

製品紹介

1.5m×1.5mの面積で10kWを発電する 熱電発電ユニット KSGU400

**Thermoelectric Generation Unit KSGU400:
Generating 10 kW of Power within an Area of 1.5 m × 1.5 m**

村瀬 隆 浩
Takahiro Murase
牧野 一 也
Kazuya Makino
後藤 大 輔
Daisuke Goto
大場 正 和
Masakazu Ohba
岸澤 利 彦
Toshihiko Kishizawa

日本政府は2050年のカーボンニュートラルを目指し、2021年の気候サミットにおいて、2030年度の温室効果ガスの総排出量を46%削減（2013年度比）する野心的な目標を表明した。2023年2月には、徹底した省エネルギーの推進、製造業の構造転換、再生可能エネルギーの主力電源化などを方針とした「GX（グリーン・トランスフォーメーション）実現に向けた基本方針」を閣議決定した。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、製鉄所や発電所、焼却炉などで排出される局所的な未利用熱を活用して電気エネルギーとして再生することができ、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。

株式会社KELK（以下KELK）は、熱電発電による応用製品の開発を進め、製鉄所規模の大熱量の排熱から1.5m×1.5mの面積換算で10kWを発電する熱電発電ユニット「KSGU400」を開発した。また、微小な熱源による温度差3℃から動作し、送信距離500mの電池レス振動センサーデバイス「KSGD-SV10」を開発した。持続的な設備状態の測定に対応でき、設備の保全タイミングの最適化や突発故障防止を支援し、設備保全活動の生産性を向上する。これらの熱電発電応用製品は省エネ効果により温室効果ガス低減に貢献する。本稿でこれらの製品を解説する。

At the 2021 Climate Summit, the Japanese government vigorously expressed their goal that they would reduce the total emission of greenhouse effect gas by 46% in FY2030 compared to 2013; to achieve the carbon neutrality in 2050. In February 2023, the Cabinet decided the “The Basic Policy for the Realization of Green Transformation (GX)” which includes the promotion of thorough energy conservation, structural transformation of the manufacturing industry, and making renewable energy the main power source. In Japan, approx. 60% of primary energy is discharged as unused heat without being used effectively. Utilization of unused heat is becoming more important. The method of thermoelectric generation can utilize local-unused heat discharged from iron and steel mills, power plants, incinerators, etc. to regenerate electric energy; and is expected to be effective in reducing greenhouse gas effect.

KELK Ltd. (hereinafter referred to as KELK) is developing applied products of thermoelectric generation, and has developed “KSGU400,” a thermoelectric generation unit that generates electricity of 10 kW, in area conversion of 1.5 m × 1.5 m, from the large quantity of waste heat obtained from large-scale facilities like iron and steel mills. They have also developed “KSGD-SV10,” a battery-less vibration sensor device that operates from a temperature differential of 3 °C caused by a minute heat source and has a transmission range of 500 m. Their development allows to handle the measurement of sustainable equipment conditions, optimize the equipment maintenance timing, and support preventing sudden failures; thereby improving the productivity of equipment maintenance activities. These applied products of thermoelectric generation contribute to the reduction of greenhouse effect gas through their energy-saving effects. In this paper, these products are introduced.

Key Words: カーボンニュートラル, 省エネルギー, 熱電発電, 排熱回収, 熱電発電モジュール, 環境発電（エネルギーハーベスティング:EH）, IoT, 状態基準保全（CBM）

1. はじめに

KELKは、1957年よりコマツが始めた熱電変換素子（熱電素子）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。熱電素子を温度制御として使うペルチェモジュールに関して、素材から応用機器までの開発・製造・販売を一貫して手掛けている。半導体製造装置にて使用される温度制御装置においては世界的なリーディングメーカーである。また、熱電素子のゼーベック効果を使う熱電発電では、世界最高効率7.2%（受熱側温度280℃と放熱側温度30℃での温度差発電）の熱電発電モジュールを製品化している。本稿では、熱電発電技術とその応用製品の「熱電発電ユニット」および「熱電エネルギーハーベスティング（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）、その表裏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。

