

平成 29 年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「アーク放電感知技術による直流スマート開閉器の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成 30 年 5 月

担当局 中国経済産業局

補助事業者 公益財団法人 鳥取県産業振興機構

## < 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             | 5 |
| 1-3 | 成果概要             | 7 |
| 1-4 | 当該研究開発の連絡窓口      | 9 |

### 第2章 本論

|     |              |    |
|-----|--------------|----|
| 2-1 | アーク検知技術の開発   | 10 |
| 2-2 | 寸法・高電圧遮断の最適化 | 13 |
| 2-3 | 信頼性評価        | 17 |

### 第3章 全体総括

|   |                |    |
|---|----------------|----|
| 1 | 複数年の研究開発成果     | 34 |
| 2 | 研究開発後の課題・事業化展開 | 39 |
| 3 | あとがき           | 41 |

## 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

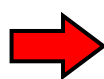
#### 「研究開発の背景」

再生可能エネルギーとして太陽光発電が注目され、一般家庭に導入され始めた1994年から20余年経過した現在、太陽光発電システム（Photovoltaic powersystem、以下P Vという）の普及は累計設置件数100万件を超えた。導入支援補助金制度や電力の買取制度等による支援により急激に普及が高まった一方でP Vの火災事故が増えている。

旭東電気株式会社は、1949年の会社設立から住宅用安全ブレーカの設計開発から販売まで行っている企業である。2010年より、これまでの交流用の開閉機器技術を活かし、P Vに使用される直流開閉器を開発し販売を開始してきた。近年、P Vにおける事故・火災事例の情報が数多く報告されているなかで、事故を予防・防止するために何か社会に対して貢献できることはないかと、直流電路における安全性を確保するための研究開発を進めてきた背景を以下に説明する。

表1 太陽光発電の事故状況集計表

| 事故内容      | 件数  |
|-----------|-----|
| 火災事故      | 40  |
| 発煙・発火・過熱  | 22  |
| ガス漏れ      | 1   |
| 燃料・液漏れ    | 2   |
| 漏電・電波等の障害 | 6   |
| 製品破損      | 18  |
| 部品脱落      | 1   |
| 転落・転倒     | 1   |
| 操作・使用性の欠落 | 7   |
| その他       | 35  |
| 合計(件数)    | 133 |



火災・発火 事故原因の  
初期症状はアーク放電



パネルの発火



開閉器の発火



施工不良

2009年～2014年データ

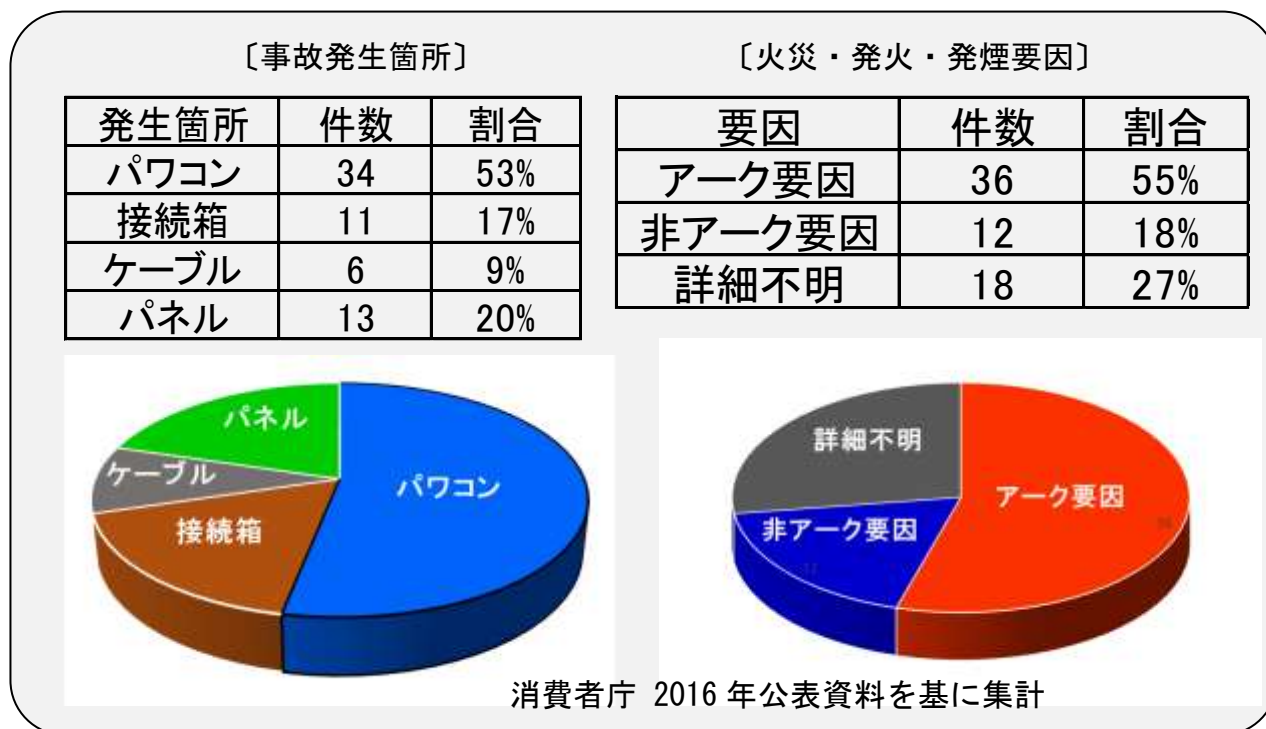
(株式会社 インターリスク総研より)

上の表1は、消費者庁の事故情報データベースからP V事故情報の集計結果を示すものであるが、火災事故、発煙、発火、過熱事故の発生件数が133件中62件(47%)報告されている。

また、表1は太陽光発電事故内容の火災事故、発火・発煙事故について分析したものであるが、事故発生箇所ではパワーコンディショナー（以下パワコンという）が53%と最も多く、太陽電池パネル、接続箱、電線ケーブルが主な発生箇所であった。

更に事故要因をアークが発生する要因なのか、アークが発生しない要因なのか分析を行った。アーク要因が 55%あり太陽光発電における重大事故の大半は、アークが発生していることがわかる。

表 2 太陽光発電システムの事故分析



旭東電気株式会社は、このような直流電路における事故を防止する為の機器開発の研究を 2011 年 9 月より進め、交流用安全ブレーカのバイメタル技術を基に開閉器と電線接続部の異常過熱を感知し電路を遮断する熱感知型直流開閉器を開発し、接続箱内でのネジ締め忘れ、緩みによっておこる火災事故のリスクは大きく改善したが、この製品で直流電路すべての火災事故を防止できるわけではない。

そこで、表 2 の太陽光発電システムの事故分析で P V の火災、発火原因であるアーク放電を検知することにより、大半の事故が防止できる可能性が大きいことから、直流電路を幅広く監視し火災リスクを改善するための研究開発を行ってきた。

### 「研究目的及び目標」

これまで、アーク放電をどのような方法でアークと検知するのが研究開発の鍵となるため、アーク放電の特徴をつかむために、電氣的に検出する方法とアーク光を検出する 2 つの方法で研究を進めてきた。住宅用 P V システムでは太陽電池パネルからパワコンまでの距離が 50m 以上になる可能性がある。従って 100m 先の微細なアーク検知できることを目標とし、その解決手法として電氣的（磁気センサーで検出）に検出する方法でアークを検知する技術を構築し、国内で初のアーク放電感知の商品化を行い、P V 火災リスクの防止に貢献したいと考えている。

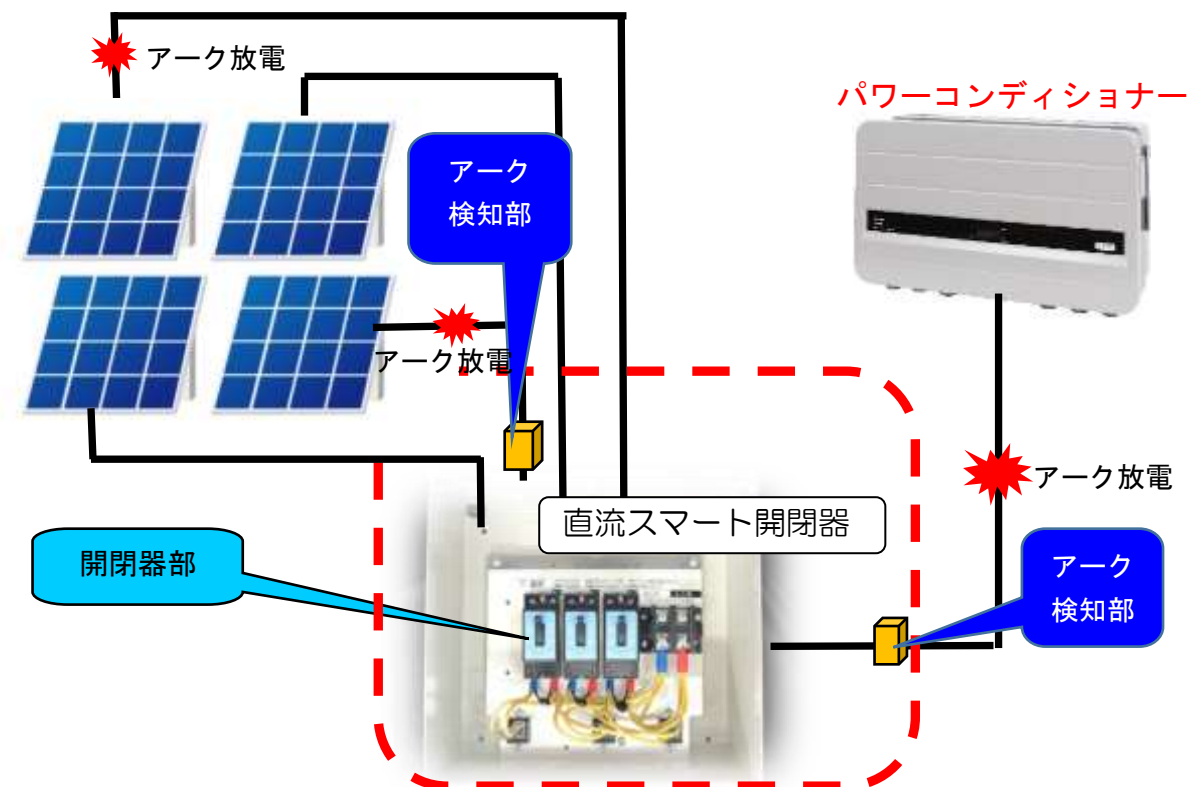


図1は、本研究開発の目的であるアーク放電感知技術の開発により、製品化した時の直流スマート開閉器（アーク検知部と開閉器部）をP Vに使用したイメージ図である。

本研究開発のアーク放電感知技術の開発は、P Vの直流回路の安全性を確保することを目的としているが、直流電源の用途としてはP Vをはじめ電気自動車、蓄電システム、バッテリー等々、幅広い用途がありアーク放電感知技術の開発は、様々な部門で利用できる技術だと考える。

写真1は、開閉器で電路をするときの接点間に発生するアーク放電現象を移したものである。高電圧の電路を遮断することは難しく、電路を遮断するための機器の開発が求められている。

写真 1 接点間のアーク放電

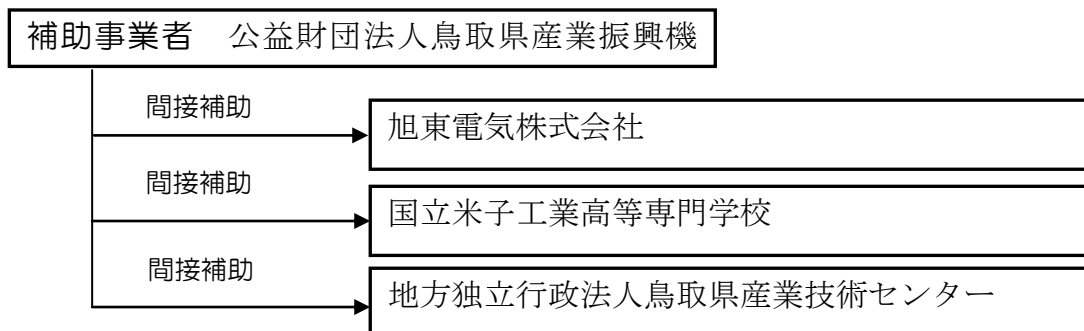
本研究開発の開発テーマと技術的目標を下の表 3 にまとめた。

表 3 開発テーマと技術的目標

| サブテーマ               | 子テーマ                            | 目標値             |
|---------------------|---------------------------------|-----------------|
| 1. アーク検知<br>技術の開発   | ①アーク放電試験装置の<br>開発               | 最大 1500V/18A 出力 |
|                     | ②アーク放電ノイズの<br>フィルタリング技術開発       | 検知時間：1 秒以内      |
| 2. 寸法・高電圧<br>遮断の最適化 | ①高電圧遮断<br>(メカニズムの簡素化)           | 遮断電圧：1500V      |
|                     | ②製品寸法の最適化                       | 10%コスト削減        |
| 3. 信頼性評価            | ①アーク検知から電路遮断の<br>テスト・検証に関する研究開発 | 開閉回数：150 回以上    |
|                     | ②アーク検出回路の<br>テスト・検証に関する研究開発     | アーク検出距離：100m    |

