

道路温度差発電ミッション 2016年度 成果報告

都市熱利用プロジェクト 道路温度差発電ミッション
代表 道網 恵佑

1. はじめに

本プロジェクトではヒートアイランド、電力供給問題への解決策として近年進みつつある排熱温度差発電（DTEC）に用いられる熱電発電、有機ランキンサイクル（ORC）に基づき路面を高温熱源として発電に利用することを考え、この解決策について以下の3つの視点から実現可能性を評価する。

1. 法令への適合性
2. エネルギー賦存量調査
3. コスト・環境負荷の推定

また、排熱による発電手法について今回は熱電発電、ORCの2種類について、熱電モジュールは上海工商のTEC1-12706、ORCはIHIのヒートリカバリーHRシリーズを想定しコスト、環境負荷の比較を行うものとする。



図1：熱電モジュール TEC1-12706



図2：ORC 発電機ヒートリカバリー

2. 活動内容

2.1 法令への適合性調査

冷却水の確保において上水を使用する場合費用が発生するが、発電事業、特に今回の案件のような出力の小さい廃熱回収においては採算性の確保に致命的な影響を及ぼす可能性がある。このため、上水以外の水源について冷却水としての利用が可能かを検討した。

しかし、発電設備が位置するのは都市の幹線道路沿いなどになると考えられ、このことに留意すると空間的制約の大きい河川水、地下水や、法令では適用除外とはいえ騒音への対策が課題となる空冷による手法は適しないと考えられる。したがって、本研究では残る下水道について暗渠内に熱交換機を設置して冷熱の確保を行うことが可能かを検討した。ここで、下水道法は平成27年に改正が行われ、民間事業者の下水熱利用への参入が可能となったが、下水道法24条3項三号ハでは前項赤線部のように示されている。この条文は熱供給事業に下水熱を利用することを可能にするための規制緩和により追加されたものであり、発電に関わる事業者は対象ではない。このため、下水道の冷却水としての利用はできないと判断し、コストの算定では上水を用いるとして費用算定を行った。

第二十四条
3 公共下水道管理者は、公共下水道の排水施設の暗渠である構造の部分には、次に掲げる場合を除き、何人に対しても、いかなる施設又は工作物その他の物件も設けさせてはならない。
一 排水施設を固着して設けるとき。
二 あらかじめ他の施設又は工作物その他の物件の管理者と協議して共用の暗渠を設けるとき。
三 次に掲げる物件その他公共下水道の管理上著しい支障を及ぼすおそれのないものとして政令で定めるものを固着し、若しくは突出し、又は当該部分を横断し、若しくは縦断して設けるとき。
イ 同意水防計画で定める水防管理者（水防法第二条第三項に規定する水防管理者をいう。）又は量水標管理者（同法第十条第三項に規定する量水標管理者をいう。）が設置する量水標等（同法第二条第七項に規定する量水標等をいう。）
ロ 国、地方公共団体、電気通信事業法（昭和五十九年法律第八十六号）第二百二十条第一項に規定する認定電気通信事業者その他政令で定める者が設置する電線
ハ 国、地方公共団体、熱供給事業法（昭和四十七年法律第八十八号）第二条第三項に規定する熱供給事業者その他政令で定める者が設置する下水を熱源とする熱を利用するための熱交換器

下水道法24条3項三号ハ（赤線部）

2.2 エネルギー賦存量調査

今回は路面を高温熱源として利用するため、路面温度が発電量決定の重要な要素となる。そこで、本件では熱収支法に基づき路表面の温度を算定した。路面材料における熱収支は図3のようになっている。

この図では熱収支の式は温度、時間、路面材料の深さの3つの変数を含むため偏微分方程式となるが、この条件での偏微分方程式

の求解にはグリーン関数法と呼ばれる手法が用いられている。この手法が難解であるため、時間、深さを考慮しない1変数のモデルとして路面材料の表面温度の算定を行った。

ただ、路面の熱を回収するヒートパイプの敷設は車両等による荷重の問題から路表面からある程度の深さを確保する必要がある。したがって今回重要なのは表面温度ではなく路面材料の層内温度となる。このため、この手法によって得た路表面温度を基に路面材料の層内温度を算定した。層内温度については先行研究において次の推定式が与えられている。この推定式によって算定された表面温度と層内温度は次のグラフの通りとなる。

