

平成27年度戦略的基盤技術高度化支援事業

家庭用コンセントから高速充電可能な
デジタルワンコンバータ方式によるEV用小型充電器の開発

研究開発成果等報告書

平成28年 3月

委託者	九州経済産業局
委託先	一般財団法人九州産業技術センター

目次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果の概要
- 1-4 当該プロジェクト連絡窓口

第2章 【1】高耐圧・高放熱性粉体樹脂の開発およびコーティング技術の確立

- 2-1 【1-1】高耐圧・高放熱性粉体樹脂の開発
- 2-2 【1-2】コーティング技術の確立
- 2-3 【1-3】モジュール信頼性の確保

第3章 【2】ワンコンバータのデジタル制御技術の確立

- 3-1 【2-1】回路シミュレーション技術を用いた基礎制御理論の構築
- 3-2 【2-2】非線形制御技術を用いた高速応答制御の実現
- 3-3 【2-3】ニューラルネットワークを利用したオートチューニング技術の実現
- 3-4 【2-4】ワンコンバータ制御プログラムの作成・評価

第4章 【3】EV用小型充電器の設計・開発

- 4-1 【3-1】小型充電器の設計・試作
- 4-2 【3-2】充電器特性の評価
- 4-3 【3-3】信頼性の評価
- 4-4 【3-4】実車試験

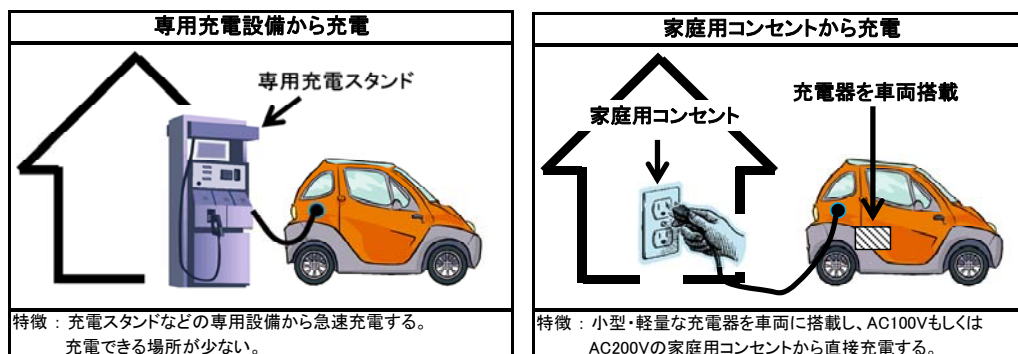
第5章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究の目的

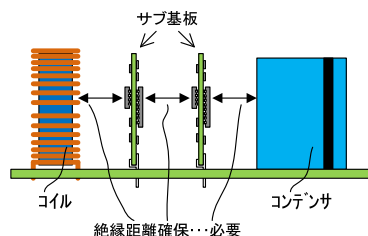
小型EVが普及するための課題は、車載用小型充電器の開発と充電時間の短縮である。小型化では内部の実装密度の向上、充電時間短縮には充電効率の向上が不可欠である。そのために、まず内部モジュールを高耐圧・高放熱粉末樹脂でコーティングすることで高密度集積技術を高度化する。さらに、独自技術であるワンコンバータのデジタル制御により充電効率の向上と部品数の削減を図り、小型化と充電時間短縮の技術を確立する。



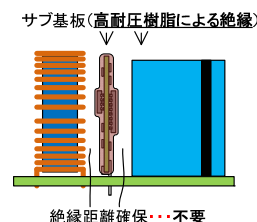
① 小型化

充電器の小型化の為には、キーパーツであるサブ基板モジュールの高密度・狭隣接実装が必要となる。これを実現するために高耐圧・高放熱粉末樹脂を新規開発することで、絶縁の確保及び放熱効果によるサブ基板モジュールの小型化を図り、高密度・狭隣接実装による充電器の小型化へと繋げる。

●電子回路実装イメージ

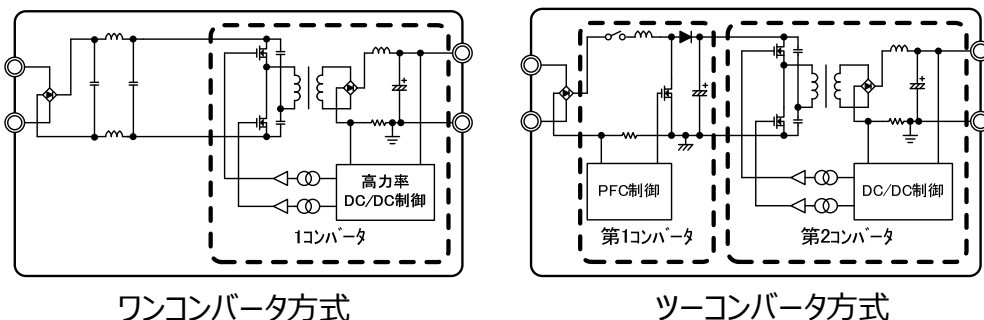


●電子回路実装イメージ



② 充電効率の向上

効率低下の要因となるコンバータ回路を2回路から1回路化（ワンコンバータ）することで、効率を高め省エネルギー化する。従来、2つのコンバータ回路で入力側の力率改善と出力側の電圧安定化を行っていたが、ワンコンバータ化によりこれら2つの機能の両立を図ることは非常に困難な技術課題である。それらを入力フィルタの設計技術とデジタル制御技術を工夫し、さらに実装技術を新たに開発することにより、入力フィルタは少し大きくなるが全体として大幅に小型・軽量化され、力率は保持されたままで、電力効率を改善することにより、充電時間を短縮したワンコンバータ方式の充電器を開発する。



(2)研究の目標

【1】高耐圧・高放熱性粉体樹脂の開発およびコーティング技術の確立

【1-1】高耐圧・高放熱性粉体樹脂の開発

- ・絶縁耐圧：2,800V／1分間
- ・熱抵抗：コーティング無し品比25%低減

【1-2】コーティング技術の確立

- ・樹脂膜厚平均値±10%のバラツキ
- ・ピンホール発生ゼロ

【1-3】モジュール信頼性の確保

- ・信頼性試験前後の電気的特性、外観等の品質確認を行う。
耐温度サイクル・・・30⇔80℃、各45分、1000サイクル
(電気的特性合否判定基準：無負荷電流60～120mAなど、外観合否判定基準：0.2mm以上の目視にて確認できるレベルの樹脂クラックなきこと)

【2】ワンコンバータのデジタル制御技術の確立

【2-1】回路シミュレーション技術を用いた基礎制御理論の構築

- ・AC100Vにおいて充電器の力率98%以上、効率93%以上。
- ・AC200Vにおいて充電器の力率98%以上、効率95%以上。

【2-2】非線形制御技術を用いた高速応答制御の実現

- ・入力急変時の出力電流の変動幅が従来の7%に対して、3%以下。

【2-3】ニューラルネットワークを利用したオートチューニング技術の実現

- ・オートチューニング技術を用いて充電電流バラつき5%以下。

【2-4】ワンコンバータ制御プログラムの作成・評価

- ・AC100Vにおいて充電器の力率98%以上、効率93%以上。
- ・AC200Vにおいて充電器の力率98%以上、効率95%以上。
- ・【2-2】、【2-3】をワンコンバータ制御プログラムに組込む。

【3】EV用小型充電器の設計・開発

【3-1】小型充電器の設計・試作

- ・小型充電器の体積を従来比50%となる構造設計・試作。

【3-2】充電器特性の評価

- ・AC100Vにおいて充電器の力率98%以上、効率93%以上。
- ・AC200Vにおいて充電器の力率98%以上、効率95%以上。

【3-3】信頼性の評価

- ・車載機器として必要な信頼性試験に合格する。

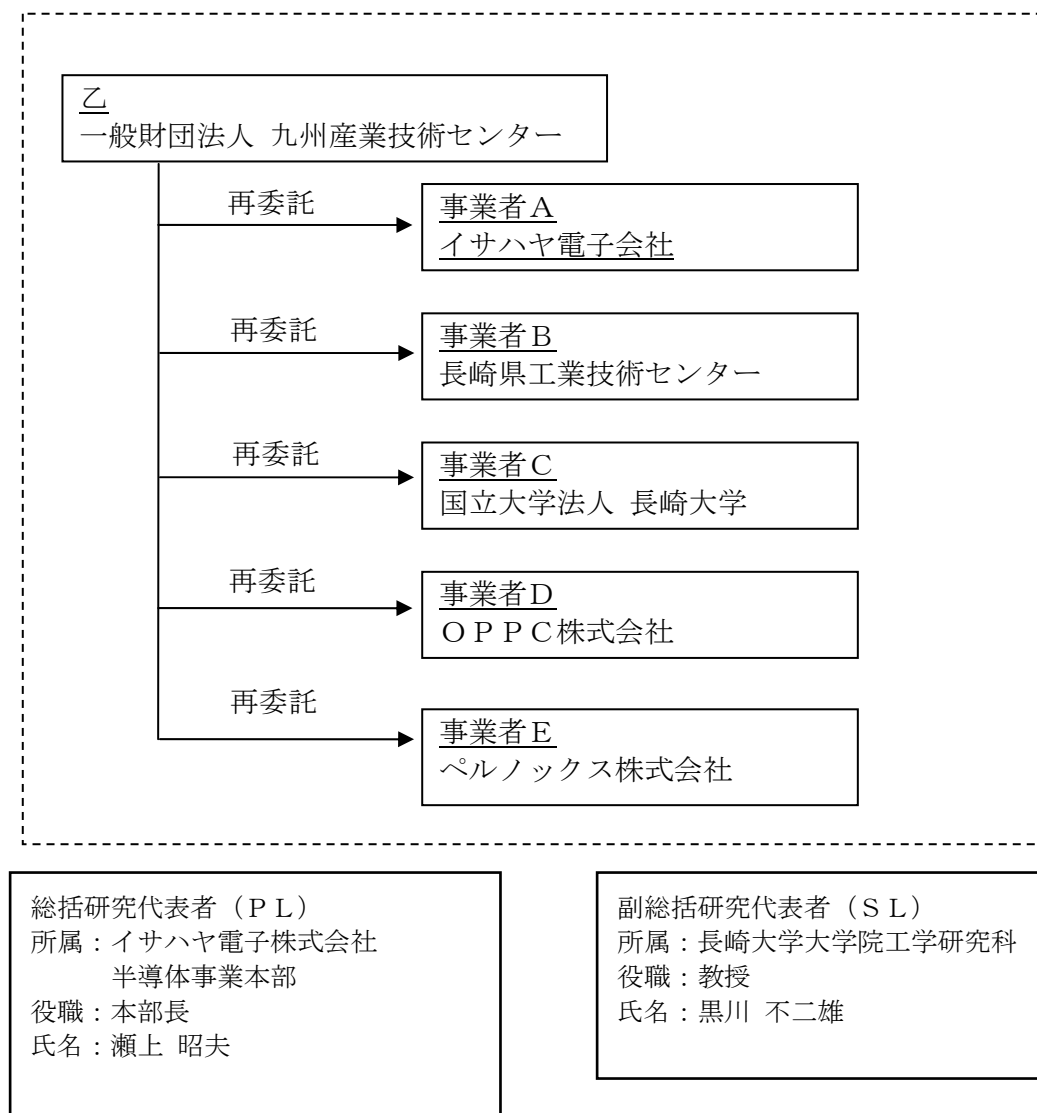
【3-4】実車試験

- ・車両搭載し、異常動作や破損無き事を確認する。

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

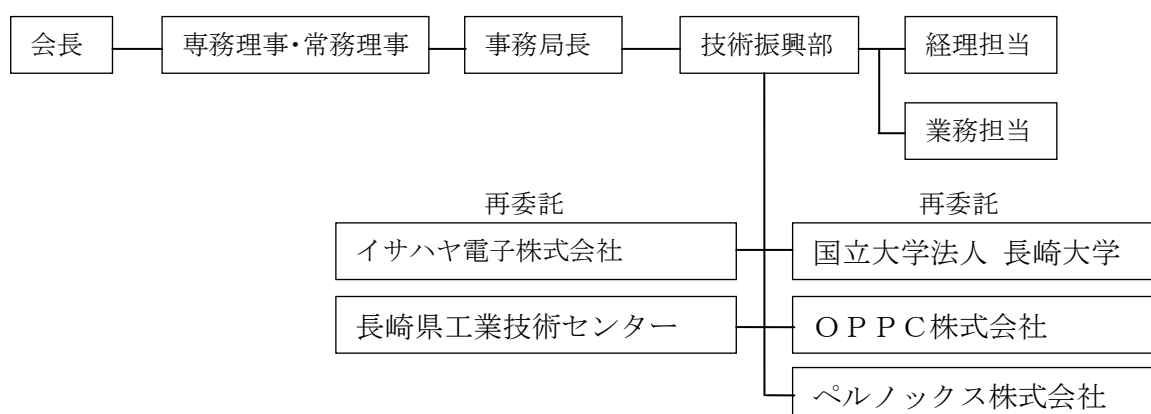
1) 研究組織(全体)



