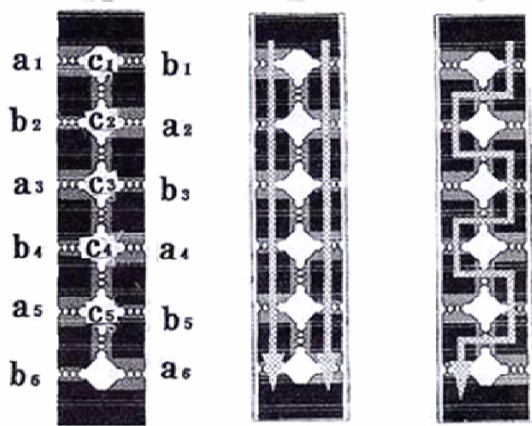


# 財団法人 関東電気保安協会 平成 22 年度研究助成報告書 「高電圧用インテリジェントエッチドヒューズの開発」

代表研究者： 埼玉大学理工学研究科 山納 康

## 1. はじめに

エッチドヒューズは、セラミック基板上に銅薄膜をメッキした後、これに微細なパターンをエッチングすることでヒューズエレメントができています。本研究のインテリジェントヒューズはエッチドヒューズをベースとし、ヒューズエレメントパターンをネットワーク状にすることで連続通電時と事故電流時でヒューズの電流経路を変化させる仕組みを持つヒューズである。図 1 にインテリジェントヒューズエレメントの概略とエレメントに流れる電流経路を示す。図 1(A) は概略図であり、ヒューズエレメントは遮断点 a 部、b 部の他に連絡ヒューズ c 部がセラミック基板上にエッチングにより作成されている。同図(B) は通常電流時の電流経路を示しており、電流は a 部、b 部を直線的に流れる。同図(C) は、事故電流通電時を示しており、大電流がエレメントに流れると、先に a 部が遮断されて電流経路がジグザグに流れるような仕組みを持つ。この結果、同図(B) の連続通電時よりも同図(C) の事故電流時の方が直列遮断点が多くなり、遮断性能が向上する[1]のである。



(A)ヒューズエレメント図 (B)連続通電時の電流経路 (C)事故電流時の電流経路

図 1 インテリジェントヒューズエレメントと連続通電時と事故電流時の電流経路変化

インテリジェントヒューズは、1997 年に元埼玉大学廣瀬健吾教授により特許が取得されているが、これまで同図(C)のように事故電流通電時に連絡ヒューズが正しく機能しないことが問題であった。本研究ではまず通常のエッチドヒューズとインテリジェントヒューズの性能比較を行い、インテ

リジェントヒューズ開発における有用性を確認する。加えて電流通電時に連絡ヒューズを作動させて電流経路を変化させること、インテリジェントヒューズの各遮断点の点弧の順番が未知だったので、遮断時にどのタイミングで点弧するかを明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験装置・方法

遮断試験は、L-C 共振型大電流発生用ヒューズ遮断試験回路(図 2)と単位インテリジェントヒューズ用遮断試験回路(図 3)で行った。

### (1) インテリジェントヒューズ・エッチドヒューズの性能比較試験

インテリジェントヒューズの遮断性能を調査するため、インテリジェントヒューズとエッチドヒューズの遮断特性の比較を行う。図 2 の L-C 共振型大電流発生回路を用いてヒューズ遮断試験を行った。コンデンサ C に 3300V を充電し、投入器を投入することで交流電流 40kArms (100Hz 相当) の共振電流を供試ヒューズに通電させて遮断試験を行った。電流遮断後の電圧は 600V 以上になるようにしている。使用するインテリジェントヒューズは未加工のもの(図 4(a))と、あらかじめエッチングを行い、エレメントパターンを変化させたジグザグ型(図 4(b))、平行型(図 4(c))を用いた。

