



全エネルギー損失に占める発電、運輸及び民生での損失合計の比率は、1975年の53% (= {17.5+6+10}/63×100) から1998年の73% (= {28+7+13}/66×100) に増大し、これらの部門ではエネルギーの利用効率が低下している。この理由は、運輸と民生のエネルギー消費の増加や、電力消費の増加に伴う発電量の増加によって、エネルギー変換に伴うエネルギー損失が増加したためである。つまり、これらの部門では、エネルギー損失がエネルギー消費機器の効率改善効果を上回って増大したと考えられる。

一方、非発電（石油精製など）と産業での損失合計の比率は、1975年の47% (= {13.5+16}/63×100) から1998年の27% (= {5+13}/66×100) へ大幅に減少している。この理由は、石油精製や産業などで、工場内でエネルギーを徹底的にカスケード利用する仕組みが導入されてきたためと考えられる。

この非発電と産業でのエネルギー損失比率が他部門に比べて、大幅に減少した点に着目すると、社会全体として、エネルギー利用効率を高めるためには、図2に示すような、仕組みを構築することが重要と考えられる。

図2は石油精製や産業部門などで実施され、顕著な効果が得られたエネルギー有効利用の仕組みを、社会全体として構築するという提案である。具体的には、工場・発電所での未利用廃熱や民生・運輸での廃棄物などのエネルギーを相互に融通するフローとして形成するとともに、バイオマスなどの再生可能エネルギーの経済的な価値を高め、その使用比率を向上させることである。

産業などで発生する廃熱は、従来から燃焼予熱空気、蒸気、温水などの顕熱で回収して利用するシステムが広く用いられ、大きな省エネルギー効果を上げてきた。しかし、このシステムが民生用に適用するためには、回収した顕熱の供給量と需要量が釣り合わないという問題を解決する必要がある<sup>2)</sup>。この供給量と需要量の不均衡には、①供給地と需要地が離れている地理的不均衡、②供給と需要の時間変動が合わない時間的不均衡、③供給されるエネルギーの質では需要を満足できない質的不均衡がある。これらの問題

を解消するために従来から様々な顕熱の利用方法が考えられてきた。しかし、顕熱はエネルギーの質が低く運輸用エネルギーとして使用できないなどの本質的問題から、解決には至っておらず、回収廃熱を有効利用するためには、顕熱以外の新たなエネルギーの循環媒体を考える必要がある。

### 3. エネルギーの再循環を可能にする媒体の候補

新エネルギー循環媒体は、次の特性が必要と考えられる。

①安全性が高く既存の燃料と同程度の経済性がある。

安全性では、媒体となる物質自体が無毒であることは勿論のこと、燃焼させた後でも、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、及び粒子状物質が排出されないことが望ましい。経済性としては、単位重量あたりのエネルギー密度が高く、貯蔵や輸送が容易なこと。例えば、液体で扱えることが望ましい。

②廃熱を汎用のエネルギーとして回収できる。

廃熱をエクセルギー値の高いエネルギーで回収する。例えば、中低温の廃熱を蒸気や温水でなく、水素などの燃料として回収できる。

③バイオマスなどの再生可能エネルギーから製造できる。

様々な原料から製造できることで、普及しやすく、また、将来のエネルギーセキュリティへの対応も可能になる。

④各種の加熱炉や内燃機関などの環境対策に有効である。

将来性だけでなく、足元の対策としても従来の燃焼設備で使用することにより効果が期待できる。例えば、加熱炉やディーゼル機関などで、NO<sub>x</sub>やCO<sub>2</sub>を大幅に低減できる。環境対策は都市部へ広く適用する際の必須条件であり、広い用途は経済性を確保する上で重要になる。

⑤将来の社会インフラの整備において2重投資にならない。

行政政策の一貫性を考慮し、水素需要の増加や石油などの化石燃料の枯渇に伴う、将来のエネルギー需要構造の変化に柔軟な対応ができ、かつ防災対策の構築にも役立つという2つの視点が重要と考えられる。