2) 管理体制

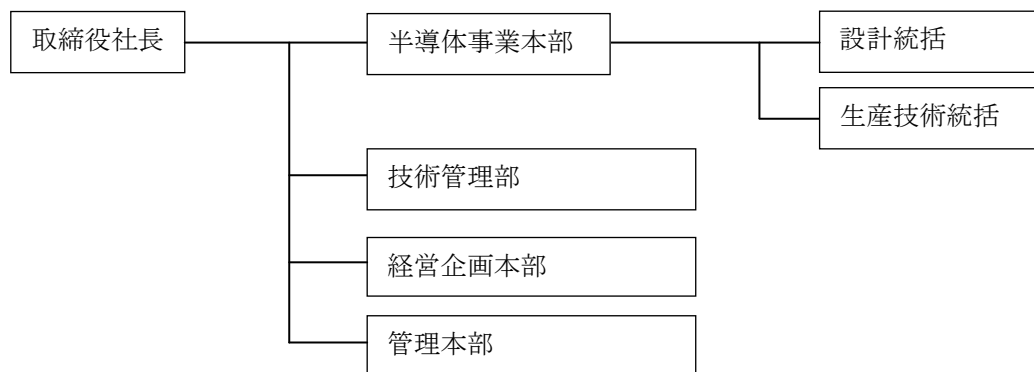
① 事業管理機関

[一般財団法人 九州産業技術センター]

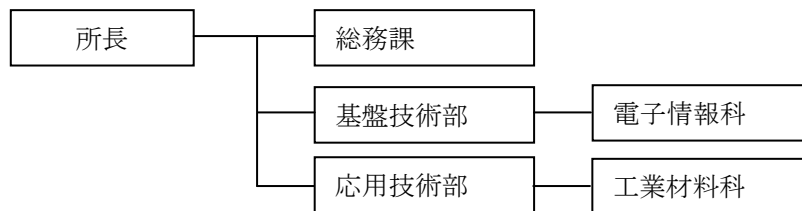


②(再委託先)

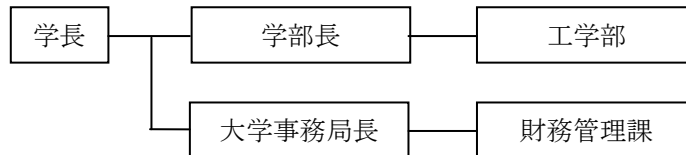
A イサハヤ電子株式会社



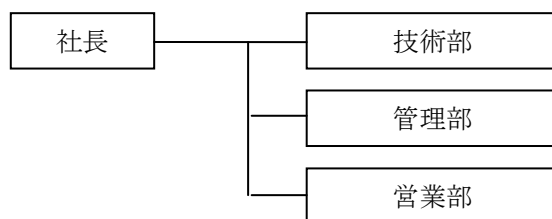
B 長崎県工業技術センター



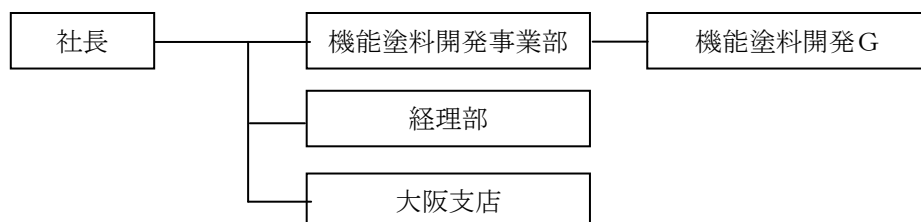
C 国立大学法人 長崎大学



D OPPC株式会社



E ペルノックス株式会社



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 一般財団法人 九州産業技術センター

①管理員

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
二階堂 正憲	技術振興部 部長	【4】
田中 和光	技術振興部 部長	【4】
濱田 和彦	技術振興部 次長	【4】
米田 毅彦	技術振興部 次長	【4】
杉本 大貴	技術振興部	【4】

【再委託先】※研究員のみ

A イサハヤ電子株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
瀬上 昭夫	半導体事業本部 本部長	【1-1】，【1-2】 【1-3】，【2-1】 【2-2】，【2-3】 【2-4】，【3-1】 【3-2】，【3-3】 【3-4】
野田 孝博	半導体事業本部生産技術統括 生産技術部製造技術課 課長	【1-1】，【1-2】 【1-3】，【3-1】
山邊 真也	半導体事業本部 副本部長	【1-1】，【1-2】 【1-3】，【3-1】
山下 裕史	半導体事業本部生産技術統括 生産技術部実装技術課 課長	【3-1】
尾口 陽軌	半導体事業本部生産技術統括 生産技術部製造技術課 担当	【1-1】，【1-2】 【1-3】，【3-1】
平川 翔悟	半導体事業本部生産技術統括 生産技術部製造技術課 担当	【1-1】，【1-2】 【1-3】，【3-1】
服部 慎一郎	半導体事業本部設計統括 パワーモジュール設計部 課長	【2-1】，【2-2】 【2-3】，【2-4】 【3-1】，【3-2】 【3-3】，【3-4】
太田 雄司	半導体事業本部設計統括 パワーモジュール設計部 担当	【2-1】，【2-2】 【2-3】，【2-4】 【3-1】，【3-2】 【3-3】，【3-4】

上野 孝太	半導体事業本部設計統括 パワーモジュール設計部 担当	【2-1】，【2-2】 【2-3】，【2-4】 【3-1】，【3-2】 【3-3】，【3-4】
-------	-------------------------------	--

B 長崎県工業技術センター

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
市瀬 英明	応用技術部 工業材料科 主任研究員	【1-3】，【3-3】
中川 豪	基盤技術部 電子情報科 主任研究員	【1-3】，【3-3】

C 国立大学法人 長崎大学

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
黒川 不二雄	教授	【2-1】，【2-2】 【2-3】，【2-4】
柴田裕一郎	准教授	【2-4】
丸田英徳	助教	【2-4】

D OPPC 株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
佐々木 正次	技術部 部長代理	【1-2】
佐藤 一生	技術部 課長	【1-2】
横山 創一	技術部 課長代理	【1-2】
名塚 幸次	営業部 課長	【1-2】

E ペルノックス株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
小宮山 宏文	機能塗料開発G マネージャー	【1-1】
武藤 秀治	機能材 営業グループ 大阪 主任	【1-1】

(3) 経理担当者及び業務管理機関の所属、氏名

(事業管理機関)

一般財団法人 九州産業技術センター

(経理担当者) 技術振興部 課長代理 小屋町 智代美

(業務管理者) 技術振興部 部長 田中 和光

(再委託先)

A イサハヤ電子株式会社

(経理担当者) 経営企画本部 副本部長 谷口 和之

(業務管理者) 技術管理部 部長 栗木 実

B 長崎県工業技術センター

(経理担当者) 総務課 専門幹 堤 昭典

(業務管理者) 所長 馬場 恒明

C 国立大学法人 長崎大学

(経理担当者) 文教地区事務部会計課会計班 主査 東谷 悠

(業務管理者) 教授 黒川不二雄

D O P P C 株式会社

(経理担当者) 管理部 部長 深谷 智

(業務管理者) 営業部 課長 名塚 幸次

E ペルノックス株式会社

(経理担当者) 経理部 部長 加藤 潔

(業務管理者) 機能材 営業グループ 大阪 主任 武藤 秀治

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

推進委員会委員

(外部推進委員)

氏 名	所属・役職	備 考
近藤 淳	トヨタ車体株式会社 新規事業開発部 EV・電子開発室 電子設計グループ 主担当員	アドバイザー

(内部推進委員)

氏 名	所属・役職	備 考
瀬上 昭夫	イサハヤ電子株式会社 半導体事業本部 本部長	PL委
山邊 真也	イサハヤ電子株式会社 半導体事業本部 副本部長	委
栗木 実	イサハヤ電子株式会社 技術管理部 部長	
服部 慎一郎	イサハヤ電子株式会社半導体事業本部設計統括 パワーモジュール設計部 課長	委
黒川 不二雄	国立大学法人 長崎大学 教授	SL
中川 豪	長崎県工業技術センター 基盤技術部 電子情報科 主任研究員	
佐々木 正次	OPPC株式会社 技術部 部長代理	
横山 創一	OPPC株式会社 技術部 課長代理	
名塚 幸次	OPPC株式会社 営業部 課長	
小宮山 宏文	ペルノックス株式会社 機能塗料開発G マネージャー	
武藤 秀治	ペルノックス株式会社 機能材 営業グループ 大阪 主任	
田中 和光	一般財団法人 九州産業技術センター 技術振興部 部長	事務局
富澤 達也	一般財団法人 九州産業技術センター 技術振興部 課長代理	事務局

(注) ・委は研究員 (労務費を委託対象にする)

小委員会委員

氏 名	所属・役職	備 考
瀬上 昭夫	イサハヤ電子株式会社 半導体事業本部 本部長	P L 委
山邊 真也	イサハヤ電子株式会社 半導体事業本部 副本部長	委
栗木 実	イサハヤ電子株式会社 技術管理部 部長	
服部 慎一郎	イサハヤ電子株式会社半導体事業本部設計統括 パワーモジュール設計部 課長	委
黒川 不二雄	国立大学法人 長崎大学 教授	S L
中川 豪	長崎県工業技術センター 基盤技術部 電子情報科 主任研究員	
市瀬 英明	長崎県工業技術センター 応用技術部 工業材料科 主任研究員	
名塚 幸次	O P P C 株 式 会 社 営 業 部 課 長	
武藤 秀治	ペルノックス株式会社 機能材 営業グループ 大阪 主任	
田中 和光	一般財団法人 九州産業技術センター 技術振興部 部長	事務局
富澤 達也	一般財団法人 九州産業技術センター 技術振興部 課長代理	事務局

(注) ・ 委 は研究員 (労務費を委託対象にする)

1-3 成果の概要

【1】高耐圧・高放熱性粉体樹脂の開発およびコーティング技術の確立

【1-1】高耐圧・高放熱性粉体樹脂の開発

高耐圧化、高放熱化については、粉体樹脂の構成成分であるエポキシ樹脂・充填剤・添加剤の選定・配合により、新しい成分の粉体樹脂開発を行い、2種類の樹脂開発に成功した。

この開発された樹脂に関する絶縁耐圧及び熱抵抗の測定を行った結果、AC絶縁耐圧については、2種類の開発樹脂両方において、2,800V/1分間を超えることを明らかにした。また、熱抵抗については、2種の開発樹脂両方において、目標値：コーティング無し品比25%減を超えることを明らかにした。尚、熱伝導性向上効果により、熱抵抗を低下させる傾向に繋がることが示唆された。

【1-2】コーティング技術の確立

コーティング技術の確立に関しては、開発した粉体樹脂塗装用のコーティングマシンでの塗装評価としてピンホール発生有無確認及び塗装厚みバラツキ確認を実施した。その結果、2種の開発樹脂両方において、ピンホール発生有無確認については、マシン条件の最適化によりピンホール発生ゼロを達成した。また、塗装厚みバラツキ確認については、目標値（樹脂膜厚平均値 $\pm$ 10%）を満足することを確認した。

【1-3】モジュール信頼性の確保

モジュール信頼性の確保については、開発した2種類の樹脂をコーティングしたモジュールサンプルを製作し、温度サイクル試験評価を実施した。その結果として試験前後の電気的特性、外観の状態確認に関し2種の開発樹脂両方において、問題ないことを確認した。

（温度サイクル試験後の電気的特性試験において良品判定且つ0.2mm以上の樹脂クラック無し）

【2】ワンコンバータのデジタル制御技術の確立

【2-1】回路シミュレーション技術を用いた基礎制御理論の構築

導入した回路シミュレーションを用いて、ワンコンバータの制御方式や二次側の整流方式を検証し、制御プログラムを作成した。制御プログラムを【3-1】にて作製した充電器に組み込み、AC100Vにおける最大効率：93.2%、最大力率：98.3%、AC200Vにおける最大効率：95.0%、最大力率：98.5%であった。

【2-2】非線形制御技術を用いた高速応答制御の実現

導入した回路シミュレーションを用いて、入力急変時に切替える制御パラメータの調整を行い、ワンコンバータの制御プログラムに組み込んだ。

作成したプログラムを【3-1】にて作製した充電器に組み込み、入力急変時の出力電圧の変動幅が従来の7%に対して3%以下に改善した。

【2-3】ニューラルネットワークを利用したオートチューニング技術の実現

ニューラルネットワークを利用したオートチューニング技術については、オートチューニング機能を組み込んだ制御プログラムを作成し、【3-1】にて作製した充電器に組み込み、充電電流のバラつきを5%以下とした。

【2-4】ワンコンバータ制御プログラムの作成・評価

【2-1】にて開発したプログラムを【3-1】にて作製した充電器に組み込み、AC100Vにおける最大効率：93.2%、最大力率：98.3%、AC200Vにおける最大効率：95.0%、最大力率：98.5%であった。

【3】EV用小型充電器の設計・開発

【3-1】小型充電器の設計・試作

出力電力に対する体積比49%の充電器を設計・試作を行った。

【3-2】充電器特性の評価

【3-1】にて設計・試作した充電器に、【2-1】にて作成したプログラムを組み込み、AC100Vにおける最大効率：93.2%、最大力率：98.3%、AC200Vにおける最大効率：95.0%、最大力率：98.5%であった。

