別紙2

平成 30 年度防衛装備庁 安全保障技術研究推進制度

## 成果報告書

「軽量かつ環境低負荷な熱電材料によるフェイルセーフ熱電池の開発」

# 令和元年5月

## 東京理科大学

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、学校法人東京理科大学が実施した平成30年度「軽量かつ環境低負荷な熱電材料によるフェイルセーフ熱電池の開発」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

1.0. 委託業務の目的

本研究課題は、熱電発電型「熱電池」及び熱電池特性に整合したDC-DC電力変換器の開発を目的とし、 将来的な応用技術範囲としてエンジン搭載車両への熱電池導入による燃費向上ならびにCO<sub>2</sub>排出削減、 及び動力用電池電源搭載車両における電源制御の簡易化ならびに安定動作化に資する取組みである。 この実現に向けて3年間の委託業務において、「フェイルセーフ熱電池モジュール構造実用化への基礎要 素技術開発」と「熱電池専用DC-DC電力変換器実用化への基礎要素技術開発」の2項目について研究開 発を実施する。各項目の具体的な内容は以下の通りである。

A.フェイルセーフ熱電池モジュール構造実用化への基礎要素技術

本項目における目標は以下の通りである。

- 目標1:熱電池モジュール基礎発電性能の向上
  - ・動作温度(600℃)大気中での発電素子耐久性 3,000 時間以上
  - ・高温側 600℃/低温側 100℃の温度差環境で発電電力密度 0.7 W/cm<sup>2</sup>
     (参考:発電電力密度 0.7 W/cm<sup>2</sup>は 2020 年欧州自動車要求値)
- <u>目標 2:高温側 600℃/低温側 100℃の温度差環境での耐振動性確保に向けた熱電池モジュールの</u> <u>開発</u>
  - ・耐振動を有するユニレグ基本構造モジュールの試作及び加振環境(サイン波 33 Hz、最大加速度 5 G)での発電動作検証
    - (加振環境条件は、自動車部品向けの JIS 耐振動要求値に基づく)
  - ・上記加振環境においてモジュール発電耐久 100 時間以上
  - ・耐振動性を有するモジュール構造及び関連周辺技術に関する知財申請
- なお、平成 29 年度より、上記目標 2 の内容について、加振環境(サイン波 33 及び 67 Hz、最大加速 度 5 及び 10 G)での発電動作検証を実施することとなった。

これらの目標を実現するために、以下の取り組みを行う。

- ① 環境低負荷型 Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電材料の熱的高耐久化
  - 申請者らによるこれまでの取り組みで、Mg<sub>2</sub>Si 材料本体については、大気中 600℃において 3,000 時間以上でも発電素子抵抗値の安定性が確認されている。本委託業務では熱電池へ導入する際に必要となるモジュール構造での耐久性を確保する。
- ② 発電用に最適化した高耐久新型ユニレグ構造モジュールの開発 本委託業務では、Mg<sub>2</sub>Si 熱電材料は高い基本熱電発電能力、熱電材料中最軽量、環境低負荷という特色を有する。このため、熱電発電モジュール構造として n 形半導体である Mg<sub>2</sub>Si のみで構成可能な
- ユニレグ型を採用する。
   ③ 発電環境下振動試験機により実環境に近い状態での発電特性評価
   一般的に自動車部品として要求されるレベルの加振環境(JIS に示される自動車部品向け耐振動環境:サイン波 加速度 5G、33 Hz)の重畳による発電モジュールの耐久性を確保する取り組みを行う。
- B. 熱電池専用 DC-DC 電力変換器(コンバータ)実用化への基礎要素技術 本項目における目標は以下の通りである。
  - 目標 1:熱電発電モジュールに特化したコンデンサ・パイルアップ型 DC-DC コンバータで変換効率 80% 以上および実装面積 1/2 倍達成

・熱電発電モジュールに特化したコンデンサ・パイルアップ型 DC-DC コンバータで変換効率 80%以 上達成(参考:熱発電ユニットの出力は 0.4~0.8V。 0.5~1Vの入力電圧で既存の DC-DC コンバー タの変換効率は 30%程度)、実装面積 1/2 倍(付録参考資料として、図 A-1 に従前実装回路を示す。 本回路は、電源と DC-DC コンバータのインターフェース回路である磁気結合トランスを含み、2個 の電源を接続可能な回路構成で、約 100cm<sup>2</sup> (DC-DC コンバータ主回路(70mm×70mm)+制御回 路(70mm×70mm))で回路実装した。従前実装回路を基準に、同等の機能を有する(2個の電源を 接続可能な)昇圧型 DC-DC コンバータを実装面積 1/2 倍(50cm<sup>2</sup>)で回路実装する)

目標 2:熱電発電モジュールに特化した DC-DC コンバータのインターフェース回路製作
 ・Si-MOSFET 及び GaN トランジスタを用いたコンデンサ・パイルアップ回路の開発
 ・コンデンサ・パイルアップ回路の知財申請(回路構成とハイサイド・ローサイド MOSFET トランジスタ
 駆動回路の設計)

これらの目標を実現するために、以下の取り組みを行う。

- ④ スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータの開発 熱電発電モジュールからの電力を蓄え、パワートランジスタスイッチング方式により昇圧と電力パイル アップを同時に行う方式の回路の動作検証を行い、コンデンサ方式パイルアップ型 DC-DC コンバータ の基礎動作を実現する。
- ⑤ コンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発

排熱熱発電システムで使用する DC-DC コンバータは、通常システム動作環境が高温下におかれる ことから耐久性が問題になる。高耐久化かつ低損失な GaN パワーデバイスを用いた熱電発電モジュー ル特性に合わせた電力パイルアップ型 DC-DC コンバータを開発する。

「フェイルセーフ熱電池モジュール構造実用化への基礎要素技術開発」は東京理科大学が担当する。また「熱電池専用 DC-DC 電力変換器実用化への基礎要素技術開発」については岡山理科大学(再委託) が担当する。

### 1.1. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

本研究開発目標にかかる成果について以下にまとめる。

はじめに、実用化に向けたMg2Si熱発電素材の高温度動作環境における耐久性向上と、動作時の熱電発電特性の両立確保を目指した、研究開発目標1についてまとめる。

A.フェイルセーフ熱電池モジュール構造実用化への基礎要素技術

本研究開発項目では、

目標1:熱電池モジュール基礎発電性能の向上

・動作温度(600℃)大気中での発電素子耐久性 3,000 時間以上

・高温側 600℃/低温側 100℃の温度差環境で発電電力密度 0.7 W/cm<sup>2</sup>

を実現するために「①.環境低負荷型 Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電材料の熱的高耐久化」および「②.発電用に最適化 した高耐久新型ユニレグ構造モジュールの開発」を設定し研究開発の目標達成への取組みを行った。

Mg<sub>2</sub>Si は熱電性能としては基本的に高い特性を有するが、想定動作温度領域(~600℃)での酸化劣化に 実用化への壁があった。実用化に向けては、動作温度領域での耐酸化特性と十分な熱発電特性の確保の 両立が求められる。この 2 点を同時に実現するためには、Mg<sub>2</sub>Si 母素材の基礎品質向上が重要であること から、本研究開発ではまずそれらについて取組みを実施した。

Mg<sub>2</sub>Si における酸化劣化の要因としては、Mg<sub>2</sub>Si 原料合成時に僅かに残留する金属 Mg と合成原料を粉 末化して焼結による発電素子作製の際に内包されるボイド(空隙)がある。本取組みでは、熱発電特性を向 上・最適化する不純物添加により原料合成条件が異なる制御性の難しさに対策を施し残留金属 Mg を排除 し、焼結工程においても発電素子の緻密度を向上させるプロセスを導入実施し、Mg<sub>2</sub>Si 粉末を焼結する製 法による発電素子単体において大気中 600℃の耐久試験で 1,000 時間を越える特性を実現した。その後、 開発した同プロセスを微調整し、さらに熱電特性向上の目的で添加導入している不純物の Mg2Si 内での振 る舞いを詳細に分析・解析して不純物種と添加量の最適化を実施することで、通常は Mg<sub>2</sub>Si の熱電特性と して実用化に向けて参照される無次元性能指数(ZT 値) が 0.9~1.0 程度であるところ、最終的にはその値 を凌駕する ZT=1.10 を得ることができ、母素材 Mg<sub>2</sub>Si の高温耐久性と高熱電特性の両立を実現することが できた。 Mg<sub>2</sub>Siを熱電池モジュールとして実用化するためには第1ステップとして産業界が要求する発電素子耐久 性目安 5,000 時間以上が示されていることから、本取組みにおいても Mg<sub>2</sub>Si 熱発電素子のさらなる耐久性 向上を推進した。Mg<sub>2</sub>Si 素材の詳細な酸化劣化メカニズムを分析・解析検討した結果、残留金属 Mg が排除 された Mg<sub>2</sub>Si 素材表面は、MgO で覆われており、過度の酸化雰囲気の場合には Mg<sub>2</sub>Si 素材内部に酸化反 応が進行することが明らかとなった。この現象に対処するために、Mg<sub>2</sub>Si 表面を酸素に触れさせない表面保 護膜として Mg<sub>2</sub>Si 素材に合う酸化膜系の保護膜を塗布し、動作温度域で保護膜の亀裂、剥離等がなく熱安 定性を確保できていること、および保護膜 Mg<sub>2</sub>Si 界面で構成元素の拡散がないこと、金属電極とMg<sub>2</sub>Si 素材 間の摂食電気抵抗値が十分に低いこと、などを確認し、最終的には大気中 600℃の耐久試験で 5,000 時間 を越える耐久性を確保することができた。熱電発電モジュール化に必要な発電素子に金属電極を付した場 合では、金属電極と Mg<sub>2</sub>Si 素材の界面で一部発電素子作製プロセス条件において金属電極の剥離が見ら れたものの、大気中 600℃の耐久試験で 3,000 時間に到達することができ、今後の開発に移行・展開できる 成果を得られたと考えている。

次に、移動体への熱電池モジュール適用を目指した、研究開発目標2についてまとめる。

目標 2: 高温側 600℃/低温側 100℃の温度差環境での耐振動性確保に向けた熱電池モジュールの開発

・耐振動を有するユニレグ基本構造モジュールの試作及び JIS 加振環境での発電動作検証

・上記加振環境においてモジュール発電耐久 100 時間以上

・耐振動性を有するモジュール構造及び関連周辺技術に関する知財申請

を実現するために「②.発電用に最適化した高耐久新型ユニレグ構造モジュールの開発」および「③.発電 環境下振動試験機により実環境に近い状態で発電特性評価」を設定し研究開発の目標達成への取組み を行った。

従来型エンジン車・発電用エンジン搭載電気自動車等への排気熱発電システムの車載化を考える場合、 熱電発電モジュールに要求される主な項目は「耐久性(高振動環境・高温環境)」「省スペース・軽量性」であ る。これまで、欧州米国で先行実施されてきた車載型エンジン排気系熱発電システム実証試験においては、 熱電発電モジュールの破損が多く報告されてきた。これは主として、熱電発電モジュールが車載環境用に調 整されず汎用型熱電発電モジュールを使用していることに起因しており、今後の自動車排気熱発電システム の構築に向けては素材および熱電発電モジュールの機械的特性向上や高温かつ高振動環境への対応が 不可欠であると考え、本研究開発を実施した。

熱発電材料としての Mg<sub>2</sub>Si 素材は、その他の代表的熱発電素材と比べて密度がおよそ4分の1~3分の1 程度と非常に軽量な特性を有する。一方、これまで多くの熱発電素材(Bi-Te 系、Pb-Te 系、Co-Sb 系など) が実用化される際に用いられるπ型モジュール構造(p 形電気伝導を示す熱発電材料と、n 形電気伝導を示 す熱発電材料をπ型のブリッジ形状で熱電発電モジュールを構成するもの)の構成が製作容易であるのに対 し、Mg<sub>2</sub>Si 素材では n 形電気伝導素材では実用上十分な熱発電特性を示すものの、p 形素材では低い値の ため、π型熱電発電モジュール構成で高発電特性を担保することが一般には難しい状況である。p 形 Mg<sub>2</sub>Si 素材の熱発電特性向上には各所で鋭意取り組まれているが、現状では実現に有効な解が見出されていな い。

本取組みでは、p 形電気伝導素材もしくは n 形電気伝導素材の熱発電性能が他方よりも著しく優れている 場合に検討される、ユニレグ型モジュール構造(p 形もしくは n 形単独で熱電発電モジュールを構成)による Mg2Si 熱電発電モジュール開発を行った。Mg2Si では、n 形電気伝導素材が高い熱発電特性を示すことから、 「n-Mg2Si ユニレグ型モジュール」開発を主目的として設定し、開発の成果目標としては、実用化の観点から、 十分な発電出力密度および耐久性(高振動環境・高温環境)を考慮して設定した。具体的には、欧州自動車 メーカーが車載型エンジン排気系熱発電システムとして示している 2020 年時点での発電電力出力密度値 (0.7 W/cm<sup>2</sup>)、および高振動環境・高温環境での耐久性として自動車部品振動試験に適用される JIS D1601-1995 振動試験下での発電耐久試験(サイン波 33~67 Hz、最大加速度 5~10G)を設定した。発電 耐久試験条件は JIS に規定がないことから、Mg2Si 利用を想定したエンジン排気系温度 500℃~600℃として、 振動試験機に搭載可能な発電試験機器を独自に製作した。

n-Mg<sub>2</sub>Si ユニレグ型熱電発電モジュールでは、π型熱電発電モジュールが「n 形+p 形」の素材をペアとして 用いるところ、「n 形+金属配線」の組合せとなり、金属配線部分を貫通する熱源からの熱流が一般には熱損 失として大きくなることから、熱流損失を抑制した十分な発電特性を確保することは難しいとされてきた。本取 組みにおいては、まず、ユニレグ型熱電発電モジュール構造での伝熱・熱発電特性を詳細に解析する有限 要素シミュレーション環境を構築し、製作したユニレグ型モジュールでの精密伝熱・熱発電計測値と比較しモ デル修正を実施して、発電モジュールの計算値と実測値の整合性を 95%以上に高める取組みを実施した。 シミュレーションによりあぶり出されたユニレグ型モジュールにおける熱流損失の抑制パラメータに対して 個々対策を実施し、繰り返し試作改良を実施した。また、モジュール構成部品としては、耐振動性の改善に 向けて、従前のアルミナ(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)基板材料から高耐久・高熱伝導特性を持つ窒化アルミニウム(AIN)の変更、 および配線電極材をNiから高耐久化処理を施したNiメッキCu配線に置換導入した。こうした取組みの最終 的な結果として、試作したn-Mg<sub>2</sub>Siユニレグ型熱電発電モジュールのインライン型6本基本構造ユニットにお いて、目標値の発電電力出力密度値 0.7 W/cm<sup>2</sup> にようやく到達することができた。

n-Mg<sub>2</sub>Si ユニレグ型熱電発電モジュールの高振動環境・高温環境耐久試験は、三重県工業研究所様との 共同実施となり実車載環境に近い発電環境下振動試験機により 6 本基本構造ユニットを有する熱電発電モ ジュールの発電特性評価を実施した。振動・高温度環境については、サイン波 33 Hz(1,000 rpm 相当)、67 Hz (2,000 rpm 相当)、最大加速度 5G、10G、発電温度 500℃、600℃の組み合わせで実施した。最終的には、 熱電発電モジュールに対して最も過酷な振動パラメータの組み合わせとなる、サイン波 33 Hz、最大加速度 10G、発電温度 600℃において 100 時間の耐振動性を得ることができた。

熱電発電モジュールの車載化について実用化のポイントであると自動車メーカー側から要望されてきた「高 温高振動環境における耐久性」に関してはこれまで世界的にも知見の積み上げがなく、測定・評価装置面に おいても難しい取組みであったが、今回の実践事例をもとに対外的な技術共有・連携の基礎ができたと考え られる。

B. 熱電池専用DC-DC電力変換器(コンバータ)実用化への基礎要素技術 本研究開発項目では、

目標 1:熱電発電モジュールに特化したコンデンサ・パイルアップ型 DC-DC コンバータの開発

・熱電発電モジュールに特化したコンデンサ・パイルアップ型 DC-DC コンバータで変換効率 80%以上達成(参考:熱発電ユニットの出力は0.4~0.8V、0.5~1Vの入力電圧で既存のDC-DCコンバータの変換効率は30%程度)、実装面積1/2倍(付録参考資料として、図A-1に従前実装回路を示す。本回路は、電源と DC-DC コンバータのインターフェース回路である磁気結合トランスを含み、2個の電源を接続可能な回路構成で、約 100cm<sup>2</sup>(DC-DC コンバータ主回路(70mm×70mm)+制御回路(70mm×70mm))で回路実装した。従前実装回路を基準に、同等の機能を有する(2個の電源を接続可能な)昇圧型 DC-DC コンバータを実装面積1/2倍(50cm<sup>2</sup>)で回路実装する)

目標 2:熱電発電モジュールに特化した DC-DC コンバータのインターフェース回路製作

・Si-MOSFET 及び GaN トランジスタを用いたコンデンサ・パイルアップ回路の開発

・コンデンサ・パイルアップ回路の知財申請(回路構成とハイサイド・ローサイド MOSFET トランジスタ 駆動回路の設計)

を実現するために「④. スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータの開発」および「⑤. コンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発」を設定し研究開発の目標達成への取組みを 行った。なお、平成 28 年度の研究取り組みの事前準備として実施した GaN スイッチングデバイスのドライバ回 路設計が順調に推移し、平成 28 年度に作成する回路の動作に使用可能な GaN デバイス回路構築に至った ため、Si トレンチ MOSFET による回路設計を飛ばして、平成 29 年度から取り組む GaN スイッチングデバイス による回路構築を平成 28 年度より前倒しにて実施した。

熱電発電モジュールの出力電圧を昇圧する機能を有する DC-DC コンバータには、高い電力変換効率と、 一部の熱電発電モジュールが故障しても発電機能が維持可能なフェイルセーフ性が必要である。これらを満 たす新規な熱電発電モジュール集電方式として「コンデンサスイッチング方式電力パイルアップ型 DC-DCコ ンバータ」の実現に取り組む。具体的な開発内容として、第一段階で「スイッチング方式による電力パイルア ップ型 DC-DC コンバータ」の動作検証を行い、第二段階として「コンデンサによる発電電力集電を加えたス イッチング方式電力パイルアップ型 DC-DC コンバータ」に取り組む。

熱電発電モジュールが発電した電力を昇圧電力変換する DC-DC コンバータについては、これまで独立型 無線通信システムなどへ数ミリから数十ミリワット程度の電力を供給する用途で開発された微小電力向けのも のがあるが、本課題にあるような発電電力密度 0.7 W/cm<sup>2</sup>の性能を有する熱電発電モジュールへそのまま接 続して使用することはできない仕様である。また、熱電発電素子の出力特性は、「低電圧(数百 mV から数ボ ルト)」で「大電流(数百ミリ A~数 A)」となる特性を有しているため、既存の太陽電池用や燃料電池用、あるい は汎用デバイスからなる通常の DC-DC コンバータでは熱電発電電力を最良の状態で取り出すことができない現状がある。本課題に取り組むにあたり、国内外の会議や熱電発電モジュール製造メーカにおいて事前調査を行なったところ、出力電力が数百ミリワットから数十ワットの中電力用途の熱電発電モジュールに接続することに最適化された DC-DC コンバータは先行開発例が見当たらなかったため、本課題を通じてこのクラスの熱電発電モジュール(発電電力密度 0.7W/cm<sup>2</sup>)に接続し、変換効率 80%を実現する DC-DC コンバータの開発に着手した。

さらに、熱電発電素子は1素子あたりの発電電圧が数十mVと低い傾向にあるため、通常、発電素子を数 +~100本程度直列接合した熱電発電モジュール構造を踏襲している。しかしながら、多数の発電素子の直 列配置は1本の不調がモジュールの発電機能停止につながるため、事実上、熱電発電モジュールの実用上 の耐久面での信頼性確保の面では大きな不安材料となり、実用化の妨げとなっている。本研究課題を開始 するにあたり、事前調査として熱と振動が加わる環境で熱電発電モジュールの発電耐久試験を実施したとこ ろ、熱電発電モジュールが電気的に開放状態で故障することを確認した。高い動作信頼性が要求されるエン ジン搭載車両排熱発電システム用途においては、本故障モードに対する抜本的な対策が望まれる。このた め、熱電発電モジュールから効率的に電力を引き出すために、熱電発電モジュールと DC-DC コンバータの 間にインターフェース回路(コンデンサ・パイルアップ回路)を設ける取り組みを実施した。

以上に鑑み、「熱電池専用 DC-DC 電力変換器(コンバータ)実用化への基礎要素技術」においては、0.4V ~0.8V を出力する熱電発電モジュールを電源に有し、コンデンサ・パイルアップ回路を介して、一部熱電発 電モジュールが電気的に開放状態で故障した場合においても、DC-DC コンバータへの入力電圧が 0V とな らない機能を有する熱電池専用 DC-DC コンバータを実装し、上記の目標を達成することを主目的として研 究開発に取り組んだ。また、3ヵ年の研究開発過程において上記目標の達成見込みがたったため、新たに下 記の目標を追加設定し、研究開発を可能な限り発展させた。

● Duty比50%で入力電圧の4倍昇圧が可能なコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの回路実装と動作確認(平成29年度までに開発したDC-DCコンバータ(当初回路)は、Duty比50%で入力電圧を2 倍昇圧する回路構成)

また、研究開発は2段階に分けて実施した。以下、各段階毎に取り組み内容と得られた研究開発成果をまと める。

第一段階では、「スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータ」の開発 を行った。本コンバータでは、熱電発電モジュールからの電力をインダクタに蓄え、パワートランジスタスイッ チング方式により昇圧と電力パイルアップを同時に行う方式の回路の動作検証を行った。この段階での重要 確認事項は、複数のパワートランジスタ動作電位をフローティング電位状態で協調させる条件の抽出であり、 DC-DC コンバータが低電圧入力時に高い電力変換効率を実現するための要素技術として、低オン抵抗の GaN スイッチングデバイスを用いた同期整流型スイッチ回路を有する DC-DC コンバータを回路実装した。本 回路で目標とする電力変換効率は、1V 未満の熱電発電電圧入力に対して 70%であった。実装面積が 50mm×50mmの同期整流型 GaN スイッチ回路を含む DC-DC コンバータを 50cm<sup>2</sup>の実装面積で設計し、本 DC-DC コンバータを 2 つ用いた 2 段構成のスイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータを 100cm<sup>2</sup>の回路実装面積で平成 28 年度に回路実装し、0.5V の入力電圧時に電力変 換効率 80%を確認し、第一段階での目標達成を平成 28 年度中に確認した。なお、2段構成のマルチノード 入力電力パイルアップ型コンバータは、2個の電源と2つのコンバータが含まれ、電源は熱電発電モジュール または熱電発電モジュールの出力特性を模擬した模擬電源などに対応する。平成 29 年度は、最終目標値 である「実装面積 1/2 倍(従前実装回路(回路実装面積 100cm<sup>2</sup>)の 1/2 倍)」を実現するために、同期整流型 GaN スイッチ回路を35mm×35mmの実装面積で最適化設計・実装した。また、小型化した同期整流型GaN スイッチ回路を有する2段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータで電力変換効率 80%の達成を確認した。平成 30 年度は、平成 28 年度および平成 29 年度に得られた研究成果をとりまとめ、 国際会議にて発表を行った。

第二段階では、コンデンサによる発電集電を加えたスイッチング方式電力パイルアップ型 DC-DC コンバータ(コンデンサ・パイルアップ型 DC-DC コンバータ)の開発を行った。第一段階で、フローティング電位状態でのパワートランジスタが協調してスイッチングできるようになれば、熱電発電モジュールと DC-DC コンバータのインターフェース回路である、「コンデンサ・パイルアップ回路」の実現が可能となる。これにより、複数個の熱電発電モジュールに対して必要な DC-DC コンバータは一つのみとなり、回路実装面積の小型化が実現できるとともに、コンデンサ・パイルアップ回路の集電によりDC-DCコンバータへの入力電圧値が上昇する

ため、電力変換効率が向上する見通しを持って取り組んだ。第二段階にあたる研究開発は平成 28 年度より 開始し、平成29年度中にコンデンサ・パイルアップ回路を開発し、直列接続された複数個の電源の内の1つ が電気的に開放状態で故障した場合においてもシステム全損を防ぐ回路動作を確認するととともに目標に掲 げる特許出願まで完了した。平成30年度は、35mm×35mmの実装面積で小型化した同期整流型スイッチ回 路と、同じく35mm×35mm で実装したコンデンサ・パイルアップ回路を有するコンデンサ・パイルアップ型コン バータを回路実装面積 49cm<sup>2</sup>で回路実装し、動作確認を行った。動作確認においては 1V 以下の低電圧入 力時に焦点を絞り、まず入力電圧が0.2V~0.8Vの範囲で変化し、出力電力が0.1W程度の熱電発電モジュ ールを用いて、最大電力点において電力変換効率90%の達成を確認した。更に、出力電力密度が0.7W/cm <sup>2</sup>程度の熱電発電モジュール(模擬電源)を用いて、DC-DC コンバータへの入力電圧が 0.4V~1V かつ実用 が想定される電力利用率 95%以上の範囲で最大電力変換効率 90%を確認し、目標値を達成することができ た。実装面積 1/2 倍(従前実装回路(回路実装面積 100cm<sup>2</sup>の 1/2 倍))の達成、Si-MOSFET 及び GaNトラ ンジスタを用いたコンデンサ・パイルアップ回路の開発、コンデンサ・パイルアップ回路の知財申請について も目標値を達成し、特に、GaN トランジスタを用いたドライバ回路設計が順調に推移したため、Si トレンチ MOSFET による回路設計を飛ばして、GaN トランジスタによる回路構築を実施するなど躍進的な成果も得ら れた。また、3ヵ年の研究開発期間における追加目標値である「Duty比 50%で入力電圧の4倍昇圧が可能な コンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの回路実装と動作確認」についても平成30年度中に達成する ことができ、発展的な研究成果が得られたと考えている。



図 A-1 従前実装回路

平成28年度~平成30年度の期間に本研究課題が設定した研究目標およびその達成状況について 以下の表にまとめる。本研究課題の達成目標値については、本課題の開始時と比べて、各年度の研究 実施状況に鑑み、一部はより高い目標値へ改変し、より良い成果創出に向けて取り組んだものを含む。

実施項目	担当	最終目標値	H28年度 目標値	H29年度 目標値	H30年度(実施年) 目標値(途中改変向上有)			
フェイルセーフ熱電池= ル構造実用化への基礎 術	<sub>モジュー</sub> を要素技							
①環境低負荷型Mg2Si 熱電発電材料の熱的 高耐久化	東京 理科大	●600℃大気中での発電素 子耐久性3,000時間以上	【目標】 ●600℃大気中での発電素 子耐久性1,000時間以上	【目標】 ●600℃大気中での発電素 子耐久性3,000時間以上 ●600℃/100℃温度差で発 電素子の無次元性能指数 ZT値1.0以上 ●キャスト法溶融合成による 粒界・ボイド生成抑制	【目標】 ●600℃大気中での発電素 子耐久性3,000~5,000時間 ●600℃/100℃温度差で発 電素子の無次元性能指数 ZT値1.1以上 ●キャスト法溶融合成で 600℃大気中での発電素子 耐久性500~1,000時間			
			【成果】 <u>年度目標達成</u> ●600℃大気中での発電素 子耐久性1,000時間以上	【成果】 <u>年度目標達成</u> ●600℃大気中で発電素子 耐久性3,000時間以上 ●600℃/100℃温度差で発 電素子の無次元性能指数 ZT値0.95 ●溶融合成法による結晶粒 界耐酸化性向上とボイド抑 制	【成果】 <u>年度目標達成</u> ●600℃/100℃温度差で発 電素子の無次元性能指数Z T値1.10の発電素子で、60 0℃大気中の発電素子耐久 性5,000時間に到達、電極 付き素子では3,000時間に 到達 ●溶融合成試料で600℃大 気中の素材耐久性は500時 間に到達、ZT値は1.01			
②発電用に最適化した 高耐久新型ユニレグ 構造モジュールの開 発	東京 理科大	<ul> <li>● 温度差環境</li> <li>600℃/100℃で発電電力</li> <li>密度0.7 W/cm<sup>2</sup></li> <li>●ユニレグ基本構造モジュ</li> <li>ールの試作</li> </ul>	【目標】 ●有限要素(ANSYS・Flow Designer)シミュレーションで の出力電力予測モデルの 作製 ●支持基板なし構造ユニレ グ基本構造モジュールで 600℃/100℃で発電電力密 度0.4W/cm <sup>2</sup>	【目標】 ●600℃/100℃温度差で熱 発電素子2~6本のAlN基板 付き基本ユニットで発電電 力密度0.7 W/cm <sup>2</sup> ●ガラスエポキシ基板の適 用調査	【目標】 ●600℃/100℃温度差で熱 発電素子4~6本のAlN基板 付き基本ユニットで発電電 力密度0.7 W/cm <sup>2</sup>			
			【成果】 <u>年度目標達成</u> ●ANSYSとFlow Designerで 熱ー電流連成解析シミュレ ーションモデル構築 ● 支持基板なし構造 600℃/100℃温度差で素子 6本の発電電力密度0.43 W/cm <sup>2</sup>	【成果】 <u>年度目標達成</u> ●600℃/100℃温度差で熱 発電素子2本のAIN基板付 き基本ユニットで発電電力 密度0.72 W/cm <sup>2</sup> 、4本で 0.68 W/cm <sup>2</sup> ●ガラスエポキシ基板の耐 久性テスト実施し温度耐久 性不十分	【成果】 <u>年度目標達成</u> ●600℃/80℃温度差で熱 発電素子6本のAIN基板付き ユニレグモジュール基本ユ ニットで発電電力密度 0.72 W/cm <sup>2</sup> に 到 達 、600℃/ 100℃換算で0.706W/cm <sup>2</sup> を 得た			
<ol> <li>③発電環境下振動試 験機により実環境に近 い状態での発電特性 評価</li> </ol>	東京理科大	● JIS D1601-1995加振環 境(サイン波 33, 67 Hz、最 大加速度5, 10G)でユニレ グ構造モジュール発電耐 久100時間以上	【目標】 ●実施準備 【成果】 ●次年度の実施準備完了	【目標】 ●JIS D1601-1995(サイン波 33,67 Hz、最大加速度5, 10G)でユニレグモジュール 構造耐久100時間以上 【成果】 <u>年度目標達成</u> ●構造破壊せずユニレグモ ジュール構造耐久100時間 以上	<ul> <li>【目標】</li> <li>●JIS D1601-1995(サイン波 33,67 Hz、最大加速度5, 10G)で発電耐久100時間以上</li> <li>【成果】 <u>年度目標達成</u></li> <li>●発電環境600℃/80℃においてサイン波33 Hz、加速 度10 G構造破壊せずユニレグモジュール6本構造の耐 久性100時間を確認</li> <li>●素子剥離、モジュール構 造の機械的破壊は製作工 程依存、抵抗劣化は軽微</li> </ul>			
熱電池専用DC-DC電 器(コンバータ)実用化 礎要素技術	」力変換 こへの基							
<ul> <li>④スイッチング方式に よるマルチノード入力</li> <li>電力パイルアップ型</li> <li>DC-DCコンバータの</li> <li>開発</li> </ul>	岡山 理科大	●⑤コンデンサ・パイルアッ プ型コンバータの開発に関 わる基礎要素技術開発	【目標】 ●変換効率70%以上の達成 (入力:0.5Vの直流電源を使 用) ●ローサイドおよびハイサイ ドスイッチをフローティング 電位状態で協調させる回路 設計	<ul> <li>【目標】</li> <li>● 2 電源に対して2つの DC-DCコンパータを接続した2段構成の回路を1段あた 960mm×60mmで集積化実装</li> <li>●小型化したDC-DCコンパ ータで変換効率70%以上の 達成(入力:0.5Vの直流電源</li> </ul>	【目標】 ●H29年度までに得られた 成果を国内外の会議にて発 表			

				を使用)	
			【成果】 <u>年度目標達成</u> ● 2 電源に対して2つの DC-DCコンバータを接続し た2段構成の回路を実装し、 変換効率80%を達成(入 力:0.5V、~2Aの直流電源 を使用) ● 事前準備として実施した GaNトランジスタを用いたド ライバ回路設計が順調に推 移し、平成28年度に作成す る回路の動作に使用可能な 回路構築に至ったため、Siト レンチMOSFETによる回路 設計を飛ばして、平成29年 度から取り組むGaNトランジ スタによる同期整流型スイッ チを有するDC-DCコンバー タの設計・実装を平成28年 度より前倒しにて実施	【成果】 <u>年度目標達成</u> ●H28年度に50mm×50mm であった同期整流型スイッ チ回路を35mm×35mmで集 積化実装し、DC-DCコンバ ータの小型化を達成(1段あ たり60mm×60mm) ●小型化したDC-DCコンバ ータで変換効率70%以上の 達成(入力:0.5V、~2Aの直 流電源を使用)	【成果】 <u>年度目標達成</u> ●回路設計および回路実験 に関する研究成果を国際会 議にて発表
⑤コンデンサ・パイル アップ型コンバータの 開発	岡山 理科大	<ul> <li>●変換効率80%の達成(熱発電ユニットの出力は0.4~0.8V)</li> <li>●実装面積1/2倍(従前実装回路(回路実装面積100cm<sup>2</sup>)の1/2倍)の達成</li> <li>●Si-MOSFET及びGaNトランジスタを用いたコンデンサ・パイルアップ回路の開発</li> <li>●コンデンサ・パイルアップ</li> <li>回路の知財申請</li> </ul>	【目標】 ●実施準備(次年度から開始する回路実装に備え、コンデンサ・パイルアップ回路の回路構成について検討) 【成果】 <u>年度目標達成</u> ●次年度の実施準備完了(熱電発電モジュールが電気的に開放状態で故障時に、システム全損を防ぐコンデンサ・パイルアップ回路の回路設計を実施)	<ul> <li>【目標】</li> <li>●変換効率70%以上の達成 (入力:0.5V、~2Aの直流電 源を使用)</li> <li>●2電源を有する2段構成回路(2個の電源を接続可能な DC-DCコンバータ)を72cm<sup>2</sup> (1個の電源を接続可能な1 段構成のDC-DCコンバータ に換算すると60mm×60mm) の実装面積で回路実装</li> <li>●特許出願に向けたデータ 収集</li> <li>【成果】 <u>年目標達成</u></li> <li>●変換効率80%を達成(入 力:0.5V、~2Aの直流電源 を使用)</li> <li>●2電源を有する2段構成回路を72cm<sup>2</sup>(1段あたり60mm×60mm)の実装面積で回路実装</li> <li>●特許出願</li> </ul>	【目標】 ●変換効率80%の達成 (0.4V~0.8Vを出力する熱 電発電モジュールまたは模 擬電源を電源に使用) ●入力電圧の変動による電 力変換効率の検証 ●2電源を有する2段構成回路 実装面積100cm <sup>2</sup> )の1/2倍) 高昇圧コンバータの回路 実装(従前実装回路(回路 実装(人力電圧の4倍昇圧) 【成果】 <u>年度目標達成</u> ●熱電発電モジュールまた は模擬電源を用いた回路実 験で、入力電圧が0.4V~ 0.8Vの範囲で変動した場合 においても変換効率80%以 上が保たれ、実用が想定さ れる電力利用率95%以上の 範囲で最大変換効率90%を 達成
					●2電源を有する2段構成回路を49cm <sup>2</sup> の実装面積で回路実装(従前実装回路(回路実装面積100cm <sup>2</sup> )の1/2倍) ●Duty比50%で入力電圧を4倍昇圧する高昇圧コンバータを回路実装

