

■ 研究論文 ■

最適化型エネルギーシステムモデルによるハイブリッドメタノール製造システムの評価

Evaluation of the Hybrid Methanol Production System Using Linear Programing Model

木曾文彦*・嵐紀夫**

Fumihiko Kiso Norio Arash

(1995年5月15日原稿受付・1996年2月9日原稿受理)

Abstract

We have proposed a new methanol production system using both coal gasification and methane (Natural Gas) steam reforming simultaneously. This system intends to transport the energy source from abroad to Japan. This system makes best use of heat and materials from coal gasification and methane steam reforming, so the efficiency of the system is expected to reach 80% and this value is 10~15% (absolute value) higher than that of the existing methanol production system. We also conducted the evaluation of this system especially under the strict CO₂ constraints. We use the linear programing model named MARKAL for evaluation which optimizes the Energy usage of Japan from 1983 to 2027. We show that the methanol made by this system can be the fuel for automobiles instead of gasoline. Methanol use for the automobile also useful to decrease NOx emission in the urban area. There exists a country that produces both coal and natural gas and we concluded that this system can contribute the stable energy supply for Japan in the near future under the strict environmental constraints.

1. はじめに

21世紀を担う新たなエネルギー供給システムに対してはCO₂排出量が少ないなど、環境負荷の小さいことが要求される。例えばエネルギー源として天然ガスを利用するシステムと石炭を利用するシステムを比べた場合、多少コストが高くなっても天然ガスを利用するシステムが有利というのが一般的な見解である。しかし、石炭には埋蔵量が豊富でコストが低く、150年以上にわたって安定供給が可能という魅力がある。この長所を生かして石炭利用システムをエネルギーシステムに組み込むためには、環境負荷低減のための高効率化が不可欠である。そのための方法として期待される

のが石炭ガス化技術である。

空気吹き石炭ガス化技術は発電分野にしか適用できないが、世界標準となった酸素吹き石炭ガス化技術を用いれば高効率石炭ガス化発電が実現できるだけでなく、燃料製造などへの応用が可能となる。本論文ではこの酸素吹き石炭ガス化で得られるガスと天然ガスを原料としてメタノールを製造するハイブリッドシステムを提案した。このシステムは図-1に示すように海外

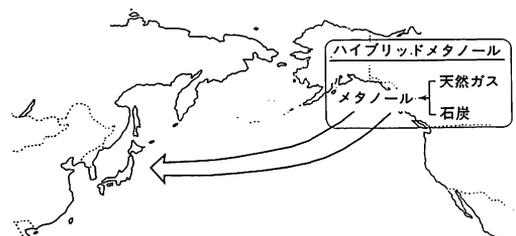


図-1 ハイブリッドメタノール製造システムの概念

* (株)日立製作所 日立研究所新火力システムグループ

** " " 環境技術研究センター

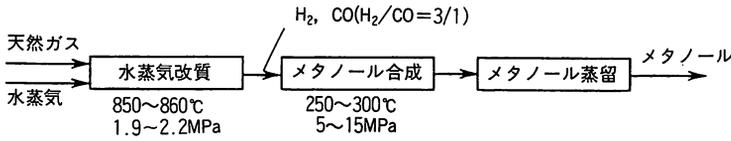


図-2 天然ガス利用メタノール製造システム 変換効率：約70%

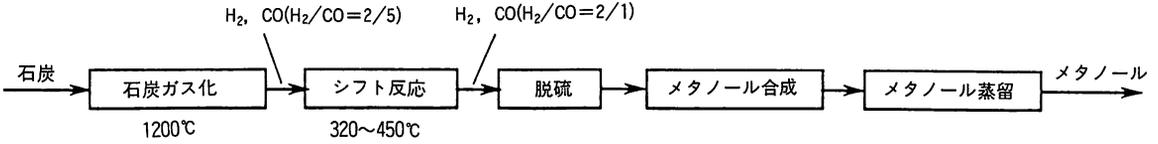


図-3 石炭利用メタノール製造システム 変換効率：約65%

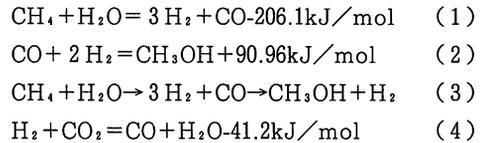
のエネルギーを高効率で日本へ輸送し、エネルギーの安定供給に寄与すると同時に環境問題へ対応することを目指しており、導入可能性を最適化型エネルギーシステムモデル (MARKAL Model) によって評価した。

