

平成 27 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「電力品質の高安定化を実現する省スペース型・  
高機能扁平メタセラ抵抗体の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成 28 年 3 月

委託者 近畿経済産業局

委託先 一般財団法人大阪科学技術センター

## 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
1-2	研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	4
	(1) 研究組織及び管理体制	
	(2) 管理員及び研究員	
	(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	
	(4) その他(協力者)	
1-3	成果概要	8
1-4	当該研究開発の連絡窓口	10

### 第2章 本論

2-1	金属粒子扁平化及びセラミックスの均一付着技術の開発(サブテーマ【1-1】)	11
2-2	複合材料中の扁平金属粒子を均一分散させる焼結技術の開発(サブテーマ【1-2】)	13
2-3	2種以上の材質への高温時付着力向上技術の開発(サブテーマ【2-1】)	17
2-4	モデル抵抗器の設計及び製作(サブテーマ【3-1】)	20
2-5	性能評価(サブテーマ【3-2】)	20

### 第3章 全体総括

3-1	研究開発成果	25
3-2	今後の課題・事業化展開	26

# 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

### 研究目的

本研究開発では、電力業界を始めとする川下製造業者のニーズである抵抗体の省資源・小型・高機能・低コスト化を達成するために、新技術の成果であるメタセラ抵抗体に対するこれまでの基礎研究の成果を強み既存技術とし、本材料を実用化するために必要な複合材料粉末の製造技術、複合材料の焼結技術、複合材料へのめっき技術を確立することを目的とする。

### 研究概要

電力業界ではスマートグリッドの普及に対して、電力品質の安定化が喫緊の課題であり、低インダクタンス機能を有する低コスト・小型抵抗体の開発に対する強いニーズがある。従来の金属抵抗体は長さによる抵抗調整で大型化し、インダクタンスが大きくなる。同時進行する金属粒子扁平化とその表面へのセラミックス粉末均一付着技術、焼結技術及びナノめっき技術の確立により、体積抵抗率の制御を実現したニーズを満たす世界初の抵抗体を開発する。

### 川下製造事業者等の抱える課題及びニーズ

図-1 に各種材料の体積抵抗率を示す。従来技術である鋳物・ニクロム抵抗体の電気抵抗は体積抵抗率が材料固有の値を持つため、随意に制御できず、金属の形状による抵抗調整のため大型でコスト高であった。

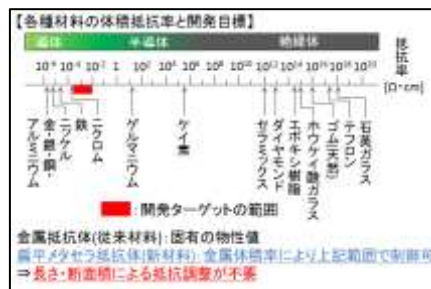


図-1 各種材料の体積抵抗率と開発目標

電力業界では、分散型電源の増加による系統電圧の乱れが問題となっており、電力品質の安定化や電力系統及び機器を保護するための低インダクタンスの抵抗器が求められている。また、再生可能エネルギーの普及に向けては、用地・建物の取得費用低減等のコスト低減が必要であり、抵抗器の小型化と低コスト化が喫緊の課題である。

一方、海外品との差別化を図るためにも、金属抵抗体では解決できない低インダクタンス抵抗体の開発が求められている。

## 研究開発の背景

国内で使用されている高電圧・大電流用抵抗器は、欧州企業と提携した中国企業が台頭し、国内企業は事業からの撤退や廃業に追い込まれており、海外勢に対抗するためには新たな抵抗器の開発が求められている。

また、国内外における抵抗器の価格と市場を図-2に示す。近畿日本鉄道株式会社や九州電力株式会社等へのアンケート結果によると、国産抵抗器の価格は海外製品に比べ、平均して25%程度高い。技術の高度化により価格を30%引き下げ、さらに付加価値を高めることが出来れば、国内はもとより海外市場においても優位に立つことができ、大きな市場が確保できる。

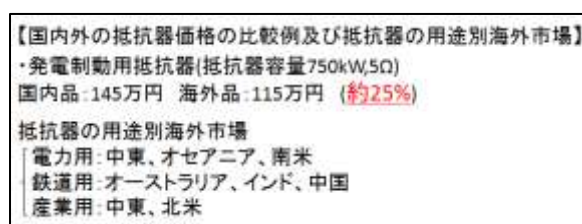


図-2 国内外の抵抗器価格の比較例及び抵抗器の用途別海外市場

しかしながら、現在の抵抗器は、ニクロムを始めとする金属材料を使用しており、材料自体で体積抵抗率の制御ができないために、求められる抵抗値の実現には複雑な形状加工が必要となる。このため、装置は大型となり製造コストも高くなる。また、ニクロム等の金属材料にはレアメタルが多く使われており、この点からもコスト低減が難しくなっており、これらの材料を使用する限り国際競争に勝つことは困難であると考えられる。

一方、粉末冶金技術を用いた複合材料であるメタセラ抵抗体(扁平金属粒子にセラミックス粉を均一に付着させて焼結した抵抗体)は、材料自体で体積抵抗率の制御が可能であることから、サージ電圧・電流に強い低インダクタンスの小型・低コストの抵抗体の開発が期待されている。

しかし、これまでのメタセラ抵抗体の研究開発において、体積抵抗率の制御は可能となっているものの、体積抵抗率のバラツキが大きく、抵抗体として使用に耐える材料の開発には至っていない。また、この焼結体を抵抗体として使用するためには、セラミックス単層の3倍以上の破壊靱性値の実現に加え、その表面への電極形成が必要である。特に、海外での事業展開を考える場合、海外電力規格 IEEEstd32 に定める温度上昇限度 760°C を超える環境(800°C)下での使用に耐えることが求められる他、加熱冷却サイクル下での耐久性や信頼性の確保も重要になる。

上記の課題を解決するために、本研究では以下の目標を設定し、研究開発に取り組むこととした。

## 技術的目標値

### 【1-1】 金属粒子扁平化及びセラミックスの均一付着技術の開発

抵抗体の形状による抵抗調整を不要にし、小型化・高機能化を図るため、体積抵抗率の制御技術を確立し、機械強度との両立を行う。上記技術の実現には、粒子形状の均一化・扁平金属粒子分散による体積抵抗率の安定及び機械強度向上のため、扁平化の目標を平均アスペクト比:4~5 から平均アスペクト比:7~8 に、又、組織中の金属粒子の均一分散のため、扁平金属粒子表面へのセラミックスの均一付着を達成する。

### 【1-2】 複合材料中の扁平金属粒子を均一分散させる焼結技術の開発

【1-1】のみでは制御できない体積抵抗率及び機械強度について、複合材料の組織中に金属粒子を均一分散させるための焼結技術を開発することで、【1-1】と合わせて体積抵抗率の安定及び破壊靱性値の目標を実現する。焼結中の金属粒子の挙動は焼結時の圧力・温度・時間で変化するため、単位断面積当たりの平均粒子個数を粒子モデルによる計算で、750 個/mm<sup>2</sup>(金属粒子体積率 30%)~1350 個/mm<sup>2</sup>(金属粒子体積率 60%)と算出し、粒子の個数を±20%の範囲に抑える。

上記【1-1】及び【1-2】の技術的目標値を達成することで、実用化時の課題である体積抵抗率の設定値に対するバラツキを±50%(自社強み既存技術)から±20%に制御し、又、セラミックス単相の破壊靱性値である約 1.0MPa・m<sup>1/2</sup>から金属粒子体積率 30%時に 3 倍以上向上(3.0MPa・m<sup>1/2</sup>≦)を実現する。

### 【2-1】 2 種以上の材質への高温時付着力向上技術の開発

抵抗体の電極形成には不可欠なめっき処理の高機能化・低コスト化を図るため、基材表面にナノ粒子を直接固定するためのバインダーと基材の相性、ナノ粒子の特性、熱処理等のめっき処理工程を検討し、海外電力規格 IEEEStd32 による 800℃時の良好なめっき特性の保持及び高温処理後の密着性試験(JIS H 8504)の合格を実現する。

### 【3-1】 モデル抵抗器の設計及び製作

当社が今までに川下製造業者(電力・鉄道会社)と共同で要求事項を達成した実績から、抵抗器に流入するエネルギーを基に、縮小モデル抵抗器は電力用中性点接地抵抗器が 1/50 スケール、鉄道用接地抵抗器が 1/10 スケールの試作品を設計・製作する。

