

論 説

# エネルギー・熱工学とサステナビリティー

— エネルギー資源，地球環境そしてサステナビリティに係わる課題 —  
Energy, thermal engineering and sustainability

西 尾 茂 文\*  
Shigefumi NISHIO

## 1. エネルギー・環境問題の行方に関する思想的側面

生産研究（1998年12月号）に“サステナビリティに関する問題提起”と題して，以下の趣旨の論考を発表した。少し長くなるが，私の基本的考え方であるので引用しておきたい（図1参照）。

即ち，『20世紀を歴史的に振り返る時代が将来到来するとすれば，恐らく間違いなく“科学技術の時代”と呼ばれるであろう。航空機や自動車あるいは鉄道は人間を高速で移動させ，ロケットは人間を月へも運び，原子力は未曾有のエネルギーを開放した。半導体は人間の記憶・演算能力

を拡大し，情報網は時空間を越えて我々の視聴覚能力を拡大した。さらに，DNA二重螺旋構造の発見は，最後の物理的能力とも言える生命力をも拡大しつつある。これらの科学技術は，利便性に富む輸送網，エネルギー網，あるいは情報網として現代ではいわば「自生」する巨大な“人工システム”あるいは“人工環境”を形成しており，我々は最早これらを抜きにしては生存することができなくなってきていると思われる。

