

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「電動車用高性能・高電圧直流用新型ヒューズの開発」

研究開発成果等報告書

平成27年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 公益財団法人埼玉県産業振興公社

目次

第1章	研究開発の概要	
1-1	研究開発の背景・研究目的および目標	1
1-2	研究体制	2
1-3	成果概要	7
1-4	当該研究開発の連絡窓口	12
第2章	本論	
2-1	直流用サブストレートヒューズの開発	13
2-1-1	エレメントの製作技術の開発	
2-1-2	ヒューズの製作技術の開発	
2-1-3	環境負荷試験による信頼性の評価	
2-1-4	溶断・遮断試験による性能評価及び試作品適正化	
2-2	直流用ハイブリッドサブストレートヒューズの開発	16
2-2-1	エレメントの製作技術の開発	
2-2-2	ヒューズの製作技術の開発	
2-2-3	環境負荷試験による信頼性の評価	
2-2-4	溶断・遮断試験による性能評価及び試作品適正化	
2-3	直流遮断試験装置の設計・製作・設置	23
2-3-1	過酷環境対応となる遮断試験システムの開発	
2-3-2	直流遮断試験装置の改造	
第3章	全体総括	
3-1	研究開発成果	25
3-2	今後の課題	26

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的および目標

(1) 研究開発の背景

現在市販されている電気自動車（以下「電動車」という。）には、金属板打ち抜きヒューズが使用されており、電力消費の増大による送電ロスの減少とハーネスの軽量化のため、高電圧直流化が求められている。また、自動車の使用環境は極めて厳しいため、耐用年数15年を確実に達成でき、高電圧・大電流対応が可能であり、遮断性能が高く、小型化されたヒューズが要望されている。

(2) 研究開発の目的

本研究開発は、これらの要望に応えるためにセラミック上の導電部を微細加工し、密着させた基板を適用した新型ヒューズを更に高性能化し、電動車に適用可能な耐久性・安全性が高く、生産効率の高い小型化された日本発の世界標準ヒューズを開発することを目的とする。

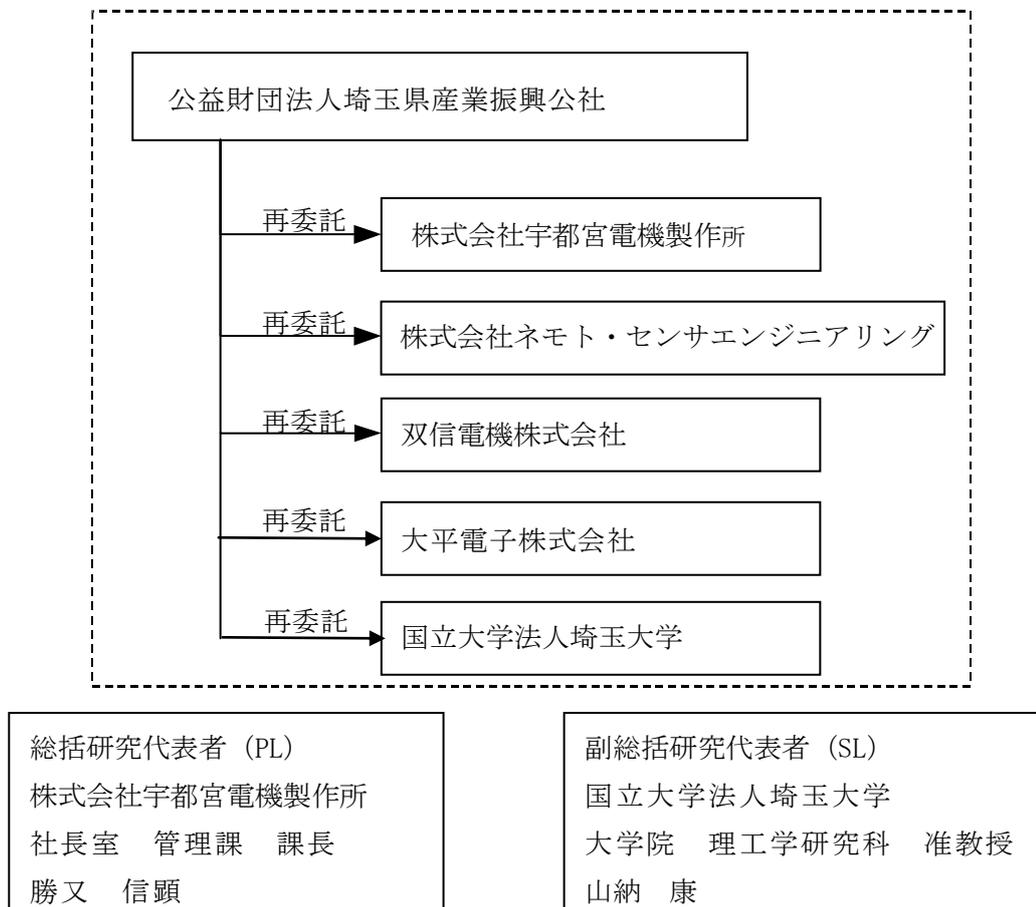
目標値は次の通りである。

- ・最大定格電圧・電流：従来ヒューズの450V、225Aに対して、1000V、400Aとする。
- ・遮断性能：速断性能向上のため、遮断エネルギーを従来対比1/6以下とする。
- ・耐用年数：従来ヒューズの耐用年数10年に対し15年とする。
- ・サイズ：同一定格で比較し、従来ヒューズ対比で容積を30%低減する。
- ・価格：従来同一規格ヒューズ対比で価格を20%低減する。

1-2 研究体制（平成26年度の体制を記載する）

(1) 研究組織及び管理体制

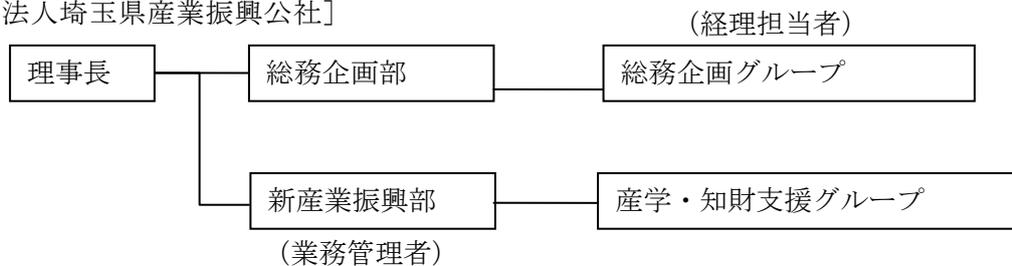
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

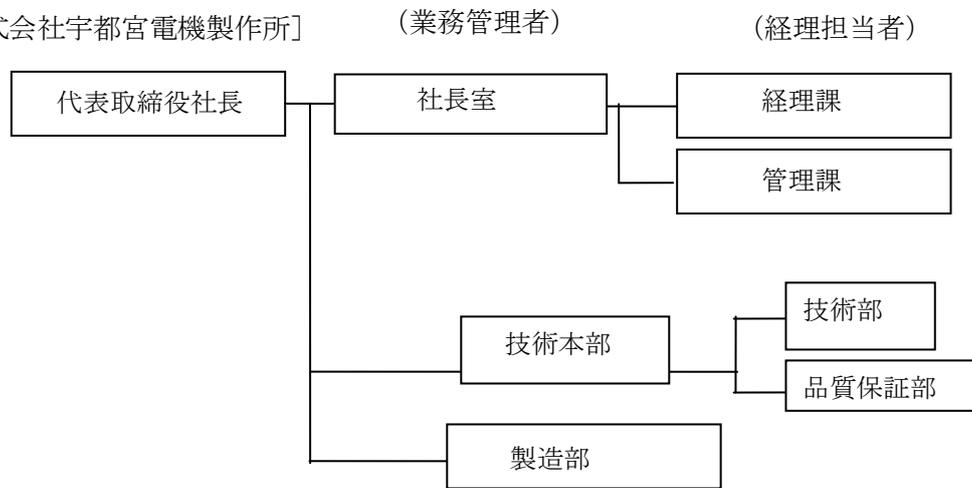
①事業管理機関

[公益財団法人埼玉県産業振興公社]