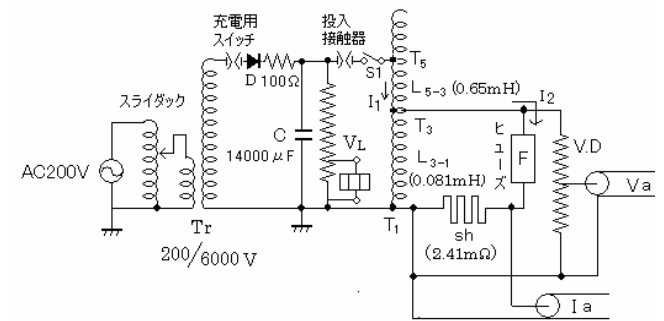


図 2 L-C 共振型大電流発生回路

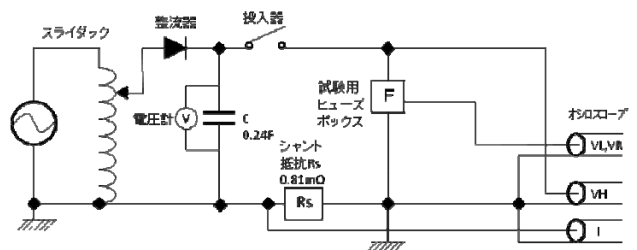


図 3 単位インテリジェントヒューズ遮断試験回路

表1 インテリジェントヒューズの抵抗値

エレメントパターン	抵抗 (mΩ)
未加工型	1.93
ジグザグ型	6.5
平行型	2.23

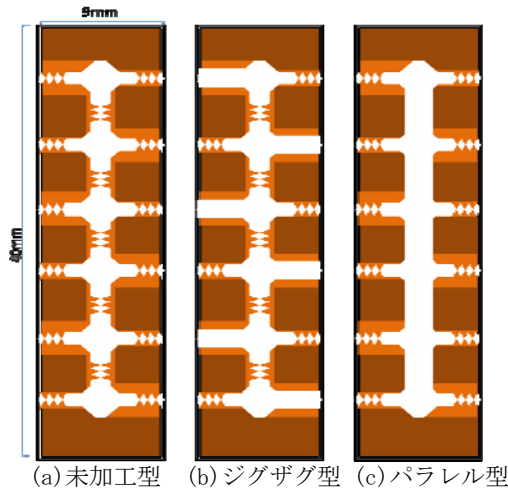


図4 I<sup>2</sup>t 値比較用ヒューズエレメント

このときのジグザグ型ヒューズをインテリジェントヒューズが完全に機能した場合とし、平行型を従来のエッチドヒューズと見なして、遮断性能の比較を行い、インテリジェントヒューズとの性能比較を行った。なお、各ヒューズの抵抗値を表1に示す。

(2) 単位エレメントヒューズの遮断試験

連絡ヒューズの発弧と各遮断点の発弧のタイミングの解明のため連絡ヒューズを一つだけ持つ単位インテリジェントヒューズを用いた。図3に単位インテリジェントヒューズ用遮断試験回路を示す。コンデンサに100Vを充電し、スイッチを投入することで最高値6000A相当の減衰電流を供試ヒューズに通電させて遮断試験を行った。なお、回復電圧は100Vである。単位エレメントヒューズは図5のような4つの直列遮断点(長狭小部、短狭小部)と1つの連絡ヒューズを持つヒューズエレメントを用い、ヒューズエレメントの各部を同図のように定義した。

