

第3章 地域特性に応じたエネルギー地産地消技術開発

3.1 対象フィールドについて

3.1.1 当別町の概要^[1]

(1) 当別町の土地と気候

当別町は、札幌市に隣接し、札幌市から車やJRで約40分に位置する。図3-1-1-1に当別町の土地利用の概要を示す。当別町は石狩平野の北部に位置し、東西26km、南北47kmと南北に細長く、南部の平野部に市街地と農地、北部に森林が広がっている。市街地には、本町地区と西側の太美地区の他、スウェーデンの街並みを再現したスウェーデンヒルズがある。町内には当別川、茨戸川や篠津川など石狩川水系支流が多く流れており、水資源が豊富な地域である。また、当別町の北部には町内面積の約62%を占める森林ゾーンが「道民の森」を囲むように存在し、また、南部の平野部には、市街地ゾーンを含む形で農業ゾーンがあり、町内面積の約20%を占めている。

図3-1-1-2に当別町の日平均気温・日最高・最低気温を示す。当別町には気象観測所が存在しないことから、隣接する観測所（厚田・新篠津・月形観測所）の過去5か年のデータを平均したものをを用いた。日平均気温は、夏期は20℃程度と涼しく、冬期は厳寒期でも-5℃程度と冷え込みは比較的穏やかな気候である。

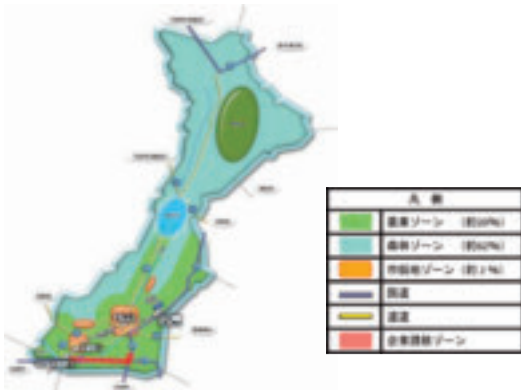


図3-1-1-1 当別町の土地利用の概要

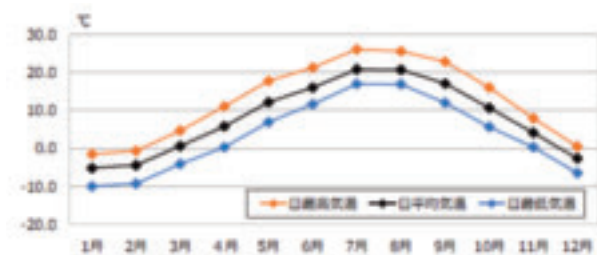


図3-1-1-2 当別町の日平均気温・日最高・最低気温

(2) 当別町の土地と人口

図3-1-1-3に当別町の人口及び世帯数の推移を示す。当別町の人口は南部に集中しており、特に本町地区と西当別地区に集中している。人口は、1995年から2020年までの間で徐々に減少しており、現在でも毎年500~600人の減少が起きている。今後の見込みとして、2045年には2015年と比較して50%減少すると予測されており、町内産業の衰退による雇用機会の減少に伴う若者や子育て世帯の町外流出等が原因と考えられる。この課題に対応するため「当別町まち・ひと・しごと創生総合戦略」^[2]において、基本目標「産業力の強化」、「人呼び込むまちの再生」、「未来を担う子どもの育成」、「住み続けたいまちの形成」を掲げ、取り組みを行っている。

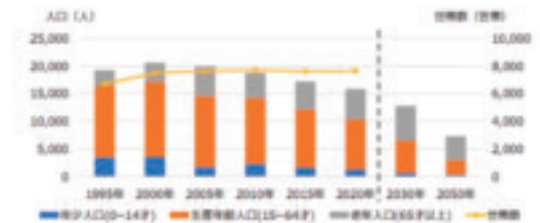


図3-1-1-3 当別町の人口及び世帯数の推移

(3) 当別町の産業

図3-1-1-4に環境省の地域経済循環分析(2015)^[3]による当別町の産業別付加価値額を、図3-1-1-5に産業別従事者の割合を示す。当別町の総生産額は811億円であり、食料品、農業の割合が最も多くなっている。北海道を代表するチョコレート製造会社の工場があるなど、食料品産業は当別町の主力産業として位置付けられている。また、農業も生産額、従事者数が多く、町の基幹産業であることがわかる。

一方、森林資源は豊富であり、7,000haほどの人工林を有するが、林業は未発達な地域となっている。

(4) 当別町におけるエネルギー利用

図3-1-1-6に環境省の地域経済循環分析(2015)^[3]による当別町の産業別エネルギー消費量を、図3-1-1-7に部門別CO₂排出量を示す。2015年のエネルギー消費量は780TJ/年であり、農業が31%、食料品製造が27%と、これらの産業が半数以上を占めている。温室効果ガスの排出量は、年間186,000tCO₂の排出量があり、製造業、家庭、業務、運輸の順となる。

(5) 当別町の地域課題

当別町は、少子高齢化による人口減少に伴う人手

不足に直面している。基幹産業である食料品、農業

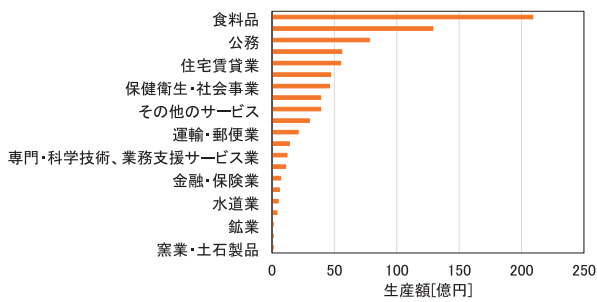


図 3-1-1-4 当別町の産業別生産額

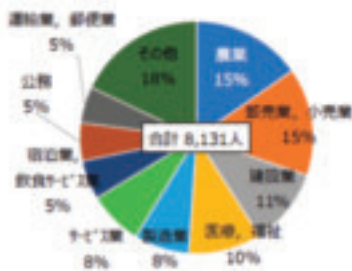


図 3-1-1-5 産業別従事者の割合

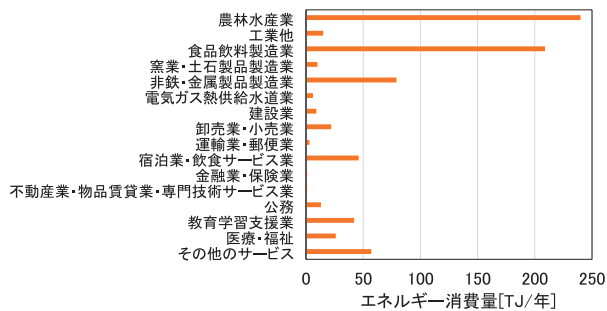


図 3-1-1-6 当別町の産業別エネルギー消費量

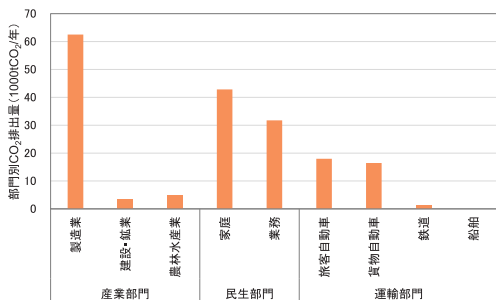


図 3-1-1-7 部門別 CO₂ 排出量

や福祉分野などの担い手の確保や、農産物、地産品の販売等の観光産業を始め、町の経済を活性化させることが課題である。また、国土交通省における豪雪地帯対策特別措置法特別豪雪地帯に指定されるなど、近郊地域に比べ、積雪が多く、町民の生活にとって大きな課題となっている。

町内のエネルギー利用においては、当別町ゼロカーボン推進計画(2023)^[1]の中で、当別町の二酸化炭素排出量について、各部門別に 2013 年度の基準年度と比較して、2019 年の実績値と、2030 年、2050 年の予測値が示されている。表 3-1-1-1 にそれを引用して示す。

表 3-1-1-1 当別町の二酸化炭素排出量

区分	【基準年度】 2013年度	2019年度	BAUシナリオ 推計値		
			2030年	2050年	
1041- 町界	産業部門	80,315	96,970	128,364	150,069
	準産業部門	41,066	37,285	29,979	17,989
	業務その他の部門	33,379	34,854	25,071	25,383
	運輸部門	35,804	31,925	27,485	24,335
10414- 町界	942	889	838	752	
合計	191,528	201,922	211,737	217,627	

※BAU シナリオ:これまで通りのエネルギー使用状況で推移するシナリオ (GDP, 業務床面積, 貨物需要, 人口変化などの今後の見通しについては、シナリオの中で反映されている)

BAU シナリオによる 2030 年度, 2050 年度の町の二酸化炭素排出量推計値は, 2013 年度比でそれぞれ 10.6%, 13.6%増加するものと推計されている。

図 3-1-1-8 に当別町全体のエネルギー消費量を示す。



図 3-1-1-8 当別町全体のエネルギー消費量

当別町によると、都道府県別エネルギー消費統計または総合エネルギー統計(資源エネルギー庁)より按分にて算出したとしている。ただし算出された石炭の消費エネルギーについては使用実績がないことから、石油製品へ振り替えたとしている。役場のエネルギー消費量は当別町の資料に基づいている。2030, 2050 年は予測値としている。

当別町のエネルギー消費量は、2,200~2,900TJ/年となっており、燃料種別では石油製品の消費量が最も多くなっている。この数値は按分法に基づく推定値に過ぎず、今後、町内のエネルギー需要の精査が必要であるが、道内の他の市町村と同様に積雪寒冷地の地域特性から、冬季の暖房利用における化石燃料の使用割合が多いことは推定されるところであり、化石燃料の削減が喫緊の課題となっている。

3.1.2 当別町における木質バイオマス・地中熱の導入検討に至った背景

(1) エネルギービジョンの作成

当別町では、住民のより良い生活環境を意識したエネルギービジョンを策定し、それに基づいた政策を実行している。最初のエネルギービジョンは、平成 15 年度に策定された「当別町地域新エネルギービジョン」^[4]であり、環境を重視したまちづくりを推進するものとした。この新エネルギービジョンでは太陽光、風力などの自然エネルギー、廃棄物、バイオマスエネルギーの町内の賦存量を数値化し、当別町の再生可能エネルギー利用の可能性を示した。また、平成 26 年度には、再生可能エネルギー導入を推進するため、新エネルギービジョンに事業化の視点を盛り込み、改定を行っている。さらに平成 30 年度には、「当別町地域新エネルギービジョンプロジェクト推進基本方針」^[5]を策定した。この基本方針は、新エネビジョンで示された方針やプログラムを基本としながら、二酸化炭素排出削減などの地球温暖化対策と農林業の活性化等におけるまちづくりのため、地域特性に応じた新エネルギー施策を推進することを目的として策定されている。「当別町まち・ひと・しごと創生総合戦略」^[2]、「当別町生涯活躍のまちづくり基本構想」^[6]、「北の住まいるタウン」の実現に向けて」^[7]、「当別町地球温暖化対策実行計画（事務事業編）」^[8]など、各種戦略・構想等と連動しながら、新エネルギーを活用したまちづくりを進めている。

(2) 再生可能エネルギー導入の取り組み

エネルギービジョンの策定に合わせて、再生可能エネルギーの導入も進めてられている。具体的には賦存量と実現可能性の高さから、木質バイオマス、地中熱、太陽光発電の利用について、優先的に取り組みが行われている。平成 26 年度には、遊休町有地である町内で最大の廃棄物埋立地を活用した太陽光発電事業化を目的に、商事会社と連携協定を締結した。平成 27 年度には、新エネルギービジョンの改定と併せて実施した町民、事業者との勉強会の意見を参考に、上記太陽光発電事業を開始し、当該太陽光発電所から得られる売電収益をコミュニティバス（使用済み天ぷら油を町内の家庭、店舗から回収、精製し、軽油代替燃料として町内で運行）の運行財源の一部として活用している。

また、行政面積の 6 割を占める森林の活用を目的に、「木質バイオマスを活用した地域循環可能性調査

事業」^[9]が実施された。この調査事業では、冬の暖房で使用する化石燃料を、地域資源である木質バイオマスに転換することで、エネルギーの地域循環による地域経済の活性化に繋がることが示された。また、町内の森林からの供給可能量で、町内の主要公共施設の化石燃料を置換し、さらに住宅 1,000 戸以上に供給することが可能であることが示された。

木質バイオマス、太陽光発電の利用については、環境省の補助金「防災拠点等への再生可能エネルギー導入促進事業」を活用し、総合体育館に太陽光発電設備、蓄電池、木質ペレットボイラを導入し、災害時にも対応可能な再エネ設備が導入された。この事業により、胆振東部地震のブラックアウト時も、町で唯一電源のある避難所として活用されている。

地中熱の利用については、西当別地区において、地中の土壌温度が他地域より高いことが知られており、この地区の地中熱エネルギーの賦存量、事業化の可能性を調査するため、「地域資源を活用した農業活性化事業」が実施された。この事業の中で、最先端の水耕栽培設備、LED 照明、地中熱を活用して、西当別地区でイチゴの栽培実証を行った。この事業を期に、現在は「北欧の風 道の駅 とうべつ」の隣接する敷地で、イチゴ栽培を最先端の水耕栽培設備で運営する企業の誘致に繋げている。平成 28 年度に建設された道の駅「北欧の風 道の駅 とうべつ」では、他の熱源と比較して優位と考えられたことから、環境省の補助金「再生可能エネルギー電気・熱自立的普及促進事業」を活用し、地中熱ヒートポンプによる床暖、暖房・冷房設備が導入された。

(3) 道総研のニーズ調査

上記のように当別町では、戦略研究開始前から町の施策により、再エネ導入を堅実に進めてきたことがわかる。この状況の中で平成 29 年に道総研が当別町に再エネ利活用に関する研究ニーズ調査やヒアリングを行ったところ、下記のとおり特に木質バイオマス、地中熱利用、エネルギーマネジメントシステムに関するニーズが浮かび上がった。下記に具体的ニーズを示す。

1) 木質バイオマスの利用拡大技術の開発

- ・町の総面積の約 62%を森林が占めており、森林環境税の導入により供給量の増大が予想されるが、より詳細な賦存量の調査が求められている。

- ・平成 30 年度に、木質バイオマス熱利用事業化計画を策定し、今後整備される複合用途建築物において、木質バイオマス燃料の活用を検討している。しかし

ながら、町内に燃料加工する工場がないため、町内で燃料を供給する体制の構築が必要とされる。

・他の地域においても同様な取組が検討されているが、住民への関心が広がらず、木質バイオマスの利用が停滞している現状にある。

2) 地中熱の利用

・積雪寒冷で熱需要の多い本道において、地中熱を活用したエネルギーシステムは、空気熱源と比較して数 10%以上の省エネが期待できる。これまでに道内で 640 件程度 (2015 年度末、全国 2 位) の導入実績があるが、高額なボーリング費が障害となり、十分な普及には至っていない。

・太美地区の一部に周辺地域より 5~10℃地中温度が高いエリアがあり (図 3-1-2-1)、これまでもこれを活用した施設導入を進めてきたが、さらに推進していきたい。



図 3-1-2-1 地下水湧出温度の等値線図
(当別町太美地区、単位：℃)

※地理院地図 (<https://maps.gsi.go.jp/>) を基に作成

3) エネルギーマネジメントシステムの導入

・ヒートポンプの成績係数は一次側、二次側温度差や負荷に応じて変動するが、状況に応じた高効率な制御により、省エネ性が向上できるエネルギーマネジメントシステム (EMS) の導入を進めていきたい。

・地中熱のような地域の熱源を効率的に活用する手法に、複数施設に熱エネルギー (温水) を分配する地域熱供給システムがある。温水を分配する際に地中に埋設した熱導管が使用されるが、当別町の太美地区を始め北海道の大部分の地質は他の地域と異なる泥炭である。地盤の部分的な沈下に伴う熱導管の歪みにより、その耐久性が懸念されているため、熱導管の耐久性を検証したい。

以上の背景に基づき、道総研では、当別町をフィールドとし、木質バイオマス・地中熱・エネルギーマネジメントシステムをキーワードとした社会実装研究を実施することとした。

(4) 導入プロセス、環境適合性、経済性評価

木質バイオマスや地中熱等の地域資源を有効活用する技術を社会実装する際に、必要な社会的合意を得るためには、適切な省エネ性や経済性の評価手法が必要である。その手法は、地域別に異なる事情を有することから、具体的な地域を対象に、地域特有の事情を踏まえて考察する必要がある。また、類似の事情を有する他地域へ展開する際に参考となるものが望ましい。このため、社会実装の導入プロセス、環境適合性、経済性に関する検討を木質バイオマス、地中熱の研究項目として加え、研究を実施することとした。

3.1.3 本章における社会実装

(1) 社会実装の目的と研究項目

当別町の状況を踏まえ、当別町との複数回の協議、道総研内関係機関との調整を行い、本研究における社会実装の目的、研究項目を設定した。

1) 木質バイオマスの利用拡大技術の開発

① 研究の目的

木質バイオマス利用のための先進的な技術・手法の実証、導入施設におけるバイオマスエネルギーの利用技術の高度化により、木質バイオマスの利用拡大のために必要な技術課題を解決することを目的とした。

② 研究内容 (図 3-1-3-1)

木質バイオマスの利用拡大に向けて、川上の資源量調査から川下のボイラーにおけるエネルギーの最適需給制御・調整まで、限られた資源を地域内で効率よく利用可能なエネルギーシステムを構築する。川上部では、UAV (ドローン) や衛星画像を用いた調査と森林調査簿を比較し、省人化した資源量調査を行う。川中部では、品質が安定したバイオマス燃料を地域内で供給するシステムを構築するための乾燥及び集荷方法を検討する。川下部では、木質バイオマス導入施設 (複合用途建築物) における建築・設備仕様及び見える化システムを含む最適制御の検討と検証、木質バイオマス利用による温室効果ガス排出削減効果の試算と検証、ボイラーにおける排ガス・焼却灰の安全性の調査と検証により、木質バイオマスの効率的利用のための手法を構築する。

③ 研究項目

- ・先進技術活用による木質バイオマス賦存量推定手法の高度化
- ・木質バイオマスの効率的乾燥及び集荷方法の検討
- ・木質バイオマス導入施設における熱利用技術の高



図 3-1-3-1 木質バイオマスの利用拡大技術の開発

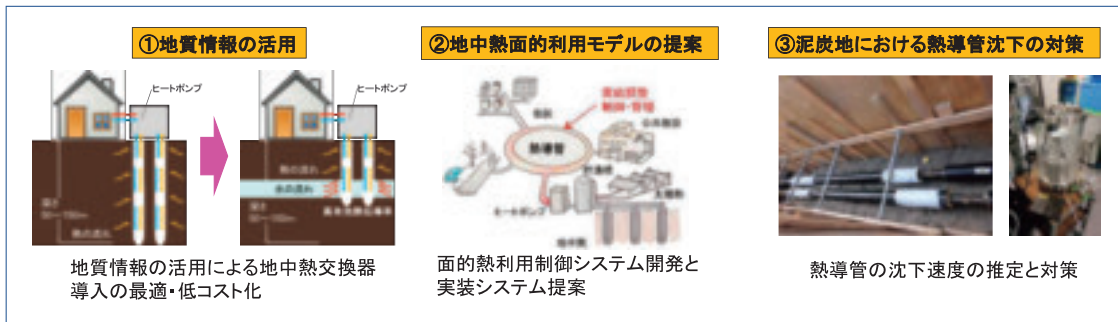


図 3-1-3-2 熱エネルギーネットワークシステムの構築の概要

度化

④ 目指す成果とその活用策

当別町におけるバイオマス利用拡大計画策定に活用するとともに、木質バイオマス熱供給システムを円滑にかつ効率的に遂行する、地産地消モデルを構築する。最終的に当別町をモデルとして、他の地域における木質バイオマス熱供給システムの社会実装を促進する。

2) 熱エネルギーネットワークシステムの構築

① 研究の目的

当別町太美地区をフィールドに、地中熱利用のエネルギーシステムの導入コストの低減を図る。また、泥炭地における熱導管の沈下速度の推定とその対策手法を検討することにより、熱導管の安全性を確保する。これにより、地産地消型のエネルギーシステムの利用を促進することを目的とした。

② 研究内容(図 3-1-3-2)

本研究では、地中熱利用の課題である導入の低コスト化に対する解決策として、地質情報を活用して、

地下水（帯水層）により、土壌の有効熱伝導率が他の場所よりも高い部分に地中熱交換器を設置し、単位熱交換器長さあたりの採熱量を増加させることを当初の検討項目とした（図 3-1-3-2）。これを基礎データとして、モデル施設におけるエネルギーシステムの設計を行い、地中熱を活用した地産地消型のエネルギーシステムを提案する。

次に、泥炭であるモデル地域における熱導管の沈下速度を周辺地盤の熱導管に与える熱圧縮による影響を検討して推定するとともに、遊びを設けた蛇行敷設による沈下対策手法を提案する。

③ 研究項目

- ・ 地中熱利用拡大技術の構築
- ・ 熱導管沈下速度の推定と対策手法の提案

④ 目指す成果とその活用策

ヒートポンプを利用したシステムの省エネ、高効率化を図るとともに、自治体、システム設計企業に施工熱導管の導入手法を提供する。これらをモデル施設のエネルギーシステムの設計に反映して、自治

体に提案することにより、その実装を目指す。

3) 導入プロセス、環境適合性、経済性に関する検討

① 研究の目的

対象地域や他地域におけるエネルギーの地産地消技術の社会実装を推進することを目的とする。

② 研究内容

対象地域におけるエネルギー地産地消技術の社会実装を推進する効果的な導入手法の検討や社会的合意形成に必要な省エネ性や経済性などのデータを提示することにより、対象地域におけるエネルギーの地産地消技術の社会実装を推進するとともに、他地域に技術展開する際に参考となる一連の導入プロセスの取りまとめを行う。

③ 研究項目

- ・導入プロセスの構築(ケーススタディの取りまとめ)
- ・環境適合性に関する検討
- ・経済性に関する検討

④ 目指す成果とその活用策

- ・木質バイオマス利用、地中熱利用に関する導入プロセス、環境適合性、経済性を明らかにし、エネルギーの地産地消技術の社会実装を推進する。
- ・ケーススタディとして当該事業の実施プロセスと費用や効果を取りまとめ、他地域の類似計画において参考事例として活用する。

(2) 社会実装のプロセス

自治体の事業は常に変化を伴う。自治体と社会実装を行う本研究においても研究開始後に状況の変化に伴い、一部目標の変更を行った。また、本研究により到達した社会実装の概要を下記に述べる。

1) 木質バイオマスの利用拡大技術の開発

当初、地産地消する木質バイオマス燃料は町内の未利用材(林地残材)から調達することを予定していたが、当別町がより低コストで調達できる燃料を検討した結果、石狩川流域の河川区域内に繁茂する樹木(河川支障木、ヤナギなど)を利用することとした。

河川支障木は、河川内の流水障害を引き起こし、洪水時に水位上昇の原因となる場合がある。また、樹木が倒木し流木となると、下流の堰等に引っかかる等、河川管理に悪影響を及ぼす場合がある。

このため、国土交通省では石狩川流域において、国土強靱化(災害対応)の交付メニューを活用して河川支障木(写真 3-1-3-1)の施業を実施しており、当別町内事業者が施業の入札に参加している。年間の施業は河川支障木全体の 1/100~1/200 程度であ

り、交付メニューが継続される限り、河川支障木の供給は確保できる。町内事業者は、10,000 t/年以上のチップを主に江別市にある発電事業者用に取り扱っており、本研究で関わりのある3つの学校の暖房用木質バイオマスボイラーで使用するチップ量(400 t/シーズン)は容易に確保できる。

表 3-1-3-1 に当別町内で 2019 年に得られた未利用材(林地残材、トドマツ)と河川支障木の性状を、写真 3-1-3-2 に各樹木から得られたチップの外観を示す。河川支障木は、未利用材(林地残材)と比較して、灰分が多く、土の付着もあるなど、燃料としては、必ずしも品質の高いものではない。一方、未利用材(林地残材)と同等の発熱量が得られ、地域の安定熱源としてとらえることもでき、当別町はボイラー燃料として、河川支障木を使う意向であった。

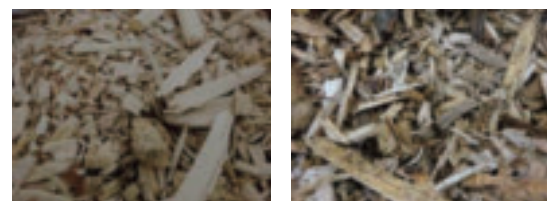


写真 3-1-3-1 河川支障木の外観

表 3-1-3-1 未利用材(林地残材)と河川支障木の性状

区分	採取時含水率 [W.B.%]	灰分 [%]	総発熱量 (無水ベース) [MJ/kg]
未利用材	58.6	0.2	20.5
上記チップ	54.2	0.2	20.6
河川支障木	48.4	0.6	19.5
上記チップ	52.5	1.4	19.4

※未利用材(林地残材)はトドマツ



未利用材(林地残材) 河川支障木

写真 3-1-3-2 各樹木から得られたチップの外観

この結果、森林資源調査と燃料チップのサプライチェーンとが紐付かないこととなったが、他の地域においては、間伐材や林地残材を利用していくケースが多いと考えられることから、森林資源量の調査はそのまま進めることとした。

本研究で到達した社会実装の概要は下記のとおり

りである。

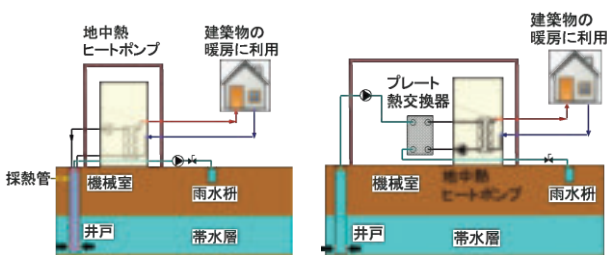
①町内の事業者による河川支障木の施業、廃校となった中学校のグラウンドでの保管、②木のチップ化と廃中学校体育館での保管、③西当別小学校・中学校への木質チップボイラー利用熱源システムの設置（従来の重油ボイラーの更新）と運用、④新築建築物であるとうべつ学園への木質チップボイラー利用熱源システムの設置と運用、⑤システム制御・運用の見える化システムの設置

これらの社会実装には、①チップ製造の事業性評価ツール、②木質ボイラー利用熱源システムの経済性・環境適合性評価ツールを活用して、事業計画や導入効果の評価が行われた。

2) 熱エネルギーネットワークシステムの構築

本研究では、地中熱利用の課題である導入の低コスト化に対する解決策として、地質情報を活用して、地下水（帯水層）により、土壌の有効熱伝導率が他の場所よりも高い部分に地中熱交換器を設置し、単位熱交換器長さあたりの採熱量を増加させることを当初の検討項目とした（図 3-1-3-2）。

しかしながら、帯水層の位置や量は地域によってまちまちであり、採熱部全体に地下水流れがあることは珍しく、地中熱交換器設置コストを十分に低下させることは難しい。このため、平成 15 年頃に盛んに研究が進められた地下水を直接利用する方式^[10]について、新たに検討することとした。図 3-1-3-3 に地下水をヒートポンプの熱源として直接利用する方式の概要を示す。本研究では、図 3-1-3-3 の(a)ヒートクラスター方式(井戸内に採熱管を導入し、地下水と採熱管内の不凍液を熱交換する)を社会実装の導入プロセスのケーススタディとして取り上げた。また、(b)オープンループ方式(井戸から地下水を揚水し、直接熱交換器に導入する)についても、地中熱利用方式の選択肢として示すこととした。



(a)ヒートクラスター方式 (b)オープンループ方式
図 3-1-3-3 ヒートポンプ熱源として地下水を直接利用する方式の概要

この結果、本研究で到達した社会実装の概要は下記のとおりである。

ロイズタウン駅前歩道に地下水利用の地中熱融雪システムの設置（2022 年度）と運用

これらの社会実装には、①当別町太美地区の地下水の性状調査②複数個所における地下水を利用した地中熱ヒートポンプシステムの実証試験の結果と、本研究を実施する中で検討した導入プロセスを検証する形で行った。

地域熱供給システムは、熱源システムから熱導管を介して各施設に温水または冷水を供給するシステムであり、北欧やアメリカ、中国などで発達している。なかでも、デンマークにおける地域熱供給の普及率は 60%を超えており、温度が 55℃以下の温水を循環する第 4 世代地域熱供給システム^[11]が実装されている。日本においても、地域にある温泉熱、地下水、太陽熱、排熱等を熱導管に導入し、適切なタイミングで給湯や暖房の熱源に供給する熱エネルギーネットワークシステム（図 3-1-3-4）の検討が行われている^[12]。

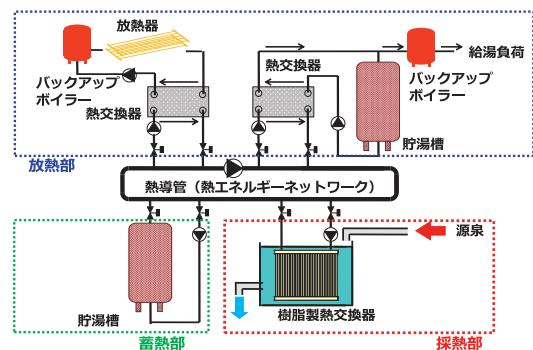


図 3-1-3-4 熱エネルギーネットワーク検討例^[12]

さらに近年では、熱損失の低減や熱導管の耐久性向上を目的に、40℃以下の低温熱源を熱エネルギーネットワークシステムに活用する第 5 世代地域熱供給システムについても検討されている。海外においては、実用化事例^[13]があり、国内においても調査が進められている^[14]。

しかしながら、熱導管の導入には、補助金を活用しても高額なインシヤルコストがかかるため、それに見合う導入メリットを示すことが課題である。当別町においても、地域熱供給システムに興味はあるものの、研究開始当初の時点で導入の検討予定はないとのことであった。

一方、ヒートポンプ熱源として、地下水を直接利用する方式を検討する中で、当別町太美地区では、後述するように地上から 40m 以深に広範囲に渡って面的に帯水層が広がり、豊富な地下水が賦存していることがわかった。この結果を受けて、帯水層を熱

導管に見立てた熱エネルギーネットワーク（図 3-1-3-5）を検討することとした。帯水層の水を各施設で“その場”で使用し、減少した地下水は帯水層から供給される。熱導管を使用する一般的な地域熱供給システムと比較して、熱導管の導入コストがないこと、温水搬送動力が必要ないこと、普及が進んでいる小型ヒートポンプを活用可能であることなどのメリットを有する。ただし、各施設で地下水を揚水するためのポンプの動力が必要である。また、所定量以上に揚水すると、地盤沈下や塩水化の原因となるため、地域で大量に使用する場合は、後述するモニタリングが必要となる。本報告書では、地下水利用の際の留意点を井戸・帯水層の性状評価の節で述べる。また、帯水層の利用の例として、1本の井戸から複数の住宅にヒートポンプ用の熱を供給する共同井戸モデルを検討することとした。

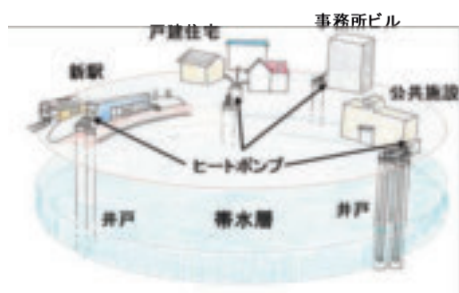


図 3-1-3-5 帯水層を熱導管に見立てた熱エネルギーネットワークの概要図

省エネ・再エネ技術の地産地消システムを構築するにあたり、当該分野においても冒頭に記載したように少子高齢化による人口減少等に伴う人手不足に対応するため、各種作業を実践する担い手を育成することも重要な取り組みと考える。本章においては、道総研の取り組みを住民勉強会、WEB を使ったセミナーで技術啓蒙や意見交換を行うとともに、住民主催の勉強会に参加するなど、エネルギー地産地消技術導入に対する住民への理解促進に関する活動を行ったので紹介する。

以上本章での記載内容が、他の自治体等の皆様の地域資源を用いた地産地消システム導入の一助になれば幸いである。

[引用文献等]

- [1] 当別町.『当別町ゼロカーボン推進計画』. (2023)
- [2] 当別町.『当別町まち・ひと・しごと創生総合戦略（第一期）』. (2015)
- [3] 環境省.『地域経済循環分析』. (2015)
- [4] 当別町.『当別町地域新エネルギービジョン』.

- (2001)
- [5] 当別町.『当別町地域新エネルギービジョンプロジェクト推進基本方針』. (2014)
- [6] 当別町.『当別町生涯活躍のまちづくり基本構想』. (2015)
- [7] 当別町.『「北の住まいるタウン」の実現に向けて』. (2017)
- [8] 当別町.『当別町地球温暖化対策実行計画（事務事業編）改訂版』. (2018)
- [9] 当別町.『木質バイオマスを活用した地域循環可能性調査事業報告書』. (2016)
- [10] 例えば、(財) ヒートポンプ・蓄熱センター.『地下水利用とヒートポンプシステム研究会第1回研究発表会（平成15年度）資料集』. (2003)
- [11] State of Green.『地域熱供給』. (2016)
- [12] 白土博康ほか. “Development and Application of New Heat Supplying Systems utilizing Hot Spring Water in the Northern Island of Japan”. 第5回スマートエネルギーシステム国際会議. 139-141. (2019)
- [13] Simone Buffa, Marco Cozzini, Matteo D’ Antoni, Marco Baratieri, Roberto Fedrizzi. “5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe”. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 104. 504-522. (2019)
- [14] 特定非営利活動法人地中熱利用促進協会.『再生可能エネルギー熱利用技術を用いた熱供給の導入可能性と研究開発課題に係る調査』. (2021)

研究担当機関：エネルギー・環境・地質研究所
執筆者：白土 博康

3.2 木質バイオマスの利用拡大技術の開発 序文 木質バイオマスの地産地消にあたって

木質バイオマスを含め、日本におけるバイオマス利用の方向性は、10年ごとに閣議決定される“バイオマス活用推進基本計画”に定められている^[1]。ここでは本論に入る前に、2022年9月に改定された、農水省の「バイオマス活用推進基本計画（第三次）」（以下、「基本計画」）の概要、次いで2023年8月に評価報告書が公表された「北海道バイオマス活用推進計画（2013-2022）」^[2]（以下、「推進計画」）より全国及び北海道の木質バイオマス利用の状況について述べたい。

(1) 国の基本計画

国が基本計画で定める主要バイオマス10種の年間発生量と利用率を表3-2-0-1に示す。木質バイオマスに分類される製材工場等残材や建設発生木材は既に利用率が100%に近い。それ以外のバイオマスも80%から100%の利用率となっているものが半数を占める。主要10種でもっとも利用率が低いバイオマスが林地残材である。

国は第二次基本計画の総括として、“バイオマスの活用を推進する取組はおおむね順調に進んでいる”とし、バイオマス産業の規模が目標値を上回る増加となったことや、個別のバイオマス利用率の改善がみられる等、目標についても一定程度達成されている状況にあるとしている。

表 3-2-0-1 主要バイオマス 10 種と利用率

（文献 1 より引用）

バイオマスの種類	年間発生量	現在の利用率	2030年の目標
家畜排せつ物	約8,000万t	約86%	約90%
下水汚泥	約7,900万t	約75%	約85%
下水道バイオマスリサイクル	—	約35%	約50%
廃棄物系			
黒液	約1,200万t	約100%	約100%
紙	約2,500万t	約80%	約85%
食品廃棄物等	約2,400万t	約58%	約63%
製材工場等残材	約510万t	約98%	約98%
建設発生木材	約550万t	約96%	約96%
未利用系			
農作物非食用部	約1,200万t	約31%	約45%
林地残材	約970万t	約29%	約33%以上

一方で、林地残材等の利用率が高くない未利用系バイオマスについては、さらなる活用に向けて重点的に取り組む必要があるとし、今後は基本計画の主要指標に含まれていないバイオマスの利用も重要としている^[1]。また、食料と木材については前計画の

時点から、バイオマスプラスチック原料や発電所向けの需要が急増したことから、マテリアル利用の供給に支障が生じないように、エネルギー利用とのバランスを図ることが重要としている。

さらに新計画では“今後は都市部を含めた各市町村が計画的かつ主体的にバイオマスの活用に取り組むことが重要”とし、地域課題への対応は地域が主体になって解決すると明記している。

以上、第三次基本計画改定の主なポイントは四つある。第一に、国の定める主要バイオマスは順調に活用が進み、今後は主要バイオマス以外の利用も重要とされている点である。国が基本計画で触れている「主要10種類以外のバイオマスの例を図3-2-0-1に示す。今後は、林地残材や農業残さなど“伸びしろ”のあるバイオマスに加え、それ以外に地域で利用可能なバイオマスを活用していく必要がある。

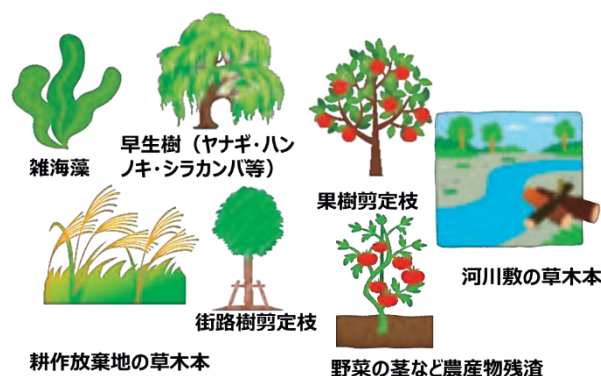


図 3-2-0-1 主要 10 種以外のバイオマスの例

第二に「地域課題への対応は地域が主体になって解決する」と明記され、そのために、2030年度を目処に全国のすべての都道府県で活用推進計画、すべての市町村においてバイオマス関連計画を保有することが目標とされている点である。なお2023年4月1日時点で、47都道府県のうち活用推進計画を保有するのは20道府県（43%）で、1724市町村のうち関連計画を保有するのは395市町村（23%）に留まっている。

第三に、「バイオマスの供給基盤となる食料・農林水産業の持続性の確保」、「原料の生産から収集・運搬、製造・利用まで、経済性が確保された一貫システムの構築」を踏まえたエネルギー地産地消の実現が目標とされている点である。

木質バイオマスで言えば、“森林・林業等と持続可能な形で木質バイオマスの効率的な供給・利用システムの構築を目指す”^[1]こととなる。森林の持続性という意味では、地域の森林資源量について、精度

の高い予測が欠かせない。また効率的な供給システムのためには地産地消を可能とする、地域の中で完結する一貫システムを構築する必要がある。

第四に「マテリアル利用との競合の回避」が前計画よりも強く押し出されている点である。

(2) 北海道の推進計画

一方、北海道の推進計画においては、主な対象となるバイオマスを4類型8項目にわけている(表3-2-0-2)^[2,3,4]。全体的に北海道では、バイオマスの利用が進んでいるのがわかる。特に、全国では利用率の低い農作物非食用部と林地残材(北海道では『未利用木材』)は、それぞれ北海道における利用率が84%、69%と高いことが特徴である^[4]。国の主要10種以外のバイオマスである“漁業系・水産加工残さ”も利用率は98%と高くなっている。

表3-2-0-2 北海道における推進計画対象バイオマス8種と利用率

(文献4より引用)

バイオマスの種類	年間発生量	現在の利用率	備考	
農業系	家畜排せつ物	20,357千t	96%	
	農作物非食用部	1,555千t	84%	利用率は全国の約2.7倍
木質系	製材工場等残材	781千t	99%	
	未利用木材	1,202千t	69%	利用率は全国の約2.4倍
水産系	漁業系・水産加工残さ	292千t	98%	主要10種以外
	食品加工残さ	930千t	97%	
廃棄物系	生ゴミ	500千t	10%	国では食品廃棄物等を含む
	下水道汚泥	134千t	84%	

評価報告書では、未利用材の利用状況と今後の課題を以下のように総括している^[3,4]。

『未利用木材を有効に活用することは、森林資源の循環利用につながることから、今後も引き続き、路網の整備や施行の集約化機械化など森林整備推進のための施策を通じて、未利用木材を効率的・安定的に集荷し供給できる体制を構築していく必要がある。』

『木質バイオマス発電所の稼働などにより、利用率は目標を大きく上回った一方、発電などによる需要の増加が、製材などの既存利用に影響を及ぼさないよう、細い間伐材や枝条などの未利用木材や河川整備に伴い発生する河道内樹木などを積極的に活用するとともに、効率的・安定的に集荷し供給できる体制を構築していく必要がある。』

(3) 本章の内容について

以上のことを踏まえると、北海道は全国に比べて主要バイオマスの利用が進んでいることから、マテリアル利用との競合を避けながら、林地残材に加えて新たなバイオマス資源の地産地消に取り組んでいくことが必要と考えられる。

次項からは、間伐材や枝条などの林地残材に加え、マテリアル利用と競合しない主要10種以外のバイオマスとして河道内樹木(以下「河川支障木」とする)に焦点を当てることとする。

以下の知見が、2030年に向けて、市町村バイオマス活用推進計画の立案をサポートするものとなれば幸甚である。

[引用文献等]

- [1] 農林水産省.『バイオマス活用推進計画(第三次)』.
<https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/biog/220906.html>. (2022)
- [2] 北海道.『北海道バイオマス活用推進計画』.
1-12. https://www.pref.hokkaido.lg.jp/fs/2/3/5/2/0/9/9/_/biomass_keikaku_honpen.pdf. (2013)
- [3] 北海道.『北海道バイオマス活用推進計画中間評価報告書』. 1-13. (2018)
- [4] 北海道.『北海道バイオマス活用推進計画評価報告書』. 1-13. (2023)

研究担当機関：林産試験場

執筆者：酒井 明香

3.2.1 先進技術の活用による木質バイオマス賦存量推定手法の高度化

(1) 背景と目的

木質バイオマスを含む森林利用計画の策定では、出材可能な樹種や材積、また森林資源の持続可能性を確認するために、対象とする森林の樹種や面積、蓄積(樹木の幹体積の合計)の正確な現況把握が必要である。これは従来、北海道や国が作成する森林の台帳(以下、森林簿)を用いて把握されてきた。しかし、森林簿の作成では立木の直径や樹高を人力によって測定しているため、広大な森林の全てを把握しきれず、森林簿に記載された資源情報が現況と乖離している可能性がある。そのため、実際の人工林利用の計画策定においては、森林簿の精度をまず評価し、現況に準ずるように補正する必要がある。そこで、本稿では、木質バイオマス利用を計画している石狩郡当別町において、近年発展を遂げているリモートセンシング技術を利用し、森林簿に記載されている人工林面積及び蓄積の精度評価を行った。その上で、当別町の人工林資源の将来予測から、持続可能な年間伐採材積を把握した。

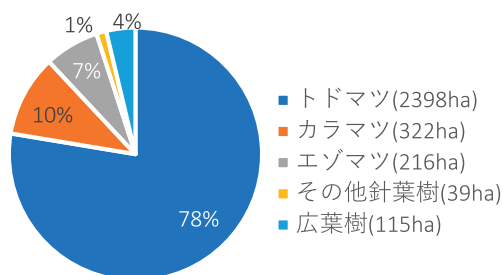
(2) 対象地及び方法

1) 対象地の概要

対象とする森林は、当別町の主要人工林であるトドマツ人工林のうち、国有林及び道有林を除く約2,400haとした(図3-2-1-1)。当別町のトドマツ人工林での近年5ヶ年での伐採材積は約2,000~7,000 m³(平均5,000 m³)である(図3-2-1-2)。また、直近10年間の平均植林面積は約10haである^[1]。

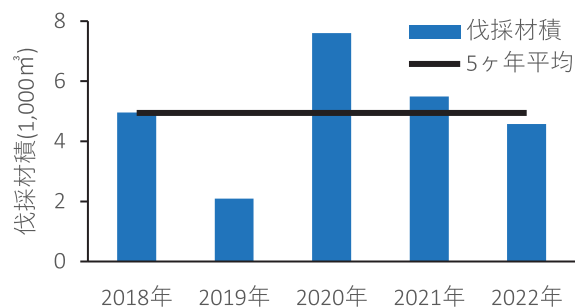
2) 分析方法

市町村単位の森林蓄積は、林分(管理の単位となる林地のまとまり)毎の蓄積の和で計算される。また、林分の蓄積は、林分面積と面積当たりの蓄積の積で計算される。このため、森林簿の蓄積を、現況を基に評価し補正するには、対象とする林分(トドマツ人工林)が実際に生育している面積と、トドマツ林分の面積当たりの蓄積の2点を評価する必要がある。本研究では、以下の4つの手順で分析した。
 [手順1: 対象林分の面積の推定]森林簿でトドマツ人工林とされている林分のうち、どれだけの面積割合が実際にトドマツとして生育しているか(以降、成林率)を把握する手法を検討した。当別町全域で把握するため、広域で現況を把握できる衛星画像(Sentinel-2 解像度:10m)を用いて、機械学習により成林率の把握を林分毎に行った。また、衛星画像



※[1]より作成

図3-2-1-1 当別町での人工林の樹種別面積割合



※[1]より作成

図3-2-1-2 当別町でのトドマツ人工林の伐採材積

の成林率の検証のため、より高解像度でトドマツ人工林を判別できる UAV (無人航空機) 画像(解像度: 0.05 m)を用いて算出した成林率^[2]と比較した。

[手順2: 面積当たりの蓄積の推定]目視によって成林率が高いと判断された林分(12箇所)にて調査区(0.04ha)を設定し、出現した樹木の地上高1.3mでの直径(cm)及び樹高(m)を測定した。その結果から調査区内のトドマツの蓄積を求め、1ha 当たり換算した。この結果と森林簿におけるトドマツ人工林の1ha あたりの蓄積を比較し、成林状態での現況の蓄積を森林簿の蓄積から推定する回帰式を作成した。
 [手順3: 対象森林全体の蓄積の推定]手順1で得た各林分の面積(ha)に、手順2で得た面積当たりの蓄積(m³/ha)を乗じることで、林分蓄積を算出した。そして、各林分の蓄積を合計することで対象森林の蓄積を算出し、森林簿に記載された蓄積と比較した。
 [手順4: 持続可能な伐採材積の推定]手順3で得たトドマツ人工林の蓄積を基に、人工林資源量の予測手法^[3,4]を市町村単位で適用できるように改良した。この手法(モデル)を用い、当別町のトドマツ人工林蓄積の50年後までの森林蓄積を予測した。本モデルは、対象の市町村を指定後、年間の伐採材積と植林面積を入力することで、5年を1分期として50年後までの森林蓄積及び出材される丸太蓄積の推移を予測できる。本研究では、予測期間の始期を2022年、トドマツ人工林の伐採材積を、当別町における直近

5ヶ年の平均伐採材積である5,000 m³/年を基準シナリオとして、0.2倍ずつの段階に設定した(10,000 m³/年が最大値)。また、植林面積は各分期の皆伐面積とした。ただし、今後の労働人口の減少等を考慮し、直近10年間の平均植林面積である10ha/年を上限とした。また、予測結果から得た持続可能な伐採材積における、各分期での丸太生産量を丸太の直径別に予測した。

