

DENCHUKEN REVIEW

電中研レビュー

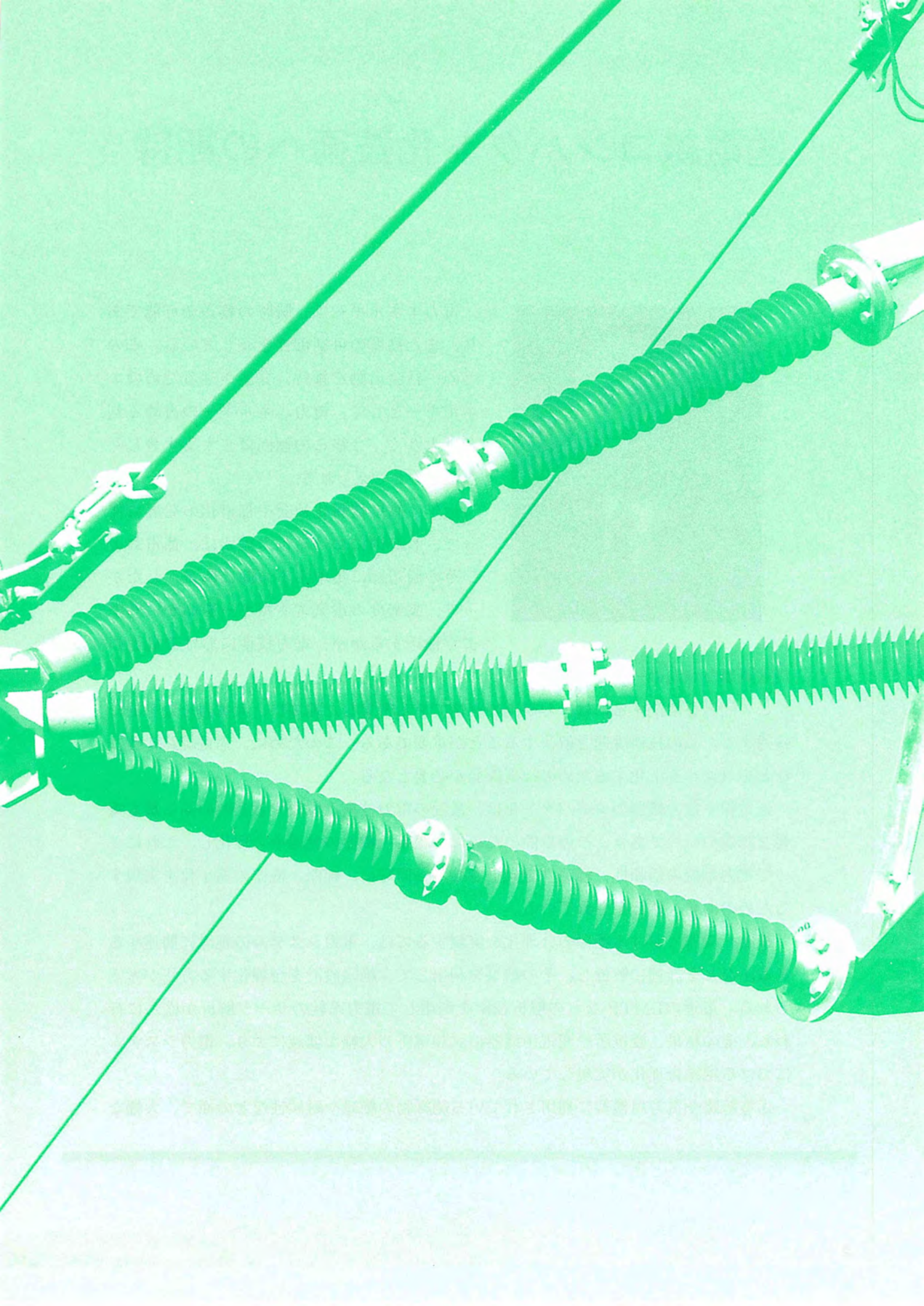
送電線コンパクト化技術の開発

— 高分子材料の適用 —



NO.36 1998.3

送電線コンパクト化技術への期待	————— 芝浦工業大学教授 河村 達雄	2
電中研「高分子がいし・CVケーブル研究」のあゆみ	.....	4
はじめに	————— 理事 横須賀研究所長 吉田 幸雄	6
第1章 電力輸送力の増強に向けて	.....	7
1-1 ●研究の背景と当研究所の取り組み	.....	9
1-2 ●送電線の現状	.....	12
1-3 ●送電線コンパクト化の考え方	.....	14
第2章 架空送電線のコンパクト化	.....	17
2-1 ●高分子絶縁アームのカバー材およびコア材	.....	19
2-2 ●154kV高分子絶縁アームの開発	.....	28
2-3 ●高分子絶縁アームを適用した架空送電線の諸特性	.....	34
2-4 ●150kV級架空送電線概念設計	.....	39
第3章 CVケーブルのコンパクト化	.....	41
3-1 ●CVケーブルの絶縁層界面改質材	.....	43
3-2 ●界面拡散法のCVケーブルへの適用法検討	.....	49
3-3 ●絶縁厚半減154kV CVケーブルの試作と性能評価	.....	51
3-4 ●150kV級地中送電線概念設計	.....	55
第4章 送電線コンパクト化技術の適用メリット	.....	57
4-1 ●電力輸送力向上とコスト低減効果	.....	59
4-2 ●研究成果の適用拡大	.....	62
おわりに	————— 理事 狛江研究所長 鈴木 俊男	63
引用文献・資料等	.....	64



送電線コンパクト化技術への期待



電力エネルギーは、瞬時の輸送が可能であり、また高度の可制御性を有している。このため、社会活動を維持、発展させるためのエネルギーとして、電力エネルギーの占める割合は大きく、今後この傾向はますます著しくなるものと考えられる。

近年、高度情報化社会や都市化の発展に伴って、わが国における電力需要は、都市およびその周辺部に集中する傾向にある。したがって、高密度の電気エネルギーをいかに効率よく輸送するかが、電力技術における最近の

最も重要な課題の一つとなっている。

この問題を解決するには、わが国の実情である密集した地域に、大電力を効率的に輸送するための技術課題を解決することが重要である。このために、送電線路や機器などをコンパクト化するための技術開発が必要となる。

送電線や電力機器のコンパクト化は、最近の電力技術上解決する必要のある最も重要な課題の一つであり、この目的のために、線路・機器の絶縁を合理化し、これによって電力システムの信頼性、経済性を向上させると同時に、線路・機器の縮小化を実現するための開発、研究がされている。

線路・機器における絶縁の合理化を実現するには、電力システムの絶縁に関連する過電圧などを詳細に解析し、その結果を利用して、絶縁設計を合理化する方法が考えられる。最近のEMTP*などの解析技術を利用して電力システムのサージ解析が盛んに行われ、その結果、変電所や変電用機器の試験電圧の大幅な低減により、電力システムにおける絶縁合理化が実現している。

送電線路や電力用機器に利用されている絶縁物の絶縁や耐候性などの面で、大幅な

特性の向上が期待できれば、この結果を利用して、線路や機器のコンパクト化が可能となる。

電力機器の絶縁を支える絶縁材料のうちで、最近著しい進歩が見られるものに、高分子材料があげられる。これらの材料について、絶縁強度はもちろん、長期間の安定性、耐候性、経済性などの広範囲な課題に関する基礎的研究の結果、実用化が期待される送電線用絶縁アームや電力用ケーブルへの適用は、密集地域に輸送する電力の送電容量の増大に直接関連するので、その実用化による効果は誠に顕著なものがある。本特集号においては、これらに関する最新の研究開発の成果が余すところなく述べられている。

電力技術の革新的進歩をはかるには、この例に見られるように、材料の基礎物性にまで掘り下げた研究を行い、その成果に基づいて実用化のための研究開発を推進する姿勢がきわめて重要で、効果的と考えられる。この意味で、本特集号に盛り込まれている成果は、今後の展開が大いに期待される例と考えることができる。

今後、電力中央研究所がこのような方向に沿った研究、開発を積み重ねることによって、世界における電力技術のセンター・オブ・エクセレンスの地位を、なお一層確立されることを期待したい。

芝浦工業大学 教授
東京大学 名誉教授

河 村 達 雄

* Electro-magnetic Transients Program (電磁過渡現象解析プログラム) の略。

電中研「高分子がいし・CVケーブル研究」のあゆみ

技術革新には材料の開発が欠かせない。当研究所では、高分子材料に注目して、送電線のコンパクト化技術の開発に取り組んできた。新しい材料の開発と改良を重ね、コンパクト化の実現が可能な高分子がいしおよびCVケーブルの開発の記録である。

西 暦	当 研 究 所 の 状 況	内 外 の 状 況
1957		・エポキシ樹脂がいし（第一世代）開発・適用（英・米）
1963		・66kVCVケーブル（絶縁厚15mm）実線路適用（日） 設計電界：（交流）15kV/mm
1964		・第一世代高分子がいしの開発（独）
1967		・第一世代高分子がいしのフィールド試験開始
1969		・225kVポリエチレン絶縁ケーブル実線路適用（仏）
1971	・架橋ポリエチレン中の半導電層突起における絶縁破壊機構の解明研究に着手 ・第一世代高分子がいしの性能を評価	
1972		・138kVCVケーブル実線路適用（米）
1976		・154kVCVケーブル（絶縁厚23mm）実線路適用（日） 設計電界：（交流）20kV/mm
1977	・電子顕微鏡による半導電層界面評価法を開発	・高分子がいし等材料試験法（傾斜平板法）規格発行 ・第一世代高分子がいしの実線路適用（種々の不具合発生）（欧米）
1980		・275kVCVケーブル（絶縁厚27mm）実線路適用（日） 設計電界：（交流）30kV/mm ・第二世代高分子がいし（添加剤改良）の開発 ・第二世代高分子がいしの適用
1986	・CVケーブル半導電層界面の電界強度向上方策（添加剤を用いた界面拡散法）に関する特許を出願 ・高分子がいしの基礎特性評価に着手 ・絶縁厚半減CVケーブルの開発研究に着手	・400kVポリエチレン絶縁ケーブル実線路適用（仏）

西 暦	当 研 究 所 の 状 況	内 外 の 状 況
1987	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高分子がいしの課電暴露試験に着手 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 500kVVCVケーブル(絶縁厚32mm)実線路適用(日) 設計電界：(交流) 35kV/mm
1988		<ul style="list-style-type: none"> ・ 長距離用275kVVCVケーブル実線路適用(日)
1989	<ul style="list-style-type: none"> ・ 60kV高分子がいしの研究に着手 	
1990	<ul style="list-style-type: none"> ・ CVケーブル最適添加剤の選定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 60~100kV級高分子がいし相間スペーサ試験適用
1992	<ul style="list-style-type: none"> ・ 架空送電線コンパクト化研究構想設定、高分子絶縁アームの開発に着手 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 275kV高分子相間スペーサ試験適用
1993	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実規模モデルCVケーブルにより、50kV/mm(交流)の目標達成 	
1994	<ul style="list-style-type: none"> ・ 絶縁厚半減(9mm)154kVVCVケーブルの長期性能を検証 ・ 絶縁厚半減CVケーブル用接続技術の開発に着手 	
1995	<ul style="list-style-type: none"> ・ 154kV高分子絶縁アームの開発に成功 	
1996	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高分子絶縁アーム適用コンパクト154kV実規模試験線による公開実験 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 長距離用500kVVCVケーブル(絶縁厚27mm)の実用化(日) 設計電界：(交流) 40kV//mm
1997	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高分子絶縁アーム適用154kV実規模試験線による公開実験と「高分子がいし」絶縁劣化研究発表会を開催 ・ 絶縁厚半減154kVVCVケーブルの接続部モデルにより初期性能を検証 ・ 電力会社の参加する「高分子絶縁アームを用いた送電線コンパクト化技術検討会」において実用化の検討に着手 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電気協同研究会「架空送電線用有機がいし技術専門委員会」発足

はじめに

理事 横須賀研究所長 吉田 幸雄



わが国は長期的な低成長時代に入り、経済、社会の状況は極めて厳しいものがあります。電気事業においても電気の安定供給はもちろん、より一層のコスト低減が要請され、種々の努力が払われています。電力中央研究所では、コストの低減を研究目標の第一に掲げて研究開発を進めており、電力輸送設備のコスト低減は主要な課題であります。

私たちは、近年急速な進展を遂げている高分子絶縁材料に着目し、架空送電線と地中ケーブルのコンパクト化技術の開発を約10年間にわたり進めてきました。その結果、架空送電線については現在の60kV級の送電線用地

で154kV送電が可能な、高分子絶縁アームを用いた150kV級のコンパクト送電技術を開発しました。これを用いると、電力輸送量の2倍以上の向上が期待できます。また、地中ケーブルの主流となっているCVケーブルの絶縁材料のマイクロ構造を改良して、絶縁の厚さを半分に減らす方法を開発しました。これにより、60kV級のケーブル収納スペースに150kV級のケーブルが収納でき、電力輸送量も2倍以上の向上が期待できます。この方法をさらに高い電圧のケーブルに適用すれば、ケーブルのジョイント数の低減も可能になります。