【3-3】信頼性の評価

車両搭載機器として必要な信頼性試験を実施し、問題なきことを確認した。

【3-4】実車試験

アドバイザーであるトヨタ車体様に協力いただき、【3-1】にて設計・試作した充電器を車両に搭載し、異常動作や破損無き事を確認した。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東二丁目13番24号
一般財団法人 九州産業技術センター
技術振興部 田中 和光

第2章 【1】高耐圧・高放熱性粉体樹脂の開発およびコーティング技術の確立

2-1 【1-1】高耐圧・高放熱性粉体樹脂の開発

【内容】

高耐圧・高放熱性粉体樹脂の開発に関しては、粉体樹脂の構成成分であるエポキシ樹脂・充填剤・添加剤の選定及び配合により新しい成分の粉体樹脂を開発した。開発ステップとしては、2種類の樹脂開発（以下開発樹脂（1）、（2）とする）を行い、開発された樹脂について絶縁耐圧の確認、熱抵抗の確認を実施した。

開発された樹脂の熱伝導率を表1に示す。

尚、今回の研究開発で得られた熱伝導率の向上が放熱性向上に大きな効果を与えるという知見を元に、窒化ホウ素をフィラーとして採用し、塗装安定性を確保する為にその含有量の配合を行った。

表1 開発樹脂特性表

	開発樹脂(1)	開発樹脂(2)
熱伝導率(W/m・K)	1.316	1.363

評価に用いる評価基板としては、図1、2に示す評価用回路基板を用い、2種の開発樹脂によるコーティングを行った製品及びコーティング無し製品に対して、表2に示す評価内訳にて検証を行った。

尚、樹脂によるコーティングを行った製品は、絶縁耐圧測定用には樹脂塗装厚みを3水準に、熱抵抗測定用には樹脂塗装厚みを5水準に振り分け製作を実施した。

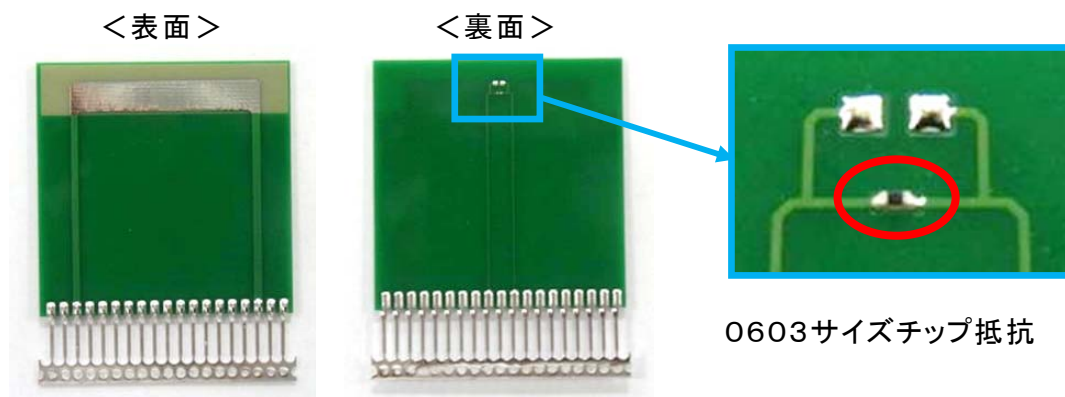


図1 絶縁耐圧測定用評価基板

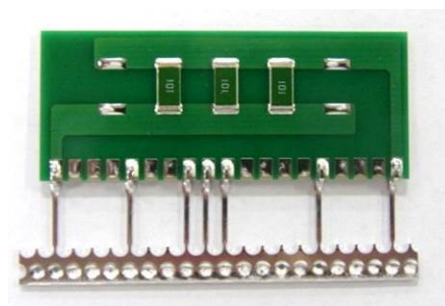
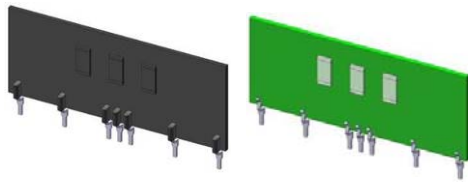


図2 熱抵抗測定用評価基板

表2 絶縁耐圧測定・熱抵抗測定 評価内訳

No	コーティング仕様	絶縁耐圧測定	熱抵抗測定
			
1	開発樹脂(1)	○	○
2	開発樹脂(2)	○	○
3	コーティング無し	×	○

○・・・評価実施 、 ×・・・評価対象外

絶縁耐圧の確認については、耐圧試験機（7473、計測技術研究所製 図3）にてAC耐圧の確認を行った。



図3 AC耐圧試験機

熱抵抗の確認については、データ収集システム（NR-500、KEYENCE製）を用い、測定環境としては、外部からの風（対流）の影響を排除するためアクリルケース内での測定を行った。測定環境を図4に示す。

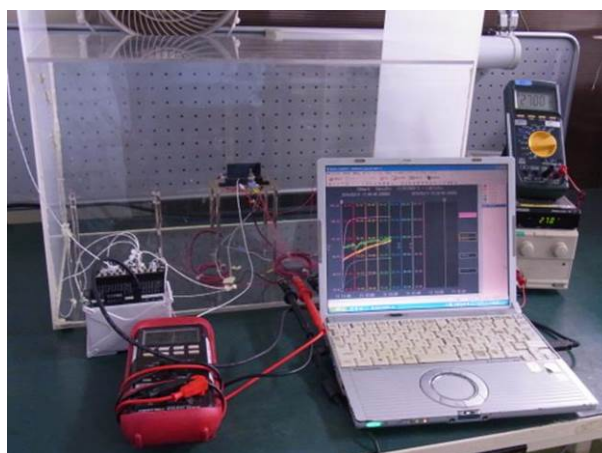


図4 熱抵抗測定環境

尚、1．8 Wの電力になるように電圧を印加し、図 2 の評価用抵抗回路基板に実装された 1 Wサイズのチップ抵抗を発熱させ、図 5 に示す T_j 、 T_a の温度を測定し、熱抵抗 θ_{ja} の算出を行った。計測時間については、評価の過程の中で 30 分後には最高温度に到達（昇温完了）し、その後温度が一定になることを確認できた知見を基に、マージンを考慮し 50 分間の計測時間とした。

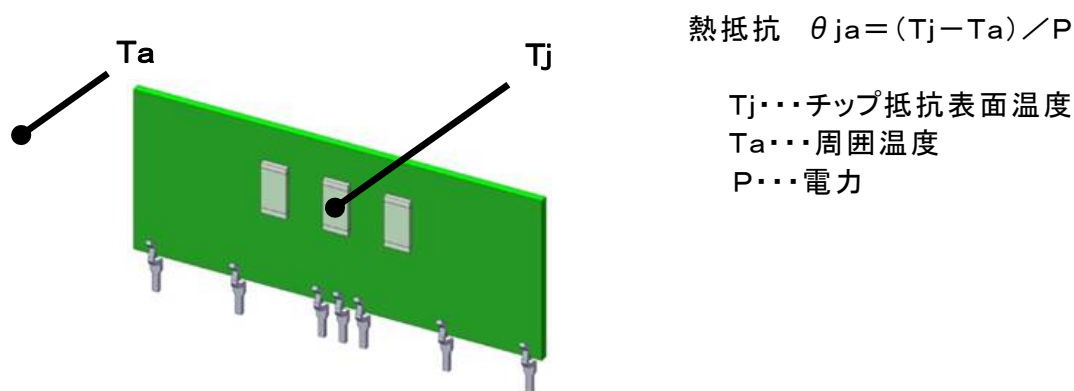


図5 熱抵抗測定 温度計測ポイント

【結果】

AC 絶縁耐圧試験結果を表 3・図 6 に示す。AC 絶縁耐圧に関しては、開発樹脂 2 種の両方において、10,000 V / 1 分間を達成し最終的な目標である 2,800 V / 1 分間を超えることを確認した（ $n = 5$ ）。

表3 AC絶縁耐圧測定結果

単位：kV

樹脂仕様	開発樹脂(1)			開発樹脂(2)		
樹脂厚み(mm)	0.5mm	1.0mm	1.8mm	0.5mm	1.0mm	1.8mm
Min	10.0	20.0	20.0	10.0	20.0	20.0
Max	15.0	20.0	20.0	15.0	20.0	20.0
Avg	12.0	20.0	20.0	14.0	20.0	20.0

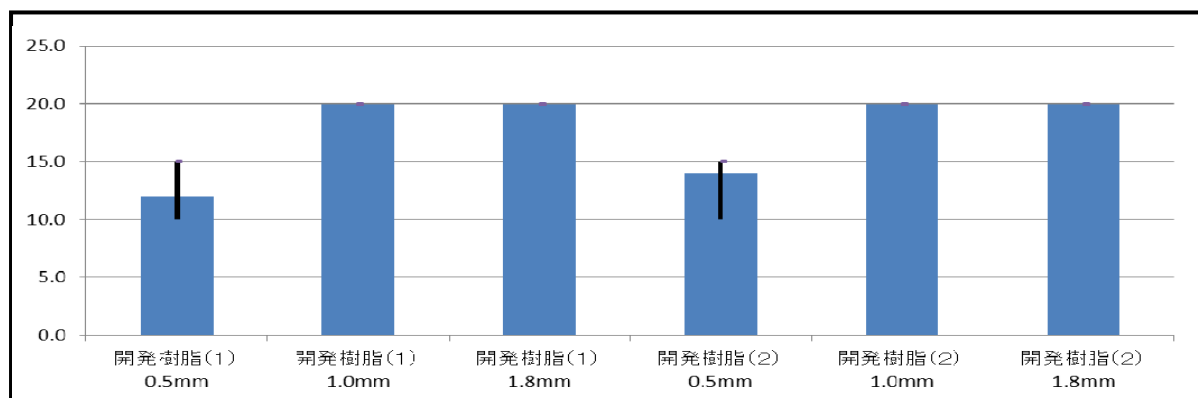


図6 AC絶縁耐圧測定結果グラフ

熱抵抗の測定結果を表４・図７に示す。測定の結果、コーティングを施さない抵抗回路基板の熱抵抗（平均）が４７．４℃／Ｗであり、これを基準値とした場合において、最良の結果が開発樹脂（２）の塗装厚みが３．４ｍｍの評価品にて３４．３℃／Ｗとなる減少率２７．６％減の結果を得た。（ｎ＝１０）

表４ 熱抵抗（ θ_{ja} ）測定結果

単位：℃／Ｗ

樹脂仕様 樹脂厚み (mm)	コーテ ィング 無	開発樹脂（１）					開発樹脂（２）				
		0.5 mm	1.0 mm	1.8 mm	2.6 mm	3.4 mm	0.5 mm	1.0 mm	1.8 mm	2.6 mm	3.4 mm
Min	46.7	41.4	39.3	37.4	35.6	33.8	40.9	39.2	36.6	35.2	33.6
Max	48.3	42.9	41.3	39.0	37.1	35.3	42.5	40.0	38.3	36.4	34.7
Avg	47.4	42.1	39.8	38.1	36.4	34.6	41.7	39.5	37.2	35.7	34.3
減少率 (%)	0	▲11.1%	▲16.0%	▲19.6%	▲23.1%	▲27.0%	▲12.0%	▲16.6%	▲21.5%	▲24.7%	▲27.6%

