

製品紹介

熱電発電技術と応用製品

Thermoelectric Generation Technology and the Applied Products

八馬 弘 邦
Hirokuni Hachiuma
村瀬 隆 浩
Takahiro Murase
後藤 大 輔
Daisuke Goto
藤本 慎 一
Shinichi Fujimoto
牧野 一 也
Kazuya Makino

2018年12月にポーランドで開催されたCOP24にて、地球温暖化対策の国際的枠組みを定める「パリ協定」の運用指針が採択され、日本政府は地球温暖化の原因となる温室効果ガスの総排出量を2030年度に2013年度比で26%削減する目標を発表した。国内では一次エネルギーの約6割が有効活用されずに未利用熱として排出されており、未利用熱の活用はますます重要になってきている。熱電発電は未利用熱を活用する次世代エネルギーとして近年注目を集めている。熱電発電は、工場や発電所、焼却炉などで排出される大量の排熱の一部を電気エネルギーとして回収することができ、温室効果ガス削減に効果を発揮するものと期待されている。

At COP 24 held in Poland in December 2018, the operation guidelines for the “The Paris Agreement” that defines the international framework for global warming countermeasures were adopted. Japanese government announced the goal of reducing greenhouse gas emissions, which are the cause of global warming, by 26% in FY 2030 compared to the FY 2013 level. In Japan, about 60% of primary energy is emitted as unused heat without being effectively utilized, and utilization of unutilized fever has become increasingly important. Thermoelectric generation has received attention in recent years as the next generation energy utilizing unused heat. Thermoelectric generation can recover electrical energy from a part of a large amount of waste heat emitted from plants, power plants, incinerators, etc. It is expected to be effective in reducing greenhouse gases.

Key Words: 熱電発電, 排熱回収, 熱電発電モジュール, 木質バイオマスストーブ, 環境発電(エネルギーハーベスティング:EH), 時間基準保全(TBM), 状態基準保全(CBM)

1. はじめに

KELKは、1957年からコマツが始めた熱電半導体の研究開発を前身とし、1966年に熱電素子応用製品メーカーとして設立した。熱電半導体を温度制御として使うサーモ・モジュール(ペルチェモジュール)に関して、素材からモジュール、熱交換器、応用機器までの開発・製造・販売を一貫して手掛けており、半導体製造装置で使用される温度制御装置においては世界トップメーカーとして市場をリードしている。また、熱電半導体により熱を電気に変換する熱電発電においても要素技術の開発から応用製品の開発まで手掛けるリーディングカンパニーであり、ボタン電池レベルのmW出力から商用電力レベルのkW出力まで幅広い出力範囲の熱電発電製品を開発している。

本稿では、熱電発電技術と応用製品の「排熱回収ユニット」「熱電発電自立電源ユニット」「熱電EH無線デバイス」を解説する。

2. 熱電モジュールの原理

熱電変換技術は熱電半導体と呼ばれる材料を介して熱を電気に、または、電気を熱に直接変換する技術である。それぞれ、19世紀前に発見された、ゼーベック効果(図1参照)、その表裏一体の関係にあるペルチェ効果としてよく知られている現象を応用した技術である。

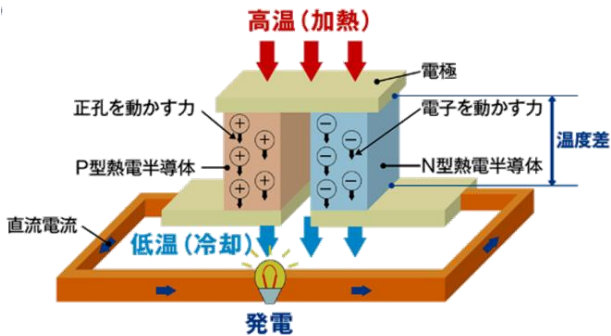


図1 ゼーベック効果の原理図

ゼーベック効果は、金属もしくは半導体の両端に温度差が生じると、両端の電子もしくは正孔濃度分布に差異が発生し、起電力(熱起電力)が生じる現象である。特に半導体ではその外因性領域で発生する電子や正孔は、温度に対して指数関数的に増加するため、熱起電力は金属よりもさらに大きくなる。熱電発電モジュールは図2のようにP型、N型の熱電半導体素子を金属電極により交互に多数直列接続したモジュールである。この構造により、同じ熱流方向に対して、それぞれの熱電半導体素子の熱起電力が累積され、より大きな電圧が得られるようになる。