今後は、長期性能評価や保守技術などの面で、さらに研究を進める必要がありますが、ほぼ、実用化のめどを得たと判断しましたので、今回ここに電中研レビューとして発刊することとしました。

現在の送電線は、膨大な技術開発をもとに建設され、合理的で高い信頼性を有しています。これらの技術に、コンパクト化技術が融合し、送電線の一層のコンパクト化と建設コストの低減に、いささかなりとも寄与できれば幸いです。

第 1 章

1

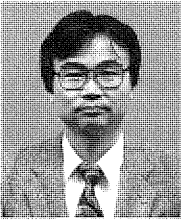
電力輸送力の増強に向けて



第1章 電力輸送力の増強に向けて ● 目次

横須賀研究所電力部長 上席研究員 今城 尚久

1-1	研究の背景と当研究所の取り組み	9
1-2	送電線の現状	12
1-3	送電線コンパクト化の考え方	14



今城 尚久（1969年入所）

地中送電線ケーブルの長期信頼性評価、直流ケーブルの性能評価、極低温ケーブルの開発および電力ケーブル熱供給導管による熱影響防止対策の開発を行うとともに、近年は配電地中化建設コストの低減方策の研究を行ってきた。今後も送配電コスト低減に役立つ新技術の開発に取り組んでいきたい。

1-1 研究の背景と当研究所の取り組み

電気は、照明・動力そして通信などに活用され、快適で便利な私たちの生活や産業を支える、クリーンで使いやすいエネルギーとして欠かせないものとなっている。この電気の需要は、都市の発展に伴い従来の産業中心から都市およびその周辺部に集中しつつある。さらに、今後の情報化、コンピューター化および高齢化社会の進展を考えると、この傾向は益々著しくなるものと考えられる。当研究所が行った予測によれば図1-1-1に示すように、21世紀中葉の電力需要は、極力、省エネルギー化を行っても現在の1.5～2倍になり、これは主に都市とその周辺に集中するものと考えられる。

発電所で作られた電気が需要家に届くまでの電気の流れを図1-1-2に示す。発電所で発電された電気（10～20kV）は、送電中の損失を低減するために154～500kVの電圧に昇圧され、一次送電線（基幹送電線）を通過して消費地近くの、多くは都市近郊の一次変電所まで送られ

る。ここで降圧されて配電用変電所または大工場や鉄道などの特別高圧需要家へ送られる。このような送電システムは、戦後の復興期に需要地から遠い山中に水力発電所を開発して、長距離を高電圧で送電したことから始まったものである。その後、産業の発展、生活の高度化に伴う電力需要の増大に対応するために、大容量の火力発電および原子力発電技術の開発が行われてきた。また、これらの大電力を送電する際に、送電ルート数の低減および送電ロスを低減するために、図1-1-3に示すように送電電圧は20～30年ごとにほぼ2倍に昇圧するため技術開発が行われ、最近では1,000kVといった超々高圧送電に関する技術開発が行われている。

一方、需要地では、供給電圧は配電用変電所において使用電力量に見合った電圧に下げられ、大口の需要家に対しては6.6kV、22～154kV、一般家庭に対しては電柱等に設置された変圧器により、6.6kVから100Vまたは

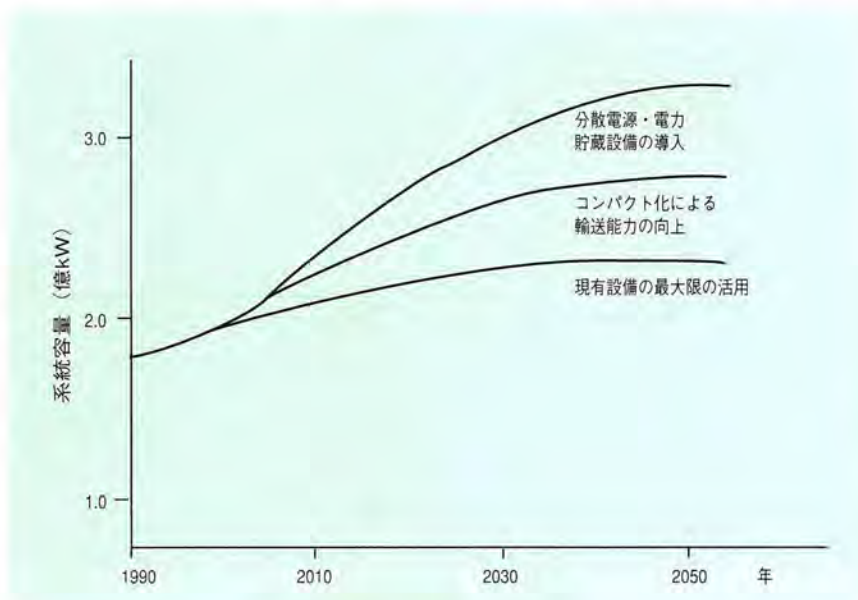


図1-1-1 電力需要の伸びと電力輸送システムの想定

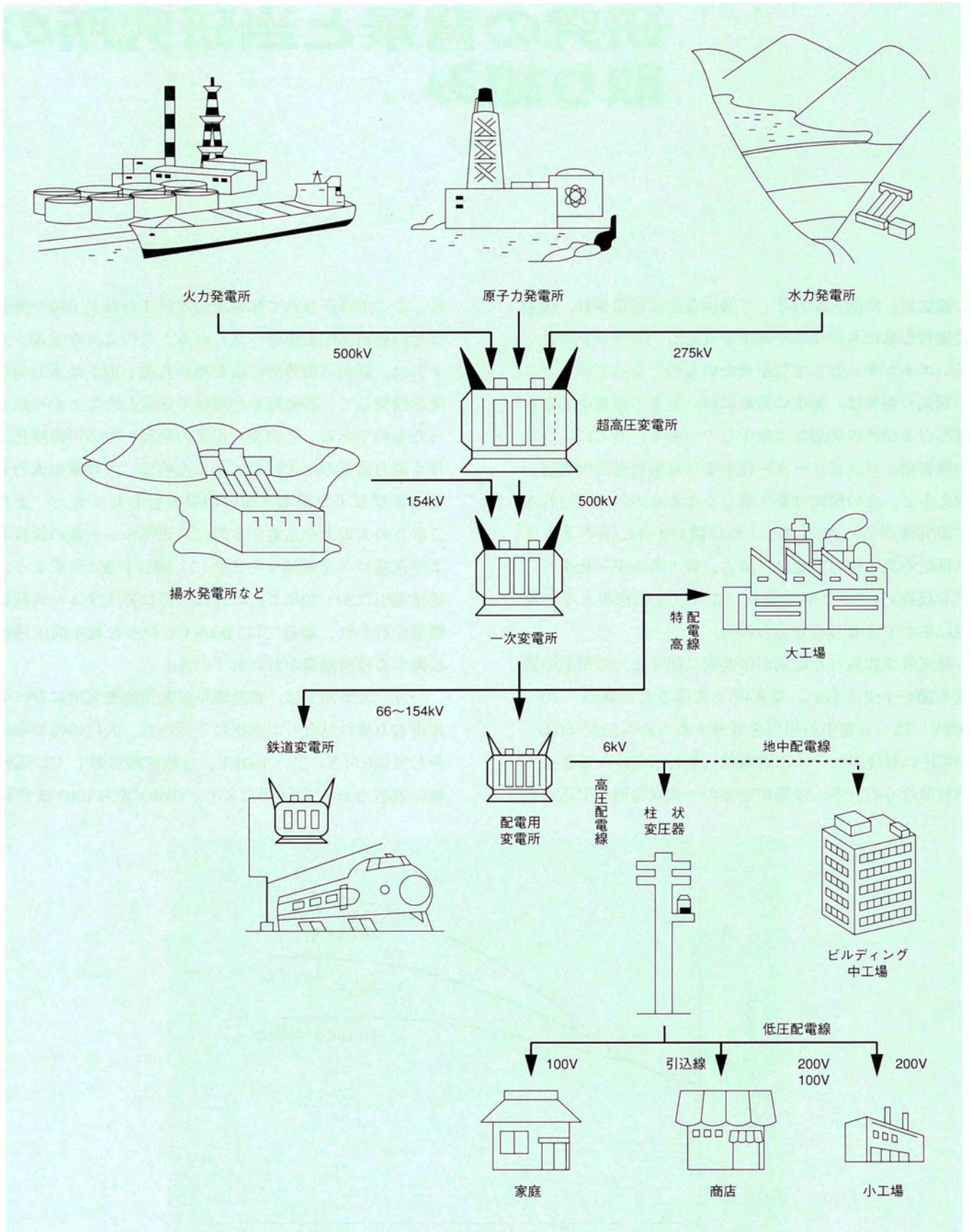


図1-1-2 電気の輸送のしくみ

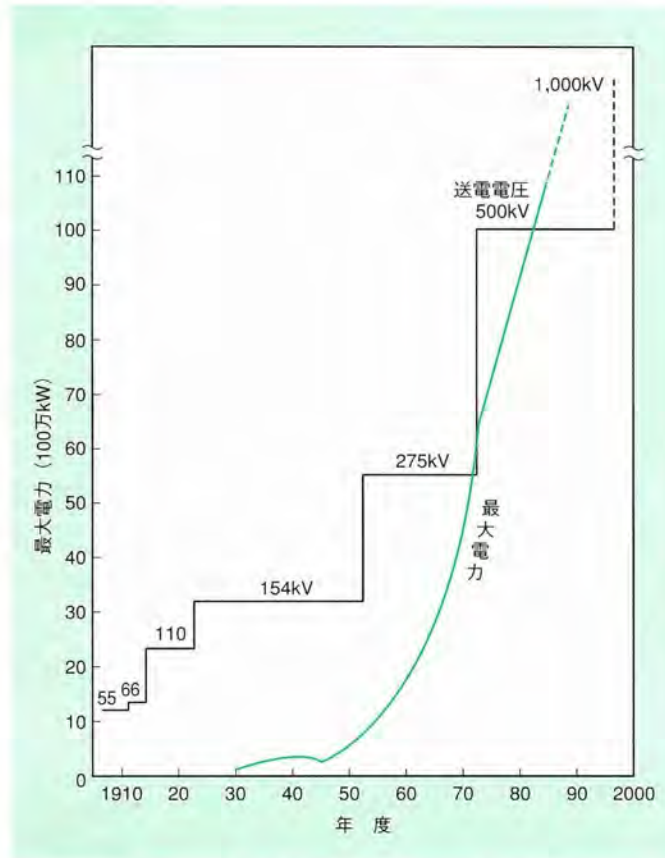


図1-1-3 わが国における最大供給電力と交流送電電圧の伸び

200Vに下げて配電される。

しかし、都市の拡大に伴い、送配電線の建設用地の確保が年々困難になってきている。このため、送配電線のコンパクト化による高密度な電力輸送のニーズは高まる

一方である。この要請に応えるために、当研究所は、これまで培ってきた超高压送電線技術や配電技術をもとに、都市部の電力需要の増大に対応できる架空および地中送電線のコンパクト化技術の開発を行ってきた。

1-2 送電線の現状

現在、わが国の送電線の電圧は、電力会社によって異なるが、図1-2-1に示すように、500kV、275kV、220kV、187kV、154kV、110kV、77kV、66kVの電圧が使用されている。これらのうち、187kV～500kVは遠く離れた発電所から周辺部の変電所、または都心部の変電所への送電に用いられる。周辺部の変電所へは、図1-2-1(a)に示すような送電鉄塔のがいしに吊るされた架空送

電線により送電されている。また、都心部の変電所へは、同図(b)に示されるように道路の地下に埋設された管路またはトンネル内に設置された地中送電線により送電される。また、66kV～154kVは主に都市部や都市周辺部の変電所あるいは需要家への架空および地中送電線に使用されている。また、これらの送電線は、送電信頼度の向上または送電線の効率的運用のために相互に連系され、

