


<p>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)</p>	
<p>低温排熱回収を目的とした熱電モジュールに関する  モデルベース設計手法の開発とシステム設計への応用</p> <p>Development of a model-based design method for thermoelectric modules  for low-temperature waste heat recovery and its application to system design</p>	
<p>内田 健太郎<sup>a)*</sup>, 清水 美咲<sup>a)</sup>, 岡田 友輝<sup>a)</sup>, 寺本 ゆう莉<sup>b)</sup>, 福江 高志<sup>b)</sup>  Kentaro Uchida<sup>a)*</sup>, Misaki Shimizu<sup>a)</sup>, Yuuki Okada<sup>a)</sup>, Yuuri Teramoto<sup>b)</sup>, Takashi Fukue<sup>b)</sup></p> <p>Corresponding Author: ku.eng07@gmail.com</p>	
<p>a) 株式会社白山, 〒920-8203, 石川県金沢市鞍月 2-2  b) 金沢工業大学, 〒924-0838, 石川県白山市八東穂 3-1</p> <p>a) 2-2 Kuratsuki, Kanazawa, Ishikawa, 920-8203, Japan, Hakusan Inc.  b) 3-1 Yatsukaho, Hakusan, Ishikawa, 924-0838, Japan, Kanazawa Institute of Technology</p>	
<p>Abstract  We have developed a system design platform for low-grade waste heat recovery thermoelectric generator with Model-Based Design (MBD). An MBD model was developed to predict the amount of electricity generated by a thermoelectric conversion unit, which utilizes the temperature difference between steam and cooling water to recover thermal energy, including latent heat. A mathematical model was proposed to predict the performance of a single thermoelectric module. Next, a model was developed to estimate the electricity generated by a thermoelectric unit comprising multiple modules, incorporating heat transfer coefficient estimation. Finally, an expanded MBD model was developed to predict the total power generation of a subsystem module (SSM) that integrates multiple thermoelectric units. The power generation was successfully predicted under various conditions. Moreover, the differences in power generation for each unit, depending on the combination of cooling circuits, were accurately predicted, demonstrating the potential applicability of this method to system optimization design.</p>	
<p>Keywords  model-based design; thermoelectric generator; IDCAE; heat transfer</p>	
<p>Received: 23/08/2024; Accepted: 13/02/2025; Published online: 21/02/2025</p>	

## 1. 緒言

カーボンニュートラルの実現に向け、産業、民生、運輸それぞれの部門における更なる省エネの深掘りの徹底が求められつつある<sup>1)</sup>。このキーテクノロジーのひとつとして熱電変換が挙げられており、産業施設や家庭で発生する未利用の熱エネルギーを有用な電気エネルギーに変換することにより、エネルギー効率と持続可能性を向上させるものとして期待される<sup>2), 3)</sup>。未利用の熱エネルギーの中でも、200 °C 未満の低温排熱が、未利用排熱量の 76 % を占めていることが報告されており<sup>4)</sup>、潜在的なエネルギーリソースの可能性を秘める。カーボンニュートラルの実現には、これまで着手優先順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わなければ達成が難しく、低温排熱を効果的に再利用や変換利用できる技術やアプリケーションの構築に対するニーズは高まることが予想される。産業、民生、運輸それぞれの低温排熱源が千差万別であり、汎用性の高いエネルギー回収が可能なメカニズムを模索した場合に、排熱の熱エネルギーを直接受け取り、電気に変換できる熱電変換技術は、周囲のシステムも含めた設計の自由度が高いことや、得られる電気エネルギーの汎用性が高いことから、熱電変換技術をキ

ーとした低温排熱の回収技術の構築に向けた基礎研究は、カーボンニュートラルの実現に向けても有意である。

排熱回収への熱電変換技術の応用に関する、材料やモジュール、システムの研究が様々に行われていることから<sup>5)</sup>、その期待度の大きさが伺える。一例として、Kuroki ら<sup>6)</sup>は熱電発電を用いた製鉄プラントからの排熱回収について報告している。Hekim ら<sup>7)</sup>は大規模システムの例として、地熱発電とのコラボレーションについて検討した結果を報告している。低温排熱回収に向けた取り組みとしては、Dede ら<sup>8)</sup>が、低温の排熱を回収するために考えられた複合基板と熱電発電素子を組み合わせることで、低品位排熱の回収が実現し、小型の遠隔センサなどに応用できる自律的な電力供給システムとしての可能性を示している。Bu ら<sup>9)</sup>は、低品位排熱のための熱電材料として、テルルを含まないアンチモン化合物の応用を検討し、熱電モジュール効率 8 % を達成している。以上のように、低温排熱に向けた熱電変換の応用について議論が行われている一方、変わらない課題として、低温におけるエネルギー回収性能の向上がある。低温排熱の回収では必然的に高温熱源の温度が低くなり、熱電変換素子の高温側と低温側の温度差も相対的に小さくならざるを得ず、発電量が低下する。

