

電力ヒューズの遮断性能試験
(電力用エッチングヒューズの基礎研究)
Breaking Characteristics Test of Power Fuse
(The Basic Research of Power Etching Fuse)

松岡 清継^{1*}、小林 信一²、山納 康²、広瀬 健吾³
Kiyotsugu Matsuoka, Shinichi Kobayashi, Yasushi Yamanou, Kengo Hirose

¹埼玉大学 大学院 理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering

²埼玉大学 工学部電気電子システム工学科

Department of Electrical and Electronic Systems

³ 株式会社 日之出電機製作所

Hinode Electric Co., LTD.

Abstract

For the improvement of etching fuse characteristics, two basic researches were conducted. One is the finding of the best pattern of fuse element, and the other is the finding of the best method of hardening of arc-extinguishing sand.

Test results show that best performances were obtained by the element with 5 serial notchs(5S), 5 parallel notchs(5P), smaller diameter holl(ϕ), and smaller narrow part, and the hardening method of sand with silicon requid.

Key Words: Fuse, I^2t , Equivalent break testing method

1. 目的

エッチングヒューズは、セラミック基板に銅メッキし、エッチングを施してヒューズエレメントを製作する方法であるため、微細なエレメントの設計が可能であり、これにより従来型のヒューズに対比して、事故電流を速やかに遮断し、ピーク電流を低く抑えるので、熱的障害を引き起こす I^2t の値を小さくすることが出来る。また、機械的に堅牢であるから、耐久性に優れており、その結果小型、軽量、低価格の製品を作る事が可能となった。

今年度は、既に実用化されている低圧半導体保護用のエッチングヒューズについて、更に特性を改善する方法として、ヒューズエレメントのパターンの最適形状を求めるための研究と、ヒューズリンクに使用している消弧

砂の固め方の研究を実施した。この研究結果は、半導体保護用の低圧ヒューズのみならず、電力用の高圧ヒューズにも適用可能である。

2. 半導体保護用エッチングヒューズエレメントの最適パターンの研究

2.1 研究方法

半導体保護用ヒューズにおいては、 I^2t が小さい事が最も重要な性能と考えられている。ただし、これは同一の定格電圧電流の下で比較されなければならない。今回の研究で、ヒューズ筒の大きさは、定格電圧の値と小型化の目標によって決められているので、定格電流を決めるものは、ヒューズ筒内で発生する熱量であり、その主たるものは遮断点の発熱であるから、試験用のヒューズを設計、製作するに当たっては次式で表される遮断点の形状係数Kが全ての試料について同一になるようにした。

$$K = (\phi / b) \times (S / P) \times (1 / 100)$$

ここで、記号 ϕ 、 b についてはFig. 1に、記号S、PについてはTable 1に示されている通りである。

* 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255

電話：048-858-3883 FAX：048-858-3883

Email：yamano@ess.saitama-u.ac.jp

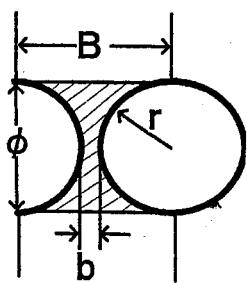


Fig. 1 遮断点の記号

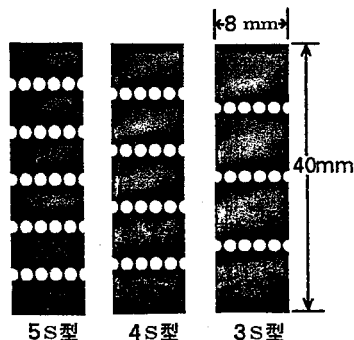


Fig. 2 5 P型エレメントの例

Fig. 2には、試験に使用した5 P型のヒューズエレメントの例を示す。なお設計上の厚さは60 μ mである。各エレメントのbの値を0.09, 0.1, 0.11, 0.12 mmの4種類、Pの値を5 P, 4 Pの2種類、Sの値を5 S, 4 S, 3 Sの3種類とし、これらを組み合わせて合計12種類のエレメントを各3枚、計36枚製作し、遮断試験を行い特性を比較した。