②再委託先

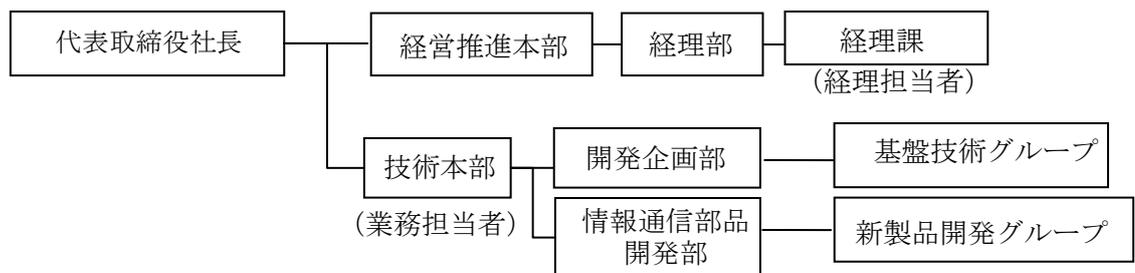
[株式会社宇都宮電機製作所]



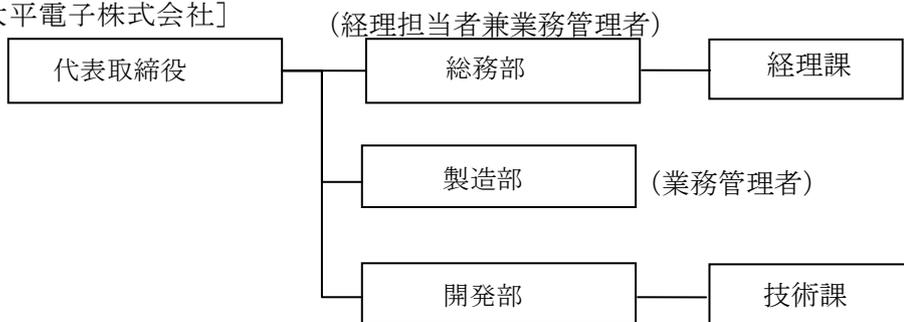
[株式会社ネモト・センサエンジニアリング]



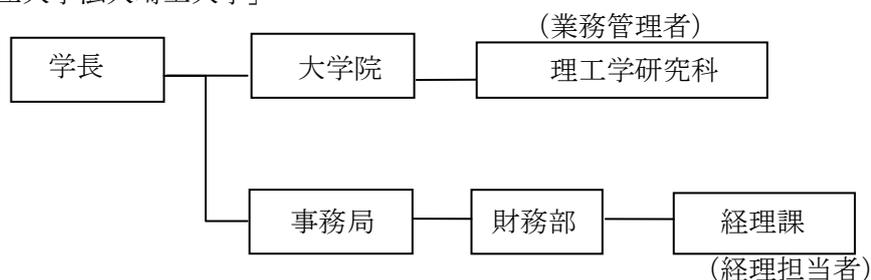
[双信電機株式会社]



[大平電子株式会社]



[国立大学法人埼玉大学]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】公益財団法人埼玉県産業振興公社

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
神山 明	総務企画部 総務企画グループ 主査	④
長谷部 鉄男	新産業振興部 産学・知財支援グループ 主任調査役	④
町田 博	新産業振興部 産学・知財支援グループ コーディネータ	④

【再委託先】

(研究員)

株式会社宇都宮電機製作所

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
勝又 信頭	社長室 管理課 課長	① ②
増田 貞雄	社長室 室長・執行役員	① ②
鈴木 茂男	技術本部 取締役	① ②
田中 修	技術本部 取締役 技術部長	① ②
堀内 大輔	技術本部 技術部	① ②
臼井 真悟	製造部 主任	① ②
木野 善幸	社長室	① ②
井沢 和成	技術本部 品質保証部	① ②

株式会社ネモト・センサエンジニアリング

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
松澤 隆嗣	代表取締役社長	① ②
矢島 充	生産本部長兼管理部長	① ②
石川 雄三	生産本部 応用製品グループ	① ②
田村 伸一	生産本部 応用製品グループ	① ②

双信電機株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
安藤 朗	技術本部 担当部長	① ②
伊藤 康行	技術本部 課長	① ②
秋山 仁志	技術本部 主任	① ②
木村 広伸	技術本部 主任	① ②
丸山 光知子	技術本部	① ②
高柳 さとみ	技術本部	① ②
広瀬 浩一	技術本部 主任	① ②
櫻井 篤司	技術本部	① ②

大平電子株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
菊池 雅行	製造部 執行役員	③
佐藤 匡	開発部 技術課 課長	③
新藤 貴也	開発部 技術課 主任	③
橋爪 澄子	製造部	③

国立大学法人埼玉大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
山納 康	大学院 理工学研究科 准教授	① ② ③

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

公益財団法人埼玉県産業振興公社

(経理担当者) 総務企画部 総務企画グループ 主査 神山 明

(業務管理者) 新産業振興部長 萩 豊

(再委託先)

株式会社宇都宮電機製作所

(経理担当者)	社長室	経理課	木野	善幸
(業務管理者)	社長室	室長・執行役員	増田	貞雄
	社長室	管理課 課長	勝又	信顕

株式会社ネモト・センサエンジニアリング

(経理担当者)	管理部	鈴木	伸子
(業務管理者)	生産本部長兼管理部長	矢島	充

双信電機株式会社

(経理担当者)	経営推進本部	経理部	経理課	高野	栄治
(業務管理者)	技術本部	担当部長		安藤	朗

大平電子株式会社

(経理担当者兼業務管理者)	総務部	部長	佐藤	かほる
(業務管理者)	製造部	執行役員	菊池	雅行

国立大学法人埼玉大学

(経理担当者)	財務部	経理課	理系学部等担当	係長	中島	弘樹
(業務管理者)	大学院	理工学研究科長			坂井	貴文

(4) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
勝又 信顕	株式会社宇都宮電機製作所 社長室管理課 課長	PL
山納 康	国立大学法人埼玉大学 大学院 理工学研究科准教授	SL
増田 貞雄	株式会社宇都宮電機製作所 社長室 室長・執行役員	
堀内 大輔	株式会社宇都宮電機製作所 技術部	
石川 雄三	株式会社ネモト・センサエンジニアリング 生産本部 応用製品グループ	
安藤 朗	双信電機株式会社 技術本部 担当部長	
伊藤 康行	双信電機株式会社 技術本部 課長	
木村 広伸	双信電機株式会社 技術本部 主任	
菊池 雅行	大平電子株式会社 製造部 執行役員	
中川 貴紀	株式会社本田技術研究所 四輪 R&D センター第5 技術開発室主任研究員	アドバイザー
井上 孝	東芝産業機器システム株式会社 技術部配電機器・品質グループ主務	アドバイザー
町田 博	公益財団法人埼玉県産業振興公社 新産業振興部 産学・知財支援グループ 産学コーディネータ	
長谷部鉄男	公益財団法人埼玉県産業振興公社 新産業振興部 産学・知財支援グループ 主任調査役	

