

平成19年度シーズ発掘試験研究報告書

報告日：平成20年4月30日

技術分野	15
------	----

課題名：Fe基金属ガラス複合材料磁心を用いた低損失・超薄型パワーインダクタの開発

研究期間：契約締結日～平成20年3月31日

1. 担当コーディネータ

氏名(役職)	藤井 國久		印
所属機関名	国立大学法人信州大学 地域共同研究センター		
連絡先	所在地	〒380-8533 長野市若里4-17-1	
	TEL/FAX	026-269-5627 / 026-269-5630	
	E-mail	fujii@crc.shinshu-u.ac.jp	

2. 代表研究者 (代表研究者のみ記入してください。)

氏名(役職)	山沢 清人 (教授)		印
所属機関名	国立大学法人信州大学工学部		
連絡先	所在地	〒380-8533 長野市若里4-17-1	
	TEL/FAX	026-269-5196 / 026-269-5215	
	E-mail	yamasaw@gipwc.shinshu-u.ac.jp	

3. 共同研究者 (委託研究契約を締結した共同研究機関の場合のみ記入してください。)

氏名(役職)			印
所属機関名			
連絡先	所在地		
	TEL/FAX		
	E-mail		

4. 試験研究の結果報告

(1) 試験内容

① 試験内容／目的

負荷近傍に電源を配置し、配線による電力損失を抑制する POL (Point of Load) と呼ばれる分散電源方式が検討されているが、増加する電源個数に対応するため、電源の低コスト化、小型化、薄型化が強く求められており、また、LSI の低電圧化にともなう大電流電源の要求が増している。電源の小型化を阻害する最大の要因はトランスやインダクタなどの磁気部品にあり、特に、10A 以上の許容電流を必要とする POL 電源用大電流インダクタの薄型化はほとんど進んでいない。本研究は Fe 基金属ガラスからなる複合材料磁心を用いた低損失・超薄型パワーインダクタに関するもので、インダクタを回路基板として電源用部品を実装する電源モジュールへの適用を通して、超小型 POL 用電源の可能性を検討する。

② 実施内容

目標仕様

- ・薄型インダクタ サイズ：10mm 角以内、高さ：1mm 以下、許容直流電流：10A 以上、 Q 値：10 以上 (MHz 帯)
- ・電源モジュール サイズ：10mm 角、高さ：2mm 高さ、入出力電圧・電力：5V-1.5V・10W、スイッチング周波数：1MHz、効率：85%以上、単位体積当たりの電力密度：50W/cm³ (現状は、10W/cm³程度)

実施内容

本研究の実施内容を以下に示す。

- ・Fe 基金属ガラスを用いた複合材料磁心の作製と薄型インダクタへの適用：Fe-Cr-P-C-B-Si 金属ガラス磁性粉とポリイミドからなる複合材料厚膜磁心をスクリーン印刷法によって作製して特性評価を行うとともに、三次元有限要素法を用いて薄型インダクタの特性解析・設計を行い、1mm 厚の Ni-Cu-Zn フェライト基板と 100 μ m 厚銅箔スパイラルコイルならびに金属ガラス複合材料磁心を用いて薄型インダクタを試作した。

- ・電源モジュールへの適用による電源の超薄型化の可能性検討：超薄型インダクタを 5V-1.5V・12W の POL 電源に適用し、電源特性を評価するとともに、薄型インダクタを一体化した薄型電源モジュールの検討を行い、本技術による POL 用電源の超薄型化の可能性を検討した。

(2) 得られた成果

① Fe 基金属ガラスを用いた複合材料磁心の作製と特性評価

- ・Fe 基金属ガラス Fe-Cr-P-C-B-Si 合金の基礎特性

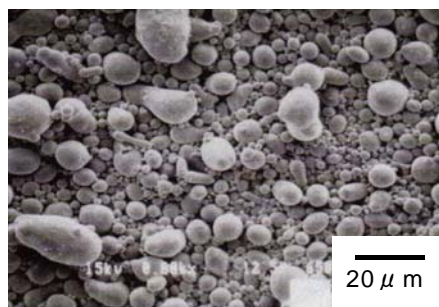
本試験で採用した Fe 基金属ガラス Fe-Cr-P-C-B-Si 合金と、これまでに複合材料磁心の磁性材料として用いてきた Fe-Al-Si 合金の諸特性を表 1 に示す。なお、これらのデータはバルク材料をサンプルとして評価したものであり、それぞれの材料の素材特性を表すものである。表 1 から明らかのように、Fe 基金属ガラス Fe-Cr-P-C-B-Si 合金は飽和磁化が高く、低保磁力による軟磁性、高い電気抵抗率を有し、材料本来が有する素材特性で比較すれば、Fe-Al-Si 合金よりも優れていると言える。