そこで、回収性能向上に向けた1つの方法として、顕熱のみならず、大気圧蒸気の凝縮で発生する潜熱輸送も利用した熱電発電システムが提案されている<sup>10)</sup>。これは大気圧蒸気を高温熱源とし、熱回収面で凝縮させることで、凝縮潜熱も熱電素子に供給するもので、熱電素子への熱供給量を増やすことが可能で、低温排熱におけるエネルギー回収性能の向上が期待できる。工場排熱や地熱、民生で使用されるボイラなど、様々な応用対象とも親和性が高く、汎用性も広いこともメリットである。以上から、蒸気利用の熱電発電システムは、今後想定される低品位排熱の回収技術としての親和性が高く、応用に向けた環境を整えることは価値が大きく、今後の熱電変換を用いた低品位排熱の回収機会の増加に向け有益なものになる。そのために必要なプロセスとして、実装による排熱回収効果を予め適切に見積もるために、排熱を含む蒸気が流れる場を持つアプリケーションに対し、熱電素子を実装した熱電発電ユニット(以下、ユニット)の性能や寸法を最適に計算し提案できる設計プラットフォームの検討が必要となる。排熱回収のための機構は、応用対象にとっては付加的なものであり、排熱量の割合はその動作の結果に付随して決定する。さらには、応用対象の構造は千差万別である。したがって、その多様性に対応し、応用対象の設計の中で付随的に熱電モジュールの機構を組み合わせながら、統合的に熱電モジュールの性能予測ができるプラットフォームの構築が期待される。

以上から本研究では、熱電変換を用いた低温排熱の回収機会の増加を狙い、水蒸気の潜熱も用いた排熱回収促進が可能なユニット<sup>11)</sup>を対象に、応用対象への実装時の性能評価が簡易に実現出来る設計プラットフォームの構築を目的とする。様々な機能の組み合わせである機械製品の機能を統合的に設計するための考え方として、あらかじめ各々の機能の挙動を数理的に記述した簡易なモデルを準備し、これらを組み合わせたシミュレーションで設計を進めるモデルベース開発(Model-Based Design / Development (MBD))<sup>12)</sup>に着目した。熱流体分野においては、伝熱や流れを電気回路とのアナロジーを用いた集中定数系でモデル化して性能評価を行う事例が報告されている<sup>13), 14)</sup>。Itoら<sup>15)</sup>は、電動航空機の構想設計を対象に、数式による機能のモデリングによりモーターの空冷性能に対する冷却流路の寸法の影響評価を試みている。熱電発電においては、Felgnerら<sup>16)</sup>がエネルギーシステムの設計に向けた熱電モジュールの機能について、数式によるモデリングを行っている。以上のように、モデルベース

でシステム全体の熱流体設計を行うための取り組みや成果は多く、この考え方を軸にした、熱電変換モジュールおよびモジュールを実装するユニットのモデリングと、システムの設計への応用可能性を評価することは有益と考えた。そのためには、熱電変換プロセス、潜熱輸送も含めた水蒸気からの熱回収、熱電変換ユニット内部の伝熱機構の適切なモデル化のための方法論の構築と、実装するシステムの性能予測の実現可能性について、信頼性も含め評価する必要がある。

そこで本稿では、水蒸気からの熱回収を行うユニットを対象に、その熱回収の機能モデリングを行った。さらに、モデリングされたユニットのモデルを用い、実応用を企図し、ユニットを組み合わせたサブシステムモジュール(以下、SSM)のシステムモデルを構築し、SSMの性能予測を試みた。予測結果は実測と比較することにより、提案するモデルベース設計の有効性について評価を行った。なお、最終的には電力利用を考慮し排熱源特性から最大源発電が可能なシステム最適化及び回収出来る発電量(kWh)が試算できることが目標であるが、本稿では研究の第一段階として、熱電モジュールの熱電特性や伝熱をもとにした熱電ユニットの発電量予測および、ユニットを組み合わせたシステムの発電量予測を目標とした。以上の内容について報告する。

## 2. 検証対象

図1に本研究で対象としたユニットを、図2にSSMにおける流体およびエネルギーの授受のイメージを示す。ユニットは、片側8枚ずつ合計16枚の熱電モジュールを内蔵している。熱電モジュールを金属板で挟み込み、高温側は高温熱源となる水蒸気で加熱され、低温側は低温熱源となる冷却水で冷却される。これにより熱電モジュールの両端に温度差を生じさせ電気出力を取り出す構造である。このユニットを複数組み合わせることにより、SSMが構築される。したがって、図2に示すように、SSMには排熱および冷却水が供給され、電力が出力される構造となる。

## 3. 熱電モジュールのMBDモデル化

### 3.1. 熱電モジュールの機能

まず、ユニットに実装される熱電モジュールの機能モデリングについて検討する。図3に、 $\pi$ 型構造をもつ熱電モジュールの構造を示す。モジュールの片側の基板を加熱し、もう一方の基板を冷却させると、モジュール両

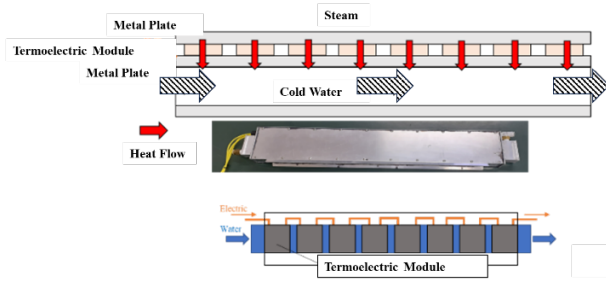


Fig. 1. Proposed thermoelectric generation unit.