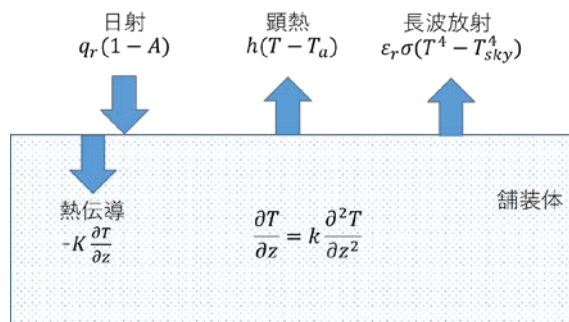


図3：路面の熱収支の模式図

層厚25cm $y = 0.802x + 1.702$
 層厚20cm $y = 0.804x + 1.401$
 層厚15cm $y = 0.854x + 0.688$
 層厚10cm $y = 0.918x + 0.303$
 層厚 5cm $y = 0.980x + 0.798$
 y:層内温度 x:表面温度

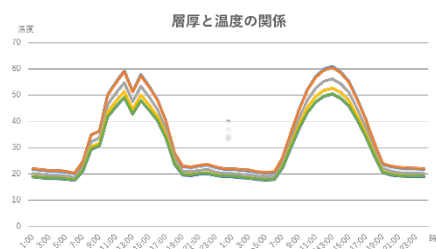


図4：表面温度・層内温度のグラフ

表面温度と層内温度の関係式

このグラフからも読み取れるように表面温度は60°C前後に達しているが、層内20cm以上では50°C前後となっている。ORCの利用可能温度域は70~90°Cであり、熱電発電についても後述する採算性の問題から50°C程度の熱源では発電において採算性を確保することは困難であり、**このため熱電発電・ORCを手法とする路面温度差発電は温度条件から採算性を確保できず不可能であると判断した。**

2.3 コストの算定

前述の通り路面熱発電については採算性を確保できないと判断したが、工場排熱など他の熱源への応用を見越し、同じ温度域における熱電発電・ORCの単位発電量当たりのコスト・環境負荷の比較を行った。

熱電モジュール、ORC発電機の本体価格は以下のように決定した。

- ・熱電モジュール：¥380 (Amazon, 予算で購入したモジュールの価格)
- ・ORC発電機：¥1000万 (矢野経済研究所報告書より)

この本体価格から独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) の温泉熱発電事業性概略評価シートを参考に諸費用の概算を行った。その結果、kWh 当たりの発電原価は右のようになった。

	熱電発電	ORC	FIT地熱	関電工場用高圧
70℃	63円/kWh	227円/kWh		
90℃	50円/kWh	49円/kWh	40円/kWh	14.92円/kWh

熱源が 70℃の条件においては熱電発電、ORC ともにコストが過大となり採算性の確保が困難であるといえる。一方、90℃の条件においては設備費用の低減や補助金等により FIT (固定価格買取制度) における地熱発電の水準に十分到達しうると考えられる。ただ、自家消費等を考慮した場合電力会社による売電価格との比較が必要だが、電力会社による事業所向け電力に比べるとコスト削減、本体価格の下落等による発電原価の低減が求められる。

2.4 環境負荷の定量化

今回算定した環境負荷はライフサイクル CO2 排出量 (LCCO2) だが、熱電発電と ORC では異なる算定手法を採用した。

・熱電発電

先行研究におけるモジュールの部材別排出量原単位 (表 1) を用いて部品別重量からモジュール当たりの排出量を算定した。次に前述のモジュールの素材にかかる排出量から先行研究における素材にかかる排出量と設備にかかる排出量、運用・修繕にかかる排出量、廃棄にかかる排出量の関係 (表 2) を用いて各プロセスにおける排出量を算定、これを合算して LCCO2 を求めた。

部品名	CO ₂ 排出量
熱電素子	2.719tCO ₂ /t
熱電素子製造	1.532tCO ₂ /t
セラミック板	2.354tCO ₂ /t
銅電極	2.719tCO ₂ /t
リード線	0.285tCO ₂
熱交換プレート	9.454tCO ₂ /t
押さえつけ治具	2.075tCO ₂ /t
低温側ポンプ	7.773tCO ₂
低温側配管	15.23tCO ₂
冷却塔	15.29tCO ₂