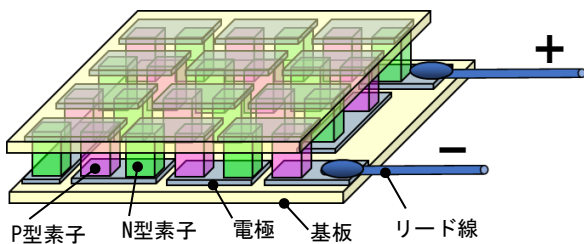


図2 熱電モジュールの基本構造

熱電発電モジュールは使用温度が高いため、高温での特性を考慮した熱電半導体が開発されている。熱電半導体では、温度が高くなるにつれ、電子または正孔の一方が支配的な外因性領域から両極性伝導となる真性領域に入ってくると、熱伝導率の増加(温度差がつきにくい状態)とゼーベック係数の低下(熱起電力の低下)につながり、熱電半導体の性能(性能指数)が低下する。熱電半導体としては、使用温度領域で両極性伝導になりにく

く、性能指数の高い材料が開発されている。

現在、ほとんどの熱電発電モジュール、ペルチェモジュールで、Bi-Te系と呼ばれる熱電半導体がいわれている。熱電発電モジュールでは、カルノー効率の観点から高温の熱源を利用して、より大きな温度差をつけて利用するのが効率的であり、古くから、シリサイド系、Pb-Te系、スクッテルダイト系、Si-Ge等、Bi-Te系熱電半導体より高温領域で特性の良好な熱電材料が多く研究開発されている(図3-1、3-2参照)。しかしながら、実際の熱電発電による発電システムにおいて、発電量を高める効率的な熱設計をした場合、より大きな熱量を熱電発電モジュールに貫通させることが重要であり、低温側を水冷とする場合が大半である。この場合、熱電発電モジュールの高温側温度は必然的に熱源の温度よりも大幅に低下し、高温側温度が300℃を大幅に超過する状況は極めて限定的である。Bi-Te系熱電半導体は、材料組成を最適化すると、室温付近のみでなく300℃付近の比較的高い温度領域でも、他の熱電半導体と比較して高い性能指数を示す。このため、熱電発電においてもペルチェ冷却の場合と同様、Bi-Te系熱電半導体は主力となる。

