

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

研 究 区 分 : 革新型研究開発（若手枠）

研 究 実 施 期 間 : 2024（令和6）年度～2024（令和6）年度

課 題 番 号 : 3RA-2402

体 系 的 番 号 : JPMEERF20243RA2

研 究 課 題 名 : シリコン太陽電池を用いた中小規模廃棄物焼却炉における熱発電技術

Project Title : Power generation from exhaust heat in medium/small-scale waste incinerator using silicon photovoltaic cells

研 究 代 表 者 : 清水 信

研 究 代 表 機 関 : 東北大学

研 究 分 担 機 関 :

キ ー ワ ー ド : 熱光起電力発電、熱輻射、廃棄物焼却炉、太陽電池、廃熱利用

注： 研究機関等は研究実施期間中のものです。また、各機関の名称は本報告書作成時点のものです。

令和7（2025）年11月



環境研究総合推進費
Environment Research and Technology Development Fund



独立行政法人
環境再生保全機構
ERCA Environmental Restoration and Conservation Agency

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
研究課題情報	3
<基本情報>	3
<研究体制>	3
<研究経費の実績>	3
<研究の全体概要図>	4
1. 研究成果	5
1. 1. 研究背景	5
1. 2. 研究目的	5
1. 3. 研究目標	5
1. 4. 研究内容・研究結果	6
1. 4. 1. 研究内容	6
1. 4. 2. 研究結果及び考察	6
1. 5. 研究成果及び自己評価	12
1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	12
1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価	13
1. 6. 研究成果発表状況の概要	13
1. 6. 1. 研究成果発表の件数	13
1. 6. 2. 主要な研究成果発表	14
1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動	14
1. 7. 国際共同研究等の状況	14
1. 8. 研究者略歴	14
2. 研究成果発表の一覧	15
(1) 産業財産権	15
(2) 論文	15
(3) 著書	15
(4) 口頭発表・ポスター発表	15
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	15
(6) マスメディア等への公表・報道等	16
(7) 研究成果による受賞	16
(8) その他の成果発表	16
権利表示・義務記載	16

Abstract

研究課題情報

<基本情報>

研 究 区 分	革新型研究開発（若手枠）
研 究 実 施 期 間	2024（令和6）年度～2024（令和6）年度
研 究 領 域	資源循環領域
重 点 課 題	【重点課題 10】地域循環共生圏形成に資する廃棄物処理システムの構築に関する研究・技術開発
行 政 ニ ー ズ	（3-1）廃棄物処理施設由来の熱輸送技術の研究開発
課 題 番 号	3RA-2402
体 系 的 番 号	JPMEERF20243RA2
研 究 課 題 名	シリコン太陽電池を用いた中小規模廃棄物焼却炉における熱発電技術
研 究 代 表 者	清水 信
研 究 代 表 機 関	東北大学
研 究 分 担 機 関	
研 究 協 力 機 関	

注： 研究協力機関は公開の了承があった機関名のみ記載されます。

<研究体制>

サブテーマ1「シリコンPVセルを用いた熱光起電力発電の廃棄物焼却炉における適用可能性評価」

<サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者>

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	東北大学	大学院工学研究科	准教授	清水信	
研究協力者	東北大学	大学院工学研究科	博士課程学生	Wang Haolin	

注： 研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

<研究経費の実績>

年度	直接経費（円）	間接経費（円）	経費合計（円）	備考（自己充当等）
2024	4,600,000	1,380,000	5,980,000	
全期間合計	4,600,000	1,380,000	5,980,000	

注： 環境研究総合推進費の規定する研究経費の支援規模を超えた額は自己充当等によるものです。

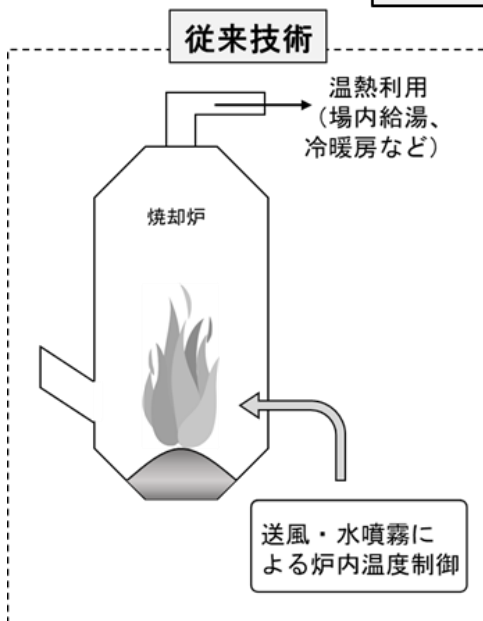
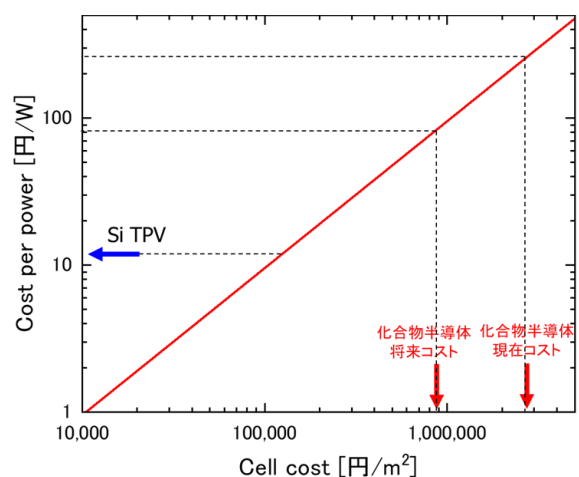
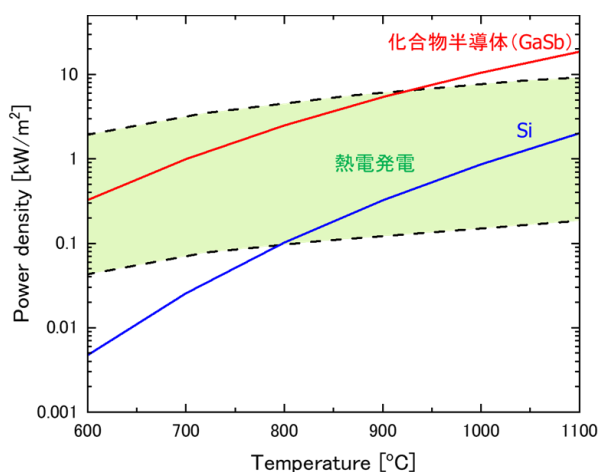
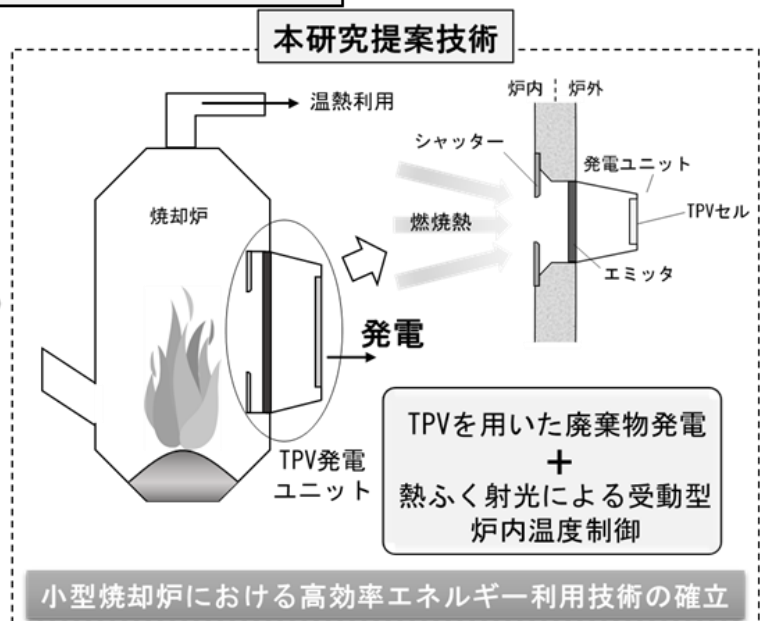
<研究の全体概要図>