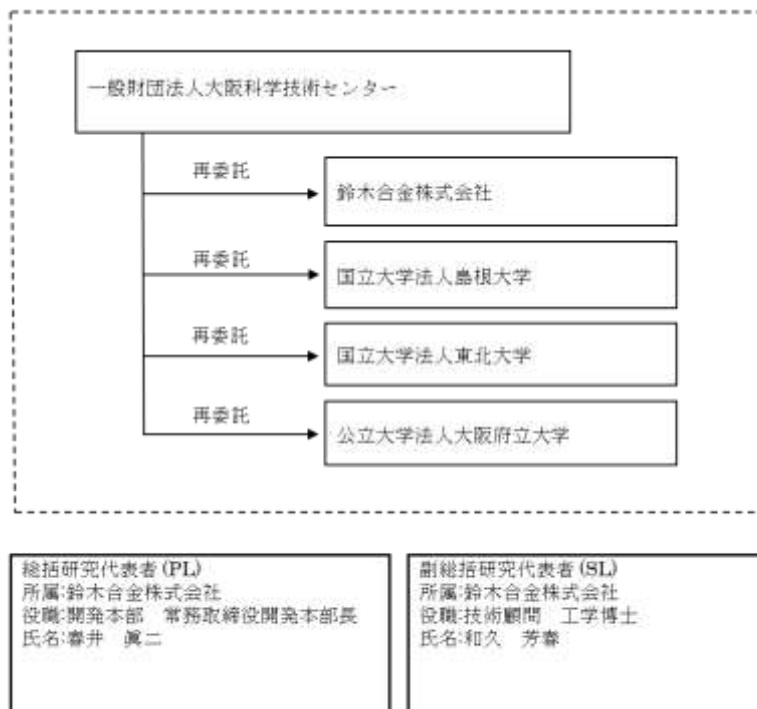
### 【3-2】 モデル抵抗器の性能評価

【3-1】で製作したモデル抵抗器を用いて、短時間大電流試験、振動試験および間欠電流試験、震動試験を行うと共に、九州電力株式会社や近畿日本鉄道株式会社のニーズ(機能性・安全性・経済性・他機器との整合性等)を踏まえた性能評価を実施する。

## 1-2 研究体制

### (1) 研究組織及び管理体制

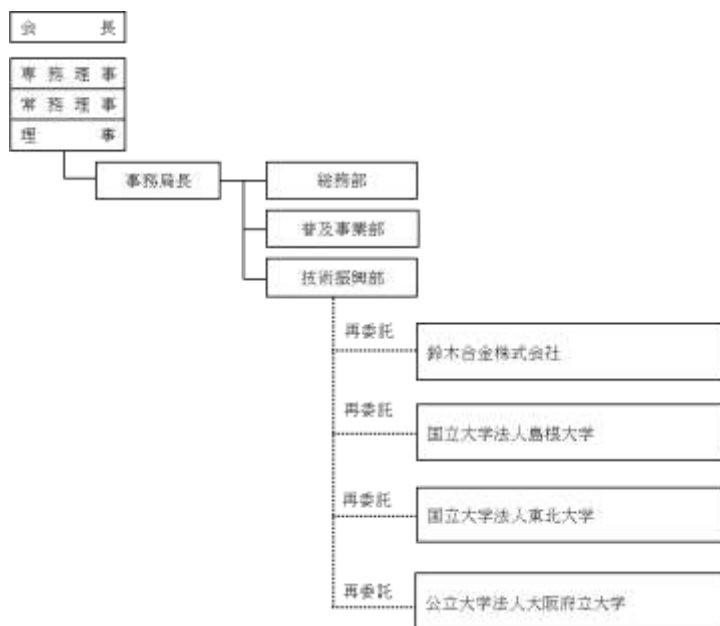
#### 1) 研究組織(全体)



#### 2) 管理体制

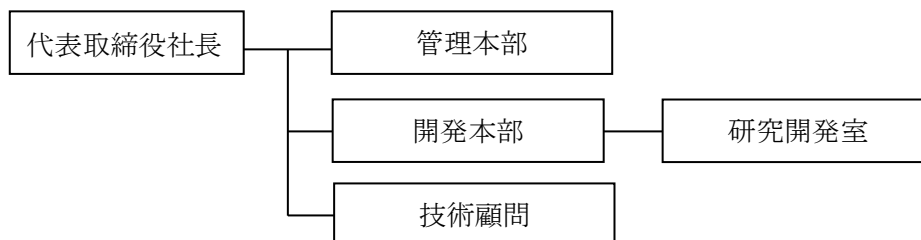
##### ① 事業管理機関

[一般財団法人大阪科学技術センター]

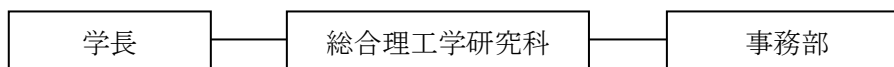


② 再委託先

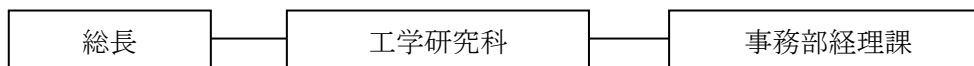
鈴木合金株式会社



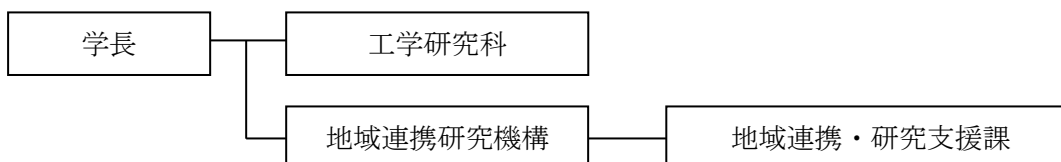
国立大学法人島根大学



国立大学法人東北大学



公立大学法人大阪府立大学



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 一般財団法人大阪科学技術センター

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
小島 一哉	常務理事・技術振興部長	【4-1】
森山 昌己	技術振興部 副部長	【4-1】
川口 満	技術振興部 副部長	【4-1】
中村 裕司	技術振興部 調査役	【4-1】
本間 克己	技術振興部 調査役	【4-1】
中山 幸子	技術振興部	【4-1】

②研究員 なし

【再委託先】

鈴木合金株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
春井 眞二	開発本部 常務取締役開発本部長	【1-1】，【1-2】，【2-1】 【3-1】，【3-2】
和久 芳春	技術顧問 工学博士	【1-1】，【1-2】
磯部 景一	開発本部 研究開発室 審議役	【1-2】，【2-1】，【3-2】
浜野 大輝	開発本部 研究開発室 研究員	【1-1】，【1-2】，【2-1】 【3-1】，【3-2】
勝山 浩道	開発本部 研究開発室 研究員	【1-1】，【1-2】，【3-1】 【3-2】

国立大学法人島根大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
北川 裕之	総合理工学研究科 准教授	【1-1】

国立大学法人東北大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
安斎 浩一	工学研究科 教授	【1-2】
板村 正行	工学研究科 准教授	【1-2】

公立大学法人大阪府立大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
長岡 勉	工学研究科 教授	【2-1】
椎木 弘	工学研究科 准教授	【2-1】
山本 陽二郎	工学研究科 客員研究員	【2-1】



(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

一般財団法人大阪科学技術センター

(経理担当者)	総務部	調査役	木村	和代
(業務管理者)	常務理事	・技術振興部長	小島	一哉

(再委託先)

鈴木合金株式会社

(経理担当者)	管理本部	常務取締役管理本部長	坂口	員平
(業務管理者)	開発本部	常務取締役開発本部長	春井	眞二

国立大学法人島根大学

(経理担当者)	総合理工学研究科	事務部	長廻	佳穂里
(業務管理者)	総合理工学研究科	准教授	北川	裕之

国立大学法人東北大学

(経理担当者)	工学研究科事務部	経理課 外部資金係長	佐藤	光信
(業務管理者)	工学研究科	教授	安斎	浩一

公立大学法人大阪府立大学

(経理担当者)	地域連携研究機構	地域連携・研究支援課	若松	宮子
(業務管理者)	工学研究科	教授	長岡	勉

(4) その他

(アドバイザー)

近畿日本鉄道株式会社

鉄道本部	企画統括部	技術管理部長	湖東	幸弘
------	-------	--------	----	----

九州電力株式会社

電力輸送本部	変電グループ	副長	平野	一也
--------	--------	----	----	----

地方独立行政法人大阪市立工業研究所

加工技術研究部	材料プロセッシング研究室	室長 研究主幹	水内	潔
---------	--------------	---------	----	---

### 1-3 成果概要

#### (1) 金属粒子扁平化及びセラミックスの均一付着技術の開発(サブテーマ【1-1】に対応)

・扁平化と変動要素比率の影響に関するデータ収集を行い、扁平化率(AR)目標の達成及び体積抵抗率のバラツキを達成する。さらに、収集したデータを基に量産化に向けた大型の装置による粉末調整条件の最適化を行い、体積抵抗率のバラツキ目標を達成する。又、体積抵抗率のバラツキの要因となる扁平金属粒子へのセラミックスの均一付着を確認する。

