

2.2 水素吸蔵合金を利用した水素熱輸送システム

水素ガスは金属と発熱反応をおこし、金属水素化物を形成し、逆に金属水素化物は熱エネルギーを吸収すると水素を放出する。この原理を利用して排熱供給側から需要側へ水素を媒体として熱輸送をおこなうのが当システムの特徴である。

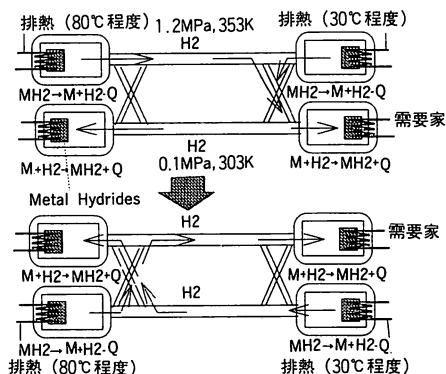


図-1 水素吸蔵合金を利用した水素エネルギー輸送システム (LaNi₅の場合、発熱量30.1kJ/mol)

図-1は、排熱供給側と熱需要側間で、水素吸蔵合金を介して水素ガスを輸送している様子を経時的に示している。上のシステムでは、排熱供給側と需要側を2本の圧力の異なる配管（上側が高圧力、下側が低圧力）で接続し、各配管の両端に2基ずつ、計4基の水素吸蔵合金の反応器を設けている。また、供給側、需要側に流量制御弁を設けて水素ガスの流れる方向を可変にしている。

熱輸送のプロセスは次の通りである。

- 1) 左上の水素吸蔵合金反応器に排熱を送り込む(図-1上段)。
- 2) 左上(図-1上段)の水素吸蔵合金(水素ガスが既に吸蔵している)は、反応平衡により水素ガスを放出する。
- 3) 放出された水素ガスは上側(図-1上段)の高圧管および流量制御弁を通じて右下(図-1上段)の水素吸蔵合金に吸蔵される。
- 4) この際に、水素ガス吸蔵による発熱反応が生じ、右側の需要家側で熱利用が可能になる。

また、熱輸送を断続的におこなうために、2)~4)のプロセスの間に、排熱供給側である左下(図-1上段)の合金が水素を吸蔵された状態になっている必要がある。これは、2)~4)のプロセスの間に右上(図-1上段)の水素吸蔵合金から水素ガスを受け取ることによって可能になる。

このとき、右上(図-1上段)の反応器は空気を熱源として排熱を吸収し、水素を放出、流量制御弁、低圧管を通して左下の合金に吸蔵される(低圧条件により水素の放出反応が促進される)。

3. 熱輸送媒体別の一次元排熱輸送システム 評価

3.1 モデルの概要

ここでは、排熱輸送媒体のうち蒸気、温水、メタノール

改質熱、水素(水素吸蔵合金を利用)に着目し、パイプラインによる一次元的な排熱輸送(排熱源と需要が1対1のケース)をおこなった場合のエネルギーコストとインフラコストから、特定の熱輸送距離および輸送熱量に対するトータルコストを算出した²⁾³⁾。

ここで用いた排熱輸送評価モデルの特徴は以下の通りである。

- 供給と需要のカロリーベースの収支に加え、需要家に必要な熱の質(温度、圧力)を制約条件とした。
- 排熱輸送で発生する各種エネルギーロス(配管圧力損失、熱損失)をコスト換算している。
- パイプラインシステムは、配管部分コストの占める割合が高いため、配管内の各種スペック(流速、圧力等)に着目してコスト最適化を図っている。

3.2 各種前提

(1) 配管内流体に関する基本前提

熱輸送媒体: 蒸気、温水、メタノール改質熱、水素ガス、

ただし、蒸気輸送の場合は選り管が温水となる場合のみを対象とした。

対象熱需要: 暖房、冷房、給湯需要

熱需要の必要温度/圧力:

暖房→110°C以上の温水あるいは、1.5atm以上の蒸気

冷房→180°C以上の温水あるいは、9.0atm以上の蒸気

給湯→60°C以上の温水か蒸気

メタノール生成反応条件: 250°C, 50atm

水素吸蔵合金: LaNi₅を想定、水素吸蔵に要する時間サイクルは30分、合金コストは5,000円/kgとした。

※メタノール改質反応や水素の合金吸蔵反応は本来、反応率の算出が不可欠であるが、ここでは便宜上100%反応と仮定している。

(2) 円管内の圧力損失

液体流についてはDarcy-Weisbachの式、一般ガス蒸気については、等温流れの圧力損失式⁴⁾を参照した。

(3) 円管内の熱損失

環境温度、熱伝導率、熱伝達率から算出している⁴⁾。

(4) 熱変換機器、建築設備、エネルギーコスト

熱変換機: 熱交換器 10千円/Mcal・h, 効率0.8

蒸気吸収冷凍機 30千円/Mcal・h, COP1.2

温水吸収冷凍機 27千円/kW, COP0.5

動力機器: 動力ポンプ 100千円/kW, 効率0.75

メタノール反応用機器：

反応器+圧縮器 24.66千円/t・s 効率0.9

注) この場合の重量は、反応器を時間当たりを通してのガス重量を指す。

※熱交換機器に関するスケールメリットは、ここでは生じないと仮定している。

建設設備：配管 参考文献⁵⁾の配管費用データをもとに、管径、輸送距離による線形近似をおこなった。

エネルギーコスト：電気(ポンプ、圧縮器用) 19.69

円/kWh, 都市ガス(ボイラー用) 5.0円/Mcal

※各機器の償却年数は10年、配管設備は20年とした

(5)水素吸蔵合金による排熱輸送システムモデリング

水素吸蔵合金は、温度条件によって水素の吸蔵・放出の平衡水素圧力が異なる。そこで、当検討では平衡水素圧力近傍で配管ガス圧力を変化させ、時系列的な水素流量、供給熱量を分析し、特性を把握している。

ここでは、配管の行き、還りを別々に考察し、図-2のように単純化したシステムを考える。

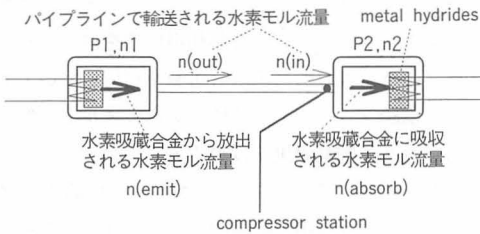


図-2 単純化した水素熱輸送システム

ここで制約式として以下の次項を考慮した。

- ・反応器における気体の状態方程式
- ・反応圧力と合金の含有水素量の関係
- ・配管における圧力損失と流量の関係

これら条件式から、変数を消去すると、

$$\frac{dP_1}{dt} = f(P_1, P_2), \quad -\frac{dP_2}{dt} = g(P_1, P_2)$$

の形で構成される微分方程式が2本得られる。これをもとに、オイラー法を用いて、反応平衡に至るまでの経過時間と輸送水素量/輸送熱量の関係を求めている³⁾。

3.3 排熱輸送システムの費用構成

以上の前提をもとに、各需要断面、すなわち熱輸送距離と輸送熱量に対して最適なトータルコストおよびその際の配管設計仕様を算出した結果、基本的な排熱輸送システムの費用構成が図-3のように示された。

ここでは、給湯需要30MW、熱輸送距離5kmのケースについてコスト算出をおこなっている。

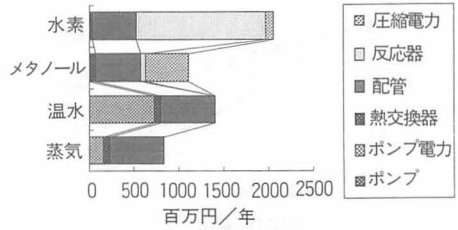


図-3 排熱輸送システムコスト内訳

図-3より、次の特性が示された。

- ・メタノール改質熱輸送は、メタノールの反応条件に必要なエネルギー(圧縮)コストが相対的に高い。
- ・水素吸蔵合金を利用した熱輸送システムは、反応器コスト(ほぼ合金コストに相当)がネックである。