1-3 成果概要

(1) 研究開発概要

【平成24年度】

交流用ヒューズとして開発されたセラミックを基板としたサブストレートヒューズが直流用ヒューズのスペックに対して、どの程度満足するかを検証するために、セラミック基板上にエッチングによる方法と印刷方式の元素による特性を把握し、狭小部のシリーズ部と平行部の組み合わせで電流・時間特性 (IT) の傾きをコントロールできるとの見解を得た。並行して溶断特性の異なる元素を組み合わせた直流用ハイブリッドサブストレートヒューズに関して、シミュレーション実験によ

り諸特性を調べ、エレメントパターンについて、シミュレーションと試験品の溶断位置との比較から、シミュレーションと一致しないことも確認された。要因はシミュレーションするための条件が足りない事にあると考えられた。

セラミック基板の熱伝導率が良い事より発熱された熱が冷却されすぎる事と温度上昇特性から溶断しにくいヒューズであることが分かった。

更に、直流遮断試験装置については、本事業の開発目標となる直流用ヒューズに関して遮断試験を行える仕様のもを設計し、製作した。試験用ヒューズで遮断試験を行いその性能を確認した。

【平成25年度】

昨年度の研究成果を基にハイブリッドサブストレートヒューズ的设计・作製・評価を進めた。合わせてエレメント作製技術に関しては、エッチド方式と印刷方式について、各要素技術（電極膜構成、ペースト材料、電極焼付技術）の適正化を行った。大電流遮断部と小電流遮断部を有する構造となるハイブリッドタイプの設計では、昨年度からの実験結果及びシミュレーション結果等を基に検討し、高電圧直流用ヒューズとしての優位性を確認した。エレメント構造の直列遮断点数の増加により高電圧化が可能であることを確認し、40A、70A、100A定格電流で450V以上の遮断に成功した。

ヒューズ開発品の信頼性については、熱衝撃サイクル試験装置を導入し、2000サイクルまでの安定性を目標に、特性劣化状況の検討を始めた。また、ヒューズ遮断試験装置については電圧印加制御装置を開発・設置し、開発品の特徴となる小電流での直流遮断特性を評価することができ、ハイブリッドタイプの構造適正化を進めた。

【平成26年度】

昨年度の研究成果を基にハイブリッドサブストレートヒューズ的设计・作製及び信頼性評価を行った。合わせてエレメント作製技術に関しては、エッチド方式と印刷方式について、各要素技術（電極膜構成、ペースト材料、電極焼付技術）の適正化を行った。大電流遮断部と小電流遮断部を有する構造となるハイブリッドタイプの設計では、従来品との特性比較から高電圧直流用ヒューズとしての優位性を確認した。エレメント構造の適正化により高電圧・大電流化（450V、40～200A）の電気自動車用ヒューズの製作が可能であることを確認し、基本性能を満たすことを確認した。

ヒューズ開発品の信頼性については、環境負荷試験として、熱衝撃サイクル試験、振動試験を実施し、溶断時間性能や遮断試験について特段の影響は見られず、ヒューズの性能に劣化は現れなかった。

本事業においては下記テーマの研究開発を行い、その概要は以下のとおりである。

【1】直流用サブストレートヒューズの開発

【2】直流用ハイブリッドサブストレートヒューズの開発

【3】直流遮断試験装置の設計・製作

(2) 研究結果概要

平成24年度から26年度の成果まとめとして、最終年度の研究結果概要を記載する。

【1】直流用サブストレートヒューズの開発

【1-1】エレメントの製作技術の開発

(実施：株式会社ネモト・センサエンジニアリング、双信電機株式会社、国立大学法人埼玉大学)

【エッチドタイプに関する事項】

ハイブリッドでないサブストレートヒューズでは定格電流が大きくなるとヒューズ全体の温度が高くなり実用に適さないことがわかった。サブストレート型ヒューズとして高電圧対応のエレメント開発を行い実用となることがわかった。エレメントパターンについては狭小部の幅と長さ厚みを適正化することで溶断特性が自動車用ヒューズ規格に適合することが分かった。

【印刷方式に関する事項】

宇都宮電機製作所社より熱衝撃サイクル試験結果として抵抗値の上昇が報告されているものについて分解し原因の解析を行った。熱衝撃試験時にヒューズのケースである FRP とセラミック基板との熱膨張係数の違いにより、接合部に応力がかかり、ハンダの接合状態が悪化したと考えられる。基板と印刷導体の密着状態に異常は見られない。

【1-2】ヒューズの製作技術の開発 (実施：株式会社宇都宮電機製作所)

サブストレートエレメントをヒューズリンクに組み立てるため、ヒューズ筒、エレメント、端子及びキャップ構造について最適化した。これらはハイブリッドサブストレートヒューズに関する実施項目【2-2】と共通することから、結果報告は【2-2】と兼ねる。

【1-3】環境負荷試験による信頼性の評価 (実施：株式会社宇都宮電機製作所、株式会社ネモト・センサエンジニアリング、双信電機株式会社)

熱衝撃環境負荷試験で不具合を生じた端子部について改善した結果は以下のとおりとなる。熱衝撃試験前後の溶断試験、抵抗検査、遮断試験、及び力学試験で、外観や溶断・遮断特性、及び抵抗値上昇に特に差が見られなかった。

これらはハイブリッドサブストレートヒューズに対する熱衝撃、力学衝撃の環境負荷試験と共通することから、結果報告は【2-3】と兼ねる。

【1-4】溶断・遮断試験による性能評価及び試作品適正化（実施：株式会社宇都宮電機製作所、株式会社ネモト・センサエンジニアリング、双信電機株式会社、国立大学法人埼玉大学）

熱衝撃環境負荷試験後のサブストレートヒューズについて、溶断時間試験、遮断試験を実施し、自動車メーカの提示する仕様を満たすことを確認した。但し、これらはハイブリッドサブストレートヒューズに関する実施項目【2-4】での試験結果を基に評価し、結果報告は【2-4】と兼ねる。

【2】直流用ハイブリッドサブストレートヒューズの開発

【2-1】エレメントの製作技術の開発（実施：株式会社ネモト・センサエンジニアリング、双信電機株式会社、国立大学法人埼玉大学）

【2-1-1】印刷方式ハイブリッドヒューズエレメントの開発（実施：双信電機株式会社）

- a. ペースト開発：新規開発ペーストの印刷性を確認し、エレメント単体の導体密着強度の信頼性を確認できた。さらに改良されたメタル版により実用的な印刷性が確認された。
- b. プロセス開発：銅ペーストの脱脂・還元焼成プロセスの開発のため、真空式ボックス炉による窒素ガス導入温度と露点制御温度の影響について検討し、抵抗値が低くなる条件を得た。
- c. 新規開発ペーストを適用し 200A 定格エレメント、300A 定格エレメント、400A 定格エレメントの3回のエレメント試作をおこない、ヒューズリンク組立に提供した。