##### 【達成状況】

- ① B200-30~60vol%NiCr 及び耐熱性 800℃を有する規格外瓦-30~60vol%NiCr の組成を持つ複合粉末の作製において、ボールミル回転数や金属粒子径等の粉末調整条件を最適化し、大型の湿式転動型ボールミルにより、全ての NiCr 体積率で平均アスペクト比(AR)目標 7~8 を達成した。
- ② B200-35~60vol%NiCr 及び規格外瓦-30~60vol%NiCr 抵抗体について、体積抵抗率のバラツキ目標±20%以内を達成した。また、抵抗体量産化時の生産性・経済性を考慮した大型転動ボールミル装置で安定した複合粉末の製造を行い、目標とする抵抗体特性を実現した。これにより、川下事業者の要求に対する粉末調整技術が確立できた。
- ③ B200-30,60vol%NiCr の組成を持つ粉体の充填において、粉末振動充填条件の最適化を図ることにより、大型抵抗体の寸法精度向上を実現した。
- ④ B200-30~60vol%NiCr 及び規格外瓦-30~60vol%NiCr なる組成について、ボールミル処理中に金属粒子の扁平化と同時に進行するセラミックスの付着を、異なるボールミル処理条件で作製した乾燥粉末の SEM 観察によって評価した。その結果、金属粒子の粒径とボールミル処理条件によって、セラミックスの付着具合に変化が見られ、体積抵抗率のバラツキとの因果関係が示唆された。
- ⑤ 粉末調整条件等の抵抗体特性に影響を与えるパラメータとそれに対応した抵抗体特性をまとめたデータベースを構築し、その情報を基に実験の効率化を図った。

#### (2) 複合材料中の扁平金属粒子を均一分散させる焼結技術の開発(サブテーマ【1-2】に対応)

・焼結条件の検討により体積抵抗率の安定化を行い、体積抵抗率のバラツキ目標達成を目指した。さらに体積抵抗率のバラツキと因果関係にあると考えられる金属粒子の均一分散と抵抗体の機械強度に関して系統的な評価を行った。

##### 【達成状況】

- ① B200-30vol%NiCr において粉末充填時に予備加圧成形を行い、体積抵抗率に生じるバラツキを評価した。予備加圧成形の有無により、体積抵抗率のバラツキ抑制に対する効果がわずかに認められたが、目標値であるバラツキ±20%を達成できなかった。又、焼結体の組織観察と密度測定から、体積抵抗率のバラツキに対する関連性は確認されなかった。

- ② 焼結時圧力の最適化により、B200-40vol%NiCr 抵抗体において、一定の焼結時圧力を加えることで体積抵抗率のバラツキ目標±20%以内を達成した。
- ③ 平均 AR 目標を達成した複合粉末を用いた抵抗体の機械強度試験を行い、B200-30～60vol%NiCr と規格外瓦-30～60vol%NiCr の組成を有する抵抗体双方について、セラミックス単層の破壊靱性値の3倍以上を達成した。ニクロム体積率が大きくなるほど曲げ強度と破壊靱性値は高くなり、ニクロム体積率 30%以上では抵抗体としての機械強度を十分に満足する値を示した。
- ④ B200-30～60vol%NiCr の組成の抵抗体全てにおいて、抵抗体内の金属粒子個数のバラツキ目標を達成した。又、B200-35vol%NiCr と規格外瓦-30vol%NiCr の抵抗体について、熱画像解析装置を用いて温度分布を測定し、ホットスポット(マクロ的な温度分布の異常)が存在しないことを確認した。

(3) 2 種以上の材質への高温時付着力向上技術の開発(サブテーマ【2-1】に対応)

・材料表面に金属とセラミックスの異種相が混在する B200-NiCr 複合材料に加え、海外電力規格 IEEEstd32 で要求される 800℃の耐熱性を合わせもつ規格外瓦-NiCr 複合材料に対するナノめっき処理技術の確立を目指した。又、事業化を想定して、大型試料並びに複数の抵抗体に対して同時に処理が可能となるナノめっき処理技術の確立を目指した。

【達成状況】

- ① B200-NiCr 複合材料にナノめっき処理した抵抗体の加熱試験、通電試験、熱衝撃試験を行い、耐熱性に問題がないことを確認した。ナノめっき処理した抵抗体は、500℃の加熱試験後も外観や抵抗値に変化がなく、強い密着性を有するナノめっき処理技術を確立した。
- ② 規格外瓦-NiCr 複合材料にナノめっき処理した抵抗体の加熱試験(800℃)、通電試験、熱衝撃試験を行った。ナノめっき処理した抵抗体は、800℃の加熱試験後も外観や抵抗値に変化がなく、強い密着性を有するナノめっき処理技術を確立した。
- ③ 平成 26 年度に購入したナノめっき装置の導入により、120×12×t3mm 大型抵抗体の端子部を 10 本同時にめっき処理することが可能となった。

(4) モデル抵抗器の設計及び製作(サブテーマ【3-1】に対応)

・電力用中性点接地抵抗器の 1/100 スケール及び鉄道車両用接地抵抗器の 1/10 スケールの 2 種類のモデル抵抗器の設計と製作を行った。

【達成状況】

- ① 実抵抗器の 1/100 の電力用モデル抵抗器の設計・製作を完了した。
- ② 実抵抗器の 1/10 の鉄道用モデル抵抗器の設計・製作を完了した。

(5) 性能評価(サブテーマ【3-2】に対応)

・電力用中性点接地抵抗器では落雷等によって発生する短時間高電圧・大電流に対する耐力、また鉄道車両用抵抗器では連続通電及び鉄道車両運行時特有の振動に対する耐久性を評価した。

【達成状況】

①電力用規格 B-0710 に準拠した定格電流及び定格時間で温度上昇試験を行った。抵抗体の最高温度上昇値は、評価基準である外気温からの温度上昇値の限度 350K 以内に対して 304.5K であり、基準値を満足していることを確認した。

②近畿日本鉄道(株)より提案された試験条件(実使用を想定した条件)に基づいて設定した電流及び時間で温度上昇試験を行った。抵抗体の最高温度上昇値は、評価基準とした外気温からの温度上昇値の限度 450K 以内に対して 61.8K であり、基準値を満足していることを確認した。

③JEAG5003 変電所等における電気設備の耐震設計指針に準拠した条件で耐震試験を行った。耐震試験の前後で抵抗体等に異常は確認されなかった。

④鉄道車両用品に対する振動及び衝撃試験の国際規格である IEC61373 に準拠した条件で振動・衝撃試験を行った。各種試験の前後で抵抗体等に異常は確認されなかった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

一般財団法人大阪科学技術センター

技術振興部 Tel : 06-6443-5322 Fax : 06-6443-5319

森山 昌己 E-mail : moriyama@ostec.or.jp

## 第2章 本論

### 2-1 金属粒子扁平化及びセラミックスの均一付着技術の開発

(サブテーマ【1-1】に対応)

本サブテーマは、下記二点の実現を目標としている。

- (1) 抵抗体の形状による抵抗調整を不要にし、小型・低インダクタンス化を図るため、体積抵抗率の制御技術を確立し、機械強度との両立を行う。
- (2) 粉末調整技術における金属粒子の扁平化・均一分散による体積抵抗率の安定及び機械強度の向上に必要な扁平化率(AR)を現状の平均AR:4~5から目標の平均AR:7~8へと拡大する。

以下、それぞれについて得られた結果を報告する。

#### 2-1-1 B200-30~60vol%NiCr 及び規格外瓦-30~60vol%NiCr 抵抗体の平均 AR 及び体積抵抗率の評価

金属粉末とセラミックス粉末を大型ボールミルで処理し、得られた粉末を基に抵抗体を作製し、平均 AR 及び体積抵抗率の評価を行った。その結果、平均 AR は B200-30~60vol%NiCr 及び規格外瓦-30~60vol%NiCr の全ての組成で目標とする平均 AR7~8 を大きく超えた値を達成した。又、体積抵抗率のバラツキ目標達成は B200-35~60vol%NiCr 及び規格外瓦-30~60vol%NiCr で達成した。各組成におけるメタセラ抵抗体の特性データを表-1 に示す。