(3) 結果

1) リモートセンシング技術による森林面積の推定

衛星画像から、森林簿でトドマツ人工林と記載されている林分をトドマツ、侵入木(植栽されたトドマツ以外の樹木)、その他(林道や樹木のない土地等)に分類し、成林率を算出した(図3-2-1-3)。機械学習で得た分類器を、林分の分類が現地確認で確定している林分に対して適用したところ、98%の林分を正しく分類出来た。また、UAV画像から算出した成林率と、衛星画像から算出した成林率とを比較した結果、両者の成林率は概ね良い相関があった(図3-2-1-4)。このため、衛星画像で算出した成林率を用いて、森林の現況を広範囲に確認できることが示された。

衛星画像から算出した成林率の結果、森林簿でトドマツと記載された林分では、成林率が0.3-0.7の林分が全体の41%を占めていた。また、成林率が0.3以下の林分は、全体の23%であった。この結果、成林率が0.7以上を示し、トドマツ人工林とみなせる面積は、森林簿の面積の44.0%だった(図3-2-1-5)。

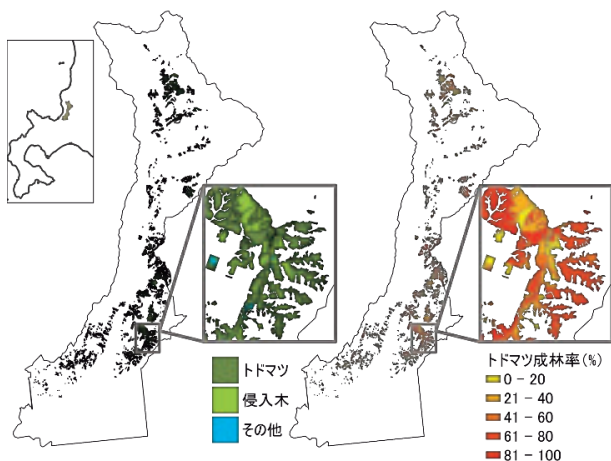


図3-2-1-3 対象森林における分類結果と成林率

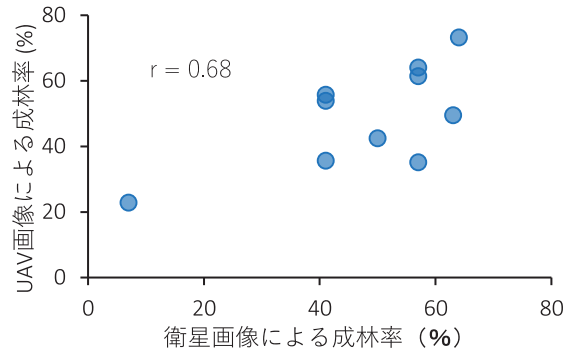
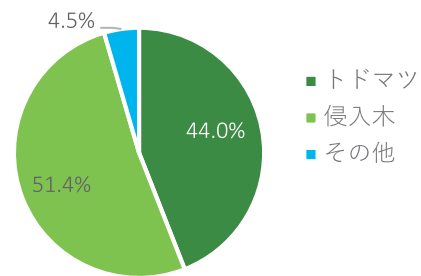


図3-2-1-4 衛星画像による成林率と UAV 画像による成林率の関係



※トドマツ：成林率が0.7以上の林分

図3-2-1-5 衛星画像による分類毎の面積率

2) 現地調査による面積当たりの蓄積の推定

森林簿に記載されているトドマツ人工林の林分蓄積(m³/ha)と、地上調査により推定された林分蓄積とを比較した(図3-2-1-6)。その結果、調査結果から算出した林分蓄積は、森林簿に記載の林分蓄積よりも1.6~3.8倍大きかった。この結果から、森林簿に記載の蓄積から現況の林分蓄積を推定する一次式を回帰分析により作成し、対象森林の各林分において、成林した場合の林分蓄積を森林簿の蓄積から推定した。

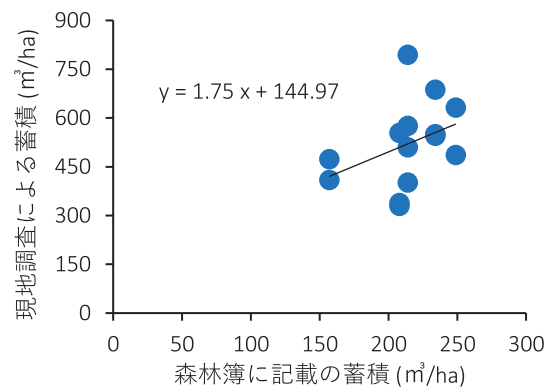


図3-2-1-6 森林簿に記載の林分蓄積と現地調査による林分蓄積の比較

3) トドマツ人工林全体での蓄積の推定

トドマツ人工林の各林分において、2) で得た成林した場合の蓄積に、1) で得た成林率を乗じることで、各林分の蓄積を算出し、齢級(林分の年齢を5年で1単位としたもの)別に合算した(図 3-2-1-7)。補正後の森林蓄積の合計は森林簿よりも約 5%小さかった。また、11 齢級以降の高齢林分では、補正後の蓄積のほうが森林簿よりも小さい傾向だった。

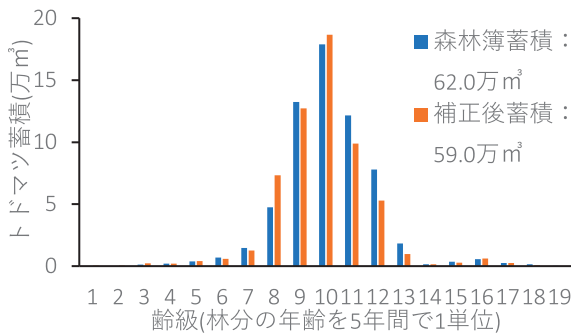
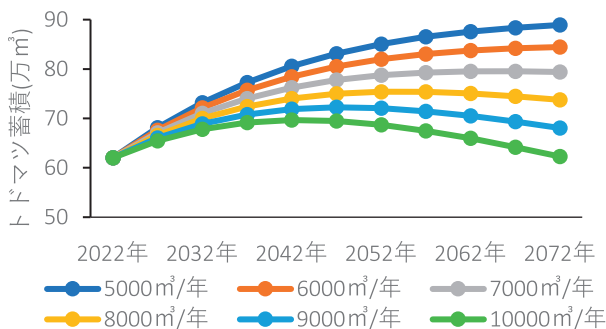


図 3-2-1-7 森林簿記載の蓄積と本研究で補正した蓄積の齢級別比較

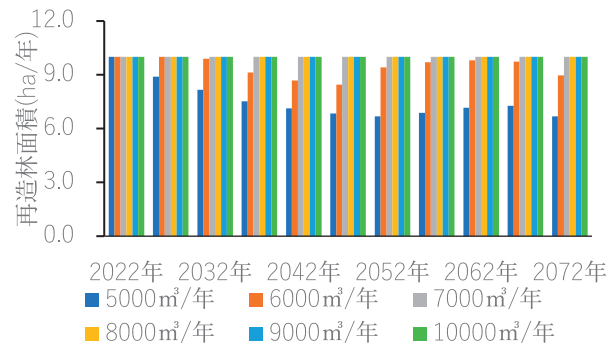
4) 森林資源予測による持続可能な伐採材積の推定

森林簿の情報を基に予測した森林蓄積及び植林面積の推移を年間伐採材積別に示す(図 3-2-1-8, 図 3-2-1-9)。森林蓄積の推移は、5,000~6,000 m³/年の伐採材積の場合、予測期間中は経年的に増加した。一方、年間 7,000 m³の伐採材積では森林蓄積は増えるものの、35 年後あたりからは一定となった。また、それ以上の伐採材積では予測期間の後半から森林蓄積が減少した。ただし、どの伐採材積であっても、50 年後の森林蓄積は 2022 年より大きいと予測され、伐採材積を 10,000 m³/年とした場合でも、50 年後の森林蓄積は現在よりも 0.4%増加すると予測された。年間の植栽面積では、7,000 m³/年以上の伐採材積の場合、植栽面積の上限値に設定した 10ha/年に達していた。



※凡例は年間伐採材積を示す。

図 3-2-1-8 森林簿を基にした場合のトドマツ蓄積の推移



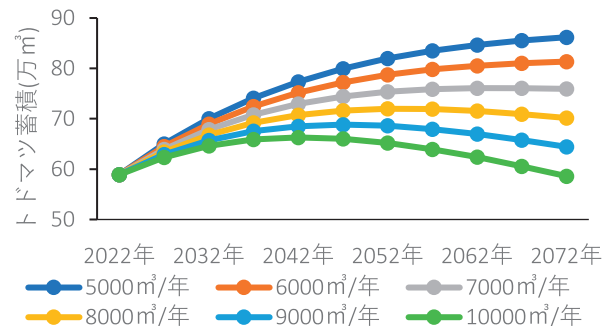
※凡例は年間伐採材積を示す。

図 3-2-1-9 森林簿を基にした場合の年間植林面積

次に、補正した森林蓄積を基に予測した森林蓄積及び植林面積の推移を年間伐採材積別に示す(図 3-2-1-10, 図 3-2-1-11)。森林蓄積の推移は、森林簿を基に予測した場合と同様の傾向であり、5,000~6,000 m³/年の伐採材積の場合は経年的に増加、7,000 m³/年の伐採材積では 35 年後あたりからは一定となった。また、それ以上の伐採材積では予測期間の後半から森林蓄積が減少した。しかし、伐採材積を 10,000 m³/年とした場合、50 年後の森林蓄積は現在よりも 0.5%減少すると予測された。現在の森林蓄積を現況に合わせて補正した結果が、本結果に影響したと考えられる。

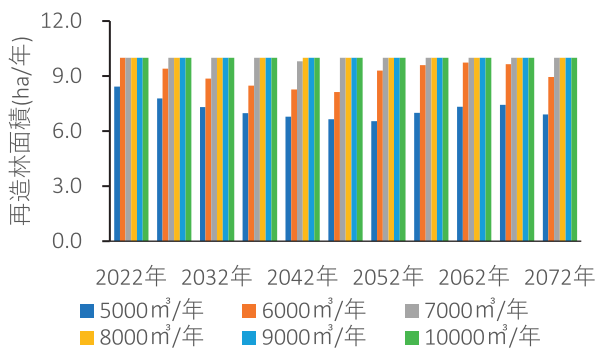
一方、年間の植栽面積では、森林簿に記載の森林蓄積を用いた場合と同様の傾向であり、7,000 m³/年以上の伐採材積の場合、植栽面積の上限値に設定した 10ha/年に達していた。

以上より、森林簿及び本研究で補正した森林蓄積のどちらを用いても、年間伐採材積を近年の伐採材積の 1.4 倍にあたる 7,000 m³/年とした場合、現行の植林面積を維持することで、予測期間の後半で森林蓄積が一定になると予測された。



※凡例は年間伐採材積を示す。

図 3-2-1-10 本研究で補正した蓄積を基にした場合のトドマツ蓄積の推移



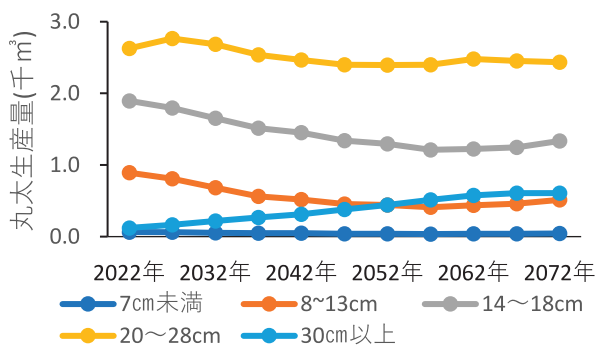
※凡例は年間伐採材積を示す。

図 3-2-1-11 本研究で補正した蓄積を基にした場合の年間植林面積

最後に、本研究で補正した森林蓄積を基にし、かつ年間伐採材積を 7,000 m³/年とした場合における直径別の丸太生産量を図 3-2-1-12 に示す。

予測期間を通じて、直径 20~28cm の丸太が多く生産されると予測された。また直径 18cm 以下の丸太生産量は 30 年後まで漸減し、30cm 以上の丸太は増加する傾向と予測された。

木材チップとして利用されるトドマツ丸太は、直径 10cm 付近と 35cm 以上の丸太で比較的高くなることから^[5]、木材エネルギー利用を考える上では、30 年までは 13cm 以下、30 年以降はそれに加えて 30cm 以上の丸太生産量を考慮し利用計画を検討する必要があると考えられる。



※凡例は丸太の直径を示す。

図 3-2-1-12 年間伐採材積を 7,000m³/年とした際の直径別丸太生産量の推移

(4) まとめ

本稿では、森林資源の利用計画の大元となる森林簿の補正を行い、人工林資源の持続性を考慮した伐採材積の推定と丸太生産量の予測を行った。

森林簿の補正では、実際にトドマツが生育している面積は、森林簿に記載の面積よりもかなり小さいことが判明した。一方、実際に成林しているトドマ

ツ林分での現地調査から、ha 当たりの蓄積は森林簿よりも大きいことも判明し、それらを掛け合わせた結果、森林簿記載の森林蓄積と本研究で得られた森林蓄積は約 5% の差異となった。また、両者の森林蓄積を基に行った資源予測では、参照する森林簿の蓄積により森林蓄積の推移が変わることが示された。以上が本研究の概要である。

最後に、本研究の水平展開の可能性について述べておく。本研究で得た結果は当別町のトドマツ人工林での結果であり、成林率や ha 当たりの蓄積を別の市町村等に直接適用できるとはいえない。しかし、本研究で採用した森林簿の評価及び補正手法、及び補正した森林簿を基にした、持続可能な年間伐採材積の推定手法は、本研究で対象とした当別町だけでなく各市町村等でも適用可能な手法となっている。木質バイオマス利用を含めた森林資源利用の計画をしている自治体などで、本手法を参考にされたい。

[引用文献等]

- [1] 北海道. 『森林計画関係資料オープンデータ』.
<https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/srk/146782.html>. (2023) (令和 5 年 12 月確認)
- [2] 近藤正一, 全慶樹, 藤澤怜央, 堀武司. “森林空撮画像の深層学習による樹冠領域推定手法の開発”. 北海道立総合研究機構. No320:13-18. (2021)
- [3] 津田高明, 大野泰之, 酒井明香, 八坂通泰, 滝谷美香. “カラマツ及びトドマツ人工林における持続可能な伐採量の推定:北海道全域を対象として”. 北方森林研究. 61:15-18. (2012)
- [4] 津田高明. “道内のカラマツ及びトドマツ人工林の低質材出材可能量:エネルギー用途を見据えて”. 北方林業. 69(1):7-10. (2018)
- [5] 大野泰之. “一般材・パルプ材別出材量の予測”. 戦略研究報告書『『新たな住まい』と森林資源循環による持続可能な地域の形成』. 北海道立総合研究機構. 46-47. (2018)

研究担当機関：林業試験場

執筆者：滝谷 美香, 津田 高明, 蝦名 益仁

3.2.2 木質バイオマスの効率的な乾燥及び保管方法の検討

(1) 背景と目的

札幌市に隣接する当別町は森林資源（森林面積26,325ha^[1]）に恵まれており、町内の木質バイオマスを公共施設の暖房用燃料として供することを計画している^[1]が、木質チップ燃料の生産施設を有していなかった。

木質チップ燃料の代表的な集荷、生産システムとしては、移動式チップパーを用いて現地でチップ化するシステム、既存チップ工場などを活用してチップ化するシステム、中間土場を設定して移動式チップパーでチップ化するシステムが想定され、それぞれ長所・短所がある^[2]。当別町では町内企業が移動式チップパーを導入し、チップ製造業への参入を予定していることから、旧中小屋中学校跡を活用した中間土場チップ化システムを採用した。

また、当別町は2019年2月に『当別町木質バイオマス熱利用事業化計画』を作成し、福岡県等の事例を参考に、人工乾燥機によるチップ乾燥では15.6円/kgのコストがかかり、自然乾燥による方法がコストを抑えることができると整理している^[1]。

そこで、林地での丸太乾燥試験、実生産レベルでの移動式チップパーを用いたチップ製造試験及び乾燥試験、廃校体育館を利用したチップ保管試験を行い、ボイラーが要求する品質の木質チップ燃料（水分^{注1}40%以下、サイズG50（オーストリア規格ÖNORM M 7133））が供給可能か検討した^[3]。さらに、チップ生産に係る作業分析、事業採算性試算を行い、木質チップ製造事業の経済性を評価した。

原料を未利用材（トドマツ）から河川支障木に変更したところ、保管中に発酵によると考えられる60℃近い発熱が観察された（写真3-2-2-1）。速やかに搬出するよう指導したが、火災の危険性もあることからベンチスケールの発酵試験を行うとともに、その防止策を検討した^[4]ので併せて報告する。



写真3-2-2-1 発熱による湯気の発生

(2) 方法

1) 効率的な乾燥方法の検討

① 丸太乾燥試験

丸太乾燥試験は林地（当別町字茂平沢）で実施した。試験地には百葉箱を設置し、30分間毎に温度、湿度を計測した。試験は2019年6月に開始し、トドマツ丸太（φ20cm×L2.4m）25本を土台2本の上にピラミッド状または通気性が良い井桁（イゲタ）状に積み、雨水防止のためのブルーシートの有・無により計4プロットを設定した（写真3-2-2-2）。定期的に重量を測定し、試験終了時（2020年5月）水分を全乾法により測定し、重量変化から水分推移を推測した。



写真3-2-2-2 丸太乾燥試験の設置状況

② 実生産レベルでの調査及び試験

集積された河川支障木を移動式チップパー（緑産株式会社 Wood Hacker MEGA561）を用いてチップ化し、粒度分析を行うとともに各工程における水分を測定した。旧中小屋中学校グラウンドにはい積みされた河川支障木に透湿シート（TenCate社製 TopTex®200）を掛け、その効果を調査した。併せて事業体の要望により地面からの水分侵入を防ぐため丸太を横架して嵩上げた試験区を設定した。

2) 保管方法の検討

① チップ保管試験

チップ保管試験は当別町旧中小屋中学校で実施した。試験は2020年7月に開始し、トドマツを原料としたチップ5m³を体育館内（屋内）及び校庭（屋外（被覆なし、ブルーシート被覆、透湿シート（TenCate社製 TopTex200）被覆））に堆積した。挿入型水分計（Schaller社製 humimeter BLL）を用いて定期的に水分変化を観察し、試験終了後（2020年11月）、表面及び内部のチップを採取して水分を測定するとともに、全重量を計測して初期水分と重量変化から全体の水分を推定した。

② 発酵による発熱とその防止策

ベンチスケールの発酵試験には当別町より提供

された河川支障木切削チップの他，トドマツ，カラマツの切削チップを供した。厚さ5cmのスタイロホームを用いて作成した発酵槽（容量150L）に任意の水分に調整した試料を投入し，20℃の恒温室内に設置して（写真3-2-2-3），中心部の温度を2週間30分間毎に計測した。発酵試験の供試試料及び保管庫より採取した河川支障木チップ2種（発熱あり・なし）について粒度分析，発熱量・灰分測定，熱水抽出多糖測定，及び元素分析を行った。



写真3-2-2-3 ベンチスケールの発酵試験

3) 木質チップ製造事業の経済性評価

① 移動式チップパーを用いたチップ生産の作業分析

チップ化の対象は，未利用材（大径のため製材用にならないトドマツ間伐材，林道支障木）及び河川支障木2種類とした。移動式チップパー（緑産株式会社 Wood Hacker MEGA561）を用いてチップを生産し（写真3-2-2-4），時間観測，作業時間分析，及びチップ出来高測定を行い，1人工1日当たりの生産量を求めた。また，チップ生産に係る燃料使用量，人件費，機械損料からチップ化に係る費用を試算した。



写真3-2-2-4 チップ生産の作業分析

② 木質チップ製造事業の採算性試算

当別町及び町内企業のヒアリング調査を行い，チップパーの実稼働日数，設定販売単価ごとの年間売上高及び利益率を求め，投資回収期間を試算することにより木質チップ製造事業の採算性を評価した。

(3) 結果及び考察

1) 効率的な乾燥方法の検討

① 丸太乾燥試験

林地で実施した丸太乾燥試験の水分推移を図3-2-2-1に示す。試験開始直後に大きな水分減少が見られ，接地状態にあった土台も3カ月で水分40%以下となった。また，通気性改善（イゲタ）・雨水防止策（+シート）の有効性が認められた。

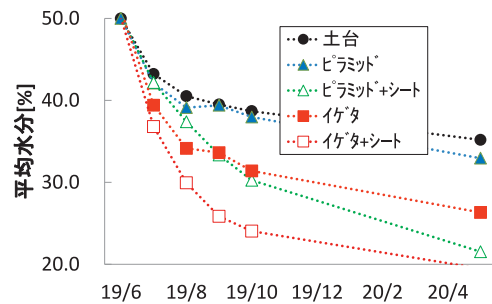


図3-2-2-1 丸太乾燥試験の水分推移

なお，試験地の夏季（6～10月）平均気温は17.1℃，平均相対湿度は88.2%であった（図3-2-2-2）。

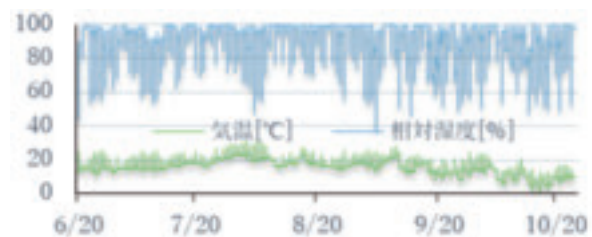


図3-2-2-2 試験地の温湿度推移

上記，試験結果を基に含水率減少曲線の近似式^[5]（式3-2-2-1）により天然乾燥に要する時間を推定した（表3-2-2-1）。

表3-2-2-1 含水率減少曲線の近似式による乾燥時間推定

区分	k	推定乾燥時間[day]	
		40[%]	35[%]
土台	0.006020	89.1	142.0
ピラミッド	0.006479	82.7	131.9
ピラミッド+シート	0.010636	50.4	80.3
イゲタ	0.011151	48.1	76.6
イゲタ+シート	0.017350	30.9	49.3

含水率減少曲線： $U-U_e=(U_i-U_e)\cdot\exp^{-k\cdot t}$ （式3-2-2-1）

ここに，U：含水率[%]db^{注2)} U_e：平衡含水率[%]db

U_i：初期含水率[%]db k：乾燥速度減少係数

t：経過時間[day]

ボイラーが要求する水分(40%以下)にまで乾燥するための日数は、通常のはい積み方法(ピラミッド)で82.7日であった。安定的な燃焼が期待できる水分35%以下とするためには131.9日を要すると推測された。

図3-2-2-3に試験終了後(11カ月後)の各試験区における丸太の水分分布を示す。冬季積雪下(測定5月)にあったにもかかわらず大きな水分上昇は見られなかったが、雨水等の影響を受けやすい上部や乾燥しにくい内部の水分が高いことを考慮すると、水分35%以下とするためには、夏季6カ月以上の乾燥が推奨されると考える。

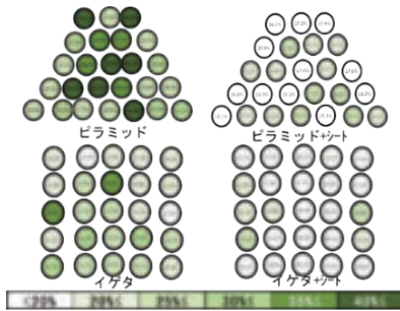


図3-2-2-3 各試験区の水分分布(11カ月後)

② 実生産レベルでの調査及び試験

2020年度、旧中小屋中学校のストックヤードとしての運用開始にともない、移動式チップパーによるチップ化及び各工程における水分調査を行った。

表3-2-2-2 寸法区分適合性評価

区分	かさ密度 [kg/m³]	寸法区分適合性				
		32mm< (<4%)	6-32mm (60-100%)	1-6mm (<20%)	<1mm (<4%)	120mm< (0%)
間伐材	237	0.5	89.1	9.3	1.1	0.0
φ35 河川支障木	277	1.3	90.0	7.5	1.1	0.1
平均	257	0.9	89.6	8.4	1.1	0.0
間伐材	220	3.6	90.3	5.2	0.9	0.4
φ60 河川支障木	253	2.4	92.7	3.9	1.0	0.2
平均	237	3.0	91.5	4.6	1.0	0.3

注) () 内はG50規格。赤字は不適

表3-2-2-2に寸法区分適合性の評価結果を示す。

目皿サイズ60mmでは長尺チップ(120mm以上)の混入が認められた。目皿サイズ35mmで製造したチップは、河川支障木を原料とした際に若干の長尺チップが認められたが、G50に対応可能と考えられた。

図3-2-2-4に各工程における水分を示す。搬入直後のため原料となる河川支障木の水分が高く、破碎直後の水分はボイラーが要求する水分以上(43.3%)だったが、体育館で保管して1カ月後、ボイラーサイロで38.2%とボイラーが運転可能なレベルまで低下していた。



写真3-2-2-5 実生産レベルでの丸太乾燥試験

同ストックヤードで2021年6~10月に実施した実生産レベルでの丸太乾燥試験の設置状況を写真3-2-2-5に示す。

4カ月後、各試験区分の各部位(上・中・下層)から採取した丸太(n=5)及び各部位から製造されたチップの水分を表3-2-2-3に示す。嵩上げによる効果は認められなかったが、林地内で実施した小規模な丸太乾燥試験4カ月後(ピラミッド38.0%, ピラミッド+シート30.2%)とほぼ同様の結果となった。

表3-2-2-3 実生産レベルでの丸太乾燥試験結果

区分	シート有		嵩上げ有		cont.	
	チップ水分[%]	丸太水分[%]	チップ水分[%]	丸太水分[%]	チップ水分[%]	丸太水分[%]
上層	23.0	33.7	34.2	36.8	31.1	38.6
中層	25.5	31.3	27.4	33.2	34.0	39.3
下層	32.9	24.1	29.0	38.6	28.7	35.0
AVE.	27.2	29.7	30.2	36.2	31.3	37.6

以上の結果から、丸太段階で天然乾燥し、移動式チップパーにより粉碎後、屋内に保管することにより、ボイラーが要求する木質チップ燃料の供給は可能であると考える。

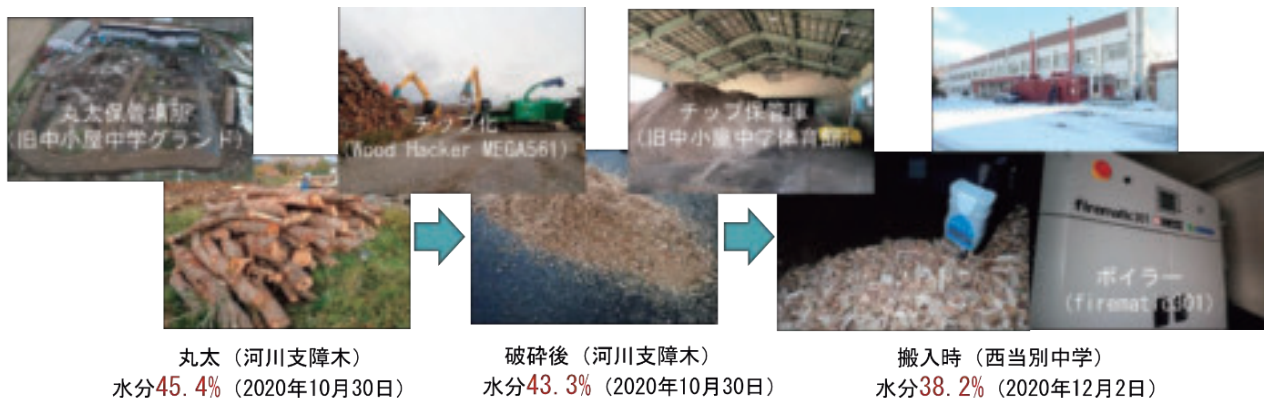


図3-2-2-4 各工程における水分

2) 保管方法の検討

① チップ保管試験

2020年に実施したチップ保管試験の設置時、終了時の状況を写真3-2-2-6に示す。終了時（11月）屋外の試験区では積雪の痕跡が認められ、ブルーシート及び透湿シートで覆ったものは、被覆なしと比較して表面は乾いていたが、ブルーシートで覆ったチップは結露により上部の水分が高く、透湿シートで覆ったチップも底部が雨水等の流入によると考えられる高い水分を示した。

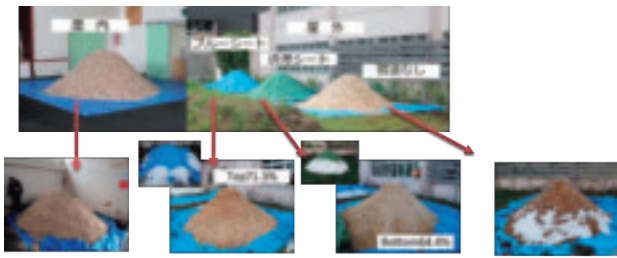


写真3-2-2-6 保管試験の設置時（上）、終了時（下）の状況

試験終了後の水分を表3-2-2-4に示す。屋内に保管したチップについては初期水分（50.2%）から約10%水分が減少した。屋外に保管したチップは雨水等の影響により水分が増加する傾向にあったが、透湿シートについては一定の効果が期待された。

表3-2-2-4 チップ保管試験（4カ月後）の水分

	屋内	屋外		
		ブルーシート	透湿シート	被覆なし
初期水分[%]	50.2	51.8	51.3	50.7
全体[%]	39.8	53.0	48.1	72.0
表面[%]	30.9	43.8	24.3	65.0
内部[%]	47.6	51.6	49.0	72.7

注) 設置時及び終了時の全重量を計測し、初期水分と重量変化から全体の水分を推定。表層、内部の水分は全乾法により測定（各n=5）

挿入型水分計による経時観察では初期1カ月は大きく水分が減少し、横ばいとなる現象が観察された（図3-2-2-5）。表面と内部の水分差が大きいことを考慮すると定期的な攪拌が必要と考えられる。

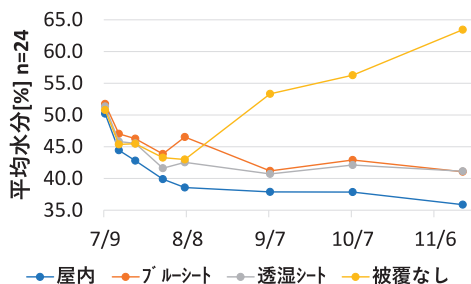


図3-2-2-5 チップ保管試験の水分推移

② 発酵による発熱とその防止策

ベンチスケールの発酵試験における温度変化を図3-2-2-6に示す。発酵試験初期に温度上昇が観察されたが、本試験では水分による差異は認められなかった。温度上昇はカラマツが最も大きく、次いで河川支障木、トドマツの順であった。

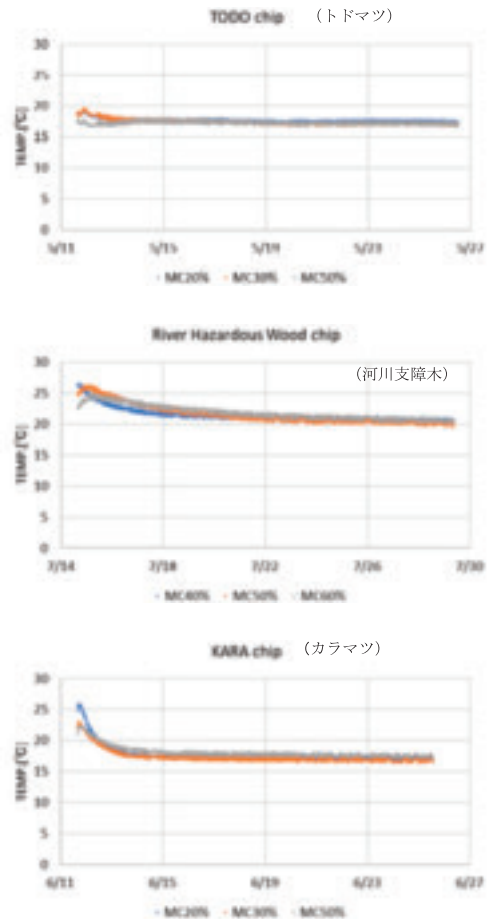


図3-2-2-6 発酵試験の温度変化

発酵試験の供試試料及び保管庫より採取した河川支障木チップ2種（発熱あり・なし）について行った粒度分析、発熱量・灰分測定の結果を表3-2-2-5に示す。粒度に大きな差は見られなかったが、河川支障木は灰分が高く、土砂等不純物の混入が示唆された。また、発熱があった部位の水分は高く（53.7%）

表3-2-2-5 各試料の粒度特性、燃料特性

区分	採取時水分 [%]	粒度特性		燃料特性（無水ベース）	
		平均粒径 d50[mm]	均等数 n	発熱量 [MJ/kg]	灰分 [%]
トドマツ	-	14.06	2.66	19.97	0.3
カラマツ	-	20.24	1.82	20.57	0.2
河川支障木	-	14.26	1.23	19.01	2.7
発熱あり	53.7	-	-	19.15	2.9
発熱なし	39.4	-	-	19.56	1.7

灰分が最も多かった (2.9%)。

上記供試試料の熱水抽出多糖測定の結果を表 3-2-2-6 に示す。最も温度上昇が大きかったカラマツはガラクトサンを始めとする熱水抽出多糖類を多く含んだ。河川支障木 (発熱あり) は他に比べて熱水抽出多糖類が少なく、発酵により消費されたと推測された。

表 3-2-2-6 各試料の熱水抽出多糖

区 分	熱水抽出多糖 [mg/試料乾燥g]					計
	グルカン	キシラン	ガラクトサン	アラビナン	マンナン	
トドマツ	2.1	1.9	0.0	1.2	3.3	8.4
カラマツ	2.6	2.2	41.6	8.0	5.0	59.4
河川支障木	2.2	1.9	0.0	1.5	1.3	7.0
発熱あり	1.7	2.1	0.0	1.3	1.0	6.1
発熱なし	2.8	1.8	0.0	1.1	1.7	7.4

各試料の元素分析値を表 3-2-2-7 に示す。河川支障木 (発熱あり) は他に比べて C/N 比が低く、微生物による炭素源の資化によるものと考えられる。

表 3-2-2-7 各試料の元素分析値

区 分	元素分析値			C/N
	水素含有率	炭素含有率	窒素含有率	
	H[%]	C[%]	N[%]	
トドマツ	6.2	49.1	0.1	669
カラマツ	6.1	49.4	0.1	496
河川支障木	5.8	47.2	0.2	192
発熱あり	6.1	48.7	0.3	142
発熱なし	6.2	50.2	0.2	205

ベンチスケールの発酵試験では温度上昇は小さかったが、大量に保管した際の微生物発酵による保管チップの温度上昇、火災の発生はいくつか報告されている。Ferrero らは大規模な木質チップ保管における発熱の数学的モデルを構築し、初期水分 35% では 45°C、46% では 67°C まで温度が上昇するとシミュレーションしている^[6]。国立環境研究所は可燃性廃棄物の火災予防策として、60°C 度以下であれば微生物発酵のみと考えて良く、火災の危険性はないとしている^[7]。

それらを参考に、保管チップの水分を 40% 以下とし、保管中に内部温度が 60°C を超えた場合は出来るだけ速やかに搬出するように指導した。

3) 木質チップ製造事業の経済性評価

① 移動式チップパーを用いたチップ生産の作業分析

作業分析の結果を図 3-2-2-7 に示す。通直な間伐材より形状が複雑な支障木の方が、生産性が劣りコスト高となった。

別途、当別町が行った「河川支障木チップ製造調査研究事業【令和 2 年度調査報告書】」^[8]では、絶乾チップ 1t 当たりの運賃込みの製造コストは 13,504 円/t (絶乾状態) と試算しており、生産性が劣る河川支障木であっても原料調達価格が無料であれば活用可能と考えられた。

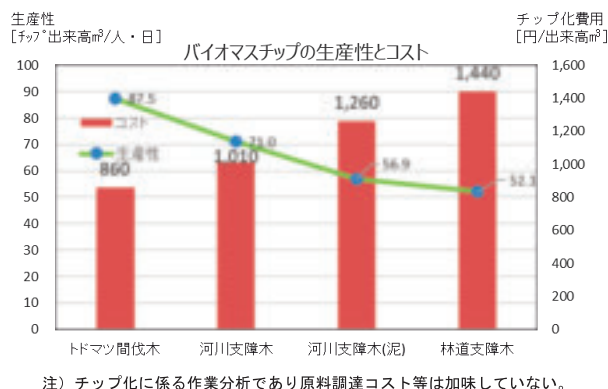


図 3-2-2-7 チップ生産の作業分析

② 木質チップ製造事業の採算性試算

設備整備費の 1/2 に補助金を導入した場合の採算性試算結果を表 3-2-2-8 に示す。設定単価 1.5 万円/t では、営業利益率がマイナスとなり事業として成立しない。2.0 万円以上であれば利益を得ることが可能であるが、木質チップ製造事業の投資回収期間を短くするためには、所定のチップ生産量が必要であり、当別町内 (約 400t/年) 以外の需要を確保することが望ましい。

当別町内のチップ製造企業はバイオマス発電用に年間 1 万 5 千 t の取扱いがある。チップ製造業用設備の法定耐用年数 (8 年) 以内に投資回収が可能であり、十分採算性を持つと予想された。

表 3-2-2-8 木質チップ製造事業の採算性試算

実稼働日数	日	40	80	120	
年間原木消費量	m³/年	5,760	11,520	17,280	
年間チップ生産量	t	3,102	6,203	9,305	
	チップm³	14,400	28,800	43,200	
1.5万円/t	年間売上高	万円/年	4,652	9,305	13,967
	営業利益率	%	-27.7	-10.0	-5.5
	投資回収期間	年	×	×	×
2.0万円/t	年間売上高	万円/年	6,203	12,406	18,609
	営業利益率	%	4.2	17.5	20.9
	投資回収期間	年	14	6	4
2.5万円/t	年間売上高	万円/年	7,754	15,508	23,262
	営業利益率	%	23.4	34.0	36.7
	投資回収期間	年	6	3	2

(4) まとめ

当別町において丸太乾燥試験，廃校跡を利用したチップ乾燥試験，及び移動式チップパーを用いたチップ製造試験を行い，ボイラーが要求する品質の木質チップ燃料が供給可能であることを検証した。またチップ保管に関する留意点を提示した。

現在，当別町では河川支障木丸太を旧中小屋中学校グラウンドで1年以上乾燥し，秋以降に移動式チップパーにて粉碎して，体育館に保管(最大貯蔵量 1000m³)したチップを冬季に町内学校施設等のボイラーに供給しているが，保管中の火災発生やボイラーの燃焼不良等の大きな問題は発生していない。

当別町では，新役場庁舎へのバイオマスボイラー導入など，さらなる増産を計画している^[1]。本論では積み方法による通気性改善や透湿シート被覆による雨水対策により，乾燥時間の短縮が可能であることを示したが，現状のストックヤード(旧中小屋中学校)だけでは足りなくなることが予想される。安定供給のためには，丸太及びチップの保管(乾燥)スペース確保が喫緊の課題になる。

津別町，足寄町においても同様な手法で燃料用チップ生産することを検討している。木質チップ製造業において採算性を確保するためには，所定のチップ生産量が必要となる。一市町村の需要では不十分であるため，近隣の自治体が連携して移動式チップパーを運用し，実稼働日数を確保する等の仕組み作りが必要になると考える。

注1) 本論にいう水分は特に指定がない限り湿量基準(wet base (wb))で示す。

注2) dbは乾量基準(dry base)の略を示す。

[引用文献等]

- [1] 当別町.『当別町木質バイオマス熱利用事業化計画』.(2019)
- [2] (地独)北海道立総合研究機構森林本部.『実践編 地域で活かそう森林バイオマス』.(2014)
- [3] 山田敦ほか.“北海道当別町における木質バイオマスエネルギーの社会実装—天然乾燥と移動式チップパーによる木チップ燃料の供給—”.第71回日本木材学会大会要旨集.1P211.(2021)
- [4] 山田敦ほか.“北海道当別町における木質バイオマスエネルギーの社会実装—発酵による発熱とその防止策—”.第72回日本木材学会大会要旨集.R15-P-01.(2022)
- [5] 中畠厚ほか.“蒸気式乾燥におけるタイムスケジュールの推定(第1報)—任意条件における

乾燥時間の推定方法—”.林産試験場報 第21巻第1号.(2007)

- [6] F Ferrero et al.. “A mathematical model to predict the heating-up of large-scale wood piles”. Journal of Loss Prevention in the Process Vol.22 Issue4. (2009)
- [7] 国立環境研究所.“仮置場の可燃性廃棄物の火災予防(第一報)”.(2011)
- [8] 当別町.『河川支障木チップ製造調査研究事業【令和2年度調査報告書】』.(2021)

研究担当機関：林産試験場

執筆者：山田 敦

3.2.3 木質バイオマス利用施設での熱利用技術の改善

(1) 既施設における木質バイオマスボイラーの導入と運用

1) 本項目における検討概要

道内で利用されている木質バイオマスボイラー（以下、木質ボイラー）は海外製のものが多く、実際の運転条件における出力、効率、制御などの設計に必要な情報が不足しており、容量不足を回避する視点から大容量の木質ボイラーを設置する傾向にある。この場合、低負荷で木質ボイラーを運転することとなり、頻繁な運転・停止（以下、オンオフ運転）による省エネルギー性の低下が懸念される。省エネルギー性向上のためには、ボイラー容量を適正化した上で、早朝の暖房時などの短時間高負荷には、重油ボイラーなど異種の熱源で補助するシステムが望ましい。さらに、省エネ設計には負荷平準化のための適切な蓄熱槽容量を設定することも必要である。

本項目では、木質ボイラーを利用した熱源システムの省エネルギー化を目的として、令和2年度に環境省の補助金を活用して重油ボイラーから木質ボイラーへの代替が予定されていた西当別小学校、西当別中学校（以下、小学校、中学校）を対象に、①熱需要実測、②熱源システムの制御方法の検討、③実測した需要を用いた数値計算によるボイラー容量、蓄熱槽容量の最適設計、④熱源システムの導入評価と運用改善を行った一連の作業について報告する。

2) 木質ボイラー利用熱源システムの概要

図3-2-3-(1)-1に導入した熱源システムの概要を、写真3-2-3-(1)-1に海上輸送コンテナと内部の設備を示す。木質ボイラー（定格301kW）と熱交換器、重油ボイラー（定格465kW）、これらで発生する温水を貯蔵する蓄熱槽、校舎側の放熱機器（パネルラジエータ）、チップ燃料庫、校舎の機械室の空気をチップ燃料庫下部へ吹きだす中間ダクトファン、吹き出し空気を加熱する加熱コイルで構成される。重油ボイラーは、木質ボイラーが故障しても単独で各学校の

需要が賄える容量としている。

これまで機械室には、重油ボイラーと各系統への配管・ポンプ類しか設置されておらず、新たに設置スペースが必要となった。ここで、設備導入のために建築物を増築すると多大なコストが発生するため、設備の一部（木質ボイラー、熱交換器、重油ボイラー、燃料庫）を海上輸送コンテナ内に設置することとした。学校内の機械室の空気は、蓄熱槽からの熱損失やポンプ稼働に伴い、冬期は室温が30℃以上となる場合もあり、湿度も低い。この空気をコンテナの燃料庫に常時送り、チップの乾燥に用いた。ただし、ここでのチップの乾燥は、運送時の雪の付着やトラブル時に加熱コイルで空気を加温すること等、全体のチップの乾燥工程の中で補助的な位置づけのものとしている。

さらに、コンテナの横に4tトラックで運搬したチップの受け台を備え、その中に燃料庫まで搬送するスクリューを設けた（写真3-2-3-(1)-2）。チップの受け台は、搬送時にチップが周囲にこぼれ落ちることを防止するため、4tトラックの横幅よりもやや幅広に製作されている。



(a) 海上輸送コンテナ



(b) 木質ボイラー



(c) 熱交換器



(d) 燃料庫



(e) 送風管

写真3-2-3-(1)-1 海上輸送コンテナと内部設備

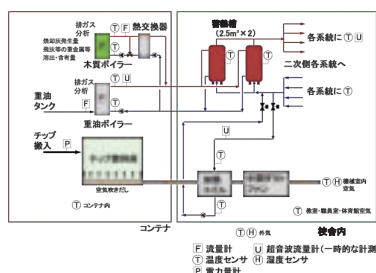


図3-2-3-(1)-1 検討した熱源システムの概要



写真3-2-3-(1)-2 チップ受け台とスクリュー

3) モデル施設の熱源システムと熱需要計測

表 3-2-3-(1)-1 に小学校、中学校における従来の熱源システムの概要をそれぞれ示す。

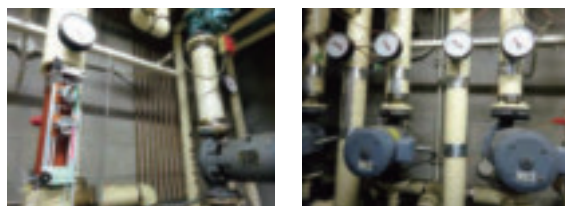
表 3-2-3-(1)-1 熱源システムの概要
小学校

ボイラーの種類	出力[kW]	燃料消費量 [L/h]	燃焼効率 (低位発熱量) [%]	出力口	運転・停止
重油ボイラー	465.2	49.9	91.7	2個	手動オンオフ 運転
重油ボイラー	465.2	51.8	88.3	1個	手動オンオフ 運転

中学校

ボイラーの種類	出力[kW]	燃料消費量 [L/h]	燃焼効率 (低位発熱量) [%]	出力口	運転・停止
重油ボイラー	581.5	66.3	86.3	1個	手動オンオフ 運転
重油ボイラー	232.6	25.9	88.3	1個	手動オンオフ 運転

小学校、中学校のどちらにも A 重油を熱源とした暖房用のボイラーが 2 台設置されており、体育館や各教室等のラジエータへ温水が供給される。ボイラーの更新にあたって、各学校の暖房熱エネルギー需要量を計測した。まず、各システムの暖房エネルギー需要を、超音波流量計による温水流量測定（5 分間 10 秒毎計測）と T 型熱電対による温水配管外表面温度測定（1 分毎連続計測・記録）を行い、式 3-2-3-1 により、算出した。式 3-2-3-2 は、式 3-2-3-1 の需要を 1 時間毎に積算したものである。写真 3-2-3-(1)-3 に計測時の写真を示す。なお、温水温度は配管内にシース型熱電対を挿入して測定する方法が正確であるが、配管厚みや配管材料（SGP 管）の熱伝導率を考慮すると、挿入シースで測定した温度と外表面温度には理論上差はほとんどない。また、設備稼働中の配管改造が困難であったことから、温水配管の外表面温度を測定する方法を採用した。なお、温度計測時には T 型熱電対と配管をアルミテープで密着させ、その上から断熱材を施すことにより、可能な限り外部への熱損失を低減させた。