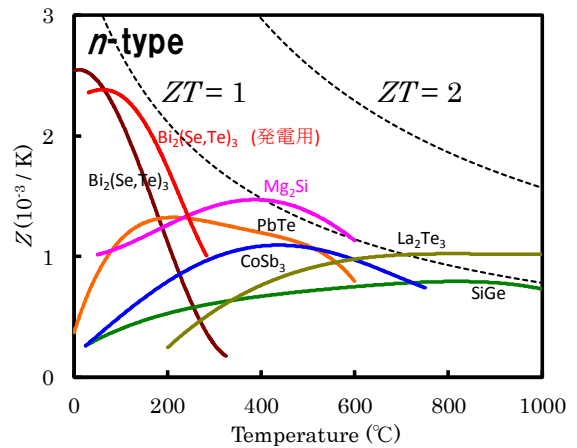


図3-1 N型熱電材料の性能指数

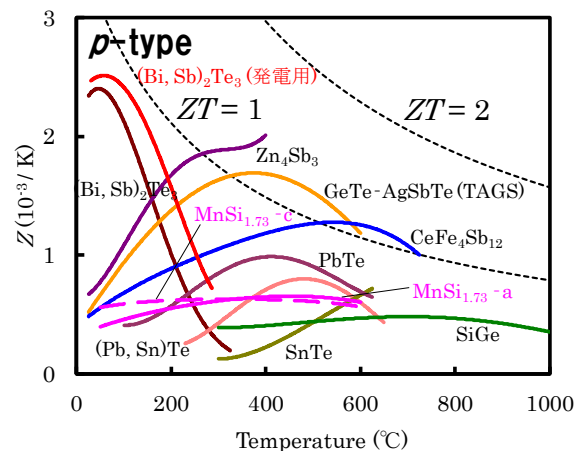


図3-2 P型熱電材料の性能指数

以上のような観点から、KELKは2009年に高温側280℃に耐えるBi-Te系熱電半導体を用いた「高出力熱電発電モジュール」を開発し販売を開始した(図4参照)。このモジュールは高温側280℃、低温側30℃、のときに最大出力24W、熱電変換効率7.2%(同温度領域で世界最高)を示す。次章にて説明する「排熱回収ユニット」に用いられるモジュールはこのモジュールの技術を用いている。

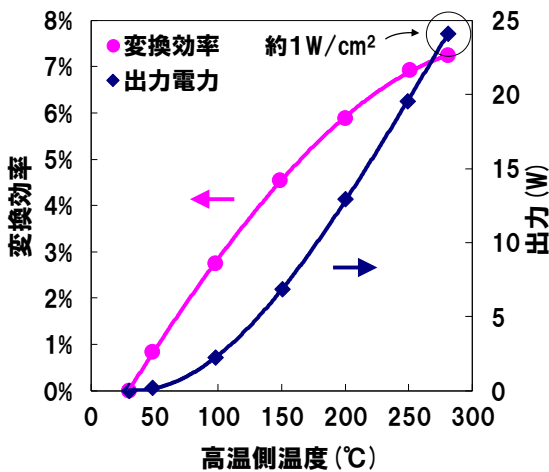
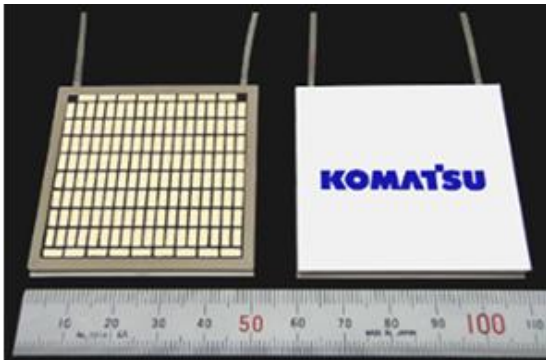


図4 「高出力熱電発電モジュール」の外観と電気的特性

さらに、2018年には、環境面を考慮し、250℃までの温度域で使用できる環境負荷の小さなPbフリーはんだ製品を開発した。従来、この温度域で使用できるはんだは安価なPbリッチはんだ、または、高価なAuSnはんだが大半であった。KELKは新たに、比較的安価でPbフリーのはんだを使用した高温耐久性の高い熱電発電モジュールを開発した。

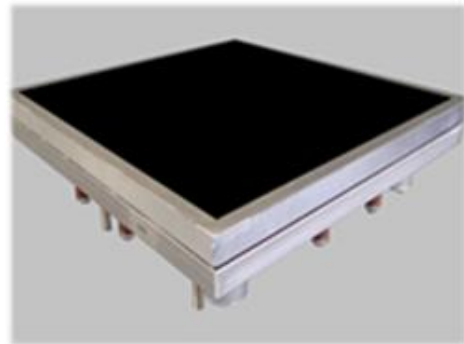
3. 応用製品の紹介

3.1 排熱回収ユニット

未利用熱の活用として、これまでも、ランキンサイクル、スターリングエンジン、熱電発電等によるエネルギー回生が検討されてきた。熱電発電には、熱電素子が熱を電気に直接変換するため駆動部品が必要ない、発電シ

