研究論文

温泉地におけるCO₂排出量低減の可能性検討：北海道・流山温泉と夕張温泉における未利用エネルギーの利用促進に向けたケーススタディ

藤原 沙弥香・荒木 肇・地子 立・藤井 賢彦

Assessing Effects of CO₂ Emission Reduction in Hot Spring Areas: A Case Study for Promoting Utilization of Unutilized Energy in Nagareyama and Yubari Hot Springs, Hokkaido

Sayaka FUJIWARA, Hajime ARAKI, Taturu JISHI and Masahiko FUJII

Synopsis:

Objective. In hot spring areas, the water is generally heated by heavy oil boilers. However, substantial CO₂ is emitted in the heating process, and the process is always affected strongly by oil prices. The Nagareyama Hot Spring, which is owned by the Hokkaido Railway Company, has recently introduced a waste oil boiler that is fueled by lubricating oil discarded by the railway company. Regarding a hotel with hot spring, used bath water is usually thrown away to the river and extra heat generated from a machine room is usually released to the outside. Given the current situations, we considered 2 possibilities: (1) using waste oil in place of heavy oil in Nagareyama Hot Spring, and (2) utilizing wasted bath water and released heat from the machine room for warming greenhouses in winter in Yubari Hot Spring. These modifications were designed to minimize the environmental burdens as represented by CO₂ emissions and economic costs. The potential CO₂ reduction was evaluated quantitatively by using a method of Life Cycle Assessment (LCA).

Results and Discussion. CO₂ emission was reduced by 94.1 t-CO₂ annually by using waste oil in place of heavy oil at the Nagareyama Hot Spring. The replacement of a heavy oil boiler with a waste oil boiler also contributed to reduce the annual running cost by 141,000 yen. By utilizing the heat of the used bath water in the Yubari Hot Spring to improve asparagus production in the greenhouses in winter, it was estimated that the annual CO₂ emission is reduced by 7.26 t-CO₂. However, the running cost was predicted to be 939,000 yen higher than in the present system.

Conclusions. The replacement of the heavy oil boiler with the waste oil boiler was expected to reduce both CO₂ emissions and the running cost. In the case of the heat-use of old bath water, it was effective in terms of the reduction of CO₂ emission. However, economic benefits were not expected because of the high price for installing a new equipment to transport the hot water into the greenhouses. Introduction of further carbon pricing such as a carbon tax and carbon credits is necessary to promote these alternative energy systems throughout local communities.

Keywords: Alternative energy; cost evaluation; hot spring; Life Cycle Assessment (LCA); waste oil

1. はじめに

1.1 温泉地におけるエネルギー利用の現状

1.1.1 廃油

温泉の加熱には重油を燃料とするボイラ（以下、重油ボイラ）の使用が一般的だが、重油燃焼時に大きなCO₂排出を伴うことに加え、重油価格の変動は経営の不安定要素と

なり、枯渇性資源ゆえにその価格は乱高下を繰り返しつつも、長期的には上昇傾向になることが予想される。よって、ボイラの燃料として重油を代替する物質の導入が求められている。このような背景から、JR北海道が所有する流山温泉では、後述のように、2010年8月以降、自社から排出される廃油（使用済み潤滑油）を燃料としたボイラ（以下、

藤原 沙弥香／北海道大学大学院環境科学院（現：（株）貴賓館）／〒047-0032 小樽市稲穂4丁目4番127号ウイングウォール208号室
荒木 肇／北海道大学北方生物圏フィールド科学センター／〒060-0811 札幌市北区北11西10 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター 生物生産研究農場（北大農場）
地子 立・藤井 賢彦／北海道大学大学院環境科学院／〒060-0810 札幌市北区北10条西5丁目 北海道大学大学院地球環境科学研究院
Sayaka FUJIWARA / Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University. Currently, Kihinkan INC. / WingWall 208, 4-127, Inaho 4-Chome, Otaru, Hokkaido 047-0032
Hajime ARAKI / Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University / N11W10, Kita-ku, Sapporo 060-0811
Taturu JISHI and Masahiko FUJII / Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University / N10W5, Kita-ku, Sapporo 060-0810

廃油ボイラ)を導入し、重油ボイラの一部を代替している。

日本における廃油の総排出量は361万トンである(環境省 2011b)。排出された廃油の処理状況とそれぞれの処理量(総排出量に対する割合)は再生利用140万3千トン(39%)、減量化200万5千トン(56%)、最終処分20万2千トン(6%)となっている。また、日本における使用済み潤滑油の年間発生量は98万kLと推定されている。これは、国内で現在使用されている潤滑油量の過半数にあたる。このうち、年間83万kLが回収され、年間9万kLが浴場や農家などで再利用されている。また、簡単な精製処理後、年間52万kLが再生重油として工業炉で再利用されている。これら使用済み潤滑油は大半が再資源化されており、燃料油へのリサイクルが主要な再資源化方法である(社団法人潤滑油協会 2009)。

1.1.2 廃食油

国内の食用油の消費量は、年間約237万トンで、そのうち外食産業や食品工業に約198万トンが使用され、一般家庭用としては約39万トンが使用されている(全国油脂事業協同組合連合会 2007)。外食産業や食品工業など業務用から出る廃食用油は産業廃棄物として取り扱われるので、産業廃棄物処理業者が回収し、鶏の飼料、工業用脂肪酸などに再資源化されている。一方、家庭からの廃食油の発生量は年間10万トン程度と推定されており、主に新聞紙に吸収させたり凝固剤で固めたりして排出され、一般ごみとともに焼却処理されているが、下水にそのまま捨てられることも多い。家庭からの廃食油のうちリサイクルされている量は1万トン程度に留まると推定されており、約9万トンが未利用のまま焼却や埋め立て処理されているのが現状である(全国油脂事業協同組合連合会 2007)。

1.1.3 温泉廃熱

日本の地熱資源量は、米国、インドネシアに次いで世界第3位である(独立行政法人 産業技術総合研究所 2011)。また、環境省(2011a)によると、北海道は温泉地の数が254と全国で最も多く、源泉数は利用源泉数が1,361、未利用源泉数が943であり、合計2,304もの源泉がある。うち、52%が温度42℃以上の源泉である。近年、地熱発電や地中熱利用ヒートポンプなど、熱として大きなエネルギーを持つ温泉の地熱を利用した施設が導入されるようになった。一方、入湯利用後の温泉排水も廃熱としての熱エネルギーを持っているが、その大半は未利用のまま廃棄されている。

1.1.4 機械発生熱

燃焼機械から発生する廃熱は、廃熱ボイラやコージェネレーション(熱電併給)システム等で回収を行い、二次的

利用も一部に見られるが、大部分は有効に利用されていない。省エネルギーセンター(2000)によると、工場から工場外に排出される排ガスの廃熱量の全国推定値は年間271,898 T(テラ) calとされている。エネルギーの使用の合理化に関する法律(省エネ法)では、廃熱の回収利用について、回収率を高めるように設定することとあり、廃熱エネルギーの更なる有効利用を推進している。

1.1.5 冬期の農業用ビニールハウスでの暖房の現状

冬期に農作物をビニールハウスで栽培する際に温室を加熱するために使用されるエネルギーは、農作物の生産エネルギーを押し上げるきわめて大きな要因であることが、ライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment; LCA)手法を用いた研究により分かっている(西藺、茂木 2007)。また、温室加温栽培品は、施設の加温による燃料消費により、同一品目の露地栽培品の2~20倍の温室効果ガス排出を伴うとされている(吉川ら 2009)。特に、冬や春に光熱動力を使用して栽培されたトマト、きゅうり、ピーマン、ナスは夏秋物に比べてより多くの温室効果ガス(Greenhouse gas; GHG)排出を伴う。同じく光熱動力を使用して栽培されたハウスみかんについても、露地栽培品に比べるとGHG排出が多い。