## 研究成果の詳細説明

本研究開発で実施した①~⑤各実施項目について、上述した研究成果の詳細説明を以下にまとめる。

	開発項目	記載ページ
1).	環境低負荷型 Mg <sub>2</sub> Si 熱電発電材料の熱的高耐久化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	P.9∼P.20
2.	発電用に最適化した高耐久新型ユニレグ構造モジュールの開発 ・・・・・・・・・・	P.20~P.32
3.	発電環境下振動試験機により実環境に近い状態での発電特性評価 ・・・・・・・・	P.32~P.37
4.	スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC ・・・・・・・	P.37~P.51
	コンバータの開発	

⑤. コンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発 ····· P.51~P.81

#### 1.1-①. 環境低負荷型 Mg2Si 熱電発電材料の熱的高耐久化(担当:東京理科大学)

本開発項目の開始時における最終目標値は、「600℃大気中での発電素子耐久性 3,000 時間以上」であった。平成 28 年度の研究開発目標値は、

(1). 600℃大気中での発電素子耐久性 1,000 時間以上

を設定し研究開発に取組んだ。以下に平成28年度の実施内容と得られた成果について記載する。

ユニレグ型構造に適した発電特性を有する熱電発電素子の作製を実施した。まず、Mg2Siへの添加不純物と して、これまでの研究室における不純物最適化研究結果から有望と考えられるアンチモン(Sb)と亜鉛(Zn)を選 定し開発を推進した。不純物 Sb と Zn の混合添加不純物を Mg<sub>2</sub>Si の溶融合成時に添加して「固化」、「粉砕」、 「放電焼結」、「素子切断切り出し」の工程による熱電発電素子を行なった。素子形状は 4×4×6 mm<sup>3</sup>とし、放 電焼結工程時にNi電極を同時形成した。放電焼結工程におけるパラメータの最適化については、焼結温度、 焼結圧力、焼結保持時間のパラメータを変化させ、焼結試料の相対密度が 96~98%程度の緻密体になる条件 を探索した。その結果、焼結温度 890℃ (調査範囲 800~910℃)、焼結圧力 50MPa (調査範囲 30~60MPa)、 焼結保持時間 15 min (調査範囲 10~30min)を得た。添加不純物である Sb と Zn の添加濃度を 0.5 at%から 1.0 at%まで変化させた試料を作製し、それぞれについて温度範囲 50℃ (323 K:室温相当)から 600℃(873 K: 想定動作最高温度)においてゼーベック起電圧、電気伝導率、熱伝導率を測定し、熱電発電素子の発電特性 の指標となる無次元性能指数 ZT 値を算出した。得られた ZT 値を図 1-①-1 に示す。 ZT 値は 0.95 程度の値 となり、10個程度の試料作製において再現よく得ることができた。Sb添加が Mg2Siの熱電特性向上に寄与があ ることは知られていたが、作製時の再現性が悪い問題があった。本開発では 0.5 at%の Sb 添加量を基礎に 0.5 at%から 1.0 at%の Zn を添加することで、次年度以降のユニレグ構造モジュールの開発に使用できる熱電発電 素子の製作条件抽出をすることができた。この熱電発電素子を熱環境 600℃/100℃温度差で発電量を測定し たところ、350 mW が得られたことから、素子単体の出力密度としては 2.2 W/cm<sup>2</sup> が得られた。したがって、本 開発の目標であるモジュール構造における 0.4 W/cm<sup>2</sup>出力密度実現に向けて十分に使用できる熱電発電素 子であると考えられる。キャスト型素材合成法については、不純物を添加する基盤条件を整えるために、不純 物を添加する基礎となるアンドープ(無添加)型 Mg2Si の作成条件探索に取り組み、MgとSi 原料を Al2O3 系の るつぼ内で溶融合成する条件について調査を行なった。使用する溶融電気炉内に形成される高温から低温 方向への温度勾配と最高溶融温度、および冷却速度のパラメータ調整による大型粒径から構成される多結晶 生成を実施し、最高溶融温度 1100℃ (調査範囲 950~1200℃)、温度勾配 7.5℃/cm (調査範囲 3.0~25.5℃ /cm)、冷却速度 30.0℃/h (調査範囲 9.0~75℃/h)の条件でアンドープ型 Mg2Si の多結晶試料作製を行える ようになった。



図 1-①-1 作製した熱電発電素子の無次元性能指数 ZT 値

熱電発電素子は、新型ユニレグ構造モジュールにおいて発電動作をする際に、大気中 600℃の環境で十 分な耐久性が必要であり、本開発での発電素子耐久性目標3,000時間以上の実現に向けたプロセスの改良 が必要である。本年度は、まず 600℃大気中で熱電発電素子表面においてどのような変化が生じるかについ て調査を行なった。図 1-①-2 に Sb(0.5at%)+Zn(0.5at%)添加した Mg2Si 熱電発電素子の熱処理耐久試験の 結果を示す。基本的に 1000 時間後においても Sb(0.5at%)+Zn(0.5at%)添加した Mg2Si 熱電発電素子の著し い外形の劣化は見られなかった。



図 1-①-2 Sb(0.5at%)+Zn(0.5at%)添加した Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電素子の大気中で 600℃における熱処理耐久試験の結果

図1-①-3にMg<sub>2</sub>Si熱電発電素子の熱処理大気中熱処理(600℃/1000時間)後の表面変化を示す。Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電素子を大気中で 600℃に長時間暴露すると外形には大きな破損や劣化は見られないものの試験 素子表面の初期状態の違いにより、ひび割れの観察される場合と、安定的保護膜と思われる表層が形成さ れることが確認された。表層部分を電子プローブマイクロアナリシス(EPMA)法を用いてより詳しく元素分析を 行なった結果を図 1-①-4 に示す。ひび割れのない安定と思われる熱電発電素子試料表面は主に酸化層に より形成されていることがわかった。



図 1-①-3 Sb(0.5at%)+Zn(0.5at%)添加した Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電素子の 熱処理 (600℃/1000 時間)後の表面変化



大気中600°C環境では発電素子内粒界と粒子表面に酸素分布が増加

図 1-①-4 電子プローブマイクロアナリシス(EPMA)による表面部の元素分析結果

図 1-①-5 に Sb+Zn と添加した Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電素子の熱処理耐久試験後の試料抵抗値の変化を示す。添加する Sb と Zn の量を変化させているが、熱処理後の抵抗値については、(1)1000 時間に至るまでは初期の抵抗値と比べて大きな変化は観測されず、一般に熱電発電素子が熱劣化する際に観測される抵抗値の上昇は見られず、電気的に 1000 時間程度までは安定である、(2) Sb と Zn の量の変化に伴う抵抗値の違いは顕著には観測されておらず、熱電気的特性としては概ね一定の傾向が観測された。



図 1-①-5 Sb(0.5at%)+Zn(0.5at%)添加した Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電素子の 熱処理耐久試験と試料抵抗値の変化

上述のように、Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電素子の耐久性に関する本年度の成果目標である「動作温度(600℃)大気中 での発電素子耐久性 1,000 時間以上」については達成できたと考えられる。また、本年度に得られた実験結 果の傾向を見る限り、Sb と Zn の同時添加量は本年度の値を基礎として進めることが妥当であるという点と、 本開発における熱電発電素子の大気中 600℃での熱処理耐久試験 3,000 時間の目標に向けた基礎データ が取得できたと考えられる。

以上、平成28年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。 ●600℃大気中での発電素子耐久性1,000時間以上

平成 28 年度の取組み成果を得て、平成 29 年度の研究開発目標値は、

- (1). 600℃大気中での発電素子耐久性 3,000 時間以上
- (2). 600℃/100℃温度差で発電素子の無次元性能指数 ZT 値 1.0 以上
- (3). キャスト法溶融合成による粒界・ボイド生成抑制

を設定し研究開発に取組んだ。以下に平成29年度の実施内容と得られた成果について記載する。

ユニレグ型構造に適した発電特性を有する熱電発電素子の作製のため、Mg2Siへの添加不純物を選定し、 母素材での不純物種と添加濃度によりゼーベック起電圧、電気伝導率、熱伝導率の最適化制御を実施した。 Mg2Si への添加不純物として、これまでの研究室における不純物最適化研究結果から有望と考えられるアン チモン(Sb)と亜鉛(Zn)を選定し平成 28 年度に引き続き開発を推進した。不純物 Sb と Zn の混合添加不純物 Sb と Zn の添加濃度を 0.5 at%から 1.0 at%まで変化させた試料を作製し、Mg2Si の溶融合成時に添加して「固 化」、「粉砕」、「放電焼結」、「素子切断切り出し」の工程による熱電発電素子を行なった。放電焼結工程にお けるパラメータの最適化については、平成 28 年度に探索した焼結温度、焼結圧力、焼結保持時間のパラメ ータを用いて焼結試料の相対密度が 96~98%程度の緻密体になる条件、すなわち、焼結温度 890℃(調査 範囲 800~910℃)、焼結圧力 50MPa (調査範囲 30~60MPa)、焼結保持時間 15 min (調査範囲 10~ 30min) で実施した。焼結作製した試料について、温度範囲 50℃(323 K:室温相当)から 600℃(873 K:想 定動作最高温度)においてゼーベック起電圧、電気伝導率、熱伝導率を測定し、熱電発電素子の発電特性 の指標となる無次元性能指数 ZT 値を算出した。平成 29 年度は、不純物 Sb 添加量を 0.5 at%と 1.0 at%およ び Zn の添加量を 0.5 at%と 1.0 at%として Sb+Zn の添加量を組み合わせて Mg<sub>2</sub>Si の溶融合成原料調合を行 い、試料作製を実施した。しかしながら、Sb+Zn 添加量が 0.5 at%と 1.0 at%の濃度範囲で作製した Mg<sub>2</sub>Si 試料 では平成 29 年度の目標値である「600℃/100℃温度差で発電素子の ZT 値 1.0 以上」に対して、同年度 2 月の成果取りまとめ時点では、添加量 Sb(0.5 at%)+Zn(0.5 at%)と Sb(1.0 at%)+Zn(0.5 at%)の組み合わせでそ れぞれ ZT 値 0.96、0.53 にとどまり、年度目標値の ZT 値 1.0 には届かない状況であった。その後、平成 29 年度 3 月から平成 30 年度 4 月にかけて、添加する不純物 Sb と Zn の導入量を変更して、Sb 0.16 at%と Zn 0.16 at%に減少させた溶融原料合成を実施し、放電焼結により作製した試料において、図 1-①-6 に示すよう な 600℃/100℃温度差で ZT 値 1.10 を得ることに成功した。得られた ZT 値 1.10 は、平成 29 年度目標値の 0.95 を上回り、最終年度となる平成 30 年度の目標値として設定される予定である「600℃/100℃温度差で発 電素子の無次元性能指数 ZT 値 1.1 以上」に到達する結果となった。



図 1-①-6 作製した熱電発電素子の 600℃/100℃温度差における無次元性能指数 ZT 値

添加した不純物の Sb と Zn が Mg<sub>2</sub>Si 中において熱電特性向上に関する機能向上要素を明らかにするため に、高輝度光科学研究センター(SPring-8) での電子状態測定として硬 X 線光電子分光(HAXPES)を実施し、 溶融体法による作製試料(Undope、Zn 1.0at%添加、Sb 添加 0.5at% Zn 添加 0.5at%)について Fermi 準位近 傍と価電子帯の光電子スペクトル解析を行なった。図 1-①-7 に Zn のドープ効果の HAXPES 測定結果、お よび図 1-①-8 に Sb のドープ効果の HAXPES 測定結果をそれぞれ示す。



図 1-①-7 HAXPES 測定結果 (Zn のドープ効果)



図 1-①-8 HAXPES 測定結果 (Sb のドープ効果)

Zn を単独で添加試料においては、Fermi 準位近傍のスペクトル端部が、不純物を添加していない Undope 試料と比較して高結合側へ移動していることからn型半導体の挙動が観測され、かつ電子の供給環境がある ことが示唆された。さらに、Zn 添加試料に Sb を追加して添加した試料では図 1-①-8 に示すように明確な電 子の状態密度がスペクトル上に見られるようになり、Mg2Si 中での電子の供給と状態密度形成が明らかとなり、 Sb の添加により Mg2Si が金属的な振る舞いにより電気伝導度の向上となっていることが明らかとなった。これ らの結果により、Sb と Zn の添加により、Mg2Si 中の電子状態密度が向上していることから、本開発における Sb および Zn の添加が熱電気特性向上の観点から有効であることが示唆された。

さらに、添加した Sb がどのような状態で電子を供給しているかを調査するために、Mg2Si 中での Sb 原子位 置確認を行うための蛍光 XAFS 測定(蛍光 X 線(XRF)マッピング測定)を SPring-8 で実施した。図 1-①-9 に Sb 添加試料の蛍光 XAFS 測定結果を示す。Sb の XRF(蛍光 X 線)マッピング結果からは、添加された Sb は結晶粒界には偏析しておらず、主としてマトリックスである Mg2Si に固溶する形で Sb が粒内に分布している 結果が得られた。このことにより、Sb は Mg2Si 中で原料合成時に固溶置換する形でドーピングされ、n 形半導 体電気伝導を示していることから、Si 原子位置に配置されていることが明らかとなった。



図 1-①-9 Sb 添加試料の蛍光 XAFS 測定結果 Sb のマッピングと詳細測定点 A~F

キャスト型素材合成法については、昨年度に探索した育成条件である、最高溶融温度 1100℃ (調査範囲 950~1200℃)、温度勾配 7.5℃/cm (調査範囲 3.0~25.5℃/cm)、冷却速度 30.0℃/h (調査範囲 9.0~75℃/h)の条件をベースにしてアンドープ型 Mg2Siの多結晶試料作製を行い、図 1-①-10 に示す試料作製を行った。作製試料は現時点では未だ全領域にわたって単結晶的な構成となっていないが、図 1-①-10 に示す試料下部は数 mm 程度からなる単結晶粒から構成されており、本開発において十分検証使用できるものであると考えられることから、Mg2Si 耐久性の確保と劣化の調査研究に用いた。図 1-①-11 は、図 1-①-10 で示した試料の高分解能走査型電子顕微鏡(FE-SEM)による試料表面および界面の観察と微量元素分析 (FE-EPMA)結果である。



図 1-①-10 キャスト型素材合成法による Mg2Si 溶融合成試料

平成 29 年度に実施したキャスト型素材合成法では、結晶粒界に析出物や生成物等は見られず、粒界、粒 内部で Mg と Si 以外はほぼ検出されない結果であった。また、生成されている Mg<sub>2</sub>Si は Mg:Si = 2:1 組成で あることが確認された。キャスト型素材合成法で作製された Mg<sub>2</sub>Si を 600℃大気雰囲気中で耐久試験を 100 時間まで実施したところ、表面や結晶粒界面に MgO が多く形成されることはなく、初期の耐久性は確保でき たと考えられる結果が得られた。比較のために、従前の放電焼結法により作製した Mg<sub>2</sub>Si 試料の FE-SEM に よる試料表面および界面の観察と FE-EPMA 結果を図 1-①-12 に示す。放電焼結法により作製した Mg<sub>2</sub>Si では、結晶粒界の多くの部分に粒状の生成物が確認され、これらは微量元素分析により、MgO であることが 知られており、マトリックス結晶の高温動作時に劣化するきっかけとなるということがすでに昨年度までに明ら かになっている。本年度の結果により、結晶粒界部に MgO や添加不純物の分布が見られないキャスト型素 材合成法による Mg<sub>2</sub>Si 試料では、高温大気中の環境で劣化を誘発する物質が減少できていることから、発電 素子耐久性の向上に資する可能性があると考えられる。次年度に耐久性試験を含めて粒界面の安定性についてさらに調査する。



図 1-①-11 キャスト型素材合成法により作製した Mg2Si 試料の高分解能走査型電子顕微鏡 (FE-SEM)による試料表面および界面の観察と微量元素分析(FE-EPMA)結果





図 1-①-12 従前の放電焼結法により作製した Mg<sub>2</sub>Si 試料の FE-SEM による試料表面 および界面の観察と FE-EPMA 結果

キャスト型素材合成法による結晶粒界面の耐酸化性向上による高耐久化の他手法として、Mg<sub>2</sub>Si 表面を酸素に触れさせない表面コーティングを合わせて実施した。本年度は、Mg<sub>2</sub>Si 試料表面にディップコート法でSiO<sub>2</sub> ベースの酸化物複合体薄膜を形成し、想定動作温度上限である 700℃で焼成を行う皮膜形成プロセスを開発した。この酸化物被膜をSb 添加量 0.5 at%、Zn 添加量 0.5 at%、および Sb 添加量 1.0 at%、Zn 添加量 1.0 at%の放電焼結法により作製された Mg<sub>2</sub>Si 熱発電素子に形成し 600℃大気中における耐久試験結果を図 1-①-13 および図 1-①-14 に示す。3,000 時間の耐久試験後の発電素子試料表面には待機中試験のため に付着した炭化水素系の焼け焦げがあるものの、素子の表面酸化劣化破損は見られず、試料外観からは耐久性が得られたと言える結果となった。試料表面の詳細を光学顕微鏡により観察した図 1-①-14 の結果から、形成した耐酸化被膜の剥がれや、部分的な亀裂は観察されず、良好な形成被膜であることが明らかとなった。

本年度の目標である、大気中 600℃での発電素子耐久性 3,000 時間以上を実現する点については、本年度 取り組んだ耐酸化被膜が有効であると考えられる。



図 1-①-13 耐久試験の前後における試料外観写真



図 1-①-14 耐久試験の前後における試料表面光学顕微鏡写真

以上、平成 29 年度の研究開発取組みにより、3 項目設定した年度目標について 2 項目を達成する以下の成果を得ることができた。

●600℃大気中での発電素子耐久性 3,000 時間以上

●600℃/100℃温度差で発電素子の無次元性能指数 ZT 値 1.10

●結晶粒界耐酸化性向上とボイド抑制

この中で、開発目標値「(2).600℃/100℃温度差で発電素子の無次元性能指数 ZT 値 1.0 以上」については、 平成 29 年度に最終目標を達成することができた。

平成29年度の取組み成果を得て、最終となる平成30年度の研究開発目標値は、

(1). 600℃/100℃温度差で発電素子の無次元性能指数 ZT 値 1.1 以上の発電素子において、

600℃大気中での発電素子耐久性 3,000~5,000 時間

(2). キャスト法溶融合成で 600℃大気中での発電素子耐久性 500~1,000 時間

を設定し研究開発に取組んだ。以下に平成30年度の実施内容と得られた成果について記載する。

平成 29 年度最終盤に得られた、ZT 値~1.1 を実現する際に調合した添加不純物である Sb 添加量 0.16 at% とZn 添加量 0.16 at%の原料試料を基礎として、平成 29 年度に実施した高性能 Mg2Si 作製プロセスと同様の 原料合成、粉末化、放電焼結ペレット作製、発電素子切断を実施し、再現性を担保しながら平成 29 年度と同 じプロセス環境で、本年度の実験に使用する発電素子製作を実施した。図 1-①-15 に作製した Mg2Si 発電素 子への保護膜形成プロセスの模式図を示す。なお、平成 29 年度までに順調に 600℃大気中での発電素子耐 久性 3,000 時間を得られる見通しがついたことから、本開発項目の開始時の到達目標を拡大設定し、平成 30 年度は発電素子をモジュール化する際に必要となる発電電力収集用のNi電極を形成発電素子に形成してNi 電極付き Mg2Si 発電素子を作製し、600℃大気中での発電素子耐久性3,000時間以上をめざす。



図 1-①-15 Mg<sub>2</sub>Si 発電素子への保護膜形成プロセスの模式図

Mg<sub>2</sub>Si の酸化物系保護膜を形成するための薬液へ発電素子形状試料をディップコート法により浸漬させ、その後に乾燥(10min)、焼成(700℃、1時間、徐例)するプロセスを最適化して実施した。平成 30 年度は、保護膜のコーティングを、Mg<sub>2</sub>Si の熱発電素子としての耐久特性を評価するために、Mg<sub>2</sub>Si 母材のみと、Ni 電極付き Mg<sub>2</sub>Si 発電素子の2 種類に実施した。その後、保護膜を形成した試料を、大気雰囲気中 600℃の耐久性熱処 理試験にかけた。図 1-①-16 に Mg<sub>2</sub>Si 発電素子母材のみの熱処理耐久試験結果を示す。Mg<sub>2</sub>Si 発電素子母 材については、平成 29 年度に 3,000 時間の耐久試験で表面保護の実績が得られていたことから、平成 30 年 度は 3,000 時間を上回る試験を実施したところ、図 1-①-16 の熱処理後に示すように今回試験を実施した上 限値である 5,000 時間までの耐久性が確認できた。



図 1-①-16 Mg<sub>2</sub>Si 発電素子母材のみの熱処理耐久試験結果

図 1-①-17 は、保護膜の付いた Mg<sub>2</sub>Si 発電素子と保護膜界面の電子顕微鏡写真と元素分析結果を示す。この分析結果では、Mg<sub>2</sub>Si 発電素子と保護膜界面部分における元素の相互拡散が顕著に起こったという形跡は見られず、600℃で 5,000 時間の熱処理試験後も Mg<sub>2</sub>Si 発電素子形成した酸化物系保護膜からは劣化要因となりうる拡散はなかったと考えることができ、当該保護膜は Mg<sub>2</sub>Si 発電素子に有効であるということが分かった。この結果より、Mg<sub>2</sub>Si 発電素子母材については、600℃大気中での発電素子耐久性 5,000 時間を達成することができた。



図 1-①-17 保護膜の付いた Mg<sub>2</sub>Si 発電素子と保護膜界面の電子顕微鏡写真とEDX 元素分析結果

他方、Ni 電極付き Mg<sub>2</sub>Si 発電素子に保護膜を形成した試料については、3,000 時間程度までの耐久試験で は、母材のみの熱処理耐久試験結果と同様に、耐久性を有していると判断できる状態を保っていたが、3,000 時間を越えるあたりから、図 1-①-18 の Ni 電極付き Mg<sub>2</sub>Si 発電素子に保護膜を形成した試料の熱処理耐久 試験結果に示すように、一部の発電素子において Ni 電極部の剥離にかかる劣化が観測された。Ni 電極部の 剥離が見られた試料は 3 割程度であり、その他の素子試料は耐久性を確認できた。耐久性試験を実施した素 子試料の Ni 電極一Mg<sub>2</sub>Si 界面部分について、図 1-①-19 に示す電子顕微鏡写真と EDX 元素分析を行った ところ、熱処理後の試料においては Ni 電極一Mg<sub>2</sub>Si 部分に一部空隙を生じている試料が見られた。この空隙 部は、熱処理の進行とともに図 1-①-19 の右側の列に示す酸素(O)濃度の増加が見られ、MgO が生成される と考えられる。MgO は熱膨張率が大きいことから、長時間の熱処理に伴いその生成量が増えることにより Ni 電 極一Mg<sub>2</sub>Si 界面の劣化、すなわち Ni 電極の剥離につながると考えられる。本取組みにより、今後 Ni 電極付き Mg<sub>2</sub>Si 発電素子の実用化に向けて解決すべき内容の抽出ができた。本開発項目開始時の到達目標を拡大設 定した Ni 電極付き Mg<sub>2</sub>Si 発電素子の耐久性については、結果として、600℃大気中で発電素子耐久性 3,000 時間を実現することができた。



図 1-①-18 Ni 電極付き Mg<sub>2</sub>Si 発電素子に保護膜を形成した試料の熱処理耐久試験結果 (熱処理後、一部素子では右端に示す試料上部右端の電極部が剥離)



図 1-①-19 Ni 電極付き Mg<sub>2</sub>Si 発電素子に保護膜を形成した試料の 電極-Mg<sub>2</sub>Si 界面部分の熱処理耐久試験結果の電子顕微鏡写真とEDX 元素分析

平成30年度は、前年度までに検討したキャスト型素材合成法によるMg<sub>2</sub>Si溶融合成条件を元にした試料の作 製も実施した。この時点で、キャスト型素材合成プロセスの再現性を完全に確保できたという状況ではなく、作 製される試料には形状の個体差や特性値に偏差が見られるものの、本年度が最終年度であることから、同プロ セスの最適化を指向しつつ、目標値の達成に向けた取組みを行った。図1-①-20はキャスト型素材合成法に より作製したMg<sub>2</sub>Siの基礎熱電特性をまとめたものである。現時点では、合成試料の切り出し部位により若干の 組成偏差があることに起因していると考えられる熱電特性の差が見られる。しかしながら、複数作製した試料に おいていくつかに関しては、図1-①-20に示すようにZT値1.00を上回るものが得られている。現在の環境に おいて得られるキャスト型素材合成法によるMg<sub>2</sub>Si溶融合成試料のZT値は0.9~1.0程度となっているが、こ の程度の特性を有する発電素子試料であれば、実用使用に求められる性能を実現できると考えられることから、 平成30年度のキャスト型素材合成法試料にかかる達成目標指標である耐久性試験実施については、当該の Mg<sub>2</sub>Si溶融合成試料を用いて行うこととした。



図 1-①-20 キャスト型素材合成法により作製した Mg2Siの基礎熱電特性

図 1-①-21 にキャスト型素材合成法により作製した Mg<sub>2</sub>Si の保護膜未塗布試料における耐久試験結果を示す。 上述のように、現時点で部位により組成ムラなどの見られる溶融合成試料状態ではあるが、適切な部位を切り 出し表面加工(鏡面)した複数試料に 500 時間の耐久性試験後に耐酸化性を有するものが見られた。本来、目 標達成を成果としてあげるには再現性の担保が重要ではあるが、現時点ではその状況には至っていない。本 取組みで扱ってきた限り、キャスト型素材合成法の育成条件は、現状、添加する不純物の量によりかなり異な る熱環境などが必要となり、必要とされるパラメーターの制御性を十分に確保できていないため、本件に関して は今後、引き続き取り組んでいく予定である。



図 1-①-21 キャスト型素材合成法により作製した Mg<sub>2</sub>Siの 保護膜未塗布試料における耐久性

以上、平成30年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。 ●600℃/100℃温度差で発電素子の無次元性能指数ZT値1.10を示す発電素子で、600℃ 大気中の発電素子耐久性5,000時間に到達、電極付き素子では3,000時間に到達 ●溶融合成試料で600℃大気中の素材耐久性は500時間に到達、ZT値は1.01

本成果は、本開発項目の開始時における最終目標値として設定した「600℃大気中での発電素子耐久性 3,000時間以上」を研究開発進捗に合わせて向上的数値目標に改変し、最終的には当初目標を上回り、実用 化に供することのできるレベルとして産業界が要求する発電素子耐久性目安5,000時間に到達することができ たと考える。

## 1.1-②. 発電用に最適化した高耐久新型ユニレグ構造モジュールの開発(担当:東京理科大)

本開発項目の開始時における最終目標値は、「温度差環境 600℃/100℃で発電電力密度 0.7 W/cm<sup>2</sup>」および「ユニレグ基本構造モジュールの試作」であった。平成 28 年度の研究開発目標値は、

(1). 有限要素(ANSYS・Flow Designer)シミュレーションでの出力電力予測モデルの作製

(2). 支持基板なし構造ユニレグ基本構造モジュールで 600℃/100℃で発電電力密度 0.4W/cm<sup>2</sup> を設定し研究開発に取組んだ。以下に平成 28 年度の実施内容と得られた成果について記載する。

平成28年度は、上記①の開発項目「環境低負荷型 Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電材料の熱的高耐久化」において出力 および熱的耐久性の向上に用いているMg<sub>2</sub>Si 熱電発電素子2~6本から構成される新ユニレグ型発電ユニッ トの製作と発電特性の実測、および有限要素計算手法による熱流と熱分布-電熱発電特性のシミュレーショ ン環境の構築・出力電力予測・実測値との比較検討を行なった。計算に使用した有限要素法計算コードは ANSYS(熱分布-電熱発電特性のシミュレーション)および FlowDesigner (熱流伝熱解析のシミュレーション)を 使用した。

図1-②-1に本開発で作製する新型ユニレグ構造モジュール(S型構造およびW型構造)の模式図を示す。 S型構造およびW型構造のユニレグ構造モジュールは、基本的には旧モデルとして示されているユニレグ型 と比較して、熱流と電気的接続構造は基本的には同様であるが、赤い部品で示される金属配線部分を意図 せず流れる熱流の最適化と、熱電発電素子および金属配線のフットプリントを最小化して発電モジュールとし てコンパクト化する際に発電エネルギー密度(単位面積当たりの発電量)を向上させるために S型構造および W型構造を新たに検討する。



0主 ビノル

S型およびW型構造の特徴として、素子側面に金属電極配線をブリッジ状に斜めに配線することで素子間 隔を縮めながら配線に必要な金属配線断面積を確保し、かつ配線断面積の最適化で高温熱源側から金属 部分を経た低温熱ドレイン側への熱流の低下が期待される。

モデリングにより示された発電モジュールの製作にあたり、熱源から発電モジュールを経て冷却側に至る熱 接合の低減、および発電素子とブリッジ配線への接触電気抵抗を十分低く抑えるための部材の探索を行っ た。電極材料には Ni 単体と Cu を基材とした Ni メッキ電極材を調査し、電気伝導性と耐食性の観点から Ni メッキ Cuを選定した。熱接合剤としては、高温度側に BN(窒化ホウ素)、グラファイトシート、InGa(インジウムガ リウム)を調査し、扱いの容易性と良好な熱接合再現性確保の観点から、BN とすることに決定した。素子電極 とブリッジ配線の電気的接合はロウ付け材料として Ag 系のロウ材を調査したが、溶接に必要な温度が 800℃ 程度と高い素材が多く、その温度では Mg<sub>2</sub>Si 自体に劣化が顕在化することが明らかとなったため、より低融点 で溶融する金属・合金系の中で Mg<sub>2</sub>Si との元素相互拡散が生じても影響が軽微であると考えられる AiSi(アル ミシリコン)を使用したところ、良好な接合が使用できることを確認した。また、InGa は熱接合材としての機能の

図 1-2-1 S型および W 型構造のユニレグ構造モジュールの模式図 (水色:熱電発電素子、赤色:金属電極配線)

みならず、Mg<sub>2</sub>Si とブリッジ配線との電気的接合にも使用できることが明らかとなったため、合わせて、使用を 検討できることとなった。

上記、電気的、および熱的接合材の探索により、モジュール構造を形成する際の組み立て容易性と再現性 が計画立案当初の予想より十分担保される見通しとなったので、素子本数の少ない(2~4 本程度)ステップ・ バイ・ステップによるモジュール製作ではなく、ユニレグインライン型モジュールの素子本数を増やし6本での モジュール製作と解析に挑戦することとした。6 本が形成できれば 8 本程度までの規模拡大で生じる問題点 が早期に見通せる可能性があるとの期待によるものである。

素子本数6本で構成されるS型およびW型モジュール構造では、図1-②-2に示すようにMg2Si熱電発 電素子と金属電極配線(ブリッジ配線)に関して、本年度初期に実施したシミュレーション計算において「ブリッ ジ間隔」と「熱電発電素子間隔」の2つの要素がモジュールの発電特性に大きく寄与することが明らかとなっ たため、主として「ブリッジ間隔」と「熱電発電素子間隔」のパラメータに関して発電特性評価を行うことに注力 することとした。これらの素子、およびブリッジ間隔パラメータの範囲としては、ANSYSやFlowDesignerを用い たスクリーニングシミュレーションを経て、「素子間隔1.5 mm、および2.5 mm」と「ブリッジ間隔0.5 mm、およ び1.5 mm」の組み合わせに関して実モジュール作製とシミュレーションを実施することが有効であるとわかっ たため、これらパラメータ数値範囲について開発を実施した。



図 1-2-2 パラメータとして設定したブリッジ間隔と熱電発電素子間隔

図 1-②-3 に製作した S 型および W 型構造モジュールとモジュールの発電特性を評価する装置の外観を示す。また測定の際の条件は以下の通りである。

低温側 : 100 ℃、高温側 : 600 ℃ モジュール固定の圧力(高温側から低温側への軸方向) : 3 MPa 雰囲気 : 大気下 使用熱電発電素子 : Ni 電極付き Mg2Si (Sb 0.5 at% + Zn 0.5 at%)、4×4×6 (mm<sup>3</sup>) 熱電発電素子本数 : S 型構造:6 本、W 型構造:6 本 配線形状 : 素子間隔 1.5 mm、ブリッジ間隔 0.5 mm 素子間隔 2.5 mm、ブリッジ間隔 0.5 mm



図 1-2-3 モジュールの発電特性評価装置(上図)と製作した S 型 および W 型構造モジュール(下図)

図 1-2-4 に素子間隔を 1.5mm に固定してブリッジ間隔を 0.5mm および 1.5mm に変化させた S 型および W 型構造モジュールの発電特性測定結果を示す。グラフでは縦軸に電圧値と出力電力値、横軸に電流を示す。S 型構造では、得られた最大出力は 848mW となり、ブリッジ間隔を広げた場合に出力向上の傾向が見られた。W 型構造の発電特性も S 型同様の傾向となっており、ブリッジ間隔 1.5mm の場合に最大出力は 886mW が得られている。配線構造として W 型モデルの出力が高く、最大出力 886mW が得られた。



(素子間隔 1.5mm 固定:ブリッジ間隔 0.5mm , 1.5mm)

次に ANSYS による発電特性のシミュレーション値との比較を行う。表 1-2-1 にブリッジ間隔 0.5mm と 1.5mm に対する S 型および W 型構造モジュールの発電特性(電圧、電流、出力、出力密度)の計算値と実 測値をまとめる。

		S	ションテ	ル						
測》	ビモデル	Voltage [mV]	Current [A]	Output power [mW]	Output power density [W/cm²]	Voltage [mV]	Current [A]	Output power [mW]	Output power density[W/cm <sup>2</sup> ]	
bridge	Experiment	271.13	9.2	624	0.37	296.72	8.7	645	0.37	
0.5mm	Analysis	373.47	15.6	1457	0.83	379.40	15.2	1442	0.76	
bridge	Experiment	297.68	11.4	848	0.41	331.05	10.7	886	0.43	
1.5mm	Analsis	380.24	15.7	1492	0.71	381.55	15.2	1450	0.66	

表 1-2-1 ANSYS および Flow Designer による実験結果評価(ブリッジ間隔)

S型およびW型構造共に、ブリッジ間隔を広げることで大きな電力が取れる傾向が示され、また解析との差が 小さくなる傾向が明らかとなった。配線構造としてはS型構造の方が電圧の値が低くなっており、ブリッジ部分 の熱流量による温度低下が明らかとなった。他方、ブリッジ感覚を広げることでS型およびW型共に電圧値は 改善しており、ブリッジ部分の熱流量による温度低下への対策が可能であることが明らかとなった。この電圧 値の低下影響は、素子の抵抗が同一の場合、結果的に電流低下に繋がるため最終的な熱電発電素子の出 力が低下してしまうことから影響の軽減が求められる。電圧値の低下の原因としてブリッジによる熱流および ジュール熱の影響が大きいと考えられる。

図 1-②-5 に ANSYS による S 型および W 型構造モジュール高温側の上面金属電極と金属配線ブリッジ部 分の熱流分布シミュレーション結果を示す。S 型および W 型構造共に、ブリッジ間隔を広げることでブリッジ部 分に影響される素子上面の熱流が低下する傾向が示されている。表 1-②-1 に示されている実験結果評価を もとに見積もると、現状では 150~200mW 程度がブリッジ部分の熱流により発電損失となっている可能性が 示された。ブリッジ間隔としては、本結果から判断すると 1.5 mm の方が素子上部の熱的環境構築には好まし いと考えられるが、フットプリントの増加につながるため懸念項目ともなりうるため、素子感覚や S 型 W 型構造 の特性と合わせた全体としての最適設定値探索が必要と考える。



