

■ 解 説 ■

濃度差エネルギーシステムとエンジン

Concentration Difference Energy System and Engine

(第1報)

— 濃度差エネルギーシステム —

— 色 尚 次*

Naotsugu Isshiki

1. はじめに

全世界の石油の確認埋蔵量は約 1000 億キロリットルといわれていて、この量は冬の富士山の白雪にかかる部分の体積より小さいくらいであり、その石油を約 4 億台の自動車を始めとする多数の機器で消費するのであるから、その存続には多少の消長はあれ石油はまさに人類一朝の夢である。また原子力燃料もその発電にいたるまでに大量の石油を消費する点と後に、核分裂生成物を残す点でまだ問題があり、石炭も長期の長い眼では石油と同じ涸渇と公害が残る。

かって地上の生物は、人類を除いて大自然より入ってくる入力と全くバランスした生態系を形成して来た。それを大きく破ったのが人類の今までのエネルギー形式である。

我々はなにも石油が涸渇したという理由ではなく、むしろ人類がこの有限の地球の上に恒久的にバランスした生態系をとるための一環として地球的にバランスしたエネルギーシステムを考えるべきである。そしてその方向へ進む第一歩として、我々エンジニアは、一切の非可逆燃料（既存の化石・原子核燃料）から手を切った可逆エネルギー源とその活用システムを求めべきであろう。その探究は企業の利潤や一国の収益といった段階ではなく、むしろ人類の永久的共存を理想とする高次のレベルの理念に立った長期的なものでなければならないであろう。

さてこの地上に降るバランスしたエネルギーには、太陽熱、風力、地熱をはじめたくさんの大自然エネルギーがある。それらはエネルギー密度は低い、総量においては極めて大量であることはよく知られている。

そこで我々の当面の仕事は、それらの大自然エネルギーをいかに補集し、蓄積し、活用するかという大自然エネルギーシステムの追究であろう。

そのシステムの一つとして喧伝されているものに水素エネルギーシステムがあるが、それによる水素の生産はまだ転換効率が低く、しかも一たん水素となったエネルギーを最終的に燃焼に利用する限り、総合エネルギー的に入力から出力までの効率がまだ 5% 前後と低い欠点があり、他にも多くの未解決点が残っているようである。

それに対して筆者がここに提案した濃度差エネルギー別名 CDE (Concentration Difference Energy) による濃度差エネルギーシステムは (CDE システム)、塩類水溶液やアンモニア溶液などの各種の溶液を媒体として、それらの溶液における溶質の濃度の差と変化によってエネルギーの補集、蓄積、動力化等を行なうもので、溶液の化学変化は生ぜず、単に濃度変化だけが生ずるので、溶液の可逆的循環使用が可能となって、一切の大自然エネルギーや省エネ対象エネルギー（排熱等）がエネルギー源となって統一的にそれらの蓄積と活用ができる点に特色がある。とくに溶液による動力化に対しては、筆者らが始めて実証した濃度差エネルギーエンジン（別名 CDE エンジン、塩水エンジン）によって直接動力化できる点に大きな特長がある。

この CDE システムは長い目でみるとまだ開発の端緒についたばかりであって、その性能の現状はまだ不十分であり、溶媒の性質、耐食材料等に多くの研究点が残っているが、極めて低密度のいかなる種類の大自然エネルギーも統一的に補集、活用できる可能性を有し、高密度エネルギーを指向する水素エネルギーシステムの丁度反対の位置にある低密度エネルギーシステムとしての特色を有するので、水素エネルギーが、高密度エネルギーにおける人類極エネルギーシステム

* 東京工業大学工学部 生産機械工学科 教授

〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1

と唱しているならこの CDE システムは低密度エネルギーにおける人類の究極エネルギーシステムであろう。

筆者は在来エネルギーに対して、聖書に書かれている「地の塩」のように、大地にかくれてはいるが人間にとって重要であり、しかも最小限度あればよい、という「地の塩のエネルギー」を人類の未来における哲学的な理想エネルギーと考えるものであるが、奇しくも塩水エンジンを一環とするこの CDE システムは文字通り「地の塩」のエネルギーシステムとなりそうである。

なお最近はこの CDE システムはサーモケミカル(熱化学)反応の利用するサーモケミカルエネルギー変換工学の一種として見られるようになり、夏から冬への長期エネルギー貯蔵や大自然エネルギー利用を目的とする方式の主要なものの一つとして多くの同種方式と比較しつつ論ぜられるようになった。ここではサーモケミカルエネルギーシステムとして見た本システムの位置づけ、特長、欠点等も明らかにしたい。