……こうした技術や科学技術が築いてきた人工システムは，一方では，周知のように資源，環境，食糧などの持続可能性に関する物理的制約要因に遭遇しつつある。しかし，

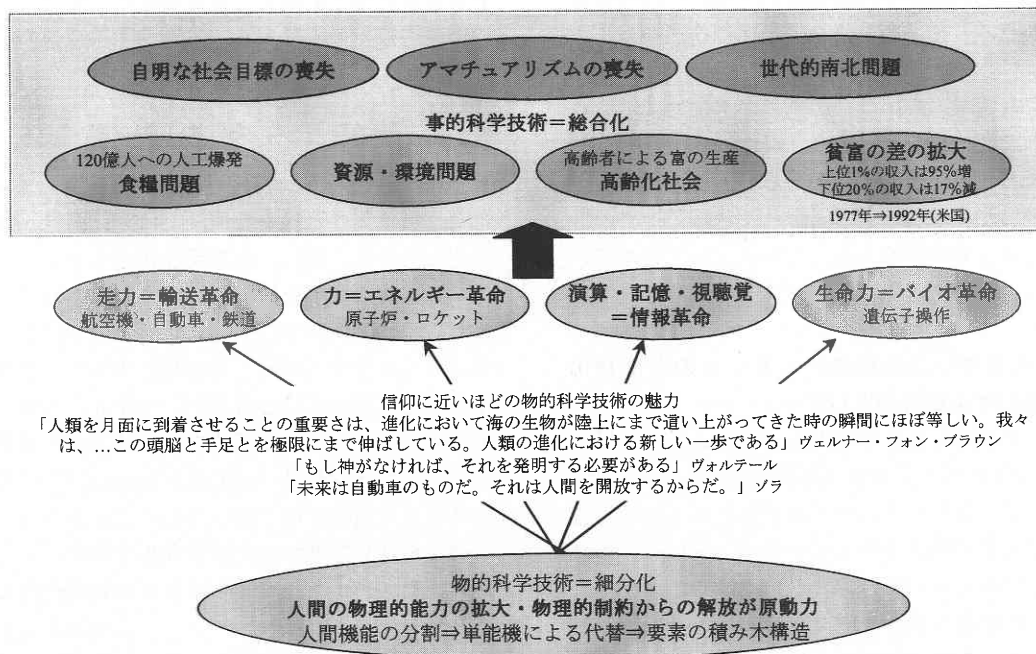


図1 今世紀が残したもの

\*東京大学生産技術研究所 第2部

人工システムが遭遇しつつある状況はさらに深刻であるように思われる。即ち、……現存の人工システムは、(画一化された大量生産に基づくという意味に加えて天才的個人等の能力には依拠しないという意味で) 没个性的であり組織的であるということもできる。科学技術が築いてきた成果を否定することやその将来に悲観的見解を述べることは筆者の意図するところではない。しかし、利便性に富んではいるがユーザーが改良を施しにくい電子化された自動車、巨大なパワーを生み出すが現代のピラミッドとも見える発電所、あるいは精巧ではあるが(卑近には実現しがたい) 優れて制御された環境においてのみ実現される先端科学技術などを前にして個人が「無力感」を感じ、個人目標を社会目標と乖離した位置に設定する(アマチュアリズムの喪失)とすれば、今世紀の科学技術の成果を代表する人工システムは、利便性や効率を高めた一方で“個人性・個性の喪失”と“個人目標と社会目標との乖離”等に遭遇していると言えよう。……技術者が発想した物が(社会目標の自明性を介して) 開発課題にほぼ直結していたこれまでの状況から、(クローンや脳死の問題を例とするまでもなく) 持続可能性においても対象物が文化的要因を介して社会目標の観点から問い直される状況に遭遇している。例えば持続可能性に関連する研究・技術開発課題が、個性豊かな社会あるいはアマチュアリズムの復興等の社会目標を実現するためのマイルストーンとしてではなく、(誤解を恐れず表現するとすれば) 現存世代が築いてきた人工システムにより大量消費された「資源の温存」や悪化させてきた「環境の保全」といった単なる対処的観点から構築されるとすれば、この課題設定は、人工システムを所与条件として育った若者世代にとっては、先進工業国の付けを開発途上国に回す国際政治における“空間的な南北問題”である側面をもつと同様に、先進工業国に限っても現存世代の付けを後世代に回す“世代的(あるいは時間的)な南北問題”と見えるように思われる。こうした図式が、持続可能性の問題の根元性を意味していると考えられる。ここでは、物理的制約要因に集約される問題を“地球資源・環境問題”と呼び、上述の観点に集約される問題を“人工環境問題”と呼んでおこう。要するに、持続可能性の問題は、(上述の意味での) 地球資源・環境問題と人工環境問題との複眼的観点から捉える必要があると考える。

……人工システムが今世紀に生み出された底流には、恐らく“人間の物理的能力の拡大・物理的制約からの開放”のための利便性・効率化・大衆化(階級の消失を含む)の追求があり、これらの追求が人類にとって自明であったが故に個人目標と社会目標との乖離が小さかったことがあったと思われる。……さらに、こうした流れの根底には、“全体の要素への還元・遡行”と“要素群の積木構造としての全体性の把握・構築”という思考方法があったと思わ

れる。……しかし、全体は要素の単純和でないことも周知の通りである。……今世紀の情報通信技術と輸送技術の進展は情報や人あるいは物の交流を飛躍的に促進し、これらは民族文化との摩擦を起こしながら、空間的国境を越えて文化・社会的国境を確かに消失させつつある。かつては国を代表した企業も、もはや多国籍企業として民族性を失い「自立」しつつある。……物理的制約要因に基づく持続可能性への危惧は、量的不確定さを伴うものの、国境が喪失し相互依存性を強める地球化時代では、各国あるいは各民族の活動を孤立系としてではなく地球規模の開放系として、……相対化された要素群が関係性や相互依存性を媒介として起こす“事”を重視する必要性を示唆している。

……以上のように、地球化時代や相互依存性は、持続可能性に関して地球資源・環境問題や人工環境問題に遭遇している物的科学技術の根底に流れる思考方法、即ち、要素と全体とを(あるいは要素間を)相対化せずそれらの関係性を重視しない思考方法の限界を示しているといえよう。ここでは、資源・環境に関するエコアナリシスやライフサイクルアセスメント(LCCO<sub>2</sub>を含む)あるいはリスクアナリシスなど(1)人工システムが直接に引き起こす“事”、および上述のような(2)社会的相互依存性や物理現象の関係性などに起因して起こる<事>に配視する科学技術を、物的科学技術に對置して“事(こと)的科学技術”と呼んでおきたい。要するに、重要課題は“物的科学技術”から“事的科学技術”への変貌」と考える。』

こうした考え方は、エネルギー資源や地球環境問題を「課題」として設定する上で極めて重要であると考えているが、事的科学技術自体についてのこれ以上の議論は他の機会に譲りたい。

## 2. エネルギー・環境問題の行方に関する政策的側面

### 2.1 京都議定書と長期エネルギー需給見通し

エネルギー・環境問題については、上述のように様々な観点からの議論が必要であるが、図2は、1997年12月のCOP3における京都議定書およびそれへの対応の内容を、また1998年6月にそれに基づき見直された長期エネルギー需給見通しの概略を示したものである。