これらの条件を満足するエネルギー媒体の有力な候補としてDMEが考えられる。例えば、(財)省エネルギーセンターが2000年に実施した調査結果によると、わが国の産業活動で排出される300～500℃の廃熱は108PJ/年（原油換算283万kl/年）であり、これは2000年におけるわが国の石油消費量2.89億kl/年の約1%に相当する<sup>3)</sup>。この廃熱を利用して水素（燃料）に転換するという視点で、各種の媒体を比較すると、図3に示すように、メタノールとDMEは300℃以下で水素への転換が可能なが分かる。

そこで、メタノール、DME及びDMEと異なる分子構造を有するエタノールについて、安全性、汎用性、経済性及び環境性を比較した結果を表1に示す。これより、メタノールはそれ自体が毒性を持つうえ、燃焼によって更に毒性の強いホルムアルデヒドを発生する可能性が高い。また、エ

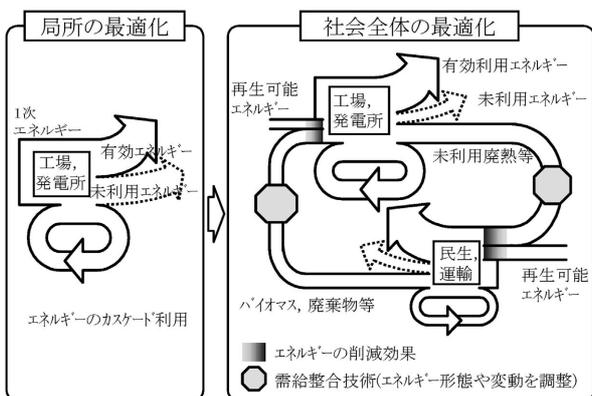


図2 エネルギー有効利用の望ましい姿

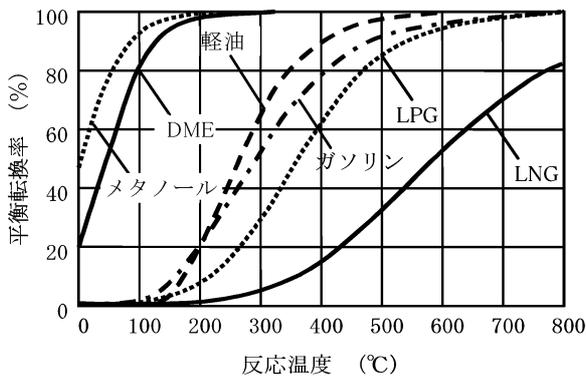


図3 各種化学媒体の水素転換特性

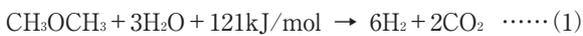
表1 エネルギー再循環の媒体としての特性比較

		CH <sub>3</sub> OH (メタノール)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O		評価	
			C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (エタノール)	CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub> (DME)		
安全性	毒性	強い	なし	なし (スプレー 噴射剤)	メタノールのみ強い 毒性を持つ	
	爆発限界(%)	5.5~36	4.3~19	3.4~17	爆発限界は同等	
	貯蔵性	沸点(°C)	64.6	78.3	-25.1	どれも液体での 貯蔵・輸送可能
汎用性	セタン価	3	8	55~60	DMEのみディー ゼルの機関へ適用 が可能	
	経済性	輸送	低位発熱量 (MJ/kg)	19.9	26.8	28.8
環境性	製造	どれもバイオマスから製造可能				
	消費 (燃料)	ホルムアルデヒド を燃焼時に 生成するリスク	燃焼時のNO <sub>x</sub> 発生が 少なく、粒子状物質も 排出しない		メタノールは燃焼時 に猛毒物質生成 のリスクあり	

タノールはセタン価が低く、ディーゼル機関への適用が難しいことなどの制約がある。以上の結果、比較した中では、エネルギー再循環の媒体にはDMEが最も望ましいと考えられることから、DMEを用いたシステムについて検討した。