2. 濃度差エネルギーとは

2.1 濃度差によるポテンシャル

濃度差のある所には、温度差や高度差のように物理化学的なエネルギーポテンシャルがある。これは従来はフガシチー、溶液自由エネルギー、逃散能などといわれたが、いまこのポテンシャルをわかり易くするため濃度差エネルギー(CDE)と呼ぶことにすると、この CDE は熱エネルギー、力学エネルギーや電気エネルギーとして取り出すことが出来る。CDE からのエネルギー変換の今までの例としてはつぎのようなものがある。

- (1) 浸透圧発電
- (2) 濃淡電池
- (3) 稀積熱の発生
- (4) 吸収熱の発生
- (5) 沸点上昇の利用

そもそも浸透圧の発生原理、濃淡電位の理論式、沸点上昇の理論モデル、等からわかるように、二つの異なる濃度の溶液の間の濃度差エネルギー(ポテンシャル)は、溶質分子を理想気体と考えてその気体が高圧力側(濃い溶液側)から低圧力側(うすい溶液側)へ等温膨張するさいの力学的発生エネルギーに相当すると考えてよい。

よって濃度差エネルギーは、高圧ガスや圧縮されたバネが有する一方向性の力学的エネルギーに等しくそ

の量はそのままエクセルギーと考えてよい。すなわち、このエネルギーは熱エネルギーと異なってカルノーの原理(熱力学の第二法則)によるような温度差によって出力の効率がきまるということはなく、同一の温度であっても力学的出力が得られる。

しかしこのエネルギーを取り出すさい、可逆的方法を使用しない限り濃度差エネルギーが熱エネルギーとなって散いつする。上記の現象のうち(1)(2)(4)(5)は理論的には可逆となり得るものであるが(3)は溶液の混合が起るので非可逆であり動力の発生には向かない。

2.2 浸透圧と濃淡電位による発電

濃度差エネルギー発電というと、まず取り上げられるのが海水と河川水の間浸透圧差を利用する海水濃度差発電である。そもそも海水と淡水の間には約 200 m (正確には 230 m) の浸透圧力差が存在するので、理論上は、図 1 に略示するような浸透圧発電ができる。しかし半透膜の強度と能力を増し、かつ設備をコンパクトとするために、最近のアメリカでは図 2 に示すような細管(径 2 mm 以下)半透膜による水車・タービン利用方式が研究されている。しかし半透膜を通過するさいの抵抗は大きな非可逆損失となりまだ効率は低いようである。

ついで取り上げられるのは濃淡電位を利用する発電であり、現在も多くの学者によって研究がなされている。

筆者は海水の代りに濃い硫酸水溶液を用いて、図 3 に示すような装置による濃淡電池を実験した。その結果ごく少量の電力を得たが、界面逆電位の発生によって電池の電位が数分で低下する現象が生じ、その解決を得られないまま現在にいたっている。

2.3 熱的な方式による濃度差エネルギーの取り出し

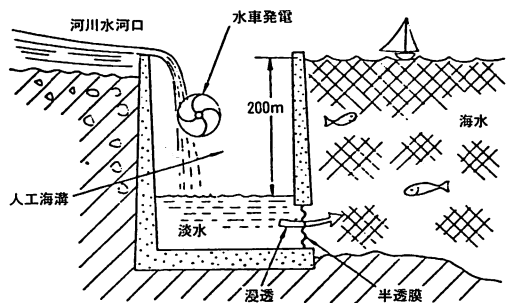


図-1 海水濃度差発電原理図

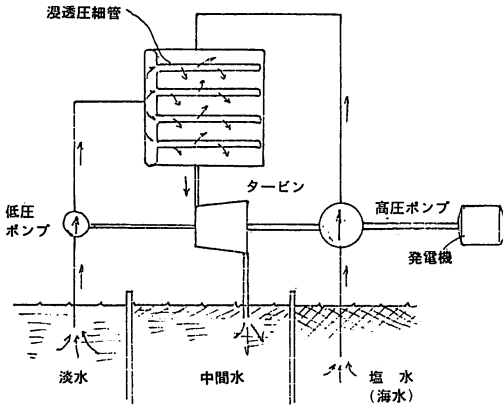


図-2 細管使用の密閉方式海水浸透圧発電

以上のような方式を試みて失敗した筆者は、濃度差エネルギーを熱的（熱工学的）な方法で外部に取り出す方法を試みることにした、それが本報告の主流となるものである。

いま純水と濃度差のある溶液との間には多くの物理化学的性質に差を生ずるが、そのうち熱的なものは沸点と飽和蒸気圧の変化である。すなわち純水と任意の濃い塩類水溶液の飽和蒸気圧曲線 S と S' を示すと図4のようになる。両者は一般にはほぼ平行の曲線であって、濃度が濃い程 S' は右へずれる。ここで S から S' への右方へのずれ幅が溶液の沸点上昇温度差 ΔT_0 であり、また両者の同一温度における上下の間隔が蒸気圧力差 ΔP_0 である。