3.4 各熱輸送媒体の有効性

排熱輸送システムごとに導入が適する需要領域を把握するため、輸送熱量と熱輸送距離に対する個々のシステムの有効領域を求めた。

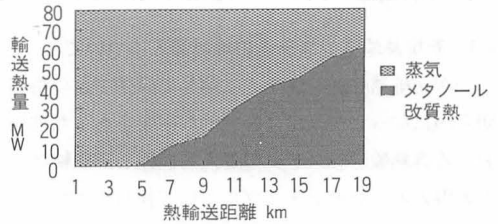


図-4 各媒体の有効領域(給湯需要)

図-4より次の点が見られた。

- ・メタノールはエネルギー密度の高い輸送が可能であり、それが配管コストを低減させ、長距離の熱輸送に関して相対的に有利となる。
- ・既存の熱輸送媒体である蒸気は短距離あるいは大量排熱輸送のケースにおいて相対的に有効である。

暖房需要、冷房需要についても同様の検討をおこなったが、大きな特性の変化はみられなかった。

3.5 排熱輸送を実施しないケースとの比較

排熱輸送を実施するか否かをコストベースのみで評価する場合、排熱輸送をせずに需要側で直接化石燃料(本研究では都市ガスのみを想定)を燃焼し、熱交換器を通じて熱エネルギーを利用するケースとの比較が有効である。

そこで、ここでは次のようにコスト削減率を定義して単純な比較をおこなった。

$$\text{コスト削減率} = \frac{\text{Cost 1} - \text{Cost 2}}{\text{Cost 1}}$$

Cost 1 : 排熱輸送を実施しない場合, Cost 2 : 排熱輸送を実施する場合

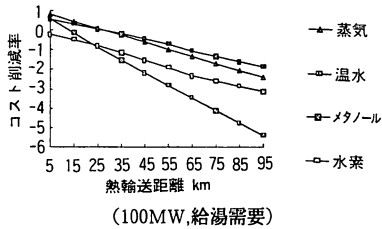


図-5 既存システムと比較した場合のコスト削減率

図-5をみると、給湯需要の場合100MWレベルの排熱輸送量であれば、25km程度までは排熱輸送がコスト的に妥当されることがわかる。

ここでは、単純なコスト評価のみをおこなっているが、同様な作業を消費エネルギーの観点からおこない、エネルギー削減率という指標でみると、長距離輸送であっても、エネルギー消費削減率は100%近傍の高い値が算出された。

4. 排熱輸送システムの地域導入に関する検討

4.1 新排熱輸送システムの地域導入について

一次元排熱輸送システムに関して媒体ごとの特性が明らかになったが、次に仮想的な需要をもった地域における排熱輸送システムの導入可能性と排熱輸送システム導入のインセンティブについて検討を加える。

ここでは、先に検討した一次元排熱輸送システムに対し、追加的に次の項目に着目している。

(1) 排熱利用オプションの考慮

・メタノール改質熱利用システムのように250~300°Cの排熱を利用する場合、排熱を発電に利用するオプションも存在する。このため需要を考慮した上で、電気エネルギーあるいは熱エネルギーとしての利用選択肢を設定する必要がある。

(2) 熱配管の階層構造

・熱配管（蒸気管、温水管）は、現在都市部で導入されている都市ガス配管と同様に圧力、管径条件の異なる階層構造で構成されていると考えられる。

・3. 熱輸送媒体別の一次元排熱輸送システム評価におけるコスト評価は大量熱輸送、大管径の基幹的な配管部分のみに着目しているため、末端需要家に接続する支管（引き込み配管）部分を追加的にコスト試算等を含める必要がある。

(3) 既存燃料価格、売買電価格の考慮

・排熱輸送システムの導入可能性は省エネルギー性は勿論、経済性によっても左右される。
 ・そこで本項では、需要および売電価格、既存ユーティ

リティーコスト（ガス、電気、LPG価格など）、一般熱変換機器コスト（エアコン、給湯器等）を考慮した上で、供給側の排熱利用の選択肢（電気エネルギー利用、熱エネルギー利用）を含めて排熱輸送システムの導入可能性について検討する。

