

# 総 論

## An Outline of Long Distance-Energy Transportation

堀 米 孝\*

Takashi Horigome

### 1. 長距離の電力・エネルギー輸送の背景

本年6月ブラジルで地球環境開発会議が開かれ、地球環境問題が幅広く討議され、地球憲章や地球温暖化防止条約が調印され、地球環境問題が人類共通の最重要課題の一つとして広く認識されるようになったことは大きな成果である。

酸性雨やCO<sub>2</sub>による地球温暖化などの地球規模の環境問題はとりもなおさず地球規模のエネルギー問題である。今迄各国のエネルギー政策は、その国の資源財存量、輸入資源のコスト、それに安全保障上の配慮などを加味して、国の利益が最大になるように考えられてきた。発電のための資源も例外ではない。しかし地球規模の環境汚染や食品汚染の問題が起き、あるエネルギーのメリットを受ける国だけが同時にそれから発生するデメリットに耐えると言う従来型の単純な図式は通用しないことがはっきりしてきた。化石燃料の大量消費によると考えられる地球温暖化、酸性雨による森林破壊、砂漠化、ローカルの食糧生産の低下、原発事故による放射能汚染など、どれも国境を越えて世界に波及する。一国の政策を、一国の利益だけから決めることが出来なくなったわけである。特に先進諸国は、今後発展途上国のエネルギー事情を念頭におき、地球規模で国益よりも地球益が最大になるようなエネルギー政策をたて実行しなければならない。最も重要な課題は持続的開発の可能な社会を構築するために「地球環境の保全とエネルギー使用を両立させる」ことである。

そのためには省エネルギーとともに地球規模での太陽エネルギーを中心とする再生可能エネルギー（以下、再生エネと略）の開発とその大量利用がきわめて重要となる。再生エネの賦存量は地域によって大きく異なる。例えば水力エネルギーはシベリヤ、中国、カナダ、

南米などに豊富に存在し、又太陽エネルギーは、赤道付近の島や洋上、砂漠や乾燥地帯、更には宇宙空間にて豊富に得られる。従って将来、上記の地域での再生エネを国際協力により開発し、これを世界各国に配送することが地球環境問題の観点からは是非とも必要になると考えられる。又原発や核融合発電所も、その安全確保のために、将来は建設し易い地域に国際共同により、まとめて建設管理し、その電力を途上国を始め各国に配送することが充分予想される。この様に将来地球規模で陸や海を越えて、さらには宇宙から長距離にわたる電力やエネルギーの輸送が極めて重要な技術となるわけである。

所で再生エネや核エネルギーの多くは、電力の形に変換される場合が多いが、これを電力として輸送する場合や他のエネルギー輸送媒体（例えば水素）に変換して化石燃料と同じように輸送する場合が考えられる。一般に、長距離にわたって電力の形で送る場合（長距離送電）は瞬時に高速に送ることができ、かつ時差を利用した電力の経済的融通が可能となるなどの利点がある反面、長距離海底ケーブルなどの布設が必要になる場合が多く、大きな初期投資を必要とすることは勿論、色々な国を通過するため通過国の政情不安やテロなどにより送電の信頼性が低下するなどの欠点が考えられる。

一方電力を他のクリーンな輸送媒体に変換して石油と同様に輸送船などで輸送する場合は初期投資が比較的少なくてすみ、かつ輸送の信頼度も比較的高く長距離輸送に適するが電力のような高速の輸送や融通は出来ない。以下に今迄のエネルギー輸送の歩みをかえり見るとともに今後の課題としての長距離エネルギー輸送の概要について報告する。なお各個別技術の詳細は次章以降を参照して頂きたい。

### 2. エネルギー輸送技術の歩みと今後の課題

#### 2.1 今迄のエネルギー輸送技術のいろいろ

\*東京農工大学工学部教授  
〒184 小金井市中町2-24-16

表1 エネルギー輸送技術の現状

技術の形態	エ ネ ル ギ ー 資 源				エ ネ ル ギ ー	
	石 油	天 然 ガ ス	石 炭	核 燃 料	電 気	熱
船	原油または 精製油	液 化	鉱 石	酸化ウラン	—	—
鉄 道					—	—
自 動 車					—	—
パ イ プ		ガスまたは液化	ガスまたはスラリ	—	—	蒸気(短距離)
電 線	—	—	—	—	架空線または 地下ケーブル	—