(a) 流量計測 (b) 配管表面温度計測
写真 3-2-3-(1)-3 計測時の写真

$$q_{\text{demand}} = C_p \times \rho \times f \times (T_1 - T_2) \quad (\text{式 3-2-3-1})$$

$$Q = \sum (q_{\text{demand}} \times \Delta t) \quad (\text{式 3-2-3-2})$$

※ q_{demand} : 暖房エネルギー需要 [kW]

C_p : 水の比熱 4.2 [kJ/(kg·K)]

ρ : 水の密度 1.0 [kg/L]

f : 各系統の水の流量 [L/s]

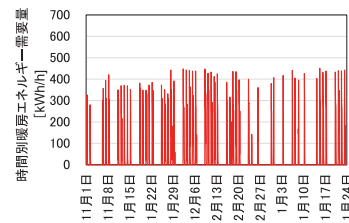
T_1 : 各系統の行き温度 [K]

T_2 : 各系統の還り温度 [K]

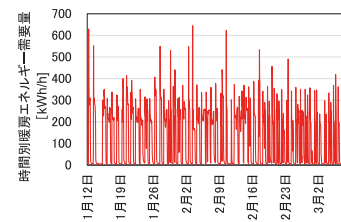
Q : 時間別暖房エネルギー需要量 [kWh/h]

Δt : 1/60 [h]

図 3-2-3-(1)-2 に時間別暖房エネルギー需要量を、図 3-2-3-(1)-3 に一週間の暖房熱エネルギー需要量を示す。小学校では朝の立ち上げ時に時間平均

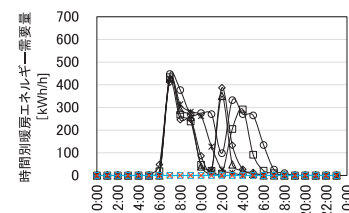


小学校

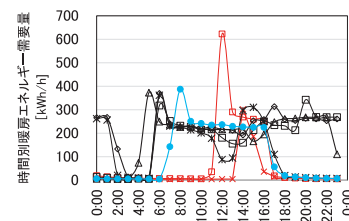


中学校

図 3-2-3-(1)-2 時間別暖房エネルギー需要量



小学校 (12/9-12/15)



中学校 (2/10-2/16)

図 3-2-3-(1)-3 一週間の暖房エネルギー需要量
(四角黒塗り:土曜, ×*:日曜・休日, 他:平日)

500kW 弱の大きな需要があり、それ以降は 250～400kW の需要が多い。また、需要は早朝から夕方までに分布し、夜間と土日は需要がない。中学校では 250～300kW の領域で多くの需要があり、土日も一定の需要がある。

図 3-2-3-(1)-4 に時間別暖房エネルギー需要量の頻度分布を示す。小学校では 280kW 程度に、中学校では 200～280kW に頻度の高い分布が見られる。

本研究では、小学校、中学校の需要頻度から、可能な限り定格運転またはそれに近い運転をし、部分負荷運転であっても熱効率が低下する懸念があるオンオフ運転（導入予定ボイラーでは定格に対し、30%未滿の負荷で停止する）を極力避ける観点から、木質バイオマスの含水率を考慮した出力が 252.8kW、210.8kW であるボイラーを 4) で検討する需給シミュレーションに選定した。出力以上の負荷、定格の 30%未滿の負荷は蓄熱槽からの出力でカバーし、蓄熱槽の熱容量で賄い切れない負荷は重油ボイラーを稼働して不足分を補う。

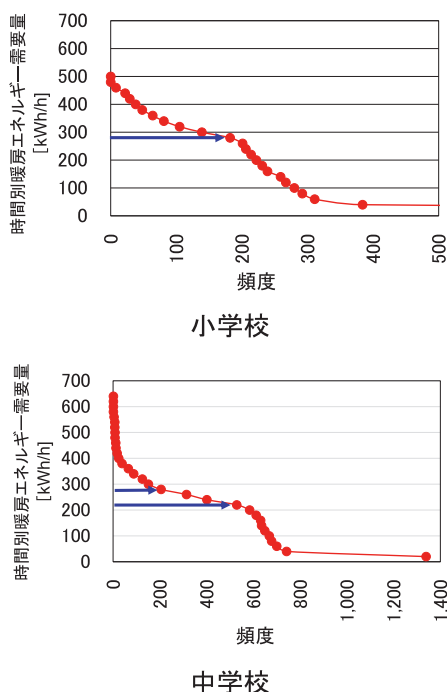


図 3-2-3-(1)-4 時間別暖房エネルギー需要量の頻度分布

図 3-2-3-(1)-5 に各学校における温水配管の表面温度が最も高い系統の行き温水配管表面温度の経時変化を示す。各系統には放熱機器として放射パネルが設置されており、その暖房能力は下記の式 3-2-3-3 で表される^{[1], [2]}。また、暖房、冷房温度差は JIS

の暖房温度差の算出式^[1]に準拠し、式 3-2-3-4 により算出される。さらに暖房能力と暖房温度差には式 3-2-3-5 の関係がある^{[1], [2]}。

$$Q = C_{pw} \times M_w \times |T_{wo} - T_{wi}| \quad \text{(式 3-2-3-3)}$$

$$Q = B (\Delta T)^n \quad \text{(式 3-2-3-4)}$$

$$\Delta T = |T_w - T_a| \quad \text{(式 3-2-3-5)}$$

Q : 暖房能力[W], C_{pw} : 水の比熱[J/(g·K)] = 4.2

M_w : 水の質量流量[g/s]

T_{wo} : 放射パネル戻り (出口) 水温[K]

T_{wi} : 放射パネル行き (入口) 水温[K]

B, n : 試験体形状等で決定される定数 [-]

ΔT : 暖房温度差[K]

T_w : 放射パネルの出入口平均水温[K]

T_a : 空気温度[K]

各学校で行われるのはボイラーの更新だけで、教室などの放射パネルの増設は行われない。このため、仮に教室内の空気温度が同じであれば、放射パネルの行き温度 (入口温度) を小学校では 70～75℃程度以上、中学校では 70～78℃程度以上確保することが必要と考えられた。

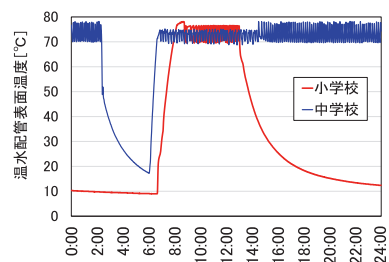


図 3-2-3-(1)-5 行き温水配管表面温度の経時変化

4) 実測した需要を用いた数値計算によるボイラー容量、蓄熱槽容量の最適設計

① 熱源システムの制御

表 3-2-3-(1)-2 に各ボイラーの制御方法を示す。導入予定の木質ボイラーの制御は、蓄熱槽内の温水温度を感知し、オンオフ運転や部分負荷運転を行うものである。部分負荷運転の制御は、①ボイラー設定温度までフル運転、②ボイラー設定温度とコントロールヒステリシス (設定幅) の 2/3 まで 100-30% 比例出力制御運転、③残りコントロールヒステリシスの 1/3 まで 30%出力運転である。

重油ボイラーはバックアップ機器として、運転温度を木質ボイラーより低く設定する。蓄熱槽の温水温度が設定値以下になると稼働し、所定値まで回復すると停止する制御とした。

熱源システムの制御は計装（運転制御のタッチパネル）により、放熱側ポンプの運転・停止を①スケジュール、②手動で設定できる制御とする。実際の運用では、蓄熱槽や配管内の凍結防止を目的として、所定時間毎に数分間ボイラーを起動させる凍結防止制御回路を追加した。

表 3-2-3-(1)-2 各ボイラーの制御方法
小学校

ボイラーが稼働する蓄熱槽温度[°C]	70	75	80	85
木質バイオマスボイラー	■	■	■	■
重油ボイラー	■	■		

■ 定格出力で運転
 ■ 定格出力の100-30%比例制御運転
 ■ 定格出力の30%で運転

中学校

ボイラーが稼働する蓄熱槽温度[°C]	73	77	81	85
木質バイオマスボイラー	■	■	■	■
重油ボイラー	■	■		

■ 定格出力で運転
 ■ 定格出力の100-30%比例制御運転
 ■ 定格出力の30%で運転

② 熱需給計算方法

熱需給計算は図 3-2-3-(1)-1 をモデルに行った。ただし、木質ボイラーと蓄熱槽間の熱交換器の熱交換能力に制限はなく、木質ボイラーで発生した温水の熱量がすべて蓄熱槽へ導入されるとした。図 3-2-3-(1)-5 から放射パネルの行き温度（入口温度）を70°C以上に保つために、小学校で75°Cまで、中学校で77°Cまで定格出力で運転し、それ以上の場合に木

表 3-2-3-(1)-3 シミュレーションの条件
小学校

条件	1	2	3	4	5
木質バイオマスボイラー出力[kW]	210.8または252.8				
木質バイオマスボイラー設定温度[°C]	75				
木質バイオマスボイラー設定ヒステリシス[°C]	10				
重油ボイラー出力[kW]	465.2				
重油ボイラースタート温度[°C]	70				
重油ボイラーストップ温度[°C]	75				
蓄熱槽容量[m ³]	2.5	3	4	5	7.5
蓄熱槽蓄熱量[kWh]	43.8	52.5	70.0	87.5	131.3

中学校

条件	1	2	3	4	5
木質バイオマスボイラー出力[kW]	210.8または252.8				
木質バイオマスボイラー設定温度[°C]	77				
木質バイオマスボイラー設定ヒステリシス[°C]	8				
重油ボイラー出力[kW]	465.2				
重油ボイラースタート温度[°C]	73				
重油ボイラーストップ温度[°C]	77				
蓄熱槽容量[m ³]	2.5	3	4	5	7.5
蓄熱槽蓄熱量[kWh]	35.0	42.0	56.0	70.0	105.0

質ボイラーで比例制御が働く運転とした。また、木質ボイラーの停止温度はボイラーの安全装置が作動する領域から85°Cに設定した。

表 3-2-3-(1)-3 にシミュレーションの条件を示す。

シミュレーションの期間は需要実測を行った日とし（小学校：11/1～1/23，中学校：1/11～3/8），蓄熱槽は槽内が完全に混合しているとした。蓄熱槽における熱損失は考慮していない。木質ボイラーの出力は前述のとおり252.8kW，または210.8kWとして検討することとし，バックアップ（重油）ボイラーの出力は465kWとした。また，蓄熱槽については，設置スペースを考慮し，2.5～7.5m³の間で最適容量を検討した。

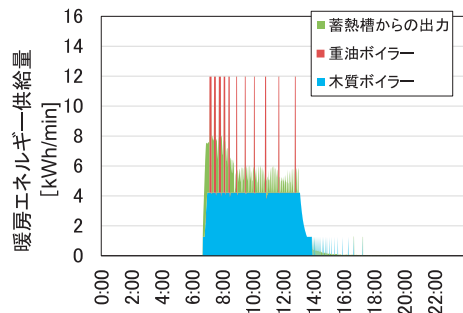
③ 熱需給計算結果

1分毎の暖房エネルギー需要量 Q_{demand} を式 3-2-3-6 で，1分毎の暖房エネルギー供給量 Q_{supply} を式 3-2-3-7 で定義し，図 3-2-3-(1)-6 に1分毎の暖房エネルギー供給量 Q_{supply} のシミュレーション結果の例を示す。図 3-2-3-(1)-6 では，平均的な熱需要パターンの日を選定して示した（小学校：1/15，中学校：2/14）。

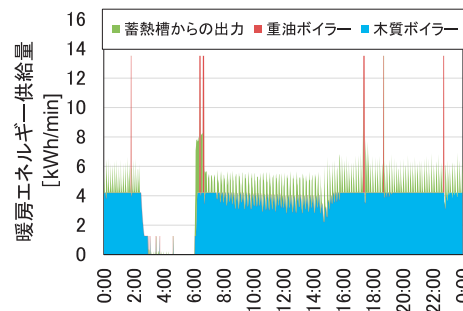
$$Q_{demand} = (q_{demand} \times \Delta t) / 3600 \quad \text{(式 3-2-3-6)}$$

$$Q_{supply} = (q_{supply} \times \Delta t) / 3600 \quad \text{(式 3-2-3-7)}$$

※ Q_{demand} ：分別暖房エネルギー需要量[kWh/min]



小学校（1/15，木質ボイラー出力 252.8kW）



中学校（2/14，木質ボイラー出力 252.8kW）

図 3-2-3-(1)-6 暖房エネルギー供給量の経時変化

q_{demand} : 暖房エネルギー需要 [kW], Δt : 60[s] (1min),
 Q_{supply} : 分別暖房エネルギー供給量 [kWh/min], q_{supply} :
 ボイラーの出力 [kW]

図 3-2-3-(1)-6 から重油ボイラー、蓄熱槽からの熱供給は朝の立ち上げ時に多くなっており、中学校に対して小学校の方が木質ボイラーの出力よりも瞬時の需要が大きい時間が多く、重油ボイラーが稼働する回数が増えていることがわかる。

図 3-2-3-(1)-7 に蓄熱量の経時変化を示す。図 3-2-3-(1)-7 は図 3-2-3-(1)-6 と同じ日のデータを示している。蓄熱量 S は式 3-2-3-8 で定義する。

$$S = C_{p_w} \times M_w \times | (T_{w_{tank}} - T_{w_{ini}}) | / 3.6 \text{ (式 3-2-3-8)}$$

S : 蓄熱量 [kWh]

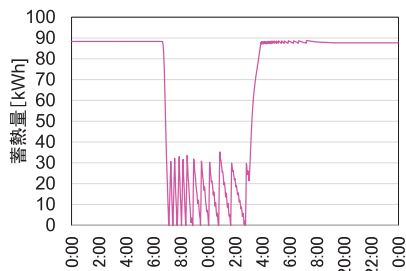
C_{p_w} : 水の比熱 [MJ/(t·K)] = 4.2, M_w : 水の質量 [t]

$T_{w_{tank}}$: 蓄熱槽内水温 [K]

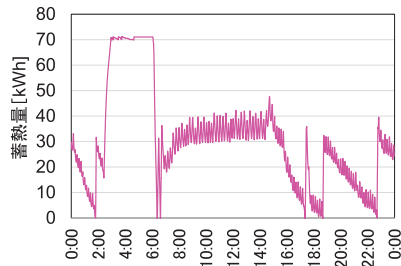
$T_{w_{ini}}$: 蓄熱槽内初期設定温度

(小学校: 343K, 中学校: 346K)

図 3-2-3-(1)-7 から、熱需要がない夜間に蓄熱量が最大となり、木質ボイラーが停止することがわかる。朝大きな需要があると木質ボイラーが先に稼働し、その後蓄熱量が 0kWh, すなわち蓄熱槽の温度が 70°C (小学校), 73°C (中学校) になると重油ボイラーが稼働する。このような制御設定のため、木質ボイラーの運転・停止回数は両学校とも 1 回、重油ボイラーの運転・停止回数は小学校で 11 回、中学校で 6 回となる。オンオフ運転は省エネ性の低下を引き



小学校 (1/15, 木質ボイラー出力 252.8kW)



中学校 (2/14, 木質ボイラー出力 252.8kW)

図 3-2-3-(1)-7 蓄熱量の経時変化の例

起こすが、本制御により、木質バイオマスボイラーの運転・停止回数を夜中-朝の間の 1 回に留めており、本ボイラーの省エネ運転に寄与している。

図 3-2-3-(1)-8 に蓄熱槽の容量に対する木質ボイラーの寄与率を木質ボイラーの出力をパラメータとして示す。ここで、木質ボイラーの寄与率 η を式 3-2-3-9 で定義する。

$$\eta = Q_{output\ bio} / (Q_{output\ bio} + Q_{output\ oil}) \times 100$$

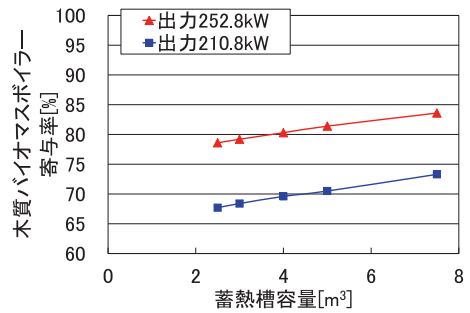
(式 3-2-3-9)

η : 木質ボイラーの寄与率 [%]

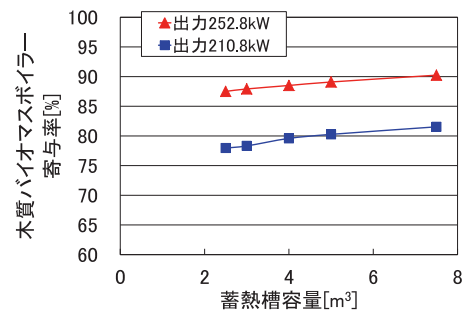
$Q_{output\ bio}$: 木質ボイラーによる温水出力量 [kWh/日]

$Q_{output\ oil}$: 重油ボイラーによる温水出力量 [kWh/日]

図 3-2-3-(1)-8 から 252.8kW の出力のボイラー、蓄熱槽容量を 5m³ とすると、木質ボイラーの寄与率は小学校で 80% 以上、中学校で 90% 近くまで達しており、本設計は良好と判定できる。小学校においては、需要が中学校と比較して平準化しておらず、朝の立ち上げ時の需要が大きい。この結果、立ち上げ時に重油ボイラーの稼働回数 (稼働時間) が多くなっている。朝の立ち上げ時に木質ボイラーのみを 2 時間先に立ち上げ、需要のピークを低減させるなどの対策を行うことにより、重油ボイラーの稼働時間、寄与率を低減させることができると考えられる。また、木質ボイラーの蓄熱槽の容量を増加させると木



小学校 (1/15)



中学校 (2/14)

図 3-2-3-(1)-8 蓄熱槽の容量に対する木質ボイラーの寄与率

質ボイラーの寄与率は増加するが、その傾きは小さく、蓄熱槽容量は木質バイオマスボイラーの寄与率に大きく影響しないことがわかった。この理由は、例えば蓄熱槽容量 5m³ は木質ボイラー、重油ボイラーがフル運転した時の 5~10 分程度の容量しかないためと考えられる。この結果、蓄熱槽の位置づけは各系統への出力温度を安定させることでしかなく、蓄熱槽は導入コストが高額になる場合や機械室の設置スペースが狭い場合は低容量でも良いと考えられた。

5) 熱源システムの導入評価

表 3-2-3-(1)-4 に熱源システムの導入にあたり、木質バイオマスの効率的導入、利用のための検証項目・スケジュールと検討内容を示す。3.2.3 では、表 3-2-3-(1)-4 の①から⑥の蓄熱槽について検証した(他の部分は他の節で言及)。また、図 3-2-3-(1)-9 に熱源システムの計測箇所と使用した計器を、表 3-2-3-(1)-5 に測定項目、測定箇所、測定内容を示す。出力や木質の寄与率などの算出に活用し、運用改善に利用するデータは計装で、数値が安定し一次的な計測で十分なもの、参考として確認するものは道総研の計器で測定した。

表 3-2-3-(1)-4 検証項目・スケジュールと検討内容

検証項目・スケジュール	検討・確認内容
①木質ボイラーの安定燃焼	・ボイラー燃焼状態・燃料供給不良発生の有無の確認
②各ボイラーの出力(12-4月)	・各ボイラーの供給熱量の測定
③木質ボイラーの熱効率(2月・4月)	・トラックスケールによるチップ重量測定とチップ含水率測定による投入チップ発熱量測定 ・投入チップ発熱量とボイラー供給熱量から熱効率算出
④重油ボイラーの熱効率(12-4月)	・重油流量(発熱量)とボイラー供給熱量から熱効率算出
⑤室内環境(12-2月)	・室内の代表温度の測定
⑥運転のチューニング(12-1月)	・省エネルギーな温水供給方法の検討と確認
シーズン使用後の木質ボイラーの状態確認(翌年5月)	・クリンカの発生チェック、その他不具合の確認
GHGの分析(12-4月)	・ボイラー、コンベアー等電力使用量 ・ポンプ電力使用量、重油使用量
木質ボイラー排ガス分析(12月)	・ガス成分分析(CO・O ₂ ・NO _x ・CO ₂) ・ばいじん・水分の定量
焼却灰の利用(12月)	・燃え殻、飛灰の重金属等溶出および含有量試験とそれに基づく利用方法の検討

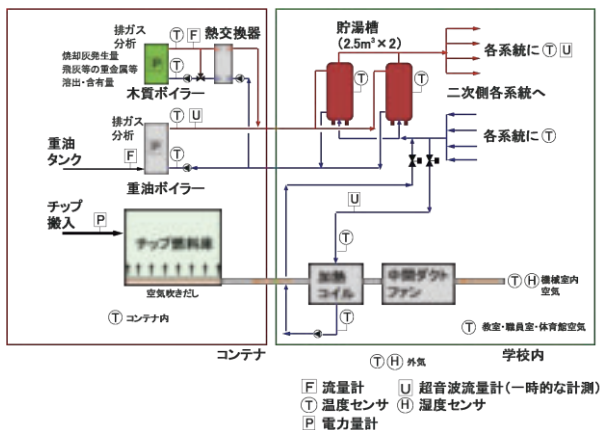


図 3-2-3-(1)-9 熱源システムの計測箇所と計器

表 3-2-3-(1)-5 測定項目、測定箇所、測定内容

測定項目	測定箇所	測定内容	計装で取得	道総研がロガー等で取得	備考
投入燃料	重油ボイラー	重油流量	○		
熱源機器	木質ボイラー	運転・停止状態	○		運転時間の記録
		行き戻り温水温度	○		
		温水流量	○		
		電力使用量	○		
	重油ボイラー	運転・停止状態	○		運転時間の記録
		行き戻り温度	○		
		温水流量	○	○	道総研が超音波流量計で計測した定数を計装に導入
		電力使用量		○	重油ボイラーの重油流量と電力使用量の関係から算出
	チップ加熱コイル	行き戻り温水温度	○		
		温水流量	○	○	道総研が超音波流量計で計測した定数を計装に導入
貯湯槽 槽内温度		○		2.5m ³ の貯湯槽が2個並列設置(2個ともデータを取得)	
コンテナ内	電力使用量	○			
放熱側ポンプ	二次側ポンプ	運転・停止状態	○	○	運転時間の記録
		行き戻り温度		○	参考として確認
		電力使用量		○	個別に電力使用量を測定
室内環境	室内空気	空気温度	○		1F体育館・1F普通教室・2F職員室・2F普通教室(西当別小学校)1F職員室・1F体育館・2F普通教室2カ所(西当別中学校)
外気温	外気	空気温度・空気湿度	○		

① 木質ボイラーの燃焼状態の確認

写真 3-2-3-(1)-4 に燃料として用いた木チップ(河川支障木)の外観を示す。運転初期には、歯幅 60mm のチップ製造装置の刃を用いていたが、アスペクト比の高い(細長い)チップは、ボイラー燃料供給口に引っかかり、燃料の詰まりの原因となって、運転が止まる事態があった。このため、チップ製造装置の刃を 35mm に変更することでこれを解消した。



写真 3-2-3-(1)-4 燃料として用いた木チップ

② 各ボイラーの出力

図 3-2-3-(1)-10 に各学校における各ボイラー出力の累積頻度を示す。ボイラーの出力は放射パネルの放熱量を算出した式 3-2-3-3 の、 T_w をボイラー行き(出湯)水温[K]、 T_{wi} を戻り水温[K]として算出する。木質ボイラーの最高出力は定格出力の 8 割程度であった。木チップの含水率は 40%程度で運転されており、ボイラーメーカーのカタログにおける同等条件の出力値と概ね一致した。

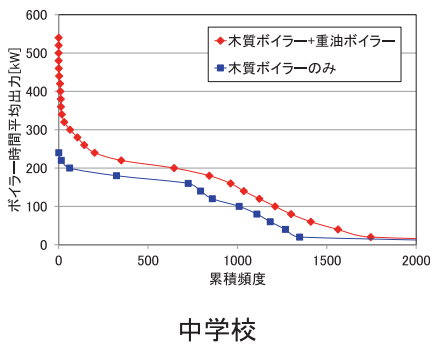
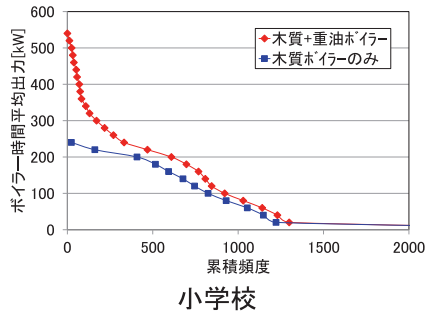


図 3-2-3-(1)-10 各ボイラー出力の累積頻度

③ 木質ボイラーの熱効率

木質ボイラーの実運転条件における熱効率の把握は次の木質ボイラーの容量設計に重要である。しかしながら、一般に木質ボイラーには投入される木チップの重量を測定・記録する機能は付与されていない。このため、令和3年2月、4月に熱効率評価を行った。具体的には西当別小・中学校のボイラーに搬入される木チップの合計重量をトラックスケールにより測定し、算出した(写真3-2-3-(1)-5)。2月の試験では、2/12・15・17・19日の早朝に、4月の試験では、4/12・15日の早朝に4tトラックでそれぞれの学校に木チップを搬入した。木チップ搬入時には、数カ所で数100gずつサンプリングし、105℃24時間乾燥して木チップの含水率を求め、総発熱量から水の蒸発熱と含水率に相当する水分を差し引き、発熱量を求めた。一方、計量検定された熱量計によ



2月(雪の上で測定)



4月

(アスファルト上で測定)

写真 3-2-3-(1)-5 トラックスケールによる木チップ重量測定

り、トラックスケールで計量した期間において、小学校・中学校の木質ボイラーで出湯された積算熱量を記録し、式3-2-3-10により、2つの学校における木質ボイラーの平均熱効率を求めた。図3-2-3-(1)-11に木チップの使用期間別(搬入毎)のボイラーの平均熱効率を示す。

$$\eta = Q_{\text{output hotwater}} / Q_{\text{output chip}} \times 100 \quad (\text{式 } 3-2-3-10)$$

η : 木質ボイラーの熱効率[%]

$Q_{\text{output hotwater}}$: 木質ボイラーの積算温水出力量[MJ]

$Q_{\text{output chip}}$: 搬入した木チップの発熱量[MJ]

図3-2-3-(1)-11に木質ボイラーの平均熱効率を示す。木質ボイラーの平均熱効率は65%程度となり、ボイラーメーカーが表示する定格熱効率とは大きく異なる。この原因は、実機における木質ボイラーの起動・停止に伴う熱損失等が原因と考えられる。

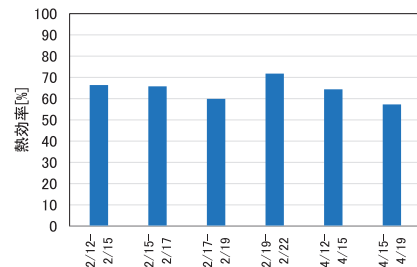


図 3-2-3-(1)-11 木質ボイラーの平均熱効率

④ 重油ボイラーの熱効率

図3-2-3-(1)-12に小学校の令和2年度における重油ボイラーの1時間毎の平均熱効率を示す。平均熱効率は、式3-2-3-11で示した。

$$\eta = Q_{\text{output hotwater}} / Q_{\text{output oil}} \times 100 \quad (\text{式 } 3-2-3-11)$$

η : 重油ボイラーの熱効率[%]

$Q_{\text{output hotwater}}$: 重油ボイラーの積算温水出力量[MJ]

$Q_{\text{output oil}}$: 投入した重油の発熱量[MJ]

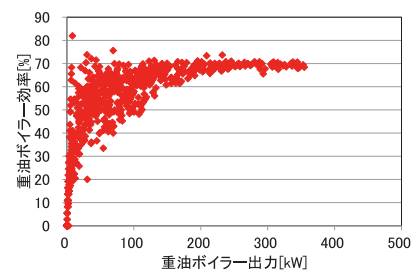


図 3-2-3-(1)-12 重油ボイラーの熱効率(小学校)

重油ボイラーの定格出力465kWに対して、負荷率(定格容量に対する平均出力)は、最大でも0.7~0.75程度であり、1時間の積算熱量でデータ処理し

た本グラフでは、低負荷率となる時間も多く、運転・停止を伴うことがわかる。図 3-2-3-(1)-6 では重油ボイラーが頻繁に運転・停止する傾向も伺える。厳寒期での重油ボイラーのみでも出力を維持できる容量設計としているが、平均熱効率向上のためには、半分の容量の重油ボイラーを 2 台設置し、通常時は 1 台しか使わないなどの対処も必要である。

⑤ 熱源システムの制御

図 3-2-3-(1)-13 に例として小学校における令和 3 年 1 月 28 日における各ボイラーから蓄熱槽への行き温度・蓄熱槽温度の経時変化を示す。蓄熱槽の温度は設定した 60℃に制御されていること、木質ボイラーの容量が足りない時に重油ボイラーが稼働し、蓄熱槽温度を維持していることが確認できる。

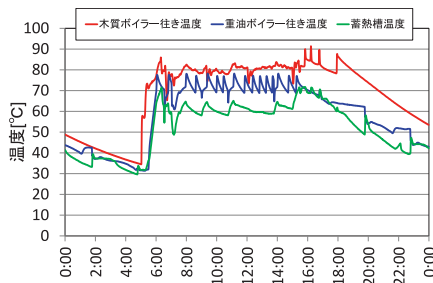


図 3-2-3-(1)-13 各ボイラーから蓄熱槽への行き温度・蓄熱槽温度の経時変化 (令和 3 年 1 月 28 日)

⑥ 運転のチューニング

木質ボイラーを効率的に運転するためには、運転で得られたデータを解析し、チューニング（運転制御の調整）を行うことが重要である。

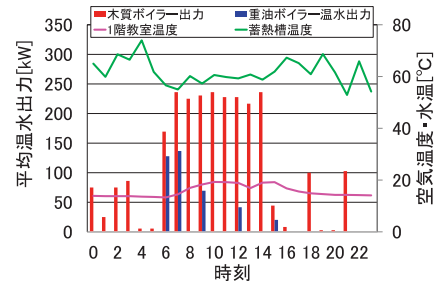
表 3-2-3-(1)-14 に小学校のチューニングの概要を示す。室温改善や年末年始における各配管系統の凍結防止の他、①需要がない時間帯の熱供給停止、②放熱側送水ポンプの土曜日・日曜日の停止、③重油ボイラーの運転開始時間の遅延を行った。その中で図 3-2-3-(1)-14 に①、③に関するチューニング

表 3-2-3-(1)-14 チューニングの概要

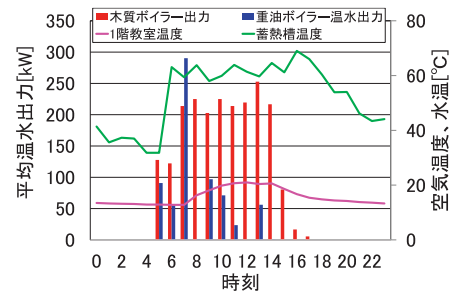
設定日	設定目的	内容
令和2年12月1日	初期設定	木質ボイラー77℃ 重油ボイラー68℃運転73℃停止 重油ポンプ:蓄熱槽温度50℃運転、60℃停止
令和2年12月7日	室温改善	重油ポンプ:蓄熱槽温度62℃運転、67℃停止
令和2年12月29日から 令和3年1月3日	各配管系統の凍結防止	木質ボイラー・重油ボイラー24時間運転 (R3年度は早朝1時間重油ボイラーのみ運転)
令和3年1月4日	需要がない時間帯の熱供給停止	ボイラー早朝・夜間停止 土曜日・日曜日 木質・重油ボイラー停止
令和3年1月30日	使用電力量削減	送水ポンプ土曜日・日曜日停止
令和3年度	木質ボイラーの寄与率向上	重油ボイラーの運転開始時間を木質ボイラーより1時間遅延する

前後の平均温水出力、1階教室温度、蓄熱槽温度の経時変化を示す。

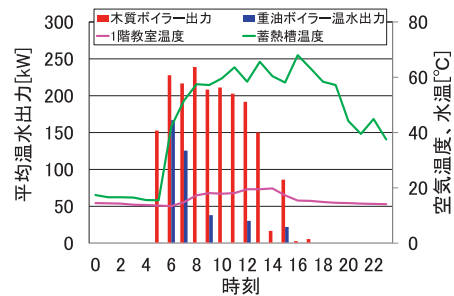
図 3-2-3-(1)-14(b)は、教室等の使用がない夜間・早朝のボイラーの運転を停止した条件のグラフであり、(c)は、重油ボイラーの起動を木質ボイラーより 1 時間遅延した条件のグラフである。この結果、式 3-2-3-9 で示される木質ボイラーの寄与率[%]は、(b)の 76%に対し、(c)では 83%と改善した。



(a) 木質ボイラー・重油ボイラー24時間連続運転 (令和 2 年 12 月 17 日, 平均外気温-5.0℃)



(b) 早朝・夜間に各ボイラーを停止 (令和 3 年 1 月 28 日, 平均外気温-3.5℃)



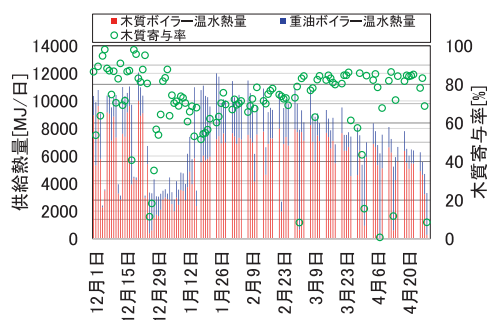
(c) 重油ボイラーの運転開始時間の遅延 (令和 3 年 12 月 13 日, 平均外気温-1.6℃)

図 3-2-3-(1)-14 チューニング前後の平均温水出力、1階教室温度、蓄熱槽温度の経時変化

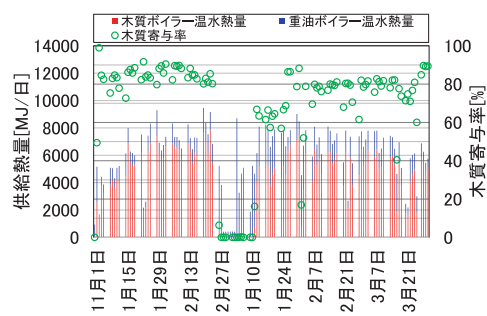
⑦ 木質ボイラーの寄与率

図 3-2-3-(1)-15 に小学校における日別の各ボイ

ラー供給熱量，木質寄与率を示す。令和2年度においては，燃料庫へのチップの搬入は2日に1回行っていたが，燃料庫の容量が十分でないため，搬入後2日目にチップ切れを起こし，重油ボイラーの寄与率が高くなる傾向にあった。このため，令和3年1月から木質ボイラーからの熱供給量を8,000MJ/日程度に抑え，2日間の木チップ供給量を平準化することで，木チップ搬入2日目の重油ボイラーの寄与率を低下させた。また，令和3年度には，燃料庫の木チップ残量が減少すると搬送する体制を整えた。この結果，木質寄与率は，令和2年度72%だったが，令和3年度には80%(令和3年11月～令和4年3月，ただし12/27-1/26のボイラーメンテナンス時は除く)に向上した。このようにデータの取得と分析，それに基づく運用改善は一定の効果がある。



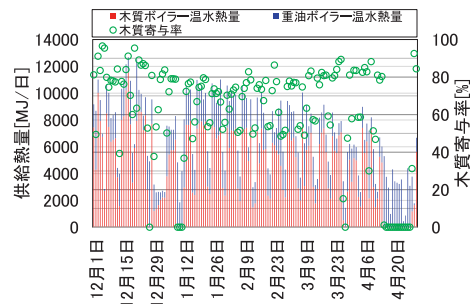
(a) 令和2年度



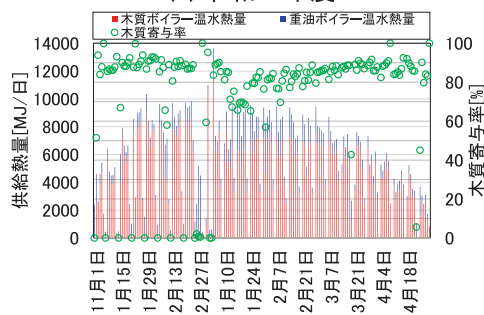
(b) 令和3年度

図 3-2-3-(1)-15 各ボイラー供給熱量，木質寄与率（小学校）

図 3-2-3-(1)-16 に中学校における日別の各ボイラー供給熱量，木質寄与率を示す。中学校においても，室温改善や年末年始における各配管系統の凍結防止の他，需要がない時間帯の熱供給停止を令和2年度に，重油ボイラーの運転開始時間の遅延を令和3年度に行った。この結果，木質ボイラーの寄与率[%]は，令和2年度68%，2021年度81%となり，木質ボイラーの寄与率80%以上の目標を達成した。



(a) 令和2年度



(b) 令和3年度

図 3-2-3-(1)-16 各ボイラー供給熱量，木質寄与率（中学校）

6) 燃料庫における送風乾燥システムの導入

学校内機械室の空気を燃料庫の下部から吹き出し，ボイラー投入前のチップを乾燥する手法^[3]について，導入と評価を実施した。

① 送風乾燥システムの概要

写真 3-2-3-(1)-6 に燃料庫に設置した送風乾燥システムと吹き出し口を示す。学校の機械室の空気は，送風機（定格 500m³/h）に接続された 200A の塩化ビニル管を経由して，燃料庫内で 50A の塩化ビニル管 2 系統（長さ 1m）に送られる。50A の塩化ビニル管の下部には，100mm ピッチ，最下部から 45 度の角度で φ15mm の孔が合計 2 個ずつ，5 列設けられており，燃料庫内のチップ層下部に空気が送られる。燃料庫上部には換気口があり，そこから空気は排出される。



写真 3-2-3-(1)-6 送風乾燥システムと吹き出し口

② 送風乾燥システムの評価

事前検証として、機械室の送風口から白煙を吹き込み、吹き出しむらの有無を確認した。写真 3-2-3-(1)-7 に白煙吹き出し中の燃料庫内の様子を示す。白煙は大きなむらがなく拡散して吹き出している様子が目視で確認できた。ただし、送風時の圧力損失の低い壁際から吹き出す白煙の流量がやや多いことも確認された。送風の一部が木チップ層を通過せず、ショートパスすることに留意が必要である。

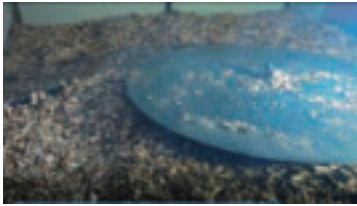


写真 3-2-3-(1)-7 白煙吹き出し中の燃料庫内

次にボイラー投入前の木チップの含水率の経時変化を令和 3 年 12 月 16 日、17 日に西当別小学校で評価した。以下表記の木チップの含水率は、湿式基準であり、式 3-2-3-12 で表される。

$$M_{\text{chip}} = (M_{\text{before}} - M_{\text{after}}) / M_{\text{before}} \times 100 \quad \cdot \cdot (3-2-3-12)$$

M_{chip} : 木チップの含水率 [%]

M_{before} : 乾燥前の木チップの重量 [g]

M_{after} : 乾燥後の木チップ重量 [g]

木質ボイラーは毎日早朝 5 時 30 分から夕方 16 時まで運転される。木チップの搬入は、前日の 12 月 15 日の 8 時に行われ、12 月 17 日も 8 時 10 分に行われた。12 月 15 日 17 時 30 分における燃料庫上部、12 月 17 日搬入時の木チップの含水率は、それぞれ 33.2、33.1%であった。次に 12 月 16 日 5 時から 30 分または 1 時間毎に 16 時までボイラーに導入される直前の木チップの一部をサンプリングし（写真 3-2-3-(1)-8）、含水率を求めた。図 3-2-3-(1)-17 に木チップの含水率の経時変化を示す。チップ搬入のない日はチップ含水率を数%低減する効果がある。12 月 16 日 13 時から 14 時にかけて木チップの含水率が 30.2 から 32.6%に上昇した。この原因は、燃料庫内のアジテータ（回転式の木チップ搬入装置）により、燃料庫中央部から集中的に木チップがボイラーに送られるが、中央部周辺における上部の乾燥していない木チップが崩れてアジテータに供給されたためと考えられる（写真 3-2-3-(1)-9）。

図 3-2-3-(1)-18 に機械室内の温度・絶対湿度、外気温、燃料庫内の空気温度、絶対湿度を示す。機械室内の空気温度はボイラー運転時には 35℃程度、ボ

イラーが稼働していない早朝においても 22℃程度であった。絶対湿度は 3~4g/kg-乾燥空気程度と乾燥している（22℃相対湿度 40%の絶対湿度は 6.6g/kg-乾燥空気）。一方、外気温は測定期間中氷点下であったが、燃料庫内の空気温度はほぼ 10℃以上となり、水分を含むチップが凍結するのが防止されている。燃料庫内の絶対湿度は 5~10g/kg-乾燥空気程度であり、木チップの水分によって上昇したと考えられる。チップ搬入のある日は、搬入がない日と比較して木チップ乾燥時間が短く、乾燥効果は少ないと考えられた。総論として、ここでの乾燥効果は 1 日数%程度の含水率低下に留まるため、全体のチップの乾燥や保管の工程の中で、補助的な位置付けであることに留意が必要である。



写真 3-2-3-(1)-8 木チップのサンプリング

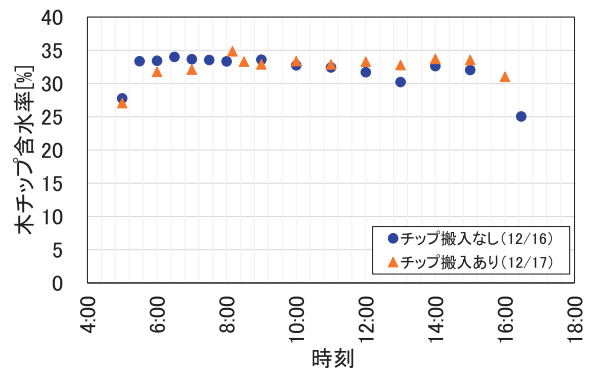


図 3-2-3-(1)-17 木チップの含水率の経時変化



写真 3-2-3-(1)-9 木チップのアジテータへの供給状況

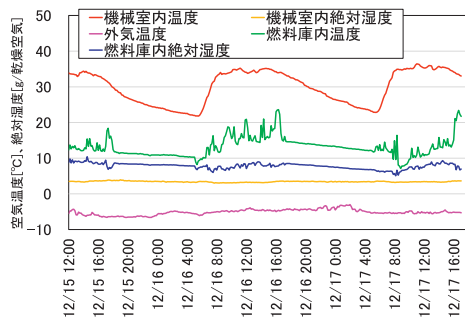


図 3-2-3-(1)-18 機械室内・燃料庫内の
空気温度・絶対湿度，外気温の経時変化

6) 結言

木質ボイラーの導入にあたって，当別町の学校施設をモデルに，熱需要実測，熱源システム制御方法の検討，数値計算による各機器の容量設計，熱源システムの導入評価と運用改善を行い，各段階における検討内容や取得したデータを示すとともに，作業にあたっての留意点を示した。

[引用文献等]

- [1] JIS A1400. “暖房用自然対流・放射形放熱器—性能試験方法”. (2007)
- [2] 白土博康, 藤澤拓己. “木質バイオマスボイラー利用熱源システムの容量設計”. 『北海道立総合研究機構工業試験場報告』. No. 317. pp15-21. (2018)
- [3] 白土博康ほか. 『木質バイオマスボイラーの安定燃焼を目的とした木チップの送風乾燥に関する評価試験 研究成果報告書』. (2019)

研究担当機関：エネルギー・環境・地質研究所

執筆者：白土 博康

(2) 新築施設における木質バイオマスボイラー利用の高効率化

1) 実装に関するスケジュール

当別小学校と当別中学校を統合して設置する一体型義務教育学校（とうべつ学園）が、本研究の実施期間内（令和元年～令和5年度）に設計、施工、開校予定となっていた。そこで本研究においては、町の構想にも盛り込まれていた木質バイオマスによる熱利用設備導入や、環境学習向けの「見える化」への研究成果の反映を目指し、社会実装対象施設として設計から運用改善までの取組みを行った。

図3-2-3-(2)-1にとうべつ学園に関する実装のスケジュールを示す。建築物の新築は「基本設計」→「実施設計」→「施工」→「供用開始」と進む。それぞれの段階の早い時期に、町関係部局（教育委員会、エネルギー担当部局）、設計者、施工者など関係者と打ち合わせし、実装内容やスケジュールについて共通認識を持って進めることができるよう努めた。実装の中で特に重要なポイントを以下に記す。

① シミュレーションによるボイラー容量算定

実施設計の積算に入る前段階（2019年12月）に、道総研にて熱負荷シミュレーションを行い、木質バ

イオマスボイラーの設計容量に反映した。検討の詳細は次項に示す。

② 汎用PCを用いた計装の採用

設備機器の制御方法、エネルギー使用量や室温等の測定、見える化の表示内容に、研究の検討結果を反映させるため、計装事業者の協力を得た。

③ 施工段階における詳細仕様検討

基本的な仕様は実施設計時に確定する必要があるが、詳細な測定箇所や見える化の方法については、施工段階で検討し、より実効性の高いシステムを目指した。

2) 設計段階におけるボイラーの容量検討

① 熱源設計の基本的な考え方（図3-2-3-(2)-2）

限りある木質資源は、できるだけ効率よく使用することが必要である。熱負荷の100%を木質チップで担うと過大なボイラーが必要となり燃焼効率が低下する（木質チップを無駄に使う）ため、極力連続運転可能な木質バイオマスボイラーの容量とし、熱負荷が大きいときは重油の真空温水器を併用する。また、スケジュール運転により朝方のピーク負荷を低減するなど、制御の工夫により木質バイオマスボイラーの分担率を向上させる。