4. DMEを用いた廃熱の燃料化回収・再生

DMEは(1)式の吸熱反応によって水素へ転換する。



(1)式の水素への転換反応は、図3に示したように、適切な触媒を使用すれば300℃程度の温度で進み、反応前後の熱収支は図4のようになる。

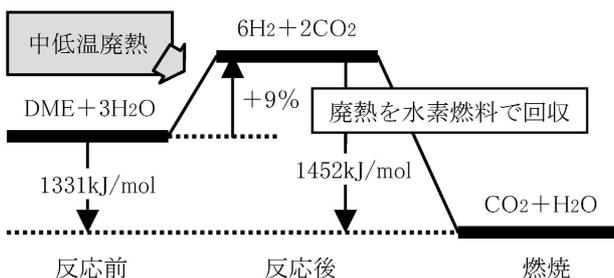


図4 DMEの水素転換特性

反応前後を比較すると、反応後における水素の燃焼熱は、反応前のDMEの燃焼熱よりも約9%増加することから、この反応を用いれば、中低温廃熱の顕熱を水素の燃焼熱として回収できることがわかる。

水素は密度が低く、利用拡大のためには、その輸送や貯蔵方法が課題である。300℃以上の廃熱は、発電や工場からの燃焼排ガスなどとして排出されているため、DMEを用いれば、輸送や貯蔵が容易な上、廃熱を水素で回収できるため、水素を使う燃料電池の普及に伴って、工場や発電の廃熱を民生・運輸用途のエネルギーに活用できるようになる。

また、DMEは(2)式の吸熱反応によってCO<sub>2</sub>をCOとH<sub>2</sub>の混合気体へ転換する。この混合気体は濃度100%のCO<sub>2</sub>を用いた場合には、11700kJ/Nm<sup>3</sup>の低位発熱量が得られ、工業用燃料として使用することができる。



(2)式の反応は(1)式の反応と同様に、適切な触媒を使用すれば、300℃程度で反応を進めることができ、反応前後の熱収支は図5のようになる。

本反応では、反応後における水素とCOの混合気体の燃焼熱は、反応前のDMEの燃焼熱よりも約18%増加する。したがって、この反応を利用すれば、燃焼排ガスなどのCO<sub>2</sub>と廃熱を燃料として回収・再生し、工場や発電所などでの再利用が可能になる。この方法は、エネルギーを再循環するだけでなく、CO<sub>2</sub>も直接に再循環できるため、DMEを用いれば、従来にはない極めて画期的なエネルギーの社会再循環システムを構築できると考えられる。

なお、DMEは燃料としても次の特徴を持っている<sup>4)</sup>。

- ①ディーゼル機関の燃料としての適性：DMEはディーゼル機関の燃料として、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、粒子状物質などの環境汚染物の排出を大幅に低減することができる。
- ②バイオマスや一般廃棄物の有効利用：DMEはCOとH<sub>2</sub>から合成でき、バイオマスや一般廃棄物をガス化することで、DMEを製造することができる。バイオマスや廃棄物をDMEにすれば、貯蔵や流通がしやすくなる。
- ③防災対策への活用：常温で気体又は液体として扱え(沸点-25℃、常温下6気圧以上で液体)、地震などでパイプ

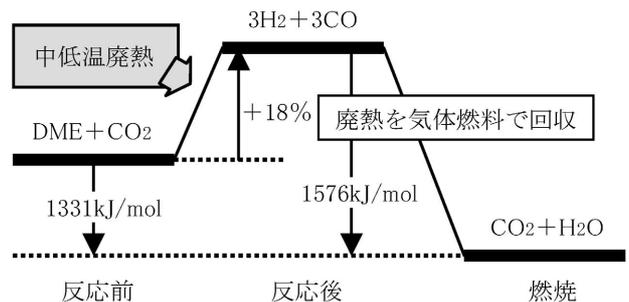


図5 DMEの燃料転換特性

ラインや送電線が遮断しても、独立して必要最小限のエネルギーが確保できる仕組みを構築することができる。

5. 検証実験

(1)式によるDMEの水素転換反応は300℃でどの程度可能か、図6に示すような実験装置を用いて検証した。触媒には銅系触媒を用い、大気圧下300℃で検証実験を行った。実験結果はDME転化率とH<sub>2</sub>選択率で評価した。