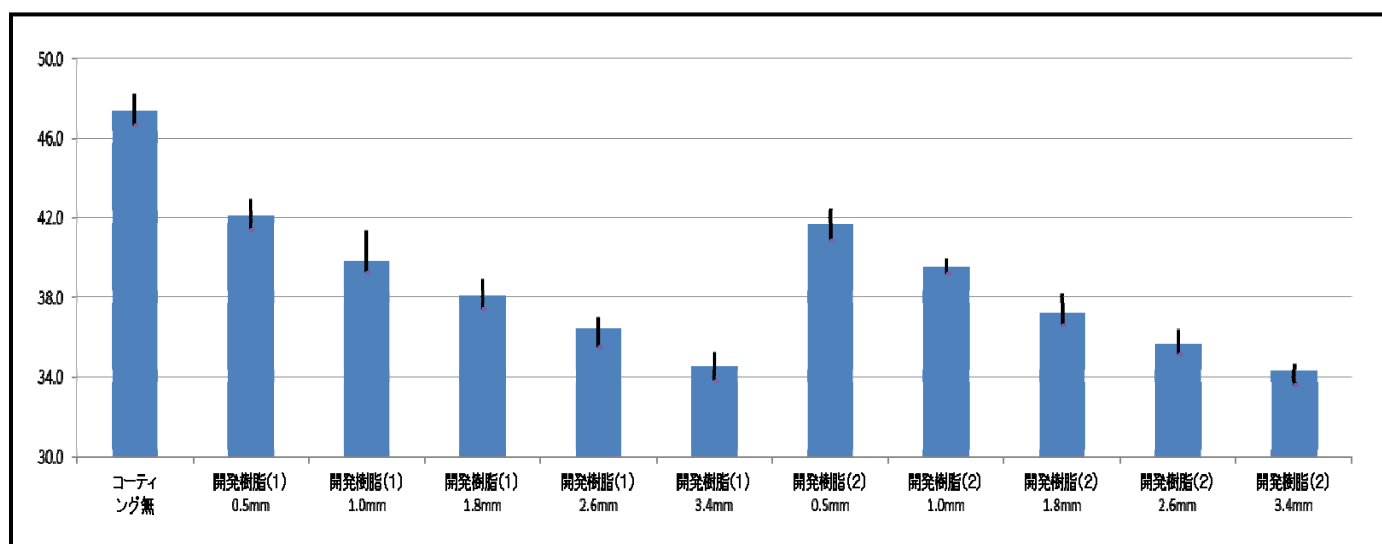


図７ 熱抵抗測定結果グラフ

2-2 【1-2】コーティング技術の確立

【内容】

コーティング技術の確立については、ピンホール抑制機能及び塗装厚バラツキ抑制機能を有した図8の粉体樹脂塗装用のコーティングマシンにより塗装評価を実施した。



図8 粉体樹脂用のコーティングマシン写真

このコーティングマシンにて設備の条件出しを実施し、図9、10の2種のサンプル品を塗装し、ピンホール発生有無確認を実施した。（ $n = 100$ ）

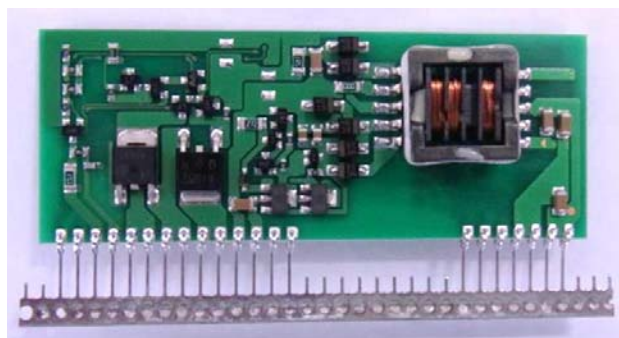


図9 ピンホール評価用製品A

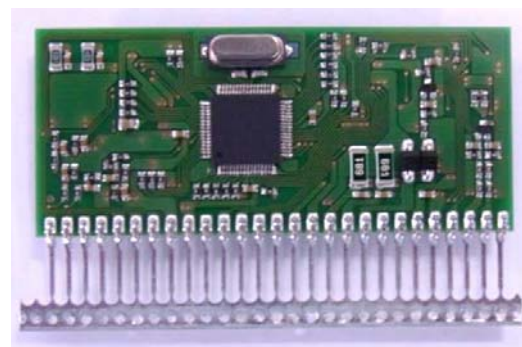


図10 ピンホール評価用製品B

塗装厚みバラツキ確認については、熱抵抗測定にて使用した図2の回路基板を用い、設備条件A、Bにてコーティングを施した製品について図11に示す断面の樹脂膜厚（①～⑥）を測定することで、塗装厚みのバラツキの確認を実施した。（ $n = 10$ ）

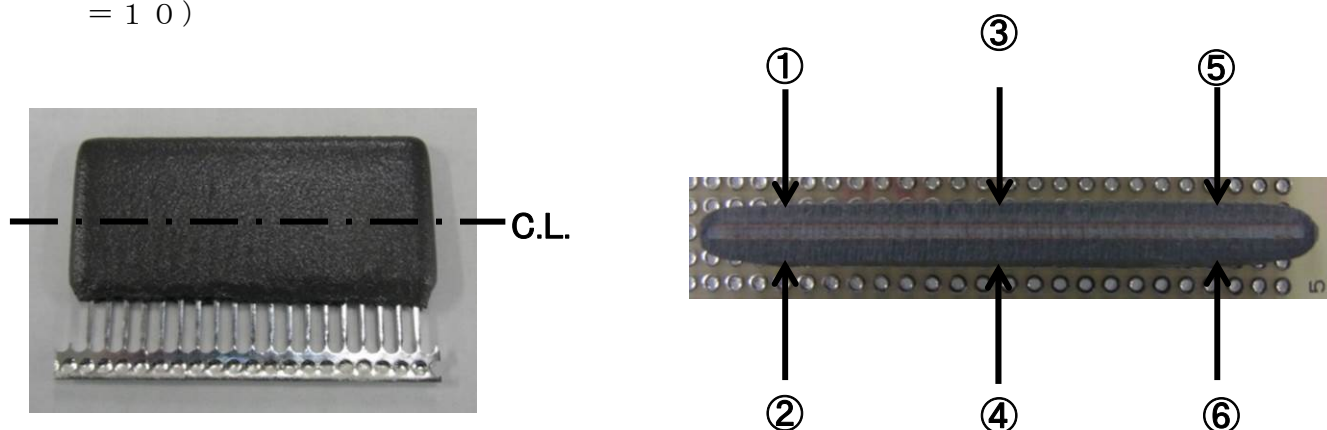


図11 塗装厚みバラツキ確認用基板

【結果】

ピンホール発生有無確認結果を表5に示す。開発樹脂2種の両方において評価用製品A、評価用製品B共に、マシン条件出しを行いピンホール発生ゼロを達成した。コーティング後の製品状態写真を図12～15に示す。

表5 ピンホール発生有無確認結果

樹脂種類	製品種類	確認数量	ピンホール発生数	ピンホール発生率
開発樹脂(1)	評価用製品A	100 個	0 個	0%
開発樹脂(1)	評価用製品B	100 個	0 個	0%
開発樹脂(2)	評価用製品A	100 個	0 個	0%
開発樹脂(2)	評価用製品B	100 個	0 個	0%



図12 開発樹脂(1) 評価用製品A



図13 開発樹脂(1) 評価用製品B

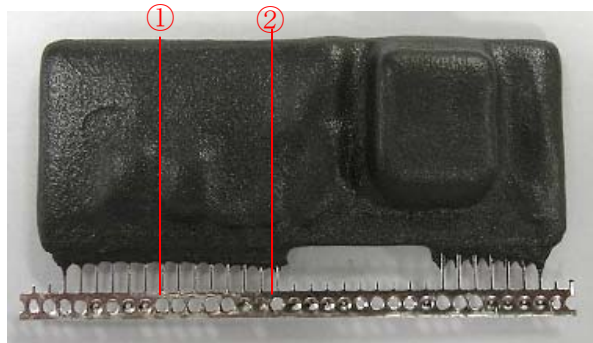


図14 開発樹脂(2) 評価用製品A

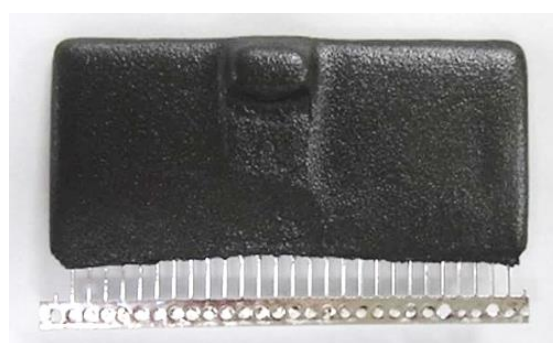


図15 開発樹脂(2) 評価用製品B

尚、上記4パターン（図12～15）の製品仕様について、内部の断面観察を実施したところ、0.3φmmサイズ程のボイドが一部確認された。但し、このサイズのボイドであれば、絶縁耐圧性に影響を及ぼさない為に問題ないものと判断している。断面観察の製品状態写真を代表例として図16、17に示す。



図16 開発樹脂(2) 評価用製品A ①



図17 開発樹脂(2) 評価用製品A ②

塗装厚みバラツキ確認結果を表6、図18に示す。塗装厚みバラツキは、目標値（樹脂膜厚平均値±10%のバラツキ）を達成し、塗装の安定化が図れることを確認した。

(n = 10)

表6 塗装厚みバラツキ確認結果

単位：μm

	開発樹脂(1)		開発樹脂(2)	
	設備条件A	設備条件B	設備条件A	設備条件B
Avg + 10%	503	972	504	1015
Max	489	962	500	987
Avg	457	884	458	923
Min	425	824	425	858
Avg - 10%	412	795	412	831

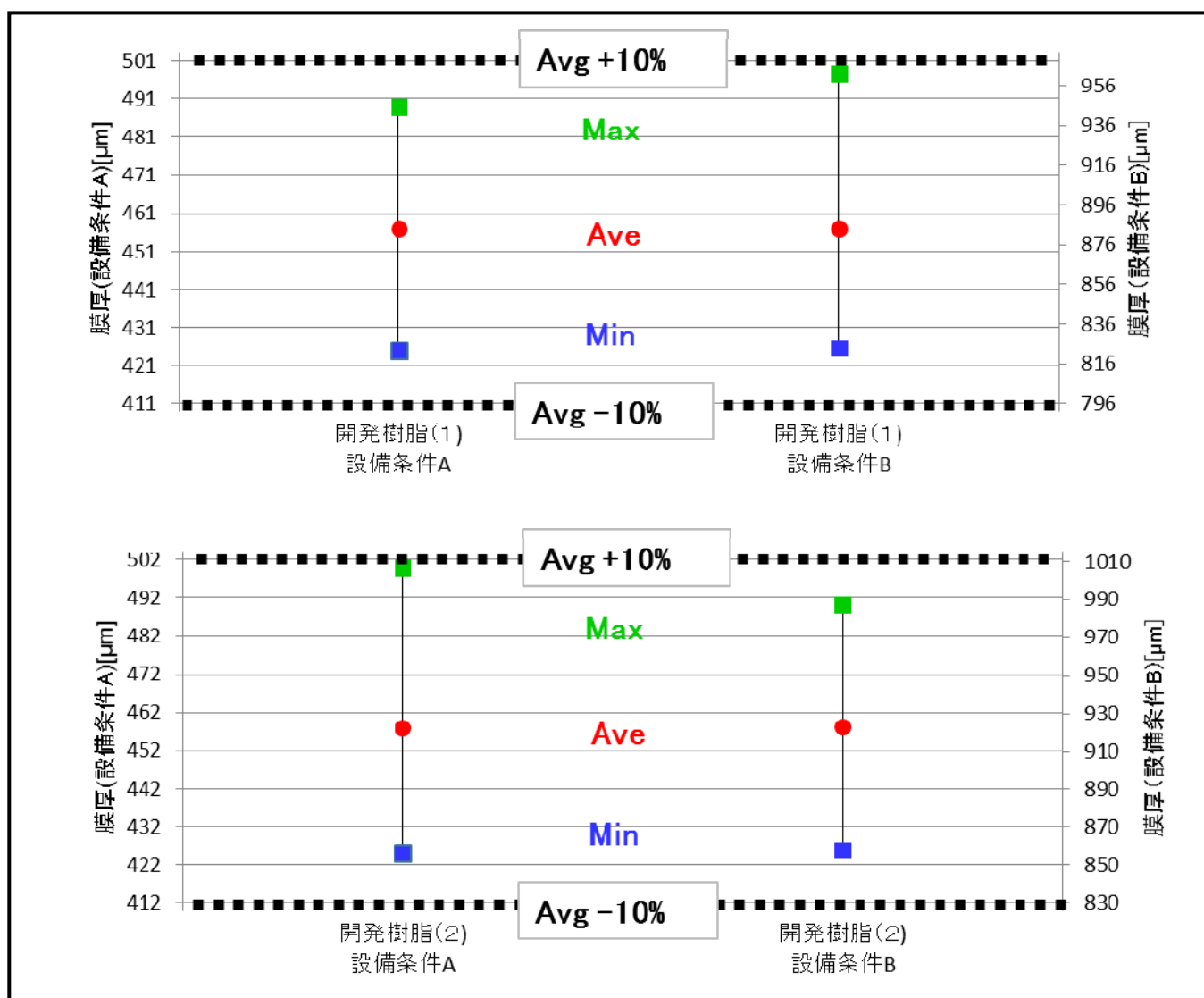


図18 塗装厚みバラツキ結果グラフ

2-3 【1-3】モジュール信頼性の確保

【内容】

モジュール信頼性の確保については、温度サイクル試験評価を実施する為のサンプルを製作し（図19）、これに開発した2種の樹脂をコーティングした。

コーティング後の製品については、温度サイクル槽（TSA-101L-A、エスペック製 図20）へ投入し、投入試験前後における電気的特性検査、外観確認を実施した。

なお、良否判定については、下記の判定基準における確認を実施した。

<電気的特性検査>

専用電気特性検査（テスター）にて良品判定すること

<外観>

0. 2mm以上の目視にて確認できるレベルの樹脂クラックなきこと

温度サイクル条件：-30℃⇔80℃、各45分、1000サイクル

下記タイミングで、温度サイクル槽から製品を取出

製品取出タイミング：100、200、300、400、500、
700、1000サイクル後

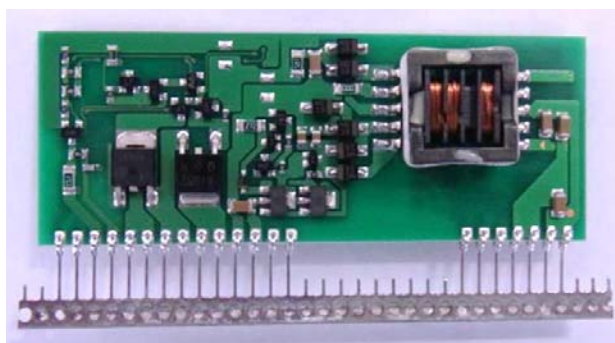


図19 耐温度サイクル性確認用モジュールサンプル



図20 温度サイクル槽

【結果】

温度サイクル試験投入における電気的特性の確認結果及び外観確認結果を表7に示す。電気的特性検査については、1000サイクル後の測定においても良品判定となり、問題ないことが確認された。また、外観確認においても1000サイクル後の確認において、0.2mm以上の目視にて確認できるレベルのクラックがなく問題ないことが確認された。(n=22)