【2-1-2】エッチド方式ハイブリッドヒューズエレメントの開発（実施：株式会社ネモト・センサエンジニアリング）

セラミック板に銅パターン上の一部に設計したとおりの面積、厚みで錫メッキを施し、ハイブリッドサブストレートのヒューズエレメントは完成したが、 $0.4\text{m}\Omega$ のエレメントでも 150A 程度の定格にしかならなかった。同じ寸法のセラミック板に放熱が良くし定格電流を上げるように狭小部の多いエレメントを設計した。ハイブリッドの特性のため銅のパターンの上に錫メッキを施した。銅 60μ 錫 60μ で抵抗値 $1\text{m}\Omega$ のエレメントで 200A(180A) の定格電流を持たせることが出来た。これが片面であるので両面のエレメントで 400A 定格が実現可能となった。

●埼玉大学での遮断試験結果について；遮断試験については、ハイブリッド化したヒューズリンクにおいて埼玉大学において定格電圧 450V 定格電流 200A 相当品までの遮断試験を実施し、450V で遮断に成功した。同性能の従来品において遮断試験を実施し、遮断性能の指標である I^2t 値の特性比較を行ったところ、従来品と比べて I^2t 値は 49%まで低下させることに成功し、高電圧直流用ヒューズとしての優位性を確認した。

【2-2】ヒューズの製作技術の開発（実施：株式会社宇都宮電機製作所）

【2-1】で製作したハイブリッドサブストレートエレメントをヒューズリンクに組み立てる為に、以下の項目を実施し、製造技術の開発・適正化した。

- ① 端子構造をエレメント一体型からブレード型端子に変更した。
- ② エレメントを内キャップ付き碍管に固定する
- ③ ②の構造の両端にブレード付き端子を取り付けた。

【2-3】環境負荷試験による信頼性の評価（実施：株式会社宇都宮電機製作所、株式会社ネモト・センサエンジニアリング、双信電機株式会社）

直流用ハイブリッドサブストレートヒューズに対して熱衝撃、力学衝撃の環境負荷試験を行い、外観及び抵抗値の変化を検査し、以下の結果が得られた。

- ① 熱衝撃試験前後の溶断試験で、外観や溶断結果に特に差が見られなかった。
- ② 熱衝撃試験前後の抵抗検査で、抵抗値上昇に差が見られなかった。
- ③ 熱衝撃試験前後の遮断試験で、外観や遮断試験結果に特に差が見られなかった。
- ④ 力学試験において、外観や抵抗値に特に差が見られなかった。

【2-4】溶断・遮断試験による性能評価及び試作品適正化（実施：株式会社宇都宮電機製作所、株式会社ネモト・センサエンジニアリング、双信電機株式会社、国立大学法埼玉大学）

450V、200A用のヒューズエレメントパターンを設計し、製作した。遮断性能に関しては450Vの遮断試験を満足することを確認している。溶断試験は180～140A定格まで得られた。再度、エレメントを見直し、年度内に抵抗値自体は、定格200A相当であり、遮断・溶断試験では180A定格まで確認された。

熱衝撃試験及び振動試験が終了し、外観的には問題が見受けられない。環境試験前後で抵抗値上昇はあったものの、溶断試験に差が無いことを確認した。

自動車メーカーの条件として挙げられたJASO規格は満足することができた。

【3】直流遮断試験装置の設計・製作・設置

【3-1】過酷環境対応となる遮断試験システムの開発（実施：大平電子株式会社、国立大学法人埼玉大学）

減圧環境下における遮断試験用の真空容器の性能は確認し、4000～5000m高度の0.05MPaの気圧での遮断実験を実施し、減圧環境下においても遮断試験が可能であることを確認した。

【3-2】直流遮断試験装置の改造（実施：大平電子株式会社、国立大学法人埼玉大学）

外部直流電源装置と GPIB 光通信を行うインターフェースを改造し、ヒューズにおいて遮断試験を実施し、ヒューズ溶断時のタイミングと、電圧印加用コンデンサの高電圧印加のタイミングをサブミリ秒の精度まで上げ、試験用ヒューズで遮断試験を行いその性能を確認した。コンデンサの大容量化が終了し、これにより遮断容量の大きなヒューズの遮断試験の実施が可能となった。

【4】プロジェクトの管理・運営（実施：公益財団法人埼玉県産業振興公社）

- ・事業管理機関である財団法人埼玉県産業振興公社において、本プロジェクトの管理を行った。プロジェクトの研究経緯と成果について取りまとめ、成果報告書1部及び電子媒体（CD-ROM）1式を作成した。
- ・本研究の実用化に向けた到達の度合いを検証するとともに、事業化に向けた課題等について研究実施者と調整を行った。
- ・再委託先事業者が作成する証憑書類について、指導・確認を行った。
- ・研究開発推進委員会を委託契約期間内に4回開催（目標；4回程度）した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

（管理法人） 公益財団法人埼玉県産業振興公社 新産業振興部
産学・知財支援グループ 主任調査役 長谷部 鉄男
〒338-0001
埼玉県さいたま市中央区上落合2-3-2
新都心ビジネス交流プラザ3階
電話番号：048-857-3901
E-mail：hasebe@saitama-j.or.jp

（総括研究代表者） 株式会社宇都宮電機製作所
社長室 管理課 課長 勝又 信顕
〒251-0861 神奈川県藤沢市大庭 8358
電話番号：0466-81-1708
E-mail：n-katsumata@utsunomiya-el.co.jp

第2章 本論

本事業のまとめとして、以下の通り最終年度の研究開発成果を提示する。

2-1 直流用サブストレートヒューズの開発

前年度の成果を基にセラミックを基板としたサブストレートヒューズエレメントを設計、作製し、自動車業界から要求されているスペックをどの程度満足するか検証した。

2-1-1 エレメントの製作技術の開発

(実施：株式会社ネモト・センサエンジニアリング、双信電機株式会社、国立大学法人埼玉大学)

エレメントの定格電流の増大を目的に、導電層の厚さ、エレメント構成及び作製条件を変え、検討を行った。得られた結果を基にエレメントを作製し、特性を検証した。

【エッチド方式の検討】

エッチドタイプのサブストレートヒューズとして本研究では基板としてアルミナ96のセラミックを使用してきた。これに銅をメッキエッチングしてヒューズパターンを形成してきた。この場合短絡電流の遮断には全く問題ないが、定格40A以上のヒューズとなると定格の110%程度の電流が流れた場合、ヒューズ全体が高熱になりハイブリッドヒューズとしての機能を持たざるを得ないことが判明した。そこでサブストレートヒューズとしては定格30A以下のヒューズに限定し、高電圧を図ることにし目標定格1000V、10、20、30Aのヒューズの開発を計画実施した。

方法としてはセラミック基板に狭小部の全長をAC600V(DC450V)5品の7.2mmから12mmに伸ばし、狭小部の断面積及びパターンで定格電流10Aを試作しJASO D622の規格に適合するヒューズを完成させた。

なお、遮断特性は500Vまで確認できており、それ以上の電圧について試験環境が整った段階で実施する。

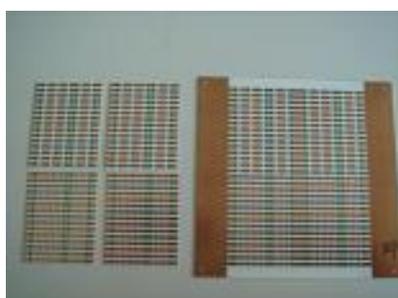


図1. 5S1P, 13S1P エレメント分割前



図2. 13S1P 溶断試験前後

【印刷方式の検討】

宇都宮電機より熱衝撃サイクル試験結果として図3のとおり抵抗値の上昇が報告されているので分解解析を行い原因の解析実施を行った。

ダイヤモンドカッターにて切断、樹脂研磨、CP研磨を行い接合部分の断面観察を行った。

熱衝撃サイクル試験後のサンプルでハンダ付け部分が剥離、劣化が確認された。アルミナ基板と印刷導体の密着状態には異常は見られない。SEM・EDS観察も実施したが両サンプルともハンダ部分の酸化は確認されなかった。

