

「物質熱エネルギーから有効仕事を取り出す新規熱サイクル —新規熱サイクルを用いた複合発電システムについて—」

“A New Heat-Cycle Which has Ability of Producing Exergy from Room Temperature Material – Co-generation system applying the new heat cycle”

前田 豊*

Yutaka Maeda

(原稿受付日 2012年3月14日, 受理日 2012年10月12日)

The ways of using solar energy for human being are to use solar cells for direct solar ray, or to warm up object by using radiant heat of the sun. However, most of the solar energy which is showered upon the earth is used for the heat-reserve in seawater and the earth. There seems not to have existed in the past that the ways of thinking to utilize heat energy near the normal temperature as the effective work, exergy, which was directly stored up in the earth.

This paper presents a new energy source, which is got from room temperature heat source. There exist a new heat cycle that creates exergy from room temperature materials. This is composed of a unique heat cycle of CO₂ gas as a heat medium. The mechanism is shown through exergy analysis as to the heat cycle which creates valid work. Proper systems are discussed on generation of electricity, and warm or cold heat, using this cycle.

1. まえがき

太陽エネルギーを人間生活に有効活用する方法は、従来、太陽直射光を用いて、太陽電池で発電し、電気エネルギーを得る方法と、太陽の輻射熱を用いて物体を暖めて熱エネルギーを利用する方法が主流であった。

しかし、地球に降り注ぐ太陽エネルギーの大部分は、海水や大地の加熱に利用されているのが実状である。このような熱エネルギーは、気象現象の源泉となり、付随して生ずる雨水からの水力や、風力がクリーンエネルギーとして発電に利用されるものの、地球に直接蓄えられた常温付近の熱エネルギーを有効仕事として活用するという考え方は、従来存在しなかったと思われる。

殆どが無為に打ち捨てられている地球に蓄えられた熱エネルギーを有効活用する方法として、炭酸ガスを熱媒とした新規な熱サイクルが存在することを第21回エネルギー資源学会等において報告¹⁻³⁾した。本報告では、この熱サイクルを用いた温冷熱を併用する複合発電システムにつき報告する。また、本システム採用によるエネルギー問題解決への寄与効果について論及する。

2. 物質熱エネルギーから有効仕事を取り出す新規熱サイクルの概要

2.1 熱エネルギーから有効仕事を取り出す指導原理

熱エネルギーから有効仕事を取り出すシステムは、熱機関である。熱機関により発電システムを構成する場合、熱→仕事のエネルギー変換効率が重要な指標となる。

その指導原理の代表は、従来、カルノーサイクルからの類推にあるとされてきた。しかし、カルノーの主張は、温度一定の2つの熱源の間で動く熱機関に限定して、非可逆機関に比べて、可逆機関の性能が高いことを示したに過ぎない。

越後は、新たな指導原理は、カルノーサイクルの呪縛から解放されたところにあるとし、エクセルギー（有効仕事エネルギー）を指標として、新たな高効率、超効率の熱サイクルの可能性について提言されている⁴⁾。

即ち、加熱源の種類や加熱方法を変えれば、熱機関の仕事効率は、カルノーの制約を受けることはない。

例えば、燃焼によって実現できる体積一定あるいは圧力一定の加熱源・加熱方法はカルノー効率の制限を受けないばかりか、これを上回るサイクルも既に提案されている。

例えばミラーサイクル⁵⁾、その他、従来の高効率熱サイクル「ランキンサイクル」を上回るサイクルとして、カーリーナサイクルが提案され⁶⁾、また、熱効率を高度に発揮できるスーパーヒートポンプシステムなどが出現してきた⁷⁾。

* 前田技術事務所 前田 豊
〒257-0002 神奈川県秦野市鶴巻南 1-26-14
E-mail: maeda_yutaka@nifty.ne.jp

第21回エネルギー資源学会研究発表講演会(2002.6.12~13)(19-1)、及び、第9回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(2003.1.30-31)(19-4)の内容をもとに作成されたもの。

2.2. 常温熱エネルギーからエクセルギーを取り出すメカニズム

太陽エネルギーは、昼間地球全土および海洋に降り注ぎ、熱エネルギーとして蓄えられている。この熱エネルギーは夜間に輻射放熱されたり、熱伝導によって拡散し、極端な温度上昇が起こらないように調節されているかにみえる。

しかし、その調節機能が崩れたとき、例えば、海洋の水温がある一定の限度を越すと、台風を発生させることがある。

人間の活動に大きな影響を与える台風の活動メカニズムは、次のように説明される。

1. 太陽熱による物質系の加熱 (加熱、熱移動)
2. 水・空気系の気化と上昇気流の発生 (蒸発、風の仕事)
3. 断熱膨張による冷却 (膨張、冷却)
4. 水蒸気の凝縮・潜熱放出 (凝縮、発熱)
5. 降雨 (液化、水流の仕事)
6. 坦体大気の循環 1.へ