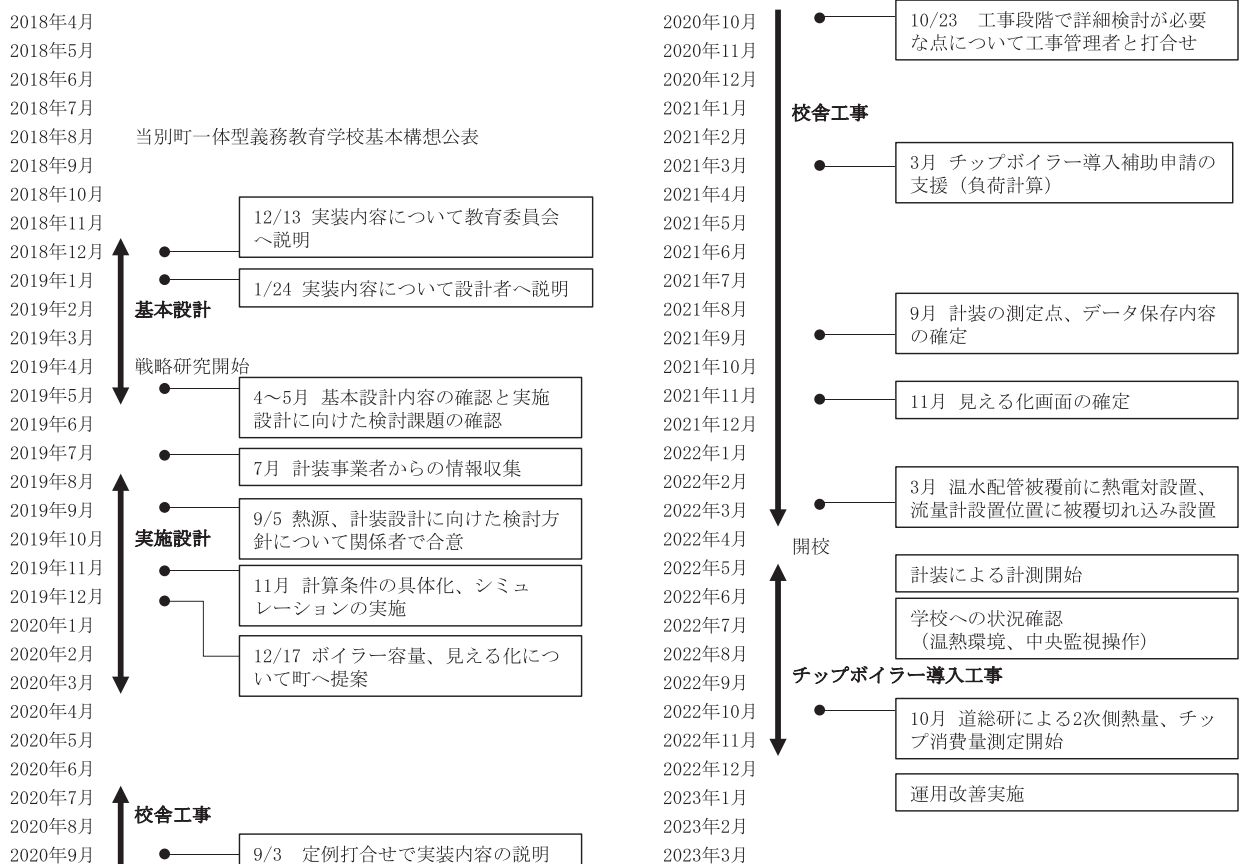


図3-2-3-(2)-1 とうべつ学園における実装スケジュール

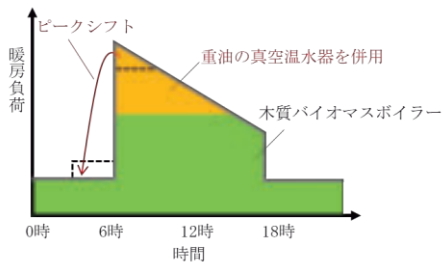


図 3-2-3-(2)-2 ボイラー容量の適正化

② 計算方法

年間の時刻別気象データを用いた多数室非定常計算を行う。図 3-2-3-(2)-3 に計算上の部屋の分割例を示す。平日 (204 日), 通常休日 (152 日), 学校閉庁日 (9 日) に区分して室温, 換気量, 内部発熱のスケジュールを仮定する。

③ 木質バイオマスボイラーの容量の適正化

本校舎では, 暖房, 換気のスケジュール運転が可能である。図 3-2-3-(2)-4 のとおり, 各設備の運転開始時刻をずらすことにより, 朝のピーク負荷を低減することができる。

図 3-2-3-(2)-5 に木質バイオマスボイラーの容量を変化させた場合の重油削減率 (= 暖房負荷に対する木質バイオマスボイラーの分担率) を示す。重油の真空温水器の容量は, 木質バイオマスボイラー停止時に単独でも設定室温を維持できるように 450kW とした。

木質バイオマスボイラーの容量が大きいと, ON/OFF 運転が増加し, 連続運転率 (年間の暖房発生時間のうち木質バイオマスボイラーが連続運転可能な負荷が発生する時間の割合) が下がる。一方, 木質バイオマスボイラーの容量が小さすぎると, 重油削減率が下がる。

なお, 熱源容量は「建築設備設計基準」に基づく必要もあり (本施設の場合, 合計 820kW 必要), ボイラー等の標準的な規格を考慮し, 設計容量は下記を推奨した。

木質バイオマスボイラー 340kW
 (基本設計段階の 500kW より小型を選択)
 重油の真空温水器 581kW

この場合も木質バイオマスボイラーの連続運転率は変わらず, 重油削減率はわずかに小さくなる (図 3-2-3-(2)-5 の ◆ 印)。

ボイラー出力の計算例を図 3-2-3-(2)-6 に示す。木質バイオマスボイラー優先で運転するため, 重油の真空温水器は ON/OFF 運転の頻度が高くなる。重油の真空温水器を 2 台とすると, ON/OFF 運転の頻度は減るが, 本施設では設置場所の制約と配管・制御の簡素化を考慮し, 重油の真空温水器は 1 台とした。

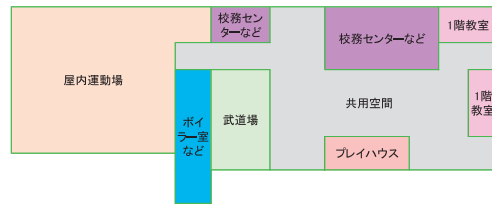


図 3-2-3-(2)-3 計算上の部屋の分割例 (1 階)

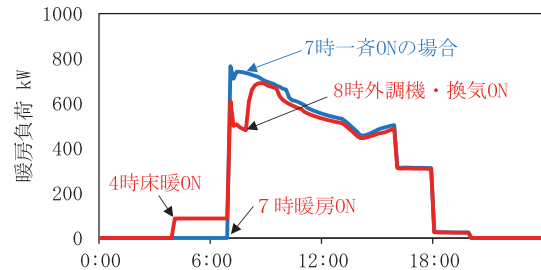


図 3-2-3-(2)-4 ピークシフトの検討

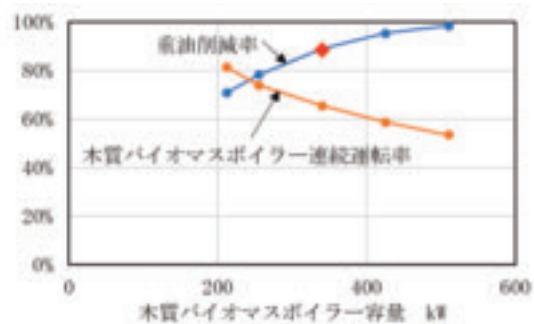


図 3-2-3-(2)-5 木質バイオマスボイラー容量と重油削減率の関係

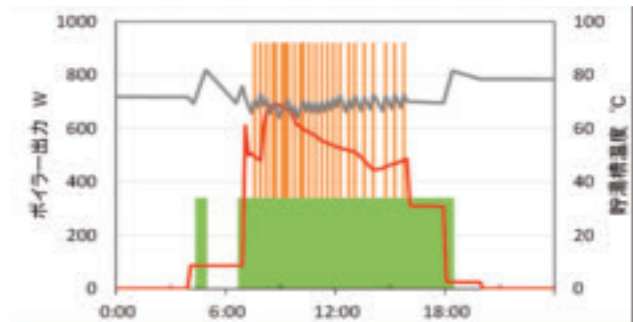


図 3-2-3-(2)-6 ボイラー等の出力 (負荷最大の日)

3) 供用開始後おける運用改善

① 概要

木質チップを燃料とするバイオマスボイラー (写真 3-2-3-(2)-1) が導入された“とうべつ学園”において, バイオマス資源の効率的利用を目的とする暖房の運用改善を行うとともに, 化石燃料の使用量削減効果を検証した。



写真 3-2-3-(2)-1 木質バイオマスボイラー

② 校舎の概要

とうべつ学園は、9 学年計 18 クラスを有する。校舎（写真 3-2-3-(2)-2）は、2022 年 4 月に運用が開始された。延べ床面積は 12,296m² で、旧校舎の 2 校合計 10,815 m² と比べ 14% 程度大きい。断熱仕様は、屋根・外壁が発泡プラスチック断熱材 150mm 厚（外断熱）、窓がアルミ樹脂複合サッシの Low-E 二層複層ガラスである。

③ 暖房の設備等（図 3-2-3-(2)-7）

主な暖房は、温水によるパネルヒータ、床暖房、外調機である。また、一部の教室に灯油の個別の暖房機がある。

温水の熱源は、前述の木質バイオマスボイラー（定格出力 401kW、1 台：機種選定の都合により容量を調整）と、重油の真空温水器（定格出力 581kW、1 台）である。これらの熱源で一次温水を生成し、熱交換により貯湯タンクの湯を昇温させる。二次温水は、貯湯タンクからヘッダーを経由し、各系統に供給される。

④ 中央監視・見える化システム

本システムは、計測センサー、操作用パソコン、見える化用のモニター等からなる。これらは、保全の観点から、長期にわたり故障時の部品交換を可能とするため、汎用部品で構成した。

計測センサーは、重油消費量、電力の用途別使用量、暖房の一次・二次温水熱量、室温等を計測する。操作用パソコンは職員室に設置され、中央制御と見える化の 2 つのプログラムを装備している。（図 3-2-3-(2)-8）

このうち中央監視は、各設備機器の運転方法（発停スケジュール、暖房送水温度、他）を設定するものである。各種設定項目のうち運用改善の可能性のある項目は、使用者が自由に設定できる仕様にした。また、各設備機器の運転状況、センサー計測値を記録し、日報等を作成するとともに、運用改善に活用するため、任意の期間の記録データを csv 形式で出力できるものとした。

一方、見える化システムは、共用空間に設置したモニター（写真 3-2-3-(2)-3）に、環境教育用の情報（木質チップや電力の消費量、室温等）を表示するものである。また、学校行事等の掲示の機能も備えるが、これは、本システムが、日常的に使用されることで、将来にわたり維持されることを期待したものである。



写真 3-2-3-(2)-2 校舎の外観

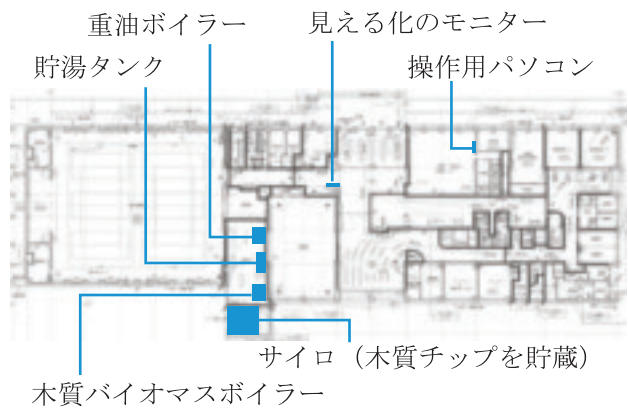


図 3-2-3-(2)-7 1 階平面図

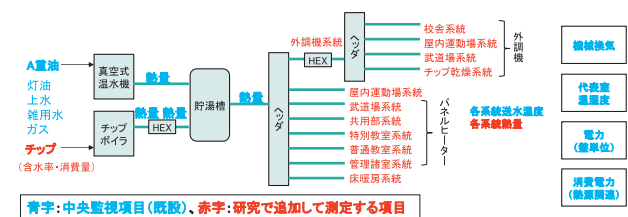


図 3-2-3-(2)-8 暖房関連の測定概要



写真 3-2-3-(2)-3 見える化のモニター

⑤ 木質バイオマスボイラーの寄与率

CO₂排出量の削減のためには、木質バイオマスボイラーの寄与率(式3-2-3-(2)-1)を高め、重油の消費量を極力削減することが求められる。

2022年10月の暖房開始当初は、木質バイオマスボイラーの寄与率は3%に留まった。木質バイオマスボイラーと重油の真空温水器は、貯湯タンクから送水される二次温水が一定の温度以下になると稼働する仕組みである。そのため運用改善では、重油の真空温水器が稼働する送水温度の閾値を徐々に下げ、木質バイオマスボイラーが優先して稼働するようにした。その結果、木質バイオマスボイラーの寄与率が向上し、12月以降は85~96%になった(図3-2-3-(2)-9)。

$$R = \text{WB} / (\text{HB} + \text{WB}) \times 100 \quad (\text{式 } 3-2-3-(2)-1)$$

R : 木質バイオマスボイラーの寄与率[%]

WB : 木質バイオマスボイラーの一次温水熱量[GJ]

HB : 重油真空温水器の一次温水熱量[GJ]

⑥ 木質バイオマスボイラーの発停時間の適切化

木質バイオマスボイラーの発停時間の適切化は、重油消費量は最少化しつつ、木質チップも消費量を抑制して効率的に利用する観点から重要である。

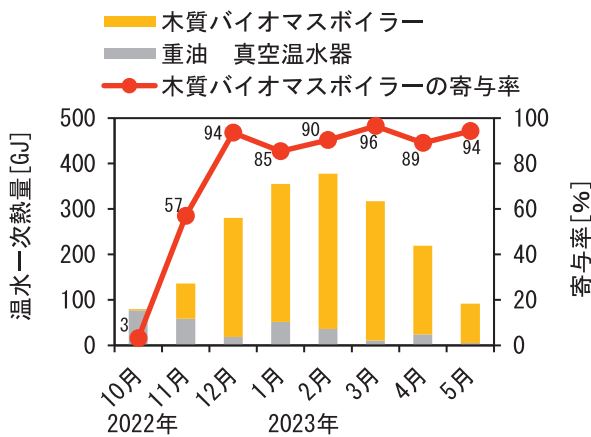


図 3-2-3-(2)-9 木質バイオマスボイラーの寄与率

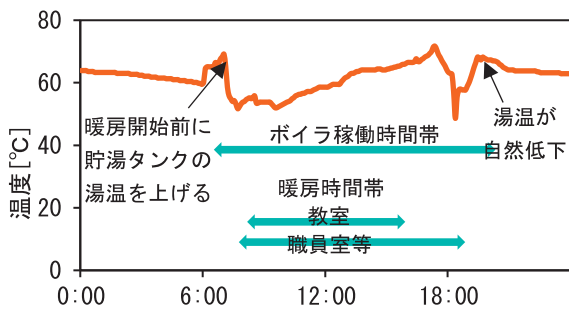


図 3-2-3-(2)-10 貯湯タンクの湯温

確認したところ、貯湯タンクの湯温が、暖房終了後の木質バイオマスボイラーの稼働により上昇し、夜間に自然低下していた(図3-2-3-(2)-10)。そのため、ボイラーの停止時刻を早め、停止後の暖房では貯湯タンクの残り湯を利用することにした。

⑦ 室温の維持

木質チップ等の燃料の使用量は削減が望まれるものの、室温は適切に維持する必要がある。

計測データを確認したところ、室温が高まる時間帯が授業時間帯より遅れるケースや、室温が低いケースがあることがわかった(図3-2-3-(2)-11)。

原因の1つとして、省エネのための送水温度の目標値(表3-2-3-(2)-1)が送水温度を制限すること

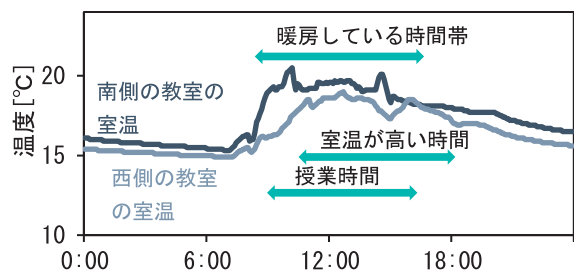


図 3-2-3-(2)-11 教室の室温の例

表 3-2-3-(2)-1 送水温度の目標値(運用改善前)

	外気温	送水温度の目標値
下限	-15°C	60°C
上限	15°C	40°C

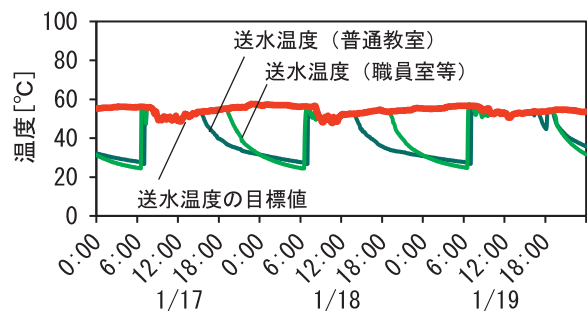


図 3-2-3-(2)-12 パネルヒータの送水温度

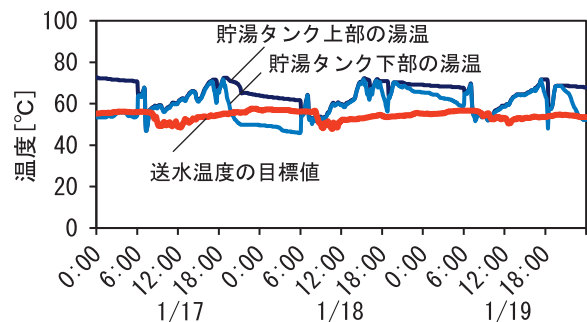


図 3-2-3-(2)-13 貯湯タンクの湯温

で、貯湯槽の湯温よりも送水温度が低く抑えられていることがわかった（図 3-2-3-(2)-12, 図 3-2-3-(2)-13）。そのため、目標値を 60℃一定に修正し、送水温度を上げることとした。

もう 1つの原因として、朝の暖房開始時刻を校舎全体で同時刻としていたことが、貯湯タンクの湯温低下を助長していることがわかった（図 3-2-3-(2)-14）。このことは、暖房開始時におけるピーク負荷の増大と、それに伴う重油の真空温水器の稼働も招いていた。そのため、室温が上がりにくい教室のみ暖房開始時刻を早めることで、室温を確保しつつ、重油の真空温水器の稼働時間短縮を狙うこととした。

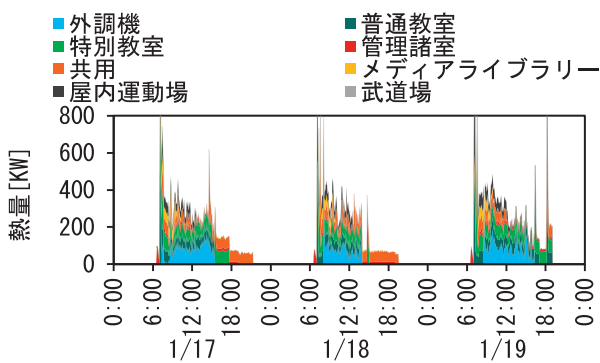


図 3-2-3-(2)-14 暖房の系統別の温水熱量

⑧ 化石燃料の削減の検証（図 3-2-3-(2)-15）

新校舎における木質チップを含む燃料の使用量は、旧校舎と比べ、熱量換算で 40%減となった。これは、校舎の断熱等の性能向上によるものと考えられる。さらに、木質チップの利用により 46%減となり、合計で 87%の化石燃料の削減となった。

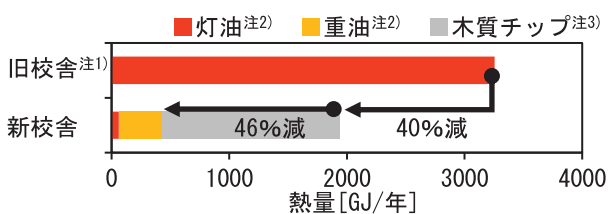


図 3-2-3-(2)-15 暖房用燃料の使用量

注 1) 旧校舎は、小・中 2 校の合算値。

注 2) 重油・灯油は、二次エネルギー換算値。

注 3) 木質チップは、木質チップ消費重量に低位発熱量 12.41 [MJ/kg] を乗じた値（詳細は次項）。

4) 木質チップ消費重量

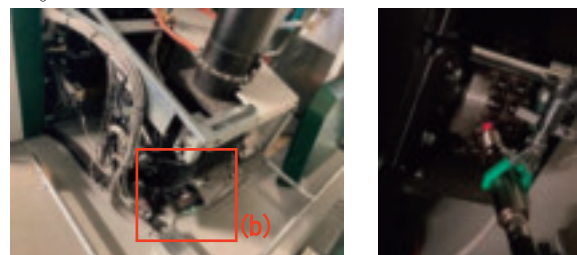
① 木質チップ消費重量の測定方法の検討

木質チップは、重油や電気と異なりその消費量を正確に把握することが難しい。これまで、新たにサイロに投入するチップ重量をトラックスケールな

どで測定することで、数日から数週間の期間に消費した木質チップの重量を推測する方法等があった。本研究では、時々刻々と変化する木質チップ消費重量を測定する方法を検討し、試行した。

② 木質チップ消費重量とスクリーコンベアの回転数の関係の把握

木質チップ消費重量を測定する方法として、木質チップをボイラーの火床へ供給するスクリーコンベアの稼働時間から推計できないか検討した。スクリーコンベアの稼働時間は、スクリーコンベアのギア部の時間当たりのギアの稼働量（通過する歯の数）を光電式回転検出器で測定した。また、火床へ供給される木質チップを回収し、その重量を測定した。



(a) ボイラー背面 (b) ギア部

写真 3-2-3-(2)-4 スクリューコンベア



写真 3-2-3-(2)-5 火床とスクリーコンベア

稼働時間を 5, 10, 20 秒と変更させながら測定した際の、木質チップ重量と通過した歯車の歯の数の関係を図 3-2-3-(2)-16 に示す。木質チップ重量は、回収後に乾燥させた絶乾時の重量である。稼働時間 20 秒のデータ（図中、通過した歯車の数が 150 前後のプロット）において、重量のばらつきがやや大きいものの、高い相関関係を得た。稼働時間 20 秒のデータでばらつきが大きくなった要因として、稼働開始前のスクリーコンベア内の木質チップの残量（充填率）に影響を受けていることがわかった。実際の制御では、5 秒未満程度の短時間の稼働と停止を交互に断続的に行うため、以降の分析では、図中の赤線で示す稼働時間 20 秒を除くデータの近似直線の結果を用いて木質チップ消費重量を推計することとした。

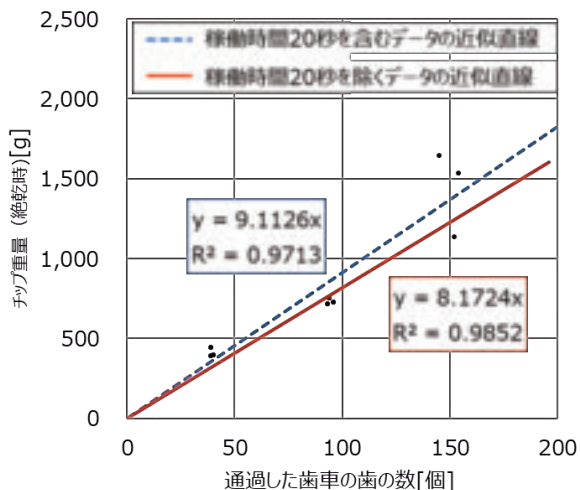


図 3-2-3-(2)-16 木質チップ重量と通過した歯車の歯の数の関係

③ 木質チップの含水率

図 3-2-3-(2)-17 に、サイロ内の温湿度及び木質チップの含水率（湿量基準）の推移を示す。サイロ内は低温・高湿な環境で、サイロ内の木質チップに含まれる水分が凍結している日もみられた。含水率は、サイロ内の採取位置によって異なり、特に高い条件では 60% 近くとなっていた。なお、サイロ下部にはチップの乾燥を促すために学校施設の排気を送風する装置が設けられている。チップの含水率が高く、不完全燃焼を起こす場合にはさらに暖房（加温）した空気を送風することもできる。測定期間中には、ボイラーの不完全燃焼等を生じなかったため、暖房はせずに排気のみを用いた送風を実施していた。サイロからボイラーに供給されるまでには短くとも数日程度以上の時間がかかり、供給されるまでにボイラーで不完全燃焼が起きない程度に乾燥が進んだものと思われる。サイロ内のチップを攪拌しコンベアに供給するためのアジテーター（回転子）が届かず、長期的にサイロ内に残留していると考えられるサイロ隅部において、含水率が 26.1～33.3% であったことから、サイロ内の定常状態が 30% 程度と仮定し、ボイラーに供給されている木質チップの含水率を 30% と設定した。

④ 木質チップ消費重量の推計

図 3-2-3-(2)-18 に、平均的な含水率を 30% として推計した月別の木質チップ消費重量及び木質チップの発熱量の推移を示す。木質チップ消費重量は、計測したギアの稼働量から推計した絶乾時の木質チップ重量と含水率から水分を含む重量を求めた。木質チップの発熱量は、木質チップ消費重量に、低位発熱量 12.41 [MJ/kg]（高位発熱量 19.95 [MJ/kg]・含水

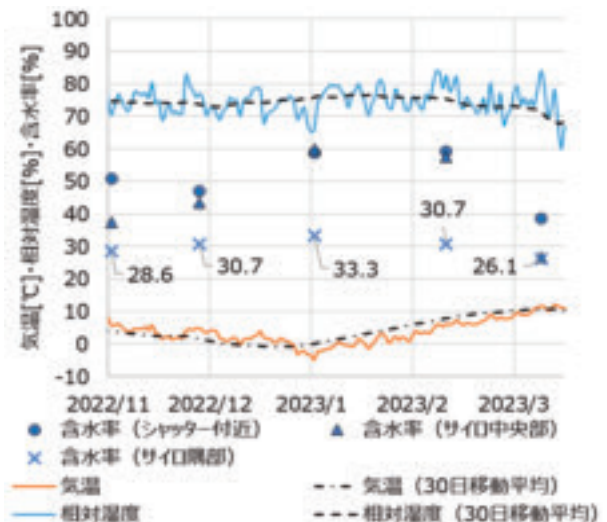


図 3-2-3-(2)-17 サイロ内の温湿度及び木質チップの含水率の推移



図 3-2-3-(2)-18 木質チップ消費重量及び木質チップの発熱量の推移

率 30% から算出) を乗じることで求めた。

5) まとめ

運用開始初年度における運用改善が、化石燃料使用量の低減及び室内温熱環境の形成において重要であることが確認された。

ここで得られた運用改善の知見は、とうべつ学園の 2023 年冬以降の運用に反映される予定であるとともに、他の木質バイオマスボイラーを導入した施設において運用改善を行う際に活かすことができる。

また、時々刻々の木質チップ消費重量の測定方法が示された。これにより、他施設を含め、木質チップ利用する際の適切な運用改善が可能になる。

研究担当機関：建築研究本部，北方建築総合研究所
執筆：北谷 幸恵，飯泉 元気，立松 宏一

(3) 木質ボイラーのメンテナンス

1) 背景と目的

木質ボイラーを適切に運用するには、定期的な点検とその結果に基づいたメンテナンス作業が不可欠である。適切な方法で、適当な時期にメンテナンス作業を行うことは、ボイラーの能力を損なうことなく、ランニングコストを最小限に抑えるために不可欠な手段のひとつである。一方、本戦略研究で西当別小学校及び中学校に設置された木質ボイラー（以下、当該ボイラー）の運用には、法的に義務付けられた自主点検項目などが存在しない。

そこで本戦略研究では「ボイラー及び压力容器安全規則」を参考にチェックシートを作成し、炉本体ならびに付帯設備の定期的な観察を行うことで、運用上のトラブルを未然に防ぎ、適切な運用に活用することを目的としている。

2) チェックシートの作成と点検例

チェックシート(表 3-2-3-(3)-1)の作成にあたり、当該ボイラーの設備構成を①炉体②熱交換器③灰出し設備④煙道、煙突⑤外観に大別した。大別した各項目について定期的な自主点検を実施するために、検査項目並びに判定基準を設定した。

① 炉体

炉体は主に鋼製ストーカーと耐火物性の炉壁から構成される(写真 3-2-3-(3)-1)。内部で燃料(木チップ)を燃焼させ、炉体は 800℃を超える高温にさらされることが想定される。高温による問題は様々に存在する。特に燃料中の灰分が原因^[1]となりクリンカが生成され、炉壁等に付着し燃焼空気の通気障害や、灰出しスクリューのトリップといった問題を引き起こす。高温による構造物の損傷、変形及びクリンカの生成、形状及び付着状況を評価した。

また、写真 3-2-3-(3)-2 のような灰の塊が高温により融解と凝固を繰り返すことで、ガラス状のクリンカに成長するため、点検ごとにこれらを除去^{注1)}す

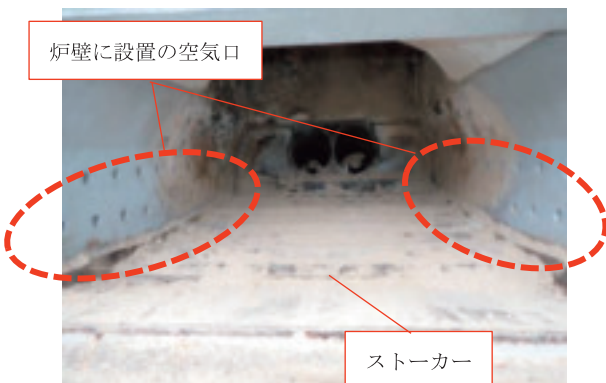


写真 3-2-3-(3)-1 炉内の構造



写真 3-2-3-(3)-2 炉内生成物の例

る必要がある。

② 熱交換器

当該ボイラーの構造上、道総研の有する機器では、直接的に円管や水室を観察することはできない。そのため、熱交換に関する操業パラメータに異常値がないかなどのヒアリング結果を元に判定を行う。当該ボイラーは煙管の自動清掃装置が付帯しており、灰の付着による熱交換能力の低下は考えづらいが、炉上部の 2 次燃焼室での灰の堆積状況(写真 3-2-3-(3)-3)を観察する必要があると考えている。



写真 3-2-3-(3)-3 2次燃焼室内での灰堆積状況

③ 灰出し設備

熱交換器同様、灰出しスクリューの損傷については直接的な観察を行うことはできない。そこで本研究では、灰箱内での灰の塊の有無や過負荷によるトリップ履歴の確認により、健全性の判定を行っている。当該ボイラーでも、過去に燃料中への異物(写真 3-2-3-(3)-4)混入により灰出し設備が過負荷停止したため、各回点検時には十分な確認が必要である。

④ 煙道、煙突

煙道にリーク等があれば排ガス中の酸素濃度が上がることが想定されるため、運転履歴に関するヒア

リングを行う。また、煙道に設置された点検口より目視等で内部状況の確認を行う必要がある。煙道内部の変色や損傷に加えて、内部に堆積した灰の性状（量、水分など）にも注意をすべきである。燃料の水分含有量が多いために燃焼ガスの温度が低下し、排ガス中の水蒸気が凝縮することで煙道内に水分を含んだダストが堆積した事象も確認されている（写真 3-2-3-(3)-5）。



写真 3-2-3-(3)-4 燃料内に混入した異物



写真 3-2-3-(3)-5 煙道に堆積した水分混じりのダスト

扉の止めボルトあるいは金具等のゆるみが無いかについても注意が必要である。また、運転時には普段と異なる異臭が無いかなど、外観に関しては日常での点検を推奨したい。

3) チェックシートの運用案

本項目で提案したチェックシートは導入事業者が年1回の自主点検に活用することを想定して作成を行った。

当該ボイラーでは冬期間（12月～翌5月）での運用後に点検を実施している。過去には2021年5月、12月、2022年5月、2023年6月の計4回実施しており、チェックシートの記入と写真の撮影を行うことで、経時的な変化を記録している。その際、当別町の担当者にも同席いただくことで、作業内容と観察項目に関して習得をしていただくことが最大の目的である。

さらに、今回作成したチェックシートやメーカーでの点検項目をもとに、項目等のアップデート、共有を行うことで、より適切な運用のための点検を関係者全員が行うことができるようになることがゴールであると考えている。

注1) 炉内生成物の炉壁等への付着が強固な場合、これを強引に除去しようとすると炉壁の損傷につながるため、十分な注意が必要である。

[引用文献等]

[1] 溝口進一ほか. “パークペレット燃焼におけるクリンカ生成と防止に関する研究”. 宮崎県工業技術センター研究報告. 60(2015). 5-8. (2015)

⑤ 外観

ケーシングを目視で確認することに加え、炉の外

研究担当機関：エネルギー・環境・地質研究所

執筆者：小倉 貴仁

表 3-2-3-(3)-1 木質ボイラー運用のためのチェックシート

検査項目	検査項目	検査方法	判定基準
1. 炉体	(1) 炉壁	[1] 損傷, 変形, 過熱, 変色の有無	目視による確認
		[2] クリンカの発生, 付着状況	クリンカサイズの性状, 除去性 空気口の閉塞がないか
	(2) ストーカー	[1] 損傷, 変形, 過熱, 変色の有無	損傷, 緩み, 漏れ又は腐食がないこと。
		[2] クリンカの発生, 付着状況	クリンカサイズの性状, 除去性 空気口の閉塞がないか
2. 熱交換器	(1) 煙管, 水室	[1] 熱交換能力異常の有無	ボイラー効率の低下
3. 灰出し	(1) 排出口	[1] 灰箱, 炉内での灰の塊, 異物の有無	目視による確認を行う
	(2) 灰出しスクリュー	[1] スクリュー羽, 軸への損傷	過去に過負荷の履歴がないか 目視による確認を行う
4. 煙道, 煙突	(1) 煙道内	[1] 損傷, リーク, ダストの付着状況の有無	排ガス中 O ₂ 濃度異常 目視による確認
5. 外観	(1) ケーシング	[1] 損傷, 異臭, 塗装の変色, 取付け金具の緩み, ダストの付着及び腐食の有無	目視, 触診による損傷, 異臭の有無を確認

(4) 排ガス・焼却灰の安全性の評価と検証

当別町は、再生可能エネルギーを活用した持続可能な循環型社会を構築するため、西当別小中学校やとうべつ学園のボイラーを従来の化石燃料を燃料とするものから木質チップを燃料とする木チップボイラーへ更新した。これにより温室効果ガスの削減や地域経済活性化へとつながることが期待される。一方、新たな環境への負荷も懸念される。木チップボイラーのメンテナンスや管理手法が適切でないといじんや窒素酸化物等の有害な物質が大気中に放出される可能性がある。また、木質バイオマスの燃焼に伴い発生する焼却灰の処理についても処理や保管にかかるコストや環境負荷を軽減するために、有効利用策の検討が求められている。そこで、本研究では、西当別小中学校の木チップボイラー（以下(i)と表記）、とうべつ学園の木チップボイラー（以下(ii)と表記）を対象に焼却灰及び排ガスの安全性について検討したので報告する。

1) 排ガス

① 検討方法

(i)及び(ii)のボイラーを対象に河川支障木由来チップ燃焼時における排ガス性状及びばいじんを測定して大気汚染防止法で規定する排出基準を目安に評価した。(i)については、間伐材由来チップの測定も実施した。また、(ii)については安定燃焼時に評価されるばいじんについて稼働開始から終了まで連続測定し、ボイラー出力の変動によるばいじん濃度の挙動を確認した。

② 結果及び考察

(a) 安定燃焼時

表 3-2-3-(4)-1 に河川支障木由来チップ燃焼時における(i)及び(ii)の排ガスの測定結果を示す。大気汚染防止法の規制対象は、ばいじん、窒素酸化物及び硫黄酸化物の3項目である。ばいじん及び窒素酸化物は基準値の半分程度以下、硫黄酸化物は3桁程度低かった。(i)の間伐材由来チップ燃焼時の測定値も基準値以下であることから、(i)及び(ii)の排ガスの安全性を確認した。

(b) 木チップボイラー稼働～停止までの連続測定

大気汚染防止法は、施設が法定基準を満たしているかどうかを示すために、安定燃焼時における測定値が重要な役割を果たしている。一方、ボイラーの出力は常に一定ではなく、燃料の品質や供給状況、酸素供給、温度制御などさまざまな要因によって変動する。そこで、(ii)において、稼働から停止までのばいじん及び排ガス性状の連続測定(06:00～

12:00)を実施し、各項目の測定値を確認した。結果を図 3-2-3-(4)-1 に示す。ボイラーは早朝6時より稼働を開始し、その後7時過ぎまで出力を増加させた後、11時過ぎまでほぼ一定の出力を維持している。この時間帯7～11時が測定時の安定燃焼の時間帯であると考えられるが、9時付近でチップ供給減少に伴い出力が一時的に減少する時間帯が確認された。この時間帯では一酸化炭素及び酸素濃度が上昇傾向を示し、特に一酸化炭素は2,000 ppmを超える程度まで上昇したが、窒素酸化物は低下傾向を示し、大気汚染防止法で定める基準値を超えることはなかった。不安定燃焼時にもっとも懸念されたばいじん濃度も安定燃焼時に比べると若干高い傾向(約160 mg/m³)を示したものの、基準値を超えることはなかった。

これらのことから、当該木チップボイラーにおいて通常の運転時における一時的な出力変動が発生しても適切な運転の制御ができており、ばいじんや大気汚染防止法に基づく基準値を超えることがないことを確認できた。

表 3-2-3-(4)-1 当別町設置ボイラーの排ガス測定結果

測定項目	単位	西当別小学校(i) 燃料種:河川支障木		とうべつ学園(ii) 燃料種:河川支障木	
		測定値	基準値	測定値	基準値
排ガス温度	°C	141	-	134	-
流速	m/s	3.8	-	4.7	-
ばいじん	mg/m ³	97	300	120	300
窒素酸化物(NOx)	cm ³ /m ³	160	350	140	350
一酸化炭素(CO)	cm ³ /m ³	71	-	19.6	-
酸素(O ₂)	%	9.9	-	9.6	-
二酸化炭素(CO ₂)	%	10.7	-	11.4	-
硫黄酸化物(SOx)	m ³ /h	<0.001	0.214	0.0013	3.8

※硫黄酸化物の基準値は煙道の高さや排ガス温度等によって基準が異なる。

また、本稿では触れないが、ボイラー更新前に西当別小学校に設置していた重油ボイラーや道内の他地域で稼働している木チップボイラーとの比較、最近ゼロカーボンの取組の一つとして注目されているものの、排ガスの測定事例の少ない薪ボイラーを対象に排ガスの安全性の評価なども合わせて実施している。

今後はこれらの結果をとりまとめ、木チップボイラー利用の際の技術情報として、情報発信につとめていきたい。

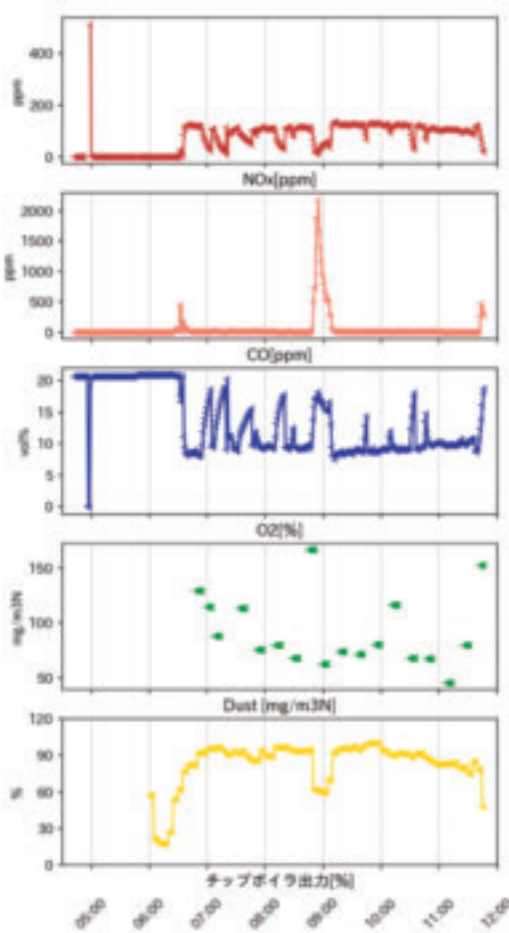


図 3-2-3-(4)-1 とうべつ学園(ii)のボイラーにおける稼働開始から終了までの排ガス性状等の連続測定 (燃料種：河川支障木)

2) 焼却灰

① 分析対象及び安全性の検証方法

焼却灰の融雪効果については、木炭やもみ殻炭など既存の融雪資材と同等であることが明らかとなっているため^[1]、本研究では(i)(ii)を対象に間伐材及び河川支障木を燃焼させたときの焼却灰の重金属を測定して安全性を確認することを目的とした。各ボイラーにおける分析対象をまとめると表 3-2-3-(4)-2 のとおりとなる。

安全性の検証方法としては、道総研森林研究本部林産試験場で発行している「利用者向け資料 木質バイオマス燃焼灰を融雪資材として利用する方法^[2]」を参考にした。すなわち、文献[2]中の散布場所ごと(「農用地」「農用地以外」)の利用先の土壌や地下水を汚染しないための満たすべき要件(表 3-2-3-(4)-3 及び表 3-2-3-(4)-4)に準じ、溶出量については※1、含有量については※2の基準で判断した。

表 3-2-3-(4)-2 各ボイラーにおける分析対象

		西当別小学校 (i)	とうべつ学園(ii)
木チップボイラ		Firematic301	Firematic401
定格出力(kW)		301	401
灰回収機構		燃え殻及び飛灰をそれぞれ排出の後、個別に灰回収コンテナで回収。	燃え殻及び飛灰をそれぞれ排出の後、まとめて灰回収コンテナで回収。
分析対象	燃え殻	間伐材及び河川支障木	-
	飛灰	間伐材及び河川支障木	-
	混合	-	河川支障木

表 3-2-3-(4)-3 各焼却灰利用の条件

散布場所	満たすべき要件
農用地	溶出量:汚泥肥料に係る適合要件を準用し、金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を満たすこと ^{※1} 。 含有量:①汚泥肥料に係る有害成分の許容最大量を基準として準用し、本基準を満たすこと ^{※2} 。②銅、亜鉛の含有量を明らかにしておくこと ^{※3} 。
農用地以外	溶出量:農用地での溶出量に係る要件に同じ 含有量:土壌基準を満たすこと ^{※4} 。 特例:農用地に関する要件を満たす焼却灰については、その結果をもって農用地以外の土地でも使用できるものとする。

※1 金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令(昭和四十八年総理府令第五号)

分析方法:昭和48年環境庁告示第13号

※2 肥料取締法第三条及び第二十五条ただし書きの規定に基づく普通肥料の公定規格(昭和六十一年二月二十二日 農林水産省告示第二百八十四号)

分析方法:肥料等試験法

※3 分析方法:肥料等試験法

※4 土壌汚染対策法施行規則(平成十四年環境省令第二十九号)

分析方法:平成15年環境省告示第19号

表 3-2-3-(4)-4 各基準値

	省令等			備考	
	※1	※2	※4		
単位	mg/L	mg/kg	mg/kg		
対象元素	Cd	0.09	5	150	
	Cr ⁺	1.5	500[※5]	250	[※5]は全クロム
	Hg	0.005	2	15	
	Se	0.3		150	
	Pb	0.3	100	150	
	As	0.3	50	150	
	F			4000	
	B			4000	
	Ni		300		

② 結果及び考察

本研究で実施した測定結果をまとめて表 3-2-3-(4)-5 及び表 3-2-3-(4)-6 に示す。燃え殻と飛灰の排出量の比率はおおよそ 9:1 だった。なお、基準値を超過した項目には背景色をピンク色にしている。

(a) 燃料種:間伐材の場合

焼却灰の形態が燃え殻の場合は、試料番号①⑨の結果のとおり基準値を下回った。また、飛灰については試料番号②⑩のとおり溶出試験は基準値^{※1}をクリアしたが、含有試験はカドミウム(Cd)が肥料基準値^{※2}の基準を超過した。これは、Cdの沸点が765℃と金属元素としては低く、燃焼時に気化したCdが

燃焼ガスに輸送され、熱交換器で冷却されて固体に転じやすい性質があるため、燃え殻よりも飛灰のほうが高濃度だったと考えられる。なお、試験番号⑩のCdにおいて、基準値^{*4}との比較では基準値を下回っており、農用地以外の利用は可能と考えられた。

(b)燃料種:河川支障木の場合

(b1)西当別小学校木チップボイラーの場合

溶出試験(試料番号③④)では飛灰中のCd, 燃え殻及び飛灰中の六価クロム(Cr⁺⁶)で基準値^{*1}を超過した。含有試験(試料番号⑪⑫)では飛灰中のCdが基準値^{*2}を超過した。Cr⁺⁶の超過要因については、ステンレス部材が使用されている燃焼装置の高温腐食による可能性がある^[3]。また、燃料種が間伐材の場合を比較(試料番号①②と③④との比較)すると燃え殻の場合で約1.7倍、飛灰の場合で約2.7倍とCr⁺⁶の溶出量が増加しているため、河川支障木の利用による影響も考えられる。

一方、Cdの含有試験も燃え殻で2倍、飛灰で約5.2倍(試料番号⑨⑩と⑪⑫との比較)間伐材よりも河川支障木のほうが高濃度だった。

クロムは通常、土壌中に5~1,000 mg/kgの範囲に含まれているとされている^[4]。また、文献[5]によると、河川の底質中のクロムは10 mg/kg、Cdも1 mg/kgのオーダーで検出されている。

河川支障木は通常の森林施業による木材と違い、土壌(この場合は河川底質)が付着しやすい環境にあると考えられる。これらのことから、Cr⁺⁶の溶出試験の基準値^{*1}の超過要因の一部、及びCdの含有試験の基準値^{*2}の超過要因は、河川底質の付着した河川支障木由来のチップが燃焼することにより、灰中にCr⁺⁶及びCdが濃縮されたことによるものと推察された。

河川支障木由来チップの利用によるCd及びCr⁺⁶の基準値超過の懸念が明らかとなったので、この2項目に絞って追加試験を実施した(試料番号⑤⑥及び⑬⑭)結果、燃え殻は溶出試験の六価クロムが基準値^{*1}を約1.5倍超過した。飛灰は溶出試験のCd及びCr⁺⁶がそれぞれ約1.1倍及び約2.9倍、含有試験のCdが約32倍超過し、同様の傾向が確認された。

(b2)とうべつ学園木チップボイラーの場合

溶出試験(試料番号⑦)ではCr⁺⁶が基準値^{*1}を約1.5倍超過した。含有試験(試料番号⑮)はすべての項目で基準値^{*2}以下であった。Cd並びにCr⁺⁶及びクロムのみを対象とした追加試験(試験番号⑧⑯)でも溶出試験のCr⁺⁶が基準値^{*1}を超過した。原因は(b1)と同様にステンレス部材の高温腐食による影響

や河川底質の付着などが考えられる。

【対策】

間伐材由来のチップの利用は二酸化炭素排出抑制の観点から望ましいが、河川支障木を利用するには河川底質を可能な限り付着物を除去することが必要である。

利用対象が燃え殻(及び飛灰との混合)の場合は、溶出試験のCr⁺⁶の基準値超過が懸念される。文献[5]によると焼却灰から溶出されるCr⁺⁶は、堆肥と混合利用することにより、還元され溶出抑制されること、また、焼却灰と堆肥を絶乾重量で1:7で混合した肥料はすべての項目で規制値以下であることが確認されている。このような技術を用いた肥料化という可能性がある。また、利用対象が飛灰のみの場合は含有試験のCdに注意が必要である。農用地利用のための要件である肥料取締法の基準値(5 mg/kg)はおろか、農用地以外の利用要件である土壌汚染対策法の基準値(150 mg/kg)も超過する可能性がある。そのため、飛灰の利用については、重金属測定値(特に含有試験のCd)に注意し、150 mg/kgを超える場合は産業廃棄物として処理することが望ましいと考える。