このような沸点上昇と蒸気圧力差の存在のため、濃度差のある溶液間には吸収（absorption）を主とする種々の工学的現象を生ずる。

すなわち、純水と水溶液を図5(a)のように二つのタンクに入れ、連通して真空に保つと、蒸気圧の差のため純水側は蒸発が生じて温度が下がり、水溶液側は蒸気圧が低いので蒸気を吸収し濃度が下降するが同時に吸収発熱のために昇温して、同図(b)のように両液が温度差 ΔT_0 （沸点上昇差）に達して平衡となり温度変化現象を生ずる。

この応用として同図(c)のように溶液側を一定の温度 T_0 に保つようにして左方よりの蒸気を吸収するときは、純水側に温度降下 ΔT_0 が生じ、その温度降下を工学的利用の対象とするのが在来の吸収式冷凍機である。逆に同図(d)のように純水側に大容量熱源から常に熱を供給して水蒸気を発生させ右方へ送ると、水溶液側の温度が最大 ΔT_0 だけ上昇するので、この熱によって加熱を行ったり動力を生ずる可能性が生ずる

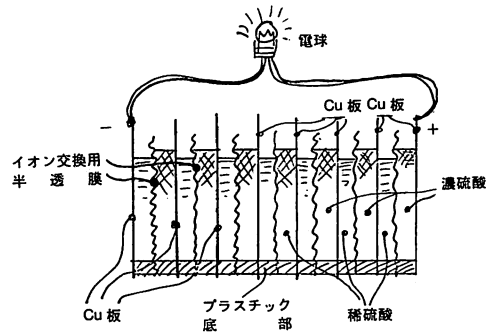


図-3 筆者の濃淡電池実験装置

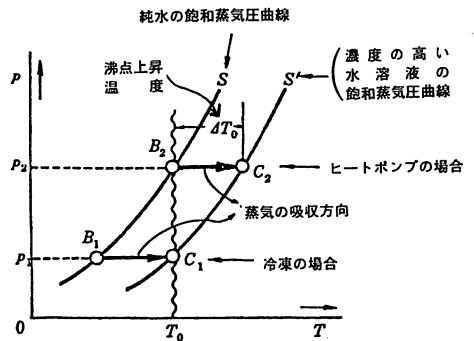


図-4 濃度差のある水溶液の沸点上昇

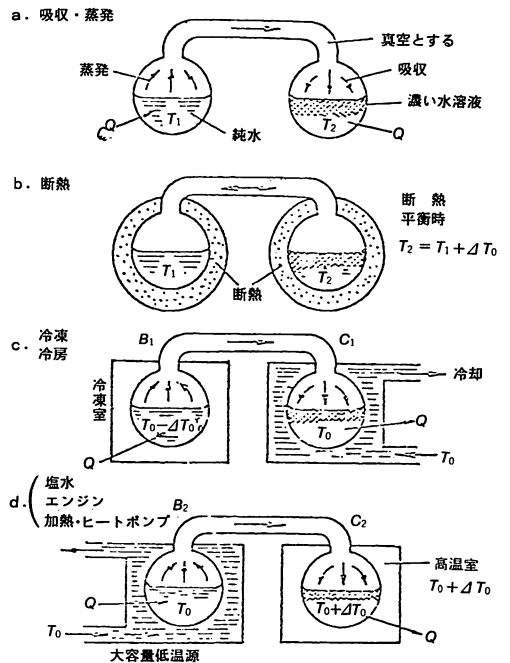


図-5 濃度差のある二つのタンクの生ずる諸現象の原理図

わけである。このさいあたかも熱が大容量定熱源から汲み上げられてより高温の溶液例に発生するようになるのでこの作用を溶液ヒートポンプ（吸収ヒートポンプ）ともいう。

2.4 各種塩類水溶液の沸点上昇と溶液の選定

それでは果して実際の水溶液はどれくらいの沸点上昇 ΔT_0 をもっているかについて、筆者らが実測したものを図6に示す。図のように最大の ΔT_0 はNaOH水溶液であり、一般に強酸、強アルカリ類は ΔT_0 が大きい。しかしそれらは腐食性が強い劇薬であり、実際上は腐食性の低い中性塩類の水溶液について調べると、 $ZnCl_2$ 、 $LiBr$ 、 $LiCl$ 、 $MgCl_2$ 、 $CaCl_2$ 、などがその順に ΔT_0 が高い。しょ糖、グリコールなどはよく水に溶けるが ΔT_0 は低い。また $NaCl$ や Na_2SO_4 は入手しやすいが ΔT_0 は小さい。

実際にCDEシステム用として、どの塩類がよいかということ、それには沸点上昇 ΔT_0 が高いこと、溶解度が高いこと、価格の低いこと、毒性の低いこと、重金属イオンを含まないこと、材料の腐食性の低いこと、塩素ぜい性、アルカリぜい性を示さないこと、常温附近の低温となっても固化、晶化、水化物、等を生じないこと、等のすべての条件を満足する必要があるが、われわれは今までかなり広範囲の塩類水溶液について調べたが、上記の条件をすべて満足するものは存在しない。

しかし、われわれの現在までの実験結果によると、

比較的安定かつ低温で固化し難く、しかも ΔT_0 の高いリチウム塩と、きわめて低価格で、かつ安全性の高いカルシウム塩との混合塩が腐食性も比較的安く、 ΔT_0 が高くてエンジン用としてはある程度の上記諸条件を妥協的に満足するので、今までのところ $LiCl$ と $CaCl_2$ の3:1ないし1:1混合塩を使用することとした。

図7に横軸を濃度としたときのこの混合塩類の沸点の変化状況を示す。図のようにこれらの ΔT_0 は約65°Cないし70°Cにも達し得るが、 $CaCl_2$ を含むため、これらの濃い溶液は20°C以下の低温で固化、晶折する欠点を有し、全くシステムは常温より少し高く保温しておく必要がある。（濃度が低い時は固化しない）。

使用溶液としては上記の組み合わせ以外に塩類のフロン類溶液やアンモニアと水の混合液などが低温に向き、また苛性ソーダ、硝酸や硫酸の水溶液が高エネルギー密度の工業用に向いていると考えられるがアンモニアやフロン類は圧力が高くなり、また強アルカリ、強酸は腐食性と安全性の点で問題がある。よってわれわれは现阶段では上記のリチウムとカルシウム塩の組み合わせを最善として研究している。なお材料としてはチタンやキュプロニッケル、燐青銅、等が十分使用できることがわかった。図8に150°Cにおける各種材料の腐食率の実験結果を示す。