即ち、水・空気を混合媒体とした、1) 熱移動、2) 気化、3) 凝縮・発熱、4) 冷却、5) ⇔ 1) 加熱・蒸発の熱サイクルシステムであって、これは空調機などのヒートポンプの逆サイクル(熱機関)と同一であると考えられる。

つまり、台風は、太陽熱エネルギーを利用した大自然の特ダのヒートポンプ逆サイクルシステムであって、媒体の循環により発生したエクセルギーが、風力や水力の電気エネルギーとして人間に活用されているのである。

因みに、1 気圧 30°C の飽和水蒸気 (約 4Wt%) を含む大気が、上昇気流に乗って、0°C、0.5 気圧となり、途中で水蒸気が液化分離すると仮定すると、流れ系の熱力学の法則により、最大有効仕事 E は、 $E=H-H_0-T_0(S-S_0)$ の式から、(注 $H=100\text{kJ/kg}\cdot\text{DA}$, $H_0=9.7\text{kJ/kg}\cdot\text{DA}$, $T=298\text{K}$, $S=0.238\text{kg}\cdot\text{DA}$, $S_0=0$ を代入して) 湿潤大気 1m³ 当たり、約 20kJ/m³ のエクセルギー変化を生じることが分かる。

そして、例えば、1 平方 km の面積で秒速 10m の上昇気流の目をもつ台風の場合、10⁷m³/sec の飽和水蒸気の熱機関として働き、2×10⁸KW、つまり、100 万 KW の発電所 200 基を稼働させるのに匹敵する最大有効仕事能力をもっている。

この巨大ヒートポンプシステムに相当するエクセルギー発生システムを、人間がコントロールできる規模で実用化することができれば、地球に貯蔵された莫大な太陽熱エネルギーを昼夜に関係なく、常温付近で人間活動に有効な電気エネルギーや温・冷熱エネルギーに変えることができ、このことは、地球温暖化を抑制し、化石燃料や原子力エネルギーにつきまとう問題を回避する技術に繋がると言える。

2.3. 物質熱エネルギーから有効仕事を取り出す新熱サイクル (TM サイクルと仮称する)

本報で提案する熱サイクルは、CO₂ など、高圧熱媒体飽和蒸気を体積膨張させたとき、冷却され気液共存系となって膨張する媒体を用いるものであって、気液分離後、両状態の熱媒を、環境を形成する常温物質の熱で加温してエネルギー供給したのち、初期条件の高圧飽和蒸気に戻す熱サイクルである。

すなわち、図 1 に示すような発電系と温・冷熱供給を兼ねた装置システムを用いる熱サイクルにおいては、圧縮動力を上回る総合膨張エクセルギーが得られる条件があることを表 1 に示す¹⁾。

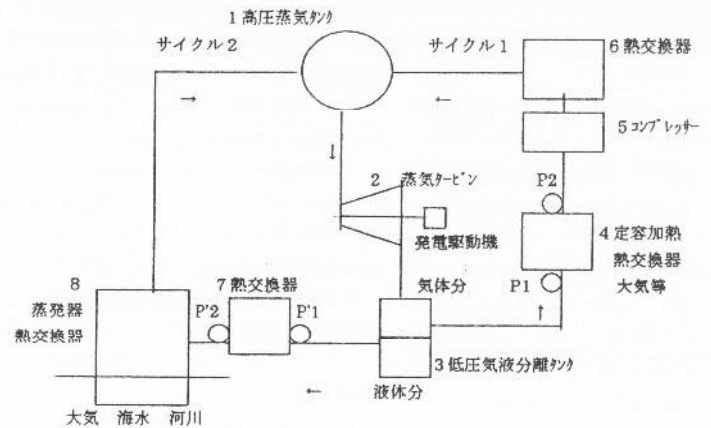


図 1 TM 熱サイクルと複合発電システム概念図

尚、本サイクルは、図 1 右側気体サイクル 1 (ブレイトンサイクル、冷凍サイクル) と左側サイクル 2 (液化を含むランキンサイクル) を統合させた形態で、膨張タービン排出温度は、媒体の断熱膨張率でコントロールされ、タービン入口の単位時間当たりの媒体放出容量と排気容量 ($P_1 + P'_1$) の比率でほぼ決まることになる。

CO₂ 熱媒の該熱サイクルは、モリエル ($i-p$) 線図上に示され、図 2 の通りとなる。また温度-エントロピー ($T-S$) 線図は図 3 に示す通りである。