2. 従来のメタノール製造方法

2.1 天然ガスを原料とする方法¹⁾²⁾³⁾

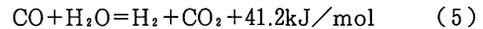
メタノールを工業的に得る代表的な方法は天然ガスを水素と一酸化炭素に改質し、この混合ガスから合成する方法である。図-2に概略を示す。天然ガスのH₂/CO混合ガスへの改質は(1)に示した反応式により、メタノール合成は(2)式に示した反応による。したがって天然ガスからメタノールを製造する方法では(3)式で示すようにメタン1 molから得られる水素3 molのうち、メタノール合成に使われるのは2 molであり、水素1 molが無駄になる。ここでH₂/CO比をメタノール合成に適した値とするために(4)式で示す逆シフト反応を用いることが考えられる。この反応に必要なエネルギーは小さいのでこの反応を利用したとしても効率を大きく損なうことはないが、CO₂製造プラントが近くにない場合は現実的でない。このような点から天然ガスのメタノールへの変換効率は約70%にとどま

ている。



2.2 石炭を原料とする方法

天然ガスを利用する方法以外では石炭ガス化を利用する方法がある。図-3に概略を示す。石炭のガス化によって得られるH₂/CO混合ガスのH₂/CO比は約0.4なので、(5)式に示すシフト反応を用いてメタノール合成に適した混合比に調節する。酸素を用いる現在のガス化技術の冷ガス効率は78~80%なので⁴⁾⁵⁾、排熱を一部利用したとしても石炭のメタノールへの変換効率は65%程度にとどまる。なお、(5)式に示すシフト反応を用いることで変換効率は大きく低下しないが、系内に水を投入することによりエクセルギーは低下し、排熱の回収が困難になる。



3. ハイブリッドメタノール製造システム

2節で示したように従来のメタノール製造システムでは、天然ガスを原料とした場合は水素が無駄になり、石炭ガス化を利用した場合はガス化効率の制約により、

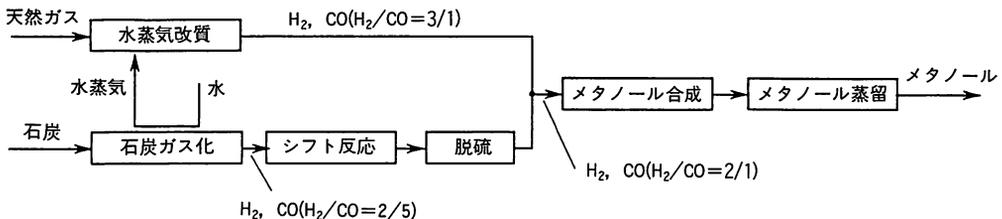


図-4 ハイブリッドメタノール製造システム 変換効率：約80%

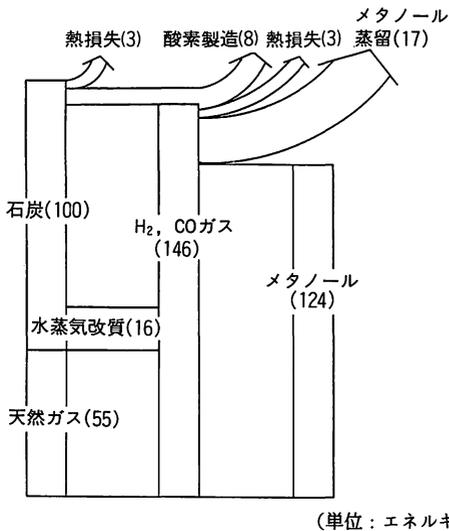


図-5 ハイブリッドメタノールの熱収支

メタノールへの変換効率を高めることができなかった。そこで原料として天然ガスと石炭の両方を用い、従来のシステムの欠点を補って高効率化するハイブリッドメタノール製造システム（以下、ハイブリッドメタノールシステムと略記する）を考案した。図-4にシステムの概略を示す。