一次エネルギーの生産と(二次エネルギーへの)変換の場所と二次エネルギー(主に電力ガス、熱)の利用する場所とが一般に異なる場合が多く、そのため昔から色々なエネルギーの輸送方法が考えられ、それに必要な輸送技術が開発されてきた。今迄のエネルギー輸送技術は表1のようになる。表1<sup>1)</sup>から解る如く輸送技術は大別すると5種類程度であり、ここ数十年本質的には余り大きな変化はない。

これらの輸送技術は、経済成長に伴って輸送量は飛躍的に増大したが、質的には構造材料や輸送速度などに進歩はあったものの最近の著しい科学技術の進歩による波及効果としては、(a)液体燃料のコストを著しく低下させた10~50万トン級のスーパータンカ、(b)極低温液化による天然ガス輸送、(c)濃縮ウランによる核エネルギーの大量輸送、(d)電力輸送の高電圧化、大電流化、低損失化およびコンピュータによる輸送の安定化等に顕著に現れている。

ところでエネルギー輸送技術の最も重要な評価基準は、経済性にあるため今までの技術開発の重点は輸送コストの低下に向けられてきた。そして輸送コストの低下を図る最も容易な方向がスケールメリットの追求であった。

エネルギー技術は一般に単一化、高密度化、大容量化によって、すなはち技術のスケールを大きくすることによってそのコスト低下を図ってきた。すなはち、「大きいことはいいことだ。」の追求であった。

例えば原油輸送のパイプラインの直径を50%増大すれば、パイプの構成材料はほぼこれに比例して増加するのに対して、原油輸送量は2倍以上に増加できるため、単位輸送量当りの輸送コストは輸送可能量が多くなるほど低下することになる。輸送容量を増大する方法は寸法の増大のみでなく、例えばパイプラインでは圧力や流速、電力輸送の送電線では、送電電圧の上昇、大電流化(昇流)によって、又天然ガスでは極低温液

体にして密度を高めることが出来るが、これらの技術にはスケールメリットの考え方が働くのである。例えば電力輸送については、送電電圧を66kVから500kVに昇圧すればkW当りの電力輸送コストは約1/10以下に低下する。

## 2.2 エネルギー輸送の経済性

エネルギー輸送の経済性は、安全性、信頼性との関連があるため、色々なエネルギー輸送方式の経済性のみを比較することは困難であるが、おおよその目安をつけるために概算し、推定した結果の一例を表2に示す。

ここで石油の場合は原油1klを100km輸送するときのコストを示しているが、石油以外のものについてはこれと等価の熱量(約900万kcal)を同一距離だけ輸送する場合のコストである。表2より解る如くタンカ輸送が最も安価であり、ついでパイプライン輸送が安い。電力の輸送は送変電設備費が高いため、他の輸送方式に比して高価となるが、輸送の安全性、信頼性

表2 エネルギー輸送コストの比較

輸 送 形 態		輸送コスト
石 油	スーパータンカ	0.5
	タンカ	1
	パイプライン	2
	鉄道タンク車	4
	タンクローリ	15~20
天然ガス	タンカ(極低温液体)	4
	パイプライン	5
石 炭	貨物船	5
	鉄道貨車	6~10
	パイプライン(スラリ)	6
電 力	500kV 交流架空線	30
	500kV 直流ケーブル	50

(原油 1 kl 等価量, 100km)

や高速性の面ですぐれている。

### 2.3 エネルギー輸送の今後の課題

以上のようなスケールメリットの追求をはじめとして、多くの改善がエネルギーの変換や輸送の技術において進められてきたためにエネルギーの価格は（一時的には大きな変動はあったが）長期にわたって比較的安定してきた。しかし最近エネルギー需要の増大に伴う大量のエネルギー輸送に対して安全性、環境保全および美観、ひいては経済性、更にはエネルギー輸送技術の進歩にともなう価値観の多様化などの面でいくつかの重要な問題が生じてきている。