冬期のハウス栽培にかかるエネルギーやそれに伴うコストの削減が求められる。北海道では、石油を代替するエネルギーとして、地熱水や温泉水を熱源として利用するガラス温室やビニールハウス等が25市町村、262,883 m²で利用されており、その石油代替量は年間37,044 kLに達する(北海道立地質研究所 2008)。

もし、このように温泉付近で重油ボイラ等による従来の暖房方法を温泉廃熱利用に切り替えれば、CO₂排出と経済コストを何れも削減できると期待される。

1.2 本研究の目的

上述の現状を踏まえ、本研究では、(1) 温泉の加熱設備として重油ボイラと廃油ボイラを比較した場合、(2) 温泉周辺のビニールハウス栽培の冬季暖房における従来の方法と温泉廃熱・機械発生熱利用を比較した場合、の2つについて、それぞれ後述の北海道流山温泉、夕張温泉を対象事例とし、CO₂削減効果および経済効果を定量的に見積もり、これらの導入可能性を検討することを目的とする。

2. 方法

2.1 ボイラの比較

2.1.1 調査地

JR北海道では、2010年8月に、JR北海道が所有する流山温泉において温水を加熱する設備を重油ボイラから廃油

ボイラに転換した。本研究では、簡単のため、流山温泉において重油ボイラ1台を使用した場合と廃油ボイラ1台を使用した場合の、CO₂削減効果及び経済効果を比較した。

流山温泉は北海道亀田郡七飯町東大沼に位置し、建築面積は1,045m²の1階建ての施設である。施設内には33～35m²の室内風呂が2つ、35～40m²の露天風呂が2つあり、レストランも併設されている。源泉温度は40℃であり、浴槽への供給の際には、43～45℃に加温して送られる。

重油ボイラの燃料はA重油を使用しており、廃油ボイラの燃料はJR北海道から排出される使用済みの潤滑油（エンジンオイル）が70～80%と、天ぷら油などの廃食油が20～30%混合したものを使用している。本研究では、簡単のため、廃油ボイラの燃料を、使用済みの潤滑油が75%と廃食油が25%混合しているものと仮定した。

2.1.2 機能単位

ボイラが1年間に源泉60tを3～5℃温める場合を機能単位とした。

2.1.3 評価範囲

図1に示す通り、流山温泉にて重油ボイラを使用する場合をCase 1、廃油ボイラを使用する場合をCase 2と仮定した。

評価範囲は、重油ボイラと廃油ボイラのボイラ本体については製造から使用、廃棄までとし、使用燃料については、重油の場合は採掘・製品化、使用場所までの輸送、そして使用までとし、廃油（JR北海道から排出される使用済み潤滑油）と廃食油の場合は、燃料の収集に伴う輸送から再

資源化、使用場所までの輸送、そして使用までとした。何れのボイラも、廃棄段階ではリサイクルされるシナリオを調査対象とした。

Case 1では、廃油と廃食油は重油ボイラの燃料としては使用されず、専ら既存の廃油ボイラの燃料として使用される。この既存の廃油ボイラの調査地として、燃料となる廃油・廃食油が実際に供給されている旭川市内を仮定した。廃油と廃食油の収集に伴う輸送から再資源化、旭川市内の既存の廃油ボイラまでの輸送、そして既存の廃油ボイラでの使用を評価対象内とした。

Case 2では、Case 1で使用される廃油と廃食油を流山温泉の廃油ボイラに供給することを仮定するため、Case 1の既存の廃油ボイラの燃料を他で代替する必要がある。このうち、25%を占める廃食油は、前述のように90%が未利用である現状（全国油脂事業協同組合連合会 2007）に鑑み、Case 2では未利用廃食油回収システムを新たに構築するとし、代替すべき廃食油のうち90%は未利用廃食油の新たな供給を以って賄うことを仮定した。また、代替すべき廃食油の残りの10%分と、代替すべき燃料の75%を占める廃油は全て重油で代替するとした。つまり、Case 2で代替すべき燃料のうち22.5%が新たに加わる未利用廃食油で、残りの77.5%が重油で代替されることになる。これらの燃料の使用場所は、Case 1と同様、旭川市内とした。代替重油の場合は燃料の採掘・製品化、代替未利用廃食油の場合は収集先から再資源化場所までの輸送と再資源化、さらに、何れの燃料についても使用場所までの輸送、そしてボイラでの使用を評価対象内とした。

図1 流山温泉で重油ボイラを使用する場合(Case 1)及び廃油ボイラを使用する場合(Case 2)のLCA分析のためのシステム境界

2.2 暖房方法の比較

2.2.1 調査地

ビニールハウス栽培の冬季暖房について、従来の方法と温泉廃熱・機械発生熱利用のどちらの場合も、アスパラガスを伏せこみ栽培するために必要な暖房設備を仮定した。アスパラガスを栽培品目の対象とした理由は、冬季や夜間の暖房はハウス全体ではなく作物の栽培床のみの加温で済み、かつアスパラガスの単価が高いことから、冬期間の暖房にコストをかけても利益を見込めるためである。

従来の暖房設備の多くは、主に電熱線と灯油や重油を燃料とする暖房機器を併用している。本研究では、この暖房使用時の燃料・エネルギー使用量に関するデータを取得するために、電熱線と小型温風機により加温して冬季にアスパラガスを生産している株式会社ファームホロ（北海道日高郡新ひだか町）での電力使用量を調査した。ここでは、一般農家と同様、温風暖房機でトンネル周囲を10℃に加温し、土壌温度は電熱線により20℃に制御している。電熱線は、土壌温度が18℃以下になると通電、22℃以上になると不通電となるようにサーモスタットで制御している。対象とした設備が設置してあるビニールハウスは長さ40m、幅7m、面積が280m²であり、ハウス内にはアスパラガスを植えるための高さ0.45m、長さ40m、幅1.2mの栽培床が2つ設置されている。

温泉廃熱・機械発生熱利用については、夕張温泉（北海道夕張市 夕張リゾート株式会社）に近接して設置されたビニールハウスを調査した（図2）。ここでは、温泉浴場からあふれ出た38℃前後の温泉水や浴槽洗浄後の排水を貯湯し、これと熱交換して温められた30～32℃の不凍液をアスパラガス栽培床に循環させている。この循環は栽培床の底面から20cm高（アスパラガス株近傍）の土壌温度が20℃以下になるとポンプが稼働して不凍液が移送され、22℃以上になるとポンプは停止するシステムである。加えて、ボイラ機械室から発生する30℃以上の熱をファンでビニールハウス内に送風し、ハウス内を保温している。

ハウスの面積は117m²であり、アスパラガスを栽培するための5.7m²の栽培床が4つ設置されている。

アスパラガスの伏せこみ栽培には、栽培前後に土をハウス内に搬入・搬出する必要があることから、水はけのよい土壌が使用され、両試験地でも山土（砂壤土）を使用し、肥料は施用しなかった。一般に乾燥土壌は湿潤土壌に比べて気相割合が大きく土壌温度が変動しやすいことから、本試験では土壌表層が乾かないように適度な灌水を行った。

比較したビニールハウスは、（株）ファームホロのものの方が、夕張温泉のものより2.4倍大きい。よって、CO₂排出量と経済コストの比較時には、夕張温泉の施設をより実際の農家の大きさに近い（株）ファームホロのハウスの大きさに合わせて評価した。

2.2.2 機能単位

アスパラガスの若茎生長は根温（株周辺温度）が20～25℃の場合に最高となり、収量性が高まる（Kim, 崎山1989）ことから、本研究では北海道における山土（砂壤土）でアスパラガスを冬期間（4カ月間）伏せこみ栽培する際の栽培施設内床温度を20℃まで暖める場合を機能単位とした。尚、アスパラガスのハウス栽培が採算性を持つのは、露地栽培を行なうことのできない冬期間の4カ月間に限られるが、ボイラの結果との比較を行えるように、1年間の値として示した。

