

ワイドギャップ半導体パワーデバイス導入による 高効率かつ小型・軽量の電力変換装置の開発

(省エネに貢献するグリーンエネルギー対応新型電源装置の開発)

電子情報科 主任研究員 中 川 豪
グリーンニューディール技術開発支援室 室 長 兵 頭 竜 二
グリーンニューディール技術開発支援室 参 事 神 田 誠
長崎県窯業技術センター 環境・機能材料科 科 長 永 石 雅 基
長崎県窯業技術センター 環境・機能材料科 主任研究員 山 口 典 男

近年、電気エネルギーを効率良く利用する省エネ技術の推進、太陽光・風力・水力といった再生可能エネルギーの活用など、省エネルギーと環境に配慮したグリーンイノベーションといわれる技術開発が求められている。こうした動きに応えるため、当センターではパワーエレクトロニクスに関する研究開発に着手した。パワーエレクトロニクスは、電力用の半導体パワーデバイスを用いて電力変換・蓄電・送電・電力機器の制御を行う技術で、電気自動車や省エネ家電、IT 機器、スマートハウスなどと応用範囲は幅広く、エネルギーを有効に利用し省エネ化するために重要な技術となる。本研究では、超低消費電力、高耐圧、高速・高温動作性など優れた特性を持つ SiC (シリコンカーバイド)^[1,2] パワーデバイスを県内に先行導入し、エネルギー使用効率が高くコンパクトな電力変換装置を開発することを目的とした。

研究事業の最終年度となる平成27年度は、SiC パワーデバイスを導入した降圧形および双方向型の DC-DC コンバータの設計および試作を行い、(1) デジタル制御による出力電圧の安定化、(2) SiC パワーデバイス導入による高効率化、(3) 窯業技術センターで開発した輻射活用型放熱器との融合による小型化について検証した。

1. 緒 言

コンバータやインバータと呼ばれる電力変換装置の変換効率を低下させる主な要因は、パワーデバイスで発生する損失である。Si (シリコン)を基板材料とした既存のパワーデバイスでは、低損失・高効率化には材料物性的に限界が見え始めており、SiCやGaN^[3] (ガリウムナイトライド)、ダイヤモンド^[4]といったワイドギャップ半導体と呼ばれる次世代の電力用半導体を導入することでこの損失を極限まで低減し、省エネ化を一層推進することが望まれている。

表1に、SiとSiCの代表的な物性値を示す。六方晶の4H-SiCは、Siに比べて禁制帯幅が3倍、絶縁破壊電界が約10倍と大きく、また、電子飽和速度は2倍、熱伝導率は3倍以上もの物性値を持っている。そのため、超低損失、高耐圧、高速・高周波動作性、高温動作性など、パワー半導体としてSiよりも優れた性能を有している。SiCパワーデバイスを導入した各種電力変換装置は主に大手電機メーカーや半導体メーカー、大学等による国主導の大型プロジェクト等で研究・開発され量産化も進んでいる。一方、県内企業では自社製品に対するSiC導入への強いニーズはあるものの、主にコストと技術的な問題でその導入には至っていない。

そこで本研究では、SiCパワーデバイスを県内に先行導入し、最適動作させるための回路方式および制御方式を開発することで、エネルギー使用効率が高くコンパクトな電力変換装置の実現を目指している。平成26年度には、SiC-SBD (ショットキーバリアダイオード)を導入した降圧形DC-DCコンバータの設計・試作と評価、および電源回路シミュレーションによる電力損失の解析を実施し、SiCパワーデバイス導入による損失低減と小型化の効果について検証した^[5]。

最終年度の平成27年度には、SiC-MOSFETおよびSiC-SBDを導入した双方向DC-DCコンバータを開発し、デジタル制御による出力電圧の安定化とSiC導入による高効率化、輻射放熱技術との融合による小型化を実現した。

表1. SiとSiCの物性値の比較

	Si	4H-SiC
禁制帯幅(eV)	1.1	3.3
絶縁破壊電界(MV/cm)	0.3	2.8
電子飽和速度(cm/s)	1.0	2.2
熱伝導率(W/cmK)	1.5	4.9