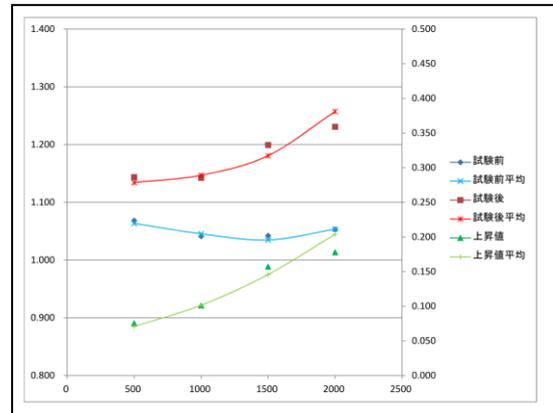


図3. エレメントヒューズの抵抗値上昇

【考察】

・熱衝撃試験時にヒューズのケースである FRP とセラミック基板との熱膨張係数の違いにより、接合部に応力がかかり、ハンダの接合状態が悪化したと考えられる。基板と印刷導体の密着状態に異常は見られない。印刷導体パターン単体の熱衝撃サイクル試験では密着強度の上昇が確認されていることからエレメント状態でも（ハンダ付け強度）＜（導体密着強度）であると判断できる。

2-1-2 ヒューズの製作技術の開発（実施：株式会社宇都宮電機製作所）

前年度までの環境負荷試験等の成果を基にヒューズ筒、エレメント、端子及びキャップ構造について適正化を行った。更に、適正化されたサブストレートヒューズリンクの組立作業性を評価した。

当初は以下の内容でヒューズ作製し諸特性の評価を進めたが、熱衝撃試験における耐久試験及び力学試験において問題が発生し、その解消のため構造の適正化を行った。

- ① 外管をセラミックから FRP に変更した
- ② 端子をエレメント一体構造にした
- ③ エレメント付き端子を外キャップのみで外管と接続した

問題及び対策は下記のとおりである。なお、本項は2-2-2項と共通することから、詳細は後述する。

【問題1】ヒューズにおける熱衝撃試験においた、外観に異常は見られなかったが、試験前後で抵抗値上昇や導通が取れないものが発覚した。また、端子とエレメントのはんだ接

合部において、エレメントとの接合部に剥離が発生した。

【問題2】一部のFRP外管の表面に熱で弱くなったような形跡が見られた。FRPの外管は、高温まで耐えられる構造であったが、更なる改良が必要と思われる。

⇒【対策1】外管をFRP樹脂からセラミックへ変更した。

熱衝撃試験において、FRP樹脂が熱で変形してしまった為、セラミックに変更した。価格面において若干高めになってしまうが、大量生産する事でコストがFRP樹脂並みに抑えられることが判った。

【問題3】力学試験において、落とし方によっては、エレメントが折れてしまう事が判明した。

⇒【対策2】エレメント一体型端子構造からブレード付端子構造に変更した。

端子構造とエレメント構造を別々にした。今回設計したブレード型端子を用い、エレメントと端子を切り分ける事で応力にも耐えられるようになり、耐久性が格段に良くなった。

また、組立作業性については、作業効率が上がり、抵抗値のばらつきが少なくなった

2-1-3 環境負荷試験による信頼性の評価（実施：株式会社宇都宮電機製作所、株式会社ネモト・センサエンジニアリング、双信電機株式会社）

●振動試験：自動車メーカーから提示されたJASO規格に沿った形で15分/1サイクルとして、7~200~7(Hz)の掃引振動をX・Y・Z軸の各方向へ3時間、8Gの振動強度を加える試験を行い、共振探査試験では3方向の振動試験を実施した。

⇒振動試験前後で異常のないことを確認。本項は2-2-3項と共通する事から、詳細は後述する。

●熱衝撃試験：-50℃から+150℃を1サイクルとして、1000サイクルの試験を実施。

⇒熱衝撃試験前後でヒューズリンクの抵抗値上昇がみられたが、熱衝撃試験前後で溶断試験の結果に差が無いことが確認できた。本項は2-2-3項と共通する事から詳細は後述する。

2-1-4 溶断・遮断試験による性能評価（実施：株式会社宇都宮電機製作所、国立大学法人埼玉大学）

熱衝撃環境負荷試験後のサブストレートヒューズについて、溶断時間試験、遮断試験を実施し、自動車メーカーの提示する仕様を満たすことを確認した。但し、これらはハイブリッドサブストレートヒューズに関する実施項目【2-4】と共通することから、結果報告は【2-4】と兼ねる。

2-2 直流用ハイブリッドサブストレートヒューズの開発

2-2-1 エレメントの製作技術の開発

(実施：株式会社ネモト・センサエンジニアリング、双信電機株式会社、国立大学法人埼玉大学)

・自動車メーカーが提示する仕様を満たす 450 V/200 A のハイブリッドサブストレートヒューズのエレメントパターンについて、通電時の温度上昇シミュレーションや溶断試験の結果を基に設計・試作した。

・450 V/400 A のハイブリッドサブストレートヒューズのエレメントパターンを、サブストレートヒューズ開発成果を基に構成設計し、開発製品スペックを決定した。

2-2-1-1. 印刷方式ハイブリッドヒューズエレメントの開発 (実施：双信電機株式会社)

前年度までの成果である既存ペースト及び新規開発ペーストを用いたエレメント印刷焼成技術について適正化を行った。具体的には印刷ペースト開発、プロセス開発、及び評価用エレメント製作の各項を中心に適正条件を選定した。

A) ペースト開発

昨年度の成果である改良ペースト S2 にて熱衝撃試験 (-50℃/+150℃) を 2000cyc まで密着力評価を実施し、目標値 20N/2mm²以上であることを確認した。

ペースト評価と並行して厚膜印刷性について、現行の製版メーカー技術で作製可能上限のメタル厚 70 μm 仕様での印刷条件を検討し 90 μm 厚の印刷性が確認された。

B) プロセス開発

銅ペーストを通常の大気内で焼成すると銅が酸化してしまうため、窒素ガスを導入し酸素濃度を低くする。ただし脱脂工程においては、ペースト内の有機成分を酸素と反応させることで残留カーボンを少なくすることができるため、脱脂時と焼成時の酸素濃度を切り替える必要がある。銅ペーストの脱脂・還元焼成プロセスの開発のため、真空式ボックス炉による窒素ガス導入温度と露点制御温度の影響について検討した。

ウェットな窒素ガスから純窒素ガスに切り替える温度と焼成後試料の抵抗値測定を実施し、窒素ガスの切り替え温度の適正化で抵抗値を低く出来ることを確認した。露点制御温度と抵抗値測定を行い、露点温度適正化を行った。

【結果】

- ・窒素ガス導入タイミングと露点温度の影響状態を確認。
- ・窒素ガス導入と露点制御の最適化した還元焼成プロファイルを確認。

C) エレメント作製

開発ペーストを適用し 200A 定格エレメント、200A 定格エレメント、200A 定格エレメントの3回のエレメント試作を実施した。

試作を通じて発生した印刷方式のエレメント作製課題について改善対策方法を検討した。パターンにより基板割れの発生率が上昇し不良率が上昇したものの、ブレイク用のレーザ加工溝の寸法を調整することで基板割れの発生を低減することができ不良率が低減した。更に導体を厚さにより、基板割れ発生率が上昇する可能性があることが分かり、ブレイク溝寸法については検討が必要と考える。