表-1 B200-NiCr 及び規格外瓦-NiCr 抵抗体における体積抵抗率と平均 AR

材料組成	平均AR	体積抵抗率( $\times 10^{-4}\Omega \cdot \text{cm}$ )			バラツキ目標達成 ( $\pm 20\%$ 以内)
		平均値	最大値	最小値	
B200-30vol%NiCr	14.51	38.9	46.5	30.5	95.0%
B200-35vol%NiCr	14.94	16.1	18.6	13.7	100%
B200-40vol%NiCr	17.86	12.3	12.4	12.3	100%
B200-50vol%NiCr	17.37	7.3	7.7	6.9	100%
B200-60vol%NiCr	16.63	5.9	6.0	5.8	100%
規格外瓦-30vol%NiCr	10.04	29.8	32.4	28.6	100%
規格外瓦-40vol%NiCr	11.41	12.8	14.6	11.1	100%
規格外瓦-50vol%NiCr	13.34	5.4	5.9	5.0	100%
規格外瓦-60vol%NiCr	11.19	3.6	3.9	3.3	100%

\*バラツキ目標達成は大型ボールミル処理を行った粉末で作製した抵抗体が、体積抵抗率のバラツキ $\pm 20\%$ 内であった割合を示す。

上記粉末調整条件等の抵抗体特性に影響を与えるパラメータとそれに対応した抵抗体特性はデータベースを構築し、その情報を基に実験の効率化が可能となった。

### 2-1-2 粉末振動充填による抵抗体寸法精度の向上

大型抵抗体を焼結する場合、複合粉末の手込めの充填では抵抗体の厚みムラや充填密度に作業者によるバラツキが生じてしまうため、粉末振動充填機を用いて、焼結型に充填後の粉末を振動させることで粉末充填のバラツキを抑えるため、振動周波数と処理時間について系統的な実験を行い、抵抗体の寸法精度の向上と組織の均一性を評価した。その結果、B200-30,60vol%NiCr 抵抗体において、適正な条件で粉末振動充填を行うことにより寸法精度の目標値である板厚差 $\pm 2\%$ 以内を達成した。又、板厚差が目標値以内の抵抗体について断面組織観察を行った結果、金属粒子の偏析は認められず、適正な条件で粉末振動充填を行うことにより、扁平金属粒子の偏析がなく抵抗体の寸法精度を向上させることが出来た。

### 2-1-3 金属粒子へのセラミックス粒子付着状態の観察

金属粒子の均一分散に影響すると考えられる金属粒子へのセラミックス粒子の均一付着は、ボールミル処理中に金属粒子の扁平化と同時進行すると考えられているため、平均 AR 目標を達成し、且つボールミル処理条件の異なる複合粉末を用いて、SEM による観察を行った。B200 及び規格外瓦をマトリックスとした各組成における粉末の SEM 観察像を図-3 に示す。B200-30~60vol%NiCr 及び規格外瓦-30~60vol%NiCr の全ての組成について、扁平金属粒子にセラミックスが付着している様子が確認できた。一方、ガラス及び規格外瓦の両者において、金属体積率の増加に伴い扁平金属粒子に付着しているセラミックス粒子の付着量が減少している傾向が確認された。これは金属体積率の増加に伴いセラミックス粒子の体積率が低くなることで、低濃度金属体積率と比べてセラミックス粒子が付着する確率が低下していることが原因と考えられる。

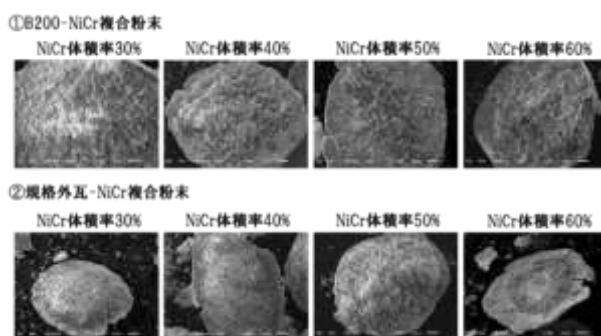


図-3 B200 及び規格外瓦をマトリックスとした各組成における粉末の SEM 観察像

### 2-1-5 メタセラ抵抗体の抵抗温度係数の評価

抵抗材料は抵抗値の高精度化が要求される一方で、電力負荷時に抵抗器は自己発熱を生じるため、抵抗温度係数(Temperature Coefficient of Resistance: TCR) が小さいことが求められる。本研究開発で用いた NiCr 合金は耐熱・耐酸化性が良好であることや加工性に優れるという特徴に加え、残留抵抗成分が大きいことから小さな TCR を有する物質として知られ

る。ニクロム1種(JIS C 2520)は代表的な抵抗材料あるいは電熱材料であり、体積抵抗率は $1.08 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ 、TCRは $0.14 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ である。本節では、メタセラ抵抗体の体積抵抗率を室温～773Kの間で測定し、TCRを算出し、ニクロム1種と比較・検討した結果を記載する。

図-4はメタセラ抵抗体の体積抵抗率の温度依存性を示す。(a)は規格外瓦-NiCrの結果であり、(b)はB200-NiCrの結果である。比較のため、100%NiCr抵抗体の値も同時に示してある。100%NiCr抵抗体と合わせてB200-30～60vol%NiCr及び規格外瓦-30～60vol%NiCrの抵抗温度係数を評価した。体積抵抗率の温度依存性は小さく、メタセラ抵抗体の抵抗温度係数は全ての組成において、ニクロム1種(JIS C 2520)と同様の小さな温度係数であることが確認できた。

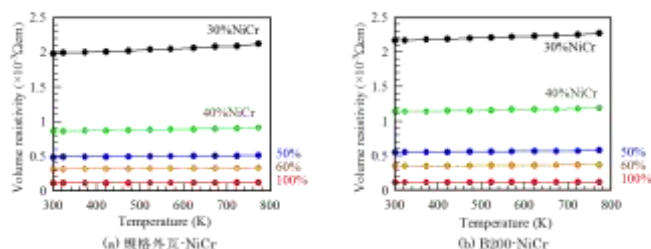


図-4 規格外瓦-NiCr および B200-NiCr メタセラ抵抗体の体積抵抗率の温度依存性

## 2-2 複合材料中の扁平金属粒子を均一分散させる焼結技術の開発

(サブテーマ【1-2】に対応)

本サブテーマは、下記二点の実現を目標としている。

- (1) サブテーマ【1-1】の粉末調整技術のみでは制御できない体積抵抗率及び機械強度について、複合材料の組織中に金属粒子を均一分散させるための焼結技術を開発することで、体積抵抗率の安定及び機械強度の目標を実現する。
- (2) 焼結中の金属粒子の挙動は焼結時の圧力・温度・時間で変化することが予想されるため、単位断面積当たりの平均粒子個数のバラツキを $\pm 20\%$ 以内に抑えるための焼結条件を明らかにする。その際、粒子モデルによって算出した値、750個/mm<sup>2</sup>(金属粒子体積率30%)～1350個/mm<sup>2</sup>(金属粒子体積率60%)を参考とした。

### 2-2-1 予備加圧成形による体積抵抗率のバラツキ抑制

粉末充填時に予備加圧成形(加圧力20MPa,1分間)を行い、メタセラ抵抗体の体積抵抗率のバラツキ抑制を目指した。予備加圧成形の有無により、体積抵抗率のバラツキ抑制に対する効果がわずかに認められたが、目標値であるバラツキ $\pm 20\%$ を達成できなかった(図-5)。又、焼結体の組織観察と密度測定から、体積抵抗率のバラツキに対する関連性は確認されなかった。

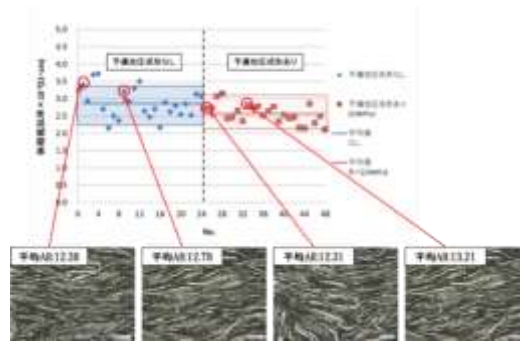


図-5 予備加圧成形における体積抵抗率のバラツキと断面組織

### 2-2-2 焼結時圧力による体積抵抗率のバラツキ抑制

焼結時に印加する圧力を制御することで体積抵抗率のバラツキ抑制を目指した。焼結時圧力は 5,10,20,38MPa の 4 種類とし、B200-40vol%NiCr 抵抗体の体積抵抗率のバラツキにより評価した。その結果、目標である体積抵抗率のバラツキ $\pm 20\%$ 以内は焼結時圧力 20MPa 以上で達成されていることが確認できた。又、抵抗体の密度は全ての焼結時圧力において、理論密度(4.876g/cm<sup>3</sup>)に対し 99%以上であり、一定の圧力が加われば高密度の抵抗体を得られることが確認できた。