工程の詳細は、以下の通りである。

初期条件は、常温高圧飽和蒸気である。体積膨張する工程で、タービンなどの出力装置と連結させて、外部運動エネルギーや電気エネルギーとして取り出しながら冷却する。

次いで、媒体の気液を分離する。その後、気体系は常温物質熱により定積加熱し、次いで所定の高圧ガスとなるまでの圧縮を行い、圧縮昇温熱を有効温熱として利用し、初期の常温高圧蒸気に戻すサイクル 1 を採る。

常温物質熱による定積加熱工程は、冷熱の利用につながる可能性がある。

液体系は常温物質熱による加熱 (冷熱利用) により気化させ、初期の常温高圧蒸気に戻すサイクル 2 を採る。

このようにして、再度、両者の飽和蒸気が混合されて初

期条件に戻り、本提案の熱サイクルが形成される。

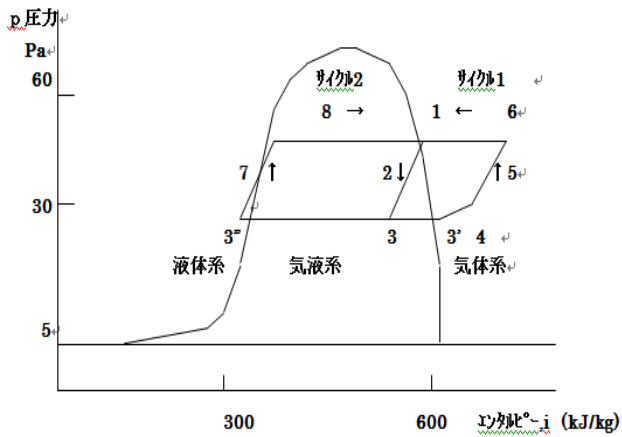


図2 CO2のモリエル(i-p)線図と複合発電・熱サイクル

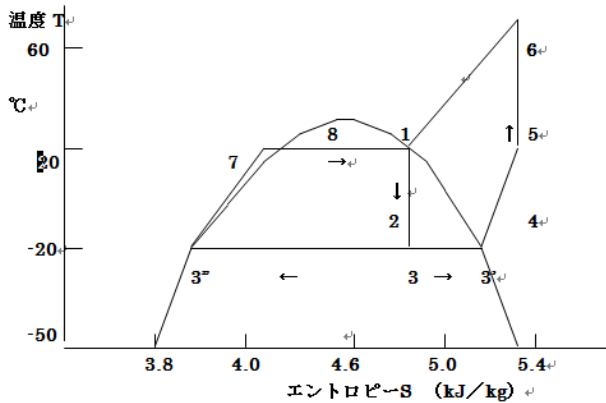


図3 CO2熱サイクルの温度エントロピー(T-S)線図

この新規複合サイクルの、液体系サイクルでは、移送の僅かなポンプ動力を要するだけで、本質的には動力なしで、初期条件の高圧飽和蒸気に戻ることができる。

また、気体系のサイクルでは、移送する門を通り、定積加熱工程に経たあと、更に圧縮することにより、圧力と温度上昇を起こす。ついで、これを有効熱として放熱することにより初期条件に戻る。

上記熱サイクルにおいて液体系と気体系サイクルで循環した総合蒸気の膨張エクセルギー変化が、サイクル循環に必須の圧縮動力を上回る条件がある。

2.4 CO2利用の新熱サイクルのエクセルギー解析

新規熱サイクルのユニット工程毎エクセルギー変化量を求めるエクセルギー解析結果は、次の理論式に基づきコンピューター計算 (Microsoft Excel による) より実施したものである。(表1)

即ち、熱サイクルに於ける状態1から状態2への変化において熱媒の外界に与える最大仕事 $W_{1,2}$ (=エクセルギー変化量) の計算式は、次の通り^{8, 9)}である。

