

## 7. キャンパス内のバイオマス発電による熱電併給システムの簡易提案・評価

### 7.1 バイオマスガス化熱電併給システムの概要

木質バイオマスは、近年、発電用や熱利用向けに活用が進んでおり、とくに、2012年7月に、再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT）が導入されてから、木質バイオマスを燃料とする発電所が増加し、エネルギーとして利用された間伐材等の木質バイオマスの量も2012年の81万m<sup>3</sup>から2016年には433万m<sup>3</sup>へと5倍以上も増加している。

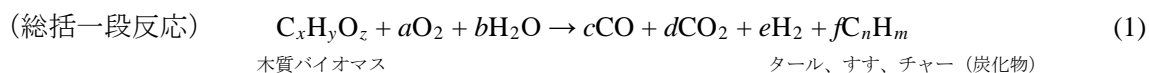
福島県内では、FITによるバイオマス発電の多くは大型の蒸気発電である。蒸気発電は、規模に依存して発電効率が向上する事がわかっているため、事業性を考えれば大規模な施設が必要となる。未利用木材を燃料とし、12MJ/kg-wet40%、単価12,000円/tとして、算出された文献では、発電コストがFIT買取価格を下回るためには、5MW以上の規模が必要であるとある<sup>1)</sup>。年間の木質は、効率20.7%、稼働時間を7500h/yとして、計算すれば年間5万トン以上必要な計算になり、地域材の調達に大きな課題がある。マレーシアやインドネシア産のパーム椰子殻（PKS：palm kernel shell）等の輸入燃料に依存せざるを得なくなる恐れすらある。

そこで、地域材利用の推進には、小規模で高効率な発電システムが必要である。小規模バイオマス発電には、主にガス化発電とORC（organic Rankin cycle：有機ランキンサイクル）があるが、とりわけ有望なものはガス化発電の熱電併給装置（CHP：combined heat and power）である。発電効率と熱生産効率を併せた効率である総合効率が、80%を超えるものもある。わが国のガス化発電システムは、開発事例は多いが稼働実績に乏しい。長時間の稼働実績を持つヨーロッパ製の商用小規模ガス化CHP装置が期待されている。

地域の木材を利用することにより、発電・熱生産などのエネルギー供給だけでなく、中山間地域の活性化、林業活性化、地域資源の循環やペレット工場や原料収集運搬において雇用を生み出すことができる。とりわけ、ガス化CHPシステムでは、放射能汚染木質バイオマスの燃料利用によって放射性物質が拡散したいことがわかってきている。ガス化CHPシステムを積極的に用いることによって、福島の復興のための残された課題である森林除染を実行することも期待できる。そのために、熱や電気の需要把握、放射能汚染木質バイオマスや未利用間伐材等の供給・利用可能性を的確に把握し、地域のニーズに合った熱電併給システムの構築が必要である。本報告書では、そのための基礎的な検討を行った。

#### バイオマスガス化反応経路

木質バイオマスガス化には、熱分解、部分酸化、還元（ガス化・水蒸気改質）の反応が逐次的・並行的に進行する。これらの反応は、酸素量、水分率、温度など様々な条件によって、反応進行度が異なる。ガス化反応を総括して一段で表した反応を式(1)に示した。



木質と酸素と水が反応して、一酸化炭素、二酸化炭素、水素、炭化物が生成する。炭化物はC<sub>n</sub>H<sub>m</sub>で表され、メタンやエタンやエチレンなどの可燃性ガスや、タールやすすやチャーなどの固液生成物なども含めて表している。表-7.1.1に主な化学反応を載せた。反応熱が正の反応は発熱反応であり、負の反応は吸熱反応である。

表-7.1.1 バイオマスガス化の主な化学反応。

反応		反応式	反応速度	反応熱 [kJ/mol]
熱分解反応	熱分解	$\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z \rightarrow a\text{CO}_2 + b\text{H}_2\text{O} + c\text{CH}_4 + d\text{CO} + e\text{H}_2 + f\text{C}_{2+} + \text{char} + \text{tar}$		
	燃焼	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	速い	393.5
酸化	酸化	$\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	速い	242
	部分酸化	$\text{C} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$	速い	123.1
還元反応	ブドア反応	$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$	やや遅い	-159.9
	水性ガス化	$\text{C} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{gas})} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	普通	-118.5
	シフト反応	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{gas})} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	普通	40.9
	メタン化	$\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}_{(\text{gas})}$	遅い	205.2
	改質反応	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}_{(\text{gas})} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	遅い	-206