地球温暖化防止あるいは気候変動防止については、1992年のリオ・デ・ジャネイロにおける地球サミットにおいて、地球温暖化対策に最大限努力すべく気候変動に関する国際連合枠組み条約への署名が開始され、1994年に発効した。この条約の実効性を担保し、世界各国が協調して地球温暖化防止への取組みを加速的に進めるため、1997年12月に第3回締約国会議が開催され、京都議定書が採択された。その後、1998年11月にヴェノスアイレスにて161カ国を集めて第4回締約国会議が開催され、気候変動枠組条約の実施の強化ならびに京都議定書の将来の発効へ

向けての準備などが行われた。

京都議定書におけるわが国に関する対応は、温室効果ガスについて、等価換算において92%を占める炭酸ガスを6.2%（1990年度総排出量を基準）削減する計画であり、3.7%相当の吸収源の増加と省エネルギー等による2.5%の炭酸ガス排出削減により対処することとしている。一次エネルギー構成については、石油・石炭の削減分を天然ガス・原子力等により主として補う計画である。

**2.2 長期エネルギー需給見通し**

長期エネルギー需給見通しにおいてまず気になることは、2010年においてもわが国の化石エネルギー資源依存度は75%を占めていることである。人口の増加および世界のエネルギー需要の伸びについては多くの試算があるが、そのいずれについても平均的な傾向を採用すると、核燃料サイクルが確立されず、また自然エネルギーの利用が飛躍的に普及しない場合には、化石エネルギー資源および核燃料に関する確認埋蔵量は21世紀の末を待たずに使い果たされる可能性がある<sup>1)</sup>。こうしたエネルギー資源に関する認識が正しいとすれば、長期エネルギー需給見通しにおける化石エネルギー資源への高い依存度には強い疑問を感じざるを得ない。長期エネルギー需給見通しについては、経済性を考えれば妥当な構成であるとの意見が当然あろう。しかし、在来採掘法による原油生産は2010年頃に限界に達し、原油生産量は2010年頃にピークを迎えるという<sup>2)</sup>。原油需要が急速に低下しないとすれば、先端的採掘方法がとられることになり、原油価格は再び高騰すること

が考えられる<sup>3)</sup>ことを付言しておきたい。

**2.3 京都議定書への対応**

さて、エネルギー供給面での炭酸ガス排出削減対策については、

- (1) 原子力発電所の大幅な増設：2010年度において1997年度の5割以上の増設、
- (2) 新エネルギーの加速的導入：2010年度において太陽光発電の現行の約3倍の導入、風力・廃棄物発電の導入推進、
- (3) 電力負荷平準化対策の推進：炭酸ガス排出原単位の低い夜間電力による蓄熱式空調やガス冷房の普及、電力負荷平準化推進のための技術開発ならびに電力料金制度等の一層の充実

が挙げられている。

**2.3.1 原子力発電**

まず、原子力について見てみよう。原子力発電所の建設には、立地可能性調査⇒環境影響評価⇒環境影響評価書提出⇒第一次公開ヒアリング⇒電源開発調整審議会⇒第二次公開ヒアリング⇒原子炉設置許可⇒工事計画認可といったステップがあり、特に「リスク」に関するアナリシス、アセスメントあるいはコミュニケーション等の事的科学技術の第一の側面を考える上での好例であろう。

ところで、2011年までに運転開始計画中の22基の中で工事計画認可済のものは3基、原子炉設置許可済のものが1基であり、用地未取得のものは5基もある。原子力発電所運転の停止を決定したスウェーデンにおいては、最近よ

