

大学における地域森林資源を活用した低炭素化への試み ～富山国際大学でのバイオマスボイラ導入に向けた基礎調査～

Study on low-carbonization by energy self-sufficiency using forest biomass resources
near Toyama University of International Studies
～ Fundamental Researches for introduction of biomass boiler to the university～

壺内 良太¹ 竹中 泰士² 佐伯 拓也³ 上坂 博亨²

TSUBOUCHI Ryota TAKENAKA Taishi SAEKI Takuya UESAKA Hiroyuki

再生可能エネルギー利用促進法の施行とそれに伴った電力の固定価格買取制度の実施により太陽光発電を始めとした再エネ利用が促進されている。森林比率が約67%の富山県において大学が使用するLPG 焚吸収式冷温水発生機を木質バイオマスボイラに更新することによって地域資源を有効活用しながら脱炭素化を実現する事をめざす基本調査を実施した。その結果、想定する資源林の面積約82haからの間伐材供給によって、既存の木質チップ供給ルートを活用しながら大学が利用するエネルギーが十分に賄い得る事が明確となった。さらに経済性を高めたボイラ導入手法として木質バイオマスボイラと電気ヒートポンプとの連動により、バイオマスボイラの小容量化による初期費用抑制とバイオマスボイラの弱点とも言える運用の不安定性へのバックアップを両立する最適化プランを立案した。以上により森林資源を活用したバイオマスボイラを比較的 low cost で導入しながらエネルギーの地域内自給と森林内の環境保全、並びにCO₂ 排出量を抑制することが可能な低炭素化空調システム構築への足掛かりが得られた。

キーワード： 木質バイオマス、森林資源、再生可能エネルギー、バイオマスボイラ

1. はじめに

1.1. 背景と目的

2012年7月に導入されたFIT制度により、木質バイオマス燃料とする発電所が急速に増加しており、平成29年度末ですでに約60か所を超える発電所が稼働している。このうち約65%にあたる39箇所において間伐材等の未利用木材が燃料として利用されており、その使用量は年々増加していると報告されている(林野庁,2017)。さらに木質バイオマス発電所は大規模化が進んでおり、富山県内でも5000kW以上の発電所が稼働中で、2021年には5万kWのバイオマス発電所の稼働が予定されている。このような

¹ 株式会社早稲田環境研究所 (東京都)

² 富山国際大学現代社会学部 (富山市)

³ 北酸株式会社 (富山市)

バイオマス発電所におけるエネルギー変換効率とは通常は20%程度とされており、大規模発電所を運用するには大量のバイオマスが必要とされる。大規模バイオマス発電所の増加に伴って未利用材の供給不足も懸念されている(安藤, 2014、石丸, 2015)。一方、バイオマスの熱利用においては変換効率が80%程度まで高くなることはよく知られており、熱電併給の場合には90%以上の熱効率を実現できることもある。このようにしてバイオマスの有効な利用方法として熱利用・熱電併給利用が挙げられ、その事例も増加してきている。薪ボイラの導入効果と課題については山間地の温浴施設における事例研究から、エネルギーの地域内自給を目的にした場合には設備導入につながりやすく、二酸化炭素の削減効果、隣地残材削減などの林内環境保全、さらには所有者の意識改善や視察客の増加のプラスの効果が報告されている(風ら, 2017A)。その一方で薪投入などが煩雑な作業が負荷となる点やそのための人件費を持続的に支出することの困難性も指摘されている(風ら, 2017B)。またチップボイラにおいても、投入の人件費は削減されるとしても含水率の変動による燃焼効率低下やブリッジングなどのチップトラブルによる運転阻害なども報告されており、順調な経営確保が困難とする報告も多い。これらの報告からバイオマスボイラの導入の目的と効果については、経済性一辺倒ではなく、多面的な目標設定と理解が必要であるといえる。

本研究で対象とするボイラーシステムは、本大学の校舎群の一部である第4号館と大講義棟の空調用の熱源機として使用しているものである。対象機であるLPG焚吸収式冷温水発生機は導入後約20年が経過している老朽機で、故障などが頻発していることから更新の必要性が生じている。また当学校法人では、環境デザイン専攻をはじめとして実践的な地域活動を通して総合的に地域問題の解決を図る人材育成などを進めていることから、地域に多く賦存する木質バイオマスを利用したバイオマスボイラへ更新することで、地域エネルギー自給、CO₂排出量削減、エネルギーコストの低減、森林環境保全だけでなく、学校教材としての活用に寄与する事業を目指している。本報ではバイオマスボイラーシステム導入に向けてのプランニングを通して、燃料供給地としての森林の理解、燃料流通システムとしての地域森林組合との調整、また熱需要者としての大学の経済性に着目して可能性を検討した結果を報告する。

1.2. 研究対象森林の概要

本事業では、大学周辺の森林からのスギ間伐材をエネルギー利用することを前提として地域内エネルギー自給と森林環境の保全、並びにCO₂排出を最小に抑制した低炭素型の空調システム構築を目指している。対象とする森林は具体的には、大学への燃料供給の便を考慮して、周辺の東黒牧、大山布目、文珠寺の3地区(9林班)とした。本大学、対象3地区、ならびに対象林班の位置関係を図1-1に示す。各林班の森林面積、賦存量、成長量は森林簿(富山県森林政策課提供)により表1-1のとおりである。3地域の合計森林面積は613haであり、その約45%に相当する271haがスギの植生である。スギの賦存量は約22,000m³で、年間成長量は約1,800m³となっている。またさらに、プロット調査による森林の実態調査を行うにあたっては大学から約1.5kmの付近に広がる第268林班を対象とした。当該林班は森林簿面積が81.4haでそのうち約46.7haがタテヤマスギの林相を持つ個人所有林である。現在はほぼ間伐などの施業は実施されておらず、所有者からは入山と調査と許可を得ており、ならびにその後の森林保全の許可も得やすい状態にある。