ガス化の反応経路を図-7.1.1に示す。バイオマス様々な熱の伝わりによって熱分解と呼ばれる反応を起こす。熱分解反応によって気体のガス、液体のタール、固体のチャーが生成する。タールやチャーは水蒸気や雰囲気ガス（ガス化剤）によって改質・分解されてガスになるものもある。

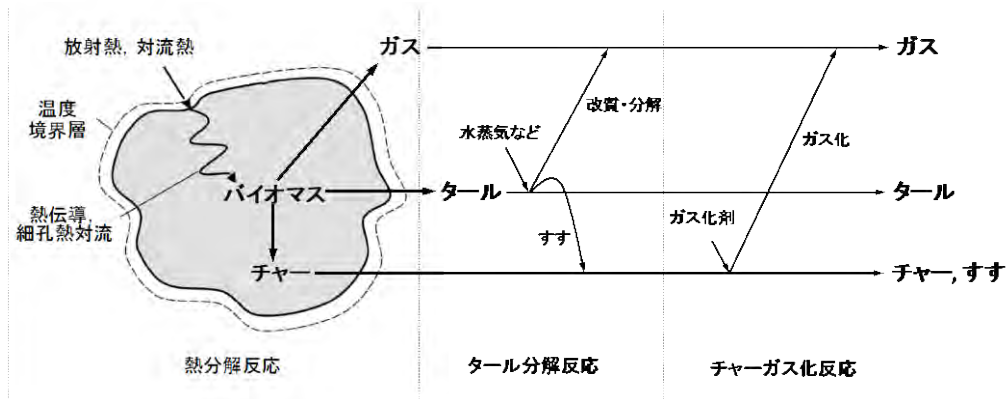


図-7.1.1 バイオマス燃料のガス化反応経路 2),3)

### バイオマスガス化熱電併給システム構成

バイオマスガス化 CHP システムの構成を図-7.1.2に示す。木質燃料をガス化炉と呼ばれる反応容器の中でガス化させる。ガス化炉に投入された木質燃料は乾燥され、熱分解する。その後空気などの酸化剤をブローすることによって部分酸化させ、還元反応を経て、可燃性ガスを発生させる。ガス化炉で発生した可燃性ガスはガスクリーニングを行って、凝縮物を取り除いた後、ガスクーラーで熱交換して冷却される。その後、冷却された可燃性ガスは、内燃機関に供給され軸動力を発生させて発電機を回して発電する。このときの内燃機関で発生する熱についても熱交換して温水として回収する。