変換効率が向上できるのは以下の2点による。まず天然ガスを水蒸気改質して得られる水素含量の大きい H_2/CO ガスと石炭ガス化によって得られる一酸化炭素含量の大きい H_2/CO 混合ガスを混合することにより、ガス組成をメタノール製造に適した H_2/CO 比以下にすることができる。一酸化炭素から水素へのシフト反応は効率を下げる原因とはならないため、天然ガスのみを用いた場合に無駄になっていた水素を有効利用することができる。次に石炭ガス化装置からの排熱を水蒸気として回収し、この水蒸気を天然ガスの改質に利用する。したがって天然ガスのみを使う場合のように天然ガスの一部を燃料用とする必要がなくなる。天然ガスと石炭の投入割合を調節することにより、投入エネルギーのメタノールへの変換効率は最大で約80%となる。図-5にこの場合の熱収支を示す。

4. システム評価の方法

システムの評価には代表的最適化型エネルギーシステムモデルであるMARKALモデルを用いた。以下にその概要を示す。

4.1 MARKAL Modelの概要⁶⁾

MARKAL Model (Market Allocation Model)

は国家レベルのエネルギーシステムの解析を目的とし、IEA (International Energy Agency) のETSAP (Energy Technology System Analysis Project) で開発されたモデルである。このプロジェクトには日本、アメリカ、ドイツ、イギリスなどの14カ国が参加している。日本からは日本原子力研究所、電子技術総合研究所が参加し、この2機関が日本のエネルギーシステムをモデル化しており、例えば発電分野での CO_2 低減ポテンシャルの評価⁷⁾、海外クリーンエネルギー導入の可能性の評価⁸⁾などに利用されている。MARKAL Modelには以下のような特徴がある。

(1) エネルギーシステムの構成要素であるエネルギー源、精製・変換技術、利用技術、最終需要をエネルギーの流れに注目して結びつける。この要素と要素を結ぶパスに流すべきエネルギー量を主な変数とし、エネルギー源価格、技術データ（コスト・効率・環境排出係数など）および最終需要は外生のシナリオとして与える。なお、これらのパスとシナリオは1983年から2027年までの45年間を1期5年として9期に分割して用意している。

(2) 目的関数としてシステム全体で必要となるコスト、 CO_2 排出量などを用い、線形計画法によって目的関数を満たす最適なエネルギーフローを求める。

(3) 種々の社会的制約、例えば電力需要のピーク負荷に対応できるシステムであること、 NO_x 、 SO_x の排出量がある上限を越えないことなどの制約を用意することで、現実に即した解析ができる。

4.2 解析の設定

以下に今回の解析の設定を簡単に示す。

(1) エネルギーシステムの構成

従来のモデルには石炭ガス化利用システムとして都市ガス製造、石炭ガス化複合発電 (IGCC)、従来型メタノール製造が組み込まれている。今回の解析では従来のメタノール製造システムとは別に、ハイブリッドメタノールシステムを海外に設けた。なお、海外での製造に伴う環境排出も日本で使用するエネルギー製造に伴うものであれば日本が責任を負うべきものなので、日本で排出したとして計上している。

(2) 主要なシナリオ

基本的には電子技術総合研究所で開発されたモデル⁶⁾のシナリオに従っている。以下に概略を示す。

・エネルギー源価格：日本エネルギー経済研究所の見通し⁹⁾などを参考にしてLNGおよび原油の価格は年率約1.9%、石炭の価格は年率約1.1%で上昇するとし

た。

海外天然ガス価格シナリオは従来のモデルに組み込まれていなかったため、今回新たに作成した。ここで海外天然ガス価格シナリオは国内LNG価格シナリオと整合性のあるものでなければならない。そこで以下に示す仮定を用い、便宜的に国内LNG価格シナリオから海外天然ガス価格シナリオを導出することにした。すなわち、国内LNG価格の約10%が原料ガスコスト、40%が海上輸送コストとされている¹⁰⁾ので、海外天然ガスの原料コストは国内LNG価格の10%とし、海外天然ガスの輸送はパイプライン(1,000km以下)を利用すると仮定して輸送コストは各種天然ガスプロジェクトの実績値¹¹⁾を参考にLNG海上輸送コストの半額とした。海外天然ガス価格はこの原料コストと輸送コストを足しあわせたものとしたが、結果的には海外天然ガスの価格設定を便宜的に国内LNG価格の30%としたことに相当する。また、海外で生産したメタノールを日本へ輸送するコストは0.40 \$/GJ(1985年ドルベース)とした。

