

直流高電圧 1500V 電車用ヒューズの試作と実用化

Development of the DC1500V High Voltage Fuse for Train Use

石川 雄三¹、浅山 三夫²、廣瀬 健吾²、山納 康²、小林 信一^{2*}
Yuzo Ishikawa¹, Mitsuo Asayama², Kengo Hirose², Yasushi Yamano², Shinichi Kobayashi²

¹ 根本特殊化学株式会社

Nemoto & Co.,LTD

² 埼玉大学 大学院 理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

Abstract

This article describes the development of the DC1500V high voltage fuse for train use. At first the performance required to the fuse was investigated. Then test results of trial products of DC1500V etching fuses were shown.

Recently JIS standard of the fuses for train use was considerably revised based on IEC standard. We conducted current breaking test according to the new JIS standard. It was found that etching fuses of from 75A to 110A rating have higher current breaking performance both in the very large inductive circuit like 20mH and in the higher short circuit like 25kA.

By test results of these breaking tests and temperature rise test, we can presume to put the invention to practical use up to 500A rating DC 1500V high voltage etching fuse for train use.

Key Words: DC fuse, high voltage fuse, etching fuse

1. 緒言

本研究は、平成 19 年度埼玉大学地域オープンイノベーション支援共同研究により、平成 20 年 8 月より平成 21 年 3 月までの間に根本特殊化学株式会社と共同で実施したものである。

2. 研究の目的

直流 1500V の電車の主回路には、事故電流の保護用として筒形の主ヒューズが使用されている。近年高速度遮断器の高性能化に伴い、JR の新造車では高速度遮断器を使用してヒューズを省略しているが、

JR 以外の公営鉄道および私鉄各社では、従来通りの設計思想に基づき依然として筒形の主ヒューズを使用している。

電車の主回路は、流れる電流が大きいためヒューズの定格電流が大きく、かつインダクタンスの大きな負荷が接続されているため事故電流の遮断時には非常に大きなエネルギーを処理しなければならず、その設計、製作には高度の技術が必要である。

旧 JIS 規格では、使用されているヒューズの性能を考慮して定められている条項も見られたが、現在各種の機器の JIS 規格において IEC 規格との整合が図られている状況であるため、鉄道車両用高圧ヒューズにおいても新しい JIS 規格が制定され、高性能のヒューズが求められつつある。

* 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 2 5 5
電話：048-858-3849 FAX：048-858-9419
Email：tiiki@ml.saitama-u.ac.jp

本研究ではこれまでに実施された高圧半導体保護用のエッチングヒューズの開発成果^[1]を基に、高性能の直流高電圧 1500V 電車用ヒューズの試作を行い、実用化の検討を行った。

3. 電車用直流 1500V ヒューズに要求される性能

本研究の対象である電車の直流 1500V 定格の主回路用ヒューズは、電車の駆動用主電動機の回路の保護用に使用されるものであるから、十分な通電容量を有し、事故時の短絡電流を異常なく遮断できると共に、過電流に対しても所定の時間—電流特性を備えることが要求されている。

1976年に制定された JISE4901「鉄道車両用直流ヒューズ」^[2]は現在は廃棄され、新たに 2007年に JISE5004-5「鉄道車両—電気品：高圧ヒューズ」^[3]が発行され、標準規格となっている。

しかしながら JISE5004-5 は、IEC60077-5 を基に作成されているため、遮断試験電圧の規定など国内の実情に合わない箇所があるため、JISE4901 の内容を採り入れた数値を選択することも認められている。

今回実施した種々の確認試験は、一部 JISE4901 の内容を基にし、JISE5004-5 の IEC 基準の規定にも対応できるように選定した内容で行った。Table 1 に両規格の比較値を示す。