2.2.3 評価範囲

図3に示す通り、電熱線・温風暖房機利用（（株）ファームホロ）と温泉廃熱・機械発生熱利用（夕張リゾート）ともに、設備の製造から使用、廃棄までを評価範囲とした。何れの場合も、温泉排水系統に対する設備投資やエネルギー供給形態はほぼ変わらないので、温泉施設は評価範囲に含めないこととした。また、廃棄段階ではいずれもリサイクルされるシナリオを調査対象とした。

図2 夕張温泉に近接設置したビニールハウスへの温泉廃熱と機械発生熱の供給システム

ビニールハウス栽培の暖房に電熱線・温風暖房機を利用した場合

ビニールハウス栽培の暖房に温泉廃熱・機械発生熱を利用した場合

図3 電熱線・温風暖房機利用及び温泉廃熱・機械発生熱利用におけるLCA分析のためのシステム境界

2.3 評価方法

ボイラや設備の製造・輸送・使用時に投入した資源・エネルギー量のデータは、関連する企業に対するヒアリング調査を経て取得した。輸送・使用時のエネルギー消費に伴うCO₂排出量は、CO₂排出係数（表1）を用いて求めた。また、燃料となる重油の採掘から製品までのCO₂排出量は、財団法人 石油産業活性化センター（2000）のCO₂排出係数（表1）を参照した。製品の原材料の生産と製品の廃棄段階のCO₂排出量については、LCA支援ソフトウェア MiLCA Ver.1.0（社団法人 産業環境管理協会 2010）・IDEA（独立行政法人 産業技術総合研究所・社団法人 産業環境管理協会 2010）のプロセスデータを参照した。なお、MiLCAで参照したプロセスデータの一部は類似する素材や製品のデータで代用するとともに、質量が小さいなど寄与が十分に小さいと判断される素材や部品はカットオフした。以下、実際に使用したデータについて詳述する。

2.3.1 ボイラの比較における評価方法

ボイラの製造、つまり原材料の生産とボイラ製造時のエネルギー消費に伴うCO₂排出量は、MiLCAのプロセスデータを参照して求めた。

ボイラの輸送に伴うCO₂排出は、自動車による輸送に伴う排出と船舶による輸送に伴う排出に分けられる。自動車による輸送に伴うCO₂排出量は、燃料である軽油の合計使用量に、軽油使用に伴うCO₂排出係数（表1）を乗じて見積もった。船舶での輸送に伴うCO₂排出量は、輸送距離と重油ボイラの重量をもとに、MiLCAのプロセスデータを参照して見積もった。

重油の採掘から製品になるまでのCO₂排出は、ボイラの燃料となる重油の年間使用量に、A重油の採掘から製品になるまでのCO₂排出係数（表1）を乗じて算出した。

JR北海道の使用済み重油（廃油）を排出場所から回収して再資源化を行っている場所に輸送する際に伴うCO₂排

出量は次のように見積もった。まず、1年間の輸送回数に輸送距離を乗じたものを輸送車の燃費で除し、輸送車の燃料（軽油）の年間使用量を算出した。これに、軽油の使用に伴うCO₂排出係数（表1）を乗じて回収・輸送に伴うCO₂排出量とした。

Case 1の既存の廃油ボイラとCase 2の流山温泉の廃油ボイラの燃料となる廃食油の収集に伴うCO₂排出は、Google Mapより算出した、回収場所である上川地方3都市から再資源化場所までの輸送距離を輸送車の燃費で除し、燃料の年間使用量を算出した。これに、輸送車の燃料である軽油の使用に伴うCO₂排出係数（表1）を乗じて、輸送車1台分による排出量を算出した。これを、廃油ボイラによる廃食油の年間使用量に換算して、廃食油の回収に伴うCO₂排出量を算出した。

使用済み重油（廃油）の再資源化においては、ろ過器の原材料の生産と生産時のエネルギー消費に伴うCO₂排出量を、MiLCAのプロセスデータを参照して算出した。

ボイラ燃料の製造場所から流山温泉への輸送に伴うCO₂排出量は次のように求めた。まず、1年間の輸送回数に輸送距離を乗じたものを輸送車の燃費で除し、燃料の年間使用量を算出した。これに、輸送車の燃料である軽油の使用に伴うCO₂排出係数（表1）を乗じて算出した。

ボイラ使用時のCO₂排出は、燃料と電力の使用によって生じるとした。燃料の使用によるCO₂排出量は、表1より、それぞれ重油ボイラの場合はA重油の燃料としての使用におけるCO₂排出係数、廃油ボイラの場合、使用済み潤滑油（廃油）は廃油（植物性及び動物性のものを除く）から製造される燃料油の使用におけるCO₂排出係数、廃食油は廃油（植物性及び動物性のもの）由来の燃料油の使用におけるCO₂排出係数に燃料の年間使用量を乗じて算出した。

ボイラの電力使用によるCO₂排出量は、ボイラの稼働時間に使用電力を乗じ、さらに表1より、北海道電力から供給された電気の使用に伴う排出係数を乗じて算出した。

表1 本研究で用いたエネルギー別CO₂排出係数

エネルギー種別	CO ₂ 排出係数	出典
軽油（使用時）	2.58 kg-CO ₂ / L	環境省（2011c）
A 重油（採掘・製品化時）	0.24 kg-CO ₂ / L	財団法人 石油産業活性化センター（2000）
A 重油（使用時）	2.71 t-CO ₂ / kL	環境省（2011c）
廃油（植物性及び動物性のものを除く） 由来の燃料油（使用時）	2.63 t-CO ₂ / kL	環境省（2011c）
廃油（植物性及び動物性のもの） 由来の燃料油（使用時）	0.00 t-CO ₂ / kL	カーボンニュートラルを 仮定
電気（使用時）	0.588 kg-CO ₂ / kWh	環境省（2011c）
灯油（使用時）	2.49 kg-CO ₂ / L	環境省（2011c）

ボイラの廃棄とそれに関わる輸送に伴うCO₂排出は、MiLCAのプロセスデータを参照して算出した。

Case 2においては、前述のように、代替重油はCase 1の廃食油相当量の10%分と廃油相当量、代替未利用廃食油はCase 1の廃食油相当量の90%分として求めた。

また、重油ボイラと廃油ボイラのライフサイクルにおけるCO₂排出量を算出する際、ボイラと廃油の再資源化に使用されるろ過器の耐用年数がいずれも15年と仮定し、1年分の値として算出していないボイラの製造、輸送、廃棄、JR北海道から排出される廃油の再資源化に伴うCO₂排出量をそれぞれ15年で除し、年間CO₂排出量として示した。

経済コストの見積もりに際しては、導入から使用・廃棄までのデータを、それぞれの使用企業・団体に対してヒアリング調査を実施して取得した。

2.3.2 暖房設備の比較における評価方法

暖房設備の製造に伴うCO₂排出量は、MiLCAのプロセスデータを参照して算出したが、電熱線と温風暖房機については、原材料や製造時に関するデータを入手できなかったため、MiLCAの製品項目データにそれぞれ使用した製品の価格を入力して見積もった。温泉廃熱・機械発生熱利用設備については、設備の原材料の質量と製造・設置時のエネルギー消費に伴うデータをMiLCAに入力して算出した。

暖房設備の輸送に伴うCO₂排出については、電熱線と温風暖房機は他の製品と共に運送会社によって運ばれているので、MiLCAのプロセスデータを参照して算出した。MiLCAへの入力データについては、Google Mapより算出した輸送距離と電熱線と温風暖房機の重量を乗じたものを輸送方法のプロセスに入力して見積もった。