Table 1は各エレメントについての上記数値と、その形状係数を示したもので、Kの値は1.00と3桁まで同一値である。

2. 2 遮断試験方法

遮断試験はFig. 3に示す回路で行った。これは4~7 kVに充電された14,000 μ FのコンデンサC₁と空芯リアクトルL₀によって、商用周波数の共振電流を発生させる方式である。リアクトルの接続を変え

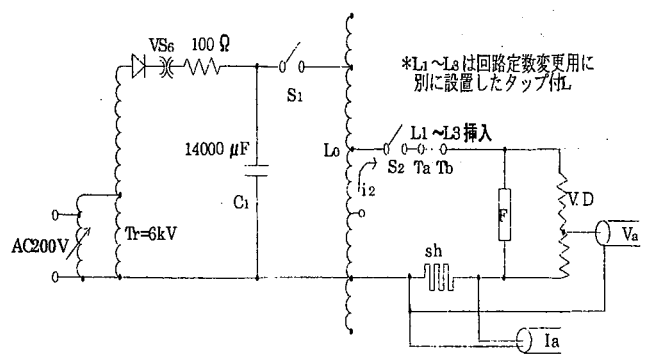


Fig. 3 等価LC遮断試験回路

て、被試験器にかかる電圧を調整できるようになっている。

今回は5,000V充電で、50Hzの共振電流を発生させ、これをステップダウンして、目標の遮断条件を作り出す方法で行われた。

遮断試験時の回復電圧(V₀)、試験電流(I₀)の値をTable 2に示す。Table 2に示された試験値は、I₀値、di/dt値が規格値に対しやや大きく、V₀値がやや低くなっているが、これらの数値は相互に関連しており、回復電圧だけを単独に調整する事が出来ないため、全数値を一致させることは難しい。製品試験の場合は全ての数値が規格値を下回らないように設定するが、今回は開発研究のための試験であるから、Table 2に掲げた数値で実施した。

Table 1 供試ヒューズの形状データと試験結果

	直列遮断部(S)	並列遮断部(P)	ϕ (mm)	b (mm)	形状係数 K ($\times 10^{-1}$ 1/mm)	実験結果 I _m (A)	実験結果 I ² T (A ² S)	補正 I ² T (A ² S)
A	5	5	0.9	0.09	1.00	1329	293	293
B	4	5	1.13	0.09	1.00	1393	411	411
C	3	5	1.5	0.09	1.00	1743	1206	1206
D	5	5	1	0.1	1.00	1595	300	290
E	4	5	1.25	0.1	1.00	1698	546	491
F	3	5	1.69	0.1	1.00	1821	829	747
G	5	4	0.88	0.11	1.00	1688	424	177
H	4	4	1.1	0.11	1.00	1765	618	404
I	3	4	1.46	0.11	1.00	1897	882	576
J	5	4	0.96	0.12	1.00	1953	464	278
K	4	4	1.2	0.12	1.00	2065	634	380
L	3	4	1.6	0.12	1.00	2207	1107	663

Table 2 規格値と試験値の比較

	回復電圧 V_0 (V)	試験電流 I_0 (kA)	dI/dt ($\times 10^6$ A/s)	周波数 (Hz)
規格値	848	141.4	44.4	50
試験値	820	150.9	47.4	50