研究題目**シリコン太陽電池を用いた中小規模廃棄物焼却炉
における熱発電技術**

処理量百トン未満/日の小型廃棄物焼却炉における発電技術を開拓すると共に、クリンカ抑制のための焼却炉内の省エネルギー温度低減手法の開発によって、廃棄物焼却炉全体の半数を占める小型廃棄物焼却炉のエネルギー有効利用促進を目指す。

研究代表者

清水信（東北大学）

従来技術**本研究提案技術**

シリコンPVセルは従来TPV発電用のPVセルとして注目されてこなかったが
コストおよび実現性の観点から十分な優位性がある

本研究では実用化研究へと発展させるための指標として、1000℃以下で
0.1kW/m²の発電出力密度を実証する

1. 研究成果

1. 1. 研究背景

我が国の一般廃棄物焼却施設の約半数を占める小型焼却炉（処理能力100トン/日未満）では、蒸気タービンをを用いた廃熱発電システムの導入が物理的・経済的制約により進んでおらず、発電設備の導入率は数%にとどまっている。具体的には、ボイラー水管やタービン機構の設置が困難であること、また小型蒸気タービンの発電効率が低く費用対効果が見込めないことが挙げられる。さらに、焼却炉内温度を850～1000℃程度に維持するために水噴霧等による強制冷却が行われており、未利用熱のエネルギー損失が常態化している。

このような背景のもと、本研究では、熱光起電力発電（Thermophotovoltaics; TPV）の技術を小型焼却炉に導入する新たな熱利用技術を提案する。TPVは、熱源と非接触で発電できる全固体型の静的発電システムであり、腐食性ガスとの接触を回避できる点や可動部がない点で、小型焼却炉における排熱利用に極めて高い適性を有する。特にTPVは800℃以上の高温環境下で変換効率が向上する特性を持ち、焼却炉の温度帯との親和性も高いことからこれまでにない革新的な廃熱利用発電技術として期待できる。

1. 2. 研究目的

本研究では焼却炉燃焼熱を熱源としたTPV発電による新たな廃棄物焼却炉における熱発電技術を提案する。TPVは一般的に800℃以上で温度が上がるほど効率も向上し、且つ、熱輻射を光起電力（PV）セルで変換するため、発電素子であるPVセルと焼却炉の高温腐食性ガスが非接触で発電できる点で優位性がある。しかしながら従来のTPV技術では、発電セルにIII-V族化合物半導体（例：GaSb）を用いた高効率型が主流であり、これらは大面積化や低コスト化に難があるため焼却炉のような広い熱源面への適用が困難であった。そこで本研究では広く普及しているシリコン太陽電池（Si-PVセル）の熱発電応用に注目し、既存の製造インフラを活かして低コストかつ大面積なTPV発電ユニットの実現性評価を目的とした。

本研究は、環境研究総合推進費における重点課題「⑩地域循環共生圏形成に資する廃棄物処理システムの構築」に強く合致している。小型焼却炉は地域に分散して立地しており、本技術実現によりこれらが分散型エネルギーステーションとして機能することで、地域循環共生圏の形成に貢献する。

また、行政要請研究テーマ「（3-1）廃棄物処理施設由来の熱輸送技術の研究開発」にも対応しており、熱の電力変換という形での高度利用を通じて、既存設備の高度化および未利用熱エネルギーの有効利用を促進するものである。

1. 3. 研究目標

<全体の研究目標>

研究課題名	シリコン太陽電池を用いた中小規模廃棄物焼却炉における熱発電技術
全体目標	シリコンPVセルを用いた熱光起電力発電の試験ユニットを作製し、廃棄物焼却炉温度環境において実際の焼却炉へも展開が可能なユニット構造を用い、少なくとも900℃以上で0.1kW/m ² の発電出力密度が達成可能であることを示す。

<サブテーマ1の研究目標>

サブテーマ1名	シリコンPVセルを用いた熱光起電力発電の廃棄物焼却炉における適用可能性評価
サブテーマ1実施機関	東北大学
サブテーマ1目標	シリコンPVセルを用いた熱光起電力発電の試験ユニットを作製し、廃棄物焼却炉温度環境において実際の焼却炉へも展開が可能なユニット構造を用い、少なくとも900℃以上で0.1kW/m ² の発電出力密度が達成可能であることを示す。

1. 4. 研究内容・研究結果

1. 4. 1. 研究内容

熱利用技術の適用可能性を検証するものである。特に、太陽光発電用の発電素子として広く普及しているSiPVセルを用い、焼却炉の実使用環境においても実用可能な熱発電ユニットの構築を目指した。以下に、本研究における具体的な計画および実施した研究内容を示す。

研究の全体像

現在、日本全国に存在する一般廃棄物焼却施設のうち、処理能力が100トン/日未満の小型焼却炉は全体の約半数を占める。しかし、これらの施設においてはボイラー・タービン型の発電設備の導入が物理的・経済的に困難であり、発電設備を有する割合は数%にとどまる。その主な理由は、配管スペースの制限、小型タービンの低効率、そして補器による温度制御の必要性によるコスト高である。このような背景のもと、中小規模焼却炉からの排熱を活用する新たな熱発電技術が必要とされており、本研究開発ではTPV発電を用いた廃熱利用技術の研究を行った。TPVは熱源からの輻射エネルギーをPVセルによって直接電力化する技術であり、腐食性の高温燃焼ガスと発電素子が非接触である点や、可動部のない全固体構造であることから、メンテナンス性にも優れている（図1参照）。