【課題】

- ・量産に向けては導体膜厚とアルミナ基板へのブレイク溝形状を最適化する必要がある。

2-2-1-2. エッチド方式ハイブリッドヒューズエレメントの開発（実施：株式会社ネモト・センサエンジニアリング）

昨年度使用した半田に比べ、より低融点の共晶半田の使用も考え、基本エレメントのパターンと錫（半田）のメッキのパターンと分量と溶断時間、溶断温度の関係を求め、ハイブリッドヒューズエレメントを製作した。また、錫半田メッキ無しでのハイブリッド化も目指し、ハイブリッドヒューズエレメントを完成させた。

ハイブリッドヒューズエレメントを完成させるためにはどうしても低温で溶断を完成させないといけないので、錫を銅のエレメントパターンの上にメッキするのが最上の方法と考えられた。そこで銅と錫の割合について3種を試作した。3種とも低温での溶断をすることが出来た。錫の部分を適正化すれば規格に適合できると考えられる。今回 120A 程度の定格電流のつもりで設計したが、片面で 200A 程度あり錫の調整で規格に適合するものが完成すると考えられる。

【埼玉大学でのエレメント設計及び遮断試験結果】

JASO D622 自動車用ねじ締め形高電圧ヒューズの溶断時間試験と遮断試験を満たすハイブリッドサブストレートヒューズのエレメントパターンを選定した。エレメント設計の要点としては、短絡電流のような大電流を遮断する大電流遮断部（P 部と呼ぶ）と、定格電流を超える過電流に対して所定の溶断時間で溶断・遮断される小電流遮断部（I 部と呼ぶ）から構成される点である。ハイブリッドサブストレートヒューズのエレメントの試作は、第一回～第五回に分け、試作毎に目標を立てエレメントの設計を行った。

以上の設計指針のもと、ハイブリッドサブストレートヒューズのエレメントパターンとしては、定格電流の異なる 40A～200A のヒューズエレメントの設計パターンを得ることができた。バッテリーに適したヒューズエレメントの設計指針は、I 部の抵抗値と P 部の抵抗値の比率、I 部の最小断面積部と P 部の最小断面積部の比率、I 部の半田の位置が重要ポイントであり、これらの基礎データを取得することができた。

2-2-2 ヒューズの製作技術の開発

(実施：株式会社宇都宮電機製作所)

【2-1】で製作したハイブリッドサブストレートエレメントをヒューズリンクに組み立てる為に、以下の項目を実施し、製造技術の開発・適正化した。

昨年度、熱衝撃試験における耐久試験及び力学試験において、いくつかの問題点が発生した。その問題を解消する為に、以下の内容について検討した。

●各問題点は下記のとおりである。

【問題点1】試作エレメントのヒューズにおける熱衝撃試験において、外観に異常は見られなかったが、試験前後で抵抗値上昇や導通が取れないものが認められた。また、端子とエレメントのはんだ接合部において、エレメントとの接合部に剥離が見られた。

【問題点2】一部のFRP外管の表面に熱で弱くなったような形跡が見られた。FRPの外管は、高温まで耐えられる構造であったが、更なる改良が必要と思われる。

【問題点3】力学試験において、落とし方によってはエレメントが折れてしまう事が判明した。外管の胴体が地面に着地する分に関しては、異常は見受けられなかったが、端子側が地面に着地する場合は、エレメントが端子の端から折れてしまった。

●問題解決を目的に下記対策を実施した。

【対策1（問題点1及び2に対する）】外管をFRP樹脂からセラミックへ変更。

熱衝撃試験において、FRP樹脂が熱で変形してしまった為、セラミックに変更した。価格面において若干高めになってしまうが、大量生産する事でコストがFRP樹脂並みに抑えられることが判った。

【対策2（問題点3に対する）】エレメント一体型端子構造からブレード付端子構造に変更。



図4 ヒューズリンク

端子構造とエレメント構造を別々にした。今回設計したブレード型端子を用い、エレメントと端子を切り分ける事で応力にも耐えられるようになり、耐久性が格段に良くなった。

ヒューズリンクの形状は図4のとおりとなり、組立作業性は、作業効率が上がり抵抗値のばらつきが少なくなった

2-2-3 環境負荷試験による信頼性の評価

(実施：株式会社宇都宮電機製作所、株式会社ネモト・センサエンジニアリング、双信電機株式会社)

直流用ハイブリッドサブストレートヒューズに対して熱衝撃、力学衝撃の環境負荷試験を行い、外観及び抵抗値の変化を検査し、以下の結果が得られた。

●振動試験：自動車メーカーから提示された JASO 規格に沿った形で 15 分/1 サイクルとして、7~200~7(Hz)の掃引振動を行う X・Y・Z 軸の各方向へ 3 時間、8G の振動強度を加える振動試験、及び 3 方向に振動 1 往復を加え共振振動の有無を評価する為共振探索試験を実施した。

供試品は、右図のとおり治具で加振台に固定し試験を行った。

⇒振動試験前後で異常のないことを確認し、共振振動数が各方向において存在しない事が分かった。

図6にZ方向(復路)の共振探索試験の結果を示すが、最大加速になった時に若干、下限方向に振動が増えるが、正常値の範囲内に収まった。



図5 振動試験装置への供試品設置状況

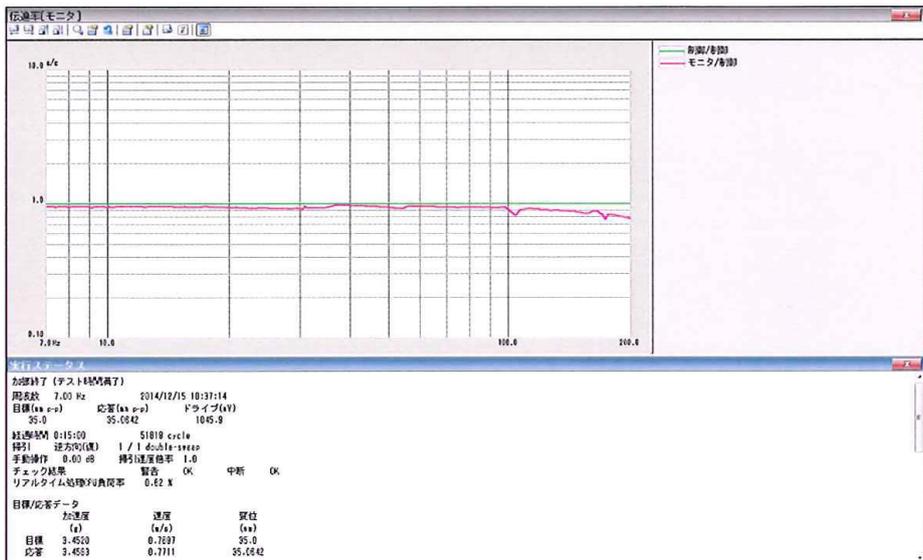
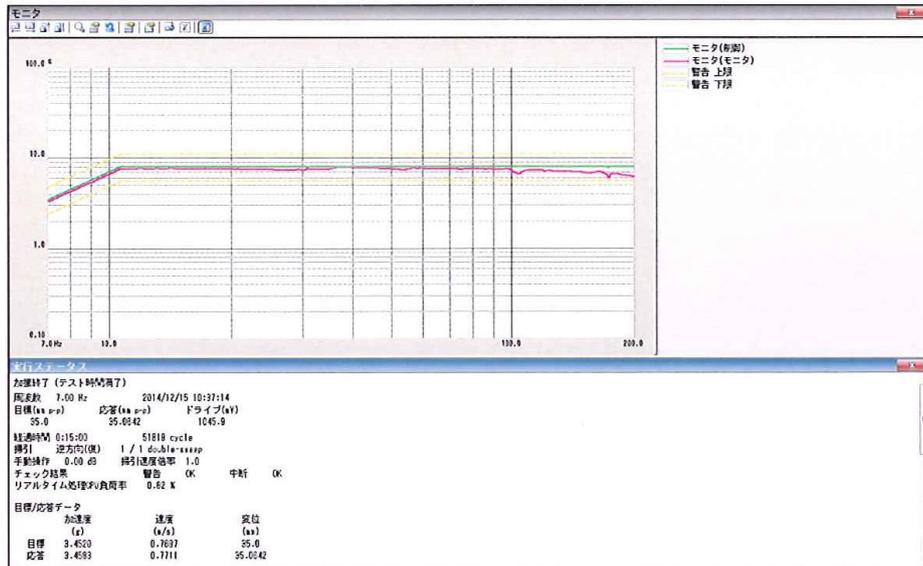