複合材料磁心では、これらの素材を微粒化した磁性微粒子として利用する。図 1 は、Fe 基金属ガラス Fe-Cr-P-C-B-Si 合金と Fe-Al-Si 合金の微粒子形状を電子顕微鏡で観察したものであり、いずれも水アトマイズ法で作製されたものである。Fe-Al-Si 微粒子は平均粒径 10 μ m の楕円体形状をしているのに対し、Fe-Cr-P-C-B-Si 微粒子は平均粒径 13 μ m とやや大きいものの球形状粒子が

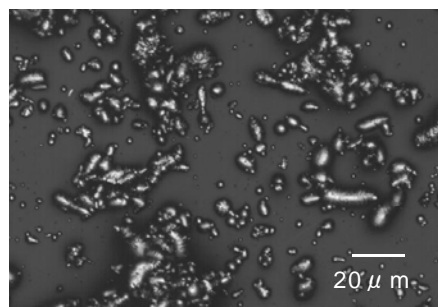
表 1 Fe 基金属ガラス Fe-Cr-P-C-B-Si 合金、FeAlSi 合金ならびに Mn-Zn フェライトの諸特性

	飽和磁化 M_s (T)	保磁力 H_c (A/m)	抵抗率 ρ ($\Omega \cdot m$)
Fe基金属ガラスFe-Cr-P-C-B-Si	1.2	1.9	1.7×10^{-6}
Fe-Al-Si	0.9	2.3	0.8×10^{-6}

バルク材料をサンプルとして評価



(a) Fe-Cr-P-C-B-Si 微粒子



(b) FeAlSi 微粒子

図 1 Fe 基金属ガラス Fe-Cr-P-C-B-Si 合金、FeAlSi 合金微粒子

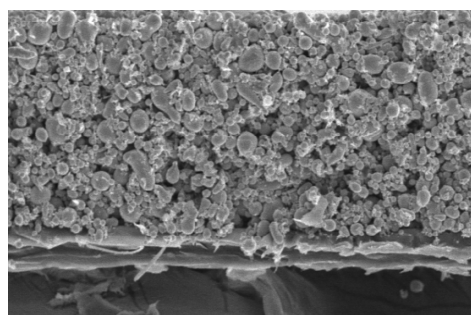
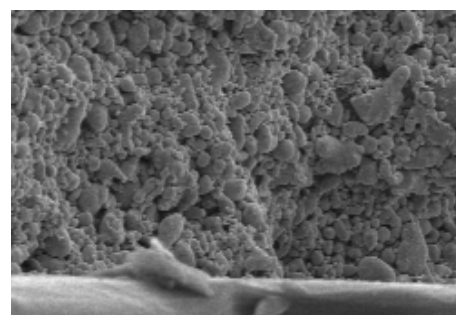
(a) Fe-Cr-P-C-B-Si/ポリイミド
(充填率 : 64%)(b) Fe-Al-Si/ポリイミド
(充填率 : 55%)

