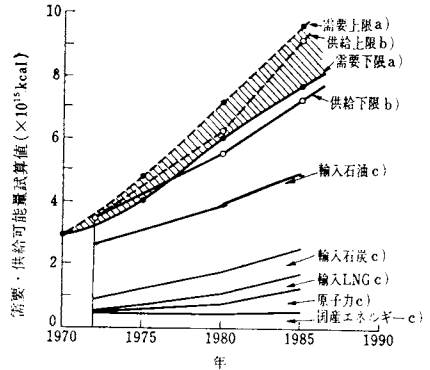


エネルギー問題と熱現象

小沢 丈夫*

1. はじめに

1973年末の中東戦争の際の石油戦略による石油通商停止事件は、エネルギー問題をにわかにクローズアップさせ、わが国のサンシャイン計画も米国のエネルギー自立計画も急に脚光を浴びるようになった。しかし、両計画ともそれ以前より立案策定されていたものであることは、あまり知られていない。もともとエネルギー資源がほとんどないわが国では、石油不足はきわめて深刻なものがあり、1974年夏に発表された総合エネルギー調査会総合部会の中間とりまとめは、¹⁾ 図1に示すような予測を提示している。この下限値は、相当の政策努力と民間の努力を前提として達成されるものであり、上限値は、その実現のために、今後官民のあらゆる努力の傾注とある程度の楽観的条件が整った場合に、はじめてあり得る量とされている。一方、ここ10年間のわが国の一次エネルギーの消費の伸び率とGNP成長率の比、エネルギー消費のGNP弾性値は、1.10の値を示しているから、省エネルギーの努力が実り、産業構造の転換ができたとしても、なお経済的にもかなりきびしいものであることがわかる。¹⁾



- a) 1971年の需要予測（文献2）
- b) 1974年の試算（文献1）
- c) 供給下限に対する値

図1 日本のエネルギー需要予測および供給可能量の試算

わが国のエネルギー供給・消費のフローチャートは、図2のようなものであり、³⁾ 米国などと比べ石油への依存度がきわめて高く、75%に達し、輸入への依存度も86%であり、きわめて高い。そこで、アメリカのエネルギー

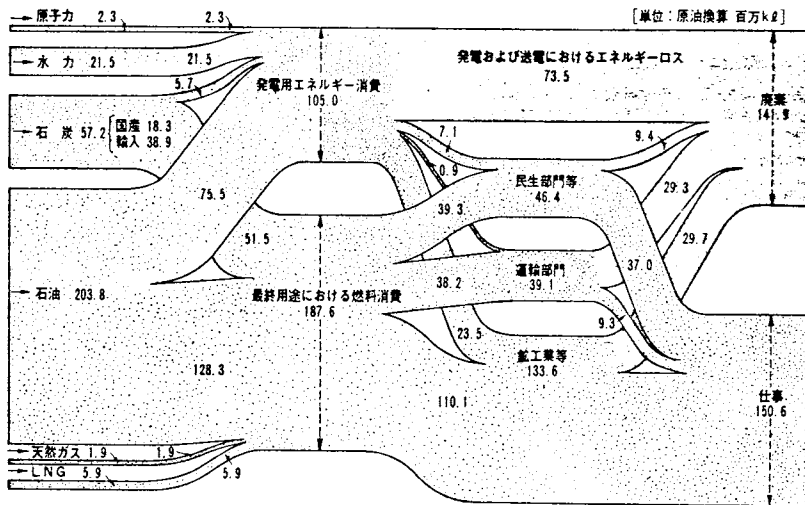


図2 わが国のエネルギーの供給・消費フローチャート

* 電子技術総合研究所：東京都田無市向台町
Takeo Ozawa: Electrotechnical Laboratory

自立計画が、国内炭の開発利用を中心として、石油頁岩やオイルサンドの開発利用を含めて、エネルギーの輸入をなくそうとするものであるのに対し、わが国のサンシャイン計画が太陽エネルギー利用を中心とする長期的なものとなるのも、このような事情を反映している。「女心と秋の空」と言われる程、あてにならない太陽エネルギーをあてにしなければならないわけである。