図6 共振探査試験データ Z方向 (復路)

●熱衝撃試験：-50℃から+150℃を1サイクルとして、1,000サイクルの熱衝撃後の溶断特性試験を行い特性変化を調べた。

⇒熱衝撃試験前後でヒューズリンクの抵抗値上昇は若干みられたが、エッチド型及び印刷型のエレメントにおいても熱衝撃試験前後で溶断試験の結果に差が無いことが確認できた。

2-2-4 溶断・遮断試験による性能評価及び試作品適正化

(実施：株式会社宇都宮電機製作所、株式会社ネモト・センサエンジニアリング、双信電機株式会社、国立大学法人埼玉大学)

2-2-1において設計したハイブリッドサブストレートヒューズを、環境負荷前後において遮断試験、溶断試験を実施し、その性能評価を行い、溶断特性が自動車メーカーの提示する仕様を満たすことを確認した。JASO 規格 No. D622-11「ねじ締め型高電圧ヒューズ」で指定されている溶断時間試験実施し、所定の電流をヒューズリンクに通電し、溶断までの時間の測定を行った。

平成25年度に試作したものは500%の電流において溶断時間が規格を満たしていなかったが、2-2-1で述べた通りI部を改良することですべての試験電流において規定の時間内に溶断していた。この結果から、このヒューズエレメントではP部とI部の抵抗値比と電流密度比を調整することで電流により動作する遮断部を分ける設計が可能と言える。

2-2-1で製作したハイブリッド化したヒューズリンクにおいて埼玉大学において450Vまでの遮断試験を実施し、450Vで遮断に成功した。一例として、定格電圧450V、定格電流200A相当品のヒューズリンクにおける試験結果を図7に示す。同図より、投入後から約0.4ms後にヒューズエレメントが溶断することで電圧が急峻に上昇し、その後最大電圧値(動作過電圧)約1100V、最大電流値(限流値)14000Aとなり、電流が急激に減少し電流遮断が完了している。全ての遮断後のヒューズの絶縁体には外見上の変化、損傷が無いことから良好な遮断が行われたことを確認した。また、遮断試験後にヒューズリンクから取り出したヒューズエレメントを確認したところ、P部とI部にフルグライトが付着していることより設計の狙い通りP部とI部の両方が遮断に寄与していた。

同性能の従来品において遮断試験を実施し、遮断性能の指標である I^2t 値の特性比較を行ったところ、従来品と比べて I^2t 値は49%まで低下させることに成功し、高電圧直流用ヒューズとしての優位性を確認した。

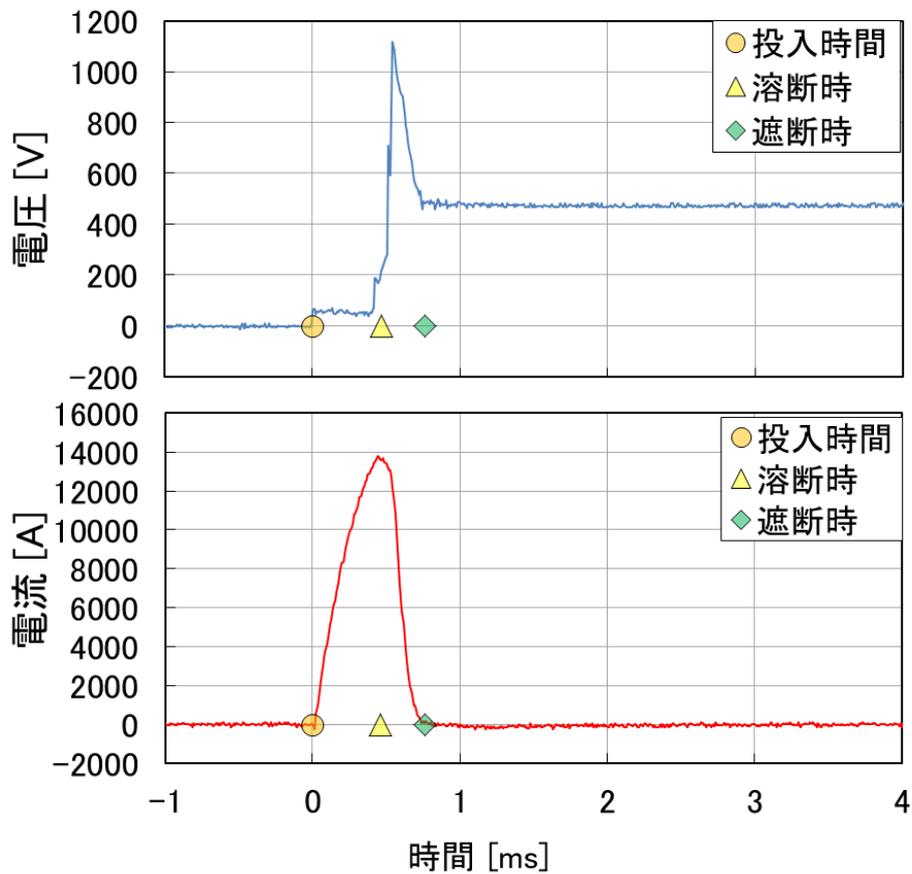


図7 定格電圧450V定格電流200A相当の遮断試験結果

熱衝撃試験及び振動試験が終了し、外観的には問題が見受けられない。環境試験前後で抵抗値上昇はあったものの、溶断試験に差が無いことを確認した。

同様に熱衝撃試験後および振動試験後のヒューズリンクについて遮断試験を実施し、各試験前のヒューズと性能の比較を行った。遮断試験前後において特段の電圧・電流波形に違いは見られず、環境負荷試験前後で遮断試験の結果に差が無いことが確認できた。

自動車メーカーの条件として挙げられた環境負荷試験を通じて破壊試験を実施しヒューズの破損率を求める必要があるが、JASO規格は満足することができた。

2-3 直流遮断試験装置の設計・製作・設置

2-3-1 過酷環境対応となる遮断試験システムの開発（実施：大平電子株式会社、国立大学法人埼玉大学）

減圧環境下における遮断試験用の真空容器の性能を確認し、4000m高度の気圧での遮断実験を実施した。気圧は高度4000～5000m程度の0.05MPaにおいて遮断実験が可能であり、遮断試験をした結果は2-3-2で後述するような電圧波形と電流波形が得られており、減圧環境下においても遮断試験が可能であることを確認した。