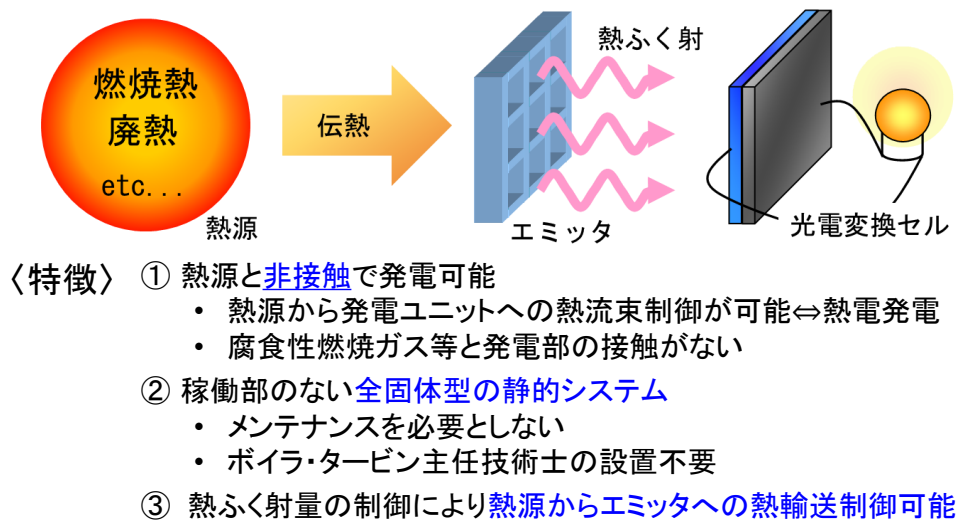


図1 TPV発電の概要図とその特徴

TPV発電は1970年代に軍事用の携帯型バッテリー開発を契機として米国で研究が開始された。その後、発電出力を大幅に向上させるⅢ-V族化合物半導体を用いたナローバンドギャップTPV用セルにおける技術進展や、PVセルの感度波長域に合わせた選択的熱放射を可能とするエミッタ技術の開発等を得て、主に新たな熱発電技術としての学術的な視点から研究開発が行われ、研究が拡大していった（図2参照）。

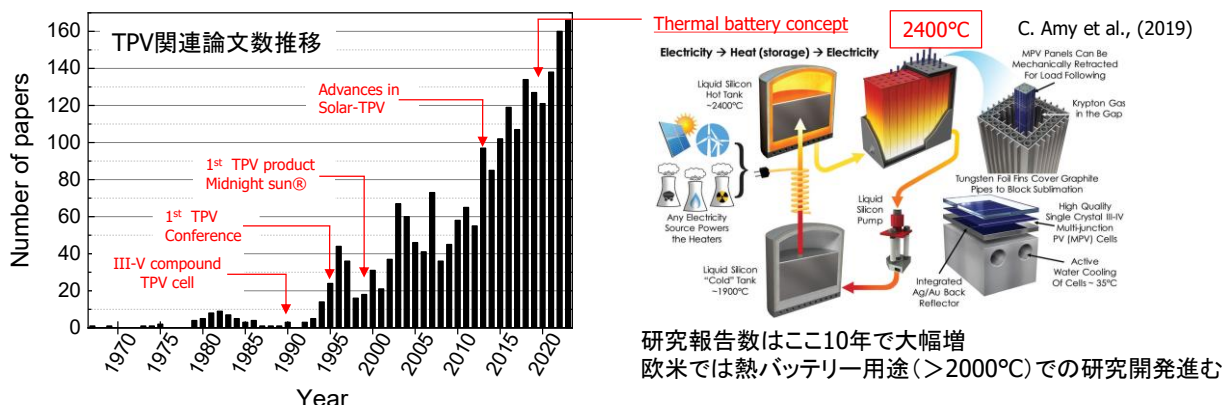


図2 TPV発電の研究数推移と最近注目されている熱バッテリー応用の研究報告例

また、2010年台には主に太陽光を熱源として用いるSolar-TPVの研究開発が進んだ。我々もSolar-TPVシステムの研究開発を行い、ふく射熱輸送の高度な制御等によって研究開始当初は1%未満であった発電効率を～10%まで向上させることに成功している。また、これらの研究で培った技術を基に2018年～2020年度においてⅢ-V族化合物半導体を用いた焼却炉廃熱利用発電システムの開発をプラント企業と共に実施した。2020年頃

からは図2に示す、再生可能エネルギーの蓄電システム（いわゆる“熱バッテリー”）との組み合わせによって高効率なエネルギー貯蔵・供給システム応用が注目され、アメリカのスタートアップ企業等を中心に約2000℃で稼働する超高温蓄熱材からの高効率発電技術として研究が盛んに行われている。

上述したようにTPV発電は現在、実用化へ向けて大きく前進している発電技術である。一方で、中小規模焼却炉など1000℃前後の熱源を対象としたTPV技術には、いまだ越えるべき技術的・実装的ハードルが存在していると考えている。特に以下の点が挙げられる。

- 波長外エネルギーによる熱負荷とセル温度上昇

1000℃の黒体放射に含まれるエネルギーのうち、TPVセルのバンドギャップ外に位置する波長成分が多くを占め、これを吸収したPVセルが高温化することで変換効率の低下や耐久性への懸念が生じる。これに対しては、反射率の高いセル表面構造や冷却系（空冷・水冷）による熱負荷の低減が不可欠である。

- TPVセルの大面积化とセルの熱マネジメント

1000℃前後の熱源からの発電密度は2000℃のものに比べると低く、大きな発電量を得るためにはTPVセル大面积が必要不可欠である。しかしながら、Ⅲ-V族化合物半導体を用いたTPVセルは大面积作製技術が確立されておらず、また現状のセルコストも高い。また発電システムを実現するには必要なTPVセルの冷却性能を知る必要がある。PVセル発電性能の温度依存性は実験的な検証が必要であるが、TPV発電環境における発電性能温度依存性評価はこれまでに為されておらず、セル温度が上昇する実使用環境での発電システム成立性検証が必要である。

そこで本研究では広く普及しているSi太陽電池（Si-PVセル）の熱発電応用に注目し、既存の製造インフラを活かして低コストかつ大面积なTPV発電ユニットの実現性評価を目的とした。

TPV発電にSiセルを適用する場合、従来のTPVで用いられてきたⅢ-V族化合物半導体セル（例：GaSb）に比べて、いくつかの明確な欠点が存在する。特に大きな課題は、Siセルのバンドギャップ（約1.1 eV）がTPV応用としては広いため、発電出力密度が約1/10になってしまう点である。また、熱源からの輻射スペクトルのうち多くのエネルギーがセルの感度波長外に位置しており、発電に寄与しないエネルギーを吸収してセル温度が上昇してしまう点も挙げられる（図3参照）。この温度上昇は、発電素子の効率や耐久性に対する悪影響として懸念される。