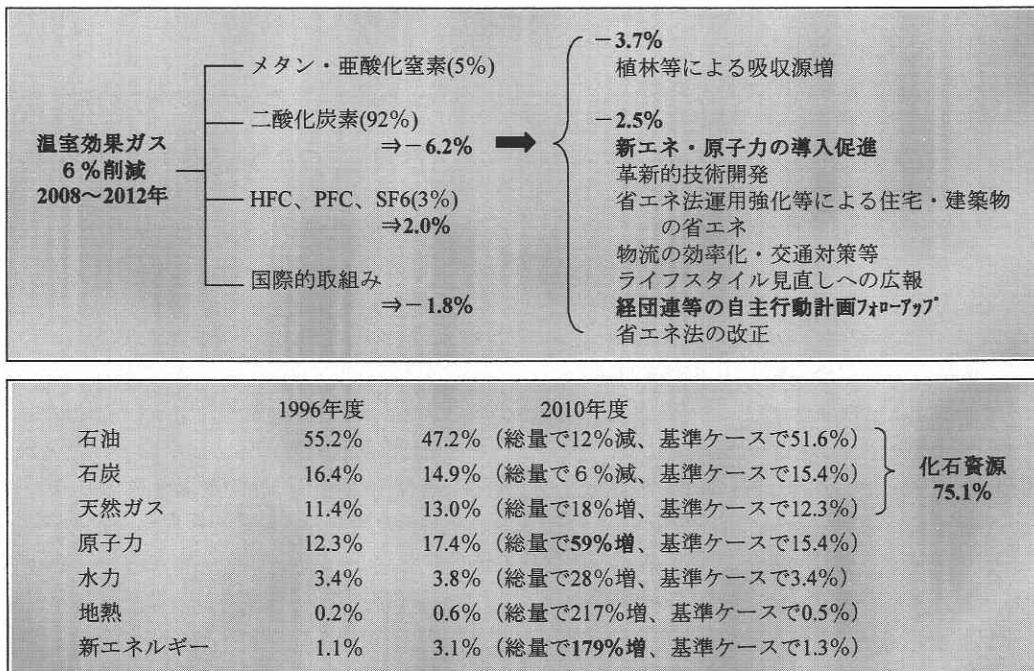


図2 京都議定書(1997.12)と長期エネルギー需給見通し(1998.6)

うやく原子力発電所1基の停止が行なわれる様子である。しかし、その場合は不足電力を隣国の火力発電所から購入することになり、これを加算するとスウェーデンは原子力発電所停止以前より顕著に多い炭酸ガスを排出することになる。こうした事情に加えて、米国においては原子力予算が復活しつつある現状を考えると、わが国における原子炉計画についても明るい見通しが有り得るが、いずれにしても22基の原子炉新・増設を2010年までに達成するには、事的科学技術の面から国民の了解を得る多大な努力が必要である。

### 2.3.2 分かりやすい単位の提案と新エネルギー

次に、いくつかの新エネルギーについて考えてみよう。“新エネルギー”とは、太陽光、風力、廃棄物、海水・河川等の温度差エネルギー、太陽熱および燃料電池等を指している。

図3は、フロー型あるいは再利用型エネルギー資源の潜在量を示したものである。図では、京都議定書において基準となっている1990年度を基準として考えるために、1990年度におけるわが国の一次エネルギー総供給量0.646 TW (0.646 × 10<sup>12</sup> W) を1単位 (JE)、同年度の総電力需要量0.0979 TW を1単位 (JP) とした。

わが国に降り注ぐ太陽エネルギーは約94 JEである。無論、太陽電池の効率や利用可能面積などの観点から、この量すべてが利用できるわけではない。NEDOの調査によれ

ば、国内太陽光発電の可能量は約0.25 JPである。2010年までの太陽光発電の導入目標はわずかに0.05 JPであるが、それにしても1997年度の導入量はその1/150であり、この目標値を達成するには150年かかることになる。

最近注目されている廃棄物発電や風力発電については、その潜在量はそれぞれ0.03 JE、0.03 JPとそれほど高いわけではないことに留意する必要がある。但し、廃棄物についてはエネルギー需要量とほぼ比例関係にあると考えられ、この意味では潜在量は多くないものの開発意義のあるエネルギー資源と言えよう。なお、新エネルギーには算入されていないようだが、バイオマスの一部である国内木材は0.11 JEと無視できない潜在量があることを付言しておきたい。

### 2.3.3 国際協力

周知のように、我が国の一次エネルギーの輸入依存度は81.5% (1993年)であり、米国の19.0%に比べるまでもなく極めて高い。このことは、一方ではわが国では「ベストミックス」などエネルギーの供給基盤の構造的安定化が指向されることを意味するが、翻って考えれば、我が国は、地球化時代に対応した相互依存性を具現する(先進国と開発途上国との間で共同して炭酸ガス排出削減を行う)クリーン開発メカニズムの一環として、国際的エネルギーネットワークの構築を指向し得る国であると言うことができよう。