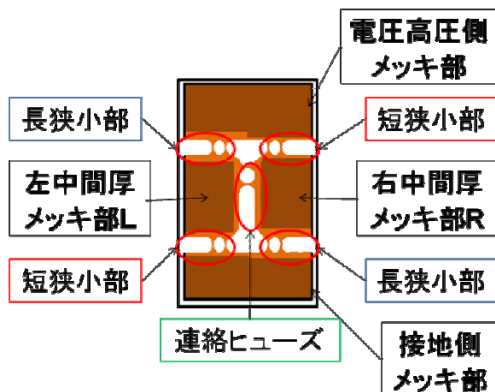


図5 インテリジェントヒューズの各部名称

表2 単位インテリジェントヒューズの遮断点数と抵抗値

エレメント	長狭小部数	短狭小部数	連絡ヒューズ数	抵抗値(mΩ)
サンプルA	2	2	2	1.71
サンプルB	1	4	4	1.74

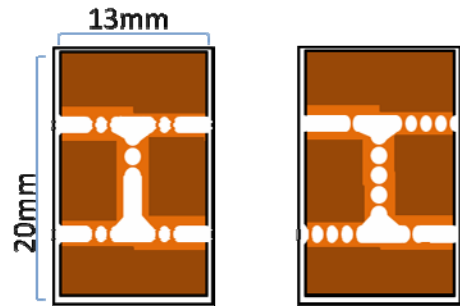


図6 サンプルA 図7 サンプルB

実験ではサンプルA(図6)とサンプルB(図7)を用いた。表2に各遮断点数と抵抗値を示す。

次に単位エレメントヒューズの電流経路変化について説明する。ヒューズは銅の直列遮断点(狭小部)が大電流によって溶断され点弧、アークが発生し絶縁状態となり、電流を遮断する。インテリジェントヒューズは各遮断点の溶断時間に差を設けることで電流経路が変化する。事故電流時に長狭小部が先に溶断し、電流は短狭小部と連絡ヒューズを通過するルートを通り、この時ヒューズの直列遮断点数が2点から3点に変化する。これによってエッチドヒューズの直列遮断点数が増加すると遮断性能が向上する[1]。供試ヒューズは遮断結果の比較用の遮断点が全て2つのサンプルAと、連絡ヒューズを作動させるために遮断点に差を付けた長狭小部4点、短狭小部1点、連絡ヒューズ4点のサンプルBを用いた。遮断試験では、電流、高圧側の電位、中間厚メッキ部の電位L部、R部(図5)をオシロスコープで測定した。

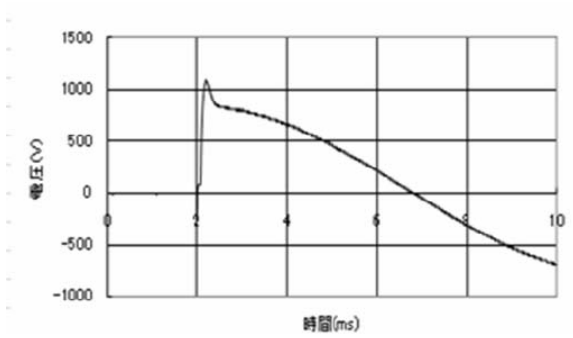
3. 実験結果および考察

(1) インテリジェントヒューズ・エッチドヒューズの性能比較試験

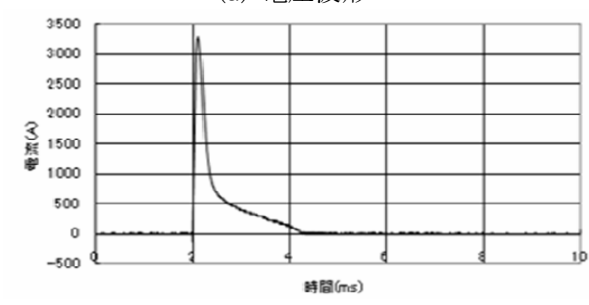
遮断波形を図8、図9、図10に示す。これらの遮断結果から得られた各種値を表3に示す。

インテリジェントヒューズの遮断性能は一般的に全遮断I<sup>2</sup>t値で表され、I<sup>2</sup>t値が小さければ優れたヒューズである。表3より、I<sup>2</sup>t値はジグザグ型が100.5 A<sup>2</sup>sと極めて低い値を示した。これらのI<sup>2</sup>t値を世界各社のヒューズのI<sup>2</sup>t値と比較するため、インテリジェントヒューズの定格電流を抵抗値から求めた。

ジグザグ型は未加工型のヒューズが完全に機能した場合であるので、定格電流は未加工型の抵抗値とする。未加工型ヒューズの抵抗値は1.93 mΩであり、図11のエッチドヒューズの抵抗と定格電流の特性より定格電流は60 Aとなる。