わが国の石油消費量は1988年で約2.8億kl、2000年には3億kl以上に増加すると予測されているが、これを20～50万トン級のタンカで中東などからわが国に運び込むことを考えるとわが国の港湾設備は超過密状態になり極めて危険な状態が予想される。巨大タンカの事故と漏油による海洋汚染はアラスカでのタンカ漏油事故や湾岸戦争によるペルシャ湾の石油海洋汚染に見られるが如くオイルフェンスによる汚染拡大を防止する以外に抜本的な対策がないまま顕在化している。特に今後地球環境問題の観点からも憂慮される問題である。

又陸上における石油やガスのパイプライン輸送は既述の如く経済性の観点からは好ましいが、しかし数十気圧から100気圧程度に加圧された油の輸送パイプが

いったん破裂すると大きな被害が予測される。更にパイプラインからの漏油による地下水汚染の可能性も考えられる。

一方電力輸送はパイプラインに比べると安全であるが、電力を大量貯蔵することが困難であるため、輸送網の運用に大きな制約を課することになりコスト高をまねいている。ところで現在電力輸送の主流は架空送電であり、そのスケールメリットの追求の観点から送電電圧の高電圧化（昇圧）、大電流化（昇流）が繰り返され、現在のわが国の最高送電電圧は500kvであるが近い将来、空気絶縁の限界と言われている1000kv級送電が運開される計画である。海外では750kv、800kv（直流）送電が既に行なわれている。

更に将来核エネルギーによる発電所の大容量集中化が予想されかつその立地は安全性や環境問題、用地取得難などの難点から遠隔化が促進されるであろう。

従って送電電力は1ルート当り数百万kW以上、送電距離も600～700kmに亘る大電力長距離送電が必要となり、送電線用地の取得も増々困難となると考えられる。そのため今後は高密度大容量長距離架空送電が必要となる。又大都市およびその近郊の電力需要は、一極集中化により更に増大し、都市部でも、大電力の送配電が増々必要となるが、用地問題、環境問題、美観、安全性などの観点から地中ケーブルの利用が余儀なくされている。このことは将来1回線で500～1000

表3 タンカ、パイプライン関連輸送方式の比較

輸 送 形 態	環境、用地などに関連輸送方式の比較	輸 送 コ ス ト
タ ン カ 石 油 天然ガス (極低温液体) メタノール	○タンカの事故、漏油による海注汚染 ○爆発などによる危険感 ○港湾設備の過密	1.0 (タンカの場合の輸送コストを1.0とし、他は指数で示す)
パイ プ ラ イ ン 石 油 石炭スラリー 水素(ガス、液体) メタノール 都市ガス	○高気圧のため事故による潜在的危険性を持つ ○液体ガスの漏洩(えい)による環境汚染(漏油による地下水汚など) ○パイプライン用地の得難	2～0.6
鉄 道 石 油 石 炭	○騒音 ○用地取得難	6～10
タン ク ク ロ ー リ 石 油 天然ガス 水 素 メタノール	○車の過密化 ○爆発などによる危険感	15～20
その他(冷凍輸送)	○冷却・冷凍媒体の爆発、漏洩による危険感	
高電圧架空 ケーブル送電	○人口過密地域での用地取得難 ○ラジオ、テレビ障害 ○高電磁界の影響	30～50

万kW程度の大電力を50~100km以上送電できる高密度大容量地中送電技術が必要となろう。一方地球環境問題や一次エネルギーの多様化の点から、クリーンで安全な中小規模分散型のオンサイト発電、例えば太陽光発電や燃料電池による住宅やコミュニティへの電力供給も進展すると予想されるが、このような電力供給システムが導入されても高密度大電力地中送電の必要性は当然変わらないであろう。以上の各輸送方式の問題点を表3<sup>1)</sup>に示す。