太陽エネルギー利用は、アメリカでもエネルギー自立計画に取り上げられているが、1955年当時もエネルギー問題の一つの大きな課題であった。当時も、石油資源の枯渇の心配から、核分裂をつなぎとし、太陽エネルギーを究極のエネルギー資源とする考え方が出されていた。しかし、石油の確認可採埋蔵量の増加、高速増殖炉や核融合の可能性が、太陽エネルギー利用の必要を遠のかせていた。

この意味で、新エネルギー技術の研究開発も、水素エネルギーシステムを除いては、新しいテーマではないが、個々の要素技術の中には新しいものも多く含まれている。ここでは、これらの中から、当学会の分野と関連深い熱現象を利用するものを取り上げ、話題を提供しよう。熱機関は、エネルギー変換方式としてもっとも古いものであり、熱現象を利用したものであるが、熱現象の新しい応用のみを取り上げた。

2. 熱エネルギー

人類にとって有用なさまざまなエネルギーも、利用された後は、究極には熱エネルギーとなる。また、熱エネルギーは、これを他の形態に変換しようとするとき、もっとも変換しにくいエネルギーの一つである。この意味で熱エネルギーは、われわれにとって最も利用しにくい質の低いエネルギーであり、逆に、電気エネルギーは他の形態のエネルギーに効率よく変換し易く、もっとも質の高いエネルギーと考えられている。しかし、電気エネルギーも蓄積できない欠点があり、電力技術は生産と消費が同時であるという制約の中で、経済性と信頼性を維持し、良質の電力を供給するためのものである。

熱エネルギーも、図3のような比較をしてみると、使い方によっては有用なエネルギーであることが理解できる。すなわち、この図で明らかなように、核エネルギーは相互変換ができないから、相互変換が可能なエネルギーの中では、熱エネルギーは化学エネルギーについてコンパクトなエネルギーである。このことを如実に示す一つの例として、海洋の熱エネルギーを挙げることができる。

海洋の熱エネルギーは、太陽エネルギーの一つのリザーバーとみなすことができるが、熱帯の30℃前後の表層水と5～6℃の深海水との温度差のエネルギーは、10

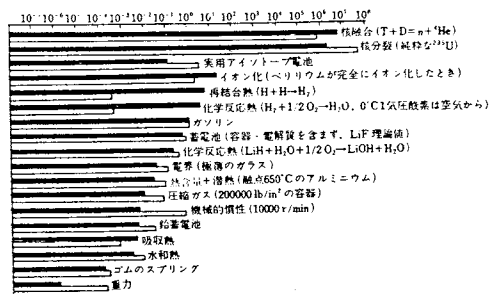


図3 単位重量および単位体積あたりのエネルギー密度の比較。ガソリンを1とした。上は重量あたりエネルギー密度、下は体積あたりのエネルギー密度である。

kmの落差に対応する。熱交換により25℃と15℃の温度差とし、これをカルノーサイクルで変換したとしても、効率は3%であるが、120mの落差の滝に等しい。この温度差を熱機関によって取り出すことは、1881年D'Arsonvalによって提案され、1926年仏のClaudeとBoucherotによって、低圧水蒸気を作業流体としたモデル実験が成功しており、現在でもエネルギー自立計画で取り上げられ、アンモニアやプロパンを作業流体として同様な試みが続けられているが、⁴⁾この大きさをみれば、その重要性が理解できよう。試算によれば、緯度で南北20度の海洋の全面積の温度を1℃下げることによって得られる電力は、600億kWに達し、これは全人類が米国民並みに電力を使用しても、その需要をまかない得る量であるという。このような低温度差の利用は、この他にも、天然熱水系や高温岩体で得られる約80℃の熱水利用や、鉄鋼の分塊・圧延工程からの排熱回収でも重要である。この低温度差利用熱機関は、アンモニア・プロパン・フロンなどを作業流体とするクローズドサイクルとなるので、熱交換器の熱伝達材料が一つの重要な課題である。