温泉廃熱・機械発生熱利用設備は、輸送距離に輸送回数を乗じたものを輸送車の燃費で除し、燃料の使用量を算出した。これに、輸送車の燃料である軽油の使用に伴うCO₂排出係数（表1）を乗じて算出した。

暖房設備の使用によるCO₂排出は、電熱線と温泉廃熱・機械発生熱利用設備については設備の電力使用に伴って排出されるものを、温風暖房機については電力と灯油の使用に伴って排出されるものを、それぞれ算出した。電力使用によるCO₂排出は、消費電力量に北海道電力から供給された電気の使用に伴う排出係数（表1）を乗じて見積もった。灯油使用によるCO₂排出は、灯油の使用におけるCO₂排出係数（表1）に灯油の使用量を乗じて見積もった。

電熱線・温風暖房機と温泉廃熱・機械発生熱利用設備の廃棄とそれに関わる輸送に伴うCO₂排出は、MiLCAのプロセスデータを参照して算出した。

電熱線・温風暖房機と温泉廃熱・機械発生熱利用設備のライフサイクルにおけるCO₂排出量は、次のように年間値として算出した。まず、年間値として算出していない電熱線・温風暖房機利用と温泉廃熱・機械発生熱利用の使用段階以外からのCO₂排出量を、それぞれの耐用年数（電熱線サーモスタット、電熱線温床ケーブル、温風暖房機、温泉廃熱・機械発生熱利用設備の耐用年数はそれぞれ10年、3.5年、7年、10年）で除して年間値に換算した。しかし、この値は実際には冬季（4か月）のみの使用であるため、3.0で除した値を年間CO₂排出量として示した。加えて、温泉廃熱・機械発生熱利用は、上述のように、ハウスの大きさを電熱線・温風暖房機を利用している（株）ファームホロのものに揃えるため、面積比（2.4倍）を乗じたものを年間CO₂排出量とした。

経済コストの見積もりに際しては、導入から使用・廃棄までのデータを、それぞれの使用企業・団体に対してヒアリング調査を実施して取得した。

3. 結果

以下に、ボイラと暖房設備の使用に伴うCO₂排出量と経済コストの算出方法の概要を示す。

3.1 ボイラの使用に伴う CO₂ 排出量と経済コストの比較

2.3.1節で示した評価方法を用いてボイラの使用に伴う CO₂ 排出量と経済コストを見積った。

3.1.1 ボイラの製造に伴う CO₂ 排出

重油ボイラと廃油ボイラの販売会社に対してヒアリング調査を行ない、ボイラの原材料の質量と製造時のエネルギー量を取得した。これらの値を踏まえ、MiLCAへの入力プロセスを重油ボイラの場合は普通鋼熱延鋼板 930 kg、ステンレス鋼鋼管 53 kg、機械用鋳鉄鋳物 5 kg、電気機械器具用プラスチック製品 3 kgと電力（北海道電力地域）120 kWh、廃油ボイラの場合は機械用鋳鉄鋳物 1,474 kg、ステンレス鋼鋼管 300 kg、銅伸銅品 200 kg、ステンレス鋼板 2 kgと電力（北海道電力地域）120 kWhとすることにより、重油ボイラと廃油ボイラの製造による CO₂ 排出量をそれぞれ年間 0.13 t-CO₂、0.24 t-CO₂と見積もった。

3.1.2 ボイラの輸送に伴う CO₂ 排出

ボイラの販売会社へのヒアリング調査の結果、ボイラの製造場所から流山温泉までの輸送手段として、重油ボイラは自動車と船舶、廃油ボイラは自動車のみを用いたことが分かった。また、輸送車の燃料である軽油の合計使用量（重油ボイラ輸送時に 113.2 L、廃油ボイラ輸送時に 85.3 L）とボイラの重量（重油ボイラ 991 kg、廃油ボイラ 1,976 kg）、船の運送距離 637 kmも明らかになった。これらのデータに基づき、自動車による輸送に伴う CO₂ 排出量は燃料の合計使用量に軽油使用に伴う CO₂ 排出係数（表1）を乗じて、船舶での輸送に伴う CO₂ 排出量は MiLCA への入力プロセスを内航貨物船輸送 631,267 kg・kmとして、それぞれ見積もった。以上により、重油ボイラと廃油ボイラの輸送による CO₂ 排出量はそれぞれ年間 0.02 t-CO₂、0.01 t-CO₂と算出された。

3.1.3 重油の採掘・製品化に伴う CO₂ 排出

JR北海道に対してヒアリング調査を行ない、重油ボイラの燃料の年間使用量（平成21年度）148.94 kLを得た。この値にA重油の採掘から製品になるまでのCO₂排出係数（採掘・製品化時; 表1）を乗じ、Case 1における重油の採掘から製品化までのCO₂排出量を年間35.75 t-CO₂と見積もった。また、Case 2における代替重油の採掘から製品化までのCO₂排出量を年間27.71 t-CO₂と見積もった。

3.1.4 廃油の回収に伴う輸送による CO₂ 排出

廃油ボイラは、実際の導入からまだ1年が経過しておらず、年間の燃料使用量に関する1次データがまだ存在しなかった。そこで、JR北海道に対するヒアリング調査を行ったところ、重油ボイラの場合と同程度の年間使用量（148.94 kL）が見

込まれることが分かった。よって、廃油ボイラの年間燃料使用量は重油ボイラのそれと同じと仮定した。JR北海道から1年間に回収される廃油全量に対する、廃油ボイラの年間燃料使用量分の輸送にかかる年間CO₂排出量は、回収車両の年間燃料使用量4.35 kLに輸送車の燃料である軽油の使用に伴うCO₂排出係数（表1）を乗じ、11.2 t-CO₂と見積もられた。また、廃油ボイラの燃料となるJR北海道からの廃油は、燃料全量のうちの75%（残り25%は廃食油）と仮定したので、さらに0.75を乗じ、使用済み重油（廃油）の回収に伴う輸送によるCO₂排出量を年間8.41 t-CO₂と見積もった。

3.1.5 廃食油の回収に伴う輸送による CO₂ 排出

JR北海道が廃油・廃食油を購入している会社へのヒアリング調査により、廃油ボイラの燃料となる廃食油の8割は上川地方で回収、残りは札幌市、稚内市、北見市等から再資源化場所である旭川市へ収集されていることが分かった。なお、ここでは、上川地方から回収される廃食油は、同地方で最も人口が多い3都市（旭川市、名寄市、富良野市）から回収するものと仮定した。この仮定を基に、廃食油の回収に伴う輸送によるCO₂排出量を次のように求めた。

まず、Google Mapより算出した、回収場所である上川地方3都市から再資源化場所までの輸送距離255 kmを2.5 t輸送車の燃費6 km/Lで除し、燃料の年間使用量を42.5 Lと算出した。これに、輸送車の燃料である軽油の使用に伴うCO₂排出係数（表1）を乗じ、2.5 t輸送車1台分のCO₂排出量を算出した。これを、廃油ボイラによる廃食油の年間使用量（仮定した廃油ボイラ年間燃料使用量中の廃食油分25%に廃食油の比重0.9を乗じたもの）33.5 tに換算して、廃食油の回収に伴う輸送による年間CO₂排出量を1.47 t-CO₂と見積もった。また、Case 2において、未利用廃食油は地元で回収することを仮定し、この回収に伴う輸送によるCO₂排出量は無視できるほど小さいとして年間0.00 t-CO₂と見積もった。