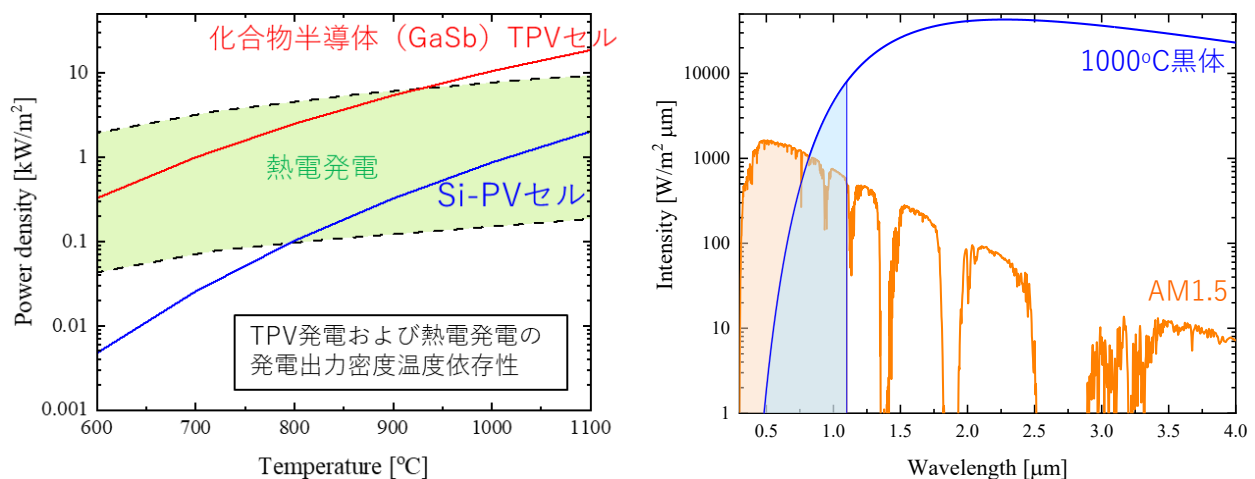


図3 【左】化合物半導体（GaSb）およびSiを用いたTPVセルの発電出力密度温度依存性。緑の領域は既存の熱電発電の発電出力密度。【右】太陽光スペクトル（橙色）と1000℃黒体からの熱放射スペクトル（青色）。領域は単結晶Siセルの感度波長域（～1.1μm）を示す。

しかしながら、既存の熱電発電技術と比較すると1000℃域ではほぼ同等の発電出力密度を示し、感度波長外における熱輻射はPVセルの光学設計によって解決が期待できる。最大のメリットはSiセルにおける実装性・経済性の観点から見た大きな優位性である。Siセルは太陽光発電用途で大量生産されており、その価格は約10万円/kW、もしくは2万円/m²程度である。これは、エピタキシャル成長を必要とするGaSbなどの化合物半導体セルと比較して、1/50以下のコストで発電システムを構築可能であることを意味する。またGaSbセルは大面积化に技術的な制約があるが、Siセルはスケラブルに面積を拡大できる点で、低出力密度を面積で補うという設計が現実的に可能である。実際、理想的なSiセルを用いた発電が可能となった場合、図4に示すように800℃～1000℃の熱源に対しては2～20万円/kWで発電が可能であると試算でき、1kW出力あたり必要な面積も10m²以下と現実的なスケールで発電が可能である。

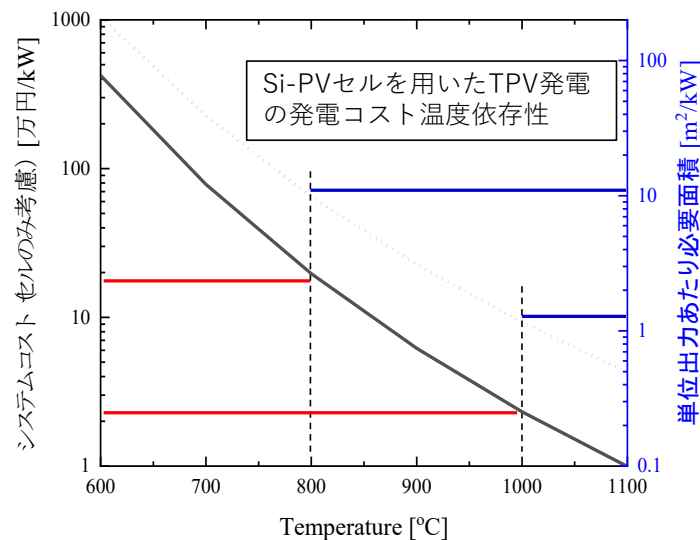


図4 Siセルの発電出力を 0.2kW/m^2 とした時のシステムコスト（黒線）および 1kW 出力あたり必要セル面積（青点線）vs 熱源温度

2018～2020年度に行った実焼却炉を用いたTPV発電システムの研究開発において、中小規模焼却炉の実際の運転温度は、温度が連続的に 930°C 前後に保たれることが多く（図5参照）、これはダイオキシン抑制のための下限（ 850°C ）と、クリンカ生成抑制のための上限（ 1000°C ）の間に位置している。このため、本研究ではこの実運用温度域に最適化されたTPVユニットの設計・評価が求められる。また発電出力としては焼却炉の全面に発電ユニットを設置することは現実的ではないため、ユニット設置可能面積を数十 m^2 程度と仮定し、数 kW 規模を目標とする。これは、焼却炉の送風機や灰処理装置といった補器の所内電力を賄うのに十分であり、省エネルギー化と運用コスト削減の両立を目指す合理的な設定である。これらの条件を鑑み、本研究の目標を以下の通りとした。

研究目標：「少なくとも 900°C 以上で、Si-PVセルの温度上昇を加味した発電密度として 0.1kW/m^2 が可能となる最大熱負荷条件を実験的に明らかにし、発電ユニット設計方針を定める」
この研究目標に対して行った研究開発内容を以下に示す。

2018～2020: NEDO 新エネ技術革新支援

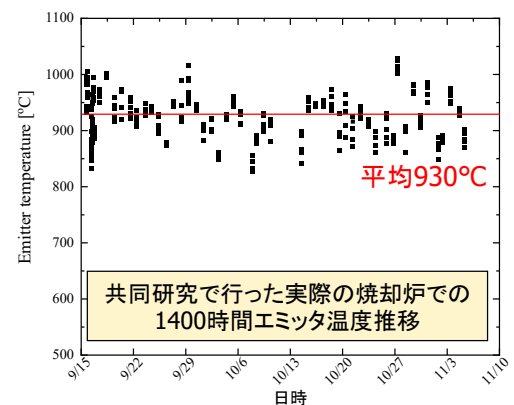
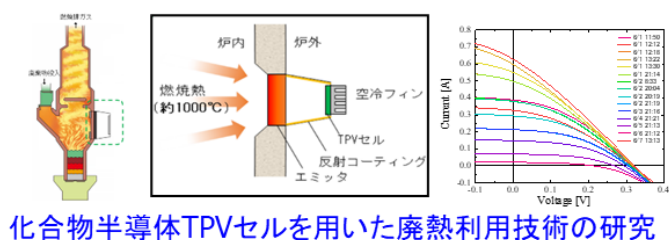


図5 過去に行った化合物半導体TPVセルを用いた焼却炉廃熱利用技術の概要図と研究開発で行った実焼却炉での1400時間エミッタ温度推移

研究開発内容

◆ TPV発電への応用に向けたSi-PVセルの基礎特性評価

(1) 光学特性の測定

本研究においては、TPV発電への応用可能性を検討する上で、Si系光起電力セルの感度外波長域における光学的挙動、とりわけ近赤外から中赤外域（ $1.1\mu\text{m}$ 以上）における分光反射率の特性を明らかにすることが、セルへの熱負荷評価や発電効率評価において不可欠となる。今回の実験にはいわゆる第1世代～第3世代と呼ばれるSi-PVセルを用いた。第1世代～第3世代のセルにおける大きな違いとしては、再結合損失が改善し、開放電圧が向上していることが挙げられる。