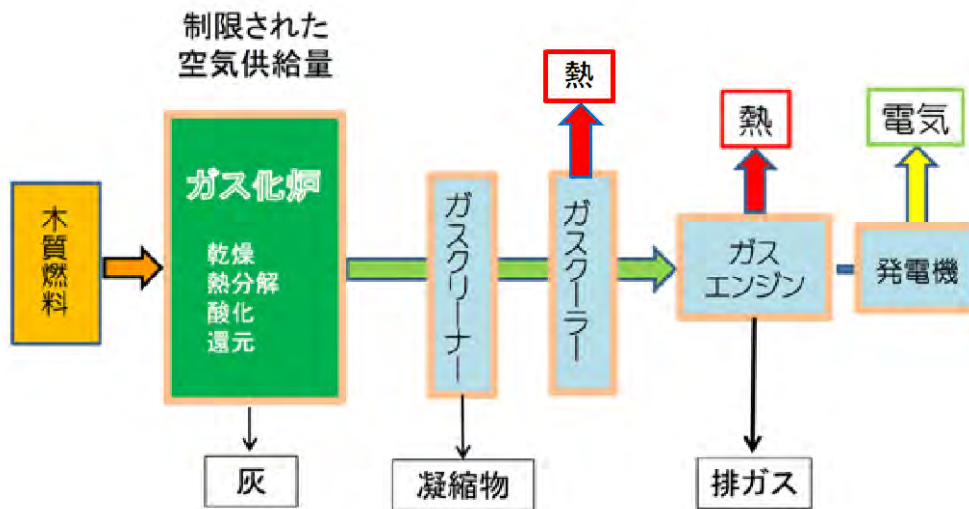


図-7.1.2 バイオマスガス化熱電併給システムの構成

## 7.2 バイオマスガス化熱電併給システムの事例（スパ・ホテルあぶくま）



図-7.2.1 スパ・ホテルあぶくまの小型木質バイオマス熱電併給プラント  
(藤田建設工業ホームページより)

福島県西白河郡西郷村のスパ・ホテルあぶくまに設置されたバイオマス発電熱電併給システムの事例を示す。図-7.2.1はドイツのデュッセルドルフを本社とする Entrade Energy 社の小型木質ペレットガス化熱電併給装置である E3 ユニットの写真である。

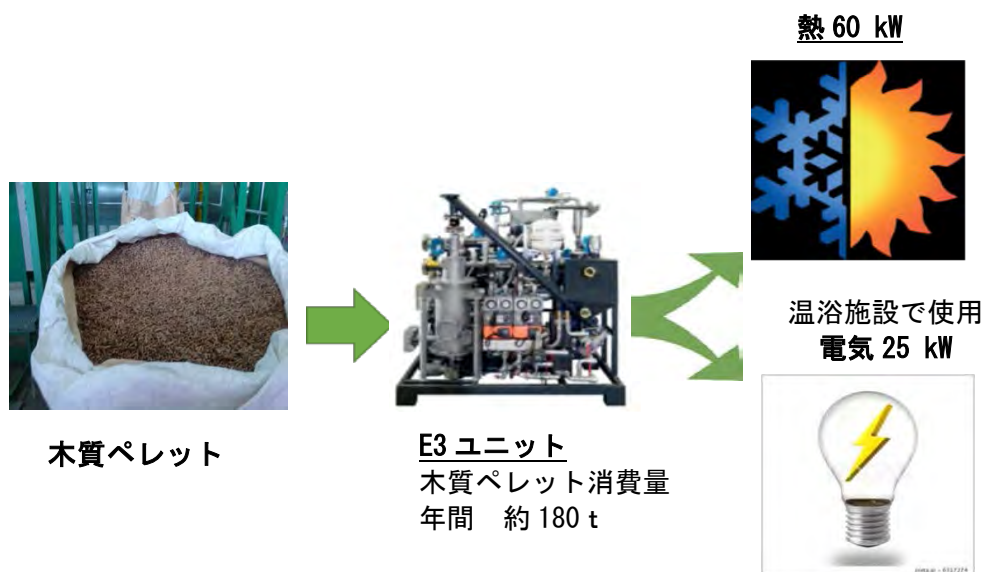


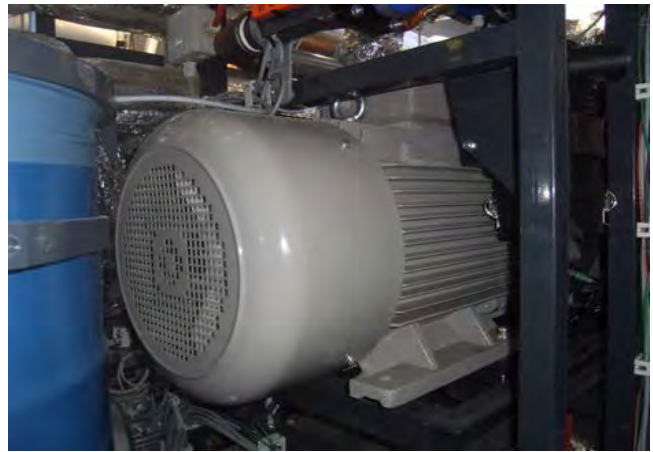
図-7.2.2 木質ペレット熱電併給の供給と生成

### E3 ユニットの仕様

E3 ユニットのインプットとアウトプットの概略を図-7.2.2 に示す。仕様は以下のとおりである。

- エンジン： General Motors 社製 4.3 L, 6 気筒, 1500 rpm
- 発電容量： 25 kW/三相 400 V 50 Hz
- 熱生産量： 60 kW (地下水による熱交換で、ガス化炉・エンジンの熱を回数) (90℃→60℃)
- 騒音： 20 dB (20 ft コンテナ扉閉)、50 dB (open)
- 総合熱効率： 85%
- ペレット消費量： 23 kg/h, 年間 8,000 時間運転で約 15 トン/月
- 灰の排出量： 0.104 kg/h