### 3. これからのエネルギー輸送

#### 3.1 これからの電力輸送～長距離化

既述の如く将来の電力輸送技術の方向としては、広域にわたる電力融通の促進、電力貯蔵設備の開発活用、高度情報技術によるシステム制御等を念頭に置くとともに、より小さなスペースでより大きな電力をより長距離輸送することのできる高密度大容量架空送電並びに高密度大容量地中送電の2つの方向が予想される。高密度大容量長距離架空送電としては1000kV級UHV送電と超大電流UHI送電が考えられる。UHV送電では交流1000~1200kV、直流±500kV送電技術の開発が進められ実用化の目的が得られている。特に超長距離送電(600~700km以上)にはUHV直流送電が適している。

又UHI送電は比較的短距離送電に利用されよう。

高密度大容量長距離地中送電としては高電圧の強制冷却ケーブル送電、極低温ケーブル送電、CVケーブル送電、超電導ケーブル送電が考えられるが、究極の高密度大容量長距離地中送電としては超電導ケーブル送電が適していると考えられる。最近の高温超電導材料の開発により超電導ケーブル送電の開発が加速され

ることになる。

一方送電線の布設が出来ない様な場所での電力輸送、例えば宇宙太陽発電衛星から地上に大電力を輸送する方式としてマイクロ波送電(周波数2.45GHz)の開発が進められている。総合送電効率70%程度と試算されている。以上の各送電方式の経済性について試算した一例を図-1<sup>1)</sup>に示す。同図から解る如く2000km以上の超長距離の電力輸送には、超電導直流ケーブル送電が望ましいことがわかる。

#### 3.2 これからのタンカ・パイプライン輸送

海洋汚染防止のためのタンカの二重底化と、ともに過密化海域のスーパータンカの一つの解決策として沖合ステーションの技術が開発されている。石油を先ず沖合ステーションに貯蔵し、これをパイプライン又は小型タンカで陸上に送り込む方式である。

パイプライン輸送についてはその安全性の向上や漏油対策について、二重ケーシング法や合成ゴムシート法などが開発されているが未だ不十分であろう。更に将来は水素パイプラインによる水素エネルギーシステムの構築が予想される。

### 4. 地球規模の再生エネ開発と超長距離エネルギー輸送

地球規模の再生エネ開発として次の3つの計画が検討されている。

#### 4.1 大規模水力の開発・輸送

今後大規模水力開発の可能性のあるカナダ、シベリヤ、中国、南米などにて大規模水力発電を行い、その電力を表4に示す様に液体水素、又は超高压直流送電にて世界各地に輸送する計画でEC諸国や日本で検討されている。

#### 4.2 南方洋上(又は砂漠、乾燥地)での再生エネの開発・輸送

図-2<sup>2)</sup>に示す如く何れの国にも属さない人類共有の公海上(特に太陽エネルギーなど再生エネの豊富な赤道付近)に人類共有の財産である再生エネルギー変換プラントを構築し、CO<sub>2</sub>を排出しない太陽発電、風力発電、ソーラーバイオ発電、OTECなどの複合発電を行い、その電力を表4<sup>2)</sup>の様な輸送方式で途上国を始め世界各地に配送する。特にここで超長距離電力輸送によるグローバルな電力システムの構築が出来れば地球規模の時差を利用した経済的な電力融通が可能となりその恩恵は計り知れないものがある。因みに赤道付近にその面積16万平方キロ程度の変換プラントを