図 1-2-5 ANSYS による S 型および W 型構造モジュール上部(高温側)の熱流分布

図 1-2-6 にブリッジ間隔を 0.5mm に固定して素子間隔を 1.5mm および 2.5mm に変化させた S 型および W 型構造モジュールの発電特性測定結果を示す。グラフでは縦軸に電圧値と出力電力値、横軸に電流を示す。S 型構造での最大出力は素子間隔が 2.5mm の時に 945mW が得られ、また、W 型構造でも素子間隔が 2.5mm の時に本年度の取り組みでは最大値となる 1067mW の出力電圧が得られた。表 1-2-2 にブリッジ間隔を 0.5mm に固定し、素子間隔を 1.5mm および 2.5mm に変化させた際の S 型および W 型構造モジュールの発電特性(電圧、電流、出力、出力密度)の計算値と実測値をまとめる。



図 1-2-4 で得られた発電特性測定結果では、素子間隔を 1.5mm に固定した場合はブリッジ間隔 1.5mm に おいて最大電力が得られているが、逆にブリッジ間隔を 0.5mm に固定すると素子間隔 2.5mm で本年度得ら れた最大値となっており、ブリッジ間隔および素子間隔の最適設計がモジュールの出力密度最大化に需要 であることが示されたものと理解している。

		S型	モデル	W型モデル							
測定	モデル	Voltage [mV]	Current [A]	Output power [mW]	Output power density [W/cm²]	Voltage [mV]	Current [A]	Output power [mW]	Output power density [W/cm <sup>2</sup> ]		
Chin-Chin	Experiment	271.13	9.2	624	0.37	296.72	8.7	645	0.37		
1.5mm	Analysis	373.47	15.6	1457	0.83	379.40	15.2	1442	0.77		
Chip-Chip	Experiment	319.04	12.1	965	0.48	333.31	12.8	1067	0.49		
2.5mm	Analysis	378.80	15.5	1468	0.73	382.08	15.2	1452	0.67		

表 1-2-2 ANSYS および Flow Designer による実験結果評価(素子間隔)

素子間隔を広げることは設計上ブリッジ電極の形状が細くかつ長くなる方向に移行するため、ブリッジ金属 配線の断面積が小さくなることになり、結果としてブリッジ電極部分を流れる熱流は抑制された方向に働くこと がシミュレーション結果から明らかとなった。図 1-②-7 に S 型および W 型構造での素子間隔 1.5mm 、 2.5mm の配線熱流の計算結果を示す。素子間隔の拡大は高い熱流部分の分布を減少させている。



図 1-2-7 S型および W型構造での素子間隔 1.5mm, 2.5mmの配線熱流

表 1-2-1 および 1-2-2 に示した通り、Mg2Si 熱電発電素子(Sb 0.5 at% + Zn 0.5 at%)による S 型構造 6

本発電モジュールおよびW型構造6本発電モジュールでは、素子間隔 1.5/2.5 mm、ブリッジ間隔 0.5/1.5 mmの組み合わせによるモジュール構造で高温側600℃/低温側100℃温度差で0.4 W/cm<sup>2</sup>を越える出力密度を得ることができ、当該年度の目標は達成できたを考える。本開発における最終的な目標値である 0.7 W/cm<sup>2</sup> の実現に向けては、本年度の取り組みで構築したシミュレーション環境と実測環境の連携による最適構造抽出の高精度化ならびに素子性能の向上を推進して取り組んでいく必要のあることが知られることとなった。

以上、平成28年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。

●ANSYSとFlow Designer で熱-電流連成解析シミュレーションモデル構築

●支持基板なし構造 600℃/100℃温度差で素子 6 本の発電電力密度 0.43 W/cm<sup>2</sup>

平成 28 年度の取組み成果を得て、平成 29 年度の研究開発目標値は、

- (1). 600℃/100℃温度差で熱発電素子 2~6本の AIN 基板付き基本ユニットで発電電力密度
   0.7 W/cm<sup>2</sup>
- (2). ガラスエポキシ基板の適用調査

を設定し研究開発に取組んだ。以下に平成29年度の実施内容と得られた成果について記載する。

平成28年度に形状決定した熱電発電素子2~6本から構成されるユニレグ型発電ユニットについて、平成28年度にユニット構造パラメータを最適化したユニレグ型発電ユニットを作製し、熱流束、最大出力電力、変換効率を測定して熱環境600℃/100℃温度差で熱発電素子2~6本のユニレグ型発電基本ユニットで0.7 W/cm<sup>2</sup>の出力密度達成に取り組みを実施した。モジュールの作製に用いるMg<sub>2</sub>Si素子の特性は、原料にSb0.5 at% + Zn 1.0 at%添加のMg<sub>2</sub>Siとし、素子作製には放電焼結方を使用した。素子から電力を取り出す際に必要となる金属電極にはNi電極を用い、本年度のNi電極はスクリーン印刷法により作製した低接触抵抗型電極を用いている。発電素子の外形サイズは、5x5x5 mm<sup>3</sup>である。図1-②-8 に製作した精密発電特性測定用の発電素子の外観を示す。また、図1-②-9 に熱発電特性測定装置の概略図を示す。







図 1-2-9 熱発電特性測定装置の概略図

また、作製した発電素子 2~6 本から構成される熱電発電モジュールの熱発電特性測定と並行して、精密 伝熱モデリングによる発電特性の算出環境構築を実施した。精密伝熱モデリングによる発電特性の算出環 境は、熱電発電モジュールの形状最適化に必要なモジュール形状およびモジュール構成部材によるモジュ ール内の熱伝達、伝熱特性、熱損失要素の抽出と低減、発電電力値算出に使用する基幹シミュレーションを 提供する基礎となるモジュール設計に重要である。本年度は、昨年度から使用している Flow Designer の精 度を向上させる取り組みとして、精密実測定値と Flow Designer モデルの一致性を高めるための要素につい て調査および対策を行った。特に、平成 28 年度までに実施できていなかった、材料界面の熱抵抗、熱接合 部材、材料界面の電気抵抗、熱電効果(ペルチェ効果、トムソン効果)、ジュール熱による吸発熱の項目につ いて、図 1-2-10 に示す熱電発電モジュール構成モデルと図 1-2-11 に示すフローによりモデル実装する ことを行なった。Flow Designer モデルを構築するための熱電発電モジュール構成は、用途により可変的に 導入されるモジュール基板(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> や AlN 等)の影響を排して行うことがモデルの汎用性確保につながることか ら特定の基盤材料を組み込んでモデル化せず、熱伝導が良好な基材として金属 Cu を支持構造材の基礎として測定を実施した。





図 1-2-10 モジュール構成モデル

図 1-2-11 実測―モデリング連携計算フロー

平成28年度に作製したユニレグ型発電モジュールは発電素子と配線金属部品のみから構成され、支持基 板を持たない構造であったが、本年度は支持基板を有するモジュール構造として、熱源への実装ができる構 造とした。本年度導入する支持基板は、発電モジュール用に一般的に用いられているアルミナ(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)系基 板に変えて、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基板より高い熱伝導性を有し、かつ 600℃超の想定動作温度域で熱的に安定な特性を 示す窒化アルミニウム(AIN)を新規基板として導入した。AIN 基礎基板上に電気配線用となる Ni 系メタライズ 配線をパターニングした基板構造を特注作製し、図 1-2-12~図 1-2-14 に示すユニレグ構造型の 2素子 から6素子のモジュールを作製した。



図 1-②-12 2 素子熱発電 モジュール (ユニレグ構造)

図 1-②-13 4素子熱発電 モジュール(ユニレグ構造)

図 1-②-14 6素子熱発電 モジュール(ユニレグ構造)

熱環境600℃/100℃の温度差での2素子から6素子のユニレグ型発電モジュールに関して、作製したFlow Designerモデルによるシミュレーション発電量とモジュールの実測発電量の比較を表1-②-3に示す。素子1 本はモジュールの基本構造であり、かつFlow Designerモデルと実測値の整合性を確認する条件を与えるが、 本実験においては、実測値と計算値の値が等しく一致率は100%を得ることができた。この環境での2素子か ら6素子のユニレグ型発電モジュールの実測値/計算値の一致率は2素子で98.2%、4素子で99.5%、6素 子で 92.4%と概ね良好な値を得ていると考えられる。ただし、素子本数が増加するにつれて、素子間をつなぐ 金属配線を有するユニレグ型構造モジュールでは、金属配線部分の熱伝達によりそう発電量は増加するも のの出力密度の値に低下が生じてしまう。この点については、モジュール構造の基礎である、発電素子の配 置改良やユニレグ型構造特有の発電素子をつなぐ金属配線構造の見直しにより改善を図りたい。発電素子 2 本から構成されるユニレグ型構造モジュールで熱環境 600℃/100℃の温度差における発電出力密度は 0.78 W/cm<sup>2</sup>となっており、目標発電出密度 0.7 W/cm<sup>2</sup>を実現することができた。

		Voc (mV)	R (mΩ)	Isc (A)	Pmax (mW)	出力密度 (W/cm <sup>2</sup> )	実測値/計算値 (%)	
麦子1木	実測値	75.1	3.18	23.6	443	1.77	100.4%	
ж J 1-4-	計算値	76.7	3.34	23.0	441	1.76	100.470	
モジュール	実測値	117.0	6.44	18.2	532	0.78	98 2%	
(素子2本)	計算値	119.5	6.59	18.1	18.1 542 0.80		55.270	
モジュール	実測値	265	16.7	15.8	1048	0.68	99 5%	
(素子4本)	計算値	266	16.8	15.8	1053	0.69	55.570	
モジュール	実測値	384	25.0	15.4	1474	0.67	02 404	
(素子6本)	計算値	393	24.2	16.2	1595	0.72	92.4%	

表 1-2-3 実測値と計算値の比較

カしかしながら、ユニレグ型構造モジュールは、発電素子間の配線電極として金属板(Ni メッキした Cu 製配線電極板)が配線されており、当該構造部分では高温熱源部から冷却側への大きな熱流が発生することにより熱損失箇所となる。この配線電極は、発電素子 2 本から構成されるユニレグ型構造モジュールで図 1-②-12 に示すように 1 箇所、発電素子 4 本のユニレグ型構造モジュールでは図 1-②-13 に示すように 3 箇所、発電素子 6 本のユニレグ型構造モジュールでは図 1-②-14 に示すように 5 箇所となり、発電素子数の 増加により熱損失の総和が増えることから、発電素子数の多いユニレグ型構造モジュールで高い出力密度を 得るためには、平成28 年度に実施して得られた知見を生かした設計が重要である。平成29 年度の取組みか ら得られた結果としては、発電素子 4 本から 6 本のユニレグ型構造モジュールでは、発電出力密度がそれぞ れ0.68 W/cm<sup>2</sup>、0.67 W/cm<sup>2</sup>となっており目標発電出力密度に若干足りない状況であるため、今後、発電素 子や金属配線における電気的接触部分の最適化やユニレグ構造モジュールの素子/配線の配置改善など により、目標発電出力密度 0.7 W/cm<sup>2</sup>を実現できるように取り組みたい。

熱電発電モジュールの汎用化に向けた取り組みのひとつとして、ユニレグ型発電モジュールの基礎基板に、 エレクトロニクス機器の電子回路基板として広く一般的に用いられているガラスエポキシ製基板を適用できる かどうかについて調査を行った。図 1-②-15 はスルーホール型ガラスエポキシ製基板に熱電発電素子をは んだ付けし、モジュールの想定動作温度として素子上部を 600℃、ガラスエポキシ基板側を 100℃の温度環 境にセットし 21 時間 (1,300 min) にわたり熱発電試験を実施した後のガラスエポキシ基板側を 100℃の温度環 境にセットし 21 時間 (1,300 min) にわたり熱発電試験を実施した後のガラスエポキシ基板側を 100℃の温度環 し、その後は 21 時間 (1,300 min) にわたり熱発電試験を実施した後のガラスエポキシ基板 の写真、および発電素子が装填されている側のガラスエポキシ基板面の温度変化を示している。ガラスエポ キシ基板の表面温度は実験開始から徐々に上昇し始め、14 時間経過後に最大基板表面温度 162℃を観測 し、その後は 160℃前後の値で推移する結果を得た。通常、エレクトロニクス用に広く用いられているガラスエ ポキシ基板の耐久温度は 180℃であり、実験ではこの耐久温度より低い値で維持したものの、連続運転にか かる上限温度である 150℃より高い保持温度環境下では、ガラスエポキシ基板に曲がりやうねりといった影響 が出ており、熱電発電モジュールの動作温度時にモジュールの総熱流が大きく設定された場合にガラスエポ キシ基板の低温側が温度上昇により基板機能が維持できない可能性が懸念されることが明らかとなり、モジ ュール基板としての使用には不適であるという結論に至った。



図 1-2-15 ガラスエポキシ製基板への発電素子配置と発電特性熱環境試験後の外観と ガラスエポキシ基板面の温度変化

以上、平成29年度の研究開発取組みにより、設定した年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。 ●600℃/100℃温度差で熱発電素子2本のAIN 基板付き基本ユニットで発電電力密度

0.72 W/cm<sup>2</sup>、4 本で 0.68 W/cm<sup>2</sup>

●ガラスエポキシ基板の耐久性テスト実施し温度耐久性不十分

この中で、開発目標値「(2). ガラスエポキシ基板の適用調査」については、平成 29 年度に設定した本課題で 作製する熱電発電モジュールに使用できるよう改良導入することを検討したが、基本的な基板素材に起因する 内容の対策が必要なことから本課題範囲では扱うことが難しいと判断して、平成 30 年度に拡大導入することは しないこととした。

平成 29 年度の取組み成果を得て、最終となる平成 30 年度の研究開発目標値は、

(1). 600℃/100℃温度差で熱発電素子 4~6本の AIN 基板付き基本ユニットで発電電力密度

 $0.7 \ {\rm W/cm^2}$ 

という実用化に必要とされる設定し発電電力密度の数値設定を行い研究開発に取組んだ。以下に平成 30 年 度の実施内容と得られた成果について記載する。

本取組みにおいては、まず、ユニレグ型熱電発電モジュール構造での伝熱・熱発電特性を詳細に解析する 有限要素シミュレーション環境を(株)アドバンスドナレッジ研究所製の FlowDesigner を用いて構築した。図 1-②-16に有限要素計算シミュレーションに用いる熱発電モデルを示す。平成29年度までの取組みでは熱電 発電モジュールの動作時に生じる物理的効果のうちゼーベック効果とジュール発熱を取り入れただけであった が、より精度を確保するために、平成30年度の取組みではペルチェ効果およびトムソン効果の考慮をシミュレ ーション・アルゴリズムに取り入れた。これをベースとしてシミュレーションによる伝熱特性および発電特性値を 算出し、製作したユニレグ型モジュールでの精密伝熱・熱発電計測値と比較しながらコード化したアルゴリズム モデルの修正を実施して、発電モジュールの計算値と実測値の整合性を高める取組みを実施した。

図1-②-17は、平成30年度に試作するユニレグ型熱電発電モジュールの構成部材要素を示す。これまでに 「①. 環境低負荷型 Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電材料の熱的高耐久化」において研究開発してきた Mg<sub>2</sub>Si 熱発電素子、素 子間配線用金属部品、電気的接合用金属ペースト、配線パターンをメタライズ処理した AIN モジュール基板、 熱源/冷却源と発電モジュールとの熱接合シートなどの構成要素について、適切にコードに取り込んだ。他方、 平成29年度までに初期試作を実施した6本素子ユニレグ型発電モジュールについては、これまでの作成にか かる知見や問題点に改良を加えた仕様で試作した 6 本素子ユニレグ型発電モジュールを図 1-②-18 に示 す。



図 1-2-16 有限要素計算シミュレーションに用いる熱発電モデル



図 1-2-17 最終年度に試作する6本素子ユニレグ型発電モジュールの構成部材要素



図 1-2-18 平成 30 年度に試作した 6 本素子ユニレグ型発電モジュールの外観

試作した6本素子ユニレグ型発電モジュールを、図1-2-19の模式図に示すような出力特性測定条件で、各 温度差環境下における発電特性の精密測定を(株)アドバンス理工社製 PEM-2を用いて行なった。



(株)アドバンス理工社 PEM-2

図 1-②-19 試作した6本素子ユニレグ型発電モジュールの出力特性測定状況を示す模式図と 精密測定に用いた(株)アドバンス理工社製 PEM-2

素子本数およびユニレグ型構造の構成を変え試作したモジュールについての発電特性値と、同構造をシミュ レーション上に構築し計算したユニレグ型モジュール各構造箇所における詳細な電圧、電流、熱流の値を基 に算出された発電量、熱損失の特性値を比較検討し、実モジュールとシミュレーションモデルの差異箇所や数 値の不一致などについて、モジュール製作精度や構造改変、およびシミュレーションアルゴリズムの改変調整 を繰り返し実施した。その結果、本取組みが対象とするユニレグ型発電モジュールの動作環境下について実 測値と計算値の整合性が確保できるようになった。一例として、作製したシミュレーションモデルによる6本素子 ユニレグ型発電モジュールの各構成要素における発生熱量と損失熱量の計算結果を図 1-②-20 に示す。



図 1-2-20 シミュレーションモデルによる6本素子ユニレグ型発電モジュールでの局所熱量の詳細

シミュレーション計算値と実測値の整合要素探索取組みと、シミュレーションによりあぶり出された損失ポイントの改良、ならびに、モジュール製作精度の向上などの各種項目やプロセスの改善取組みを複数実施し、試作した Mg<sub>2</sub>Si ユニレグ型熱電発電モジュールのインライン型 6 本基本構造ユニットについて、本研究開発での最終的な発電特性測定を実施した。当該測定においては、冷却側の温度調節機能が不調で、本来 100℃で行うべきところ、81℃上限での実施となり、モジュールに印加される温度差は 519℃になってしまったが、表 1-②-4 に示す発電特性を得ることができた。

温度差/℃		R (mΩ)	Isc (A)	Pmax (mW)	P <sub>max</sub> /A (W/cm²)	実測Pmax/解析 Pmax(%)			
解析	45	17.5	2.57	28.92	0.01	50			
実測	38.3	21.4	1.79	17	0.0069	59			
解析	274	21.7	12.6	864	0.35	84			
実測	258.4	23.0	11.2	727	0.295	04			
解析	340	24.6	13.8	1174	0.45	04			
実測	331.3	25.0	13.3	1100	0.446	94			
解析	448	26.8	16.8	1876	0.76	05			
実測	437.7	27.0	16.3	1780	0.72	95			
	解析 実解析 実解析 実解析 実解析 実解析 実相析 実相析 実相析 実相析 実相析 実相析 実相析 実	Voc (mV)       解析     45       実測     38.3       解析     274       実測     258.4       解析     340       解析     341.3       解析     448       実測     437.7	Voc (mV)         R (mΩ)           解析         45         17.5           実測         38.3         21.4           解析         274         21.7           実測         258.4         23.0           解析         3400         24.6           解析         341.3         25.0           解析         448         26.8           実測         437.7         27.0	Voc (mV)         R (mΩ)         Isc (A)           解析         45         17.5         2.57           実測         38.3         21.4         1.79           解析         274         21.7         12.6           解析         258.4         23.0         11.2           解析         3400         24.6         13.8           実測         331.3         25.0         13.3           解析         448         26.8         16.8           実測         437.7         27.0         16.3	Voc, mvv         R mx         Isc, mvv         Pmax mvv           解析         45         17.5         2.57         28.92           東湖         38.3         21.4         1.79         21.7           解析         274         21.7         12.6         864           東湖         258.4         23.0         11.2         727           解析         340         24.6         13.8         1174           東測         331.3         25.0         13.3         1100           解析         448         26.8         16.8         1876           東測         437.7         27.0         16.3         1780	Voc (mV)         R (mΩ)         Isc (A)         Pmax (mW)         Pmax/A (W/cm²)           解析         45         17.5         28.92         0.01           実測         38.3         21.4         1.79         17         0.0069           解析         274         21.7         12.6         864         0.35           実測         258.4         23.0         11.2         727         0.295           解析         340         24.6         13.8         1174         0.45           実測         331.3         25.0         13.3         1100         0.446           解析         448         26.8         16.8         1876         0.76           実測         437.7         27.0         16.3         1780         0.72			

表 1-2-4 実測値と計算値の比較

まず、シミュレーション計算モデルと実測値との比較によるモデルの検証について検討する。表 1-2-4 に示 すように、改良され精度の上がったシミュレーション計算値では、実際の測定で用いた温度差 519℃の印加さ れた熱電発電モジュールの発電電力密度は平成 29 年度作製モデルより若干向上し0.76 W/cm<sup>2</sup>となっている のに対し、得られた出力は0.72 W/cm<sup>2</sup>で、実測値と計算値の間に依然として差異があり、整合率としては95 % を得る結果となった。この数値から考えるに、本取組みだけではまだ内包できていないあぶり出しの十分でな い要素、すなわち、モデル内に組込まれていない実測部での損失要因などがあることは明らかであり、発電モ ジュール製作、使用部材、精密測定環境、シミュレーション組み込み要素ならびにアルゴリズムのさらなる検討 であることが示された結果でもあると言える。この点については、平成 30 年度の結果を踏まえて、本取組みの 期間が終了した後も引き続きシミュレーション計算値と実測値の整合要素探索取組みを実施していきたいと考 えている。

本取組み達成目標値の一つである発電電力出力密度値 0.7 W/cm<sup>2</sup> について考えると、平成 30 年度の最 終ユニレグ型熱電発電モジュール 6 本ユニット発電特性測定では、達成目標値測定条件の高温度側 600 ℃、 低温度側 100 ℃ (温度差 500 ℃)に対して、高温度側 600℃、低温度側 81℃(温度差 519 ℃)の条件での測 定となってしまった。一般的に、熱電発電素材・発電モジュールでは、印加される温度差が大きいほど発電量 が増えることから、今回目標達成条件温度差値より 19 ℃大きな温度差環境での測定となっていることから、発 電量が過大に評価されていることについて検証・補正する。本取組みでは平成 30 年度に作製したシミュレー ション計算環境の精度および実測値との一致率を向上し 95 %を得ることができた。この一致率の向上には、さ らなる取組みが必要であるが、熱電発電モジュールへの印加温度差に依存する貫通熱量等の解析では変化 分の比率についてはある程度以上の精度が得られているものと考えられると仮定し、定温側環境を 100℃に補 正して印加温度差 500 ℃の場合について発電量を算出したところ、1,746 mW となり、発電電力出力密度値 0.706 W/cm<sup>2</sup> を得た。この結果をもとにすると、本取組み達成目標値の一つである発電電力出力密度値 0.7 W/cm<sup>2</sup> に到達することができたと考えられる。

以上、平成 30 年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。 ●600℃/80℃温度差で熱発電素子 6 本の AIN 基板付きユニレグモジュール基本ユニットで 発電電力密度 0.72 W/cm<sup>2</sup>を得た。この結果を 600℃/100℃に換算すると 0.706 W/cm<sup>2</sup> を得た 本成果は、本開発項目の最終目標値として設定した「温度差環境600℃/100℃で発電電力密度0.7 W/cm<sup>2</sup>」および「ユニレグ基本構造モジュールの試作」に到達することができたと考える。

## 1.1-③. 発電環境下振動試験機により実環境に近い状態で発電特性評価(担当:東京理科大)

本開発項目の開始時における最終目標値は、「JIS D1601-1995 加振環境(サイン波 33 Hz、最大加速度 5G)でユニレグ構造モジュール発電耐久 100 時間以上」であった。本項目の実施については、熱電発電モジ ュールを発電環境に置きながら振動試験を実施する評価機器を、三重県工業研究所と調整開発する必要が あることから、平成28年度は、実施準備として調整に取組み、成果として平成29年度実施の準備が完了した。 平成28年度の準備取組みを経て、平成29年度の研究開発目標値は、

(1). JIS D1601-1995(サイン波 33, 67 Hz、最大加速度 5, 10G)でユニレグモジュール構造耐久 100 時間以上

を設定し研究開発に取組んだ。以下に平成29年度の実施内容と得られた成果について記載する。

ユニレグ型発電ユニットの実使用環境に対する耐久性を評価するために、「JIS D1601-1995」自動車部品振 動試験方法による発電特性評価を実施した。車載実装では、振動による発電ユニット構成要素の機械的構造 破壊が懸念され、動作耐久性を低下させる要素を調査する必要がある。本年度は、②で製作した AIN 基板を 有する発電モジュールについて、発電モジュールの経時変化と破損箇所の特定、および劣化過程の調査を実 施した。振動試験環境は、表 1-③-1 に示す「JIS D1601-1995」自動車部品振動試験方法における振動機能 試験条件において小型車から中型車にかかる懸架振動環境として 3 種 D 種の中から、4 サイクル 4 気筒エン ジンでの 1000 rpm、2000 rpm に相当する 33Hz、67Hz サイン波で、5G および 10G に相当する振動加速度 45m/s<sup>2</sup>および 90 m/s<sup>2</sup>を設定して実験を実施した。

表 1-3-1

振動条件の分類 振動機能試験及び振動耐久試験の振動条件は,次のように分ける。 (1)部品の振動条件は,取り付けられる自動車の種類によって分類し,次のとおりとする。

- 1種 主として乗用車系 2種 主としてバス系
- 3種 主としてトラック系
- 4種 主として自動二輪車系

(2) 部品の振動条件は、取り付けられる状態によって分類し、次のとおりとする。

- A種 車体又は懸架装置のばね上に取り付けられ、比較的振動の小さい場合 B種 車体又は懸架装置のばね上に取り付けられ、比較的振動の小さい場合
- 日種
  単体又は
  認定表直のは
  ね
  上に
  取り付けられ、
  に
  取り振動の
  大さい
  場
  て
  種
  エンジン
  に
  取り付けられ、
  比較的
  振動の
  小さい
  場合

D種 懸架装置のばね下に取り付けられる場合及びエンジンに取り付けられ,比較的振動の大きい場合

			1	振動	bbo	速度	臣段	階	区分	ł										ŧ	も振が無い場	合の振動耐災	く性身	<b>K件</b>		
段陛	振動加速度		1	種			2	種			3	種	5	Γ	4	·種			EQ: REF		振動数	振動加速度	討	験	時間	h
+XPB	m /s²	A	R	C	U	A	В	C	D	A	R	C	U	A	R	C	Π	U	4X PE		Ηz	m /s <sup>z</sup>	上下	12	도石	<b>前後</b>
5	5	0				0				0							T	-	5	33	又は 67	5	4		2	2
10	10	0				0				0				t		1	t		10	33	又は 67	10	1			
20	20	0	1	1		0			1	0		1	1	$^{+}$	1	1	t		20	33	又は 67	20				
30	30	0	0		$\square$	o	0		1	0			+	o	1	1	t		30	33	又は 67	30	1			
45	45	Γ	0	0			0		1	0	0			0	1	1	t	_	45	33	又は 61	45				
70	/0		1	0				0			O	0		0			t	_	70	33	又は 67	/0			-	
90	90				0				0		$\vdash$		0	0			t		90	33	,6/又は	90	3	31	z:1	1000rpm相译
110	110		1		0				0		$\square$		0	0			t		110	67	又は16/	110	-			
150	150		1		0	$\vdash$	1		0			-	0	0		1	t	_	150	67	又は161	150				
200	200		$\vdash$		0	$\vdash$			O	$\vdash$	$\vdash$	1	0	0	0		t		200	67	又は 200	200				
250	250		1	1	0	1			0				0		0		t		250	67	又は 200	250	6		1	2000
300	300		1		0	1	-		0			-	0	$\vdash$	0	0	1	0	300	67,	200 又は	300		97 F	٦Z • .	2000rpmm
400	400		+	1	0	$\vdash$	1	$\vdash$		$\vdash$	$\vdash$	1	1	$\vdash$	0	0	1	0	400	200	又は400	400	_	Т		
500	500												1		0	0	0	0	500	200	又は 400	500				

発電環境下振動試験機は、図1-③-1に示す三重県工業研究所の装置を使用した。本装置は振動試験機 に熱電発電モジュールの発電環境を実現するための温度差設定が可能な試料ステージを有しており、低温 度部は冷却水 25℃~70℃(モジュールの貫通熱量により変化)、高温度部 500℃の温度差環境を設定可能 である。本試料ステージの高温度部 600℃を実現する予定であったが、振動環境下において熱電発電モジ ュールに連続的に均一で十分な熱量を与える伝熱環境が作製できず、ステージの機構を改良する必要が出 てきたため、本年度の高温度部の最高温度は500℃として実験を実施する。図 1-③-2 は熱電発電モジュール ル試料設置ステージの詳細図である。熱電発電モジュールは、グリースや黒鉛シートなどの熱接合材を用い て、加圧環境下で高温度部および低温度部と接合される形式で固定される。



図 1-③-1 三重県工業研究所における振動試験装置の外観 振動試験装置 振動機&試料ステージ



図 1-③-2 熱電発電モジュール試料ステージの構造・セッティングの機構

図 1-③-3 に 5G 33Hz/100 時間の振動試験を実施した 4 本素子熱電発電モジュールの外観を示す。5G の試験段階では熱電発電モジュール本体構造、および AIN 基板とも損傷はなく、5G 33Hz/100 時間での耐久性は実現できていることが知られた。次に同様の 4 本素子熱電発電モジュールを 10G 67Hz/100 時間の振動試験にかけたところ、図 1-③-3 に示すように、基板がユニットから剥離、素子1本だけ配線から剥離し、モジュール端部の素子1本が脱離していた。しかし、4 本の発電素子そのものにはにひび割れ損傷や端部のかけは確認されなかった。また、発電素子間をつなぐ金属配線や AIN 基板本体と、AIN 基板に配しているメタライズ電極パターンにも目立った損傷は認められなかった。こうした点に鑑み、10G 67Hz で素子の外れは観測されたものの、熱電発電モジュールの基本構造的な振動耐性は確保できていると考えられるものの、発電素子と金属電極間の接合については十分ではないことが露見した。接合部はこの他にも金属電極とAIN パターン電極間など複数あることから、各種部材の接合部については今後改良を検討する必要があると考えられる。



図 1-③-3 5G 33Hz/100 時間の振動試験後の4本素子熱電発電モジュール外観



図 1-③-4 10G 67Hz/100 時間の振動試験後の4本素子熱電発電モジュール外観

図 1-③-5 は 6 本素子熱電発電モジュールに 10G 33Hz/100 時間の振動試験を実施した後の外観を示したものである。6 本素子熱電発電モジュールでは、高温と低温側の AIN 基板の最端部分の欠損が確認された。他方、熱発電素子と素子間をつなぐ金属配線には目立った損傷は確認できなかった。



図 1-③-5 10G 33Hz/100 時間の振動試験後の 6 本素子熱電発電モジュール外観

AIN 基板端部で発生した亀裂について、その要因として考えられるのは、AIN 基板の両端が発電素子6本の幅よりも大きなサイズで設計されていることに起因して、発電素子が挟まれていない最端部で基板が加振で内側に湾曲する変形が試験中に繰り返され起こり、最終的に変位に耐えきれずに基板に亀裂が発生し最終的に破断したことが考えられる。本年度作製した6本素子熱電発電モジュール用 AIN 基板では、発電実験
時の集電を行いやすくするために AIN 基板端部に発電素子の配置以外に電極パターンニングを行なってお り、この端部処理が問題となった可能性があると考えられる。今後、次年度以降の AIN 基板設計については、 AIN 基板端部の形状を精査して再設計を実施し、引き続き発電環境下振動試験を実施していくこととする。 表 1-③-3 に本年度の発電環境下振動試験にかかる結果をまとめる。本年度は、発電環境下振動試 験による経時変化と破損箇所の特定、および劣化過程について調査を行った。本年度の結果と改善点 を踏まえ、最終年度に抵抗値変化などの発電特性にかかる発電環境下振動試験を 600℃において実 施する。最終年度に向けては、試料ステージの高温度部 600℃を実現できるように機構の改良を検討し た。

表 1-③-3 ユニレグ型発電モジュールの発電環境下振動試験結果

モジュール	5G/100時間	10G/100時間
発電素子 6本	基板:亀裂 発電ユニット:損傷無し	基板:亀裂箇所で剥離 発電ユニット:損傷無し
発電素子 4本	損傷なし	基板:高温度・低温度部側とも剥離 発電ユニット:端部の素子 l 本剥離
発電素子 2本	基板:高温度部側剥離 発電ユニット:損傷無し	_

以上、平成29年度の研究開発取組みにより、以下の成果を得ることができた。

●構造破壊せずユニレグモジュール構造耐久 100 時間以上

平成 29 年度は振動試験において、モジュールの基本構造が室温環境で耐久性を有するかどうかの取り組み であった。構造を変更して自動車の過酷な振動環境に耐えうるモジュール構造とすることができたが、今後の 高温度発電環境での耐久性が実用上は最重要であるので、平成29年度の各種データを参照して最終目標を 実現するための取組みを平成30年度に実施した。

最終となる平成30年度の研究開発目標値は、

(1). JIS D1601-1995(サイン波 33、67 Hz、最大加速度 5、10G)で発電耐久 100 時間以上

という実用化に必要とされる設定をし高温度発電環境下での耐久性に必要な目標数値設定を行い研究開発 に取組んだ。以下に平成30年度の実施内容と得られた成果について記載する。

本年度は、まず本試料ステージの高温度部 600℃を実現するために熱電発電モジュールを装填するステージ機構を改良した。この改良により、試料ステージ高温度部を600℃に保った環境でJIS D1601-1995に基づくサイン波 33、67 Hz、最大加速度 5、10G を印加できる発電耐久試験を実施できることとなった。 図 1-③-6 に改良した熱電発電モジュール装填用試料ステージと発電モジュールを装填する際の熱接合環境に関する挿入部材、および振動試験を実施した 6 本素子基本構造ユニットを有するユニレグ型熱電発電モジュールの外観を示す。



図 1-③-6 改良した熱電発電モジュール装填用試料ステージと装填部詳細説明、 および振動試験装置の外観

平成 30 年度は、熱電発電モジュールの高振動環境・高温環境耐久試験として実車載環境に近い発電環境 下振動試験条件を指向し、これまで振動・高温度環境について、サイン波 33 Hz(1,000 rpm 相当)、67 Hz(2,000 rpm 相当)、加速度 5G、10G、発電温度 500℃、600℃の組み合わせで実施した試験を、熱電発電モ ジュールに対して振幅幅が最も大きく、過酷な振動パラメータの組み合わせとなる、サイン波 33 Hz、最大加 速度 10G、発電温度 600℃において実施検証することとした。10G 33Hz/100 時間の振動試験を実施したのち に、ユニレグ型熱電発電モジュール本体構造、および AIN 基板とも損傷はなく、複数の試験モジュールにおい て発電環境下で 100 時間の耐振動性を得ることができた。表 1-③-4 に計測した 6 本素子ユニレグ型発電モジ ュールの高温度部 600℃での発電環境下振動試験結果を示す。

		試験	試験結果			
試験 モジュール	固定条件	設定温度 高温/低温	加速度/振動数	試験時間	抵抗値の変化	概要
No.1	治具使用 スペーサーあり	600℃/80℃	10 G⁄33 Hz	100時間	試験前0.123 Ω 試験後0.128 Ω	劣化、破損等は 無し
No.2	治具使用 スペーサーなし	600℃/80℃	10 G⁄33 Hz	100時間	試験前0.122 Ω 試験後0.158 Ω	出力低下あり デバイスの破損や 破壊等は無し
No.3	治具使用 スペーサーなし	600℃∕80℃	10 G⁄33 Hz	50時間※	未計測※	モジュール破損 外側基板脱離
No.4	治具使用 スペーサーなし	600℃∕80℃	10 G⁄33 Hz	100時間	試験前0.123 Ω 試験後0.140 Ω	出力低下あり デバイスの破損や破壊 等は無し