2. デジタル制御による出力電圧の安定化

2-1. DC-DCコンバータの試作および特性評価

試作した降圧形DC-DCコンバータの外観と変換効率のスイッチング周波数依存性の実測およびシミュレーション結果を図1に示す。定格入出力電圧は48V⇒24V（デューティ比：50%）で、電力容量を50Wとした。スイッチング周波数を20kHzから160kHzまで変化させており、各周波数に応じてインダクタンスおよび入出力キャパシタンスの値を最適化している。シミュレーションでは、電源回路シミュレータの校正係数を調整することで、実動作環境に近い状態でのシミュレーションへと合わせ込みを行った。既存のSi-MOSFETおよびSi-FRDを用いた場合は、スイッチング周波数が高くなるにつれてスイッチング損失が増大するため、変換効率が低下している。一方、SiC-MOSFETおよびSiC-SBDを導入した場合は、SiC-SBDにおいてリカバリ電流がほとんど発生せずにスイッチング損失がほぼゼロとなるため、高周波化に伴う損失増大がみられない。さらにSiC-MOSFETの導入によって高周波動作が可能となり、その結果、スイッチング周波数を160kHzまで高にした場合、85%（Si）から95.5%（SiC）に高効率化、即ち70%の電力損失削減を実現している。また、それぞれ最大効率を得られたスイッチング周波数（Si：40kHz、SiC：160kHz）における実測結果を比較しても、92%（Si）から95.5%への高効率化を実現できている。さらに、SiCパワーデバイスを用いて試作した降圧形DC-DCコンバータの容積は172cm³で、Siパワーデバイスを用いた場合の728cm³に対して76%の小型化を実現した。これは、作動周波数の高周波化によってコイルやコンデンサ等の受動部品を小さくできたことが大きく寄与している。

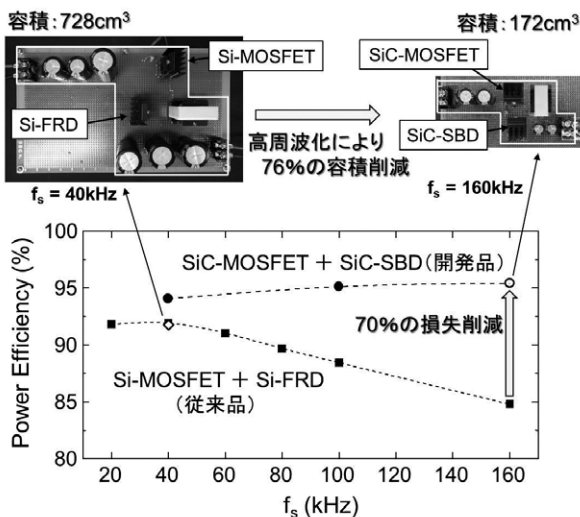


図1. 試作した降圧形 DC-DC コンバータの外観と変換効率のスイッチング周波数依存性

2-2. 制御ゲインの選定と出力特性の評価

次にコンバータの出力電圧をフィードバックし、デジタル演算およびパルス幅変調制御を行うため、DSP（デジタルシグナルプロセッサ）を用いた制御方式を開発した。コンバータの出力電圧をAD変換器でデジタル信号に変換し、出力を安定化させるためのPID演算処理を行う。その結果をもとにPWM（パルス幅変調）信号を生成し、駆動回路を通してパワーMOSFETのオン/オフを制御する。平成26年度には、コンバータの出力電圧を検出する前置増幅器の設計と出力特性の評価、およびAD変換器によってコンバータの出力電圧をデジタル信号に変換する際の補正処理を行った^[5]。平成27年度は、出力の安定化を図るためにPID制御ゲインの最適化を行った。