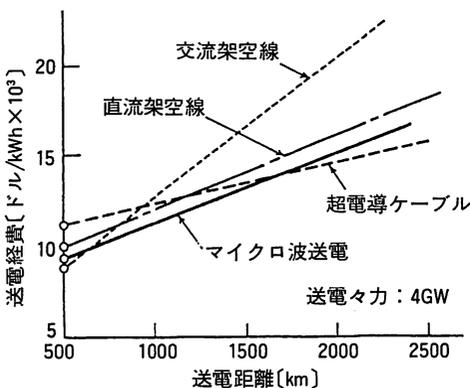
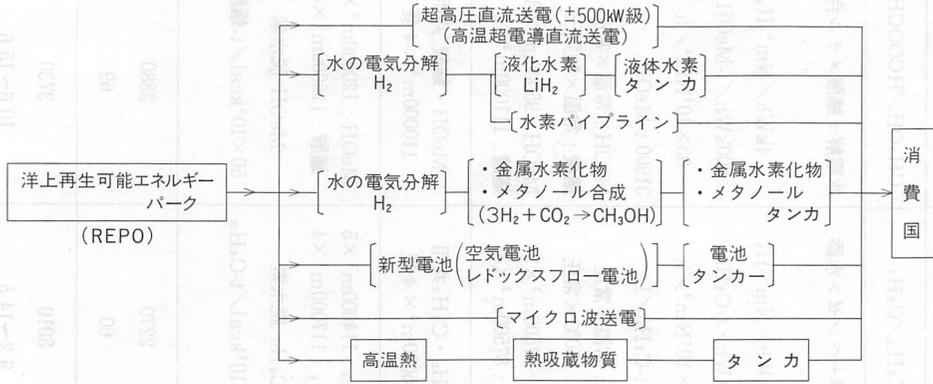


図-1 各種送電方式の経済比較の一例

表4 地球規模の長距離・高速・エネルギー輸送・貯蔵技術の例



10プラント（全海洋面積の0.4％）建設すればそれだけで2020年の世界の総エネルギー需要を充分まかなえる計算になる。勿論この様な計画の実現のためには安全な洋上浮揚構築物や表4<sup>2)</sup>の様なエネルギー・電力の超長距離輸送技術の開発が必要である。これら技術の開発は現在の科学技術をもってすれば充分可能であろう。大規模洋上浮揚プレートも最近では7000円～1万円/m<sup>2</sup>程度で設置可能である。

4.3 宇宙発電の開発・輸送

地上約36000kmの赤道上の静止軌道上に太陽発電衛星を構築し、その電力をマイクロ波（周波数2.45GHz）にて地上に伝送（伝送効率約70％）する計画である。1ユニットで500～800万kW程度の規模を考えている。