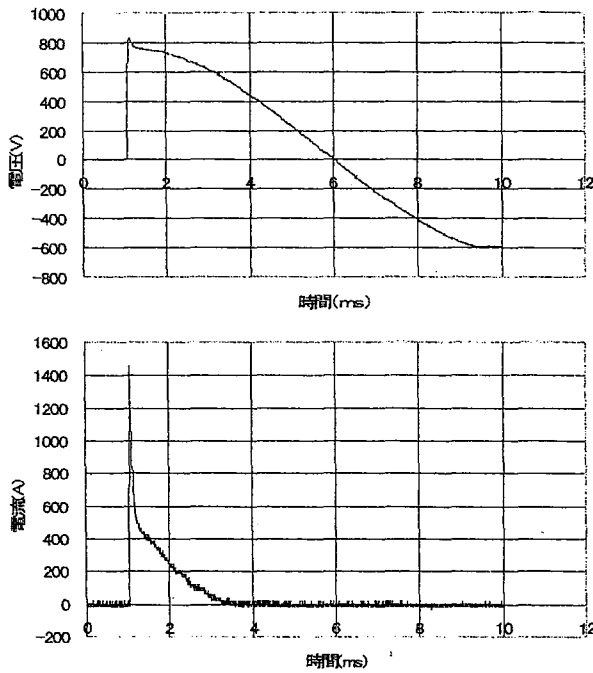


Fig. 4 遮断オシログラムの例 (D)

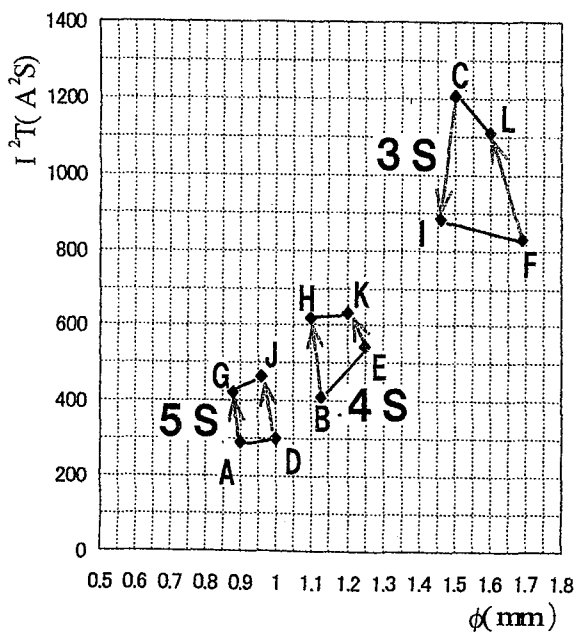


Fig. 5 $I^2t - \phi$ 特性

2. 3試験結果と検討

Fig. 4に代表的遮断オシログラムとしてD型の試験結果を示し、Table 1の右側欄にはピーク電流値 I_m と I^2t 値の各3回の平均値を示した。

Table 1に示した I^2t 値をエレメントの円形穴の直径 ϕ と対比して示すと Fig. 5の様になる。Fig. 5では I^2t 値を5S型、4S型、3S型にグループ化した。 I^2t は5S<4S<3Sの順に大きくなっている。更に各グループ内の各エレメントの I^2t の値の違いを見ると、例えばAとGでは ϕ の値はほぼ同一であるのに I^2t の値に差が出るのは、bの値とPの値の違いによって生じたものと考えられる。狭小部の幅bの値が大きく、並列個数Pが少ない程、 I^2t 値が大きくなると言える。他の各点についても調べた結果、同じような状態である。ただし、3S型のC→Iのみは例外である。

ここで I^2t に最も大きく影響を与える I_m の特性について検討すると、Fig. 6は、C点を不安定遮断による特異点として除外すれば、他は極めて規則的な関係があることが分かった。更に詳しく調べて見ると、 I_m 値はbに比例して大きくなり、Pにも比例して大きくなっている。