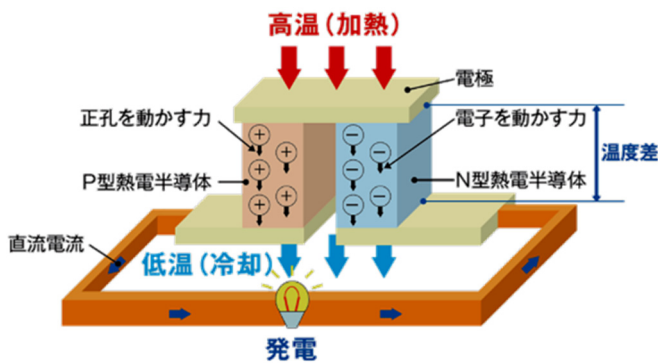


図1 ゼーベック効果の原理図

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更に大きくなる。熱電発電モジュールは図2のようにP型と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。

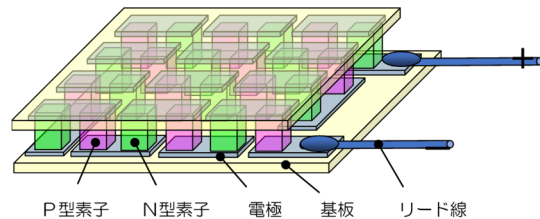
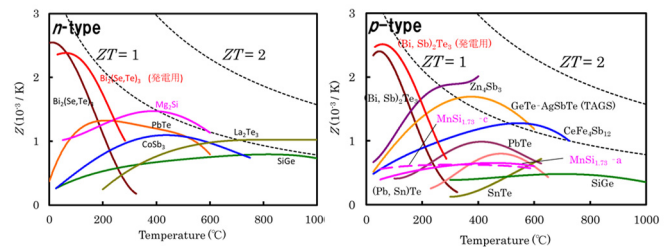


図2 熱電モジュールの基本構造

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。

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開発されている。

発電量を高める効率的な熱電発電システムを設計する場合、より大きな熱量が熱電発電モジュールを貫通する熱設計が有効であり、多くの場合、冷却側は温度差を大きくする水冷を採用する。このため、熱電発電モジュールの高温側温度は熱源温度よりも大幅に低下し、300℃を大幅に超過する状況は極めて限定的となる。Bi-Te系熱電半導体は、室温付近のみでなく300℃付近の比較的高い温度領域においても材料組成の最適化により、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Bi-Te系熱電半導体は主力となる。



左：N型熱電材料性能指数，右：P型熱電材料性能指数

図3 さまざまな熱電材料の性能指数

以上のような観点から、KELKは高温側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」（図4）を開発し製品化している。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。

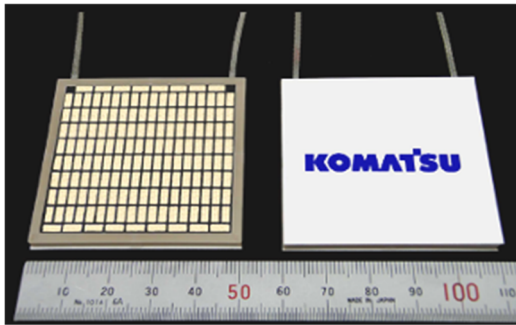
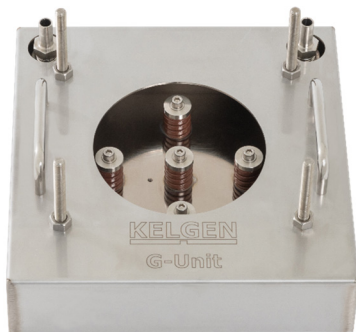