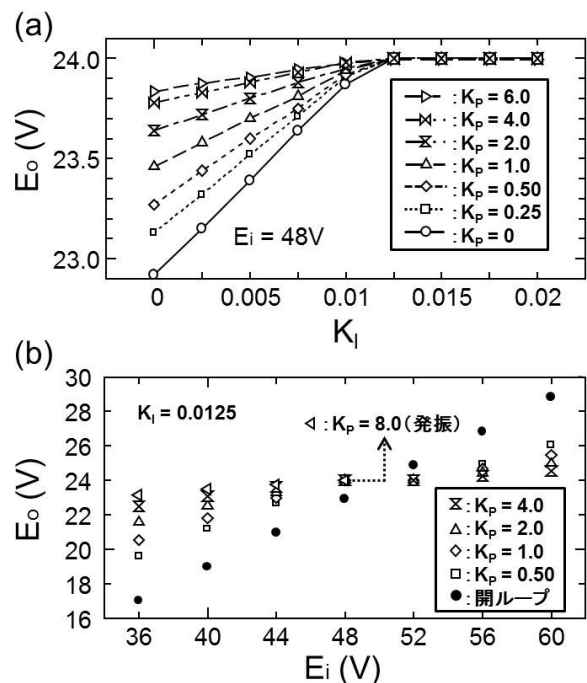


図2. (a) 積分ゲインと (b) 比例ゲインの選定

図2に、積分ゲインと比例ゲインを変化させて出力電圧をシミュレーションした結果を示す。図2(a)の横軸は積分ゲイン(K_i)を、縦軸はSiCパワーデバイスを導入したDC-DCコンバータの出力電圧(目標値：24V)をそれぞれ示している。比例ゲイン(K_p)を0から6.0まで変化させているが、いずれの条件においても出力電圧の偏差をなくし目標値に安定化させるためには、積分ゲインが0.0125以上必要であることが分かる。そこで次に、積分ゲインを0.0125で固定し、比例ゲインを0.5から8.0まで変化させながら入出力特性を評価した。図2(b)の横軸はコンバータの入力電圧を、縦軸は出力電圧をそれぞれ示している。開ループ特性と

の比較から明らかなように、比例ゲインの増大に伴って、入力電圧を変化させても出力電圧が目標値付近で安定化していくのが分かる。しかしながら、比例ゲインを8.0まで大きくすると出力電圧の発振が確認された。

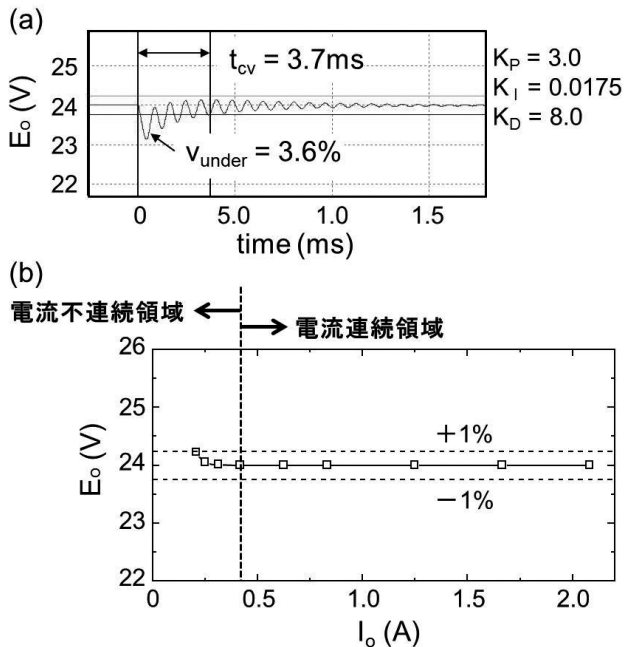


図3. (a) 過渡特性のシミュレーション結果、および (b) 出力電圧の安定性の実測結果

図2の結果をもとに比例ゲインおよび積分ゲインを調整し、微分ゲイン(K_D)も加えて、過渡特性のシミュレーションを実施した。図3(a)の横軸は時間、縦軸はコンバータの出力電圧である。出力電流を0.312A(定格の15%)から2.08A(定格値)までステップ変化させた場合の過渡応答特性を評価した結果、比例ゲイン:3.0、積分ゲイン:0.0175、微分ゲイン:8.0の条件において、出力電圧が目標値(24V)の $\pm 1.0\%$ 以内に収まるまでの収束時間は3.7msと短く、また、アンダーシュートも定格出力電圧の3.6%と低く抑えることができた。そこでSiCパワーデバイスを用いて試作したDC-DCコンバータに前置増幅器、DSP、駆動回路を接続し、デジタル制御でコンバータ出力電圧の安定性について評価した。図3(b)の横軸はコンバータの出力電流を、縦軸は出力電圧をそれぞれ示す。試作したコンバータでは、定格電流値の20%を臨界電流に設計しており、それを下回ると電流不連続領域、即ちリアクトル電流が不連続な状態となる。そのため、電流不連続領域においては出力電圧が異常上昇して出力が不安定となる。図3(b)より、出力電流を2.08A(定格値)から0.208A(定格の10%)まで徐々に下げていった場合、電流不連続領域においても出力電圧は