## 1－2 研究体制

### (1) 履行体制図



### (2) 管理員、研究員及び補助員

#### 【補助事業者】 公益財団法人鳥取県産業振興機構

##### 管理員

| 氏 名   | 所属・役職                | 実施内容   |
|-------|----------------------|--------|
| 山崎 均  | 新事業創出部長              | 事業管理業務 |
| 井上 佳美 | 総務企画部総務企画G副グループ長     | 事業管理業務 |
| 長井 和広 | 新事業創出部次世代産業G副グループ長   | 事業管理業務 |
| 小坪 一之 | 新事業創出部次世代産業Gコーディネーター | 事業管理業務 |

#### 【間接補助事業者】

##### 研究員

##### 旭東電気株式会社

| 氏 名   | 所属・役職                 | 実施内容（番号）                   |
|-------|-----------------------|----------------------------|
| 山田 育夫 | 鳥取事業所 専任部長            | 1－①、1－②、2－①<br>2－②、3－①、3－② |
| 小松 幹也 | 鳥取事業所 生産技術部 技師長       | 1－①、1－②、2－①<br>2－②、        |
| 井上 貴幸 | 鳥取事業所 生産技術部生産技術課      | 1－①、1－②、2－①<br>2－②、        |
| 福本 輝紀 | 品質保証部 環境試験課 リーダー      | 1－①、1－②、2－①<br>2－②、3－①、3－② |
| 高松 良樹 | 鳥取事業所 生産技術部生産技術課      | 1－①、1－②、2－①<br>2－②、3－①、3－② |
| 渋谷 祐樹 | 鳥取事業所 生産技術部生産技術課      | 1－①、1－②、2－①<br>2－②、3－①、3－② |
| 出来 健一 | 鳥取事業所 生産技術部 部長        | 1－①、1－②、2－①<br>2－②、        |
| 浦川 巧  | 鳥取事業所 生産技術部生産技術課 専任技師 | 1－①、1－②、2－①<br>2－②、        |
| 松嶋 啓介 | 鳥取事業所 生産技術部生産技術課 課長補佐 | 1－①、1－②、2－①<br>2－②、        |

|       |                       |                            |
|-------|-----------------------|----------------------------|
| 藤竹 孝光 | 鳥取事業所 生産技術部生産技術課 リーダー | 1－①、1－②、2－①<br>2－②、        |
| 長棟 孝之 | 鳥取事業所 生産技術部生産技術課 課長   | 1－①、1－②、2－①<br>2－②、        |
| 大西 信  | 技術品質本部 品質保証部 部長       | 3－①、3－②                    |
| 前田 正  | 大阪本社技術部設計課・担当課長       | 1－①、1－②、<br>3－①、3－②        |
| 米田 和人 | 大阪本社技術部設計課・課長補佐       | 1－①、2－①、2－②                |
| 赤塚 充修 | 大阪本社技術部設計課            | 1－①、1－②、<br>3－①、3－②        |
| 才原 良士 | 大阪本社技術部設計課            | 1－①、1－②、<br>3－①、3－②        |
| 加藤 尚宏 | 大阪本社技術部設計課            | 1－①、2－①、2－②                |
| 塚本 泰正 | 大阪本社技術部技術課・担当課長       | 3－①、3－②                    |
| 前田 勝也 | 品質保証部 環境試験課           | 3－①、3－②                    |
| 久保 晃  | 大阪本社技術部技術課・課長         | 2－①、2－②、3－①<br>3－②         |
| 前田 優博 | 大阪本社営業部 部長            | 1－①、1－②、2－①<br>2－②、3－①、3－② |
| 河津 寿昭 | 大阪本社営業部営業課・担当課長       | 1－①、1－②、2－①<br>2－②、3－①、3－② |

**国立高等専門学校機構米子工業高等専門学校**

| 氏 名   | 所属・役職      | 実施内容（番号）        |
|-------|------------|-----------------|
| 石倉 規雄 | 電気情報工学科 助教 | 1－①、2－①、<br>2－② |

**地方独立行政法人鳥取県産業技術センター**

| 氏 名    | 所属・役職                       | 実施内容（番号）        |
|--------|-----------------------------|-----------------|
| 高橋 智一  | 電子・有機素材研究所 電子システム科<br>科長    | 1－②、3－①、<br>3－② |
| 吉田 大一郎 | 電子・有機素材研究所 電子システム科<br>特任研究員 | 1－②、3－①、<br>3－② |
| 山根 知之  | 電子・有機素材研究所 電子システム科<br>研究員   | 1－②、3－①、<br>3－② |



## 1－3 成果概要

### 1. アーク検知技術の開発

#### ①アーク放電試験装置の開発

##### 1) 目標

アーク検知技術の開発において、信頼性評価、各種データ解析を実施するための各種試験装置が必要であった。しかし、市場にはこのような装置が存在しないために、研究開発に使用する下記仕様設備を自社で製作する。

- ・最大 1500V/18A を出力できる負荷装置
- ・安全に開閉器が開閉できる開閉試験装置
- ・微細なアーク放電を発生することができるアーク発生装置
- ・太陽電池パネルと複数のパワコンとの接続が変更できる切替え装置

##### 2) 成果

- ・負荷装置・・・3台で最大 2000V/24A の負荷を発生し、45回路×3台の組合せで各種電圧に対応した負荷装置の製作に成功。
  - ・開閉試験装置・・・1000V以上の電圧で開閉操作を行うために、人為的に操作することは危険であることから、遠隔から開閉操作が可能で、開閉操作は定量で行える開閉試験装置の製作に成功。
  - ・アーク発生装置・・・100ジュール程度の微細なアーク放電を発生させることができるアーク発生装置の製作に成功。
  - ・切替え装置・・・太陽電池パネル（3社）とパワコン（5社）の接続が自由に切替えることができる切替え装置の製作に成功。
- 以上、上記目標を全て達成した。

#### ②アークノイズのフィルタリング技術開発

##### 1) 目標

アーク放電ノイズと外来ノイズをフィルタリング技術の開発により、1秒以内にアーク放電ノイズの検知が可能であること。

##### 2) 成果

下の表4の通り、アーク検出距離が100m以内であれば1秒以内に検出することができ目標を達成した。

表4 アークの検出精度

| 項 目  | 100m先の<br>アーク検出 | 150m先の<br>アーク検出 | 200m先の<br>アーク検出 |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 検出時間 | 1秒以内            | 1.5秒以内          | 3秒以内            |
| 検出精度 | 95%以上           | 90%以上           | 80%以上           |

## 2. 寸法・高電圧遮断の最適化

### ①高電圧遮断（メカニズムの簡素化）

#### 1) 目標

直流 1500V/10A の電路を遮断することができる開閉器を開発すること。

#### 2) 成果

直流 1500V/10A の電路を遮断できる開閉器の開発に成功し目標を達成した。

### ②製品寸法の最適化

#### 1) 目標

自社の従来製品と比較し 10%コストの削減を目指した製品を開発すること。

#### 2) 成果

フェライト磁石仕様で 30%、ネオジム磁石仕様で 25%コスト削減ができ、更に外形寸法からも従来品と比較すると容積比率で 30%小型化に成功し、全て目標を達成した。

## 3. 信頼性評価

### ①アーク検知から電路遮断のテスト・検証に関する研究開発

#### 1) 目標

直流 1500V/10A の電路を連続 150 回以上遮断する開閉器の開発のための、遮断テスト実施と評価をすること。

#### 2) 成果

接点寿命（直流開閉器が正常に開閉可能な回数）算出する指標となるアークエネルギーを用いて、開閉器の寿命を算出した。

1500V/10A の時の 1 回の開閉に要するアークエネルギーで割出した結果、推定 11,461 回の開閉回数となり目標を達成した。

### ②アーク検出回路のテスト・検証に関する研究開発

#### 1) 目標

100m先で発生したアークを検出すること。

#### 2) 成果

フィールドテストにより、100m先でアークを発生できる環境をつくり、アーク検出の検証を実施した。

検証結果により、100m先のアークを 1 秒以内に検出することを確認し目標を達成した。しかし、検出精度が 95%であり商品化には検出精度の改善が必要である。

#### 1－4 当該研究開発の連絡窓口

|                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 補助機関：公益財団法人鳥取県産業振興機構<br>代表者役職・氏名：代表理事理事長 中山 孝一<br>住所：〒689-1112鳥取県鳥取市若葉台南7丁目5番1号                                    |
| 連絡担当者名：小坪・長井（新事業創出部）<br>電話：0857-52-6704 Fax：0857-52-6673<br>E-mail:kkotsubo@toriton.or.jp、 tnakamura@toriton.or.jp |

|                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 間接補助事業者（法認定企業）：旭東電気株式会社<br>代表者役職・氏名：代表取締役社長 北村 文秀<br>住所：〒535-0022 大阪市旭区新森6丁目2番1号                                                 |
| 連絡担当者名：前田 正・米田 和人（技術部）<br>電話：06-6952-2071 Fax：06-6952-2307<br>E-mail: t.maeda@kyokuto-elec.co.jp , k.kazuhito@kyokuto-elec.co.jp |
| 連絡担当者名：山田 育夫（鳥取事業所）<br>電話：0858-52-2381 Fax：0858-53-1814<br>E-mail: i.yamada@kyokuto-tottori.jp                                   |

## 第2章 本論

### 2-1 アーク検知技術の開発

#### ①アーク放電試験装置の開発

アーク検知技術の開発において、信頼性評価、各種データ解析を実施するための各種試験装置が必要であった。しかし、市場にはこのような装置が存在しないために、研究開発に使用する以下の設備を自社で製作した。

- 1) 最大 1500V/18A を出力できる負荷装置
- 2) 安全に開閉器が開閉できる開閉試験装置
- 3) 微細なアーク放電を発生することができるアーク発生装置
- 4) 太陽電池パネルと複数のパワコンとの接続が変更できる切替え装置

#### 1) 負荷装置

開閉器の遮断評価試験で 1500V/10A の遮断目標があるため、1500V/10A 以上の電流を流すことのできる装置の開発に成功した。

この装置開発の課題は、電流を発生させる時に部品が発熱するため、部品をどのように冷却をすれば安定した精度の良い電流を再現できるかであった。

熱流体解析ソフトを使用し、様々な電圧、電流設定時に部品からの発熱量、送風による冷却効果、適正な部品配置等、シミュレーションを繰り返し 2000V/24A の電流を発生できる負荷装置を完成させることができた。(写真2)



写真2 負荷装置

## 2) 開閉試験装置

右の写真3が開閉器の接点を開いたり、閉じたりを自動で動作させる装置開発に成功した。この装置の特徴は、開閉器の接点を閉から開へ動作させる時間、開から閉へ動作させる時間が定量で調整することができ、製品の再現試験や評価試験が行える装置である。

また、試験中に発火等の異常があった場合は自動的に試験回路電源を遮断することができ、安全に試験を実施することができる。



写真3 開閉試験装置

## 3) アーク発生装置

電流値の高い電路で継続的なアーク放電を発生させることは比較的容易であったが、低い電流の場合、アーク放電を継続させることが困難であった。

電極の形状の検討と電極動作を微細に可動させることで、微細なアーク放電を発生させることに成功した。(写真4)

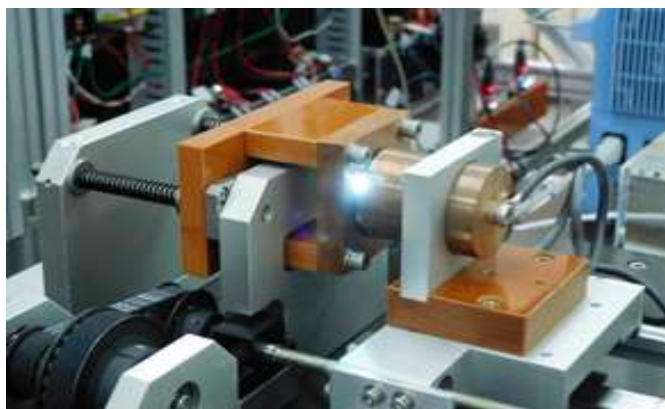


写真4 アーク発生装置

## 4) 切替え装置

アーク検知技術の研究で課題となるのが外来ノイズとアークノイズの違いを見極めることである。パワコンから発生するノイズ等、フィールド上でどのようなノイズが発生しているのかPVの現状を調査するために太陽電池パネル3社とパワコン5社との接続パターンを切替える装置を完成させた。(写真5)