$$W_{1,2} = H_1 - H_2 - T_0 (S_1 - S_2) \quad (1)$$

ここに、 H_1, H_2 は、状態1, 2のエンタルピー

S_1, S_2 は、状態1, 2のエントロピー

T_0 は、環境温度 (K) を表す。

又、エンタルピーH、エントロピーSのデータは、CO2のモリエル(i-p)線図および表から求めた。

表1 エクセルギー解析結果

条件	特徴	(気液排出動力不要の場合=安定運転時)								
		a	b	c	d	h	I	j	k	l
	シリーズNo	熱源/膨冷	熱源/膨冷	圧縮	気液分離	膨張	圧縮	動力	発電/動	総ex/効率
		熱源/膨冷	°C	°C	°C	kcal/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	
全量液化	液体サイクル	25-20b	25	-20	-20	-0.84	34.24	38.13	0.898	1.00
全量気化	気体サイクル	25-20d	25	-20	65	-0.84	34.24	52.20	0.656	1.00
2-2	定積圧縮	25-20e定積	25	-20	99	-1.09	34.24	53.58	0.639	1.11
2-3	定圧圧縮	25-20f定圧	25	-20	118	-1.09	34.24	72.00	0.476	1.00
気液分離	定積圧縮	25-20g定積	25	-20	99	-1.09	34.24	39.64	0.864	1.14
3-2	定圧圧縮	25-20f定圧	25	-20	118	-1.09	34.24	53.29	0.643	1.02
気体系定積加熱	冷却0°C	25-0e	25	0	61	-0.42	17.29	16.45	1.051	1.26
4-2	冷却-10°C	25-10e	25	-10	77	-0.92	25.66	27.75	0.925	1.19
4-3	冷却-20°C	25-20e	25	-20	99	-1.09	34.24	39.64	0.864	1.14
4-4	冷却-30°C	25-30e	25	-30	122	-1.59	44.08	55.09	0.800	1.12
4-5	冷却-40°C	25-40e	25	-40	145	-1.47	53.71	74.43	0.722	1.09
気体系定積加熱	熱源10°C	10-10e	10	-10	39	-0.63	19.21	15.36	1.251	1.36
5-2	熱源15°C	15-10e	15	-10	49	-0.33	22.06	19.09	1.156	1.29
5-3	熱源20°C	20-10e	20	-10	66	-1.00	25.12	23.23	1.081	1.25
5-4	熱源25°C	25-10e	25	-10	77	-0.92	25.66	27.75	0.925	1.19
膨張即全体定積加熱	気液非分離	25-20e'	25	-20	83	0.00	34.24	39.77	0.861	1.13

尚、本結果を導いた計算過程経緯の表を末尾に付録として添付する。付表1は、環境温度 25°Cで飽和蒸気状態の炭酸ガスを、外部仕事をさせつつ、-20°Cになるまで断熱膨張させた場合のエクセルギー変化の理論計算例である。

気液総合サイクルでは、環境物質から 98.28Kcal/Kgの熱エネルギーと圧縮動力 39.66 Kcal/Kgのエクセルギーを用いて、34.24 Kcal/Kgの膨張エクセルギーを得、-67.25 Kcal/Kgの冷熱と 103.70 Kcal/Kgの温熱を得ることができるサイクルである。このサイクルでの増加生成エクセルギーは、5.58 kJ/Kgであり、環境物質熱取込みのエクセルギー化比率は 5.58/98.28=0.057である。

また、この条件の場合、膨張エクセルギーは、圧縮に要するエクセルギーより小さくなっているが、初期条件、膨張冷却温度の条件、気体サイクルの定容、定圧加熱の条件差、気液分離の有無など条件変更により、圧縮に要するエクセルギーと膨張により取り出せるエクセルギーの比率に変化がある。(表1参照)

気体系定積加熱シリーズ条件では、10--20°Cの環境温度のCO2飽和ガスを-10°Cまで仕事をさせつつ断熱膨張冷却させた場合、圧縮動力に必要なエクセルギーを上回るエクセルギーが膨張仕事として取り出せる条件がある。

又、温・冷熱エクセルギーを有効に取り出せるとして算入すれば、圧縮工程で投入する理論エクセルギーの1.36倍という、更に大きなエクセルギーの生成が可能な条件が

ある。

従って、高効率の膨張発電機、圧縮機、熱媒ポンプ等、適切な設備を開発・構成することにより、常温付近の熱エネルギーを用いて、有効仕事を取り出す可能性があることが判明した。

この場合、室温付近の環境物質から取得される熱エネルギーに対し、理論的には5-10%のエクセルギーを発生することが出来る。

2.5 熱媒選定の経緯

室温付近での飽和蒸気が、等エントロピー膨張した場合、冷却すると共に液化する熱媒を探索したところ、表2に示した通り、水蒸気、炭酸ガス、亜硫酸ガス、アンモニアなどが、該当し、炭化水素やフッ化炭化水素ガス、ハロンガスなどは液化が起こらない。

特に、液化比率の多いものは水蒸気であるが、飽和蒸気圧を高くすることが出来ない。ついで、炭酸ガスが液化の傾向が大きく、アンモニアが続く。水蒸気・アンモニア系なども候補に上がるが、低温で水蒸気は固化するため扱いが難しく、炭酸ガスが最適の熱媒として選定される。

表2 常温付近での飽和蒸気の断熱膨張時の液化率

	液化比率 (25°C→0°C)	圧
大気/水	80%	24 → 5 mmHg
炭酸ガス	25	65.6 → 35.5 atm
アンモニア	7	0.5 → 4.5
亜硫酸ガス	6.5	4.0 → 1.6
プロパン	1-2	9.5 → 4.8
n-ブタン	0	2.4 → 1.0
134a	0	7 → 3
R12	1-2	6.6 → 3.1
R22	4	10.7 → 5.1