図 2 磁性粒子複合材料厚膜の断面写真

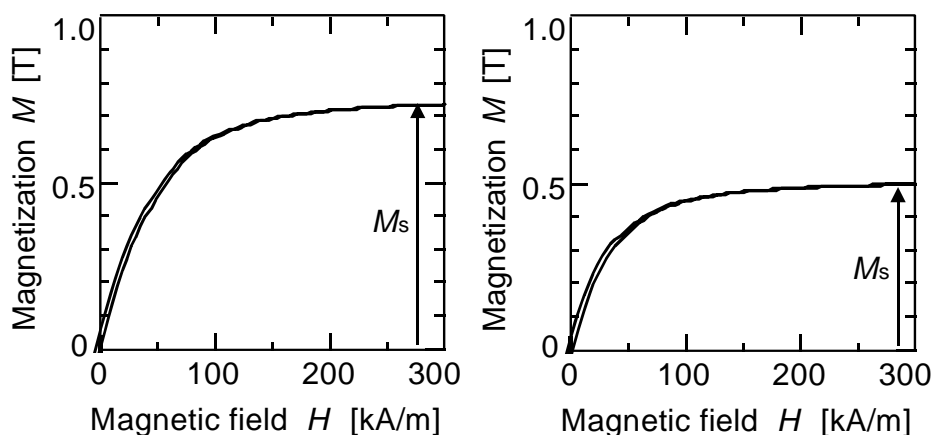
多い。

・磁性粒子/ポリイミド複合材料の作製と特性評価

図 2 は、スクリーン印刷法によって作製した磁性粒子/ポリイミド複合材料厚膜の断面写真を示すものである。複合材料磁心の高透磁率化のためには、磁性粒子体積充填率を可能な限り高くすることが必要であり、図 2 で示した複合材料は、スクリーン印刷可能な上限の充填率で作製した場合を示している。金属ガラス Fe-Cr-P-C-B-Si 微粒子は球形状であることと、微細な粒子が多数存在するため、粗大粒子間を微細粒子が埋める最密充填に近い状態になっており、微粒子充填率は 60% を越える。

図 3 は、磁性粒子/ポリイミド複合材料厚膜の静磁化曲線を示すものである。図 3 から明らかのように、Fe-Cr-P-C-B-Si/ポリイミド複合材料厚膜は磁性体充填率が高いために、0.75T に達する飽和磁化 M_s を有する。インダクタへの適用を考えると、飽和磁化の高い磁心を採用することで直流重畳特性の向上が期待できる。

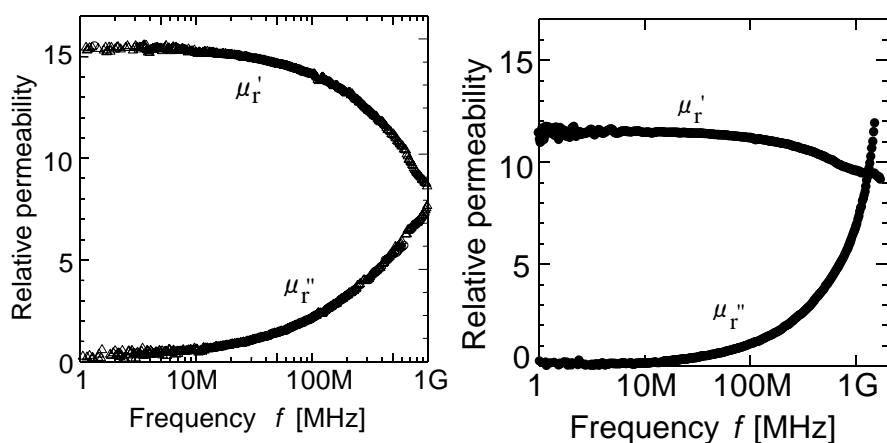
図 4 は、磁性粒子/ポリイミド複合材料厚膜磁心からなるリング形状サンプルを作製して測定した複素透磁率の周波数特性を示すものである。Fe-Cr-P-C-B-Si/ポリイミド複合材料厚膜は磁性



(a) Fe-Cr-P-C-B-Si/ポリイミド
(充填率 : 64%)

(b) Fe-Al-Si/ポリイミド
(充填率 : 55%)

図 3 磁性粒子複合材料厚膜の静磁化曲線



(a) Fe-Cr-P-C-B-Si/ポリイミド
(充填率 : 64%)

(b) Fe-Al-Si/ポリイミド
(充填率 : 55%)