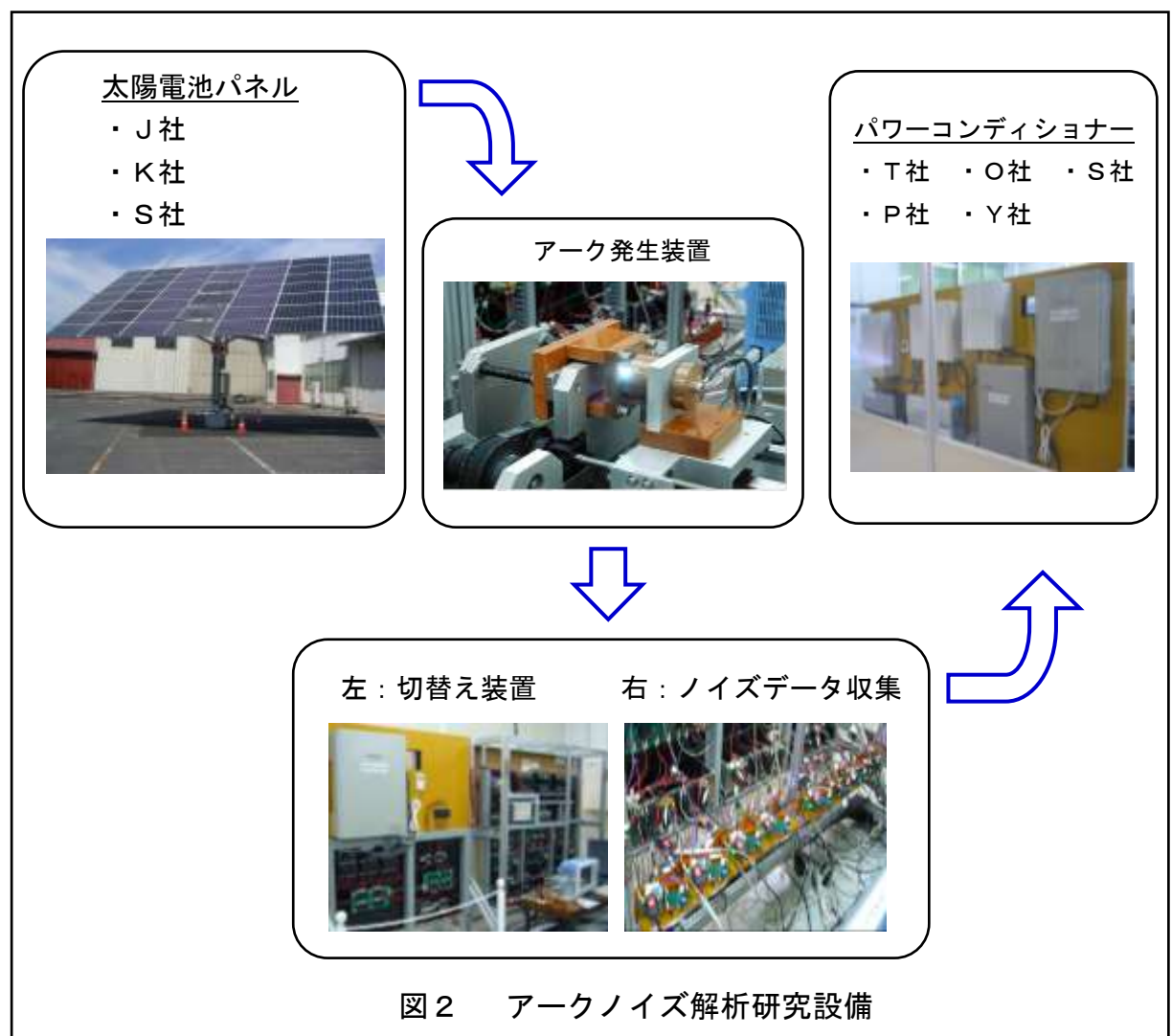


写真5 切替え装置

## ②アークノイズのフィルタリング開発

アーク検知の課題として、P Vから発生するノイズや自然環境からのノイズ等、様々なノイズの中からアークノイズを拾い出す必要があった。そのため、これらのノイズデータを収集するためにP Vを設置し、様々なノイズデータの収集を行いノイズデータにフィルタをかけアークノイズを抽出する方法の研究開発を実施した。

下の図は、太陽電池パネル3社とパワコン5社のパネルとパワコンの15通りの接続切替えを行い、パネルとパワコンのメーカーの違いによる電路ノイズの特徴、また、パネルとパワコンの間でアークを発生させノイズデータを収集する研究設備である。この試験設備で収集したノイズデータを解析し、アーク放電ノイズの特徴を掴むことができ、アルゴリズムに加えアーク検出に成功した。





## 2-2 寸法・高電圧遮断の最適化

### ① 高電圧遮断（メカニズムの簡素化）

直流電源の電路遮断技術の課題は、交流電源のように周期的に電圧がゼロボルトになれば電路の遮断は比較的簡単に遮断可能であるが直流電源では電圧変化が無い場合、電路を遮断する場合接点間にアーク放電が発生し、電路の遮断は不可能となり、また、火災の要因となり大変危険である。このアーク放電を消滅（消弧）させることが大きな課題である。

アーク放電を消弧するための方法としては幾つかの方法があるが、今回の研究開発では開閉器の構造を簡素化し、小型で高電圧時のアーク放電を消弧できる構造を目指していることから、自社が従来から進めている磁力を活用した方法で効率よく消弧できる仕組みを目指し、研究開発を実施した。

#### 1) 磁界シミュレーション

近年、3D CAD を用いた計算機シミュレーションの技術が発達し、電磁気、熱、流体などの製品開発に適用できるようになり、実験実証の試行錯誤の回数が減ることで開発工数を低減できるようになってきた。

そのことから、磁力線のシミュレーションを研究開発に取入れたいと考え、シミュレーションの妥当性を自社既存機種3機種の開閉器を使用し検討した。

表5 対象とした機種一覧

| 機種名                 | KD-DS23315h                                                                         | KD-DS2436                                                                            | KD-DS20010                                                                            |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 姿図                  |  |  |  |
| 定格電圧                | DC330V                                                                              | DC330V                                                                               | DC1000V                                                                               |
| 磁石の種類               | フェライト(400 mT)                                                                       | フェライト(400 mT)                                                                        | ネオジム(1300 mT)                                                                         |
| 接点の磁界<br>(シミュレーション) | 21.2 mT                                                                             | 26.1 mT                                                                              | 34.8 mT                                                                               |
| 接点の磁界<br>(実験)       | 18.6 mT～20.5 mT                                                                     | 27.7 mT～30.7mT                                                                       | 33.2 mT～36.7 mT                                                                       |
| シミュレーションと実験との差      | 3.07 %                                                                              | 6.24 %                                                                               | —                                                                                     |

上の表 5 がシミュレーションの妥当性を確認するためにホールセンサを用いて行った実験結果である。

3機種すべてについて磁束密度のシミュレーション結果と実験結果が誤差 10%程度で一致することを確認した。

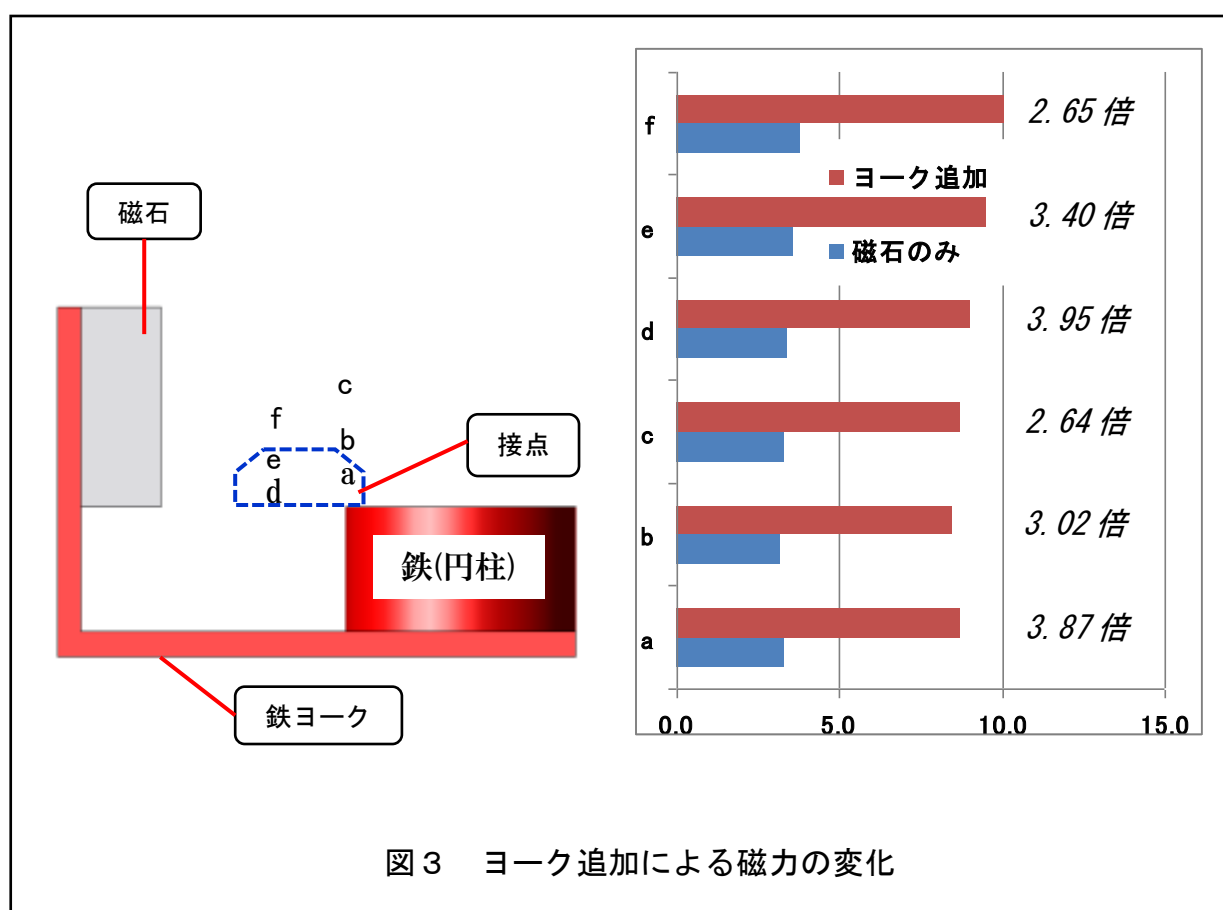
このことにより、設計における計算機シミュレーションは、現実に近い磁界を再現可能であることが判明したため有用性であることを確認した。

## 2) 磁力強化と消弧機構の検討

前項の磁力線シミュレーションを使用し、高電圧遮断を可能にするために接点周辺の磁力強化と磁力を強化するための機構の検討を行った。

シミュレーションと機構の検討を繰返す中で、下の図 3 の構造が小型で接点周辺の磁力を現状の 2.6 倍～3.9 倍に増加することを確認したものである。

ヨークを追加するだけで大幅に磁力が向上する結果を得られ、ヨークを追加するスペースは十分あり、有用なシミュレーション結果であることが確認できた。



磁力線シミュレーションの結果をもとに試作品を製作し、遮断試験を実施した。遮断電圧 800V で行った試験では、従来品は接点が焼損したが試作品では、カバーやアークの逃がし穴の改善を行った結果、遮断が可能になった。これは、接点周辺の磁力を強化したことによる効果だと考える。

しかし、1000V 以上の遮断電圧については磁力強化だけでは遮断は難しく、磁力強化以外の消弧方法の検討が必要となった。



目標である「遮断電圧：1500V」の実現に向け、電圧の違いによるアーク放電をハイスピードカメラで撮像し、消弧方法の検討を行った。

400V と 800V の時のアーク放電をハイスピードカメラで撮像したが、アーク放電の違いは分るが遮断に対してどのような違いがあるのか解かりにくい。

そこで接点寿命（直流開閉器が正常に開閉可能な回数）を算出する指標となるアークエネルギーに着目した。

下の図 4 が400Vと800Vの電圧で遮断したときの遮断時間とアークエネルギーを表した図である。遮断時間が長くなれば、アークエネルギーが大きくなることが確認できる。

また、電圧も高くなるので電圧の上昇と比例しアークエネルギーも増大する。

400V と 800V のアークエネルギーを比較すると、接点の劣化が 800V では4倍のスピードで劣化するということになる。このことにより、高電圧の遮断を可能にするためには、如何にアークエネルギーを小さくするかが課題となる。

課題となるアークエネルギーの抑制については、遮断時間を短くするために消弧グリッドの検討をし、最適な寸法・形状、設置場所を遮断試験の繰返しで技術的ポイントを見つけることができ、1500V/10A の遮断に成功した。