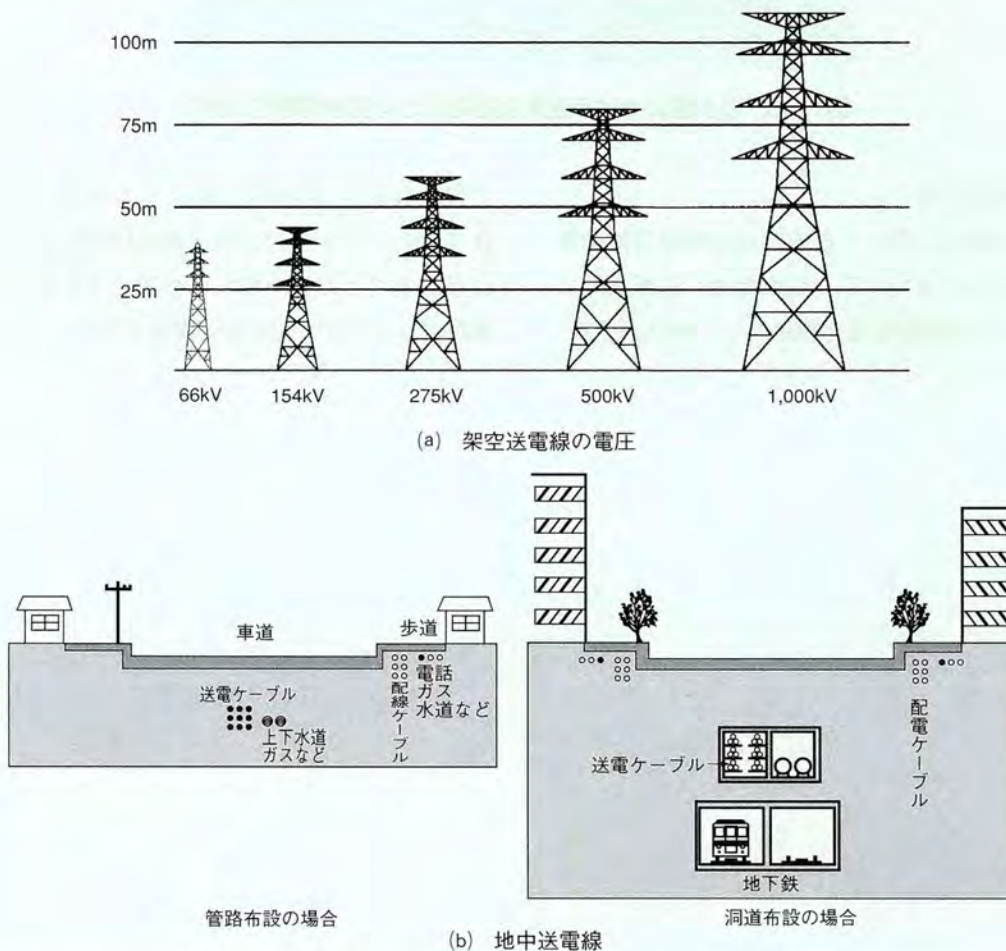


図1-2-1 わが国の送電線

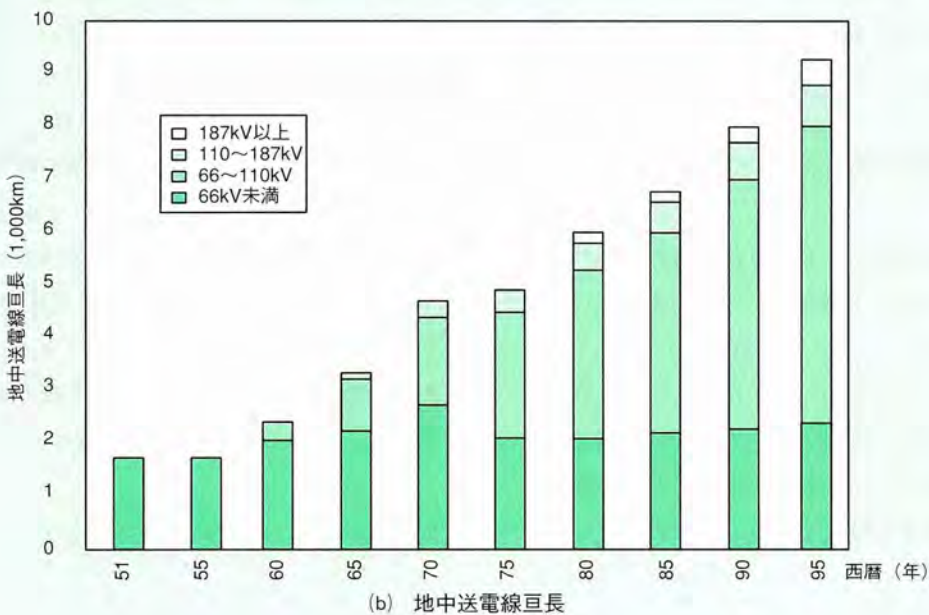
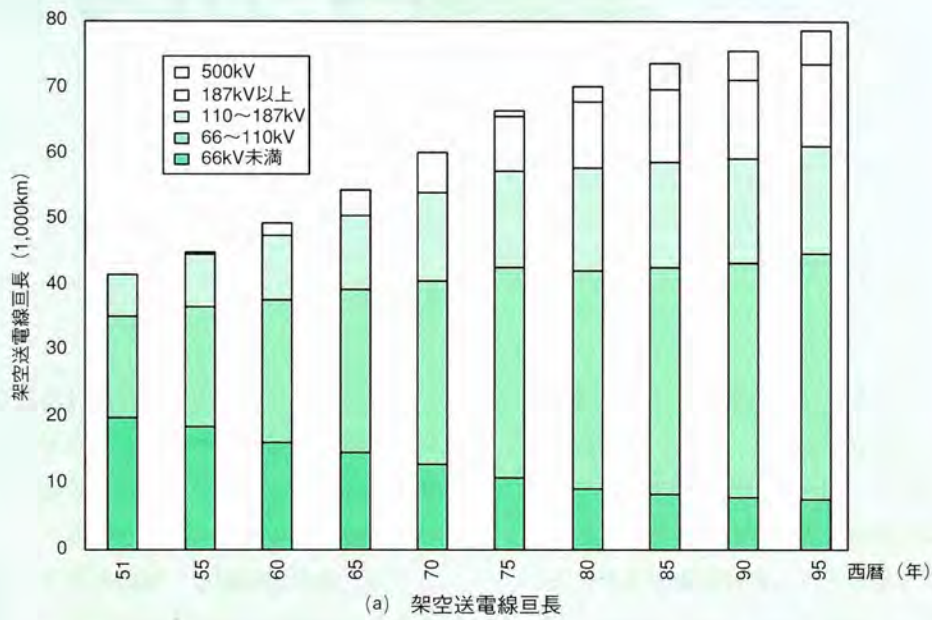


図1-2-2 全国の送電線巨長の推移

ネットワークを構成している。

このため、送電線ルートの長さに相当する全国の送電線巨長は、図1-2-2に示すように電力需要の増大に伴い年々増大している。1951年頃には66kV未満の送電線が約半分を占めていたが、需要の伸びに伴い、大容量送電に適した高電圧送電線が使用されはじめており、近年では500kV送電線も増えつつある。また、同図(b)に示すように地中送電線は、架空送電線の約1/8であるが、年々

増大している。これらの送電線巨長は、最近では8万kmと地球2周分に達しようとしているとともに、これらに設置される電線の長さはほぼその2倍となる。特に、都市およびその周辺への送電に用いられる66~187kVの電圧の送電線は全体の約7割を占めている。さらに、近年の都市および周辺部の電力需要の増大に対応するためには、新たな送電線の建設あるいは既設の送電線の送電電圧の昇圧が必要となっている。

1-3 送電線コンパクト化の考え方

架空送電線のコンパクト化には、電線を支える鉄塔をコンパクト化することが有効である。一般に、送電線は3つの相をを1回線とする三相交流方式が採用されており、通常2回線が鉄塔の両側で支持されている。鉄塔の大きさは、送電電圧から決められる絶縁距離が保たれるように設計される。特に、鉄塔アームから吊るされたがいしの先端に電線を支持する現在の方式では、風などにより電線が揺れた場合でもこの絶縁距離が保たれるように設計されている。従って、送電線をコンパクト化するためには、各相の電線間の距離を縮小することが有効である。

このため、従来の磁器製がいしより絶縁特性の優れた高分子がいしを用いた高分子絶縁アームを開発することとした。高分子絶縁アームは、図1-3-1に示すように、従来の鋼鉄製のアームと磁器がいしの役割を同時に合わせ持つものである。高分子絶縁アーム方式では、電線を直接アームの先端に固定するために、従来のがいし連の長さの分だけ鉄塔の高さを低くできる。また磁器がいし

に吊り下げる従来の方式では避けられなかった、風などによる電線の横方向への振れがなくなるために、電線の間隔を縮小できるので、送電用鉄塔のコンパクト化および送電線用地の縮小に効果がある。

一方、地中送電線は、道路の地下に設置されたトンネルまたは管路内に布設されるために、電力ケーブルそのものをコンパクト化する必要がある。近年、電力ケーブルは従来の油浸紙絶縁ケーブルに代わり、図1-3-2に示すような架橋ポリエチレンを絶縁に用いたCV*ケーブルが500kV級の高い電圧でも使用されるようになってきている。しかし、現在のCVケーブルは、絶縁材料そのものが持っている絶縁強度を十分活かしているとはいいがたく、今までその1/10程度の電圧で使用されてきた。このため、電力会社およびケーブルメーカーは絶縁体中の微小な異物や気泡（ボイド）を極力少なくする技術開発を行った。この結果500kVCVケーブルの開発を可能

*CV：架橋ポリエチレン絶縁ビニールシース。

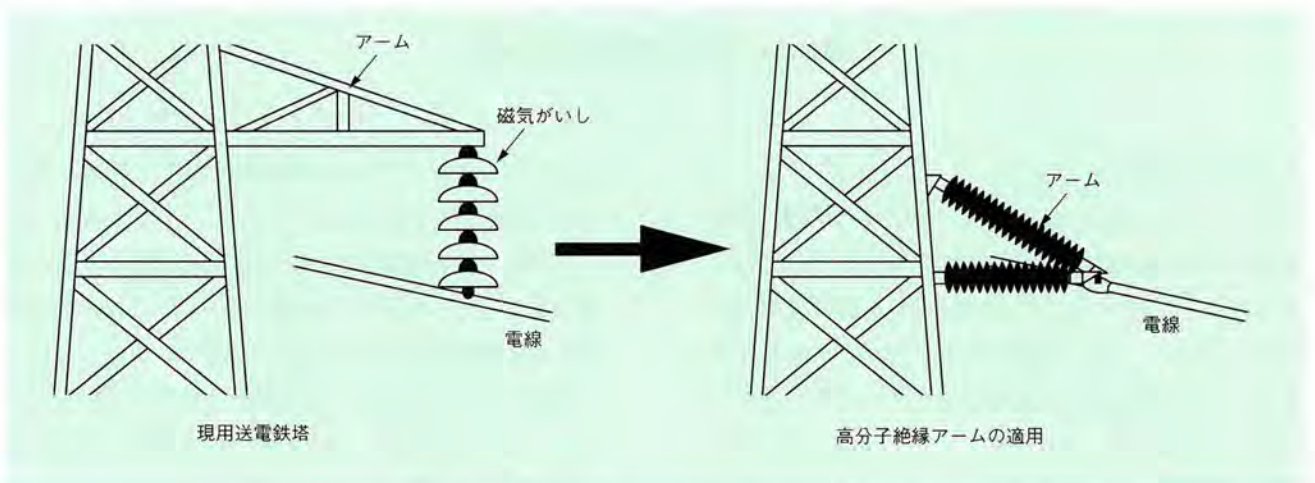


図1-3-1 高分子絶縁アームのコンパクト化効果

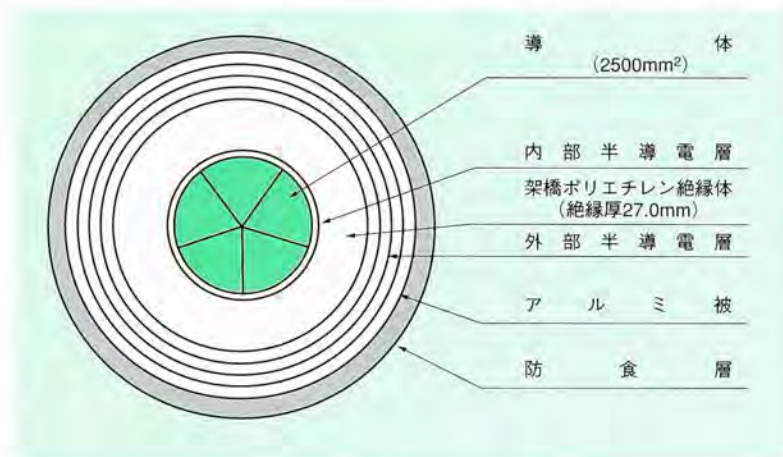


図1-3-2 275kV VCVケーブルの構造例

とし、また材料のもつ絶縁強度の1/2程度まで活用できるようになった。

これと平行して、絶縁破壊の起点（始まり）が絶縁層と半導電層の界面にあることから、当研究所は、絶縁破壊の強度を向上するためには、この半導電層の界面を構成する絶縁体の改良が必要であることを提案し、それに基づいてCVケーブルの絶縁厚を半減する技術開発を行っている。これは、CVケーブルの半導電層に添加剤を混入し、半導電層界面の絶縁体の分子構造を改良し、密

度を増大するものであり、「界面拡散法」と呼んでいる。この界面拡散法によりCVケーブルの絶縁破壊の起点となる弱点の発生を抑制し、ポリエチレン本来の絶縁破壊強度に近づけようとするものである。これにより、既設の管路を利用して、従来の66k VCVケーブルを、それとほぼ同じサイズにまで縮小された154k VCVケーブルにリプレースすることが可能となり、地中送電線のコンパクト化による送電容量の増大やコスト低減に有効となる。

第 章

2

2

架空送電線のコンパクト化



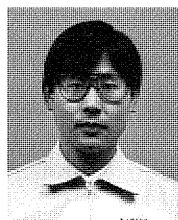
第2章 架空送電線のコンパクト化 ● 目次

横須賀研究所電力部	上席研究員	泉	邦和
横須賀研究所電力部	主任研究員	高橋	毅
横須賀研究所電力部	主任研究員	本間	宏也
横須賀研究所電力部	主任研究員	畔柳	俊幸
我孫子研究所構造部	主任研究員	清水	幹夫
横須賀研究所電力部	主任研究員	谷口	毅