Table.1 電車用ヒューズ試験規格の比較

項目	JISE4901	JISE5004-5	
遮断試験	①使用電圧	1500V	1500V
	②定格電圧	1500V	1800V
	③遮断試験電圧	1500V	1950V
	④回復電圧	③×0.8以上	1950V以上
	⑤最大アーク電圧	4300V	③×3
	⑥試験回路定数	20mH, 4kA 7.5mH, 9kA *	時定数30ms, 5kA 時定数20ms, 5~25kA 時定数10ms, 25kA
温度上昇試験	①通電電流	[定格電流]×0.8	[定格電流]
	②通電時間	1時間	連続
	③温度上昇限度	Table 3 に示す値	Table 3 に示す値
溶断特性試験	[定格電流]×1.2で5分間溶断しない [定格電流]×3で溶断時間を測定	[電流]—[時間]特性で保証する	

*規格本文で規定はしていないが、解説で必要なことを述べている

太枠内が今回の試験に適用した内容

4. 遮断特性試験の方法と試験結果

ここでは、電車用ヒューズに要求される諸特性の中で最も重要な遮断特性について示す。

4.1 DC 高電圧ヒューズの等価試験法の検討

電車の直流 1500V ヒューズの遮断試験では、20mH という大きなインダクタンスの回路の試験も含まれているため、アーク時間が長くなり、試験設備の容量によっては電源電圧の降下を生じる。しかし、遮断完了時における回復電圧は規定値以上に保つ必要がある。

このため最終的には、慣性の大きな大容量の回転機を使用して、実際の定格電圧をかけて行わなければならないが、ここでは当大学の LC 遮断試験装置を使用する等価試験法について説明する。

4.1.1 大容量コンデンサの放電を利用する方式

Fig.1 に示すように、本学の LC 遮断試験設備の回路で、14,000 μF のコンデンサを規定の電圧に充電し、L—R を通してヒューズに大電流を流し遮断試験を行う方式である。この際、前述のようにコンデンサの電圧が、放電電流の大きさと、持続時間に応じて減少するので、その減少分を見込んで予め充電電圧を高くしておく必要がある。これにより遮断完了時にヒューズの両端にかかる電圧、すなわち回復電圧を規定値以上に保つことができる。ただし、充電電圧を過度に高くすることは、ヒューズが溶断し発弧し始めの電圧が非常に高くなるので、ヒューズにとっては、荷酷な遮断条件となるため充電電圧を的確に選定することが重要である。本研究では、この方式で遮断試験を行った。

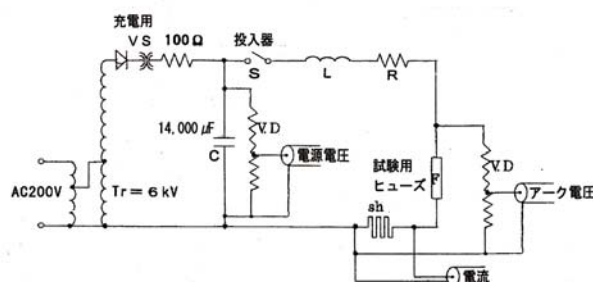


Fig.1 DC 遮断試験回路

4.1.2 合成試験法による遮断方式

高圧大電流を流すための設備は、非常に大掛かりとなるため、低圧の大電流源装置から電流を流して溶断させ、溶断後直ちに高圧電源から高圧電流を供給する方式がある。アーク時間が比較的短い場合には、十分な等価性が得られると考えられるが、この方式には特殊な回路部品が必要となるため、本研究では、実施できなかった。

4.2 予備試験の結果

直流 1500V 用のヒューズを設計するに当たり、高圧半導体保護用のヒューズエレメントを使用して予備試験を行い、最適なエレメントの形状を決めることにした。

予備試験の結果を Table 2 に示す。試験結果から得られた主要な点を次に示す。

Table 2 予備試験の結果

No.	エレメント	抵抗値 (mΩ)	充電電圧 (V)	限流値 (A)	アーク電圧 (V)	残留電圧 (V)	絶縁抵抗 (MΩ)
1	60S39P	16.63	3,000	1,078	9,107	2,800	∞
2	79S30P	10.79	3,000	1,196	7,406	2,700	40
3	79S30P	8.61	3,000	1,395	5,580	1,700	1
4	40S48P	12.40	3,000	1,158	8,766	2,780	20
5	39S39P	12.24	2,000	1,003	6,842	1,710	75
6	39S18P	8.94	2,500	1,108	4,697	1,700	2.5
7	35S18P	10.42	2,300	984	5,345	1,650	6