1.3. 富山国際大学の空調システムの概要

本大学(東黒牧キャンパス)では、講義棟毎にガスヒートポンプエアコン、空冷ヒートポンプエアコンなど様々な個別空調システムを使用している。本研究で対象とする設備は、第4号館(1Fと2F の一部分)と大講義棟の合計 1,260m² に冷温水を供給している2 台の「LPG 直焚きの吸収式冷温水発生器(表 1-2)」で、能力は約 200kW×2 台=400kW 程度である。このセントラル空調システムは、別棟である「大学本部棟」にメインスイッチが設置されており、遠隔操作により朝晩 ON/OFF スwitchを入れて運用している。本空調システムは設置から約 19 年が経過しており、COPは暖房 0.76、冷房 0.93 と低く、近年では故障によるメンテナンスコストも増大しており、早急な設備更新が必要となっている。

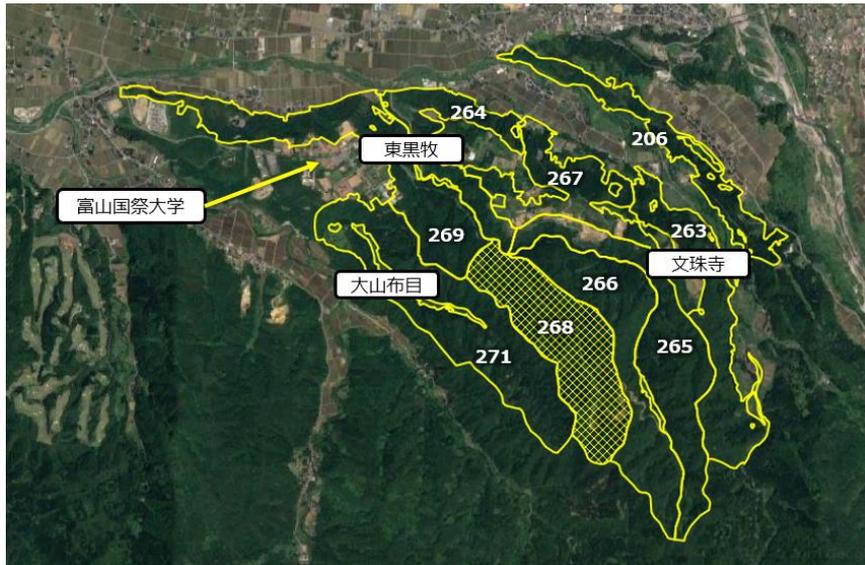


図 1-1 富山国際大学と周辺林班との位置関係。東黒牧・大山布目・文珠寺の3地区を対象林とする。第268林班(ハッチ)は調査のための立ち入りを行った林班。

表 1-1 3地区9林班の森林簿データ

字	林班	森林簿 面積 ha	タテヤマスギの林相			
			面積		総材積 m ³	生長量 m ³
			ha	%		
文珠寺	206	37.6	12.0	31.9	5,436	92
	263	64.4	10.8	16.7	5,756	81
	264	43.8	13.6	31.1	6,792	67
	265	80.4	20.5	25.6	9,991	116
	266	78.0	14.4	18.4	6,545	84
	267	35.5	16.3	45.8	7,683	89
東黒牧	268	81.4	46.7	57.3	22,266	236
	269	83.3	56.2	67.5	25,654	389
大山布目	271	108.5	83.7	77.1	36,452	718
合計		613.0	274.1	44.7	126,575	1,872

表 1-2 富山国際大学の既存空調システム

項目	内容
機器名称	アロエース (二重効用吸収式冷温水機)
メーカー	矢崎総業株式会社
型式	CH-KX50PS-1 (LPG 焚)
設置台数	2台
導入年	平成11年10月
機器出力	暖房: 211kW/台 冷房: 176kW/台
機器効率	暖房: 76.0% 冷房: 93.4%

2. 研究方法

2.1. 森林の状態調査方法

2.1.1. プロット調査の方法

研究対象とした206～271の9林班の人工林はいずれもタテヤマスギを中心とした林相で、比較的保全がなされていない状況であった。まず人工林の林分密度を調査するために、特に立ち入りを許可されており将来の利用が見込まれる268林班を対象としてプロット調査を行い、森林の状況を把握した。

プロット調査は第268林班の中でも隣接する269林班に近い沢沿いの2地点、および尾根沿いの1地点を選び、半径11.3mの円内(面積400m²)を測定対象として全木調査を行った。測定項目は①胸高直径、②樹高とし、胸高直径はメジャーテープにて、樹高はレーザーレンジファインダー(TruPulse200L:レーザー・テクノロジー社製)にて測定した。必要に応じてレーザー測距計を利用して樹幹距離を計測し、プロット円の中に位置する立木個体か否かを確認して計測を行った。

2.1.2. 調査結果の分析方法: 材積量の見積もりと林分密度の評価方法

資源量を見積もるために、プロット調査によって得られた立木個体数、胸高直径、樹高のデータを元にして対象プロット内の材積量を推算し、ヘクタール当たりの材積量を求めた。材積はShumacher-Hallの材積式(式①: 細田他, 2010)によって算出した。材積式の係数は名古屋スギの係数を利用し、その詳細は表 2-1の通りである。

$$\log V = a + b \cdot \log D + C \cdot \log H \quad \dots \text{式①}$$

ここで、 V : 幹材積 (m³) , D : 胸高直径 (cm) , H : 樹高

表 2-1 材積式の係数 (名古屋スギの係数を利用)

	a	b	c
$0 \leq D < 11$	-4.22927	1.967735	0.874649
$11 \leq D < 31$	-4.26522	1.864665	1.023757
$31 \leq D < 41$	-4.06819	1.687367	1.079349
$41 \leq D <$	-3.92355	1.728859	0.927572