ステムは比較的コンパクトで軽量にしやすい、排熱の変動に比較的強いといった利点があり、分散した排熱を活用する発電において特に競争優位性が高い。

KELKは2018年に、出力密度を上げ、当社比46%出力向上した最大出力350Wの熱電発電ユニットを開発した(図5参照、出力以外同等品の240Wモデル)。



型式	KSGU240
サイズ (mm)	W290 x D290 x H85
重量	約12 Kg
定格発電量	240 W
使用可能温度	受熱板センサ温度250℃以下
その他	冷却水が必要。熱源に応じて受熱板の形状は異なる

図5 「排熱回収ユニット」の外観と仕様

KELKは栗津工場にて浸炭炉のアフターバーナーの排熱を活用する「排熱回収ユニット」の実証試験を実施している(図6参照)。浸炭炉では熱処理後の使用済み可燃性ガスを燃焼して除害する必要がある。また、経済性や製造条件の安定性の観点から炉の温度の維持が必要で設備稼働率が高い。KELKは未活用であった浸炭炉の可燃性ガスの燃焼熱を「排熱回収ユニット」により電気エネルギーとして回生し、電気事業者の配電系統に系統連系するシステムを構築した。このシステムは熱電発電として国内初の経済産業省保安院発電設備認定を取得している。



図6 工業炉アフターバーナーの排熱利用熱電発電の実証試験

また、KELK は NEDO の「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」に参画し、製鉄所にて連続鋳造設備の輻射排熱を利用した熱電発電実証試験を実施している。鉄鋼業は日本全体のエネルギー消費の約 10% を占めるエネルギー多消費産業で、そのエネルギーの約 1/3 が未活用のまま排熱されている。連続鋳造設備では高温スラブ表面から放出される輻射熱は、広い面積から周囲に拡散するため、ランキンサイクルやスターリングエンジン等では、構造上効率的な排熱回収が困難である。一方、「排熱回収ユニット」は、輻射排熱を受熱面で受け、直接発電可能であるため、レイアウト上の利点がある。この実証試験では、幅 2 m、長さ 4 m のエリアに 56 台の「排熱回収ユニット」を敷き詰め、国内最大規模の 10 kW 級の発電を実現している（図 7 参照）。

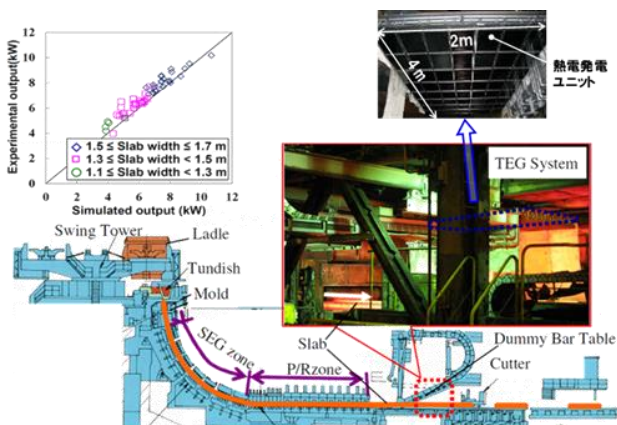
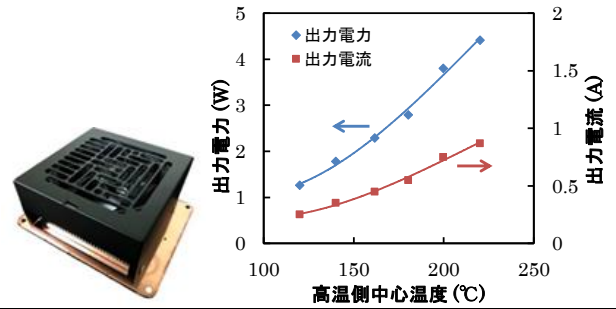