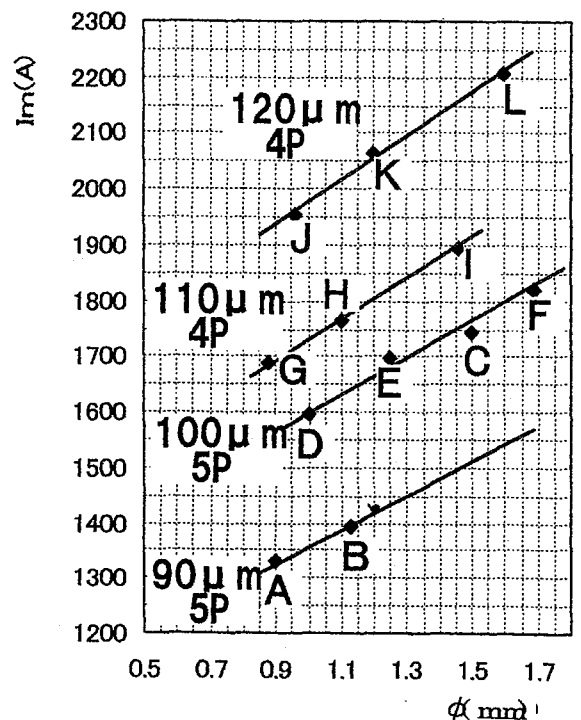


Fig. 6 $I_m - \phi$ 特性

以上の関係は $I^2 t$ 値においても同様であると考え、Table 1 の A の $I^2 t$ 値を 1 として他の全てを b_n/P_n で補正し、補正 $I^2 t$ として Table 1 の右端に記入した。

この値を使って $I^2 t - \phi$ 特性を表示すると Fig. 7 の様に各点はある線上に並ぶ。本図で分かる事は、D → F で示される下限特性と、D → C で示される上限特性がある事である。これは 3 S 型、4 S 型がアーク電圧が上昇せず不安定遮断のためと言うことができ、3 S 型、4 S 型は定格 600 V 用のヒューズリンクとしては不適格であり 5 S 型が適当と考えられる。Fig. 7 から $\phi = 0.95 \text{ mm}$ 付近に $I^2 t$ 値の最小値があり、 $I^2 t$ 値の曲線は V 字型になると考えられる。

今回の試験結果は、全て A 型エレメントを基準に計算されている。A エレメントの抵抗値は、平均 4.9 mΩ であり、これに対応する現用 40 A 定格のヒューズの抵抗値は平均 5.3 mΩ であるから、今回の試験で使用したヒューズは全て定格が 40 A と考えてよい。

結論として、今回の試験から最も良い特性が得られるエレメントのパターンは、5 S 直列型で $\phi = 0.95$ のものであり、狭小部の幅はエッチングの精度の許す限り細く、並列数は定格電流によって決定すれば良い事が分かった。 $I^2 t$ の値は、5 S 5 P で 0.95 ϕ とすれば、270 A²s という結果が得られており、この値は現用の同定格ヒューズの $I^2 t$ 値 560 A²s に対して 50% 以下に抑えられる事が分かった。

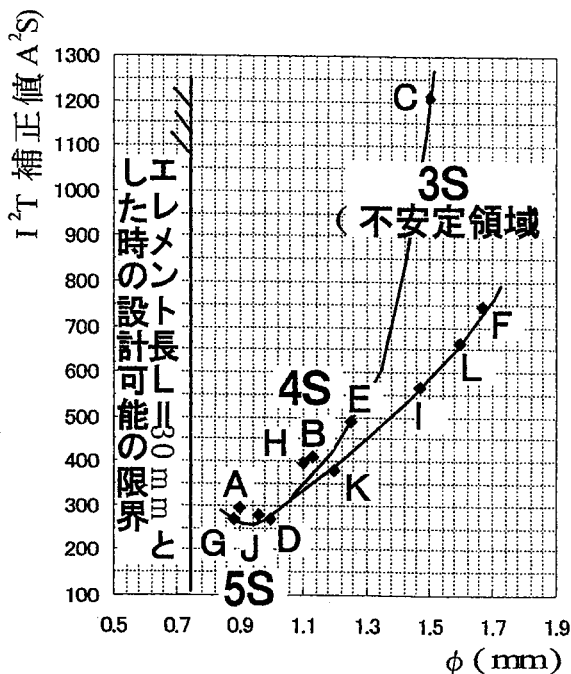


Fig. 7 $I^2 t$ 補正值特性

3. エッチングヒューズリンクの消弧砂の固め方の研究

3.1 研究方法

半導体保護用ヒューズにおいては、消弧砂を水ガラスで固めるのが最近の傾向である。一方、砂をより固く詰めれば、水ガラスで固める方法より経済的で信頼性も高くなるという考え方もある。しかし、これらはヒューズメーカーのノウハウに属し、具体的なデータは報告されていない。