4.4 超長距離エネルギー輸送

上記の様に地球規模の超長距離エネルギー輸送方式

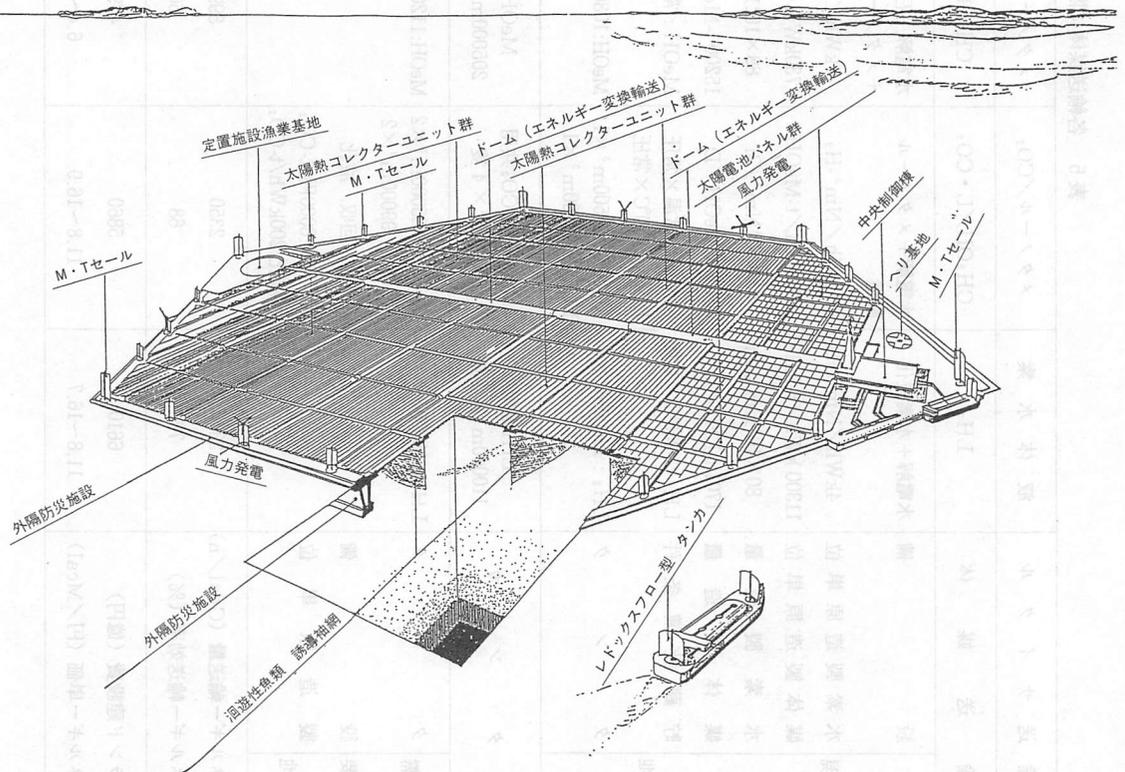


図-2 洋上再生可能エネルギーパーク構想 [Renewable Energy Park on Oceans(REPO)構想

表5 各輸送媒体に関する可能性検討結果

輸送サイクル		液体水素	メタノール/CO <sub>2</sub>	メタノール/CO	アンモニア	シクロヘキサン	メタノール/蟻酸メチル
輸送媒体		LH <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH/L・CO <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH/-	NH <sub>3</sub> /-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> /C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>3</sub> OH/HCOOCH <sub>3</sub>
ブ ラ ン ド	設 備	水電解+水素液化	水電解+メタノール製造	水電解+石炭ガス化+メタノール製造	水電解+N <sub>2</sub> 分離+アンモニア製造	水電解+ベンゼン水添	水電解+蟻酸メチル合成
	水素製造原単位	4kWh/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>	4kWh/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>	4kWh/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>	4kWh/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>	4kWh/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>	4kWh/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>
	媒体製造原単位	11300 kWh/t-LH <sub>2</sub>	800kWh/t-MeOH	730kWh/t-MeOH	280kWh/t-NH <sub>3</sub>	50kWh/t-C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	800kWh/t-MeOH
	水素製造量	80×10 <sup>4</sup> Nm <sup>3</sup> /h	91×10 <sup>4</sup> Nm <sup>3</sup> /h	89×10 <sup>4</sup> Nm <sup>3</sup> /h	86×10 <sup>4</sup> Nm <sup>3</sup> /h	98×10 <sup>4</sup> Nm <sup>3</sup> /h	93×10 <sup>4</sup> Nm <sup>3</sup> /h
	媒体製造量	1701 t-LH <sub>2</sub> /D	1040θ t-MeOH/D	15200 t-MeOH/D	10500 t-NH <sub>3</sub> /D	29500 t-C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> /D	31900 t-MeOH
貯蔵設備条件	LH <sub>2</sub> : -253℃×常圧	MeOH: 常温×常圧 LCO <sub>2</sub> : -50℃×常圧	MeOH: 常温×常圧	NH <sub>3</sub> : -34℃×常圧	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> : 常温×常圧 C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> : -50℃×常圧	MeOH: 常温×常圧 蟻酸: 常温×数気圧	
タ ン ク	LH <sub>2</sub> : 19000m <sup>3</sup> ×9	MeOH: 94500m <sup>3</sup> ×1 LCO <sub>2</sub> : 13500m <sup>3</sup> ×1	MeOH: 103000m <sup>3</sup> ×3	NH <sub>3</sub> : 53000m <sup>3</sup> ×2	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> : 87500m <sup>3</sup> ×3 C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> : 87500m <sup>3</sup> ×3	MeOH: 95000m <sup>3</sup> ×3 蟻酸: 111000m <sup>3</sup> ×2	
タ ン カ	LH <sub>2</sub> 専用 110000m <sup>3</sup> ×4隻	MeOH・LCO <sub>2</sub> 共用 63000m <sup>3</sup> ×4隻	MeOH専用 205000m <sup>3</sup> ×2隻	NH <sub>3</sub> 専用 69000m <sup>3</sup> ×4隻	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> ・C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> 共用 175000m <sup>3</sup> ×4隻	MeOH・蟻酸 共用 110000m <sup>3</sup> ×4隻	
ト 需 要 設 備 地	タ ン ク	LH <sub>2</sub> : 18600m <sup>3</sup> ×20	MeOH: 105000m <sup>3</sup> ×2 LCO <sub>2</sub> : 99000m <sup>3</sup> ×2	MeOH: 112000m <sup>3</sup> ×3	NH <sub>3</sub> : 76000m <sup>3</sup> ×3	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> : 114000m <sup>3</sup> ×5 C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> : 117000m <sup>3</sup> ×4	MeOH: 120000m <sup>3</sup> ×5 蟻酸: 116000m <sup>3</sup> ×4
設 備	製 造 原 単 位		CO <sub>2</sub> 回収, 液化 CO <sub>2</sub> 回収: 8000円/t-CO <sub>2</sub> " 液化: 200kWh/t-CO <sub>2</sub>		アンモニア分解 648×10 <sup>3</sup> kcal/t-NH <sub>3</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> 脱水素 586×10 <sup>3</sup> kcal/t-C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	MeOH脱水素 50×10 <sup>3</sup> kcal/t-蟻酸
エネルギー輸送量 (Gcal/h)		2370	2350	3990	2360	2270	2380
エネルギー輸送効率 (%)		70	68	66	68	60	69
ブランド建設費 (億円)		6610	5860	4790	2600	3010	3730
エネルギー単価 (円/Mcal)		11.8~16.7	11.8~16.9	6.4~9.4	7.6~12.2	9.2~14.5	10.6~15.6

