


文書の種類として、以下の四つから一つを選択してください。 () 学術論文 (原著論文), () 学術論文 (レビュー論文), (○) 技術論文 (原著論文), () 技術論文 (レビュー論文)	
自噴蒸気を利用した熱電発電システム Thermoelectric generation system using self-vented steam	
内田 健太郎 ^{a),*} , 宮崎 博志 ^{a)} , 安田 和正 ^{a)} , 松浦 美沙 ^{a)} , 畦地 絵里 ^{a)} , 清水 美咲 ^{a)} , 宗本 隆志 ^{b)} , 豊田 丈紫 ^{b)} Kentaro Uchida ^{a),*} , Hiroshi Miyazaki ^{a)} , Kazumasa Yasuda ^{a)} , Misa Matsuura ^{a)} , Azechi Eri ^{a)} , Misaki Shimizu ^{a)} , Takashi Munemoto ^{b)} , Takeshi Toyoda ^{b)}	
Corresponding Author: ku.eng07@gmail.com	
a) 株式会社白山, 〒920-8203, 石川県金沢市鞍月 2-2 b) 石川県工業試験場, 〒920-8203, 石川県金沢市鞍月 2-1 a) 2-2 Kuratsuki, Kanazawa, Ishikawa, 920-8203, Japan, Hakusan Inc. b) 2-1 Kuratsuki, Kanazawa, Ishikawa, 920-8203, Japan, Industrial Research Institute of Ishikawa	
Abstract A thermoelectric power generation unit that efficiently utilizes exhaust steam has been developed. A prototype 1 kW-class power generation system was evaluated at a hot spring resort using self-heated steam. The final power output was 373 W, limited by insufficient cooling water. For practical application of thermoelectric power generation, it is essential to reduce system costs, select an appropriate waste heat source and installation site, and optimize the entire system, including power conversion and utilization.	
Keywords thermoelectric; teg; condensation; geothermy	
Received: 8/7/2024; Accepted: 14/4/2025; Published online: 17/4/2025	

1. 緒言

カーボンニュートラルの実現には、従来は優先順位が低いと考えられていた省エネ対策の積み上げを積極的に行うことが重要である¹⁾。現在もなお、一次エネルギーの大部分が未利用の熱エネルギーとして環境中に放出されており、エネルギー変換の効率化と並行して、未利用の熱の有効利用技術の開発が喫緊の課題となっている。特に、200℃未満の未利用排熱が多く、これらの削減、再利用、および電力などへ変換して利用することが求められている。社会の電化が進む中、未利用熱を電力に変換して再利用する手法は高い利便性を有する。再生可能エネルギーにおける実用例として、地熱を利用した検討事例が報告²⁾³⁾されている。これらはいずれも熱源として温水を対象にしており、蒸気を対象とした事例は報告されていない。本稿では、自噴蒸気を対象とした熱電発電システムを試作し、発電実証試験を実施したので、その結果について報告する。

2. 凝縮潜熱伝熱式熱電発電ユニット

自噴蒸気を対象とした熱電発電システムは、以下の4つの基本構成から成り立つ。①発電部となる熱電モジ

ジュール(50 mm×50 mm)、②20 mm×60 mm断面のアルミ製角パイプの外壁の両面に各8枚の熱電モジュールを配置した熱冷却部、③この熱冷却部を4本並列に配置して蒸気を貯留するユニット部、④ユニット内で発電した電気エネルギーを交流へ変換する電力変換部である。Fig. 1に蒸気を貯留するユニットの外観を示す。冷却水温度15℃、冷却水流量12 L/minの条件の地下水を4本の冷却部へ常時流入しつつ、100℃の大気圧蒸気を貯留ユニット内へ導入することで、124 Wの発電量が得られる凝縮潜熱伝熱式の熱電発電ユニットを開発した。本ユニットは350 mm×650 mm×420 mmである。16枚の熱電モジュールは全て直列に接続した。熱電発電ユニットの詳細な設計、構造、評価結果等は別論文にて報告予定である。

本ユニットは蒸気と冷却水の諸条件によって定常伝熱状態を制御できる。そこで、高温熱源である蒸気量が充足した状態で、冷却水量を変更した際の熱電発電ユニットの最大発電量を評価した結果をFig. 2に示す。また、実際の温泉地における蒸気を用いた実証試験では、本ユニットを複数台設置して、排熱量に見合った発電量が得られるかを検証した。