図 7 製鉄所の連続鋳造設備における輻射排熱を利用した熱電発電実証試験（本試験は NEDO の助成を受けて実施）

3.2 熱電発電自立電源ユニット

熱電発電モジュールは、熱源さえあれば特別な配線なしで半永久的に自立した電源として機能させられるため、数W～十数Wレベルのバッテリーの代替として応用可能である。さらに、配線レス・バッテリーレスのため、1次電池や2次電池などの電力単価以上の付加価値をもつ。熱電発電モジュールは、すでにカセットガスファンヒーターやアウトドアや災害時対策用の機器に応用されている。

KELK は、熱電発電モジュールの扱いに不慣れな人でも簡単に数Wの電力を得ることができる「熱電発電自立電源ユニット」を開発した。「熱電発電自立電源ユニット」は熱電発電モジュールと受熱板、DC-DC コンバータ、ファンなどを組合せて一体化した製品である。熱電発電自立電源ユニット「KSGU004」は受熱面が最高使用温度 220℃時に、最大値 4 W を出力する（図 8 参照）。



型式	KSGU004
サイズ (mm)	W140 x D142 x H76
重量	約3 Kg
定格発電量	4.0 W
使用可能温度	120～220℃
その他	出力ポート：USB

図 8 「熱電発電自立電源ユニット」の外観と仕様

熱電発電自立電源向け熱電発電モジュールとして、KELK は 2015 年に最高使用温度 200℃の熱電発電モジュール（図 9 参照）を開発し、「熱電発電自立電源ユニット」に搭載している。この発電モジュールは、図 4 に示した高出力熱電発電モジュールと比較すると性能面でやや劣るものの、出力、高温での耐久性のバランスがとれ、コストパフォーマンスが高い。

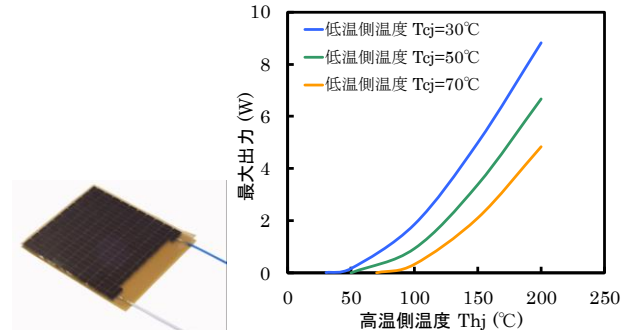


図 9 200℃熱電発電モジュールの外観と出力特性

「熱電発電自立電源ユニット」の応用例として、ペレットストーブのペレット燃料自動供給用モータの動力があげられる（図 10 参照）。このシステムを用いれば、燃料が枯渇するまで、自動でストーブの火力を維持することができる。



図 10 ペレットストーブの燃料自動供給システム

欧州では地球温暖化防止対策のため木質バイオマス燃料とする薪ストーブおよびペレットストーブの設置が増加しており、2020年には年間200万台以上の設置が見込まれている。その一方で、木質バイオマスストーブは燃焼により微細粒子状物質（PM）を発生し、大気を汚染するため、PMの規制値が年々厳しくなっている。ストーブメーカーはPMを抑制するための燃焼室内の温度や外気との混合、煙突のドラフト等を自動制御する技術開発を進めており、KELKはストーブメーカーと協力して、燃焼熱による熱電発電で自動制御システムを駆動する電源の開発を進めている。

3.3 熱電EH無線デバイス

米国航空会社による機械部品の劣化特性調査報告によると、機械部品は初期故障率低下後、89%の設備で故障がランダムに発生する。一般的な時間基準保全(Time Based Maintenance: TBM)では適正なメンテナンス周期を設定することができず、設備毎にランダムに発生する故障を抑えることが難しい。このため、設備診断技術での測定データに基づいたメンテナンスを行う状態基準保全(Condition Based Maintenance: CBM)が重要になっている。しかしながら、CBMでは監視部に温度・圧力・振動等のセンサを取付け、継続的に傾向を監視することが必要となる。そのため、センサ（本体、設置および配線）の費用、データの収集・判定システムの費用、および維持管理費用が高価になり、運用は製鉄所やプラントなどの一部に限られている。