図4 「高出力熱電発電モジュール」の外観

3. 熱電発電ユニットの開発

3.1 開発詳細と製品概要

熱電発電は出力密度が高く、サイズをコンパクトにできるため、従来エネルギー回収が難しかった局所的な熱源の近傍に設置できるという特長がある。製鉄所の連続鋳造設備や鍛造・鋳造設備および熱処理炉などでは多くの排熱が発生しており、この未利用熱を有効活用すべく、KELKは熱電発電ユニットの開発を進めてきた。2023年には定格250Wの熱電発電ユニット「KELGEN G-Unit KSGU250」を製品化した。さらに、発電出力向上による費用対効果の向上を目的とし、同一サイズにて定格400Wの「KSGU400」を開発した（図5）。



| 項目 | KSGU250 | KSGU400 |
|-------------|---------------|---------|
| 常用発電出力 (定格) | 250W | 400W |
| 使用可能温度 | 受熱板温度：280℃以下 | |
| 外形寸法 | 291×291×66 mm | |
| 重量 | 約 18 kg | |
| 冷却水温度 | 10 - 35℃ | |
| 冷却水流量 | 5 - 20 LPM | |

図5 熱電発電ユニット「KELGEN G-Unit」の外観と主な仕様

熱電発電は、太陽光発電システムに比べ出力密度が10倍以上高く、熱電発電ユニットを設置する設備は、経済性や製造条件の安定性の観点から熱源の温度の維持が必要なため設備利用率は4倍以上高い（表1）。

これらにより熱電発電システムは、太陽光発電システムに比べて非常にコンパクトな面積で大きな電力を得ることができる。

表1 熱電発電ユニットと太陽光発電

| | 熱電発電ユニット | | 太陽光発電 (一般値) |
|-----------------------------------|----------|---------|-------------|
| | KSGU250 | KSGU400 | |
| 出力密度 (W/cm ²) | 0.30 | 0.47 | 0.016~0.02 |
| 設備利用率 | 75% | | 14.5% (※1) |
| 10万 kWh/年に必要な面積 (m ²) | 5.2 | 3.2 | 394~492 |

(※1)：経済産業省 調達価格等算定委員会
令和4年2月

これまでの実証開発の過程において、設備から発生する水蒸気や結露水が熱電発電モジュール内へ浸水し、マイグレーションによる熱電素子の劣化や熱電発電ユニットの地絡が発生し、熱電発電技術の実用化は阻まれてきた。KELKは熱電発電モジュールと熱電発電ユニットの構造を一から見直し、高温・高湿度環境に耐える完全防水構造を確立した。熱電発電モジュールにおいては構造および熱交換器の形状や厚みの最適化により熱電素子にかかる応力を緩和し、大面積の熱電発電モジュールにおいても200℃以上の温度変化に耐える構造を実現した。耐久性の評価は、防水構造の検証と、温度サイクルによる熱電素子の劣化を想定し、1時間/日の水没試験と並行して熱電発電ユニット高温側の温度を50℃⇔280℃の温度サイクル試験を実施した。温度サイクル試験の目標値は、熱電発電の適用の可能性が高い製鉄所における連続鋳造設備を想定し、高温から常温までの温度サイクルを平均3回/日、10年相当での1万サイクルの耐久評価とし、発電出力劣化の10%以下とした。検証の結果、1万サイクル経過で発電出力劣化1%となり目標を達成した。試験後に熱電発電ユニットの分解調査を実施した結果、熱電モジュール内に浸水の痕跡が無いことを確認し、防水性についても問題がないことを検証した（図6）。