林分密度を評価するために、平均樹幹距離と樹高から相対幹距比を算出して評価値とした。

平均樹幹距離はプロット(400m²)中の立木個体1本が占める面積の平方根として算出した。相対幹距比は林木の平均樹幹距離と林分の上層木の平均樹高との比とされ(近藤他, 2002)、以下の式②で算出される。指標として、相対幹距比が20%以上の場合は健全な林分密度とし、17%以下を過密林、14%以下を超過密林とする。

$$Sr = \frac{100^2}{H \cdot \sqrt{N}} \quad \dots \text{式②}$$

ここで、 Sr : 相対幹距 (%), H : 上層木樹高 (m), N : 単位面積当たりの本数 (本/ha)

2.2. 地域森林組合への聞き取り調査

富山県内には表 2-2に示すとおり4つの森林組合がある。富山市は、西部を婦負森林組合が、東部を立山山麓森林組合が担っているが、本大学と大学裏手の森林は富山市の旧大山地区に位置することから立山山麓森林組合の管轄エリアとなっている。立山山麓森林組合は、平成11年に旧大山町・大沢野町と現在の立山町、上市町の4町の組合が広域合併し誕生した森林組合で、県内でも最大規模の約4万1千haの組合員保有森林面積を有している。当森林組合の平均的な搬出材積量は約7,000m³で、そのほとんどは間伐である。平成27年のバイオマス発電所（グリーンエネルギー北陸：射水市）の竣工以降、生産量が年々右肩上がりが増えてきている。

本大学で使用する未利用材を立山山麓森林組合から調達することを想定し、当森林組合に対して大学周辺の森林における施業実績、CD材発生比率、原木の購入価格等をヒアリングして調査した。

表 2-2 富山県内の森林組合と、それぞれが管轄する行政区

森林組合名	森林面積	林産	対象市町村
富山西部森林組合	54,229ha	51,764m ³	氷見市、高岡市、射水市、小矢部市、礪波市、南砺市
婦負森林組合	19,556ha	10,371m ³	富山市（旧：富山市、婦中町、山田村、八尾町、細入村）
立山山麓森林組合	41,226ha	3,280m ³	富山市（旧：大山町、大沢野町） 立山町、上市町
新川森林組合	24,450ha	9,459m ³	滑川市、魚津市、黒部市、入善町、朝日町

2.3. 大学におけるエネルギー消費量調査方法

対象施設のエネルギー消費量の調査は、月別および時刻別の熱負荷を以下の方法により把握した。

月別の熱負荷は、表 2-3の平成29年度の月別のLPG購入明細から算定した。LPG燃料は年間で4,329m³利用し、うち暖房（10月～5月）が3,067m³、冷房（6月～9月）が1,261m³と暖房の使用量が2.5倍程度多い。月別の熱負荷の算定は、月別の燃料消費量×LPG発熱量×機器効率×搬送効率により算定する。LPGの低位発熱量は26.6kWh/m³、機器効率は、機器仕様より暖房：76%、冷房：93.4%、搬送効率は90%とした。

表 2-3 対象設備のLPG購入量（平成29年度）

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	合計
暖房 m ³	163.5	3.4	—	—	—	—	115.5	627.8	596.9	905.1	345.8	313.3	3,067
冷房 m ³	—	—	271.9	598.6	387.0	3.8	—	—	—	—	—	—	1,261
合計 m ³	163.5	3.4	271.9	598.6	387.0	3.8	115.5	627.8	596.9	905.1	345.8	313.3	4,329

1日の時刻別空調負荷は、LPG焚吸収式冷温水発生機の温水供給温度と流量を測定し、式③にもとづいて算出する。測定方法を図 2-1に示す。温度は、各熱源機に接続されている往路管と復路管の保温材を剥ぎ、配管外周面に熱電対を貼り付けて測定した。流量は、搬送ポンプが定量供給（458.2L/min）のため、ポンプのON/OFF稼働をA接点回路により把握した。データを5分間隔でロガーに記録し、1日1回

遠隔サーバーにアップロードしPCからダウンロードできる遠隔システムとした。測定は、2018年11月8日から12月28日まで実施した。

$$Q = (t_1 - t_2) \cdot i \cdot q / 860 \dots \text{式③}$$

ここで、 Q : 供給熱量 (kWh/min) , t_1 : 往路温度 (°C) , t_2 : 復路温度 (°C) ,

i : ポンプ稼働 (0 or 1) , q : ポンプ流量 (L/min) =458.2 (定量)