3.1.6 廃油・廃食油の再資源化に伴う CO₂ 排出

JR北海道が廃油・廃食油を購入している会社へのヒアリング調査を行なった結果、廃油ボイラの燃料となるJR北海道からの使用済み潤滑油（廃油）と廃食油を混合したものは、ろ過器を用いた沈殿ろ過法を用いて再資源化されていること、そして、再資源化するにはエネルギーを使用しないことが分かった。また、MiLCAへの入力が必要な、ろ過器の原材料の重量と製造時に使用する電力量についても明らかになり、MiLCAへの入力プロセスを機械用鋳鉄鋳物 400 kg、電力（北海道電力地域）20 kWhとして廃油・廃食油の再資源化に伴う年間CO₂排出量を0.03 t-CO₂と見積もった。

3.1.7 ボイラ燃料の輸送に伴う CO₂ 排出

輸送車の燃料である軽油の年間使用量（Case 1における重油ボイラ用に202.8 L、Case 2における流山温泉で使用する廃油ボイラ用に2,182.2 L）に、軽油の使用に伴うCO₂排出係数（表1）を乗じ、Case 1の重油ボイラとCase 2の流山温泉で使用する廃油ボイラの燃料の輸送に伴う年間CO₂排出量をそれぞれ0.52 t-CO₂、5.63 t-CO₂と見積もった。Case 2における代替重油の輸送に伴うCO₂排出量は、大沼・旭川市間の距離を考慮し、0.76 t-CO₂と見積もった。Case 1における廃油・廃食油及びCase 2で新たに導入する代替未利用廃食油の輸送にかかる年間CO₂排出は、輸送距離が微小であると仮定し、0.00 t-CO₂と見積もった。

3.1.8 ボイラの使用に伴う CO₂ 排出

ボイラの燃料使用に伴う年間CO₂排出量は、流山温泉で使用する、Case 1の重油ボイラとCase 2の廃油ボイラの燃料の年間使用量（重油148.94 kL、廃油111.71 kL、廃食油37.23 kL）にCO₂排出係数（表1）を乗じ、それぞれ403.63 t-CO₂、293.80 t-CO₂と見積もられた。

ボイラの電力使用に伴う年間CO₂排出量は、ボイラの年間稼働時間4,745時間に使用電力（重油ボイラ2.0 kW、廃油ボイラ4.8 kW）を乗じ、さらに北海道電力から供給された電気の使用に伴うCO₂排出係数（表1）を乗じて、流山温泉で使用するCase 1の重油ボイラでは5.58 t-CO₂、Case 2の廃油ボイラでは13.39 t-CO₂と見積もられた。

よって、ボイラの使用に伴う年間CO₂排出量は、ボイラの燃料と電力の使用によるものを合計し、流山温泉で使用するCase 1の重油ボイラでは409.21 t-CO₂、Case 2の廃油ボイラでは307.19 t-CO₂と見積もられた。Case 2において代替重油と代替未利用廃食油を使用するボイラの使用に伴う年間CO₂排出量は317.14 t-CO₂と見積もられた。

3.1.9 ボイラの廃棄及び輸送に伴う CO₂ 排出

ボイラの購入先に対するヒアリング調査の結果、MiLCAへの入力データとなるボイラの重量（重油ボイラ991 kg、廃油ボイラ1,976 kg）と廃棄処理方法（産業廃棄物として廃棄・破碎処理）が明らかになった。これらの情報を基に、MiLCAへの入力プロセスを産業廃棄物収集運搬と廃棄・破碎処理サービスとし、ボイラの廃棄とそのための輸送に伴う年間CO₂排出量を、重油ボイラでは0.01 t-CO₂、廃油ボイラでは0.02 t-CO₂と見積もった。

3.1.10 重油ボイラと廃油ボイラの使用システムの比較

重油ボイラと廃油ボイラのライフサイクルにおける各段階でのCO₂排出量、またボイラの製造、輸送、廃棄、JR

北海道から排出される廃油の再資源化に伴うCO₂排出量を各ボイラの耐用年数（15年）で除した年間CO₂排出量を表2に示す。重油ボイラでは年間762.74 t-CO₂、廃油ボイラでは年間668.64 t-CO₂と見積もられた。よって、重油ボイラよりも廃油ボイラを使用した方がCO₂排出量を年間94.10 t-CO₂削減できること、そしてこれは廃油ボイラの使用段階において、廃食油をカーボンニュートラルと見なすことによる削減分が寄与することが分かった。

3.1.11 ボイラに関する経済コストの比較

JR北海道へのヒアリング調査により、重油ボイラと廃油ボイラのライフサイクルにおける経済コストの合計は年間それぞれ1,409万円、1,395万円と分かった（表3）。よって、重油ボイラよりも廃油ボイラを使用する場合の方が年間14万円安く、耐用年数が15年であることを考慮すると、購入から廃棄までの15年で212万円安くなると見積もられた。ボイラ自体の価格は、廃油ボイラの方が重油ボイラに比べて約2倍高いが、廃油ボイラの場合、メンテナンス代や燃料となる廃油・廃食油の低価格による経済コスト削減の効果が寄与した。

3.2 暖房設備の使用に伴う CO₂ 排出量と経済コストの比較

2.3.2節で示した評価方法を用いて、暖房設備の使用に伴うCO₂排出量と経済コストを見積もった。

3.2.1 暖房設備の製造に伴う CO₂ 排出

電熱線と温風暖房機、温泉廃熱・機械発生熱利用設備のそれぞれの販売会社に対するヒアリング調査を実施し、MiLCAへの入力データを取得した。電熱線はサーモスタットと温床ケーブルに分けられ、MiLCAへの入力プロセスを産業用電熱装置としてそれぞれの価格（サーモスタット33,600円、温床ケーブル82,500円）を入力し、CO₂排出量を見積もった。温風暖房機はMiLCAへの入力プロセスを温風暖房機（熱交換式）414,000円としてCO₂排出量を見積もった。温泉廃熱利用設備と機械発生熱利用設備はMiLCAへの入力プロセスをそれぞれ強化プラスチック製容器・浴槽・浄化槽60 kg、ステンレス鋼鋼管28 kg、ポリエチレン55.4 kg、機械用鋳鉄鋳物2.6 kg、機械用可鍛鋳鉄鋳物12 kg、電気鋼板38 kg、軽油15 Lと電気鋼板15.5 kg、溶融亜鉛めっき鋼板99.1 kg、電力（北海道電力地域）0.64 kWhとして見積もった。以上より、電熱線サーモスタット、電熱線温床ケーブル、温風暖房機、温泉廃熱・機械発生熱利用設備の製造による年間CO₂排出量をそれぞれ0.01 t-CO₂、0.04 t-CO₂、0.04 t-CO₂、0.09 t-CO₂と見積もった。

表2 Case 1 及び Case 2 のライフサイクルにおける CO₂ 排出量

	製品	過程	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)	年間CO ₂ 排出量 (t-CO ₂ / 年)
Case 1	重油ボイラ	製造	1.99 ★	0.13 ⁺
		輸送	0.320 ★	0.02 ⁺
		使用		409.21
		輸送・廃棄	0.167 ★	0.01 ⁺
	重油	採掘・製品化		35.75
		輸送		0.52
	廃油	輸送		8.41
	廃食油	輸送		1.47
	廃油・廃食油	再資源化	0.512 ★	0.03 ⁺
		輸送		0.00
	廃油ボイラ	使用		307.19
	合計			762.74
Case 2	廃油ボイラ	製造	3.66 ★	0.24 ⁺
		輸送	0.220 ★	0.01 ⁺
		使用		307.19
		輸送・廃棄	0.333 ★	0.02 ⁺
	廃油	輸送		8.41
	廃食油	輸送		1.47
	廃油・廃食油	再資源化	0.512 ★	0.03 ⁺
		輸送		5.63
	代替重油	採掘・製品化		27.71
		輸送		0.76
	代替未利用廃食油	輸送		0.00
		再資源化	0.512 ★	0.03 ⁺
		輸送		0.00
	代替重油・未利用廃食油ボイラ	使用		317.14
	合計			668.64