3. 新熱サイクルシステム用装置の構成

3.1 装置構成

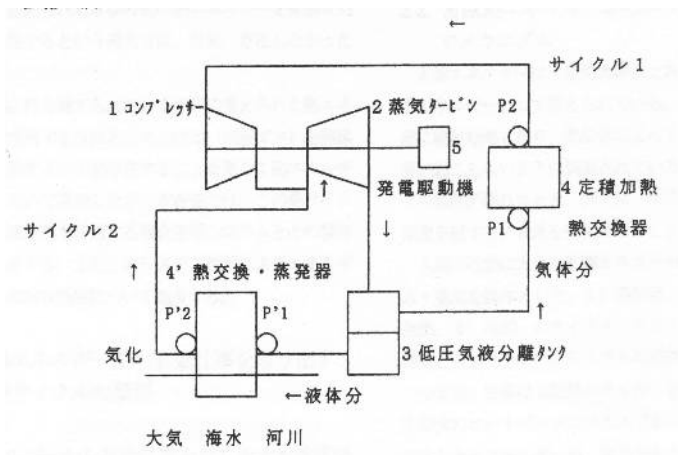


図4 圧縮と膨張の回転装置が同軸の TM サイクル複合発電システム例

基本概念を表すシステム図は、図1の通りであるが、効果を発現しやすくするため、圧縮工程と膨張工程を同軸ないし、連動させることができる。(図4)

例えば、ガスタービンのように、圧縮と膨張を同一マシンの中で実現することも可能である。

3.2 螺旋構造膨張タービン

図1において、2の発電タービンについては、低温・気液共存系での膨張に耐える高効率のタービンが望ましい。

気液2相の膨張仕事で発電力を取り出す方式には、地熱発電で検討されている、容積変化の圧力エネルギー取り出し式の2相回転膨張機やスクリューエキパンダーがある。

近年開発されたピッチが変化する螺旋構造のヘリカルコンプレッサー^{10,11)}を逆作動させる圧縮ガスの断熱膨張タイプのタービンが、速度形と容積形の利点を兼ね備えたているため、新規なエクセルギー取り出し機器としての可能性が注目される。

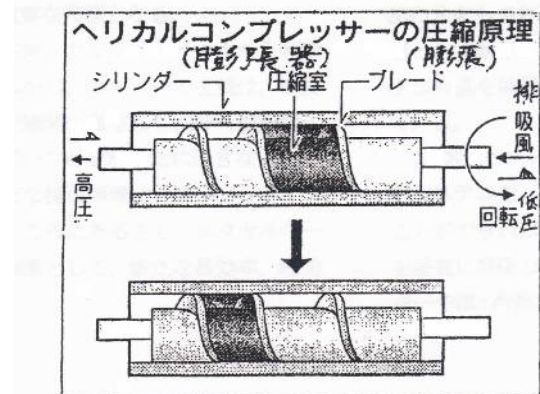


図5 らせん構造に膨張-圧縮機のモデル¹²⁾

3.3 螺旋構造圧縮機

コンプレッサーについては、小型のシステムの場合、螺旋式またはスクロール式や、ピストン式が用いられるが、中型・大型のシステムでは、スクリュー方式やターボ方式のコンプレッサーを採用することが可能である。また上記ヘリカルコンプレッサーは、ピッチの調整によって、定積加熱工程の媒体移送に好適で、伝熱と定積移送を実現するのに有利であると考えている。(バッチ式では弁の開閉が困難、単なるパイプでは定積加熱困難)

蒸発器等熱交換器については、大気熱に適応した集熱・放熱効果の優れた薄手放熱金属製熱交換器を用いることができる。水熱を適用する場合には、従来公知の水冷用熱交換器を用いたり、改良装置を適用することができる。

4. 考察

4.1. 新規熱サイクルシステムの効果

図1において、2の蒸気タービンで発電用のエクセルギーを生み出し、3の低温・低圧気液分離タンクを出た媒体は、低温冷却熱源として有効に利用することが可能であるし、5のコンプレッサー圧縮後の熱媒は高温加温熱源として、必要に応じて利用できる。

この熱サイクルシステムの特徴は、1) 気液共存系での体積膨張エネルギーを取り出す、2) 気液を分離する、3) 気液の加熱は常温物質（大気、流水、海水など）による、4) 気体系の加熱は常温まで定容積で行ったのち、コンプレッサー圧縮を行うところにある。