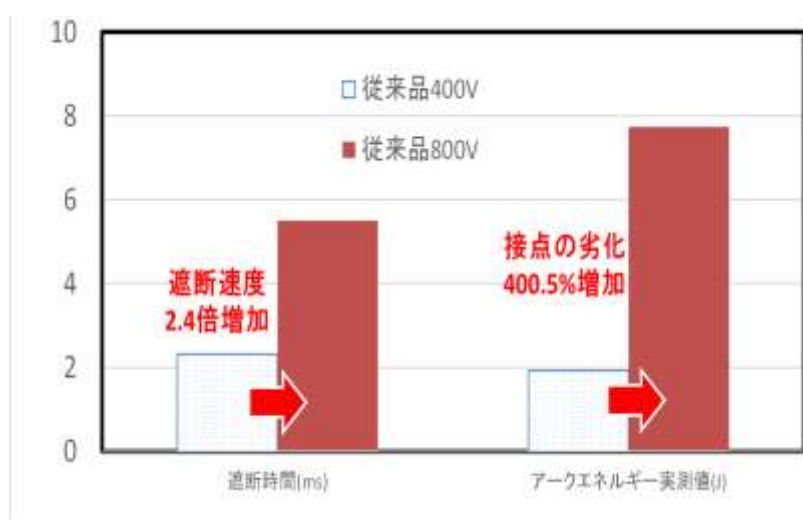


図 4 遮断時間とアークエネルギー

右の写真 6 が開閉器の接点を開閉した時のアーク放電をハイスピードカメラで撮像し、消弧機構の開発と検証を行っている時のものである。



写真 6 アーク放電の撮像

## ②製品寸法の最適化

下の写真7が磁力線シミュレーションと遮断試験を繰返し、高電圧遮断に向け機構の検討を行い出来上がった試作品と従来製品を比較したものである。

目標である「10%コスト削減」は従来品と比較し、フェライト磁石の仕様で30%、ネオジム磁石仕様で25%コストの削減ができ目標を達成した。

また、外形寸法からも従来製品と比較すると容積比率で30%小型となった。



外形：縦70 横32 高さ54.5  
開閉性能：1300V10A（フェライト）  
：1500V10A（ネオジム）



外形：縦90 横25 高さ78  
開閉性能：500V10A（フェライト）  
開閉性能：1000V10A（ネオジム）

写真7 製品寸法の比較

## 2-3 信頼性評価

### ①アーク検知から電路遮断のテスト・検証に関する研究開発

#### 1) アーク放電による劣化の定量化

接点の寿命（直流開閉器が正常に開閉可能な回数）を算出する指標となるアークエネルギーを用いることを提案した。この指標は、開閉時の電圧・電流波形から、接点で消費された電気エネルギーを算出するものであり、シンプルな物理現象かつ実用性が高い。文献(3-3-1)では、アークエネルギーにより接点が磨耗し、質量が低減することを明らかにしており、文献(3-3-2)では、有接点機器の寿命予測のための指標としてアークエネルギーが活用されている。

図5に、開閉器が電流を遮断する場合におけるアークエネルギーのイメージを示す。図5の横軸と  $p$  で囲まれた面積が、アークエネルギーに相当する。理想的には電圧  $v$  の波形は0から一定値に垂直に立ち上がり、電流  $i$  の波形は一定値から0へ垂直に立ち下がる。しかしながら、実際はアークを引くことにより有限の時間を要して波形が変化する。その際の電力  $p = (\text{電圧 } v \times \text{電流 } i)$  の時間累積値が、開閉器が電流を遮断する際に消費されたアークエネルギーである。文献(3-3-1)および(3-3-2)より、アークエネルギーにより接点が磨耗することが明らかとなっていることから、アークエネルギーが小さいほど寿命が延びると考えられる。

本事業ではこのアークエネルギーを用いて、開閉器の寿命を算出した。現行製品で400V/16Aの開閉耐久実験を実施し、開閉1回のアークエネルギー3.3Jを28200回達成していることから、開閉器が許容する総アークエネルギーを  $3.3\text{J} \times 28200\text{回} = 93060\text{J}$  とした。この総アークエネルギーを、試作品の1回の開閉に要するアークエネルギーで割ることにより、開閉可能回数を推定し寿命の指標とした。

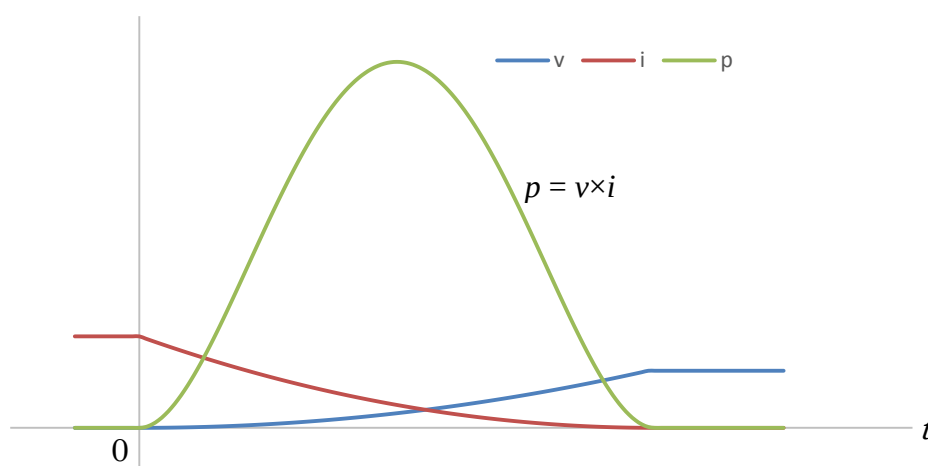


図5 アークエネルギーのイメージ

## 2) 実機を用いたアーク放電の実験

従来製品の課題を明確にするために、また、改良を加えた試作品の効果を検証するために、実機のアークを観測した。写真 8 に、実験装置の概観を示す。実験には、ハイスピードカメラ、オシロスコープ、高電圧差動プローブ、電流プローブを用いた。抵抗負荷として、本事業で 28 年度に作成した負荷装置を用いた。



写真 8 アーク放電を観測する実験装置

### ・従来商品が有する課題の明確化

従来商品は 1500V 印加すると筐体が焼損することが、本事業の H28 年度以前における実験から明らかになっている。その要因を定量的に判断するため、アークの撮像と接点間の電圧・電流波形を測定した。写真 9 に従来商品のアークを撮像した写真を示す。このとき、電源電圧は 800V、電流は 10A とした。写真 9 より、激しくアークを引いていることがわかる。また、取得した動画より、アークが遮断し切れずに数回繋がり直していることが観測できた。この現象から、強いアークが筐体に長時間接触しているため焼損に至ったと考えられる。図 6 に、このときの遮断時間とアークエネルギーを示す。アークエネルギーは電源電圧が 400V の場合 1.93J であり、800V へ増加した場合は 7.73J であり、4 倍となっていることがわかる。すなわち、電源電圧が 2 倍となったことで、接点の寿命が 1/4 となっていた。ここで、アークエネルギーは、接点の電圧×電流の時間積分である。仮に電流値を変更せず遮断時間も大きく変動しない場合は、アークエネルギーは電圧の一次関数となる。目標とする 1500V を印加する場合、筐体が発火せずとも 17.88J のアークエネルギーが発生し、開閉を行うことが困難であることを再確認できた。

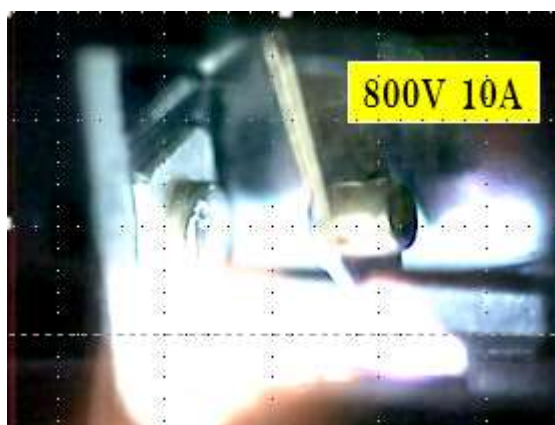


写真 9 従来商品のアーク撮像

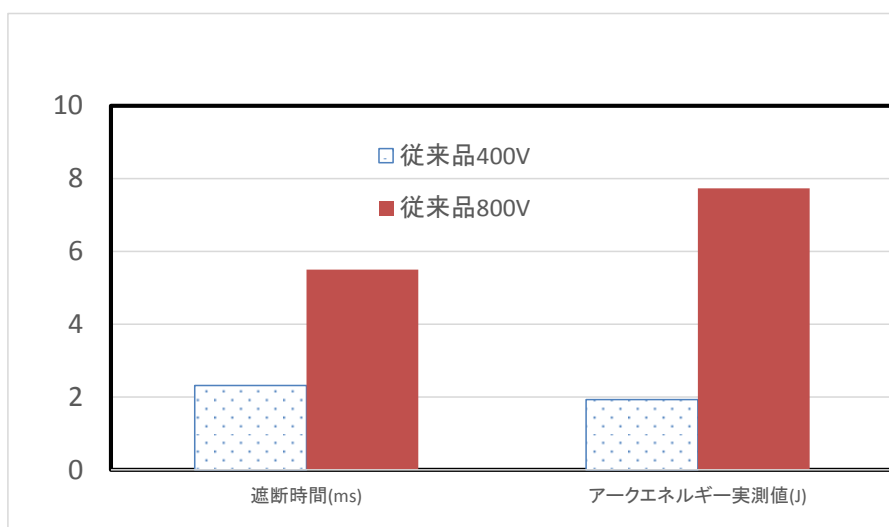


図 6 従来商品の遮断時間とアークエネルギー

表 6 に、ヨークの効果写真を示す。

- ・ヨークによる消弧能力向上の確認

ヨークの有無による効果を実験により確認した。このとき、電源は 800V/10A とした。①対策なしの場合は、接点周辺にアークが滞留した。②はヨークをつけた場合であり接点周辺の磁力が強化され、アークが写真の下側へ押し出されていることがわかる。図 7 に、ヨークの有無による遮断時間とアークエネルギーを比較したグラフを示す。ヨークの効果により、遮断時間が 5.50ms から 3.86ms に低減でき、さらにアークエネルギーは 7.73J から 5.14J へ低減できたことを確認した。

- ・消弧グリッドによる消弧能力向上の確認

消弧グリッドの有無による効果を実験により確認した。このとき、電源は 800V/10A とし、表 6 の③に、消弧グリッドの効果を写真によって示す。消弧グリッドをアークが押し出された先に設置することにより、アークが消弧グリッドに接触しアークを直接冷却できるため、遮断時間を短縮できる。図 8 に、ヨークの有無による遮断時間とアークエネルギーを比較したグラフを示す。消弧グリッドの効果により、遮断時間が 3.86ms から 2.22ms へさらに低減でき、アークエネルギーは 5.14J から 2.63J へさらに低減できたことを確認した。

- ・筐体の改良および開口部除去の影響



製品化のため、筐体内部のアーキにより発生するガスを逃がす機構を追加し、消弧グリッドの素材をアルミニウムからナイロンへ変更し、開口部を除去した。これらの影響として、遮断時間は 2.22ms から 2.42ms へわずかに増加し、アーキエネルギーも 2.63J から 3.06J へ増加した。筐体内でアーキが閉じ込められたこと、消弧グリッドが金属から樹脂へと変更したことにより、冷却能力が低下したことが考えられるが、微かな増加であるため商品開発上において問題ないと考えた。(今後の製品開発のための参考としてデータを掲載した。)

表6 ヨークと消弧グリッドの有無の比較

|            | 写真                                                                                   |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ① 対策なし     |   |
| ② ①+ヨーク    |  |
| ③ ②+消弧グリッド |  |

