

# 熱電 EH（エネルギーハーベスティング）無線温度センサの 製鉄所適用技術

## Development and Demonstration of Steelworks Application Technology for Wireless Temperature Sensor Using Energy Harvesting

黒木 高志 KUROKI Takashi JFE スチール スチール研究所 カーボンニュートラルプロセス研究部 主任研究員（課長）・博士（工学）  
茂木 康弘 MOGI Yasuhiro JFE スチール スチール研究所 カーボンニュートラルプロセス研究部 主任研究員（副部長）  
野内 泰平 NOUCHI Taihei JFE スチール スチール研究所 カーボンニュートラルプロセス研究部 主任研究員（部長）・博士（工学）

### 要旨

製鉄所においてコークス炉温度を有人測定する場合がありますが、測定箇所が多く負荷の高い作業であり、また人が実施するため 1 か所あたりの測定頻度は 1 日数回程度にとどまる。エネルギーハーベスティングを利用した無線温度センサによる電源/制御配線レスかつ短周期の温度測定により、炉温管理の高度化が図れ、省エネルギーや CO<sub>2</sub> 削減効果が期待できる。無線温度センサの安定データ送信/受信、温度環境制御技術開発と実証の取り組みを報告する。

### Abstract:

In steelworks, furnace temperatures are sometimes measured by workers, but this is a high-load operation with many measurement points even the frequency of measurement per site is low, around several times per day. The wireless temperature sensor using energy harvesting is expected to improve furnace temperature control without power and control wiring and with high frequency temperature measurement, thereby saving energy and reducing CO<sub>2</sub>. Stable data transmission/reception for wireless temperature sensors and efforts to develop and demonstrate temperature environment control technology are reported.

## 1. はじめに

近年、無線送信可能なセンサを環境中に複数配置して、環境情報（温度など）を取得し活用するワイヤレスセンサネットワークに注目が集まっている。無線を使用することによりケーブル敷設工事のコストが不要になるメリットがある一方で、用いられるワイヤレスセンサの多くは一次電池駆動であるため、その交換コストが課題となっている。そのため、電源にエネルギーハーベスティング（環境発電）デバイスを用いた電池交換レスの無給電システムが望まれている。

エネルギーハーベスティング技術は、熱、振動、光、電波など、周りの環境に様々な形態で存在する微小エネルギーを収穫（ハーベスト）し、電力に変換する技術である<sup>1)</sup>。従来は、小規模な発電技術は使い道が限られていたが、近年の低消費電力技術の進歩で利用用途が広がってきた。また、インターネット（IoT: Internet of Things）やサイバーフィジカルシステム（CPS: Cyber Physical System）、デジタルトランスフォーメーション（DX: Digital Transformation）などへの関心の高まりも、それを実現するためのキーテクノロジー

としてのエネルギーハーベスティングへの期待につながっている。熱電発電は、廃熱として棄てられている 100℃未満の微小なエネルギーを回収し、電力に変換できる可能性があり、IoT、DX 分野における様々なデバイスの自立電源として注目されている。

製鉄所のコークス炉では、燃焼室温度を確認する必要から温度を有人測定する場合がありますが、測定箇所が多く、またコークス炉上は、夏場は 40℃以上の高温かつ粉塵環境下であることから、負荷の高い作業である。1 か所あたりの測定頻度は数回/日程度と低位であるものの、1 日の測定数は 1 000 回以上と負荷の高い作業であるため、省力化・安全化が望まれる。図 1 にコークス炉の概念図を示す。コークス炉の炉体はほとんどがレンガ積みで構成される。炉体本体は石炭を乾留するための炭化室（coke oven chamber）と、その両側に熱供給のための燃焼室（combustion chamber）があり、炭化室と燃焼室は交互に数十組が連続して設置されている。燃焼室の内部は区切られており、それぞれの区画に燃焼ガスと空気が下から供給されて燃焼し、燃焼排ガスは燃焼区画の上部から別の区画に入って下から抜ける構造となっている。

