

製鉄所排熱を利用した熱電発電技術

Thermoelectric Generation Technology Using Waste Heat from Integrated Steelworks

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

日本の鉄鋼業はこれまでさまざまな省エネルギー対策を実施し、そのエネルギー効率は世界最高水準であるが、CO₂削減やエネルギーセキュリティに対するニーズの高まりからさらなる省エネ推進が求められている。温度差により生じる熱起電力を利用した熱電発電は、未利用熱エネルギーを有効利用できる技術の一つである。本稿では、製鉄プロセスにおけるふく射熱を回収するシステムについて、熱電発電技術の適用を検討した結果を報告する。

Abstract:

The steel industry in Japan has significantly reduced its energy use for the past several decades and has kept the highest energy efficiency in the world. However, the steel industry is strongly required to develop new technologies for further energy conservation in view of energy security, high and volatile energy prices and CO₂ reduction. Waste heat recovery can be one of the key technologies to solve these issues. Thermoelectric generation is one of the promising technologies expected to play an important role for steel plant's waste heat recovery, particularly radiant heat from steel products which had not been used efficiently yet. This paper describes the thermoelectric generation system using waste heat in steelmaking process.

1. はじめに

日本の鉄鋼業は、1970年代の2度にわたるオイルショックを経て、連続鋳造設備やCDQ (Coke Dry Quenching) などの大型省エネルギー設備の導入などにより省エネルギー技術・設備の普及が大幅に進んでおり、現時点で実用化レベルにある技術・設備はほぼ100%導入されている。その結果、日本の鉄1トンを製造するために必要なエネルギー原単位は、世界最高水準となっている¹⁾。

しかし、エネルギー安全保障や昨今の不安定で高騰するエネルギー価格などの観点から、さらなる省エネルギーに寄与する技術への期待は非常に大きい。その中で、エネルギー利用の高効率化に寄与する製鉄所未利用排熱を有効活用するための熱回収技術は、鍵となる技術の一つである。

1.1 製鉄所における排熱を利用した熱電発電技術

製鉄所で発生する排熱は重要なエネルギー源であり、その多くは回収利用されている。しかし、未利用のまま有効利用されていない排熱がまだ3割程度残されている²⁾。これらは、小規模で分散していたり、変動が大きかったり、また発生温度が低かったりと、経済合理性の観点から既存技術で

は対応が困難な、排熱回収を行うには設備的、技術的に極めてハードルが高いものである。製鉄プロセスでは、赤熱した鋼板や鋼材が熱を大気中に放散させながら搬送されるケースが多くある。JFE スチールは、鍛接管工場での赤熱した管が放散するふく射熱を活用した数百kW級の小規模熱電発電実機試験³⁾の後、鋼の連続鋳造時に赤熱したスラブ (圧延用半製品鋼塊) が放散するふく射排熱に着目し、この未利用排熱を有効活用する技術として10kW級の大規模な熱電発電技術を開発した⁴⁾。

1.2 熱電変換の概要

一般に、固体の金属や半導体は、電気を流す物質であればすべて熱電変換を行える性質を持っている。ただし、それが顕著に現れる材料は限られており、そのような材料は特に熱電変換材料と呼ばれている。熱電変換は材料のもつ特性を利用して、熱と電気を直接変換するエネルギー変換方法であり、発電と熱移動 (冷却あるいは加熱) というふたつの利用方法がある。温度差発電は、ゼーベック効果と呼ばれる、温度差によって金属または半導体の2つの接触した物質の間に熱起電力が発生する現象によるもので、熱エネルギーを電気エネルギーに変換できる。一方、冷却あるいは加熱は、ペルチェ効果と呼ばれる、電流を通すことで熱を移動させる現象によるもので、電気エネルギーを熱エネル