**日本の一次エネルギー総供給量(1990)=5億2600万kL/年=0.646TW=1JE**

**日本の総電力需要量(1990)=8.58 × 10<sup>11</sup>kWh/年=0.0979TW=1JP**

- 世界の一次エネルギー総供給量(1990)=約10TW=約16JE
- 地球断面に降り注ぐ太陽エネルギー=172,000TW=270,000JE
  - ◇ 陸地到達太陽エネルギー=120,000JE
    - ・ 実用陸地到達太陽エネルギー=12,000JE
  - ◇ 陸地実用潜在風力=310JE
  - ◇ 高位雨水=1,050JE
    - ・ 潜在水力=3.1JE
- 日本全土に降り注ぐ太陽エネルギー=160W/m<sup>2</sup> × (37.8 × 10<sup>10</sup>m<sup>2</sup>) =93.6JE
- 国内廃棄物(1990)\*1=0.032JE
  - \*1: エネルギー消費量に比例
- 国内木材(温帯林)=6t/ha/年\*2 × 25.1Mha × 3.6Gcal/t=0.0717TW=0.11JE
  - \*2: 森林回復の時定数を40年とした場合
- 国内排熱(1990)\*1=0.66JE
- 国内太陽光発電可能量 (NEDO) =2.18 × 10<sup>11</sup>kWh/年\*3=0.25JP
  - \*3: 住宅58%、公共施設3%、産業21%、遊休地18%
- 国内風力発電可能量 (NEDO) =2.63 × 10<sup>10</sup>kWh/年\*4=0.031JP
  - \*4: 年平均風速6m/s以上(全土の約1/7)で人工密集地および標高1000m以上を除いた2.1 × 10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>に、600kW風力発電機を1km四方に4基置いた場合

図3 エネルギー資源(再生利用型エネルギー資源の潜在量)

即ち、化石資源の有限性および国内フロー型エネルギー資源の限界を加味すると、再生可能エネルギーへの移行を、相互依存性に基づく国際規模展開として早期に実現するよう努力する必要がある。国際的展開を考えれば、現在の世界のエネルギー需要を再生可能エネルギーにより賄うことも可能である。

2.3.4 産業界の自主行動計画

わが国のエネルギー消費量は全世界の約6%であるが、(先に述べたようにわが国に降り注ぐ太陽エネルギーは約94JEであるので)わが国では降り注ぐ太陽エネルギーの約1%に相当するエネルギーを消費していることになる。こうした人工発熱量が地球環境に及ぼす影響については定かでないが、将来、こうした人工発熱量を事的科学技術の立場から客観的に評価する指標が必要となると思われる。

一方、わが国ではエネルギー需要の40%(電力利用を含めて)を産業分野が占めている。そこで、次に、省エネルギーの代表例として図2中にある経団連等の産業界自主行動計画について考えてみる。

電気事業以外の産業の炭酸ガス総排出量のうち、鉄鋼業、セメント業、化学工業、石油業、紙パルプ業、自動車産業、電子産業の7業種で88%を占めている。産業界の自主行動計画に対するフローアップ委員会に提出されたデータをもとにした試算<sup>4)</sup>によると、この7業種における排出量は、0.371JC(1990年度、JCは1990年度のわが国の炭酸

ガス総排出量)から0.384JC(2010年度)へと0.013JC増大する。電気事業も同様に0.275JCから0.331JCへと0.056JC増大する。1992年度の分野別電力利用割合をもとにすると、0.056JCのうち0.029JCは民生および運輸部門における電力利用による炭酸ガス排出量増加と考えられ、したがって、電気事業を含めて2010年度には0.042JCだけ産業分野における炭酸ガス排出量が増加することになる。

以上は、多分に不確定な資料に基づく試算であるが、いずれにしても産業界の努力にもかかわらず京都議定書の履行は困難な状況に遭遇していると考えられる。

3. エネルギー・環境問題の行方に関する技術的側面

相互依存性を強める地球化時代においては京都議定書の履行は、地球環境の保全はもとより、わが国の国際的位置を高める上で重要である。また、少なくとも長期エネルギー需給見通しに記された程度の化石エネルギー資源依存度の削減は、化石資源の保存および京都議定書に履行のために不可欠である。しかし、以上のように、長期エネルギー需給見通しにある資源構成の実現にはかなりの困難が予想され、産業界における省エネルギー等による炭酸ガス排出の大幅な削減も期待できないように思われる。排出権取引なども考えられるが、エネルギー・環境問題については、2010年が終わりでではなく、2010年以降も継続する問題で