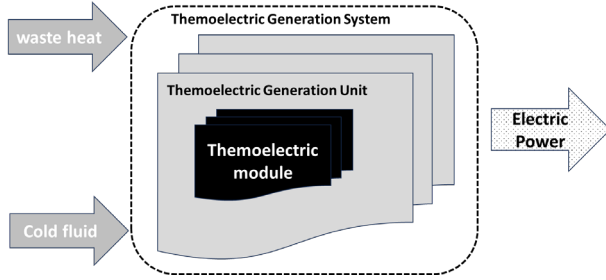


Fig. 2. Schematic of fluid and energy flow in proposed sub system module.

面に温度差が生じ、Seebeck 効果により電圧が発生する。端子に外部負荷をつなぐと電流が流れて電気出力を取り出すことができる。

### 3.2. モジュールの MBD モデルと基礎方程式

図 4 に構築した MBD モデルのイメージ図を示す。図 3 に表現した熱電モジュールにおけるエネルギーのやり取りは次のように示される<sup>7),8)</sup>。

まず、熱電モジュールへの熱入力  $Q_{in}$  [W]、熱電モジュールからの放熱量  $Q_{out}$  [W] に関するエネルギーバランスが次式のかたちで成立する。

$$Q_{in} = \alpha IT_h - \frac{1}{2}r_i I^2 + K(T_h - T_c) \quad (1)$$

$$Q_{out} = \alpha IT_c + \frac{1}{2}r_i I^2 + K(T_h - T_c) \quad (2)$$

ここで  $T_h$  [K]：高温側温度、 $T_c$  [K]：低温側温度、 $r_i$  [ $\Omega$ ]：モジュールの抵抗（内部抵抗）、 $I$  [A]：電流、 $\alpha$  [V/K]：モジュールの Seebeck 係数、 $K$  [W/K]：モジュールの熱コンダクタンスである。電流  $I$  は次で表現される。

$$I = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{r_i + r_o} \quad (3)$$

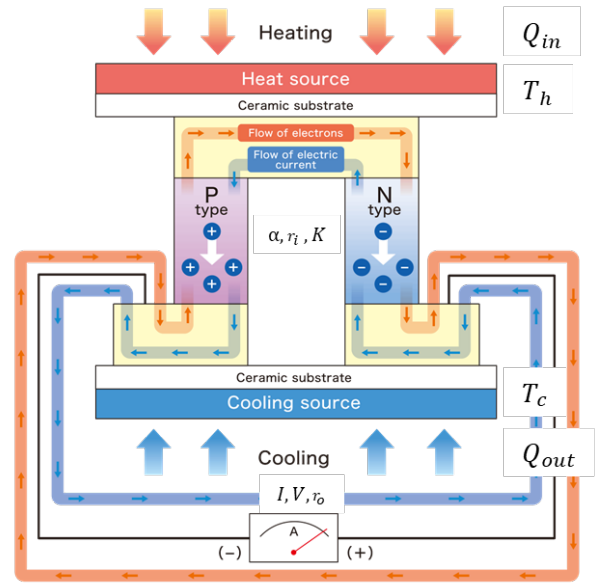


Fig. 3. Construction of thermoelectric module.

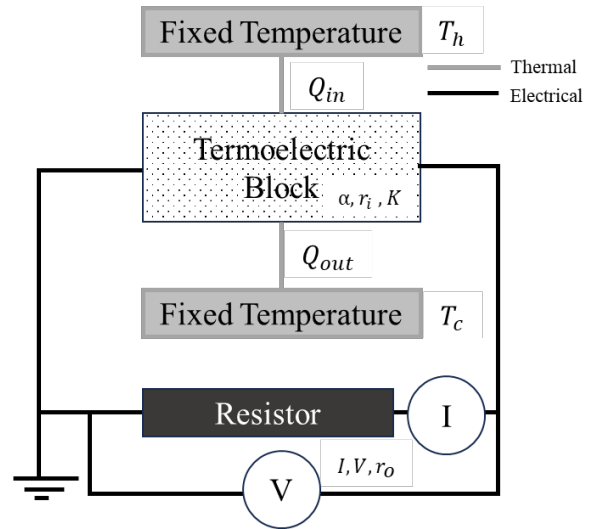


Fig. 4. MBD model of the thermoelectric module.

$r_o$  [ $\Omega$ ]：モジュールから電流が出力される回路の抵抗（外部抵抗）である。モジュールで発生される電位差  $V$  [V] および発電量  $P$  [W] は次のようになる。

$$V = \alpha T_h - r_i I \quad (4)$$

$$P = r_o I^2 \quad (5)$$

以上を基礎方程式として熱電発電モデルを作成した。熱系の境界条件として高温側温度  $T_h$  と放熱側温度  $T_c$  を与えた。また、電気系の境界条件として外部抵抗  $r_o$  を設定した。このとき、 $r_o$  に対して発生する電圧  $V$ 、電流  $I$ 、発電量  $P$  を予測できるようにした。