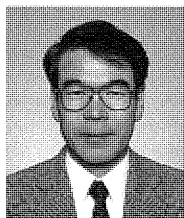
2-1	高分子絶縁アームのカバー材およびコア材	19
2-2	154kV高分子絶縁アームの開発	28
2-3	高分子絶縁アームを適用した架空送電線の諸特性	34
2-4	150kV級架空送電線概念設計	39



泉 邦和 (1977年入所)
送変電設備の絶縁性能評価や過電圧抑制技術に関する研究を行うとともに、送電線コンパクト化技術課題推進担当として、高分子絶縁アームに関する技術開発を進めてきた。現在、高分子がいしなど有機材を適用した電力システムの絶縁協調に関する研究に取り組んでいる。



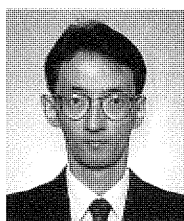
畔柳 俊幸 (1993年入所)
主に高分子絶縁アームを適用した架空送電線コンパクト化の研究に携わってきた。現在、主に高分子絶縁材料の直流系統への適用性の研究に取り組んでいる。



高橋 毅 (1977年入所)
がいし等の電力用絶縁機器の高電圧現象、特に汚損がいしの沿面放電現象の解明に関する研究に従事してきた。現在、送電線のコンパクト化技術の開発や高分子がいしの性能評価の研究に取り組んでいる。



清水 幹夫 (1991年入所)
ケーブルの大変形問題、および送配電線の風による強制振動・自励振動を扱った解析的研究を実施してきた。最近開発したケーブルおよび立体骨組みの時刻歴非線形解析コード「FU_SIN」、「CAPSS」は、電力各社において広く用いられている。現在、送配電設備に関する実務レベルの諸問題の、力学的な解明に取り組んでいる。



本間 宏也 (1989年入所)
高分子がいしカバー材の絶縁特性評価および表面劣化機構の解明等に関する研究を行ってきた。現在、高分子絶縁材料の長期信頼性向上および高性能化に関する研究に取り組んでいる。



谷口 毅 (1977年入所)
高電圧用がいしのフィールドにおける汚損特性や耐電圧特性に関する研究を行ってきた。現在、高分子がいしや電力用機器等の高電圧試験研究の高度化に取り組んでいる。

2-1 高分子絶縁アームのカバー材およびコア材

ここでは、高分子がいしについて概説するとともに、送電線のコンパクト化に必要な高分子絶縁アームの主な構成要素である高分子がいしについて、表面の電気絶縁を分担するカバーや、電線支持のための機械力を分担するコア、ならびに高分子がいしの基本性能などに関する材料の開発・評価の研究の概要について述べる。

2-1-1 高分子がいし

送電線などに用いられる屋外用がいしの絶縁材料として、日本国内では磁器、海外では磁器やガラスが使用されている。しかし近年、欧米を中心に、射撃によるがいしの破損防止対策や軽量で機械的衝撃力や汚損性能に優れているなどの観点から、有機絶縁材料を用いたがいし、すなわち高分子がいしが磁器がいしの代りに架空送電線に適用され始めている。高分子がいしの使用状況について、米国の電力研究所（EPRI）が1988年に米国電力会社を対象として行ったアンケート調査例がある。電圧

別の使用状況は、図2-1-1に示すように700kVの高電圧にまで使用されているが、115kVから230kVまでの電圧に最も多く使用されており、20%を超えている。また、使用目的は、図2-1-2に示すように耐張、引留め、懸垂などの機能を対象としたものが大部分である。これらの

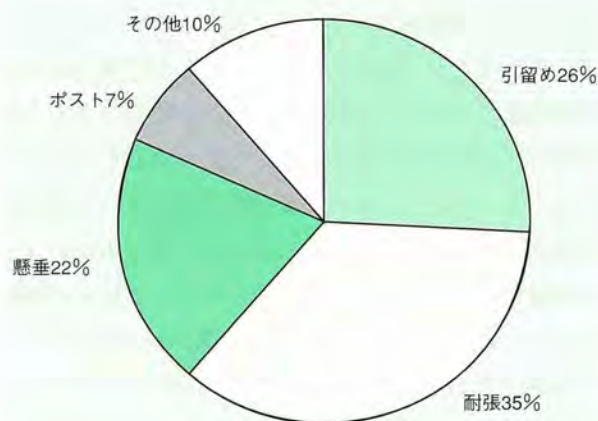


図2-1-2 高分子がいしの使われ方

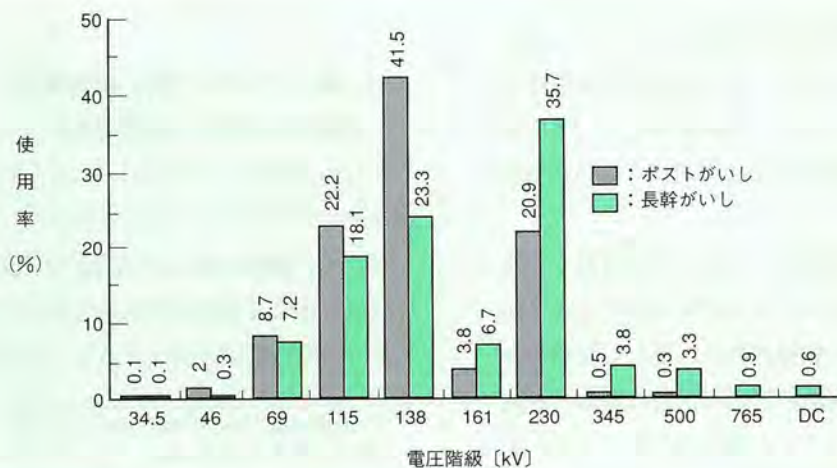


図2-1-1 高分子がいしの電圧階級別使用率

高分子がいしを使用する理由は、射撃によるがいしの破損防止が最も多く、次いで試験的な使用、軽量性、耐衝撃性、汚損絶縁対策等があげられている。またヨーロッパにおいても高分子がいしの使用が広範囲に進められている。しかし、一方で塩害や劣化による事故例も報告されており、国際的な研究の動きも現われている。

一方、日本国内における高分子がいしの使用は、厳しい塩害などに対する性能を確認する必要がある、まだ本格的な実用化までいっていない。しかし、相間スペーサとして試験的に使用され、性能の評価が進められている。これらの相間スペーサは、高分子がいしの軽量性を活かして、送電線鉄塔の中央部で電線同士を固定し、電線に雪などがついた後に脱落した場合の電線のはね上がり（ストリートジャンプ）や、強風時の電線の揺れや電線間の接触を防止するものである。

高分子がいしの歴史は、1940年代にアメリカでエポキシ樹脂が屋内用絶縁がいしとして使われたことに始まる。一方、屋外用として初めて高分子がいしが開発されたのは1960年頃であり、その構造はエポキシ樹脂による一体成形またはFRPとエポキシ樹脂との複合構造のものが主流であった。しかし、エポキシ樹脂の耐候性（天候に対する耐力）などが不十分であったため、屋外用がいしとして本格的に使用するには至らなかった。これらの経験をもとに、最近の高分子がいしは、図2-1-3に示すように、機械力を分担するための繊維強化プラスチック（FRP）コアと、その表面を笠形状に加工した屋外用高分子絶縁材料で覆ったカバーならびに、コアの両端に取り付け用金具を設けた構造となっている。

高分子がいし用材料である、屋外用高分子絶縁材料およびFRPと、磁器との特性比較を図2-1-4に示す。高分子がいし用材料は磁器に比較し、特に汚損時の耐電圧や、曲げ・引張強度が高いとともに、比重が小さい。したがって、高分子がいしは磁器がいしに比べ、コンパクト化、高性能化が期待できる。

今後の高分子がいしの課題としては、有機材料であることから長期の屋外使用などにより劣化を起こすことがあげられる。また、高分子絶縁材料は、新しい材料であるため、絶縁性能や機械性能の評価法、特に寿命の評価法などが確立されていないことも課題である。これらのうち、耐候性や引張機械力や塩害などによりカバー表面が汚損された場合の絶縁性能などの基本的な性能評価試

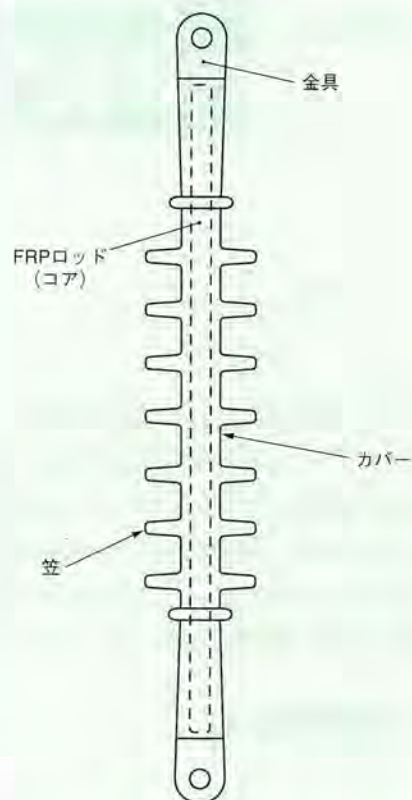


図2-1-3 高分子がいしの基本構造

験法は、国際規格が定められている。

本節では、高分子がいしを日本国内の送電線に使用する場合、特に重要となる高分子絶縁材料の海塩汚損*1に対する評価とその機構の化学的解明、ならびに絶縁アームへの適用を目指したFRPの高強度化の研究開発などについて述べる。

2-1-2 屋外用高分子絶縁材料（カバー材）の特性

(1) 耐トラッキング性、耐侵食性

各種屋外用高分子絶縁材料のうち、代表的なシリコーンゴム（SR）、エチレンビニールアセテート（EVA）、エチレンプロピレンジエンモノマ（EPDM）を試験対象として、図2-1-5に示す装置（RWDT法）を用いて、表面電流による侵食性*2に対する人工加速試験を実施した。この試験は、図に示すように、回転する円板にとりつけ