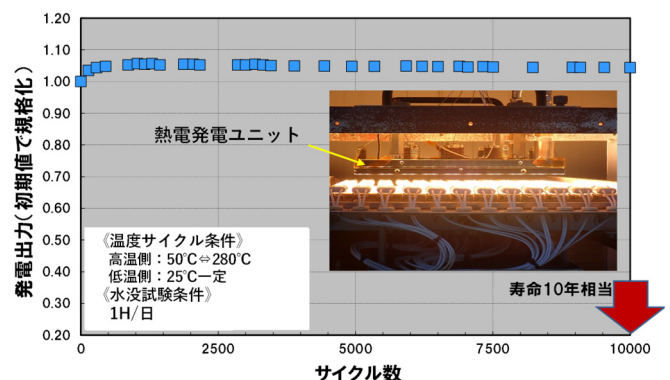


図6 耐久性評価検証

発電出力の目標は、熱電発電ユニットの目標投資回収年数から現行機の1.6倍の定格400Wとした。熱電発電出力の向上には、熱電発電材料の性能向上または温度差の拡大が有効である。「KSGU400」の開発は、熱電発電モジュールを通過する熱量（貫通熱量）を大きくすることで温度差を拡大し発電出力の向上を図ることを開発のコンセプトとし、水冷板の冷却効率を向上する流路最適化と、水冷板の冷却能力に合致して最大出力となる熱電発電モジュールの設計を実施した。まず、水冷板は冷却性能の向上のため流路形状を見直した。流路は渦巻形状とし、中心部から冷却水が渦巻状に流れ、外周側から抜けていく構造に変更し、流路の形状を最適化した（図7）。これらにより冷却性能は大幅に向上し従来の「KSGU250」に使用している水冷板と比較すると熱抵抗は半減となった。

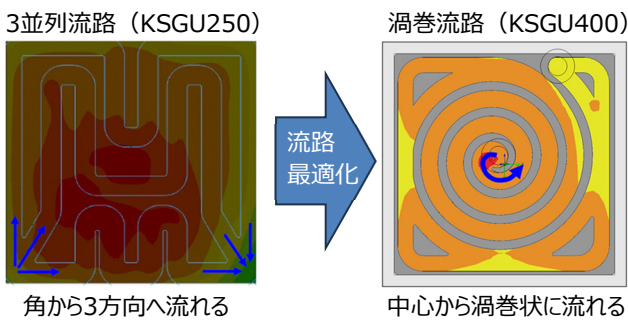


図7 水冷板の熱流体シミュレーション比較

次に熱電発電モジュールの最適形状を検討した。水冷板の冷却性能の向上に伴い、より多くの貫通熱量を流すことが可能となり、素子形状と対数を見直すことで発電出力の向上を図った。受熱板温度や水冷板の熱抵抗などの制約条件下で熱電発電モジュールの発電出力が最大となるよう素子形状や対数を最適化した（図8）。

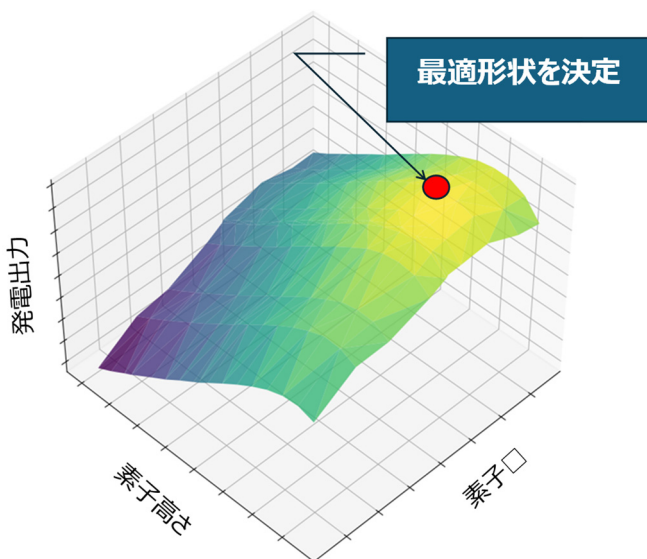


図8 熱電素子形状の最適化計算

これらにより、発電出力を「KSGU250」の1.6倍の定格400Wとなる「KSGU400」を開発した（図9）。

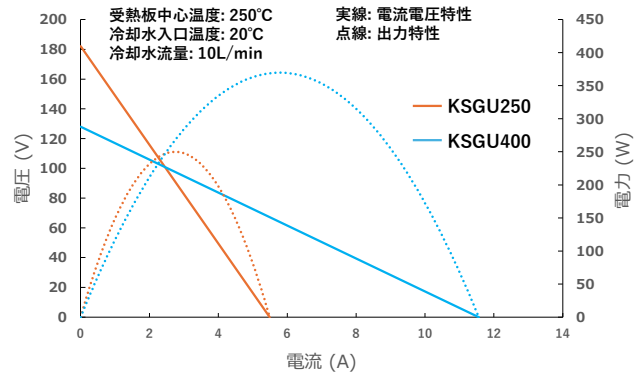


図9 「KELGEN G-Unit」の特性

3.2 熱電発電の適用

熱電発電ユニット「KSGU250」および「KSGU400」は、製鉄所の連続鋳造設備などの大規模排熱の回収が対象になるが、圧延工程または鍛造や鋳造工程など比較的排熱量が少ない熱源を対象にしたユニットも製品化を予定しており、さまざまな排熱形態に合わせたユニットの開発を進めている（図10）。特に小中規模の熱源については、例えば受熱面積を大きくすることで受熱量が受熱面積比に応じて向上することもわかってきており、ユニット1台当たりの受熱量向上に向けた開発も並行して実施している。