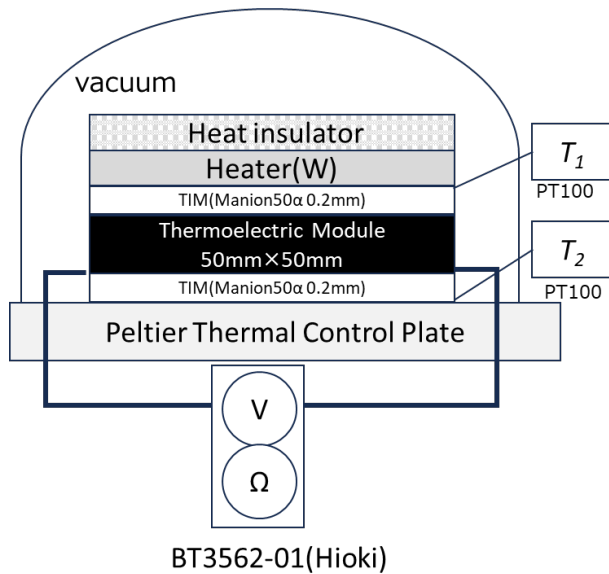


Fig. 5. Evaluation system of physical properties of thermoelectric module.

### 3.3. 熱電モジュール物性値の実測

熱電モジュールの性能として、モジュールの抵抗  $r_i$ 、Seebeck 係数  $\alpha$ 、熱コンダクタンス  $K$  はモジュールを実測することにより取得した。以下、試験用のモジュールを用いた場合の結果について示す。

以下に物性測定の方法を述べる。図 5 に、本稿で用いたモジュールの評価装置を示す。真空状態のチャンバ内にモジュールを実装し、モジュールの片面にはヒータ、反対の面には別の熱電モジュールを用いた温度調整板を取り付けた。双方の接触面は TIM を塗布し接触熱抵抗を低減している。温度調整板の表面温度  $T_2$  を一定に制御した上で、ヒータに電力を投入し加熱した。この時のヒータ側のモジュール表面温度  $T_1$  と、モジュールの電圧および抵抗値を計測した。このとき、Seebeck 係数は起電圧の温度変化に対する傾き、熱コンダクタンスはヒータ出力（モジュールの通過熱量）の温度変化に対する傾きより計算できる。このことから、ヒータ出力を変更し、温度差を変えながら複数点のデータを取得し、起電圧およびヒータ出力の傾きを計測し、Seebeck 係数と熱コンダクタンスを計算した。 $T_2 = 50^\circ\text{C}$  に設定した場合の、モジュール表裏面温度差  $T_1 - T_2$  に対する起電圧およびヒータ出力の変化を図 6 に示す。この結果を用いて得られた各々の物性値は表 1 に示すとおりで、それぞれのパラメータを取得できた。なお本稿の検証の範囲では、各パラメータの温度依存は小さいとして、それぞれの物性値については、計算中は定数として取り扱った。

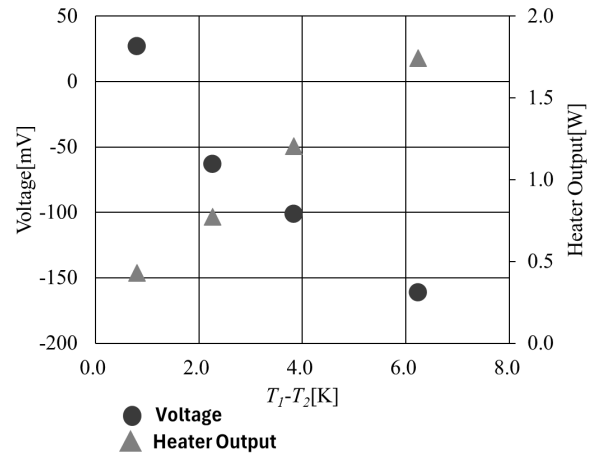


Fig. 6. Measurement results of change of voltage and heater output against temperature difference between the module.

Table 1. Measurement result of physical properties of the thermoelectric module.

Parameters	Value
Generated Voltage of the module [V/K]	$2 \times 10^{-2}$
Electrical resistance [ $\Omega$ ]	1.40
Thermal conductance [W/K]	0.222
ZT ( $T_2 = 323.15\text{ K}$ )	0.58

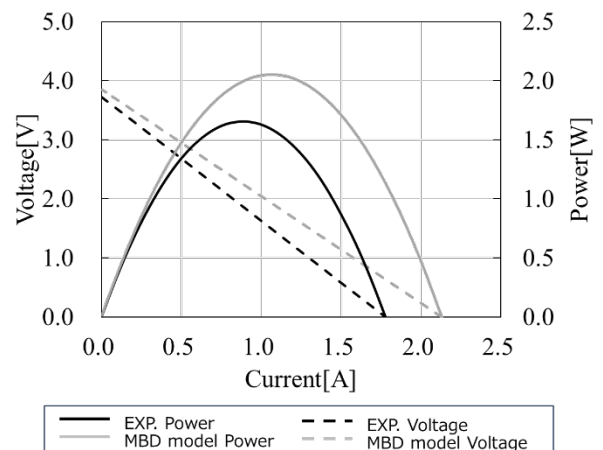


Fig. 7. Relationship between experimental result and predicted result by developed MBD model.