★: 1次データにCO₂排出原単位を乗ずるかMiLCAへ入力することで得た値

+: 各ボイラの耐用年数 (15年) で除した値

表3 Case 1 及び Case 2 に関する経済コスト

	項目	年間コスト (円 / 年)
Case 1	重油ボイラの購入価格	140,000
	重油ボイラのメンテナンス代	300,000
	燃料代 (重油)	8,022,000
	重油ボイラの廃棄代	10,000
	燃料代 (廃油・廃食油)	5,615,000
	合計	14,087,000
Case 2	廃油ボイラの購入価格	267,000
	廃油ボイラのメンテナンス代	150,000
	燃料代 (廃油・廃食油)	5,615,000
	廃油ボイラの廃棄代	13,000
	燃料代 (代替重油)	6,217,000
	燃料代 (代替未利用廃食油)	1,684,000
	合計	13,946,000

3.2.2 暖房設備の輸送に伴う CO₂ 排出

電熱線と温風暖房機のそれぞれの販売会社に対するヒアリング調査の結果、電熱線と温風暖房機は他の製品と共に、電熱線は自動車と船舶によって、温風暖房機は自動車のみによって、それぞれ輸送されていることが分かった。また、電熱線の重量（サーモスタット 2.7 kg、温床ケーブル 21.6 kg）と温風暖房機の重量（95 kg）、運搬輸送距離（サーモスタットについては車での輸送距離 1,865 km と船舶での輸送距離 109 km、温床ケーブルについては車での輸送距離 1,400 km と船舶での輸送距離 109 km、温風暖房機については車での輸送距離 915 km と船舶での輸送距離 109 km）も明らかになった。よって、MiLCA への入力プロセスを、電熱線のサーモスタットと温床ケーブルはトラック輸送・軽トラック（サーモスタット 5,036 kg km、温床ケーブル 30,240 kg km）と内航貨物船輸送（サーモスタット 294 kg km、温床ケーブル 2,354 kg km）とし、温風暖房機はトラック輸送・4t車 86,925 kg km と内航貨物船輸送 10,355 kg km として見積もった。

温泉廃熱・機械発生熱利用設備については、販売会社に対するヒアリング調査の結果、輸送車の燃料である軽油の合計使用量が 0.37 L であることが分かった。これに軽油使用に伴う CO₂ 排出係数（表 1）を乗じた。

以上より、電熱線サーモスタットと温床ケーブル、温風暖房機、温泉廃熱・機械発生熱利用設備の輸送による年間 CO₂ 排出量をそれぞれ 0.00 t-CO₂、0.01 t-CO₂、0.00 t-CO₂、0.00 t-CO₂ と見積もった。

3.2.3 暖房設備の使用に伴う CO₂ 排出

電熱線・温風暖房機については（株）ファームホロ、温泉廃熱・機械発生熱利用設備については販売会社へのヒアリング調査の結果、電熱線と温泉廃熱・機械発生熱利用設備の電力使用量（電熱線 172 kWh、温泉廃熱・機械発生熱利用設備 1,638 kWh）、及び温風暖房機の電力と灯油の使用量（電力 835.2 kWh、灯油 3.6 kL）が分かった。これらの値に電気と灯油の使用に伴う CO₂ 排出係数（表 1）を乗じた。以上により、電熱線、温風暖房機と温泉廃熱・機械発生熱利用設備の使用に伴う年間 CO₂ 排出量をそれぞれ 0.10 t-CO₂、9.46 t-CO₂、2.31 t-CO₂ と見積もった。

3.2.4 暖房設備の廃棄とそのための輸送に伴う CO₂ 排出

電熱線と温風暖房機、温泉廃熱・機械発生熱利用設備のそれぞれの販売会社に対するヒアリング調査の結果、MiLCA への入力データとなるそれぞれの重量（電熱線サーモスタット 2.7 kg、温床ケーブル 21.6 kg、温風暖房機 95 kg、温泉廃熱・機械発生熱利用設備 310.6 kg）と廃棄処理方法（電熱線は燃やせないごみとして回収、温風暖房機と

温泉廃熱・機械発生熱利用設備は産業廃棄物として破碎処理）が分かった。これらのデータを基に、MiLCA への入力プロセスを、電熱線サーモスタットと温床ケーブルはごみ収集運搬（電熱線サーモスタット 2.7 kg、温床ケーブル 21.6 kg）、廃棄・家電中間処理サービス（電熱線サーモスタット 2.7 kg、温床ケーブル 21.6 kg）、温風暖房機と温泉廃熱・機械発生熱利用設備は産業廃棄物収集運搬（温風暖房機 95 kg、温泉廃熱・機械発生熱利用設備 310.6 kg）、廃棄・破碎処理サービス（温風暖房機 95 kg、温泉廃熱・機械発生熱利用設備 310.6 kg）として見積もった。以上により、電熱線サーモスタットと温床ケーブル、温風暖房機と温泉廃熱・機械発生熱利用設備の廃棄とそのための輸送に伴う年間 CO₂ 排出量をそれぞれ 0.00 t-CO₂、0.00 t-CO₂、0.00 t-CO₂、0.00 t-CO₂ と見積もった。

3.2.5 電熱線・温風暖房機利用と温泉廃熱・機械発生熱利用の比較

電熱線・温風暖房機利用と温泉廃熱・機械発生熱利用のライフサイクルにおける各段階での CO₂ 排出量、また電熱線・温風暖房機利用と温泉廃熱・機械発生熱利用の使用段階以外からの CO₂ 排出量をそれぞれの耐用年数（サーモスタット 10 年、温床ケーブル 3.5 年、温風暖房機 7 年、温泉廃熱・機械発生熱利用設備 10 年）で除した。さらに、暖房設備は 1 年間のうち冬期間（4 カ月）のみの使用を前提とするため、3.0 で除した。温泉廃熱・機械発生熱利用の場合は、ハウスの大きさを電熱線・温風暖房機を利用している（株）ファーム・ホロのものと等しくするため、その値に 2.4 を乗じた。

以上のようにして求めた年間 CO₂ 排出量を表 4 に示す。電熱線・温風暖房機利用と温泉廃熱・機械発生熱利用のライフサイクルを通じて伴う年間 CO₂ 排出量はそれぞれ 9.65 t-CO₂、2.40 t-CO₂ と見積もられた。よって、温泉廃熱・機械発生熱利用の方が、電熱線・温風暖房機利用の場合よりも CO₂ 排出が年間 7.25 t-CO₂ 少なくなると見積もられた。使用段階以外の CO₂ 排出量は十分に少ないため、CO₂ 排出量に関する両者の比較はほぼ使用段階のみで議論することができることが分かった。

3.2.6 暖房設備に関する経済コストの比較

電熱線・温風暖房機と温泉廃熱・機械発生熱利用設備の販売会社へのヒアリング調査により、電熱線・温風暖房機と温泉廃熱・機械発生熱利用設備のライフサイクルにおける年間の経済コストの合計はそれぞれ 37.1 万円と 131 万円であることが分かった（表 5）。ここでは、1 年間にかかる経済コストは、使用電気代のみ 4 カ月間の値で算出し、購入代と廃棄代はそれぞれの耐用年数で除した値としている。