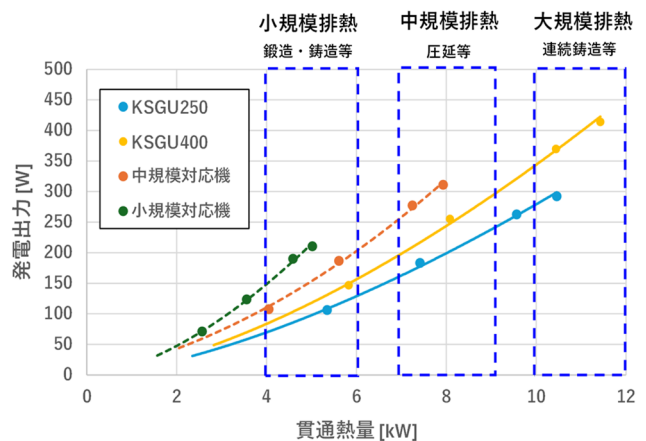


図10 発電出力と貫通熱量の関係

また熱電発電ユニットへの突発的な過加熱への保護機能として過昇温時、熱電発電モジュールに対して短絡回路を形成することでペルチェ効果が発生させ、熱電発電ユニットを冷却する過昇温防止保護装置を同時に開発した（図11）。本装置を組込むことで、より安全に運転することが可能となる。

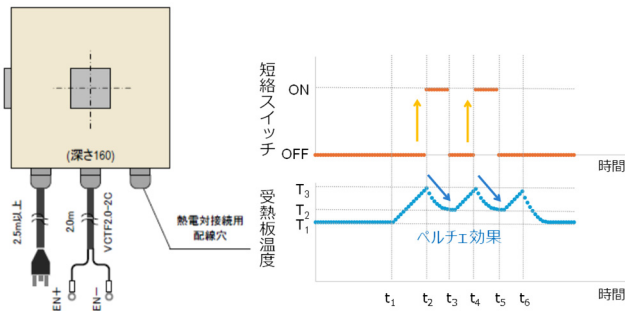


図11 過昇温防止保護装置の概要

3.3 熱電発電システム

熱電発電の実用化を図る上でシステムの構築は不可欠であり、複数のユニットを並べることでkW以上の電力を発電する。この電力は、太陽光発電システムと同様にパワーコンディショナを介して系統連系し、工場などの電力として活用することを想定している(図12)。

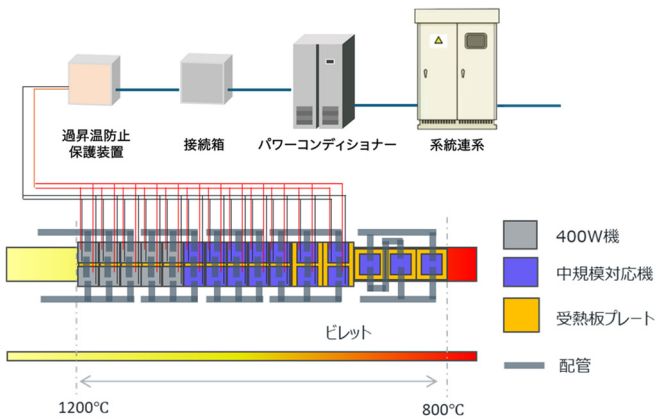


図12 熱電発電システム例 (+架台, 配管など)