試験回路のインダクタンスはいずれも 20mH

(1) 直列遮断点数(S)の値には下限値があり、それ以上であれば、アーク持続時間の長い 20mH の回路の遮断でも、十分であることが分かった。

それ以上の遮断点がある場合には、電流は良く遮断されるが、アーク電圧が異常に高くなり、かつ一部の遮断点のみで発弧し、他の遮断点は溶解せずに残っている現象が見られた。Fig.2 にその例を示す。



Fig.2 遮断後のエレメント図

Fig.2 では、両端が溶断せずに残っている。この原因は、溶断時に両端部からは熱が速やかに外部端子の方に移動するため、狭小部（遮断点）が溶断温度に達しなかったためと考えられる。

(2) 規格の規定値に従いアーク電圧を試験電圧の 3 倍以下に抑えるには、直列遮断点を必要な数に制限する必要がある。その代わりにアークが持続した時に蒸発する銅の量を少なくし遮断性能を良くするために、遮断点の薄メッキ部分の長さ(Fig.3 の W)を長くし、かつエレメントの抵抗値を少なくして電流定格を大きくするために、遮断点間の厚メッキ部分の長さ(Fig.3 の E)を長くするのが望ましい。

(3) 半導体保護用ヒューズでは、動作 I^2t を極力小さくするために、並列遮断点数(P)を多くする設計にしてあるが、予備試験の結果では、むしろ P が少ない方が限流値とアーク電圧が低くなっているため、適当な並列遮断定数を設定した。

以上の点を考慮して、本試験を行うために Fig.3 に示すようなエレメントと、Fig.4 に示される外形のヒューズリンクを設計し、試作した。筒の長さは現用品との互換性を考え 300 mm とした。

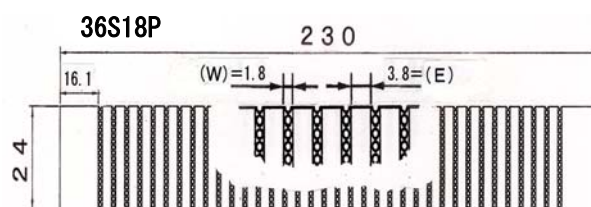


Fig.3 試験用エレメント図



(A)400A、(B)200A、(C)100A

Fig.4 試作ヒューズリンク

4.3 試作品の試験の結果

試験は従来の規格を参考に、5000A, 20mH および 9000A, 7.5mH を中心に実施した。Table 3 に遮断試験結果の一覧表を、Fig.5 にヒューズ No.31、定格 90A 相当のヒューズの 5000A, 20mH 回路での遮断オシログラムを示す。

Table 3 遮断試験結果一覧

ヒューズ No.	エレメント S-P	抵抗値 (mΩ)	回路のL (mH)	充電電圧 (V)	限流値 (A)	溶断時間 (ms)	アーク時間 (ms)	アーク電圧 (V)	残留電圧 (V)	絶縁抵抗 (MΩ)
39	36S18PX2	3.98	0.8	3,500	4,398	1.1	12.5	6,874	2,806	350
36	36S18PX2	4.03	2.5	4,000	4,475	3.0	9.3	6,117	2,659	6
38	36S18PX2	4.11	7.5	4,000	3,446	7.1	12.2	6,109	1,839	14
37	36S18PX2	4.13	20	4,500	2,498	10.2	26.2	5,293	1,021	1.2
32	36S18P	5.29	7.5	4,000	2,622	5.3	11.2	6,251	2,793	6.5
31	36S18P	5.74	20	4,000	2,118	11.7	19.0	5,695	2,250	1.2
33	35S18P	7.45	7.5	3,300	2,018	5.0	9.0	5,896	2,439	22
40	36S18P	7.96	20	3,600	1,690	10.1	16.2	6,267	1,900	35