またエンジンと発電機の写真は図-7.2.3 に示す。



(a) エンジン部  
(General Motors 社製, 4.3 L)  
エンジンオイル : 約 4ℓ  
回転数 : 1500rpm

(b) 発電機  
(AC-Motoren 社製, 400 V / 25 kW)  
性能 : IE3 (プレミアム規格)  
タイプ : 三相誘導発電機 4P

図-7.2.3 E3ユニットのエンジンと発電機

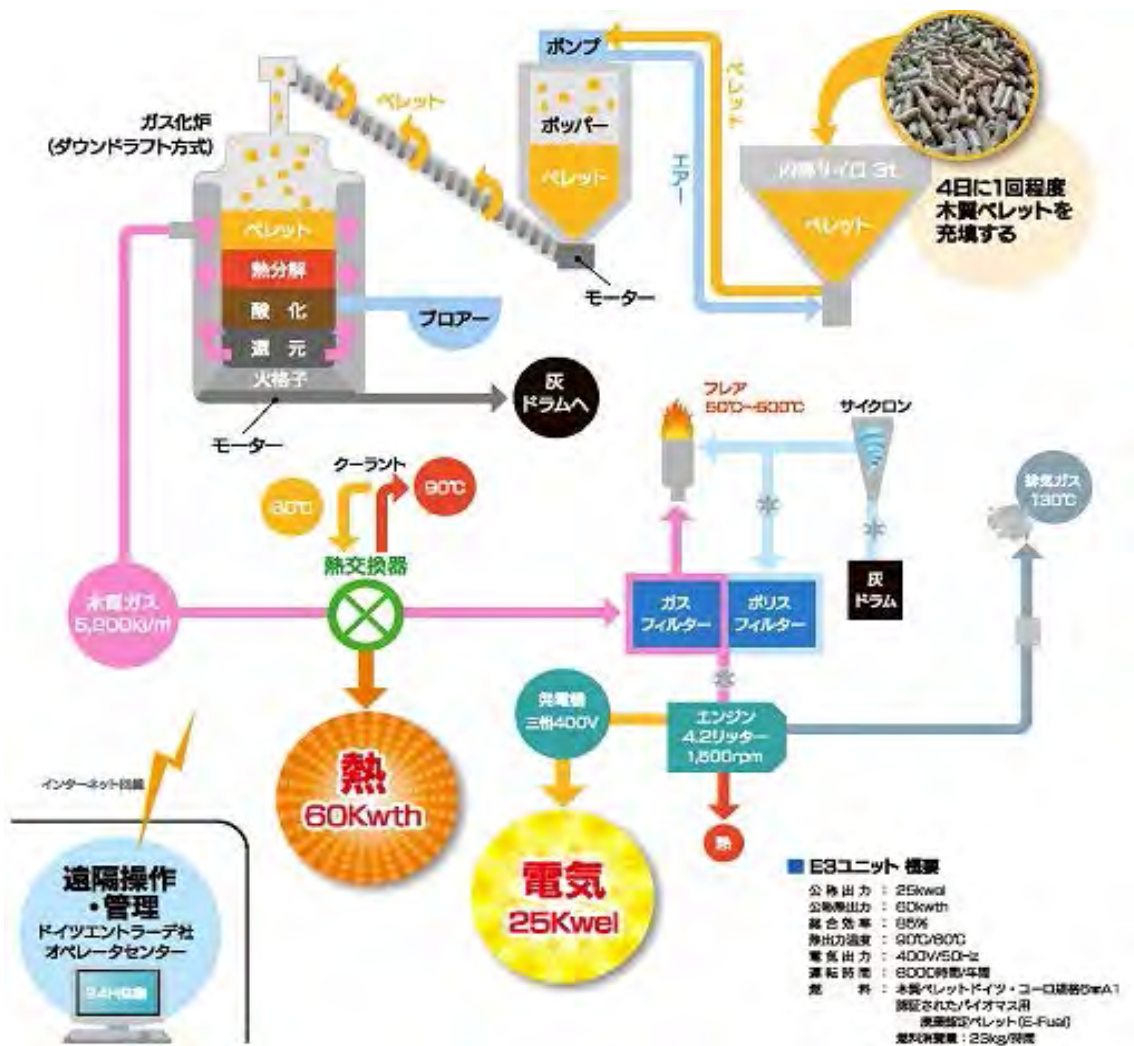


図-7.2.4 E3ユニットの物質とエネルギーのフロー図

### E3 ユニットの物質・エネルギーフロー

燃料の木質ペレットを熱分解しガス化する。木質ガスは公表値によると、CO : 22.5%、CO<sub>2</sub> : 9%、H<sub>2</sub> : 19%、CH<sub>4</sub> : 1.8%、である。木質ペレット燃料の消費量は 0.5 t/d である。