*1 海塩汚損：海水の塩分ががいし表面に付着する現象で、絶縁を低下させる主因となる。

*2 表面電流による侵食性：高電圧下で高分子絶縁材料表面に塩分が付着し、これに湿潤が加わると小さな放電が発生する。それにより表面に微小な侵食を受ける現象。

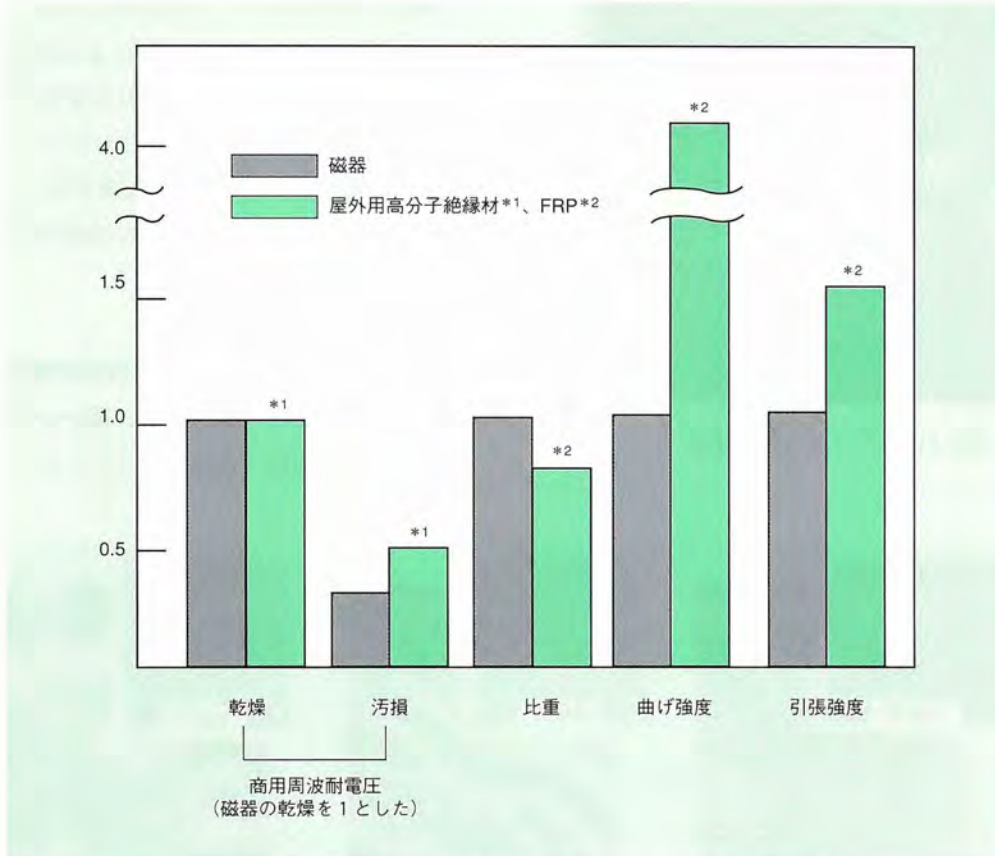


図2-1-4 高分子絶縁材料およびFRPと磁器との特性比較

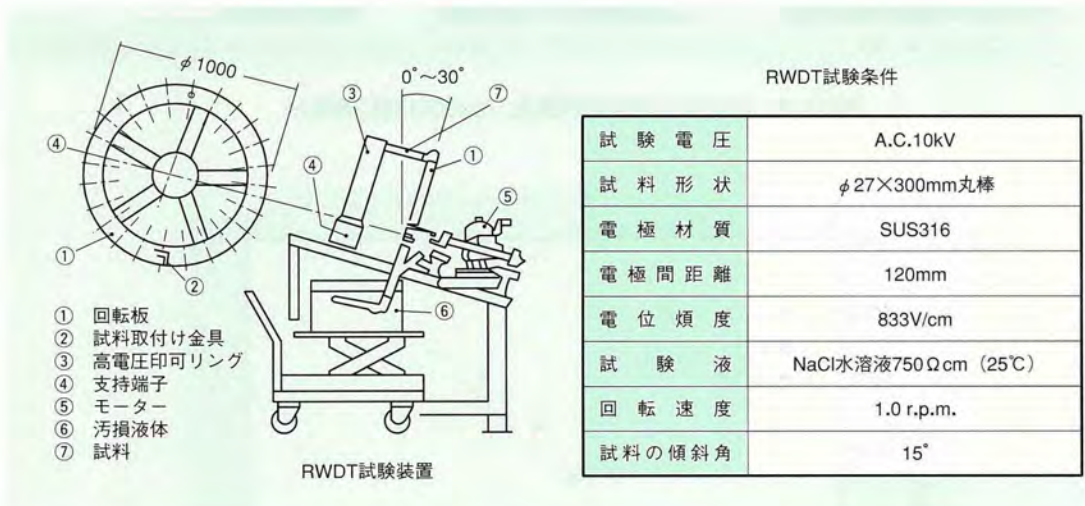


図2-1-5 侵食性加速劣化 (RWDT) 試験概要

られた試料を汚損液体中に通過させて、海水によりがし表面の汚損を模擬した後、電圧が印加され、試料表面に強制的に局部放電を発生させるものである。これを一定の周期で繰返すことにより、短時間で汚損時の耐侵食性に起因する絶縁性能を評価することができる。試験時

の表面アークの発生状況を図2-1-6に示す。

5,000時間までの試験の結果は、図2-1-7に示すように各試料とも表面に侵食はあるものの、著しい絶縁低下の要因となる炭化路 (トラッキング) は形成されず、フラッシュオーバー電圧の著しい低下も認められなかった。また、



図2-1-6 アークの発生状況

同図より試料EVA、EPDMは、SRに比較して著しい侵食痕が見られる。この侵食による重量損失は、図2-1-8に示すように、いずれの試料も電気量（表面電流の時間積分）とともに増大した。これにより重量損失、すなわち侵食量が最も小さいのはSRであること、また表面電流の電気量は、経年使用時の等価年数の指標として有効であることが分かった。

(2) シリコンゴム (SR) の化学構造と表面改質機構

屋外用高分子絶縁材料は、図2-1-9に示すように、気象条件等に起因する環境的ストレスや、高電圧印加時の

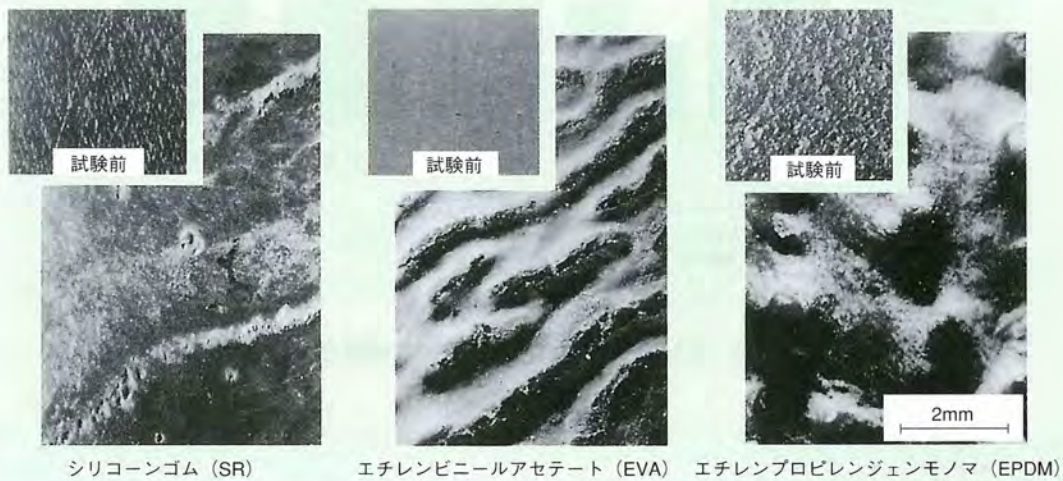


図2-1-7 加速劣化試験試料表面（5000時間試験後）

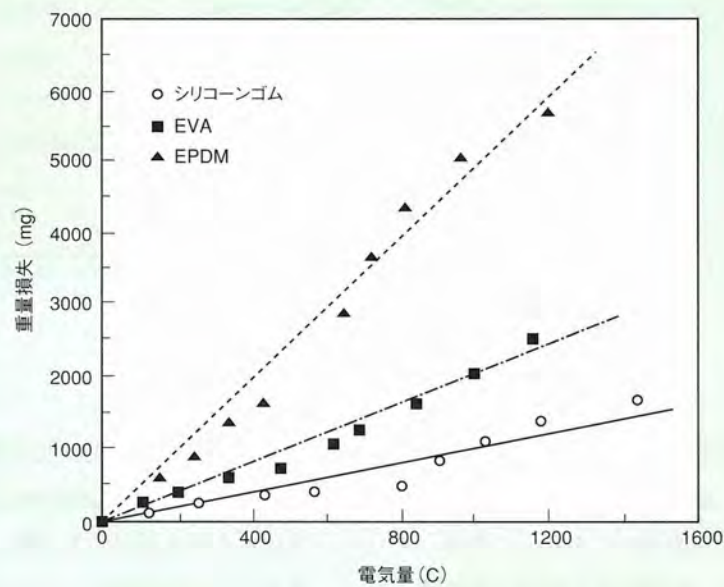


図2-1-8 RWDT試験における電気量と重量損失の関係

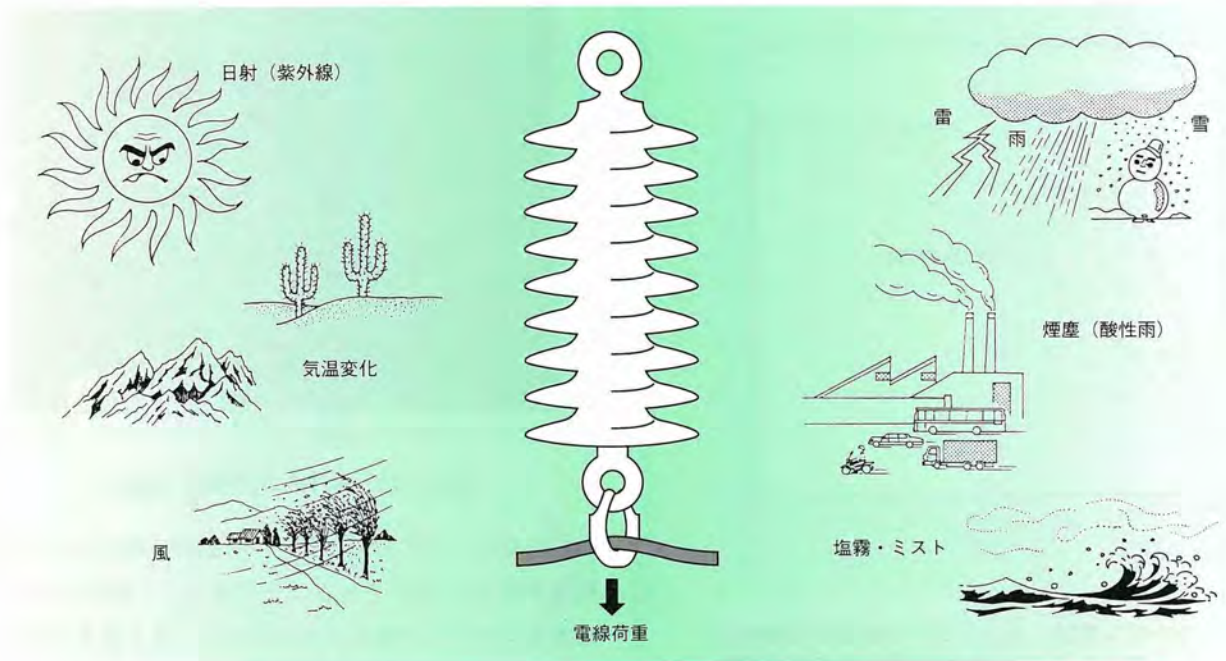


図2-1-9 高分子がいしへのストレス

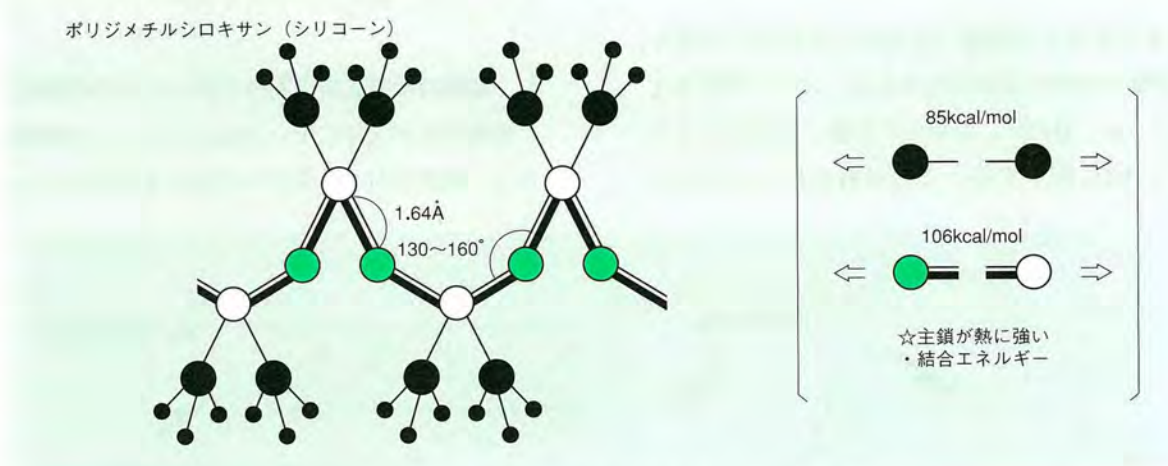


図2-1-10 ポリジメチルシロキサンの化学構造

表面漏れ電流等に起因する電氣的ストレスを受ける。これら外部からの複合的ストレスによって、材料の分子鎖の切断が起こったり、分子の解重合の繰り返し、酸化反応などにより化学構造が変化し、その結果、劣化などの特性変化が発生する。

SRの耐侵食特性が良好な理由は、図2-1-10に示すような結合力の強いシロキサン結合 (Si-O) を骨格とする化学構造を有することと、表面はっ水性の発現に効果のある、低分子シリコーン成分の表面に起因すると考えられる。この低分子シリコーン成分の表面への浸み出しメカニズムを確認するために、フーリエ変換赤外分光器

(FT-IR) を用いて、SR表面各結合基を観測した結果を図2-1-11に示す。この図より、低分子量分子の表面への浸み出し現象は、充填剤の量にも依存するが、おおよそ1日以内に飽和することが確かめられた。

これらの結果から、SR表面のはっ水性とその回復現象を図2-1-12のように模式化することができる。

2-1-3 ガラス繊維強化プラスチック (コア材) の特性

高分子がいしに使用されるコア材は、通常、機械的強

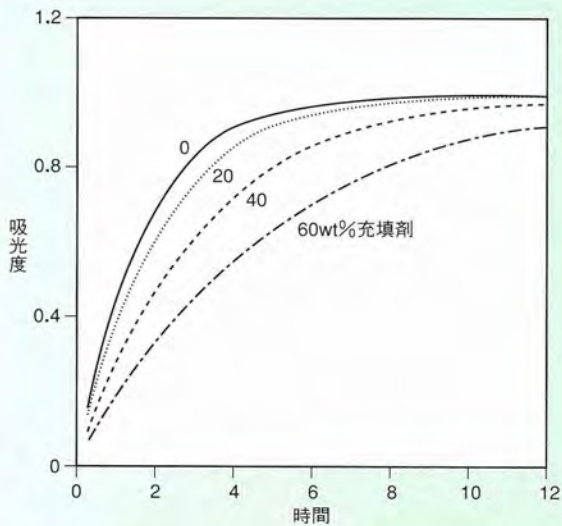
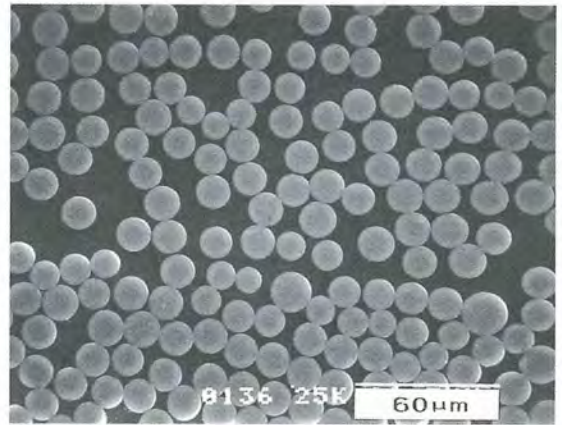