低圧から特別高圧までの広い範囲にわたってエッチングヒューズの実用化を目指す上で、消弧砂の固め方は重要な課題である。そこで、水ガラスで固める方法、消弧砂のみを固める方法、及び現在進めている新しい方法としてのシリコン溶解液を使って固める方法の3種類について試験を行い、特性を比較した。

3.2 遮断試験方法

遮断試験は、2.2節の試験で使用した Fig. 3 の回路で行ったが、途中で試験回路の部品に不具合が生じたため、以降の試験は Fig. 8 に示す回路で行った。この回路は 800 V に充電された 125,000 μF の電解コンデンサを放電させ、推定短絡電流最大約 50 kA を流し、且つ 50 Hz に相当する回路電圧を加えるようにしたものである。

試験内容は、Table 3 の遮断試験計画表に示す通りで、JEM1383「半導体保護用ヒューズ」に規定されている遮断試験条件の I_1 (定格遮断電流) 及び I_2 (アークエネルギーが最大となる回路電流) について実施した。

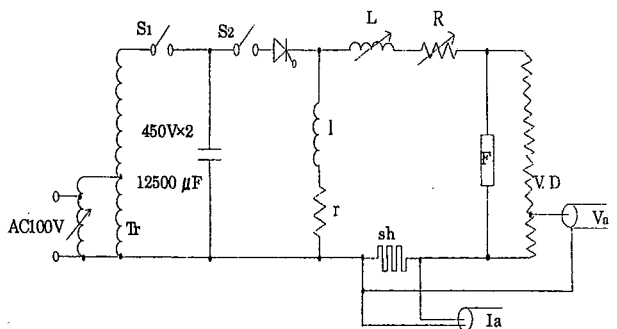


Fig. 8 低圧専用型 LC 遮断試験回路

Table 3 遮断試験計画表

試料No.	試験回路	遮断条件	回復電圧 (V)	推定短絡 電流(kA)
1~3	Fig. 3	I ₁ 試験	615	58
4~14	Fig. 8	I ₁ 試験	773	68
15~20	Fig. 8	I ₂ 試験	773	68