熱効率は公表値によると、発電効率が 25% (公表値)、熱生産効率が 60% (公表値) である。E3 ユニットの運転は、ドイツ Entrade 社のオペレーションセンターが 24 h 監視しており、ガス化炉内の温度や圧力の異常な上昇などを検知すると木質ペレット燃料や空気の供給停止を行う。メンテナンスについては、オペレーションセンターから具体的な指示が SNS アプリ (WhatsApp) を介して届く。

## ENTRADE E3 CHPのエネルギー収支

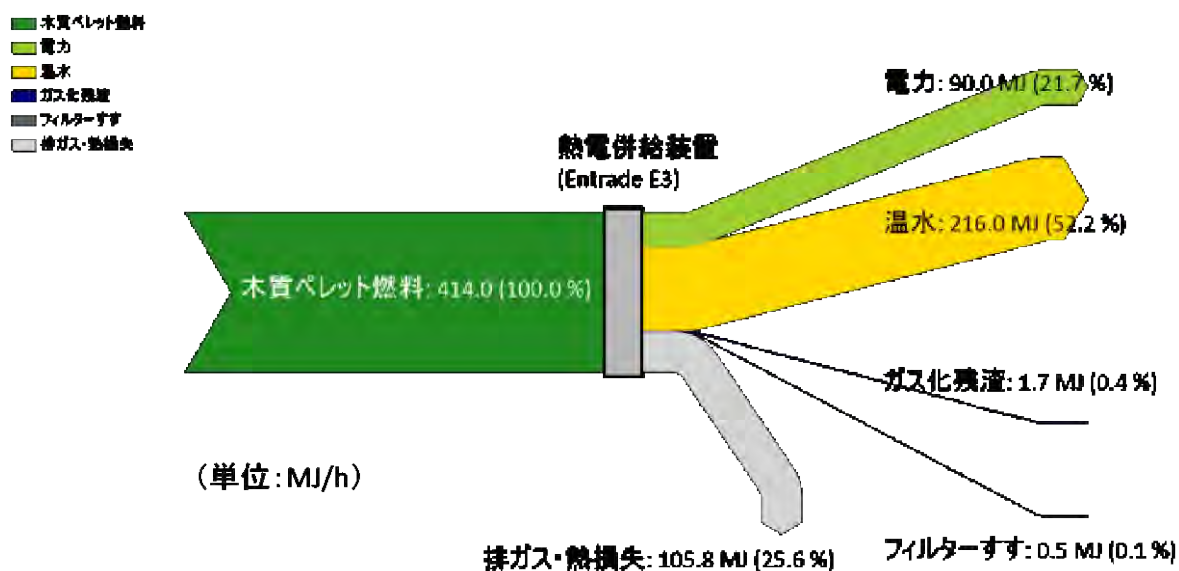


図-7.2.5 E3 ユニットのエネルギー収支

E3 ユニットのエネルギー収支を図-7.2.5 に示す。発電、熱生産は ENTRADE 社公表値とヒアリング値をもとに作成した。電力が 90 MJ/h、温水が 216 MJ/h、ガス化残渣が 1.7 MJ/h、フィルターすすが 0.5 MJ/h、排ガス・熱損失が 105.8 MJ/h である。