図2-1-11 カーボン蒸着したシリコン表面での低分子シリコンによる赤外光吸収の時間依存性 (吸光度：低分子量シリコンの表面への浸み出し量に比例)

度を強化させるガラス繊維（直径 $10\mu\text{m}$ 程度）の束を、エポキシ樹脂で固めた複合材料である、ガラス繊維強化形プラスチック（GFRP）が用いられる。断面の拡大写真を図2-1-13に例示する。この材料の最大の特徴は、



丸く見えるものがガラス繊維
バー： $60\mu\text{m}$

図2-1-13 GFRPコア断面（拡大）

繊維の量ならびに方向により、引張や圧縮に対する機械強度を容易に設計できることである。一般的なコアは、繊維方向がコアの軸方向のみとなる。引き抜き成型法による円柱型GFRPが使用されているが、予備検討により、絶縁アームに適用する場合、強度が不足すると推測されたことから、新しいコア材を開発することとした。

(1) 電線の水平支持用高分子がいしコアの開発

電線の水平支持に用いる高分子がいしの機械的ストレスは、線路方向から受ける荷重が支配的となる。したが

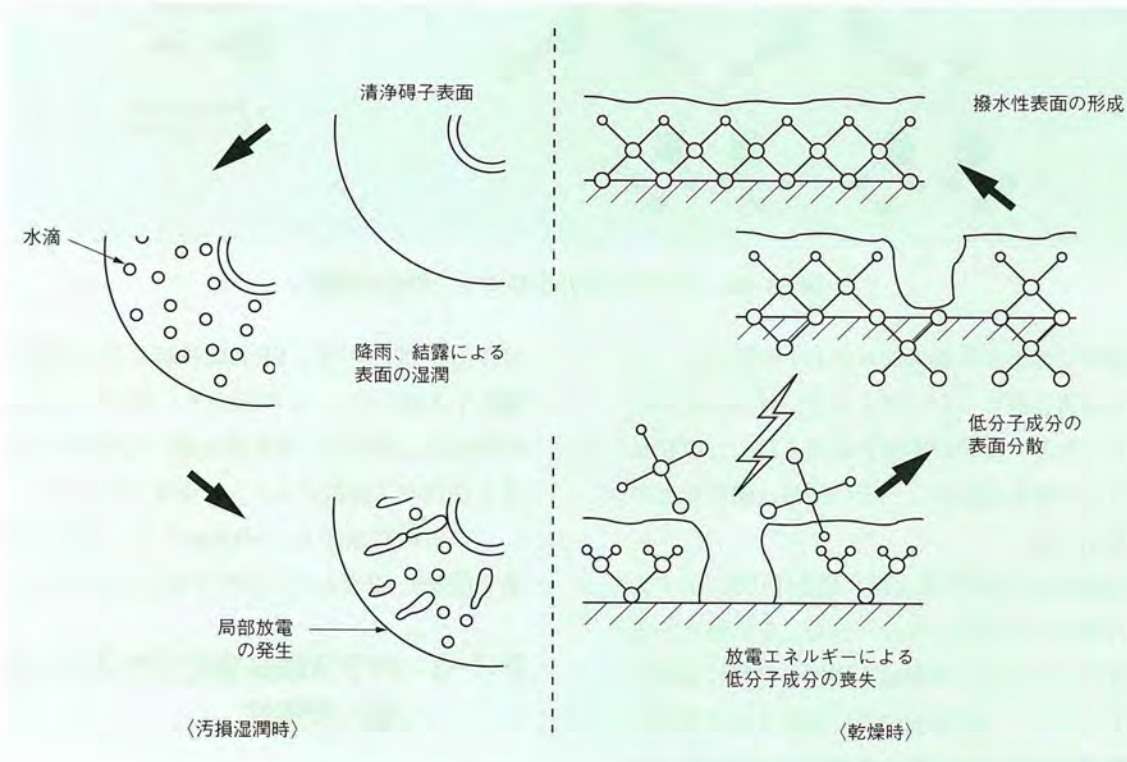


図2-1-12 シリコンゴム表面でののはっ水性回復現象

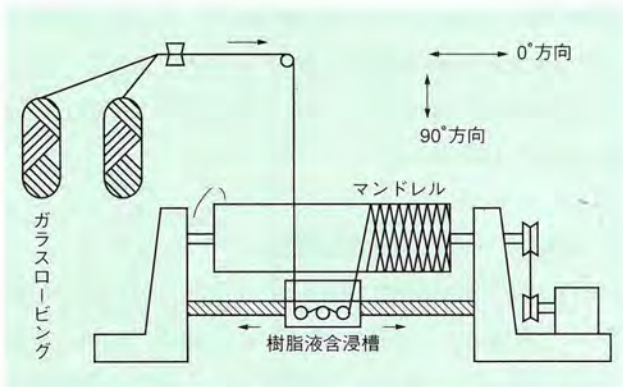


図2-1-14 フィラメントワインディング法の概要

って、高分子がいしの荷重は、等しい引張荷重と圧縮荷重を考慮する必要がある。そのため、コアの製造方法として、繊維の方向が制御できるフィラメントワインディング法（FW法）を用いた。このFW法は図2-1-14に示すように、エポキシ樹脂を含浸したガラス繊維を、回転する金型（マンドレル）に巻き付けて成形するものである。したがってコアは必然的にパイプ型（円筒型）となり、軽量化にも有効となる。

FW法により、配向角を20度、40度および0+90度とした3種類の試料（外径26mm、内径21mm、長さ680mm、繊維の体積含有率を約65%）を試作し、それらの性能を評価した結果、引張強度および圧縮強度が等しく（約50kgf/mm²）なる0度+90度の複合配向を、コア材に採用することとした。

(2) 電線の引張支持用高分子がいしコアの開発

主に引張状態で使用される高分子がいしを対象に、引張強度に対して、ガラス繊維の強度を有効に利用できるレーストラックコイル型コアを開発した。基本構造は、図2-1-15に示すように、一定の間隔をおいて設置した2本のピンを端末部とし、エポキシ樹脂を含浸させたガ

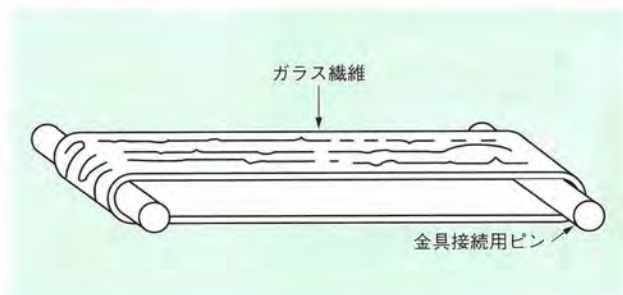


図2-1-15 レーストラックコイル型FRPコアのガラス



図2-1-16 レーストラックコイル型コアの引張荷重に対する破壊部位

ラス繊維をレーストラックコイル状に成形したものである。コア直径26mm、金具接続用ピン直径10mmのコアを試作し、引張試験を実施した結果、引張強度約90kgf/mm²を得た。また、破壊部位は図2-1-16に示すように、金具接合用ピンとの接触部であり、シミュレーションによる破壊部位と一致した結果が得られた。

碍子種類	ハイブリッドがいし	8A長幹がいし
取り付け長さ (mm)	1175	1175
銅径 (mm)	80	80
笠径 (mm)	145/180	160
笠枚数 (mm)	16/16	24
笠間隔 (mm)	50 (20/30)	40 (30)
笠の厚み (mm)	3.0	10
平均直径 (mm)	110	115
表面漏れ距離 (mm)	2510	2470
有効長 (mm)	1011	1011
表面積 (cm ²)	8980	8900

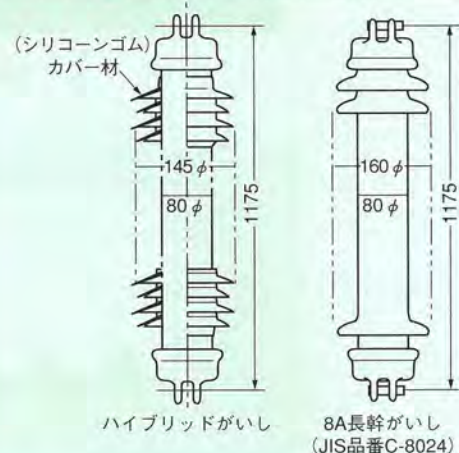


図2-1-17 ハイブリッドがいしおよび長幹がいしの外観と諸元

2-1-4 高分子がいしの基本性能評価

(1) 課電暴露試験によるシリコンゴム (SR) カバーの長期絶縁特性

SRカバーの海塩汚損下での長期絶縁特性を把握するため、図2-1-17に示すように、磁器製コアに笠付SRカバーを被せたハイブリッドがいし、および参照用に磁器製長幹がいしを4本直列に接続したものを試験対象として、課電暴露試験を実施した。試験状況を図2-1-18に示す。

約8年間の課電暴露試験中の、漏れ電流の発生頻度を図2-1-19に示す。漏れ電流波高値が20mA以上の場合の発生回数は、SRの方が磁器がいしよりはるかに少ない。試験期間中のSRと磁器がいしの汚損度とは、平均的には大きな差異は認められていないことから、この発生回数少ない理由は、SRの高いはっ水性が、漏れ電流の

抑制作用を発現するものと判断される。なお、SRカバー表面の拡大写真を図2-1-20に示すが、変色および小さな荒れが認められるものの、トラッキングや著しい侵食は認められなかった。

(2) SRカバーの汚損耐電圧特性

前述の課電暴露試験に用いたハイブリッドがいしを供試し、霧中耐電圧を実施した。この試験は、カバー表面の海塩汚損→湿潤→漏れ電流発生という自然汚損現象を模擬するため、予め試料表面を塩水汚損し乾燥させた後、所期の電圧を印加して、霧を発生させるものである。これにより自然状態での汚損時のフラッシュオーバー特性が取得できると考えられている。

得られた汚損耐電圧特性を図2-1-21に示す。同図は、単位表面漏れ距離(1m)当たりの耐電圧として表したもので、磁器がいしと同様に、汚損度が増加するにつれて耐電圧が低下する傾向が認められる。しかし、SRカ

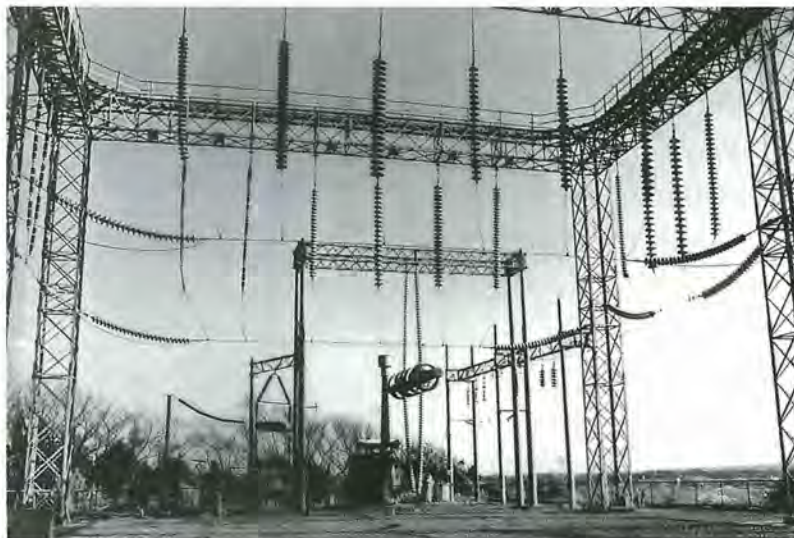


図2-1-18 課電暴露試験状況

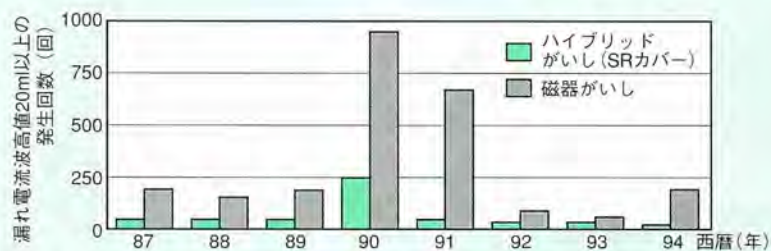


図2-1-19 漏れ電流の発生状況(測定間隔 1回/1時間)