これらのセルにおいてまず反射率スペクトルを測定した。反射率測定には可視・近赤外分光光度計（波長

範囲：0.4-2.2 μm 、測定分解能：2 nm）およびFT-IR（波長範囲：1.5-10 μm 、測定分解能：0.5 cm^{-1} ）を用い、いずれの測定系においても積分球を使用することでセル表面からの全反射率（正反射＋拡散反射）を取得した。特に波長1100 nm以上、すなわちバンドギャップ（1.1 eV）以下の長波長域に注目し、この領域での高反射特性が感度外熱輻射のセルへの吸収を抑制することでセル温度上昇を抑え、冷却負荷の低減に寄与することが期待される。

(2) 温度係数の測定

PVセルは照射条件下で発電するとともに、入射エネルギーの一部を熱として吸収し、セル自身の温度上昇を招く。セルの温度上昇による熱励起電子の増加は図6に示すように開放電圧（ V_{oc} ）の低下や曲線因子（ FF ）の低下を通じて、発電出力（ P_{max} ）の低下を引き起こすことが知られている。一般に太陽光入射下でのSiセルの発電出力低下率は約0.5%である。上で述べたようにTPV発電では通常の太陽光発電と比べて入射エネルギー密度が高い。特にバンドギャップの広いSiセルにおいては1000℃の黒体輻射の約99%は感度外波長の熱輻射であり、この吸収による大きなセル温度上昇が実作動環境状態では懸念される。

一方で、セル温度上昇はバンドギャップの低下を生じさせる。これにより低エネルギーのフォトン、すなわち長波長の熱輻射の電力変換が可能となる。このバンドギャップの低下量は小さいため、一般に太陽光発電ではセル温度上昇による短絡電流密度（ J_{sc} ）の増大はあまり意識されてこなかった。一方で1000℃の黒体輻射の大部分は感度波長外にあるため短絡電流密度の増加率は太陽光発電と比べて非常に大きい（図6参照）。例えば約0.1eVバンドギャップが低下した際の短絡電流増加率は太陽光入射環境においては1.1倍に留まるのに対し、1000℃の黒体輻射入射環境では3.1倍になると推定される。このように、従来の温度係数は参考にすることができず、TPV環境における温度係数評価は本研究において必要不可欠であり、評価した温度係数は発電システム設計において重要なものとなる。

本研究ではTPV発電実験装置を用いてエミッタ温度一定条件下でセルの冷却水温度10℃から最大70℃まで段階的に変化させることでセル温度を変化させ、その際のセル発電性能を評価して温度係数を評価した。

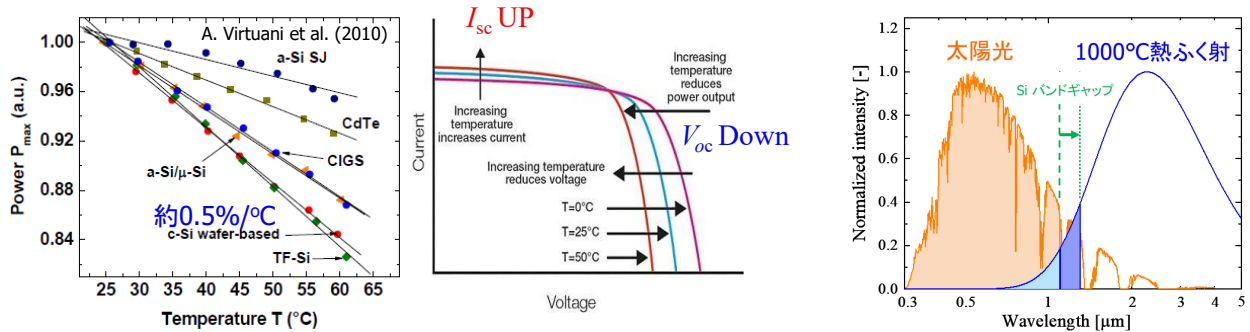


図6 セル温度上昇による発電性能低下およびセル温度上昇に伴う感度波長内熱輻射の増加

◆ Siセルにおける発電出力密度の実験的評価

TPV発電性能の評価を行うため、高出力ソーラーシミュレーターで模擬した集光太陽光によって加熱されるエミッタとPVセルを対向配置した小型のTPV発電装置を構築した（図7参照）。エミッタには熱伝導性と耐熱性に優れたモリブデン基板（直径 $\phi 9$ mm）を用い、その両面に黒体塗料を均一に塗布することで、黒体近似放射源とした。エミッタは、光学系により集光された強度可変の照射光を受けて加熱される構成とし、照射密度の調整によってエミッタ温度は800～1000℃の範囲で制御する。加熱されたエミッタからの熱輻射は、対向配置されたPVセル（典型サイズ：10 mm角）に入射し、発電が行われる。セルおよびエミッタは、真空チャンバー内に設置され、内部は約 3×10^{-2} Paに減圧される。

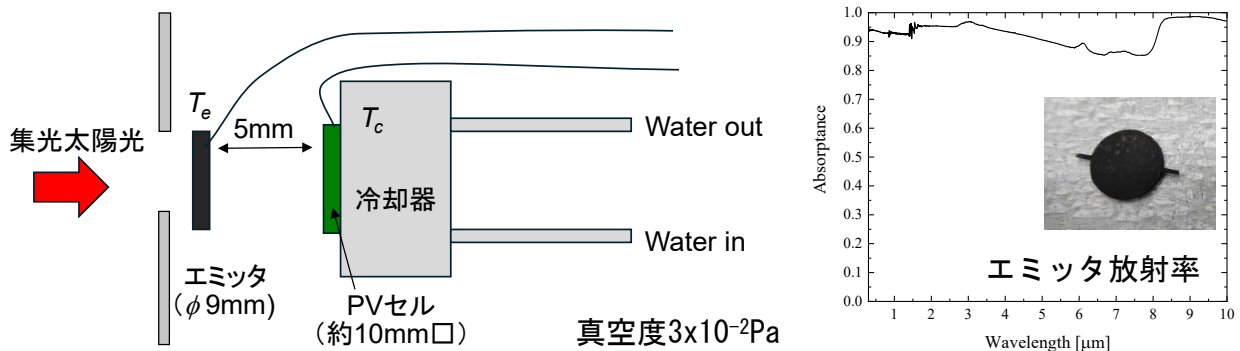


図7 PVセル発電特性の温度依存性評価装置の概要図および使用したエミッタの放射率スペクトル

これにより、対流や気体熱伝導によるエミッタからセルへの熱移動を抑制し、ふく射熱輸送を支配条件とする実験環境を実現した。

発電セルの背面には水冷ヒートシンクを一体化して取り付け、冷却水によるセル温度の安定制御を行った。水温と流量は一定に保持し、定常状態での発電出力と熱負荷の評価が可能な設計とした。熱放射面およびセルの温度測定は、エミッタ側面およびセル裏面に配置したK型熱電対によって行った。この構成により、TPVセルの受熱条件と発電出力を定量的に評価するための安定的な試験環境を整備した。エミッタ温度、セル温度、またエミッターセル間の形態係数といった幾何学的・熱的パラメータを明示的に制御可能であり、各種セルに対する温度依存性や熱負荷応答の系統的な測定が可能となっている。