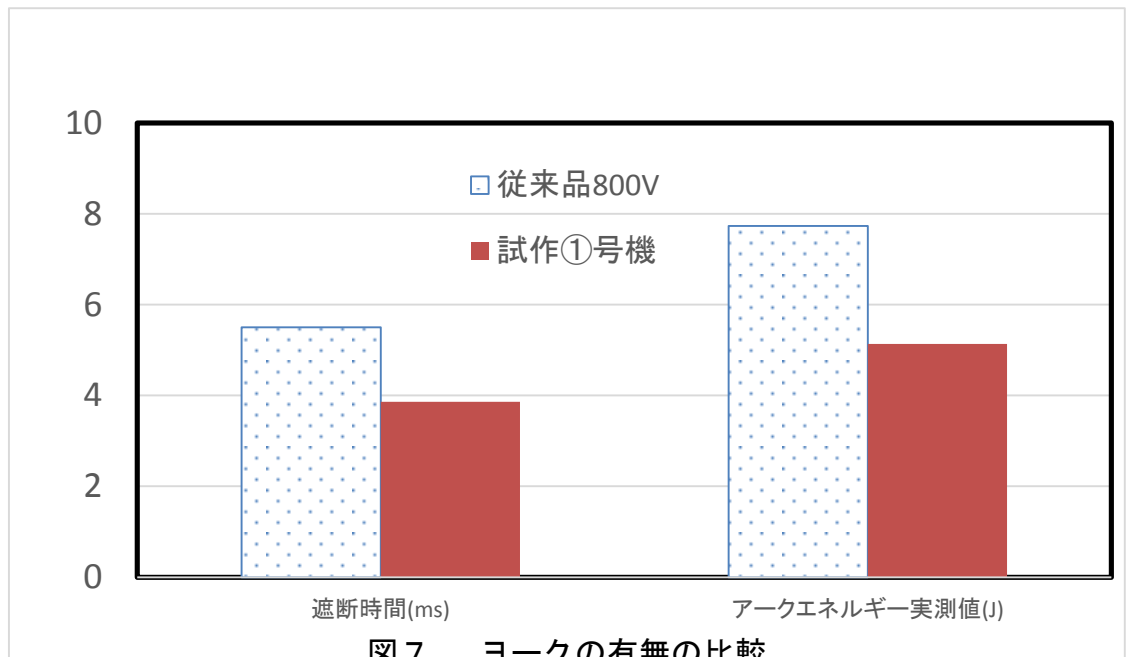


図7 ヨークの有無の比較

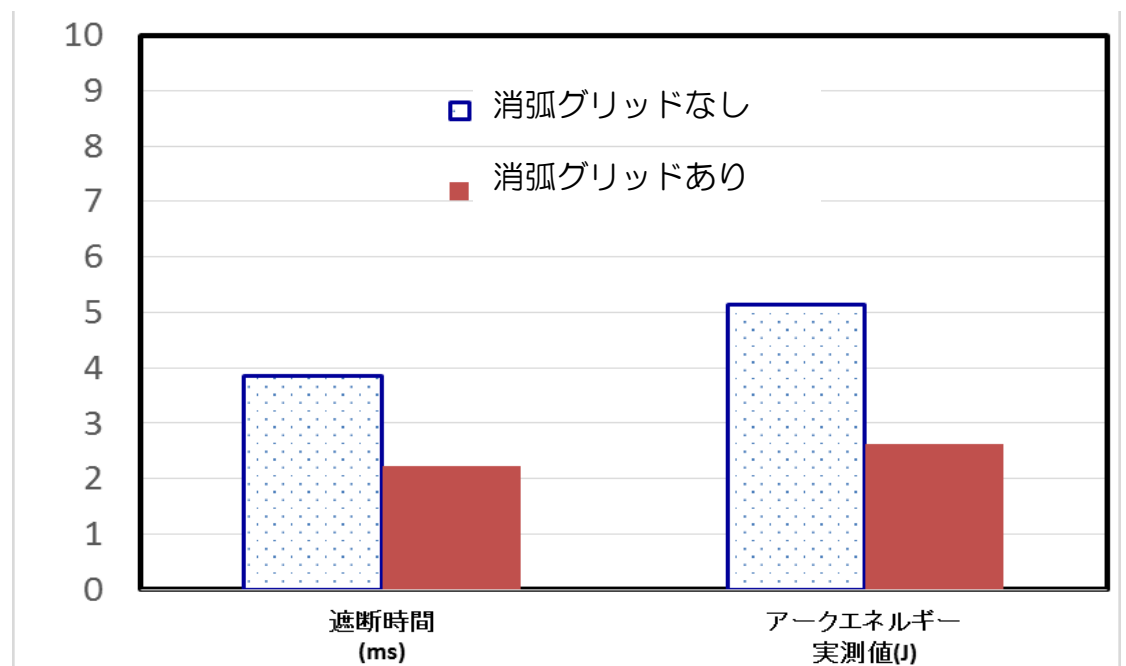


図8 消弧グリッドの有無の比較

- ・開閉動作のばらつき

開閉動作のばらつきを確認するために、開閉試験を複数回実施した。表 7 および図 9 に実験結果を示す。このとき用いた試作品は、筐体内部のアーキにより発生するガスを逃がす機構を追加し、消弧グリッドの素材をアルミニウムからナイロンへ変更し、開口部を除去したものである。試作の過程で消弧グリッドを切削で加工したことにより、開閉試験で発生したアーキで切りくずが燃焼し、試験開始直後の 5～10 回程度はアーキが切れにくいことがわかった。このばらつきを確認する試験では、数千、数万の開閉可能回数の評価を目的とするため、図 10 は切りくずの影響がなくなった後のデータを示している。有効なデータ多数は、700V および 800V が 5 点、900V が 4 点、1000V が 14 点、1100V が 16 点、1200V および 1300V が 13 点である。この結果から、アーキエネルギーは電圧に対して一次関数で増加する傾向があった。これは、ヨークと消弧グリッドが十分に機能し、電圧の増加に伴い遮断時間が急増しなかったからであり、これらの対策が有効であったことを示している。

開閉可能回数は、アーキエネルギーの平均値を用いて、耐久可能な総アーキエネルギー 93060J から割ることで算出した。電圧に対する接点の開閉可能な推定回数は電圧の上昇に伴い開閉可能回数が低下する。

実験結果から図 10 の一次関数を基に電圧が 1400V と 1500V の開閉可能な開閉回数を推定すると、1400V では 5241 回、1500V では 1025 回であり、目標とした 150 回の開閉を達成可能であることを確認できた。

表 7 開閉動作のばらつき

| 電圧 (V) | データ数 | アーキエネルギー (J) |      | 開閉可能回数 |
|--------|------|--------------|------|--------|
|        |      | 平均           | 標準偏差 |        |
| 700    | 5    | 2.50         | 0.09 | 37200  |
| 800    | 5    | 3.19         | 0.36 | 29200  |
| 900    | 4    | 3.44         | 0.05 | 27100  |
| 1000   | 14   | 5.02         | 0.53 | 18500  |
| 1100   | 16   | 5.32         | 0.70 | 17500  |
| 1200   | 13   | 6.52         | 0.72 | 14300  |
| 1300   | 13   | 8.48         | 0.82 | 11000  |



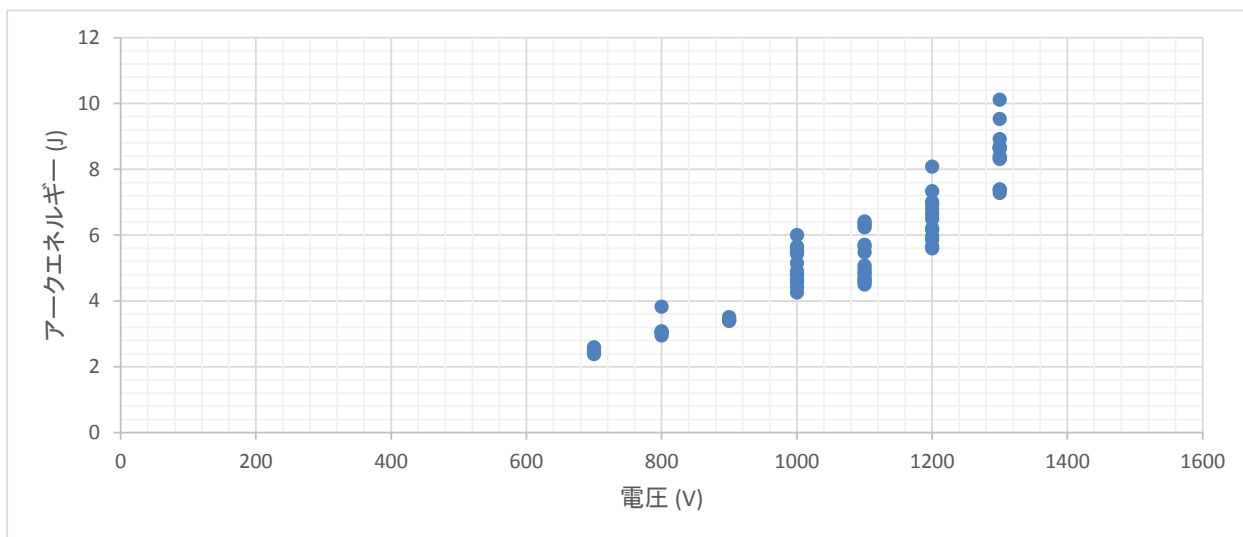


図 9 電圧に対するアークエネルギーの測定結果

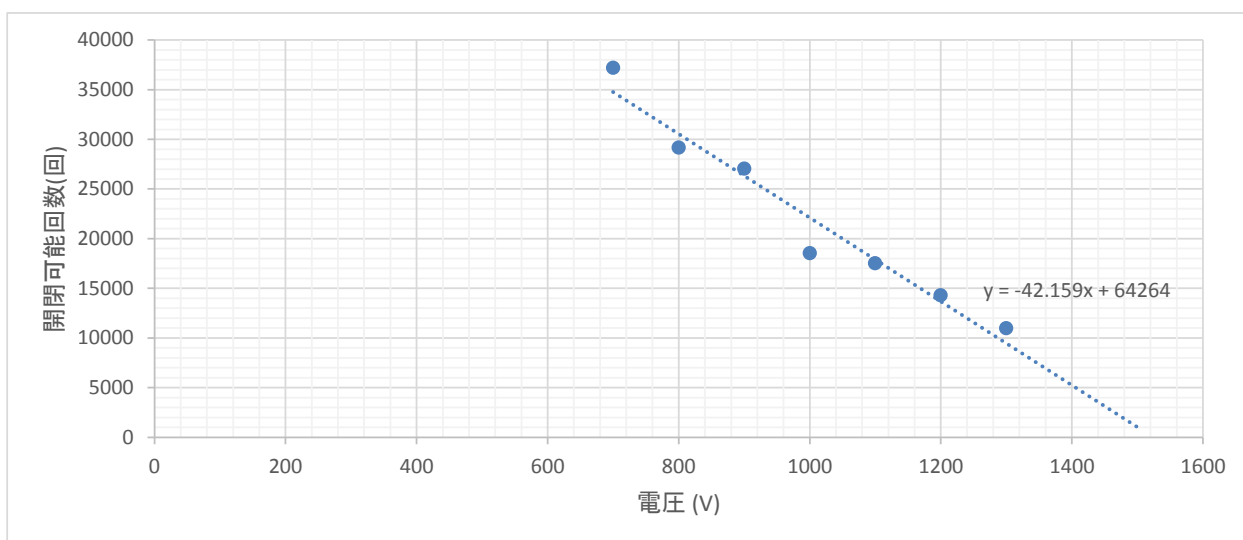


図 1 0 電圧に対する接点の開閉可能回数の推定

・電圧 1500V とした実験結果

本事業で目標とした 1500V 耐圧の試験を行い、開閉可能であることを実験により確認でき、目標を達成できた。ただし、消弧グリッドが金属であること、磁石にネオジムを用いており、これらは想定している量産製品と仕様が異なるため、本事業以降の課題である。写真 10 に、1500V 時のアークの写真を示す。写真 10 より、ヨークの効果でアークが下側へ力を受けていることがわかる。さらに、消弧グリッドにアークが接触していることから、消弧グリッドにより直接アークが冷却できたと考えられる。また、このときのアークエネルギーは 8.12J であった。この値は、ヨーク・消弧グリッドとも考慮していなかった当初の想定 17.88J に対して 55%低減でき、開閉可能回数は 11460 回であり、目標とする 150 回を達成可能であることを確認できた。



写真 10 1500V 時のアーク撮像

### 3) まとめ

#### 〔アーク放電による劣化の定量化〕

接点の寿命（直流開閉器が正常に開閉可能な回数）を算出する指標を提案した。指標として用いるアークエネルギーは、開閉時の電圧・電流波形から、接点で消費された電気エネルギーを算出するものであり、シンプルな物理現象かつ波形データから容易に算出できるため実用性が高い。

#### 〔実機を用いたアーク放電の実験〕

本事業で開発対象としている直流開閉器に対して、昨年度までに実施した磁力線の計算機シミュレーションの有効性を実験により確認できた。固定接点直下に強磁性体のヨークを設置し、消弧に用いる磁力をアーク近傍へ集中でき、アークの遮断時間を従来製品より 30%低減可能である。さらに、アークが発生する空間に消弧グリッドを設置することにより直接アークを冷却でき、従来製品よりアークの遮断時間を 42%低減可能である。この 2 つの機構を同時に実装することで、アークの遮断時間を従来製品より 60%低減可能である。さらに、実験結果に対して提案する指標を適用した結果、目標とした「1500V・10A の負荷に対して 150 回以上開閉」に対し、1025 回（ネオジム磁石、金属の消弧グリッドを用いれば 11460 回）開閉が可能であり、目標を十分達成できることを実験により確認できた。

#### 参考文献

- (3-3-1) 下野：「閉成時のみにアーク放電が発生させた場合の電磁コンタクタの諸特性」、日本工学大学研究報告 第 46 巻、第 1 号、pp. 85-88(平成 28 年 6 月)
- (3-3-2) 潮崎・川原木・宮沢：「有接点機器の長寿命化とその寿命予測」、富士時報、Vol. 75、No. 9、pp. 539-88(2002)

## ②アーク検出回路のテスト・検証に関する研究開発

### (1) アーク放電ノイズの電路への再生

#### 「背景と目的」

アーク検出回路のテスト・検討や、信頼性評価において、アーク放電ノイズを高い再現性で発生させることが必要である。そこで、実際に発生させたアーク放電ノイズを記録したものを電路へ再生することで、放電装置を用いずとも現象を再現させる装置の研究開発を行った。

#### 「アーク放電ノイズ再生装置の概要」

アーク放電ノイズの記録、再生のブロックを図 1 1 に示す。今回製作した装置は、電流波形を再生する部分である。

波形の記録は、PV、パソコンおよびアーク発生装置で構成された電路から、電流プローブを介してオシロスコープに電流波形を取得することで行った。ノイズ波形の記録は 1 度行えばよい。波形の再生は、記録された波形を波形発生装置を用いて再生し、これを後段のアンプにより電流波形として増幅し、電路へ重畳することで行った。