これらのデータより、高密度の抵抗体を得られれば、焼結時圧力の増減は体積抵抗率のバラツキ抑制に対する影響が少ないと考えられる。又、体積抵抗率のバラツキは粉末調整条件の影響も大きく、粉末調整条件と合わせて、焼結時プロセスの検討が必要と思われる。

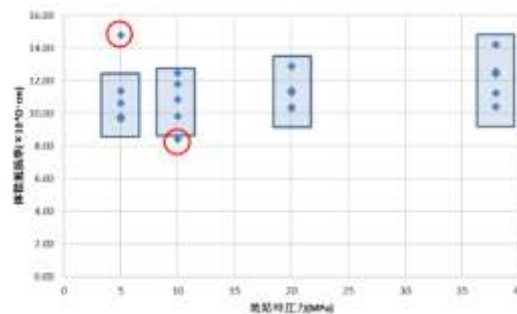


図-6 焼結時圧力ごとの抵抗体の体積抵抗率のバラツキ

### 2-2-3 平均 AR 目標達成抵抗体の機械強度評価

平均 AR 目標を達成した複合粉末を用いた抵抗体について、曲げ強度、破壊靱性値および引張強度の測定を行い、機械強度を評価した。曲げ強度は 3 点曲げ試験(JIS R1601)、破壊靱性値は破壊靱性試験(ISO 6872,SEVNB 法)、引張強度は引張試験(JIS R1608)に準拠した内容で各種試験を実施した。

その結果、B200-NiCr 及び規格外瓦-NiCr 抵抗体は共に NiCr 体積率が高くなるほど曲げ強度、破壊靱性値、引張強度が向上する特性を示した(図-7~9)。又、機械強度の技術目標値(曲げ強度 150MPa 以上、破壊靱性値 3MPa $\cdot$ m<sup>1/2</sup> 以上)は全ての NiCr 体積率において、達



成している。規格外瓦-40vol%NiCr 抵抗体の中央部の曲げ強度が端部の曲げ強度に対して約 45.9%と低い値を示した。他の組成と比べて、試験片の採取位置に大きな違いはなく、試験前から試験片に何らかの欠陥が存在していたためと考えられる。

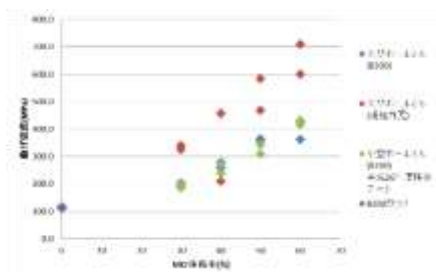


図-7 NiCr 体積率と曲げ強度の関係

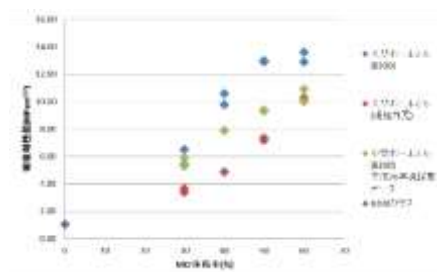


図-8 NiCr 体積率と破壊靱性値の関係

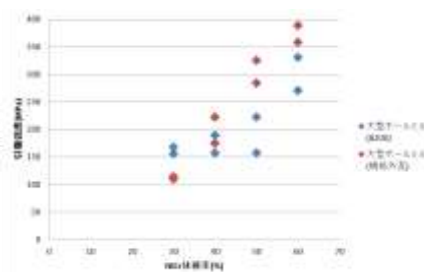


図-9 NiCr 体積率と引張強度の関係

NiCr体積率の機械強度と破面観察との系統的評価を行った。B200及び規格外瓦の抵抗体において、30~60%とNiCr体積率が増えるに従い、破面の凹凸が激しく破壊靱性値の向上と対応した破面になっている。観察倍率5000倍ではNiCrが塑性変形による延性破壊をしている様子が観察された。又、引張試験結果はB200-30vol%NiCr抵抗体と比較して規格外瓦-30vol%NiCr抵抗体の強度が低い、破断面の観察から違いを確認できなかった。B200-30vol%NiCr抵抗体とB200-60vol%NiCr抵抗体を比較すると凹凸が激しく粒子間の距離が短いことが強度向上につながっているといえる。破壊靱性試験片の破断面を図-10に示す。引張試験片の破断面を図-11に示す。

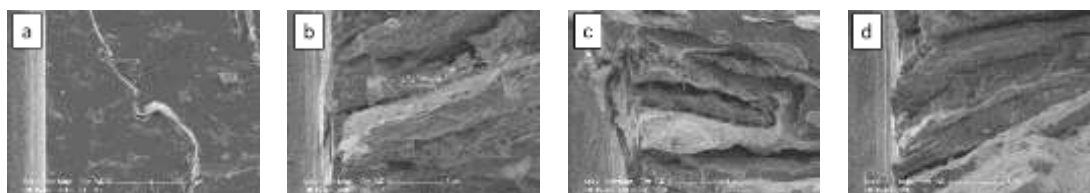


図-10 破壊靱性試験片破断面(a.B200-30vol%NiCr b.B200-40vol%NiCr c.B200-50vol%NiCr d. B200-60vol%NiCr 倍率は全て 5000 倍)

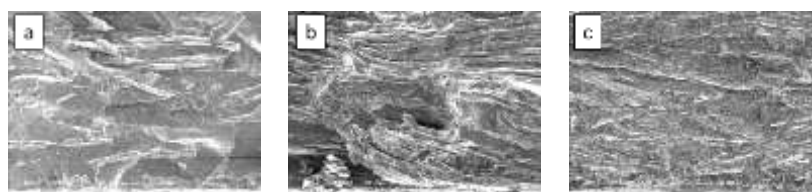


図-11 引張試験片破断面(a.B200-30vol%NiCr b.B200-60vol%NiCr  
c.規格外瓦-30vol%NiCr 倍率は全て 1000 倍)

### 2-2-3 メタセラ抵抗体の金属粒子個数のバラツキ測定

メタセラ抵抗体の断面組織画像から単位断面積(mm<sup>2</sup>)当たりの金属粒子個数を算出し、B200-30~60vol%NiCr 抵抗体における金属粒子個数のバラツキにより、組織の均一性を評価した。B200-30~60vol%NiCr 抵抗体において金属粒子個数のバラツキは±20%の範囲内であり、扁平金属粒子が比較的均一に分布していると考えられる(表-2)。しかし、50vol%NiCr の金属粒子個数は平均値が 5163 個/mm<sup>2</sup>であるのに対して、60vol%NiCr の金属粒子個数の平均値は 4760 個/mm<sup>2</sup>であり、金属体積率が高く金属粒子個数が多い抵抗体の測定値が少なくなっているなど、複雑な現象を示している。この現象はボールミル処理中の扁平金属粒子の分断挙動と密接に関係しているものと推察される。

粒子モデルから算出した金属粒子個数の値 650~1300 個/mm<sup>2</sup>に対して、測定値は 2660~5460 個/mm<sup>2</sup>であり、実測値は計算値より大幅に大きくなっている。実際はボールミル処理中に、金属粒子の粉碎も平行して進行しているため、微細な粒子が生じ金属粒子個数が増加する。又、粒子モデルで計算した NiCr 粒子径は 23~50 μm の場合であるが、用いた NiCr 粒子径は 20~32 μm で小さくなっており、単位断面積当たりの金属粒子個数が増加している。このことが計算値と実測値が大幅に異なった一因と考えられる。

表-2 メタセラ抵抗体の金属粒子個数のバラツキ

NiCr 体積率 (%)	測定箇所	①	②	③	④	平均値
		30	粒子個数 (個/mm <sup>2</sup> )	2660	3010	
	バラツキ (%)	-11.63%	0.00%	2.33%	9.30%	
40	粒子個数 (個/mm <sup>2</sup> )	4410	3570	4270	4410	4165
	バラツキ (%)	5.88%	-14.29%	2.52%	5.88%	
50	粒子個数 (個/mm <sup>2</sup> )	5390	5460	4620	5180	5162.5
	バラツキ (%)	4.41%	5.76%	-10.51%	0.34%	
60	粒子個数 (個/mm <sup>2</sup> )	4130	5460	4690	4760	4760
	バラツキ (%)	-13.24%	14.71%	-1.47%	0.00%	