本提案のサイクルは、記述のエクセルギー解析によって判明した通り、電力として取り出し得る熱媒膨張のエクセルギー変化が、外部投入を必要とする断熱圧縮と熱媒循環ポンプの作動エクセルギー変化を上回る可能性があり、高効率の、発電、冷熱・温熱エネルギーの有効利用が可能な装置の開発の指針となるものと考えられる。

4.2. 従来自然エネルギー利用システムとの比較

大気、河川、海水等の流動性物質を熱源として使用する場合、これらの物質が太陽エネルギー（熱・光）を吸収して、対流することにより連続的にエネルギーが供給されつつ、温熱、冷熱、電力として、人間生活に価値をもつ有効仕事エネルギー供給が可能となる。

また、これらのエネルギー発生に際して汚染物質が生じないので、地球環境を守る点からも極めて有効である。

本システムの熱サイクルにより生ずるエクセルギーは、中～大型コンバインド発電機として、或いは空調機のような、分散型発電・温冷熱発生装置で、発生させることができ、立地を問わない分散発電装置としても有効に利用することができる。

表3 クリーンエネルギー発生システムの優劣比較

	エネルギー源	立地	稼働率	発電効率	設備化
太陽電池発電	○	○	△	○	△
太陽熱発電	○	○	△	△	△
海洋温度差発電	△	△	△	△	×
波力発電	△	△	×	△	×
地熱発電	△	×	○	○	△
新規熱サイクル発電	○	○	○	△	○

本提案の物質熱エネルギーの資源化システムについては、特開 2001-123936、特開 2001-152813、特開 2001-193419、特願 2002-161715、公開 2003-336573 などで、特許出願済みである。

5. 結論

従来、太陽エネルギーの人間生活への有効活用法として採られていた方法は、太陽の直射光を用いて、太陽電池で発電し、電力エネルギーを得る方法と、太陽直射熱を用いて、物体を暖めたり、集光して暖める方法で熱エネルギーを利用する方法が主流であった。

しかし、地球に降り注ぐ太陽エネルギーの大部分は、海水や大地を加熱し蓄熱されているのが実状で、このような熱エネルギーは、気象現象に反映され、人類の利用する水力発電や、風力発電に利用することはあっても、直接地球に蓄えられた熱エネルギーを活用するという思想は、存在しなかった。

本報では、殆どが無為に打ち捨てられている地球に蓄えられた常温付近の熱エネルギーを有効仕事として活用する方法として、CO₂を用いる新規熱サイクルを提言し、そのエクセルギー解析を行うことによって、常温物質からエクセルギーを創出する条件が存在することを見出した。

また、この新規熱サイクルを実現する高性能発電システムの開発によって、従来のヒートポンプのように単なる熱利用を行うだけでなく、電力を創成するシステムとなりうることを提言した。

参考文献

- 1) 前田豊, 第21回エネルギー資源学会研究発表会講演要旨集 2002.6.12~13, (19-1), p503-508
- 2) 前田豊, 第19回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2003.1.30-31) (19-4), p531-535
- 3) 前田豊, 第21回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2005.1.26-27) (27-6), p437-500
- 4) 越後亮三, 日本機械学会誌 2001.4 Vol.104 No.989, p209
- 5) 藤若貴生ら, JETI 2000, Vol.48, No.4(2000), p44
- 6) Uehara, H, Ikegami, Y., ASME Joint Solar Engineering Conference., (1993), 203; 日本機械学会第72期通常総会講演論文集(III) (1995-3.29, p528)
- 7) 亀山秀雄, ヒートポンプ技術, 化学工学 Vol162, No.12, 1998, p718-721
- 8) 吉田邦夫編, エクセルギー工学・理論と実際, 1999.2, 共立出版, (亀山秀雄, エクセルギーの基礎, p16-42)
- 9) 藤田秀臣・加藤征三著, 熱エネルギーシステム, 1999.4 共立出版
- 10) NIKKEI MECHANICAL 2000.12 No.555, p64-65; 福田岳ら, 東芝レビュー, 58.No.10 (2003) pp70-73
- 11) 前田豊, 特開 2001-123936; 特開 2002-161715 など.
- 12) 前田豊, 第22回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2006.1.26-27) (32-2), p561-564