この装置の仕様は、アーク放電ノイズの特性から以下のように設定した。

- ・ 直流電源電圧は 100V～300V（任意の電圧で固定）であること。
- ・ 再生する電流は DC7.5A、AC2.5Ap-p（誤差±5%）であること。
- ・ 工程検査での使用を考慮し、簡素な構成とし安定動作すること。
- ・ 生産性を考慮し、低コストであること。

再生する交流電流の誤差の考え方について、図 1 2 に示す。波形全体の振幅の±5%以内を許容範囲とした。

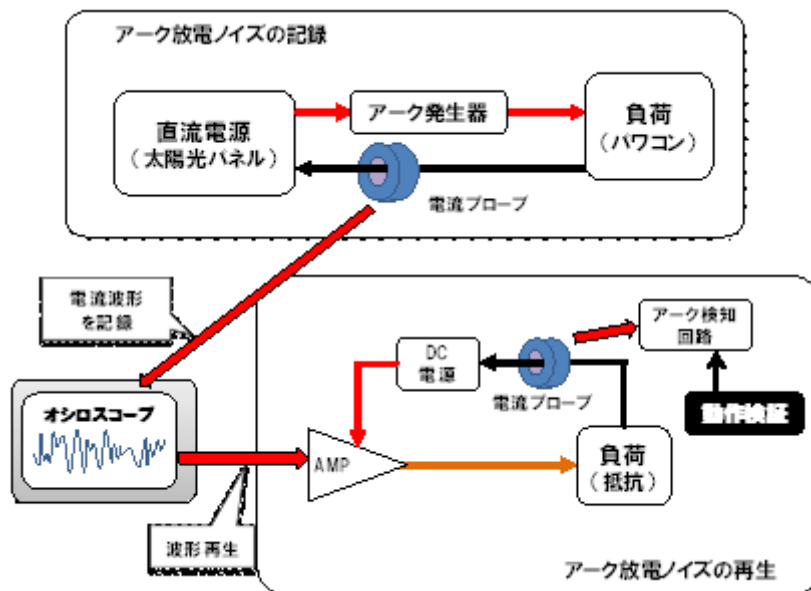


図 1 1 アーク放電ノイズの記録と再生概要図



図 1 2 アーク放電ノイズの誤差の考え方

## 1) 装置の製作

### ①バイポーラトランジスタアンプ型再生装置

ノイズ波形再生装置として、バイポーラトランジスタを用いたアンプを設計した。装置は電源部、オペアンプによるプリアンプ部およびバイポーラトランジスタによるアンプ部により構成されている。プリアンプ部、アンプ部は主にオーディオで見られる回路構成であるが、周波数特性が可聴域以上の高周波までフラットに延び、かつ発振等なく安定して動作する必要がある点で設計が異なっている。

出力段トランジスタをプッシュプルで構成したアンプで動作を確認したところ、300V での交流増幅出力が可能であったが、直流電路への交流重畳が難しく、低周波数の再現性が悪いことが分かった。対策としてアンプにより直流、交流ともに電流出力する方式（A 級アンプ）として設計する方法が考えられたが、部品の耐久性、放熱、動作の安定性などを考慮すると、信頼性の面で装置仕様が満足できないことが分かった。

### ②FET による電流制御型再生装置

バイポーラトランジスタアンプ型再生装置の代替として、FET 素子のゲートを電圧制御することで、負荷へ流す電流量を制御する電流アンプの製作を行った。

FET のリニア領域を利用することで、FET を電圧制御型の可変抵抗とみたと、ゲートに供給されるアーク放電ノイズに比例した電流波形を負荷に供給することで、アーク放電ノイズの電流波形を再現する。トランジスタアンプ型に対して、回路構成がシンプルになるため、低コストと安定性の両立が可能となった。

## ②-1 装置の動作説明

装置の仕様電流値を得るための回路構成および素子の乗数を図 1 3 に示す。アーク放電ノイズを入力する信号源が OFF の場合、FET に電流が流れないため、負荷抵抗には 5A の直流電流が流れている。次に、信号源から直流電圧を FET のゲートに入力すると、FET に電流が流れ始め負荷抵抗に流れる電流が増加する。この直流電圧を、抵抗負荷に DC7.5A が流れるように調整する。この状態から、信号源より交流電圧であるアーク放電ノイズを重畳すると、負荷抵抗にアーク放電と同じ電流ノイズを再生することができる。オシロスコープで記録した波形を再生する、

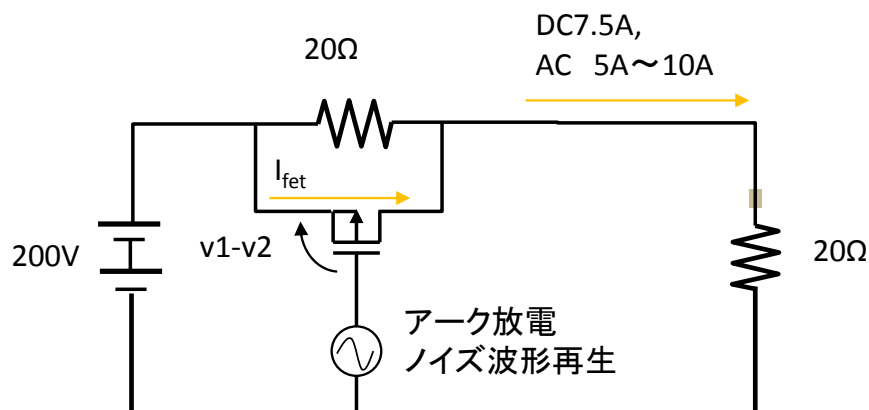


図 1 3 仕様に即した電流制御型再生装置回路および定数

この装置によって、直流 200V から DC7.5A、AC2.5Ap-p のアーク放電ノイズ電流を再生できることが確認できた。なお装置の動作においては、抵抗および FET の発熱が問題となるが、放熱フィンなどが準備できなかったため、水冷により放熱することで動作確認を行った。

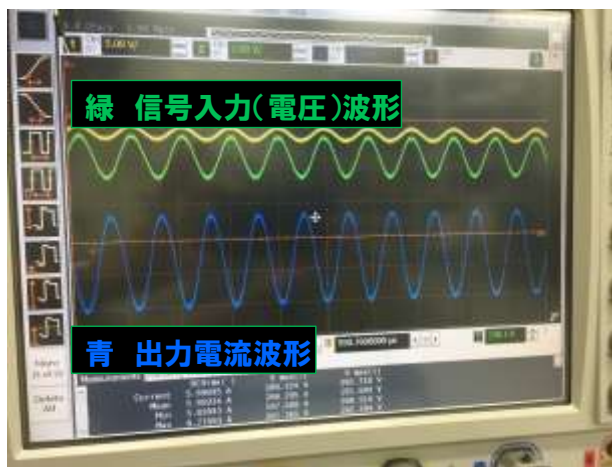
## ②-2 装置の動作実験

負荷抵抗および FET の放熱が必要であるが、放熱板の準備ができなかったため、水槽で水に浸した状態で実験を行った。

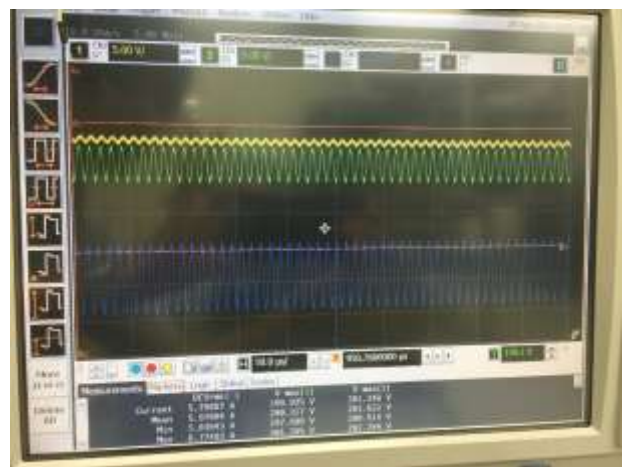
実際に正弦波を再生した波形の様子を写真 1 1 に示す。緑の信号入力波形（オシロスコープで記録した波形を再生したもの）に追従して、仕様に即した電流波形が出力されているのが確認できた。

装置の周波数帯域については、仕様要件である波形振幅の $\pm 5\%$ 以内となる周波数まで再生が必要である。事前に、アーク放電ノイズを記録した波形を解析した結果、60kHz 以上の帯域があれば問題ないと判断されたため、余裕をもって 100kHz まで再生できる回路構成とした。

実験により、アークノイズ再生回路が仕様の範囲で動作することが確認できた。



(a) 入力信号周波数=10kHz



(b) 入力信号周波数=100kHz

写真 1 1 アーク再生回路による正弦波再生の様子



## (2) 電路線通信

### 「背景と目的」

PV とパワコンの接続は、従来接続箱を介して行われていた。しかし近年においては、接続箱を介することなく PV とパワコンが直接接続されるケースが増えている。これにともない電路遮断機能についても、従来の直流開閉器の設置によるものから、パワコン内蔵のものに置き換わってきており、直流開閉器の需要は減少傾向である。

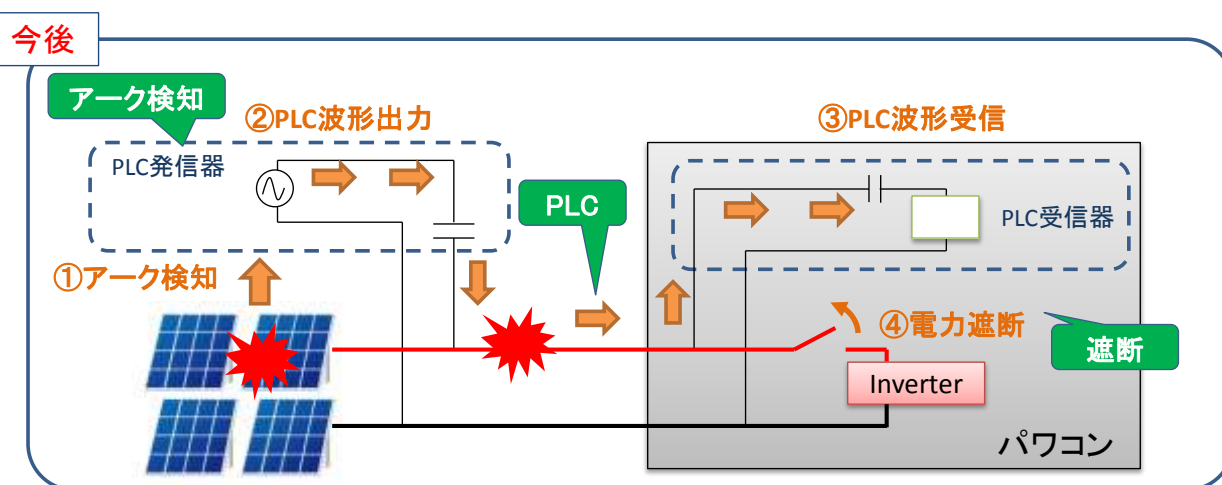
このような市場変化に対応するため、すでに開発を進めているアークノイズ検知技術により異常が検知された場合に、パワコンへ電路線通信を用いて通知を行い、パワコン側で電路を遮断する手法が必要となると考え、PV-パワコン間通信技術の研究開発を行った。

### 「電路線通信の概要」

太陽光発電システムにおける電路線通信（以下 PLC）を用いたアーク検知の概略を示す。従来のアーク検知は、図 1 4 (a) のように電路上や接続箱内で直流開閉器により各々行われていた。今後は図 1 4 (b) のように、パワコンで電路を遮断する方式となることから、アーク検知を PV 毎に行い、検知された場合は電力線を利用した通信により、パワコンへ電路遮断を要求し、電路遮断をパワコンにて行う。通信に既存の電力線を利用するため、低コストである。



(a) 従来の電路遮断の手法



(b) 今後普及が予想される電路遮断の手法

図 1 4 太陽光発電システムにおける電路遮断手法の概要

一般的に PLC は低速 PLC、高速 PLC に分けられるが、本研究ではパワコンへアーク発生を通知するのみであるので、10kHz～450kHz の範囲の周波数を用いる低速 PLC を使用する。ただし、低速であってもデータ通信は可能であるため、アーク検知信号のみではなく、PV 監視として温度や電圧などを送信することも可能である。

#### ① PV 電路網

PV 電路網を通信路とした PLC を設計するにあたり、PV システムによる通信への影響を考慮する必要がある。また机上検討において DC 電源を用いる場合、スイッチングノイズが発生するため、実際の PV システムの再現性が低下する問題がある。

上記に対応するため、ABB 社が提唱するアークテスト回路網を元に回路を設計し、この回路を用いて PLC 設計を行うことで、PV システムを模擬した環境での開発が可能となった。アークテスト回路網は、DC 電源のノイズフィルタとしてのデカップリング回路部、PV アレイおよび電路インピーダンスを模擬したアレイ+電路インピーダンス部により構成される。