3) まとめ

当別町の木チップボイラーを対象に排ガス及び焼却灰を対象にその安全性を検証した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・排ガスは大気汚染防止法に基づく基準値を超えることがないことを確認した。
- ・燃え殻は、間伐材由来チップについてはすべての基準値を下回った。このため農用地への利用が可能。河川支障木由来チップは溶出試験における六価クロムの基準値の超過が懸念される。このため、堆肥と混合した利用の検討が必要。
- ・飛灰は、溶出試験における六価クロムに加えて含有試験におけるカドミウム基準値の超過が懸念される。特に河川支障木由来のチップを燃焼した際は土壌汚染対策法の基準値も超える恐れがある。そのため、カドミウムが土壌汚染対策法の基準値150 mg/kg 以上の場合は産業廃棄物処理が望ましく、150 mg/kg を下回る場合は六価クロムの測定値に応じて農用地以外の利用や堆肥と混合した肥料としての利用の検討が必要である。

表 3-2-3-(4)-5 溶出試験結果

試料諸元					対象元素									
No.	施設	燃料種	焼却灰 形態	採取年月日	Cd	Cr ⁶⁺	Hg	Se	Pb	As	Ni	Zn	Cu	単位
①	西当別	間伐	燃え殻	2021/01/21	ND	0.95	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	mg/L
②	西当別	間伐	飛灰	2021/01/21	ND	0.91	ND	0.036	0.006	0.13	ND	0.93	0.10	mg/L
③	西当別	河川	燃え殻	2021/12/24	ND	1.6	ND	ND	ND	ND	ND	0.01	ND	mg/L
④	西当別	河川	飛灰	2021/12/24	0.87	2.5	ND	0.1	0.22	0.19	0.22	51	1.6	mg/L
⑤	西当別	河川	燃え殻	2023/06/12	ND	2.2								mg/L
⑥	西当別	河川	飛灰	2023/06/12	0.1	4.3								mg/L
⑦	学園	河川	混合	2022/12/07	ND	2.2	ND	ND	0.006	ND	ND	ND	ND	mg/L
⑧	学園	河川	混合	2023/06/12	ND	6.8								mg/L
基準値※1					0.09	1.5	0.005	0.3	0.3	0.3				mg/L

基準値※1～表 1-2-1 の注釈と同じ。金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令

表 3-2-3-(4)-6 含有量結果

試料諸元					対象元素									
No.	施設	燃料種	焼却灰 形態	採取年月日	Cd	Cr	Hg	Se	Pb	As	Ni	Zn	Cu	単位
⑨	西当別	間伐	燃え殻	2021/01/21	0.06	63		0.47	0.55	1.9	36	50	120	mg/kg
⑩	西当別	間伐	飛灰	2021/01/21	23	80		0.83	11	3.5	32	1900	90	mg/kg
⑪	西当別	河川	燃え殻	2021/12/24	0.12	110	ND	1.8	0.61	2.2	290	77	120	mg/kg
⑫	西当別	河川	飛灰	2021/12/24	120	110	ND	4	17	7.5	94	4600	130	mg/kg
⑬	西当別	河川	燃え殻	2023/06/12	0.1	99								mg/kg
⑭	西当別	河川	飛灰	2023/06/12	160	47								mg/kg
⑮	学園	河川	混合	2022/12/07	ND	89	ND	ND	1.0	1.5	300	50	160	mg/kg
⑯	学園	河川	混合	2023/06/12	ND	120								mg/kg
基準値※2					5	500	2		100	50	300			mg/kg
基準値※4					150	250	15	150	150	150				mg/kg

基準値※2～表 1-2-1 の注釈と同じ。肥料取締法第三条及び第二十五条ただし書きの規定に基づく普通肥料の公定規格

基準値※4～表 1-2-1 の注釈と同じ。土壤汚染対策法施行規則

[引用文献等]

- [1] 『地域・産業特性に応じたエネルギーの分散型利用モデルの構築』. 北海道立総合研究機構第1期戦略研究報告書. 64-65. (2019)
- [2] “利用者向け資料 木質バイオマス燃焼灰を融雪資材として利用する方法”. 北海道. (2017)
- [3] 高橋徹ほか. “木質系バイオマス燃料灰の安全性評価および有効利用”. 第19回廃棄物学会研究発表会
- [4] 中川良三ほか. “土壌および底質中のクロムの原子吸光分析”. 日本化学学会誌. 1974(12). 2331-2335. (1974)
- [5] 山田重矢ほか. “最終処分場浸出水中重金属の河川及び底質への影響評価”. 土木学会論文集. No. 713/VII-24. 37-43. (2002)

研究担当機関：エネルギー・環境・地質研究所

執筆者：丹羽 忍

(5) 経済性・環境適合性評価

1) 木質バイオマスボイラー導入のための経済性・環境性評価ツールの開発

① ツールの概要

木質バイオマスエネルギーの熱利用は、発電に比べエネルギー変換効率が高く、効率的なエネルギー利用の形態であるといえる。木質バイオマスは地産地消が可能な再生可能エネルギーであり、適切に利用することによって地域経済に対するメリットに加え、主要な温室効果ガスである二酸化炭素 (CO₂) の排出削減にも貢献できると期待される。

木質バイオマスエネルギーの熱利用事業を実施するにあたって重要なのは経済性の評価であるが、熱利用事業の経済性評価は評価方法が複雑であり、事業検討にあたってのハードルとなっている。このため、熱利用事業を検討する主体が簡易に事業性を判断できれば熱利用の敷居が下がり、普及促進に繋がると期待される。そこで、こうした簡易な評価を行うためのツールを作成した。加えて熱利用に伴うCO₂排出削減効果も同時に試算することにより、設備導入による環境性の効果も可視化できる。

このツールは、自治体職員や事業者、地域住民等が容易に使用できるよう Microsoft Excel を用いて作成し、様々な条件で入力ができ、かつできるだけ簡易な条件のみで試算できるように設計した。

このツールにおける評価範囲は温水熱供給システムとした (図 3-2-3-(5)-1)。温水熱供給システムとは、熱源及び製造した温水をポンプで熱供給するシステムである。化石燃料のみを使用して熱供給する「化石燃料システム」と、木質燃料を主体的に使用しバックアップ熱源として化石燃料を補助的に使用する「木質燃料系システム」との比較を行うことで、経済性や環境性を簡易に評価することが可能である。

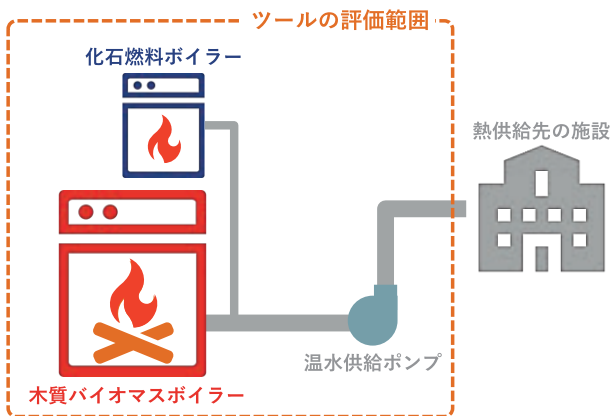


図 3-2-3-(5)-1 ツールの共通評価範囲

② 経済性評価の方法

木質バイオマスボイラー (以下、木質燃料系システム) は、化石燃料ボイラー (以下、化石燃料システム) とのインシヤルコストの差額を、燃料費以外の費用も含めたランニングコストの差額で回収することができ、かつ、その回収期間が木質バイオマスボイラーの耐用年数よりも短い、という条件において経済的メリットがあると判断できる。

木質バイオマスボイラーの経済性評価では、両システムのインシヤルコストに各年次のランニングコストを累積し、両システムの累積額の交点の年次をコスト回収期間と定義した上で、それが木質バイオマスボイラーの耐用年数である 15 年間以内にあるかどうかで経済性の有無を判断する (図 3-2-3-(5)-2)。本ツールは、温浴施設、役場・学校、農業施設等に導入された木質バイオマスボイラー (バックアップボイラーを含む木質燃料系システム) によって事業者が熱を自家利用する場合に、化石燃料システムに対して経済的なメリットがあるかどうかを評価することができるツールである。

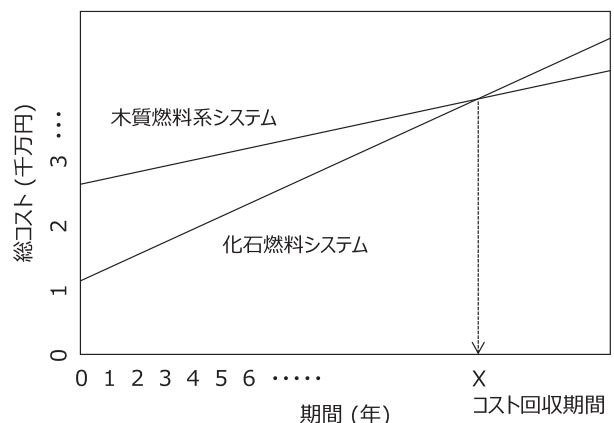


図 3-2-3-(5)-2 評価のイメージ

評価の流れは以下の通りである。木質燃料系システム及び化石燃料システムの入力条件から両者のインシヤルコスト及びランニングコストにかかる費用を決定し、各エネルギー製造コスト、ならびに化石燃料システムに対して木質燃料系システムが経済的メリットを生じる事業期間 (以下、コスト回収期間) を推計する。原料費等の各種単価、建設費、ボイラー効率、従業員数、ユーティリティ費などは任意に設定することができる。また、建設・運営を行う事業者は、民間と自治体の両方を想定しており、事業者が自治体の場合には、起債による充当や交付税による措置 (起債の一部が、翌年の交付税 (収入) となる措置) を考慮した評価が可能である。

図 3-2-3-(5)-3 及び図 3-2-3-(5)-4 に、ツールの入力シート及び出力シート（一部）を示した。入力シートには約 80 のセルに値の入力を行う（一部のセルでは条件を選択する）。出力シートには 15 年間の損益と総コストの累積額の積算結果及び温水熱 1 MJ あたりの製造コスト評価結果を表示する。

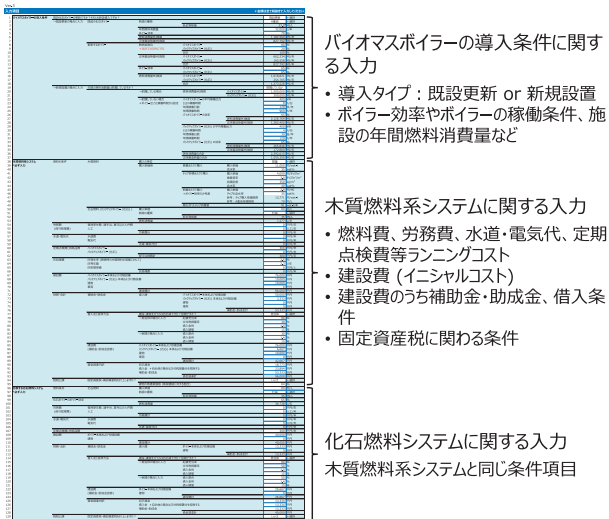


図 3-2-3-(5)-3 ツールの入力シート（一部）

経済性評価結果（累積・平均）

年次	項目	値
1	初期投資	1,000,000
2	ランニングコスト	100,000
...
15	総コスト	2,500,000
15	総収入	1,500,000
15	累積損益	1,000,000

図 3-2-3-(5)-4 ツールの出力シート（経済性：一部）

③ 環境性評価の方法

このツールでは、主要な温室効果ガスである二酸化炭素（CO₂）の排出削減量を環境性として可視化する。CO₂排出削減量は、化石燃料システムと木質燃料システムそれぞれの CO₂ 排出量を試算し、両者の差を排出削減量として算出する。なお、木質燃料の燃焼に伴う CO₂ 排出量は森林による吸収量と相殺すると考えてカウントしない。なお、排出削減量の算出については国の認証制度における既存の方法論^[1]

（後述）に一部準拠しているが、算定要件を完全に満たす訳ではないため、一定の条件における試算を行うものであることに留意が必要である。

追加的に入力するオプションとして、使用する電力の排出係数及び温水熱供給における水搬送システム効率（WTF）を任意に設定可能とした。さらに、ツールの共通評価範囲外となるが、木質燃料の原料搬送や木質燃料の製造、木質燃料の搬送に伴う CO₂ 排出量も試算可能としている。ここでは、原料や木質燃料の搬送時の車両積載量や搬送距離を入力して輸送に伴う CO₂ 排出量を算出する。なお、道内の市町村を始点・終点として選択することで、代表点間の最短経路距離に基づく試算が可能である。また燃料製造に伴う排出量は、一般的な製造時の排出量原単位を用いて算出する。

図 3-2-3-(5)-5 に、環境性評価結果の出力シートを示す。なお、前述した追加的に入力するオプションを設定しない場合は、図 3-2-3-(5)-3 に示した入力シートへの入力内容のみで結果が出力される。追加的なオプションを指定する場合は入力シート下部に対応する条件項目が入力できるようになっており、必要に応じてユーザーが入力することによって設定可能である。



図 3-2-3-(5)-5 ツールの出力シート（環境性）

なお、本ツールは道総研のホームページからダウンロード可能である。ツールの詳細については、ツールに添付の「利用の手引き」を参照されたい。

2) 経済性評価

① とうべつ学園における木質バイオマスボイラーシステムの経済性

当別町小中一体型義務教育学校とうべつ学園に導入されている木質バイオマスボイラーシステムの経済性を、開発した木質バイオマスボイラー経済性・環境性評価ツールを用いて分析した。とうべつ学園の建物概要は以下の通りである。構造規模は、鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造）3階建てで、建築面積は 5,772.8 m²、延床面積は 12,295.9 m²である。分析に必要なイニシャルコスト及びランニングコ

ストにかかるデータは、当別町ゼロカーボン推進室の内部資料から得た。表 3-2-3-(5)-1 に主な設定条件を示した。

表 3-2-3-(5)-1 経済性評価における主な設定条件

化石燃料システム (灯油ボイラー)	燃料費	灯油	消費量：69,823 L/年 単価：95円/L 購入額：6,633千円/年
	人件費	考慮しない	
	水道・電気代	29千円/年	
	定期点検費と消耗品費	200千円/年	
	灰処理費	なし	
	減価償却費	ボイラー本体および付随設備	建設工事費：54,824千円 補助金を除く建設工事費：36,550千円 うち借入金：9,138千円 減価償却方法：定額法、15年
		建物	考慮しない
		車両	なし
	固定資産税・償却資産税	なし	
	支払い金利	0.2%、12年返済	
木質燃料系システム (チップボイラーおよびバックアップボイラー)	燃料費	チップ	消費量：173 t-35%W.B./年 単価：23,465円/t-35%W.B. 購入額：4,068千円/年
		灯油	消費量：15,090 L/年 単価：95円/L 購入額：1,434千円/年
	人件費	考慮しない	
	水道・電気代	86千円/年	
	定期点検費と消耗品費	600千円/年	
	灰処理費	41千円/年	
	減価償却費	ボイラー本体および付随設備 *バックアップボイラー含む	建設工事費：113,300千円 補助金を除く建設工事費：39,778千円 うち借入金：6,802千円 減価償却方法：定額法、15年
		建物	考慮しない
		車両	なし(運搬車両はチップ供給業者所有)
	固定資産税・償却資産税	なし	
支払い金利	0.2%、12年返済		

評価結果を図 3-2-3-(5)-6 に示した。両システムの累積コストの交点 X 座標は 14 年、すなわち、コスト回収期間は 14 年と推計され、ボイラーの法定減価償却期間である 15 年以内となったことから、木質燃料系システム導入による経済的なメリットが認められた。

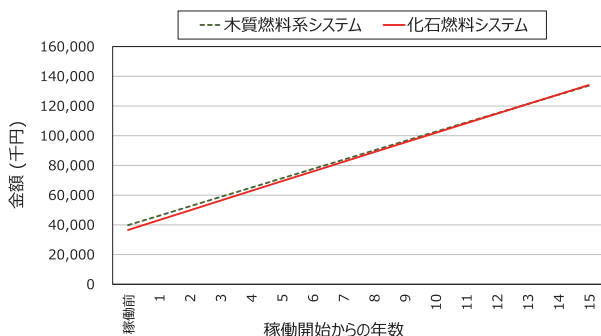


図 3-2-3-(5)-6 とうべつ学園における両システムの累積コスト

しかしながら、この結果は、木質燃料系システムに対する国の高額な補助金(補助率 2/3)の寄与が大きい。補助がない場合、インシヤルコストの差は大きく開くことになるが、図 3-2-3-(5)-6 における両

システムの傾きが示すように、木質チップにインシヤルコストの差を埋めるランニングコストの差、つまり、灯油に対する単位発熱量あたりのコスト有意差はそこまでない。

ランニングコスト低減の方策及び可能性を以下に考察した。現在よりも高い灯油価格(95 円/L 以上)を想定しない限りは、木質チップの製造コストを下げる努力が必要である。木質チップの製造コストを削減するための方策には 3 つのアプローチがあると考えられる。1 つ目は木質原料費の削減、2 つ目は生産量の増加、3 つ目はチップ輸送費の削減である。

各方策について以下のように考えられた。1 つ目には、安価な木質原料の調達、例えば、工事支障木、河川支障木及び建築解体材などの利用が考えられる。2 つ目の生産量の増加は、減価償却費及び人件費の削減に寄与するが、そのためには販路と販売量の確保が必要である。具体的には、小規模な熱利用向けのチップと並行して、大規模な木質バイオマス発電所向けの販路開拓が考えられる。3 つ目には、チップ価格にはチップの生産地から消費地までの輸送費が含まれるが、チップ輸送費は、年間輸送量が少ないほど高くなる^[2]。現在の単価に占めるチップ輸送費の割合は明らかではないが、検討の余地はあると思われる。チップ輸送量の増大を図る方策の一つとして、配送時間の短縮がある。コンテナ式サイロの投入は、開口部の小さな投入口を介して行われるため 30 分ほど要する。効率的な輸送体制構築のためには、1 度のダンプアップで全てのチップを荷下ろしできるサイロが必要であると思われる。表 3-2-3-(5)-2 に、とうべつ学園におけるコスト回収期間に対する灯油単価とチップ単価の関係を示した。

表 3-2-3-(5)-2 とうべつ学園におけるコスト回収期間に対する灯油単価とチップ単価の関係

灯油単価 (円/L)	チップ単価 (円/t-35%W.B.)							
	20,000	21,000	22,000	23,000	24,000	25,000	26,000	27,000
90	6	8	14	×	×	×	×	×
95	4	5	7	10	×	×	×	×
100	3	4	5	6	8	15	×	×
105	3	3	4	4	5	7	11	×
110	2	3	3	3	4	5	6	9
115	2	2	3	3	3	4	4	5
120	2	2	2	3	3	3	3	4
125	2	2	2	2	2	3	3	3
130	2	2	2	2	2	3	3	3

② 当別町における木質チップ利用の地域経済波及効果

町内の木質チップの消費が地域に与える経済波及効果を産業連関分析によって評価した。評価対象

とした木質チップ消費量は、西当別小中学校に設置されるボイラーの年間消費量を設定した。分析には、林産試験場の開発した経済波及効果試算ツール^[3]を援用し、当別町を含む札幌広域市町村圏に対する地域経済波及効果を分析した。なお、札幌広域市町村圏には、札幌市、江別市、千歳市、恵庭市、北広島市、石狩市、小樽市、当別町、南幌町、由仁町、長沼町、栗山町、新篠津村が含まれる。地域経済波及効果算定における各システムの最終需要額を表 3-2-3-(5)-3 に示す。なお、木質燃料系システムにおけるチップボイラーとA重油ボイラーによる熱供給割合は、低位発熱量比で 57:43 である。燃料の年間購入額(=燃料に対する支払額)は木質燃料系システムの方が化石燃料システムよりも 61 万円安価である。木質チップは全て札幌広域市町村圏内で自給される(自給率 100%)として分析を行った。A重油他の自給率には、全て道内の平均自給率を適用した。

表 3-2-3-(5)-3 地域経済波及効果算定の最終需要額

	燃料消費量	単位	購入額(万円)
木質燃料系システム	チップ	236 (t)	456
	A重油	41,383 (L)	391
	計	-	848
化石燃料システム	A重油	97,117 (L)	909

表 3-2-3-(5)-4 地域経済波及効果の算定結果

		システム	
		木質燃料系	化石燃料
支払い額		848	909
直接効果	生産誘発額	527	165
	粗付加価値誘発額	203	111
第1次間接効果	生産誘発額	384	27
	粗付加価値誘発額	181	16
第2次間接効果	生産誘発額	60	24
	粗付加価値誘発額	40	16
合計	生産誘発額	972	216
	粗付加価値誘発額	424	143
倍率	生産誘発額/支払い額	1.15	0.24
	粗付加価値誘発額/支払い額	0.50	0.16

算定結果を表 3-2-3-(5)-4 に示した。木質燃料系システムは 848 万円の支払額に対して、圏内への生産誘発額は 972 万円、同粗付加価値額は 424 万円と算定された。一方、化石燃料システムは 909 万円の支払額に対して、圏内への生産誘発額は 216 万円、同粗付加価値額は 143 万円と算定された。支払額に対する生産誘発額、粗付加価値額の倍率は、木質燃料系システムがそれぞれ 1.15 倍、0.50 倍、化石燃料システムがそれぞれ 0.24 倍、0.16 倍となり、木質燃料系システムの効果の大きさが明らかとなった。

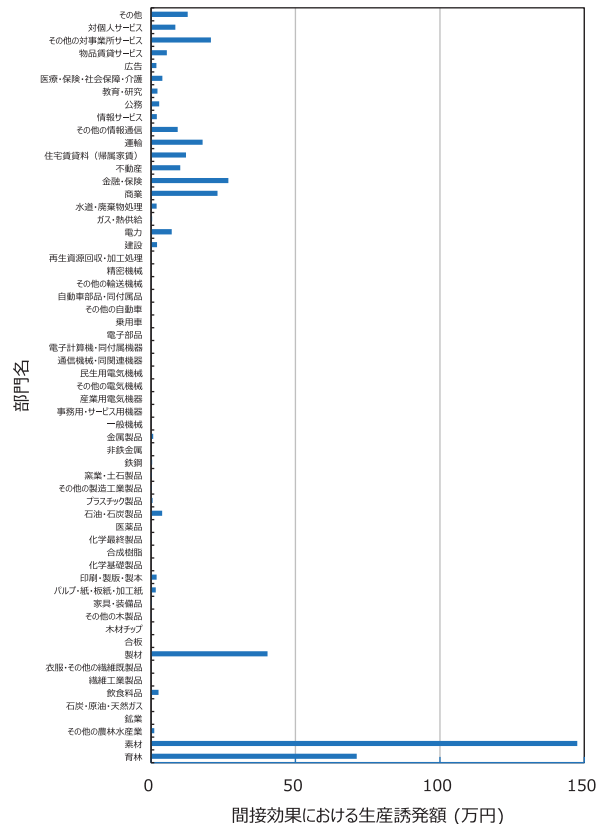


図 3-2-3-(5)-7 木質燃料系システムにおいて間接効果生産誘発額の生じる部門

図 3-2-3-(5)-7 に、木質燃料系システムにおいて間接効果生産誘発額の生じる部門を示した。生産誘発額の大きかった部門は順に素材(147.6 万円)、育林(71.2 万円)、製材(40.4 万円)であり、素材生産量や育林業といった木質チップ生産の上流部門に対する効果の大きさが示された。

3) 木質バイオマスボイラー導入の環境性評価

本項では、実際のケーススタディとして、当別町内で導入された木質バイオマスボイラーによる温水熱供給事例において、その CO₂ 排出削減量を推計した。

① 既設ボイラーから木質ボイラーへの更新事例

当別町では、西当別小学校及び西当別中学校において、それぞれ既設の重油温水ボイラーによる温水熱供給から木質ボイラーを中心とした温水熱供給への更新が実施された。そこで、この事例を対象として既設の熱源更新に伴う CO₂ 排出削減効果の試算を行った。

ア 方法

温室効果ガス排出量や排出削減量の算定方法は、国際標準規格 (ISO14064 シリーズ) やこれに対応す

る日本産業規格（JIS Q 14064 シリーズ）が定められている。省エネ設備導入や再エネ利用等の取り組みによる CO₂ 排出削減量の定量化方法は 14064-2 で定められているが、ここでは排出削減量算定の原則的な考え方等について規定されているのみであり、木質バイオマスボイラーの利用に伴う CO₂ 排出削減量の算定を含む個別の取り組みにおける具体的な算定ルールが定められているわけではない。個別の取り組みに対応した算定ルールとしては、取り組みに伴う排出削減量をクレジットとして国が認証する制度である「J-クレジット制度」が方法論を策定している。これは、公定法で定められたものではないものの、方法論の策定規定は ISO 14064-2 に準拠して定められていることから、個別の取り組みにおける排出削減量の算定方法としては標準的な考え方となるものと考えられる。木質バイオマスの熱利用に対応する方法論としては「バイオマス固形燃料（木質バイオマス）による化石燃料又は系統電力の代替（EN-R-001）」^[4]が定められている。

本研究では、可能な限り本方法論を参照して排出削減量算定を行ったが、方法論内で影響度の大きさによって算定すべきかどうかに変化する項目についても、影響度に関わらず算定に含めた。また、方法論では明確に規定されていない項目についても、算定のバウンダリ内に含まれる項目については含めて排出量の算定を行った。表 3-2-3-(5)-5 に、CO₂ 排出量算定にあたって排出源として考慮した工程または設備、ならびに付随する排出源を示す。表中に○で示した項目が排出源である。なお、西当別小中学校での更新前熱源は重油ボイラーであり、更新後のバックアップボイラーも重油を使用する。また燃料チップの製造には軽油駆動のチップパーを用いているため、それらの条件を考慮した。なお、各排出源の消費量から CO₂ 排出量を換算する排出係数は、化石燃料については方法論の既定値を、電力については実際に電力を購入した電力事業者の排出係数をそれぞれ用いた。

表 3-2-3-(5)-5 CO₂ 排出源として考慮した項目

排出工程/設備	排出源	熱源システム	
		更新前 ^{*1}	更新後 ^{*2}
原料搬送	軽油		○
木質燃料製造	軽油		○
木質燃料搬送	軽油		○
木質ボイラー	電力		○ ^{*3}
木質ボイラー付帯設備	電力		○
化石燃料ボイラー	重油	○	○
化石燃料ボイラー	電力	○ ^{*3}	○ ^{*3}
熱搬送動力（ポンプ）	電力	○ ^{*3}	○ ^{*3}

*1: 重油ボイラーからの熱供給システム

*2: 木質ボイラーを中心とした熱供給システム

*3: 方法論では一部または全部の算定が明示されていない

なお方法論では、設備更新後に設備に投入した熱量あるいは生成した熱量を、更新前に使用していた化石燃料で得る場合に想定される排出量を「ベースライン排出量」として算定し、更新後の排出量との差を排出削減量とすることが定められている。ただし今回対象とした事例では、設備更新前はほぼ定常稼働であった熱搬送動力（ポンプ）の稼働方法を需要に応じてコントロールすることによる運用改善を行っていることや、設備更新前の長期的な燃料消費状況についてもデータが得られたことから、前後比較による実質的な排出削減量についても算定を行った。

また、ボイラーの稼働に係る電力消費に起因する排出量の算定に関しては方法論では必ずしも明示されていないが、本研究では次の方法により消費電力量を算定した。設備更新前については一定期間実測を行い、供給熱量に対する相関を分析することにより熱供給実績から電力消費量を推計した。また設備更新後は計装により直接個別の電力消費量をモニタリングできるため、実績によってこれを把握した。

イ 結果

図 3-2-3-(5)-8 に、燃料消費の実績を把握できた 2001 年度以降の排出量算定結果を示す。なお、熱供給は例年 4 月中まで継続するため、ここでは 10 月～翌 4 月までを暖房シーズン（年度）としている。木質ボイラーの稼働後（2020 年度以降）、CO₂ 排出量の削減がみられる。2020 年度はボイラーの運用改善が途上であったため、2021 年度はさらに運用効率化に伴う削減が進んだ。2019 年度までの平均排出量に対して西当別小学校では 2020 年度実績で 39%、2021 年度実績で 57%、西当別中学校ではそれぞれ 42%、64%削減したと試算された。木質ボイラーは重油ボイラーに対してボイラー稼働自体の電力消費量が大きいことに加え木質チップ投入のためのホッパやコンベアなどの電力消費もあり、ボイラー稼働に付随

する電力消費が増加している一方、熱搬送に伴うポンプ稼働の電力消費は運用効率化によって削減されている。

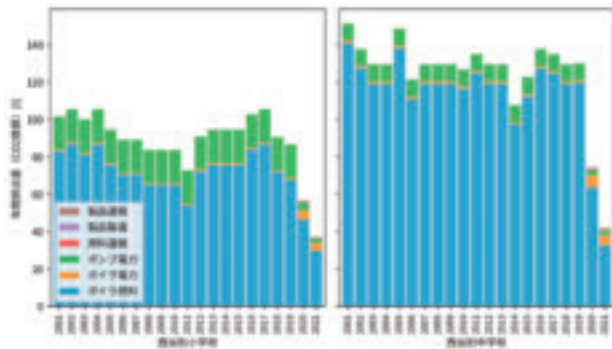


図 3-2-3-(5)-8 西当別小中学校における熱供給に伴う CO₂ 排出量の算定結果

なお、ベースライン排出量の推計については、重油ボイラーのボイラー効率を一般的なカタログ値（81%）に設定して算定すると、更新前設備での実績排出量より少なくなる見積りとなり、2021 年度の削減実績としては約 15t 程度の排出削減量となる。

② 新規施設における木質ボイラーによる温水熱供給事例

前項①は、既存施設において既設の重油ボイラーのみで温水熱供給を行っていたものを、木質ボイラーを主体とした熱源に変更した事例であった。それに対して、当別町では当別小学校及び当別中学校を統合し、新たに一体型義務教育学校として「とうべつ学園」を新設した。同学園では新規に木質ボイラーを主体とした温水熱供給システムを整備しており、この導入に伴う CO₂ 排出削減効果の試算を行った。

ア 方法

前項①の事例とは異なり、本項の事例は熱供給システムだけでなく熱供給を行う施設を含め全て新設であるため、前後比較による実質排出削減量の算定ができない。したがって、ここでは熱供給実績に基づくベースライン排出量との比較により排出削減量を算定した。なお、熱供給システムにはバックアップボイラーとして重油ボイラーが導入されており、かつ計装によって生成熱量及び重油ボイラーでの燃料消費量ならびに電力消費量を把握することができた。さらに、生成熱量と燃料消費量あるいは電力消費量との相関を確認したところ、良好な線形関係にあることが把握されたため、本研究では実績生成熱量をすべて重油ボイラーで生成した際の燃料消費量及び電力消費量を推計し、これによる CO₂ 排出量をベースライン排出量として排出削減量を算定した。

イ 結果

前期の方法に基づき、排出量の実績及び排出削減量を算出した結果を図 3-2-3-(5)-9 に示す。2022 年度実績で約 100t-CO₂（71%）の排出削減効果が推計された。

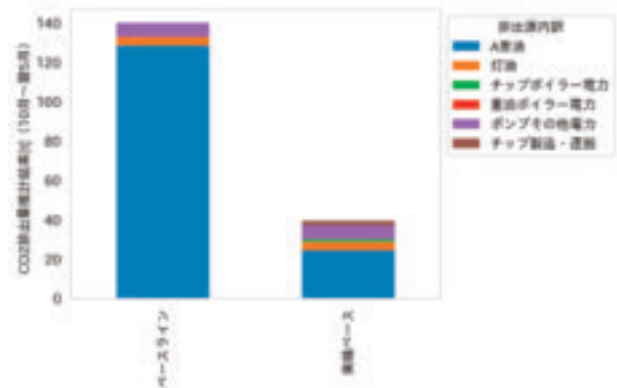


図 3-2-3-(5)-9 とうべつ学園における熱供給に伴う CO₂ 排出量の算定結果

なお本事例は熱供給が開始されたのが 2022 年度であり、執筆時点で 1 シーズンのデータしか得られていない。

[引用文献等]

- [1] 経済産業省，環境省，農林水産省『J-クレジット制度方法論 EN-R-001 Ver. 1.7 バイオマス固形燃料（木質バイオマス）による化石燃料又は系統電力の代替』。（2020）
- [2] 古俣寛隆ほか，“木質チップを用いた熱分解ガス化による熱電併給事業の採算性評価－中山間地域におけるエネルギー製造拠点の検討－”．第 32 回日本エネルギー学会大会講演要旨集．（2023）
- [3] 林産試験場．『木造建築物に地域材を利用するための「経済波及効果試算ツール」』．（2019）

研究担当機関：林産試験場，エネルギー・環境・地質研究所

執筆者：古俣 寛隆（林産試），福田 陽一朗（エネ環地研）

3.2.4 木質バイオマスの利用拡大技術に関する総括

本項目においては、地域産森林資源の地産地消システムモデルの構築を目的に、川上の地域燃料資源の取得・確保から、川下の木質ボイラー利用まで、当別町、地域企業とともに下記の項目を実施した。その中で、道総研は、各種設計や導入にあたっての評価・運用を実施（下線部）し、当別町や関連企業の取り組みを支援した。

- ① ドローン・衛星画像による森林資源の賦存量推定
- ② 国土交通省の国土強靱化事業を活用した河川支障木の伐採
- ③ 丸太の自然乾燥、移動式チップパーによるチップ化、旧中小屋中学校体育館を利用した保管
- ④ 丸太・チップの自然乾燥速度評価、保管手法検討
- ⑤ チップ製造事業の経済性評価
- ⑥ 木質バイオマスボイラー（以下、木質ボイラー）の省エネルギー性を向上させる熱源システムの容量・制御システムの設計
- ⑦ 熱源システムの導入と運用
- ⑧ 木質ボイラーのメンテナンス
- ⑨ 熱源システムの評価と改善提案
- ⑩ 熱源システムの運転・制御に関する見える化システムの導入
- ⑪ 効果的な中央監視・見える化システムの提案
- ⑫ 木質ボイラーの排ガス測定と灰の利用方法の提案
- ⑬ チップ製造事業、木質ボイラー導入事業の経済性・環境適合性の評価

道総研の取り組みの中で、システムの妥当性、技術の有益性、各技術を利用する際の留意点をまとめる。

(1) システムの妥当性

一連の技術支援を基に当別町は、令和2年から西当別小学校・中学校への、令和4年からとうべつ学園への燃料（木チップ）供給と木質ボイラーを用いた熱源システムの運転を行った。これらの熱源システムは順調に稼働しており、現状問題となるトラブルは抱えていない。施設の暖房熱供給量全体に対する木質ボイラーの熱供給量は8割を超えている。また、学校施設のCO₂排出量については、ボイラーやポンプ動力に必要な電力も含めて、西当別小学校で2001-2019年度までの年間排出量の平均値に対し64%、中学校で57%、とうべつ学園では、重油ボイラーのみの熱源システムとしたベースラインの設定に対し72%削減し、ゼロカーボン時代に相応しいシス

テムとなっている。また、ボイラーの投資回収年数も現実的な値が試算されており、システムは十分な妥当性を有している。

(2) 技術の有益性

1) ドローン・衛星画像による森林資源賦存量の推定

これまで地域森林資源の賦存量は、自治体の関係者が、実際に該当する区域に入り、作成した森林調査簿によるものであった。森林調査には人手がかかるため、同じ小班を再度調査するには年数がかかる。この結果、同じ小班を再調査すると、前回と賦存量が大きく異なる場合がある。今回、ドローンと実地調査、ドローンと衛星画像を比較、補正することにより、省人化した森林賦存量評価が可能となった。

2) 丸太・チップの自然乾燥速度評価、保管手法検討

当別町林道近傍の土場において、その気象条件と丸太の自然乾燥速度を評価することで、当別町における乾燥速度、自然乾燥日数の目安を示した。また、越冬しても丸太の含水率が増加しないことを示した。これにより、木の伐採時期や乾燥時期の工程を検討することができる。また、発酵が進まない、あるいは火災が発生しないチップの安全な保管に必要な要件を示した。

3) 熱源システムの容量・制御システムの設計

既設施設のボイラーの更新の際に、木質ボイラーの寄与率を設定値とする熱源システムの各機器の容量を①熱需要の評価、②ボイラーの制御を含む数値シミュレーションの手順で算出する簡便な手法を示した。これにより、木質ボイラーや蓄熱槽の容量を抑え、イニシャルコストを削減する経済的なシステムの設計が可能となった。また、新築建築物においては、建築物の断熱性能から室用途別の負荷を求め、外調機も含めた熱源システムの各機器の最適容量を求める手法を示した。

4) 木質ボイラーのメンテナンス

今回設置した木質ボイラーの適用区分は、小規模ボイラーであり、定期点検を管理業者が行うものであるが、灰分が多い河川支障木を燃料としたことから、特に炉内でのクリンカによる障害や飛灰による影響などについて、ユーザー目線によるチェックシートを作成し、自主点検を行う手法を示した。これを運用管理に活用し、運用上のトラブルを未然に防ぐ手段として活用していきたい。

5) 熱源システムの評価と改善提案

木質ボイラーの熱効率の算出には、投入する木チップの重量を測定することが不可欠である。本研究

では、トラックスケールによる重量測定手法と、ボイラーの火床へ供給するスクリーコンベアの稼働時間を光で検出して推計する手法を示した。前者は簡便に実施可能であり、後者は木質ボイラーの熱効率を連続的に算出できる利点がある。また、得られたデータの着目すべきポイントを示すとともに、無駄を省き、木質ボイラーの寄与率を向上させ、CO₂排出量を低減する手法をまとめている。

6) 効果的な中央監視・見える化システム

各ボイラーの動作の制御や監視を行う中央監視システムは、汎用部品で構成されているため、入力、出力ユニット等故障時の部品交換が長期間可能である。また、運用改善の可能性のある項目を使用者が自由に設定できる利点がある。一方、見える化システムは、共用空間に設置し、環境教育に活用するもので、将来的には無駄をなくす省エネなどの行動誘発に繋げていきたい。

7) 木質ボイラーの排ガス測定と焼却灰の利用方法

木質ボイラーから排出される排ガス中のNO_x、SO_x、ばいじんは大気汚染防止法の基準値内であることを示した。灰の利用については、燃料種の違い（トドマツ、河川支障木（ヤナギなど）や燃え殻、飛灰で、カドミウム、クロムの溶出量、含有量に差があることを示し、燃料種や形態別の利用方法を提案した。

8) チップ製造事業、木質ボイラー導入事業の経済性・環境適合性の評価

木チップ製造事業の経済性について、チップパーの実稼働日数、設定販売単価等条件に応じた評価を行うことが可能になった。また、木質ボイラー導入事業については、経済性・環境適合性を設計時に一度に検証できる汎用ツールを開発した。

(3) 技術の活用にあたっての留意点

1) ドローン・衛星画像による森林資源の賦存量推定

本研究において開発した、リモートセンシング技術は、現段階においてトドマツ人工林に限定される。また、成林率（面積率）が30%以下では、誤差が大きくなることに留意が必要である。

人工林は主に木材生産のために造成されてきたため、燃料として使用する場合、未利用材（林地残材、支障木など）を活用することが重要である。

2) 丸太・チップの自然乾燥速度評価、保管手法検討

今回計測した丸太の自然乾燥速度は、当別町の森林内土場での結果であり、他の気象条件では直接反映されないことに留意が必要である。

3) 熱源システムの容量・制御システムの設計

機械室内の空気を木チップ燃料庫の送風乾燥に利用する技術について、木チップの燃料庫をコンテナ内に、あるいは暖房のない施設内に設置する場合は、燃料庫内における木チップの凍結を防止する対策が必要と考えられる。燃料庫内送風管の吹き出し口の孔は木チップによる閉塞を防ぐため、下向きにすることが望ましい。

4) 木質ボイラーのメンテナンス

今回導入した木質ボイラーは、法的義務のある自主点検項目が存在しないが、熱源システムの中で併設する重油ボイラーでは定期点検が実施される。このため、2つのボイラーを併せてメンテナンス会社で定期点検することが望ましい。本項目で記載したチェックシートは、ユーザー側の視点から簡易に点検する内容をまとめていることに留意が必要である。

5) 熱源システムの評価と改善提案

木質ボイラーの熱効率の算出にあたって、燃料供給用スクリーコンベアの稼働時間から木チップの供給重量を推計する場合、定期的に木チップの含水率を測定して、木チップの発熱量を算出する必要がある。赤外線を利用し、連続的に水分を計測する装置も市販されているが、高額である問題がある。

6) 効果的な中央監視・見える化システムの提案

本システムは、地元企業による受注生産となるため、初期導入コストが高額となる場合がある。

7) 焼却灰の利用方法の提案

焼却灰の利用では、基準値を超えたクロム、カドミウムについて記述したが、その他にも水銀、セレン、鉛、ヒ素が規制の対象となる。さらに亜鉛や銅の含有量について把握することが必要となる。また、燃料の木チップに防腐剤や塗料などの化学物質を含まないことが必要要件となる。一方、散布に適さない場所として、融雪水が土壌に浸透せずに表面を流れて直接河川や水路、池などに至る恐れのある場所や土壌がアルカリ性である場所が挙げられる。

8) チップ製造事業、木質ボイラー導入事業の経済性・環境適合性の評価

木チップ製造事業の事業性、木質ボイラー導入事業の経済性・環境適合性を評価する際に、その前提条件は、ユーザー側で精査する必要がある。また、地域経済波及効果については、現在のところ市町村別で検討はできず、複数の自治体を含んだ広域における波及効果の算出となることに留意が必要である。

研究担当機関：エネルギー・環境・地質研究所

執筆者：白土 博康

3.3 帯水層を活用した熱エネルギーネットワークシステムの構築

3.3.1 地下水資源の評価と管理

(1) はじめに

1) 水の循環と水資源の賦存状況

地球には約 13.51 億 km³ の水があると推定されており、そのうちの大半は海水で、淡水はわずか 2.5% 程度しかない。しかも、この淡水の約 2/3 は両極地域の氷や氷河として存在しているため、地下水や河川・湖沼等の水として存在する淡水の量は、地球全体の水の約 0.8% に過ぎない^[1] (図 3-3-1-1)。

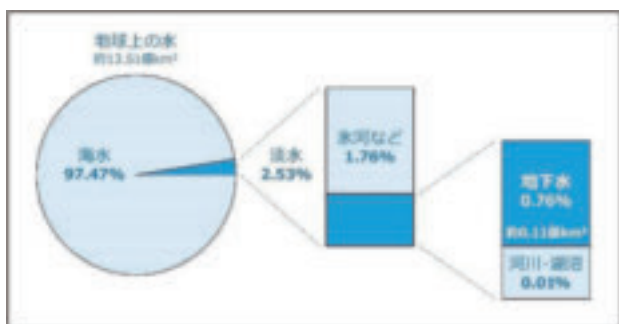


図 3-3-1-1 地球上の水の量^[1]

2) 水使用の現況

水使用形態の区分を図 3-3-1-2 に示した。水使用の用途は、大きく都市用水と農業用水に分けられ、さらに都市用水は生活用水と工業用水に分けられる。2019 (令和元) 年における全国の年間水使用量 (取水量ベース) は、生活用水と工業用水を合わせた都市用水が約 252 億 m³ 年、農業用水が約 533 億 m³、合計で約 800 億 m³ である^[1]。

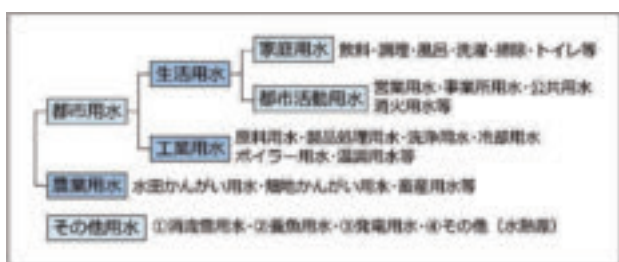


図 3-3-1-2 水使用形態の区分^[1]

3) 地下水の特性

一般に水資源としての地下水は、表 3-3-1-1 に示すように簡易性、経済性、良質な水質、恒温性という特性を有しており、このような特性を活かして生活用水、工業用水、農業用水、その他の用水として多様な用途に利用されている。「良質な水質」という

点では飲料・食品加工・調理等の用途に適しており、恒温性という点では冷却用水・融雪用水・ヒートポンプの熱源の用途に適している。

表 3-3-1-1 地下水の利用特性^[2]

特性	内容
簡易性	井戸の掘削と揚水設備の設置で容易に水が得られること
経済性	一般的に取水にかかる経費が他の水資源に比べて安価であること
良質な水質	一般的に水質が良好で適度にミネラル分を含んでいること
恒温性	年間を通して、ほぼ一定の水温で維持されており、夏は冷たく冬は暖かいこと

(2) 地下水資源の評価

1) 地下水の産状と分類

図 3-3-1-3 に地下における地下水の存在状態を模式的に示した。地下にある地層には、砂利や砂などからなる水通しの良いものと、粘土や泥などからなる水通しの悪いものがある。前者は水を蓄える能力があるので「帯水層」といい、逆に後者は能力がないので「難透水層」や「不透水層」という。

一般的に最初の難透水層より上位にある地表付近の帯水層には、上面が大気圧と釣り合った状態の地下水が存在する。この地下水を「不圧地下水」もしくは「自由面地下水」といい、採取する井戸を「浅井戸」という。一方、難透水層に挟まれている帯水層には、標高の高い位置からの水圧が働く地下水が存在する。この地下水を「被圧地下水」といい、採取する井戸を「深井戸」という。被圧地下水は加圧されているため、一般的に井戸の水位は不圧帯水層よりも上位となり、被圧水頭面が地表面よりも高い場合は、自然に湧出する「自噴」状態となる。

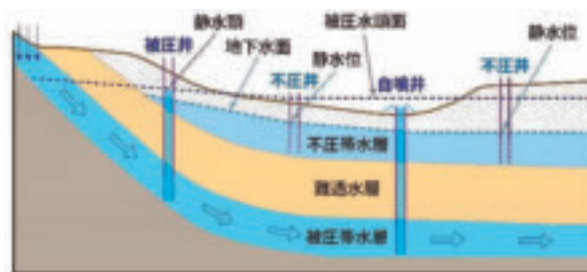


図 3-3-1-3 地下水の産状と分類

2) 揚水試験

地下水が自噴して必要量を賄える場合を除き、一般的には、ポンプなどの動力装置を用いて井戸から地下水を汲み上げることで必要な地下水量を得る。

揚水試験は地下水が賦存している帯水層の能力、もしくは井戸の能力を把握し、必要な地下水量を得るためのポンプ仕様を判断するために行われるほか、水資源の将来予測のために行われる（表 3-3-1-2）。