### 3.4. モデル予測結果の実測値との比較

図 7 に、試験用熱電モジュールの起電圧および発電量の実測値と、図 4 で開発した MBD モデルで予測した値の比較を示す。起電圧、発電量ともに、実測結果と MBD の結果で電流値に対する定性的な傾向が一致し、MBD モデルによる両特性の予測が出来ていることが確認できた。

高電流条件での定量的な差が大きくなったが、これは実測における計測の問題：温度の評価点が厳密に MBD と実測で一致させられていないこと、測定に使用した温度調整板の周囲の熱抵抗が顧慮されていないことから、モジュールに供給された熱量を過大評価していることによると考える。実測の精度向上が課題である一方で、MBD モデルの活用という観点では、まずモジュールを実装したシステムの定性的な性能を、設計パラメタに対して探査出来ることが第一である。本稿で開発した MBD モデルは、熱電モジュールの性能の傾向を定性的に追えており、比較評価の中で最適解を探す設計初期段階の性能予測には十分有効であると評価できる。

#### 4. ユニットのモデル化

##### 4.1. ユニット内部の伝熱現象

前章においてモジュール単体のエネルギー収支のモデリングを行った。このモデルを活用し、次は伝熱も含む図 8 に、ユニットとモジュールの伝熱の様相を示す。図 1 で示したように、ユニット内部で熱電モジュールは金属板（ステンレス製）により挟まれ、高温側の金属板の隣には水蒸気が流れ、低温側の金属板の隣には冷却水が流れる。したがって、伝熱はまず (1) 水蒸気から、ユニットの高温側金属板へ発生する。このとき、水蒸気が熱を奪われることで凝縮することから、凝縮熱伝達になる。(2) 金属板の内部を熱伝導する。(3) 金属板を通過した熱がモジュールに伝熱し、モジュールの内部を通過し、この一部が熱電変換により電力として出力される。(4) 変換されなかった熱は低温側の金属板に流入し、熱伝導により金属板表面に達する。(5) 金属板表面から冷却水へ強制対流熱伝達により排熱される。

##### 4.2. ユニットの MBD モデルと基礎方程式

以上の伝熱を再現する MBD モデルについて検討する。図 9 に 1 ユニットイメージ図を示す。ユニットの MBD モデルを検討するにあたり、それぞれの伝熱プロセスについて下記のようにモデル化した。

- (1) 高温側の凝縮熱伝達：本稿においては、後述する実測において、高温側金属板の表面温度が大気圧下の水の沸点 (99.974 °C) とほぼ相違なかったことから、モデル内においては温度境界として 100 °C に固定して運用した。
- (2) および (4) 金属板内の熱伝導：実際には金属板とモジュールの間には接触熱抵抗が発生することから、この低減に TIM を塗布している。本稿においては接触熱抵抗

より他の伝熱要素の熱抵抗が支配的と考え、金属板とモ

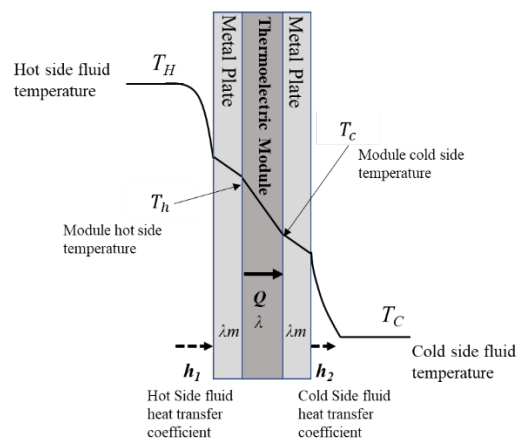


Fig. 8. Heat transfer through thermoelectric module in the proposed unit.

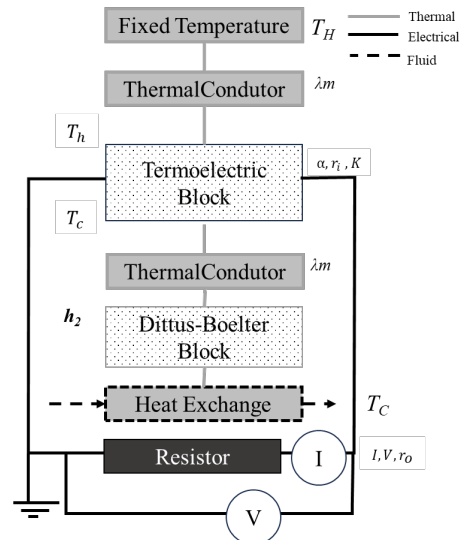


Fig. 9. MBD model of heat transfer in the unit.

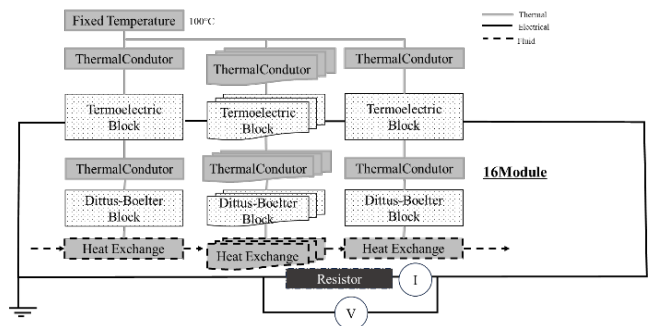


Fig. 10. 16 module model of the thermoelectric unit.