2023年9月14日受付

ギーに変換できる。

1.3 熱電発電技術

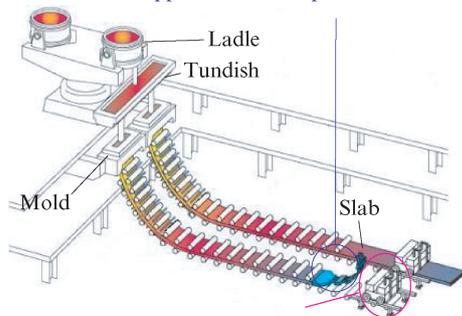
熱電発電技術は、前述のとおり、ゼーベック効果を利用した、熱を有効利用できる革新技術の一つである。熱を電気に変換できる熱電発電の特徴としては、①熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換できる、②可動部がなく構造が単純でコンパクト、③発電時の騒音、振動、CO₂排出がない、④材料を適切に選択すればさまざまな熱源・温度に対応して発電できることなどがあげられる。排熱利用の観点で考えると、小規模で分散した排熱源に対しても有効に適用でき、また、排熱を部分的に利用し、段階的に発電システムを拡大していくことも可能である。熱電発電は、エネルギー直接変換の最も単純なシステムとして世界各国で盛んに研究が行われており、宇宙開発や僻地用電源としてはすでに実用化されている。また、体温と外気の温度差で駆動する腕時計や、災害時などに薪などを用いた火を熱源とする発電鍋が商品化された例もある。しかし、産業用の大規模な試験は報告されていない。

製鉄所は昼夜問わず操業しており、操業中は常に排熱が存在するため、昼夜・天候によらず、年間を通して安定した電力を得られる可能性がある。本技術をさまざまな工場排熱に適用すれば、省エネルギーやCO₂排出の削減に効果を発揮するものと期待される。

2. 製鉄プロセスでの熱電発電技術の実証試験

JFE スチールでは、鋼の連続鋳造時に赤熱したスラブが放散するふく射熱を有効活用する技術として、10 kW 級の熱電発電試験の1期目を2011年～2013年に実施した。その後種々の技術開発ののち、2期目として2017年～2019年に実機実証実験を実施した（図1、表1⁵⁾。

FY 2011-2013 Practical application development



FY 2017-2019 Demonstration and development

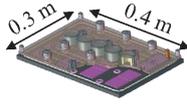
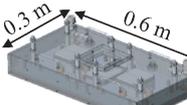
Continuous casting machine

図1 連続鋳造装置での熱電発電試験の模式図

Fig. 1 Schematic illustration of thermoelectric generation (TEG) system installed in the JFE's continuous casting line (East Japan Works (Keihin))

表1 連続鋳造装置での熱電発電試験装置の概略仕様

Table 1 Specification of 10 kW thermoelectric power generation system

	FY 2011-2013 Practical application development	FY 2017-2019 Demonstration and development
Total TEG unit area	7.9 (m ²)	3.0 (m ²)
Power generation density	0.2 (W/cm ²)	0.45 (W/cm ²)
TEG unit		

2.1 熱電発電モジュール

熱電発電モジュールはp型およびn型の熱電素子を、電極を介して交互に接合し、熱的には並列に、電気的には直列に接続したものが、絶縁基板で挟み込まれたような構造をしている。このモジュールの上下の基板間に温度差をつけることで、ゼーベック効果により、その温度差に対応した発電ができる。この熱電発電モジュールを、直列および並列に組み合わせて熱電発電システムを構築する。使用した熱電発電モジュール⁶⁾の最高使用温度は高温側電極部分で280℃、常用温度は250℃であり、未利用の工業排熱の温度域で利用可能である。最大発電電力は高温側と低温側の温度差 ΔT の2乗に比例する。従って、大きな出力を得るには、大きな温度差を確保することが重要である。なお、熱電素子の高温側温度は耐熱温度以下とする必要があるため、さまざまな条件で高温側温度を予測することが非常に重要である。

2.2 熱電発電ユニット

製鉄プロセスにおける熱電発電実証試験では、これらのモジュールをユニット化して用いた。一つの熱電発電ユニット³⁾は受熱板、熱電発電モジュール、水冷板等で構成される。

1期目の熱電発電ユニットは以下のとおりである。16個直列に接続された熱電発電モジュール（約50 mm×50 mm×4.2 mm）が受熱板と冷却板の間に配置され、接触状態を良好に保てるよう、ばねにより約1 MPaの加圧力で挟み込まれている。受熱板は集熱効率向上のため表面は黒色化処理している。冷却水量は約10 L/minであり、低温側を効率的に冷却し、温度差を保てるようにしている。