・ハイブリッドメタノールシステムの技術データ：従来のモデルに含まれるメタノール製造システムのデータとの整合性を保つため、従来のデータを元に割り出した(導出アルゴリズムの詳細は付録に示す)。例えば建設費はハイブリッドメタノールシステム：天然ガス：石炭=1:0.4:1.2(単位メタノール製造設備あたり)に設定してある。またNO_x排出量の計算に用いた排出係数の一部を表1に示す。

・エネルギー需要：総合エネルギー調査会の見通し⁹⁾などを参考に年率約1.2%で増加するとした。

(3) 目的関数

目的関数には(5)式に示す、割引総システムコストと日本からのCO₂総排出量を線形結合したものをを用いた。

$$[\text{目的関数}] = [\text{割引総システムコスト}] + \alpha \times [\text{CO}_2\text{総排出量}] \quad (5)$$

表1 メタノール製造及び自動車のNO_x排出係数 (kg/GJ)

天然ガス利用メタノール製造	0.0042
石炭利用メタノール製造	0.0230
ハイブリッドメタノール製造	0.0610
ガソリン自動車A	0.863~0.602
ガソリン自動車B	0.431~0.301
メタノール自動車A	0.239~0.167
メタノール自動車B	0.119~0.084

(自動車の表示は「1985年の値~2025年の値」)

ここで割引総システムコストはモデルで扱う45年間の日本のエネルギーシステム全体での費用を現在価値換算したもので、 α は日本からのCO₂総排出量をコストに換算する係数である。この α の大きさ、すなわちCO₂規制の厳しさは最適化計算の実行結果から得られる日本からのCO₂総排出量と日本が気候変動枠組条約で掲げた目標(国民1人あたりのCO₂排出量を2000年までに1990年レベルで安定化する)を比較することで評価できる。

5. 解析結果

5.1 CO₂排出規制と石炭ガス化技術

図-6に従来のモデルとハイブリッドメタノールシステムを組み込んだ新しいモデルでの石炭ガス化技術への累積石炭投入量を示し、新モデルについては日本全体でのCO₂排出量も示す。なお、従来モデルでのCO₂排出量は新モデルとは若干異なるが、ここでは割愛する。

(1) 従来のモデルでの石炭ガス化技術の評価

従来のモデルで解析した結果では、図-6に示したように石炭ガス化技術を含むシステムで使用されるのは石炭ガス化複合発電システム(以下IGCCと略記する)のみだった。しかし、IGCCもCO₂排出規制の強化に伴って減少し、CO₂排出量の1990年レベルでの安定化を2010年よりも前に達成するためには使用できないという結果になった。これは最適化を行う目的関数にコストとCO₂排出量しか含まれていないため、多少極端な解が得られていることにもよるが、CO₂排出規制下ではIGCCは不利と言える。

(2) 新モデルでの石炭ガス化技術の評価

新たに作成したモデルで解析した結果、石炭ガス化技術を含むシステムで利用され得るのはIGCCと海外で稼働させるハイブリッドメタノールシステムだけであった。CO₂排出規制がなければ両システムへの石炭投入量はほぼ同じになる。CO₂排出規制をかけると従来のモデルでの解析と同じくIGCCへの石炭投入量は控えるのが適当という結果になるが、ハイブリッドメタノールシステムへの石炭投入量は大きく減らす必要がなく、IGCCの場合よりも石炭ガス化の利用を拡大しながら、なおかつ日本全体でのCO₂総排出量をほぼ同じ値に抑えることができている。石炭ガス化の利用が拡大してもCO₂総排出量が増加しなかった理由は、大きくはモデル中で以下の2つのメカニズムが働いたことによる。すなわち自動車燃料のメタノールへの代替が