2.5 溶液による動力の発生能力

水溶液よりの動力の発生は本システムの中心となるものである。

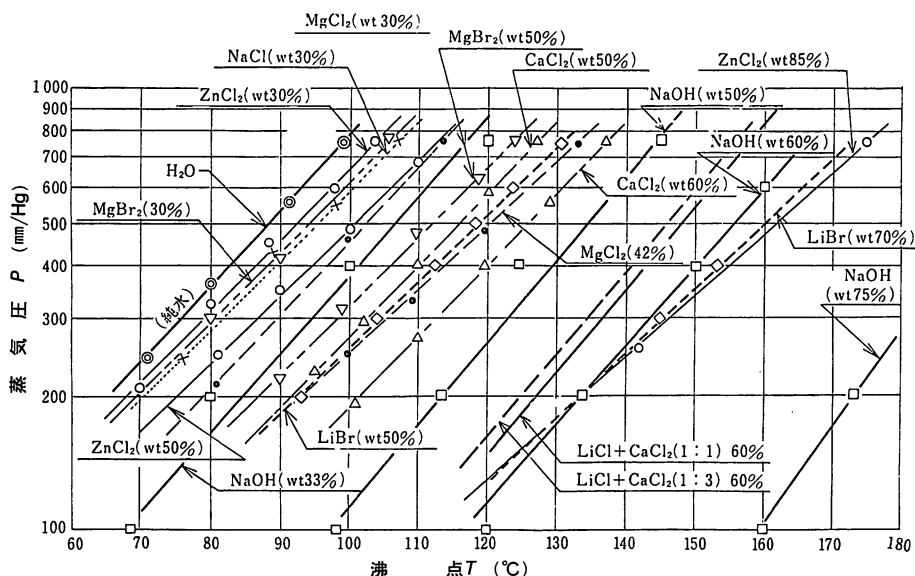


図-6 各種代表的な水溶液の蒸気圧～沸点(p～t)線図

さてこのような水溶液によって熱的に動力を取り出すときの理論動力発生値は沸点上昇温度差 ΔT_0 によ

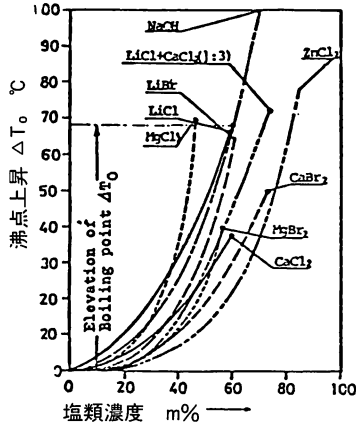


図-7 各種塩類水溶液の沸点上昇温度

て動くカルノーエンジンを考えることによって計算できる。すなわちいま図9のように水溶液と純水との間にカルノー機関を置き、まずカルノー機関を上昇温度差 ΔT_0 を有するヒートポンプとすると、水溶液は熱を受けて蒸発濃縮され、その濃度を増し、また逆にカルノー機関を同一温度差の熱機関とするとときは、水溶液で発生する吸収熱で機関を動かし、その排熱が純水を蒸発して水溶液側に水蒸気を送るのでエンジンが連続的に作動できる。このさいは水溶液は水蒸気を吸収して濃度を減少し液面が上昇する。

このプロセスは水蒸気の ΔT_0 の温度差の顕熱以外は可逆的に行われ、それにより水溶液の理想的な比動力蓄積量が計算できる。すなわち対象とする水溶液の任意の濃度 m における蒸気を吸収熱 (= 蒸気の潜熱 + 稀釈熱) 及び沸点上昇の ΔT_0 がわかれば、任意の蒸気移動による発熱と動力発生量がわかり、それを積分することにより、任意の濃度変化に対する動力発生量が計算できる。単純発熱量についても同様である。