表 1-③-4 ユニレグ型熱電発電モジュールの高温度部 600℃での発電環境下振動試験結果

発電環境下振動試験を実施した4つのユニレグ型発電モジュールのうち、No.1、No.2、およびNo.4のモジュ ールについては構造的な破壊は無く試験を終えることができた。No.1の熱電発電モジュール測定では図 1-③-6に示す熱電発電モジュール装填用試料ステージに設置する際に、熱電発電モジュールと同じ高さのス テンレス角の治具を試料ステージの四隅に配置して、振動試験時に試料ステージを構成する上下の熱源板と 冷却板がバタついて熱電発電モジュール破壊の影響を与えないようにと考え設置した。他方、No.2 の熱電発 電モジュールでは、上記バタつき防止を期待したステンレス角の治具を設置せず、効果を確かめる目的とした。 No.1とNo.2の試験後において、熱電発電モジュールの構造的破壊は双方共に見られず、外観上も差異がな いと判断できる状況であったたこと、および、ステンレス角の治具を試料ステージ四隅に配置する場合には、こ の金属治具を通して熱源板から冷却板に大きな貫通熱量が発生し、特に高温側の 600℃を保持し続けること が電源的に難しくなるかもしれないということを考慮して、その他の試験時には治具を設置しないで行うことを 選択した。No.3 のモジュールについては、試験中に破損が観測され、試験を中断した。No.1、No.2、および No.4の熱電発電モジュールでは概ね500~600 mW 程度の出力が観測された。図1-③-7 ユニレグ型発電モ ジュール No.4 の試験時の温度変化及びデバイスの電気特性の変化について、実測値のグラフを示す。「②. 発電用に最適化した高耐久新型ユニレグ構造モジュールの開発」の項目で平成 30 年度に製作した 6 本素子 ユニレグ型発電モジュールでは、同様の温度差環境で精密な発電特性評価装置で計測したところ 1,600~ 1,800 mWの発電量が得られていることと比較すると、発電環境下振動試験実施時の発電量は約3分の1程 度にとどまっている。この差異については以下の要因が考えられる。(i) 熱電発電モジュールの発電特性評価 装置では、熱源/冷却源と発電モジュールの熱接合を静的測定環境のため高い熱伝導特性を有するペースト 状の部材により得ているのに対し、発電環境下振動試験時には熱電発電モジュールの設置性と耐振動性に 有効な厚みのあるシート状カーボンシートを使用したことによる熱環境の差、(ii)発電モジュール No.1、No.2、 No.4 においては、若干ではあるが、試験中にモジュール抵抗値の増加(モジュール抵抗値の増加はモジュー ル出力電力の低下に関連)しており、モジュールの外観に損傷はないと観察されたモジュールにおいても、内 部的には発電環境下・振動環境下での劣化が進行していることに起因、(iii) 試験環境がサイン波 33 Hz、最 大加速度10Gの過酷な条件であったため、熱電発電モジュール装填用試料ステージの熱源/冷却源と熱電発 電モジュールの熱接合をとる機械的な構造にわずかなゆるみが生じて熱接合のための加圧力が低下した、な どの理由が考えられる。加えて、試験終了後の結果検討時に気づいたことであるが、ステンレス角の治具をス ペーサーとして設置した No.1 の熱電発電モジュール測定では、熱電発電モジュールの劣化に起因する 100 時間後の抵抗値の変化が、ステンレス角治具をスペーサーとして挿入していない No.2、および No.4 の熱電発 電モジュールで見られた抵抗値の変化量に比べて小さくなっていることが明らかとなった。No.3 のモジュール では試験中に破損した事実も踏まえ、スペーサーの挿入が有効であることを暗に裏付ける結果と考えることも できることから、引き続きこうした点について調査検証する必要性が見出された。これらについて、平成30年度 は製作できる熱電発電モジュールの個数に限りがあったことから、さらに深掘り探求を実施することは年度中に は叶わなかったが、こうした実用上重要と考えられる内容については今後も引き続き取組んで行く予定である。



図 1-3-7 ユニレグ型発電モジュール No.4 の試験時の温度変化及びデバイスの電気特性の変化

以上、平成30年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。

- ●発電環境 600℃/80℃においてサイン波 33 Hz、加速度 10 G 構造破壊せずユニレグモジュール 6 本構造の耐久性 100 時間を確認
- ●素子剥離、モジュール構造の機械的破壊は製作工程依存、抵抗劣化は軽微

本成果は、本開発項目の最終目標値として設定した「JIS D1601-1995加振環境(サイン波 33, 67 Hz、最大 加速度 5, 10G)でユニレグ構造モジュール発電耐久 100時間以上」に到達することができたと考える。

## 1.1-④. スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータの開発

## (担当/再委託先:岡山理科大学)

本研究開発項目の開始時における最終目標値は、「コンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発に関わる 基礎要素技術開発」であった。この最終目標を実現するため、平成28年度の研究開発目標値として、

(1) 電力変換効率 70%以上の達成(入力:0.5V、~2A の直流電源を使用)

(2) ローサイドおよびハイサイドスイッチをフローティング電位状態で協調させる回路設計

を設定し研究開発に取組んだ。本研究開発項目で取組むマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コン バータは、電源のフェイルセーフ化で重要となる、熱電発電モジュールが電気的に開放状態で故障した時に システム全損を防ぐ機能を実装したコンデンサ・パイルアップ回路の基礎動作を開発検証する位置付けとなっ ている。フェイルセーフ化回路の取り扱いは、平成 28 年度の 1.1-④の成果を踏まえて、1.1-⑤の研究開発項 目で実施された。以下に平成 28 年度の実施内容と得られた成果について記載する。

図1-④-1にマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータの概念図を示す。本回路は、複数の熱電発電 モジュールに対し DC-DC コンバータを1対1で接続した回路である。DC-DC コンバータを用いて熱電発電 モジュールの出力電圧の昇圧と集電を同時に行い、一部の熱電発電モジュールが故障した場合においてもシ ステム全体の出力電圧が0V にならない回路構成である。図1-④-2 に DC-DC コンバータの回路図を示す。 熱電発電デバイスの低電圧出力特性を考慮し、ローサイドおよびハイサイドスイッチからなる同期整流型スイッ チを用いて70%以上の電力変換効率を実現可能な回路設計を行った。



図 1-④-1 マルチノード入力電力パイルアップ型コンバータの概念図



図 1-④-2 DC-DC コンバータ

図 1-④-3 にマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータを示す。本回路は、2 個の電源に対して 2 つの DC-DC コンバータを接続した 2 段構成の回路であり、約 100mm×100mm で回路実装した。基板加工機を用いた回路実装の様子を図 1-④-4 に示す。



図 1-④-3 マルチノード入力電力パイルアップ型コンバータ



図 1-④-4 基板加工機を用いた回路実装の様子

図 1-④-5 に回路パラメータの決定に用いた2 段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータの シミュレーション結果を示す。図中において、黒色領域に示す回路パラメータを選ぶと、回路動作が電流不連 続モードになり、電力低下につながる可能性がある。本シミュレーション結果より、スイッチング周波数の高周波 数化およびインダクタンスの低下に伴い、DC-DC コンバータの出力電圧が低下する傾向にあることが分かる。 他方、インダクタンスが増加するにつれ、回路実装面積は大きくなる。以上に鑑み、回路が電流連続モードで 動作し、かつ回路実装面積の仕様(2 段構成の DC-DC コンバータで 100mm×100mm)を満たすスイッチング 周波数およびインダクタンスを、それぞれ f=20~30kHz および L=500uH と決定した。なお、抵抗値は、5Ω か ら50Ω まで変化させ、ほぼ一定の出力電圧が得られることを確認したうえで、平成 28 年度においては R=20Ω とし、コンデンサは負荷電圧を十分に平滑化できることを条件に選定し、C=100uF とした。



図 1-④-5 回路パラメータの決定に用いた2段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型 コンバータのシミュレーション結果

回路実験においては電源に直流電源を用い、DC-DC コンバータへ 0.5V の電圧を入力した。また、図 1-④ -3 中の緑色の基板は同期整流型 GaN スイッチ回路であり、フローティング電位状態の GaN スイッチングデバ イスをターンオンおよびターンオフすることのできる回路構成となっている。ここで、DC-DC コンバータに含ま れるハイサイドスイッチをフローティング電位状態でターンオンさせるための条件として、ブートストラップ回路を 用いることを設計条件に加えた。また、ローサイドおよびハイサイドスイッチを協調させる条件として、ローサイド スイッチおよびハイサイドスイッチへ印加するスイッチング信号の位相を 180 度ずらすことを条件に設定した。さ らに、ローサイドスイッチ、およびハイサイドスイッチが同時にターンオンすることによる短絡をさけるため、ロー サイドおよびハイサイドスイッチへ印加されるスイッチング信号に 10ns 以上のデッドタイムを作成することを条件 設定した。本同期整流型スイッチ回路の概念図を図 1-④-6 に示す。

本回路は、主に定電圧レギュレータ、論理回路、ドライバICから構成される。外部から入力された PWM 信号 は、論理回路を用いて反転される。また、論理回路を用いてハイサイドスイッチとローサイドスイッチが同時にタ ーンオンすることを避けるためのデッドタイムを作成している。元の PWM 信号と反転された PWM 信号は、ドラ イバIC へ入力され、DC-DC コンバータのローサイドおよびハイサイドスイッチをフローティング状態でターンオ ンまたはターンオフするためのスイッチング信号が作成される。図 1-④-7 に実験結果を示す。なお、本結果は 図 1-④-3 に示す回路の実験結果に対応している。DC-DC コンバータへの入力は、熱電発電モジュールの出 力特性を考慮して 0.5V 程度とした。DC-DC コンバータの総出力電圧は 1.8678V であり、ローサイドスイッチお よびハイサイドスイッチがフローティング電位状態で協調動作し、入力電圧の集電と昇圧が達成されたことを確 認した。また、総出力電流は 0.19014A であり、変換効率 83%を達成した。



図 1-④-6 同期整流型スイッチ回路の概念図



図 1-④-7 マルチノード電力パイルアップ型コンバータの実験結果

以上、平成28年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。

- 2 電源に対して 2 つの DC-DC コンバータを接続した 2 段構成の回路を実装し、電力変換効率 80%を達成(入力:0.5V、~2A の直流電源を使用)
- 同期整流型スイッチ回路を有する DC-DC コンバータを設計

平成 28 年度の取組み成果を得て、平成 29 年度の研究開発目標値は、

- (1) 2 電源に対して 2 つの DC-DC コンバータを接続した 2 段構成の回路を 1 段あたり 60mm×60mm で集積化実装
- (2) 小型化した DC-DC コンバータで変換効率 70%以上の達成(入力:0.5V、~2A の直流電源を 使用)

を設定し研究開発に取組んだ。本申請提案のスイッチング方式マルチノード入力電力パイルアップ型構造は、 本取組みで回路の基本設計から基本動作の確認まで行うが、実用技術としての研究開発であることに鑑み、出 来上がり回路規模(回路構成および基板サイズ)が大きすぎると熱電発電モジュール用のコンバータ回路として 使用が難しくなることから、現在の研究開発のリソース規模で特定用途回路集積を実施せずディスクリート回路 構成によりできる限り小さくすることを目指すこととした。以下に平成29年度の実施内容と得られた成果について 記載する。

平成 28 年度に回路実装した2段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータは、1 段 (1つの DC-DC コンバータからなる回路)あたりの回路実装面積が 50cm<sup>2</sup> であった。特に、50mm×50mm の回路実装面積である同期整流型スイッチ回路が DC-DC コンバータの実装面積の 1/2 を占めていたため、平成2 9年度は同期整流型スイッチ回路の小型化に注力した。

図1-④-8に2段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータの回路図を示す。本回路は、平成28 年度実装回路と同様の構成であり、2個の直流電源に対しDC-DCコンバータを1対1で接続した回路である。 DC-DCコンバータを用いて熱電発電モジュールの出力電圧の昇圧と集電を同時に行い、一部の熱電発電モジュールが故障した場合においてもシステム全体の出力電圧が0Vにならない回路構成を踏襲し、低電圧入 力時の電力変換効率を向上させることを目的に同期整流型スイッチ回路を組み込んでいる。



図1-④-8 2段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータ

同期整流型スイッチ回路は現有する回路設計ソフト Altium Designer を用いて設計した。図 1-④-9 に平成 29 年度に開発した同期整流型スイッチ回路を示す。図中の(a)は回路部品レイアウト図であり、Q はハーフブリ ッジタイプの GaN スイッチングデバイス、C はコンデンサ、R は抵抗、IC は論理回路および低電圧レギュレータ、 CN はコネクタに対応している。一方、図中の(b)は実装基板である。平成 28 年度に 50mm×50mm であった回 路面積を 35mm×35mm まで小型化した回路仕様となっている。図 1-④-10 に回路実装した 2 段構成のマル チノード入力電力パイルアップ型コンバータを示す。本回路は図 1-④-8 に示す回路に対応しており、配線パ ターンを最適化し、基板加工機を用いて 80mm×90mm(72cm<sup>2</sup>)で回路実装した。なお、1 段構成のコンバータ 回路あたりの実装面積は 36cm<sup>2</sup>(60mm×60mm)に相当し、平成 29 年度に目標とする回路実装面積の達成を 確認した。



図 1-④-9 同期整流型 GaN スイッチ回路



図 1-④-10 回路実装した 2 段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータ

新たに開発した同期整流型スイッチ回路を含み、1 段あたりの回路実装面積が 36cm<sup>2</sup> に小型化された DC-DC コンバータを用いた 2 段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータに対して、 室温での動作確認を実施した。図 1-④-11 に実験結果を示す。



図 1-④-11 2 段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータの実験データ

ここで、回路実験における電源は熱電発電モジュールの出力特性を模擬した直流電源を用い DC-DC コン バータへの入力電圧を 0.5V とし、室温で回路実験を行った。(a)および(b) は電源が正常動作時の実験デー タである。1 段目の DC-DC コンバータおよび 2 段目の DC-DC コンバータへ 0.5V が入力されている。入力電 圧は DC-DC コンバータで昇圧・集電され、トータルで 2V の出力電圧が得られた。ここで、(a)はローサイドおよ びハイサイドへ印加されるスイッチング信号、1 段目の DC-DC コンバータのインダクタ電流およびトータルとし ての出力電圧の実験データを示している。ローサイドおよびハイサイドスイッチへ印加されるスイッチング信号 は逆相であることが分かる。また、ローサイドへ印加されるスイッチング信号が High のときインダクタ電流が増加 し、ローサイドへ印加されるスイッチング信号が Low のときインダクタ電流が減少していることが分かり、昇圧型 DC-DC コンバータの回路理論通りの動作および正常動作時における入力電圧の昇圧と集電の同時達成が 確認できた。(c)および(d)は、1 段目または 2 段目の DC-DC コンバータへ接続された模擬電源が開放状態で 故障したときの実験データである。入力が開放状態である DC-DC コンバータの出力電圧は 0V となるが、シス テム全体としては 1V の出力電圧が得られ、システム全損が避けられることが確認できた。

表 1-④-1 に電力変換効率の測定結果を示す。1 段目の DC-DC コンバータの電力変換効率が 90.3%であ り、2 段目の DC-DC コンバータの電力変換効率が 85.2 %であり、本年度目標とする入力電圧 0.5V 時に電力 変換効率 70%の達成を確認した。なお、2 段目の DC-DC コンバータの電力変換効率については、はんだ付け 等の回路実装過程が変換効率に影響を及ぼしている可能性がある。

## 表 1-④-1 2 段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータの 電力変換効率

	入力電圧[V]	入力電流[A]	出力電圧[V]	出力電流[A]	変換効率[%]
1 段目 コンバータ	0.5041	0.0923	0.9568	0.0439	90.3
2 段目 コンバータ	0.4933	0.0960	0.9358	0.0431	85.2

回路実験においては、DC-DC コンバータを2つ含む 2 段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DCコンバータの動作確認を行ったが、2 段以上の多段構成の回路においても同様に回路は動作する。こ れを確認するため、一例として 6 段のマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータの入力電圧波形、出力 電圧波形、インダクタ電流波形の回路シミュレーションを実施した。図 1-④-12 に 6 段構成のマルチノード入力 電力パイルアップ型コンバータの回路図を示す。また、図 1-④-13 および図 1-④-14 に PSpice を用いたシミ ュレーション結果を示す。ここで、図 1-④-13 は各 DC-DCコンバータに接続された電源が正常に動作している 場合、図 1-④-14 は 1 段目の DC-DC コンバータへ接続された電源が電気的に開放状態で故障した場合の 実験結果である。なお、電圧波形は図 1-④-12 に示す端子電圧に対応していることに注意する。図 1-④-13 に示すように、正常動作時においては 1 段目から 6 段目までの DC-DC コンバータの電流波形が重なっている ことが分かる。また、このときの出力電圧はトータルで 4V となった。一方、図 1-④-14 に示すように、1 段目の DC-DCコンバータへ接続される電源が電気的に開放状態となったとき、1 段目の DC-DCコンバータに電流は 流れない。このとき、1 段目の DC-DCコンバータの出力電圧は 0V となるが、トータルとしての出力電圧は 3.4V でシステム全損が避けられることを確認した。

なお、マルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータに関しては、DC-DC コンバータに含まれる ローサイドおよびハイサイドスイッチを協調動作させる回路設計が重要確認事項であったが、これについては 平成 28 年度中に達成を確認した。上記の同期整流型スイッチ回路を含むマルチノード入力電力パイルアップ 型コンバータにおいて、変換効率 80%以上も確認済みである。本取り組み項目における当初目標は平成 29 年 度中にすべて達成されたため、最終年度となる平成 30 年度は得られた研究成果を取りまとめ国内外の会議等 で発表する。



図 1-④-12 6 段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータ



図 1-④-14 電源一部故障時の6段構成マルチノード入力電力パイルアップ型コンバータの シミュレーション結果

以上、平成29年度の研究開発取組みにより、当該年度の目標を達成する以下の成果を得ることができた。

- H28 年度に 50mm×50mm であった同期整流型スイッチを 35mm×35mm で集積化実装し、DC-DC コン バータの小型化を達成(1 段あたり 60mm×60mm)
- 小型化した DC-DC コンバータで変換効率 80%以上を達成

平成 29 年度の取組み成果を得て、最終となる平成 30 年度の研究開発目標値を、

(1)平成 29 年度までに得られた成果を国内外の会議にて発表

に設定した。以下に平成30年度の実施内容と得られた成果について記載する。

平成29年度までに2段構成のスイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型DC-DCコンバータを作製し、実装面積72cm<sup>2</sup>(1 つの DC-DC コンバータからなる1段構成の回路あたり36cm<sup>2</sup> (=60mm×60mm)に相当)及び電力変換効率80%を達成し、取り組み項目「④スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型DC-DCコンバータの開発」における最終目標値を達成した。平成30年度は、平成29年度までに得られた成果に回路動作解析の過程を加えて国際学会「The 50<sup>th</sup> ISCIE International Symposium Stochastic Systems Theory and Its Applications」および「2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications」で研究成果を発表した。以下、得られた研究成果について報告する。

図1-④-15にn段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータを示す。本回路は、n個の熱電発 電モジュールに対しDC-DCコンバータを1対1で接続した回路である。DC-DCコンバータを用いて熱電発 電モジュールの出力電圧の昇圧と集電を同時に行い、一部の熱電発電モジュールが故障した場合においても システム全体の出力電圧が0Vにならない回路構成を踏襲している。



図 1-④-15 n 段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータ

本回路の回路パラメータは以下のように設定した。

$$R_n = 5[\Omega], \ L_n = 470[\text{uH}], \ C_n = 100[\text{uF}], \ r_n = 8[\text{m}\Omega], \ f = 30[\text{kHz}] \qquad \cdots (1-(4-1))$$

また、解析を簡単化する目的で、以下に示す変数変換式を定義した。

$$i_n = \frac{x_n}{\sqrt{L_n}}, \ v_n = \frac{y_n}{\sqrt{C_n}}, \ t = \sqrt{L_n C_n} \tau, \ R_n = \frac{1}{2\sigma} \sqrt{\frac{L_n}{C_n}}, \ E_n = \frac{1}{\sqrt{C_n}} P, \ r_n = \gamma \sqrt{\frac{L_n}{C_n}} \qquad \cdots (1 - (4) - 2)$$

(1-④-2)式に示す変数変換を用い、本回路の回路方程式を次式に示すように導出した。

$$\frac{dx_n}{d\tau} = \begin{cases} P - \gamma x_n & \text{SW is ON} \\ P - y_n & \text{SW is OFF} \end{cases} \qquad \cdots (1 - (4) - 3)$$

$$\frac{dy_n}{d\tau} = \begin{cases} -2\sigma y_n & \text{SW is ON} \\ x_n - 2\sigma y_n & \text{SW is OFF} \end{cases} \qquad \cdots (1-4)$$

ここで、(1-④-3)式および(1-④-4)式に示すように、(1-④-2)式に示す変数変換を用いることで、回路方程式 に含まれる回路記号が減り、回路ダイナミクスが簡素に記述できていることが分かる。

まず、DC-DC コンバータのローサイドスイッチがオンの状態のとき、回路方程式の解は容易に導出可能であり、次式で定義できる。ここで、 $x_{n0}$ および  $y_{n0}$ は本回路に PWM 信号が印加された瞬間( $\tau = 0$  に相当)における 初期値であることに注意する。

$$x_n(\tau) = \left(x_{n0} - \frac{P}{\gamma}\right)e^{-\gamma\tau} + \frac{P}{\gamma} \qquad \cdots (1 - (4 - 5))$$
$$y_n(\tau) = y_{n0}e^{-2\sigma\tau} \qquad \cdots (1 - (4 - 7))$$

一方、DC-DC コンバータのローサイドスイッチがオフのとき、本回路の回路方程式の解は(1-④-3)式 および(1-④-4)式に示す連立微分方程式を解くことにより次式で定義できる。なお、本解は特性方程式 の解が負となる場合に対応しており、連立微分方程式を解く際に回路パラメータを代入して特性方程式 の解が負となることを確認している。

$$x_n(\tau) = e^{\alpha \tau} (\xi_1 \cos \beta + \xi_2 \sin \beta) + 2\sigma P \qquad \cdots (1 - (4 - 8))$$

$$y_n(\tau) = -e^{\alpha\tau} \left( \left(\xi_2 \alpha - \xi_1 \beta\right) \sin \beta\tau + \left(\xi_1 \alpha + \xi_2 \beta\right) \cos \beta\tau \right) + P \qquad \cdots (1 - (4) - 9)$$

ここで、(1-④-8)式および(1-④-9)式において、 ξ1および ξ2は初期条件より次式で定義した。

$$\xi_1 = \left(x_{n0} - \frac{P}{\gamma}\right)e^{\gamma DT} + \frac{P}{\gamma} - 2\sigma P \qquad \cdots (1 - (4 - 10))$$

$$\xi_2 = -\frac{1}{\beta} \left( y_{n0} e^{-2\sigma DT} + \xi_1 \alpha - P \right) \qquad \cdots (1 - (1 - 1))$$

図 1-④-16 に上記で導出した厳密解を用いて計算した n 段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータの動作解析結果を示す。



図 1-④-16 変数変換前後の解軌道の振る舞い

ここで、(a)は変数変換後の電流・電圧波形であり、(b)は変数変換前の電流・電圧波形である。なお、変数変換 を行わない場合についても同様の手順で厳密解を定義しており、更にはルンゲ・クッタ法を用いた数値解析も 実施し、本回路動作シミュレーションの正当性を多角的に検証した。図 1-④-16 より、変数変換前後で解軌道 の振る舞いの定性的な一致が確認でき、以降の変数変換を用いた解析の妥当性が確認できた。ここで、変数 変換を用いて回路方程式の解および回路動作解析用プログラムを簡素に記述した後、得られた解を再び変数 変換式に代入することで、図 1-④-16 中の(a)に示す解軌道は図 1-④-16 中の(b)に示す解軌道に完全に一致 することに注意する。

図 1-④-17 に解軌道の振る舞いの説明図を示す。DC-DC コンバータのローサイドスイッチがオンのとき、ハ イサイドスイッチはオフで、このときインダクタ電流は増加する。一方、DC-DC コンバータのローサイドスイッチ がオフのとき、ハイサイドスイッチはオンで、このときインダクタ電流は減少する。この動作は回路方程式および 回路方程式の解からも明らかである。



図 1-④-17 解軌道の振る舞いの説明図

図 1-④-18 に Duty 比と DC-DC コンバータへの入力電圧を変化させた際の、インダクタ電流および DC-DC コンバータの出力電圧の分布図を示す。



図 1-④-18 Duty 比と入力電圧を変化させた際の電圧・電流分布図

本図は、Duty 比を 0.1~0.8 の範囲で、DC-DC コンバータへの入力電圧を 0.1V~2.5V の範囲で変化させ、 定常回路動作状態におけるインダクタ電流および出力電圧の最大値を 200 サイクル分データサンプリングし、 その平均値の分布を濃淡で示した図である。例えば、(a)の「Maximum voltage distribution」は DC-DC コンバ ータの最大出力電圧の分布を示しており、Duty 比が大きくなるほど、または入力電圧レベルが高くなるほど DC-DC コンバータの出力電圧値が高くなる傾向にあることが分かる。本結果より、サージ電圧を考慮して DC-DC コンバータの出力電圧の2 倍以上のバス電圧の GaN スイッチングデバイスを用いることが望ましいこと が分かり、この結果を考慮してバス電圧が 30V の GaN スイッチングデバイスを回路実装においては選定してい る。同様に(b)の「Maximum current distribution」はインダクタ電流の分布を示しており、こちらも Duty 比が大き くなるに伴い、または入力電圧レベルが高くなるに伴いインダクタ電流が増加する傾向が確認できる。本研究 取り組みにおいては、最大インダクタ電流が 3A 程度と見込まれるため、インダクタは電流重畳特性を考慮して 最大許容電流 3A の部品を選定した。以上により、回路部品を選定するにあたり、回路パラメータを代入するこ とで回路動作を可視化し、解析可能なツールの数学的枠組みの基礎構築を終え、計算機実装により簡単な動 作確認を行った。これらの結果は、「2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications」 において発表した。今後はより詳細な回路動作解析へと継続的に発展させ、新たな成果が得られた場合は学 術論文に発表する予定である。

一方、図 1-④-19 に実験データ取得装置のセットアップを示す。本取り組み項目においては、平成 29 年度 までに最終目標値を達成しているが、平成29年度までに実施した実験では DC-DC コンバータへの入力電流 値が 0.1A~0.2A と低い値であった。このため、より高い入力電力範囲で本 DC-DC コンバータの電力変換効 率を調査することを目的とし、発展的に追加実験を実施した。なお、平成 29 年度までは 2 段構成のマルチノー ド入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータ(2個の直流電源に2つの DC-DC コンバータを接続した回路) を用いて実験を行ったが、上記の回路動作解析過程において説明したようにマルチノード入力電力パイルアッ プ型コンバータは、各段の DC-DC コンバータで回路パラメータが共通のため、回路動作も各段の DC-DC コ ンバータで同じである。したがって、図 1-④-10 に示す平成 29 年度に作成した 2 段構成のマルチノード入力 電力パイルアップ型 DC-DC コンバータの 1 段目の DC-DC コンバータのみを用いて実験を行った。



図 1-④-19 実験データ取得装置

また、DC-DCコンバータに接続する電源は、熱電発電モジュールの出力特性を模擬した模擬電源を使用し ており、1V以下の電圧レベルで最大 2A 程度を出力する低電圧・大電流出力特性を再現した。 DC-DC コン バータへの入力電圧が高いとき、入力電流は低い値となり、電力変換効率は 90%に達する傾向を確認した。一 方、DC-DC コンバータへの入力電圧レベルが低くなるに伴い、これに反比例して DC-DC コンバータへの入 力電流が高くなり、電力変換効率が低下する傾向にあった。特に、現状の回路では DC-DC コンバータへの入 力電流が 1A 程度に達したとき、電力変換効率が 70%程度まで落ち込むことも確認し、DC-DC コンバータへの 入力電圧が 1V以下かつ入力電流が 1A 以上の低電圧・高電流出力特性を有する熱電発電モジュールを接続 した場合においても、DC-DC コンバータの電力変換効率 80%以上を担保するためには、平成 29 年度までに 開発した DC-DC コンバータから更なる改善が必要であることが明らかとなった。

ここで、図 1-④-5 に注目すると、平成 28 年度に実施した回路動作解析で、スイッチング周波数の高周波数 化は電力変換効率の向上に寄与することを確認できている。そこで、平成 29 年度に回路実装した図 1-④-10 に示すマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータの回路構成はそのままで、ファンクションジェ ネレータを用いて作成するスイッチング周波数を現状の 30kHz から高周波数化し、電力変換効率の向上を図 る取り組みを実施した。ここで、図 1-④-5 よりスイッチング周波数を高周波数化した場合、DC-DC コンバータ の出力電圧が低下する傾向も確認しているため、DC-DC コンバータに接続している電子負荷装置を定抵抗 モードから定電圧モードへ切り替えた。また、Duty 比を変化させることで模擬電源の出力電圧および出力電流 を調整し、DC-DCコンバータへ 1A 以上の入力で 2V の一定出力電圧が得られるよう条件設定して実験を行っ た。表 1-④-2 に実験結果を示す。

	表	電力変換効率	の測定結果	÷
--	---	--------	-------	---

スイッチング 周波数[kHz]	Duty比 [%]	入力電圧 [V]	入力電流 [A]	入力電力 [W]	出力電圧 [V]	出力電流 [A]	出力電力 [W]	電力変 換効率 [%]
120	75	0.50	1.22	0.61	2.03	0.25	0.52	85

表に示すようにスイッチング周波数 120kHz において DC-DC コンバータへの入力電圧 0.5V および入力電流 1.22A となり、電力変換効率 85%を達成することができた。これらの成果を「The 50<sup>th</sup> ISCIE International Symposium Stochastic Systems Theory and Its Applications」において報告した。

以上、平成30年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。 ●回路設計および回路実験に関する研究成果を国際会議にて発表

本成果は、本開発項目の開始時における最終目標値として設定した「コンデンサ・パイルアップ型コンバータ の開発に関わる基礎要素技術開発」を研究開発進捗に合わせて向上的数値目標に改変し、最終的には当初 目標を上回り、実用化に供することのできるレベルに到達することができたと考える。

## 1.1-⑤. コンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発(担当/再委託先:岡山理科大学)

本研究開発項目の開始時における最終目標値は、「変換効率 80%の達成(熱発電ユニットの出力は 0.4~ 0.8V)」、「実装面積 1/2 倍(従前実装回路(回路実装面積 100cm<sup>2</sup>)の 1/2 倍)の達成」、「Si-MOSFET 及び GaN トランジスタを用いたコンデンサ・パイルアップ回路の開発」および「コンデンサ・パイルアップ回路の知財 申請」であった。本研究開発項目では、熱発電の実用化とフェイルセーフ化に重要となる、熱電発電モジュー ルの出力低下時においても、発電システム全体が発電電力出力を保持できるコンバータ回路について取組む。 本コンデンサ・パイルアップ型 DC-DC コンバータ回路は、基本的に、1.1-④で研究開発されたスイッチング方 式マルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータを発展させるため、平成 28 年度は 1.1-④の開発 回路を考慮して、平成 29 年度に研究開発するコンデンサ・パイルアップ型コンバータ基本回路動作の検証を 実施し準備を行った。以下に平成 28 年度の実施内容と得られた成果について記載する。

図 1-⑤-1 にコンデンサ・パイルアップ型コンバータの概念図を示す。本回路は、熱電発電モジュールと DC-DC コンバータをつなぐインターフェース回路(コンデンサ・パイルアップ回路)を含む。熱電発電モジュー ルの出力は、コンデンサ・パイルアップ回路によって集電され、DC-DC コンバータへ入力される。コンデンサ・ パイルアップ回路を用いることにより、複数個の熱電発電モジュールの一部が故障した場合においても、 DC-DC コンバータへの入力電圧が 0V になることはない。さらに、複数個の熱電発電モジュールに対して必要 な DC-DC コンバータは 1 つであり、マルチノード入力電力パイルアップ型コンバータと比べて、システム全体 の回路実装面積の縮小化が期待できる。コンデンサ・パイルアップ回路の回路構成としては、熱電発電モジュ ールに対してダイオードとスイッチが 1 対 1 で並列接続されており、ローサイドおよびハイサイドスイッチおよび これらに並列接続されたダイオードを含むドライバ回路をコンデンサ・パイルアップ回路と呼ぶ。



図1-⑤-1 コンデンサ・パイルアップ型コンバータの概念図

平成 28 年度は、次年度から開始するコンデンサ・パイルアップ型コンバータの回路実装に備え、コンデン サ・パイルアップ回路の回路構成について検討した。図1-⑤-2にコンデンサ・パイルアップ回路の概念図を示 す。まず、電源が正常に動作している場合、コンデンサ・パイルアップ回路に含まれるスイッチングデバイスは オフの状態であり、本回路は DC-DC コンバータの回路動作に影響を及ぼさない。一方、電源が電気的に開 放状態で故障した瞬間、故障した電源に並列接続されたバイパスダイオードを経由して電流が流れるため、 DC-DCコンバータへ入力される電力がゼロになることはなく、システム全損を防ぐ回路構成となっている。一方、 熱電発電モジュールは低電圧・高電流出力特性を有するため、バイパスダイオードによる電圧降下が DC-DC コンバータの電力変換効率に影響を及ぼす可能性がある。そこで、故障検出回路で電源の故障を検出して故 障した電源に並列接続されたスイッチングデバイスをターンオンさせ、ダイオードによる電圧降下を可能な限り 低減させる回路構成を考えた。なお、バイパスダイオードはスイッチングデバイスに含まれるボディダイオード でも代用可能であると見込んでいる。



図1-⑤-2 コンデンサ・パイルアップ回路の概念図

以上、平成28年度の研究開発取組みにより、当該年度の目標を達成する以下の成果を得ることができた。

 熱電発電モジュールが電気的に開放状態で故障時に、システム全損を防ぐコンデンサ・パイルア ップ回路の回路設計を実施

コンデンサ・パイルアップ型コンバータ開発の平成 29 年度の研究開発目標値は、平成 28 年度の準備取組み 成果を得て、

- (1) 変換効率 70%以上の達成(入力:0.5V、~2A の直流電源を使用)
- (2)2電源を有する2段構成回路を72cm2の実装面積で回路実装
- (3) 特許出願に向けたデータ収集

を設定し研究開発に取組んだ。以下に平成29年度の実施内容と得られた成果について記載する。

図 1-⑤-3 に 2 つの熱電発電モジュール、1 つのコンデンサ・パイルアップ回路、1 つの DC-DC コンバータ からなるコンデンサ・パイルアップ型コンバータの回路図を示す。なお、同期整流型スイッチに関しては、平成 28 年度の「④スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータの開発」におい て回路実装した同期整流型 GaN スイッチ回路を踏襲した。



図 1-5-3 コンデンサ・パイルアップ型コンバータ

図 1-⑤-4 に直列接続された電源のうち、ローサイドに位置する電源が電気的に開放状態で故障した場合の コンデンサ・パイルアップ型 DC-DC コンバータの回路動作説明図を示す。まず、電源が正常に動作している 場合、ローサイドの電源からハイサイドの電源を介して DC-DC コンバータへ電流が流れ込む。一方、ローサイ ドの電源が電気的に開放状態で故障したとき、バイパスダイオードが機能してシステム全損を避ける。直後に 故障検出回路で電源の故障を検出し、Highレベルの信号をコンデンサ・パイルアップ回路へ印加し、故障した 電源に並列接続されたスイッチングデバイスをターンオンさせる。平成 29 年度はコンデンサ・パイルアップ回路 の開発初年度であるため、コンデンサ・パイルアップ回路へ印加するスイッチング信号は、ファンクションジェネ レータを用いて生成した。