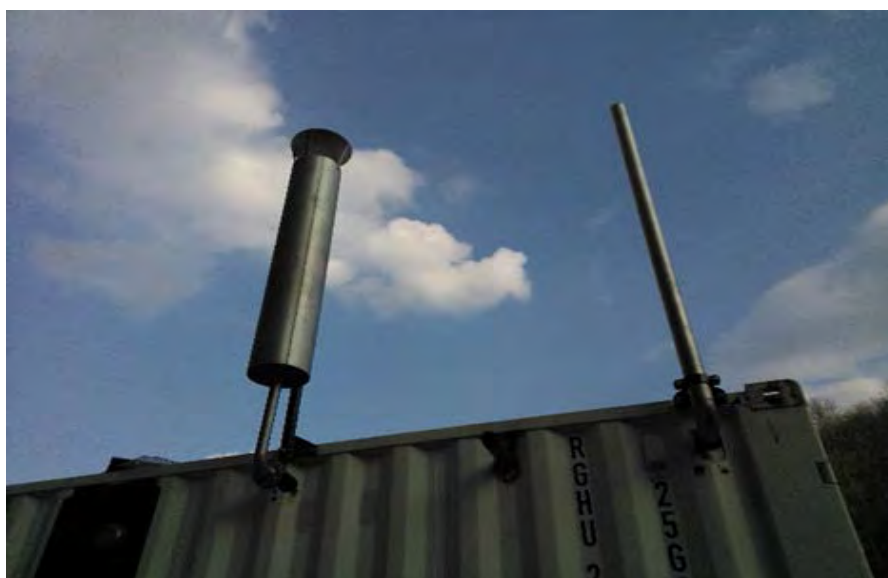


図-7.2.6 E3 ユニットのフレア管と排気ガス

E3 ユニットのフレア管と排気ガスの写真を図-7.2.6 に示す。右側が、エンジン排気管である。通常運転時の排気はエンジンの排気ガスのみで、放射性物質は排気ガ

スから拡散しない。福島大学共生システム理工学類、小井土によって排ガス捕集を行い分析の結果、不検出であることがわかっている。

左側がフレア管である。メンテナンス時（ガスフィルター交換や、エンジンオイル交換）にはガス化炉を停止しないで、エンジンを止めて行う。この間、木質ガスはエンジンに供給されず、フレア配管で燃焼される。

### E3ユニットの木質燃料

西郷村の E3 ユニットに供給する木質ペレット燃料の製造工場が、棚倉町上台にある。工場は株式会社シーズによって運用されている。木質ペレット燃料の原料は、協和木材株式会社の埴町工場で作られる製材端材とマツを混合して作られる。その他は未利用材である間伐材を手に入れて、粉碎してオガ粉にした後、マツと混合してペレットを製造する予定である。バーク（樹皮）は混合しないことになっている。以下に木質ペレット燃料の寸法と仕様を列挙する。

- 寸法： 長さ 6~8mm, DIN, A1, 径 3~4mm
- 機械的強度： 97%以上（固め）
- 水分率： 10%以下（工場出し）
- ペレタイザー能力： 750 kg/h

図-7.2.7には木質ペレット燃料製造工場（シーズ上台工場）のペレット製造設備を示す。ロータリーキルン式おが粉乾燥機とペレタイザー（CPM社製 750 kg/h, リングダイ式）である。



(a)



(b)

図-7.2.7 木質ペレット製造上台工場のペレット製造設備。(a)ロータリーキルン式おが粉乾燥機, (b)ペレタイザー (CPM社製 750 kg/h, リングダイ式)

### 木質ペレット燃料の搬送

木質ペレット燃料を効率よくかつ高品質で輸送するためには、専用の輸送トラックが必要となる。図-7.2.8は英国リバプールにて視察したペレット搬送車である。日本では、トン袋（約600～700kg）が一般的であるが、ペレット燃料を損傷せずに、湿気を抑えて輸送し、高所にあるサイロの入口まで輸送するためには、バルク（粒粉体）車による空気圧送方式が必要である。平成30年度に、シーズ社のペレット上台工場にて、ペレット搬送車を導入予定でいる。