ジュールは密着しているものとして考え、金属板内の熱伝導のみを考慮した。

- (3) モジュール内の熱伝導：3章で構築したモジュールの

MBD モデルを組み込む。このときの、ユニット用の熱電モジュールのパラメータは、別途 3 章で説明した実測により獲得した (表 2)。

(4) 低温側の冷却水の強制対流熱伝達：冷却水による強制対流熱伝達が発生する。これを予測できる平均熱伝達率の性能式をもってモデル化した。

実際のユニットには、16 個のモジュールが電氣的に直列で接続されている。実際のユニットは図 9 を複数個接続した図 10 のモデルで表現した。

#### 4.3. 冷却流路の平均熱伝達率と予測結果の評価

冷却流路の熱伝達率のモデル式について検討すると同時に、ユニットの伝熱予測精度の評価を行う。

本稿で低温熱源側にて使った冷却水流路の冷却水の流れは、冷却水流路（矩形管路）の水力等価直径を代表寸法  $D$  [m] に、流路の平均流速を代表流速  $u$  [m/s] にとつた Reynolds 数：

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (6)$$

において乱流の範囲であった。ここで  $\mu$  [Pa·s]：流体の粘度、 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]：流体の密度である。そこで、管内流における平均熱伝達率のモデル式に基づき、冷却性能の予測を行うこととした。強制対流熱伝達では、一般に熱伝達率の無次元数である Nusselt 数は、Reynolds 数と Prandtl 数の関数であることがわかっており、最も簡単な実験式の形として次のような表現が広く使われる<sup>(19)</sup>。

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (7)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (8)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (9)$$

ここで  $h$  [W/(m<sup>2</sup>·K)]：平均熱伝達率、 $k$  [W/(m·K)]：流体の熱伝導率、 $c_p$  [J/(kg·K)]：流体の定圧比熱である。著名な式として、温度一定で、流れ場および温度場ともに十分に発達した滑らかな円管内の乱流熱伝達に対する Dittus-Boelter の式<sup>20)</sup>においては、 $C = 0.023, m = 0.8, n = 0.4$  となる。本稿では実験結果と比較することにより、この係数を推定し、実験式として用いることとした。

実験は図 11 のように、水蒸気が供給されるチャンバ内

Parameter	Measurement result
Generated Voltage of the module [V/K]	0.041
Electrical resistance [Ω]	0.85
Thermal conductance [W/K]	1.04

Table 2. Physical parameters of thermoelectric module mounted in the test unit.

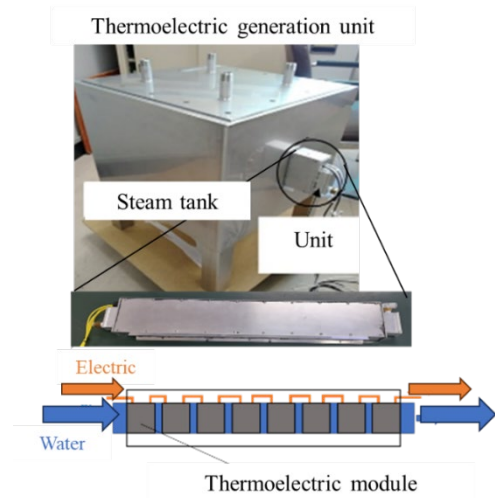


Fig. 11. Schematic of the test chamber and the test unit.

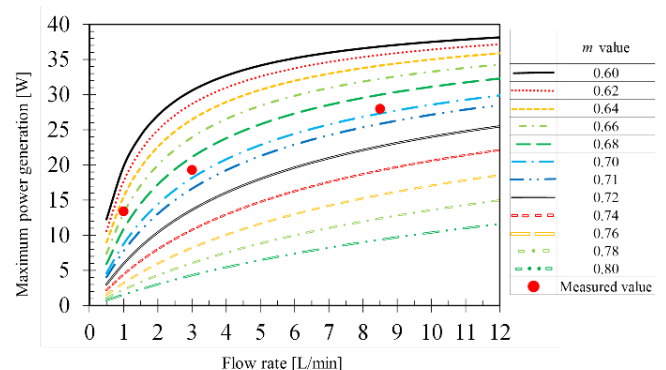


Fig. 12. Prediction result of relationship between the maximum power generation and the flow rate of the cooling water.