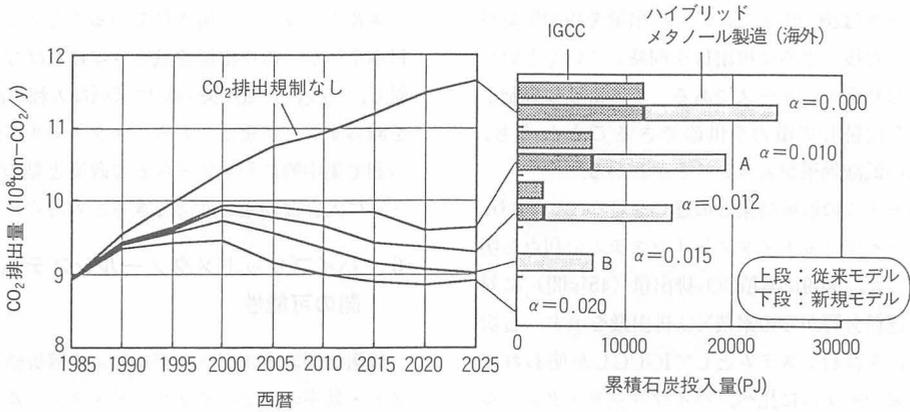


図-6 CO₂排出量の石炭ガス化技術での石炭利用量の関係

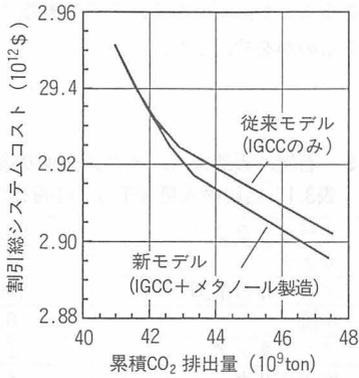


図-7 CO₂排出量とコストの関係

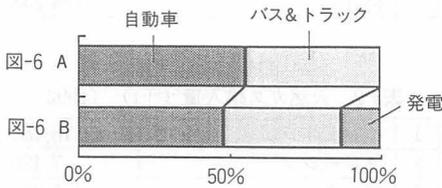


図-8 メタノールの利用形態 (45年間の合計)

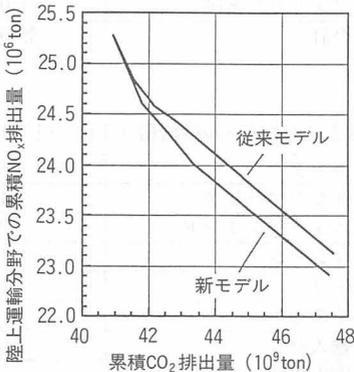


図-9 CO₂排出量とNO_x排出量の関係

進み石油の消費量が減少したこと。(5)式に示した目的関数を用いており、低コストの石炭を利用することでコストに余裕が生じた分、コストが高くてもCO₂排出源単位の小さいLNG、自然エネルギーの利用量が増加したことによる。図-6に示したように α の値を0.020とすると石炭ガス化技術は利用されていない。しかし、この場合のCO₂排出量をみると1985年レベルに安定化するという高い目標が達成されており、日本人一人あたりのCO₂排出量は現状でもアメリカ合衆国などと比べて低いことを鑑みるとここまでの規制は必要ないと考えられる。ハイブリッドメタノールシステムは日本に要求されるレベルのCO₂排出規制下において、石炭ガス化技術を生かすことのできるシステムと言える。

5.2 ハイブリッドメタノールシステム導入の効果

ハイブリッドメタノールシステムによって石炭ガス化技術が生かされることがわかったが、これは基本的には単位エネルギー消費量あたりのコストおよびCO₂排出量が小さく、コストとCO₂排出量を最小化するという目的のもとで有利だからである。図-7に45年間の累積CO₂排出量に対する割引総システムコストを示す。石炭ガス化技術を含むシステムとしてIGCCしか使われていない従来のモデルに比べ、ハイブリッドメタノールシステムを組み込んだモデルでは累積CO₂排出量と同じであっても割引総システムコストが低く抑えられている。

図-8にハイブリッドメタノールシステムが組み込まれている図-6のA、Bのケースでのメタノール利用形態を示す。図-8のAとBを比較すると、Bのケースでは自動車、バス&トラックでの利用に加え、メタノールコンバインドサイクル発電が利用されている。Bで

示したケースは2010年までにCO₂排出量を1990年レベルに落とした後、さらに排出量を削減していくという規制のかなり厳しいケースである。このような規制下でIGCCに代替して電力を供給できることから、CO₂排出の低減効果が大きいことがわかる。