3. 熱エネルギーの蓄積

太陽エネルギーもまた、変換しにくい質の低いエネルギーである。その第一の原因は、波長分布が広いことである。光のエネルギーが他のエネルギーに変換されるのは、量子的過程によるので、この波長分布は変換効率を著しくさげる。たとえば、シリコン太陽電池を用いて発電を行なう場合、その禁制帯幅に対応する波長の光量子は、100%変換される可能性があるが、それより長い波長の光は全く変換されず、短い波長の光も、その光量子のエネルギーと禁制帯幅のエネルギーとの差は、電気に変換されない。このためだけで56%変換効率が低下する。そこで、波長分布に合った吸収特性をもつ選択吸収

膜を用いて熱エネルギーに変換して利用する方式が試みられている。この太陽熱発電では、太陽光と選択吸収膜で作業流体を数百度に加熱し、ここからの熱放射を、図4に示したように、太陽光の波長の光を透過し、数百度の物体から放射される赤外光を反射する選択透過反射膜で防ぐ方式がとられる。

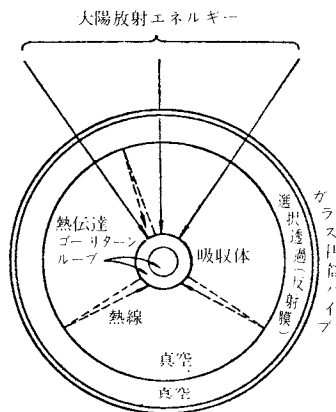


図4 太陽エネルギー吸収カプセルの断面図

この他の太陽エネルギーの問題点には、希薄であることと間欠的であることが挙げられる。地上で太陽光に垂直な平面をとったとき、晴天でも約 1 kW/m^2 のエネルギーであり、これも夜間や雨天曇天には得られず、季節変動が大きい。このあてにならない太陽エネルギーをあてにするためには、何らかの蓄積手段をもたなければならない。季節変動を克服する長期的な蓄積としては、太陽エネルギーを利用した発電で水を電解し、水素として蓄積しようという提案もある。しかし、短期的な蓄積で、かつ、エネルギーの最終使用形態が熱である場合には、変換による損失がないので、熱エネルギーとして蓄積した方が有利である。

このような目的で熱エネルギーを蓄積するために、相転移の潜熱の利用と定常熱容量の利用とが提案されてい

る。後者は、碎石などを用いた夜間余剰電力利用の蓄熱による暖房として一部実用化されており、夜間余剰電力による温水器もその一種とみなすことができよう。潜熱の利用は、太陽熱発電への応用が検討されている。この場合、前記のように数百度の熱エネルギーが利用されるから、この程度の温度域における潜熱の大きい相転移、とくに融解が利用される。この観点から878種の混合物の中からDTAを使って選ばれた共晶混合物の蓄熱材料を、表1に挙げた。⁵⁾エネルギー技術における重要な課題は、環境保全、信頼性、経済性である。この意味で、表には価格を示した。この表に挙げたもの以外にも、経済性が良く、環境を汚染せず、資源も豊富で、腐食性や劣化や経時変化のない蓄熱材料があると思われるが、読者諸氏の検討を期待したい。イオン結晶の融点については、法則性を見出そうとする試みがあるが、⁶⁾融点と融解熱について法則性が見出され、それが蓄熱材料選択の一つの指導原理となれば、得るところは大きいであろう。

太陽熱利用の冷暖房では、より低い温度での蓄熱材料が必要であり、ここでは、表2に報告されているような転移の潜熱を利用するもの他に、表3に示した固体や水の定常熱容量の利用も検討されている。⁷⁾前者は凝固により空隙を生じ、熱伝導が悪くなり、結果的に蓄熱容量が小さくなる場合もあり、後者では蓄熱容量が小さいことが欠陥であるが、経済的にはこちらの方がすぐれている。⁷⁾このような蓄熱の話で、読者の中には、湯たんばや熱いこんにゃくの湿布を思い起こされる人もあろう。

4. 熱エネルギーの輸送

誘電体などでの熱伝導が、フォノンの伝播によるのに対し、金属などの導体では、電子が運動エネルギーを運ぶことにより熱伝導が行なわれる。電子の代りに気体分子を熱エネルギーの運び屋とし、蒸発の潜熱を運ばせることにより、きわめて高い熱伝達を実現させることができる。これが、ヒートパイプとして最近注目されている