アーク検知については、検出感度向上と誤検知率の低下はトレードオフの関係にあるため、アレイ+電路インピーダンス部の乗数によりこれらのコンディションを設定することができる。PLC で使用を考えると、通信信号品質が低下する条件の悪い設定とし、そのような環境でも品質を確保できる設計が望ましいため、アーク検知が難しくなるよう抵抗、コンデンサ、コイルの各定数を選択した。

アークテスト回路網において PLC が影響を受けるのは、アレイ+電路インピーダンス部であることが実験で分かっている。具体的には、回路網の出力側から見た高周波帯域のインピーダンスが低くなっており、PLC 送信側からの通信波形の振幅が低下するため、送信側から電路網へ信号を重畳する手前で増幅する必要がある。アークテスト回路網の出力側からみたインピーダンスの実測結果を表 8 に示す。本研究では、オーディオ帯域のアンプを設計し、利用した。なお、デカップリング回路による影響は無視できる。

表 8 アークテスト回路網の出力側から見たインピーダンス（実測値）

| 周波数[Hz] | 120  | 1k   | 10k  | 100k |
|---------|------|------|------|------|
| Z[Ω]    | 40.3 | 4.64 | 3.64 | 2.56 |

## ② PLC 回路

### ・ A S K 変調

本研究では PLC で用いるデジタル変調方式として、メンテナンス性、コスト、回路規模の面からシステムがシンプルとなる ASK(Amplitude Shift Keying)を選択した。その他の基本的な通信方式として FSK(Frequency Shift Keying)、PSK(Phase Shift Keying)などの手法があるが、受信側の計算補助回路が必要で、コスト、回路規模が ASK に比べて大きくなるため非採用とした。

ASK 変調のキャリア周波数は、疑似回路シミュレートにより、上述のアンプで増幅が容易でかつ、受信側の復調 IC が十分に復調可能な振幅が得られる範囲で、より高い周波数を調べた結果から、20kHz を選択した。

## (3) 実験および結果

### 1) PLC 通信回路

図 1 5 に回路のブロック図を示す。PLC 送信側には MCU を使い、キャリア周波数 20kHz の波形を ON/OFF することでボーレートが 133Hz の ASK 変調波形を生成した。MCU で生成した波形は、トランジスタで製作したアンプで増幅されたあと、コンデンサ結合により電路へ重畳される。アークテスト回路網は電源の後段、電路出力側に設置した。

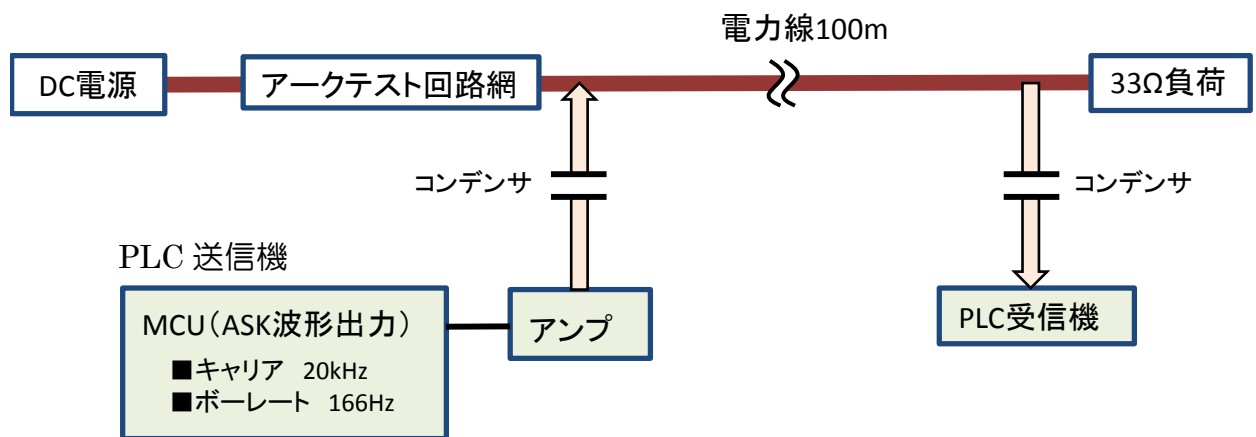


図 1 5 PLC 通信実験回路ブロック図

## 2) 実験結果

PLC 通信実験回路の動作波形を図 1 6 に示す。PLC 送信機側から出力された波形が、アークテスト回路網の影響を受け、矩形波がなまっているが、受信機側で問題なく復調できていることが確認できた。この実験により、PLC 送受信回路が電力線通信で有効に機能していることが確認できた。なお本実験では、1010…の信号をデューティー 50%で出力しており、通信内容に意味を持たせていないが、バイナリデータとすることで、いろいろな情報を受信側に送信することが可能である。この実験により、ASK 方式による低コストの送受信回路を製作し、回路の有効性を確認できた。

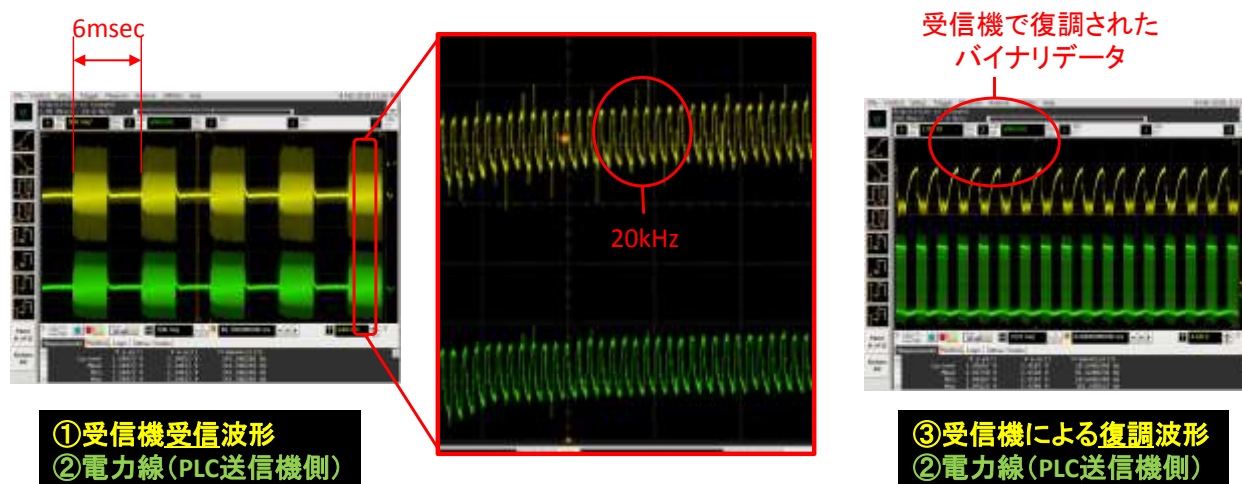


図 1 6 PLC 通信実験の通信波形

### 第3章 全体総括

#### 1. 複数年の研究開発成果

##### (1) アーク検知技術の開発

###### ①目標

- ・アーク放電試験装置の開発  
最大 1500V/18A 出力
- ・アーク放電ノイズのフィルタリング技術開発  
検知時間 : 1 秒以内

###### ②成果

- ・アーク放電試験装置の開発  
電流を発生する時の部品から発生する熱を効率よく冷却することが課題であったが、熱流体解析ソフトを導入し部品の配置、冷却ファンの配置等、シミュレーションを実施し最適な条件で装置の開発を行うことができた。  
このことにより、目標を達成することができた。下の図 1 7 がシミュレーションの一例である。

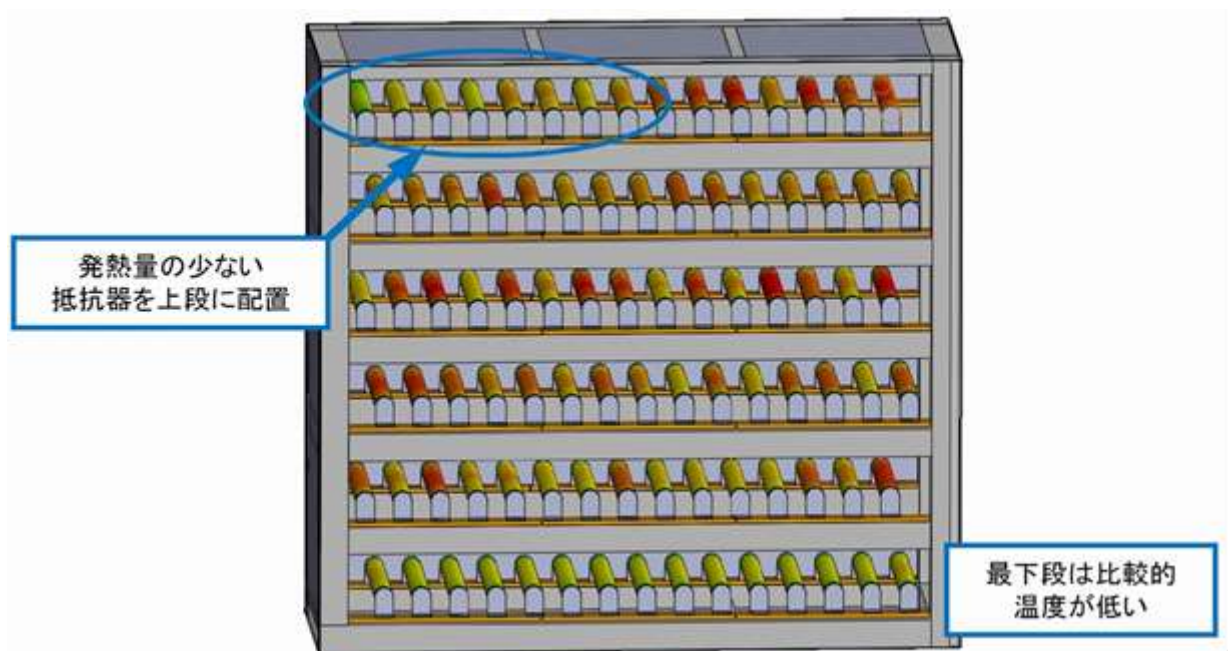


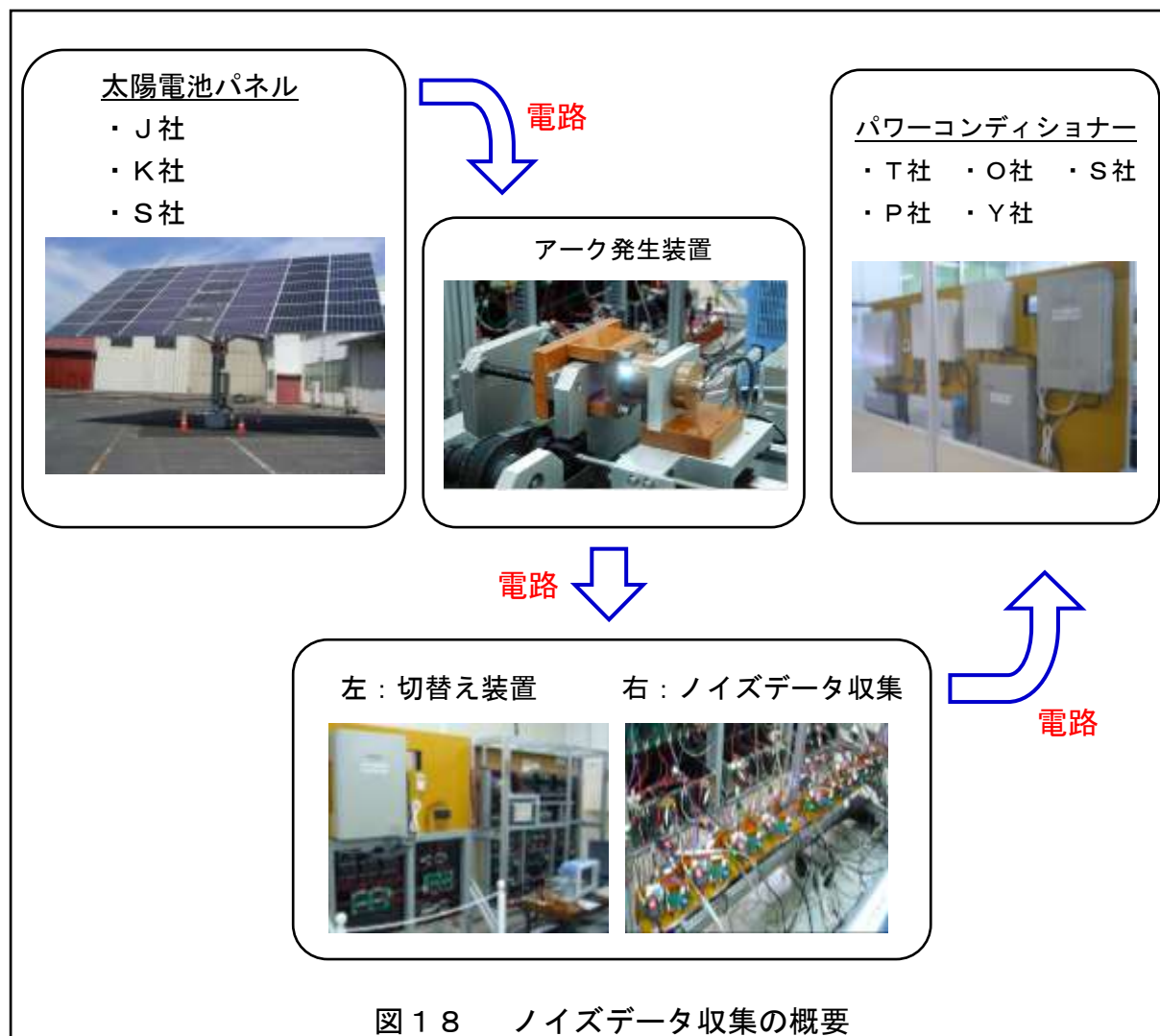
図 1 7 解析結果後の抵抗器の温度分布

・アーク放電ノイズのフィルタリング技術開発

アーク放電ノイズの課題として、P Vから発生するノイズ、自然環境からのノイズ等、様々なノイズの中からアーク放電ノイズを拾い出すことが大きな課題であった。

自社に太陽電池パネル3社、パワコン5社のP Vを設置し、パネルとパワコンの接続を切り替え、各社のP Vから発生するノイズデータを収集・解析を行いフィルタリングに成功し、目標を達成することができた。