目標値(24V)の $\pm 1.0\%$ 以内に収まっているのが分かる。以上より、デジタル制御の導入によって、コンバータ出力電圧の安定化を実現した。

3. SiCパワーデバイス導入による双方向DC-DCコンバータの効率化

これまでの結果をもとに、SiCパワーデバイスを導入した双方向型のDC-DCコンバータを設計・試作した。図4に回路構成を示す。昇圧及び降圧動作用のSiC-MOSFETとSiC-SBDをそれぞれ並列に接続しており、検出した出力電圧をデジタル値に変換してPID演算を行う。演算結果をもとに生成したパルス幅変調信号でSiC-MOSFETを駆動させ、コンバータ出力の安定化を図っている。

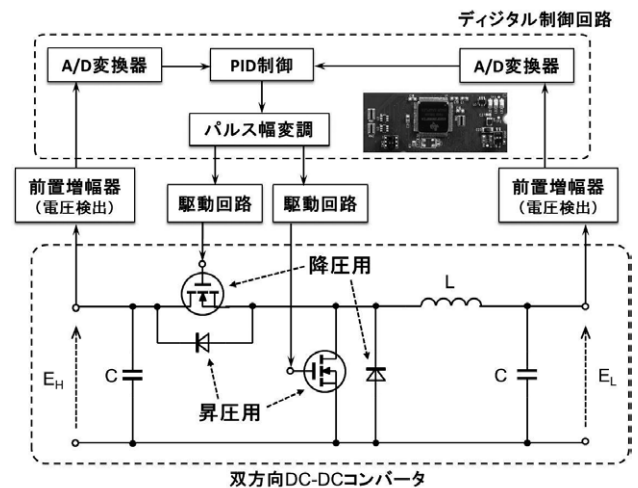


図4. 双方向DC-DCコンバータの回路構成

図5(a)に試作機の外観を示す。SiCパワーデバイスを搭載したこの試作機は、出力電力を500W、スイッチング周波数を160kHzで設計し、電力変換部のみを実装した拡張用の別基板(出力電力:500W)を接続して並列運転させることで、電力容量を拡大できる仕様とした。定格入出力電圧は200V \Rightarrow 100V(デューティ比:50%)で、定格出力電流を2.5A(昇圧)および5A(降圧)、インダクタンスを320 μ H、入出力キャパシタンスをそれぞれ220 μ F、330 μ Fに設定した。輻射を活用した放熱器を用いるため、他の電子部品への輻射熱の影響を抑える目的で、主な熱源となるパワーデバイスのみ基板の裏面側に配置している。

一方、比較用にSiパワーデバイスを搭載した基板(出力電力:250W、スイッチング周波数:40kHz)も設計・試作した。Siを用いた場合には、定格出力電流を1.25A(昇圧)および2.5A(降圧)、インダクタンスを1250 μ H、入出力キャパシタンスをそれぞれ820 μ F、1000 μ Fに設定した。