いま LiCl_2 水溶液と $\text{LiCl} + \text{CaCl}_2$ (3 : 2)水溶液とについて計算した理論的な比動力と熱の蓄積 (もしくは放出) 能力などについて図10に示す。同図に、初め濃度 $m = 1.0$ (ドライ) からスタートして、最終的に濃度 $m = m_f$ にいたる間に放出できる動力と熱とを、その最終状態 ($m = m_f$) の溶液の1トンおよび 1 m^3 あたりについて計算した値、つまり最終溶液の比動力 P_w (KWh/トン), P_r (KWh/ m^3), 比発熱電量 Q_w (Kcal/トン), Q_r (Kcal/ m^3) を示している。なお P_t , Q_t

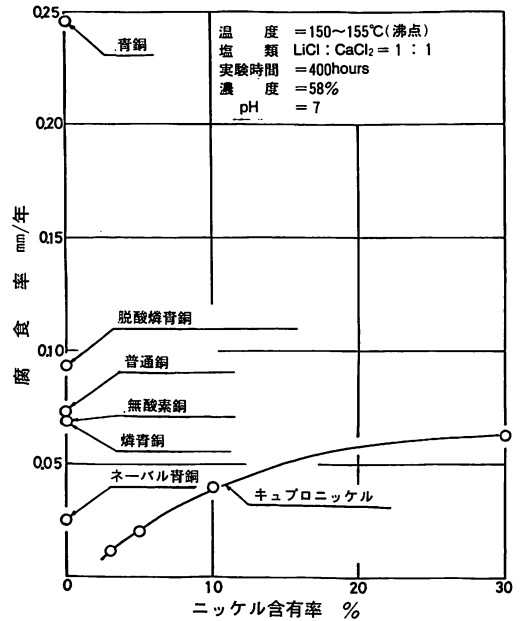


図-8 各種金属のLiCl, CaCl₂ (1 : 1) 水溶液の沸点における年腐食率の実験値

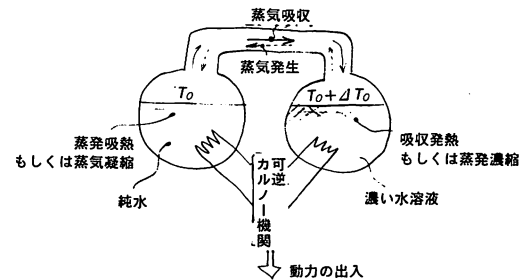


図-9 濃度差があるときの理論動力発生およびヒートポンプによる濃縮

は塩1トンあたりの比動力と比発熱量である。

また同図には各濃度 m_f における沸点上昇 ΔT_0 (°C) も示されている。

同図によると最終時の溶液あたりの比動力 P_w は $m_f = 0.5$ くらいで最大となり、 LiCl 水溶液で75 (KWh/トン), CaCl_2 と LiCl の混合水溶液ではほぼその80% くらいの値をとることが示されている。