具体的には、製鉄所の連続鋳造設備(図13)や、鍛造・鋳造工程の冷却ラインで搬送されるワークの輻射排熱を回収し電気に変換する。輻射排熱は熱源の温度と大きさ、距離がわかれば、理論どおりに伝熱する。熱源の温度や大きさから、定格で運転できる最適な距離を算出し、熱電発電ユニットをワークの直上または直下に設置することができる。

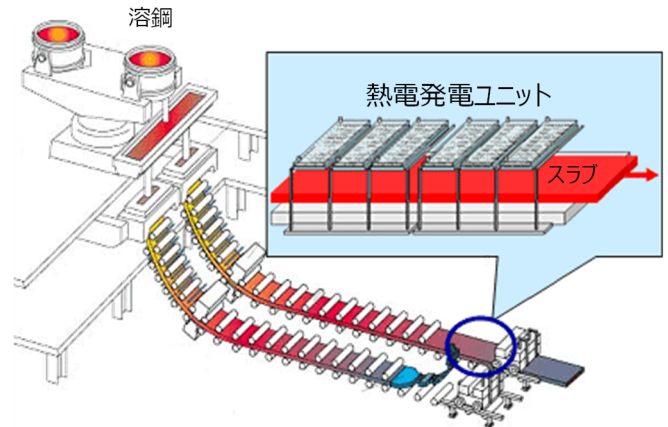


図13 鉄鋼の連続鋳造設備^[1]

3.4 投資回収と補助金の適用

2023年1月に発売した熱電発電ユニット「KSGU250」は、令和5年度補正予算 省エネルギー投資促進・需要構造転換支援事業費補助金「(I)工場・事業場型」先進設備・システムに採択された。本補助金は、先進的な省エネ技術に係る機器・設備の導入を支援することにより、「2030年度におけるエネルギー需給の見通し」の達成に寄与することを目的とし、工場・事業場において大幅な省エネを実現できる先進的な設備の導入を支援する事業であり、「KSGU250」は熱電変換式の産業排熱回収設備として初めて採択された。「KSGU400」についても、「KSGU250」と同様に補助金の適用に向け準備を進めており、補助金が適用された場合、投資回収年数は10年以下を見込んでいる。また小中規模の排熱を対象にしたユニットについても順次適用に向けた準備を進める。現時点では補助金を活用しながら導入を促進していくが、熱電発電の本格的な普及に向け、コストダウン開発を加速し、2030年までに太陽光発電システムと同様、補助金無しで投資回収年数7年以下を目指していく。

4. 熱電EH無線デバイス

4.1 熱電EH 振動センサーデバイス「KSGD-SV10」

設備故障原因の約半数はモーターなどの回転機器が占めている。突発的な設備の故障は、緊急保全の発生による生産性の低下や機会損失、エネルギーロスの原因となっている。2010年代にIoTが一世を風靡し、設備の保全分野ではCBM（状態基準保全）の普及が期待されたが、IoTへの電力供給問題、データ解析の課題などにより普及は限定的であった。

KELKは温度差3℃からの熱電発電により設備状態を測定し、データを500m送信する熱電EH 振動センサーデバイス「KSGD-SV10」を開発した（図14）。従来機種と比べて通信距離が約10倍となり、製鉄所やプラントなどのより広いエリアの設備機器のデータを継続的な測定が可能となった。



図14 熱電EH振動センサーデバイス「KSGD-SV10」外観

新製品「KSGD-SV10」は無線規格に920MHz帯の周波数を使用するLoRaを採用した。LoRaは無線変調にチャープ・スペクトラム拡散を使用し、微弱な信号でも長距離通信を可能としている。920MHz帯は長距離送信が可能であるが、2.4GHz帯に比べて送信エネルギーは10倍以上大きい（表2）。この電力を熱電発電により発電した微弱な電力で賄うため、KELKは微小な熱源から効率よく排熱を回収する熱電発電モジュールの最適設計を行い、発電部の上下面の温度差の伝熱ロスを排除する構造を開発し、動作回路を省電力化することにより実用レベルで動作させること達成した（表3）。