供試ヒューズの外観は Fig. 9 に示すもので、次の3種類である。

①消弧砂の入ったヒューズ筒に水ガラスを注入したもの。

②消弧砂の入ったヒューズ筒にシリコン溶解液を注入したもの。

③消弧砂のみ入れたもの

また、ヒューズエレメントのパターンは Fig. 1 の5S型と同じ形状であるが、設計上の厚さは45μmである。

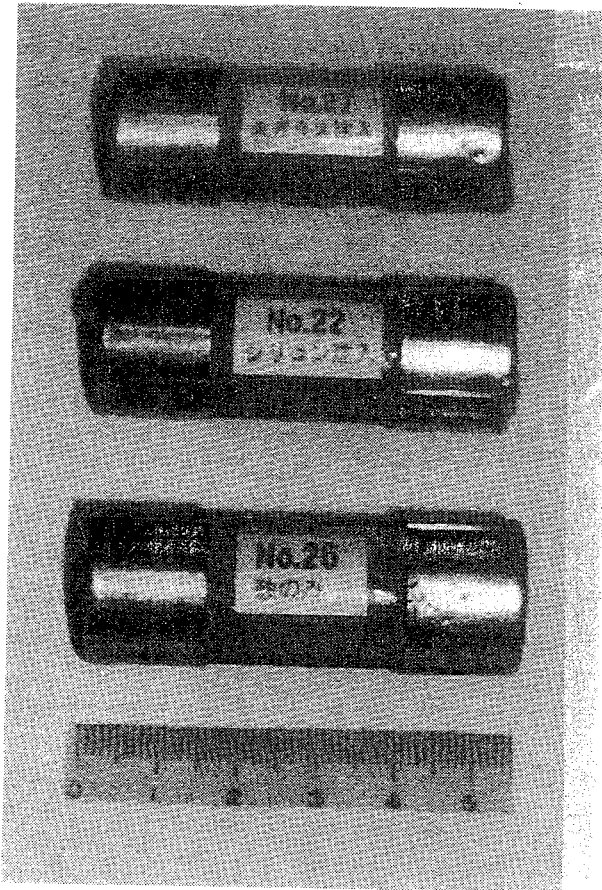


Fig. 9 遮断試験用ヒューズ外観

3. 3試験結果と検討

遮断試験結果の一覧表を Table 4 に示す。また代表的な遮断オシログラムを Fig. 10 に示す。これらの結果から、砂のみ場合には全ての条件で限流値が大きく、 $I^2 t$ の値も大きいので、遮断特性が悪いと言える。①水ガラスを注入したものと、②シリコン溶液を注入したものの性能の差は、短絡電流が小さいところでは殆どないが、電流が大きくなると②のほうが限流値、 $I^2 t$ の値共に小さくなっている。

Fig. 11 に遮断後のエレメントの分解図を示しているが、遮断によって生じる溶融体 (Fulgurite) の大きさが、砂のみの場合には非常に大きいことが分かる。

全ての性能をまとめた平均値を Table 5 に示す。要点は次の通りである。

(1) $I^2 t$ の値の最も小さいのはシリコン注入品であり、続いて水ガラス注入品が小さく、砂のみは極めて大きいので、固める事の必要性が確認された。

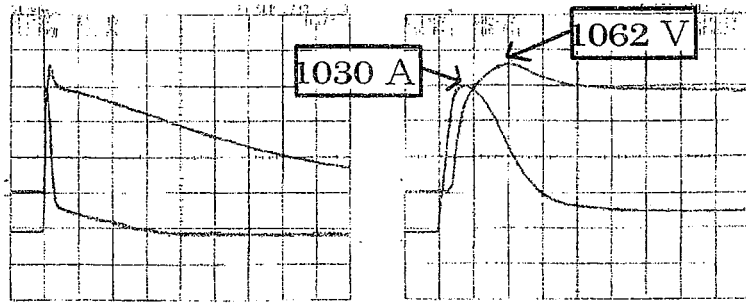
(2) 遮断直後の絶縁抵抗値が高いのはシリコン注入品で、 ∞ となっている。続いては砂のみのもので、水ガラス注入品は最も低い。しかし低圧ヒューズについての JEM規格では、200kΩ以上となっているので何れも規格を満たしている。製作コストの面から見ると、水ガラスは溶媒が水であり、また一液性であることによる使い易さもあって使用されているようである。ただし、高圧ヒューズでは問題であり、シリコン注入品が最優位となる。

(3) 砂を固めることにより、ヒューズエレメントで発生する熱が外管に伝わるまでの熱抵抗が低くなるので、同一エレメントを使用した場合に定格電流を大きくすることが出来るという利点がある。

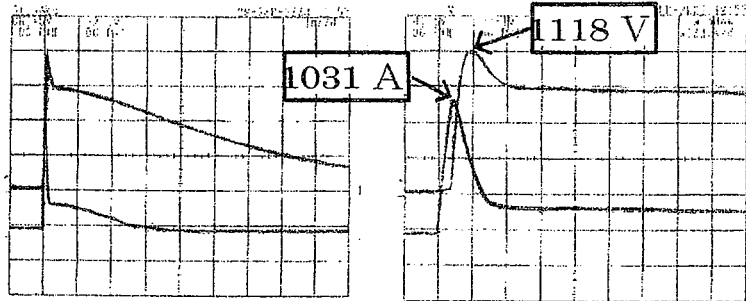
別途に実施した温度上昇試験の結果、シリコン液注入品と水ガラス注入品の定格電流は35Aで、砂のみの場合は30Aとなることが確認された。