表1 固体蓄熱材料の例(I)

共融混合物	成分比 (モル比)	価格 円 kg^{-1}	融点(実測値) °C	密度 g cm^{-3}	融解熱 kJ mol^{-1}	コスト 円 kJ^{-1}
KCl - KNO_3	6 - 94	130	320	1.78	14.9	0.87
NaCl - NaNO_3	6.5 - 93.5	75	297	1.93	14.3	0.44
CaCl_2 - LiNO_3	40.3 - 59.7	838	268	1.87	16.3	4.42
KCl - LiCl - PbCl_2	39.2 - 33.6 - 27.1	675	325	2.1	17.1	4.69
BaCl_2 - KCl - LiCl	5.43 - 40.92 - 53.65	765	337	1.6	15.8	3.12
KBr - NaBr - PbBr_2	7.9 - 16.7 - 75.4	2340	309	3.87	20.0	35.5
KBr - LiCl - PbBr_2	45.4 - 31.9 - 22.7	1670	323	2.4	16.6	15.2
KF - NaF - KNO_3	7 - 2.5 - 90.5	143	298	1.77	14.3	0.97
NaCl - NaNO_3 - Na_2SO_4	8.4 - 86.3 - 5.3	75	287	1.88	14.4	0.45
KBr - KCl - LiBr - LiCl	21.3 - 37.7 - 34.8 - 6.1	900	357	1.95	15.8	4.92

表 2 潜熱利用蓄熱材料の例

蓄熱材料	分子式	転移点 ℃	潜 熱 kJ kg ⁻¹	価 格 円 kg ⁻¹	コスト 円 kJ ⁻¹
塩化カルシウム	CaCl ₂ ・6H ₂ O	29~39	174	30	0.17
炭酸カルシウム	CaCO ₃ ・10H ₂ O	31~36	268	20	0.07
磷酸水素二ナトリウム	Na ₂ HPO ₄ ・12H ₂ O	36~48	265	150	0.57
硝酸カルシウム	Ca(NO ₃) ₂ ・4H ₂ O	40~42	209	77	0.37
硝酸ナトリウム	Na ₂ SO ₄ ・10H ₂ O	31~32	242	26	0.11
チオ硫酸ナトリウム	Na ₂ S ₂ O ₃ ・5H ₂ O	49~52	209	98	0.47

表 3 固体蓄熱材料の例(II)

蓄熱材料	比熱容量 kJ K ⁻¹ kg ⁻¹	比重 kg m ⁻³	容積比熱容量 kJ K ⁻¹ m ⁻³	熱伝導率 kJ K ⁻¹ m ⁻¹ h ⁻¹	価格 円 m ⁻³	コスト 円 kJ ⁻¹ K ⁻¹
砂 利	0.8	1850	1547	1.42	2000	1.4
砂	0.8	1700	1421	1.17	2000	1.5
碎石(花崗岩)	0.8	2810	2340			
コンクリート	0.8	2200	1839	5.85	11000	6.3
ブロック						
れんが	0.8	1600	1338	1.96	13900	10.9

ものの原理であり、ナトリウムを作動流体(運び屋)とする初期のヒートパイプでも、 $10^5 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 以上の見かけの熱伝導率が得られ、銀の1000倍に達した。ヒートパイプの構造は、図5に示したようなものである。左の蒸発部が加熱されると、作動流体は蒸発の潜熱を得て蒸発し、この部分の蒸気圧が上がる。このため、蒸気は右側へ流れ、ここで冷やされ、蒸発の潜熱を放出して凝縮する。この液体は、液圧とウィックの毛管作用により蒸発部へもどり、再び潜熱の運び屋となる。この蒸発と凝縮との温度差はわづかであるから、非常に小さい温度差で、大きな熱エネルギーを輸送することができ、見かけの熱伝導率は大きくなる。⁸⁾