◆ PVセル発電性能の温度依存性を踏まえたシステム設計

実際の発電システムにおいて必要となる冷却性能を求めるため、セル裏面からの冷却媒体に対する熱伝達係数をパラメータとしてPVセルの平衡温度を計算し、実験的に測定した発電出力の温度係数を用いて実使用環境における発電性能推定を行った。

1. 4. 2. 研究結果及び考察

課題全体の研究結果

本研究では、従来の蒸気タービン方式を用いた廃熱発電の導入が困難とされてきた中小規模の廃棄物焼却炉を対象に、新たな熱エネルギー利用技術としてTPV発電の適用可能性を検証した。特に、既存の太陽光発電システムで広く用いられているSi太陽電池（Si-PVセル）を用いたTPV発電技術に着目し、その低コスト性、供給安定性、大面積化の容易さなどの利点を活かした廃熱電力利用システムの構築を目指した。

廃棄物焼却施設、とりわけ100トン/日未満の処理能力を持つ小型焼却炉では、施設スペースの制約や運転時間の短さ、導入コストの高さといった要因から、ボイラー・タービン型の廃熱発電設備の導入は進んでいないのが現状である。加えて、ボイラー運用には一定以上のスキルと保守体制が必要であり、地域自治体が単独で対応するには限界がある。これに対し、TPVは熱源と発電素子が直接接触しない静的なシステムであり、腐食性ガスや焼却灰の影響を受けにくいという特性を持つ。また、機械的可動部を持たない全固体型の発電機構を持つため、長期間にわたるメンテナンスフリー運転も可能であり、焼却炉の排熱を効率よく回収し電力に変換するための新たな手段となり得る。

従来、TPV発電にはGaSbなどのⅢ-V族化合物半導体セルが用いられてきたが、それらは製造プロセスが複雑であり、成膜や接合に高価なエピタキシャル成長技術が必要とするため、大面積展開や商業化には大きな課題があった。一方、Siセルは既に太陽光発電用途で大規模量産体制が確立されており、圧倒的なコスト優位性を有する。

本研究では、SiセルをTPV環境に適用する際の最適条件を明らかにするため、実験系を構築し、焼却炉での使用を想定したエミッタ温度（800～1000℃）条件下で、実際に各種Siセルを用いた発電試験を実施した。実験ではSiの感度波長域において高放射率を持つエミッタを用い、真空中での照射により対流伝熱の影響がない状態で、セル温度・冷却条件・発電特性を系統的に評価した。

その結果、いずれのSiセルを用いた場合でも実用温度条件である900℃熱源温度に対する出力密度0.1 kW/m²以上が達成可能であることを実証した。また、エミッタ温度に対する発電出力の依存性は良好に一致した。特に注目すべき点として、セル温度に対する出力の変化（温度係数）が太陽光発電時と異なり、TPVではその影響が顕著に小さい、あるいは正になる傾向が見られた。これは、約1000℃の黒体放射スペクトルが1.1μm以上の波長に偏っており、温度上昇に伴うバンドギャップ低下によって長波長側の熱放射吸収が増加し、短絡電流密度が上昇することが要因と考えられる。結果として、セル温度上昇に伴うP_{max}の向上が期待できる。

さらに、セルの赤外反射特性が熱負荷抑制に与える影響も定量的に評価した。反射率が高いセルでは、吸収される不要な熱放射が減少し、セル自体の温度上昇が抑制される傾向が明らかとなった。高いものでは波長1.1μm以上において反射率0.9を超える性能を示し、冷却系の簡略化に寄与する効果が期待された。加えて、本ユニット構成では、エミッタとセルをユニット化し、局所的に焼却炉壁面へ設置することで、全体の構造改修を伴わない段階的導入も可能となる。想定される導入面積（数m²）と出力密度を掛け合わせることで、所内電源として数kW規模の電力供給が実現可能であり、センサやファン、計測機器など焼却炉の補器電源の代替として十分な性能を持つことが示された。

これらの結果より、本研究はSi-PVセルを活用した実用的かつ低コストなTPV発電システムの実現性を示したものであり、今後の社会実装に向けた第一歩となる技術的成果であると考えられる。

以下に本研究開発で達成した具体的な研究結果および考察を示す。

具体的な研究結果および考察

◆ TPV発電への応用に向けたSi-PVセルの基礎特性評価

本研究においてはTPV環境下で使用されるSi-PVセルの適用可能性を明らかにするため、まず基礎的な光学

特性評価を実施した。各種Siセルに対して積分球を用いた可視から中赤外波長域にわたる反射率スペクトルを測定し、熱輻射との波長整合性を検討した。特に、熱輻射の主要成分が分布する波長域（1.1～3 μm ）におけるセルの光学応答は、TPV発電効率に直結するため重要な評価項目である。研究開発の中で反射率が波長1.1 μm 以上において0.9以上と高く、熱負荷抑制において有利な特性を示すセルを実現することができた。これによって1000 $^{\circ}\text{C}$ の黒体輻射に対する全反射率は0.85となり、大きな熱負荷抑制効果が期待されると共に、感度波長外熱輻射を反射し、熱源へ戻すフォトンリサイクリングによって正味熱輻射入力量を低減できるため発電効率向上も期待できる。一般的な太陽光発電用多結晶Siセルは平均反射率約は0.3程度となった。感度波長域での光吸収は優れるものの、感度波長外熱輻射の吸収が過剰となり、セルの温度上昇を助長する傾向が見られた。

本研究の一つの大きな成果として、Siセルの発電特性における温度依存性の詳細な評価が挙げられる。従来、太陽光発電用途においては、セル温度の上昇に伴う熱励起電子の影響によって V_{oc} が低下するため、発電出力の劣化が避けられないとされていた。実際、多くの市販セルでは温度係数が $-0.3\sim-0.5\%/^{\circ}\text{C}$ と報告されており、高温環境における効率低下が重要な課題となっていた。しかし、TPV環境における熱輻射スペクトルは、AM1.5の太陽光スペクトルと異なり、波長1.1 μm 以上の長波長成分が支配的である。これは、黒体温度が1000 $^{\circ}\text{C}$ 近いエミッタから放射されるスペクトルが、赤外領域に集中することに起因している。このような環境下では、温度上昇によりバンドギャップが狭くなることで、セルが感知可能な光子エネルギーの範囲が広がり、 J_{sc} が急激に増加することが予想された。本研究では、様々なSiセルを対象に、エミッタ温度とセル温度を制御しながら、発電特性（ J_{sc} , V_{oc} , FF , P_{max} ）の詳細な測定を行った。エミッタ温度を段階的に変化させ、各エミッタ温度においてセル温度を変化させ測定を行った。想定通り J_{sc} はセル温度の上昇によって増加し、 V_{oc} と FF はセル温度の上昇によって低下した。測定データは線形フィッティングし、25 $^{\circ}\text{C}$ 時の発電特性で規格化した。実験結果から、TPV発電の場合、エミッタ温度が変わると熱輻射スペクトルも変化するため、発電特性の温度依存性も異なることがわかった。