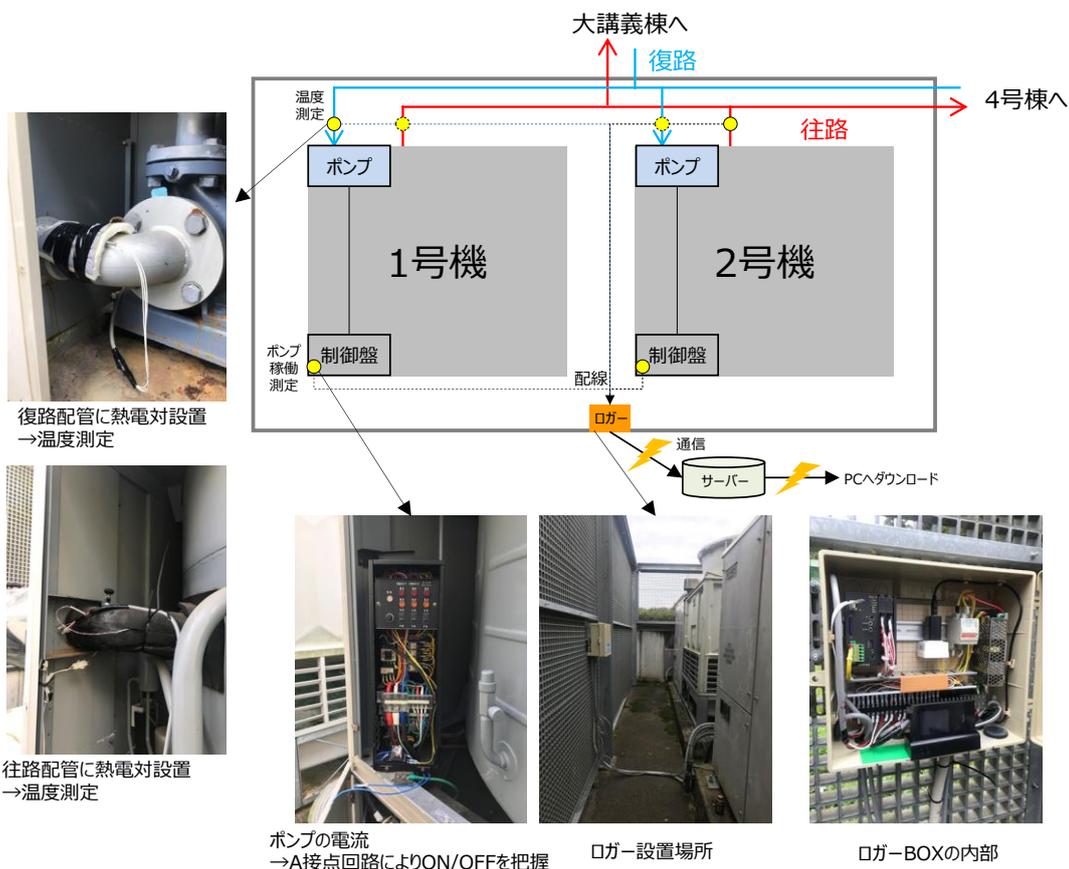


図 2-1 温度と流量の測定方法

3. 結果

3.1. 対象林班の森林資源

3.1.1. プロット調査結果

対象とする268林班のうち3つの地点においてプロット調査を行った結果を表 3-2、図 3-1に示す。地点1と地点2はほぼ同様の個体数を示したが地点2においては特に大径木の分布が大きかった。また地点3においては立木個体数が突出して多く400m²あたり60本となり、直径の分布は他の地点よりも小径となる傾向を示した。

計測された値に基づいて相対幹距比を求めた結果を表 3-1に示す。地点1では相対幹距比が20.38%を示し健全な密度の林分であることが確認できたが、地点2ではやや地点1よりもやや低く密度が高いことを示し、地点3は超過密林の指標である14%を下回る状況であった。

表 3-1 プロット調査を行った3地点の林相

	特徴	本数 (本)	平均幹距 L (m)	平均樹高 H (m)	相対幹距比 L/H (%)
地点1	沢沿い、南西向き	31	3.59	17.6	20.38%
地点2	尾根沿い、北東向き	34	3.43	18.1	18.99%
地点3	沢沿い、北東向き	60	2.58	18.6	13.91%

表 3-2 プロット調査による胸高直径の分布

胸高直径	地点1	地点2	地点3
0<D≤10	0	0	0
10<D≤20	3	1	7
20<D≤30	9	11	26
30<D≤40	15	13	14
40<D≤50	4	5	13
50<D≤60	0	4	0
合計 (本)	31	34	60

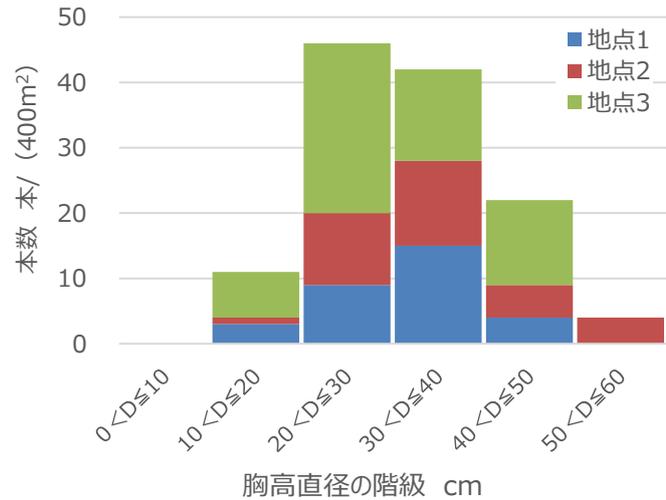


図 3-1 3地点の胸高直径の分布

3.1.2. 森林簿との比較による資源量の見積もり

プロット調査によって得られたデータを元にして各調査地点の筆ごとに材積を比較した結果を表 3-3 に示す。富山県森林政策課提供による森林簿の値との比較を行うと、地点1においては面積に大きな食い違いが見られたがヘクタール当たりの材積については近似した値となっている。一方、地点2、地点3では実測調査に基づいて推算された材積のヘクタール当たり材積が大きくなっており、森林簿の値よりも実際の林分の方が蓄積が多いとみる事ができた。総材積で比較してみると地点2では(面積との関係で)同程度の材積量となっているが、地点1、地点3ともに著しく蓄積が多いことが読み取れた。これを第268林班全体に拡大して推算した結果を表 3-4に示す。森林簿では22,266m³とされるのに対して実測に基づく推算では36,071m³となった。

表 3-3 筆ごとの材積量の森林簿との比較

調査地点			地点1		地点2		地点3		
リンク ID			筆界 147692		筆界 147651		筆界 147654		
項目			森林簿	実測	森林簿	実測	森林簿	実測	
スギ	筆界	面積	ha	0.01	0.69	1.47	1.02	0.46	0.40
		面積比率	%	100	100	91	91	98	98
		面積	ha	0.01	0.69	1.34	0.93	0.45	0.39
		haあたり材積	m ³ /ha	600	514	501	735	542	1,066
		材積	m ³	6	353	671	680	244	420

表 3-4 第 268 林班における材積量の森林簿との比較

林班			林班 268	
項目			森林簿	実測
林班	面積	ha	81.40	82.03
スギ	面積比率	%	57	57
	面積	ha	46.66	46.76
	ha あたり材積	m ³ /ha	477	771
	材積	m ³	22,266	36,071