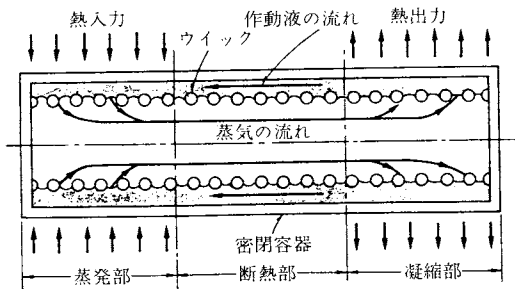


図 5 ヒートパイプの構造と原理

ヒートパイプ内に作動温度で凝縮しない第二の気体があると、この非凝縮性気体は、図5の右端に圧縮される。熱流量が増すと、非凝縮性気体が膨張して凝縮面積が減少し、熱伝導率が低下する。逆に熱流量が減少すると、凝縮面積が増して、熱伝達がよくなる。このようなヒートパイプは、可変コンダクタンスヒートパイプと呼ばれる。さらに、右端に非凝縮性気体の気体だめを設ければ、

凝縮部はほぼ一定温度に保たれるようになる。このような工夫をこらしたものが、定温ヒートパイプと呼ばれる。

ヒートパイプは、1942年Gauglerが発明したものであるが、1964年Grover^{3,9)}の実用化実験により多くの分野に応用されるようになり、¹⁰⁾熱電子発電、熱電発電、宇宙船の温度制御、電子計算機を初め各種の電子装置の冷却、¹¹⁾に使われる他、太陽エネルギー利用の面でも多くの利用が検討されている。

作動流体は、蒸気圧、蒸発熱、表面張力、ウィックとのぬれ、粘性係数などを考慮して選ばれる。-150℃以下では、窒素、酸素、水素が、

-100℃から250℃では、水、アンモニア、メタノール、エタノール、四塩化炭素、エチレン、メタン、アセトン、フロンが、300℃から2000℃の間では、水銀、ナトリウム、カリウム、カドミウム、銀、亜鉛などの金属が使われている。ウィックは、管に溝を切ってもよいが、金属の網、ガラスファイバー、織物などが使われる。

5. 熱による冷却

ガス冷蔵庫では、熱による冷却が行なわれているが、太陽熱利用の冷房の中に、新しい冷凍のやり方があるので、最後に、これを紹介しよう。図6はソ連南部のタクメニア地方の炎暑乾燥地で Baum らにより試みられている方式の原理を示したものである。屋根の上を塩化リチウムの稀薄水溶液を流して太陽熱により濃縮し、この濃厚溶液を冷却して水槽と同じ容器内におけば、水槽から濃厚溶液側へ水蒸気が蒸発移行し、水槽の水は蒸発熱を奪われて冷却される。屋根での蒸発量に相当する分の水が、この水槽に補給される。⁷⁾

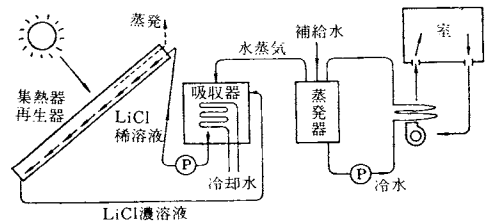


図 6 Baum らの共同住宅の冷房系統

これをクロズドサイクルとしたものが、図7の吸収式冷凍機である。太陽熱で左下の臭化リチウム水溶液が濃縮され、蒸発した水蒸気は凝縮器で凝縮される。濃厚

臭化リチウム溶液は、左上の吸収器に送られる。この吸収器と右上の蒸発器は同一容器内におかれているから、蒸発器の水は蒸発熱を奪って水蒸気となり、吸接管内の濃厚水溶液を稀釈する。このサイクルが循環され、冷房が行なわれる。⁷⁾これはいわば庭に打ち水の現代版と言うことができよう。

6. おわりに

以上、主に相転移を利用した要素技術を中心に記述してきたが、われわれが利用したエネルギーが最終的には熱エネルギーになるということは、熱エネルギーへの変換がもっとも容易に行なえることを示しているといえよう。これは、太陽電池による太陽光発電と選択吸収膜を用いた太陽熱発電との比較でも明瞭である。そこで熱エネルギーを利用したエネルギー技術が、別の角度から見直されよう。ここに示したいくつかの例も、その例とみなすこともできる。高温から冷熱源までの温度差を巧みに使いこなし、全体の効率を向上するために、今後このような要素技術が考案されるものと期待される。