測定した発電出力密度の温度係数は、セル構造、熱輻射スペクトル、冷却条件によっても変動することが分かり、システム設計においては動作温度範囲の明確な定義と、スペクトル制御技術（フィルター、エミッタ材質選定など）との組み合わせが重要であることが示唆された。注目すべきは高品質なSiセルにおいて、いずれのエミッタ温度においても正の温度係数が得られたことである。これはセル温度上昇に伴い、発電出力が増大することを意味し、既存の概念を打破する結果となっている。今後、より高精度な外部量子効率の温度依存性を通じて、温度特性の理論モデル構築を行う。

◆ Siセルにおける発電出力密度の実験的評価

本研究においては、Si-PVセルを用いたTPV発電ユニットの構築と実験検証を行い、900 $^{\circ}\text{C}$ 以上の熱源において、0.1 kW/ m^2 以上の発電出力密度を達成した。焼却炉温度の上限である1000 $^{\circ}\text{C}$ で見ると最大で0.35kW/ m^2 と目標の3倍超の性能を達成することができた。

この結果をもとに、この発電システムのコスト試算を行った。発電出力密度は約0.35kW/ m^2 と考えると約3 m^2 で1kWの発電システムとなる。Siセルのコストを2万円/ m^2 とするとセルコストは6万円であり、配線等含めても10万円程度と予想される。エミッタのコストを約50万円、またセルを組み込むための冷却系を備えた発電ユニットのコストを50万円とするとシステムコストは110万円/kWである。一方で、化合物半導体を用いた場合にはセルを大面積作製できたとして、コストはSiセルの150～200倍である。発電出力密度が高いため、セル面積は低減できるがそれを踏まえて計算してもセルだけで150～200万円となり、化合物半導体を用いた場合のシステムコストは250～300万円/kWと試算されることから、Siセルを用いたTPV発電システムがいかにコスト的優位性を持っているかがこの試算からも明らかである。

◆ PVセル発電性能の温度依存性を踏まえたシステム設計

TPV発電ユニットの構築に際し、セル発電性能の温度依存性を踏まえた冷却システム設計を重点的に検討した。TPV発電においては、発電素子が高温熱源に曝されるため、セルの熱負荷をいかに制御し、効率的な冷却を施すかが、システム全体の性能と信頼性を左右する重要な設計要素となる。特にSiセルは、感度波長外の長波長熱輻射を多く吸収するため、セル温度が上昇しやすく、発電特性に影響を与える。したがって、セルが受け取る熱輻射のうち反射するエネルギーと、エミッタからの全熱輻射との差である実効吸収熱量を評価し、それに基づいた冷却設計の必要性を定量的に明らかにした。図からわかるように各種Siセルにおける反射率の違いがセルに到達する熱負荷量に大きく影響し、それに応じて必要とされる冷却性能が変化することが明確に示された。特に感度外波長における反射率が高く、セルに入射する熱輻射の多くを反射することができる開発Siセルは必要な冷却能力が他のセルに比べて顕著に小さかった。

次に得られた温度係数と計算したセル温度を用いた発電出力密度のセル温度依存性を解析した。測定したセル温度域では発電出力密度の温度係数が正となるため、冷却性能が低い程、発電出力密度が向上するという結果となる。これはすなわち冷却設計において必ずしも最大限の除熱を追求せずとも、むしろ適度なセル

温度上昇を許容することで出力密度が向上するという新たな設計戦略が可能であることを示している。冷却性能と発電効率が単純なトレードオフ関係にないことは、冷却系のコスト・スペースの縮減という実装上の利点とも合致する。配線等への影響もあるため、セル温度100℃以上で発電することは難しいと考えられるが、反射率の高いセルを選定することで、熱負荷が低減し実用化の観点から非常に大きな成果が得られたと言える。(成果1)

これらの結果は、従来の太陽光用設計手法とは異なる、TPV特有の温度スペクトル環境に最適化されたセル選定と冷却方針の重要性を示しており、今後の実焼却炉への実装に向けて、単なる発電素子の選定にとどまらず、システム全体としての熱設計、ユニット配置、冷却方法、コスト最適化の指針として有効な知見を提供するものである。TPV発電の実用化を加速するうえで、この温度依存性評価を基軸としたシステム設計は、特に中小規模廃棄物焼却炉における余熱利用の新たなスタンダードになりうる可能性を秘めている。

1. 5. 研究成果及び自己評価

1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

本研究では、熱光起電力 (TPV) 発電技術におけるSi太陽電池 (Si-PVセル) の応用可能性を検証した。これまでTPV発電には、波長変換効率を重視してバンドギャップの狭いIII-V族化合物半導体セルが主に用いられてきたが、高コストかつ大面積展開の困難さが実用化の大きな障壁となっていた。一方、Siセルは太陽光発電で広く実用化されているものの、熱輻射源においては感度波長外のエネルギー吸収による過熱と効率低下が課題とされ、TPV用途には不適とされてきた。本研究ではこの通念を打破し、SiセルのTPV応用可能性を示した。

まず、1.1 μm を超える感度波長外の光を高反射率 (0.9以上) で反射できることを明らかにした。この光学的工夫は、セルへの熱負荷を大幅に抑制するだけでなく、感度波長外でのエネルギー損失の最小化という観点から光熱変換効率の向上にも寄与するものである。これにより、99%が感度波長外となるTPV発電環境下でもSiセルを応用できる可能性を示したことは、学術的にも独創的な成果であり、従来のIII-V族化合物半導体セルを用いた発電デバイス設計思想に新たな一石を投じるものである。

また、実際の熱源環境 (900℃超) において、0.1 kW/m^2 以上の発電出力密度を安定的に得られることを実証した点は、廃棄物焼却炉など中小規模熱源への現実的な導入可能性を示すものであり、分散型熱利用の新たな道を開く成果である。ここでも、従来の高コストな熱発電技術に比して桁違いの経済性と量産性を持つSiセルを適用するという先導的視点が貫かれており、技術普及と社会実装の両面において高い波及効果が期待される成果を得ることができた。

さらに、本研究における最も特筆すべき成果は、SiセルがTPV環境下において従来とは全く異なる発電特性の温度依存性を示すことを実証した点である。通常、太陽光発電ではセル温度の上昇により電流は微増するものの、開放電圧の急激な低下により全体の発電効率が低下することが知られている。しかし本研究では、熱輻射のスペクトル特性に起因して短絡電流密度 (J_{sc}) の増加率が顕著に高く、特に高品質なセルでは開放電圧 (V_{oc}) の低下率が小さいことから、温度上昇に伴って発電性能がむしろ向上する「正の温度係数」動作が実験的に確認された。これは、熱源スペクトルとセル構造の相互作用に起因する新しい知見であり、熱輻射発電において新たな物理的設計指針を提供するものである。こうした知見は、SiセルのTPV応用性を拡張するのみならず、他の光電変換技術にも波及する可能性を秘めており、学術的にも極めて発展性の高い成果である。

したがって、本研究はこれまで実用化が進んでこなかったTPV発電技術に対して、低コスト・高実現性という現実的な解決策を提示した点で、政策的にも社会的にも大きな価値を持ち、未利用熱資源の電力化を通じてエネルギー循環社会の構築に貢献することが期待される。