付録

付表1 25°C-20°C 系での各状態変化のエクセルギー解析結果詳細

熱媒エクセルギー変化量 $T_a-T_b, E=H_a-H_b-T_o(S_a-S_b)$		KCal/Kg atm																	
		4.186kJ/kg101.3kPa																	
サイクルE: 気液分離膨張		熱源温25°C		放熱-20°C		外部熱25°C		定容加熱											
全量		0.7402		0.2598		液体分		液		全量									
等圧膨張		等圧膨張		等圧膨張		等圧膨張		等圧膨張		等圧膨張		等圧膨張		等圧膨張		等圧膨張		等圧膨張	
# 25-20e	外部加熱30°C	T4-T1	T1-T2	T2'-T2b'	T2b'-T3'	T3'-T1'	T2"-T3"	T3"-T4"	T4"-T1"	T2"-T4"	総合exr	投入動力	差引仕事	必要熱E	熱出力	生成EX	生成ex/動力		
定積加熱	温度K	298-298	298-253	253-298	298-372	372-298	253-253	253-298	298-298										
	圧力Pa	65.59-65.5	65.59-20.06	20.06-25	25-65.59	65.59-65.5	20.06-65.5	65.59-65.5	65.59-65.59										
	Ha, kJ/kg	497.30	616.72	656.28	703.25	756.83	372.26	377.58	497.30	372.26									
	Hb, kJ/kg	616.72	582.48	703.25	756.83	616.72	377.58	497.30	616.72	497.30									
	Sa, kJ/kgK	4.45	4.85	5.14	5.27	5.27	4.02	4.02	4.45	4.45									
	Sb, kJ/kgK	4.85	4.85	5.27	5.27	4.85	4.02	4.45	4.85	4.45									
	To, 環境温度	298	298	298	298	298	298	298	298	1.03				環境熱	温熱				
	Eexergy, kJ/kg	-0.05	34.24	-4.48	-39.66	9.99	-1.38	2.41	-0.01	1.10	-39.66	5.42		98.28	103.70				
	気液分離	(1.10)	(14.31)	気体exr			7.52	液体exr			3.61				(67.25)	5.58	1.14		

付表2 様々な状態系におけるエクセルギー算出結果

新サイクル		エクセルギー解析データ										(気液排出動力不要の場合=安定運転時)																
条件	特徴	b	c	d	h	i	j	k	l	p	q	r	生成エクセル	必要熱エクセル	熱Ex化率	定積加熱Ex												
		熱源	膨冷	圧熱	気液分離	膨張	エクセル	圧縮	動力	発電/動力	総ex/効率	温熱エクセル	冷熱エクセル	等圧膨張	生成エクセル	必要熱エクセル	熱Ex化率	定積加熱Ex										
		kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	I/j	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	%	kJ/kg										
全量液化	1-1 液体サイクル	25	-20	-20	-0.84	34.24	36.13	0.898	1.00			3.93		0.04	34.24	0.1												
全量気化	2-1 気体サイクル	25	-20	65	-0.84	34.24	52.20	0.656	1.00	6.07		11.89	0.00	73.80	0.0													
	2-2 定積圧縮	25	-20	99	-1.09	34.24	53.58	0.639	1.11	13.48	0.00	11.89	6.03	120.77	5.0		-6.07											
	2-3 定圧圧縮	25	-20	118	-1.09	34.24	72.00	0.476	1.00	19.88	5.99	11.89	0.00	126.21	0.0		5.99											
気液分離	3-1 定積圧縮	25	-20	99	-1.09	34.24	39.64	0.864	1.14	10.00	1.05	0.00	5.65	98.29	5.7		-4.48											
	3-2 定圧圧縮	25	-20	118	-1.09	34.24	53.29	0.643	1.02	14.73	5.48	0.00	1.17	102.31	1.1		4.44											
気体系定積加熱	4-1 冷却0°C	25	0	61	-0.42	17.29	16.45	1.051	1.26	3.56	-0.08	0.00	4.31	66.81	6.5		-3.89											
	4-2 冷却-10°C	25	-10	77	-0.92	25.66	27.75	0.925	1.19	6.91	0.38	0.00	5.19	81.42	6.4		-4.23											
	4-3 冷却-20°C	25	-20	99	-1.09	34.24	39.64	0.864	1.14	10.00	1.05	0.00	5.65	98.29	5.7		-4.48											
	4-4 冷却-30°C	25	-30	122	-1.59	44.08	55.09	0.800	1.12	15.70	2.01	0.00	6.70	111.22	6.0		-5.07											
	4-5 冷却-40°C	25	-40	145	-1.47	53.71	74.43	0.722	1.09	23.99	3.31	0.00	6.57	125.33	5.2		-5.11											
気体系定積加熱	5-1 熱源10°C	10	-10	39	-0.63	19.21	15.36	1.251	1.36	0.33	0.21	1.13	5.53	45.84	12.1		-4.94											
	5-2 熱源15°C	15	-10	49	-0.33	22.06	19.09	1.156	1.29	1.38	0.29	0.88	5.53	57.47	9.6		-5.15											
	5-3 熱源20°C	20	-10	66	-1.00	25.12	23.23	1.081	1.25	3.22	0.29	0.50	5.90	69.86	8.4		-4.90											
	5-4 熱源25°C	25	-10	77	-0.92	25.66	27.75	0.925	1.19	6.91	0.38	0.00	5.19	81.42	6.4		-4.23											
膨張即全体定積加熱	6-1 気液非分離	25	-20	83		34.24	39.77	0.861	1.13	10.88			5.36	114.49	4.7		-5.36											