図 4 磁性粒子複合材料厚膜の複素透磁率

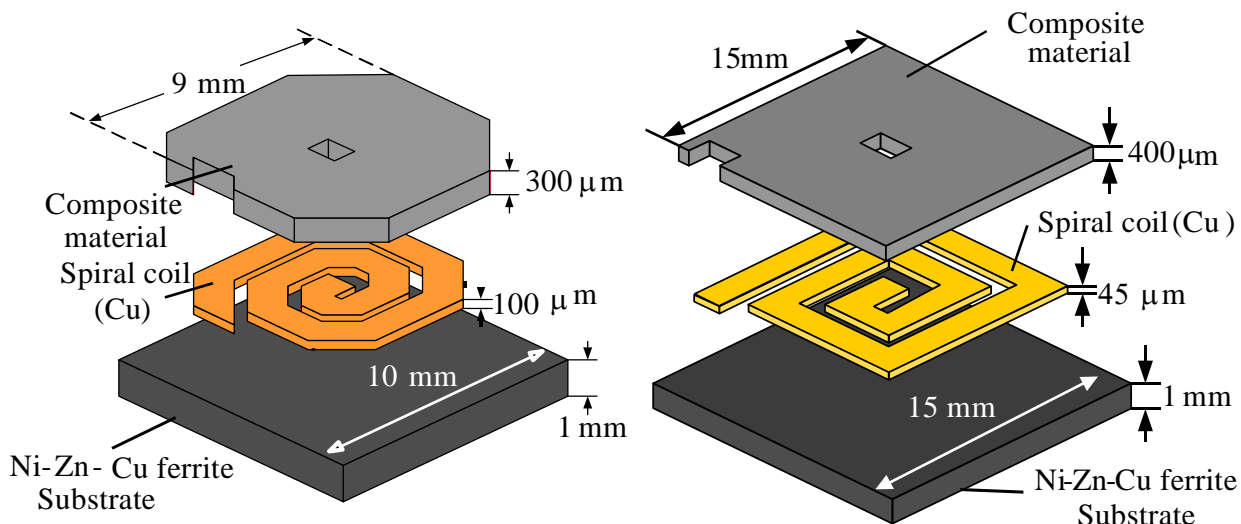
体充填率が高いため磁性粒子間の静磁結合が強く、3つの中で透磁率が最も高い。後述する電源モジュールのスイッチング周波数 1MHz 近傍の周波数における磁気損失 μ_r'' は無視できるほど小さい。

②Fe 基金属ガラスを用いた複合材料磁心の薄型インダクタへの適用

本試験で作製した Fe 基金属ガラス複合材料磁心を用いて薄型インダクタを試作した。後述する電源におけるインダクタの電流連続条件から、インダクタンス : 130nH、直流重畳電流 : 10A 以上を目標特性として、三次元有限要素法による特性解析にもとづいてインダクタの設計を行った。

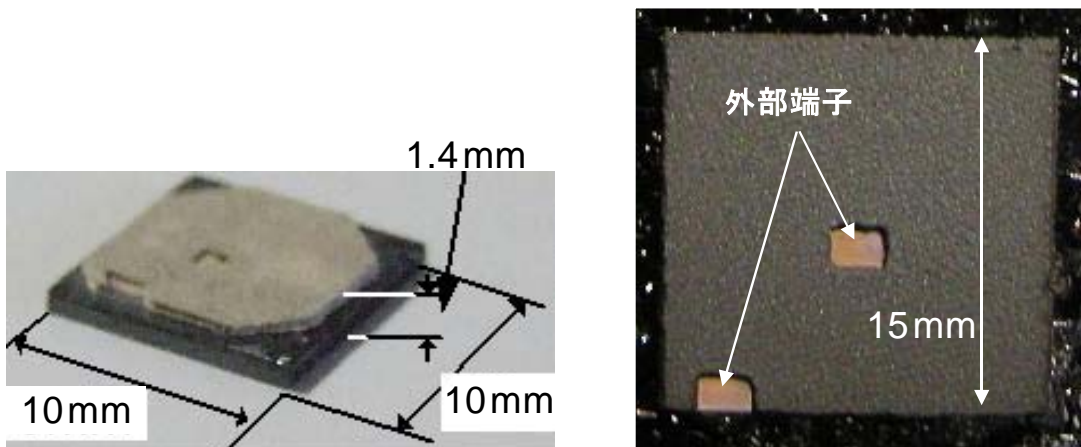
・複合材料磁心を用いた薄型インダクタの試作

図 5 は、本試験で試作したインダクタとこれまでに試作したインダクタの模式図と外観写真を示すものである。基板には、厚さ 1mm、透磁率 100 の Ni-Zn-Cu フェライト板を用い、厚さ $100\mu\text{m}$ の銅箔を接着した後、エッチングにより 2 ターンの八角形スパイラルコイルを作製した。さらに、コイルの上からスクリーン印刷により複合材料磁心を形成した。従来型インダクタのサイズは 15mm 角と大きく、また、銅箔スパイラルコイルの厚さも $45\mu\text{m}$ と薄いため、コイル直流抵抗が $10\text{m}\Omega$ 以上であった。これに対して、本試験による試作インダクタのサイズは 10mm 角であり 1/2 以下の小