2-3-2 直流遮断試験装置の改造（実施：大平電子株式会社、国立大学法人埼玉大学）

直流遮断試験装置のコンデンサ容量の増強のための仕様を設計・作製した。コンデンサ

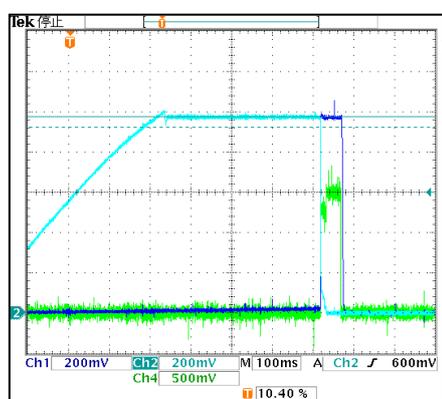


図8 コンデンサバンクの写真

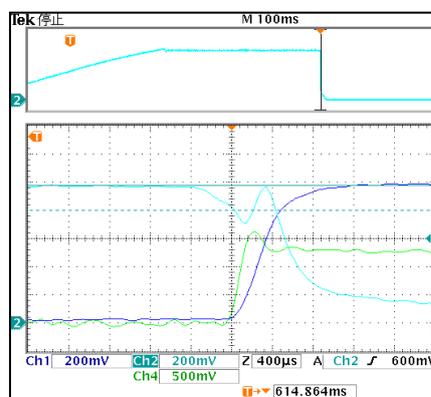
容量を $6900\mu\text{F}$ から $9200\mu\text{F}$ に増強し、遮断試験用として性能を確認した。図8に導入したコンデンサバンクの写真を示す。これにより、平成25年度よりも電気エネルギーを1.33倍多く充電できるようになり、遮断容量の大きなヒューズも遮断実験可能となった。

外部直流電源装置と GPIB 光通信を行うインターフェースを改造した。これにより、パソコンにより遮断条件の設定ができるようになり、加えて、複数台の電流源の並列接続が可

能となった。改良後にヒューズリンクを用いて減圧下で遮断試験を実施した。図9に遮断試験時の電圧波形と電流波形を示す。同図の水色の波形が電流波形で、青色の波形が電圧波形で、緑色の波形がサイリスタのゲート信号である。同図より、400Aの電流（水色の波形、定格電流の800%の電流値）が約800ms通電された後にヒューズが溶断し電流が遮断されている。その直後に200Vの電圧（青色の波形）が印加されている。拡大波形では、電流波形が400Aの所から約30%低下したところで電圧（青色の波形）が立ち上がり、それと同時に電流も一時的に増加しているが、その後電流ゼロに至っていることがわかる。これらの試験から、サブミリ秒オーダーで電圧印加が行われていることを確認できた。



減圧下遮断試験結果
 水色(CH1):電流波形400A,
 青(CH2):電圧波形100V,
 黄緑(CH4):サイリスタ信号



左図の拡大波形(減圧下遮断試験結果)
 水色(CH1):電流波形400A,
 青(CH2):電圧波形100V,
 黄緑(CH4):サイリスタ信号

図9 遮断試験波形

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果

エッチド方式および印刷方式によりハイブリッドタイプのサブストレートヒューズエレメントを設計・試作して、各種の特性評価からエレメント構造とヒューズ特性の関係を得た。交流用ヒューズとして開発されたセラミックを基板としたサブストレートヒューズの特徴を生かしつつ、自動車業界から要望されているヒューズのスペック（JASO 規格 No. D622-11 「ねじ締め型高電圧ヒューズ」）の満足するヒューズとして、ハイブリッドサブストレートヒューズリンクを開発した。450V 定格電圧で、40A, 70A, 90A, 100A, 140A, 200A の定格電流を有するハイブリッドサブストレートヒューズを設計し、試作した。

ハイブリッドタイプのエレメント設計の要点としては、短絡電流のような大電流を遮断する大電流遮断部（P 部と呼ぶ）と、定格電流を超える過電流に対して所定の溶断時間で溶断・遮断される小電流遮断部（I 部と呼ぶ）から構成される点である。このP部とI部の設計指針を確立した。定格電圧 450V, 定格電流 40A のハイブリッドサブストレートヒューズについて動作検証を行った。溶断時間試験は 40A のものは JASO 規格の溶断時間を満たすことに成功した。

遮断試験については、ハイブリッド化したヒューズリンクにおいて埼玉大学において 450V までの遮断試験を実施し、450V で遮断に成功した。同性能の従来品において遮断試験を実施し、遮断性能の指標である I^2t 値の特性比較を行ったところ、従来品と比べて I^2t 値は 49%まで低下させることに成功し、高電圧直流用ヒューズとしての優位性を確認した。

環境負荷試験として、熱衝撃試験は $-50^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ の熱衝撃を 1500 サイクル繰返したものの、振動試験については 15 分/1 サイクルとして、7~200~7 (Hz) の掃引振動を行う X・Y・Z 軸の各方向へ 3 時間、8G の振動強度を加える試験、共振探索試験と 3 方向の振動試験を実施した。これらの試験後のヒューズリンクに対して溶断時間試験および遮断試験を調べたところ、未試験品と比べて今回の試験サイクル数の範囲においてはヒューズリンクに劣悪な劣化は見られないことを確認した。

直流遮断試験装置については、本事業の開発目標となる直流用ヒューズに関して遮断試験を行えるように制御系の改良を行い、ヒューズ溶断時のタイミングと、電圧印加用コンデンサの高電圧印加のタイミングをサブミリ秒の精度まで上げ、試験用ヒューズで遮断試験を行いその性能を確認した。減圧環境下での遮断試験が実施できるように真空容器付きヒューズ遮断試験ボックスを構築し、加えて、直流遮断試験装置のコンデンサ容量の増強を行い、これにより遮断容量の大きなヒューズの遮断試験の実施が可能となった。

3-2 今後の課題

(1) 直流用ハイブリッドサブストレートヒューズのエレメント設計

450V 定格電圧で、200A および 400A 定格電流のヒューズエレメントの設計は行えているが、200A 定格電流においては試作したヒューズの抵抗値が高かったため、溶断時間が満たせておらず更なる抵抗値の低下が望まれる。これについては、遮断試験との関わりはあるが、ヒューズエレメント構造の改良で対応は可能と考えられる。

(2) 直流用ハイブリッドサブストレートヒューズの信頼性評価

今回の環境負荷試験として、メーカーが提示した JASO 規格以上の試験条件で熱衝撃試験および振動試験を実施し、試験前のヒューズと比べて、外観の変化、溶断時間の変化、遮断試験の特性については特段の違いは見られなかった。

また、JASO 規格 (D622) においては、環境負荷試験として気候負荷、化学負荷、トランジェント電流断続耐久性等があり、これらについても試験をする必要がある。

(3) 直流用ハイブリッドサブストレートヒューズの製造工程

コスト面や公差に重点を置くと、セラミックよりも樹脂 (FRP) での構造にした方が良いと思われる。また今回、遮断試験において結果良好のものがあつたものの、内圧が高くなって端子が外れるものが認められた。現在の端子構造では、内圧が高くなった時に同じ問題を発生させる可能性が高く、課題として今後も検討する。

以上