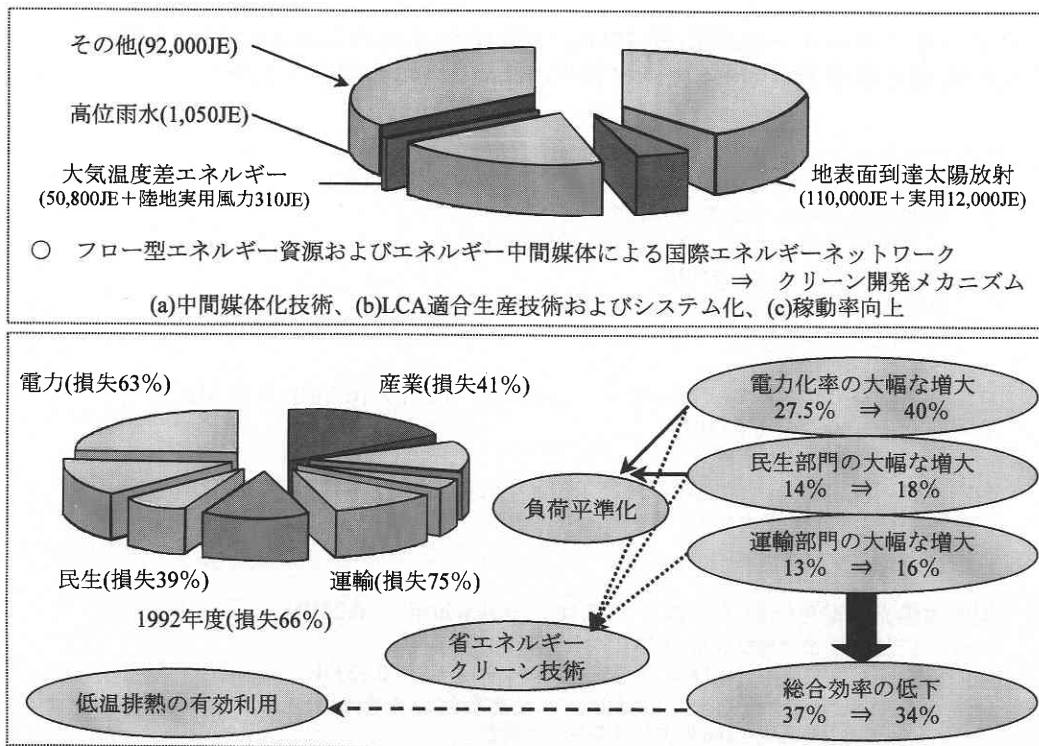


図4 サステナビリティに関するエネルギー・熱工学的重要課題

あることに留意すべきである。図4は、こうしたことを背景として、重要と思われる課題を私なりに示したものである。

### 3.1 民生・運輸部門における省エネルギー

発電所の飛躍的効率化が期待できないとすれば、図2に示した0.025 JC削減の目標を達成するには、運輸部門と民生部門との飛躍的省エネルギーを図らなければならない。

運輸部門については、周知のように輸送力に対するエネルギー原単位の小さい鉄道（発電効率を37%として553 kJ/人・km, 690 kJ/t・km）の占める割合2.5%に比べて、航空機（2390 kJ/人・km, 23700 kJ/t・km）は5%, 自動車（2340 kJ/人・km, 3970 kJ/t・km）は88%と高く、輸送システムの最適化を図るとともに、自動車の大幅な燃費改善（現在の効率は約18%）に注力すべきと考えられる。但し、運輸部門の省エネルギーについては各先進諸国とも頭を悩ませている課題であり、先進諸国では飽和に達しつつある民生部門のエネルギー消費が未だに急速な伸びを示しているわが国では、特に民生部門における省エネルギーを飛躍的に進める必要がある。

### 3.2 国際的エネルギー基地とネットワーク

既に2.3.3で述べたように、地球化時代に対応した相互依存性を具現するクリーン開発メカニズムの一環として、再生可能エネルギーに基づく国際的エネルギー基地建設と、それによる国際的エネルギーネットワークの構築に貢献すべきであると考えられる。