温度サイクル試験1000サイクル後の製品状態について、図21、22に示す。

表7 温度サイクル試験前後の電気的特性、外観確認結果

サイクル数	0	100	200	300	400	500	700	1000
電気的特性	0/22	0/22	0/22	0/22	0/22	0/22	0/22	0/22
外観	0/22	0/22	0/22	0/22	0/22	0/22	0/22	0/22

(r / n)



図21 樹脂(1)1000サイクル後状態



図22 樹脂(2)1000サイクル後状態

第3章 【2】ワンコンバータのデジタル制御技術の確立

3-1 【2-1】回路シミュレーション技術を用いた基礎制御理論の構築

【内容】

PFC+DC-DCコンバータの2つの回路機能を1つのDC-DC回路で実現するには、高速かつ複雑な制御を行う必要があり、制御のデジタル化が不可欠である。導入した回路シミュレーションを用いて、ワンコンバータの制御方式や二次側の整流方式を検証し、制御プログラムを作成した。作成したプログラムは【3-1】にて設計・試作した充電器に組み込み、力率、効率などの諸特性を確認した。（力率および効率については4-2【3-2】充電器特性の評価にて示す。）

【結果】

<デジタル制御回路の動作原理>

本章では、デジタル制御方式AC-DCコンバータの基本的な動作を議論するために、デジタル制御回路の動作原理について述べる。図23に、デジタル制御回路のブロック図を示す。図のように主回路であるAC-DCコンバータの入力電流 i_L 、出力電圧 e_o の2つの値を検出し、これらを前置増幅器への入力としている。ここで、 e_i 、 e_L はそれぞれ商用交流電源 e_{ac} 、 e_{ac} の全波整流後の電圧、電流である。このときの i_L は検出抵抗を用いて電流を電圧に変換して入力としている。これらの値を前置増幅器によりレベル調整を行い、その出力をA-D変換器への入力としている。このA-D変換器では入力される電圧がデジタル量に変換され、 e_i 、 e_L および e_o がデジタル量 N_{EI} 、 N_{IL} 、 N_{EO} となる。これらのデジタル値をもとにスイッチング周波数 T_s に相当するパルス数 N_{Ts} 、主スイッチ T_{r1} のゲート・ソース間電圧 V_{GS} のオン時間に相当するパルス数 N_{Ton1} が設定、演算され、ドライブ信号発生回路（Drive Signal Generator）に出力される。

図24にオン時間の設定値 N_{Ton1} の演算処理の原理図を示す。図に示すように、 N_{lr} および N_{Ton1} が次の式（1）および（2）により演算される。

$$N_{lr,n-1} = G_1 N_{EI,n-1} (N_{or} - N_{EO,n-1}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} N_{Ton1,n-1} &= G_2 (N_{lr,n-1} - N_{IL,n-1}) + N_B \\ &= G_1 G_2 N_{EI,n-1} (N_{or} - N_{EO,n-1}) - G_2 N_{IL,n-1} + N_B \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 N_B はバイアス電圧に相当する値、 N_{or} および N_{lr} はそれぞれ E_{or} および I_{lr} に対応する出力電圧 e_o および入力電流 i_L の目標値である。また、入力電流 i_L に相当するデジタル量 N_{IL} にかかるゲインが G_2 だけであることから、 G_2 を電流ゲインとし、 $G_{12} = G_1 \cdot G_2$ は出力電圧 e_o に相当するデジタル値 N_{EO} にかかるゲインであるため電圧ゲインと称する。

式（1）においては、全波整流後の入力電圧に相当する理想正弦波のデジタル量 N_{EI} および出力電圧 e_o に相当するデジタル量 N_{EO} を元にした入力電流の基準値 N_{lr} が求められる。一方、式（2）では、式（1）から求まる入力電流の基準値 N_{lr} と入力電流 i_L に相当するデジタル量 N_{IL} を比較することにより入力力率および入力電流における歪率を改善するように N_{Ton1} を決定している。

以上のデジタル制御回路により、AC-DCコンバータの入力力率・入力電流歪率の改善および出力電圧の安定化の制御を行う。

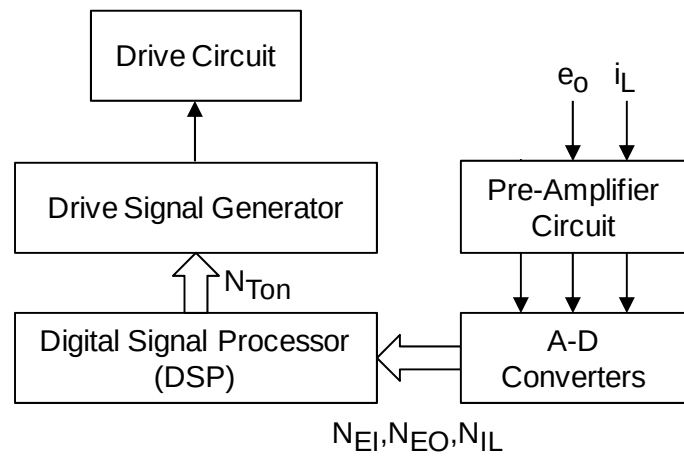


図23 デジタル制御回路のブロック図

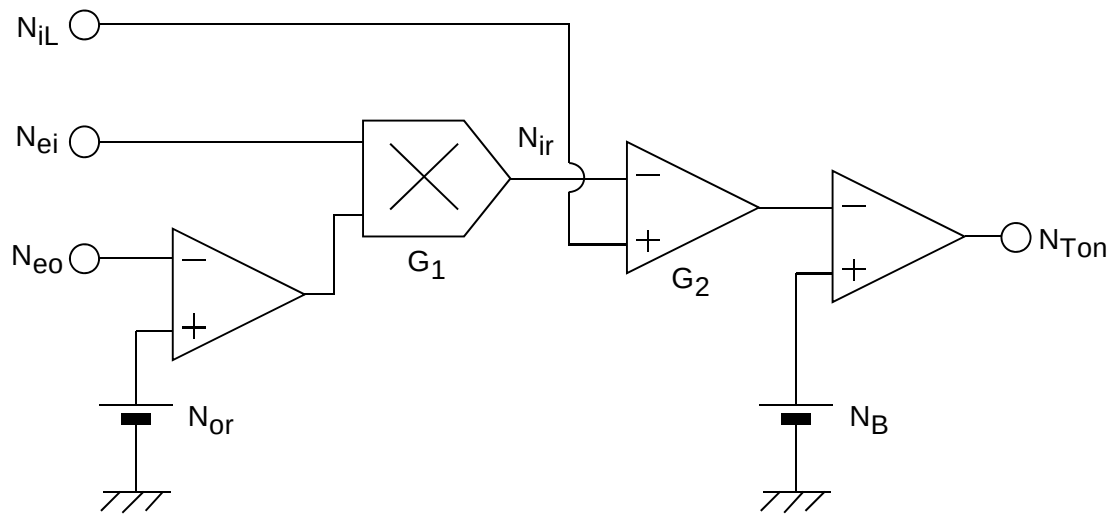


図24 オン時間 N_{Ton} の演算処理の原理図

＜シミュレーション回路図およびパラメータ＞

シミュレーション回路の回路図を図 25 に示す。回路図中の回路定数（一部抜粋）および制御パラメータは表 8 および表 9 のとおりである。

表8 シミュレーション回路の回路定数(一部抜粋)

素 子	記 号	値
入力交流電圧	e_{ac}	200 V
入力交流周波数	f_{ac}	60 Hz
出力直流電圧	E_o	80 V
出力容量	P_o	1 kW
ダイオード順方向降下電圧	V_D	1.2 V
負荷	R	6.4 Ω
スイッチング周波数	f_s	60 kHz
スイッチングデッドタイム	T_d	1.2 μs
前置増幅器のゲイン(ei)	A_{EI}	0.0125
前置増幅器のゲイン(eo)	A_{EO}	0.025
前置増幅器のゲイン(iL)	A_{IL}	0.2
A-D 変換ゲイン	G_{AD}	200
A-D 変換器の最大入力	e_{ADmax}	5 V
A-D 変換器の分解能	—	10 bit
A-D 変換器の標本化周波数	f_{AD}	100 kHz

表9 シミュレーション回路の制御パラメータ

パラメータ	記 号	値
電圧ゲイン	G_{12}	0.001
電流ゲイン	G_2	0.1
バイアス（固定）	N_B	500

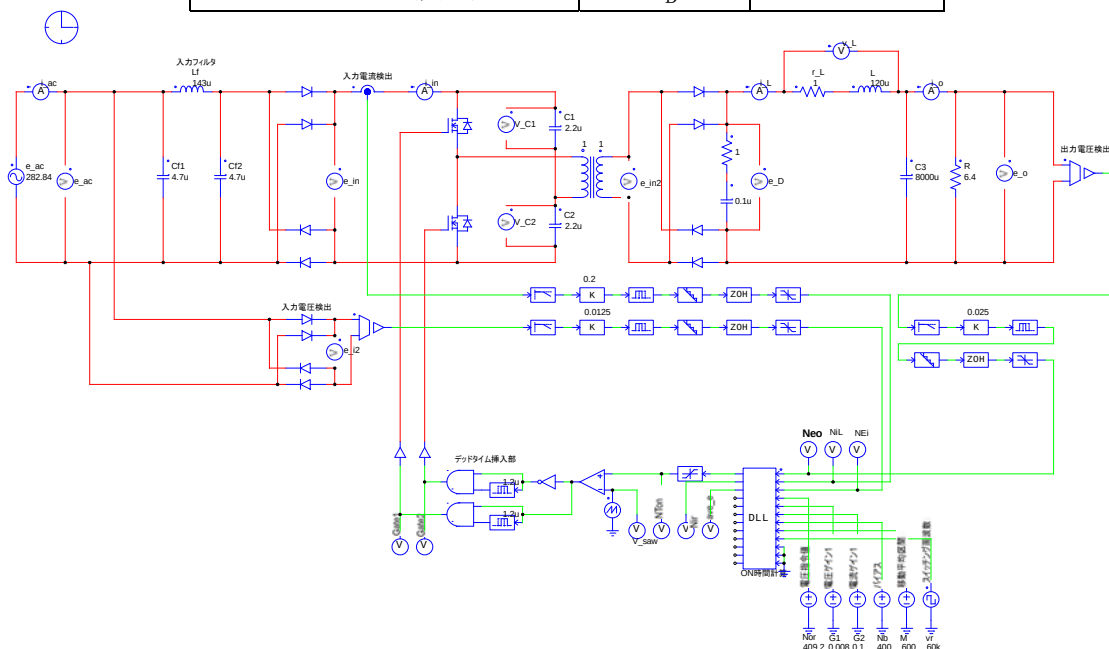
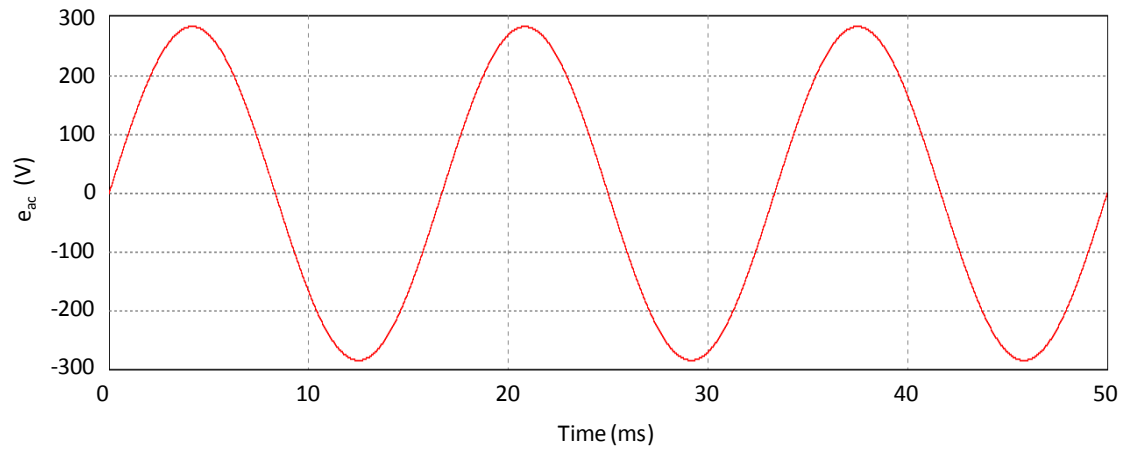
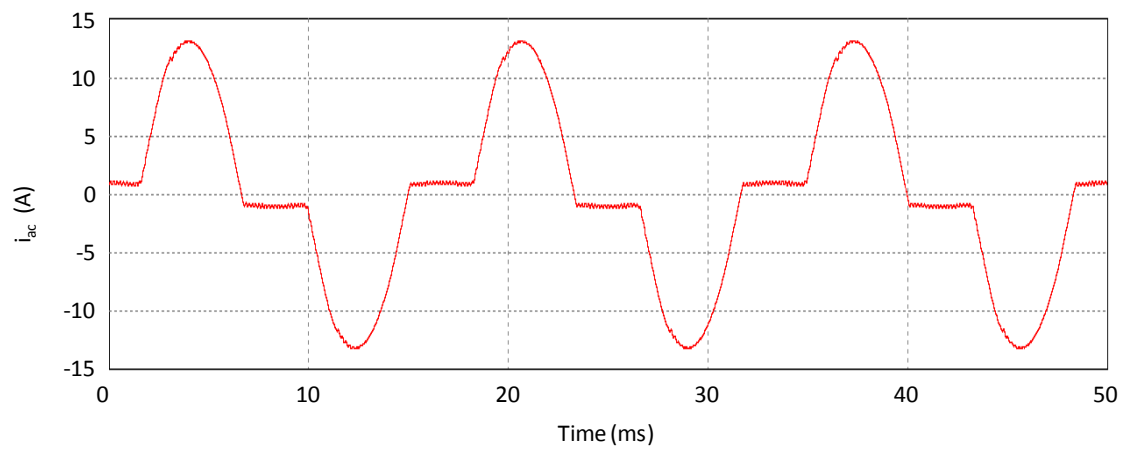


