、例えば腸内細菌は人の食物の消化や免疫作用を助けると同時に、彼らは栄養と住み処を得ることで人と共生している。

先人たちは酒や発酵食品の生産など、微生物を巧みに利用してきた。暮らしや産業活動に伴い排出される汚水の処理でも活性汚泥法が古くから行われている。近年では、微生物を利用した汚染土壌の修復技術や希少金属を回収する技術なども開発されている。また、農業用マルチシートのように、役目を終えた後に環境中で容易に自然に還る生分解性プラスチックは望ましい製品である。さらに、骨折の接合に用いるボルトは金属の代わりに生体適合性(徐々に体内で分解)のプラスチックを使うことで治療後の再手術(摘出)を避けるなど、医療材料への応用も広がっている。

今後、微生物や生命科学を活用する技術・製品の開発は一層重要性を増すものと考えられる。

4. おわりに

将来目指すべき持続可能な社会の一つの形としてスマートコミュニティが言われる。そこでは、

ICT(情報通信技術)が重要な位置を占めるが、人体での相当する機能は脳神経系であろう。今回はその辺のところまでは頭と手が回らなかった。また、述べてきた内容にしても私の認識不足ゆえに、ごく小さな断片を独善的にかじっただけかも知れない。

近代科学技術の歴史はせいぜい 200 年である。それに対して、自らの体には生命 37 億年の知恵が詰め込まれている。これを謙虚に学んで得たヒントをもとに、微力ながら社会に役立つ技術を一步でも前に進める姿勢を持ちたいと思う。

【参考文献】

- 1) 環境省：第四次環境基本計画，2012 年 4 月
http://www.env.go.jp/policy/kihon_keikaku/index.html
- 2) 佐藤昭夫，佐伯由香編：人体の構造と機能，医歯薬出版，2003 年
- 3) 中村桂子，藤山秋佐夫，松原謙一監訳：Essential 細胞生物学，南江堂，1999 年
- 4) 柏木孝夫：エネルギーを取り巻く課題と将来展望，北海道経済産業局主催；熱利用“ヒートアップ”セミナー資料，2013.2.21
- 5) 森宏一郎(日医総研)：病院排水の処理状況に関する調査，2008 年 1 月
<http://www.jmari.med.or.jp/research/dl.php?no=369>
- 6) NPO21 世紀水倶楽部：ディスプレイ研究集会報告，第 1 回 2005 年 12 月～第 5 回 2011 年 10 月
第 5 回(図 4)
<http://www.21water.jp/G111011.pdf>
- 7) アン・マクズラック著，西田美緒子訳：細菌が世界を支配する，白揚舎，2012 年

伊 藤 等(いとう ひとし)

技術士(環境部門)

伊藤技術士事務所