付表3 炭酸ガスの温度・圧力とエンタルピー, エントロピー値データ (データ便覧抜粋)

炭酸ガス(個體 液體 気體)モリエル線圖 (i-P)

エンタルピー : 1 kcal/kg = 5 mm
 圧力 : 1 kg/cm² = 20 mm -- P < P_v
 1 kg/cm² = 5 mm -- P > P_v
 % = 100.00 kcal/kg
 K_{max} (°) --- 蒸發温度に於て最大冷凍率を得る壓力 P_i を與ふる線

温度 t °C	壓力 P kg/cm ²	比體積		比重		エンタルピー		蒸發潜熱 kcal/kg	エントロピー		温度 t °C
		液體 v ^l l/kg	蒸氣 v ^g l/kg	液體 ρ kg/m ³	蒸氣 ρ kg/m ³	液體 i kcal/kg	蒸氣 i kcal/kg		液體 s °C kcal/kg	蒸氣 s °C kcal/kg	
31	74.96	2.156	2.156	463.9	463.9	133.50	133.50	0.00	1.109 8	1.109 8	31
30	73.34	1.677	2.990	596.4	334.4	125.90	140.95	15.05	1.085 4	1.135 1	30
27.5	69.35	1.520	3.635	661.0	275.1	122.00	144.55	22.55	1.073 0	1.148 7	27.5
25	65.59	1.417	4.167	705.8	240.0	118.80	147.33	28.53	1.062 8	1.158 5	25
22.5	61.85	1.353	4.715	741.2	212.0	116.20	149.50	33.30	1.054 3	1.166 6	22.5
20	58.46	1.298	5.258	770.7	190.2	114.00	151.10	37.10	1.046 8	1.173 4	20
17.5	55.10	1.253	5.794	795.5	178.4	111.90	152.27	40.37	1.040 0	1.179 0	17.5
15	51.93	1.223	6.323	817.9	158.0	110.10	153.17	43.07	1.034 0	1.183 5	15
12.5	48.83	1.193	6.910	838.5	144.7	108.20	153.95	45.75	1.027 4	1.187 5	12.5
10	45.95	1.166	7.519	858.0	133.0	106.50	154.59	48.09	1.021 8	1.191 7	10
7.5	43.20	1.142	8.175	876.0	122.3	104.78	155.08	50.30	1.015 5	1.195 2	7.5
5	40.50	1.120	8.850	891.0	113.0	103.10	155.45	52.35	1.010 3	1.198 5	5
2.5	37.95	1.100	9.584	910.0	104.3	101.53	155.82	54.29	1.005 0	1.202 2	2.5
0	35.54	1.081	10.383	924.8	96.3	100.00	156.13	56.13	1.000 0	1.205 5	0
-2.5	33.21	1.063	11.230	940.0	89.0	98.38	156.27	57.89	0.994 2	1.208 2	-2.5
-5	31.05	1.048	12.141	953.8	82.4	96.91	156.41	59.50	0.989 0	1.210 9	-5
-7.5	29.00	1.033	13.120	968.0	76.2	95.48	156.51	61.03	0.983 5	1.213 5	-7.5
-10	26.99	1.019	14.190	980.8	70.5	94.09	156.60	62.51	0.978 7	1.216 3	-10
-12.5	25.10	1.006	15.320	993.8	65.3	92.75	156.65	63.90	0.974 0	1.218 8	-12.5
-15	23.34	0.994	16.609	1006.1	60.2	91.44	156.70	65.26	0.969 0	1.221 8	-15
-17.5	21.71	0.982	17.950	1018.5	55.7	90.18	156.72	66.54	0.964 4	1.224 3	-17.5
-20	20.06	0.971	19.466	1029.9	51.4	88.93	156.78	67.79	0.959 4	1.227 2	-20
-22.5	18.68	0.960	21.070	1041.7	47.5	87.73	156.70	68.97	0.955 0	1.229 8	-22.5
-25	17.14	0.950	22.885	1052.6	43.8	86.53	156.67	70.14	0.950 1	1.232 8	-25
-27.5	15.76	0.940	24.850	1063.6	40.2	85.35	156.62	71.27	0.946 0	1.235 5	-27.5
-30	14.55	0.931	27.001	1074.2	37.0	84.19	156.56	72.37	0.942 8	1.238 5	-30