2期目では、低廉化し、かつ発電出力の高い熱電発電ユニットを用いて実機実証試験を行った。熱電発電ユニットは、軽量化や均熱技術等のために改造した。さらに、従来の熱電発電モジュールを配線で接続する方法を変更し、大

型モジュールを一体成形することで、モジュール間同士の配線接続による無駄なスペースを減少させた。その結果、熱電発電装置中の熱電発電素子密度が高まり、発電出力密度は従来の 0.2 W/cm^2 に対して、 0.45 W/cm^2 に向上した。

2.3 熱電発電装置

排熱を活用した熱電発電システムの中核は熱電発電モジュールであるが、実用的に熱を電気として回収するには、高温熱源（排熱源）からの熱を熱交換器により効率的に収集し、熱電発電モジュールに与え、電力を創出するとともに、低温熱源に残りの熱量を排出する熱マネジメント技術が非常に重要である。また、熱電発電により得られる電力は直流のため、この電力を使用する側が必要とする用途に効率的に活用できる電力マネジメント技術も求められる。具体的には、工場排熱はいろいろな場所で発生しており、それぞれの排熱場所に対応するシステム形状が必要となる。排熱場所にどのように取り付けるか、取り付けの際にどのような熱流があるかなど、システムへの熱流および発電の予測が必要となる。

今回設置した連続鋳造スラブからのふく射熱を活用した熱電発電装置では、高温熱源からの入熱はスラブからのふく射熱などに起因する。

1期目の熱電発電モジュール、熱電発電ユニット、熱電発電システムのサイズ感とイメージを図2に示す⁷⁾。熱電発電

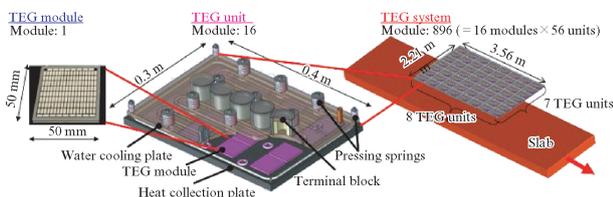


図2 熱電発電モジュール、ユニット、システムの模式図

Fig. 2 Schematic illustration of TEG module, TEG unit and TEG system

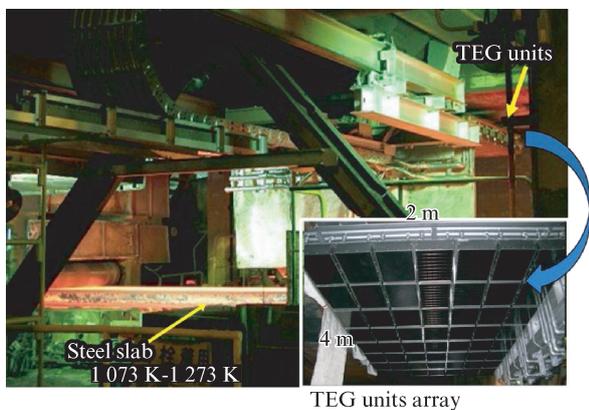


写真1 連続鋳造機に設置した熱電発電装置

Photo 1 Appearance of a thermoelectric power generator installed in a continuous casting machine

ユニットの温度や出力をさまざまな操業条件下で解析的に求め、熱電装置の仕様を決定した。JFE スチールの東日本製鉄所（京浜地区）連続鋳造設備に設置した熱電発電装置の外観を写真1に示す⁷⁾。鋳造が進み、露出するスラブの水平部の上方約2 mの位置に、パネル状の熱電発電ユニットを56個（熱電発電モジュール896個）配置している。この熱電発電装置はスラブ（表面温度はおおむね $800^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$ ）から放出されるふく射熱から発電を行うものであり、その面積は幅約2 m、長さ4 mの約 7.9 m^2 である。発電出力は、MPPT（Maximum Power Point Tracking: 最大電力追尾）制御機能を有するパワーコンディショナを介して直流から交流に変換後、製鉄所の既存の配電線に接続（系統連系）し、製鉄所内の空調の一部として利用される。また、熱電発電ユニットのスラブと反対側の面は、水冷して温度差を生じさせている。なお、スラブに接触するものは水を含めて何もなく、熱電発電ユニットをかざすだけなので、スラブの冷却状態への影響はほとんどない。