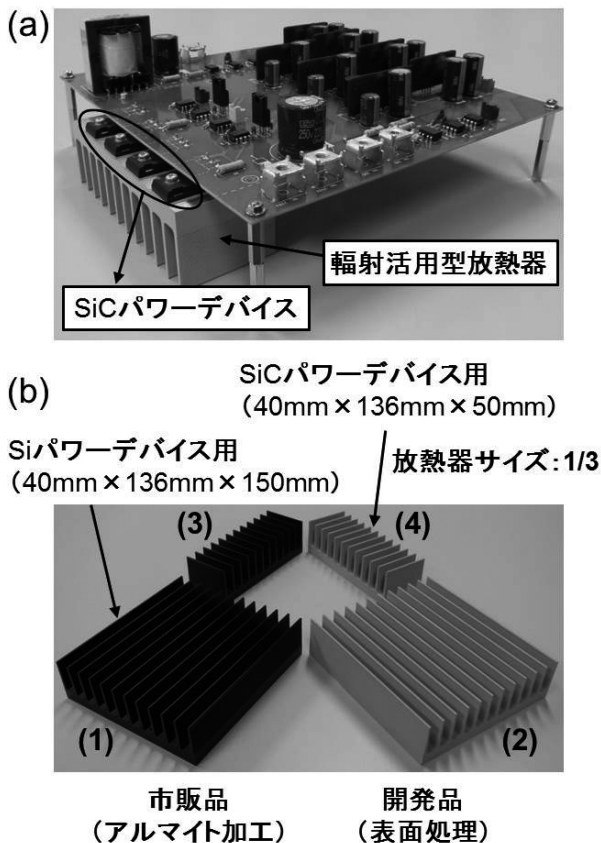


図5. (a) 試作機および (b) 放熱器の外観

図5 (b)には、放熱特性の評価に用いた4種類((1) ~ (4))の放熱器の外観を示している。図中(1)と(2)の放熱器サイズは、高さ:40mm (フィン高さ:30mm) × 136mm × 150mmで、(3)と(4)の放熱器サイズは、高さ:40mm (フィン高さ:30mm) × 136mm × 50mmであり、容積が1/3となっている。また、(1)と(3)の放熱器は市販のアルマイト加工品、(2)と(4)の放熱器は輻射率を向上させるための表面処理を施した開発品である。SiCもしくはSiパワーデバイスを搭載した試作機では、それぞれ電力容量も発生する損失も異なるため、コンバータの消費電力をシミュレーションで算出することで放熱器のサイズを見積もった。

図6に昇圧および降圧動作させた場合の変換効率について、既存のSiパワーデバイスを搭載した回路と比較した一例を示す。コンバータの負荷率を定格の100%から8%まで変化させ、変換効率を計測した。使用した放熱器は、Siの場合は図5 (b)中(1)に示したアルマイト加工された市販品で、SiCの場合は図5 (b)中(4)の表面処理を施した開発品であり、放熱器の容積は1/3となっている。Siでは出力電力:250W、スイッチング周波数:40kHzであるのに対し、SiCでは出力電力:1kW (2並列運転)、スイッチング周波数:

160kHzで動作させている。図6より、最大効率はSiが85.0% (昇圧)および82.3% (降圧)であるのに対し、SiCでは93.7% (昇圧)および92.5% (降圧)となっており、58%の損失削減効果を得ることができた。これにより、双方向DC-DCコンバータにおいて出力電力:1kW以上、変換効率:90%以上、スイッチング周波数:150kHz以上という本研究事業の目標値を達成した。

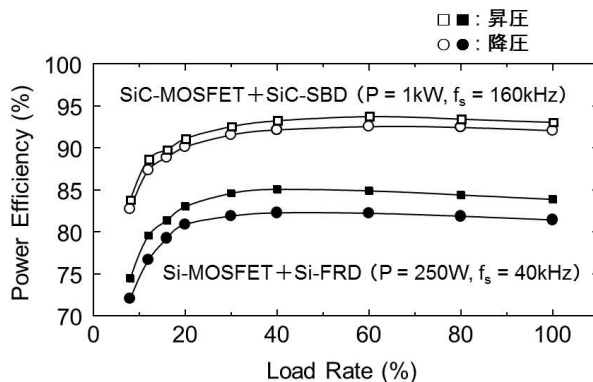


図6. 変換効率の負荷特性

4. 輻射活用型放熱器との融合による小型化

4-1. 放熱特性の評価

最後に、当センターで開発したSiC導入双方向DC-DCコンバータと、窯業技術センターで開発した輻射活用型放熱器を融合させ、電力変換装置全体の小型化について検証した。図7に試作機の放熱特性を評価した結果を示す。ここでは、図5 (b)に示した4種類の放熱器の番号と、図7の表中に記載した番号が対応している。まずは図5 (b)中(1)のアルマイト加工品と、同一形状/同一サイズの図5 (b)中(2)の表面処理品を用い、これらをSiパワーデバイスを搭載した双方向DC-DCコンバータに取り付け、スイッチング周波数:40kHzで動作させた場合の温度計測を実施した。温度計測を実施した箇所は、パワーデバイス(Si-MOSFETもしくはSiC-MOSFET)のパッケージ表面と、放熱器の表面である。ここでいう放熱器の表面とはパワーデバイスと接触する面のことであり、熱伝導の効果を低減させず、かつ、条件を合わせるために、アルマイト加工も表面処理も行っていないアルミ素地となっている。また、放熱特性を評価するにあたり、ファンは使用せず自然空冷とし、放熱器のフィン側は開放空間としている。

図7のグラフは、横軸にコンバータの消費電力を、縦軸左に室温(27°C)からの温度上昇値を、縦軸右に温度をとっている。図7より、パワーデバイス表面と放熱器表面のいずれにおいても、市販のアルマイト加工