表2 通信規格と送信エネルギー比

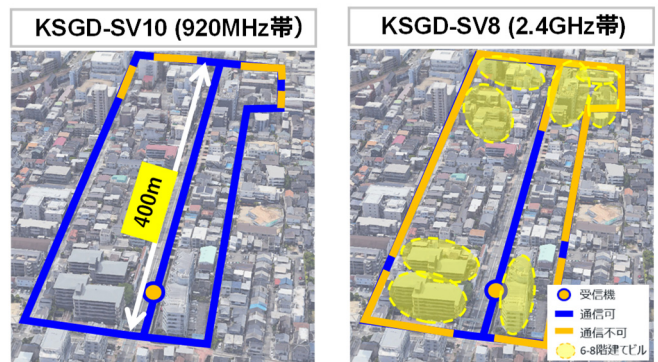
| 通信規格 | 通信出力 | 通信速度 | 送信エネルギー比 |
|-------------|------|---------|----------|
| 2.4GHz | 1mW | 250kbps | 1 |
| 920MHz LoRa | 10mW | 5.5kbps | 13 |

表3 熱電EH振動センサーデバイスの主な仕様

| 型式 | | KSGD-SV10 | KSGD-SV8 |
|---------------------|----------|-------------------|-----------|
| 通信規格 | | 920MHz 帯 | 2.4GHz 帯 |
| 通信距離（※2）（（）内は見通し距離） | | 500m（1km） | 50m（250m） |
| 振動 | 速度（※3） | RMS | ○ |
| | 加速度（※4） | PEAK, RMS, CF, OA | ○ |
| | | サンプリング周波数 | 26.7kHz |
| 温度 | -20℃～80℃ | | ○ |
| 測定時間 | | 300msec | 300msec |
| 動作開始温度差 | | 3℃ | 3℃ |
| 温度差と測定頻度（ /回） | 3℃ | 40分 | 40分 |
| | 5℃ | 30分 | 30分 |
| | 10℃ | 6分 | 6分 |
| 発電部 動作温度範囲 | | -5℃～80℃（設置側表面温度） | |
| 保護等級 | | IP67 | |

- （※2）：参考値である。周囲環境により変化する。
- （※3）：周波数レンジ（±3db）10Hz～1.0kHz
- （※4）：周波数レンジ（±3db）1.0Hz～7.5kHz

障害物がある環境を想定し、建物の立ち並ぶ市街地にて、920MHz 帯 製品の「KSGD-SV10」と2.4GHz 帯 製品の「KSGD-SV8」との通信状況を比較評価した。（図15）



市街地での通信評価比較

図15 無線通信可能エリアの違い

2.4GHz帯製品の「KSGD-SV8」は、直線距離においても200m程度であり、受信機の近傍の建屋の裏側からの電波が受信できなかった。一方、920MHz帯製品の「KSGD-SV10」は、受信機の近傍の6階建てレベルの建屋の裏側からの電波を受信でき、距離が離れた場所においても3階建てレベルの建屋であれば受信可能であることを確認した。

4.2 設備異常度モニタリング「KELGEN swift」

KELKはIoTによる設備保全のもう一つ課題であるデータ解析に対して、オンプレミスのコンピュータ上で動作し、IoTの測定値を解析する設備異常度モニタリング用ソフトウェア「KELGEN swift」を開発した(図16)。KELGEN swiftは、オンプレミスのパソコン上で動作し、振動センサーのノイズ問題に対処するノイズ除去機能を備える。またMT法(※5)による多変量解析機能を備える。この機能により、ワークの変更や加工方法の変更により発生する回転機器の負荷変動に対してもより安定した判定を実現する。

「KELGEN swift」は、IoTデバイスの大量なデータをオンプレミスのパソコン上で高速に解析することができ、通信費用やクラウドによる解析費用を大幅に削減する。また、セキュリティの厳しい工場での使用に有効である。

- (※5) : Mahalanobis Taguchi method. MD値(対象の多変量データの相関関係を考慮して多変量標準化した尺度)により異常度を判定する多変量解析の一手法