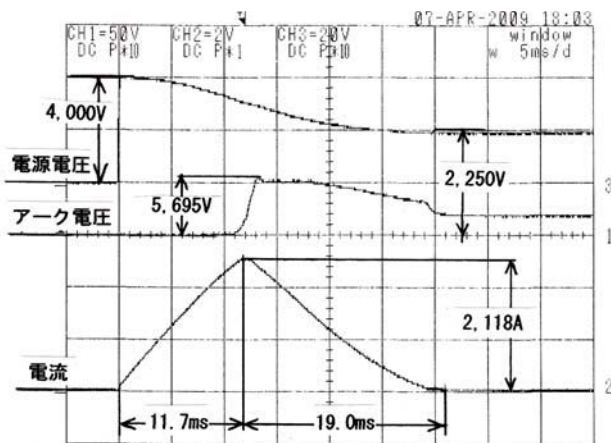


Fig.5 遮断試験オシログラムの例(ヒューズ No.31)

試験時の電源電圧 (コンデンサの充電電圧) は、前述のように通電による電圧降下を見込んで、規定

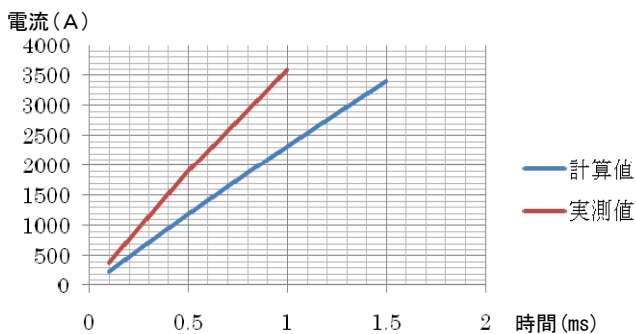


Fig.6 0.8mH,固有電流 25kA の電流立ち上りの 1950V より高かったが、高すぎた場合とやや不足

の場合が生じた。

試験 No.39 は、1950V, 0.8mH で固有電流 25kA (時定数 10ms に相当) の条件で行ったが、電流の立ち上がり波形を比べると、Fig.6 に示すように実測値は、充電電圧が高いため、計算値を上回っており、25kA 以上の固有電流を遮断したことを示している。

Table 3 から、いずれの条件でも十分な遮断容量を有していることが確認された。またアーク電圧の値が 6000V を超えているものもあるが、その時点の電源電圧は 1950V より 1000V 以上高くなっているため、その差を引けば 6000V 以下になり規定値(1950V の 3 倍)内に収まると考えて良いであろう。

なお、試作品として、抵抗値が 2.8mΩ (150A 相当)、および 1.4mΩ (250A 相当) のヒューズリンクも製作したが、抵抗値が低いため電源電圧の降下が大きくなるので、1950V での試験は不可能と判断し試験は中止した。

5. 温度上昇試験による定格電流の確認

6 種の抵抗値のヒューズリンクについて温度上昇試験を実施した。

一例として抵抗値が 3.98mΩ のヒューズリンクの各部の温度上昇値を Table 4 に示す。

今回の試験では、1 時間後の温度上昇で定格値を決めることにした。新しく制定された JIS5004-5 の規定では、最終の飽和温度が規定値を超えないことを要求しているが、文献^[2]の解説に示されるような現実的な考え方に従って実施した。なお、各試験の上昇限度値はいずれも端子間の電圧降下の値で決定された。これはエッチングヒューズの場合に、端

Table 4 温度上昇試験結果の例

ヒューズリンク抵抗値: 3.98mΩ, 通電電流: 110A, 周囲温度: 20°C			
測定箇所	上昇値(°C)	規定値(°C)	備考
筒	81	130	ガラス繊維強化エポキシ樹脂
クリップ(1)	33	65	銅板に錫メッキ
クリップ(2)	35	65	銅板に錫メッキ
端子(1)	25	65	銅板にニッケルメッキ
端子(2)	27	65	銅板にニッケルメッキ
電圧降下倍率	1.55	1.6	[常温の抵抗値]×[通電電流]の値に対する倍率