DME転化率は、DMEが水素やメタノールなど他の物質に転換した割合を示す指標として、(3)式により算出した。

$$\text{DME転化率} = (F_{\text{DMEin}} - F_{\text{DMEout}}) / F_{\text{DMEin}} \times 100 \dots\dots (3)$$

H<sub>2</sub>選択率は、転換したDMEのうち(1)式の通り水素に転換した割合を示す指標として、(4)式により算出した。

$$\text{H}_2\text{選択率} = 1/6 \times F_{\text{H}_2\text{out}} / (F_{\text{DMEin}} - F_{\text{DMEout}}) \times 100 \dots\dots (4)$$

- 但し、F<sub>DMEin</sub>：反応前のDME流量 [mol/h]、
- F<sub>DMEout</sub>：反応後のDME流量 [mol/h]、
- F<sub>H<sub>2</sub>out</sub>：反応後の水素流量 [mol/h]

図7にDME転化率とH<sub>2</sub>選択率の結果を示す。また、図8に反応後の出口ガス組成の結果を示す。

図7において、Wは触媒重量 [g-cat] であり、FはDMEとH<sub>2</sub>O合計の流量 [mol/h] である。

図7より、W/Fが12以上の条件で、DME転化率が100%となり、同時に水素選択率も100%にできることが分った。また、図8より、水蒸気改質の過程で生成するメタノール

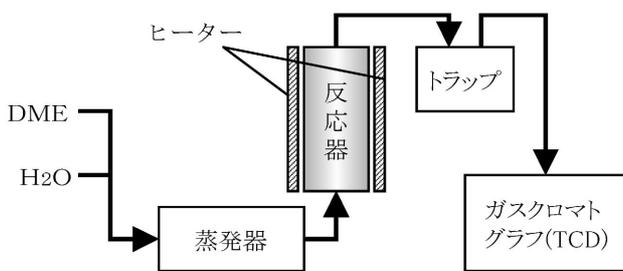


図6 実験装置

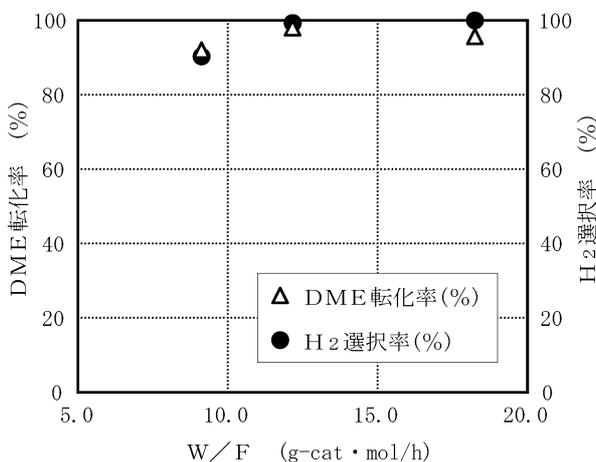


図7 DME水蒸気改質実験結果

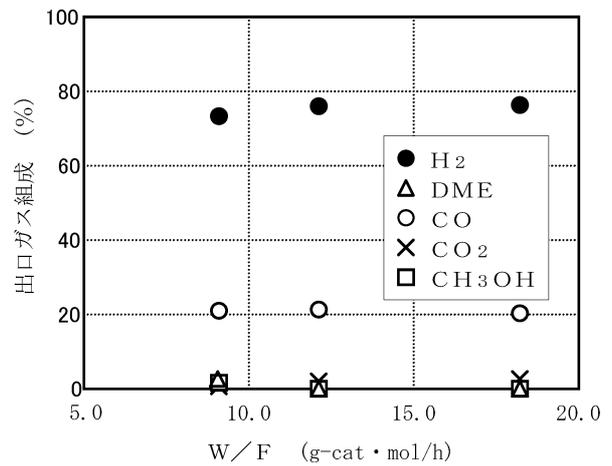


図8 DME水蒸気改質実験結果

もほぼ完全に水素へ転化できていることが分かる。

以上の結果、DMEを用いて300℃以上の廃熱を水素として回収できる可能性を検証できた。

6. 廃熱の燃料化回収の効果

燃焼設備のCO<sub>2</sub>を削減するためには、単位発熱量当りの炭素含有量が少ない天然ガスへの燃料転換が有効と考えられる。そこで、DMEを用いた廃熱燃料化回収システムの導入で期待される効果を、図9に示すような、天然ガスを燃料とした発電、加熱及び水素発生の仮想設備群で検討した。図9において、DMEの水素やCO<sub>2</sub>への転化率は95%とした。