製鉄所排熱を活用し、電源にエネルギーハーベスティング

2023 年 9 月 15 日受付

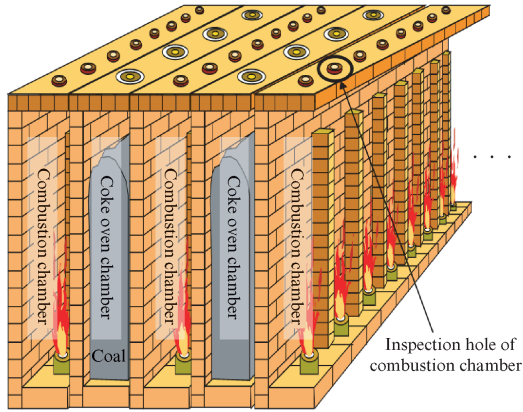


図1 コークス炉の概念図

Fig. 1 Schematic illustration of coke oven

グ技術を利用した無線温度センサにより、給電源レス・制御配線レスかつ短周期で温度測定できれば、炉温管理の高度化が図れ、使用ガスの削減による省エネルギーやCO<sub>2</sub>削減効果が期待できる。しかし、熱電発電エネルギーハーベスティング（以下、熱電EH）装置の特性は明確でない場合が多い。また、通信距離は2.4 GHz IEEE802.15.4に準拠すると10~75 m程度とされるが、仕様上は約10 mや20 m等根拠が不明瞭で、データ受信ばらつきに及ぼす送信機と受信機の距離の関係は明確にされていない。本稿では、無線温度センサの安定データ送信/受信、温度環境制御技術開発と製鉄所のコークス炉における実証の取り組み結果を報告する。

## 2. 実験

熱電EH装置を用い、温度差による送信頻度の変動を明確にするため、温度差と送信間隔の関係を調査した。次に、受信ばらつきに及ぼす送信機と受信機の距離の関係を明確にするため、距離と受信間隔の関係を調査し、使用できる範囲を明確にした。また、動作温度上限が約80℃の熱電EHセンサを屋外のコークス炉上の暑熱、粉塵環境で使用するため、装置に放熱や遮熱/遮光対策を施した。なお、市販の熱電EHデバイスには外部信号入力端子が設けられていたが、製鉄所の粉塵環境では接続部での不良が心配された。そのため、接続部を熱電EHデバイスから離れた場所に配置し、接続部分を別途保護することで、接続部における不良を抑制した熱電EHデバイスとした。

## 3. 結果と考察

図2に熱電EH温度差とデータ送信間隔の関係を示す<sup>2)</sup>。データ送信間隔は熱電EH温度差の2乗に反比例し、温度差10℃でデータ送信間隔が約5秒であることが分かった。熱電発電は、物質の両端に温度差をつけると温度差に比例

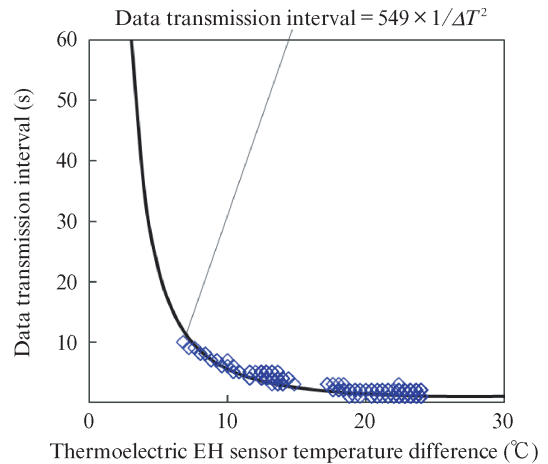


図2 熱電EH温度差とデータ送信間隔の関係

Fig. 2 Relationship between temperature difference of thermoelectric EH device and data transmission interval

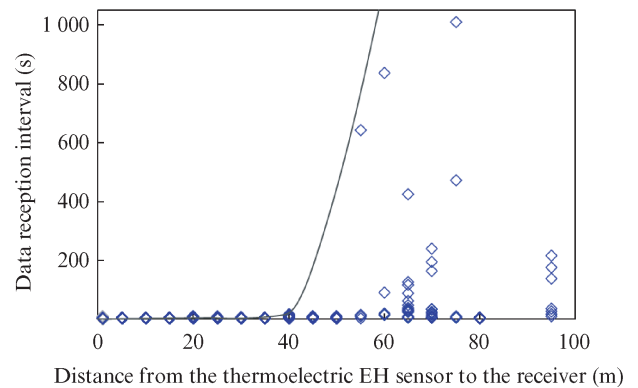


図3 熱電EHセンサと受信機の距離とデータ受信間隔の関係

Fig. 3 Relationship between distance between thermoelectric EH sensor and receiver and data reception interval

した電圧が発生する現象を利用したもので、この現象はゼーベック効果と呼ばれる。また、電力は温度差の2乗に比例することが知られていることから、実験結果は妥当と考えられる。なお、EHセンサと受信機の距離は1 m、熱源側の温度はヒーターを用い50~70℃、冷却側は空冷とし、外気温は32℃の条件であった。