2期目も基本的なコンセプトは1期目と同様とし、装置出力仕様も10 kWの熱電発電システムとしたが、熱電発電ユニットの仕様変化に応じ、温度や出力をさまざまな操業条件下で解析的に求め、熱電装置の仕様を決定した。具体的には、スラブの上方約0.4 mの位置に、パネル状の熱電発電ユニットを18ユニット（熱電発電モジュール36個）配置している熱電発電装置付きスラブ切断機とした。

2.4 熱電発電試験

1期目の熱電発電システムの出力について、解析結果と発電実証試験結果を比較したものを図3に示す。熱電発電出力は、スラブ温度が高くなるほど、またスラブ幅が広いほど大きくなり、解析と実験値は良く一致している⁸⁾。なお、当該規模の熱電発電の実証試験は世界初である。

次に、スラブの大きさ、熱電発電ユニットとスラブの相対位置を考慮し、幅方向における熱電発電ユニットの高さ方向の適正化改造を実施した。図4に、従来配置と最適化配

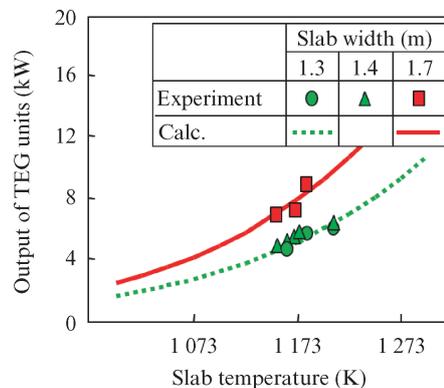


図3 熱電発電出力とスラブ温度の関係

Fig. 3 Slab temperature and thermoelectric power system output (Parameters: slab width 1.3 m, 1.7 m)

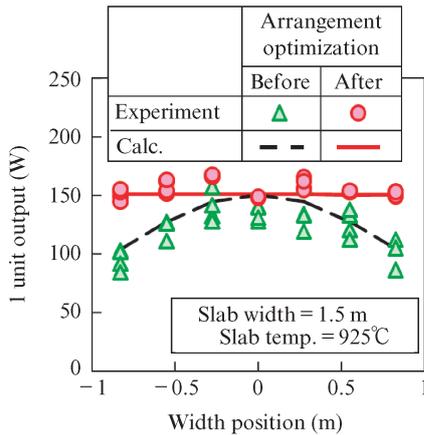


図4 幅方向位置における熱電発電ユニット1個当たりの発電出力（従来配置，最適化配置）

Fig. 4 Power output per thermoelectric generation unit in the width position (conventional arrangement and optimized arrangement)

置後のスラブ幅方向位置における熱電発電ユニット1個当たりの発電出力について，解析結果と発電実証試験結果をあわせて示す（スラブ幅1.5 m，スラブ温度925°C）。幅端部の熱電ユニットを0.49 m近接化することにより，解析どおり，幅方向の発電出力が向上し，幅端部においては1.4倍の出力向上結果が得られた。

また，改造に合わせ一部ユニット（約4500時間製鉄所の粉じん，湿度高汚気環境下に設置）を取り外し交換し，ユニット内部の調査を含めた耐久性評価を実施した。熱電発電ユニットに汚れは認められるも目立った損傷はなく，調査28ユニット中全ユニットで内部に異物がないことを確認した。また，一部ユニットにモジュールの破損が見られたが，熱電発電モジュールの部品である絶縁基板に一部金属部分があったことが問題で，すでに対策済みである。さらに，一部のユニットには出力低下が見られたが，熱応力が原因で，半田/拡散防止膜/素子間が剥離し，モジュール抵抗が上昇したことによると考えられ，拡散防止膜の品質向上（熱電発電モジュールメーカー対策）で解決できる見通しである。

上記のように，熱電発電技術を開発し，実機で熱電発電実験を実施した。その結果，事前の予測値と実績値が一致することを確認し，既存の熱電発電ユニットの耐久性評価も行った。さらに，熱電発電ユニットの高さ方向位置を最適化し，良好な成果を得た。