従来のモデルの解析結果との違いを見ることにより、この他のハイブリッドメタノールシステムの利点も明らかになった。図-9に累積CO₂排出量（45年間）に対する陸上運輸分野からの累積NO_x排出量を示す。石炭ガス化技術を含むシステムとしてIGCCしか使われていない従来のモデルに比べ、ハイブリッドメタノールシステムを組み込んだモデルでは、累積CO₂排出量が同じであっても陸上運輸分野からのNO_x排出量が低減されている。具体的には例えば累積CO₂排出量が44×10⁹tonの時、累積NO_x排出量が約1%低減されている。これは図-8に示したように、メタノールが主に自動車、

バス&トラックに利用されていることによる。CO₂は日本全体からの排出量を減らさなければならないのに対し、NO_xは大気汚染の特に深刻な大都市圏での排出を減らすことが重要である。メタノール自動車を大都市圏で集中的に利用するなどの政策と結び付ければ、さらに大きな効果が期待できると考えられる。

6. ハイブリッドメタノールシステムの海外展開の可能性

最適化型エネルギーモデルによる解析結果から、コスト・効率の面でハイブリッドメタノールシステムは実用的であることがわかったが、実用化するためにはさらに立地条件として石炭と天然ガスの両方が容易に入手できることが必要である。そこで実際にそのような国があるのかを検討した。

表2 石炭、天然ガスの生産量（1990）

表2.1 石炭生産量（千t）

1	中国	1,080,000
2	アメリカ合衆国	861,434
3	旧ソビエト	543,000
4	インド	201,829
5	南アメリカ	174,784
6	オーストラリア	159,417
7	ポーランド	147,000
8	イギリス	89,303
9	旧西ドイツ	76,354
10	北朝鮮	40,700
11	カナダ	37,672
12	旧チェコ・スロバキア	22,770
13	コロンビア	20,468
14	韓国	17,217
	その他	94,124
	世界	3,566,072

表2.2 天然ガス生産量（1000兆J）

1	旧ソビエト	27,733
2	アメリカ合衆国	17,542
3	カナダ	3,992
4	オランダ	2,541
5	アルジェリア	1,975
6	イギリス	1,904
7	インドネシア	1,579
8	ノルウェー	1,131
9	サウジアラビア	1,101
10	メキシコ	1,011
11	ルーマニア	959
12	ベネズエラ	956
13	イラン	934
14	アルゼンチン	793
	その他	9,115
	世界	73,266

表3 石炭、天然ガス、メタノールの輸入量

表3.1 石炭輸入量（千t）（1992）

1	オーストラリア	60,046
2	カナダ	14,664
3	アメリカ合衆国	11,531
4	中国	6,054
5	インドネシア	5,488
6	南アフリカ	5,271
7	ロシア	3,854
	その他	1,345
	合計	108,253

表3.2 天然ガス輸入量（千t）（1992）

1	インドネシア	18,186
2	マレーシア	7,420
3	ブルネイ	5,353
4	オーストラリア	4,595
5	アラブ首長国連邦	2,476
6	アメリカ合衆国	1,038
	合計	39,068

表3.3 メタノール供給量（千t）（1990）

1	カナダ	674
2	サウジアラビア	408
3	ニュージーランド	211
4	マレーシア	177
5	チリ	126
6	その他	50
	輸入計	1,646
	国内生産	84

6.1 石炭, 天然ガス生産量からの検討

石炭および天然ガスの主要生産国での生産量(1990年)を表2に示す¹²⁾。旧ソビエト, アメリカ, イギリス, カナダは石炭, 天然ガスとも生産量が多い。このような国では産地が隣接していない場合であってもガスパイプライン網が整備されているため天然ガスを石炭産地に輸送することが容易であり, ハイブリッドメタノールシステムの実用化に適している。また, ヨロッパは天然ガスパイプライン網が整備されており, これを利用して天然ガスを石炭産地まで運搬し, ハイブリッドメタノールシステムを利用することは可能であろう。また, アメリカや西欧では自動車の排ガス規制の強化に伴ってガソリン混入MTBE(メチル-tert-ブチルエーテル)製造用のメタノール需要が伸びており, 低コストメタノール製造システムに対する潜在的な需要がある。

6.2 石炭, 天然ガス, メタノールの日本への輸出国の可能性

表3に日本の石炭, 天然ガスおよびメタノールの輸入量を示す¹³⁾。オーストラリア, インドネシアは天然ガス, 石炭ともに日本への輸出量が多い。このような国では日本への輸出が大きな位置を占めている点から日本が資本参加してプラントを建設していく下地がある。また, カナダはメタノールの日本への輸出国であると同時に, 石炭, 天然ガスの産出量が多い国でもある。カナダでは現状のメタノール製造設備に石炭ガス化設備を追加する形でハイブリッドメタノールシステムを実現することが可能だろう。