4.2 線形計画モデルを用いた排熱輸送システム導入シェア試算

(1) 検討の目的・手法

地域における排熱輸送システム導入可能性について、先の一次元排熱輸送システム評価モデルで得られた結果を元に、線形計画法による推定をおこなう。

ここでの目的、手法は次の通りである。

<検討の目的>ここでは、仮想的なエネルギー需要をもつグリッド（正方形）型都市を設定し、メタノール改質熱や水素吸蔵合金を利用した排熱輸送システムが導入されうる条件を把握する。

<検討の方法>仮想都市を設定し、その中で住民および地方公共団体が支払うべき総エネルギー供給コストを最小化するような、排熱利用形態を検討する。また、同時に既存システム（排熱を利用しないエネルギー供給システム）と比較して省エネルギー性、およびコスト削減効果を試算する。

ここでLPの目的関数となるエネルギー供給総コスト（年間ベースで算出）の内訳は以下の通りである。

・設備費用（配管、各種熱交換機器等）、
 ・購入ガス費用、
 ・買電費用、
 ・売電（自家発電）費用（マイナスでカウント）。

(2) モデル前提

<排熱源>ここでは地域の排熱源をコンバインドサイクルを導入した清掃工場とした。これは、排熱温度が高く、250~300°C程度の排熱利用に適するメタノール改質熱の技術等も導入できると考えられるためである。

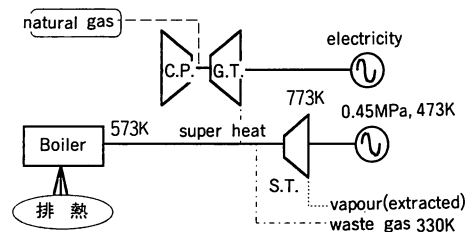


図-6 コンバインドサイクル概要

注：本研究では、コンバインドサイクルにおける蒸気タービンを抽気可能することで、熱および電気エネルギー出力

を可変にしている。

得られた電気および抽気蒸気、排熱はガスエンジンHP、電動HP、ターボ冷凍機、吸収式冷凍機、熱交換機等を経て、暖房、冷房、給湯需要を賄う。

<対象地域>対象地域面積：100km²（仮想的に10km*10kmのグリッド型都市を想定する）

メタノール改質熱輸送配管や水素吸蔵熱輸送配管は、熱輸送システムにおける基幹的なインフラ部分であり、末端需要家までこれらの技術が接続導入されることは想定していない。

対象地域の世帯数：131,000世帯

対象地域の土地利用用途：一般住居用地

対象地域の熱需要は、地域全体で下図の通り設定した。

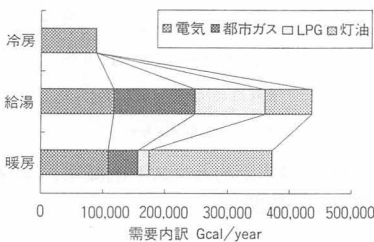


図-7 対象地域の熱需要供給構成

<各種熱配管の敷設方式>各種熱配管の延長距離、敷設密度は、表1の都市ガス管データを参考に設定した。

表1 ガス管タイプ別敷設延長

(表上段：東京ガス供給全区域、表下段1km²当たり換算値、単位：km²)

10kg/cm ²	3~10kg/cm ²	1~3kg/cm ²	1kg/cm ² 未満	合計
461	1,554	3,288	35,830	41,133
0.10	0.35	0.74	8.01	9.20

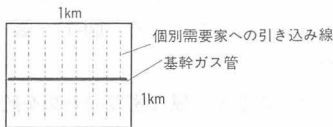


図-8 末端需要家への接続を考慮した配管イメージ

<燃料市場価格>一般住居で消費される電力、都市ガスなどのユーティリティークストは表2の通り設定した。なお、売電価格は、5.6円/kWhと設定した⁸⁾。

表2 各種ユーティリティークスト

燃料種類	価格	単位
電力	29	円/kWh
都市ガス	14.7	円/Mcal
灯油	8.45	円/Mcal
LPG	14.2	円/Mcal
売電価格	5.6	円/kWh