KELKの「熱電EH無線デバイス」はこの課題を解決するデバイスとして期待されている。

「熱電EH無線デバイス」は、熱電素子を用いてモーターや配管などの排熱を活用する環境発電（エネルギーハーベスティング: EH）を電源とした無線通信機能付きデバイスである。「熱電EH無線デバイス」では、電源と通信の配線が不要で、かつ、電池交換不要のため、センサの設置費用と維持管理費用を削減できる。

「熱電EH無線デバイス」のデータの送信間隔は、搭載する超小型「熱電発電モジュール」の発電量に依存し、

最小間隔3秒にて送信される（図11参照）。

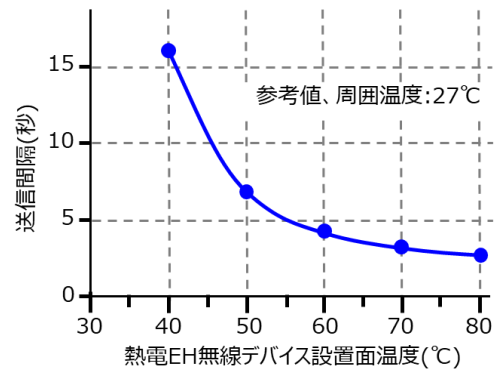


図 11 設置面温度とデータの送信間隔

「熱電EH無線デバイス」の熱電発電性能は、環境変化に対してロバスト性が高く、日中と夜間で10°C以上変動する曇り気や、降雨による急激な温度変化時でも本デバイスの表裏面の温度差は一定を保ち、安定して発電しセンシングデータを送信することができる（図12参照）。また、デバイスの筐体は屋外での使用も考慮した設計となっている。

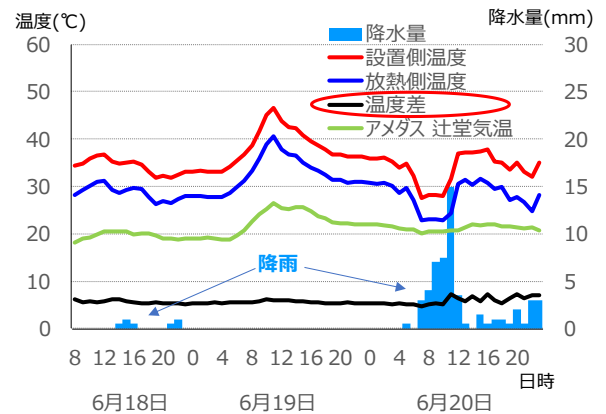


図 12 屋外設置「熱電EH無線デバイス」の環境温度の変化に対するロバスト性

KELKは2018年に、温度計測用の「熱電EH無線熱電対デバイス」と計測機器のアナログ出力を送信する「熱電EH無線アナログ入力デバイス」を開発した。「熱電EH無線熱電対デバイス」は、熱電対により-200°C~1500°Cの範囲で温度を測定しデータを無線送信する。「熱電EH無線アナログ入力デバイス」は、設備に搭載した電流・流量・圧力・湿度などの計測器の4-20 mAまたは0-5 Vのアナログ出力をデバイスへ入力でき、そのデータを無線送信する。

表 1 「熱電 EH 無線デバイス」の仕様

型式	KSGD-SNA	KSGD-SNT
種類	アナログ入力	熱電対
外部入力	4-20mA, 0-5V	K, R, B熱電対
サイズ (mm)	W61 x D44 x H20	
重量	約0.1 Kg	
電源	熱源による自己発電	
送信頻度	最小間隔3秒(設置環境による)	
使用可能温度	85℃以下	

「熱電 EH 無線デバイス」の通信方式は 2.4 GHz IEEE 802.15.4 準拠。中継機を最大 3 段設置でき、通信の障害物の迂回や、通信距離を伸ばすことが可能である。デバイスでセンシングしたデータはオンプレミス (図 13 参照) またはクラウド (図 14 参照) で収集と分析が行われ、規定値を外れるとメール配信されるシステムとして活用できる。