$I^2 t$ の値は、同一定格電流値で比較する必要がある。定格30Aのヒューズを定格35Aのヒューズと比較する場合には、 $I^2 t$ 値を $(35/30)^2 \approx 1.4$ 倍する必要がある。従って砂のみの場合は益々大きな値となる。3種類のヒューズの定格電流を35Aとして比較した時の $I^2 t$ 値は Table 6 のようになる。

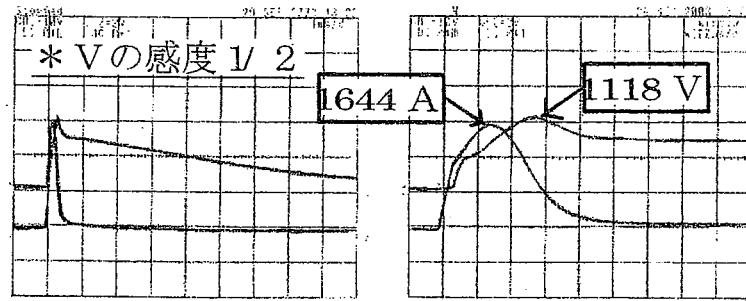
以上のように、消弧砂を固めることは定格電流の増大と $I^2 t$ 値の低減と両方に役立ち、極めて重要であることがわかった。



(a) 水ガラス注入品 (Nb 7)



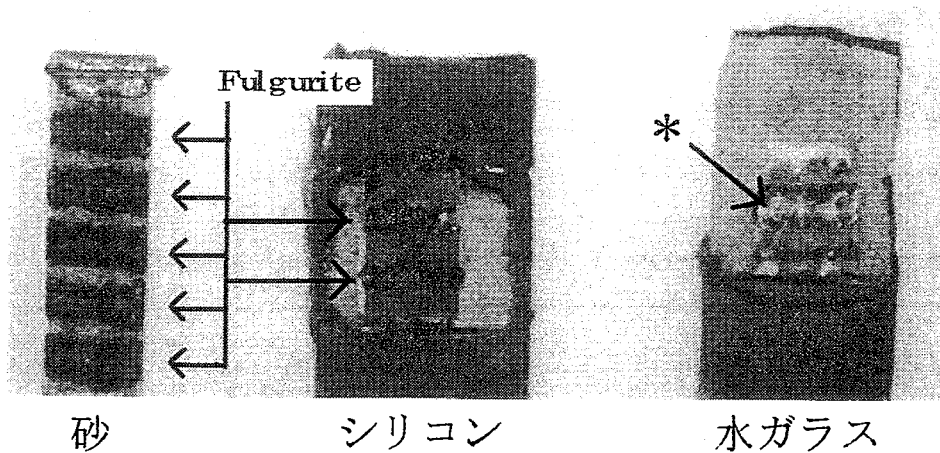
(b) シリコン注入品 (Nb11)



(c) 砂のみ (Nb14)