4.3 現行制約下での排熱輸送システム導入可能性

本検討で取り上げた線形計画問題は、先に示した様に次の目的関数を最小化するものとしている。

Obj.F設備費用+購入ガス費用+買電費用-売電費用

ここで、各設備費用、必要エネルギーコストそれぞれを輸送熱量、熱輸送距離で線形表記することにより、目的関数全体を熱輸送媒体ごとの輸送排熱量および熱輸送距離（基幹部分の配管総延長距離）、自家発電量のみで表記した場合の目的関数係数を媒体ごとに整理したのが表3である（ただし、定数項は除外）。

更に制約条件として、輸送排熱量と排熱輸送距離（基幹部分の配管総延長距離）とを比例関係におくことで、目的関数全体を熱輸送媒体ごとの輸送排熱量と清掃工場の自家発電量のみからなる線形式に単純化できる。

このときの輸送排熱量と排熱輸送距離を一元化した目的関数係数を、下表では輸送熱量換算係数と便宜上定義している。

表3 目的関数係数（輸送熱量および排熱輸送距離）

熱輸送媒体	温水(暖房)	メタノール(暖房)	自家発電
輸送熱量の係数	-2.38	-6.63	
熱輸送距離の係数	682.46	413.78	
輸送熱量換算係数	181.01	104.55	-6.51

つまり、温水輸送（暖房）の場合は、
 $-2.38 * \text{輸送熱量(Tcal/year)} + 682.36 * \text{管長(km)} + \text{定数項}$
 $-6.51 * \text{自家発電量(Tcal/year)} = 181.01 * \text{輸送熱量(Tcal/year)} + \text{定数項}$
 $-6.51 * \text{自家発電量(Tcal/year)}$

メタノール輸送（暖房）の場合は、
 $-6.63 * \text{輸送熱量(Tcal/year)} + 413.78 * \text{管長(km)} + \text{定数項}$
 $-6.51 * \text{自家発電量(Tcal/year)} = 104.55 * \text{輸送熱量(Tcal/year)} + \text{定数項}$
 $-6.51 * \text{自家発電量(Tcal/year)}$

となり、これらより、次の点が示された。

- 暖房需要では、メタノール改質熱を媒体とした排熱輸送システムが経済的導入インセンティブが高い。
 （冷房、給湯需要についても同様の結果が得られた）
- 既存の設備コスト、エネルギーコストの条件下では、自家発電による売電が経済的に優先される。

4.4 排熱輸送システムが導入されるためのインセンティブ

前節4.3で得られた各目的関数係数の構成をみると、輸送排熱量に関する目的関数係数の構成から、

- 電力（購入電力）の低価格化
- 灯油価格の低下（暖房需要の場合）
- 都市ガス、LPG価格の低下（給湯需要の場合）

排熱輸送距離に関する目的関数係数の構成から、

- 支管部分配管のコスト低減
- 電力（購入電力）価格の低下

がそれぞれ必要な条件であることが示された。

ここでは、環境排出規制および炭素税の導入により排熱輸送システムが選択されるケースについて検討を加えている。

(1)環境規制による排熱輸送インセンティブの向上

排熱輸送システムを二酸化炭素排出削減手段とみた場合、自家発電との有効性を比較検討した。ここで、各燃料の燃焼時炭素排出量は表4の通り仮定している。

表4 燃料別発生二酸化炭素量

燃料タイプ	発生二酸化炭素量	単位
都市ガス	2.089	kg/9,900kcal
灯油	3.245	kg/11,000kcal
石油	2.933	kg/10,000kcal
電力	0.36	kg/kWh

図-9は、熱需要および熱輸送媒体ごとに排熱輸送と自家発電による二酸化炭素削減効果を既存システム、すなわちコンバインドサイクルや排熱輸送システムを導入しないケース、と比較したものである。