表4 電熱線・温風暖房機及び温泉廃熱・機械発生熱利用設備のライフサイクルに伴うCO₂排出量

製品	過程	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)	年間CO ₂ 排出量 (t-CO ₂ / 年)
電熱線	サーモスタットの製造	0.158 ★	0.01 +
	温床ケーブルの製造	0.387 ★	0.04 +
	サーモスタットの輸送	0.00280 ★	0.00 +
	温床ケーブルの輸送	0.122 ★	0.01 +
	使用		0.10
	サーモスタットの輸送・廃棄	0.0002 ★	0.00 +
	温床ケーブルの輸送・廃棄	0.0014 ★	0.00 +
温風暖房機	製造	0.821 ★	0.04 +
	輸送	0.0139 ★	0.00 +
	使用		9.46
	輸送・廃棄	0.0160 ★	0.00 +
合計			9.65
温泉廃熱・ 機械発生熱	製造	1.07 ★	0.09 +
	輸送	0.00096 ★	0.00 +
利用設備	使用		2.31
	輸送・廃棄	0.0524 ★	0.00 +
合計			2.40

★: 1次データにCO₂排出原単位を乗ずるかMiLCAへ入力することで得た値

+ : 実際に使用するのは冬季の4ヶ月間だけなので、1年間相当の値を3.0で除した。

さらに、各製品の耐用年数（サーモスタット10年、温室ケーブル3.5年、温風暖房機7年、温泉廃熱・機械発生熱利用設備10年）で除し、温泉廃熱・機械発生熱利用設備の各過程については、(株)ファームホロのハウスの大きさに合わせて評価するため、2.4を乗じた値で表した。

表5 電熱線・温風暖房機及び温泉廃熱・機械発生熱利用設備の使用に伴う経済コスト

製品		年間コスト (円 / 年)
電熱線・温風暖房機		
電熱線	購入価格	5,609
	電気代	3,150
	廃棄代	0
温風暖房機	購入価格	59,143
	灯油代	288,000
	電気代	15,322
	廃棄代	0
合計		371,224
温泉廃熱・機械発生熱利用設備		
購入価格		1,165,848
電気代		72,120
廃棄代		72,000
合計		1,309,968

また、温泉廃熱・機械発生熱利用はハウスの大きさを電熱線・温風暖房機を利用している(株)ファーム・ホロのものと等しくするため、それぞれの値を2.4倍した。

温泉廃熱・機械発生熱利用設備利用は、電熱線・温風暖房機を使用する場合よりも年間93万9千円高いと見積もられた。つまり、温泉廃熱・機械発生熱利用設備の耐用年数を10年と仮定すると、10年間に要するコストは購入から廃棄までで939万円高くなると計算された。これは、主に温泉廃熱・機械発生熱利用設備の初期投資額が高額であることに起因している。

4. 考察

4.1 ボイラのCO₂排出量・経済コスト比較

上記のように、廃油ボイラ使用の場合、重油ボイラ使用の場合と比べてCO₂排出量は年間94.1 t-CO₂、経済コストは年間14万円、それぞれ削減できると見積もられた。

一方、株式会社東和へのヒアリング調査により、廃油ボイラの燃料となる使用済み鉱物油の主な供給元はガソリンスタンドや車の整備会社、JR北海道、自衛隊であること、しかしその供給量が少ないため、更なる廃油ボイラの普及には燃料の確保が課題であることが明らかになった。よって、燃えるごみとして、或いはそのまま下水に廃棄されているため、現状では未利用となっている廃食油を地域内で効率よく収集・供給して有効利用することで、廃油ボイラ

の導入拡大が期待される（株式会社東和、私信）。そのためには、回収の周知徹底や回収システムの構築、回収コストの低減等が今後の課題となる。

また、エンジンやボイラの燃料として、CO₂を排出しない廃食用油（植物性）のみの使用を仮定する場合があるが、株式会社新日石総研（2009）によると、廃食用油は、カロリーが比較的高く不純物が少ないものの、流動点が高いため固化する場合があります、現時点では単独で燃料として使用することが難しい。一方、廃潤滑油には添加剤に由来する灰分などの不純物が含まれているが、流動点は低い。従って、このように性質が異なる両者を混合することにより、安価で良質な工業炉燃料（バイオ再生重油）製造の可能性が検討されている。現在、バイオディーゼル（BDF）などのカーボンニュートラルな燃料が注目を集めているが、廃食用油のリサイクル用途として、バイオ再生重油とBDFのどちらが適しているかは、今後の技術革新や原油価格の動向に左右される要素が大きく、またその時の経済情勢にも依存するものと考えられる。バイオ再生重油は高濃度BDFと比較すると精製コストも安価で、排ガスや装置に対する悪影響もない。今後、バイオ再生重油の燃料としての普及や廃油ボイラなどの機器の導入の際には、より広い範囲で調査・検討を行なう必要がある。

廃油ボイラの導入がCO₂削減効果を考慮した温室効果ガス削減クレジットと結びつくことは、廃油ボイラ導入促進に向けた経済的動機となる。しかし、現時点では廃油ボイラの燃料には植物油のみではなく使用済みの鉱物油が混入しているため、CO₂削減効果の測定は難しいとしてクレジットの対象外となっている。今後、調査や研究が進むことによって、このようなリサイクル燃料の使用によるCO₂排出削減の妥当性が明らかにされ、導入推進が図られるものと考えられる。

本研究では、重油ボイラと廃油ボイラを比較する際の機能単位を1年と設定した。しかし、実際は廃油ボイラの導入からまだ1年経っておらず、廃油ボイラに関するデータは推定値であること等から、仮定した条件下での評価に留まった。将来的には、実際のデータに基づいた評価を行なうことが求められる。

4.2 暖房設備のCO₂排出量・経済コスト比較

ビニールハウス栽培の冬季暖房にかかるCO₂排出量及び経済コストを電熱線・温風暖房機利用と温泉廃熱・機械発生熱利用で比較した場合、温泉廃熱・機械発生熱利用の方が、電熱線・温風暖房機利用の場合よりもCO₂排出量は年間7.25 t-CO₂低く、経済コストは年間93.9万円高いことが分かった。

冬季のアスパラガスは高値で取引されており、北海道名

寄市農業振興センターの試算では、330m²のハウスでのホワイトアスパラガス冬季生産による収益を100～150万円と見積もった時期もある（荒木、私信）。本研究では280m²のハウスに換算した場合の経済コストを見積もったが、前述の試算から、高付加価値作物を選択して高値で取引できる状況下であれば、電熱線・温風暖房機利用による経済コスト増を相殺できる可能性はある。しかし、2011年の冬季アスパラガスの価格は北海道名寄市農業振興センターによる試算時より約20%下落する等、経済コスト増分を十分に相殺できる状況にはなっていない。

よって、経済的にも合理性のある温泉廃熱・機械発生熱利用を推進していくためには、廃熱を送る管の断熱性を高める等、より効率的な廃熱利用に向けた技術的な改善や、炭素クレジットなどのカーボンプライシングの導入、また、環境に配慮した方法で栽培された作物に付加価値をつけた販売・PR等の社会システムの変更を検討する必要がある。

現在、オフセット・クレジット（J-VER）制度において、機械発生熱の利用は削減プロジェクトとして認定されているが、温泉熱及び温泉廃熱等の利用については削減活動の候補に挙がっている状態であり、認定には至っていない。カーボン・オフセットフォーラム（2011）の調査によると、2011年1月時点での排出削減系J-VER取引価格の中間値はCO₂ 1トン当たり6,900円である。もし、温泉廃熱と機械発生熱利用のいずれも削減プロジェクトとして認証された場合、本研究で見積もった年間CO₂削減量7.25 t-CO₂のクレジット価格は50,025円となる。設備の耐用年数を10年と仮定すると、その使用期間を通じたクレジット価格の合計は500,250円と見積もられる。これにより、仮に暖房方法を電熱線・温風暖房機利用から温泉廃熱・機械発生熱利用に転換した場合に考えられる経済コストの増加を緩和することができる。