DMEを用いた廃熱燃料化回収システムを適用した場合のエネルギー消費とCO<sub>2</sub>の削減効果の結果を表2に示す。表2より、図9のケースでは、DMEを用いた廃熱燃料化回収システムを適用することにより、天然ガスだけを使った場合に比べ、「加熱炉+水素製造」の燃料消費量が23%、また

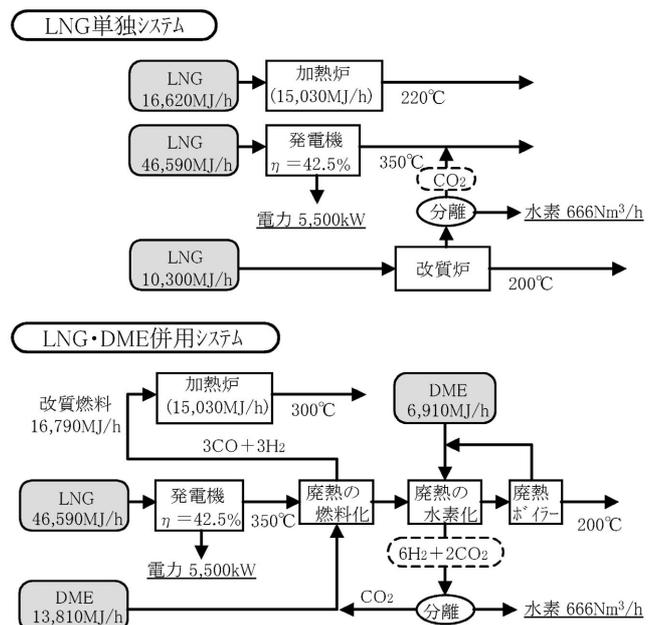


図9 LNGとDME廃熱回収の併用システム

表2 DMEを用いた廃熱回収システムの効果

	LNG単独システム		LNG・DME併用システム	
	燃料消費 (MJ/h)	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg/h)	燃料消費 (MJ/h)	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg/h)
発電	46,590	2,614	46,590	2,614
加熱炉	16,620	932	13,810	915
水素製造	10,300	578	6,910	458
「水素製造 + 加熱炉」	26,920	1,510	20,720	1,373
燃料消費	基準		-23.0%	
CO <sub>2</sub> 排出		基準		-9.1%

CO<sub>2</sub>排出量で9%の削減が可能なが分かった。つまり、DMEを従来燃料の単なる代替として使うのではなく、天然ガスなどと併用した燃料化回収システムとして使うことにより、燃料消費とCO<sub>2</sub>排出量の両方で大きな削減効果が期待できることが分かった。

特に、燃料消費量の削減効果は、DMEが従来燃料と比較して1.3[=1/(1-0.23)]倍の価格であっても、従来燃料と同等の経済性を持ちつつCO<sub>2</sub>排出量のみ9%削減できることを意味する。

将来において、この燃料削減による経済性を利用してDMEを産業副生成物、廃棄物、バイオマスなどから製造できれば、更に大幅なCO<sub>2</sub>排出量の削減が可能になる。

## 7. 廃熱の燃料化回収・再生を利用したエネルギー循環

DMEの水素転換反応及びCO<sub>2</sub>との燃料転換反応を利用した廃熱の燃料化回収と、DMEの燃料としての特性を生かすと、図10に示すような、社会におけるエネルギーの再循環利用システムを構築することができる。