図2-1-20 SRカバー表面

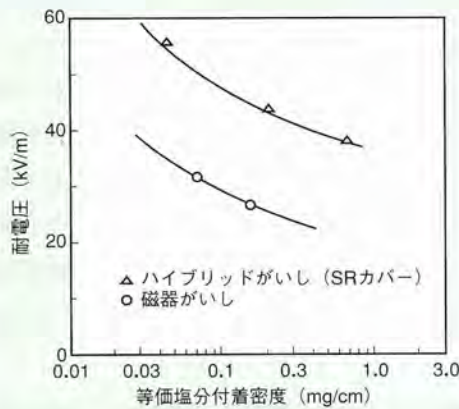


図2-1-21 笠形状カバー材の人工汚損耐電圧特性

カバーの耐電圧は、0.03mg/cm²の軽汚損から0.35mg/cm²の重汚損領域において、磁器がいしより約1.5倍高いことが明らかになった。

(3) 高分子がいしモデルの耐久性能

SRカバーとGFRPで構成される高分子がいしのモデル（長さ1m、胴径：65mm）を試作し、電気・機械的複合ストレスに対する基本耐久性能の評価試験を実施した。試験は、図2-1-22に示すような実験設備を用いて、約



図2-1-22 高分子がいしの電気・機械性能評価試験状況

20年間の実使用状態で想定される、風による電線振動に起因した振動荷重と、表面漏れ電流による電気量を、21日間で与えた。その結果、電気絶縁および機械的な異常は認められず、また、試験後の電気・機械的性能は、初期性能と同程度であった。

以上の結果から、SRカバーとGFRPで構成される高分子がいしの電気・機械的な基本性能は、実用化するのに十分であることが確かめられた。

今後、課電暴露試験や、よりち密な複合条件による人工加速劣化試験等を継続して行い、高分子がいしの長期性能評価を明らかにしていく予定である。

2-2 154kV高分子絶縁アームの開発

配電用変電所への送電線の主な電圧階級66、77、110、154kVのうち、高分子絶縁アームへの電氣的・機械的ストレスが最も厳しいと考えられる154kV送電線を対象に、同絶縁アームの試作と諸性能の評価を行った。

なお、高分子絶縁アームとは、シリコンゴムカバーとGFRPコアを組合せた高分子がいし数本で構成し、鉄塔に直接固定し、その先端に電線をとりにつける方式をいう。また、高分子絶縁アームを構成する各高分子がいしを、ここでは高分子ユニットと呼称する。

架空送電線の鉄塔は懸垂形ならびに耐張形が適用されている。前者には電線の張力変動を線路方向へ逃がす機能をもつ懸垂形高分子絶縁アーム、後者には万一の断線時に対しても健全径間側の電線を保持できる性能をもつ耐張形高分子絶縁アームを適用することとし、高分子絶縁アームの設計・試作はこれらを対象とした。

2-2-1 高分子絶縁アームの試作

(1) 高分子絶縁アームに求められる性能

設計の対象とする154kV送電線の所要性能を表2-2-1に示す。電氣的には、雷サージ、開閉サージ、商用周波性過電圧ならびに運転電圧などのもとで、台風や季節風などの塩害による汚損条件に対しても十分な絶縁性能が要求されるとともに、万一の故障電流アークに対しても異常を発生しないことが要求される。また、機械的には、電線の最大使用張力、着氷雪、風圧、送電線の水平角、電線の引き下げ角度などから決定される垂直下方向荷重、線路方向荷重および水平横方向荷重に対して十分な性能が要求される。

(2) 高分子絶縁アームの設計

試作した高分子絶縁アーム（絶縁アームと略称）は、

図2-2-1に示す2種類である。一つは、(1)高分子がいし斜め取り付けの吊りユニットと水平ユニットの2本組構造で、鉄塔側の取り付け部をヒンジ構造にして電線の張力変動を線路方向に逃がす機能をもつ、懸垂形絶縁アームである。もう一方は、(2)耐張形絶縁アームであり、斜め取り付けの吊りユニットと、開き角をもつ2本の水平ユニットの3本組トラス構造とし、万一の電線破断時にも健全径間側の電線を支持できる機能をもつ。各高分子

表2-2-1 154kV用高分子絶縁アームの仕様

送電線	回線・ルート数	2回線・1ルート
	送電電圧 (kV)	154
	電力線	ACSR 410mm ² 1条 最大使用張力 4000kgf
	径間長 (m)	300
	水平線間距離/相間距離 (m)	5.6/3
絶縁アーム	汚損耐電圧 (kV)	161
	等価塩分付着密度 (mg/cm ²)	0.12
	表面漏れ距離 (mm)	6000
	使用最大荷重 (kgf)	4000 (最大張力時の電線断線を想定)
	設計荷重 (kgf)	10000 (想定最大荷重の2.5倍)
相間スペース	最大線間電圧 (kV)	161
	相間開閉サージ電圧 (P,U)	5.3
	等価塩分付着密度 (mg/cm ²)	0.12
	表面漏れ距離 (mm)	6000以上
	最大軸方向荷重 (kgf)	1000
	1径間内の取り付け間隔 (m)	75

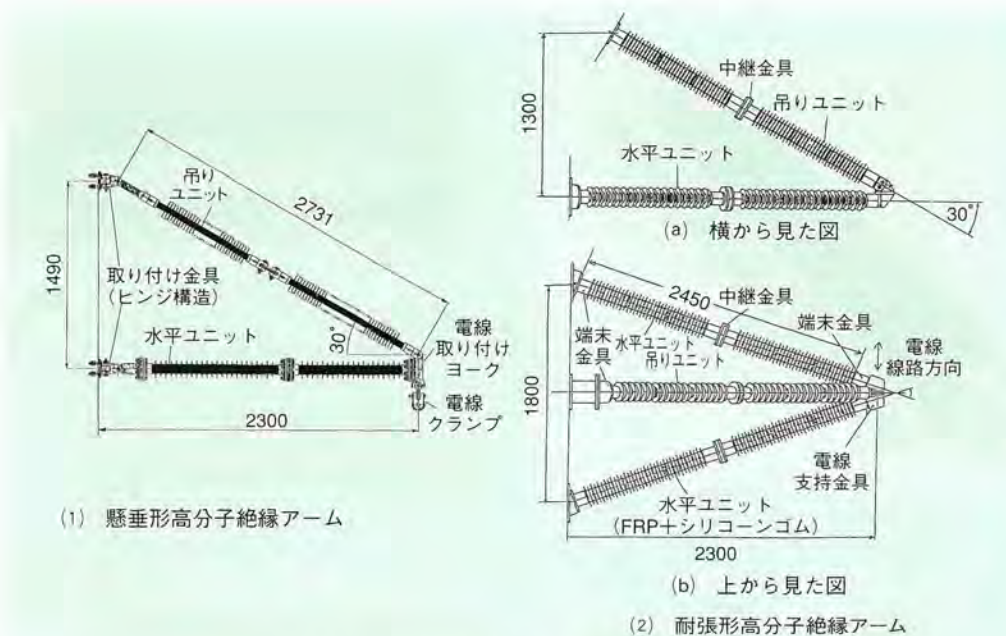


図2-2-1 154kV用高分子絶縁アームの外観

がいしのカバー材には、SR（シリコンゴム）を用い、また、GFRPコアは、懸垂形絶縁アームの吊りユニットにはレーストラックコイル型、同絶縁アームの水平ユニットと耐張形絶縁アームの各ユニットには、フィラメントワインディング成形によるパイプ型を各々用いている。各高分子がいしの概観ならびに端末金具の構造を図2-2-2に示す。

(イ) 表面漏れ*1距離の設計

電気絶縁設計においては、通常、がいし表面の汚損絶縁性能が支配的となる。SRカバーの汚損耐電圧は、磁器がいしの約1.5倍の性能（前掲図2-1-21参照）をもっているが、裕度を見込んで、磁器がいしと同等の汚損耐電圧性能（汚損度0.12mg/cm²において約30kV/m）とした。絶縁アームの所要表面漏れ距離は、系統の1線地絡時の健全相電圧161kV電圧で約5.5mとなるが、裕度を見込んで6mとした。なお、表面漏れ距離と取り付け長さとの比は、通常、2.5程度であることから、コアの所要長さは約2.2mと算出される。

(ロ) 荷重に対する設計

耐張形絶縁アームの水平ユニットのGFRPコアは、高強度が要求される。その強度は、引張/圧縮強度、内/外径、2本のユニットの開き角とユニット長さか

ら決定される所要強度などから設計される。具体的には、高分子がいしのカバーの胴径から外径が、また製造上の制約から内径が決定され、必然的に断面積から強度が算出される。また、電線の最大使用張力（4t）に安全率2.5倍とした10tの最大荷重に耐えるために、2本の水平ユニットの開き角度は、水平ユニットへの機械力に対応した長さ方向の力との関係から40度とした。

懸垂形絶縁アームの水平ユニットについては、耐張形絶縁アームのコアを使用すれば、所要荷重が最大使用張力の60%となるように安全率を考慮しても、十分な強度を有すると考えられる。

なお、懸垂、耐張形両絶縁アームの吊りユニットと水平ユニットとの開き角度は、3節に述べるように、上下の電線の間隔と、絶縁アーム近傍で発生した1線地絡電流アークが上の電線に移行して2線地絡短絡に進展する事故を防ぐための距離として、実験的に解明した結果をもとに、30度とした。

2-2-2 電気絶縁性能評価

(イ) 商用周波電圧に対する性能

前節で試作した絶縁アームの商用周波電圧に対する耐電圧試験を、乾燥条件および降雨を模擬した注水条

*1 表面漏れ距離：2つのがいしの表面に沿った金具間の絶縁距離。

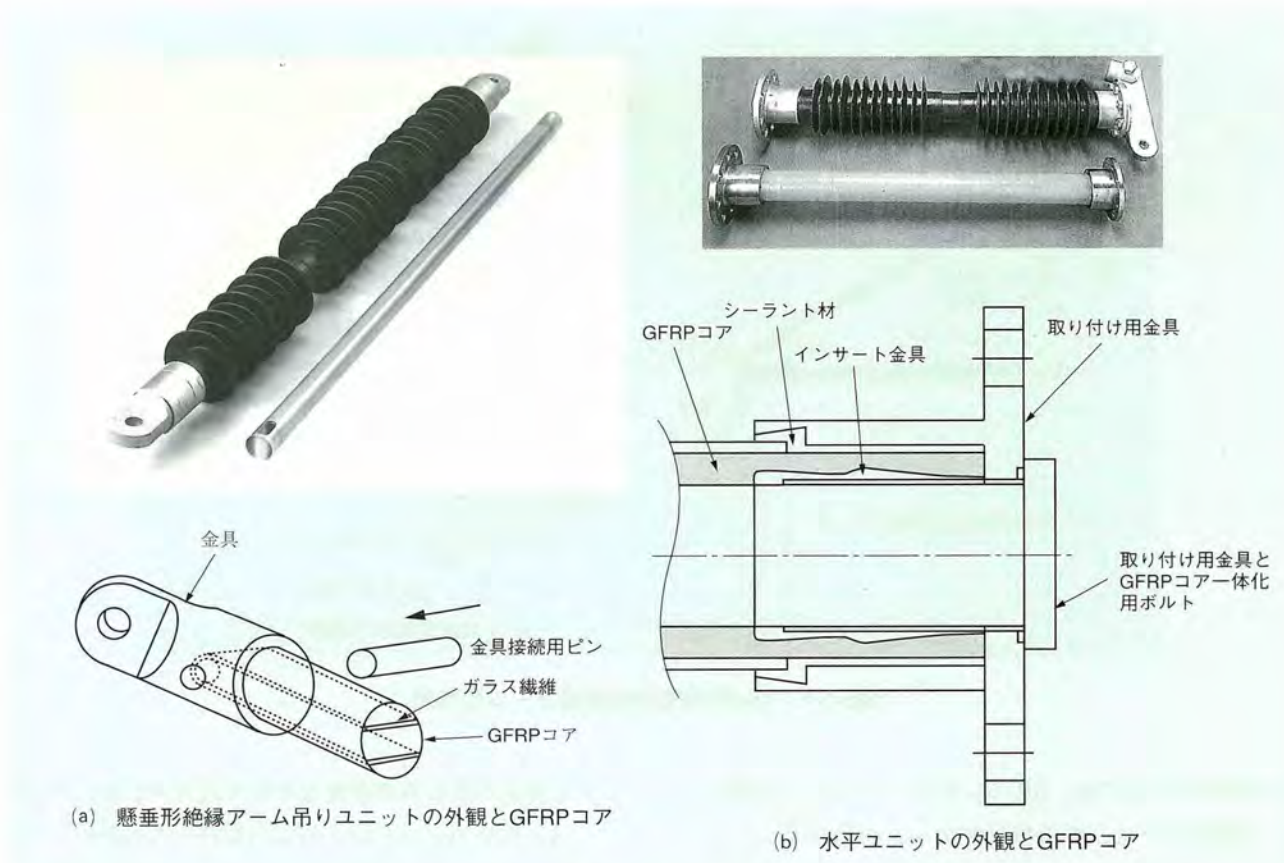


図2-2-2 高分子がいしの概観と端末金具構造



図2-2-3 絶縁アームの電気絶縁性能試験状況

件について実施した。試験は図2-2-3に示すように供試絶縁アームを模擬鉄塔に取り付け、絶縁アームの電線支持側の端末金具に吊り下げた模擬電線に、電圧を印加した。電圧印加は上昇法*1で10回行い、50%フラッシュオーバー電圧*2を求めた。