表 3-3-1-2 揚水試験の種類と目的

種類	目的	項目
予備揚水試験	揚水量と水位低下量の傾向を把握	最大揚水量 水位低下量
段階揚水試験	井戸の限界揚水量と適正揚水量の把握	限界揚水量 適正揚水量 井戸損失
連続揚水試験	帯水層の水力定数の算出	透水量係数 透水係数 貯留係数
水位回復試験	帯水層の水力定数の算出	透水量係数 透水係数

図 3-3-1-4 に段階揚水試験の一例を示した。この図は毎分 100L ずつ量を増やして揚水した際の経過時間と水位の関係を表している。毎分 300L 未満では水位の低下量が少ないに対し、毎分 300L 以上では水位の低下量が多くなり、かつ安定するまでの時間が長くなっている。

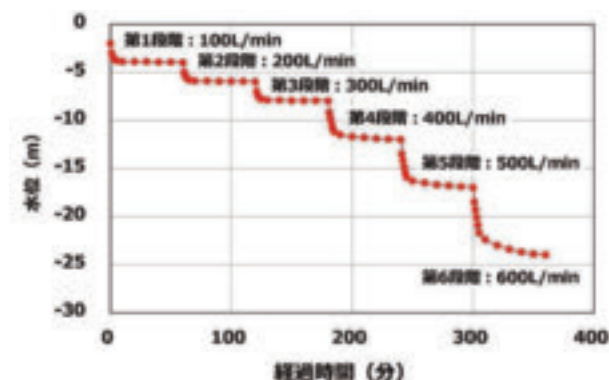


図 3-3-1-4 段階揚水試験の一例

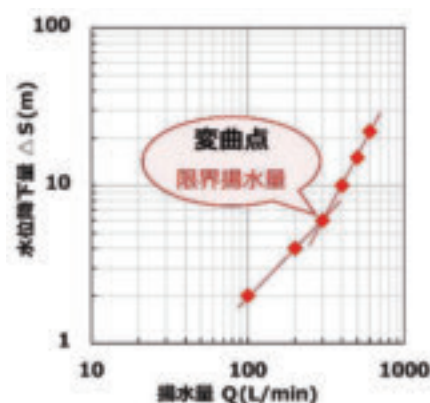


図 3-3-1-5 揚水量 (Q) と水位低下量 (ΔS) の関係

これらの揚水量と水位降下量の関係を両対数の散布図で示すと、各点を繋いだ直線に傾きが変化することがある（図 3-3-1-5）。この変曲点に相当する揚水量を「限界揚水量」といい、持続的に地下水を使うためには、この量以下で使うことが望ましい。

(3) 地下水資源の管理

1) 地下水に関するマネジメント

地下水に関するマネジメントは、広域の地下水資源利用を目的とした「地下水資源マネジメント」、土地や地下空間の開発に伴って起こり得る地下水環境悪化の防止・軽減を目的とした「地下水環境マネジメント」に分けられる（図 3-3-1-6）。地下水熱を利用する場合は、量的な関わりが強いため、地下水資源のマネジメントが主体となる。

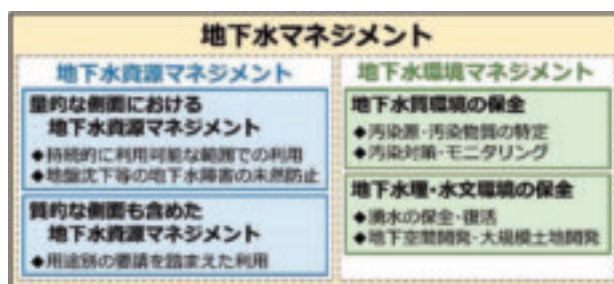


図 3-3-1-6 地下水マネジメントの対象^[2]

2) 地下水資源マネジメント

ある地下水盆（地下水が溜まっている器）において、一定の期間に利用可能な地下水の量を「適正採取量」とした時、適正採取量と採取量の関係は、図 3-3-1-7 のようになる。地下水資源の枯渇や地下水障害を生じさせず、持続可能な形で地下水を利用するためには、図の青色の範囲で使うことが必要条件となり、この採取量の管理（マネジメント）が重要である。

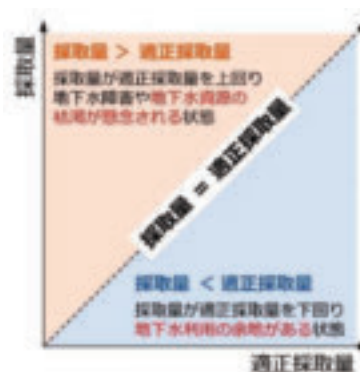


図 3-3-1-7 適正採取量と採取量の関係^[2]

3) モニタリング

適正揚水量は、ある地下水盆において、地下水を汲み上げた量に応じて、溜まっている地下水がどう変化するかを数値シミュレーションで求めるのが一般的である。しかし、数値シミュレーションには、多くの調査データが必要なほか、計算するためのソフトウェアが必要など、運用にはハードルが高い。

しかし、適正揚水量を数値化できなくても、地下水盆の状態が安定か否かを判断することで、適正揚水量と採取量の関係を把握することができる。具体的には、井戸の地下水位をモニタリングし、水位が安定傾向なのか（適正揚水量>採取量）、回復傾向なのか（適正揚水量>採取量）、もしくは低下傾向なのか（適正揚水量<採取量）を判断すればいい。そして将来的には、モニタリングデータをシミュレーションにフィードバックし、パラメータをチューニングする PDCA サイクルを回し、より実データに近いマネジメントを行っていくことが理想的である（図 3-3-1-8）。

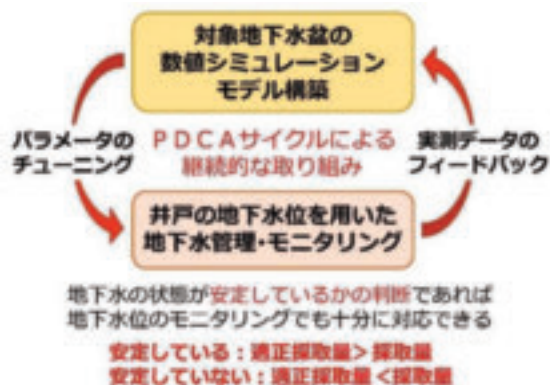


図 3-3-1-8 適正採取量と採取量の関係

(4) 当別町太美地区の事例

1) 既存調査による地下構造の推定

当別町太美地区には、地中採熱用に掘削した複数の孔がある（図 3-3-1-9）。それらの地質柱状図に基づいた地質柱状断面図を、水平距離を考慮して図 3-3-1-10 に示した。上段は図 3-3-1-9 の①断面、下段は同②断面である。南-北方向の①断面は、層厚の違いは若干あるものの上位から泥炭、礫混り粘土、砂礫、砂礫・粘土の互層の順に累重する。また、北東-南西方向の②断面も同様に上位から泥炭、礫混り粘土、砂礫、砂礫・粘土の互層の順に累重する。両断面から、深度 40~50m 以深には主に砂礫からなる帯水層が連続して分布すると推測される。

2) 電気探査による地下構造の推定

電気探査とは地下に電気を流して地下の比抵抗



図 3-3-1-9 既存の地中採熱用孔の位置

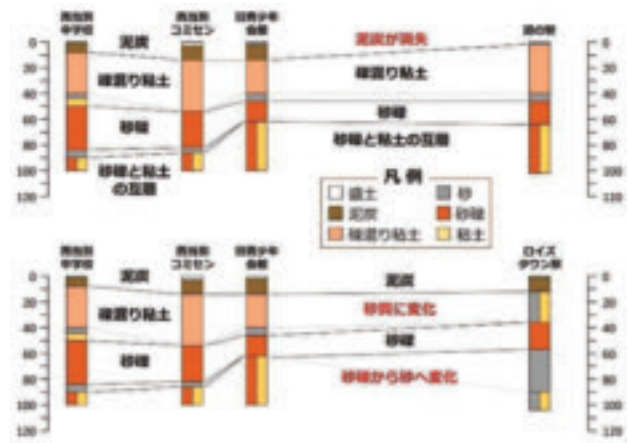


図 3-3-1-10 地質柱状断面図

を測定し、地下構造を推定する探査手法で、地下水の調査ではしばしば用いられている。本研究では、太美地区の帯水層の層厚と連続性を確認するため、JR 太美駅を中心に 9 測線を展開し、電気探査を行った（図 3-3-1-11）。

9 測線のうち、測線 03 と測線 09 の測定データを除いた 7 測線のデータを用いて 1 次元の比抵抗構造解析を行なった。解析の結果、太美地区の比抵抗構造は表 3-3-1-3 に示す 5 つの比抵抗層に分類でき、そのうちの第 IV 層が砂礫から構成される帯水層に相当すると推測される。

比抵抗構造の南北断面と東西断面を図 3-3-1-12 と図 3-3-1-13 に示した。第 IV 層は南北断面・東西断面のいずれでも上面が深度 40~50m と解析されており、地質柱状図による推定断面と調和的な結果である。



図 3-3-1-11 電気探査の測線位置

表 3-3-1-3 比抵抗構造の概要

比抵抗層	比抵抗値	層厚	対応地質
第Ⅰ層	数 10～数 100Ω	数 m	路盤・盛土
第Ⅱ層	数 10Ω	10m 程度	泥炭？
第Ⅲ層	15～35Ω	30～50m	シルト・粘土
第Ⅳ層	50～150Ω	50～250m	砂礫
第Ⅴ層	15～35Ω	不明	不明

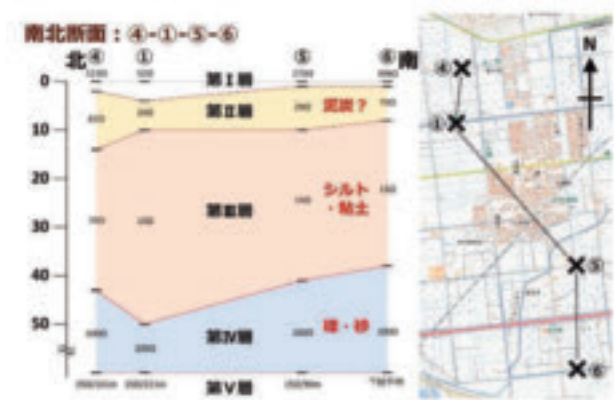


図 3-3-1-12 比抵抗構造断面図（南北方向）

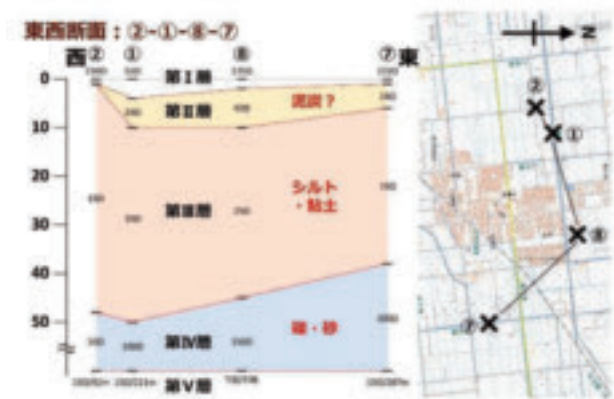


図 3-3-1-13 比抵抗構造断面図（東西方向）

3) ロイズタウン駅における地下水開発の事例

① 坑井地質とケーシングプログラム

ロイズタウン駅敷地内で掘削した 3 本の井戸（試験井戸，本設井戸①，本設井戸②）の坑井地質は，地層境界が若干上下するが，上位から泥炭混じりシルト，砂・粘土互層，砂礫，砂，砂・粘土互層の順に累重する（図 3-3-1-14）。地下水を採取するスクリーンは，試験井戸では深度 36m～100m(区間長 64m)に，本設井戸①と本設井戸②では深度 88m～96m(区間長 8m) にそれぞれ設置している。

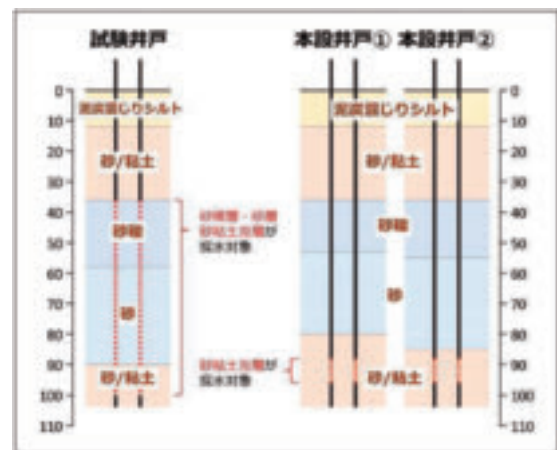


図 3-3-1-14 坑井地質とケーシングプログラム

② 揚水試験と微流速検層

井戸の能力を把握するため，試験井戸と本設井戸①のそれぞれで段階揚水試験と微流速検層を行った。段階揚水試験は，毎分 50L，毎分 100L，毎分 150L，毎分 200L の 4 段階で行い，各段階の途中で分析用の水試料を採取した。微流速検層は段階揚水試験時のほかに自然状態でも行ったが，両井戸は自然状態では自噴するため，自噴しない様に井戸の高さを調整して試験を行った。

試験井戸の微流速検層結果を図 3-3-1-15 に示した。揚水量を 4 段階に変化させると深度 41m，深度 70～80m，深度 88m で階段状に流量が増加することから，この区間に帯水層が存在すると考えられる（以降，帯水層 A，帯水層 B，帯水層 C という）。揚水量が少ない時は，帯水層 C からはほとんど湧出しないが，揚水量を増やすと帯水層 C からも湧出を始める。また，自然状態では深度 41m から深度 83m まで流量がマイナスの値を示すことから，帯水層 A から湧出した地下水が流下して帯水層 B に流入していると考えられる。

本設井戸①の微流速検層結果を図 3-3-1-16 に示した。揚水量を 4 段階に変化させても孔内の流量は

一定なことから、本設井①では帯水層 C のみがスクリーンから井戸内に流入していると考えられる。

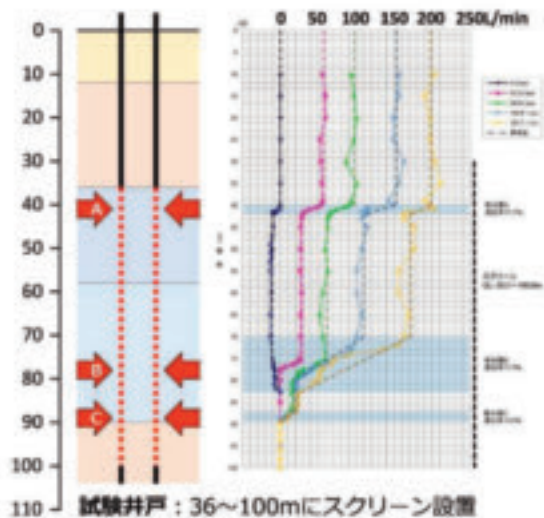


図 3-3-1-15 試験井の孔明管と流速検層結果

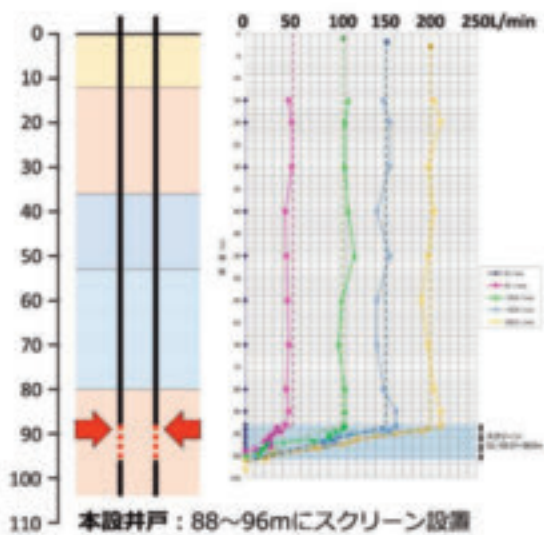


図 3-3-1-16 本設井の井戸構造と流速検層結果

試験井戸と本設井戸①の揚水時における水質性状を表 3-3-1-4 と表 3-3-1-5 に示した。試験井戸の水質性状は揚水量の増加に伴い、pH がアルカリ側に变化して電気伝導度が増加する。一方、本設井戸①の水質性状は揚水量を増やしても pH や電気伝導度がほとんど変化しない。電気伝導度の値は、概ね溶存成分量に置き換えることができるため、これらの測定結果は、複数の帯水層を揚水対象とする試験井戸、単独の帯水層を揚水対象とする本設井戸①、それぞれの微流速検層の結果と調和的である。

表 3-3-1-4 試験井の水質性状

揚水量(L/分)	温度(°C)	pH	電気伝導度(S/m)
57	18.2	7.12	1.06
100	18.9	7.14	1.07
149	18.5	7.37	1.09
198	18.8	7.50	1.52

表 3-3-1-5 本設井①の水質性状

揚水量(L/分)	温度(°C)	pH	電気伝導度(S/m)
51	22.0	7.83	2.62
106	21.4	7.81	2.66
153	19.3	7.83	2.64
200	18.8	7.81	2.66

(5) おわりに

ゼロカーボンの実現に向け、地下水熱を利用することは、積雪寒冷地である北海道において有効な手段である。しかし、先に述べたように地下水は循環する資源である一方、地球上に存在する水の約 0.76% しかない貴重な資源でもある。地下水資源のマネジメントを着実に実行するとともに、地下水を開発する際には、開発前の背景データを含め、適切なモニタリングを同時並行で進めることが重要である。

最後になりますが、電気探査ならびに井戸調査を進めるにあたり、当別町役場や現場の工事事業者の方々に多大なる協力をいただきました。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

[引用文献等]

- [1] 国土交通省水管理・国土保全局水資源部.『令和 4 年版 日本の水資源の現況』. https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000039.html
- [2] 今後の地下水利用のあり方に関する懇談会.『健全な地下水の保全・利用に向けて』. <https://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/070307/01.pdf>. (2007)

研究担当機関：エネルギー・環境・地質研究所
執筆者：鈴木 隆広

3.3.2 帯水層を活用した地中採熱システム設計のための基礎試験

(1) 背景と目的

一般的な地中採熱方式であるボアホール方式（以下、BH）は、土壌と熱交換するため採熱管の単位長さ当たりの採熱量が限定的であるが、地下水と熱交換するヒートクラスター方式（以下、HC）はBHの数倍の採熱量が見込まれ、掘削孔数の削減による大幅なコストダウンが期待できる。しかし、HCの設計のための基礎データが不足していたことから、それらの知見を得る目的で、両方式の試験設備を所有している苫小牧工業高等専門学校（以下、苫小牧高専）の協力を得て予備採熱量比較試験を、さらに、その結果を基に当別町において既存のBHの近傍にHCを施工して、BHとHCの採熱量比較試験等を行った。

(2) 苫小牧高専における予備試験

1) 試験システムの概要

試験システムの概要を図3-3-2-1に示す。

BHとHCの採熱管は約14m離れて設置されており、並列接続とすることで、それぞれの単独運転と同条件下における同時運転を可能とした。ヒートポンプはサンポット製GSHP-1001（以下、HP-1）1台を用いた。主な熱負荷は、実験棟の床暖房とした。

浅井戸ポンプ（川本ポンプ製NF3-150S）（以下、ページP）1台により揚水と排水を行った。地下水の汲み上げ深度は8mである。熱交換後の地下水は実験棟内の排水溝に排水した。

なお、本報告では、ヒートポンプと地中熱交換器を繋ぐ系統を「一次」、ヒートポンプと各放熱器を繋ぐ系統を「二次」と呼ぶ。

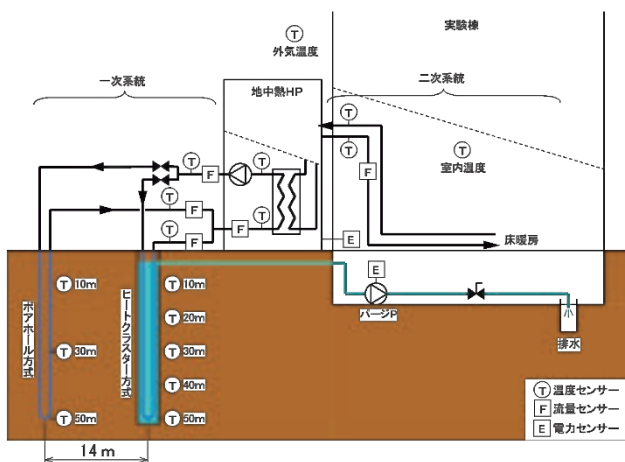


図3-3-2-1 試験システムの概要

① BHの仕様

BHの採熱管は、写真3-3-2-1に示す25Aの（株）イノアック住環境製高密度ポリエチレンU字管（商品名、U-ポリパイ）を、図3-3-2-2のように2本束ねて、採熱量の増加を図った採熱管（以下、ダブルUチューブ）を使用している。埋設深さは60mである。



写真3-3-2-1 Uポリパイ

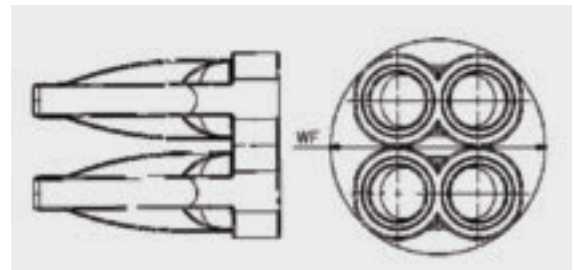


図3-3-2-2 ダブルUチューブ

② HCの仕様

HCの埋設深さはBH同様60mである。外管（以下、ケーシング）はSGP125A（内径130.8mm）の鋼管で、地下水をケーシング内に導入するスリットを設けた有孔管と、それ以外の部分に埋設する無孔管の組み合わせで構成される。有孔管のスリット形状は、縦型3mm×150mm×25段×7本で、開口率は3.5%である。

有孔管は帯水層とされる深さ40～60m、無孔管はそれ以外の深さ0～40mに埋設され、ケーシング内には25AのダブルUチューブ管（外径99.7mm）が挿入されている。ケーシング内の地下水温度は、深度10m、20m、30m、40m、50mの5点で計測した。

2) 試験方法

試験は以下の制御方法により行った。HC20mの地下水温度が約4℃まで低下するとページPが地下水を汲み上げて冷水を排除し、帯水層からのより暖かい地下水によって井戸内水温を回復させた。HC10mの地下水温度が約6℃まで上昇すると汲み上げを停止した。

3) 予備採熱量比較試験の結果

予備採熱量比較試験は、2020年1月31日から2月3日までの3日間で行った。本報告ではシステムが比較的安定して稼働した2月1日の並列運転時の試験結果を示す。

図3-3-2-3にHP-1二次出入口温度と放熱量を示す。この図から、計測期間中のHP-1二次出口温度は約45.5℃、放熱量は約5,700Wで、稼働状況が安定していることがわかる。

図3-3-2-4に、HC10mとHC20mの地下水温度とページP流量を示す。この図から、ページPが稼働すると、約22L/minの揚水を行っていることがわかる。

図3-3-2-5にHCとBHの一次戻り温度とHP-1一次行き温度を、図3-3-2-6にHCとBHのそれぞれの

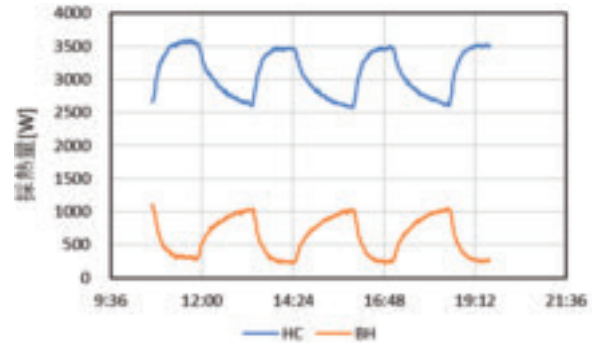


図3-3-2-6 HCとBHの採熱量

採熱量を示す。これらの図から、ページPが地下水を汲み上げると、HCの一次戻り温度が上がるためHP-1一次行き温度も上がるが、比較的溫度が低いBHでは一次戻り温度との溫度差が小さくなるため採熱量が減少するのに対し、HCは溫度帯が高く、HP-1一次行き温度やBHの一次戻り温度の上昇以上にHC一次戻り温度が上昇するため、採熱量が増加していることがわかった。

4) まとめ

以上の予備採熱量比較試験の結果を基に、HCとBHを比較した試算結果を表3-3-2-1に示す。

BHの採熱量は10.3W/mであるのに対し、HCの採熱量は51.7W/mと、BHの約5倍であることから、1本当たりのイニシャルコストが2倍であったとしても、BHの約40%程度のコストとなり、約60%のコスト低減となる可能性があることがわかった。

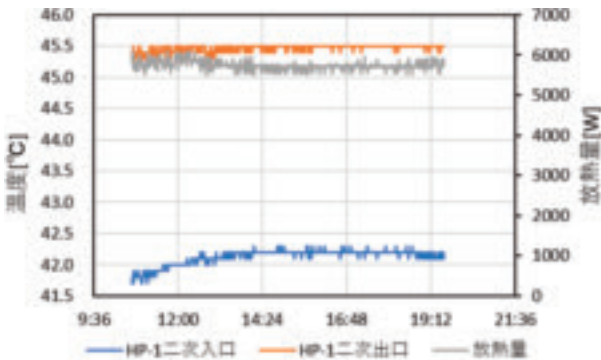


図3-3-2-3 HP-1 出入口温度と放熱量

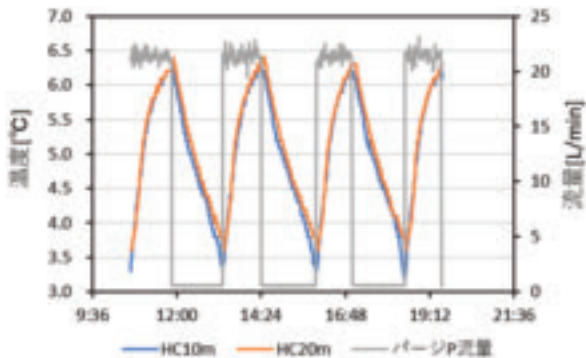


図3-3-2-4 HC10m・20m温度とページ流量

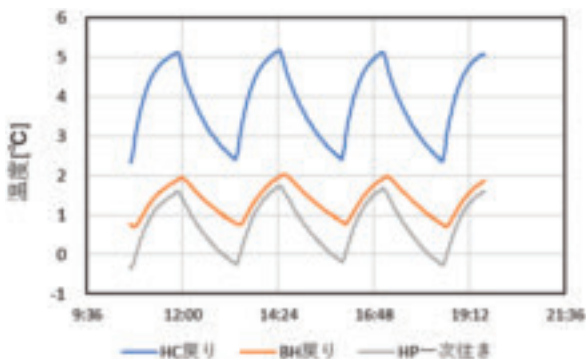


図3-3-2-5 HCとBHの戻りとHP一次行き温度

表3-3-2-1 HCとBHのまとめ

実測値	HC	戻り温度	℃	3.9
		①採熱量	W	3101.1
			W/m	51.7
		②イニシャルコスト ¹⁾	千円/本	3,036
	BH	戻り温度	℃	1.4
		③採熱量	W	616.6
			W/m	10.3
		④イニシャルコスト ¹⁾	千円/本	1,500
暖房	行き温度	℃	45.5	
	放熱量	W	5744.0	
HP	消費電力	W	1688.6	
	ページP	消費電力	W	38.3
排出水量(期間合計)		L	5733.2	
		m ³	5.7	
	運転時間割合	%	48.9	
試算	①HC採熱量/②BH採熱量		—	5.0
	②HCコスト/④BHコスト		—	2.0
	HCコスト/BHコスト(同一採熱量)		—	0.4

1)深さ60m

(3) 当別町における冷暖房試験

1) 試験システムの概要

試験システムの施工位置を図 3-3-2-7 に、試験システムの概要を図 3-3-2-8 に示す。

西当別コミュニティセンターの駐車場に 2015 年度に熱応答試験用として施工され、現在は使用されていない深さ 100m の BH1 本がある。予備採熱量比較試験の結果を基に、BH から 5m 離れた位置に HC1 本を埋設施工し、ヒートポンプや負荷用放熱器等の試験用機器を収納するユニットハウスをその上に被せるように設置して、既設 BH との採熱量比較試験を行った。

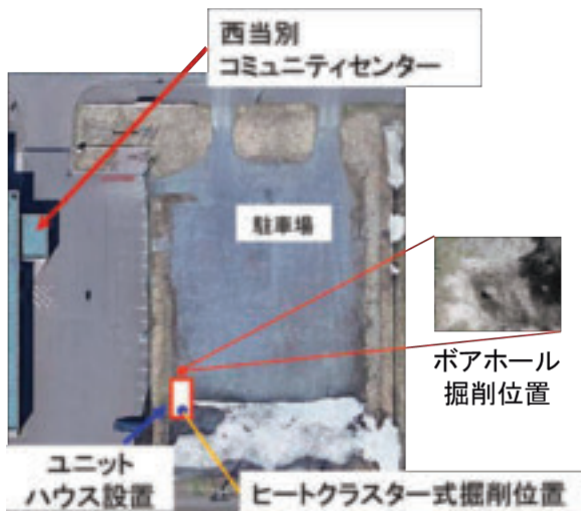


図 3-3-2-7 試験システムの施工位置

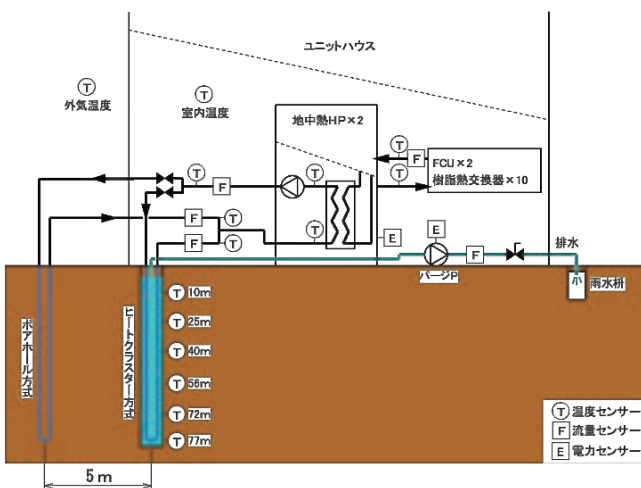


図 3-3-2-8 試験システムの概要

① BH の仕様

この試験の BH の採熱管は、苫小牧高専と同じ 25 A のダブル U チューブで、埋設深さは 100m である。

② HC の仕様

埋設する HC 採熱管の断面図を図 3-3-2-9 に示す。

HC 採熱管のケーシングは硬質ポリ塩化ビニル管とし、帯水層部分に埋設して地下水をケーシング内に導入する有孔管 (4m/本) と、それ以外の部分に埋設する無孔管 (4m/本) の組み合わせで構成した。

ケーシングは、地下水と熱交換を行う 25A のダブル U チューブ管 (外径 99.7mm) を挿入できる最小径である VP125 (内径 125mm) とした。掘削孔径は掘削費用を最小限とするため、VP125 (外径 140mm) を挿入できる最小径である 7 インチ (178mm) とした。有孔管が掘削孔壁に接して砂などが流入することを防ぐため、孔壁からのクリアランスを確保する写真 3-3-2-2 に示す部品 (セントラライザー) を有孔管に取り付けた。

地下水の汲み上げ予定量が 40L/min 以内と、それほど多くないため、関係業者との打合せにより有孔管の開口率は 8% 程度で問題ないと判断し、孔形状は扁平強度に優れた横スリットで、幅 1.5mm、ピッチ 15mm、条数 5、開口率 7.8% である misaki 製ストレーナ管 (VP125mm) とした。

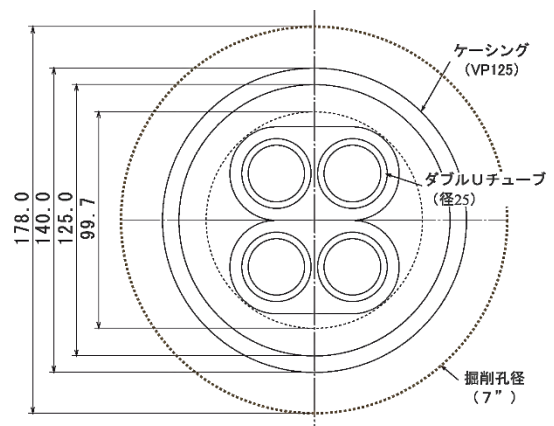


図 3-3-2-9 HC の断面図



写真 3-3-2-2 セントラライザー

③ HC 採熱管の埋設工事

HC を埋設する掘削深さは、BH の埋設工事を行った際に施工業者が作成した地質柱状図を基に、帯水

また、同じ地下水温度における揚水の on/off 制御がヒートポンプの COP（成績係数、消費電力あたりの冷暖房能力）等に与える影響の有無を確認するため、深度 10m の地下水温度を 20℃、17℃、及び 11℃となるように on/off 制御を行う試験を行った。以下、連続揚水の場合は、最大流量、中間流量、最少流量での試験結果の表記を「連続 on (20℃)」、「連続 on (17℃)」、「連続 on (11℃)」、on/off 制御の場合は、地下水維持温度 20℃、17℃、11℃の試験結果の表記を「on/off (20℃)」、「on/off (17℃)」、「on/off (11℃)」とした。

また、試験中は HP が連続運転を行うために、室内の設定温度は到達しないと予想される 35℃とし、HP-A の二次行き設定温度は 45℃とした。

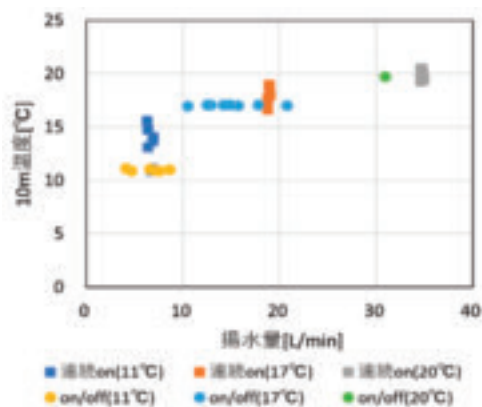


図 3-3-2-12 地下水の揚水条件

② 冷房試験

冷房を行う時期は地下水位が上昇して自噴することが時々あり、on/off 運転の効果が判別不能となるため、on/off 運転は行わず、全て連続運転とした。揚水条件は自噴水量を上回る最少流量 (8.2L/min)、最大流量 (34.5L/min)、その間の流量 (10.7L/min, 20.2L/min, 21.3L/min) の 5 条件とした。

また、試験中は HP が連続運転を行うために、室内の設定温度は到達しないと予想される 10℃とし、HP-A の二次行き設定温度は 7℃とした。

3) 試験の結果

① 冬季暖房試験

ア BH と HC の二次放熱量と COP の比較

BH と HC の二次放熱量と COP の相関を図 3-3-2-13 に、一次戻り温度と COP の相関を図 3-3-2-14 に示す。

図 3-3-2-13 から、BH の COP は放熱量が 6~9.5kW において、変動が少なく約 3 程度であるのに対し、HC は揚水条件や放熱量により大きく異なり、揚水量

が少ない「連続 on (11℃)」や「on/off (11℃)」の COP は 4~5、揚水量が多い「連続 on (20℃)」や「on/off (20℃)」の COP は 5.5~6、HC 全体で 4~6 であることがわかった。

これは図 3-3-2-14 から、一次戻り温度と COP は 2 次関数の関係があり、HC の一次戻り温度が比較的高く、COP への影響が大きい温度帯であるのに対し、BH は一次戻り温度が比較的低く、COP への影響が小さい温度帯であるためと考えられる。

なお、揚水量の条件はバルブで調整したため、揚水量の違いによる揚水ポンプの消費電力量の違いを反映できないことから、本報告では SCOP (揚水ポンプ等システムを駆動させるために必要な付帯設備の消費電力も考慮した COP) の評価は行っていない。

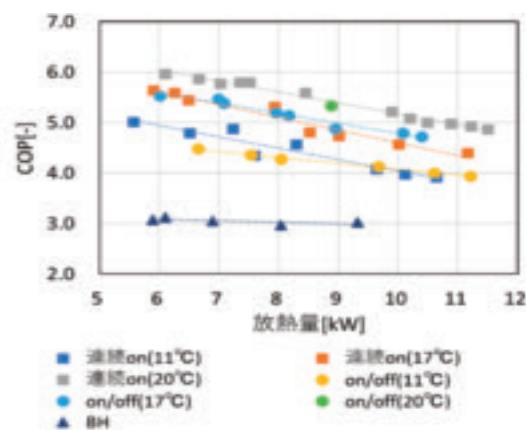


図 3-3-2-13 二次放熱量と COP

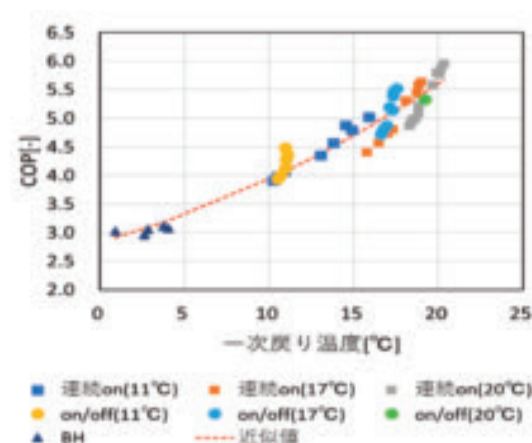


図 3-3-2-14 一次戻り温度と COP

イ HC の揚水量と二次放熱量による COP の試算

連続揚水時における COP を、揚水量と二次放熱量による重回帰分析により試算した (図 3-3-2-15)。

この図から、連続揚水時の COP は重回帰分析ではほぼ正確に試算することが可能であることが確認された。

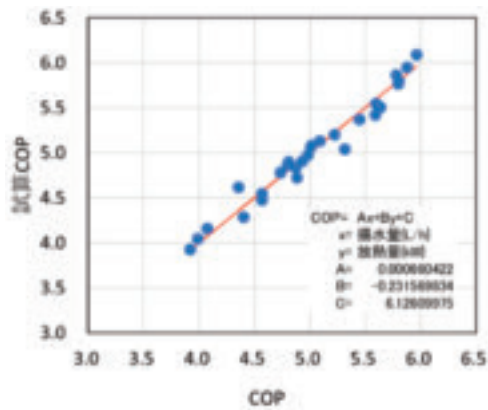


図 3-3-2-15 揚水量(連続)と二次放熱量による COP の重回帰分析結果

ウ BH と HC の最大一次採熱量の推定

地中熱交換機の採熱量は、一次行き温度が低くなるに伴い増加するが、無限に温度を下げられるわけではなく、ケーシング内の地下水や地中熱交換器周辺の土壌等が凍結しないような温度にする必要がある。本研究では、実用上問題ないとされる一次行き温度 5℃のときの採熱量を最大一次採熱量とした。

BH と 6 条件の HC について、一次採熱量と一次行き温度の関係を図 3-3-2-16 に示す。

なお、「on/off (20℃)」については、ほぼ連続運転となったため「連続 on (20℃)」と重なる結果となっている。この図から、各条件の近似式を求め、一次行き温度が 5℃となる採熱量を試算した。

その試算結果を、表 3-3-2-2 に示す。BH は 22.3W/m、HC は最大で 215.9W/m となり、HC は BH の 9.7 倍の採熱量が見込めることがわかった。

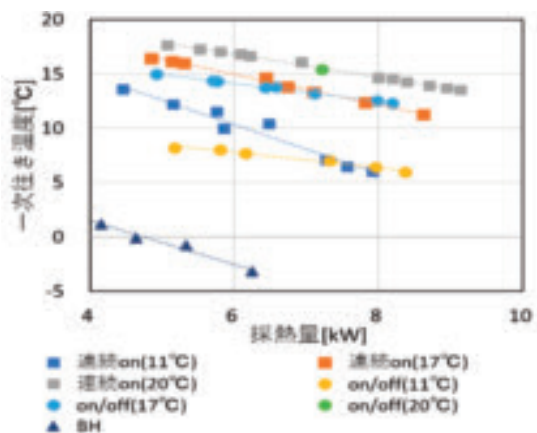


図 3-3-2-16 一次採熱量と一次行き温度

表 3-3-2-2 HC の最大採熱量の試算結果

	取水量 [L/min]	一次行き 温度 [°C]	採熱量(試算値)	
			[kW]	[W/m]
BH			2.2	22.3
HC	on/off(11°C)	6.4	10.0	124.8
	on/off(17°C)	16.0	17.3	215.9
	on/off(20°C)	30.9	17.3	215.8
	連続on(11°C)	6.6	8.4	104.5
	連続on(17°C)	18.8	13.1	163.8
	連続on(20°C)	34.7	17.3	215.8

② 夏季冷房試験

当別町のような温度が高い地下水を利用する場合、冷房には不利となることが予想されたことから、その状況を確認するため、BH と HC の冷房試験を行った。

図 3-3-2-17 に BH と HC の二次採熱量と一次行き温度を、図 3-3-2-18 に一次行き温度と COP を、図 3-3-2-19 に二次採熱量と COP を示す。

これらの図から、二次採熱量が 3~5.5kW において、BH の一次行き温度は 39~48℃、COP は 2~3 であるのに対し、揚水量が 10L/min 前後の HC の一次行き温度は 30~36℃、COP は 3~4、揚水量が 20L/min 以上の HC の一次行き温度は 28~31℃、COP は 3.5~4 で、いずれも BH より COP が高く、揚水量が 20L/min 以上の HC と BH では、二次採熱量が大きいほど差が大きくなることがわかった。

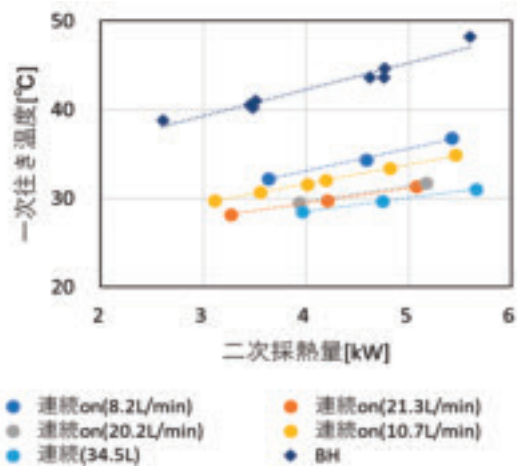


図 3-3-2-17 二次採熱量と一次行き温度

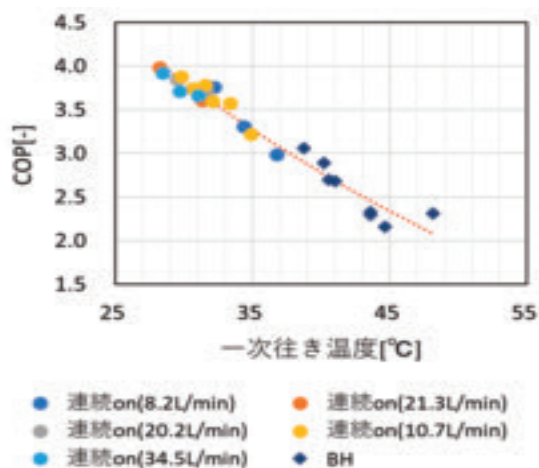


図 3-3-2-18 一次行き温度と COP

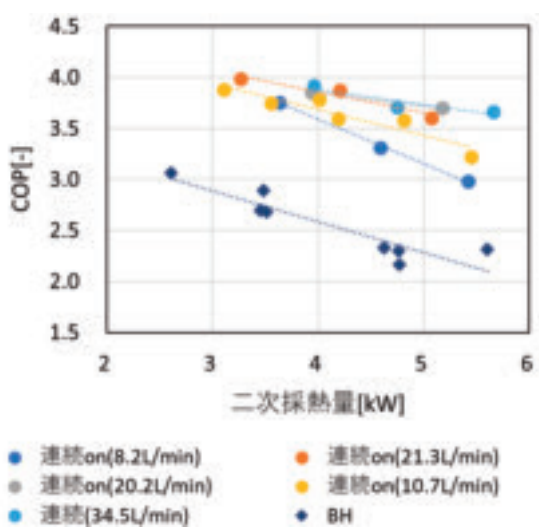


図 3-3-2-19 二次採熱量と COP

② 冷房試験

二次採熱量が 3~5.5kW において、BH の COP は 2~3 であるのに対し、揚水量が 20L/min 以上の HC の COP は 3.5~4 と、冷房においても HC の COP が高いことがわかった。

研究担当機関：エネルギー・環境・地質研究所

執筆者：保科 秀夫

3) まとめ

比較的溫度が高い地下水が存在する当別町において、BH と HC の同一地点における冷・暖房試験を行った結果、以下の知見を得た。

① 暖房試験

ア 二次放熱量が 6~9.5kW における BH の COP は約 3 程度であるのに対し、HC の COP は 4~6 で、揚水量が多い「連続 on (20°C)」や「on/off (20°C)」の COP は 5~6 であることがわかった。

イ 重回帰分析により HC の揚水量と二次放熱量から COP の試算が可能となった。

ウ 一次行き溫度が 5°C となる最大採熱量を、各条件の試験結果を基にした近似式から求めた結果、BH の熱交換器単位長さ当たりの採熱量は 22.3W/m、HC は揚水方法に関わらず 30L/min 以上の揚水量で 215.8W/m となり、HC が BH の約 9.7 倍となることがわかった。

3.3.3 帯水層を活用した地中採熱システムの導入プロセスとその検証

本項では、これまで説明してきた地下水から採熱するヒートポンプシステムについて、JR ロイズタウン駅前歩道融雪システムを例に導入プロセスを整理し、導入にあたっての留意点を説明する。

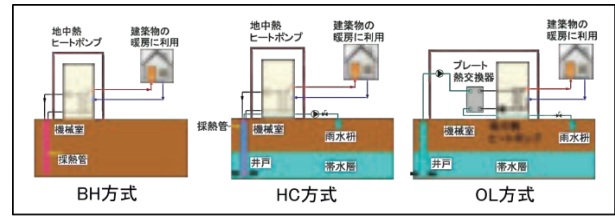


図 3-3-3-1 各地中採熱方式

(1) 地下水熱利用のメリット・デメリット

図 3-3-3-1 に各地中採熱方式(以下、ボアホール、ヒートクラスター、オープンループ方式をそれぞれ、BH, HC, OL 方式とする)を、表 3-3-3-1 に各地中採熱方式のメリット・デメリットを示す。土壌から採熱し、実績の多い BH 方式に対して、OL 方式は地下水がある場所でしか利用できないものの、採熱量が大きく(一つの目安として井戸深さ 1m に対して 100W 以上)、結果として必要井戸本数が少なくなり、導入コストが格段に安価になる。一方、デメリットとして、水質が良好な箇所ではしか導入できないこと、使用水量が多く、場所によっては地盤沈下の懸念があること、排水設備または還元井が必要であること、熱交換器・井戸の維持管理が必要であること。