図10のより具体的イメージとして、例えば、図11に示すようなエネルギー需給システムが考えられる。

図11のように、工場内で余剰廃熱があるケースを考えると、工場の燃料として使用するDMEの一部は工場に隣接したステーションへ供給でき、また、廃熱から回収した水素を同じステーションへ供給することができる。これにより、DMEと水素兼用ステーションを容易かつ汎用的に構築でき、DMEはトラック、バスなどの大型ディーゼル車の燃料として供給する一方で、燃料電池自動車へは水素を供給することができる。このステーションでは、燃料電池自動車が改質器を車載する方式にはDMEを供給し、車載しない方式には水素を供給することで、燃料電池自動車が何れの方式を採用しても、そのどちらにも燃料を供給できる。

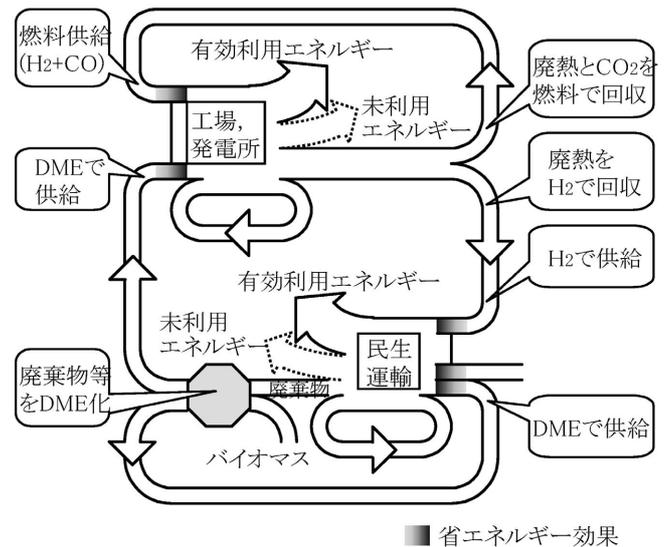


図10 DMEを用いた社会のエネルギー再循環利用図

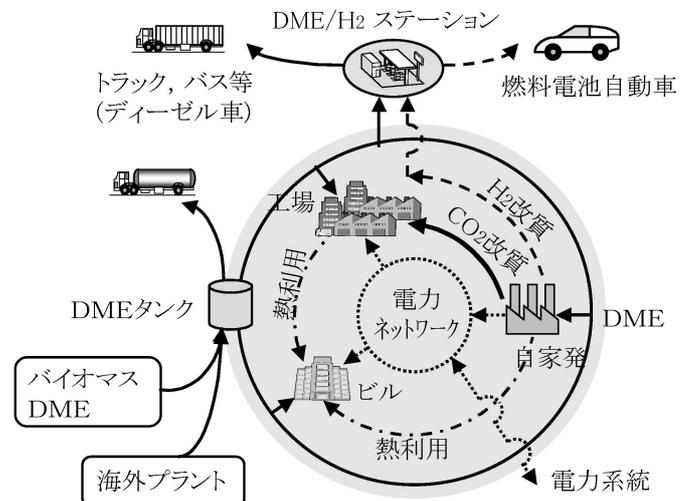


図11 産業でのエネルギー循環のイメージ

## 8. まとめ

DMEとH<sub>2</sub>O又はCO<sub>2</sub>を用いて、300℃以上の廃熱を水素や燃料ガスで回収できることを明らかにした。これらの廃熱回収法を用いて、工場や発電所で発生する廃熱を民生や運輸用途のエネルギーとして利用することで、社会全体のエネルギー循環が形成でき、環境・防災対策を進めつつ、大幅な省エネルギーとCO<sub>2</sub>削減が図れることを示した。

## 参考文献

- 1) 平田賢；日本機械学会RC185資料，(2001)。
- 2) 中川二彦；DMEを用いたエネルギー利用の高効率化，日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集，04-28 (2004)，321-322。
- 3) 省エネルギーセンター；広域エネルギーネットワークシステム開発 エネルギーシステム設計技術の研究，工場群の排熱実態調査研究要約集，(2001)。
- 4) Y. Ohno, et al. ; OIL GAS European Magazine, 2 (2001), 35-39。