図25 シミュレーション回路図

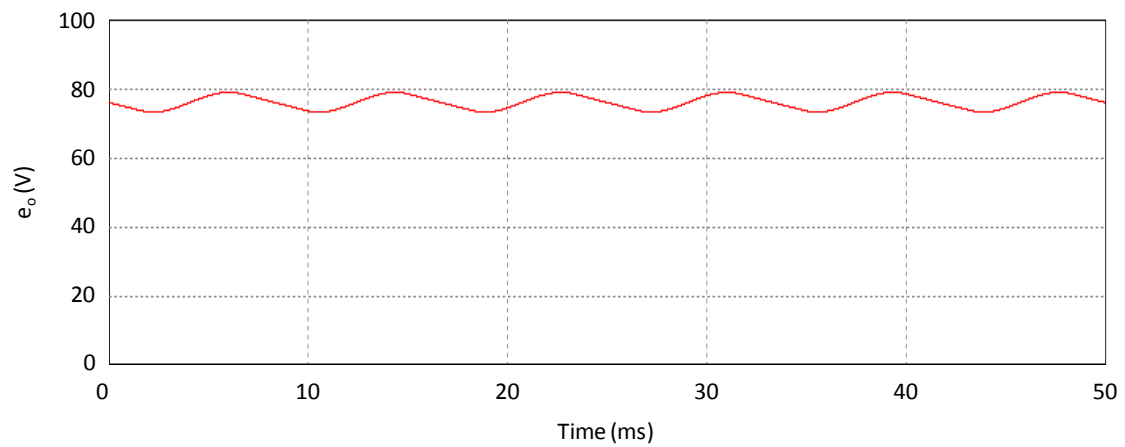
< シミュレーション結果（二次側整流方式の比較） >



(a) 入力電圧 e_{ac}

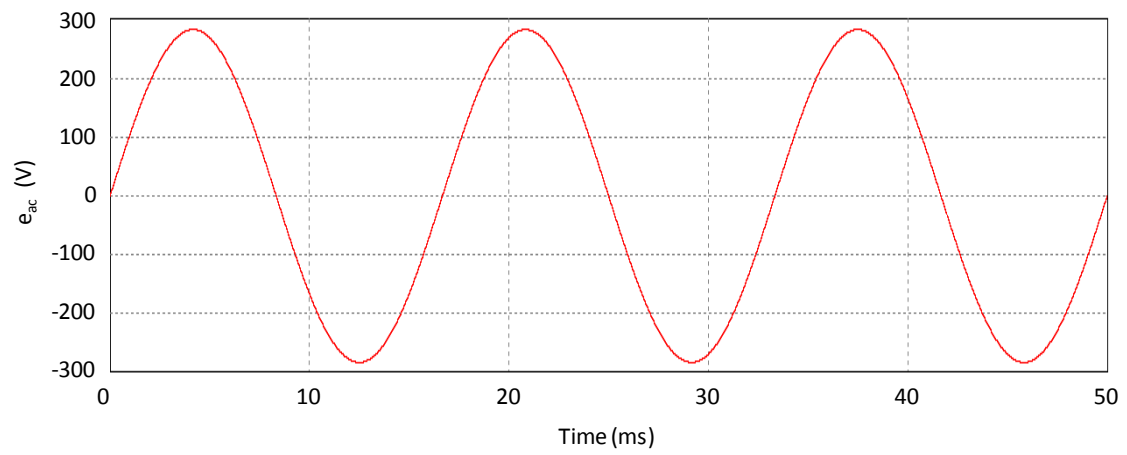


(b) 入力電流 i_{ac}

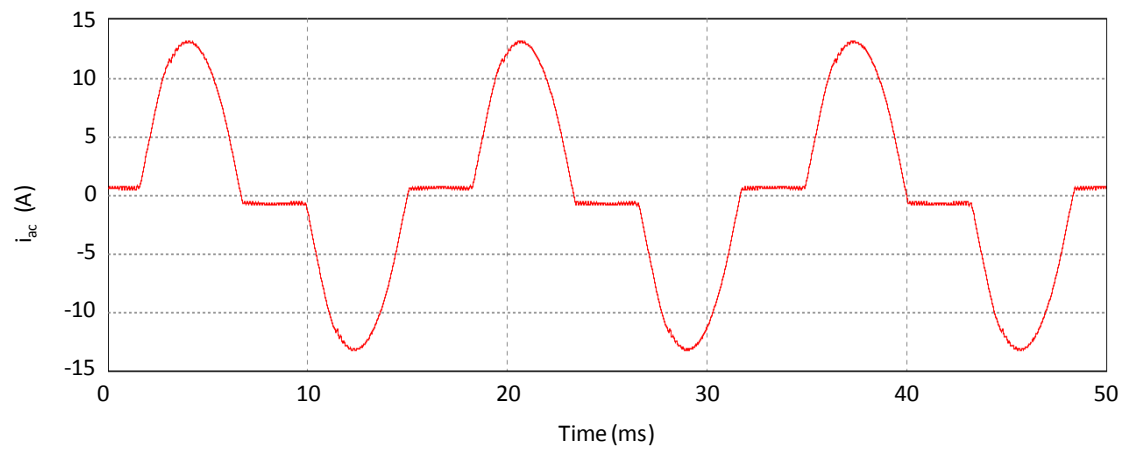


(c) 出力電圧 E_o

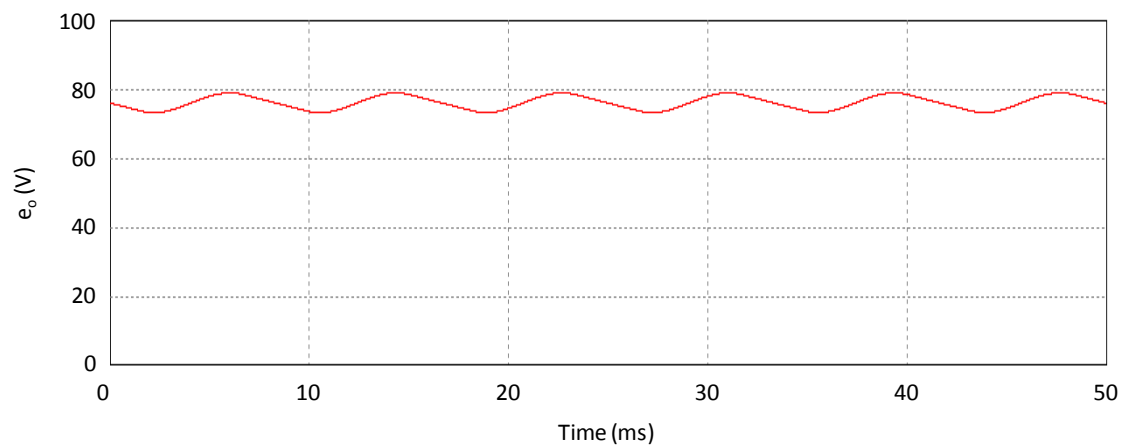
図26 シミュレーション波形 ダイオード整流



(a) 入力電圧 e_{ac}



(b) 入力電流 i_{ac}



(c) 出力電圧 E_o

図27 シミュレーション波形 同期整流

シミュレーションの結果を図26、図27に示す。図中の(a)は入力電圧波形、(b)は入力電流波形、(c)は出力電圧波形である。ダイオード整流および同期整流いずれにおいても入力電流および出力電圧に差異はないことを確認した。

3-2 【2-2】非線形制御技術を用いた高速応答制御の実現

【内容】

入力電圧変動や負荷変動などの外乱に対し、入力電流および出力電圧の変動を抑えるため、制御プログラムに非線形制御技術を付加する。回路シミュレーションの結果を元に、非線形制御を適用した制御プログラムを作成し、【3-1】にて作製した充電器に組み込み、入力急変時の出力電流の変動幅を確認した。

【結果】

図28に入力急変時の動作波形を示す。充電電流12Aに対し、オーバーシュート：220mA（1.8%）、アンダーシュート：310mA（2.6%）であり、出力電圧の変動幅が3%以下であることを確認した。

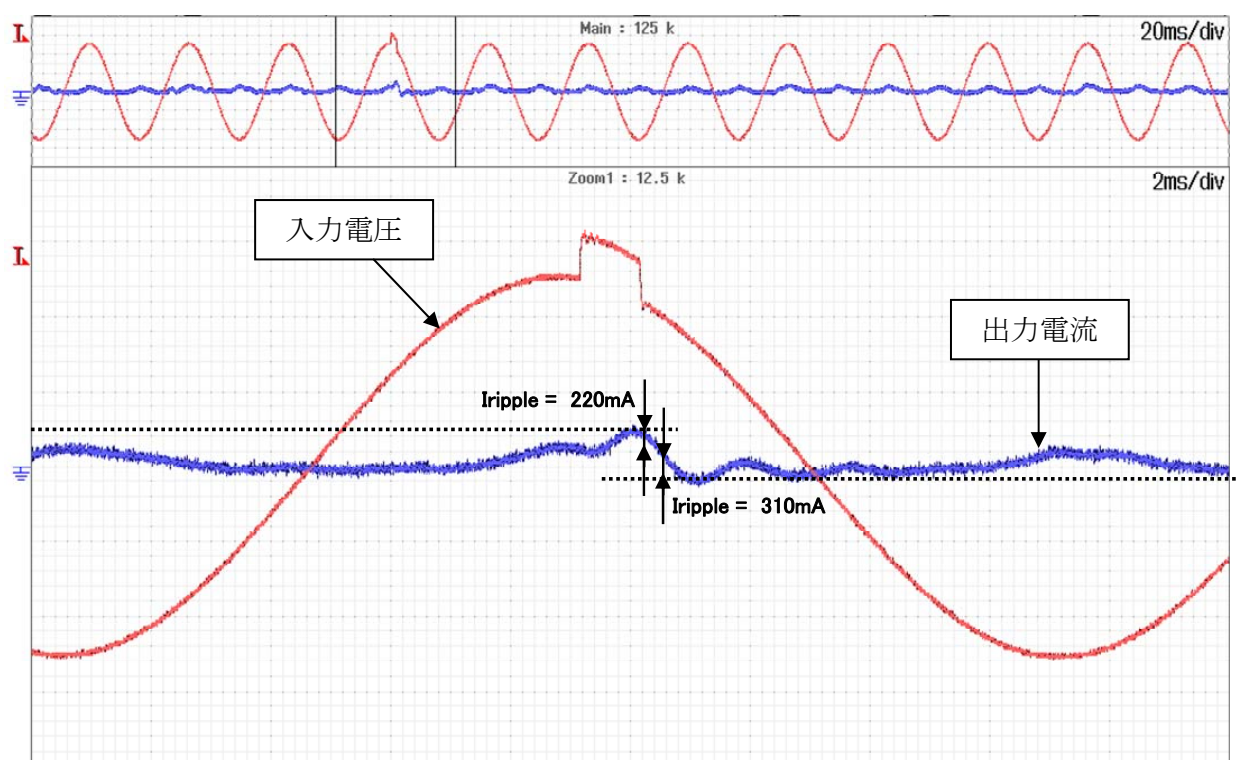


図28 入力急変時の動作波形

3-3 【2-3】ニューラルネットワークを利用したオートチューニング技術の実現

【内容】

部品バラツキや素子経年劣化に対応するため、ワンコンバータ制御プログラムにニューラルネットワークを利用したオートチューニング技術を付加したワンコンバータ制御プログラムの開発を行い、【3-1】にて作製した充電器にプログラムを組み込み、動作確認を行う。尚、本研究では充電器の特性として重要な充電電流の精度に対し、そのバラツキを抑制することを目的とした。