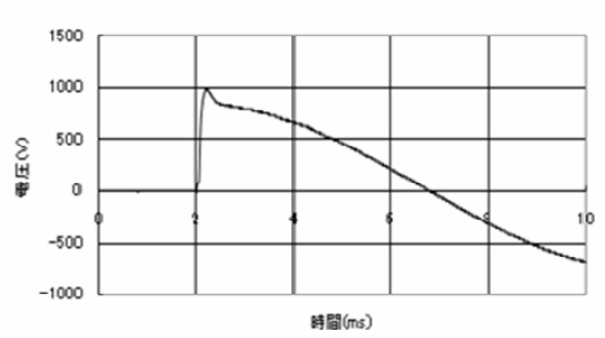


(a) 電圧波形

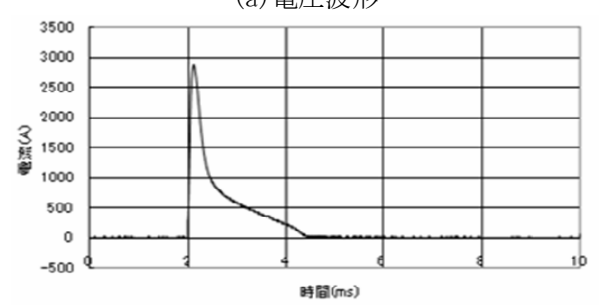


(b) 電流波形

図8 未加工型インテリジェントヒューズの遮断波形



(a) 電圧波形



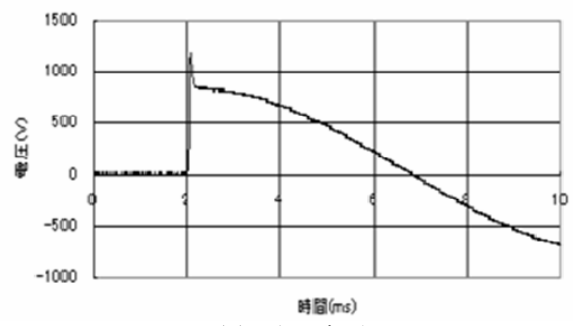
(b) 電流波形

図10 パラレル型インテリジェントヒューズの遮断波形

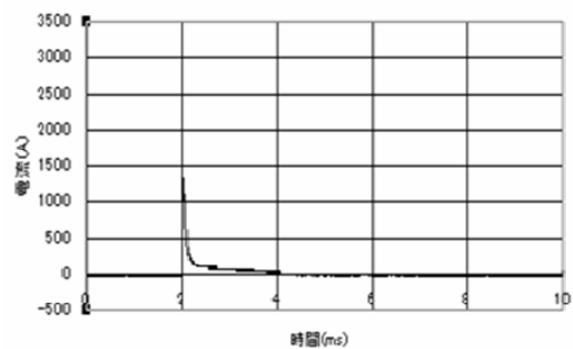
表3-1 インテリジェントヒューズの各種値

エレメント	限流値 (A)	動作過電圧 (V)	全遮断 $I^2t$ 値 ( $A^2S$ )	$di/dt (\times 10^6 A^2S)$	抵抗 (mΩ)
未加工型	3286.4	1098.5	2049.5	41	1.93
ジグザグ型	1332.5	1177.5	100.5	38.2	6.5
パラレル型	2887.7	996.7	2293.7	38.1	2.23

( $di/dt$  は立ち上がり電流の傾き)



(a) 電圧波形



(b) 電流波形

図9 ジグザグ型インテリジェントヒューズの遮断波形

図12からジグザグ型の値が  $100.5 A^2s$  であるのに対し、世界平均値は定格電流 60 A のとき、全遮断  $I^2t$  値が約  $2300 A^2s$  であり、この値を比較すると世界平均値との比は  $1:0.044$  であることがわかった。(全遮断  $I^2t$  値は約  $1/22.8$  に低下する。) よって、インテリジェントヒューズの開発による利益が大きいと言える。