参考文献

- 1) 通商産業省資源エネルギー庁, 総合エネルギー調査会総合部会中間とりまとめ(1974年7月); 通産ジャーナル, 7 [5], 58(1974年8月)
- 2) 向坂正男, サイエンス 1 [3], 167(1971)
- 3) 通商産業省工業技術院技術調査課, 省エネルギー技術に関する調査報告(1974年7月)
- 4) 本間琢也, 電学会誌, 93, 783(1973)
- 5) 通商産業省工業技術院編, 新エネルギー技術研究開発計画(サンシャイン計画), 日本産業技術振興協会

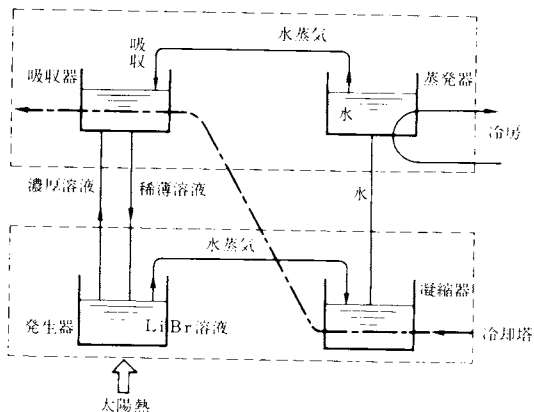


図7 吸収式冷凍機の原理

(1974): "Research Applied to Solar-Thermal Power System". Report No. NSF/RANN/SE/GI-34871/PR/72/4.

- 6) たとえば, 館野淳, 化学の領域 27 [6], 533(1973)
- 7) 木村建一, 太陽エネルギー利用技術(野口哲男編) P. 75, フジテクノシステム(1974)
- 8) Chang-Lin Tien "Heat Pipes, AIAA Selected Reprint Series XVI" Am. Inst. Aeronautics and Astronautics (1973)
- 9) G.M. Grover, T. P. Cotter, G.F. Erickson, J. Appl. Phys. 35, 1990 (1964)
- 10) 山西哲夫, 電学会誌 94, 721(1974)
- 11) 日経エレクトロニクス No. 96, 50(1974年12月2日)

論文紹介

不定比化合物の熱測定

不定比化合物の熱容量は、不定比組成の違いにかかわらず1原子当りに換算すると、低温では若干違いがあるが高温ではほぼ等しくなる (VO_{1-x} , Na_xWO_3)。このことは、不定比化合物の熱容量が高温ではKopp-Neumannの法則に従うことを意味している。しかし、不定比化合物に相転移がある場合には、その相転移熱容量が不定比組成によって大きく変わることが最近報告されている。従って、転移エンタルピーまたはエントロピーを組成の関数として求めることによって転移機構を議論することができる。

Grønvdal³⁾は、 Ni_{1-x}Se の熱容量を断熱型熱量計を用いて 298 から 1050K までの温度範囲で組成を変えて測定し、 λ 型熱容量異常の温度、大きさが組成と共に大きく変わることを見出した。 Ni_{1-x}Se の構造は NiAs 型で、欠陥構造は Ni 空格子であることが知られている。従って、 λ 型の熱容量異常は格子欠陥の規則-不規則転移として説明された。即ち、 $\text{Ni}_{19/20}\text{Se}$ で λ 型熱容量異常が見られないのは欠陥濃度が低いために規則化過程が起りにくくなるためであると説明された。 $\text{Ni}_{7/8}\text{Se}$ では転移点約 500K で、転移エンタルピー $\Delta S_{17} = 1.8\text{J K}^{-1}$ per mole of $\text{Ni}_{7/8}\text{Se}$ を得たが、これは、欠陥層が一層おきに規則化過程が起るとした計算値:

$$\Delta S = -\frac{R}{2} \left(\frac{1}{4} \ln \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \ln \frac{3}{4} \right) = 2.34\text{J K}^{-1} \text{ per mole of } \text{Ni}_{7/8}\text{Se}$$

とほぼ一致する。 $\text{Ni}_{4/5}\text{Se}$ では、590 および 995