として表4に示す様なシステムが検討されている。電力として輸送する方式としては超高压直流送電(超電導直流送電)、マイクロ波送電、新型電池の輸送船による輸送が、又他の輸送媒体としては液体水素、メタノール、アンモニア等を輸送船で輸送する方式や高温熱を熱貯蔵物やケミカルヒートポンプを利用して輸送する方式も考えられている。

電力以外の主な輸送媒体について検討した結果を

表5<sup>3)</sup>に示す。輸送効率には各方式ともに約60~70%程度と試算されている。

#### 文 献

- 1) 関根泰次, 堀米孝; エネルギー工学概論 (1979), 電気学会
- 2) 堀米孝; 地球環境問題と再生可能エネルギー開発; 太陽光発電システムシンポジウム, 1992, 6月
- 3) 萩本和彦; 海外クリーンエネルギー輸送, サンシャインジャーナル; Vol.13, No.1, 平成4年3月, p6~7

協賛行事ごあんない

## 第9回混相流レクチャーシリーズ

### 「氷蓄熱システムと混相流」参加ごあんない

- |        |  |         |   |
|--------|--|---------|---|
| 1. 主 催 | 日本混相流学会  | 6. 申込締切 | 11月24日(火)   |
| 2. 協 賛 | 化学工学会, 日本機械学会, 土木学会,<br>エネルギー・資源学会 他                                       | 7. 申込先  | 〒659 芦屋市公光町9-7-202<br>(株)学術出版印刷内<br>日本混相流学会 企画運営委員会<br>TEL 0797-38-3390   |
| 3. 日 時 | 平成4年12月2日(水)・3日(木)   | 8. 問合せ先 | 大阪市立大学工学部機械工学科 東 恒雄<br>TEL 06-605-2666; FAX 06-605-2769<br>または<br>関西大学工学部機械システム工学科 大場謙吉<br>TEL 06-388-1121, FAX 06-388-8785 |
| 4. 会 場 | 大阪市立大学文化交流センター<br>(大阪駅前第3ビル6階)<br>〒530 大阪市北区梅田1-1-3-700<br>TEL 06-344-5425 |         |   |
| 5. 参加費 | 会員 20,000円, 会員外 30,000円<br>学生 5,000円                                       |         |   |