図 1-⑤-5 に回路実装したコンデンサ・パイルアップ回路を示す。本回路は、ローサイドおよびハイサイドスイ ッチからなる GaN スイッチングデバイスおよびそのドライバ回路を有し、回路面積 35mm×35mm で実装した。 また、図 1-⑤-6 に図 1-⑤-3 に対応するコンデンサ・パイルアップ型 DC-DC コンバータを示す。コンデンサ・ パイルアップ型 DC-DC コンバータは回路面積 80mm×90mm で実装した。これらの回路は現有する回路設計 ソフト Altium Designer で設計し、基板加工機を用いて実装した。なお、本回路は平成 28 年度に開発した「④. スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータの開発」における2 段構成の マルチノード入力電力パイルアップ型コンバータ回路と同等の回路パラメータおよび機能を有する回路であり、 コンデンサ・パイルアップ回路によって集電された電力が DC-DC コンバータへ入力されるため、マルチノード 入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータと比較して、理論上高い電力変換効率を実現できる回路構成で ある。



(a) ローサイドスイッチがオフのとき



(b) ローサイドスイッチがオンのとき

図 1-⑤-4 コンデンサ・パイルアップ回路のローサイドスイッチに並列接続された模擬電源が 開放状態で故障した場合の動作







図 1-⑤-6 回路実装した 2 段構成のコンデンサ・パイルアップ型 DC-DC コンバータ

以下、本回路の実験結果を示す。ここで、回路実験における電源は熱電発電モジュールの出力特性を模擬 し 0.5Vを出力する直流電源を用い、室温で実験を行った。図 1-⑤-7 に実験波形を示す。(a)に示すように、 正常動作時は模擬電源から 0.5V の電圧供給を受け、DC-DC コンバータへの入力電圧は 1V となり、出力電 圧は 2V に昇圧される結果が得られ、昇圧と集電が同時に達成されていることを確認できた。(b)はコンデンサ・ パイルアップ回路のローサイドスイッチへ並列接続された模擬電源の接続線を取り外し、電源の電気的な開放 状態での故障を再現したときの実験データである。このとき、故障した電源が接続されているコンデンサ・パイ ルアップ回路のローサイドスイッチに対して、ファンクションジェネレータを用いて High レベルのスイッチング信 号を印加しスイッチをターンオンさせているため、DC-DC コンバータへの入力電圧が 0.5V、出力電圧が 1V と なり、システム全損を防ぐ機能を確認した。また、表 1-⑤-1 に本回路の電力変換効率の測定結果を示す。室 温で電力変換効率 81.4%を確認した。



図 1-5-7 コンデンサ・パイルアップ型 DC-DC コンバータの実験結果

表 1-⑤-1 コンデンサ・パイルアップ型 DC-DC コンバータの電力変換効率

入力電圧	入力電流	出力電圧	出力電流	変換効率
1.16	0.195	1.907	0.0966	81.4

図 1-⑤-8 にコンデンサ・パイルアップ回路のローサイドスイッチに並列接続された電源が電気的に開放状態となるときの実験データを示す。故障が生じた瞬間、図 1-⑤-4 の(a)に示すように故障した電源に並列接続されたダイオードがオンし、システム全損を防ぐ。その後、図 1-⑤-4 の(b)に示すようにコンデンサ・パイルアップ回路のローサイドスイッチをオンすることでダイオードによる電圧降下を低減できる。電源故障時にコンデンサ・パイルアップ回路のローサイドスイッチがオフのとき、またはオンのときにおいて、ダイオードにかかる電圧を Vdとする。また、コンデンサ・パイルアップ回路を経由して DC-DC コンバータへ入力される電圧を V in とする。図 1-⑤-8 より、コンデンサ・パイルアップ回路のローサイドスイッチがオフのとき、ダイオードによる電圧降下はほぼ観測されないことが分かる。一方、コンデンサ・パイルアップ回路のローサイドスイッチがオフのときの実験データを見ると、ダイオードの電圧降下が80mV 程度生じていることが分かり、電源入力電圧がダイオードの電圧降下の影響で15%程度減り、変換効率の低下に直結することを示唆する結果が得られた。なお、コンデンサ・パイルアップ回路のバイパスダイオードを用いた場合はダイオードによる電圧降下の影響が更に深刻に電力変換効率に影響を及ぼすと考えられる。コンデンサ・パイルアップ回路については、平成 29 年度中に特許出願するに至った。



(a) ローサイドスイッチがオンのとき

(b) ローサイドスイッチがオフのとき

図 1-5-8 (図 1-5-4)に示す端子間電圧簡易測定結果

続いて、回路動作確認のために PSpice を用いた回路シミュレーションを実施したためこの結果を報告する。 図 1-⑤-9 に 6 段構成のコンデンサ・パイルアップ型コンバータの回路図を示す。また、図 1-⑤-10 および図 1-⑤-11 に PSpice を用いた入力電圧波形、出力電圧波形、インダクタ電流波形の回路シミュレーション結果を 示す。ここで、図 1-⑤-10 は各電源が正常に動作している場合のシミュレーション結果である。一方、図 1-⑤ -11 は 1 段目の電源が開放状態となる場合のシミュレーション結果である。電圧波形は図 1-⑤-9 中に示す端 子電圧に対応している。まず、図 1-⑥-10 に注目すると、PWM 信号の High および Low に応じて DC-DC コ ンバータがスイッチングしていることが分かり、一つあたり 0.5V を出力する電源が 6 個分直列接続されているた め、DC-DC コンバータへ 3V が入力され、トータルで 6V の出力電圧が得られ、昇圧と集電が同時に達成され る回路構成となっていることが確認できた。一方、図 1-⑤-11 に示すように、熱電発電デバイスが故障した場合 を想定し、1 段目の電源が電気的に開放状態となった場合においては開放状態になった電源に並列接続され たスイッチがオンし、DC-DC コンバータへ 2.5V が入力されトータルで 5V の出力電圧が得られ、総出力電圧 が 0V にならないことが確認できた。回路シミュレーションを通じて 2 個以上の熱電発電モジュールを有するコ ンデンサ・パイルアップ型コンバータの回路動作確認がとれた。



図 1-⑤-9 6 段構成のコンデンサ・パイルアップ型コンバータ



(a) 電流波形



(b) 電圧波形

図 1-5-10 正常動作時の 6 段構成のコンデンサ・パイルアップ型コンバータのシミュレーション結果







(b) 電圧波形

図 1-⑤-11 1 段目のコンデンサ・パイルアップ回路に並列接続された電源が開放状態で 故障したときの6 段構成のコンデンサ・パイルアップ型コンバータのシミュレーション結果

以上、平成29年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。

- 変換効率 80%を達成(入力:0.5V、~2A の直流電源を使用)
- 2 電源を有する2 段構成回路を72cm<sup>2</sup>の実装面積で回路実装
  - 特許出願

本研究は将来的な応用先として、出力電力が数十~数百ワットに達する熱電発電モジュールへ接続し、従来型エンジン車・発電用エンジン搭載電気自動車等への排気熱発電システムの車載化を目指している。このため、

取組み項目「A. フェイルセーフ熱電池モジュール構造実用化への基礎要素技術開発」において同時並行的に 開発をすすめる0.7W/cm<sup>2</sup>クラスの熱電発電モジュールの出力特性を有する電源を使用して、コンデンサ・パイ ルアップ型コンバータで電力変換効率80%以上の達成を確認しておくことは重要であると考える。0.7W/cm<sup>2</sup>クラ スの電力出力密度を有する熱電発電モジュールにおいては、最大電力点において0.4V~0.8Vで1A程度の出 力が得られるため、この条件下で電力変換効率80%を担保するコンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発と 入力電圧変動(電圧変動に伴い入力電流も変動する)によるDC-DCコンバータの電力変換効率の検証に取り組 むことは重要である。更に、平成29年度はコンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発初年度であったため、 電源が電気的に開放状態で故障した際、ファンクションジェネレータを用いて、コンデンサ・パイルアップ回路へ 印加する信号を作成し、故障検出回路は未実装であった。そこで、平成30年度は、電源の電気的な開放状態 での故障を検出し、コンデンサ・パイルアップ回路へ信号を印加する機能を有する故障検出回路を実装し、動 作確認を行うことを目標に加えた。最後に、排気熱発電システムの車載化を検討するにあたり、48V系バッテリへ の給電や熱電発電モジュールの故障時における出力電圧レベル維持の観点から、熱電発電モジュールに接続 可能なように最適化設計した高昇圧型コンバータの検討を行うことも重要であり、平成29年度までの取り組み期 間において、研究開発が順調に進展し、最終目標が達成可能な見込みがたったため、平成30年度はコンデン サ・パイルアップ回路を接続するよう最適化したコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの開発にも着手し、 Duty比50%で入力電圧の4倍昇圧を目標に追加した。

以上より、最終年度となる平成30年度の研究開発成果目標は、

- (1) 変換効率 80%の達成(0.4V~0.8V を出力する熱電発電モジュールまたは模擬電源を電源に使用)
- (2) 入力電圧の変動による電力変換効率の検証
- (3) 2 電源を有する2 段構成回路を 50cm<sup>2</sup>(従前実装回路(回路実装面積 100cm<sup>2</sup>)の 1/2 倍)の実装 面積で回路実装
- (4) 高昇圧コンバータの回路実装(Duty 比 50%で入力電圧の 4 倍昇圧)

を設定し、研究開発に取り組んだ。以下に平成30年度の実施内容と得られた成果について記載する。

図1-⑤-12にコンデンサ・パイルアップ型コンバータの設計資料を示す。



(a) Schematic図



(b) PCB図と完成イメージ図

まず、回路設計ソフトを用いて、(a)に示すSchematic図を作成した。本回路図は、図1-⑤-3に示す2入力の コンデンサ・パイルアップ型コンバータに対応しており、電源や負荷へ接続するための端子台、同期整流型ス イッチ回路やコンデンサ・パイルアップ回路に接続するためのコネクタ、その他、インダクタ、キャパシタ、ダイオ ードなどによって構成される。また、図中(b)のPCB図は、(a)のSchematic図に示す回路部品やパターンを基板 上へレイアウトした図であり、回路実装面積35mm×70mmでレイアウトし、3D完成イメージ図で回路部品取り付 け後の基板を確認した後、回路実装工程へと移行した。

なお、平成30年度に実施した「④スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型DC-DCコンバータの開発」において、スイッチング周波数を120kHzまで高周波数化することにより、表1-④-2に示すように入力電圧0.5V、入力電流1.22Aで電力変換効率85%を確認できた。他方、スイッチング周波数を高周波数化することでインダクタの小型化が可能となったため、平成29年度に実装した回路からインダクタを75µHの部品に交換した。これに加えて、平成29年度のコンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発においては開発初年度であったため、平成28年度にマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータの開発において用いた実装面積50mm×50mmの同期整流型スイッチ回路を踏襲したが、これを平成29年度に「④マルチノード入力電力パイルアップ型DC-DCコンバータ」の開発取組みにおいて35mm×35mmで回路実装した同期整流型スイッチ回路に置き換えることで、回路実装面積の更なる小型化が可能となった。図1-⑤-13に動作確認用コンデンサ・パイルアップ型コンバータの試作基板を示す。35mm×70mmで基板を実装し、回路素子を取り付けた。

図1-⑤-12 平成29年度に実装した同期整流型スイッチを踏襲した コンデンサ・パイルアップ型コンバータの設計資料



(b) 部品取付後の基板

図1-⑤-13 動作確認用コンデンサ・パイルアップ型コンバータの試作基板

図1-⑤-14に実験データ測定用の回路セットアップを示す。図中のAおよびVの記号は電流計と電圧計を表 しており、デジタルマルチメータを用いて入出力電流および電圧を計測した。まず、電源が正常に動作してい るときの実験結果について報告する。図1-⑥-15に電源が正常に動作しているときに対応する回路セットアッ プを示す。電源が正常に動作するとき、コンデンサ・パイルアップ回路は回路動作に影響を及ぼさないため取 り外している。また、同期整流型スイッチ回路にはファンクションジェネレータを用いてスイッチング信号を印加 しており、同期整流型スイッチ回路や、コンデンサ・パイルアップ回路を駆動させるために12V電源を使用して いる。



図 1-5-14 実験データ測定用回路セットアップ



図 1-5-15 電源が故障していないときの動作確認用回路セットアップ

図1-⑤-16にコンデンサ・パイルアップ型コンバータへの入力電圧を1V、Duty比を50%に固定した場合の実験結果を、図1-⑤-17にコンデンサ・パイルアップ型コンバータへの入力電圧を1V、出力電圧を2Vに固定した場合の実験結果をそれぞれ示す。図1-⑤-16は、抵抗値およびスイッチング周波数を変化させ、コンデンサ・パイルアップ型コンバータの電力変換効率を測定している。また、図1-⑤-17はコンデンサ・パイルアップ型コンバータのDuty比およびスイッチング周波数を変化させ、電力変換効率を測定した結果である。これらの結果より、スイッチング周波数は100kHz以上が電力変換効率の観点から望ましいことが確認できた。本結果を考慮して以降の実験ではスイッチング周波数を120kHzとした。



(a) スイッチング周波数と電力変換効率の関係 (b) 抵抗値と電力変換効率の関係

図1-5-16 電源が故障していないときの実験結果



図1-⑤-17 コンデンサ・パイルアップ型コンバータの出力電圧を2V一定に保ったときの実験結果

平成30年度は、コンデンサ・パイルアップ型コンバータへKELK社製熱電発電モジュールを接続した場合と将 来的な排熱発電システムの車載化を視野に入れた取り組みとして出力電力密度が0.7W/cm<sup>2</sup>クラスの熱電発電 モジュールの模擬電源を接続した場合について、電力変換効率を測定し、目標とする80%以上の達成を目指し た。

まず、KELK社製熱電発電モジュールをコンデンサ・パイルアップ型コンバータへ接続した場合の実験結果について報告する。図1-⑤-18に実験結果を示す。現有する熱試験装置を用い、KELK社製熱電発電モジュールの低温側と高温側に50℃または280℃の温度差を設けて実験を行った。図中には、熱電発電モジュールの出力特性とコンデンサ・パイルアップ型コンバータの電力変換効率の測定結果を示している。まず、温度差が50℃のとき、熱電発電モジュールの最大出力電力は0.065W程度となり、最大電力点における電圧は0.4V、電流は0.15A程度である。最大電力点付近において、電力変換効率90%を確認できたと同時に、コンデンサ・パイルアップ型コンバータへの入力電圧が0.3V以上0.8V以下の範囲で電力変換効率80%以上を確認できた。コンバータへの入力電圧の低下に伴い、入力電流が増加するため、変換効率が低下する傾向も確認できた。温度差280℃の場合においても、同様の傾向であり、目標とするコンデンサ・パイルアップ型コンバータで変換効率80%以上の達成が確認できた。



(b) 温度差280℃

図1-⑤-18 KELK社製熱電池をコンデンサ・パイルアップ型コンバータへ接続した場合の実験結果

ー方、出力電力密度が0.7W/cm<sup>2</sup>程度となる熱電発電モジュールの例として、フラウンフォーファー研究機構 IPM部門製があげられる。本研究課題全体を通して、取り組み項目「A.フェイルセーフ熱電池モジュール構造 実用化への基礎要素技術」および「B.熱電池専用DC-DC電力変換器実用化への基礎要素技術開発」は、同 時並行的に研究開発がすすめられてきたため、平成30年度の時点では出力特性が定性的に一致するフラウン フォーファー社製IPMの模擬電源を構築し、これをコンデンサ・パイルアップ型コンバータへ接続して電力変換 効率を測定した。特に、フラウンフォーファー研究機構IPM部門製のモジュールは、本取組みで開発するMg2Si ユニレグモジュールと、動作温度域、出力特性、発電電力密度の点で競合するモジュールであることから、「A. フェイルセーフ熱電池モジュール構造実用化への基礎要素技術」でのモジュールを模して「B.熱電池専用 DC-DC電力変換器実用化への基礎要素技術開発」を実施することには妥当性があると考える。また、フラウン フォーファー研究機構IPM部門製のモジュールにおいても、モジュール内の一部素子欠損時の全発電機能不 全の問題は同様であるので、平成30年度の取組みで、フラウンフォーファー研究機構IPM部門製のモジュール など外部の物を使用することは、本開発での熱電池専用DC-DCコンバータの適用範囲を広める上で好ましいと 考える。

図1-⑤-19に本模擬電源を接続した場合の実験結果を示す。本模擬電源は、最大電力点において1A以上の出力が得られ、低電圧・大電流出力特性を有する。コンデンサ・パイルアップ型コンバータ回路に接続された 電子負荷により、コンバータの出力電圧を2V一定に保ち、Duty比を変化させて本結果を得た。Duty比を増加さ せることにより、模擬電源から取り出せる電流量が増加し、これに伴い模擬電源の出力電圧は低下する。なお、 Duty比は一般に20%~80%の範囲で設定されるため、この範囲内で実験データを取得した。最大電力点におい て、約84%程度の電力変換効率が確認でき、更に実用が想定される電力利用率95%以上の範囲で最大電力変 換効率90%を達成し、本年度の目標の達成を確認できた。



図 1-5-19 高出力タイプ熱電発電モジュールの模擬電源を用いた場合の実験結果

次に、平成30年度に新たに回路実装したコンデンサ・パイルアップ型コンバータで、熱電発電モジュールが 電気的に開放状態で故障した場合の動作確認を行った。図1-⑤-20に電源が故障しているときの動作確認用 回路セットアップを示す。一例として、図中に示す電源1が電気的に開放状態で故障した場合を想定し実験を 行った。また、コンデンサ・パイルアップ回路には動作確認のためファンクションジェネレータを用いて、電源1 に並列接続されたGaNスイッチングデバイスをターンオンさせるために5Vの信号を印加した。得られた実験結果



図1-5-20 電源が故障しているときの動作確認用回路セットアップ

を図1-⑤-21に示す。コンバータへの入力電圧は電源2から供給される0.5V程度であり、Duty比が50%のため コンバータの出力電圧は入力電圧の2倍の1V程度となっている。ファンクションジェネレータから入力されたス イッチング信号によって、同期整流型スイッチ回路が動作している様子も分かる。また、コンデンサ・パイルアッ プ回路において、電源1に並列接続されたGaNスイッチングデバイスに対してファンクションジェネレータから5V の信号が印加され、スイッチがターンオンし、ダイオードの電圧降下が低減されていることも確認できた。なお、 電源2が電気的に開放状態で故障した場合にも同様に動作確認がとれている。



図1-⑤-21 電源が故障しているときの回路動作波形

一方、平成29年度までの取り組みでは電源の故障時にファンクションジェネレータを用いてコンデンサ・パイルアップ回路へ印加するスイッチング信号を作成していたが、電源の故障を検出し、コンデンサ・パイルアップ回路へ印加するスイッチング信号を生成する機能を有する故障検出回路を実装しておくことは、実用上重要で

ある。そこで、コンパレータをベースとしたシンプルな故障検出回路をコンデンサ・パイルアップ型コンバータへ 実装した。

図1-⑤-22に故障検出回路を接続したコンデンサ・パイルアップ型コンバータの試作回路を示す。図中の(a) は、コンパレータをベースとした故障検出回路の回路図を示している。コンパレータは、電源の両端子間電圧 を監視しており、電源が正常に動作しているときは正の電位となることを検出しLowレベルの信号、電源が電気 的に開放状態で故障したときにはバイパスダイオードに電流が流れることにより電源の両端子間電圧が負の電 位となることを検出しHighレベルの信号をコンデンサ・パイルアップ回路へ印加する機能を実現する。故障検 出回路の動作確認のため、まずは図1-⑤-22(b)に示すようにブレットボードを用いて回路実装し、図 1-⑤-24(c)に示すように図1-⑤-15に示すコンデンサ・パイルアップ型コンバータへ接続し、動作確認を行っ た。

図1-⑤-23に故障検出回路を接続したコンデンサ・パイルアップ型コンバータ試作回路の動作波形を示す。 ここで、(a)は電源が故障していないときの回路動作波形であり、(b)は電源が電気的に開放状態で故障した瞬間の過渡波形である。一例として、電源1の接続線を図1-⑤-22(c)に示すように取り外して電気的な開放状態 を再現した。電源1が正常に動作しているとき、電源1および電源2の出力電圧は0.5V程度であるため、 DC-DCコンバータには1V程度の入力電圧が確認できる。電源1の接続線を取り外した瞬間、電源1に並列接 続されたバイパスダイオードを経由して電流が流れるため、DC-DCコンバータへの入力電圧が0Vになることは ない。一方、電源1の端子間電圧が負となることをコンパレータで検出し、故障検出回路の出力信号がHighレ ベルとなり、コンデンサ・パイルアップ回路のスイッチがターンオンしていることも確認できた。電源1の接続線を 取り外してから、故障検出回路で電源1の故障を検出し、Highレベルの出力信号を生成するまでの時間は 15ms程度であることも確認できた。なお、電源2についても同様に回路動作を確認し、故障検出回路が問題な く動作していることを確認済みである。



(b) 故障検出回路実装写真



(c) 故障検出回路とコンデンサ・パイルアップ型コンバータの接続例

図1-⑤-22 故障検出回路を接続したコンデンサ・パイルアップ型コンバータの試作回路



(a) 電源が故障していないときの回路動作波形



(b) 電源が故障した瞬間の過渡波形

図1-⑤-23 故障検出回路を接続したコンデンサ・パイルアップ型コンバータ試作回路の動作波形

以上より、故障検出回路の動作が確認できたため、故障検出回路を含むコンデンサ・パイルアップ型コンバータの設計開発に着手した。図1-⑤-24に故障検出回路を組み込んだコンデンサ・パイルアップ型コンバータのSchematic図を示す。本Schematic図は、図1-⑤-13に示すコンデンサ・パイルアップ型コンバータをベースに、図1-⑤-22に示す故障検出回路を組み込んだ回路仕様とした。図1-⑤-25はPCB図を示しており、35mm×70mmの回路実装面積でパターン、回路部品をレイアウトした。ここで、PCB図の青色パターンは基板の裏面、赤色パターンは基板の表面の配線である。図1-⑤-26に3D完成イメージ図を示す。







図1-⑤-25 故障検出回路を有するコンデンサ・パイルアップ型コンバータのPCB図と完成イメージ図



図1-⑤-26 故障検出回路を有するコンデンサ・パイルアップ型コンバータの3D完成イメージ図



(a) 回路素子取り付け後の基板



(b) 完成基板

図1-⑤-27 故障検出回路を組み込んだコンデンサ・パイルアップ型コンバータ実装基板


図1-⑤-28 故障検出回路を有するコンデンサ・パイルアップ型コンバータの最終版回路設計図

また、回路実装面積35mm×70mmで実装した回路を図1-⑤-27に示す。最後に、上記のSchematic図、PCB図、 3D完成イメージ図、ガーバーデータなどをベースとした、故障検出回路を有するコンデンサ・パイルアップ型コンバ ータの最終版回路設計図を図1-⑤-28に示す。本回路を用いて回路実験を行い、上記同様の回路動作および回路性能を確認した。

以上より、故障検出器を組み込んだコンデンサ・パイルアップ型コンバータを実装面積50cm<sup>2</sup>以下で回路実装し、 電発電モジュールまたは模擬電源を用いた回路実験で、入力電圧が0.4V~0.8Vの範囲で変動した場合において も変換効率80%以上が保たれ、実用が想定される電力利用率95%以上の範囲で最大変換効率90%を達成したととも に応用を見据えた発展的な取り組みとして、出力電力密度0.7W/cm<sup>2</sup>クラスの熱電発電モジュールの模擬電源を用 いて最大電力点で80%以上の電力変換効率を確認し、コンデンサ・パイルアップ型コンバータにおける年度目標を 達成することができた。

続いて、高昇圧型コンバータの開発について報告する。熱電発電モジュールは低電圧入力特性を有し、また電気的に開放状態で故障するため、昇圧比の高いコンバータに接続するシステム構成を考えておくことが実用上重要であると考えられる。これにより、直列接続する熱電発電モジュールの個数が減り実装面積が低減されるとともに、高昇圧比ゆえに一部の熱電発電モジュールの電気的な開放状態での故障時においても一定の出力電圧を得易くなる。以上の観点から、Duty比50%で入力電圧の4倍昇圧が可能な高昇圧型コンバータをベースとしたコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの回路設計、実装及び動作検証を行った。

図1-⑤-29にコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータを示す。主回路はコイル、コンデンサ、ダイオードによって構成される。スイッチがONのとき、電源からコイルを通ってグランドへ向かう電流経路と、コンデンサC1からダイオードD2、コンデンサC3を通ってグランドへ向かう電流経路がある。この状態ではコイルへ電源が接続されているため磁気エネルギーが蓄積されると同時に、コンデンサC3は蓄電される。一方、スイッチがOFFのとき、電源からコイルを通ってコンデンサC3、ダイオードD3、コンデンサC2およびC1を通ってグランドへ流れる電流経路と、電源からコイルを通ってダイオードD1、コンデンサC1を通ってグランドへ流れる電流経路がある。この状態では蓄えられた磁気エネルギーとコンデンサC3の蓄電エネルギーにより、入力電圧が昇圧される。以上の動作を繰り返して、Duty比50%で入力電圧の4倍昇圧が可能な回路構成である。回路パラメータはC1=C2=100[µF]、C3=10[µF]、L=75[µH]とした。



図1-5-29 コンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータ

図1-⑤-30にコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータのSchematic図を示す。また、図1-⑤-31に本回路の PCB図を示す。本回路は、コンデンサ・パイルアップ回路へ接続可能なように設計しており、本年度は開発初年度で あったため、故障検出回路は含めていない。回路実装面積は、50mm×60mmであり、スイッチングデバイスはSi系 MOS-FETを用いた。図1-⑤-32に回路実装した基板を示す。図中の(a)は基板加工機で50mm×60mmのサイズで 実装した両面プリント基板に回路素子を取り付けた図面である。また、(b)は(a)の基板にコンデンサ・パイルアップ回 路を取り付けた図面である。



図1-⑤-30 コンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータのSchematic図



図1-⑤-31 コンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータのPCB図



(a) 実装基板に回路部品を取り付けた図面



(b) 上記(a)の基板にコンデンサ・パイルアップ回路を取り付けた図面

図1-5-32 回路実装したコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータ

図1-⑤-33に実験用セットアップを示す。スイッチング信号はファンクションジェネレータを用いて作成し、 MOS-FETを駆動させている。また、電源が電気的に開放状態で故障したとき、コンデンサ・パイルアップ回路に含ま れるGaNスイッチングデバイスを駆動させるための信号についてもファンクションジェネレータで生成している。

図1-⑤-34にコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの実験波形を示す。本実験結果は、図1-⑤-33(b)の 状態に対応する結果であり、図1-⑤-29中のE2に対応する電源2が電気的に開放状態で故障した場合を再現して いる。図1-⑤-34 (a)は、故障検出回路が電源の故障を検出できない場合に対応する結果であり、ファンクションジェ ネレータからLowレベルの信号を電源2に並列接続されたGaNスイッチングデバイスを駆動させるためのドライバ回 路へ印加している。このとき、電源1の出力電圧は0.5V程度としているが、電源2に並列接続されたバイパスダイオー ドの電圧降下の影響で、DC-DCコンバータへの入力電圧が0.3V程度となっている。また、Duty比50%の設定でコン バータの出力電圧は1V程度であり、図1-⑤-14などに示す既存回路と比較して昇圧比が2倍程度高いことも確認で きた。一方、図1-⑤-34 (b)においては、故障検出回路で電源2の故障を検出し、Highレベルのスイッチング信号をコ ンデンサ・パイルアップ回路へ印加した場合に対応する実験波形であり、DC-DCコンバータへの入力電圧は0.46V、 出力電圧は1.83V程度であった。以上より、コンデンサ・パイルアップ回路が機能し、一部熱電発電モジュール故障時に高昇圧コンバータがシステム全損を免れることが確認できた。



(a) 電源が正常に動作しているとき



(b) 電源が故障しているとき

° 1.0V					47 47 47 28	Corners I Ne asure 34 Paulus 7 Paulus 7 Nog 4/1047 V Marat 3 Nog 4/1098.1 and Nog 4/1098.1
1.0V					5.V 4.V 2.V 2.V	Measure 5 Results 1 Top 1 Virit 1 Hop 1 Viri
1.0V					4V 3V 2V	Reputs Table Winted T Top Winted V Market Top Winted T Top Winted T Top Winted T Top Winted T Top Winted T Top Winted T
1.0V					4V 3V 2V	Marri I Top u'i 1.047 V Marri J Top u'i 308.1 eeV Marri J Top u'i 6.475 V Marri J Marri Maar
1.0V					14 14	ur 1.047 V Minn 2 Top ur 308.1 erv Minn 3 Top ur 6.475 V Minn 4 Minn
1.0V				at a standard	24 ( ) 24 ( )	Top p/1 308.1 mly Mores Top p/1 6.475 V More More
1.0V					24	Top JC 6.475 V Mean
1.0V				de la dife	24	Mean 4
1.00				dia dia Malan		
	and the second second second			11771111	E I	ar 12,91 m
			and the second se			Top 10-41.01 m
					Contract of the	
0.3V				(II)3/2 11 -/		
				10.01.97	10.	
		_		_		
				PWM信	号	
					and av	
			スイッチ	-ング信号:(	OFF	
0.2 D) here 0.4			Horizontal	Trigger	Acquisition	

図1-⑤-33 コンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの実験用セットアップ

(a) 故障を検出できない状態を再現したときの実験波形



(b) 故障を検出できた状態を再現したときの実験波形

次に、熱電発電モジュールの出力特性を模擬した模擬電源を使用し、本回路の特性を調査した結果を報告する。 図1-⑤-35に現有するする熱試験装置を用いてKELK社製熱電発電モジュールを温度差20℃または温度差200℃ で使用した場合の出力特性計測結果を示す。本特性に基づき、熱電池に抵抗を直列接続した模擬電源を構築した。 図1-⑤-36に模擬電源を用いたコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの実験データ測定用セットアップを示 す。図中のAおよびVの記号は電流計および電圧計を意味しており、デジタルマルチメータを用いてコンバータの入 出力電流および電圧を計測した。図1-⑤-37に本実験で使用した熱電発電モジュールの模擬電源のセットアップ図 を示す。直流電源の出力値および抵抗値を調整することにより、模擬電源を用いて、熱電発電モジュールの出力特 性が再現できる。



図1-⑤-35 KELK社製熱電発電モジュールの出力特性

図1-⑤-34 電源2が電気的に開放状態で故障した場合のコンデンサ・パイルアップ型 高昇圧コンバータの実験波形



図1-5-36 コンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの実験データ測定用回路セットアップ



図1-5-37 熱電発電モジュールの模擬電源のセットアップ

図1-⑤-38にコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの実験結果を示す。ここで、(a)はKELK社製熱電発電 モジュールを温度差20℃で使用した場合の模擬電源の出力特性と、高昇圧型コンバータの特性を示している。模 擬電源の出力特性に注目すると、図1-⑤-35(a)に示す出力特性と定性的に等しいことがわかる。なお、直流電圧源 に直列接続する抵抗値を調整し模擬電源の出力特性を熱電発電モジュールの出力特性により詳細にフィッティン グ可能であるが、本年度は高昇圧型コンバータの開発初年度であったため、模擬電源のフィッティングまでは実施し ていない。また、コンバータの特性においては、出力電圧を2V一定に保ち、スイッチング周波数を1kHzから200kHz まで変化させて電力変換効率を測定している。一方、(b)はKELK社製熱電発電モジュールを温度差200℃で使用し た場合の模擬電源の出力特性と、高昇圧型コンバータの特性を示している。ここで、コンバータの出力電圧は20V 一定に保ち、スイッチング周波数を1kHzから200kHzまで変化させて電力変換効率を測定している。これらの結果か ら、コンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータで入力電圧の4倍昇圧と変換効率75~80%程度の達成が確認でき た。本回路に含まれるダイオードをGaNスイッチングデバイスに置き換えることで、更なる高効率化が期待できる。ま た、故障検出回路の開発を同時並行的にすすめていたため、平成30年度中の本回路への実装は難しかったが、将 来的にはコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータに故障検出回路を組み込むことが十分可能な見通しが立っ た。



(b) 温度差200℃のときの実験データ

図1-⑤-38 模擬電源をコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータへ接続した際の実験結果

以上、平成30年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。

- 熱電発電モジュールまたは模擬電源を用いた回路実験で、入力電圧が 0.4V~0.8V の範囲で変動した場合も変換効率 80%以上が保たれることを確認
- 2 電源を有する2 段構成回路を50cm<sup>2</sup>(従前実装回路(回路実装面積100cm<sup>2</sup>)の1/2 倍)の実装 面積で回路実装
- Duty 比 50%で入力電圧を 4 倍昇圧する高昇圧コンバータを回路実装

本成果は、本開発項目の開始時における最終目標値として設定した熱電発電モジュール故障時の入力損失 を想定したフェイルセーフ機能内蔵 DC-DC コンバータ実現において「変換効率 80%の達成(熱発電ユニット の出力は 0.4~0.8V)」、「実装面積 1/2 倍(従前実装回路(回路実装面積 100cm<sup>2</sup>)の 1/2 倍)の達成」、 「Si-MOSFET 及び GaN トランジスタを用いたコンデンサ・パイルアップ回路の開発」および「コンデンサ・パイル アップ回路の知財申請」を研究開発進捗に合わせて向上的数値目標に改変し、最終的には当初目標を上回 り、実用化に供することのできるレベルに到達することができたと考える。

### 1.2. 研究課題終了後の将来性

我が国のCO2削減目標「2030年に2013年度比26.0%削減、2050年に80%削減」へ向け、運輸部門では、 電動化によるCO2排出削減が必須であるものの、インフラ構築や航続距離問題、リチウム資源不足によるリサ イクル等ライフサイクル・発電エネルギー源での CO2 増を考慮すると、電池のみの BEV のみならず、発電機搭 載 EV (EREV)やプラグインハイブリッド (PHEV)の普及を支援する要素技術開発は 2040 年にかけて急務であ る。本取組み内容と関連する、EREV 系発電用エンジンやハイブリッド系の未利用排気熱源から熱電発電方式 で回生電力化を行い、自動化および補機電動化等により需要が逼迫している車載電力を補うことで、エンジン 軸出力からの発電機を大型化せず排気熱発電システムにより~6%以上の燃費改善(CO2 削減)を期待されて いる現状がある。EREV 系発電用エンジンやハイブリッド系の未利用排気熱発電システム開発は、電動化同様、 欧米に先行されている技術であるため、国内メーカーも開発を急ぎ初めており、本取組み成果が今後車載実 装への開発時に参照される可能性は十分にある。特に材料・モジュール面では、本取組みでの Mg2Si が軽量、 環境低負荷(無毒・資源豊富・地域リスクなし)、十分な発電能力であることから期待が大きい。また、DC-DCコ ンバータについては、これまで熱発電の低電圧・大電流発電対応とフェイルセーフを担保する回路機構が無く、 今回の取組みで必要性と実用性を示すことができたため、今後の熱発電組み込み用途には車載のみならず 開発・応用展開が期待されると考えられる。

## 1.3. 副次的成果や目標を超える成果

本取組みでは、初年度の業務計画作成時に設定した以下の到達目標値に対し、各年度の研究実施状況に 鑑み、より良い成果創出に向けて、一部の目標値はより高い数値目標に改変して実施した。その結果、一部に おいて当初の目標を越える成果をあげることができた。