6.3 中国での可能性

日本の近くでハイブリッドメタノールシステム導入の可能性があるのは中国である。例えば四川省の重慶(チョンチン), 成都(チョンツー)付近は石炭と天然ガスの両方が産出する¹⁴⁾。1992年の中国の四川省の石炭生産量は7,100万t/y(中国全体の6.4%), 天然ガスの生産量は67.1億Nm³/y(中国全体の42.5%)であった¹⁵⁾。これは1,000t/dクラスのメタノール製造プラントを作るには十分な生産量である。

7. まとめ

海外のエネルギーを高効率で日本へ輸送し, エネルギーの安定供給に寄与すると同時に環境問題に対応するシステムとして, 石炭ガス化ガスと天然ガスを原料としてメタノールを製造するハイブリッドシステムを提案した。このシステムのエネルギー変換効率は約80

%で, 従来のシステムに比べて10~15%高効率である。このシステムの導入可能性をMARKAL Modelによって評価し, 以下の結論を得た。

(1)CO₂規制下であっても主に自動車などの燃料供給システムとして利用が可能であり, 石炭ガス化技術を生かすことのできるシステムである。

(2)厳しいCO₂規制下では, IGCCに代替してこのシステムで製造したメタノールを用いたコンバインドサイクル発電が利用できる。

(3)自動車用のクリーンな燃料を供給できることからNO_x低減にも寄与する。

また, 実際に石炭と天然ガスを産出する国が存在することから, ハイブリッドメタノールシステムは21世紀のエネルギー供給システムのひとつになり得ると考える。ハイブリッドメタノールシステムを実現するためにはさらに実験による検証, 詳細なシステム設計が必要であるが, これらは今後の課題とする。

謝辞

末筆ながら本研究を遂行するにあたり, MARKAL Modelによるシステム分析に関して多大な御指導を賜った, 工業技術院電子技術総合研究所の黒川浩助氏, 村田晃伸氏, 加藤和彦氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 野沢伸吉, 橋本佳法; メタノール, 化学工学, Vol.46, No.9 (1982), 507~518
- 2) 触媒学会編; 触媒講座6 触媒反応装置とその設計 (1985), 講談社
- 3) 与志耶紀; 奔流となる天然ガスメタノールサイクル発電, 季報エネルギー総合工学 (1992), エネルギー総合工学研究所
- 4) 佐藤昌男他8名; 将来型石炭火力技術, 火力原子力発電, Vol.44, No.10 (1993), 1201~1234
- 5) 宮寺 博他6名; 石炭利用水素製造技術(HYCOL)の開発, 日エネ誌, Vol.74, No.8 (1995), 691~698
- 6) 遠藤栄一, 小山茂夫; エネルギーシステムモデル MARKALの実用化と応用に関する研究, 電総研研報第869号 (1986), 電子技術総合件研究所
- 7) 村田晃伸, 加藤和彦, 清水定明; 発電技術の二酸化炭素排出低減効果の動学的システム分析, 電学論B, Vol.114, No.10 (1994), 969~978
- 8) 加藤和彦, 村田晃伸, 黒川浩助; 海外クリーンエネルギーの導入に関するシステム分析, 第11回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 (1995), 337~342
- 9) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課編; 総合エネルギー統計平成6年度版 (1995), 通商産業研究所
- 10) E.N.Tiratsoo; 各国別世界の天然ガス・LNG需給予測と利用技術集 (1981), 日本技術経済センター
- 11) Marian Radetzki; World Demand for Natural Gas :

History and Prospects ; The Energy Journal (1994), IAAE

12) 総務庁統計局編 ; 世界の統計1994 (1994) , 大蔵省印刷局

13) 通産大臣官房調査統計部編 ; エネルギー生産・需給統計

年鑑(1993), 通商産業調査会14) 帝国書院編集部 ; 新詳高等地図 (1994), 帝国書院

15) 中国国家统计局 ; 中国統計年鑑1993 (1993) : 中国統計出版社

付録. ハイブリッドメタノール製造システムのコスト推定アルゴリズム