図 13 オンプレミスシステムでの構成例

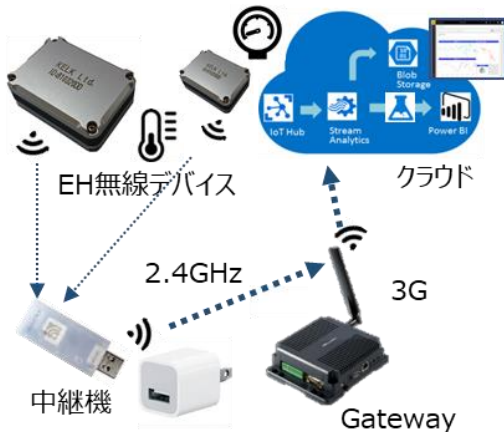


図 14 クラウドシステムでの構成例

センサの設置費用と維持管理費用を削減する「熱電 EH 無線デバイス」と、急速に技術革新が進むクラウドや AI 診断でのシステムは、TBM からより効率的な CBM への移行を促進すると期待されている。

KELK はこれらの「熱電 EH 無線デバイス」を自社工場の設備へ設置し、CBM での状態監視と保全への活用の評価を開始している (図 15 参照)。また、建設機械においても、この技術を用いた状態監視の評価試験を開始している。

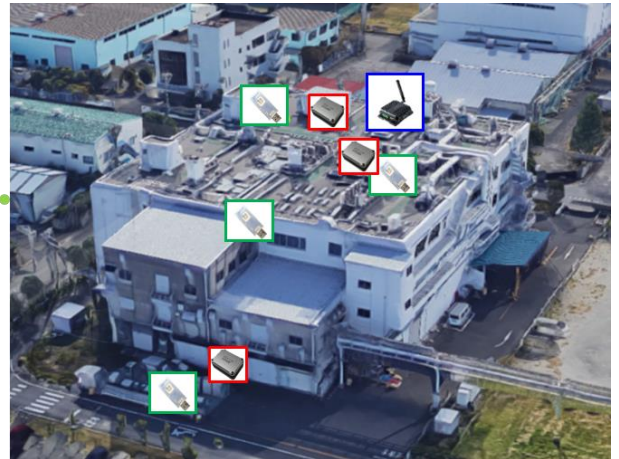


図 15 KELK の工場および屋上設置モータに設置した熱電 EH 無線デバイス

4. おわりに

熱電発電は、分散した排熱を活用する発電において特に競争優位性が高い。KELK は 2017 年から、従来の熱電発電モジュール単体のみでの製品ではなく、熱電発電応用製品の販売を開始した。より使いやすいデバイスやユニットとして熱電発電応用製品を提供することで、これまで以上に様々な場面や環境で、より多くのユーザーの熱電変換のニーズに応え、省エネルギー社会やスマート社会の構築に貢献していきます。

筆者紹介



Hirokuni Hachiuma
 はち うま ひろ くに
八馬弘邦 2001年, KELK 入社.
 専務取締役



Takahiro Murase
 むら せ たか ひろ
村瀬隆浩 2002年, KELK 入社.
 熱電発電技術営業部所属



Daisuke Goto
 ご とう だい すけ
後藤大輔 1993年, KELK 入社.
 熱電発電技術営業部所属



Shinichi Fujimoto
 ふじ もと しん いち
藤本慎一 2011年, KELK 入社.
 熱電発電技術営業部所属



Kazuya Makino
 まき の かず や
牧野一也 1999年, KELK 入社.
 熱電発電技術営業部所属

【筆者からひと言】

熱電発電技術は、mW のボタン電池レベルから kW の商用電力レベルまでの幅広い出力範囲の電源として活用できるにまで進化した。プロダクトアウト先行ではなくマーケットインでの製品開発プロセスを引き続き進め、熱電発電市場の創出を進める。