一方において、在来の鉛バッテリーの理論比動力は約110 (KWh/t) であり、実際比動力は約40 (KWh/t) といわれているので、カルノー機関より効率の悪い実際エンジンを利用して比動力がさらに約60% (60 KWh/t) 落ちるとしても、 LiCl と CaCl_2 を混ぜたものだからなりそれに近い値を出しうることが考えられる。どこ

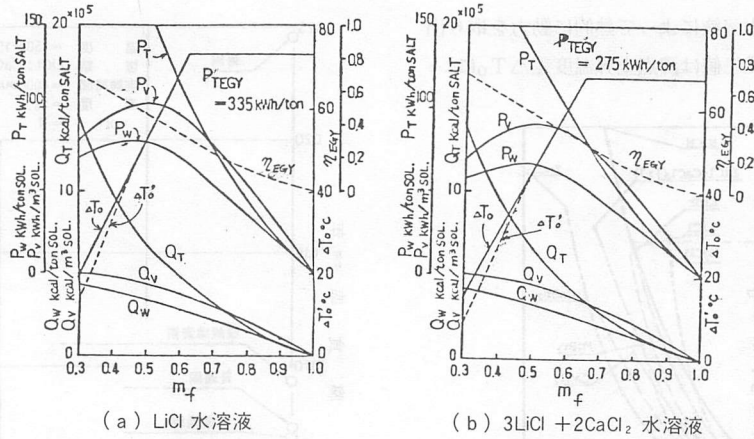


図-10 各種水溶液の比動力と比発熱量等

まで理論値に迫り得るかは今後の開発研究に待つところが多い。なおNaCl, H₂SO₄などはLiClの約50%増しの比エネルギーをもつので従来の工業用に研究され

る必要がある。

(第2報「濃度差エンジン」は次号掲載予定)

話の泉

エネルギーに冷たいレーガン政権

アメリカンセンターは4月13日、ブルッキングズ研究所のジョセフ・イェーガー主任研究員を講師に「エネルギー討論会」を開いた。カーター政権からレーガン政権への政策転換を日本とのかかわりで大胆に語った。講演の要旨を紹介しよう。

長期的にみれば原油がこれからますます発見がむずかしくなり採取しにくく、さらに価格が高騰する。だからエネルギー転換が避けられない。

日米の類似点はともに大きなエネルギー受け入れ国ということだ。しかし日本はエネルギーを多様化するのに比べ、米国はそうでない。

ワシントンの政策の変化を説明しよう。カーターは市場勢力に強く介入しようとしたが、レーガンは逆の政策をとる。たとえば米国内産原油価格統制はカーターが今年10月までに撤廃していたが、レーガンはすでに完全に撤廃した。また環境優先から生産優先へ変換するし、原子力発電はカーターの安全性重視=反対からレーガンの原子力賛成に変わる。米国は同盟国から受け入れられやすくなるだろう。カーターは石油備蓄についてサウジアラビアに話してしまったので大きな失敗を犯した。

レーガンは合成燃料の開発のための支出を削減した。太陽エネルギー開発にカーターは熱心だったが、レーガンは支出を抑え民間に委ねるだろう。地熱、新電力システム、ウラン開発についても支



ジョセフ・A・イェーガー氏

出が削減される。エネルギー節約予算もカットされる。その肩代わりは民間企業に任される。

国際関係をみると①エネルギー消費の伸びを抑えること②代替エネルギー開発の面で国際協力が行われるだろうが、輸入国カルテルなどはダメだ。カーターは核兵器の拡散に神経質だったので、核燃料処理工場をつくらせることに反対だった。レーガンは高速増殖炉の開発に乗り気だから、私は日本、英国、フランスなどに大きな工場をつくらせればプルトニウムのコントロールもしやすいと思う。

注 Joseph A. Yager

1916年4月生まれ。ミシガン大学で経済学を専攻、M. A. 国家資源計画委員会エコノミスト、国務省中国調査部エコノミスト等、中国通。著書に核エネルギー面の国際協力を扱った「Energy Policy in Perspective」等がある。

(K)