3.2. 地域森林組合による施業実績および供給能力

立山山麓森林組合の間伐材の利用用途と大学周辺の施業実績のヒアリング結果を図 3-2に示す。旧大山町エリアでは、毎年平均して約18haを間伐している。1haで約72.5m³伐採することから、大山町エリアでは年間約1,317m³が伐採されている。東黒牧周辺では、平成30年度より文珠寺にて年間5ha(約363m³伐採)の間伐を開始する。過去の伐採材積の利用用途の内訳は、AB材が全体の40%、CD材が52%、林地残材が8%であった。以上をまとめると、旧大山町で988t(1,317m³)/年、うち東黒牧周辺で272t(363m³)/年の伐採が行われており、これにCD材率52%を掛けると、大山町で514t/年、東黒牧周辺で141t/年の供給能力がある。これは、大学で必要とする最大約50t/年に対して約10倍の供給能力であることから、大学周辺地域から十分な資源量が確保できる見込みである。ヒアリングを通じて、この地域から富山国際大学向けの原木供給が可能(季節変動を考慮しても)であることの下承が得られた。原木価格については、現状のパルプ・発電所向けと同等価格5,000円/tで提供される。ただし、発電所向けの供給量が増加した場合、取引価格が上がるため、大学向けの価格もそれに準ずる形で上昇する可能性が示唆された。

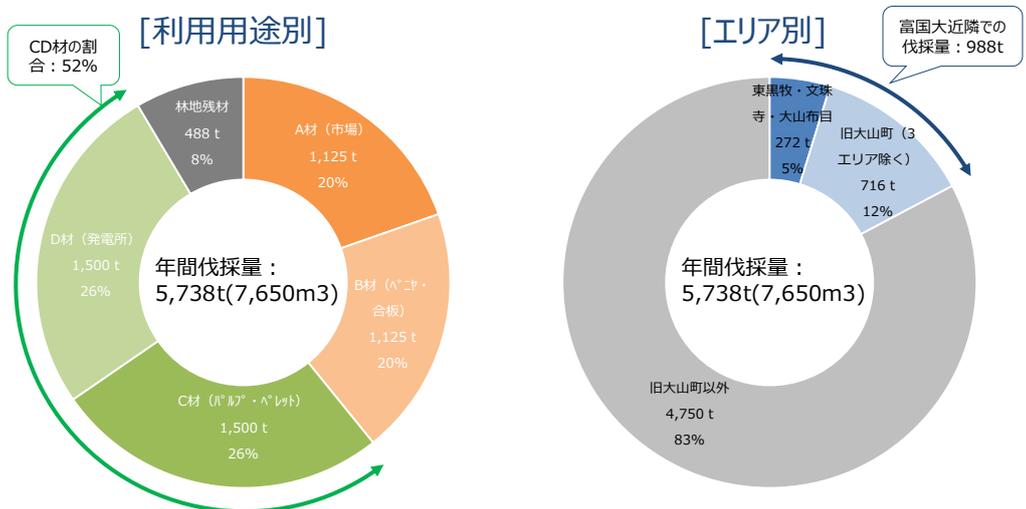


図 3-2 立山山麓森林組合の利用用途内訳 (左) と大山地区での伐採量 (右)

3.3. 大学におけるエネルギー消費状況

3.3.1. 年間のエネルギー消費状況

対象施設の月別の熱負荷を図 3-3に示す。暖房負荷は1月の16,475kWh/月、冷房負荷は7月の13,397kWh/月がもっとも高い。また、8、9月の冷房負荷や12、2月の暖房負荷が低いのは、夏季、冬季の休校期間によるものである。(前期4/9~8/7、後期:10/1~2/8)

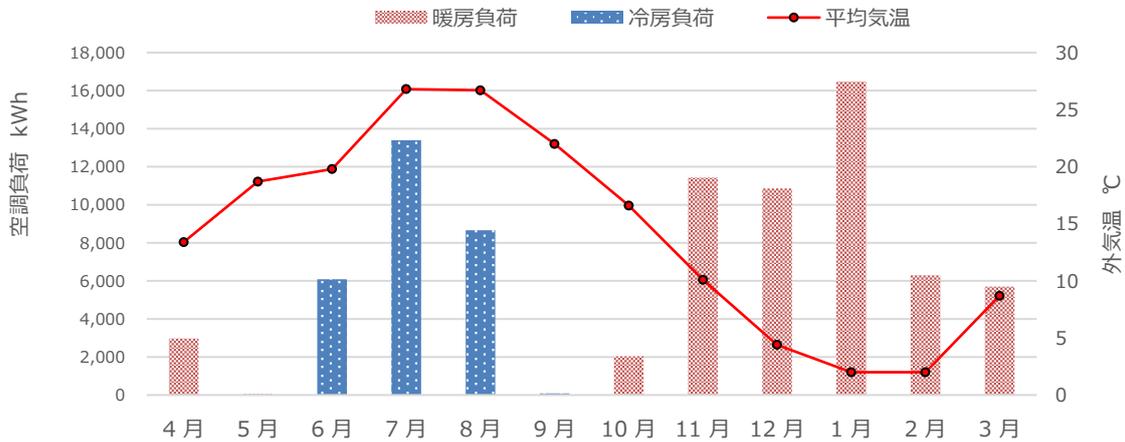


図 3-3 対象施設の月別の熱負荷

3.3.2. 1日のエネルギー消費パターン

熱源機の測定により1日の暖房負荷パターンは、図 3-4のように朝の立上げ時間帯にピーク負荷が発生し、午前中から夕方にかけて負荷が下がっていくパターンとなることが判明した。これは、朝の立上げ時には、室内温度と空調設定温度の温度差が大きく、徐々に外気温と室内温度の上昇に伴い負荷が減少していくためと考えられる。