本試験で試作した薄型インダクタ これまでに試作した従来型インダクタ

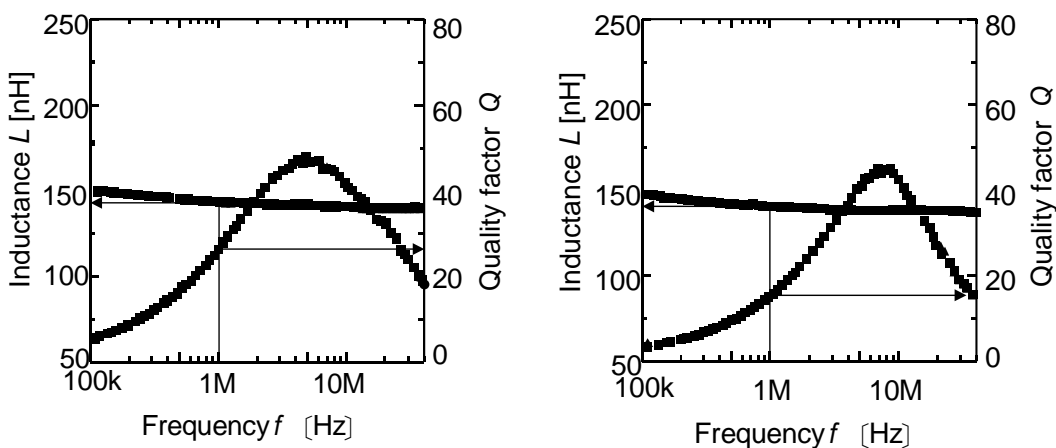
(a) 薄型インダクタの模式図



本試験で試作した薄型インダクタ これまでに試作した従来型インダクタ

(b) 薄型インダクタの外観写真

図 5 磁性粒子複合材料厚膜を用いた薄型インダクタ



(a) Fe-Cr-P-C-B-Si/ポリイミド
(サイズ : 10mm 角)

(b) Fe-Al-Si/ポリイミド
(サイズ : 15mm 角)

図 6 磁性粒子複合材料厚膜を用いた薄型インダクタの特性

型化を達成するとともに、コイル直流抵抗も半分以下の 4mΩ に低減できた。

・薄型インダクタの諸特性

図 6 は、試作インダクタのインダクタンスと Q 値の周波数特性を示すものである。比較のために、これまでに試作した Fe-Al-Si / ポリイミド複合材料磁心を用いた 15mm 角薄型インダクタのデータを併せて示す。図から明らかなように、金属ガラス複合材料を用いた薄型インダクタは、これまでに試作したインダクタに比べて半分以下のサイズであるにもかかわらず、ほぼ同等のインダクタンス（約 140～150nH）を有することが分かる。これは、金属ガラス複合材料の透磁率が高いことに加え、本文では詳述しないが、スパイラルコイル内径サイズの拡大による

磁気回路の磁気抵抗の低減が効いているものと考えられる。また、銅箔厚さを 100μm に厚くしたことによるコイル抵抗の低減によって、1MHz の Q 値は 26 程度の高い値を示した。

図 7 は、薄型インダクタに直流バイアス電流を流した状態で測定したインダクタンスの直流重畳特性を示すものである。10A の直流重畳電流におけるインダクタンスの低下は Fe-Cr-P-C-Si-B 金属ガラス複合材料磁心を用いた場合で約 2.6%、Fe-Al-Si 複合材料磁心の場合で約 3.2 であった。

・目標特性との比較

本試験で試作した金属ガラス複合材料磁心を用いたインダクタの電気特性はいずれも目標値を満足した。しかしながら、インダクタのサイズ目標のうち、高さ寸法のみが目標の 1mm 以下を達成できなかった。三次元有限要素法による磁束密度分布解析によれば、Ni-Zn-Cu フェライト基板中の磁束はコイル近傍に集中し、0.5mm 程度まで基板を薄板化してもインダクタ特性にほとんど影響を与えないことが明らかになっている。この知見をもとに、0.5mm 厚 Ni-Cu-Zn フェライト基板を用いてインダクタの試作を行ったところ、試作途中で多数の基板割れを生じた。インダクタ作製後に基板裏面を研磨してインダクタ高さを 1mm 以下にする方法などが考えられ、今後、検討する予定である。