【結果】

電流の検出には固定抵抗器（シャント抵抗）を使用して検出する方法とホール素子などを使用した電流センサを使用する方法がある。抵抗器を用いる検出方法では、検出する電流値に比例して損失が発生するため、本研究では電流センサを用いて電流検出を行う。使用する電流センサの選定においては、検出精度とコストおよびサイズを考慮し選定を行っている。

電流センサを使用した充電器100台分のオートチューニング前後での出力電流のバラツキ分布図を図29、まとめを表10に示す。オートチューニング前の電流値の測定値で約±2%、+6σを考慮すると±6%バラツキがあるが、オートチューニング後では電流値の測定値で約±1.2%、+6σを考慮しても±4.4%以内のバラツキとなることを確認した。

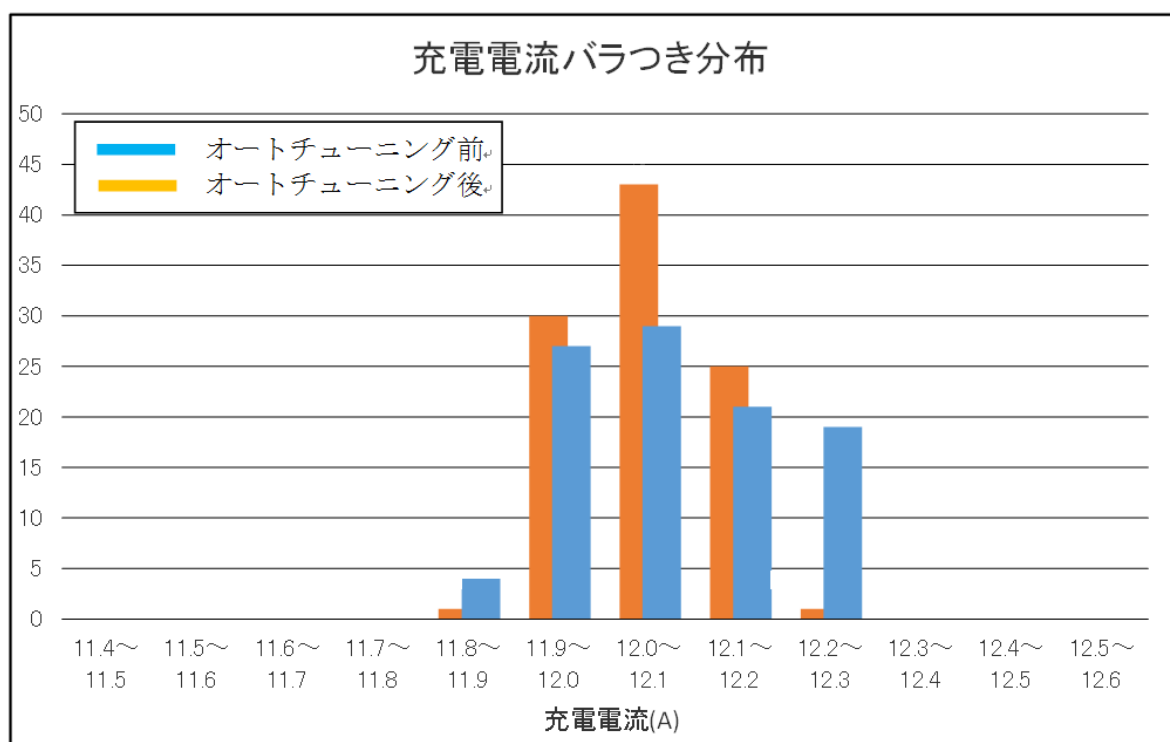


図29 出力電流バラツキ分布図

表10 出力電流バラツキデータまとめ

		オートチューニング	
		前	後
測定値(A)	平均値	12.08	12.05
	標準偏差	0.12	0.08
-	+3σ	12.44	12.28
	-3σ	11.72	11.81
	+6σ	12.80	12.52
	-6σ	11.36	11.58

3-4 【2-4】ワンコンバータ制御プログラムの作成・評価

【内容】

3-1 【2-1】回路シミュレーション技術を用いた基礎制御理論の構築にて作成したプログラムを、4-1 【3-1】小型充電器の設計・試作にて作製した充電器に組み込み、評価を行った。

【結果】

効率：目標値 93 % に対し 93.2 %、力率：目標値 98 % に対し 98.3 % であった（図 30）。（詳細については 4-2 【3-2】充電器特性の評価にて示す。）

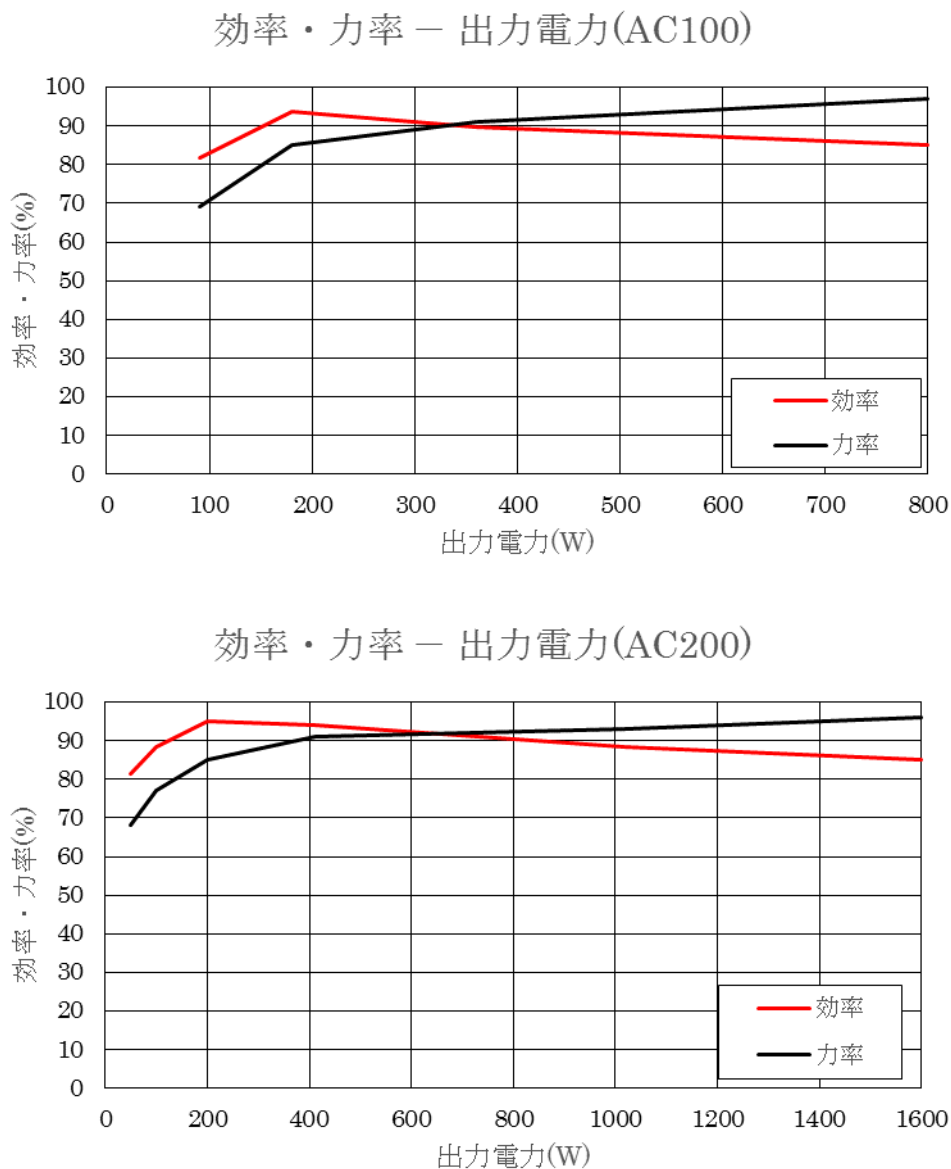


図30 充電器評価結果

第4章 【3】EV用小型充電器の設計・開発

4-1 【3-1】小型充電器の設計・試作

【内容】

回路シミュレーションおよび充電器（プロトタイプ）での予備評価を行ない、その結果を元に目標体積比50%の充電器を設計・試作を行った。

【結果】

充電器のブロック図を図32、試作品の写真を図33に示す。従来の充電器は出力電力あたりの体積は $4.9 \text{ cm}^3/\text{W}$ であるが、今回設計した充電器は $2.4 \text{ cm}^3/\text{W}$ である。従来品に対し、出力電力に対する体積比は49%であり、目標をクリアしている。

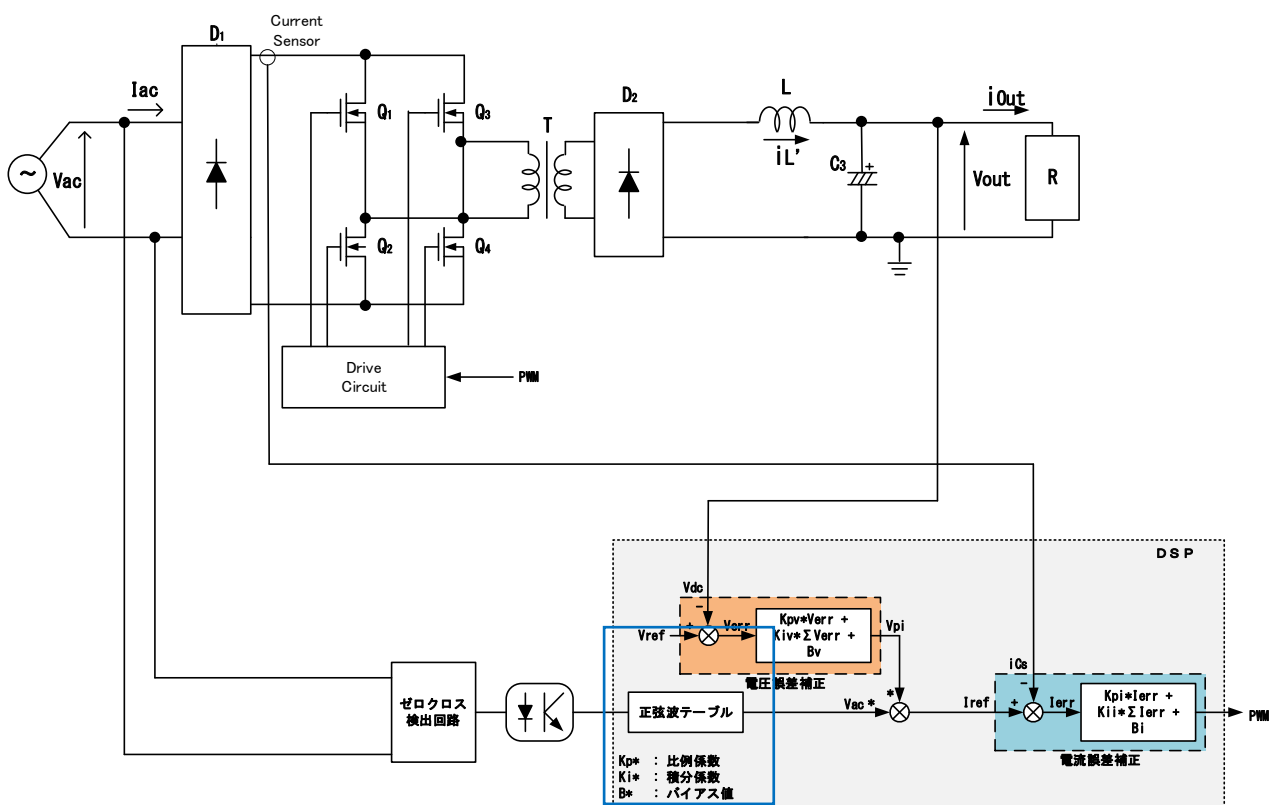


図32 ブロック図

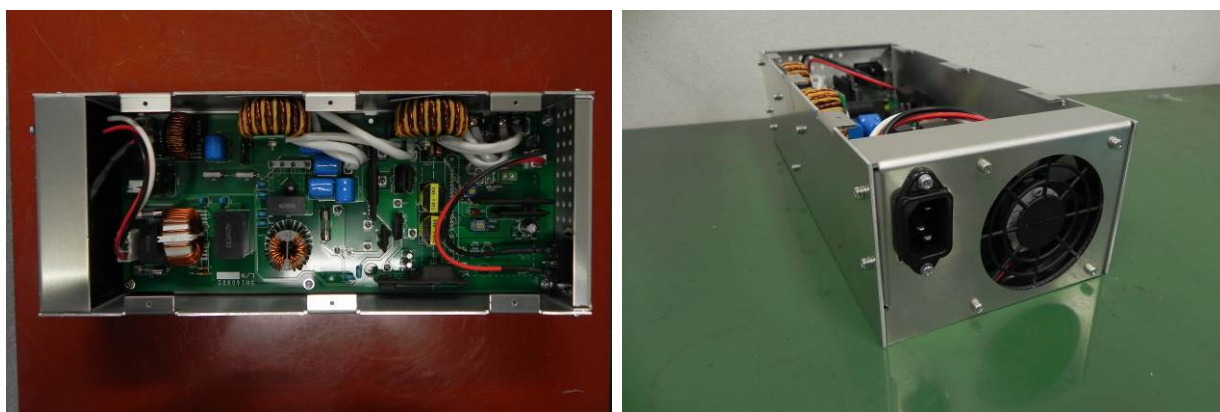


図33 充電器

4-2 【3-2】充電器特性の評価

【内容】

4-1にて作成した充電器を動作させ、特性評価を行った。

測定環境を図34に示す。入力には交流電源装置：ES0012を使用し、実使用環境に則したかたちで測定を行うため、IEC規格等で定められた電源網インピーダンスを接続した。入力電圧、入力電流、出力電圧、出力電流、力率、効率の測定にはパワーメータ：WT3000を使用した。負荷装置には電子負荷装置：PLZ1004WHおよびPLZ2004WHBを使用し、各部の波形観測にはオシロスコープ：DLM4058を使用した。