横軸(時間軸) 左側: 1 ms/div, 右側: 100 μ s/div

Fig. 10 遮断試験波形



*水ガラスは最も硬く、分解時にFulguriteが剥がれた。

Fig. 11 遮断試験後のエレメント

Table 4 遮断試験結果

試料 No.	試験条件	固め方	エレメント抵抗 (mΩ)	動作過電圧 (V)	限流波高値 (A)	溶断時間 (μs)	アーク時間 (ms)	動作時間 (ms)	溶断I ² t (A ² S)	全遮断I ² t (A ² S)	絶縁抵抗遮断直後 (MΩ)	絶縁抵抗遮断3日後 (MΩ)
1	I ₁	水ガラス注入	7.8	783	1059	21	2.1	2.1	8	38	20	200
2		シリコン注入	7.82	717	1016	23	2.4	2.4	8	39	∞	∞
3		砂のみ	7.72	700	1067	22	3.5	3.5	8	609	75	500
4		水ガラス注入	8.05	994	1140	41	3.4	3.4	14	213	5.5	80
5		"	8.45	994	1130	40	3.4	3.4	13	210	9	80
6		"	8.24	1014	1255	41	2.8	2.8	14	258	8	110
7		"	8.53	1062	1130	40	3.6	3.6	13	209	4	140
8		シリコン注入	8.41	1014	1140	41	3.4	3.4	11	113	∞	∞
9		"	8.49	994	1030	40	3.0	3.0	11	92	∞	∞
10		"	7.89	1004	1039	43	2.8	2.8	12	95	∞	∞
11		"	8.55	1118	1031	40	3.3	3.3	10	93	∞	∞
12		砂のみ	8.41	1094	1790	41	5.4	5.4	17	435	20	250
13		"	8.02	1064	1650	47	5.7	5.7	16	450	5	150
14		"	8.5	1118	1644	43	5.1	5.1	16	420	100	900
15	I ₂	水ガラス注入	8.35	990	290	1300	4.4	5.7	43	170	5	75
16		"	7.73	1034	288	1680	3.7	5.4	42	153	3	420
17		シリコン注入	8.26	1100	270	1470	3.3	4.7	33	113	∞	∞
18		"	7.91	1258	264	1470	2.5	4.0	31	95	∞	-
19		砂のみ	8.13	1292	373	1530	8.5	10.0	40	660	20	200
20		"	9.10	1006	354	1544	12.7	14.2	38	790	25	600

Table 5 試験結果のまとめ

	I ₁ テスト			I ₂ テスト			定格電流値 (A)
	限流値 (A)	I ² t (A ² s)	絶縁抵抗 (MΩ)	限流値 (A)	I ² t (A ² s)	絶縁抵抗 (MΩ)	
水ガラス注入品	1,164	223	6.6	289	162	4	35
シリコン液注入品	1,060	98	∞	267	104	∞	35
砂のみ	1,695	435	42	354	790	25	30

Table 6 定格電流を35Aに換算した場合のI²t値 (A²s)

	I ₁ テスト	I ₂ テスト
水ガラス注入品	223	162
シリコン液注入品	98	106
砂のみ	609	1,106

4. まとめ

(1) 半導体保護用ヒューズリンクの最適パターンを求める研究では、 I^2t の値を最も小さくする最適パターンがあることが分かり、 I^2t 値の曲線はV型特性になると考えられる。今回の試験では、 ϕ を更に小さくしていくと、どのような I^2t 値になるかまでは明らかにできなかったが、今後、 $\phi=0.9\sim 0.7$ 付近についての試験を行い確認したい。

また、 I^2t 特性はPの値によって大きく変わる事が分かり、正確な試験結果を得るにはPの値を同一にして、比較試験をしなければならないことが分かった。

なお、今回の試験で得られた I^2t の最小値は、 $270A^2s$ であり、この値は現用品のそれに比較して50%も低い値である事が分かった。

(2) エッチングヒューズリンクの消弧砂の固め方の研究では、

①消弧砂を固める方法の効果が極めて大きい事が分かった。

② I^2t を小さくする効果については、 I_1 テスト及び I_2 テストを通して、シリコン液注入品が水ガラス注入品に対してやや勝っている。

③遮断後の絶縁抵抗値では、水ガラス注入品が極めて低い値となることが分かった。しかしその値は低圧ヒューズリンク限っては、なお十分な値であるから、水ガラスの経済性と作業の簡易性を考えると、評価できる場合もある。

④高圧ヒューズリンクに限ってはシリコン液注入品が最適と考えられる。

最後に、本研究にあたりご協力頂きました浅山三夫氏に心より感謝致します。

5. 参考文献

[1]松岡清継、小林信一、山納康、広瀬健吾、「半導体保護用エッチングヒューズエレメントの最適パターンの研究」、平成15年電気学会電力・エネルギー部門大会、分冊Bpp155-156(2003-8)

[2]松岡清継、山納康、小林信一、広瀬健吾、「半導体保護用エッチングヒューズの消弧砂の固め方の研究」、電気学会
放電・開閉保護・高電圧合同研究会、ED-03-236, SP-03-158, HV-03-151(2003-11)

[3]広瀬健吾、工藤一衛、「電力ヒューズ等価遮断試験法の研究」、芝浦工業大学工学研究所委託研究報告書