にユニットを実装し、モジュールおよび冷却水を循環するポンプを動作させた。このときの発電量を正しく予測できるように、(7) 式の係数を決定した。図 12 に、冷却水の供給流量を変えた場合の、モジュール最大発電量の実測値の結果と、MBD モデルで予測した結果を併記して示す。なお、MBD モデルの結果は、(7) 式において、 $C = 0.023, n = 0.4$  として、Reynolds 数の係数  $m$  を変えた場合の結果を示している。また、最大発電量は内部の抵抗と外部の抵抗が同一とした時の発電量である。結果から、 $m = 0.7$  としたときに、最大発電量の実測値と MBD の予

測結果は良好な一致を示した。これにより、本稿で構築したユニットの MBD モデルについて、適切な冷却水の熱伝達率を定義することで、良好な制度でユニットの総発電量を予測できることを確認することが出来た。

## 5. SSM 性能予測への応用

### 5.1. SSM の構造と MBD モデル

最後に、4 つのユニットを組み合わせたサブシステムモジュール (以下、SSM) のシステムモデルを構築し、SSM の性能予測を試みた。図 13 のように、実際の熱電発電システム (TEG) を構築する際に、ある程度のユニットの集合体を一つの単位として複数の集合体を設置し発生排熱量に併せた発電量を得る。そのための最小単位として、120W 程度の出力を得られる、4 つのユニットを集合させた集合体である SSM を開発した。この性能評価を、開発した MBD モデルにより行った。

図 14 に SSM の MBD モデルのイメージ図を示す。高温熱源が水蒸気、低温熱源は冷却水として、前章で開発した 4 つのユニットの MBD モデルを並列接続した。このときの物性値および冷却水の熱伝達率は、前章で検討した通りの値を用いた。

### 5.2. 予測結果

まず図 15 に、SSM の最大全発電量の予測結果を、実

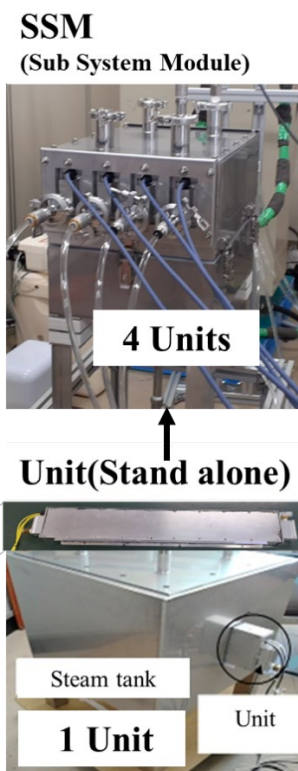


Fig. 13. Relationship between SSM and one unit.

測結果と比較したものを示す。プロットが実測の結果であるが、MBD による計算結果が、SSM 全体の発電量を適切に予測できることが確認できた。さらに、図 16 には各ユニットでの予測結果を示している。各ユニットで発電量に分布があるのは、4 つのユニットは Unit 1 から順番に直列に接続されており、後段のユニットになると冷却水温度が上昇し発電量が低下するためである。このことも再現でき、冷却の接続方法による発電量の推定ができることも確認できた。このことは、最大発電量を得るための将来の SSM の冷却回路の最適設計にも、開発した MBD モデルが適用可能である可能性も示唆している。

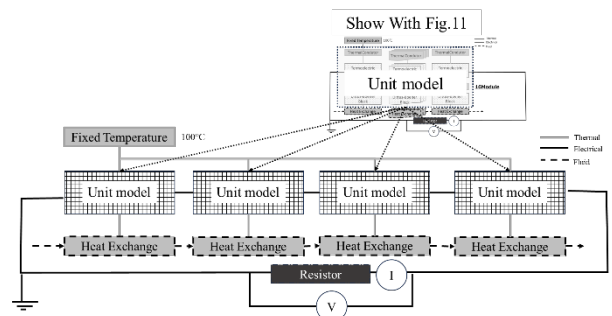


Fig. 14. Image of MBD model of SSM.

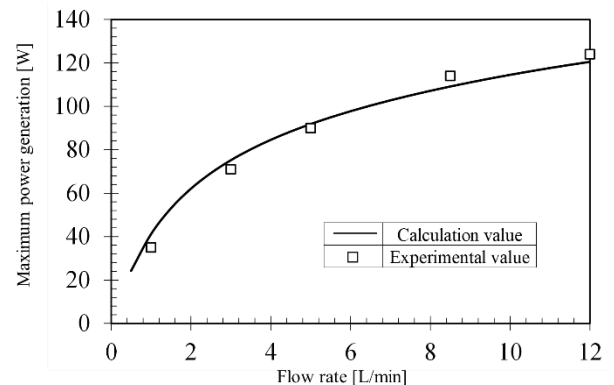


Fig. 15. Prediction result of power generation of SSM by developed MBD model.

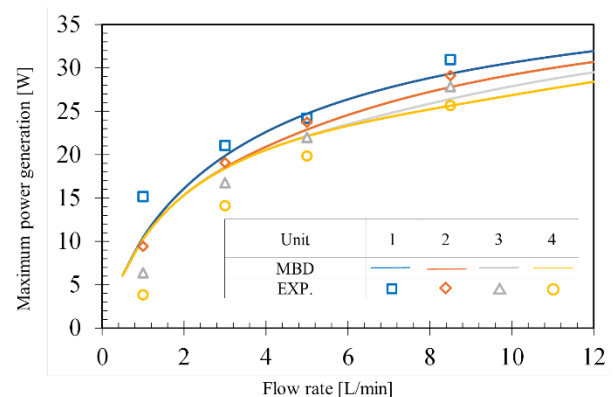


Fig. 16. Prediction result of power generation of each test unit mounted in SSM.