### 2-2-4 熱画像解析装置による温度分布測定

体積抵抗率のバラツキが±20%以内を達成した B200-35vol%NiCr と規格外瓦-30vol%NiCr 抵抗体に関して、抵抗体(70×20×t5mm)に通電し、熱画像解析装置により温度分布

を解析することで組織の均一性を評価した。

その結果、図-12,13 が示すように B200 及び規格外瓦の両者共に、抵抗体①～③の中心部が最も高温であり、放射状に温度が低くなることが確認できた。両側の端子部は電極に接触しているため、熱が電極へ移動していることが原因と考えられる。又、B200-35vol%NiCr は抵抗体間の温度差が最大で 24℃程度、規格外瓦-30vol%NiCr は抵抗体間の温度差が最大で 28℃程度であり、ホットスポットは存在していないことが確認できた。

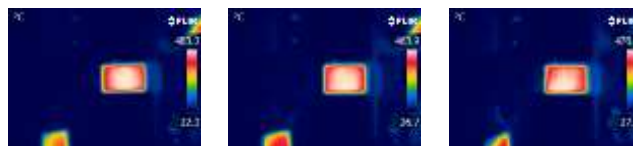


図-12 B200-35vol%NiCr の温度分布(左：抵抗体①、中央：抵抗体②、右：抵抗体③)

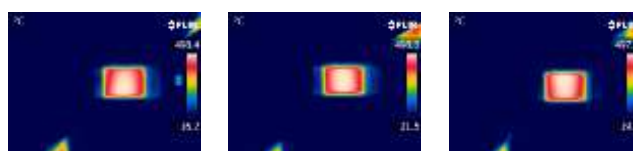


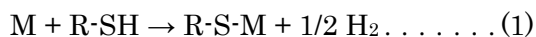
図-13 規格外瓦-30vol%NiCr の温度分布(左：抵抗体①、中央：抵抗体②、右：抵抗体③)

## 2-3 2種以上の材質への高温時付着力向上技術の開発(サブテーマ【2-1】に対応)

メタセラ抵抗体は材料表面に金属とセラミックスの異種相が混在し、均一なめっき層と密着性の確保が困難である。そこで、基材とナノ粒子の双方に結合するバインダーを利用した異種相への均一なナノめっき処理技術を開発する。更に、事業化へ繋げるためには海外向け製品も視野に置く必要があり、800℃(海外電力規格 IEEEstd32 に定める温度上昇限度 760℃)に耐えるナノめっき技術を開発する。

### 2-3-1 B200-NiCr 複合材料に対するナノめっき処理技術の確立

メタセラ抵抗体は材料表面に金属とセラミックスの異種相が混在している。本めっき法は、金属ナノ粒子を基板に固定する工程である 1 次めっきと導電化処理を行う工程である 2 次めっきからなり、めっき膜は 1 次めっきと 2 次めっき条件により制御される。基板への金属ナノ粒子(銀もしくはパラジウムナノ粒子)の固定はチオール化合物を用いて行うがチオール分子( $R-SH$ )は式(1)のように貴金属に化学結合することが知られており、本法に用いたチオール化合物は複合材料の表面との間に相互作用すると考えられ、バインダーを介して金属ナノ粒子が基板表面に吸着する。2 次めっきでは、金属塩、錯化剤および還元剤を加え、金属ナノ粒子を核として銀もしくはニッケルを析出させ、粒子間の空隙を埋めることにより導電性を付与する(図-14)。



M：貴金属(Au, Ag, Pt, Pd 等)

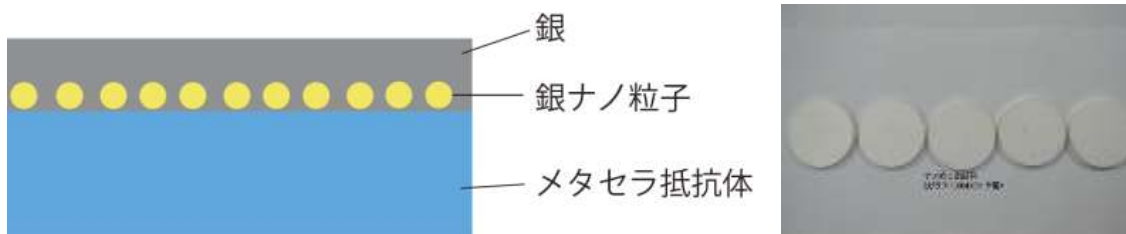


図-14 めっき膜の断面イメージ図  
(1次めっき：銀ナノ粒子、2次めっき：銀)

耐熱性の評価は加熱試験(500℃)及び熱衝撃試験(水温+120℃)により行った。評価はめっきの状態を目視で確認し、ナノめっきに異常は見られなかった。

密着性の評価はテープ剥離試験(JIS H 8504)とスタッドプル剥離強度測定により行った。スタッドプル剥離強度測定の結果、密着力の数値化に成功した。又、テープ剥離試験では良好な結果を得られたものもあるが、一部の試料はめっきムラが生じており、めっきの剥離が見られた。そのため、めっきの歩留まりに課題があり、めっきのムラや密着不良が起こる場合があるため、めっき工程やめっき液の改良を行い、歩留まりの向上が必要である。

### 2-3-2 瓦-NiCr 複合材料に対するナノめっき処理技術の確立

海外向けとなる耐熱性 800℃を有する瓦-NiCr 複合材料のメタセラ抵抗体に対して最適なナノめっき処理条件の確立を試みた。瓦-NiCr 複合材料は B200-NiCr 複合材料に対するナノめっき処理技術と同じ条件では 800℃の加熱試験後、複合材料への銀の拡散がおり、電気抵抗の増加がみられた。そこで、銀より素材への拡散の起こりにくいニッケルめっきを複合材料に施し、加熱試験を行った。試験後は外観にあまり変化はみられないが、電気抵抗が大幅に増加した。めっき表面の状態を調べるため、SEM 観察と元素マッピング（ニッケル及び酸素）を行った結果、加熱後もニッケルのめっき膜は残っている様子が観察されたが、元素マッピングにより酸素が検出された。電気抵抗の増加は高温による表面の酸化が原因と考えられる。そこで、高温酸化が起こりにくいニッケル-タングステン合金めっきを施した複合材料の加熱試験を行ったが、ニッケルめっきと同様に表面の酸化とみられる電気抵抗の増加がみられた。ニッケルめっきは素材への拡散は見られないが、表面の酸化が起こるため、表面酸化の防止を検討した。加熱時に生じる酸化を防止するため、1次めっき(パラジウム)と 2次めっき(ニッケル)を行った後、3次めっきに電解銀めっきを行うことで耐熱性、導電性に優れたナノめっき処理条件を確立した(図-15)。

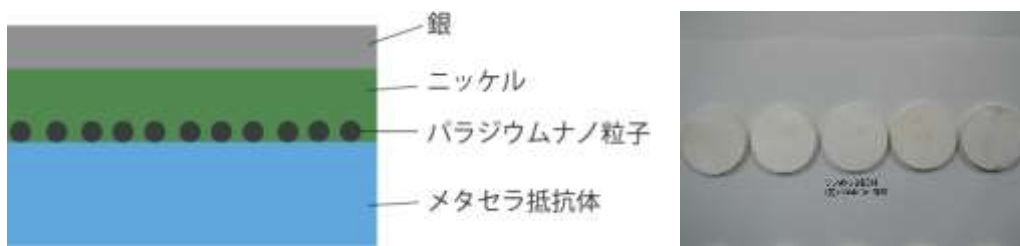


図-15 めっき膜の断面イメージ図

(1次めっき：パラジウムナノ粒子、2次めっき：ニッケル、3次めっき：銀)

ニッケル/銀めっきした複合材料の耐熱性評価は加熱試験(800℃)及び熱衝撃試験(水温+120℃)により行った。各種試験後、めっきの状態を目視で確認し、ナノめっきに異常は見られなかった。密着性の評価はテープ剥離試験(JIS H 8504)とスタッドプル剥離強度測定により行った。スタッドプル剥離強度測定の結果、密着力の数値化に成功した。又、テープ剥離試験では良好な結果を得られたものもあるが、一部の試料はめっきムラが生じており、めっきの剥離が見られた。そのため、めっきの歩留まりに課題があり、めっきのムラや密着不良が起こる場合があるため、めっき工程やめっき液の改良を行い、歩留まりの向上が必要である。又、今回確立したナノめっき処理技術は3次めっきを電解めっきとしており、一連の工程でナノめっき処理を実施することが困難であるため、今後は無電解めっきによる処理条件を確立する必要がある。