- A.フェイルセーフ熱電池モジュール構造実用化への基礎要素技術
- ① 環境低負荷型 Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電材料の熱的高耐久化
- 当初目標値を凌駕する成果:
  - ●「動作温度(600℃)大気中での発電素子耐久性3,000時間以上」の初期目標値に対し、「5,000時間以上」 を達成できた。
- 途中からより高い目標値を設定し達成した成果:
  - ●「発電素子単体に金属電極を装填した発電チップ構造で動作温度(600℃)大気中において 3,000 時間 以上」を達成できた。
  - ●Mg2Si 母材料の示す基本熱電発電性能 ZT 値を高い値である 1.1 に設定し、この ZT 値を示す発電素子の作製と動作温度(600℃)大気中の耐久性を実現することに変更し、達成した。
- 発電環境下振動試験機により実環境に近い状態で発電特性評価
  - ●「耐振動を有するユニレグ基本構造モジュールの試作及び加振環境(サイン波 33 Hz、最大加速度 5 G) での 100 時間以上の発電動作検証」の初期目標値に対し、「より過酷な加振環境(サイン波 33 Hz、最 大加速度 10 G)、かつ大気雰囲気中 600℃での発電動作」検証で 100 時間以上の耐久性を達成でき た。
- B. 熱電池専用 DC-DC 電力変換器(コンバータ)実用化への基礎要素技術

④. スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータの開発、および、⑤ コ ンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発

当初目標値を凌駕する成果:

●「熱電発電モジュールに特化したコンデンサ・パイルアップ型 DC-DC コンバータで変換効率 80%」の達成を確認し、さらに実用が想定される電力利用率 95%以上の範囲で「最大電力変換効率 90%」を達成できた。

これら具体的な成果の設定・向上的見直しと年度ごとの達成成果値については、「1.1 研究開始時に設定した 研究目標の達成度」の項において、「平成28年度~平成30年度の期間に本研究課題が設定した研究目標 およびその達成状況」として一覧表にして記載している。

### 1.4. 論文、特許、学会発表等の研究の成果

以下に現時点での成果をまとめる。

【学術論文】 該当ありません

【特許】(1 件) 題 目 :電池装置、故障監視システム、及び電池の電圧出力方法 出願者 :飯田 努,麻原 寛之 出願番号:特願 2018-067841 出願日 :2018.3.30

【学会等発表】(20件)

(招待講演:4件(国際3、国内1)、国際会議:13件、国内学会等:7件)

本取組みでは基礎研究面と応用研究面の両方を内包しているものの、エンジン向けの排気熱発電システム の実現に少しでも早期に寄与できるようにと、関連産業分野が所望する実用化面に寄った開発成果の数値目 標設定を行ったことから、その数値達成に日々多大な研究開発労力を投入することとなってしまった。また、実 用化技術が本取組み成果に含まれることから、成果公表前の知財化検討にもリソースを割く必要も生じ、成果 数値目標実現への緊張した取組みと相まって、公表タイミングの判断がつかぬまま、本取組みに関する学術 的なコア成果に関する学術論文や学会発表の機会を十分に得られなかったことについては現時点において 反省をしている。苦心惨憺して目標値を達成して得た本取組みの結果には、十分に掘り下げた検討ができて いない多くの知見が含まれていることから、一旦プロジェクトが終了したこの時点を境に、これから学術的な面 での実験結果の解析・検討、知財性などを精査し、遅ればせながら、今後継続的・積極的に学術論文・学会発 表を実施していく所存である。

#### 1.5. 研究実施体制とマネジメント

本研究開発は、基礎研究と応用研究を同時に内包する取組みであり、研究代表者が所属する東京理科大 学、および東京理科大学とDC-DCコンバータ研究開発内容に関する委託開発契約を締結した岡山理科大 学において、実施内容を分担し、かつ相互連携する形で進められた。東京理科大学では、本取組みに参画す る教員、サポート教員、研究室に在籍し本取組みに携わる意思を有する大学院生、および熱電発電モジュー ルに関する研究開発内容を実施する研究補助者を雇用し研究開発を実施する体制を構築した。岡山理科大 学においては、参画教員、サポート教員に加えて、本取組みに携わる意思を有する大学生・大学院生により実 施体制を構築した。本研究開発の推進に関しては、研究代表者の統括の下、約2ヶ月に一度、研究開発進捗 会議を実施し、相互に東京理科大学もしくは岡山理科大学のサイトビジットを行うことで、熱電発電モジュール 設計やDC-DCコンバータの設計などにかかる情報共有を実施する連携推進を推進した。また、本取組みで は、申請当初に設定した成果目標について、研究開発内容の進捗が当初計画より進んだ、あるいは研究結果 により、より好ましく設定目標値を高度化する取組みも随時実施してきたが、その際には両大学の研究担当者 代表者間で十分な打ち合わせを実施し、POと協議の上、目標値の再設定を行う取組みも複数回行うことがで き、結果として、当初想定した成果を上回る項目に波及する成果が得られたと感じている。総論的に、本研究 開発を実施するに当たり、構築した研究実施体制は適切であり、本取組みを推進するマネジメントについては 十分に機能する形で実施できたと考えられる。

#### 1.6. **経費**の効率的執行

本取り組みの推進における経費の執行にあたっては、研究開発計画の進捗に合わせて適切に執行すること に十分留意し、推進上、購入品の過不足や誤購入のないような執行に努めた。また、経費執行のコンプライア ンス遵守面については、東京理科大学が作成する公的予算管理マニュアルに従って大学事務局が物品の購 入・検収、管理を実施し経費を執行した。業務委託先の岡山理科大学については、岡山理科大学が作成する 公的予算管理マニュアルに従って執行され、最終的に東京理科大学が経費に執行に関する監査を実施した。

## 2. 平成30年度(報告年度)の実施内容

## 2.1 実施計画

本年度は、本プロジェクト最終年度であり、これまでに得られた段階的な成果をベースに達成すべき最終目標値 実現に向けて研究開発を推進する。以下に、本プロジェクトにおける各実施項目と最終、および年度目標値の一覧 を示す。

実施項目	担当	最終目標値	2016年度 日標値	2017年度 日標値	2018年度(実施年) 日標値	
フェイルセーフ熱電池モジュール構						
造実用化への基礎要素技術						
①環境低負荷型Mg2Si熱 電発電材料の熱的高耐久 化	東京 理科大	●600℃大気中での発 電素子耐久性3,000時 間以上	【目標】 ●600℃大気中での発電 素子耐久性1,000時間以 上	【目標】 ●600℃大気中での発電 素子耐久性3,000時間以 上 ●600℃/100℃温度差で 発電素子の無次元性能 指数ZT値1.0以上 ●キャスト法溶融合成に よる粒界・ボイド生成抑制	【目標】 ●600°C大気中での発 電素子耐久性3,000~ 5,000時間 ●600°C/100°C温度差 で発電素子の無次元 性能指数ZT値1.1以上 ●キャスト法溶融合成 で600°C大気中での発 電素子耐久性500~ 1,000時間	
			【成果】 <u>年度目標達成</u> ●600 <sup>°</sup> C大気中での発電 素子耐久性1,000時間以 上	【成果】(1/22時点未達) ●600℃大気中で発電素 子耐久性3,000時間以上 ●600℃/100℃温度差で 発電素子の無次元性能 指数ZT値0.95(未達項目) ●結晶粒界耐酸化性向 上とポイド抑制	10009319	
②発電用に最適化した高 耐久新型ユニレグ構造モ ジュールの開発	東京 理科大	<ul> <li>温度差環境</li> <li>600°C/100°Cで発電電力密度0.7 W/cm<sup>2</sup></li> <li>ユニレグ基本構造モジュールの試作</li> </ul>	<ul> <li>【目標】</li> <li>●有限要素(ANSYS・Flow Designer)シミュレーション での出力予測モデルの作 製</li> <li>●支持基板なし構造ユニ レグ基本構造モジュール で600°C/100°Cで発電電 力密度0.4W/cm<sup>2</sup></li> </ul>	【目標】 ●600°C/100°C温度差で 熱発電素子2~6本のAIN 基板付き基本ユニットで 発電電力密度0.7 W/cm <sup>2</sup> ●ガラスエポキシ基板の 適用調査	【目標】 ●600°C/100°C温度差 で熱発電素子4~6本 のAIN基板付き基本ユ ニットで発電電力密度 0.7 W/cm <sup>2</sup>	
			【成果】 <u>年度目標達成</u> ●ANSYSとFlow Designer で熱-電流連成解析シミ ュレーションモデル構築 ●支持基板なし構造 600℃/100℃温度差で素 子6本の発電電力密度 0.43 W/cm <sup>2</sup>	【成果】 <u>年度目標達成</u> ●600°C/100°C温度差で 熱発電素子2本のAIN基 板付き基本ユニットで発 電電力密度0.72 W/cm <sup>2</sup> 、 4本で0.68 W/cm <sup>2</sup> ●ガラスエポキシ基板の 耐久性テスト実施し温度 耐久性不十分		
③発電環境下振動試験機 により実環境に近い状態 で発電特性評価	東京 理科大	●JIS D1601-1995加振 環境(サイン波 33, 67 Hz、最大加速度5, 10G)でユニレグ構造モ ジュール発電耐久100 時間以上	【目標】 ●実施準備	【目標】 ●JIS D1601-1995(サイ ン波 33,67 Hz、最大加 速度5,10G)でユニレグモ ジュール構造耐久100時 間以上	【目標】 ●JIS D1601-1995(サ イン波 33,67 Hz、最大 加速度5,10G)で発電 耐久100時間以上	
執言池直用DC-DC言力です	<b>象</b> 器(コン		<ul> <li>▶次年度の実施準備完</li> <li>了</li> </ul>	<ul> <li>ⅠXX未J <u>+皮目標達成</u></li> <li>●構造破壊せずユニレグ</li> <li>モジュール構造耐久100</li> <li>時間以上</li> </ul>		
パータ)実用化への基礎要素	技術					
④スイッチング方式による マルチノード入力電力パイ ルアップ型DC-DCコンバ ータの開発	岡山 理科大	<ul> <li>●変換効率80%の達成</li> <li>(空気中温度差環境~</li> <li>500℃/~50℃で発電する熱電池を電源に使用)</li> </ul>	【目標】 ●変換効率70%以上の達 成(入力:0.5V、~2Aの直 流電圧源を使用) ●ローサイドおよびハイ サイドスイッチをフローティ	【目標】 ●2電源に対して2つの DC-DCコンバータを接続 した2段構成の回路を1段 あたり6cm×6cmで集積 化実装	【目標】 ●変換効率80%の達成 (空気中温度差環境~ 500℃/~50℃で発電 する熱電池を電源に使 用)	

			ング電位状態で協調させ る回路設計 【成果】 <u>年度目標達成</u> ● 2 電源に対して2つの DC-DCコンバータを接続 した2段構成の回路を実 装し、変換効率80%を達成 (入力:0.5Vの直流電圧源 を使用) ●ブートストラップ回路を 用い、同期整流型スイッ チを設計	<ul> <li>小型化したDC-DCコン バータで変換効率70%以 上の達成(入力:0.5V、~ 2Aの直流電圧源を使用)</li> <li>【成果】 <u>年度目標達成</u></li> <li>②2016年度に5cm×5cm</li> <li>であった同期整流型スイ ッチを3.5cm×3.5cmで集 積化実装し、DC-DCコン バータの小型化を達成(1 段あたり6cm×6cm)</li> <li>小型化したDC-DCコン バータで変換効率80%以 上を達成</li> </ul>	●回路データの取得と 学術論文誌への投稿
⑤コンデンサ・パイルアッ プ型コンバータの開発	岡山 理科大	<ul> <li>●変換効率80%の達成 (空気中温度差環境~ 500℃/~50℃で発電 する熱電池を電源に使 用)</li> <li>●コンデンサ・パイルア ップ回路の知財申請</li> </ul>	【目標】 ●実施準備(次年度から 開始する回路実装に備 え、コンデンサ・パイルア ップ回路の回路構成につ いて検討) 【成果】 <u>年度目標達成</u> ●次年度の実施準備完 了(熱電池故障時に電源 入力オープンでシステム 全損を防ぐコンデンサ・パ イルアップ回路の回路設 計を完了)	【目標】 ●変換効率70%以上の達 成(入力:0.5V、~2Aの直 流電圧源を使用) ●2電源を有する2段構成 回路を72cm <sup>2</sup> の実装面 積で回路実装 ●特許出願に向けたデ ータ収集 【成果】 <u>年度目標達成</u> ●変換効率80%を達成 (入力:0.5V、~2Aの直流 電圧源を使用) ●2電源を有する2段構成 回路を72cm <sup>2</sup> の実装面 積で回路実装 ●1/22時点で特許出願 手続き中(データ取得完 了)	【目標】 ●変換効率80%の達成 (空気中温度差環境~ 500°C/~50°Cで発電 する熱電池を電源に使 用) ●高昇圧コンバータの 回路実装(入力電圧の ~4倍昇圧)

過去2年間に実施し到達した開発内容を基礎として、2018年度は、以下の①~⑥の研究開発に取り組み、最終 目標値到達を目指す。

①.環境低負荷型 Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電材料の熱的高耐久化(担当:東京理科大学)

ユニレグ型構造に適した発電特性を有する熱電発電素子の作製のため、Mg<sub>2</sub>Si への添加不純物を選定し、 母素材での不純物種と添加濃度によりゼーベック起電圧、電気伝導率、熱伝導率の最適化制御を行い、熱 的高耐久性と発電能力の指標となる ZT 値の両立を図る取り組みを行う。

●焼結法試料において600℃大気中での発電素子耐久性3,000~5,000時間

●600℃/100℃温度差で発電素子の無次元性能指数ZT値1.1以上

●キャスト法溶融合成試料において600℃大気中での発電素子耐久性500~1,000時間

大気中600℃での発電素子耐久性は2017年度に3,000時間に到達したが、実用上さらに耐久性を向上させる 取り組みを継続して行う。2016~29年度において、発電素子劣化の主要因はMgO生成による酸化劣化であり、 この酸化劣化は素子表面と素子内部の粒界およびボイド(空隙)に存在するMgO周辺から進行することが明確に なった。この粒界およびボイドに存在するMgOは主に作製プロセスである粉砕、焼結工程に起因していることが わかってきたことから、原料粒粉砕工程や焼結条件パラメータ(焼結温度、焼結圧力、焼結時間、昇温レート、素 材粉末粒径)を最適化して、焼結後に素子内部の粒界およびボイドに存在するMgO量を削減した状態で素子を 作製し、発電素子耐久性3,000~5,000時間に挑戦する。

2017年度の取り組みから、実用化の観点を重視し発電能力の指標となるZT値として目標値ZT=1.0以上を設定した。ZT値向上に向けて不純物添加の条件(不純物種、不純物組み合わせ、添加量)を探索することで2017 年度は達成目標値であるZT値1.0にかなり近い値の素子試料が再現よく得られている。同じく2017年度に実施したMg2Siの電子状態に関する精密測定では、半導体材料Mg2Siが熱電発電に優位な金属性の特性を僅かに有することが明らかになり、この特性を人工的な不純物添加により助長することで、熱電発電特性の向上が可能ではないかという期待が得られた。これらの点を考慮して、2018年度は、600℃/100℃温度差で発電素子の無次元性能指数ZT値1.1以上が得られるように、引き続き不純物添加の条件に着目してより高いZT値を得るための取り組みを行う。

なお、Mg<sub>2</sub>Si熱電発電材料の熱的高耐久化に関して、有用な成果が得られた場合には、米国材料工学会 20 18秋季国際会議「Materials Research Society 2017 Fall Meeting」と国際会議「14th Ceramics Congress & 8 th Forum on New Materials」で発表する。 ②発電用に最適化した高耐久新型ユニレグ構造モジュールの開発(担当:東京理科大)

2017年度に製作したAIN基板付きユニレグ構造モジュール(基本構造)では2本素子の際に発電電力 密度0.7 W/cm<sup>2</sup>を達成し、4本素子では発電電力密度0.68 W/cm<sup>2</sup>となっている。最終目標値である発電電力 密度0.7 W/cm<sup>2</sup>を達成する上での、2018年度の目標値は以下の通りである。

●600℃/100℃温度差で熱発電素子4~6本のAIN基板付き基本ユニットで発電電力密度0.7 W/cm<sup>2</sup>

2017年度からユニレグモジュール構造の支持基板として動作温度域で熱的に安定なAIN(窒化アルミニウム)を 導入したが、AIN基板に関する熱源-基板間の熱接合方式、発電素子配置数、基板形状が電熱特性上重要な 要素であることがこれまでの有限要素法計算コード(ANSYSおよびFlow Designer)によるモデリングおよび実モジ ュール製作の取り組みで明らかになった。2018年度は2017年度に得られたユニレグ型発電ユニットに関する熱 電発電特性と伝熱特性に関して、モジュールの実測値と比較し損失要素を抽出して解析することで、AIN基板 付きユニレグ型発電ユニットの高出力化に寄与のあるパラメータ数値幅を絞り込み、実モジュールの製作を実施 する。

なお、ユニレグ構造モジュールの開発に関して、有用な成果が得られた場合には米国材料工学会 2018秋季 国際会議「Materials Research Society 2017 Fall Meeting」で発表する。

③発電環境下振動試験機により実環境に近い状態での発電特性評価(担当:東京理科大)

振動環境下での使用が想定されるユニレグ型発電ユニットにおいて、動作耐久性を低下させる懸念材料の一つとして、振動による発電ユニット構成要素の機械的構造破壊が挙げられる。2017年度は、AIN基板を有する発電モジュールを自動車部品振動試験方法JIS D1601-1995による振動試験機でサイン波 33,67 Hz、最大加速度5,10Gの耐久試験を行い、AIN基板付きユニレグ型発電ユニットが機械的に発電素子マトリックス本体、マトリックス-電極材界面部分、電極材-金属配線接合部分、金属配線-支持基板接合部分で構造破壊が生じないことを確認したことを受け、2018年度は、同様のJIS D1601-1995振動試験後にAIN基板付きユニレグ型発電ユニット発電耐久性が確保されることの実証を行う。2018年度の目標値は以下の通りである。

●自動車部品振動試験方法JIS D1601-1995(サイン波 33,67 Hz、最大加速度5,10G)で発電耐久100時間 以上

(注)振動環境 67Hz は、4 サイクル 4 気筒エンジンが 2000 rpm に相当する

また、分担機関と連携し、再委託によって、以下の④~⑤の研究開発に取り組む。

④スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型DC-DCコンバータの開発 (担当/再委託先:岡山理科大学)

本取り組みにおける重点開発項目は、ローサイドおよびハイサイドスイッチをフローティング電位状態で協調して動作させるドライバ回路の設計開発であり、2017年度までに回路設計・

回路実装を完了し当初目標を概ね達成している。一方、熱電池を接続したDC-DCコンバータはこれまでに報告例が少なく、回路理論の発展ひいては産業応用の観点から得られた研究成果を学術論文誌等で公表しておくことが重要である。

2017年度までに開発したスイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型DC-DCコン バータでは、熱電池出力特性を模擬した直流電圧源(入力:0.5V、~2A)を用いて室温で変換効率8 0%を達成した。2018年度は、直流電圧源を熱電池に置き換え、変換効率80%の達成を目指す。また、 熱電池を接続したDC-DCコンバータに関する研究成果は学術的に価値が高いため、得られた研究 成果をまとめ学術論文を執筆する。以上に鑑み、2018年度の目標値は以下の通りである。

●変換効率80%の達成(空気中温度差環境~500℃/~50℃で発電する熱電池を電源に使用)
 ●回路データの取得と学術論文誌への原稿投稿

回路シミュレーションにおいては、2016年度から温度差環境~500℃/~50℃の真空中で発電する熱電池の 出力特性をモデル化し、回路動作解析を行っている。しかし、熱電池の実際使用環境は空気中であるため、20 18年度は温度差環境~500℃/~50℃の空気中で発電する熱電池の発電電圧をマルチノード入力電力パイル アップ型DC-DCコンバータへ入力し、回路動作確認を行うこととする。ここで、真空中と空気中では熱電池の出 力が異なることが予測され、実験データに基づき空気中における熱電池の出力特性をモデル化する。この空気 中における熱電池の出力特性モデルを用いて回路動作を数値シミュレーションし、回路実験結果とのフィッティ ングを目指す。回路実験おいては2つの熱電池に対して2つのDC-DCコンバータが接続された2段構成のマル チノード入力電力パイルアップ型DC-DCコンバータを実装し、入力電圧波形、出力電圧波形、インダクタ電流 波形を観察するとともに、2016年度から一貫して開発コンセプトに掲げてきたDC-DCコンバータへの入力電圧 の集電と昇圧が同時に達成されていることを確認する。また、1段目のDC-DCコンバータへ接続される熱電池が 故障して熱電池からの入力がオープンになったとき、DC-DCコンバータの総出力電圧が0Vとならないことを確 認することとする。なお、電力変換効率の目標値は80%とする。得られた研究成果をまとめて、学術論文を執筆し、 原稿投稿する。

なお、マルチノード入力電力パイルアップ型DC-DCコンバータの開発に関して、有用な成果が得られた場合 には国際学会「RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing 2019」などで発表する。

(5)コンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発(担当/再委託先:岡山理科大学)

コンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発において、2017年度までに当初最終目的の1V未満の熱電 発電電圧入力に対して80%以上の変換効率の達成を完了している。また、取り組み項目④で開発した基礎 要素技術(ローサイドおよびハイサイドスイッチをフローティング電位状態で協調して動作させるドライバ回路)を 応用し、熱電池とDC-DCコンバータをつなぐインターフェース回路(コンデンサ・パイルアップ回路)を実装し、 2017年度時点で特許出願手続き中にある。このコンデンサ・パイルアップ回路を有するDC-DCコンバータ をコンデンサ・パイルアップ型コンバータとする。

熱電池の出力は、コンデンサ・パイルアップ回路によって集電され、DC-DC コンバータへ入力される。コン デンサ・パイルアップ回路を用いることにより、複数個の熱電池の一部がオープンで故障した場合においても、 DC-DC コンバータへの入力電圧が 0V になることはない。さらに、複数個の熱電池に対して必要な DC-DC コンバータは1 つであり、マルチノード入力電力パイルアップ型コンバータと比べて、システム全体の回路実 装面積の縮小化が確実に期待できる。2018 年度はコンデンサ・パイルアップ型コンバータの集積化回路実 装を飛ばして、当初計画をさらに発展させ、コンデンサ・パイルアップ型高昇圧 DC-DC コンバータの開発に 取り組む。2018 年度の目標値は以下の通りである。

●変換効率80%の達成(空気中温度差環境~500℃/~50℃で発電する熱電池を電源に使用) ●高昇圧コンバータの回路実装(入力電圧の~4倍昇圧)

2017年度に開発したコンデンサ・パイルアップ型コンバータでは、熱電池出力特性を模擬した直流 電圧源(入力:0.5V、~2A)を用いて室温で変換効率80%を達成した。2018年度は、直流電圧源を熱 電池に置き換え、変換効率80%の達成を目指す。また、2017年度までに開発したDC-DCコンバータ は入力電圧を~2倍程度に昇圧する回路構成であったが、~0.5V程度の低電圧出力特性を有する熱 電池を接続するコンバータとしては、高昇圧比の回路構成が望ましい。そこで、複数のコンデンサを用 いて入力電圧の~4倍程度の高昇圧比を実現可能なDC-DCコンバータを実装する。なお、電源には 熱電池の出力特性を模擬した(入力:0.5V、~2A)直流電圧源を用い、コンデンサ・パイルアップ回路 を経由して、この高昇圧DC-DCコンバータへ入力電圧を供給することとする。

コンデンサ・パイルアップ型コンバータおよびコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータにおいては、DC-D Cコンバータへの入力電圧の集電と昇圧が同時に達成されていることを確認する。また、DC-DCコンバータへ接 続される熱電池が故障して熱電池からの入力がオープンになったとき、DC-DCコンバータの総出力電圧が0Vと ならないことを確認することとする。

なお、コンデンサ・パイルアップ型コンバータおよびコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの開発に関して、有用な成果が得られた場合には国際学会「International Conference on Applications in Nonlinear Dyn amics 2018」などで発表する。

- 荷型Mg2Si 4月 5月 6月 7月 8月 9月 10月 11月 12月 1月 2月 3月
- ① 發電稅費 荷墅服勢 鷻夁翹鼄

⑥プロジェクトの総合 構理 熱 プロジェクト全体の 養弱の なとしつつ円滑に運営していくため、運営委員会や技術検討会の開催等、参画各 機関の連携・調整に読んし

特に、プロジェク全部電離をお状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、必要に応じて調査或いは外部有識 者を招聘して意見を思想してごとしてロジェクトの推進に資する。

と篙構奠 薪堂크三 2.2 研究実施日程 ③ 化の構発 発電環境

業務項目	髡	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
③ 発電環 ①環境低負荷型 <b>は暴</b> 発電材料の熱的高 <b>振援は</b> 移重な	電電	л •	ニレク	ブ型構	造(こ)	適した	熱電多	轮電素	子の1	乍製と	性能言	平価	•
電精 ②発電用に最適化 一での 新型ユニレグ構造ででの 開発 価グ方	新久の発売の	•	600°C,	/100°C	温度	差環均	にお	ける素	<b>热</b> 電発	電素子	の性	能評価	<u> </u>
③発電環境下振動誘撃機 り実環境に近い状態にある 特性評価 れ分子	たまでし	•	ł	辰動試	験機を	月い	た発電	特性	と劣化	過程の	)調査		-
④スイッチング方式ビメオ チノード入力電力バイル 型DC-DCコンバー	開レの発	•				成果	取りま	まとめ					
5 スンデ 5 スンデ 5 スンデ 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	あイ型シゾ	▲ 高	回路 昇圧型	実装と 回路討	性能診 と計	平価	<b>→</b>	昇圧	型回路	実装と	:性能	評価	
元争9 <u>墾コン</u> ⑥プロジェクトの総合的対称 発	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·												

## 2.3 研究成果の説明

当該年度における成果の目標及び研究の方法

本年度は、本プロジェクト最終年度であり、これまでに得られた段階的な成果をベースに達成すべき最終目標値 実現に向けて研究開発を推進する。以下に、本プロジェクトにおける各実施項目と最終、および年度目標値の一覧 を示す。

実施項目	担当 H30年度 目標値							
フェイルセーフ熱電池モジュール構造実用化への基礎要素技術								
①環境低負荷型Mg2Si熱電発電 材料の熱的高耐久化	東京理科大	【目標】						

	●600℃大気中での発電素子耐久性3,000~5,000時間 ●600℃/100℃温度差で発電素子の無次元性能指数ZT値1.1以上 ●キャスト法溶融合成で600℃大気中での発電素子耐久性500~1,000時間
	【成果】 <u>年度目標達成</u>
	●600℃/100℃温度差で発電素子の無次元性能指数ZT値1.10の発電素子で、600℃大気 中の発電素子耐久性5,000時間に到達、電極付き素子では3,000時間に到達 ●溶融合成試料で600℃大気中の素材耐久性は500時間に到達、ZT値は1.01
	【目標】
京理科大	●600℃/100℃温度差で熱発電素子4~6本のAIN基板付き基本ユニットで発電電力密度0.7 W/cm <sup>2</sup>
	【成果】 <u>年度目標達成</u>
	●600℃/80℃温度差で熱発電素子6本のAlN基板付きユニレグモジュール基本ユニットで発 電電力密度 0.72 W/cm <sup>2</sup> に到達、600℃/ 100℃換算で0.706W/cm <sup>2</sup> を得た
	【目標】
京理科大	●JIS D1601-1995(サイン波 33, 67 Hz、最大加速度5, 10G)で発電耐久100時間以上
	【成果】 <u>年度目標達成</u>
	●発電環境600℃/80℃においてサイン波33 Hz、加速度10 G構造破壊せずユニレグモジュ ール6本構造の耐久性100時間を確認
	●素ナ剥離、モンユール構造の機械的破壊は製作工程依存、抵抗务化は軽微
バータ)実用化	こへの基礎要素技術
	【目標】
山理科大	●H29年度までに得られた成果を国内外の会議にて発表
	【成果】 <u>年度目標達成</u>
	●H29年度までに得られた成果を国内外の会議にて発表
	【目標】
山理科大	<ul> <li>●変換効率80%の達成(0.4V~0.8Vを出力する熱電発電モジュールまたは模擬電源を電源に使用)</li> <li>●入力電圧の変動による電力変換効率の検証</li> <li>●2電源を有する2段構成回路を50cm<sup>2</sup>の実装面積で回路実装(従前実装回路(回路実装面積100cm<sup>2</sup>)の1/2倍)</li> <li>●高昇圧コンバータの回路実装(入力電圧の4倍昇圧)</li> </ul>
	【成果】 年度目標達成
	●熱電発電モジュールまたは模擬電源を用いた回路実験で、入力電圧が0.4V~0.8Vの範 囲で変動した場合においても変換効率80%以上が保たれ、実用が想定される電力利用率95% 以上の範囲で最大変換効率90%を達成 ●2電源を有する2段構成回路を49cm <sup>2</sup> の実装面積で回路実装(従前実装回路(回路実装面 積100cm <sup>2</sup> )の1/2倍)
	京理科大 京理科大

# ①. 環境低負荷型 Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電材料の熱的高耐久化(担当:東京理科大学)

平成 29 年度の取組み成果を得て、最終となる平成 30 年度の研究開発目標値は、

- (1). 600℃/100℃温度差で発電素子の無次元性能指数 ZT 値 1.1 以上の発電素子において、
   600℃大気中での発電素子耐久性 3,000~5,000 時間
- (2). キャスト法溶融合成で 600℃大気中での発電素子耐久性 500~1,000 時間

を設定し研究開発に取組んだ。以下に平成30年度の実施内容と得られた成果について記載する。

平成29年度最終盤に得られた、ZT 値~1.1を実現する際に調合した添加不純物であるSb 添加量0.16 at% とZn 添加量0.16 at%の原料試料を基礎として、平成29年度に実施した高性能 Mg2Si 作製プロセスと同様の 原料合成、粉末化、放電焼結ペレット作製、発電素子切断、電極形成を実施し、再現性を担保しながらの環境 で、本年度の実験に使用する発電素子製作を実施した。図2-①-1 に事前に溶融合成法により製作した Mg2Si 原料を、粉砕して放電焼結法により作製した Mg2Si 焼結ペレットの外観写真、および光学顕微鏡による表面形 態写真と、アルキメデス法により測定した相対密度値を示す。添加不純物のSb および Zn の量が0.16 at%、0.5 at%ともに良好な焼結ペレットが得られており、得られた相対密度値からも緻密体であると言える。基本的に、平 成30年度の研究開発実験においては、図2-①-1 に示す焼結試料と同じ条件で作製されたペレットから発電 素子を得ている。

図 2-①-2 に作製した Mg<sub>2</sub>Si 焼結ペレットの粉末 X 線回折で得られた回折スペクトルを示す。参考として、焼結に用いた溶融合成原料、および比較参考となる異なる不純物濃度(0.5 at%)試料の測定結果も合わせて示す。 Mg<sub>2</sub>Si は、プロセス中において Mg<sub>2</sub>Si が局所酸化により MgO に変化することが主な劣化形態であるが、粉末 X 線回 折分析結果に示される通り、焼結に使用する粉末化した Mg<sub>2</sub>Si 原料および焼結された Mg<sub>2</sub>Si 試料ともに添加不 純物量 Sb、Zn 0.16 at%の試料では MgO の生成は軽微なレベルと判断できる。今回用いている Mg<sub>2</sub>Si 原料は、 溶融原料合成時に生成しやすい金属 Mg の残留量を抑制することで、原料自体の組成に起因する MgO 生成 酸化劣化を十分に抑える製造工程を経ているものの、~25 µ m サイズの粉末化と粉末原料を焼結する際の酸 素を完全に遮断できない環境下における高いプロセス温度(800~900℃)の影響で、若干の MgO 生成は通常 観測される。しかしながら、添加不純物量 Sb、Zn 0.16 at%の試料で観測された MgO の生成レベルは、ある程 度低く抑えられているという判断の下、本年度の試料作製に用いる標準環境とした。

添加濃度	Sb0.16at% Zn0.16at%	Sb0.5at% Zn0.5at%
外観写真		
光学顕微鏡 写真	<mark>,100 μm</mark> ,	100 μm
相対密度	97.3%	98.2%

図 2-①-1 放電焼結法により作製した Mg2Si 焼結ペレット (外観写真、光学顕微鏡による表面形態観察、アルキメデス法による相対密度値)



図 2-①-2 作製した Mg<sub>2</sub>Si 焼結ペレットの粉末 X 線回折分析結果 (溶融合成原料、比較参考となる異なる不純物濃度試料などの結果を含む)

図2-①-1に示した焼結ペレットから発電素子を切り出し、その後の保護膜形成による耐酸化性向上取り組み に用いた。図2-①-3に Mg<sub>2</sub>Si 発電素子への保護膜形成プロセスの模式図を示す。



図 2-①-3 Mg<sub>2</sub>Si 発電素子への保護膜形成プロセスの模式図

Mg<sub>2</sub>Siの酸化物系保護膜を形成するための薬液へ発電素子形状試料をディップコート法により浸漬させ、その後に乾燥(10min)、焼成(700℃、1時間、除冷)するプロセスを最適化して実施した。平成 30 年度は、保護膜のコーティングする際に、Mg<sub>2</sub>Siの熱発電素子としての耐久特性を評価するために、Mg<sub>2</sub>Si 母材のみと、Ni 電極付き Mg<sub>2</sub>Si 発電素子の2 種類に実施した。その後、保護膜を形成した試料を、大気雰囲気中 600℃の耐久性熱処理試験にかけた。図 2-①-4 に Mg<sub>2</sub>Si 発電素子母材のみの熱処理耐久試験結果を示す。Mg<sub>2</sub>Si 発電素子母材については、平成 29 年度に 3,000 時間の耐久試験で表面保護の実績が得られていたことから、平成 30 年度は 3,000 時間を上回る試験を実施したところ、図 1-①-16 の熱処理後に示すように今回試験を実施した 上限値である 5,000 時間までの耐久性が確認できた。



図 2-①-4 Mg<sub>2</sub>Si 発電素子母材のみの熱処理耐久試験結果

図 2-①-5 は、保護膜の付いた Mg<sub>2</sub>Si 発電素子と保護膜界面の電子顕微鏡写真と元素分析結果を示す。この分析結果では、Mg<sub>2</sub>Si 発電素子と保護膜界面部分における元素の相互拡散が顕著に起こったという形跡は見られず、600℃で 5,000 時間の熱処理試験後も Mg<sub>2</sub>Si 発電素子形成した酸化物系保護膜からは劣化要因となりうる拡散はなかったと考えることができ、当該保護膜は Mg<sub>2</sub>Si 発電素子に有効が出るということがわかった。



図 2-①-5 保護膜の付いた Mg<sub>2</sub>Si 発電素子と保護膜界面の電子顕微鏡写真と EDX 元素分析結果

他方、Ni 電極付き Mg<sub>2</sub>Si 発電素子に保護膜を形成した試料については、3,000 時間程度までの耐久試験で は、母材のみの熱処理耐久試験結果と同様に耐久性を有していると判断できる状態を保っていたが、3,000 時 間を越えるあたりから、図 2-①-6 の Ni 電極付き Mg<sub>2</sub>Si 発電素子に保護膜を形成した試料の熱処理耐久試験 結果に示すように、一部の発電素子において Ni 電極部の剥離にかかる劣化が観測された。Ni 電極付き Mg<sub>2</sub>Si 発電素子に保護膜を形成した試料の Ni 電極一Mg<sub>2</sub>Si 界面部分について、図 2-①-7 に示す電子顕微鏡写真 と EDX 元素分析を行ったところ、熱処理後の試料においては Ni 電極一Mg<sub>2</sub>Si 部分に一部空隙を生じている 試料が見られた。この空隙部は、熱処理の進行とともに図 2-①-7 の右側の列に示す酸素(O)濃度の増加が見 られ、MgO が生成されると考えられる。MgO は熱膨張率が大きいことから、長時間の熱処理に伴いその生成量 が増えることにより Ni 電極一Mg<sub>2</sub>Si 界面の劣化、すなわち Ni 電極の剥離につながると考えられる。