品に比べて、開発した表面処理品を用いた場合の方が温度上昇を抑制できている。そこで次に、Si用の放熱器に比べ容積が1/3である図5(b)-(3)のアルマイト加工品と図5(b)中(4)の表面処理品を用い、これらをSiCパワーデバイスを搭載した双方向DC-DCコンバータに取り付け、スイッチング周波数：160kHzで動作させた場合の温度上昇値を計測した。図7より、放熱器の容積が1/3になったことでグラフの傾きは大きくなっているものの、開発した表面処理品を用いることで市販のアルマイト加工品と比較して温度上昇を抑制できることが確認された。放熱のメカニズムには「伝導」、「対流」、「放射」がある。いずれの放熱器もパワーデバイスの接触面は未処理であるため、「伝導」の効果に差異はないと言える。窯業技術センターによる評価によれば、放射率については、黒アルマイト加工品が0.82であるのに対し、表面処理品では0.88と向上している。放射率の増大に伴い放射熱抵抗は減少するが、対流熱抵抗はほぼ一定となるため「対流」の効果にも差異はないと言える。以上より、開発した表面処理を施すことによって「放射」による放熱効果が増大し、市販のアルマイト加工品に比べて、温度上昇を約9%低減することができた。

4-2. 小型化の検証

図7に、コンバータを定格出力で動作させた場合の温度計測結果を併せて示している。SiとSiCを比較すると、SiCパワーデバイスの導入により電力損失を低減できるため、コンバータの出力電力が2倍、放熱器の容積が1/3であるにも関わらず、定格出力動作時の放熱器表面温度は同等(Si：68.9℃、SiC：68.7℃)で、パワーデバイスのパッケージ表面温度を約13℃低減(Si：107.2℃⇒SiC：94.4℃)することができている。電力変換回路と放熱器に加え、制御回路、前置増幅器、駆動回路、内部電源回路(±15V生成用)全てを考慮した場合、試作機を並列運転させることで出力電力を3kWまで拡大すると、SiCパワーデバイスおよび放射活用型放熱器の導入により、双方向DC-DCコンバータ全体の容積を1/4以下に小型化できることが試算され、小型化についても本研究事業の目標値を達成することができた。

また、図7の結果に加えて、SiCパワーデバイス自体が高温動作性に優れていることを踏まえると、放熱器をさらに小型化できる可能性も十分にあると言える。

放熱器	温度計測位置	SiC搭載基板 (500W)	Si搭載基板 (250W)
アルマイト加工	パワーデバイス表面	(3) \diamond	(1) \bullet
	放熱器表面	\blacktriangle	\blacksquare
表面処理	パワーデバイス表面	(4) \diamond	(2) \circ
	放熱器表面	\triangle	\square

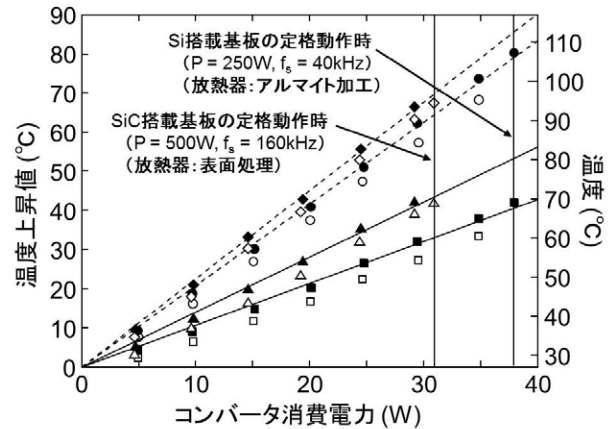


図7. 放熱特性の評価結果

5. 結 言

本研究事業では、SiCパワーデバイスとデジタル制御技術を導入した双方向DC-DCコンバータを開発し、既存のSiパワーデバイスを用いた場合と比較して、58%の電力損失削減を達成した。また、窯業技術センターで開発した放射活用型放熱器と融合させることで、1/4以下への小型化が可能であることを示した。開発した双方向DC-DCコンバータは、家庭内直流バスや蓄電池の充放電などに応用可能である。今後は、県内企業への技術移転を行いながら、事業化に向けた取り組みを進めていく予定である。

参考文献

- [1] 松本寿彰、田井裕通、四戸孝：東芝レビュー Vol. 63 No. 11 (2008) .
- [2] 荒井和雄：Synthesiology Vol. 3 No. 4 (2010) pp. 259-271.
- [3] 田村聡之：Panasonic Technical Journal Vol. 58 No. 1 (2012) .
- [4] 茶谷原昭義、杵野由明、坪内信輝、山田英明：Synthesiology Vol. 3 No. 4 (2010) pp. 272-280.
- [5] 中川豪、兵頭竜二、神田誠、阿部久雄、山口典男：平成26年度長崎県工業技術センター研究報告書 No44, pp. 5-7, 2015.