②薄型インダクタの POL 電源への適用実験

・POL 電源の回路構成

図 8 に、複合材料磁心を用いた薄型インダクタを適用した同期整流方式降圧チョップパ DC-DC コンバータの基本回路構成を示す。図中の N チャンネル MOS-FET スイッチ、PWM 制御 IC は Volterra 社製を使用した。Vi は電源の入力電圧、Ii は入力電流、Vo は出力電圧、Io は出力電流である。インダクタ電流連続条件を満足する臨界出力電流 Ioc は(1)式で与えられ、スイッチング周波数 f: 1MHz として、試作インダクタのインダクタンス L: 140nH を代入すると、Ioc は約 3.8A となり、この電流以上で電力連続条件を満足することになる。

$$I_{oc} = \frac{V_o(V_i - V_o)}{2 L f V_i} \dots \dots \dots (1)$$

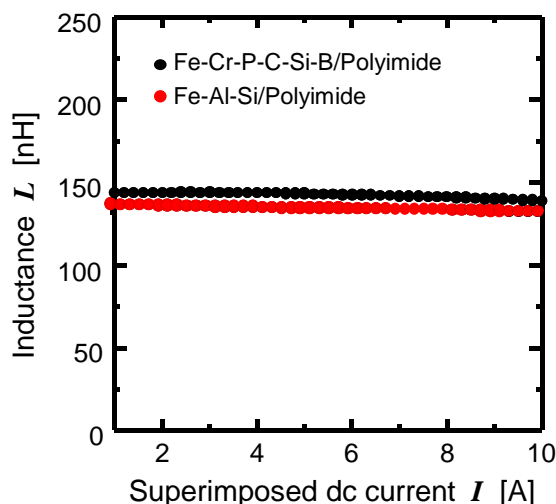


図 7 直流重畳特性

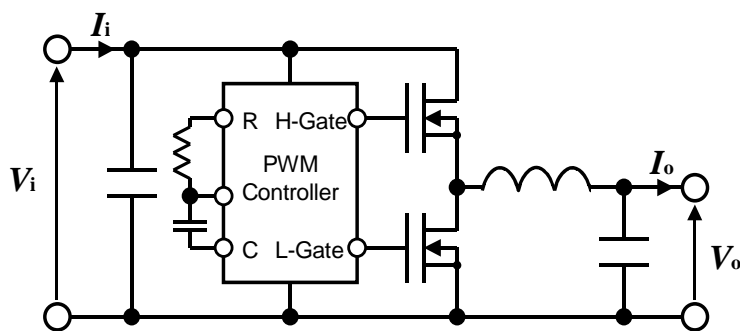


図 8 同期整流方式降圧チョップ DC-DC コンバータの基本回路構成

・電源の電力変換効率

DC-DC コンバータの入出力電圧・電流を測定して、(2)式を用いて電力変換効率ηを見積もった

$$\eta = \frac{V_o \times I_o}{V_i \times I_i} \times 100 \text{ [%]} \dots \dots \dots (2)$$

図 9 に、電力変換効率ηと出力電流 I_o の関係を示す。Fe-Al-Si/ポリイミド複合材料磁心を用いた薄型インダクタは45μm厚の薄い銅箔スパイラルコイルを用いているため、コイル直流抵抗が10mΩ以上と大きく、電力変換効率ηは出力電流 I_o の増大に伴って著しく低下し、8A（出力12W）の時の効率は80%程度にとどまる。これに対して、Fe 基金属ガラス Fe-Cr-P-C-B-Si/ポリイミド複合材料磁心薄型インダクタを用いた場合は、インダクタの高い Q によって軽負荷効率が高いだけでなく、コイル直流抵抗が4mΩ程度と小さいため、8A の出力電流条件における効率は86%に達する。