図3に熱電EHデバイス（送信機）と受信機の距離とデータ受信間隔の関係を示す<sup>2)</sup>。熱電EH温度差を約12℃に設定し実験した。送信間隔を4秒とすると、同じ4秒間隔で受信できるが、距離が40 mを超えるとデータ受信間隔がばらつきはじめる。これは、距離が遠くなると電波強度が小さくなるのが原因だと考えられる。なお、熱電EHデバイス（送信機）と受信機の間には障害物等がない条件での実験であり、実際の使用条件により変化はあるが、距離40 mまではそのまま使用可能で、それ以上の距離での安定的なデータ受信には、中継器を介することが必要であると考えられる。

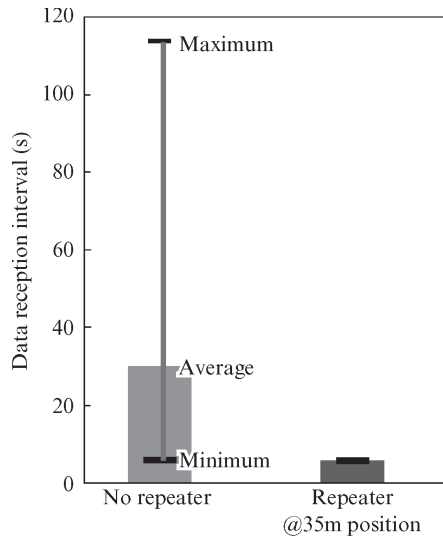


図4 受信間隔に及ぼす中継器の影響

Fig. 4 Effect of repeater on reception interval

送信機と受信機が 70 m 離れた状態で、コークス炉上での実機実証試験を行った。図 4 に示すように、中継器がない場合は受信間隔が 6~114 秒とばらついたが、中間の 35 m 位置に中継器を設置すると、ばらつきが小さくなりほぼ 6 秒間隔でデータを安定して受信できることを確認した<sup>3)</sup>。

これらの結果を基に構築した、製鉄所における熱電 EH を利用した無線温度センサ活用概念図を図 5 に示す<sup>2)</sup>。排熱があるコークス炉上で、熱電 EH デバイスを温度差により動作させ、测温した熱電対温度情報は、複数の中継器を介し通信を集約する親機に無線伝達する。熱電 EH デバイス~中継器間、中継器~親機間ともに電波通信機品質を示す電波強度は実用上問題ないレベルで推移していることを確認できた。また、コークスを炉内に装炭するためコークス炉上を往来する装炭車が無線送信の障害物となる原料炭装入時には、装炭車直下にある熱電 EH デバイスの通信先が、通常時に通信している中継器との通信強度が低下するタイミング

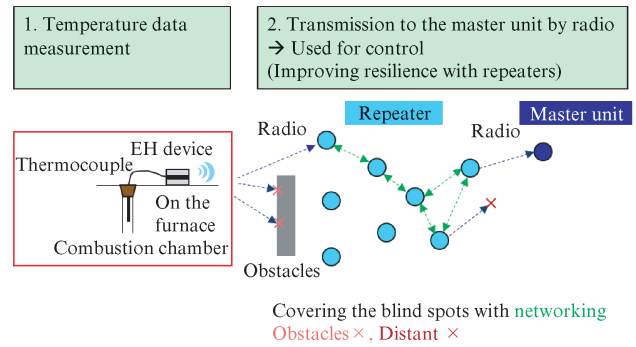


図5 製鉄所における EH を利用した無線温度センサ活用概念図

Fig. 5 Schematic illustration of utilization of wireless temperature sensor using EH device in steelworks

で別の箇所に設置している中継器との通信に切り替わり、データ送受信が問題なく実施できることを確認できた。これらの結果、この熱電 EH 無線温度センサはコークス炉温制御に活用できることを確認した。

#### 4. おわりに

巨大な設備が広範囲に設置され、多くが稼働している製鉄所では、熱電 EH 技術を利用した無線温度センサによる電源/制御配線レスかつ短周期の温度測定が期待される。ラボおよび実機実験で無線温度センサの安定データ送信/受信、温度環境制御技術を開発し、その実用性を確認した。

今後は、操業のさらなる高効率化、安定化をめざし、本技術の改善に取り組む予定である。

#### 参考文献

- 1) 竹内敬治. エネルギーハーベスティング技術の動向と展望. IIP 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集. 2016, keynote1.
- 2) 黒木高志. 製鉄所におけるエネルギーハーベスティングを利用した無線温度センサーの開発と実証の取り組み. 第 32 回日本エネルギー学会大会講演要旨集. 2023, p. 168-169.
- 3) 黒木高志. 製鉄所における排熱を利用したエネルギーハーベスティング技術の開発. 材料とプロセス. 2023, vol. 36, no. 2, p 526.