図 2-①-6 Ni 電極付き Mg<sub>2</sub>Si 発電素子に保護膜を形成した試料の熱処理耐久試験結果



図 2-①-7 Ni 電極付き Mg<sub>2</sub>Si 発電素子に保護膜を形成した試料の 電極--Mg<sub>2</sub>Si 界面部分の熱処理耐久試験結果の電子顕微鏡写真とEDX 元素分析

平成 30 年度は、前年度までに検討したキャスト型素材合成法による Mg2Si 溶融合成条件を元にして試料の 作製を実施した。この時点で、キャスト型素材合成プロセスの再現性を完全に確保できたという状況ではなく、 作製される試料には形状の個体差や特性値に偏差が見られるものの、本年度が最終年度であることから、同 プロセスの最適化を指向しつつ、目標値の達成に向けた取組みを行った。図 2-①-8 はキャスト型素材合成法 により作製した Mg2Si の基礎熱電特性をまとめたものである。現時点では、合成試料の切り出し部位により若干 の組成偏差があることに起因していると考えられる熱電特性の差が見られる。しかしながら、複数作製した試料 においていくつかに関しては、図 2-①-8 に示すように ZT 値 1.00 を上回るものが得られている。現在の環境に おいて得られるキャスト型素材合成法による Mg2Si 溶融合成試料の ZT 値は 0.9~1.0 程度となっているが、こ の程度の特性を有する発電素子試料であれば、実用使用に求められる性能を実現できると考えられることから、 平成 30 年度のキャスト型素材合成法試料にかかる達成目標指標である耐久性試験実施については、当該の Mg2Si 溶融合成試料を用いて行うこととした。



図 2-①-8 キャスト型素材合成法により作製した Mg2Siの基礎熱電特性

図 2-①-9 にキャスト型素材合成法により作製した Mg<sub>2</sub>Siの保護膜未塗布試料における耐久試験結果を示す。 上述のように、現時点で部位により組成ムラなどの見られる溶融合成試料状態ではあるが、適切な部位を切り 出し表面加工(鏡面)した複数試料に 500 時間の耐久性試験後に耐酸化性を有するものが見られた。本来、目 標達成を成果としてあげるには再現性の担保が重要ではあるが、現時点ではその状況には至っていない。本 取組みで扱ってきた限り、キャスト型素材合成法の育成条件は、現状、添加する不純物の量によりかなり異な る熱環境などが必要となり、必要とされるパラメーターの制御性を十分に確保できていないため、本件に関して は今後、引き続き取り組んでいく予定である。



図 2-①-9 キャスト型素材合成法により作製した Mg<sub>2</sub>Siの 保護膜未塗布試料における耐久性

以上、平成30年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。 ●600℃/100℃温度差で発電素子の無次元性能指数ZT値1.10を示す発電素子で、600℃ 大気中の発電素子耐久性5,000時間に到達、電極付き素子では3,000時間に到達 ●溶融合成試料で600℃大気中の素材耐久性は500時間に到達、ZT値は1.01

本成果は、本開発項目の開始時における最終目標値として設定した「600℃大気中での発電素子耐久性 3,000時間以上」を研究開発進捗に合わせて向上的数値目標に改変し、最終的には当初目標を上回り、実用 化に供することのできるレベルに到達することができたと考える。

## ②発電用に最適化した高耐久新型ユニレグ構造モジュールの開発(担当:東京理科大)

平成 29 年度の取組み成果を得て、最終となる平成 30 年度の研究開発目標値は、

(1). 600℃/100℃温度差で熱発電素子 4~6本の AlN 基板付き基本ユニットで発電電力密度

 $0.7 \text{ W/cm}^2$ 

という実用化に必要とされる設定し発電電力密度の数値設定を行い研究開発に取組んだ。以下に平成 30 年 度の実施内容と得られた成果について記載する。

本取組みにおいては、まず、ユニレグ型熱電発電モジュール構造での伝熱・熱発電特性を詳細に解析する 有限要素シミュレーション環境を(株)アドバンスドナレッジ研究所製の FlowDesigner を用いて構築した。図 2-②-1 に有限要素計算シミュレーションに用いる熱発電モデルを示す。平成 29 年度までの取組みでは熱電 発電モジュールの動作時に生じる物理的効果のうちゼーベック効果とジュール発熱を取り入れただけであった が、より制度を確保するために、平成 30 年度の取組みではペルチェ効果およびトムソン効果の考慮をシミュレ ーション・アルゴリズムに取り入れた。これをベースとしてシミュレーションによる伝熱特性および発電特性値を 算出し、製作したユニレグ型モジュールでの精密伝熱・熱発電計測値と比較しながらコード化したアルゴリズム モデルの修正を実施して、発電モジュールの計算値と実測値の整合性を高める取組みを実施した。

図 2-2-2 は、平成 30 年度に試作するユニレグ型熱電発電モジュールの構成部材要素を示す。これまでに 「①. 環境低負荷型 Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電材料の熱的高耐久化」において研究開発してきた Mg<sub>2</sub>Si 熱発電素子、素 子間配線用金属部品、電気的接合用金属ペースト、配線パターンをメタライズ処理した AIN モジュール基板、 熱源/冷却源と発電モジュールとの熱接合シートなどの構成要素について、適切にコードに取り込んだ。他方、 平成 29 年度までに初期試作を実施した6本素子ユニレグ型発電モジュールについては、これまでの作成にか かる知見や問題点に改良を加えた仕様で試作した6本素子ユニレグ型発電モジュールを図 2-2-3 に示す。



図 2-2-1 有限要素計算シミュレーションに用いる熱発電モデル



図 2-2-2 最終年度に試作する6本素子ユニレグ型発電モジュールの構成部材要素



図 2-2-3 平成 30 年度に試作した 6 本素子ユニレグ型発電モジュールの外観

試作した6本素子ユニレグ型発電モジュールを、図2-2-4の模式図に示すような出力特性測定条件で、各温度差環境下における発電特性の精密測定を(株)アドバンス理工社製 PEM-2を用いて行なった。



図 2-2-4 試作した6本素子ユニレグ型発電モジュールの出力特性測定状況を示す模式図と 精密測定に用いた(株)アドバンス理工社製 PEM-2

素子本数およびユニレグ型構造の構成を変え試作したモジュールについての発電特性値と、同構造をシミュ レーション上に構築し計算したユニレグ型モジュール各構造箇所における詳細な電圧、電流、熱流の値を基 に算出された発電量、熱損失の特性値を比較検討し、実モジュールとシミュレーションモデルの差異箇所や数 値の不一致などについて、モジュール製作精度や構造改変、およびシミュレーションアルゴリズムの改変調整 を繰り返し実施した。その結果、本取組みが対象とするユニレグ型発電モジュールの動作環境下について実測 値と計算値の整合性が確保できるようになった。一例として、作製したシミュレーションモデルによる 6 本素子ユニ レグ型発電モジュールの各構成要素における発生熱量と損失熱量の計算結果を図 2-②-5 に示す。



図 2-2-5 シミュレーションモデルによる6本素子ユニレグ型発電モジュールでの局所熱量の詳細

シミュレーション計算値と実測値の整合要素探索取組みと、シミュレーションによりあぶり出された損失ポイントの改良、ならびに、モジュール製作精度の向上などの各種項目やプロセスの改善取組みを複数実施し、試作した Mg<sub>2</sub>Si ユニレグ型熱電発電モジュールのインライン型 6 本基本構造ユニットについて、本研究開発での 最終的な発電特性測定を実施した。当該測定においては、冷却側の温度調節機能が不調で、本来 100℃で 行うべきところ、81℃上限での実施となり、モジュールに印加される温度差は 519℃になってしまったが、表 1-②-4 に示す発電特性を得ることができた。

まず、シミュレーション計算モデルと実測値との比較によるモデルの検証について検討する。表 2-②-1 に示 すように、改良され精度の上がったシミュレーション計算値では、実際の測定で用いた温度差 519℃の印加さ れた熱電発電モジュールの発電電力密度は平成 29 年度作製モデルより若干向上し0.76 W/cm<sup>2</sup>となっている のに対し、得られた出力は0.72 W/cm<sup>2</sup>で、実測値と計算値の間に依然として差異があり、整合率としては95 % を得る結果となった。この数値から考えるに、本取組みだけではまだ内包できていないあぶり出しの十分でな い要素、すなわち、モデル内に組込まれていない実測部での損失要因などがあることは明らかであり、発電モ ジュール製作、使用部材、精密測定環境、シミュレーション組み込み要素ならびにアルゴリズムのさらなる検討 であることが示された結果でもあると言える。この点については、平成 30 年度の結果を踏まえて、本取組みの 期間が終了した後も引き続きシミュレーション計算値と実測値の整合要素探索取組みを実施していきたいと考 えている。

本取組み達成目標値の一つである発電電力出力密度値 0.7 W/cm<sup>2</sup> について考えると、平成 30 年度の最 終ユニレグ型熱電発電モジュール 6 本ユニット発電特性測定では、達成目標値測定条件の高温度側 600 ℃、 低温度側 100 ℃ (温度差 500 ℃)に対して、高温度側 600 ℃、低温度側 81 ℃(温度差 519 ℃)の条件での測定 となってしまった。一般的に、熱電発電素材・発電モジュールでは、印加される温度差が大きいほど発電量が 増えることから、今回目標達成条件温度差値より 19 ℃大きな温度差環境での測定となっていることから、発電 量が過大に評価されていることについて検証・補正する。本取組みでは平成 30 年度に作製したシミュレーショ ン計算環境の精度および実測値との一致率を向上し 95 %を得ることができた。この一致率の向上には、さらな る取組みが必要であるが、熱電発電モジュールへの印加温度差に依存する貫通熱量等の解析では変化分の 比率についてはある程度以上の精度が得られているものと考えられると仮定し、定温側環境を 100℃に補正し て印加温度差 500 ℃の場合について発電量を算出したところ、1,746 mW となり、発電電力出力密度値 0.706 W/cm<sup>2</sup> を得た。この結果をもとにすると、本取組み達成目標値の一つである発電電力出力密度値 0.7 W/cm<sup>2</sup> に到達することができたと考えられる。

温度差/℃	温度差/℃   Voc  R (mV) (mΩ)		Isc (A)	Pmax (mW)	P <sub>max</sub> /A (W/cm²)	実測Pmax/解析 Pmax(%)	
00.0	解析	45	17.5	2.57	28.92	0.01	50
60.2	実測	38.3	21.4	1.79	17	0.0069	29
270	解析	274	21.7	12.6	864	0.35	04
378	実測	258.4	23.0	11.2	727	0.295	04
410	解析	340	24.6	13.8	1174	0.45	04
419	実測	331.3	25.0	13.3	1100	0.446	94
F10	解析	448	26.8	16.8	1876	0.76	05
519	実測	437.7	27.0	16.3	1780	0.72	32

表 2-2-1 実測値と計算値の比較

以上、平成30年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。

●600℃/80℃温度差で熱発電素子 6 本の AIN 基板付きユニレグモジュール基本ユニットで 発電電力密度 0.72 W/cm<sup>2</sup>に到達

本成果は、本開発項目の開始時における最終目標値として設定した「温度差環境 600℃/100℃で発電電力密度 0.7 W/cm<sup>2</sup>」および「ユニレグ基本構造モジュールの試作」に到達することができたと考える。

## ③発電環境下振動試験機により実環境に近い状態での発電特性評価(担当:東京理科大)

最終となる平成30年度の研究開発目標値は、

(1). JIS D1601-1995(サイン波 33、67 Hz、最大加速度 5、10G)で発電耐久 100 時間以上 という実用化に必要とされる高温度発電環境下での耐久性に必要な目標数値設定を行い研究開発に取組ん だ。以下に平成 30 年度の実施内容と得られた成果について記載する。

本年度は、まず本試料ステージの高温度部 600℃を実現するために熱電発電モジュールを装填するステージ機構を改良した。この改良により、試料ステージ高温度部を 600℃に保った環境で JIS D1601-1995 に基づくサイン 波 33、67 Hz、最大加速度 5、10G を印加できる発電耐久試験を実施できることとなった。

図 2-③-1 に改良した熱電発電モジュール装填用試料ステージと発電モジュールを装填する際の熱接合環境に関する挿入部材、および振動試験を実施した6本素子基本構造ユニットを有するユニレグ型熱電発電モジュールの 外観を示す。



図 2-③-1 改良した熱電発電モジュール装填用試料ステージと装填部詳細説明、 および振動試験装置の外観

平成 30 年度は、熱電発電モジュールの高振動環境・高温環境耐久試験として実車載環境に近い発電環境 下振動試験条件を指向し、これまで振動・高温度環境について、サイン波 33 Hz(1,000 rpm 相当)、67 Hz(2,000 rpm 相当)、最大加速度5G、10G、発電温度500℃、600℃の組み合わせで実施した試験を、熱電発 電モジュールに対して最も過酷な振動パラメータの組み合わせとなる、サイン波 33 Hz、最大加速度10G、発 電温度 600℃において実施検証することとした。10G 33Hz/100 時間の振動試験を実施したのちに、ユニレグ 型熱電発電モジュール本体構造、および AIN 基板とも損傷はなく、複数の試験モジュールにおいて発電環境 下で100 時間の耐振動性を得ることができた。表 2-③-1 に、計測した 6 本素子ユニレグ型発電モジュールの 高温度部 600℃での発電環境下振動試験結果を示す。 表 2-③-1 ユニレグ型発電モジュールの高温度部 600℃での発電環境下振動試験結果

		試験	試験結果			
試験 モジュール	固定条件	設定温度 高温/低温	加速度/振動数  試験時間		抵抗値の変化	概要
No.1	治具使用 スペーサーあり	600℃/80℃	10 G⁄33 Hz	100時間	試験前0.123 Ω 試験後0.128 Ω	劣化、破損等は 無し
No.2	治具使用 スペーサーなし	600℃∕80℃	10 G⁄33 Hz	100時間	試験前0.122 Ω 試験後0.158 Ω	出力低下あり デバイスの破損や 破壊等は無し
No.3	治具使用 スペーサーなし	600℃∕80℃	10 G⁄33 Hz	50時間※	未計測※	モジュール破損 外側基板脱離
No.4	治具使用 スペーサーなし	600℃∕80℃	10 G⁄33 Hz	100時間	試験前0.123 Ω 試験後0.140 Ω	出力低下あり デバイスの破損や破壊 等は無し

発電環境下振動試験を実施した4つのユニレグ型発電モジュールのうち、No.1、No.2、およびNo.4のモジュ ールについては構造的な破壊は無く試験を終えることができた。No.1 の熱電発電モジュール測定では図 2-③-1に示す熱電発電モジュール装填用試料ステージに設置する際に、熱電発電モジュールと同じ高さのス テンレス角の治具を試料ステージの四隅に配置して、振動試験時に試料ステージを構成する上下の熱源板と 冷却板がバタついて熱電発電モジュール破壊の影響を与えないようにと考え設置した。他方、No.2 の熱電発 電モジュールでは、上記バタつき防止を期待したステンレス角の治具を設置せず、効果を確かめる目的とした。 No.1とNo.2の試験後において、熱電発電モジュールの構造的破壊は双方共に見られず、外観上も差異がな いと判断できる状況であったたこと、および、ステンレス角の治具を試料ステージ四隅に配置する場合には、こ の金属治具を通して熱源板から冷却板に大きな貫通熱量が発生し、特に高温側の 600℃を保持し続けること が電源的に難しくなるかもしれないということを考慮して、その他の試験時には治具を設置しないで行うことを 選択した。No.3 のモジュールについては、試験中に破損が観測され、試験を中断した。No.1、No.2、および No.4の熱電発電モジュールでは概ね500~600 mW 程度の出力が観測された。図2-③-2 にユニレグ型発電 モジュール No.4 の試験時の温度変化及びデバイスの電気特性の変化について、実測値のグラフを示す。「②. 発電用に最適化した高耐久新型ユニレグ構造モジュールの開発」の項目で平成30年度に製作した6本素子 ユニレグ型発電モジュールでは、同様の温度差環境で精密な発電特性評価装置で計測したところ 1,600~ 1,800 mW の発電量が得られていることと比較すると、発電環境下振動試験実施時の発電量は約3分の1程 度にとどまっている。この差異については以下の要因が考えられる。(i) 熱電発電モジュールの発電特性評価 装置では、熱源/冷却源と発電モジュールの熱接合を静的測定環境のため高い熱伝導特性を有するペースト 状の部材により得ているのに対し、発電環境下振動試験時には熱電発電モジュールの設置性と耐振動性に 有効な厚みのあるシート状カーボンシートを使用したことによる熱環境の差、(ii)発電モジュール No.1、No.2、 No.4 においては、若干ではあるが、試験中にモジュール抵抗値の増加(モジュール抵抗値の増加はモジュー ル出力電力の低下に関連)しており、モジュールの外観に損傷はないと観察されたモジュールにおいても、内 部的には発電環境下・振動環境下での劣化が進行していることに起因、(iii) 試験環境がサイン波 33 Hz、最 大加速度10Gの過酷な条件であったため、熱電発電モジュール装填用試料ステージの熱源/冷却源と熱電発 電モジュールの熱接合をとる機械的な構造にわずかなゆるみが生じて熱接合のための加圧力が低下した、な どの理由が考えられる。加えて、試験終了後の結果検討時に気づいたことであるが、ステンレス角の治具をス ペーサーとして設置した No.1 の熱電発電モジュール測定では、熱電発電モジュールの劣化に起因する 100 時間後の抵抗値の変化が、ステンレス角治具をスペーサーとして挿入していない No.2、および No.4 の熱電発 電モジュールで見られた抵抗値の変化量に比べて小さくなっていることが明らかとなった。No.3 のモジュール では試験中に破損した事実も踏まえ、スペーサーの挿入が有効であることを暗に裏付ける結果と考えることも できることから、引き続きこうした点について調査検証する必要性が見出された。これらについて、平成 30 年度 は製作できる熱電発電モジュールの個数に限りがあったことから、さらに深掘り探求を実施することは年度中に は叶わなかったが、こうした実用上重要と考えられる内容については今後も引き続き取組んで行く予定である。



図 2-③-2 ユニレグ型発電モジュール No.4 の試験時の温度変化及びデバイスの電気特性の変化

以上、平成30年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。

- ●発電環境 600℃/80℃においてサイン波 33 Hz、加速度 10 G 構造破壊せずユニレグモジュール 6 本構造の耐久性 100 時間を確認
- ●素子剥離、モジュール構造の機械的破壊は製作工程依存、抵抗劣化は軽微

本成果は、本開発項目の開始時における最終目標値として設定した「JIS D1601-1995加振環境(サイン波 33、 67 Hz、最大加速度 5、10G)でユニレグ構造モジュール発電耐久 100 時間以上」に到達することができたと考 える。

# ④スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型DC-DCコンバータの開発 (担当/再委託先:岡山理科大学)

平成 29 年度の取組み成果を得て、最終となる平成 30 年度の研究開発目標値を、

(1) 平成 29 年度までに得られた成果を国内外の会議にて発表

に設定した。以下に平成30年度の実施内容と得られた成果について記載する。

平成29年度までに2段構成のスイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型DC-DCコンバータを作製し、実装面積72cm<sup>2</sup>(1 つの DC-DC コンバータからなる1段構成の回路あたり36cm<sup>2</sup>(=60mm×60mm)に相当)及び電力変換効率80%を達成し、取り組み項目「④スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型DC-DCコンバータの開発」における最終目標値を達成した。平成30年度は、平成29年度までに得られた成果に回路動作解析の過程を加えて国際学会「The 50<sup>th</sup> ISCIE International Symposium Stochastic Systems Theory and Its Applications」および「2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications」で研究成果を発表した。以下、得られた研究成果について報告する。

図 2-④-1 に n 段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータを示す。本回路は、n 個の熱電発 電モジュールに対し DC-DC コンバータを1 対 1 で接続した回路である。DC-DC コンバータを用いて熱電発 電モジュールの出力電圧の昇圧と集電を同時に行い、一部の熱電発電モジュールが故障した場合においても システム全体の出力電圧が 0V にならない回路構成を踏襲している。本回路の回路パラメータは以下のように 設定した。



図 2-④-1 n 段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータ

$$R_n = 5[\Omega], \ L_n = 470[\text{uH}], \ C_n = 100[\text{uF}], \ r_n = 8[\text{m}\Omega], \ f = 30[\text{kHz}] \qquad \cdots (2-(4-1))$$

また、解析を簡単化する目的で、以下に示す変数変換式を定義した。

$$i_n = \frac{x_n}{\sqrt{L_n}}, \ v_n = \frac{y_n}{\sqrt{C_n}}, \ t = \sqrt{L_n C_n} \tau, \ R_n = \frac{1}{2\sigma} \sqrt{\frac{L_n}{C_n}}, \ E_n = \frac{1}{\sqrt{C_n}} P, \ r_n = \gamma \sqrt{\frac{L_n}{C_n}} \qquad \cdots (2 - (4) - 2)$$

(2-④-2)式に示す変数変換を用い、本回路の回路方程式を次式に示すように導出した。

$$\frac{dx_n}{d\tau} = \begin{cases} P - \gamma x_n & \text{SW is ON} \\ P - y_n & \text{SW is OFF} \end{cases} \qquad \cdots (2 - (4) - 3)$$
$$\frac{dy_n}{d\tau} = \begin{cases} -2\sigma y_n & \text{SW is ON} \\ x_n - 2\sigma y_n & \text{SW is OFF} \end{cases} \qquad \cdots (2 - (4) - 4)$$

ここで、(2-④-3)式および(2-④-4)式に示すように、(2-④-2)式に示す変数変換を用いることで、回路方程式 に含まれる回路記号が減り、回路ダイナミクスが簡素に記述できていることが分かる。

まず、DC-DC コンバータのローサイドスイッチがオンの状態のとき、回路方程式の解は容易に導出可能であり、次式で定義できる。ここで、 $x_{n0}$ および  $y_{n0}$ は本回路に PWM 信号が印加された瞬間( $\tau$ =0 に相当)における初期値であることに注意する。

$$x_n(\tau) = \left(x_{n0} - \frac{P}{\gamma}\right)e^{-\gamma\tau} + \frac{P}{\gamma} \qquad \cdots (2-4)-5)$$

$$y_n(\tau) = y_{n0} e^{-2\sigma\tau}$$

一方、DC-DC コンバータのローサイドスイッチがオフのとき、本回路の回路方程式の解は(2-④-3)式 および(2-④-4)式に示す連立微分方程式を解くことにより次式で定義できる。なお、本解は特性方程式 の解が負となる場合に対応しており、連立微分方程式を解く際に回路パラメータを代入して特性方程式 の解が負となることを確認している。

$$y_n(\tau) = -e^{\alpha\tau} \left( (\xi_2 \alpha - \xi_1 \beta) \sin \beta\tau + (\xi_1 \alpha + \xi_2 \beta) \cos \beta\tau \right) + P \qquad \cdots (2 - (4) - 9)$$

ここで、(2-④-8)式および(2-④-9)式において、ξ1およびξ2は初期条件より次式で定義した。

$$\xi_1 = \left(x_{n0} - \frac{P}{\gamma}\right)e^{\gamma DT} + \frac{P}{\gamma} - 2\sigma P \qquad \cdots (2-4-10)$$

$$\xi_2 = -\frac{1}{\beta} \left( y_{n0} e^{-2\sigma DT} + \xi_1 \alpha - P \right) \qquad \cdots (2 - (4 - 11))$$

図 2-④-2 に上記で導出した厳密解を用いて計算した n 段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DC コンバータの動作解析結果を示す。



図 2-④-2 変数変換前後の解軌道の振る舞い

ここで、(a)は変数変換後の電流・電圧波形であり、(b)は変数変換前の電流・電圧波形である。なお、変数変換 を行わない場合についても同様の手順で厳密解を定義しており、更にはルンゲ・クッタ法を用いた数値解析も 実施し、本回路動作シミュレーションの正当性を多角的に検証した。図2-④-2より、変数変換前後で解軌道の 振る舞いの定性的な一致が確認でき、以降の変数変換を用いた解析の妥当性が確認できた。ここで、変数変 換を用いて回路方程式の解および回路動作解析用プログラムを簡素に記述した後、得られた解を再び変数変 換式に代入することで、図2-④-2中の(a)に示す解軌道は図2-④-2中の(b)に示す解軌道に完全に一致する ことに注意する。

図 2-④-3 に解軌道の振る舞いの説明図を示す。DC-DC コンバータのローサイドスイッチがオンのとき、ハイ サイドスイッチはオフで、このときインダクタ電流は増加する。一方、DC-DC コンバータのローサイドスイッチが オフのとき、ハイサイドスイッチはオンで、このときインダクタ電流は減少する。この動作は回路方程式および回 路方程式の解からも明らかである。



図 2-④-3 解軌道の振る舞いの説明図

図 2-④-4 に Duty 比と DC-DC コンバータへの入力電圧を変化させた際の、インダクタ電流および DC-DC コンバータの出力電圧の分布図を示す。



図 2-④-4 Duty 比と入力電圧を変化させた際の電圧・電流分布図

本図は、Duty 比を0.1~0.8の範囲で、DC-DCコンバータへの入力電圧を0.1V~2.5Vの範囲で変化させ、 定常回路動作状態におけるインダクタ電流および出力電圧の最大値を200サイクル分データサンプリングし、 その平均値の分布を濃淡で示した図である。例えば、(a)の「Maximum voltage distribution」はDC-DCコンバ ータの最大出力電圧の分布を示しており、Duty 比が大きくなるほど、または入力電圧レベルが高くなるほど DC-DCコンバータの出力電圧値が高くなる傾向にあることが分かる。本結果より、サージ電圧を考慮して DC-DCコンバータの出力電圧の2倍以上のバス電圧のGaNスイッチングデバイスを用いることが望ましいこと が分かり、この結果を考慮してバス電圧が30VのGaNスイッチングデバイスを回路実装においては選定してい る。同様に(b)の「Maximum current distribution」はインダクタ電流の分布を示しており、こちらもDuty 比が大 きくなるに伴い、または入力電圧レベルが高くなるに伴いインダクタ電流が増加する傾向が確認できる。本研究 取り組みにおいては、最大インダクタ電流が3A程度と見込まれるため、インダクタは電流重畳特性を考慮して 最大許容電流3Aの部品を選定した。以上により、回路部品を選定するにあたり、回路パラメータを代入するこ とで回路動作を可視化し、解析可能なツールの数学的枠組みの基礎構築を終え、計算機実装により簡単な動作確認を行った。これらの結果は、「2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications」において発表した。今後はより詳細な回路動作解析へと継続的に発展させ、新たな成果が得られた場合は学術論文に発表する予定である。

一方、図2-④-5に実験データ取得装置のセットアップを示す。本取り組み項目においては、平成29年度までに最終目標値を達成しているが、平成29年度までに実施した実験ではDC-DCコンバータへの入力電流値が 0.1A~0.2A と低い値であった。このため、より高い入力電力範囲で本 DC-DCコンバータの電力変換効率 を調査することを目的とし、発展的に追加実験を実施した。なお、平成29年度までは2段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DCコンバータ(2個の直流電源に2つの DC-DCコンバータを接続した回路)を 用いて実験を行ったが、上記の回路動作解析過程において説明したようにマルチノード入力電力パイルアップ型コンバータは、各段の DC-DCコンバータで回路パラメータが共通のため、回路動作も各段の DC-DCコンバータで同じである。したがって、平成29年度に作成した2段構成のマルチノード入力電力パイルアップ型 DC-DCコンバータの1段目の DC-DCコンバータのみを用いて実験を行った。



図 2-④-5 実験データ取得装置

また、DC-DCコンバータに接続する電源は、熱電発電モジュールの出力特性を模擬した模擬電源を使用し ており、IV以下の電圧レベルで最大 2A 程度を出力する低電圧・大電流出力特性を再現した。 DC-DC コン バータへの入力電圧が高いとき、入力電流は低い値となり、電力変換効率は 90%に達する傾向を確認した。一 方、DC-DC コンバータへの入力電圧レベルが低くなるに伴い、これに反比例して DC-DC コンバータへの入 力電流が高くなり、電力変換効率が低下する傾向にあった。特に、現状の回路では DC-DC コンバータへの入 力電流が 1A 程度に達したとき、電力変換効率が 70%程度まで落ち込むことも確認し、DC-DC コンバータへの 入力電圧が IV以下かつ入力電流が 1A 以上の低電圧・高電流出力特性を有する熱電発電モジュールを接続 した場合においても、DC-DC コンバータの電力変換効率 80%以上を担保するためには、平成 29 年度までに 開発した DC-DC コンバータから更なる改善が必要であることが明らかとなった。

ここで、平成 28 年度に実施した回路動作解析で、スイッチング周波数の高周波数化は電力変換効率の向 上に寄与することを確認できている。そこで、平成 29 年度に回路実装したマルチノード入力電力パイルアップ 型 DC-DC コンバータの回路構成はそのままで、ファンクションジェネレータを用いて作成するスイッチング周 波数を現状の 30kHz から高周波数化し、電力変換効率の向上を図る取り組みを実施した。イッチング周波数 を高周波数化した場合、DC-DC コンバータの出力電圧が低下する傾向も確認しているため、DC-DC コンバ ータに接続している電子負荷装置を定抵抗モードから定電圧モードへ切り替えた。また、Duty 比を変化させる ことで模擬電源の出力電圧および出力電流を調整し、DC-DC コンバータへ 1A 以上の入力で 2V の一定出力 電圧が得られるよう条件設定して実験を行った。表 2-④-1 に実験結果を示す。 表 2-④-1 マルチノード入力電力パイルアップ型コンバータの電力変換効率

スイッチング 周波数[kHz]	Duty比 [%]	入力電圧 [V]	入力電流 [A]	入力電力 [W]	出力電圧 [V]	出力電流 [A]	出力電力 [W]	電力変 換効率 [%]
120	75	0.50	1.22	0.61	2.03	0.25	0.52	85

表に示すようにスイッチング周波数 120kHz において DC-DC コンバータへの入力電圧 0.5V および入力電流 1.22A となり、電力変換効率 85%を達成することができた。これらの成果を「The 50<sup>th</sup> ISCIE International Symposium Stochastic Systems Theory and Its Applications」において報告した。

以上、平成30年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。 ●回路設計および回路実験に関する研究成果を国際会議にて発表

本成果は、本開発項目の開始時における最終目標値として設定した「コンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発に関わる基礎要素技術開発」を研究開発進捗に合わせて向上的数値目標に改変し、最終的には当初 目標を上回り、実用化に供することのできるレベルに到達することができたと考える。

#### ⑤コンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発(担当/再委託先:岡山理科大学)

本研究開発項目の開始時における最終目標値は、「変換効率80%の達成(熱発電ユニットの出力は0.4~0.8V)」、「実装面積1/2倍(従前実装回路(回路実装面積100cm<sup>2</sup>)の1/2倍)の達成」、「Si-MOSFET及びGaNトランジスタを用いたコンデンサ・パイルアップ回路の開発」および「コンデンサ・パイルアップ回路の知財申請」である。

本研究は将来的な応用先として、出力電力が数十~数百ワットに達する熱電発電モジュールへ接続し、従来 型エンジン車・発電用エンジン搭載電気自動車等への排気熱発電システムの車載化を目指している。このため、 取組み項目「A. フェイルセーフ熱電池モジュール構造実用化への基礎要素技術開発」において同時並行的に 開発をすすめる0.7W/cm<sup>2</sup>クラスの熱電発電モジュールの出力特性を有する電源を使用して、コンデンサ・パイ ルアップ型コンバータで電力変換効率80%以上の達成を確認しておくことは重要であると考える。0.7W/cm<sup>2</sup>クラ スの電力出力密度を有する熱電発電モジュールにおいては、最大電力点において0.4V~0.8Vで1A程度の出 力が得られるため、この条件下で電力変換効率80%を担保するコンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発と 入力電圧変動(電圧変動に伴い入力電流も変動する)によるDC-DCコンバータの電力変換効率の検証に取り組 むことは重要である。更に、平成29年度はコンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発初年度であったため、 電源が電気的に開放状態で故障した際、ファンクションジェネレータを用いて、コンデンサ・パイルアップ回路へ 印加する信号を作成し、故障検出回路は未実装であった。そこで、平成30年度は、電源の電気的な開放状態 での故障を検出し、コンデンサ・パイルアップ回路へ信号を印加する機能を有する故障検出回路を実装し、動 作確認を行うことを目標に加えた。最後に、排気熱発電システムの車載化を検討するにあたり、48V系バッテリへ の給電や熱電発電モジュールの故障時における出力電圧レベル維持の観点から、熱電発電モジュールに接続 可能なように最適化設計した高昇圧型コンバータの検討を行うことも重要であり、平成29年度までの取り組み期 間において、研究開発が順調に進展し、最終目標が達成可能な見込みがたったため、平成30年度はコンデン サ・パイルアップ回路を接続するよう最適化したコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの開発にも着手し、 Duty比50%で入力電圧の4倍昇圧を目標に追加した。

以上より、最終年度となる平成30年度の研究開発成果目標は、

- (1) 変換効率 80%の達成(0.4V~0.8V を出力する熱電発電モジュールまたは模擬電源を電源に使用)
- (2) 入力電圧の変動による電力変換効率の検証
- (3) 2 電源を有する 2 段構成回路を 50cm<sup>2</sup>(従前実装回路(回路実装面積 100cm<sup>2</sup>)の 1/2 倍)の実装 面積で回路実装

(4) 高昇圧コンバータの回路実装(Duty 比 50%で入力電圧の 4 倍昇圧) を設定し、研究開発に取り組んだ。以下に平成30年度の実施内容と得られた成果について記載する。

以下、平成30年度に得られた成果について説明する。図2-⑤-1にコンデンサ・パイルアップ型コンバータの 設計資料を示す。





まず、回路設計ソフトを用いて、(a)に示すSchematic図を作成した。本回路図は、2個の電源入力を有するコ ンデンサ・パイルアップ型コンバータに対応しており、電源や負荷へ接続するための端子台、同期整流型スイ ッチ回路やコンデンサ・パイルアップ回路に接続するためのコネクタ、その他、インダクタ、キャパシタ、ダイオ ードなどによって構成される。また、図中(b)のPCB図は、(a)のSchematic図に示す回路部品やパターンを基板 上へレイアウトした図であり、回路実装面積35mm×70mmでレイアウトし、3D完成イメージ図で回路部品取り付 け後の基板を確認した後、回路実装工程へと移行した。

なお、平成30年度に実施した「④スイッチング方式によるマルチノード入力電力パイルアップ型DC-DCコンバータの開発」において、スイッチング周波数を120kHzまで高周波数化することにより、入力電圧0.5V、入力電流 1.22Aで電力変換効率85%を確認できた。他方、スイッチング周波数を高周波数化することでインダクタの小型化 が可能となったため、平成29年度に実装した回路からインダクタを75 µ Hの部品に交換した。これに加えて、平 成29年度のコンデンサ・パイルアップ型コンバータの開発においては開発初年度であったため、平成28年度に マルチノード入力電力パイルアップ型コンバータの開発において用いた実装面積50mm×50mmの同期整流型

スイッチ回路を踏襲したが、これを平成29年度に「④マルチノード入力電力パイルアップ型DC-DCコンバータ」の開発取組みにおいて35mm×35mmで回路実装した同期整流型スイッチ回路に置き換えることで、回路実装 面積の更なる小型化が可能となった。図2-⑤-2に動作確認用コンデンサ・パイルアップ型コンバータの試作基 板を示す。35mm×70mmで基板を実装し、回路素子を取り付けた。