### 2-3-3 大型抗体に対するナノめっき処理条件の確立

事業化の際、大型及び複数の抗体に同時にナノめっき処理を実施する必要があるため、ナノめっき装置を用いて大型抗体により、10本同時のナノめっき処理条件を確立した。ナノめっき装置(図16)は1次めっき、2次めっき及び各工程後の水洗を自動で行うことが出来る。小型のナノめっき装置で確立した条件を基に図-18の装置によりナノめっき装置でモデル抵抗器用抗体(120×100×t3mm, B200-35vol%NiCr, 113枚)にナノめっき処理を行った。ナノめっき装置を用いることで1度に10枚のナノめっき処理を行い、図-16に示すようにこれまでと同様のめっき処理が可能であることが確認できた。但し、ナノめっき装置によるナノめっき処理では、多数のめっきムラが出ており、歩留まりの改善が必要である。



図-16 ナノめっき装置とメタセラ抗体(ナノめっき処理済)

## 2-4 モデル抵抗器の設計及び製作(サブテーマ【3-1】に対応)

電力及び鉄道業界向けの抵抗器は大型であり、社会インフラ用設備に組み込まれることから、特性確認のみによる製品化はできない。そのため、自社の信頼性確保並びに川下事業者に性能を評価して頂く際にモデル抵抗器による評価が必要となる。

九州電力株式会社及び近畿日本鉄道株式会社のアドバイスや要求事項を頂きながら、電力用中性点接地抵抗器の 1/100 スケール及び鉄道車両用接地抵抗器の 1/10 スケールの 2 種類のモデル抵抗器を製作した。

### 2-4-1 モデル抵抗器用抵抗体の設計

メタセラ抵抗体の諸特性を元に抵抗体の組成及び形状とモデル抵抗器の仕様は決定し、製作を完了した。



図-17 電力用モデル抵抗器

#### ①製作目標

落雷等によって発生する短時間高電圧・大電流に対する耐力を有する中性点接地抵抗器(図-17)

#### ②仕様

製品仕様 : 66/√3kV 100A 10sec 381Ω

モデル抵抗器仕様 : 660/√3V 100A 10sec 3.81Ω  
(1/100 スケール相当)



図-18 鉄道用モデル抵抗器

#### ①製作目標

連続通電及び鉄道車両運行時特有の振動に対する耐力を有するコンプレッサー抵抗器(図-18)

#### ②仕様

製品仕様 : DC1500V 10.4A 7Ω

モデル抵抗器仕様 : DC1500V 10.4A 0.7Ω  
(1/10 スケール相当)

## 2-5 性能評価(サブテーマ【3-2】に対応)

電力用中性点接地抵抗器では落雷等によって発生する短時間高電圧・大電流に対する耐力、また鉄道車両用抵抗器では連続通電及び鉄道車両運行時特有の振動に対する耐久性を評価する必要がある。製作したモデル抵抗器を用いて、上記の短時間・大電流試験、連続通電試験及び震動・振動試験を行うと共に、九州電力株式会社や近畿日本鉄道株式会社のニーズ(機能性・安全性・経済性・他機器との整合性等)を踏まえた性能評価を実施する。



## 2-5-1 電力用モデル抵抗器の性能評価

製作した電力用モデル抵抗器は電力用規格及び社内規格を基に温度上昇試験と震動試験を行った。又、抵抗体の抵抗値変化とインダクタンスの評価を実施した。

今回のモデル抵抗器ではサブテーマ【1-1】で確立した体積抵抗率のバラツキが±20%の範囲内に収まった B200-35vol%NiCr 抵抗体を用いたが、体積抵抗率のバラツキ±20%以上となっており、電力用モデル抵抗器の抵抗値に関しては評価を行わないこととした。

### (1) 温度上昇試験

#### ① 試験条件

電力用規格(B-0710)及び社内規格を基に、試験条件を設定した。短時間通電を行い、温度上昇値が 350K 以下(従来品の鋳鉄抵抗体の許容温度を基に設定)であることを確認した。試験完了後は抵抗体及び端子部のめっきに異常がないか確認を行った。又、メタセラ抵抗体は試験前後で抵抗値変化がないか確認を行った。

#### ② 試験結果

抵抗体の温度上昇値は測定点③で最大 304.5K であり、電力用規格に定められた鋳鉄抵抗体の外気温からの温度上昇値の限度 350K 以内であることを確認した。

### (2) 震動試験

#### ① 試験条件

変電所等における電気設備の耐震設計指針である JEAG5003 に準拠して、試験条件を設定した。前後方向の共振試験及び耐震試験を行い、その後左右方向も同様の震動試験を実施した(図-19)。各種震動試験後にメタセラ抵抗体及び端子部のめっきは異常がないことを目視確認により評価した。



図-19 電力用モデル抵抗器震動試験状態(左：前後方向 右：左右方向)

#### ② 試験結果

前後方向及び左右方向の 1~20Hz の範囲では共振周波数は存在しなかったため、規格通りに耐震試験は 10Hz で実施した。全試験が完了後、モデル抵抗器の外観を目視により確認したが異常等は見られなかった。変電所等における電気設備の耐震設計指針である JEAG 5003 を満足した。

### (3) 抵抗体の外観及び抵抗値変化の評価とインダクタンスの測定

全試験が完了後、モデル抵抗器を分解し、抵抗体の目視確認を実施した。抵抗体及び端子部のめっきに異常がないことを確認した。

モデル抵抗器の組み立て前と全試験完了後に抵抗体の抵抗値測定を行い、抵抗値の変化量を確認した。組み立て前と全試験完了後の抵抗値変化量は 0.14%であった。抵抗値の変化量は中性点接地抵抗器の規格である抵抗素子許容差の値である±10%を満足した。表-3 に抵抗値変化量を示す。

メタセラ抵抗体のインダクタンスを測定し、従来品と比較した。メタセラ抵抗体のインダクタンスは従来品の 10  $\mu$  H/枚と比較して、0.05  $\mu$  H/枚となりサポイン提案時の目標である 0.5  $\mu$  H/枚を達成した。

表-3 電力用モデル抵抗器抵抗体の抵抗値変化量

	抵抗値 at 20°C ( $\Omega$ )	変化量 (%)		従来品 (鑄鉄抵抗体)	目標値 (サポイン提案)	測定値
組み立て前	2.4479	-	インダクタンス ( $\mu$ H/枚)	10	0.5	0.05
全試験完了後	2.4513	0.14				

### (4) まとめ

温度上昇試験及び振動試験を実施し、電力用モデル抵抗器は電力用規格を満足することが確認できた。又、試験後に抵抗体に対して異常は見られていない。

電力用モデル抵抗器に用いた抵抗体(B200-35%NiCr)の体積抵抗率は想定していた値の半分であった。平成 26 年度の研究により 120×100×t5mm の抵抗体作製条件に関しては目途がついていたが、今回のモデル抵抗器に用いた抵抗体の厚さは 5mm から 3mm に変更しており、焼結条件が確立していない。厚さを変更した場合、目標の抵抗値を持つ抵抗体の作製のため、新たに焼結条件の検討が必要である。

今回使用した抵抗体サイズで電力用モデル抵抗器を 1/1 スケールに換算した場合、現状の中性点接地抵抗器と比較して容積比率が約 50%、重量比率が約 30%となり、サポイン提案時の目標である容積 50%縮小を満足できる見込みである。

## 2-5-2 鉄道用モデル抵抗器の性能評価

鉄道車両用抵抗器規格(JIS E 6401 及び IEC61373)に則った温度上昇試験及び振動試験を行った。各種試験後にモデル抵抗器の評価を実施した。

### (1) 温度上昇試験

#### ①試験条件

鉄道車両用抵抗器規格(JIS E 6401)と近畿日本鉄道株式会社からの要求事項を基に、試験



条件を設定した。温度上昇値が 450K 以下(B200-35vol%NiCr の耐熱性に基づいた限界温度上昇幅)であることを確認した。この通電パターンは普通列車に搭載されている抵抗器が 1日に受ける負荷を想定した条件とした。試験完了後は抵抗体及び端子部のめっきに異常がないか確認を行った。又、メタセラ抵抗体は試験前後で抵抗値変化がないか確認を行った。

## ②試験結果

鉄道用モデル抵抗器の目標抵抗値 0.7Ω に対してモデル抵抗器の抵抗値は 0.6379Ω とバラツキ±20%の範囲内であり目標を達成した。表-15 に鉄道用モデル抵抗器の目標抵抗値の確認を示す。