井戸内に熱交換用の採熱管を導入し、土と比較して熱伝導率の高い井戸内の水と採熱管内の不凍液の間で熱交換する HC 方式は、BH 方式と OL 方式の中間の手法と位置づけられる。この方式では、揚水量を減少させることができるが、基本的には OL 方式と同様のデメリットがある他、企業が特許を保有^[1]しているため、特許の実施・コンサルティング料が必要となる。一方、OL 方式は公知であるため、特許実施料なしで利用できる。OL 方式の中には、井戸から揚水して、陸上に槽を設け、その中に採熱管を設置して採熱する HC 方式と類似する手法^[2]もあり、状況に応じて選択することが必要である。

(2) 採熱方式の選択

図 3-3-3-2^[3]に地中熱利用方式選定の流れを示す。OL 方式の導入可能性を検討するにあたり、地域の地質や地下水に関する文献調査、地下水現地調査を行う。そこでまず、地下水採取の可否を判断し、否である場合は BH 方式を採用する。次に採熱後の地下水の放流の可否を判断する。次に採熱後の地下水の還元・浸透の可否を判断する。還元・浸透が難しい場合は、BH 方式を採用する。HC 方式は井戸内に残存する熱容量が減少すると揚水する方式なので、揚水量を減少させたい場合等に採用する。

表 3-3-3-1 各地中採熱方式のメリット・デメリット

方式	ボアホール (BH)方式	ヒートクラスター (HC)方式	オープンループ (OL)方式
メリット	導入実績が多い	採熱量大(100W/m程度) 採熱管(井戸)本数が少ない 導入コストが安価	採熱量大(100W/m以上) 井戸本数が少ない 導入コストがかなり安価
デメリット	採熱量低(30W/m程度) 採熱管本数が多い 導入コスト高価 広い敷地が必要	本質的に揚水でのみ採熱可能 採水設備または還元井が必要 冷水使用時に発生する塩分あり 特殊凍結・コンクリート材料が必要	本質的に揚水でのみ採熱可能 採熱管本数が多い(地盤沈下の懸念) 採水設備または還元井が必要 下水道使用時に発生する場合あり 独立設備・井戸の維持管理が必要

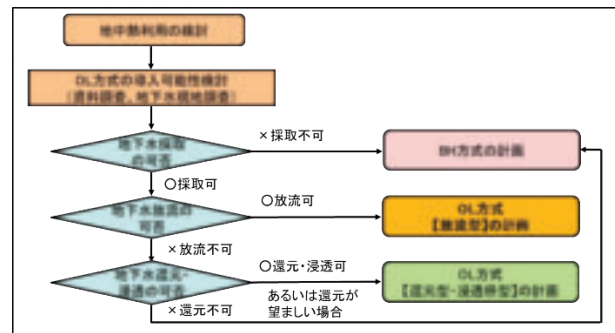


図 3-3-3-2 地中熱熱利用方式選定の流れ

(3) 地下水利用地中採熱技術の導入プロセス

表 3-3-3-2 に地下水利用地中採熱技術導入の流れを示す。最初に、導入する施設の冷暖房、融雪などの熱負荷を算定する。施設の冷暖房負荷は、国の研究所等が提供する WEB プログラム^{[4], [5]}, The BEST Program[®]^[6] (ユーザー登録者のみ使用可能)などの各種ツールを使用するか、アメダスデータを活用し、熱負荷計算により算定する。融雪負荷は、アメダスデータと北海道融雪工業会のガイドライン^[7]などを参照し、算定する。

地下水利用地中採熱システムの設計・導入時には、まず、地盤沈下を防ぐ等の目的で作られた自治体、地域の条例などの揚水規制の法規を確認する。次に、必要な揚水量が持続的に得られるかを判断するため、帯水層の性状、井戸の性能を設計時に把握することが必要である。このため、既設井戸等の文献調査、電気探査など、帯水層に関する事前調査と行う。具体的な方法として国土地盤情報検索サイト^[8]や北海道水井戸データベース^[9] (一般社団法人全国さく井協会北海道支部会員限定で利用可能)、その他井戸の柱状図、ボーリングデータを収集する。これにより、

採熱方式を検討する。

文献による情報が不十分な場合は試験井を設置する。孔を掘削して井戸を設置前に電気や温度の検層を行い、水の有無や温度を判別する。ここで帯水層の情報収集が不十分なまま施工すると所定の地下水が得られない場合がある。ここで井戸情報を確実に取得することが確実にシステムを導入するために特に重要である。

次に予定する仕様の井戸管を設置して、水質検査、揚水試験、微流速検層を行う。これらにより、揚水量や帯水層別の揚水量、水質を把握する。これらのデータを基に採熱設計を行い、使用電気を計算し、それに基づき、経済性・環境性の評価を行う。ここまでを、実機施工を行う前年の秋までに行い、次年度の予算書の作成、補助金申請を準備することが望ましい。

次年度以降、孔を掘削、電気・温度検層により、実機の井戸の有孔管位置等を現場で微調整して井戸の設置工事を行う。揚水試験・水質検査・採熱管やヒートポンプの設置を行い、最終的には試運転・運転調整を行う。

表 3-3-3-2 地下水利用地中採熱技術導入の流れ

作業内容	実施者	方法	意思決定
①負荷の算定	設計会社	・WEBプログラム等の活用 ・アメダスデータの活用	
②帯水層に関する事前調査 ・法的規制の有無 ・既設井戸等文献調査 ・電気探査	調査会社	・国土情報検索サイト「KuniJiban」等で井戸位置・ボーリングデータを収集 ・その他井戸情報の収集	・採熱方式の検討 ・試験井戸設置の判断
③試験井による事前調査 ・試験井戸掘削 ・裸孔で検層(電気・温度) ・井戸管の設置 ・水質検査・揚水試験・微流速検層	調査会社 施工会社	・揚水量・水温の把握 ・帯水層の位置別揚水量の把握 ・水質検査	・採熱方式・井戸仕様を決定
④採熱設計・経済性・環境性評価	設計会社 施工会社	・採熱条件の設定 ・採熱シミュレーション	・設備導入の可否判断
⑤掘削工事、帯水層評価、井戸仕様調整・井戸工事	施工会社	・孔を掘削 ・実機で各種検層により、帯水層の性状を評価後、有孔管の設置位置などを調整 ・井戸工事	
⑥揚水試験・水質検査	施工会社	・段階揚水試験で限界揚水量を把握。連続揚水試験で揚水の持続性を確認 ・自噴あるいは揚水して水を採取し、水質汚濁防止法に関連する項目を検査	
⑦採熱管・ヒートポンプ設置工事	施工会社		
⑧試運転・運転調整	施工会社		

(4) ロイズタウン駅前歩道融雪システムの導入

令和4年3月に西当別コミュニティセンターから南西に数 km 離れた場所にロイズタウン駅が開設された。その駅前歩道に同年の秋、地下水を利用した地中熱融雪システムを導入した。この地中採熱システムをケーススタディとして(3)で示した導入プロセスを実践、検証した。

1) ロイズタウン駅前歩道融雪システム導入の流れ

表 3-3-3-3 にロイズタウン駅前歩道融雪システム導入の流れを示す。色塗り部分は、道総研が当別町に設備導入支援を実施した項目である。システム導入に関する役場内協議を受け、令和3年10月に負荷の算定や採熱設計・経済性・環境性評価を行った。そこで、一度システム導入は立ち消えとなったが、令和4年4月に役場内で本格的にシステムの導入を進める話があり、再度採熱設計と経済性、環境性評価を行っている。表 3-3-3-2 における②帯水層に関する事前調査、③試験井による事前調査は 3.3.1 で説明した近傍による調査により実施した。その後、5月中旬に補助金申請を行い、7月に採択通知を受けている。8月以降、当別町により詳細設計と設備設計・施工企業への発注が行われ、融雪路盤、配管工事が先行して実施された。10月から孔の掘削工事と帯水層評価を行い、井戸仕様を調整の上、井戸工事が行われた。その後、ポンプによる揚水と自噴により水を採取して水質検査を行い、水質汚濁防止法の排水基準を満たしているか確認した。次に機械室を設置し、ヒートポンプや揚水ポンプなどの機械類を設置するとともに、採熱管・配管工事を行い、採熱系統、融雪温水出力系統の接続を行った。最後に機械室内の計装・電気工事を行って、工事は12月上旬に完了した。その後、試運転を行い、12月中旬から本格稼働した。揚水量や省エネルギーなどを検討するために1ヶ月ほどかけていくつかの条件で運転を行い、最終的に令和5年1月14日から一定の運転条件で融雪機器を稼働した。この間、後述する各種データは連続的に取得しており、年度末に年間の運転データを取りまとめている。

表 3-3-3-3 融雪システム導入の流れ

項目	令和3年			令和4年									令和5年		
	10	11	12	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
1. 負荷の算定	←			←											
2. 採熱設計・経済性・環境性評価	←			←											
3. 補助金申請支援				←											
4. 補助金ヒアリング、結果の通知						←	←								
5. 詳細設計、発注								←	←						
6. 融雪路盤、配管工事										←	←				
7. 掘削工事、帯水層評価、井戸仕様調整・井戸工事											←	←			
8. 揚水試験・水質検査												←	←		
9. 機械室設置、採熱管・ヒートポンプ設置工事、電気工事													←	←	
10. 試運転														←	←
11. システム評価、運転調整															←
12. まとめ															←

2) ロイズタウン駅前歩道融雪システムの概要

図 3-3-3-3 に施工場所の概要図を示す。駅舎から駐車場やロイズタウン工場へのバス乗り場までの歩

道を融雪するシステムである。写真 3-3-3-1 に融雪箇所における温水配管施工の状況を示す。路盤には 200mm ピッチで放熱用の架橋ポリエチレン管 16A が施工されており、その融雪面積は 157.8m² である。

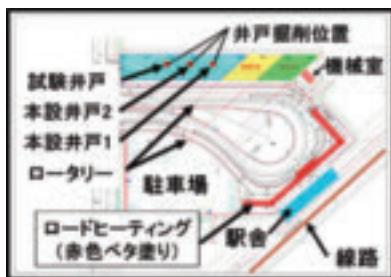


図 3-3-3-3 施工場所の概要図



写真 3-3-3-1 融雪箇所における温水配管施工状況

図 3-3-3-4 に融雪システムの概要図を示す。採熱方式は HC 方式とし、井戸は 3 本（試験井戸も兼ねたもの 1 本、本設井戸 2 本）施工した。井戸内で帯水層の水から採熱し、ヒートポンプを 10kW×4 台並列接続して運転し、融雪路盤に温水を供給するシステムである。

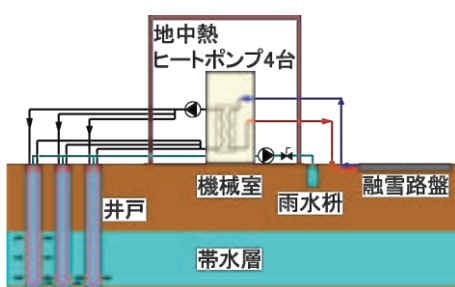


図 3-3-3-4 融雪システムの概要図

井戸は、耐震の関係で融雪箇所から数 10m 離れた場所に深度 104m まで塩ビ製 125A 管を井戸ケーシングとして埋設し、その離隔を 10m とした。そのうち 2 本（本設井戸 1・2）は地面から深度 88~96m に、残りの 1 本（試験井戸）は深度 36~100m に有孔管（横スリット型ストレーナ管（ミサキ製））を使用した。有孔部は定尺 4m の有効管（開口率 8%）を縦に繋いで使用した。採熱管にはいずれも高密度ポリエ

チレン管 25A, ダブル U チューブ型を用い、熱媒として不凍液（プロピレングリコール 40wt%）を封入した。これらの採熱管は、地中に埋設した横引き配管（内側から架橋ポリエチレン管, ウレタン断熱層, 波付きポリエチレン管で構成された 3 層構造の熱導管, 以下熱導管とする）を介して、サンポット社製地中熱ヒートポンプ（10kW×4 台）と並列に接続されている。採熱側の制御は GL から深度 10m の位置の水温を検知することで、揚水ポンプを起動・停止させ、井戸内の地下水を雨水枡に排出する方法を採用した。融雪側の制御は、3 要素制御（運転条件：（外気温）AND（降雪センサ OR 融雪路盤内温度））である。

3) 融雪負荷の算定

過年度のアメダスデータを使って融雪負荷を算定した。路盤温度が -2℃ 以下となる場合にその温度から -2℃ まで予熱する負荷を加えた。図 3-3-3-5 に時刻別の平均融雪負荷を示す。2020 年 12 月~2021 年 2 月における当別町近郊石狩市のアメダスデータを使用した。この結果から、最大融雪負荷を 300W/m² とし、ヒートポンプの必要容量を 47.3kW と算定した。図 3-3-3-6 に融雪負荷の累積頻度を示す。負荷が 50kW 以上となる累積頻度は 2.7% となった。これ以上の融雪負荷の時間帯は町の建設部に手動で除雪を依頼することとした。なお、当別町からのコストダウン要請があり、ヒートポンプの容量を 40kW とし、最大負荷率（出力[kW]/定格容量[kW]）1.3 で運用する計画とした。

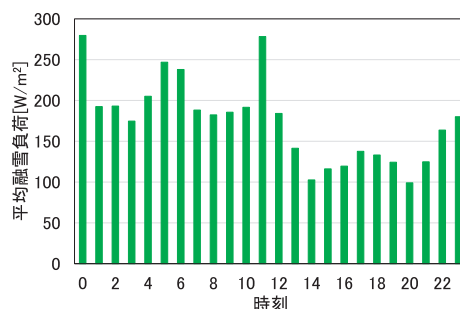


図 3-3-3-5 時刻別の平均融雪負荷

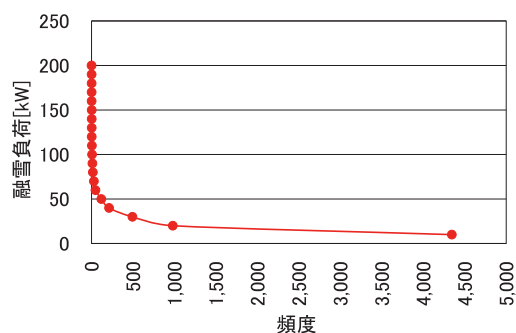


図 3-3-3-6 融雪負荷の累積頻度

4) 当該地における帯水層の予測、設置井戸の検討
 最初に、3.3.1に記載した試験井戸により、近隣の地質情報、柱状図、検層結果から当該地の地質を予測した。近隣の道の駅の柱状図では、深度42～48mの地質は砂、48～66mは砂礫、66～100mは砂礫・粘土互層であった。近隣地で電気検層を実施し、帯水層は上面深度40m、下面深度100m以深で広がっていることがわかった。
 また、3.3.2の採熱試験を実施する際に、近隣の西当別コミュニティセンターで試験井戸を設置して調査した。図3-3-3-7にその総合柱状図を示す。

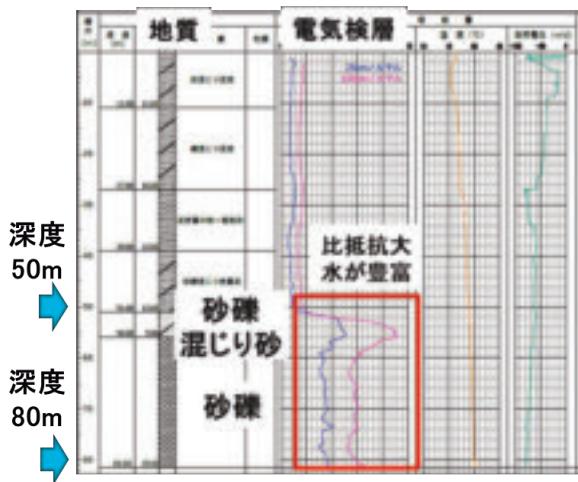


図 3-3-3-7 西当別コミュニティセンター試験井戸の総合柱状図

深度51mから砂礫混じり砂、深度56mから砂礫の層があることがわかった。これらの情報から、近隣のロイズタウン駅前で、40m～100m以深に砂・砂礫層があり、帯水層があると予測した。

5) 採熱設計及び経済性・環境性の試算

ここでは、ロイズタウン駅前歩道融雪システムの採熱部として導入したHC方式について説明する。道総研では、試験井戸での採熱特性(①条件別採熱量、②地下水から採熱管への熱通過率、③周辺土壌への熱損失)を把握し、ロイズタウン駅前融雪システムにおけるヒートポンプのSCOP(システム成績係数、(5)2参照)、放熱量、採熱量を試算した。図3-3-3-8に負荷率に対するSCOP、放熱量、採熱量を示す。これと時系列の負荷から、採熱シミュレーションを実施し、使用電量を求め、経済性・環境性を試算した。

なお、OL方式では、揚水温度・採熱設定温度、揚水流量から採熱量を決定するのが一般的である。次に表3-3-3-4に経済性・環境性の試算結果を示す。BH方式100m12本、HC方式100m3本で採熱す

る地中熱ヒートポンプシステムを灯油ボイラーのみの熱源システムと比較したものである。

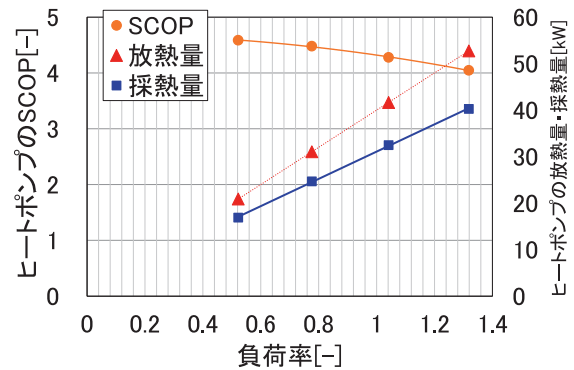


図 3-3-3-8 負荷率に対する SCOP, 放熱量, 採熱量 (ロイズタウン駅前融雪システム)

採熱部分のインシヤルコストに関しては、HC方式はBH方式と比較して3.3.2と同等レベルの大幅なコスト削減となった。しかしながら、線路の耐震性を向上させるため、JR敷地から遠方に井戸を設置する必要あり、横引き配管など井戸以外の部分で大幅なインシヤルコスト増となった。地中熱ヒートポンプも含めた熱源システムとしては、灯油ボイラー利用熱源システムと比較してコスト増大となった。ランニングコストについては、町の設定予算の範囲内で理解が得られた。HC方式の灯油ボイラー導入に対する一次エネルギー消費量、CO₂排出量の削減率はそれぞれ35、45%であり、BH方式よりも省エネ性に優れ、CO₂排出量を削減できると考えられ、設備導入に進むこととなった。

表 3-3-3-4 経済性・環境性の試算結果

評価項目	検討設備		備考
	BH100m 12本導入	HC100m 3本導入	
インシヤルコスト	・HCはBHと比較して大幅なコスト削減 ・灯油ボイラー利用システムと比較してコスト増大	・線路の耐震を確保するため、JR敷地から遠方に井戸を設置する必要あり ・横引き配管など井戸以外で大幅なインシヤルコスト増	
一次エネルギー消費量の削減率[%]	19	35	・ポンプ動力(一次側、二次側、揚水ポンプ)の影響が大きい
CO ₂ 排出量の削減率[%]	32	45	

6) 掘削工事、帯水層評価、井戸仕様調整・井戸工事
 写真3-3-3-2に孔の掘削、電気検層の状況を、図3-3-3-9に掘削井戸の総合柱状図を示す。

深度34m以深は砂・砂礫層、100m近辺は細かい砂の層であることがわかった。図3-3-3-10に各井戸のスクリーン(有孔管)の位置を示す。当初、深度92～100mの位置にスクリーン(井戸の孔)を導入する



孔の掘削 電気検層
写真 3-3-3-2 孔の掘削, 電気検層の状況

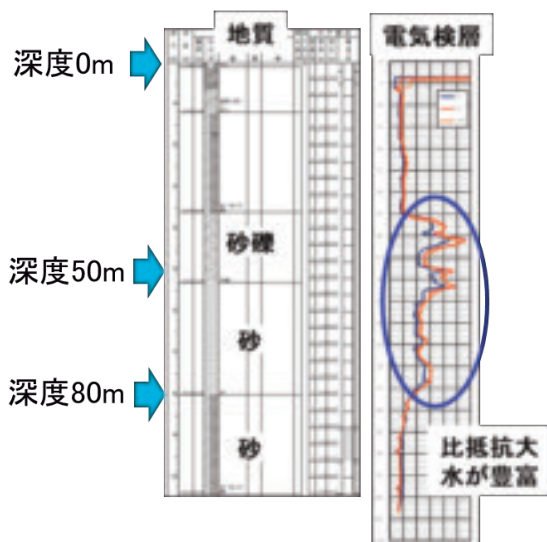


図 3-3-3-9 掘削井戸の総合柱状図

予定であったが、砂が想定以上に井戸内に入り込み堆積することに備え、スクリーンの位置を 4m 上部の 88~96m とした井戸を 2 本設置した。また、将来の井戸の掘削の事前データを得ることも兼ねて、36m 以深をオールスクリーンとする試験井戸を 1 本設置した。この結果、3.3.1 で説明したが、揚水可能な層が 3 層あることを確認した。

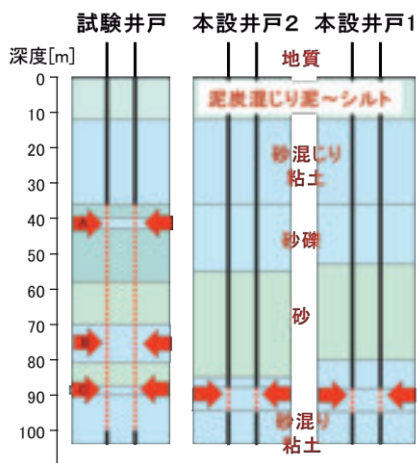


図 3-3-3-10 各井戸の仕様 (赤矢印は揚水位置)

7) 揚水試験・水質検査

太美地区の帯水層は地下に圧力がかかっている被圧水で、今回施工した井戸は全て自噴し、中でも孔の面積が大きい試験井戸の自噴量は 105L/min であった。図 3-3-3-11 に本設井戸 1 における揚水量に対する水位低下量を示す。本試験においては 1 時間毎に揚水量を変え、その際の水位低下を計測した。極端な流量の増加はスクリーンからの砂の混入を招くため、100L/min までの流量で測定した結果、揚水量 100L/min で 0.8m の水位低下となった。急激に水位が低下する量を限界揚水量として定めるが、この流量範囲では、限界揚水量は定まらなかった。HC 方式では管長 100m1 本の井戸管に対し、凡そ 20L/min の揚水が必要であるが、十分な揚水量を確保できることがわかった。

表 3-3-3-5 に本設井戸 1 における 50L/min 揚水時の水質検査結果を示す。採熱後排水する場合は、水質汚濁防止法の排水基準への適合が必要である。表で示した検査項目については、水質汚濁防止法に適合することを確認した。ただし、システム設置の際に、SS (浮遊物質) 成分が多い場合は、ろ過器が必要で、時折清掃が必要である。鉄やマンガンを多く含有する地下水は、酸化 (腐食) するので、使用しないことが推奨される。

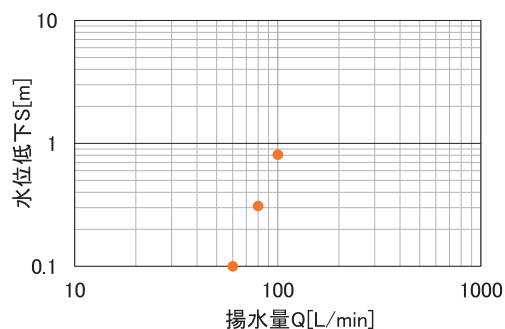


図 3-3-3-11 揚水量に対する水位低下量 (本設井戸 1)

表 3-3-3-5 水質検査結果 (本設井戸 1, 50L/min 揚水時)

水素イオン濃度 (pH)	7.5
浮遊物質 (SS) [mg/L]	11
生物化学的酸素要求量 (BOD) [mg/L]	0.5 未満
窒素含有量 [mg/L]	1.7
リン含有量 [mg/L]	0.53
溶解性鉄含有量 [mg/L]	0.06 未満
溶解性マンガン含有量 [mg/L]	0.27
水温 [°C]	17.6

8) 採熱管・ヒートポンプ設置工事

図 3-3-3-12 に井戸の断面概要図を、写真 3-3-3-3 に採熱管設置状況を、写真 3-3-3-4 に機械室への配管，ヒートポンプの設置状況を示す。HC 方式の場合は採熱管を井戸内に導入する。ここでは，内径 125mm の塩ビ管に 25A の高密度ポリエチレン管を 2 系統導入した。地下水が自噴し，周辺に水が漏水するのを防ぐため，地上部にフランジを設置した。そこから機械室のヒートポンプまでの横引き配管を，熱損失低減のため断熱層がある熱導管で接続した。



図 3-3-3-12 井戸の断面概要図



井戸への採熱管の挿入 井戸へのフランジの接続
写真 3-3-3-3 採熱管設置状況



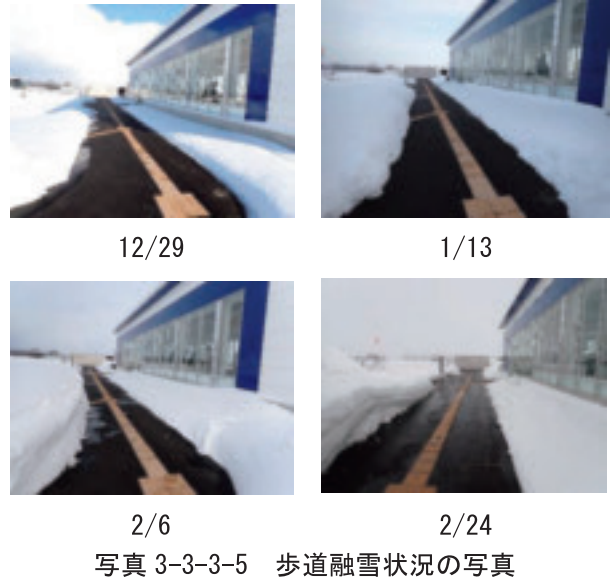
横引き配管の設置 ヒートポンプの設置
写真 3-3-3-4 配管，ヒートポンプ設置の設置状況

(5) ロイズタウン駅前歩道融雪システムの運用

1) 運用状況

写真 3-3-3-5 に歩道融雪状況を，写真 3-3-3-6 に運転状況別の歩道を，図 3-3-3-13 にヒートポンプ（以下，HP）の運転と地表表面・路盤温度の経時変化を示す。

各日も問題なく融雪できているのが確認できる。システムの稼働条件として，町から路面表面温度を 0℃以上とする安全側での運転要請があり，システムの制御は，外気温 8.5℃以下で且つ降雪センサオンまたは地中の路盤温度が 15℃以下となる場



(a) (b) (c)
写真 3-3-3-6 運転状況別の歩道の様子

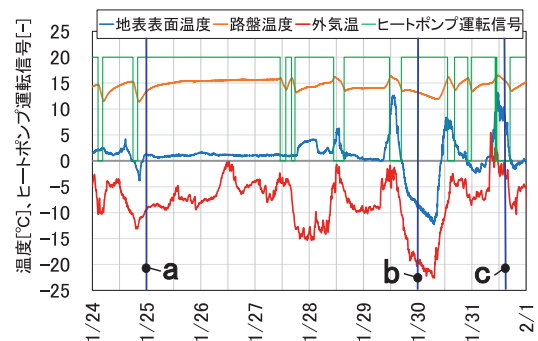


図 3-3-3-13 HP の運転と地表表面・路盤温度の経時変化

- (a) 積雪時， HP 運転 (1/25 0 時)
- (b) 積雪なし， HP 運転 (1/30 0 時)
- (c) 積雪なし， HP 停止 (1/31 15 時)

合に温水供給される仕組みとした。3 月中旬までその運用を行い，その後路盤温度設定を 13℃，11℃と段階的に低下させ，3 月 29 日まで運転した。

ヒートポンプの運転パターンは，3 つに分けられる。積雪があり，路盤温度が低い時にヒートポンプ

が稼働する（写真 3-3-3-6(a), 図 3-3-3-13(a)）。積雪はないが、外気温が低くかつ路盤温度が低い時に HP が運転する（写真 3-3-3-6(b), 図 3-3-3-13(b)）。積雪がなく、路盤温度が高い時に HP が停止する（写真 3-3-3-6(c), 図 3-3-3-12(c)）。(a)の時は、ヒートポンプの運転により、地表表面温度が 0℃をやや上回っている。(c)の時は、日射があり、地表表面温度が高く、HP が停止している。このように多くの時間帯で概ね適切な運転である。一方、(b)の時は、積雪がなく、外気温が低い場合に、積雪による断熱効果がないため、放熱量が大きくなる課題がある。しかし、路盤は一定の熱容量があり、温度変化に時間を要するため、急な大雪に対応できるよう温度維持のための予熱運転も必要である。

2) 運用評価

表 3-3-3-6 に運用評価で使用した計測内容を示す。測定間隔は 1 分とし、シーズン中連続計測した。採熱管の熱交換量、放熱側の放熱量はそれぞれ式 3-3-3-1, 式 3-3-3-2 で、ヒートポンプの出力, COP (成績係数), システムの COP (SCOP) を式 3-3-3-3, 式 3-3-3-4 で求めた。

表 3-3-3-6 運用評価で使用した計測内容

評価内容	測定項目	測定器
採熱管(地中からの)採熱量	採熱管地中行き温度、還り温度(各井戸でそれぞれ測定)	測温抵抗体
	採熱管内を循環する不凍液の流量	容量式流量計
ヒートポンプの出力、COP、SCOP	ヒートポンプから二次側架橋ポリエチレンパイプの行き・還り温度	測温抵抗体
	ヒートポンプの二次側を循環する水の流量	電磁流量計
	ヒートポンプ、循環ポンプ、揚水ポンプの使用電力量	電力量計
その他	井戸内水温(深度10、50、80、92m)、外気温、地表表面温度、路盤温度	測温抵抗体
	HP運転信号	ヒートポンプ
	降雪の有無	降雪センサ

$$Q_c = C_p \times \rho \times f_c \times (T_{c, out} - T_{c, in}) \quad (式 3-3-3-1)$$

$$Q_o = C_p \times \rho \times f_o \times (T_{o, out} - T_{o, in}) \quad (式 3-3-3-2)$$

$$COP_{HP} = \sum_{n=1}^e ((Q_o / 60) / (E_{HP} / 60)) \quad (式 3-3-3-3)$$

$$SCOP_{HP} = \sum_{n=1}^e ((Q_o / 60) / ((E_{HP} + E_{CP} + E_{PP}) / 60)) \quad (式 3-3-3-4)$$

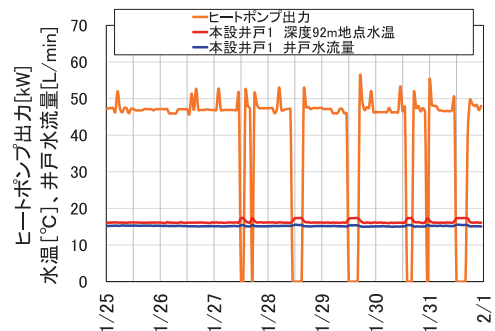
※ Q : 採熱管の採熱量・ヒートポンプの出力[kW], C_p : 熱媒(不凍液)の比熱[kJ/(kg·K)], ρ : 熱媒(不凍液)の密度[kg/L], f : 熱媒(不凍液)の循環流量[L/s], T : 温度[K], e : 積算時間[min], COP: ヒートポンプの成績係数[-], SCOP: システムの成績係数[-], E : 電力量[kWh/min]

添え字: in: 行き, out: 還り, c: 採熱, o: 放熱, HP: ヒートポンプ, total: 全体量, CP: 循環ポンプ, PP: 揚水ポンプ, output: 出力

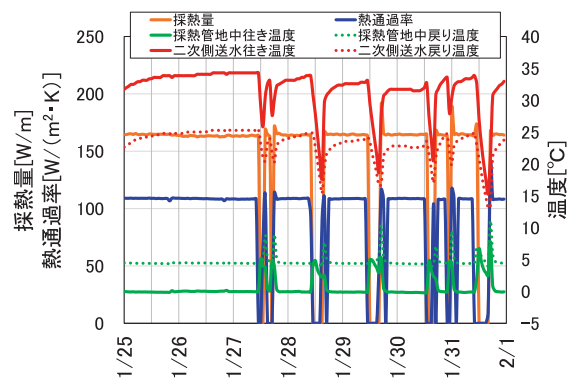
① 本設井戸 1 の採熱量等の経時変化

図 3-3-3-14 に本設井戸 1 における各データの経時変化を示す。ヒートポンプの出力は定格 40kW に

対して、多くの時間帯において負荷率 1.2 で運転された。町の要請でヒートポンプ台数を減少させたが、本来は定格以下の負荷で運転できることが望ましい。井戸は試験期間中平均流量 15.1L/min で常時自噴している(本設井戸 2, 試験井戸ではそれぞれ平均 17.3, 19.0L/min で自噴)。その採熱時の水温は、地面から深度 92m 地点で約 16℃であるが、採熱していない時間帯は約 17℃まで回復しており、17℃の井戸水が得られているとして良いと考えられる。ヒートポンプ運転時の平均採熱量は、地面から垂直方向の長さに対して 164W/m 得られている。ただし、同じ時間帯で計測した本設井戸 2 の平均採熱量は 130W/m, 広範囲にスクリーンが導入されている試験井戸の平均採熱量は 108W/m であった。試験井戸では、スクリーン面積が広く、井戸下方部から地下水が引き込まれにくいこと、採熱管の温度計測用のセンサ(測温抵抗体)は一様に機械室に設置されているが、採熱管の機械室までの横引き配管が本設井戸 1・2・試験井戸の順に井戸の離隔分だけ 10m ずつ遠く、熱損失の影響があると考えると整合できる。



(a) HP の出力, 井戸内水温, 井戸の流量



(b) 採熱量, 採熱管の熱通過率

図 3-3-3-14 本設井戸 1 の各データの経時変化

② 本設井戸 1, 試験井戸の水温の経時変化

図 3-3-3-15 に本設井戸 1, 試験井戸の水温の経時変化を示す。本設井戸 1 において、各地点の水温は、

地面から92m地点が最も高く、上部に水が移動し、採熱されるに従って温度が低下した。また、どの地点においても、井戸の自噴により常時11℃以上を維持している。一方、試験井戸においては、地面から深度50m地点において水温が最も高く、地面から深度80m、92m地点の水温は低い。微流速検層結果3)から、36mから100mまでスクリーンが導入されている試験井戸では、少なくとも半分以上の水が井戸の上部層から流入するものと考えられる。なお、一定期間採熱しない状態を維持すると、計測したこの水温も16℃程度まで上昇し、温度が回復することが確認できた。

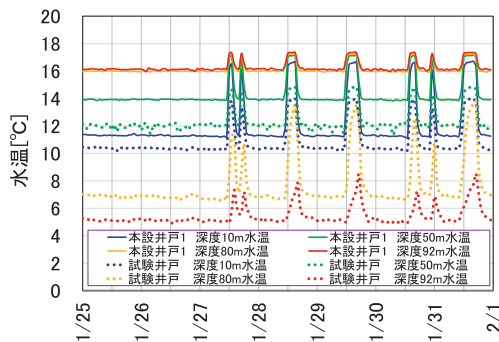


図 3-3-3-15 本設井戸 1, 試験井戸水温の経時変化

③ ヒートポンプの SCOP と揚水制御温度のチューニング

12月16日から1月14日にかけて、条件を変えてヒートポンプを運転し、揚水量を最小限にしながら省エネルギー性を確保する条件を模索した。

表 3-3-3-7 に運転条件を示す。ここで平均揚水量は自噴量を差し引いて算出しており、運転 No. 1 は自噴である。運転 No. 1~5 では、揚水温度の最適化を目的に3本の井戸から採熱した。運転 No. 6~8 では、井戸の限界採熱能力の把握を目的に本設井戸 2 本、またはそれぞれ本設井戸 1 本の井戸から採熱した。ヒートポンプの放熱側の循環水行き温度は33~35℃程度であった。

図 3-3-3-16 に運転 No. 1 におけるヒートポンプの COP(期間積算温水出力[kWh])/ヒートポンプの積算電力使用量[kWh]), SCOP (期間積算温水出力[kWh])/ヒートポンプ及び採熱側・放熱側の循環ポンプ、揚水ポンプの合計積算電力使用量[kWh]), ヒートポンプの瞬時出力の経時変化を示す。また、表 3-3-3-8 に揚水条件と平均揚水量, 期間平均 COP・SCOP を示す。

期間平均 COP・SCOP はヒートポンプの運転開始時に高くなる傾向にあるが、これはヒートポンプの停止時に井戸内の温度が回復するためと考えられる。

表 3-3-3-7 運転条件

運転No.	試験目的	揚水井戸	揚水条件 (各井戸 水深10m)	平均揚水量 [L/min]	備考	
1	揚水温度の最適化	試験井戸 本設井戸1 本設井戸2	9±1℃	0.0		
2			11±1℃	5.1		
3			試験井戸 11±1℃ 本設井戸1・2 12±1℃	9.6		
4			試験井戸 11±1℃ 本設井戸1・2 13±1℃	29.1		
5			13±1℃	90.3	試験井戸連続運転	
6	井戸の限界採熱能力の把握	本設井戸1 本設井戸2	11±1℃	8.9		
7			本設井戸1	11±1℃	16.1	
8			本設井戸2	11±1℃	27.4	

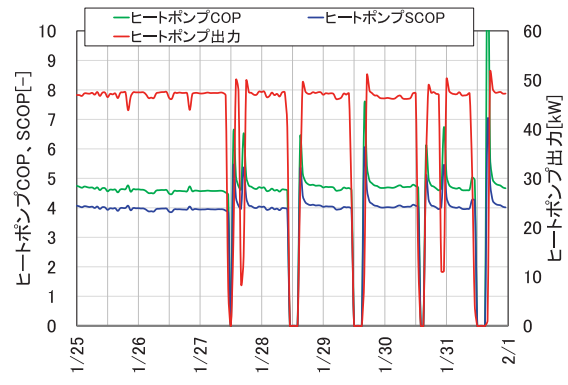


図 3-3-3-16 ヒートポンプの COP, SCOP, 出力の経時変化 (運転 No. 1)

各井戸の地面から深度 10m の揚水制御温度条件を13℃とすると、揚水量が増加する。それに伴い、期間平均 COP, 平均採熱量, 平均出力は増加傾向にあるが、期間平均 SCOP は、揚水ポンプ動力の増加により低下する。一方、井戸水深 10m の揚水制御温度を9℃とし、自噴する地下水のみを熱源とした運転 No. 1 と運転 No. 2-4 (揚水して運転) の SCOP に大きな差異は認められない。水資源を効率よく利用する観点から、1月14日以降 No. 1 の条件で運転した。

表 3-3-3-8 揚水条件と平均揚水量, 期間平均 COP・SCOP

運転 No.	揚水条件 (各井戸 水深10m)	平均揚水量 [L/min]	期間平均 COP[-]	期間平均 SCOP[-]	平均採熱量 [W/m]	平均放熱量[kW]
1	9℃	0.0	4.7	4.1	133	47.7
2	11℃	5.1	4.9	4.2	139	49.0
3	試験井戸 11℃ 本設井戸1・2 12℃	9.6	4.9	4.2	140	49.2
4	試験井戸 11℃ 本設井戸1・2 13℃	29.1	5.0	4.2	142	50.7
5	13℃	90.3	4.8	3.8	143	50.4

表 3-3-3-9 に本設井戸 1・2 での運転, 本設井戸 1 本のみで運転した場合の揚水温度条件と平均揚水量, 期間平均 COP・SCOP を示す。運転 No. 6-8 においては、表 3-3-3-7 の No. 2 と比較して 1 本の井戸に必

要な熱容量が増加するため、平均揚水量は増加した。一方、HPの採熱温度が低下するため、期間平均COP・SCOPは低下した。特にNo.7-8はNo.1-5と比較して平均採熱量が大幅に増加したが、採熱温度が低下し、HPの定格出力に必要な採熱量が得られないため、平均放熱量は減少した。運転No.6はNo.2と比較して期間平均SCOPはやや減少したものの、施工コスト低減のために井戸本数を減少させる場合は、許容される運転条件と考えられる。

表 3-3-3-9 揚水温度条件と揚水量，期間平均COP・SCOP

運転No.	揚水制御条件 (各井戸水深10m)	平均揚水量 [L/min]	期間平均 COP[-]	期間平均 SCOP[-]	平均採熱量 [W/m]	平均放熱量[kW]
6	本設井戸1+2 11℃	8.9	4.6	3.9	183	44.5
7	本設井戸1 11℃	16.1	3.9	3.3	275	35.6
8	本設井戸2 11℃	27.4	3.8	3.3	276	35.4

表 3-3-3-10 に灯油ボイラーを導入するシステムに対する各項目の削減率と投資回収年数について、12月16日から3月29日までの実績値を示す。コスト関連の数値は道総研の試算値である。灯油ボイラーにおいても、地中採熱システムと同様の計装システムを導入し、三要素制御をすると仮定している。

本システムでは、路面の表面温度を0℃以上の安全側で運転したため、負荷が多く、現実的な投資回収年数で導入できた。また、日射の影響でシステムが停止し、路盤を予熱しない時間があり、予測値よりも高い一次エネルギー、CO₂削減効果が得られた。HC方式（地下水利用方式）の採用により、ランニングコスト・一次エネルギー・CO₂を大幅に削減することができた。

表 3-3-3-10 灯油ボイラーに対する各項目の削減率

項目	BH方式 (試算値)	HC方式 (実績値)
ランニングコスト削減率[%] (電力会社の基本料金を含む)	32	44
投資回収年数[年] (メンテナンス費を除く)	9.0	6.6
一次エネルギー消費量削減率[%]	30	51
CO ₂ 排出量削減率[%]	40	59

ボアホール型のSCOP=3.0（実験値）、ヒートクラスター式におけるHPのシーズンSCOP=4.1、灯油ボイラーの熱効率0.8[-] 電力の一次エネルギー換算係数9.76[GJ/1000kWh]^[10]、CO₂排出係数 電力：0.549[kg-CO₂/(受電端) kWh]^[11] 灯油：0.0678[kg-CO₂/MJ]^[12]

(6) まとめ

地下水熱を利用した採熱システムとその導入プロセスについて、ロイズタウン駅前融雪システムをケーススタディとして説明した。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 地下水熱の導入にあたっては、事前に周辺地域の地質情報、ボーリングデータ等の情報を収集・分析することが肝要である。
- 2) 地下水熱を活用することで、より多くの採熱量が得られ、従来方式より掘削本数を削減できる（導入コスト削減）。ただし、排水工事等でもコストが発生するので、それも念頭に計画を進める必要がある。
- 3) 自噴する地下水のみを熱源とした運転と揚水制御温度を数℃上昇させて揚水した運転の期間平均SCOPに大きな差異は認められず、地下水の揚水量低減の観点から自噴のみの運転を選択した。
- 4) 地下水利用方式は灯油ボイラー利用方式に対して、高いシステム効率により、ランニングコスト・一次エネルギー・CO₂を大幅に削減できる。

[引用文献等]

- [1] 『熱交換システム』. 特許第6039856号
- [2] 大西豊ほか. “既設井戸を水源及び熱源として活用したハイブリッドシステムの研究(第1報), (第2報) 築150年超の明日香村古民家の宿泊施設改修事例”. 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集. vol.2. 77-84. (2023)
- [3] 特定非営利活動法人地中熱利用促進協会, 一般社団法人 全国さく井協会. 『地中熱ヒートポンプシステムオープンループ導入ガイドライン第1版』. WEB ページ. (2017). http://www.geohpaj.org/wp/wp-content/uploads/openloop_guide01.pdf (アクセス日 2023. 12. 10)
- [4] 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人 建築研究所. 『エネルギー消費性能計算プログラム(非住宅版)』. WEB ページ. <https://building.lowenergy.jp/> (アクセス日 2023. 12. 10)
- [5] 国土交通省国土技術政策総合研究所国立研究開発法人 建築研究所, 『住宅に関する省エネルギー基準に準拠したプログラム』. WEB ページ. <https://house.lowenergy.jp/> (アクセス日 2023. 12. 10)
- [6] (一財)住宅・建築SDGs推進センター. 『The BEST Program®』. WEB ページ.

https://ibec.or.jp/best/#chosakuken_shohyo
o (アクセス日 2023. 12. 10)

- [7] 北海道融雪工業会. 『融雪技術ガイドライン (改訂版)』. (1999)
- [8] 国土交通省国立研究開発法人土木研究所, 国立研究開発法人港湾空港技術研究所. 『国土地盤情報検索サイト』. WEB ページ.
<https://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/> (アクセス日 2023. 12. 10)
- [9] (一社) 全国さく井協会北海道支部. 『北海道水井戸データベース』. WEB ページ.
<http://133.125.34.42:8080/login> (アクセス日 2023. 12. 10)
- [10] 『エネルギー使用量(原油換算値)簡易計算表』. 資源エネルギー庁.
- [11] 北海道電力株式会社. 『2021 年度の CO₂ 排出実績について (暫定値)』. WEB ページ.
https://www.hepco.co.jp/corporate/environment/global_warming/results_co2.html (アクセス日 2022. 11. 01)
- [12] 環境省. 『温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧』.
WEB ページ https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf (アクセス日 2023. 12. 08)

研究担当機関：エネルギー・環境・地質研究所
執筆者：白土 博康

3.3.4 熱エネルギーネットワークシステムの概要と施設への適応試算例

本項では、地下水熱を面的に活用する地域熱エネルギーネットワークシステムの考え方を示すとともに、隣接する複数施設へ導入する場合の試算例について説明する。

(1) 地域熱エネルギーネットワークシステムの提案

図 3-3-4-1 に提案する地下水熱を利用した地域熱エネルギーネットワークシステムを示す。連続する帯水層を一種の熱導管（熱媒体を輸送する管）に見立て、地上施設のヒートポンプ冷暖房システムの熱源として活用する。この方式は集中熱源システムで温水を発生させ、熱導管を地下に埋設して循環ポンプで温水を各施設に送水する従来方式に対して、熱導管の導入コスト、温水搬送動力の削減という大きなメリットがある。一方、地域で大量の揚水・自噴する地下水を用いる場合の持続的な水量は、これまでの文献で得られた周辺の地質情報を用いてシミュレーションすることも可能であるが、井戸と井戸の間の地質情報は推定の域を出ず、精度が担保できない。このため、地下水位等をモニタリングしながら、段階的に面的利用を推進することで、持続可能なシステムを構築することが重要である。