これから、暖房需要におけるメタノール改質熱輸送の場合は、排熱輸送導入促進による追加的な二酸化炭素削減効果があらわれている。

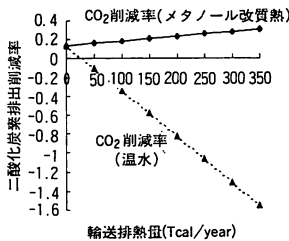


図-9 輸送排熱量と二酸化炭素排出削減

注1. 二酸化炭素削減率は、次のように定義した。

$$\text{二酸化炭素削減率} = C1 / C2$$

C1: 排熱輸送と自家発電量に相当するエネルギーを外部エネルギーシステムから調達する際に必要となる化石燃料の消費に伴って発生する二酸化炭素量から、排熱輸送システムの運用に必要なポンプ用電力の発電およびコンバインドサイクル用の都市ガス燃焼により発生する二酸化炭素量を差し引いたもの

C2: 既存の熱需要を賅うのに必要な化石燃料の消費に伴って発生する二酸化炭素量

注2. メタノール改質熱と温水の場合で二酸化炭素排出削減率の差が顕著なのは、末端需要までの接続部分がメタノールでは蒸気、温水輸送の場合は、温水をそれぞれ利用しているためである。

注3. 二酸化炭素削減率が-1.6程度の極めて低い値となるのは、対象地域の熱需要を全て一本の基幹配管で賅うモデルを仮定しているためである。

実際には、排熱源から複数本の基幹配管が敷設されるため、図-9ほど排熱輸送システムで外部エネルギーを消費しない。

以上の結果に基づき、特定の二酸化炭素排出制約のもとでメタノール改質熱による暖房熱供給システムを導入した場合について、既存システム（コンバインドサイクルも排熱輸送システムも導入しない）と比較したコスト削減、省エネルギー性を図-10に示した。

これをみると、コンバインドサイクル導入による発電ケースだけでも、35%程度の省エネルギーおよび13.4%程度の環境排出（本検討ではCO₂）抑制が達成されることが示された。

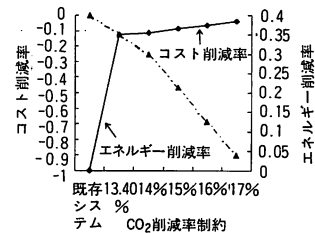


図-10 CO₂削減率制約とコスト削減率、エネルギー削減率の相関

注: グラフ中のCO₂削減率制約のうち、13.4%のケースは、コンバインドサイクルを導入し、発電のみをおこなったケースである。

(2)炭素税導入による排熱輸送システム導入インセンティブの向上

本項では、先の二酸化炭素排出制約のかわりに燃料価格に炭素税を付加した場合を想定し、排熱輸送が自家発電を経済面で上回る条件を考察する。

排熱輸送システム導入が自家発電による売電よりも経済的に有効となる限界条件での炭素税の試算を各熱需要ごとにおこなったところ、図-11～図-12の結果が得られた。

ここでは、需要家の貯蔵密度の効果を把握するため、需要密度係数（現状の需要密度の何倍に相当するか、を表す指標）を定義し、炭素税との相関をみている。

これをみると、

- ・住居地域のような低い需要貯蔵密度下では、排熱輸送システムを導入するために非常に高い炭素税(2000～3000円/kg-Cを課す必要があり、その場合メタノール改質熱を媒体としたシステムが部分的（暖房需要のみ）に選択される。

- ・水素吸蔵合金を用いた熱輸送システムは、高密度需要においては、メタノール改質熱を媒体とした熱輸送システムと競合し得る。

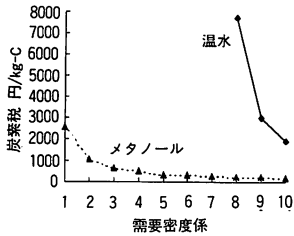


図-11 排熱輸送が選択される条件(暖房需要)