熱電発電システムのコストが高いという課題に対しては，以下の対策が考えられる。

- ① 熱電発電ユニットのコスト低減
- ② 発電出力を向上させることで設置面積当たりの出力を増やし，出力あたりのコストを低減
- ③ 熱電装置の製作から施工までを考慮したパッケージ化により，設備のコストを低減

2期目では，低廉化し，かつ発電出力の高い熱電発電ユニットを用いた実証試験を実施した。総発電出力10 kW，出力密度0.45 W/cm²，1500時間経過で出力劣化なしの耐久性という良好な結果が得られた熱電発電ユニットであった。しかし，相当数のユニットで熱電発電ユニット内部への水分の浸入による影響で地絡や短絡が発生し，その対策が信頼性，耐久性の観点から課題であることが明らかになった。すなわち，本開発では発電出力や耐久性等で一定の成果をあげることができ，一方で本格的な事業化に向けては，熱電発電ユニット封止部の長期高温耐久性やコスト面などの課題を抽出できたと見える⁵⁾。熱電発電のコスト低減に向けて，上述のとおり，高出力密度，高稼働率により多くの発電電力量を得ることができる安価熱電発電システムの開発に鋭意取り組んでいく。

3. おわりに

鉄鋼業における製鉄所未利用排熱を活用する省エネ技術開発の一つとして，熱電発電技術を用いた実証実験について述べた。今後もさらなる省エネルギーに資する技術開発を通じて，地球環境保全に貢献していく所存である。

謝辞

本研究開発は，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の省エネルギー革新技术開発事業「製鉄プロセスにおける排熱を利用した熱電発電技術の研究開発」（共同プロジェクト実施者：国立大学法人 北海道大学，（株）KELK）および，戦略的省エネルギー技術革新プログラム「製鉄プロセスにおける排熱を利用した熱電発電装置の実証開発」（共同プロジェクト実施者：（株）KELK（プロジェクト間の共同研究含））の研究成果を含むことを記し，謝意を表します。

参考文献

- 1) 小倉滋，手塚宏之，弓手崇生，田村望. JFE スチールにおける環境保全と省エネルギーへの取組み. JFE 技報. 2013, no. 32, p. 1-7.
- 2) Kabeya, K. Development of ultimate energy saving and CO2 reduction technologies in steel works. Symposium on Technology of the Waste Heat Energy (AIST). 2012, no. 2, p. 67.
- 3) Kuroki, T.; Kabeya, K.; Makino, K.; Kaibe, H.; Hachiuma, H.; Fujibayashi, A. Waste heat recovery in steelworks using a thermoelectric generator. Proceedings of the 11th European Conference on Thermoelectrics, ECT 2013. 2014, p. 143-149.
- 4) Kuroki, T.; Kabeya, K.; Makino, K.; Kajihara, T.; Kaibe, H.; Hachiuma, H.; Matsuno, H.; Fujibayashi, A. Thermoelectric generation using waste heat in steel works. J. Electron. Mater. 2014, vol. 43, issue 6, p. 2405-2410.
- 5) ENEX 2021 NEDO が取り組む最新の省エネルギー技術. “戦略的省エネルギー技術革新プログラム”. NEDO. 2021-01-13. <https://www.nedo.go.jp/content/100926713.pdf>, (accessed 2023-07-31).
- 6) KELK Ltd., 2009, KELK to Launch Sales of the World's Highest Efficiency Thermoelectric Generation Modules Developed In-house.

<http://www.kelk.co.jp/english/news/090128.html>. (October 21, 2014).

- 7) Kuroki, T.; Murai, R.; Makino, K.; Nagano, K.; Kajihara, T.; Kaibe, H.; Hachiuma, H.; Matsuno, H. Research and development for thermoelectric generation technology using waste heat from steelmaking process. J. Electron. Mater. 2015, vol. 44, issue 6, p. 2151-2156.
- 8) 黒木高志, 村井亮太, 松野英寿, 深見真行, 藤田浩起, 高岡隆司, 梶原健, 八馬弘邦. 製鉄プロセスにおける排熱を利用した熱電発電技術の開発. 材料とプロセス. 2014, vol. 27, p. 781.