子間の電圧降下を[常温時の抵抗] x [通電電流]の 1.6 倍を限度と定めていることによっている^[4]。

試験結果から、ヒューズリンクの抵抗値と定格電流の間には、Table 5 および Fig.7 に示すような関係があることが分かった。

Table 5 ヒューズ抵抗と定格電流の関係

No.	エレメント 枚数	抵抗値 (mΩ)	定格電流 (A)	筒寸法
1	4	1.42	250	450X530X300
2	2	2.79	140	360X430X300
3	2	2.86	155	450X530X300
4	2	3.98	110	360X430X300
5	2	4.84	100	360X430X300
6	1	5.29	90	330X390X300
7	1	7.45	75	330X390X300
8	1	7.86	75	360X430X300
9	1	9.57	52	360X430X200

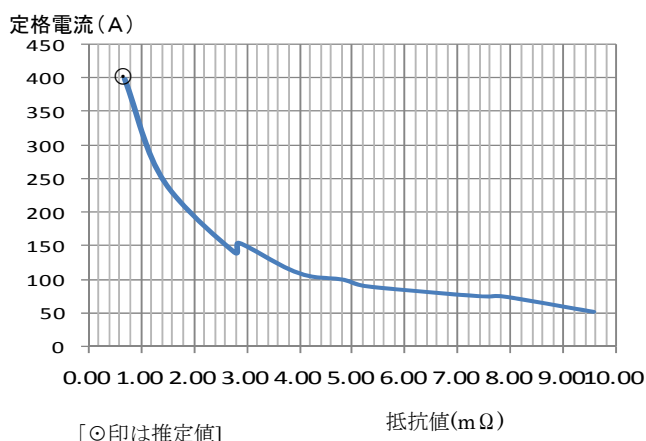


Fig.7 ヒューズ抵抗と定格電流の関係

6. 溶断特性の確認

溶断特性は、JIS5004-5 では電流—時間特性で表示するように決められているが、この特性曲線を決めるには数個のヒューズリンクを用いて各電流に対する溶断時間を測定する必要がある。本研究では試験用ヒューズリンクの数が不足であったため、JISE4901 に準じて2本のヒューズについて実施した。その結果は次の通りである。

(1) 定格電流の120%を5分間通電したがいずれも溶断には至らなかった。

(2) 定格電流の300%を通電し、溶断までの時間を測定した結果、1本は2分30秒、1本は2分50秒と

のデータが得られた。

7. 試験結果の検討

試作した 75A、90A、および 105A 定格のヒューズについて 1950V の電源電圧で 20mH、5000A および 7.5mH、9000A の遮断試験を行い、いずれも優れた遮断特性を示すことが確認された。また 0.8mH、固有電流 25kA というような大きな短絡電流も遮断可能なことが確認できた。

なお、遮断後の絶縁抵抗値が 5 MΩ以下の低いものがあるが、これは遮断試験時の電源電圧を規定値の 2 倍程度に高くして行ったことも関係していると思われる。絶縁抵抗値についての規定は現規格にはないが、今後の研究課題としたい。

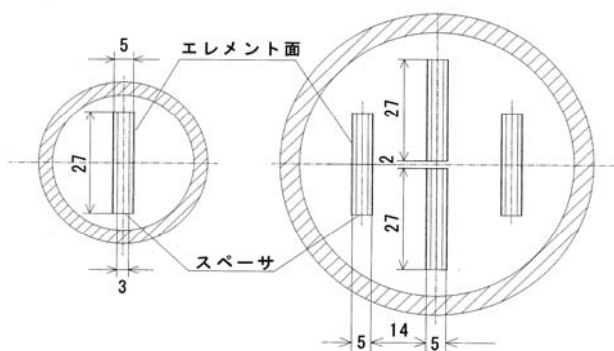
本研究では、電流定格が 200~500A のヒューズの実用化を目標として着手しており、また実用されている主ヒューズの電流定格もほとんど 400A あるいは 500A となっているので、これまでの試験結果からその実用化の可能性について検討する。