Fig. 1 Prototype TEG unit

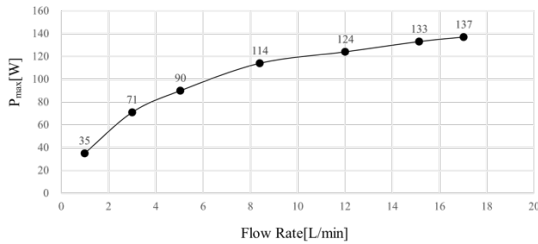


Fig. 2 Power generation of the prototype TEG unit

3. 実証場所及び熱電発電システム

実証場所として、GPSS エンジニアリング株式会社の協力の下、大分県由布市の温泉保養集落東ノ間を選定した。実証場所では、自噴蒸気を温泉として利用している。今回、余剰な自噴蒸気を用いて、熱電発電システムの実証試験を行った。

蒸気量が十分確保できることから、出力 1 kW とし、システム設計を行った。

① 熱電発電システム

1 kW の出力を想定し、8 台の熱電発電ユニット(120 W×8=960 W)から構成される熱電発電システムを試作した。それぞれの熱電発電ユニットに対して、熱交換条件を合わせるために並列で蒸気及び冷却水を供給した。また、蒸気及び冷却水はそれぞれユニット入口にて供給量を調整できるようにバルブを設けた。

② 電力変換システム

電力利用回路は、関連法令(電気事業法第 38 条)を考慮し、熱電発電ユニットの開放電圧が 30 V 未満となるよう設計した。

具体的には、冷却部毎に集約した 16 枚の熱電モジュールのうち、8 枚を直列に接続し、それらを並列に接続した。熱電モジュールの見かけのゼーベック係数は実測で 0.041 V/K であった。実証試験の推定温度差は約 85 °C(高温側温度 100 °C-低温側温度 15 °C)であったことから、8 枚の熱電モジュールを直列に接続した条件で、開放電圧が 28 V となるように設計した。よって、16 枚の熱電モジュールを直列接続とした一単位

で DC-DC コンバーター(直流-直流電圧変換器)を設けることとした。一つの熱電発電ユニット内には冷却部が 4 つ含まれておりそれぞれを並列に接続した。さらに、4 つのユニットを 12 V のバッテリーに並列接続することで発電電力の平準化回路とした。最終的に 2 つのバッテリーを直列に接続し、インバーターによって直流から交流に変換し、外部電源(AC100 V)として電力を取り出し利用するシステムとすることができる。各熱電モジュールから最終的な電力取出までの接続図を Fig. 3 に示す。

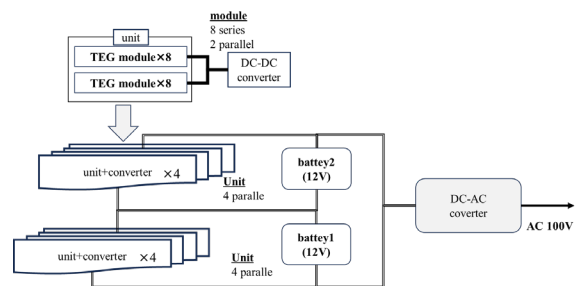


Fig. 3 Power conversion system.

4. 実証結果

実証場所に設置した熱電発電システムを Fig. 4 に示す。実証試験に当たり、現地での冷却水の供給量が設計値の 12 L/min に対し、冷却水の供給能力は 1.9 L/min であった。そのため、熱電発電システムの最大発電能力 1 kW は期待できなかったが、温泉の自噴蒸気を熱源とした熱電発電システムの運転確認や今後の課題整理を行うことができた。以下、実証試験結果を報告する。

Fig. 5 に熱電発電システムの発電量を測定した結果を示す。最大発電量は 372.8 W であった。本システムは 8 個の熱電発電ユニットから構成されており、熱電発電ユニット 1 台当たりの発電量は 46.6 W であった。Fig. 2 より冷却水の流量が 1.9 L/min の場合、1 台あたり 45-50 W の発電量が得られると考えられる。事前の試験結果と現地での発電量は整合的であり、実証場所において与えられた条件下で性能を発揮していることが確認できた。また、インバーターを介した交流負荷の動作確認も行った。

実証試験は 2024 年 3 月から 2024 年 6 月まで実施した。実証試験終了後の熱電発電内部の様子を Fig. 6 に示す。自噴源の周囲や熱電発電システムの外観はスケール等で覆われているものの熱電発電ユニット内部に