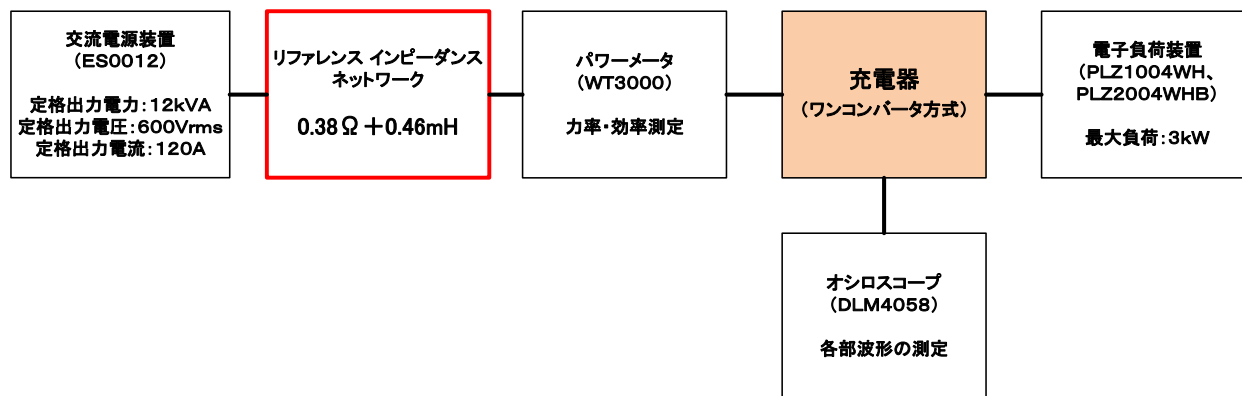


図34 測定環境

【結果】

図35に効率・力率特性を示す。AC100Vにおいて、効率：目標値93%に対し93.2%、力率：目標値98%であった。AC200Vにおいて、効率：目標値95%に対し95.0%、力率：目標値98.5%であった。

効率・力率－出力電力(AC100)

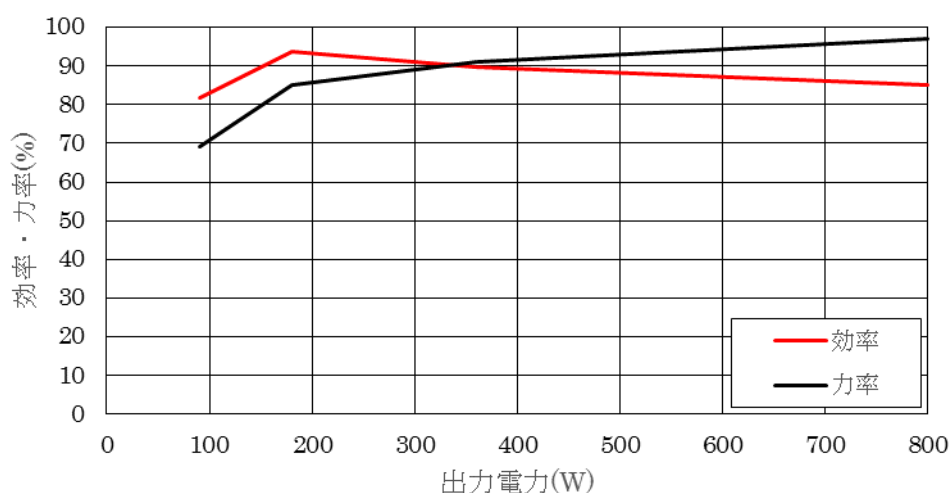


図35(a) 充電器評価結果

効率・力率－出力電力(AC200)

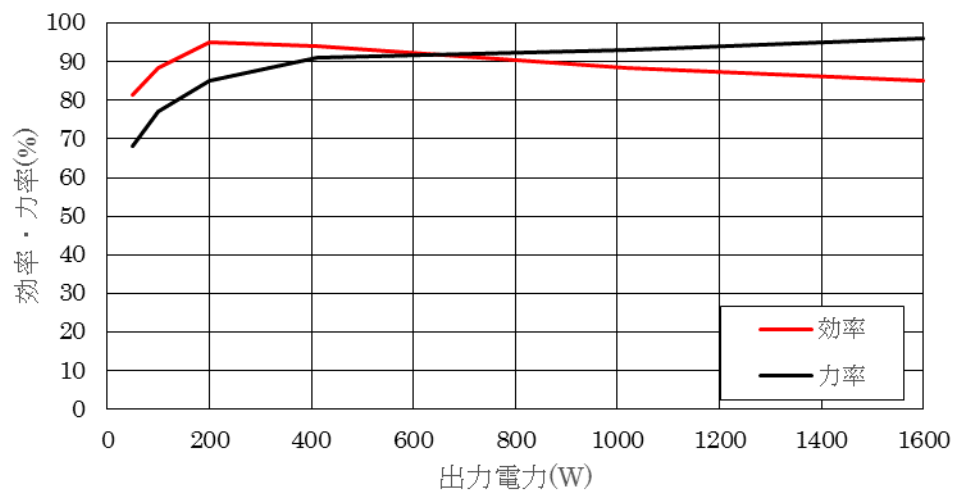


図35(b) 充電器評価結果

4-3 【3-3】信頼性の評価

【内容】

車載機器として必要な信頼性試験に関して、試験項目、試験条件、試験方法の調査を行ない、信頼性試験を実施した。

【結果】

信頼性試験の評価結果を表12に示す。いずれの信頼性試験も試験結果に問題なく、車載用として必要な信頼性があることを確認した。

表12 信頼性試験の評価結果(国際規格のみ抜粋)

No.	評価項目	結果
1 2	AC 電源電圧変動試験 IEC610004-11	問題なし
1 3	ファーストトランジエント/ バーストイミュニティ試験 IEC61000-4-4	問題なし
1 4	サージイミュニティ試験 IEC61000-4-5	問題なし
1 5	伝導イミュニティ試験 IEC61000-4-6	問題なし
1 6	放射イミュニティ試験(充電時) IEC61000-4-3	問題なし
1 8	静電気イミュニティ試験 (充電時) IEC61000-4-2	問題なし
1 9	伝導エミッション試験 CISPR Pub. 11 ClassB グループ 1	問題なし
2 0	放射エミッション試験 CISPR Pub. 11 ClassB グループ 1	問題なし
2 1	高調波電流試験 IEC61000-3-2	問題なし

4-4 【3-4】実車試験

【内容】

【3-1】にて設計・試作した充電器を車両（コムス）に搭載し、車両を一定距離走行させた後、充電器に異常動作や破損無き事を確認する。

【結果】

充電器の車両搭載状態を図36、車両搭載前後の充電器特性を表13に示す。充電器は、インバータへの配線引回しを容易にするため、車両荷台の下部に搭載した。車両を一定距離走行させた後充電器の特性を確認した結果、走行前と差異はなく、破損等もないため、今回設計・試作した充電器は車載用途として問題ない。



図36 充電器搭載状態

表13 充電器特性（充電電流、切り替え電圧）

	切り替え電圧(V)				電流値(A)				
	1→2段目	2→3段目	3→4段目	4→5段目	1段目	2段目	3段目	4段目	5段目
車両搭載前	86.49	86.29	86.61	86.64		6.15	3.05	1.54	1.54
車両搭載後	86.48	86.32	86.59	86.60		6.14	3.03	1.52	1.52
規格値	86.4	86.4	86.4	86.4	12.0	6.0	3.0	1.5	1.5
規格値+5%	90.72	90.72	90.72	90.72	12.60	6.30	3.15	1.58	1.58
規格値-5%	82.08	82.08	82.08	82.08	11.40	5.70	2.85	1.43	1.43

* 充電電流および切り替え電圧に変化なく、車両搭載前後で充電器特性に差異はない。

第5章 全体総括

< 研究開発成果 >

サブテーマ		目標値	結果
【1】高耐圧・高放熱粉体樹脂の開発およびコーティング技術の開発	【1-1】高耐圧・高放熱粉対樹脂の開発	・絶縁耐圧: 2KV/1 分間 (AC) クリア ・熱抵抗: 従来比 ▲25% 低減	・絶縁耐圧: 10KV/1 分間 (AC) クリア ・熱抵抗: 従来比 ▲27.6% 低減
	【1-2】コーティング技術の確立	・ピンホール発生ゼロ ・塗装安定化 樹脂膜厚平均値 ±10% のバラツキ	・ピンホール発生ゼロ ・樹脂膜厚平均値 ±10% 以内達成
	【1-3】モジュール信頼性の確保	・耐温度サイクルに投入し、試験前後の電気的特性、外観に問題無き事。 30⇄80℃、各 45 分、1000 サイクル	・温度サイクル試験後に、電気的特性、外観問題無し
【2】ワンコンバータのデジタル制御技術の確立	【2-1】回路シミュレーション技術を用いた基礎制御理論の構築	・ワンコンバータ制御プログラムの作成（充電器の特性にて確認）	・AC100V 時 力率 98.3% 効率 93.2% ・AC200V 時 力率 98.5% 効率 95.0%
	【2-2】非線形制御技術を用いた高速応答制御の実現	・非線形制御技術を用いた高速応答制御プログラムの作製	・入力急変時の出力電圧変動 3% 以下を達成
	【2-3】ニューラルネットワークを利用したオートチューニング技術の実現	・ニューラルネットワークを用いたオートチューニングプログラムの作製	・充電電流のバラツキ 5% 以下を達成
	【2-4】ワンコンバータ制御プログラムの作成・評価	・AC100V 時 力率 98% 以上 効率 93% 以上 ・AC200V 時 力率 98% 以上 効率 95% 以上	・AC100V 時 力率 98.3% 効率 93.2% ・AC200V 時 力率 98.5% 効率 95.0%
【3】EV 用小型充電器の設計・開発	【3-1】小型充電器の設計・試作	・体積比 50% の充電器の作製	・体積比 49% を達成
	【3-2】充電器特性の評価	・AC100V 時 力率 98% 以上 効率 93% 以上 ・AC200V 時 力率 98% 以上 効率 95% 以上	・AC100V 時 力率 98.3% 効率 93.2% ・AC200V 時 力率 98.5% 効率 95.0%
	【3-3】信頼性の評価	・信頼性試験の実施	・信頼性試験実施完了 問題なし
	【3-4】実車試験	・車両に搭載し、異常無きことを確認する	・車両搭載し、異常動作や破損無き事の確認

<今後の課題・事業化展開>

高耐圧・高放熱紛体樹脂においては、樹脂性能は問題なく、コストが最終的な製品実現化の課題としてあげられる。ポイントとしては、放熱フィンの価格と樹脂との価格差である。放熱フィン価格と開発樹脂品をコーティングした製品の樹脂付着量を加味した樹脂価格とでは、開発樹脂をコーティングした場合が低コストに繋がることが判明しており、製品実現性があるものと考ええる。

充電器においては、今回開発したワンコンバータ制御技術を個別の顧客に向けた製品への設計落とし込みが課題となる。また、充電器のみならず、他のAC/DCコンバータ、DC/DCコンバータへの応用も課題となるため、今後の補完研究にて研究・開発を継続し、課題解決を図る。

今後の事業化展開は上記課題を解決した上で、小型EVメーカーならびに産業機器メーカーに対し、PR・受注活動を行っていく。

<専門用語の解説>

- 力率・・・皮相電力に対する有効電力の割合。皮相電力を供給側（発電所）の供給エネルギー、有効電力を需要者側（電気機器）の消費エネルギーと置き換えると考え易い。需要側の力率が低い程、供給側の負荷が大きくなる。

例）力率50%の充電器で500W消費する場合・・・発電所は1000VAのエネルギー供給が必要。力率100%の充電器で500W消費する場合・・・発電所は500VAのエネルギー供給が必要。

- 皮相電力・・・実際に消費される電力ではなく、見かけの電力。（単位：VA）
- 有効電力・・・負荷で実際に消費される電力。（単位：W）
- 無効電力・・・負荷と電源とで往復するだけで実際には消費されない電力。（単位：Var）
- PFC・・・力率改善回路のことを言う。力率が高い程、電力を有効に使用できる。
- コンバータ・・・直流変換装置
- 充電効率・・・力率×効率のこと。
- 熱抵抗・・・温度の伝えにくさを表す値で、単位時間当たりの発熱量あたりの温度上昇量を意味する。（単位：℃/W）
- 絶縁耐圧・・・絶縁体が絶縁状態を保てなくなる電圧をいう。