図-7.2.8 英国リバプールのペレット搬送車（20 t）

### 導入のねらいと課題

藤田建設工業が中心になって、行った西郷村のスパ・ホテルあぶくまのE3ユニット設置であるが、目的は、

#### 《導入のねらい》

- (1) 小規模な分散型電源を地域の需要地に設置して、中山間地域の活性化と地域資源の循環や林業の活性化などの地域振興を行うこと
- (2) ペレット工場や原料収集運搬において雇用を踏み出すこと
- (3) これまでの重油を用いたボイラーによる熱供給を、木質バイオマスによるCO<sub>2</sub>フリーなエネルギーにシフトすることによる環境負荷低減

であった。これらの目的のもと、E3ユニットの設置・稼働とペレット工場の稼働を行ってきたなかで、浮かび上がってきた課題は、

#### 《課題》

- (1) 燃料である木質ペレットのコストダウン（ストーブ用→産業用）
- (2) 給湯など熱を無駄なく使うこと（特に夏期の給湯が課題）
- (3) 自家用電力として使用（400V→200V変換）は良いが、FIT売電には系統連携保護装置（PCS）が必要であり、国内ではメーカーが限定的で高価である

である。これまでストーブ用として、主に冬季のみ製造されてきたペレット燃料を、産業用の燃料として流通させるには、製造規模が小さい。海外のペレット工場では単一の事業所あたりの製造規模が年間数万～数百万トンであるが、国内では、年間数千トンである。ペレット燃料価格の低減のために規模の拡大が必要である。

また、生産される熱の需要を確保することが必要である。給湯以外の施設園芸や養殖など様々な選択肢を検討する必要がある。

## エネルギーシフト

給湯量は、流量 28.68 L/min であり、約 2000 L/h の冷却水が必要である。熱量を A 重油に換算すれば、MAX で 44,200 L に相当する（ただし、年間 8,000 h 稼動、A 重油の標準発熱量（9,293 kcal）換算）。

発電量は、年間 200,000 kWh であり、標準的な家庭の 40 件分に相当する（ただし、年間 8,000 h 稼動を想定）。このときの CO<sub>2</sub> 削減量は、電気が 77.4 t-CO<sub>2</sub>/年（標準的な家庭の 14.5 件分）、重油が 120 t-CO<sub>2</sub>/年（標準的な家庭の 22.4 件分）である（資料：全国地球温暖化防止活動推進センターより）。