下の図18が、ノイズデータ収集の概要を表したものである。



## (2) 寸法・高電圧遮断の最適化

### ①目標

- ・高電圧遮断（メカニズムの簡素化）

遮断電圧：1500V

- ・製品寸法の最適化

10%コスト削減

### ②成果

アーク放電を消弧するための方法としては幾つかの方法があるが、今回の研究開発では開閉器の構造を簡素化し、小型で高電圧時のアーク放電を消弧できる構造を目指していることから、自社が従来から進めている磁力を活用した方法で効率よく消弧できる仕組みで10%のコスト削減を目指し研究開発を実施してきた。

シミュレーション技術を使用し、接点周辺の磁力を強化するための部品配置・構造検討を行い、試作評価にて目標を達成した。

また、この研究開発により得られた知見は以下のとおりである。

- ・直流開閉器の電磁界シミュレーションのデータ自体が一般的には非公開であり、新規性があり、定量的な評価を行うために有用であった。
- ・製品の構造の最適化を行うため、シミュレーションを行ったことは有効であった。
- ・検討を行った構造はヨークを足しただけであり、それ以外のパラメータ（磁石の種類、ヨークを除く空間的な配置）は変更する必要がなかった。
- ・アークが実際に発生しそうな箇所(6箇所)に対して、満遍なく2～3倍程度のアークを引き伸ばす力（磁力）の向上が認められ、これまで以上に効率よく磁石を使う方法がわかった。
- ・アーク放電による劣化を定量的に示す指標として、開閉時の電圧・電流波形から、接点で消費された電気エネルギーを算出するアークエネルギーを用いることが有効であった。
- ・ヨークと消弧グリッドの機構を同時に実装することで、アークの遮断時間を従来製品より60%低減可能であることがわかった。さらに、目標とした「1500V・10Aの負荷に対して150回以上開閉」に対し、1025回（ネオジム磁石、金属の消弧グリッドを用いれば11460回）開閉が可能であり、目標を十分達成できることを実験により確認できた。

まず、製品開発に対する従来の開発工数を削減するため磁力線のシミュレーションを適用した。シミュレーションにはFemtet（ムラタソフトウェア株式会社製）を用いて、有限要素法による磁場解析を行い、シミュレーションの妥当性を確認するためにホールセンサを用いた実験を行った。

既存の3種類の製品について静磁場の計算機シミュレーションと実験を行い、3種類全てについて磁束密度のシミュレーション結果と実験結果が誤差10%程度で一致することを確認した。



その結果、設計における計算機シミュレーションは、現実に近い磁界を再現可能であることが判明したため有用であることを確認した。同時に、従来製品におけるアークを引き伸ばすための磁力が、アーク発生箇所以外で強まってしまうことが判明し、従来製品の構造を改善することによりアークを消弧する性能を高めることが可能であることがわかった。

構造を改善するために、磁力の強化の為に[ヨーク]を追加し、更に接点へ磁束を集中する事を目的とした構造の最適化を考えつき、シミュレーションを行った結果、アークが実際に発生しそうな箇所(6箇所)に対して、満遍なく2~3倍程度のアークを引き伸ばす力(磁力)の向上が認められ、これまで以上に効率よく磁石を使う方法がわかった(図19)。さらに、試作品を用いた実験を実施した結果、消弧に用いる磁力をアーク近傍へ集中でき、アークの遮断時間を従来製品より30%低減可能であることを明らかにした(図20)。さらなるアークの消弧能力向上のために、アークが発生する空間に消弧グリッドを設置することにより直接アークを冷却でき、従来製品よりアークの遮断時間を42%低減可能であった。この2つの機構を同時に実装することで、アークの遮断時間を従来製品より60%低減可能であった(図21)。併せて、実験結果に対し、アークエネルギーを用いて寿命を算出した結果、目標とした「1500V・10Aの負荷に対して150回以上開閉」に対し、1025回(ネオジム磁石、金属の消弧グリッドを用いれば11460回)開閉が可能であり、目標を十分達成できることを実験により確認できた。

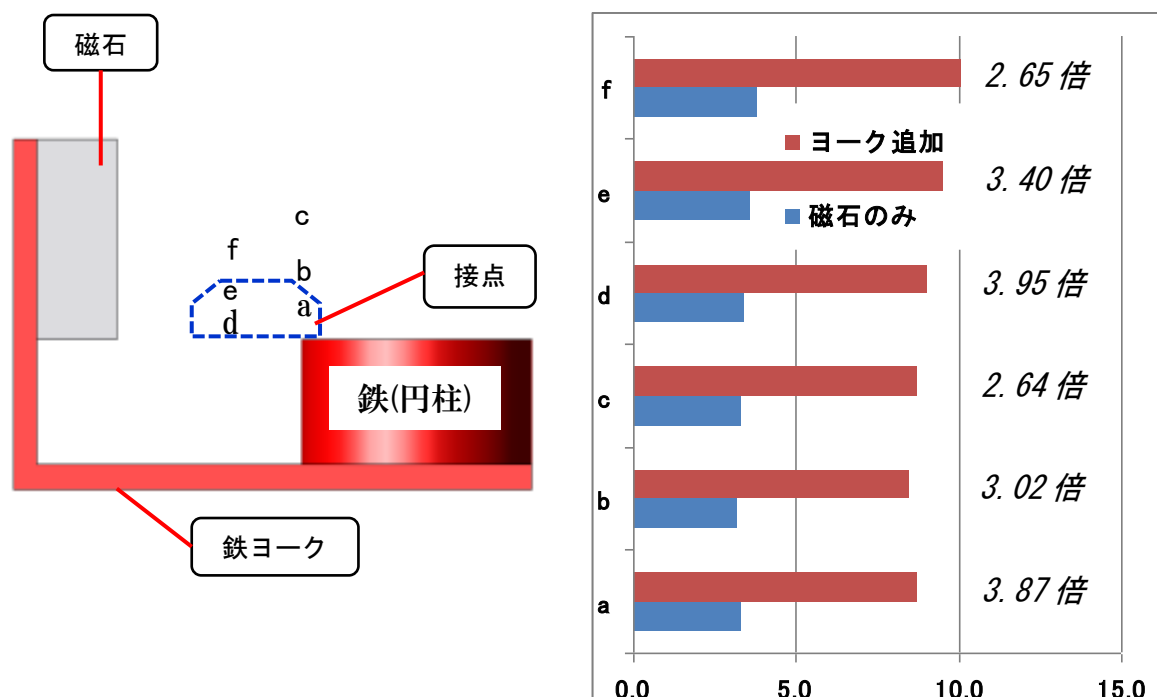


図19 シミュレーション結果(ヨーク追加による磁力の変化)

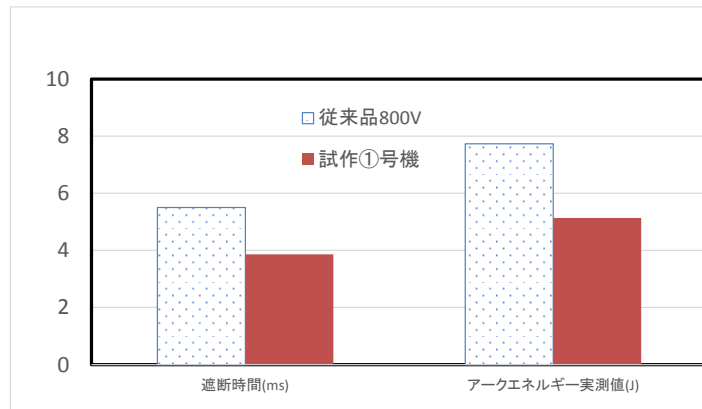


図 2 0 実験結果（ヨーク追加による磁力の変化）

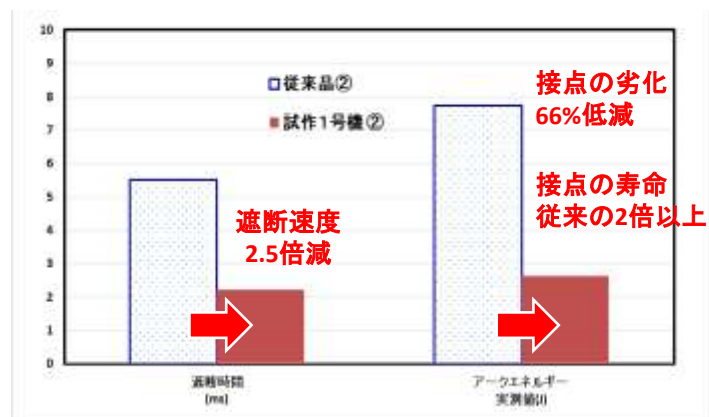


図 2 1 従来商品の遮断時間とアークエネルギー

## 2. 研究開発後の課題・事業化展開

2050年までに温室効果ガスの排出量を80%削減するという目標をわが国は掲げており、その達成には発電時にCO<sub>2</sub>を排出しない電源の比率を90%に高める必要があるとされている。再生エネルギーに求められる貢献のレベルは高いと推測され、その中でも太陽光発電は、期待度が大きい。

太陽光発電は直流であり、これを安全に給電できる設備の需要は、今後も続くと推測する。直流電源で推測される需要として、アーク火災の防止や保守・点検時に感電しないよう確実に電気を止める遮断器等は、今後ますます市場ニーズがでてくると推測する。但し、投資と回収の問題もあり、設備等にはコスト低減の要求が、日に日に増しているのが現状である。

また、売電業者としては、送電効率を上げる為に、高電圧の送電に移行しつつある。今回の高電圧遮断の研究成果を活かすことができ、市場のニーズに合わせ、高電圧遮断器の機種開発を手掛けていくと共に、取引先の拡大を目指す。

アーク検知については、取引先の設備等の特性に影響されやすい為、取引先と一体になり、設備に応じたアーク検知器の供給を目指す。市場としては、国内だけでなく海外（特に東南アジア）も視野に入れ販売活動を展開していく。

数値目標は、なかなか描き辛いですが、1億円／年以上の販売を目指し、販売活動を展開していきたい。

### 「直近の課題」

市場では、発電コストを抑えるために住宅用、産業用とも太陽電池からパワーコンディショナーまでの直流電路で、電圧、電流容量の上昇の要求が下記のように向いている。

#### ①住宅用

- ・大電流化 10～15A ⇒ 26A（推測）
- ・電圧については、450Vまで

#### ②産業用

- ・大電流化 10～12A ⇒ 26A
- ・高電圧化 750～1000V ⇒ 1500V

いずれにしてもコストの低減が必要となる。

### 「長期的な課題」

将来的には、直流電流を交流電流に変換せず、直流のまま使用するものが増えると推測する。

例えば、直流電源の実用例として写真１２のようなデータセンター、また、写真１３のような直流電源の実用を検討されているエアコンと言うような比較的電気容量の高いものである。



写真１２ データセンター



写真１３ エアコン

以上のような場合、直流経路の保護機能を有する下記のような遮断器の需要も高まると推測する。

- ・漏電保護
- ・過電流保護
- ・短絡保護
- ・火災等の事故時の遠隔回路遮断

今後の商品開発の長期的な課題となる。

### 3. あとがき

太陽光発電システムの普及が急激に高まった一方で太陽光発電システムの火災事故が増えている。また、発電事業用（産業用）太陽光発電システムにおいては、直流電路の電圧が 1000V を超える高電圧化に進み、電路を遮断する開閉器の開発が望まれている。

このような課題を解決させる機器を開発するために 3 年に及ぶ本研究開発を行い、商品開発に効果的な成果が得られた。多様化する市場のニーズに合致した信頼性の高い商品の供給に向けて、鋭意取り組んでいく所存である。

最後に、ご指導・ご協力を賜った関係各位に感謝する次第である。