プロセス	CO ₂ 排出量	備考
素材	1	素材のCO ₂ 排出量を1とする
設備	1.2	素材 + (製造, 輸送, 建設)
運用・修繕保守	0.05	1年あたり
廃棄	1.2	設備と等価と仮定
LCCO2	1.2+0.05*年数+1.2	耐用年数は7.5年を想定

表 1 : 部材別排出量原単位

表 2 : 素材における排出量と各プロセスの関係

・ORC

ORC では上記のような部材別重量を用いた算定はできない。したがって、産業連関表を用いて排出量の算定を行う。ただ、今回 ORC の LCCO2 の算定に当たっては該当する品目を含む産業連関表で過去のデータによるものが見つからなかったため、早稲田大学次世代科学技術経済分析研究所の 2030 年再生可能エネルギー想定取引額表を用い算定を行った。

この結果、熱電発電、ORC の LCCO2 は表 3 のようになった。

	熱電発電	ORC
70℃	71.71gCO ₂ /kWh	376.6gCO ₂ /kWh
90℃	34.37gCO ₂ /kWh	75.32gCO ₂ /kWh

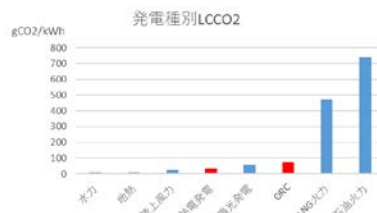


表 3 : 熱電発電・ORC の単位発電量当たりの LCCO2

図 5 : 他の発電手法との比較

この結果、太陽光や風力といった普及の進む再生可能エネルギー源と比較すると排出量が大きく、更なる排出量削減の努力が必要であるといえる。

3. まとめ・今後の課題

本プロジェクトが今年度の活動の目的とした路面熱発電の実現可能性検討は不可能という不本意な結果ではあるものの達成されたといえる。この結果を受け本プロジェクトでは工場排熱など都市部に賦存する異なるエネルギー源に着目し、次年度からの活動を踏まえて熱電発電と ORC のコスト、環境負荷の比較を行った。

しかし、先行研究から和歌山市内における工場排熱の熱量を推定することは可能であるが、業界や個々の設備構造により排熱の形態（水か排気か）や温度に差が存在する。このため熱量の推定からでは正確な発電量ポテンシャルの算定は困難であるといえる。したがって、設備の積算に加え熱源状況のサーベイが必要であり、湯村温泉のように既存の導入事例について現地調査を含めたサーベイを行うとともに和歌山市内の事業者の方に設備構造や熱源状況の調査のため協力をお願いする等のアプローチが必要と考えている。

- [1] 熱電素子による道路舗装面の熱エネルギーを利用した発電システム,上川優貴,長谷部正基,土木学会第60 回年次学術講演会論文集 pp385-386,2005
- [2] 熱収支解析による路温予測手法の実用化に関するフィージビリティ・スタディの実施について,関平和,芹川博,西谷直人ほか,ゆきみらい研究発表会論文集 2007
- [3] アスファルト舗装体の温度に関する調査研究,秋山政敬,土木学会論文報告書第 248 号 pp105-115
- [4] 2013 バイナリー発電システムの最新動向&市場展望,矢野経済研究所
- [5] 平成 25 年度小規模地熱発電のうち温泉発電導入促進のための手引書,独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構
- [6] 環境負荷を評価指標とした熱電発電システムのモジュール決定手法,堀康彦,伊藤哲夫,電気学会論文誌 B Vol.124,pp597-604,2004
- [7] 拡張産業連関表による再生可能エネルギー発電施設建設の経済・環境への波及効果分析,文部科学省 科学技術・学術政策研究所科学技術動向研究センター
- [8] 日本における発電技術のライフサイクル CO₂排出量総合評価,電中研報 Y06
- [9] 工場排熱を利用したオフライン熱供給システムの導入による CO₂排出量削減効果の評価,片山賢,山本祐吾ほか,環境システム研究論文集 Vol.36,pp97-105,2008
- [10] 廃熱利用に関する実態調査：第 1 報-工場廃熱の賦存量・利用可能量に関する調査分析,根津浩一郎,下田學ほか,空気調和・衛生工学会論文集 Vol.22,pp79-87,1983