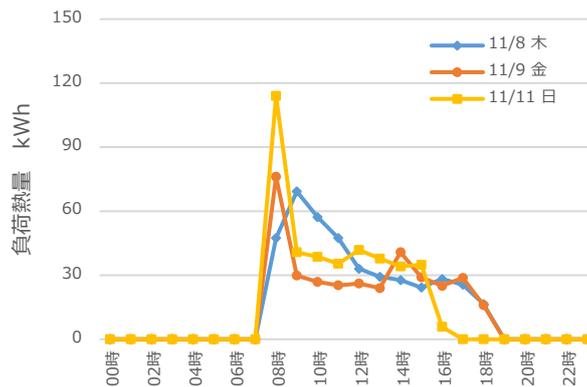


図 3-4 1日の暖房負荷パターン例

測定データをもとに、暖房・冷房それぞれの負荷パターンを作成した。各日の時刻別負荷を平均化したものを負荷パターンにすると、図 3-5に示すようにピークロードが潰れてしまい、実負荷特性を適切に反映しているとは言い難い結果となった。これは、授業開始時間のずれに伴いピークロード発生時間がずれ、ずれたピークロードを平均化するとピークロードが潰れることが原因である。そこで、文献値

(柏木,2008) より、もっとも負荷パターンが似ているオフィス（標準系）のデータを負荷パターンとした。冷房の負荷パターンは計測できていないため、暖房と同じくオフィス（標準系）の文献値とした。

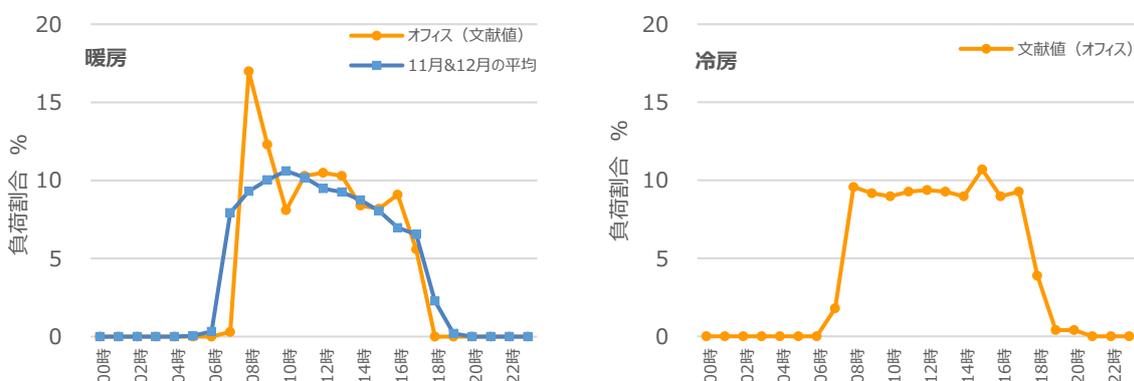


図 3-5 1日の負荷パターン (左：暖房、右：冷房)

3.4. 木質バイオマスボイラ導入のコスト試算

木質バイオマスボイラの普及のためには導入コストは重要なポイントである。今回は表 3-5、表 3-6 に示す条件のもと、表 3-7の5つのケースを想定して15年間のライフサイクルコストを試算した。ケース1は、現行のLPG焚吸収式温水発生機をそのまま更新としたシステムである。ケース2は、高効率ヒートポンプチラーのシステムで木質バイオマスを使用しない場合を想定している。ケース3、は全負荷に対してバイオマスボイラ（550kW）を用いると想定したバイオマスシステムである。冷房はバイオマスボイラで生成した温水を投入し冷水を生成する排熱投入型吸収式冷凍機を想定する。ケース4は、ベース負荷をバイオマスボイラ（200kW）で、ピーク負荷を効率のよいヒートポンプチラーから供給するハイブリッドモデルとした。この場合、冷房はヒートポンプチラーからのみの供給とする。ケース5は、ケース4からバイオマスボイラの出力を115kWに小さくしたシステムである。

イニシャルコストは、推計した熱負荷パターンをもとに各ケースの機器システムの容量や構成を設定し、スクルーコンベアなどの燃料供給系、バッファタンク、熱交換機、制御盤などの設備、配管や電源、基礎工事などを含めて検討した。さらに、補助対象設備を選定し補助金の予定額を考慮し実導入費用を算定した。ケース5の補助金はチラー部分にも適用されるとしている。以上の前提条件で算出したイニシャルコストは、ケース2のチラーの導入費用約5,000万円に対して、全量バイオマス（ケース3）で約6,300万円、バイオマス200kWとチラーの組合せ（ケース4）で約6,800万円、115kW（ケース5）で約4,700万円となった。このように、バイオマスボイラとチラーを組合せたシステムにて、チラーを含めた補助金を活用するパターンが最も安価であることがわかった。

ランニングコストは、エネルギーシミュレーションをもとに燃料費、メンテナンス費、修繕積立費、灰処理費、補機類電気代、ばい煙測定費などを算出した。その結果、木質バイオマスを利用したケース3,4,5においては燃料費は下がるものの、付帯するメンテナンスや修繕積立費が高く、ケース2のチラーと比較するとケース3の全量バイオマスで約2.2倍、ケース4、5のチラーとの組合せでそれぞれ約1.8、約1.4倍の費用となった。このように、本大学の対象施設の負荷熱量が小さく安価な燃料である木質バイオ

マスによる燃料費削減効果が小さくなったため、電気ヒートポンプチラーのみのケース2がもっともランニングコストが低くなることがわかった。

以上のイニシャルコストと15年間のランニングコストを加味したライフサイクルコストは、ケース2で約68百万円、ケース3で約104百万円、ケース4で約100百万円、ケース5で約74百万円となり、ケース5のバイオマスボイラ115kWとヒートポンプチラーを組合せたシステムにより、ケース2の通常更新として想定されるヒートポンプチラーと同等のライフサイクルコストになることが明らかとなった。