本研究では、ハウスの規模を統一するため、温泉廃熱・機械発生熱利用設備にハウスの大きさの比を乗じて計算したが、実際にはスケールメリットが働くことにより、設備の購入代金はより低くなると考えられる。さらに、対象とした温泉廃熱・機械発生熱利用設備は試行段階のものであり、今後はより実際の生産方法に沿った形での評価も必要である。例えば、収穫量を増やすために規模を大きくする、温泉廃熱をさらに効率的に利用するために栽培土を温める循環水の管の配置の仕方を改善する等、異なった仕組みでのCO₂排出量の検討も行っていく予定である。また、コストについても、本研究で扱ったシステムは必ずしも十分な収益を上げる構造になっておらず、今後イニシャルコストを減らす努力が必要になると考えられる。

4.3 未利用エネルギーの利用促進に向けた PR活動と今後の課題

重油ボイラから廃油ボイラへの転換のような、CO₂排出と経済コストの低減につながる可能性のある取り組み事例は、広くPR活動を行なうことで、導入の更なる拡大に繋がるものと考えられる。そこで、流山温泉における重油ボイラから廃油ボイラへの転換による環境負荷低減効果に関する本研究成果をまとめたポスターを流山温泉施設内に掲示した。また、内閣府「新しい公共」の枠組みで流山温泉を地域のコミュニティセンターにすることを目指して活動している、ななえ大沼ひと・まちづくり協議会のウェブサイト (<http://onuma-furusen.com/ivent/ivent08.html>) でも本研究成果を紹介することで、一層の普及拡大に努めた。

温泉廃熱を利用することで環境配慮による付加価値を付けた作物販売・PR活動の先進事例としては、例えば北海道森町濁川地区で温泉廃熱を利用し冬季ハウス栽培されたトマトに、温泉育ちのトマトというキャッチフレーズを与えて販売している例がある。また、温泉熱の活用は、温泉施設に対しても同様にPR効果を与えるものと考えられる。温泉熱活用について、温泉の温暖化対策研究会（2010）が150カ所の温泉施設へ行ったアンケートにより、今のところ温泉熱の有効利用は進んでいないが、将来的な利用に向けた関心が高いことが分かっている。一方で、温泉熱利用の具体的な方法、助成システムの種類や内容、申請方法が分からないという意見も少なくなく、助成システムの周知や助成申請の簡易化等の支援が必要である（温泉の温暖化対策研究会 2010）。

また、温泉熱回収システムや省エネ、環境配慮型温泉等の表現及び利用客へのPR効果については、「PR効果はある」、「PR効果は期待できないが、環境に優しい温泉として有効と思う」と回答した温泉施設が多い。温泉熱利用に伴う定量的なCO₂削減量や具体的な環境対策を示す等、PR方法を工夫することで、更なる効果が得られると考えられる。このような、温泉熱利用の供給先と需要先のPR効果の定量化は今後の課題である。

5. まとめ

本研究では、温泉地におけるCO₂排出量低減の可能性を検討するために、(1) 温泉の加温設備としての重油ボイラの利用と廃油ボイラの利用を比較した場合、(2) ハウス栽培の冬季暖房として電熱線と温風暖房機を利用した場合と温泉廃熱・機械発生熱を利用した場合、の2つについて、CO₂削減効果および経済コストを定量的に見積もった。

温泉の加温設備として廃油ボイラを利用する場合は、重油ボイラを利用する場合と比べてCO₂排出量、経済コスト共に少なくなることが分かった。廃油ボイラの燃料となる

バイオ再生重油はA重油や高濃度バイオディーゼルと比較してもコストが安い。しかし、廃油ボイラの更なる普及にあたっては、燃料となる使用済み潤滑油の供給量が少ないことが課題となっており、現状では利用されていない廃食油を地域内で効率よく収集・供給することで、導入の拡大が期待される。

ハウス栽培の冬季暖房として温泉廃熱・機械発生熱を利用する場合、従来の電熱線と温風暖房機を利用する場合に比べてCO₂排出は抑制される一方、経済コストは増加することが分かった。環境負荷低減の観点だけでなく、経済的にも合理性のある温泉廃熱・機械発生熱利用を推進していくためには、システムの高効率化を図る、炭素クレジットなどカーボンプライシングの導入を促進する、環境に配慮した作物栽培や温泉施設運営を付加価値としてPRする、等の方策を検討する必要があると考えられる。

謝辞

JR北海道 開発事業本部（札幌市）の林直樹氏、佐々木晃一氏、前川直之氏には、流山温泉のボイラ転換に関わるデータの提供にご丁寧に対応していただきました。株式会社東和（旭川市）の宮本行夫氏には廃油ボイラに関わるデータについてご親切に対応してくださいました。夕張りゾート株式会社（夕張市）には、温泉近接地の使用、温泉廃熱の供給、機械発生熱の利用等にご協力を頂きました。建成産業株式会社（岩見沢市）・横田富男氏には、ビニールハウス設置と供給システムの開発及び管理にご尽力頂きました。株式会社iepoの岩井尚人氏、NPO法人ねおすの宮本英樹氏、大沼・駒ヶ岳ふるさとづくりセンターの高橋諭子氏と菊地敏孝氏には大学外の組織との関わりの中でご助言を賜りました。本論文の審査員には数々の有益なコメントを頂きました。厚く御礼申し上げます。

（平成23年7月25日受付、平成24年9月4日採択）

参考文献

- 独立行政法人 産業技術総合研究所・社団法人 産業環境管理協会, 知的財産権公開システム (IDEA), 東京, 2008年
- 独立行政法人 産業技術総合研究所, 地熱発電の開発可能性, 経済産業省ホームページ, 入手先 <<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g81201a05j.pdf>>, (参照 2011-7-11)
- 北海道立地質研究所 (2008): 北海道における地熱・温泉利用の現状 —2007年版—, 85pp.
- 地子立, 志賀義彦, 今野一男, 田中静幸 (2008): 園芸学研究, 7(2), 241-247
- カーボン・オフセットフォーラム, オフセット・クレジット

ト (J-VER) 市場の動向, カーボン・オフセットフォーラムホームページ, 入手先 <<http://www.j-cof.go.jp/document/jver/markettrend20110119.pdf>>, (参照 2011-1-29)

株式会社 新日石総研 (2009): 平成20年度資源循環推進調査 (3Rシステム化可能性調査事業) 廃潤滑油と廃食用油によるバイオ再生重油の製造及び家庭廃食用油の回収システムに関する調査報告書, 104pp.

環境省, 平成20年度温泉利用状況, 温泉の保護と利用, 環境省ホームページ, 入手先 <http://www.env.go.jp/nature/onsen/data/riyou_h20.pdf>, (参照 2011a-12-29)

環境省, 産業廃棄物の排出及び処理状況等 (平成19年度実績) について, 環境省ホームページ, 入手先 <http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=14830&hou_id=11977>, (参照 2011b-8-26)

環境省, 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧, 環境省ホームページ, 入手先 <<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran.pdf>>, (参照 2011c-12-27)

Kim, Y. S., 崎山亮三 (1989): 園芸学会雑誌, 58(2), 377-382
温泉の温暖化対策研究会 (2010): 温泉施設における温泉熱等の利用状況の実態と有効利用に向けて, 94pp.

西薗大実, 茂木裕美 (2007): 群馬大学教育学部紀要, 42, 145-157

財団法人 石油産業活性化センター (2000): 石油製品油種別LCI作成と石油製品環境影響評価調査報告書, 94pp.

社団法人 潤滑油協会 (2009): どうしていますか? 廃油の分別 (2009年改訂版), 6pp.

社団法人 産業環境管理協会, LCAシステムMiLCA, ver.1.0, 東京, 2010

省エネルギーセンター (2000): 工場群の排熱実態調査研究要約集, 3pp.

吉川直樹, 天野耕二, 島田幸司 (2009): 環境経済・政策学会, 9, 59-60

全国油脂事業協同組合連合会 (2007): UCオイル (廃食用油脂) リサイクルについての手引き (案) (2007年版), 6pp.