はほぼスケール等の付着物の発生は確認できなかった。

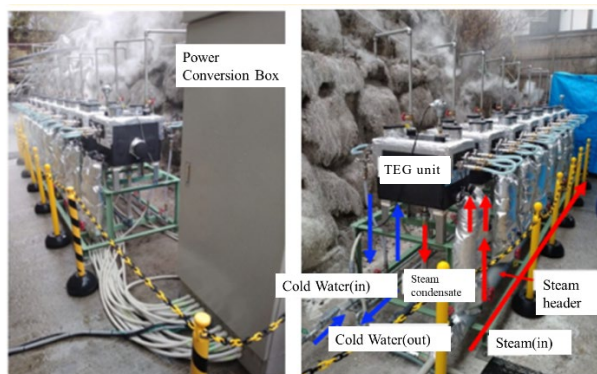


Fig. 4 TEG system for the pilot test

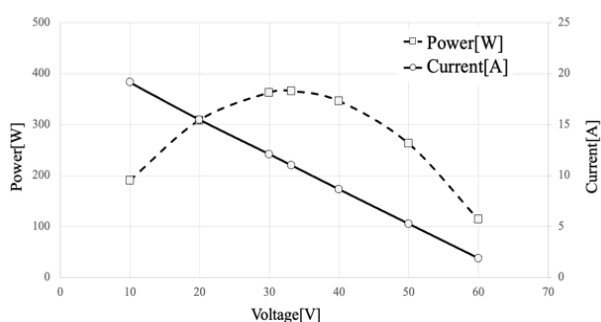


Fig. 5 Results of power generation measurements at the pilot test

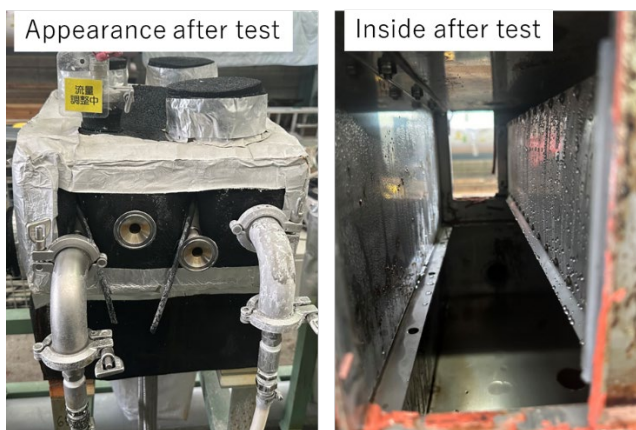


Fig. 6 Exterior and interior of the unit after completion of the pilot test.

5. まとめ

本報告では、凝縮潜熱伝熱式の熱電発電ユニットを用いて、熱電発電システムを設計、製作し、大分県由布市の温泉施設における自噴蒸気と地下水を用いた熱電発電の実証試験を行った。熱電発電システムは、発電量 1 kW を目指して熱電発電ユニット 8 台から構成される。法規制に対応するため、蓄電池を含め、

AC100 V として電力を取り出すことのできる電力変換システムを設計した。実証試験において得られた最大発電量は 372.8 W であった。設計上得られる発電量の 3~4 割しか得られていない。

差異の原因は冷却水の流量不足である。設計上必要な流量の 1/6 程度しか確保できなかったため、発電量が大幅に低くなった。なお、実証場所の周囲には大量のスケールが付着しており、本試験においても装置内へのスケール付着が想定されたが、試験後に内部を確認したところ、付着はほとんど発生していなかった。

本実証において、1 kW の発電量を得るためには冷却水の確保が必要である。今回冷却水は実証場所の井戸水を利用している。実証場所では井戸水を自噴蒸気との間接熱交換で加熱してお湯として利用しており、このような間接加熱の前段に設置するなどして冷却水および熱エネルギーを有効に利用するようなトータルの設計ができれば全体のエネルギーが損失することなく、必要な発電量を確保することも可能である。このような設計を行うためには物理モデル等を用いた全体最適ツールの構築が課題となる。このようなツールを用いて、発電だけでなくトータルのエネルギー最適化を行うことで熱電発電の導入を促進することが可能となる。

6. 謝辞

実証試験に協力いただきました温泉保養集落東ノ間堀江洋一郎様、GPSS エンジニアリング株式会社 齋藤洋様、GDI 株式会社 浦野雄人様に深く感謝します。

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (JPNP 21005) の結果得られたものです。

7. 参考文献

- 1) NEDO, 未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発,
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100097.html (最終閲覧日 : 2024 年 7 月 1 日)
- 2) 日本熱電学会編:熱電変換技術の基礎と応用, シーエムシー出版, 東京, 190, (2011)
- 3) 梶川武信, 佐野精二郎, 守本純編: 熱電変換システム技術総覧, リアライズ理工センター, 東京, 287, (2004)