・目標特性との比較

金属ガラス複合材料を用いた薄型インダクタを降圧チョップ DC-DC コンバータに適用して電源特性を評価した結果、目標特性（入出力電圧・電力：5V-1.5V・10W、効率：85%以上）を達成した。また、薄型インダクタを一体化した P0L 電源の可能性を検証する目的で、薄型インダクタの裏面に半導体デバイスや抵抗、キャパシタを実装した電源モジュール（図 10）を試作した。当初は、MOS-FETとPWM制御ICのペアチップをインダクタのフェライト基板裏面に実装する予定であったが、ペアチップの状態で購入することが困難であり、パッケージ封止品で対応した。このために、目標とする2mm高さをクリアすることができず、約3.5mmとなった。12W出力を体積で割った単位体積当たりの電力密度に換算すると34w/cm³となり、目標の50W/cm³にはおよばないが、現状のP0L電源用インダクタの部品高さが3~4mm程度であることを考えると、インダクター一体型P0L電源で3.5mm高さを実現できたことは、本試験による薄型インダクタ技術が電源の薄型化に大きく寄与するものと言える。

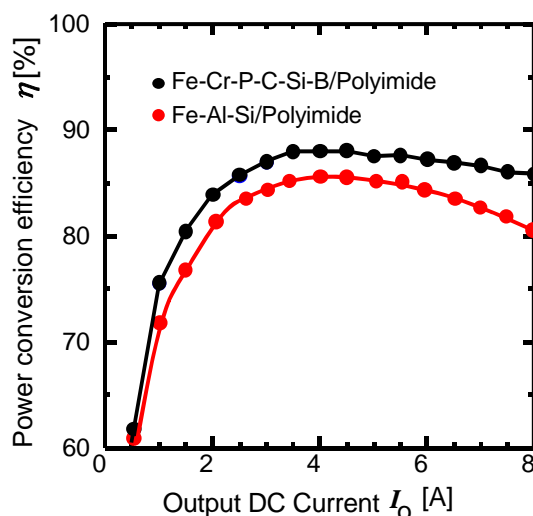


図 9 薄型インダクタを用いた DC-DC コンバータの電力変換効率

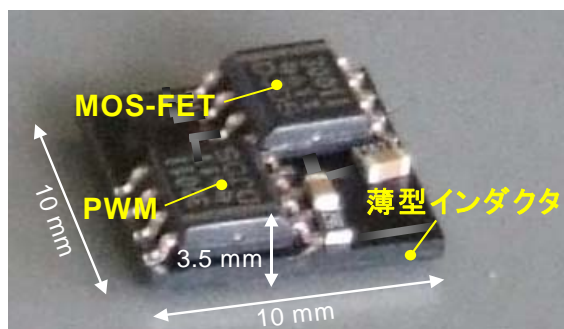


図 10 薄型インダクター一体型電源モジュール

(3) 今後の展開

①平成 20 年度計画

- ・薄型インダクタの改良とインダクター一体型 POL 電源モジュールの試作

本試験で未達であった「基板裏面研磨によるインダクタの 1mm 以下の薄型化」、「半導体ベアチップ実装によるインダクター一体型 POL 電源モジュールの試作」を行う予定である。

- ・外部発表等

本試験による成果を 9 月開催の日本応用磁気学会、12 月開催の電気学会マグネティックス研究会で発表予定。特許出願については、検討中。また、金属ガラスの供給先であるアルプス電気（株）との共同研究を計画している。

②今後の実用化に向けた長期的展望

(4) 知的財産権について

①試験の結果得られた知的財産権

なし。インダクター一体型電源モジュールについて、構成法、製造法などについて、共同研究先の企業と今後出願を検討する。

②今後の知財権確保

今後、共同研究先企業と共同出願の予定。POL 電源の薄型化・小型化のニーズは高く、周辺特許も含めて出願後は速やかに審査請求を行い、戦略的に知財権確保を図っていく。

(5) 今後のフォローアップ等について（コーディネータ記載）

本試験は、金属ガラスという先進材料の用途開拓を図った点で、材料分野の市場開拓が今後期待されるとともに、小型化・薄型化のニーズの高い POL 電源用薄型インダクタのキー材料としての位置付けを確立した。また、アルプス電気（株）においても、金属ガラスを用いたスクリーン印刷部品に多大の関心を持っており、平成 20 年度中に共同研究契約を締結するようフォローする。