しかし、再生可能エネルギーを国際規模の基盤エネルギー

源とするためには、越えなければならない技術的課題がある。課題の第一は(a)空間的に希薄で時間的に間欠性を有する再生可能エネルギーの効率的利用技術の開発、第二は(b)ライフサイクルアセスメントLCAに適合するシステム化、第三は(c)経済性の確立であろう。既に開発プロジェクトが進んでいるように、(a)については水素など中間媒体化、(b)についてはシリコンなど原料の省エネルギー生産技術の開発、(c)については量産化と設備可能率の向上が重要と思われる。特に量産化については、国内需要規模では不十分であり、上述した再生可能エネルギーに基づく国際的ネットワーク構築を通じて飛躍的に需要を高めるべきであろう。また、設備稼働率の問題も大きな問題である。例えば太陽光発電による国際的中间媒体製造基地を考えた場合、現状では夜間にはシステムを停止せざるを得ないが、夜間はバイオマスなどをエネルギー源とするなどシステム稼働率の低下を防止するハイブリッド基地が必要であろう。

### 3.3 低温排熱の中間媒体化

現在のわが国におけるエネルギーの有効利用率は、約34%である。逆にいえば、0.66 JEが排熱となっている。排熱の利用形態としては、図5に示したように、ヒートカスケーディングの考え方からすれば上流側に位置する、蒸気プラントにガスタービンプラントを増設したりリパワリングがある。しかし、既設蒸気プラント+新設ガスタービンプラントの総合効率と新設複合サイクルプラントの総合効率とでは後者が高いのでリパワリングが普及し難いとの意

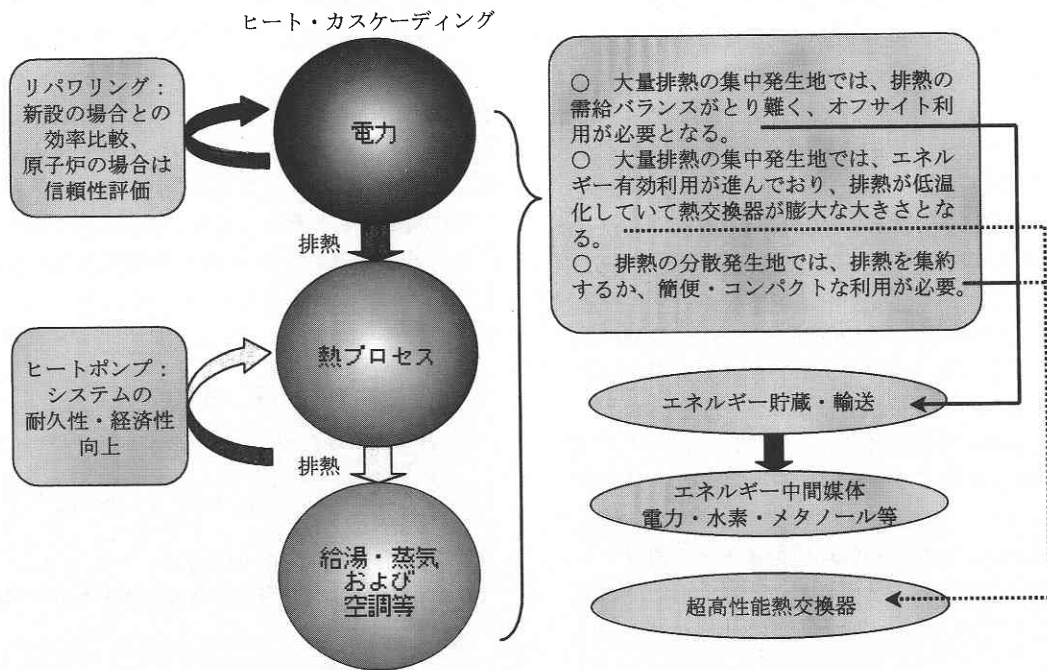


図5 ヒートカスケーディング



見もある。また、蒸気プラントとして原子力を想定すると、リパワリングがシステムに持ちこむより一層の複雑さが「安全性」への課題となるとの意見もある。リパワリングについては、こうした観点からの評価が課題であろう。

また、中流側に位置すると思われる方法として、ヒートポンプの利用による昇温がある。これは有効な方法と考えられるが、システムの複雑さと耐久性・経済性の解決が課題となろう。