抵抗体の温度上昇値は測定点②の 3 サイクル目で最大 61.8K であり、B200-35vol%NiCr の外気温からの温度上昇値の限度である 450K 以内であることを確認した。鉄道用モデル抵抗器の各サイクルの最大温度上昇値を表-4 に示す。

表-4 温度上昇試験時の各サイクルの最大温度上昇値

サイクル数 (回)	温度上昇値 (K)			
	測定点①	測定点②	測定点③	測定点④
1	49.9	59.1	45.8	41.1
2	40.4	46.9	37	33.4
3	55.3	61.8	49.3	45.6
4	44.7	54.3	41.3	37.5
5	42.3	51.7	36.6	37.5
6	42.3	54.4	39.9	35.7
7	42.9	51.7	37.5	35.1
8	42.2	52.2	39.9	35.7
9	44.3	54.8	41.2	37.1
10	42.9	52.8	39.6	35.1

\* 試験前外気温度：18.8℃

## (2) 振動及び衝撃試験

### ①試験条件

鉄道車両用品に対する振動及び衝撃試験の規格である IEC61373 に準拠して、試験条件を設定した。試験は各方向で共振探査試験、ランダム耐久試験、衝撃試験を実施した(図-20)。



図-20 鉄道用モデル抵抗器振動試験(左：前後方向 中央：左右方向 右：上下方向)

## ②試験結果

前後方向、左右方向、上下方向に 1～30Hz の範囲で共振周波数は存在しなかった。各方向でランダム耐久試験と衝撃試験を実施した結果、抵抗体の外観に割れは見られなかった。全試験完了後、目視により抵抗体の割れの有無及び端子部のめっきを評価し、異常がないことを確認した。

### (3) 抵抗体の外観及び抵抗値変化の評価

全試験が完了後、モデル抵抗器を分解し、抵抗体の目視確認を実施した。抵抗体及び端子部のめっきに異常がないことを確認した。

モデル抵抗器の組み立て前と全試験完了後に抵抗体の抵抗値測定を行い、抵抗値の変化量を確認した。組み立て前と全試験完了後の抵抗値変化量は-1.01%であった(表-5)。抵抗値の変化量は JIS E 6401 で定められた値である±3%以内を満足した。

表-5 鉄道用モデル抵抗器用抵抗体の抵抗値変化量

	抵抗値 at 20°C (Ω)	変化量 (%)
組み立て前	0.6379	-
全試験完了後	0.6315	-1.01

### (4)まとめ

鉄道用モデル抵抗器は目標とする抵抗値に対して±20%の範囲内であり、目標を達成した。

温度上昇試験に関して、抵抗体の最大温度上昇値は 100K 以下であり、想定よりも小さくなった。設計に用いた抵抗体の加熱・冷却特性データはモデル抵抗器用の抵抗体サイズとして想定していた 120×100×t5mm であったが、その後の設計過程で 120×100×t3mm に抵抗体の厚みを変更したため、想定した温度上昇幅より低くなった。現状のスペックでは温度上昇限度に余力があるため、今回の温度上昇試験で得られたデータを基に抵抗体のサイズを再検討することにより、さらなる抵抗器の小型化が期待できる。

振動試験に関しては、鉄道車両用の振動及び衝撃試験の規格である IEC61373 を満足した。試験後、抵抗体の外観に異常は確認されなかった。

試験前後で抵抗体の抵抗値変化量は規格で定められた範囲内であった。又、端子部のめっきも異常がないことを確認した。

## 第3章 全体総括

### 3-1 研究開発成果

電力・鉄道業界等を対象とした抵抗器分野の基盤技術の高度化を目的として、抵抗器の省資源・小型・高機能・低コスト化のために、新たな発想の抵抗体材料の実用化に必要な3つの技術である複合材料粉末の製造技術、複合材料の焼結技術、複合材料へのめっき技術の開発を目指した。

1つ目の複合材料粉末の製造技術については、ほぼ計画通り進められた。初年度は小型ボールミルの回転数を検討し、回転数が体積抵抗率と強い相関性があることを明らかにした。2年度及び最終年度は小型ボールミルの実験データを基に、大型ボールミル処理条件の最適化を図り、ボールミル回転数や金属粒子径を制御することで、機械強度の向上及び電気的特性の安定化に寄与する金属粒子の扁平化率(平均AR)は技術目標の7~8以上を達成し、体積抵抗率のバラツキが±20%以内に収まるメタセラ複合粉末の作製に成功した。その結果、体積抵抗率の安定した制御が可能となり、抵抗体の省資源・小型・高機能化を実現するための材料製造技術を確立した。

2つ目の複合材料の焼結技術については、予備加圧成形や焼結時圧力の条件を変更し、放電プラズマ焼結装置を用いて抵抗体を作製した。作製した抵抗体について、機械強度測定、断面組織・破断面の観察、単位断面積当たりの粒子個数の確認及び熱画像解析を行った結果、機械強度と体積抵抗率のバラツキ(±20%以内)を満足する焼結条件について、ほぼ把握することができた。最終年度はモデル抵抗器の性能評価に供する大型試料(120×100×t3mm)の開発を行い、20枚の大型抵抗体の製作に成功した。

3つ目の複合材料へのめっき技術については、初年度及び2年度にB200-NiCrメタセラ抵抗体へのナノめっき技術の開発を行った。シランカップリング処理等のめっきの処理条件を変更した結果、耐熱温度500℃を有する密着性に優れたナノめっき技術を確立した。ナノめっき処理を施した抵抗体については、モデル抵抗器を用いて温度上昇試験を行い、その実用性を実証した。最終年度はパラジウムナノ粒子とニッケルめっきを1,2次めっきとし、3次めっきに銀を適用した。これにより、抵抗体表面へのめっき成分の拡散を防止しながら高温による酸化を防ぎ、耐熱性800℃を有する複合材料へのナノめっき技術の開発の目途が立った。

上記の3つの技術を高度化させることで、最終年度には川下事業者の要求を踏まえ、電力及び鉄道用の2種のモデル抵抗器を製作し、抵抗体の性能評価を実施した。性能評価はそれぞれの抵抗器の規格に準拠した条件で温度上昇試験、振動試験等を行い、異常等がないことを確認した。これにより抵抗器及び抵抗体として使用できる目途が立った。

本事業の提案時に計画していた技術目標は、B200-30vol%NiCr抵抗体の体積抵抗率のバラツキ±20%以内の目標以外は全て達成した。

## 3-2 今後の課題・事業化展開

### 今後の課題

- 本事業で想定していたマトリックスであるセラミックス粉末と金属粒子の組合せにおいて、B200-35～60vol%NiCr 及び規格外瓦-30～60vol%NiCr の組成の抵抗体は、体積抵抗率のバラツキ目標±20%以内を達成できた。但し、B200-30vol%NiCr の組成の抵抗体のみ、体積抵抗率のバラツキが目標値を達成できなかった。一方、金属体積率下限の拡大は、使用する抵抗体枚数の減少、低インダクタンス化、省資源化において有効である。本事業ではモデル抵抗器の製作及び性能評価を優先したため、課題解決までには至らなかったが、どこまで金属体積率を下げられるかについては検証する価値のある課題である。
- 本事業の最終目的はメタセラ抵抗体の量産であるが、現在の焼結方法は放電プラズマ焼結法を用いた加圧焼結によるものである。加圧焼結法は研究開発目的等で短時間焼結が出来る点は良いが、構造上バッチ処理となるため量産性には優れていない。そのため、今後は無加圧化を始めとする焼結技術の高度化が必要である。
- 事業化に必要な要素の一つ、量産製造技術の確立を達成するには、3-1 節で記載した 3 つの要素技術の安定化、信頼性の評価及び製造システムの構築が必要である。今後、これらの技術の熟成度をさらに高めていく予定である。

### 事業化展開

- 本研究開発において、金属とセラミックスを複合化させたメタセラ抵抗体の実用化に取り組み、現行の金属抵抗体を用いた電力用中性点接地抵抗器と比較して、約 50%の小型化と約 70%の軽量化の見通しを得た。今後はメタセラ抵抗体の導入を計画している電力・鉄道・産業用の抵抗器をメインターゲットに、最重要課題である量産化に対応した焼結技術の達成に約 2 年、その後 2 年以内に市場の要求する品質と価格が実現できるよう設備・事業体制を構築し、市場への製品投入を目指す。また、当初の需要のみならず、その他適用できる発熱体(ヒーター)など潜在的新規需要が見込まれている分野への積極的な展開も目指す。
- 拡販は小型化・軽量化のみならず、従来製品では実現できないインダクタンスの低減や金属使用量の低減(省資源化)等をアピールポイントとして、他材料との差別化を図り、展示会等を通じて認知度向上を図る。