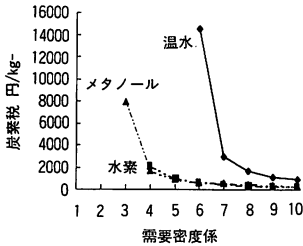


図-12 排熱輸送が選択される条件(給湯需要)

5. 結論と今後の課題

本稿では、各排熱輸送システムの媒体ごとの特性に着目し、数値シミュレーションを試み、主にコスト面から相互優位性を評価した。

また、需要を仮想的に設定することにより、実際に排熱輸送システム導入のためのインセンティブについて考察を加え、これらから次の結論が得られた。

- ・熱輸送システムを一次元で考えた場合、メタノール改質熱は、比較的長距離の輸送に適しており、既存の熱輸送媒体では蒸気が相対的に短距離の熱輸送でコスト的に有利となる。
- ・一次元熱輸送で、水素吸蔵合金を利用した水素熱輸送システムは、現時点では合金コストの負担が高く、メタノール改質熱との競合は困難と考えられる。
- ・一次元熱輸送の枠で考察した場合、配管敷設による熱輸送システムと、排熱を利用しない既存エネルギーサービスとをコスト面で比較評価したところ、大規模熱輸送(30~100MW)の場合、メタノール改質熱を用いた排熱輸送システムは10~25kmの輸送距離までコスト的に妥当し得る。
- ・実際に地域に排熱輸送システムを導入する場合、メタノール改質熱のように発電可能な排熱温度では、発電による売電収入確保が優先され、地域への配管敷設による排熱輸送のインセンティブは相対的に低い。
- ・ただし、環境規制あるいは熱需要賦存密度の集中によって排熱輸送システムが地域で選択される可能性は

十分にある。

・排熱輸送システムが、自家発電による売電よりも優先されるための炭素税価格は、住居地域のような低密度需要のケースで2000~3000円/kg-C(メタノール改質熱による暖房の場合)と極めて高いが、業務地域など高密度需要条件下では、比較的安価な炭素税で排熱輸送システムの導入が選択され得る。

また、今後検討すべき課題として、

- ・水素吸蔵合金について、金属価格低下などの要因変化に伴う、既存システムあるいはメタノール改質熱輸送システムとの競合可能性
- ・配管等排熱輸送インフラに伴うライフサイクルベースの環境排出を考慮した排熱輸送システムの優位性の考察
- ・各種費用関数、排熱輸送システムモデリング、配管システム基本仕様の精査、感度分析等が挙げられる。

謝辞：
本研究で取り上げたメタノール改質熱輸送システムについては、川崎重工業株式会社 明石技術研究所 化学技術研究部 高谷芳明様より、また水素吸蔵合金を用いた水素エネルギーシステムについては、物質工学工業技術研究所 無機材料部エネルギー材料研究室 秋葉悦男様より、それぞれ貴重な御意見およびデータを頂きました。ここに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 東京大学工学部 吉岡理文, 石谷久, 松橋隆治「発電所の配置を考慮した排熱利用による省エネルギー可能性の検討」第10回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集。
- 2) 東京大学工学部 長谷川秀夫, 松橋隆治, 石谷久, 吉岡理文「需要の質と熱輸送媒体を考慮した排熱エネルギー輸送システムの分析」エネルギー・資源学会第14回研究発表会講演論文集。
- 3) 東京大学 長谷川秀夫, 松橋隆治, 石谷久, 吉岡理文「需要と排熱の質を考慮した地域熱輸送システムの分析」第12回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集。
- 4) 千葉孝男著「蒸気・高温水システム-配管径の設計から施工まで」(財)省エネルギーセンター編。
- 5) 東京都清掃局「清掃工場余熱利用推進調査報告書(平成3年)」。
- 6) 富永博夫, 吉田邦夫監修「新メタノール技術」(株)サイエンスフォーラム。
- 7) 太田時男監修「水素エネルギー最先端技術」(株)NTS
- 8) 資源エネルギー庁監修「ガス事業便覧」(社)日本ガス協会。
- 9) 長岡俊雄「余剰電力の買い取りについて」コージェネレーション。vol. 8 No.1. 1993。
- 10) 日本機械学会「蒸気表」