なお、木質バイオマスの燃料消費量は、全量バイオマスのケース3で年間40t、200kWバイオマスボイラのケース4で年間22.9t、115kWのケース5で22.6tとなった。全量バイオマスのケース2は、木質チップは40t程度であり、実燃焼効率が仕様上の効率より悪化することを想定すると最大でも50t程度と予想される。また、ケース4,5のボイラサイズが200kWと115kWでは、使用量にほとんど差が見られない。これは、200kWのバイオマスボイラは115kWに対して、ピークロード部分のみの供給が若干増えることを意味しており、ベースロードの供給に適したバイオマスボイラの特徴からするとオーバースペックになっているといえる。

表 3-5 シミュレーション条件 (燃料)

燃料	項目	値	出展
LPG	低位発熱量	26.6kWh/m ³	日本LPガス団体協議会
	単価	200 円/m ³	購入明細
	CO ₂ 排出係数	3.0t-CO ₂ /kg	温室効果ガス排出量・報告・公表制度 LPG
電力	単価	22 円/kWh	購入明細
	CO ₂ 排出係数	0.512kg-CO ₂ /kWh	電気事業者別排出係数 平成 29 年度実績 代替値
チップ	低位発熱量	2.9kWh/kg(40%wb)	木質バイオマスボイラ導入指針 2012
	単価	14,000 円	本調査結果
	CO ₂ 排出係数	0t-CO ₂ /t	—

表 3-6 シミュレーション条件 (ランニングコスト)

項目		値	
メンテナンス費	ガス焚吸収式冷温水発生機	500,000 円/年	
	空冷 HP チラー	200,000 円/年	
	バイオマスボイラ	500,000 円/年	
修繕積立費	機器	補修率	寿命
	ガス焚吸収式冷温水発生機	50 %	15 年
	空冷 HP チラー	20 %	15 年
	バイオマスボイラ	50 %	15 年
ばい煙測定費	115kW 以下は不要	300,000 円/年	

表 3-7 導入ケースごとのライフサイクルコスト試算

ケース	方式	イニシャルコスト	ランニングコスト	ライフサイクルコスト	燃料消費量
1	LPG 吸収式	47,635 千円	2,822 千円	8,9965 千円	LPG4,329m ³
2	電気 HP チラー	49,830 千円	1,233 千円	68,323 千円	電力 26,662kWh
3	バイオマス (550kW)	62,945 千円	2,758 千円	104,311 千円	チップ 40t
4	バイオマス (200kW) +電気 HP チラー	67,766 千円	2,192 千円	100,645 千円	チップ 23t 電力 9,039kWh
5	バイオマス (115kW) +電気 HP チラー	47,059 千円	1,782 千円	73,794 千円	チップ 23t 電力 9,579kWh

4. 考察

4.1. 地域の森林資源の活用と森林保全との両立について

大学近傍の林班における3地点でのプロット調査から人工林の林分密度を求めたところ、3地点中1地点でやや過密、1地点において超過密となっている事が明らかとなった。超過密となった地点の相対幹距比は約13.9%であった。これを正常値とされる20%に近づけるためには現在の60本の立木を31本間伐して29本とする必要がある(約50%間伐)。またプロット調査を行った3地点の平均では125本中36本の間伐が望まれ、この場合28.8%の間伐となる。以上のように大学近傍の山林では所によって大幅に密生した林分となっていることが明らかとなった。一方、前述のように大学で年間に必要とされる木質バイオマス重量は約50tであり、これは対象資源林と考えている第268林班の総材積量約36,000m³の約0.18%に過ぎない(比重を0.8t/m³とする)。材積量の約40%がAB材であることを考慮しても重量ベースでの間伐率は0.28%程度である。このことから大学におけるバイオマスボイラの燃料消費量は、望まれる間伐量と比較すると圧倒的に小さい事が明確となった。すなわち、燃料としての森林資源活用は大学周辺においては直ちに森林保全に貢献するというよりはむしろ、長期的な観点からバランス維持効果を期待することにつながると考える方が妥当と思われる。現時点ではプロット調査地点が少ないため林班全体の保全を議論するには時期尚早であるが、今後調査プロットを増加していく事で森林の内部環境保全への貢献の程度がより明確になることと期待される。

4.2. 初期費用と運用費用を抑制した導入パターンの提案について

ライフサイクルコストの算出結果より、本大学にて木質バイオマスボイラを導入する場合、バイオマスボイラ(115kW)とヒートポンプチラーの組合せたシステムがもっとも経済性が高いことがわかった。これは、全量バイオマスの供給システムのように一時的なピーク負荷に合わせたシステム容量にしてしまうと、設備の稼働率が低くなり高価なシステムを有効活用できず費用対効果が悪化してしまうからである。加えて、バイオマスボイラを利用した冷房システムは、吸収式冷凍機の機器効率が0.68と低いため冷房効率が悪くなり、安価なバイオマス燃料の恩恵を受けられない。さらに、冷凍機の機器効率が悪い場合、冷房のピーク負荷に合わせて過大な出力のバイオマスボイラが必要となり導入費用が高くなってしまふことから、全量バイオマスを利用したシステムの経済性が悪化したといえる。このように、木

質バイオマスのエネルギー利用に際しては、バイオマスボイラの運転特性やエネルギー負荷特性に応じたシステム設計が重要であるといえる。

4.3. CO₂排出量の削減効果について

各ケースの CO₂ 削減効果を算定した。各ケースの CO₂ 排出量を縦軸にとり、ライフサイクルコストを横軸にとったグラフを図 4-1 に示す。CO₂ 排出量が少なくライフサイクルコストも小さいケースが良いことから、グラフの左下にプロットがあるケースほど費用対効果が高いことを示している。