加えて、パラレル型ヒューズの実験の全遮断  $I^2t$  値が  $2293.7 A^2s$  であるので、世界平均値の約

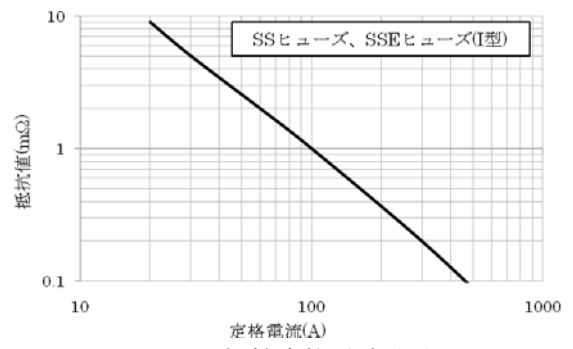


図11 抵抗定格電流特性

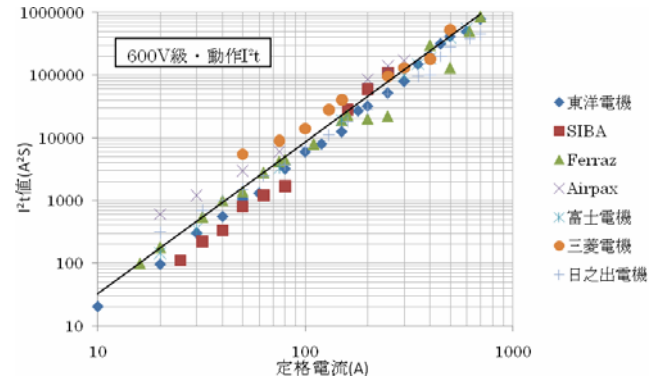


図12 世界各社のヒューズの  $I^2t$  値の平均値

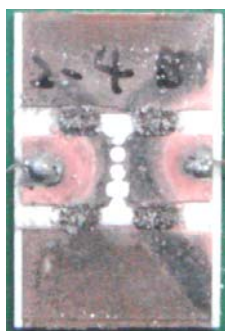
2300A<sup>2</sup>S とほぼ同等である。このことから、パ  
ラレル型ヒューズの遮断試験結果は世界各社のヒュー  
ズと同程度の性能であり、作製したヒューズリン  
クは世界各社のヒューズと比較できる精度で作  
製できていたと言える。

## (2) 単位エレメントヒューズの遮断試験

単位エレメントヒューズの遮断試験後の様子を  
図 13 に示す。図 13(a) よりサンプル A では、長狭  
小部および短狭小部では、電流遮断現象が終わっ  
た後に現れる砂の固まりであるフルグライトが見  
られるが、連絡ヒューズにはフルグライトが現れ  
ておらず、銅の狭小部が残っている。図 13(b) の  
サンプル B では長狭小部、短狭小部および連絡ヒ  
ューズに明らかにフルグライトが付いていること  
が分かり、連絡ヒューズが機能していることが分  
かった。加えて、今回のサンプル B のヒューズに  
おいては、再現性良く連絡ヒューズを機能させる  
ことに成功し、その成功率はほぼ 100%であった。

一例として、サンプル A、サンプル B の遮断試  
験時の電圧・電流波形と L 部、R 部の電位の波  
形を図 14、図 15 に、遮断結果から得られた各  
種値を表 4 に示す。

図 14、図 15 の波形は、上から電流波形、電  
圧波形(ヒューズの高圧側)、左中間メッキ部電  
位(L 部電位)、右中間厚メッキ部電位(R 部電位)、  
電位差波形(L 部電位と R 部電位の測定データの  
差)の移動平均 20 点間の計算値である。図 14  
の波形から L 部電位波形と R 部電位波形は同時  
に立ち上がり、電位差波形も同じであるため長  
狭小部と短狭小部が同時に発弧し、連絡ヒュー  
ズが作動していないことが分かる。