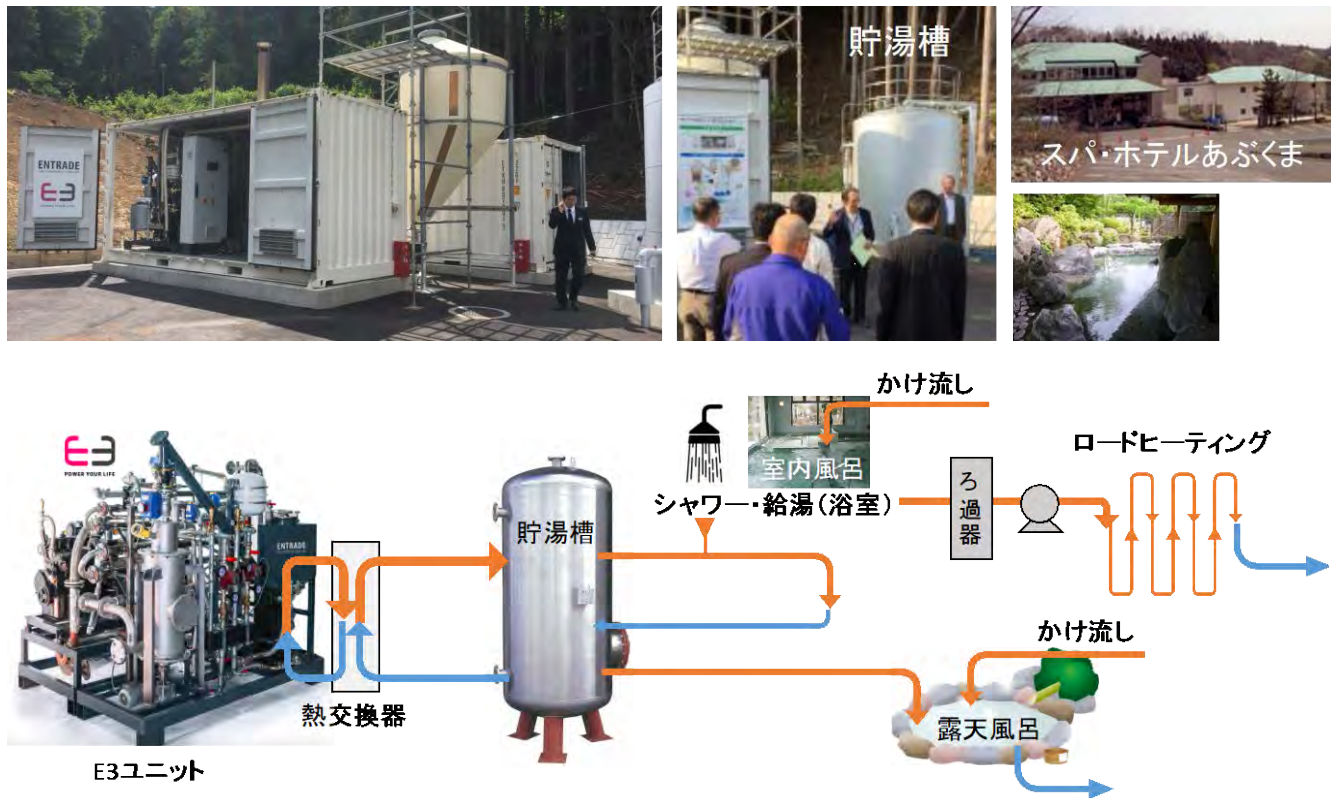


図-7.2.9 西郷村のスパ・ホテルあぶくまの熱供給

熱供給の系統を、図-7.2.9 に示す。

## 7.3 学生寮・ハイブリッド給湯システム

投資した金額を早期に回収するために、熱は、年間熱負荷が生じる給湯熱源で用いるのが、暖冷房熱源より効果が高い。しかし、一般に教育・研究施設で給湯熱需要は少ないことから、長期休暇中の熱需要が低いものの学生寮が適当と考える。

金谷川キャンパス内にある学生寮 3 棟の内 1 棟に、「7.2 バイオマスガス化熱電併給システムの事例（スパ・ホテルあぶくま）」に記述したエンターデエネルギーシステム社（本社：ドイツ・デュッセルドルフ）製の小型木質ペレットガス化熱電併給プラント E3 を導入することを想定する。木質バイオマスは、福島県内産を使用するのが望ましいが、供給先の確保が重要になり、課題の一つになる。

木質ペレットガス化熱電併給プラントは、学生寮 3 棟の東南方向の空き地に設置する。木質ペレット燃料の貯蔵用に用いるサイロの置き場も、この近辺を想定する。

木質バイオマス熱電併給プラントから出る熱（温水）は、「6.8 学生寮・地下水利用ヒートポンプハイブリッド給湯システム」で設置する貯湯槽に供給する。地下水利用ヒートポンプシステムは、高い運転効率であることから、本バイオマス熱電併給システムとの比較をして運転制御を構築する。

木質ペレットガス化熱電併給プラントで発電する電気は、学生寮の動力系統に接続して、連携する。運転管理と日常の保守点検要員が、1 名必要となり、経費の負担と人員の確保が課題である。



#### 引用・参考文献

- 1) 多喜真之・山本博己・市川和芳:国内バイオマス発電の経済性評価, 第 31 回エネルギー・システム・経済・環境コンファレンス(エネルギー資源学会), (2015-1)
- 2) Basu P. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. 1st ed. Chichester: Elsevier: 2010. p. 68. ISBN: 978-0-12-374988-8
- 3) 化学工学会・日本エネルギー学会共編, バイオマスプロセスハンドブック, オーム社, p. 258.