(1) 電流定格について

400A 定格用については、エレメント不足で確認ができなかったが、次のように推定できる。

Table 5 および Fig.7 から、エレメントを 4 本並列にして組み立てたヒューズリンクが 250A 定格となっているので、エレメントを 8 本並列にした場合には、抵抗値が 0.7mΩとなり、400A 定格のものが得られる計算になる。そのエレメントの断面比較図を Fig.8 に示す。

筒ヒューズの場合、温度上昇は筒の外径—すなわち表面積に反比例するといわれているが[文献 2 の解説]、Table.4 の No.2、3 の結果からはそれほどの効果は期待できそうもない。しかし 500A 定格のヒューズリンクの製作には①外径を 80 mmにすることは有効であり、さらに②メッキ厚さを増してエレメントの抵抗を小さくすること、③またヒューズリンクの支持部を今回の試作品のようなクリップ構造



100A～内径 36mm 400A～内径 70mm

Fig.8 ヒューズ筒断面比較

から厚い端子銅板をキャップ部にねじ止めする構造にして、放熱を良くすることなどの方法を取り入れれば、製作が可能と考えられる。

(2) 遮断特性について

並列に配置されたエレメントを持つヒューズリンクで電流を遮断する場合には、各エレメントが遮断時に発生するアークをそれぞれ処理するための消弧空間が必要である。一つの考え方としてエレメント 2 個入りのヒューズリンクに対して、8 個並列の場合には筒の内部の断面積が 4 倍になれば充分であろう。110A と 400A 定格のヒューズリンクについて比較すると Table 6 のようにほぼ近い値を示している。

したがって、110A 定格のものと同様な遮断特性が得られるものと推定される。

500A 定格のヒューズについては、400A 定格のヒューズについて試験した結果から、同寸法でも十分か、あるいは若干外径を増す必要があるかを判断することになるであろう。

本学の遮断試験設備では、Table 3 に示すものより大きな電流定格のヒューズの試験は難しいので、

4.1.2 で述べた試験回路などにより試験を行わな

Table 6 ヒューズリンク断面積比較

No.	抵抗値 (mΩ)	電流定格 (A)	エレメント枚数	筒外径 (mm)	筒内径 (mm)	筒断面積 (mm ²)
1	3.98	110	2	43	36	1,017
2	0.70	400	8	80	70	3,847

ればならないが、最終的には、高圧大電流設備による試験によって確認する必要がある。

8. 結論

本研究ではエッチング方式で製作したエレメントを用いた直流高電圧 1500V 電車用ヒューズを試作し、その試験結果から実用化の検討をおこなった。

エッチングヒューズでは、ヒューズリンクの抵抗値と電流定格の関係を把握することが重要であるので、数種の抵抗値のヒューズリンクを試作し、温度上昇試験によって電流定格を見極めながら、遮断試験を行い、特性を確認した。

試験は本学の LC 遮断試験設備の中の 14000 μF のコンデンサを使用した等価試験法により、IEC の規定を盛り込んだ新規制定の JISE5004-5 に準じて、電源電圧を 1950V として行った。その結果 75A、90A、および 110A 定格のヒューズについては、20mH、5000A および 7.5mH、9000A の回路において、いずれも優れた遮断特性を示すことが確認された。また 0.8mH、固有電流 25kA というような大きな短絡電流も遮断可能なことが確認できた。

温度試験および遮断試験の結果から、400A ないし 500A 定格のヒューズについても、前節に述べた方法によって実用化が図れるものと考えられる。

参考文献

[1] 浅山三夫、石川雄三、廣瀬健吾、小林信一、山納康：“高圧半導体保護用エッチングヒューズの開発(続)” 地域共同研究センター年報、5 号、pp.34-35 (2006).

[2] 旧 JISE4901 「鉄道車両用直流ヒューズ」(1976)

[3] JISE5004-5 「鉄道車両—電気品：高圧ヒューズ」(2007)

[4] 浅山三夫「銅メッキ膜を用いた半導体保護用ヒューズの研究」埼玉大学大学院理工学研究科博士後期論文、pp32-33(2007)

[5] 長井成吉：技術講座 “車両用多素子ヒューズ” 三菱電機技報・Vol.40・No.7、pp.1205-1210(1966)