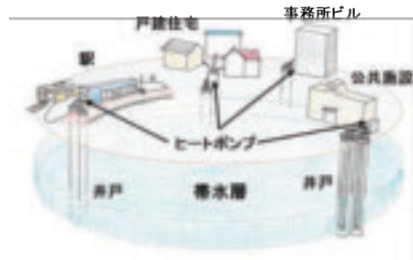


図 3-3-4-1 地下水熱を利用した地域熱エネルギーネットワークシステム

一方、ロイズタウン駅前融雪システムで導入した井戸（管長 104m、内径 125mm）では、1 本あたり採熱量として 15kW、出力として 20kW 程度が得られ、一住宅の暖房熱需要を鑑みると容量が大きい。このため、一つの井戸を共同で使用し、複数の住宅の暖房熱需要を賄う共同井戸モデルを検討した。

(2) 家庭用ルームエアコンの性能評価

共同井戸モデルを検討するにあたって、灯油ボイラーとの比較だけでなく、近年北海道でも導入数が

増加している空気熱ヒートポンプの性能も確認し、比較検証する必要がある。

ここでは(3)で検討する複数住宅への共同井戸モデルを提案するにあたり、A社の寒冷地用家庭用ルームエアコン（以下エアコン、暖房能力 2.8kW）を評価した。

1) 評価方法と試験項目

図 3-3-4-2 にエアコンの性能試験の模式図を示す。道総研工業試験場内に設置されている 2 つの環境試験室（恒温恒湿室、輻射暖房試験室）のうち、輻射暖房試験室に室内機を、恒温恒湿室に室外機を設置し、両者を断熱被覆された冷媒配管（銅管、冷媒は R32）で接続した。次に、輻射暖房試験室の壁温度を所定温度に、恒温恒湿室内空気を所定温湿度に設定して制御し、試験エアコンを暖房モードで稼働させた。輻射暖房試験室の空気温湿度は成り行きである。

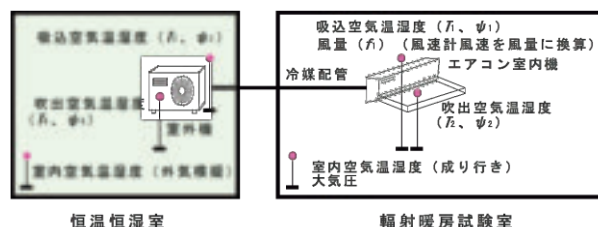


図 3-3-4-2 エアコン性能試験の模式図

表 3-3-4-1 に測定項目を示す。室内機のエアコン吸込、吹出温度、湿度、吸込風速は、測定精度の維持のため、それぞれ 2 箇所ずつ測定した。

表 3-3-4-1 測定項目

測定場所	内容	計測器	単位	備考
室内機 (輻射暖房試験室内)	室内機吸込・吹出温度	測温抵抗体	℃	2箇所測定
	室内機吸込・吹出湿度	湿度センサ	相対湿度%	
	消費電力	電力計	W	
輻射暖房試験室	代表室内空気温度	測温抵抗体	℃	
	代表室内空気湿度	湿度センサ	相対湿度%	
室外機 (恒温恒湿室内)	室外機吸込・吹出温度	測温抵抗体	℃	
	室外機吸込・吹出湿度	湿度センサ	相対湿度%	
恒温恒湿室	代表室内空気温度	測温抵抗体	℃	
	代表室内空気湿度	湿度センサ	相対湿度%	
風速計	室内機吸込風速(風量)	風速計	m/s	室内機吸込部を2箇所測定。風量計で検定。
各試験室近傍	大気圧	気圧計	kPa	
輻射暖房試験室	放射パネル不凍液入口・出口温度	T熱電対	℃	
	放射パネル不凍液各系統流量	流量計	L/min	

恒温恒湿室内空気温湿度、輻射暖房試験室の壁温度、空気温度、エアコンの室内機、室外機の吸込、吹出温湿度、消費電力が 30 分以上一定となった後、室内機側で大気圧、吸込・吹出空気の温湿度データから吸込、吹出空気の保有エンタルピーを算出した。

次に、吸込、吹出空気のエントルピー差と風量から出力を算出（10s 毎計測）した。10 分間の定常状態での SCOP を式 3-3-4-1、3-3-4-2 で算出（※デフロスト状態は含まない）した。

$$\text{※} Q = (h_2/v_2 - h_1/v_1) \times f_1 / 3600 \quad (\text{式 3-3-4-1})$$

$$\text{SCOP} = \Sigma Q \Delta t / \Sigma P \Delta t \quad (\text{式 3-3-4-2}) \quad (\text{※} \Delta t = 10\text{s})$$

Q : 出力[W], h : 空気の保有比エンタルピー[kJ/kg], v : 空気の比容積[m³/kg], f : 吹出風量[m³/h], P : 投入電力[W]

添え字 1: 室内機吸込空気, 2: 室内機吹出空気, 3: 室外機吸込空気, 4: 室外機吹出空気

2) 試験条件

表 3-3-4-2 に性能試験時における室外機側吸い込み設定温度条件を示す。室外機側吸い込み設定温度条件は、JIS C9612^[1]を参考に 15℃～-20℃までの 6 点とした。エアコンの負荷率（エアコンの平均出力[kW]/エアコンの定格出力[kW]）を輻射暖房試験室壁の通水温度等をパラメータとして 4 種類設定した。この際、輻射暖房試験室内の空気温度は成り行きである（19.4～24.5℃）。室内機の風量はリモコンで操作できる最大値とした。

表 3-3-4-2 室外機側吸い込み設定条件

試験No.	乾球温度 [°C]	湿球温度 [°C]	湿度 [%]	備考
1	15.0	9.8	51	試験No.2と同等の絶対湿度
2	7.0	6.0	87	
3	2.0	1.0	84	
4	-7.0	-	-	
5	-15.0	-	-	
6	-20.0	-	-	

3) 試験結果

図 3-3-4-3 に負荷率に対する SCOP を示す。室外機吸い込み空気温度が 7℃、15℃の時は、負荷率に対し山なりのカーブが描かれ、SCOP が最大になる負荷率がある。室外機が 2℃以下で SCOP が 2 を下回る結果となり、エアコンの冷媒温度が低いことやデフロスト防止ヒータ作動等の影響があると考えられる。

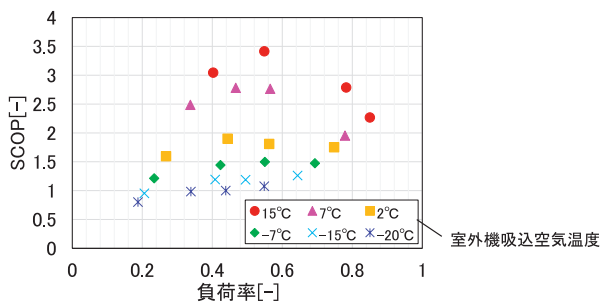


図 3-3-4-3 負荷率に対する SCOP

(3) 共同井戸モデルの概要と計算内容

1) 共同井戸モデルの概要

図 3-3-4-4 に検討した共同井戸モデルを示す。地域の建設・熱源供給企業が所有する土地の一部に 80m の井戸を 1 本設置し、地下水熱利用方式（ヒートクラスター方式）で採熱管を導入し、10kW のヒートポンプ 2 台を並列接続する。残りの土地を 3 分割して分譲し、そこに住宅を建設して販売する。冬期はヒートポンプで得られた温水を熱導管で住宅に供給する熱源システムの集中管理方式とした。各住宅に計量検定された熱量計を設置し、熱量単価×使用した熱量分の金額を建設・熱源供給企業が各住宅の居住者に請求する仕組みである。

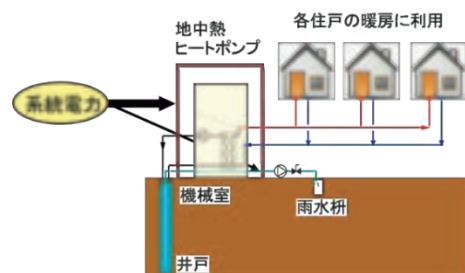


図 3-3-4-4 検討した共同井戸モデル

2) 熱源方式

表 3-3-4-3 に比較する熱源方式を示す。各戸に灯油ボイラーを設置するケース A、家庭用ルームエアコンを設置するケース B、敷地内にボアホールを設置して、地中熱ヒートポンプを稼働するケース C と上記のヒートクラスター式（ケース D）を比較した。熱源システムから温水を出力するケース A、C、D には放射パネルを設置することとし、温水循環ポンプがシミュレーション期間中常時稼働することとした。各システムの導入価格は令和 5 年度における当別での市場価格を想定して設定している。

表 3-3-4-3 比較する熱源方式

ケース	熱源	熱源システム	備考
A	灯油	灯油ボイラー	各戸に灯油ボイラーを設置
B	電気（空気熱）	家庭用ルームエアコン	1軒にA社製暖房容量2.8kWを4台設置
C	電気（地中熱）	深度100mのボアホール5本を設置	地中熱ヒートポンプ
D	電気（地下水熱）	ヒートクラスター方式深度80mの井戸1本を設置	長府製作所製地中熱ヒートポンプ10kWを2台設置

※ケースA・C・Dの出力側には放射パネルを設置

3) モデル住宅の仕様とシミュレーションフロー

表 3-3-4-4 にモデル住宅の仕様とシミュレーションの条件を示す。モデル住宅の仕様は 3 軒とも同じとした。延べ床面積 109m² とし、外皮性能を示す UA

値は $0.34\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (高断熱仕様) とした。換気回数は 0.5 回/h とした。シミュレーション期間は、令和 2 年 11 月 1 日から令和 3 年 4 月 30 日、時間ステップは 1 時間毎とした。外気温湿度設定値は西当別小学校での計測値を使用し、室内の温度設定値は 24 時間 $22^\circ\text{C}40\%$ 一定に維持するとした。

表 3-3-4-5 にケース B, C, D におけるシミュレーションフローを示す。また、図 3-3-4-5 に 3.3.2 の西当別コミュニティセンターで得られたヒートポンプの負荷率に対する成績係数 (SCOP, 1 時間あたりの出力の積算値 [kWh]/1 時間あたりの積算電力量 [kWh]) を示す。

表 3-3-4-4 モデル住宅仕様とシミュレーション条件

項目	設計値
外皮面積[m ²]	261.1
UA値[W/(m ² ·K)]	0.34
外皮負荷[W/K]	88.8
延べ床面積[m ²]	108.89
全体容積[m ³]	252.8
換気回数[回/h]	0.5
換気負荷[m ³ /h]	126.4
暖房時の室内の設定温湿度	22°C、40RH%
暖房期間	11月~4月
外気の設定温湿度	当別町太美地区 (西当別小学校)
シミュレーションの時間ステップ	1時間

シミュレーションフローは、以下のとおりである。エアコンまたはヒートポンプの容量と暖房熱需要量から負荷率を算定する。負荷率は熱需要量を 1 時間あたりの定格のエアコンまたはヒートポンプの出力で除する。次に、その負荷率に対応するエアコンまたはヒートポンプの SCOP から 1 時間あたりの電力量を算出する。

ケース B(エアコン)においては、室外機吸い込み空気温度は外気温度とみなし、負荷率と外気温度を説明変数、SCOP を目的変数として多変量解析を実施し、負荷率と外気温度に対するエアコンの SCOP を求めた。ケース D(地下水利用地中熱ヒートポンプ)においては、地下水が井戸内に挿入されてから地上に放出される熱量に対する採熱量 (地下における熱損失) を一定と仮定した。負荷率 0.5 以下の SCOP は一定 (0.5 と同じ) とした。

ケース A の灯油ボイラーは熱効率 0.8 (低発熱量基準) とし、期間全体の熱需要から消費される灯油使用量を算出した。ケース C については、3.3.2 の基礎試験時の結果 (西当別コミュニティセンター) から、ヒートポンプの負荷率に関わらず、SCOP=3.0 とし、表 3-3-4-5 のフローにより計算した。なお、ケース A・C・D では、放熱側に放射パネルを設置し

ており、循環ポンプ(消費電力 105W)を期間中連続して稼働させる。

次に表 3-3-4-6 に示す電力料金契約、灯油料金の設定により、各ケースによる電力料金、灯油料金を算出した。電力料金は北海道電力株式会社が 2023 年 6 月に改正した料金体系による。

さらに電力使用量と灯油使用量に所定の原単位を掛けることで、各ケースにおける一次エネルギー使用量、CO₂排出量を算出した。電力の一次エネルギー換算係数は 9.76 [GJ/1000kWh]^[2]、電力の CO₂ 排出係数は 0.535 [kg-CO₂/(受電端) kWh]^[3]、灯油の CO₂ 排出係数は、 0.0678 [kg-CO₂/MJ]^[4] とした。

表 3-3-4-5 シミュレーションフロー (ケース B・C・D)

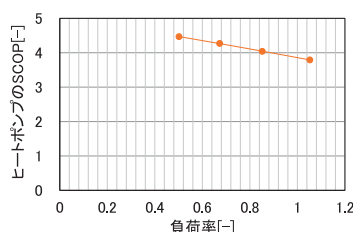
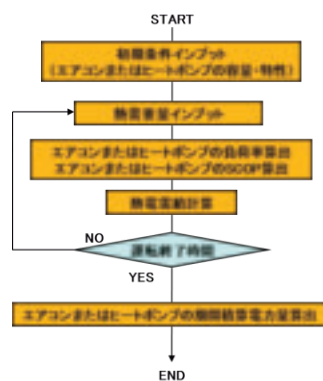


図 3-3-4-5 ヒートポンプの負荷率に対する SCOP

表 3-3-4-6 電力料金契約、灯油料金の設定

ケース	電力料金の契約	電力料金に関する計算の考え方	灯油料金
A	北海道電力 個人用電力料金 従量電灯Bを使用	灯油ボイラーに使用する家庭用電力の基本料金は加算しない 定格運転時の放熱側循環ポンプ消費電力105W	130円/L
B		エアコン使用による契約電力 30A積み増し (20A→50A)	
C	北海道電力 エネ特動力プラン 主開閉器契約14kW	定格運転時の放熱側循環ポンプ消費電力105W	
D			

(4) 計算結果

1) 熱需要

図 3-3-4-6 に一軒 1 時間あたりの熱需要の経時変化を示す。シーズン全体の 1 軒あたりの暖房負荷は $40,057\text{kWh}$ であった。

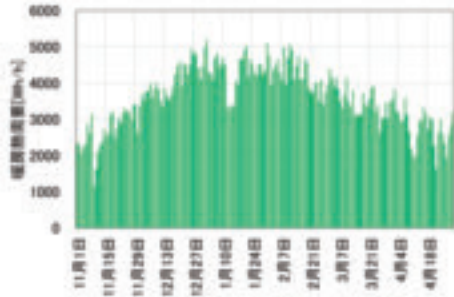


図 3-3-4-6 一軒あたりの熱需要の経時変化

2) 経済性

表 3-3-4-7 に方式別のイニシャル・ランニングコスト(3軒合計)の比較を示す。各イニシャルコストには、配管・放射パネル工事費等を含む。ここでコスト回収年数とは、方式別のイニシャルコストの差額を年間のランニングコストの差額で除したものである。補助金とは当別町が採択を受けた環境省の重点加速化補助金(地中採熱, ヒートポンプ,)を指す。

ケース A (灯油ボイラー使用) と D (地下水熱利用ヒートポンプ) のシーズンのイニシャルコスト, ランニングコストの差はそれぞれ 538.2 万円, 13.1 万円であり投資回収年数は, 40 年以上かかるが, 補助金の活用(地中採熱部, ヒートポンプの設置補助率 2/3, 放射パネルの設置補助率 1/2)により, イニシャルコストはケース D の方が 41 万円安価となる。同様にケース B (エアコン使用) と D のシーズンのイニシャルコスト, ランニングコストの差はそれぞれ 717.3 万円, 44.0 万円であり, 投資回収年数は 16.3 年かかるが, 補助金の活用でケース D のイニシャルコストは 234.7 万円となり, ケース B に対する投資回収年数は 5.3 年となる。以上のように帯水層利用ヒートポンプシステムは, 経済性が高いシステムであることがわかった。一方, 補助金がなければ, 経済性の担保は難しいため, 補助金の獲得は重要である。例として, 引用文献に補助金リストを記載した WEB ページ^[5]を記載するので, ご参照いただきたい。補助金の補助率や電力料金単価の変動により, 投資回収年数は変化することに留意が必要である。

地中熱利用ボアホール方式(ケース C)は, ケース D と比較して, 地下水が得られる帯水層が深い場合や一軒単独で導入するなどの場合にも対応可能であるが, 2023 年 6 月に改正された北海道電力株式会社の電気料金を用いると, 灯油ボイラーとの比較では, 経済的メリットが得られず, エアコンとの比較でも投資回収年数が長い(17.6 年)。

表 3-3-4-7 方式別イニシャル・ランニングコスト

イニシャルコスト	ケースA(灯油ボイラー)	灯油ボイラー[万円]	396
	ケースB(AC)	家庭用エアコン(寒冷地仕様)[万円]	217
ケースC(BH)	地中熱交換器(100m 4本)[万円]	1,791	
ケースD(HC)	帯水層利用井戸(80m 1本)[万円]	934	
ランニングコスト	ケースA 効率0.8	必要灯油熱量[MJ]	180,256
		シーズン灯油料金[万円](130円/L)	67.7
		必要電気量[kWh]	456
		シーズン電気料金[万円]	1.8
	合計ランニングコスト[万円]		69.5
	ケースB(AC) SCOP=1.8	必要電気量[kWh]	22,348
		シーズン電気料金[万円]	100.3
	ケースC(BH) SCOP=3.0	必要電気量[kWh]	16,393
シーズン電気料金[万円]		67.3	
ケースD(HC) SCOP=4.1	必要電気量[kWh]	12,876	
	シーズン電気料金[万円]	56.4	

3) 環境適合性

表 3-3-4-8 に各方式の一次エネルギー使用量, CO₂ 排出量と, 帯水層利用方式(ヒートクラスター方式)の他の方式に対する削減率を示す。帯水層利用方式は, 灯油ボイラー個別設置に対して, 一次エネルギー使用量削減率 32%, CO₂ 排出量削減率 45%, エアコン個別設置に対して, 一次エネルギー使用量削減率, CO₂ 排出量削減率がいずれも 42%となり, 環境適合性にも優れていることがわかった。

表 3-3-4-8 帯水層利用方式(ヒートクラスター方式)の一次エネルギー使用量, CO₂ 排出量, 他の方式に対する削減率

ケースA (灯油ボイラー) 効率0.8	シーズン一次エネルギー使用量[MJ]	184,707
	シーズンCO ₂ 排出量[kg-CO ₂]	12,465
ケースB(AC) SCOP=1.8	シーズン一次エネルギー使用量[MJ]	218,117
	シーズンCO ₂ 排出量[kg-CO ₂]	11,956
ケースC(BH) SCOP=3.0	シーズン一次エネルギー使用量[MJ]	159,996
	シーズンCO ₂ 排出量[kg-CO ₂]	8,770
ケースD(HC) SCOP=4.1	シーズン一次エネルギー使用量[MJ]	125,671
	シーズンCO ₂ 排出量[kg-CO ₂]	6,889
ケースAに対するケースDの一次エネルギー使用量削減率[%]		32.0
ケースAに対するケースDのCO ₂ 排出量削減率[%]		44.7
ケースBに対するケースDの一次エネルギー使用量削減率[%]		42.4
ケースBに対するケースDのCO ₂ 排出量削減率[%]		42.4

(5) まとめ

地下水熱を面的に活用する地域熱エネルギーネットワークシステムの考え方を示すとともに, 隣接する複数施設へ導入する場合の試算例を示した。地下水水位等のモニタリングをしながら, 少しずつ導入事例を増加させること, 導入には適切な補助金を活用することが重要である。

[引用文献等]

[1] (一財)日本規格協会. 『ルームエアコンディショナ』. JIS C9612. (2013)

- [2] 『エネルギー使用量(原油換算値)簡易計算表』。資源エネルギー庁
- [3] 北海道電力株式会社. 『2022 年度の CO₂ 排出実績について (暫定値)』。WEB ページ. https://www.hepco.co.jp/corporate/environment/global_warming/results_co2.html (アクセス日 2023.12.08)
- [4] 環境省. 『温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧』。WEB ページ. https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf (アクセス日 2023.12.08)
- [5] 特定非営利活動法人地中熱利用促進協会. 『2022 年度 全国の地方自治体における地中熱に活用できる補助金・融資制度について』。WEB ページ. <http://www.geohpaj.org/wp/wp-content/uploads/2022hojyokin.pdf> (アクセス日 2023.12.08)

研究担当機関：エネルギー・環境・地質研究所
執筆者：白土 博康

3.3.5 熱導管の沈下とその対策

(1) 背景と目的

前項で示した共同井戸モデルや一般的な地域熱供給システムにおいては、熱源システムで作成した温水を搬送するために熱導管を敷設する。しかしながら、当別町の地盤には広く泥炭（植物の遺骸が十分分解されずに堆積して、濃縮されたもの、石炭の一種）が地面の浅い層に分布していることが知られており、泥炭地盤に熱導管を敷設し、熱圧縮や地盤沈下した際に熱導管が引っ張られ破損する懸念がある。

そこで本項目では、施工企業等による熱導管沈下の対策に関する調査を行った。次に、北海道大学 大学院工学研究院 環境フィールド工学部門 防災地盤工学分野 地盤物性学研究室の西村聡准教授（当時）に、泥炭地盤に熱導管を埋設することを想定し、熱導管周辺地盤の熱導管に与える熱圧縮による影響について、検討していただいた^[1]ので、概要を紹介する。また、熱導管沈下対策について文献調査をした。

(2) 熱導管沈下の対策に関する調査

全国の熱導管を敷設した熱供給事業者 3 団体、2 施工企業に、1) 泥炭地への熱導管の敷設方法、2) 施工マニュアルについて、ヒアリング調査を行った。1)については、下記の回答を得た。

①事業者 3 社

- ・熱導管の沈降対策に特別な措置を取っていない。

②施工企業

- ・泥炭地と判断されれば、コンクリートによる地盤改良を行う。
- ・FRP 管などの軽量の管材を使用する。
- ・管路底盤をコンクリートで構築、木杭などで管を固定する。

一方、2)については、各管路構築における施工要領などを確認するなどに留まり、熱導管沈下に関する特に専門的なマニュアルはないとしている。

(3) 熱導管周辺地盤における熱圧縮の評価

1) 泥炭試料

試験に使用した試料は、江別市にある中樹林道路建設地から採取し（写真 3-3-5-1）、その試料の土質試験は日本工業規格や地盤工学会基準に従って実施した。また、土質試験に加え強熱減量と分解度も加えて実施した。試料の物性値を表 3-3-5-1 に示す。

2) 試験・解析の概要

セルの背面に恒温槽で温度制御された水を循環させることで、セル内を所定温度に固定して圧密試

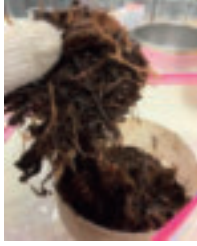
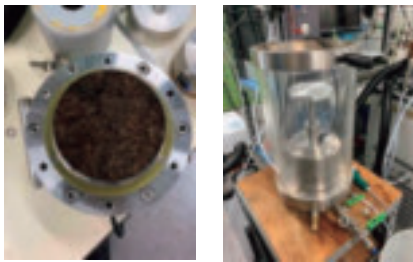


写真 3-3-5-1 泥炭試料の外観

表 3-3-5-1 泥炭試料の物性値

含水比 W[%]	土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	強熱減量 Li [%]	分解度 [%]
585	1.51	94.5	72.3

験を行った。写真 3-3-5-2 に圧密試験の様子を示す。正規圧密状態の泥炭を温度変化させることで、その圧縮特性の変化を評価する。実験は計 3 回行い、それぞれの step ごとに条件を変えた。表 3-3-5-2 に実施した実験の各段階における条件設定を示す。



試料の設置 試験機組み立て
写真 3-3-5-2 圧密試験機の外観

表 3-3-5-2 圧密試験条件設定

実験 条件	1回目		2回目		3回目	
	載荷 荷重 (kPa)	容器 温度 (°C)	載荷 荷重 (kPa)	容器 温度 (°C)	載荷 荷重 (kPa)	容器 温度 (°C)
Step1	10	10	40	10	10	10
Step2	30	10	60	10	10	40
Step3	30	40	60	40	30	40
Step4			60	10		

次に、泥炭地盤内に熱導管を通した場合の温度状態を推定する手段として、拡散方程式を用いた非定常熱伝導解析を行った。本解析では仮定断面に対して有限要素法を適用する。有限要素法による解析プログラムは西村^[2]によるものを改変した。図 3-3-5-1 に今回作成した有限要素メッシュ及び境界条件を示す。

本解析では 1. 相変化は起こらないものとする 2. 地表面は凍らないものとする という二つの条件を

与えており、有限要素モデルにおける積雪部分については境界条件として $T=10^{\circ}\text{C}$ を与えているため、雪は存在せず融解条件は考慮しない。式 3-3-5-1 に一次元断面における熱拡散方程式を示す。それぞれの物性値については一般的な値を与えている。

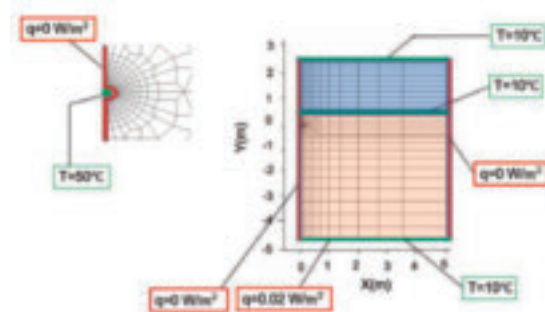


図 3-3-5-1 有限要素モデル・各境界条件
(q :熱フラックス, T :温度)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{式3-3-5-1})$$

ρ : 密度, C : 比熱, λ : 熱伝導率, T : 温度, t : 時間

3) 試験結果

実験 1 で得られた間隙比（土粒子の体積に対する間隙の体積の比）の時間経過(図 3-3-5-2)、及び実験 1~3 の歪み経過の比較図(図 3-3-5-3)を示す。図 3-3-5-2 の step3 後の挙動により、セル内温度を 10°C から 40°C に上げることで大きく圧縮が進み、間隙比に大きな変化が現れることがわかった。また図 3-3-5-3 の各実験の歪み経過の比較図より、載荷荷重の大きさに関わらず温度変化による歪みの変化が見ら

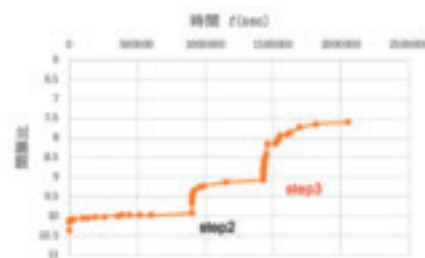


図 3-3-5-2 間隙比の時間経過

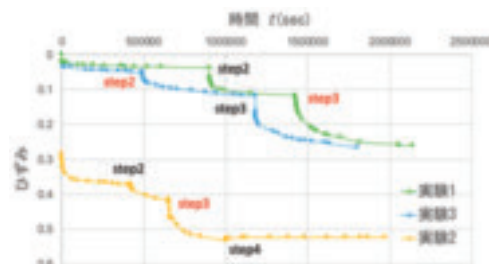


図 3-3-5-3 歪みの時間経過比較

れることが明らかとなった。具体的なセル内温度上昇後の歪みの大きさは、実験 1 で 0.14, 実験 2 で 0.13, 実験 3 で 0.07 であった。

図 3-3-5-4 に非定常熱伝導解析による地中温度のコンター図を示す。このコンター図では地盤内のパイプの中心に座標を取り、パイプ内の温度を 50℃に上げた場合の地盤温度の分布を示している。パイプから 70cm 程度の距離まで地温が 30~40℃まで上昇し、100cm の距離より外側ではほとんど温度変化は見られなかった。このことからパイプ周辺 70cm 程度の距離においてのみ泥炭の圧縮が顕著に現れ、この部分では実験結果より 0.07~0.14 程度の歪みが起こると推定される。100cm の距離より外側では、熱変化による影響はないものと考えられる。

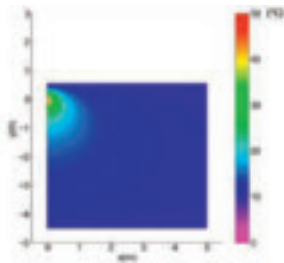


図 3-3-5-4 コンター図(地盤温度の分布)

(4) 熱導管の沈下対策

実験結果から、当別町のような泥炭地盤では温度変化に伴う土壌圧密の歪みによる地盤沈下が発生する可能性がある。一方、環境省が全国の地盤沈下地域の概況^[3]を報告している。それによると、石狩平野の地域内水準点における平成 29 年度から令和 3 年度まで(5 年間)の累積沈下量の最大値は札幌市手稲区で 4.1cm, 昭和 50 年から平成 30 年(43 年間)の累積沈下量の最大値は札幌市白石区で 87.2cm と報告されている。こうした地盤沈下は防ぐことはできないが、定点観測状況を確認するとともに、土壌圧密の歪みを考慮した配管長として、外部からの応力がかからないようにして配管の破損を防ぎ、地盤沈下が著しいと判断されるケースについては、該当地域に独自に定点ポイントを設け、年 1 回など定期的な観測を行うことも必要と考えられる。

[引用文献等]

- [1] 小泉祐也. “泥炭の変形・圧縮特性に対する温度の影響”. 北海道大学工学部環境社会工学科地盤物性学研究室令和元年度学士論文. (2019)
- [2] 西村聡. “降雨浸透と盛土・基礎地盤圧縮に起因する堤体内水位変動の予測”. 地盤工学会北海

道支部技術報告書. 第 55 号. 235-238. (2015)
[3] 環境省 水・大気環境局. 『令和 3 年度全国の地盤沈下地域の概況』. (2023)

研究担当機関：エネルギー・環境・地質研究所
執筆者：白土 博康

3.3.6 帯水層を活用した熱エネルギーネットワークシステムに関する総括

本項目において、道総研では、地中熱等再生可能熱エネルギーの面的利用モデルの提案を目的に、帯水層の性状、井戸の性能把握から、地下水を利用した地中熱ヒートポンプシステムの設計・導入・効果の確認までを実施した。表 3-3-6-1 にその概要を示す。これに基づき、太美地区における地下水熱利用の有効性に関するエビデンスデータを当別町に提出し、ネットワークの提案を行うとともに、当別町の地下水熱利用に関する事業を全面的に支援した。表 3-3-6-2 に帯水層を活用した地中採熱に関する道総研の支援可能内容を示す。

表 3-3-6-1 帯水層を活用した熱エネルギーネットワークシステムに関する取り組み概要

作業項目	取り組み状況
①帯水層・井戸の性能評価	①文献調査で太美地区の帯水層を確認 ②電気探査で太美地区の帯水層の位置を推定 ③過去のデータから帯水層の深度を推定 ④西当別CCで試験井戸を設置 温度・電気・微流速検層を実施
②帯水層を活用した地中採熱システム設計のための基礎試験	①苫小牧高専でBHとHC方式の採熱量を比較検証 ②西当別CCでBHとHC方式の採熱量を比較検証 ③西当別CCでHC方式による地中熱HPの単独運転を実施、設計データを取得
③帯水層を活用した地中採熱システムの導入と検証	ロイズタウン駅前歩道融雪システムで地中熱HPシステムの導入と検証を実施
④熱エネルギーネットワークシステムの概要と施設への適応試算例 ⑤熱導管の沈下とその対策	①帯水層を面的に利用する考え方を提案 ②共同井戸モデルで経済性・環境性評価を実施 ①北海道大学で熱導管の沈下に関する評価を実施 ②蛇行配管を軸として対策技術を検討

CC:コミュニティセンター, BH: ボアホール, HC: ヒートクラスター, HP: ヒートポンプ

表 3-3-6-2 帯水層を活用した地中採熱に関する道総研の支援可能内容

段階	支援内容
設計	・地中熱導入・設計支援 ・補助金申請支援 ・地中採熱方式の選択指標の提示
導入	・井戸仕様の修正支援
運用	・現状分析 ・運用改善提案 ・運用改善効果の確認の支援

本項目では、帯水層（地下水熱）を利用した地中採熱システムの機能性、技術の有益性、各技術を利用するにあたっての留意点をまとめる。

(1) システムの妥当性

帯水層の性状評価、地下水熱を活用した地中熱ヒートポンプシステムの基礎試験を基に、令和4年冬からロイズタウン駅前歩道に導入した融雪システムの運転を行った。システムは、順調に稼働しており、現状問題となるトラブルは抱えていない。設定負荷を超え、システムだけで融雪が追い付かない場合(頻度は年3%程度)は、町職員による除雪を行うこととしており、導入コストと機能のバランスが取れたシステムとなっている。

また、一次エネルギー消費量、CO₂排出量についても、従来の灯油ボイラー利用システムと比較して削減率がそれぞれ51、58%と算定されており、従来システムよりも高い削減率が得られていることから、木質バイオマスの取り組みと同様にゼロカーボン時代に相応しいシステムとなっている。また、システム導入の投資回収年数も現実的な値が試算されており、システムは妥当である。

(2) 技術の有益性

1) 帯水層・井戸の性能評価技術

本節では、揚水試験とモニタリングから地下水資源をマネジメントする評価手法について記載した。特にモニタリングについては、多くの調査データや複雑な数値シミュレーションを用いず、適正揚水量を比較的簡便に求める手法として有効と考える。

次に当別町太美地区を事例に、既存調査や電気探査を基に地下構造の推定内容を示すとともに、揚水試験と微流速検層により、取水する層と取水流量を確認する手法を示した。

2) 帯水層を活用した地中採熱システム

地中熱利用システムの低コスト化という課題に対して、帯水層（地下水熱）から採熱するシステムを採用して、課題解決を試みた。

今回、ヒートクラスター方式を採用したが、ボアホール方式と比較して、ヒートクラスター式の採熱量は、暖房時に苫小牧高専での予備試験で約5倍、当別町太美地区での基礎試験で最大約10倍となった。この結果、地下水熱の利用により1本あたりの導入コストがボアホール方式の2倍になったとしても、イニシャルコストの削減率は約60%以上となる可能性があると考えられた。

地下水から採熱する場合、還元井や排水設備の設置が必須であるが、ロイズタウン駅前歩道融雪システムにおいては、設置した排水設備を考慮しても、従来のボアホール式と比較して大幅にイニシャルコ

ストを削減できることが確認できた。

省エネルギー性、CO₂排出量削減についても、当別町の基礎試験におけるヒートポンプの COP がボアホール方式で約 3、ヒートクラスター方式で 4~6 となり、大幅に向上することが確認できた。また、冷房時においても、地下水からの採熱により、ヒートポンプの COP を向上できる。ロイズタウン駅前歩道に導入した融雪システムにおいても、循環ポンプや揚水ポンプを含んだシーズンの成績係数 (SCOP、出力の積算値[kWh]/循環ポンプや揚水ポンプを含んだシステムの投入電力の積算値[kWh]) が 4.1 となり、ボアホール型 (3.0) と比較して大幅に向上できる。

3) 帯水層を熱導管に見立てた熱エネルギーネットワークシステム

帯水層を熱導管に見立て、地上の各施設で地下水を採熱源として利用する熱エネルギーネットワークシステムは、従来検討されてこなかった考え方である。従来方式の熱導管の導入には多額の費用が発生することが知られており、搬送動力の削減も課題である。これらのことから、当別町太美地区のような広範囲に帯水層が見込まれる地域限定ではあるが、地域エネルギー供給システムとして有用と考えられる。

一つの共同井戸から採熱し、集中熱源方式で同一区画にある複数の住宅の暖房熱需要を賄う共同井戸モデルについては、補助金の活用により、戸別に灯油ボイラーで暖房するよりも導入コストが安価になる。また、エアコン設置の場合と比較しても、5.3 年の投資回収となり、現実的な経済性となった。一方、環境適合性については、エネルギー消費量が一次エネルギー換算で 32~42%程度、CO₂ 排出量が 42~45%の削減となった。この考え方は、集合住宅などにも応用できることから、地域エネルギー供給システムのモデルとして有用と考えられる。

4) 熱導管の沈下とその対策

熱導管の沈下対策については、地温温度変化に伴う土壌圧密の歪みや自然の地盤沈下を考慮した配管長とし、外部からの応力がかからないようにすることで簡便に対処できることを示した。

(3) 技術の活用にあたっての留意点

1) 帯水層・井戸の性能評価技術

文献調査により、周辺地域で帯水層がある地面の深さはどこか、揚水量はどのぐらいか確認する。次に当該地域の水質に井戸や配管等の閉塞を発生する問題を起こさないか、排水が水質汚濁防止法の基準

に合致しているか確認する。文献調査で十分な情報が得られなければ、試験井を設置して、実地調査することは必須であり、調査を怠ると適正なシステムを導入することはできない。地質柱状図と電気探査、微流速検層と水質分析など、複数の探査方法を補完、組み合わせて地下構造や帯水層の性状を整合すると間違いが少ない。

2) 帯水層を活用した地中採熱システム

設計段階においては、自治体内予算要求や省庁の補助金申請準備もあるので、設備導入前年秋にはシステムの導入の可否判断とシステムの基本構想が完了していることが望ましい。

導入段階においては、孔掘削後の電気検層により、井戸の有孔管の位置を調整して礫層に当てることが望ましい。この際、設備設計者、井戸施工関係者、自治体職員など関係者が集まり、協議、合意の上で有孔管の位置を決定することが望ましい。有孔管設置予定の位置が砂層の場合は、有孔管から混入する砂の堆積を鑑み、砂の堆積分の無孔管を余分に設置する、定期的な洗浄を行うなどの作業が必要となる。

次に運用段階であるが、所定の揚水ができずシステムの出力が低下しないようにすることや適正揚水量を超えないことが最も重要である。このため、3.1.1 で説明した井戸水位の継続的な観測による地下水資源量の定性的な把握や、3.3.3 で説明した採熱量・システムの出力の計測による定量的な把握が必要である。

3) 帯水層を熱導管に見立てた熱エネルギーネットワークシステム

現時点では、設計根拠を提示することができないため、地域レベルで同じタイミングで井戸を多数設置し、同時揚水する設計ができない。複数地点で水位を計測しながら、少しずつ地域における採取水量を増加させることが必要である。数値シミュレーションでこれを把握する場合は、その基礎となる井戸情報が当該地域近隣に多数あり、数値シミュレーションの精度がある程度担保される場合に限定される。

4) 熱導管の沈下とその対策

地盤沈下そのものを防ぐことはできないが、文献で近隣の地盤沈下速度を把握し、特に配慮すべきと判断される場合、定点観測ポイントを設け、年 1 回など定期的な観測を行い、必要に応じて配管の設備更新を行うことに留意が必要である。

研究担当機関：エネルギー・環境・地質研究所
執筆者：白土 博康

3.4 エネルギー地産地消技術導入に対する住民の理解促進に関する活動

3.4.1 活動の目的

再生可能エネルギー技術の導入の動機は技術ではなく、政策的なインセンティブ、法的規制の緩和、住民の理解促進によるところが大きい。政策的なインセンティブや法的規制については国の政策によるところが大きく、その動向を把握しながら、自治体としての対応を検討する必要がある。

当別町の再エネ導入プロセスにおいても、一部の積極的な担当者の努力によるところが大きい。このような個人に依存したプロセスは担当者の転勤等で頓挫しがちである。特に前例のないものを導入する場合には、その必要性やメリット、デメリットを含む特性等の情報を多くの関係者で共有することが重要である。

また、再エネ導入推進計画のような政策を決定する際には、パブリックコメントを求める機会があり、意見集約はされるものの、住民への情報公開、住民から意見収集する機会は必ずしも多くないのが現状と考えられる。一方、当別町では、これまでもエネルギー導入に関する勉強会が町民レベルで開催されるなど、エネルギー政策に関する町民の意識、関心は高い。今後も、再エネ利用に対する考えを引き出す問いを出す等、継続的な住民同士の意見交換、合意形成の場を作るとともに、得られた知見を共有し、官民間問わず担い手を養成していくことで、再エネ導入、エネルギーの地産地消に関する裾野を広げ

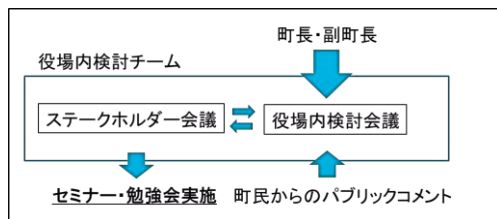


図 3-4-1-1 再エネ導入プロセスの検討プロセス例

表 3-4-2-1 住民への理解促進活動の概要

イベント名	開催日時	参加人数	内容
○ゼロカーボンシティに向けた意見交換会	令和4年8月20日	25名	ゼロカーボン推進計画策定に向けた町主催の住民との意見交換会 道総研の地中熱関連の取り組みを説明
○帯水層を活用した地域産エネルギー導入に関する勉強会	令和5年2月2日	23名	道総研・当別町共同で戦略研究（地中熱）の取り組み内容に関する住民勉強会を開催
○地域産チップを活用した木質バイオマス導入に関する勉強会	令和5年2月21日	33名	道総研・当別町共同で戦略研究（木質バイオマス）の取り組み内容に関する住民勉強会を開催
○技術セミナー 地域産木質バイオマスの利用に向けて～ゼロカーボンに向けた当別町の取り組み～	令和5年7月31日	149名	道総研・当別町共同で戦略研究（木質バイオマス）の取り組みに関するオンライン技術セミナー開催
○技術セミナー 地下水熱の利用に向けて～ゼロカーボンに向けた当別町の取り組み～	令和5年8月30日	116名	道総研・当別町共同で戦略研究（地中熱）の取り組みに関するオンライン技術セミナー開催
○当別町ゼロカーボン勉強会	令和5年月1回開催	20名程度	住民による脱炭素、町づくりに関する勉強会

ていくことが重要である。

本項目では、図 3-4-1-1 で示すような再エネ導入プロセスの構築の一助とすることを目的として、エネルギー地産地消技術導入に対する住民の理解促進に関する活動について紹介する。

3.4.2 活動内容

(1) 概要

表 3-4-2-1 に住民への理解促進活動の概要を示す。令和4年度に開催されたゼロカーボンシティに向けた意見交換会は、ゼロカーボン推進計画策定に向けた町主催の住民との意見交換会である。道総研の戦略研究については令和5年の2月に地中熱（地下水熱）、木質バイオマス導入に関する勉強会を開催して、住民から広く意見を集約した。また、令和5年に技術セミナーをオンラインで実施した。この技術セミナーは他の自治体や関連企業への技術の発信と住民への普及啓蒙を兼ねており、場所を問わず参加できるようにオンライン講演会を開催した。また、町職員や当別町青年会議所会員にコミュニティで実施可能なエネルギーの地産地消に関する意見交換の場を作るよう薦めたところ、令和5年4月に町民主催の当別町ゼロカーボン勉強会が発足し、月1回、脱炭素、町づくりに関わる作業の方向性の共有・情報交換が行われている。

(2) ゼロカーボンシティに向けた意見交換会

写真 3-4-2-1 に意見交換会当日の様子を示す。①当別町のゼロカーボンに関する取り組みについて、②ゼロカーボン推進計画の策定について、③道総研による当別町での取り組みについて、話題提供があり、意見交換が行われた。この中で①町のゼロカーボンシティの構想に関するもの、②発電・蓄電（太陽光発電の冬期利用、小型風力発電の可能性、EVによる蓄電）、③農産廃棄物の資源化、④省エネ（既設物件のリノベーション、ペレットストーブ、省エネ

モデル構築), ⑤地中熱利用, ⑥当別町ゼロカーボン推進計画に関する統計データの整理等について, 意見があった。



写真 3-4-2-1 意見交換会当日の様子

(3) 戦略研究の取り組みに関する町民勉強会

写真 3-4-2-2 に町民勉強会当日の様子を示す。帯水層を活用した地域産エネルギー導入に関する勉強会では, 道総研から①当別町太美地区の温泉・地下水資源, ②帯水層を活用した地中採熱手法, ③当別町太美地区における帯水層を活用した地中熱の面的利用について話題提供した。この中で, 町民から地下水資源の管理, ヒートポンプのイニシャルコストや騒音について, 質問や意見があった。

地域産チップを活用した木質バイオマス導入に関する勉強会では, 道総研から①当別町における木質バイオマスの賦存量とその評価方法, ②木質バイオマスの効率的な乾燥方法, ③木質バイオマスボイラーの効率的な利用方法, ④地域産チップを活用した木質バイオマスボイラー導入の経済性・環境性評価について話題提供した。この中で町民から, 森林簿における木材の賦存量評価手法や森や自然との持続的な共生方法, 効率的な木質ボイラーの燃焼方法と地域産チップの利用, 木質燃料のコストについて, 質問や意見があった。



(a) 帯水層活用



(b) 木質バイオマス導入

写真 3-4-2-2 意見交換会当日の様子

(4) 戦略研究の取り組みに関する技術セミナー

地域産木質バイオマスの利用に関する技術セミナーでは, ①木質バイオマスの地産地消に向けた総論, ②先進技術を用いた木質バイオマスの賦存量の評価方法, ③木質バイオマスの効率的な集荷・乾燥方法, ④木質バイオマスボイラー利用の高効率化, ⑤木質バイオマスボイラー導入のための経済性・環

境性評価ツールの開発までの各種技術の説明, 当別町の取り組みについて説明した。参加者からは住民からは木の賦存量について, 気候変動の影響や用途別・樹種別で評価は可能か, 林地残材の収集に関する収支と問題点, チップの地産地消割合, 年間供給量と増減, 木質ボイラーの運用改善の効果や耐久性, バックアップボイラー利用の考え方について, 質問や意見があり, 研究成果のパッケージ化について, 要望が出された。

地下水熱の利用に関する技術セミナーでは, 外部講師による地中熱利用の現状と将来展望に関する基調講演があり, ①地下水資源の評価と管理, ②地下水を利用した地中採熱システムと導入プロセス, 当別町の取り組みについて説明した。参加者からは, 積雪寒冷地におけるシステムの耐久性やトラブルの有無, 普及の見込み, 戸建て住宅での費用について, 気候変動の影響による帯水層の性状や量の変化, 地盤沈下の実例について, 質問や意見が出された。技術の理解と普及促進のため, 今後もこれら研究成果の発信に関する継続的な取り組みが必要である。

(5) 当別町ゼロカーボン勉強会

写真 3-4-2-3 に町民勉強会当日の様子を示す。町青年会議所の町民が発起人となり, 現在のところ町民 20 名ほど(当別町職員, 町議員)の参加があり, 道総研職員も参画している。内容としては, ①ゼロカーボンの意義の説明や②エネルギー需給に関するワークショップ, ③町の施策や補助金事業の説明, ④小型風力発電事業, 新電力会社設立の可能性, ⑤まちづくりについて対話が行われている。コミュニティレベルでできる脱炭素に関わることの検討の他, この勉強会で得られた町づくりに関する共有事項を町に提言することも検討されており, 対話の積み重ねから, 再エネ事業に関する担い手が生まれることを期待してやまない。それには, 国や道の適切な政策的支援も必要と考えられる。



写真 3-4-2-3 当別町ゼロカーボン勉強会の様子

研究担当機関: エネルギー・環境・地質研究所
執筆者: 白土 博康