図 2-5-2 動作確認用コンデンサ・パイルアップ型コンバータの試作基板

図2-⑤-3に実験データ測定用の回路セットアップを示す。図中のAおよびVの記号は電流計と電圧計を表 しており、デジタルマルチメータを用いて入出力電流および電圧を計測した。まず、電源が正常に動作してい るときの実験結果について報告する。図2-⑤-4に電源が正常に動作しているときに対応する回路セットアップ を示す。電源が正常に動作するとき、コンデンサ・パイルアップ回路は回路動作に影響を及ぼさないため取り 外している。また、同期整流型スイッチ回路にはファンクションジェネレータを用いてスイッチング信号を印加し ており、同期整流型スイッチ回路や、コンデンサ・パイルアップ回路を駆動させるために12V電源を使用してい る。



図 2-5-3 実験データ測定用回路セットアップ



図 2-5-4 電源が故障していないときの動作確認用回路セットアップ

図2-⑤-5にコンデンサ・パイルアップ型コンバータへの入力電圧を1V、Duty比を50%に固定した場合の実験結果を、図2-⑤-6にコンデンサ・パイルアップ型コンバータへの入力電圧を1V、出力電圧を2Vに固定した場合の実験結果をそれぞれ示す。図2-⑤-5は、抵抗値およびスイッチング周波数を変化させ、コンデンサ・パイルアップ型コンバータの電力変換効率を測定している。また、図2-⑤-6はコンデンサ・パイルアップ型コンバータのDuty比およびスイッチング周波数を変化させ、電力変換効率を測定した結果である。これらの結果より、スイッチング周波数は100kHz以上が電力変換効率の観点から望ましいことが確認できた。本結果を考慮して以降の実験ではスイッチング周波数を120kHzとした。



図2-⑤-5 電源が故障していないときの実験結果



図2-5-6 コンデンサ・パイルアップ型コンバータの出力電圧を2V一定に保ったときの実験結果

平成30年度は、コンデンサ・パイルアップ型コンバータへKELK社製熱電発電モジュールを接続した場合と将 来的な排熱発電システムの車載化を視野に入れた取り組みとして出力電力密度が0.7W/cm<sup>2</sup>クラスの熱電発電 モジュールの模擬電源を接続した場合で、電力変換効率を測定し、目標とする80%以上の達成を目指した。

まず、KELK社製熱電発電モジュールをコンデンサ・パイルアップ型コンバータへ接続した場合の実験結果に ついて報告する。図2-⑤-7に実験結果を示す。現有する熱試験装置を用い、KELK社製熱電発電モジュール の低温側と高温側に50℃または280℃の温度差を設けて実験を行った。図中には、熱電発電モジュールの出 力特性とコンデンサ・パイルアップ型コンバータの電力変換効率の測定結果を示している。まず、温度差が 50℃のとき、熱電発電モジュールの最大出力電力は0.065W程度となり、最大電力点における電圧は0.4V、電 流は0.15A程度である。最大電力点付近において、電力変換効率90%を確認できたと同時に、コンデンサ・パイ ルアップ型コンバータへの入力電圧が0.3V以上0.8V以下の範囲で電力変換効率80%以上を確認できた。コン バータへの入力電圧の低下に伴い、入力電流が増加するため、変換効率が低下する傾向も確認できた。温度 差280℃の場合においても、同様の傾向であり、目標とするコンデンサ・パイルアップ型コンバータで変換効率 80%以上の達成が確認できた。



図2-(5)-7 KELK社製熱電池をコンデンサ・パイルアップ型コンバータへ接続した場合の実験結果

一方、出力電力密度が0.7W/cm<sup>2</sup>程度となる熱電発電モジュールの例として、フラウンフォーファー研究機構 IPM部門製があげられる。本研究課題全体を通して、取り組み項目「A.フェイルセーフ熱電池モジュール構造 実用化への基礎要素技術」および「B.熱電池専用DC-DC電力変換器実用化への基礎要素技術開発」は、同 時並行的に研究開発がすすめられてきたため、平成30年度の時点では出力特性が定性的に一致するフラウン フォーファー社製IPMの模擬電源を構築し、これをコンデンサ・パイルアップ型コンバータへ接続して電力変換 効率を測定した。特に、フラウンフォーファー研究機構IPM部門製のモジュールは、本取組みで開発するMg2Si ユニレグモジュールと、動作温度域、出力特性、発電電力密度の点で競合するモジュールであることから、「A. フェイルセーフ熱電池モジュール構造実用化への基礎要素技術」でのモジュールを模して「B.熱電池専用 DC-DC電力変換器実用化への基礎要素技術開発」を実施することには妥当性があると考える。また、フラウン フォーファー研究機構IPM部門製のモジュールにおいても、モジュール内の一部素子欠損時の全発電機能不 全の問題は同様であるので、平成30年度の取組みで、フラウンフォーファー研究機構IPM部門製のモジュール など外部の物を使用することは、本開発での熱電池専用DC-DCコンバータの適用範囲を広める上で好ましいと 考える。
図2-⑤-8に本模擬電源を接続した場合の実験結果を示す。本模擬電源は、最大電力点において1A以上の 出力が得られ、低電圧・大電流出力特性を有する。コンデンサ・パイルアップ型コンバータ回路に接続された電 子負荷により、コンバータの出力電圧を2V一定に保ち、Duty比を変化させて本結果を得た。Duty比を増加させ ることにより、模擬電源から取り出せる電流量が増加し、これに伴い模擬電源の出力電圧は低下する。なお、 Duty比は一般に20%~80%の範囲で設定されるため、この範囲内で実験データを取得した。最大電力点におい て、約84%程度の電力変換効率が確認でき、本年度の目標の達成を確認できた。



図 2-5-8 高出力タイプ熱電発電モジュールの模擬電源を用いた場合の実験結果

次に、平成30年度に新たに回路実装したコンデンサ・パイルアップ型コンバータで、熱電発電モジュールが 電気的に開放状態で故障した場合の動作確認を行った。図2-⑤-9に電源が故障しているときの動作確認用 回路セットアップを示す。一例として、図中に示す電源1が電気的に開放状態で故障した場合を想定し実験を 行った。また、コンデンサ・パイルアップ回路には動作確認のためファンクションジェネレータを用いて、電源1 に並列接続されたGaNスイッチングデバイスをターンオンさせるために5Vの信号を印加した。得られた実験結果 を図2-⑤-10に示す。コンバータへの入力電圧は電源2から供給される0.5V程度であり、Duty比が50%のためコンバ ータの出力電圧は入力電圧の2倍の1V程度となっている。ファンクションジェネレータから入力されたスイッチング信 号によって、同期整流型スイッチ回路が動作している様子も分かる。また、コンデンサ・パイルアップ回路において、 電源1に並列接続されたGaNスイッチングデバイスに対してファンクションジェネレータから5Vの信号が印加され、ス イッチがターンオンし、ダイオードの電圧降下が低減されていることも確認できた。なお、電源2が電気的に開放状態 で故障した場合にも同様に動作確認がとれている。



図2-5-9 電源が故障しているときの動作確認用回路セットアップ



図2-⑤-10 電源が故障しているときの回路動作波形

一方、平成29年度までの取り組みでは電源の故障時にファンクションジェネレータを用いてコンデンサ・パイ ルアップ回路へ印加するスイッチング信号を作成していたが、電源の故障を検出し、コンデンサ・パイルアップ 回路へ印加するスイッチング信号を生成する機能を有する故障検出回路を実装しておくことは、実用上重要で ある。そこで、コンパレータをベースとしたシンプルな故障検出回路をコンデンサ・パイルアップ型コンバータへ 実装した。

図2-⑤-11に故障検出回路を接続したコンデンサ・パイルアップ型コンバータの試作回路を示す。図中の(a) は、コンパレータをベースとした故障検出回路の回路図を示している。コンパレータは、電源の両端子間電圧 を監視しており、電源が正常に動作しているときは正の電位となることを検出しLowレベルの信号を、電源が電 気的に開放状態で故障したときにはバイパスダイオードに電流が流れることにより電源の両端子間電圧が負の 電位となることを検出しHighレベルの信号をコンデンサ・パイルアップ回路へ印加する機能を実現する。故障 検出回路の動作確認のため、まずは図2-⑤-11(b)に示すようにブレットボードを用いて回路実装し、図 2-⑤-11(c)に示すようにコンデンサ・パイルアップ型コンバータへ接続し、動作確認を行った。

図2-⑤-12に故障検出回路を接続したコンデンサ・パイルアップ型コンバータ試作回路の動作波形を示す。 ここで、(a)は電源が故障していないときの回路動作波形であり、(b)は電源が電気的に開放状態で故障した瞬間の過渡波形である。一例として、電源1の接続線を図1-⑤-11(c)に示すように取り外して電気的な開放状態 を再現した。電源1が正常に動作しているとき、電源1および電源2の出力電圧は0.5V程度であるため、 DC-DCコンバータには1V程度の入力電圧が確認できる。電源1の接続線を取り外した瞬間、電源1に並列接 続されたバイパスダイオードを経由して電流が流れるため、DC-DCコンバータへの入力電圧が0Vになることは ない。一方、電源1の端子間電圧が負となることをコンパレータで検出し、故障検出回路の出力信号がHighレ ベルとなり、コンデンサ・パイルアップ回路のスイッチがターンオンしていることも確認できた。電源1の接続線を 取り外してから、故障検出回路で電源1の故障を検出し、Highレベルの出力信号を生成するまでの時間は 15ms程度であることも確認できた。なお、電源2についても同様に回路動作を確認し、故障検出回路が問題な く動作していることを確認済みである。



(c) 故障検出回路とコンデンサ・パイルアップ型コンバータの接続例

図2-⑤-11 故障検出回路を接続したコンデンサ・パイルアップ型コンバータの試作回路



(a) 電源が故障していないときの回路動作波形



(b) 電源が故障した瞬間の過渡波形

図2-⑤-12 故障検出回路を接続したコンデンサ・パイルアップ型コンバータ試作回路の動作波形

以上より、故障検出回路の動作が確認できたため、故障検出回路を含むコンデンサ・パイルアップ型コンバータの設計開発に着手した。図2-⑤-13に故障検出回路を組み込んだコンデンサ・パイルアップ型コンバータのSchematic図を示す。本Schematic図は、図2-⑤-2に示すコンデンサ・パイルアップ型コンバータをベースに、図2-⑤-11に示す故障検出回路を組み込んだ回路仕様とした。図2-⑤-14はPCB図を示しており、35mm×70mmの回路実装面積でパターン、回路部品をレイアウトした。ここで、PCB図の青色パターンは基板の裏面、赤色パターンは基板の表面の配線である。図2-⑤-15に3D完成イメージ図を示す。



図2-⑤-13 故障検出回路を有するコンデンサ・パイルアップ型コンバータのSchematic図



図2-⑤-14 故障検出回路を有するコンデンサ・パイルアップ型コンバータのPCB図と完成イメージ図



図2-⑤-15 故障検出回路を有するコンデンサ・パイルアップ型コンバータの3D完成イメージ図

また、回路実装面積35mm×70mmで実装した回路を図2-⑤-16に示す。最後に、上記のSchematic図、PCB図、 3D完成イメージ図、ガーバーデータなどをベースとした、故障検出回路を有するコンデンサ・パイルアップ型コンバ ータの最終版回路設計図を図2-⑤-17に示す。本回路を用いて回路実験を行い、上記同様の回路動作および回 路性能を確認した。



(b) 完成基板

図2-⑤-16 故障検出回路を組み込んだコンデンサ・パイルアップ型コンバータ実装基板

以上より、故障検出器を組み込んだコンデンサ・パイルアップ型コンバータを実装面積50cm<sup>2</sup>以下で回路実装し、 熱電発電モジュールまたは模擬電源を用いた回路実験で、入力電圧が0.4V~0.8Vの範囲で変動した場合におい ても変換効率80%以上が保たれることを確認したとともに応用を見据えた発展的な取り組みとして、出力電力密度 0.7W/cm<sup>2</sup>クラスの熱電発電モジュールの模擬電源を用いて最大電力点で80%以上の電力変換効率を確認し、コン デンサ・パイルアップ型コンバータにおける年度目標を達成することができた。



図2-⑤-17 故障検出回路を有するコンデンサ・パイルアップ型コンバータの最終版回路設計図

続いて、高昇圧型コンバータの開発について報告する。熱電発電モジュールは低電圧入力特性を有し、また電気的に開放状態で故障するため、昇圧比の高いコンバータに接続するシステム構成を考えておくことが実用上重要であると考えられる。これにより、直列接続する熱電発電モジュールの個数が減り実装面積が低減されるとともに、高昇 圧比ゆえに一部の熱電発電モジュールの電気的な開放状態での故障時においても一定の出力電圧を得易くなる。 以上の観点から、Duty比50%で入力電圧の4倍昇圧が可能な高昇圧型コンバータをベースとしたコンデンサ・パイル アップ型高昇圧コンバータの回路設計、実装及び動作検証を行った。

図2-⑤-18にコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータを示す。主回路はコイル、コンデンサ、ダイオードによって構成される。スイッチがONのとき、電源からコイルを通ってグランドへ向かう電流経路と、コンデンサC1からダイオードD2、コンデンサC3を通ってグランドへ向かう電流経路がある。この状態ではコイルへ電源が接続されているため磁気エネルギーが蓄積されると同時に、コンデンサC3は蓄電される。一方、スイッチがOFFのとき、電源からコイルを通ってコンデンサC3、ダイオードD3、コンデンサC2およびC1を通ってグランドへ流れる電流経路と、電源からコイルを通ってダイオードD1、コンデンサC1を通ってグランドへ流れる電流経路がある。この状態では蓄えられた磁気エネルギーとコンデンサC3の蓄電エネルギーにより、入力電圧が昇圧される。以上の動作を繰り返して、Duty比50%で入力電圧の4倍昇圧が可能な回路構成である。回路パラメータはC1=C2=100[µF]、C3=10[µF]、L=75[µH]とした。



図2-(5)-18 コンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータ

図2-⑤-19にコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータのSchematic図を示す。また、図2-⑤-20に本回路の PCB図を示す。本回路は、コンデンサ・パイルアップ回路へ接続可能なように設計しており、本年度は開発初年度で あったため、故障検出回路は含めていない。回路実装面積は、50mm×60mmであり、スイッチングデバイスはSi系 MOS-FETを用いた。図2-⑤-21に回路実装した基板を示す。図中の(a)は基板加工機で50mm×60mmのサイズで 実装した両面プリント基板に回路素子を取り付けた図面である。また、(b)は(a)の基板にコンデンサ・パイルアップ回 路を取り付けた図面である。



図2-5-19 コンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータのSchematic図



図2-⑤-20 コンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータのPCB図



(a) 実装基板に回路部品を取り付けた図面



(b) 上記(a)の基板にコンデンサ・パイルアップ回路を取り付けた図面

図2-5-21 回路実装したコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータ

図2-⑤-22に実験用セットアップを示す。スイッチング信号はファンクションジェネレータを用いて作成し、 MOS-FETを駆動させている。また、電源が電気的に開放状態で故障したとき、コンデンサ・パイルアップ回路に含ま れるGaNスイッチングデバイスを駆動させるための信号についてもファンクションジェネレータで生成している。

図2-⑤-23にコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの実験波形を示す。本実験結果は、図2-⑤-22(b)の 状態に対応する結果であり、電源2が電気的に開放状態で故障した場合を再現している。図2-⑤-23(a)は、故障検 出回路が電源の故障を検出できない場合に対応する結果であり、ファンクションジェネレータからLowレベルの信号 を電源2に並列接続されたGaNスイッチングデバイスを駆動させるためのドライバ回路へ印加している。このとき、電 源1の出力電圧は0.5V程度としているが、電源2に並列接続されたバイパスダイオードの電圧降下の影響で、 DC-DCコンバータへの入力電圧が0.3V程度となっている。また、Duty比50%の設定でコンバータの出力電圧は1V 程度であり、図2-⑤-3などに示す既存回路と比較して昇圧比が2倍程度高いことも確認できた。一方、図2-⑤-23 (b)においては、故障検出回路で電源2の故障を検出し、Highレベルのスイッチング信号をコンデンサ・パイルアップ 回路へ印加した場合に対応する実験波形であり、DC-DCコンバータへの入力電圧は0.46V、出力電圧は1.83V程 度であった。以上より、コンデンサ・パイルアップ回路が機能し、一部熱電発電モジュール故障時に高昇圧コンバー タがシステム全損を免れることが確認できた。



(a) 電源が正常に動作しているとき



(b) 電源が故障しているとき

図2-⑤-22 コンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの実験用セットアップ



(a) 故障を検出できない状態を再現したときの実験波形



(b) 故障を検出できた状態を再現したときの実験波形

図2-⑤-23 電源2が電気的に開放状態で故障した場合のコンデンサ・パイルアップ型 高昇圧コンバータの実験波形

次に、熱電発電モジュールの出力特性を模擬した模擬電源を使用し、本回路の特性を調査した結果を報告する。 図2-⑤-24に現有するする熱試験装置を用いてKELK社製熱電発電モジュールを温度差20℃または温度差200℃ で使用した場合の出力特性計測結果を示す。本特性に基づき、熱電池に抵抗を直列接続した模擬電源を構築した。 図2-⑤-25に模擬電源を用いたコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの実験データ測定用セットアップを示 す。図中のAおよびVの記号は電流計および電圧計を意味しており、デジタルマルチメータを用いてコンバータの入 出力電流および電圧を計測した。図2-⑤-26に本実験で使用した熱電発電モジュールの模擬電源のセットアップ図 を示す。直流電源の出力値および抵抗値を調整することにより、模擬電源を用いて、熱電発電モジュールの出力特 性が再現できる。



(a) 温度差20℃のとき

(b) 温度差200℃のとき

図2-⑤-24 KELK社製熱電発電モジュールの出力特性



図2-⑤-25 コンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの実験データ測定用回路セットアップ



図2-5-26 熱電発電モジュールの模擬電源のセットアップ

図2-⑤-27にコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータの実験結果を示す。ここで、(a)はKELK社製熱電発電 モジュールを温度差20℃で使用した場合の模擬電源の出力特性と、高昇圧型コンバータの特性を示している。模 擬電源の出力特性に注目すると、図2-⑤-24(a)に示す出力特性と定性的に等しいことがわかる。なお、直流電圧源 に直列接続する抵抗値を調整し模擬電源の出力特性を熱電発電モジュールの出力特性により詳細にフィッティン グ可能であるが、本年度は高昇圧型コンバータの開発初年度であったため、模擬電源のフィッティングまでは実施し ていない。また、コンバータの特性においては、出力電圧を2V一定に保ち、スイッチング周波数を1kHzから200kHz まで変化させて電力変換効率を測定している。一方、(b)はKELK社製熱電発電モジュールを温度差200℃で使用し た場合の模擬電源の出力特性と、高昇圧型コンバータの特性を示している。ここで、コンバータの出力電圧は20V 一定に保ち、スイッチング周波数を1kHzから200kHzまで変化させて電力変換効率を測定している。これらの結果か ら、コンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータで入力電圧の4倍昇圧と変換効率75~80%程度の達成が確認でき た。本回路に含まれるダイオードをGaNスイッチングデバイスに置き換えることで、更なる高効率化が期待できる。ま た、故障検出回路の開発を同時並行的にすすめていたため、平成30年度中の本回路への実装は難しかったが、将 来的にはコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータに故障検出回路を組み込むことが十分可能な見通しが立っ た。







<sup>(</sup>b) 温度差200℃のときの実験データ

図2-⑤-27 模擬電源をコンデンサ・パイルアップ型高昇圧コンバータへ接続した際の実験結果

以上、平成30年度の研究開発取組みにより、年度目標を達成する以下の成果を得ることができた。

- 熱電発電モジュールまたは模擬電源を用いた回路実験で、入力電圧が 0.4V~0.8V の範囲で変動した場合も変換効率 80%以上が保たれ、実用が想定される電力利用率 95%以上の範囲で最大変換効率 90%を達成
- 2 電源を有する 2 段構成回路を 49cm<sup>2</sup>(従前実装回路(回路実装面積 100cm<sup>2</sup>)の 1/2 倍)の実装 面積で回路実装
- Duty 比 50%で入力電圧を 4 倍昇圧する高昇圧コンバータを回路実装

本成果は、本開発項目の開始時における最終目標値として設定した熱電発電モジュール故障時の入力損失 を想定したフェイルセーフ機能内蔵 DC-DC コンバータ実現において「変換効率 80%の達成(熱発電ユニット の出力は 0.4~0.8V)」、「実装面積 1/2 倍(従前実装回路(回路実装面積 100cm<sup>2</sup>)の 1/2 倍)の達成」、 「Si-MOSFET 及び GaNトランジスタを用いたコンデンサ・パイルアップ回路の開発」および「コンデンサ・パイル アップ回路の知財申請」を研究開発進捗に合わせてより高い数値目標に改変し、最終的には当初目標を上回 り、実用化に供することのできるレベルに到達することができたと考える。

3. 成果の外部への発表及び活動

(1).発表題目:Fail safe DC-DC converter with thermoelectric modules
学会名:RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing 2019
開催場所:Honolulu, USA
発表者・共著者:Hiroyuki Asahara, Nobuyuki Kasa, Takuji Kousaka, Shota Uchino, Takashi Fujii, Tsutomu Iida
発表日:2019/03/05

 (2).発表題目:軽量かつ環境低負荷な熱電材料によるフェイルセーフ熱電池の開発 展示会名:第18回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議(nano tech 2019)
 開催場所:東京 発表者・共著者:飯田努,麻原寛之
 発表日:2019/01/30~2019/02/01

- (3).発表題目:熱電用電力変換回路のフォールトトレラント設計と回路動作検証 学会名:電子情報通信学会 非線形問題研究会 開催場所:北海道 発表者・共著者:麻原寛之,飯田努,笠展幸,太田垣博一,内野翔太,藤井貴志,高坂拓司 発表日:2019/01/23
- (4).発表題目:Fabrication of thermoelectric power generator using solely n-type Mg<sub>2</sub>Si for automotive application 学会名:Materials Research Society 2018 Fall Meeting 開催場所:Boston, USA 発表者・共著者:Tatsuya Yamashita, Tsutomu Iida, Kenki Tani, Koki Kaita, Daishi Shiojiri 発表日:2018/11/27
- (5).発表題目:Formation of thermally stable intermetallic electrodes with low contact resistance for semiconducting thermoelectric Mg<sub>2</sub>Si
  学会名:Materials Research Society 2018 Fall Meeting
  開催場所:Boston, USA
  発表者・共著者:Fuyuko Ikeda, Koki Kaita, Tomoya Kawamura, Daishi Shiojiri, Tsutomu Iida
  発表日:2018/11/27
- (6).発表題目:Synthesis of n-type Mg<sub>2</sub>Si using conventional vertical Bridgman method for thermoelectric power generation application
  学会名:Materials Research Society 2018 Fall Meeting
  開催場所:Boston, USA
  発表者・共著者:Hiroto Hamba, Tsutomu Iida, Takuya Kodama, and Daishi Shiojiri

発表日:2018/11/27

- (7).発表題目:Experimental Study on Low-Input-Voltage DC-DC Converter
  学会名:The 50th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications
  開催場所:Kyoto, Japan
  発表者·共著者:Yoshiki Maeda, Tsutomu Iida, Nobuyuki Kasa, Hirokazu Ohtagaki, Takuji Kousaka, Hiroyuki
  - Asahara
  - 発表日:2018/11/01
- (8).発表題目:Updated thermoelectric properties of n-type Mg<sub>2</sub>Si and elemental techniques applied for power generation device fabrication
  - 学会名: 3rd Asia Conference on Thermoelectrics (3rd ACT)
  - 開催場所:Taipei, Taiwan
  - 発表者·共著者:T. Iida, K. Kaita, T. Yamashita, H. Hamba, T. Kawamura, K. Tani, F. Ikeda, T. Kodama, R. Hatanaka, D. Shiojiri, R. Inoue, and Y. Kogo
  - 発表日:2018/10/09
- (9).発表題目:Fabrication of durable Mg<sub>2</sub>Si thermoelectric chip for industrial application and design of unileg thermoelectric power generator
  - 学会名: 3rd Asia Conference on Thermoelectrics (3rd ACT)
  - 開催場所:Taipei, Taiwan
- 発表者·共著者:Kenki Tani, Tomoya Kawamura, Tsutomu Iida, Koki Kaita, Tatsuya Yamashita, Fuyuko Ikeda, Rena Hatanaka, Daishi Shiojiri
- 発表日:2018/10/09
- (10).発表題目:有限要素解析を用いたユニレグ型 Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電モジュール構造の探索 学会名:第15回日本熱電学会学術講演会 開催場所:東北大学青葉山キャンパス 発表者・共著者:森笑菜,山下達也,谷建樹,塩尻大士,飯田努 発表日:2018/09/13
- (11).発表題目:熱-電気解析によるユニレグ型Mg<sub>2</sub>Si 熱電発電モジュールの発電特性計算値の精密化 学会名:第15回日本熱電学会学術講演会 開催場所:東北大学青葉山キャンパス 発表者・共著者:谷建樹,山下達也,塩尻大士,飯田努 発表日:2018/09/13
- (12).発表題目:ペースト印刷法による低接触抵抗 Ni 基合金電極の開発 学会名:第15回日本熱電学会学術講演会 開催場所:東北大学青葉山キャンパス 発表者・共著者:河村知哉,海田航希,池田芙由子,塩尻大士,飯田努 発表日:2018/09/13
- (13).発表題目:A Basic Circuit Design of Pile-up DC-DC Converters
   学会名:2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications
   開催場所:Tarragona, Spain
   発表者・共著者:Shota Uchino, Tsutomu Iida, Nobuyuki Kasa, Takuji Kousaka, Hirokazu Ohtagaki, Kenta Shinohara, Hiroyuki Asahara
  - 発表日:2018/09/04
- (14).発表題目:Optimization in basic thermoelectric properties on n-type Mg<sub>2</sub>Si and improvement in elemental durability issues for industrialization
- 学会名:International Conferences Materials And Technologies, 8th Forum On New Materials (CIMTEC)

開催場所:Perugia, Italy 発表者・共著者:T. lida, T. Kodama, M. Tokumura, H. Hamba, T. Mamba, R. Hatanaka, D. Shiojiri, R. Inoue, K. Nishio, A. Yasumori and Y. Kogo 発表日:2018/06/13 (15). 発表題目: DC-DC Converter with Thermoelectric Modules 学会名:The Research Institute of Signal Processing Japan (RISP), International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing 2018 開催場所:Honolulu, USA 発表者•共著者:Hiroyuki Asahara, Nobuyuki Kasa, Tsutomu Iida 発表日:2018/03/03 (16). 発表題目: Thermoelectric Power Generation System for IoT Clean Devices 学会名:The Research Institute of Signal Processing Japan (RISP), International Workshop on Nonlinear C ircuits, Communications and Signal Processing 2018 開催場所:Honolulu, USA 発表者·共著者:Tsutomu Iida, Nobuyuki Kasa, Hiroyuki Asahara 発表日:2018/03/03 (17).発表題目:Examination of thermal stability and deterioration at grain boundary of n-type Mg<sub>2</sub>Si for better endurance 学会名:Materials Research Society 2017 Fall Meeting 開催場所:Boston, USA 発表者・共著者:Mako Tokumura, Tsutomu Iida, Hiroto Hanba , and Daishi Shiojiri 発表日:2017/12/01 (18). 発表題目: Fabrication and evaluation modeling of unconventional unileg structure power generator using n-type Mg<sub>2</sub>Si 学会名:Materials Research Society 2017 Fall Meeting 開催場所:Boston, USA 発表者·共著者:Takeaki Harada, Tsutomu lida, Tadaoki Manba, Tatsuya Yamashita, Daishi Shiojiri, Keishi Nishio, and Yasuo Kogo 発表日:2017/12/01 (19). 発表題目: Improved thermoelectric characteristics of n-type Mg<sub>2</sub>Si and surface passivation for oxidation perseverance 学会名:European Materials Research Society, 2017 Spring Meeting 開催場所:Strasbourg, France 発表者・共著者:Koki Kaita, Mitsunobu Nakatani, Yuma Nagatsuka, Kai Ikeda, Syoji Takemoto, An Ozeki, Atsuo Yasumori, Tsutomu Iida 発表日:2017/05/23 (20).発表題目:熱発電用DC/DCコンバータの動作解析 学会名:電子情報通信学会 非線形問題研究会 開催場所:青森 発表者・共著者:ムハマド ファキヒン,飯田努,笠展幸,麻原寛之 発表日:2017/03/15

4. まとめと今後の見通し

平成28年度~平成30年度の期間に本研究課題が設定した研究目標およびその達成状況について以下の表 にまとめる。

実施項目	担当	最終目標値	H28~30年度 目標値(途中、向上に向けた改変有り)
フェイルセーフ熱電池モジュー ル構造実用化への基礎要素技 術			
<ol> <li>① 環 境 低 負 荷 型 Mg2Si 熱 電発 電材料 の熱的高耐久化</li> </ol>	東京 理科大	●600℃大気中での発電素子耐久性3,000時 間以上	<ul> <li>【目標】</li> <li>●600℃大気中での発電素子耐久性3,000~5,000時間</li> <li>●600℃/100℃温度差で発電素子の無次元性能指数ZT値1.1以上</li> <li>●キャスト法溶融合成で600℃大気中での発電素子耐久性500~</li> <li>1,000時間</li> <li>【成果】</li> <li>【成果】</li> <li>目標達成</li> <li>●600℃/100℃温度差で発電素子の無次元性能指数ZT値1.10の発電素子で、600℃大気中の発電素子耐久性5,000時間に到達、電極付き素子では3,000時間に到達</li> <li>● 溶融合成試料で600℃大気中の素材耐久性500時間に到達、</li> </ul>
②発電用に最適化した 高耐久新型ユニレグ 構造モジュールの開 発	東京 理科大	●温度差環境600℃/100℃で発電電力密度 0.7 W/cm2 ●ユニレグ基本構造モジュールの試作	<ul> <li>価格日次回知 (600 0)(ペイジネギ) (1)(12000年)(12)(2)(2)(2)</li> <li>値は1.01</li> <li>【目標】</li> <li>●600℃/100℃温度差で熱発電素子4~6本のAIN基板付き基本ユニットで発電電力密度0.7 W/cm<sup>2</sup></li> </ul>
③発電環境下振動試 融機により空標値に近	東京	●JIS D1601-1995加振環境(サイン波 33	【成果】 <u>目標達成</u> ●600℃/80℃温度差で熱発電素子6本のAIN基板付きユニレグモジ ュール基本ユニットで発電電力密度0.72 W/cm2に到達 【目標】 ●US D1601 1005(サム)がた22 67 Us 島土加速度5 10C)で発電
www.cより夫瑛見に近い状態で発電特性評価	理杆人	H2、取入加速度3G)でユーレク構造モジュー ル発電耐久100時間以上	<ul> <li>●JIS D1001-1995(サイン波 33, 67 H2、最大加速度5, 10G)で発電耐久100時間以上</li> <li>【成果】<u>目標達成</u></li> <li>●発電環境600℃/80℃においてサイン波33 Hz、加速度10 G構造破壊せずユニレグモジュール6本構造の耐久性100時間を確認</li> <li>●素子剥離、モジュール構造の機械的破壊は製作工程依存、抵抗劣化は軽微</li> </ul>
熱電池専用DC-DC電力変換 器(コンバータ)実用化への基 礎要素技術			
<ul> <li>④スイッチング方式に よるマルチノード入力</li> <li>電力パイルアップ型</li> <li>DC-DCコンバータの</li> <li>開発</li> </ul>	岡山 理科大	●⑤コンデンサ・パイルアップ型コンバータの 開発に関わる基礎要素技術開発	<ul> <li>【目標】</li> <li>●ローサイドスイッチおよびハイサイドスイッチをフローティング電位状態で協調させる回路(同期整流型スイッチ回路)の設計と動作確認</li> <li>●同期整流型スイッチ回路の集積化実装</li> <li>②電源に対して2つのDC-DCコンパータを接続した2段構成の回路を1段あたり6cm×6cmで集積化実装</li> <li>●小型化したDC-DCコンパータで変換効率70%以上の達成(入力:0.5V、~2Aの直流電圧源を使用)</li> <li>【成果】 目標達成</li> <li>●同期整流型スイッチ回路を35mm×35mmで集積化実装し動作確認を完了</li> <li>●DC-DCコンバータの小型化を達成(1段あたり6cm×6cm)</li> <li>●小型化したDC-DCコンバータで変換効率80%以上を達成</li> </ul>
⑤コンデンサ・パイル アップ型コンバータの 開発	岡山 理科大	<ul> <li>●変換効率80%の達成(熱発電ユニットの出 力は0.4~0.8V)</li> <li>●実装面積1/2倍(従前実装回路(回路実装 面積100cm<sup>2</sup>)の1/2倍)の達成</li> <li>●Si-MOSFET及びGaNトランジスタを用いた コンデンサ・パイルアップ回路の開発</li> <li>●コンデンサ・パイルアップ回路の知时申請</li> </ul>	<ul> <li>●変換効率80%の達成(0.4V~0.8Vを出力する熱電発電モジュール または模擬電源を電源に使用)</li> <li>●入力電圧の変動による電力変換効率の検証</li> <li>●2電源を有する2段構成回路を50cm2の実装面積で回路実装</li> <li>●高昇圧コンパータの回路実装(入力電圧の4倍昇圧)</li> <li>【成果】目標達成</li> <li>●熱電発電モジュールまたは模擬電源を用いた回路実験で、入力電 圧が0.4V~0.8Vの範囲で変動した場合においても変換効率80%以上 が保たれ、実用が想定される電力利用率95%以上の範囲で最大変換 効率90%を達成</li> <li>●2電源を有する2段構成回路を50cm<sup>2</sup>の実装面積で回路実装</li> <li>●Duty比50%で入力電圧を4倍昇圧する高昇圧コンバータを回路実装</li> <li>●動前準備として実施したGaNトランジスタを用いたドライバ回路設計 が順調に推移したため、SiトレンチMOSFETによる回路設計を飛ばし て、GaNトランジスタによる回路構築を実施。GaNトランジスタを用いた コンデンサ・パイルアップ回路を開発し、特許出願完了</li> </ul>

我が国のCO<sub>2</sub>削減目標「2030年に2013年度比26.0%削減、2050年に80%削減」へ向け、運輸部門では、電動化によるCO<sub>2</sub>排出削減が必須であるものの、インフラ構築や航続距離問題、リチウム資源不足によるリサイクル 等ライフサイクル・発電エネルギー源でのCO<sub>2</sub>増を考慮すると、電池のみのBEVのみならず、発電機搭載EV (EREV)やプラグインハイブリッド (PHEV)の普及を支援する要素技術開発は2040年にかけて急務である。本取 組み内容と関連する、EREV系発電用エンジンやハイブリッド系の未利用排気熱源から熱電発電方式で回生電 力化を行い、自動化および補機電動化等により需要が逼迫している車載電力を補うことで、エンジン軸出力から の発電機を大型化せず排気熱発電システムにより~6%以上の燃費改善(CO<sub>2</sub>削減)を期待されている現状があ る。EREV系発電用エンジンやハイブリッド系の未利用排気熱発電システム開発は、電動化同様、欧米に先行さ れている技術であるため、国内メーカーも開発を急ぎ初めており、本取組み成果が今後車載実装への開発時に 参照される可能性は十分にある。特に材料・モジュール面では、本取組みでのMg<sub>2</sub>Siが軽量、環境低負荷(無 毒・資源豊富・地域リスクなし)、十分な発電能力であることから期待が大きい。また、DC-DCコンバータについて は、これまで熱発電の低電圧・大電流発電対応とフェイルセーフを担保する回路機構が無く、今回の取組みで 必要性と実用性を示すことができたため、今後の熱発電組み込み用途には車載のみならず開発・応用展開が 期待されると考えられる。