<環境政策等へ既に貢献した研究成果>

特に記載する事項はない。

<環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果>

本研究で実証したSi太陽電池を用いた熱光起電力 (TPV) 発電技術は、これまで有効活用が進んでこなかった中・小規模焼却炉の廃熱利用に新たな選択肢を提供するものであり、環境政策において極めて高い実装性と波及効果が期待される。特に、現状では発電設備を有する焼却炉は全体の3~4%にとどまり、未利用のまま排出されている中温度帯 (800~1000℃) の熱エネルギーが多数存在している。本研究で開発されたTPV発電ユニットは、焼却炉壁面等の限られた面積でも設置可能であり、数kW規模の所内電力供給が可能であることから、補助設備の電源としての活用に加え、非常用・独立系電源としての展開も見込まれる。

例えば、国内に存在する中小規模の焼却炉 (処理能力100トン/日未満) は約550施設あり、仮に5kW規模のTPVユニットが導入された場合、総計2.8MW、年間発電量にして約2.4GWh (稼働率60%として試算) に相当するエ

エネルギー創出が可能となる。これは、地域内での熱エネルギーの有効活用のみならず、焼却炉を地域の「電源ステーション」として再定義する役割を果たしうるものであり、分散型電源ネットワークの構築によるレジリエントなエネルギー社会への移行に大きく貢献すると共に、電源の低炭素化にも貢献する。

また、現在の対象は一般廃棄物焼却炉であるが、産業廃棄物焼却炉への応用展開も視野に入れている。これらの施設では高温かつ連続運転が可能であり、さらに大きな熱回収ポテンシャルを有している。

さらに本研究は、TPV用途に特化した新たなSiセル応用の道を切り拓いた点でも意義が大きい。既存の太陽光発電市場では、国内PVセル製造産業はグローバル競争に押され衰退傾向にあるが、TPVという新たな応用分野の確立により、内製化可能なSiセルの再需要を創出できる可能性がある。特に、本研究で示されたTPV発電用のSiセルは国内製造技術の活用余地が大きく、再び製造産業の国内回帰・再編を促す契機となりうる。このような視点から、エネルギー安全保障および産業振興の両面で政策への貢献が期待できる。

1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価

<全体達成状況の自己評価> 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

<サブテーマ1 達成状況の自己評価> 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

1. 6. 研究成果発表状況の概要

1. 6. 1. 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0
査読付き論文	0
査読無し論文	0
著書	0
「国民との科学・技術対話」の実施	0
口頭発表・ポスター発表	1
マスコミ等への公表・報道等	0
成果による受賞	0
その他の成果発表	0

1. 6. 2. 主要な研究成果発表

成果 番号	主要な研究成果発表 (「研究成果発表の一覧」から10件まで抜粋)
1	H. Wang, M. Shimizu, H. Yugami, Optimizing Optical Cavities for Thermophotovoltaic Systems: Consider Photon-recycling and Thermal Behavior of TPV Cells, TPV-15, 2024.

注：この欄の成果番号は「研究成果発表の一覧」と共通です。

1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動

特に記載する事項はない。

1. 7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究の概要>

国際共同研究を実施していない。

<相手機関・国・地域名>

機関名（正式名称）	（本部所在地等の）国・地域名

注：国・地域名は公的な表記に準じます。

1. 8. 研究者略歴

<研究者（研究代表者及びサブテーマリーダー）略歴>

研究者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
清水 信	研究代表者及びサブテーマ1リーダー 東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了 博士（工学） 東北大学助教を経て、現在、東北大学准教授 専門は熱工学、研究テーマは熱輻射に基づく熱制御およびエネルギー変換 詳細は https://researchmap.jp/7000005536

2. 研究成果発表の一覧

注：この項目の成果番号は通し番号です。

(1) 産業財産権

成果番号	出願年月日	発明者	出願者	名称	出願以降の番号
	特に記載する事項はない。				

(2) 論文

<論文>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
		特に記載する事項はない。		

(3) 著書

<著書>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
		特に記載する事項はない。	

(4) 口頭発表・ポスター発表

<口頭発表・ポスター発表>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
1	2025	TPVの国際会議であるTPV-15（スペイン）にて口頭発表を行った。 H. Wang, M. Shimizu, H. Yugami, Optimizing Optical Cavities for Thermophotovoltaic Systems: Consider Photon-recycling and Thermal Behavior of TPV Cells, TPV-15, 2024.	1	無

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
		特に記載する事項はない。	

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
		特に記載する事項はない。	

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
		特に記載する事項はない。	

(8) その他の成果発表

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
		特に記載する事項はない。	

権利表示・義務記載

特に記載する事項はない。

この研究成果報告書の文責は、研究課題に代表者又は分担者として参画した研究者にあります。
この研究成果報告書の著作権は、引用部分及び独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）のロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。
ERCAは、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

Abstract**[Project Information]**

Project Title : Power generation from exhaust heat in medium/small-scale waste incinerator using silicon photovoltaic cells

Project Number : JPMEERF20243RA2

Project Period (FY) : 2024-2024

Principal Investigator : Shimizu Makoto

(PI ORCID) : ORCID0000-0002-6094-8827

Principal Institution : Tohoku University
Sendai City, Miyagi, JAPAN
Tel: +81227956925
E-mail: makoto.shimizu.a3@tohoku.ac.jp

Cooperated by :

Keywords : Thermophotovoltaic, Thermal radiation, Waste incinerator, Photovoltaic cell, Waste heat recovery

[Abstract]

This study proposes and evaluates a novel thermophotovoltaic (TPV) power generation system that utilizes silicon photovoltaic (Si-PV) cells to convert exhaust heat from medium- to small-scale waste incinerators into electricity. Unlike conventional waste-to-energy systems that rely on steam turbines—often unsuitable for compact incinerators due to cost and space limitations—the TPV approach offers a solid-state, maintenance-free solution capable of non-contact heat-to-electricity conversion, making it well-suited to facilities operating at approximately 900–1000 °C.

The core innovation lies in the experimental application of widely available Si-PV cells to TPV systems, overcoming the traditional reliance on expensive III-V compound semiconductor TPV cells. Although Si-PV cells possess a wider bandgap and consequently lower output power density and conversion efficiency at infrared wavelengths, their low cost, scalability, and thermal robustness render them promising candidates for this application.

A series of experimental investigations were conducted to evaluate the optical and thermal performance of several Si-PV cell types under controlled TPV conditions. High infrared reflectivity and reduced thermal loading were achieved with peak power densities exceeding 0.35 kW/m² at 1000 °C. Notably, the temperature coefficient of power output was found to be positive in some types of Si-PV cells, particularly under TPV-specific radiation spectra. This is attributed to bandgap narrowing at elevated cell temperatures, which enhances the absorption of longer-wavelength photons and increases short-circuit current density. As a result, the adverse impact of temperature rise -typically seen in solar applications- was counteracted or even reversed in the TPV context.

This research demonstrates the technical viability of Si-based TPV systems as a cost-effective and

practical solution for waste heat recovery in distributed incineration infrastructure. It lays the groundwork for further development and implementation of localized energy networks contributing to Japan's circular economy and carbon neutrality goals.

This study was supported by the Environment Research and Technology Development Fund of the ERCA (JPMEERF20243RA2) funded by the Ministry of the Environment.