ケース 2 の電気 HP (ヒートポンプ) チラーはもっとも経済性に優れており、現状より 24% の費用削減が見込まれ、CO₂ は 49% の削減が見込まれる。ケース 3 の全量バイオマスボイラで賄う場合では、設備の動力に伴う電気使用のみが CO₂ 排出量としてカウントされ、CO₂ 排出量が現状より 93% の削減が見込まれる。しかし、コストは現状よりも 16% 増加する。ケース 4, 5 は、ケース 3 のモデルからバイオマスボイラ容量を小さくした場合を示している。最終的にケース 5 の 115kW のモデルがもっとも費用対効果に優れ、CO₂ が 78% の削減、ライフサイクルコストが 18% の削減が見込まれる。ケース 5 では、冷房は電気 HP チラーから供給されるものの、冷房の負荷が少なくチラーが高効率であること、暖房では負荷の 97% をバイオマスボイラから供給可能なこと、により総負荷の 67% をバイオマスに置換えられたことで CO₂ 削減効果が高く維持されている。このように、負荷に応じた適切なバイオマスボイラの導入システムの考案により、現状より環境性・経済性に優れたシステムとなることが期待できる。

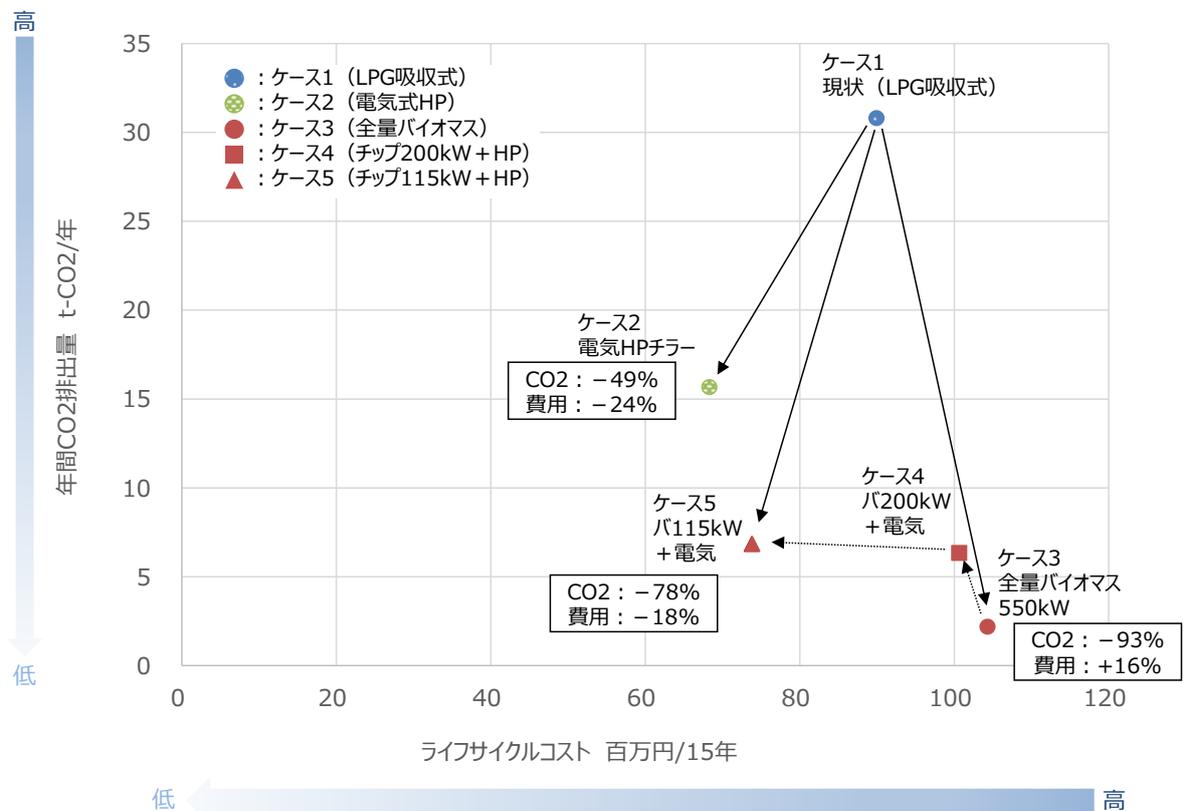


図 4-1 導入ケースごとのライフサイクルコストと CO₂ 排出量の削減効果

(謝辞)

本研究を実施するにあたり、富山県農林水産技術センター森林研究所（富山市吉峰）の岡子光太郎博士には森林調査手法を始めとして研究の全般にわたり懇切なご指導を頂いた。また対象森林調査等の利用許可を頂いた職芸学院（稲葉實理事長）に感謝の意を表するとともに、当学院の亀谷事務局長、ならびに長谷川教授には研究会を通して基調なご意見と示唆を頂いた。ここに改めて感謝の意を表する。

なお本研究の一部は、環境省「平成30年度二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金（再生可能エネルギー電気・熱自立的普及促進事業）」第2号事業の補助事業により実施した。

引用文献

- (1) 安藤範親（2014）未利用材の供給不足が懸念される木質バイオマス発電，農林金融，Vol67(6)，p.p.364-378
- (2) 石丸美奈（2015）木質バイオマス発電事業の拡大と輸入バイオマス燃料，共済総研レポート，（一社）JA 共済総合研究所，12月号，p.p.48-53
- (3) 柏木孝夫監修（2008）天然ガスコジェネレーション計画・設計マニュアル，日本エネルギー学会
- (4) 風聡一郎・梶間周一郎・内山愉太・香坂玲（2017A）温浴施設での薪ボイラー導入における運用実態－木質バイオマスの小規模熱利用が地域に与える影響とは－，日林誌，Vol99，p.p.18-23
- (5) 風聡一郎・梶間周一郎・内山愉太・香坂玲（2017B）山村地域における薪ボイラー導入の効果と課題－三市町村の事例分析より－，林業経済研究 Vol63(3)，p.p.74-80
- (6) 近藤洋史・今田盛生・吉田茂二郎（2002）高齢林における林分密度指標の解析，九州森林研究，No.55，p.p.42-45
- (7) 細田和男・光田靖・家原敏郎（2010）現行立木幹材積表戸材積式による計算値との相違およびその修正方法，森林計画誌 44，p.p.23-39
- (8) 林野庁（2017）木質バイオマス熱利用・熱電併給事例集