一方で、冷却水流量が低い領域においてはそれぞれのユニットの実験値と推定値に乖離が大きい。本モデルでは乱流領域を想定しており、低流量になると遷移領域に近づくため乖離が大きくなってきたと推定する。低流領域のモデルの解析は今後の課題である。

## 6. 結言

本研究では、カーボンニュートラルへの熱電発電の貢献を目的として、低品位排熱の回収に向けたシステム設計を、多様な実装対象に対して自由な設計を実現するための MBD に基づく設計プラットフォームを構築することを目的とした。特に、水蒸気と冷却水で温度差を発生し、潜熱も含めた熱回収を行うことの出来る熱電変換ユニットについて、その発電量を予測できる MBD モデルを開発した。まず熱電モジュール単体の性能予測ができる数式モデルを構築した。そのうえで複数のモジュールを実装した熱電変換ユニットの発電量を予測するモジュールを、熱伝達率の推定も含め開発した。最後に、複数の熱電発電ユニットを組み合わせたサブシステムモジュール (SSM) の総発電量の予測が出来るよう拡張した。本研究の成果として次のような結言が得られた。

モジュールにおけるエネルギーバランスおよび発生する電力の関係式から、モジュールの数式モデルの構築に成功し、モジュール単体での発電量予測に成功した。

モジュールモデルを組み合わせたユニットモデルについては、冷却水の熱伝達率を適切にモデル化することで、全体の発電量を適切に予測することができる。

最後に、ユニットを組み合わせた SSM についても、総合発電量の予測に成功した。冷却回路の組み合わせによる各ユニットの発電量の差についても予測できており、冷却回路の最適化設計にも適用可能な感触を得た。

今後は、電気系システムを含めた最適化、特に実際の発電システムでは、システム側の設計により外部抵抗が決まることから、SSM が実際に実装される系も組み合わせた統合的なシステム設計への応用可能性について評価できると有益である。また、熱電モジュールの素子形状や材料物性といった特性の設計や最適化も、熱電モジュール部をブレイクダウンし、材料物性レベルまでパラメータを最適化できるようになれば、材料開発の目標値の設定等も同時に設計できる可能性があり、今後の検討課題としたい。

## 謝辞

本論文の実験に協力いただきました株式会社白山 宮崎氏、畦地氏、論文作成を支援いただきました金沢工業大学 長井氏に感謝いたします。また、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。

## 参考文献

- 1) 経済産業省: On the Web., [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene\\_shinene/sho\\_energy/pdf/031\\_01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/pdf/031_01_00.pdf) (最終閲覧日: 2024年8月6日)
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: On the Web., [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101741.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101741.html) (最終閲覧日: 2024年8月6日)
- 3) 小原拓, 川南剛, 藏田耕作, 小宮敦樹, 津島将司, 小野義広, 今村宰, 木戸口和浩, 谷口満彦, 荒井政大, 中別府修, 山崎美稀: *日本機械学会誌* **127-1262**, 16 (2024).
- 4) 小原春彦: On the Web., <https://www.nedo.go.jp/content/100957675.pdf> (最終閲覧日: 2024年8月7日)
- 5) 河本洋: *科学技術動向* 2008年9月号, 20 (2008).
- 6) Kuroki, T., Kabeya, K., Makino, K., Kajihara, T., Kaibe, H., Hachiuma, H., Matsuno, H. and Fujibayashi, A.: *J. Electron. Mater.* **43-6**, 2405 (2014).
- 7) Hekim, M. and Cetin, E.: *Int. J. Energy Res.* **45-15**, 20891 (2021).
- 8) Dede, E. M., Schmalenberg, P., Wang, C. M., Zhou, F. and Nomura, T.: *AIP Advances* **6**, 055113 (2016).
- 9) Bu, Z., Zhang, X., Hu, Y., Chen, Z., Lin, W., Xiao, C. and Pei, Y.: *Nat. Commun.* **13:237** (2022).
- 10) 特開 2011-004500, *水蒸気凝縮潜熱を利用した熱電発電システム* (2011).
- 11) 特開 2023-104304, *熱電発電ユニット、及び熱電発電ユニットの製造方法* (2023).
- 12) 平野, *日本機械学会誌* **119-1177**, 662 (2016).
- 13) Kamiyama, A., Inokuma, K., Murata, A., Yamamoto, S., Iwamoto, K. and Konno, T.: *JTST* **17-1**, 21-00241 (2022).
- 14) 福江高志, 石塚勝, 山崎健太, 畠山友行, 中川慎二, 中山恒: *TSE* **19-3**, 81 (2011).
- 15) Ito, Y., Watanabe, T., Seki, N., Hirakawa, K., Inoue, T. and Himeno, T.: *J. Eng. Gas Turbines Power* **145**, 041016 (2023).
- 16) Felgner, F., Exel, L., Nesarajah, M. and Frey, G.: *IEEE Trans. Ind. Electron.* **61-3**, 1301 (2014).
- 17) Goupil, C.: *Continuum Theory and Modeling of Thermoelectric Elements*, WILEY-VCH, Weinheim, (2016).



- 18) 坂田亮編: 熱電変換, 裳華房, 東京, (2021).
- 19) 望月貞成, 村田章, 伝熱工学の基礎 (増補改訂版), 日新出版, 東京, (2015).
- 20) 吉田駿: 伝熱学の基礎第 2 版, オーム社, 東京, 83 (2019).