下流側に属する方法として、温水や空調など低温エネルギーの利用可能な用途に振り分ける方法がある。これについては、大量排熱の集中発生地に（温度レベルのあった）集中熱需要地が隣接している場合は有効である場合が有り得るが、一般には以下のような課題がある。まず、オンサイト利用（排熱発生地での利用）を考える。大量排熱の集中発生地を考えると、それを熱として利用する需要がどの程度あるかが問題（需給バランスの問題）である。空調に利用するとしても、利用は季節的に限られ、有効利用率は必ずしも高くはないと言えよう。したがって、こうした場合には、汎用性の高い電力、水素、あるいはメタノールなどの中間媒体に低温排熱（大気温度に比較的近い200°C程度以下の排熱）を変換・貯蔵する技術開発が課題となる。排熱の中間媒体化は、当然の事ながらオフサイト利用における輸送の面でも利点がある。また、大量排熱の集中熱発生地では一般にエネルギーの有効利用が進んでおり、こうした低温排熱を作動媒体に熱交換して熱利用するためには、膨大な面積の熱交換器が必要となり、空間的にも経済的にも普及は限定される問題がある。これは、特に排熱が空気などの気体エネルギーとして排出される場合には、大きな問題となる。したがって、排熱を直接利用する方法や体積効率の高い直接接触熱交換器などを積極的に利用したシステム開発が課題となる。少量排熱の分散発生地においては、排熱の輸送・集約による効率的オフサイト利用や、簡便かつコンパクト機器によるオンサイト利用を図る必要があり、ここで述べた中間媒体化はこの場合にも有効である。

### 3.4 ソフトエンジン等のシンプルマシン

ヒートカスケディングにおける上記の上流、中流および下流における技術課題は、総排熱量の大きさ（0.66 JE）から見ればいずれも重要であるが、ここでは最も開発の遅れていると考えられる低温排熱の中間媒体化を考えよう。

筆者は、低温排熱の中間媒体化においては、極言すれば“転換効率”の概念を捨てるべきであると考えている。思想的側面で述べたように、今世紀の発展を支えた物的科学技術は“人間の物理的能力の拡大や物理的拘束からの開放”といった社会目標の自明性に支えられながら、効率的単能機とその集合体としての人工システムを構築してきた（図1

参照）。しかし、低温排熱の中間媒体化に際して最も汎用性の高い電力への転換を考えるとすると、カルノー効率は、周知のように排熱温度が200°Cの場合で36.6%、100°Cの場合で19.6%である。メタノールから水素への転換に廃熱を利用するとしても、メタンからメタノールへの転換効率を考慮すると、高転換効率の実現には多くの課題がある。ここでは、中間媒体として汎用性の高い電力に焦点を当てよう。

高転換効率の概念を捨てるとすれば、まず第一の課題は、%カルノーを高くすることが不可欠と思われる。例えば、通常の内燃機関においては、発熱量の10%程度を機械損失が占めている。機械損失自体は熱源温度の関数ではないと考えられるので、同じ運転条件では熱源温度が低いほど機械損失の占める割合は高くなる。例えば、図示熱効率が40%、機械損失が10%の通常内燃機関を考えると、図示熱効率の25%が機械損失に相当することになるが、低温排熱を熱源とした20%程度の図示熱効率機関では半分が機械損失に費やされることになる。こうした機械損失は、慣性力に抗して運転する過渡状態ではさらに割合が大きくなると考えられる。

したがって、%カルノーを向上させるためには、固体摺動部の摩擦から開放されたエネルギー変換機が必要となる。ここでは、固体摺動部を可能な限り排除した、こうした変換機を“ソフトエンジン”と呼んでおく。ソフトエンジンの原理としては、熱電現象、熱・機械効果、熱音響効果、水素急増現象などが考えられる。

低温排熱の電力化に際して、高転換効率の概念を捨てるとすれば、必然的に低コスト、低LCCO<sub>2</sub>である必要がある。これらの要求は、即ち構造が単純であるソフトエンジンすなわち“シンプルマシン”を志向することとなる。筆者は、構造単純化を施したシンプルマシンの考え方は、高信頼性に着目した固有安全炉、低振動・騒音および高信頼性に着目したパルス管冷凍機、低摩擦に着目したMEMSなどに共通すると考えており、さらに今世紀の科学技術にアマチュアリズムを取り戻す方向性を有すると思っている。

(1999年12月8日受理)

### 参考文献

- 1) 片山優久雄：1990，エネルギー総合工学，Vol.13，No.3，p.12.
- 2) C.J.キャンベル・J.H.ローレル：1998.6，日経サイエンス，p.20.
- 3) 中島林彦：1998.6，日経サイエンス，p.43.
- 4) 西尾茂文：日本機械学会RC166研究分科会1999.8.6分科会資料.