(a) 遮断後のサンプル A



(b) 遮断後のサンプル B

図 13 単位エレメントヒューズの遮断試験後の様子

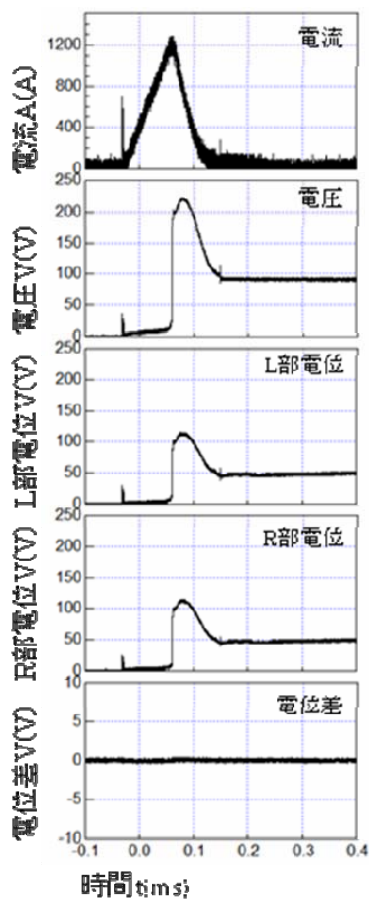


図 14 サンプル A の遮断波形

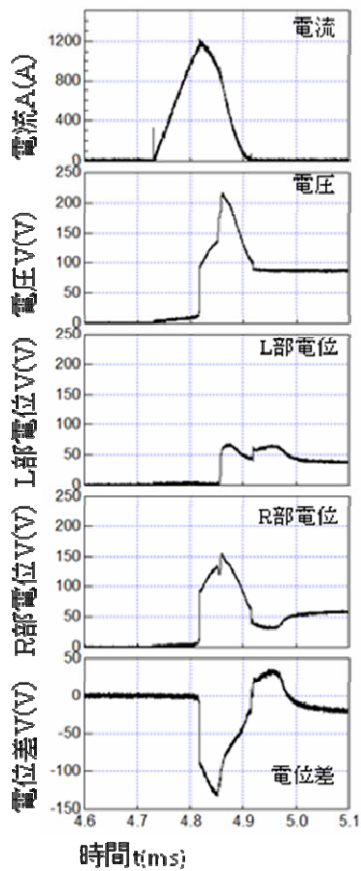


図 15 サンプル B の遮断波形

表4 単位インテリジェントヒューズの各種値

エレメント	遮断点数比	全遮断 I <sup>2</sup> t 値 (A <sup>2</sup> S)	限流値 (A)	動作過電圧 (V)	di/dt (× 10 <sup>6</sup> A/S)	抵抗値 (mΩ)
サンプル A	2:2:2	75.5	1284.8	220.8	14.6	1.71
サンプル B	1:4:4	97.6	1172.1	209.4	15.8	1.74

図 15 では、電流波形で 4.81ms のときに電流が限流し、それと同時に電圧波形、R 部電位波形、電位差波形が変化していることがわかる。更に電流波形は 4.85ms のときにも電流波形の傾きが変化していることが分かり、それと同時に電圧波形、L 部電位波形、電位差波形が変化している。

よって、電流波形の傾きが変化する 2 点で各直列遮断点、連絡ヒューズが点弧したと考えられる。R 部電位波形が先に上昇しているのがヒューズの右下側長狭小部にアークが発生していると分かり、それと同時に電位差波形に電位差が発生していることから連絡ヒューズもアークが発生していると考えられる。その後、L 部の電位が上昇しているため、アーク発生のタイミングは、同時に長狭小部、連絡ヒューズが発弧、その後短狭小部が発弧したと考えられ、電流経路が変化したと考えられる。

表 4 から遮断性能を比較すると、サンプル A と比較し、連絡ヒューズが遮断されたサンプル B は全遮断 I<sup>2</sup>t 値が大きく、限流値、動作過電圧が小さかった。全遮断 I<sup>2</sup>t 値が大きいため、同程度の抵抗値のサンプル A のヒューズと比較して電流遮断性能は低下したといえる。これは、サンプル A とサンプル B の電流波形で電流が限流してからゼロになるまでの違いから明らかである。図 14 のサンプル A の電流波形は、限流してからゼロに至るまでが早いことがわかる。一方、図 15 のサンプル B では 4.81 ms に限流してから 4.85 ms に電流が変化しており、電流が限流してからゼロに至るまでが遅く、これが全遮断 I<sup>2</sup>t 値を大きくしている。

図 15 の電流波形で 4.85ms のときに電流波形の傾きが急になった部分が見られるが、この傾きが電流経路の変化によるものであると考えられる。図 13(b)においては、フルグライトが大きい部分に大電流が流れ、フルグライトが小さい部分は電流が小さかったと考えられ、図 13(b)の単位インテリジェントヒューズにおいては、長狭小部と連絡ヒューズに大きな電流が流れたと考えられる。今回の場合、長狭小部で発弧が起きた後、直ぐに電流が短狭小部に転流しなかったため、長狭小部のフルグライトが大きくなり、I<sup>2</sup>t 値も大きくなったのであろう。短狭小部が発弧した 4.85ms 以降においては、電流が急激に低下して電流を早く遮断できているので、長狭小部から短狭小部への転流が速やかに行われれば、短狭小部と連絡ヒューズの全ての遮断点が発弧して、直列遮断点数の増加で起こり、遮断特性の向上が見られると考えられ

る。

これを改善するためには、今後は各遮断点の溶断時間差を短くすることで、事故電流時に素早く直列遮断点数を増加させ、ヒューズの性能向上を図ればよいと考えられる。

#### 4. まとめ

インテリジェントヒューズの性能比較試験を行い、世界各社のヒューズと比較した際に全遮断 I<sup>2</sup>t 値がインテリジェントヒューズの場合、世界平均のヒューズの全遮断 I<sup>2</sup>t に比べて約 1/22.8 に低下させることができることが明らかになった。

各直列遮断点数に差をつけることで連絡ヒューズを再現性良くほぼ 100%の成功率で作動させることに成功し、遮断試験の電流通電時にヒューズの電流経路を変化させることができた。ただ、全遮断 I<sup>2</sup>t 値はエッチドヒューズより大きいため、電流を転流させるタイミングを早める必要があることが明らかになった。

#### 参考文献

- [1] 浅山, 廣瀬, 山納, 石川, 小林: “高圧半導体保護用エッチングヒューズの開発”, 埼玉大学地域共同研究センター紀要 Vol. 5, pp. 53-59, 2004.