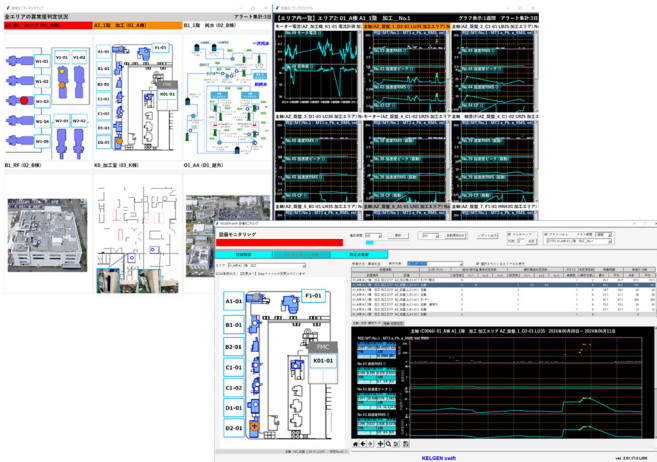


図16 KELGEN swiftのモニタリング画面

4.3 KELGEN SDシステム

920MHz帯を採用する「KSGD-SV10」は、無線通信エリアを大幅に拡大し、製鉄所などの広大な敷地内の設備に対してIoTによるデータ収集を電池交換なしで測定し続ける。また、オンプレミスで設備異常度をモニタリングする「KELGEN swift」は、IoTのデータを活用して簡便に設備異常度の状況が確認できる。

KELGEN SDシステムはゲートウェイを準備しており、PLCへの出力や、ハブを経由して出力先を分岐することで複数のデバイスへデータを出力できる。お客様の既存システムへの連携も可能である(図17)。

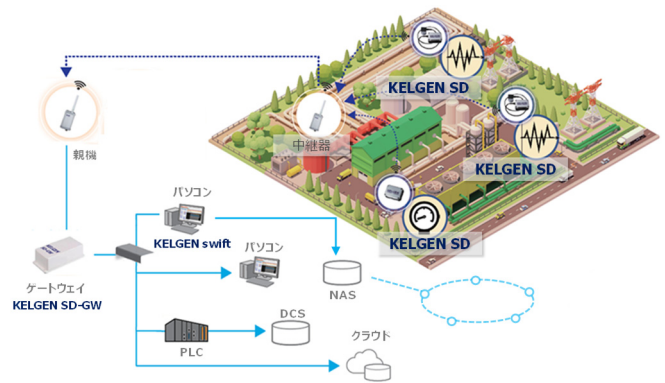


図17 KELGEN SDシステムの概要

5. おわりに

産業排熱を回収する熱電発電ユニットは、排熱対象の規模に合わせて柔軟に運用することができる。また電力が必要な工場操業時にあわせて発電が可能で、電力の安定供給源として期待できるなど、脱炭素やSDGsなどの社会的目標に合致する技術である。さまざまな排熱規模に対応できる熱電発電ユニットの普及により産業排熱の回収が促進されることを期待する。

KELGEN SDシステムは、コマツの工場をはじめ活用が広がっている。モーターの排熱を電力回生し、動作し続ける熱電EH振動センサーデバイスと、クラウドレスでのIoTデバイスの大量なデータ解析することにより、設備異常度モニタリングシステムの設置コストと運用コストを大幅に削減することで製造業のCBM導入を促進する。今後は防爆対応など製品ラインナップを増やし、活用範囲を拡大する。

参考文献

- 【1】 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、製鉄プロセスにおける排熱を利用した熱電発電技術の実証開発、NEDO成果報告書、2015年

筆者紹介



Takahiro Murase
村瀬 隆 浩 2002年, KELK入社.
熱電発電開発部所属



Kazuya Makino
牧野 一 也 1999年, KELK入社.
熱電発電開発部所属



Daisuke Goto
後藤 大 輔 1993年, KELK入社.
熱電発電開発部所属



Masakazu Ohba
大場 正 和 2006年, KELK入社.
熱電発電開発部所属



Toshihiko Kishizawa
岸澤 利 彦 2014年, KELK入社.
熱電発電開発部所属

【筆者からひと言】

産業排熱回収やエネルギーハーベスティングなど、柱となる製品が立ち上がったことで本格的な市場導入が見えてきたと考えます。熱電発電のトップランナーとして、今後も高性能・低コスト化開発を加速し、市場導入を促進して参ります。