耐電圧（フラッシュオーバーしない最高電圧）は50%フラッシュオーバー電圧から標準偏差（3%）の2倍を引いたものとした。なお、試験後の試験品の表面にフラッシュオーバーの痕跡は認められず、またSR特有のはっ水性も残っていた。

一方、汚損耐電圧は、あらかじめ絶縁アームの表面を塩分で汚損させ乾燥させた後、霧中で電圧を印加する定印霧中法により行い、その4回耐電圧値を求めた。なお、汚損は、SRがはっ水性を有するため、汚損前に供試絶縁アームに汚損液を塗布し、その後、電圧を

*1 上昇法：がいしに加わる電圧を徐々に上昇させ、フラッシュオーバーが発生する電圧を求める方法。

*2 50%フラッシュオーバー電圧：フラッシュオーバー発生率が50%となる電圧。



図2-2-4 汚損耐電圧試験前のフラッシュオーバー状況

印加して、表面で局部放電を発生させるとともに、図2-2-4に示すようにフラッシュオーバーを発生させ、はっ水性を一時的に低下させた後、スプレー汚損*1する方法を考案した。得られた絶縁アームの霧中耐電圧特性は、図2-2-5に示すように軽汚損から重汚損領域に対して、高分子がいしユニットより約15%低い、磁器製長幹がいしに比較して約15%高い。絶縁アームの汚損耐電圧が高分子がいしユニットに比較して低くなるのは、3本のユニットが並列に課電されることによりフラッシュオーバーの確率が高まることに起因するものと考えられる。

*1 スプレー汚損：がいし表面に塩とトノコの混合液をスプレーで吹き付ける方法。

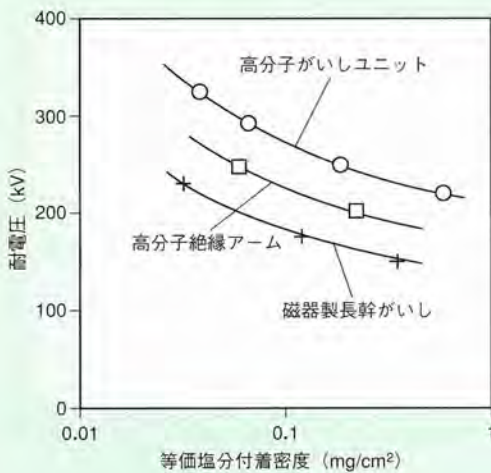


図2-2-5 高分子絶縁アームの霧中耐電圧特性 (定印霧中による)

(ロ) 雷・開閉インパルス電圧に対する性能

絶縁アームを供試した雷インパルス電圧試験*2、開閉インパルス電圧試験*3ならびに高分子がいしユニットを供試して、急峻波インパルス電圧試験*4を実施した。急峻波、雷、開閉インパルス試験の波頭長は、各々0.4 μs、3 μs、210 μsである。いずれの試験においても、絶縁破壊に伴う放電はすべて高分子がいしユニットの表面で発生しており、コアなどの内部の貫通破壊はなかった。また、試験後の絶縁アーム表面に異常はなく、はっ水性も残っていた。定印霧中試験による50%フラッシュオーバー電圧から標準偏差(3%)の2倍を引いた耐電圧(フラッシュオーバーしない最高電圧)は198kVであり、初期値と同等であった。

(ハ) 故障電流アークに対する性能

高分子絶縁アームの表面で絶縁破壊が発生した場合、系統の短絡電流に相当する故障電流アークが発生し、表面の損傷やアームの破損等に至ることが考えられる。このような大電流アークに対する高分子絶縁アームの性能を把握するため、図2-2-6に示すように、高分子がいしユニットを供試して耐アーク試験を実施した。

試験はあらかじめ、高分子がいしユニットの端末金

*2 雷インパルス試験：架空送電線への落雷時に発生する過電圧に対して、絶縁の性能を把握するための試験。
 *3 開閉インパルス試験：送電線の開閉時に発生する過電圧に対して、絶縁の性能を把握するための試験。
 *4 急峻波インパルス試験：雷インパルス電圧よりさらに短い時間で規定電圧に達するような、急激に立ち上がる電圧を加える試験。



図2-2-6 高分子がいしユニットの耐アーク試験状況

具間に、がいし表面に沿わせて細銅線を張り、大電流通電により細銅線を溶断させて、大電流アークを発生させた。アーク条件は、154kV系統の標準的短絡故障条件（31.5kA、0.4秒）とした。なお、このアーク条件は図2-2-7に示すように、磁器製ポストがいしについて試験を行うと、がいしの笠が割れたり欠けたりする、破損限界を超えるような厳しい条件である。アーク試験後の供試品の高分子がいしユニットの状況を図2-2-8に示す。

試験の結果、笠欠けや胴切れは発生せず、笠の著しい溶損や焼損も認められなかった。なお、細銅線を取り付けた端末金具部は一部溶損しており、また高分子がいしユニット表面の黒く変色した部分では、高温によって分解された炭化物が残留していた。この試験後

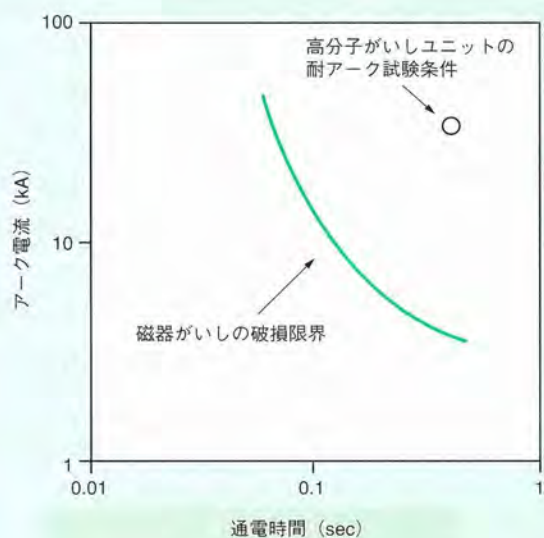


図2-2-7 高分子がいしユニットの耐アーク試験条件



図2-2-8 耐アーク試験後の高分子がいしユニットの表面の状況

の高分子がいしユニットの商用周波注水フラッシュオーバ電圧は、初期フラッシュオーバ電圧に比較して、表面残留物の影響により、一時的に約10%低下した。

(二) 154kV高分子絶縁アームの絶縁性能

電気絶縁試験の結果をもとに、高分子絶縁アームの各種条件における絶縁性能の概要を図2-2-9に示す。いずれの耐電圧についても仕様値を上回る性能が得られた。また、フラッシュオーバ電圧の時間依存特性を、急峻波、雷インパルス、開閉インパルスの各電圧波形の立上りの特性を示す波頭長の関係として図2-2-10に

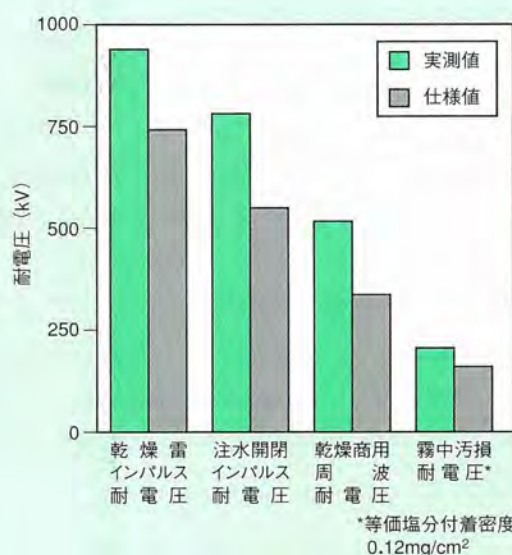


図2-2-9 154kV用高分子絶縁アームの電気絶縁性能

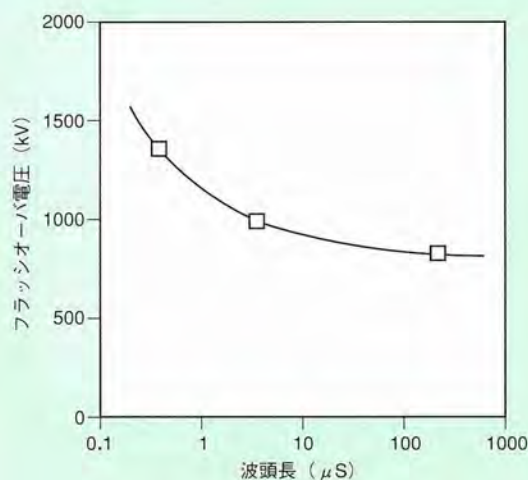


図2-2-10 高分子絶縁アームにおけるフラッシュオーバ電圧の波頭長依存性

示す。この結果は、一般的に得られている表面絶縁の電圧-時間特性と同様な傾向である。

(2) 機械性能評価

(イ) 静荷重に対する性能

試作した154kV耐張形絶縁アームの限界機械力性能を検証するため、静荷重試験を実施した。試験は、図2-2-11に示すように、絶縁アームを固定架台上に向き固定し、電線取り付け金具部の片端に張力計を介してワイヤを取り付け、ワイヤをウィンチで巻き上げることにより線路方向荷重を加えた。

得られた荷重と電線取り付け部変位の関係は、図2-2-12に示すように最大使用張力である荷重4 tまでは載荷荷重と絶縁アーム載荷部（電線取付け部に対応）変位量はほぼ直線関係にあり、絶縁アームに破損や変形などの異常は認められなかった。最大使用張力（4 t）に対する応力は約11kg/mm²であり、これはGFRP

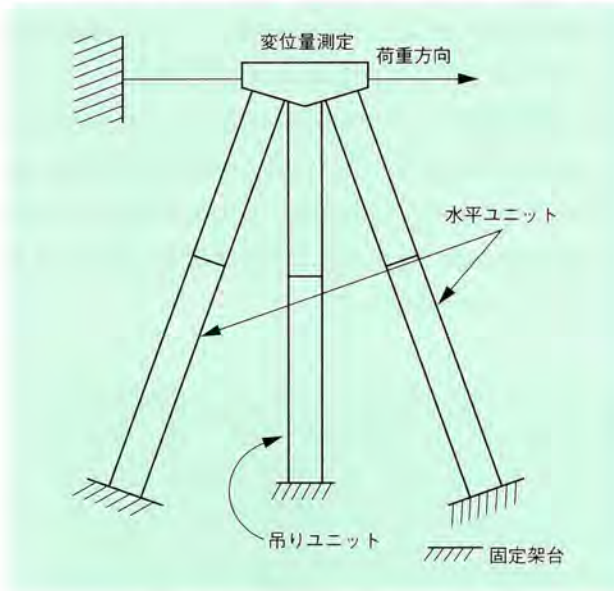


図2-2-11 機械力試験状況

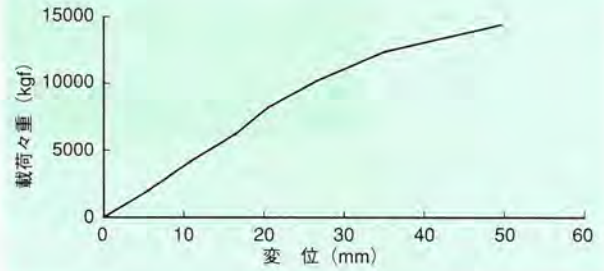


図2-2-12 静荷重試験における荷重-変位関係

コアの許容引張・圧縮強度20kg/mm²（最大強度約50kg/mm²の1/2.5）に比較し十分小さい。さらに荷重を増大して得られた破壊荷重は15.5 tであり、最大使用張力に安全率を考慮した設計荷重10 tを十分満足するものであった。なお、破壊箇所は載荷側水平ユニットコアの鉄塔側取り付け部付近であり、破壊様相は座屈破壊であった。

(ロ) 衝撃荷重に対する性能

電線破断時などに発生する瞬間的な荷重に対する高分子絶縁アームの機械力性能を評価するため、衝撃荷重試験を実施した。絶縁アームは静荷重試験時と同様に固定し、絶縁アームの電線取り付け部の両側にワイヤを接続し、一方のワイヤは固定するとともに、他方のワイヤは切断器を介してウィンチで巻き上げ、一定以上の荷重で切断器を動作させて、線路方向の衝撃荷重を載荷した。

その結果、衝撃荷重時に絶縁アームに発生する応力は、ほぼ静荷重試験時と同じ傾向を示すことが分かった。したがって、高分子絶縁アームの機械力は、静荷重に対する特性により設計すれば十分であることが明らかになった。

2-3 高分子絶縁アームを適用した 架空送電線の諸特性

2-3-1 試験送電線による機械的ストレスの 解明

架空送電線に絶縁アームおよび相間スペーサを適用した場合、それらに加わる機械的ストレスを把握することは、機械的長期性能を評価する上で重要である。このため、高分子絶縁アームおよび相間スペーサを適用した実規模試験線を設置し、自然風に対する応答試験および電線に付着した雪や氷の一斉脱落によるはねあがり、すなわちスリットジャンプを模擬した人工加振試験を実施した。

試験線の概要を図2-3-1に、また絶縁アームおよび相間スペーサの取り付け状況を図2-3-2に示す。各鉄塔間の径間長は約150m、相間距離（垂直電線間距離）は3mである。絶縁アームはNo.2鉄塔に、また相間スペー

サは両径間の中央部の各相間に1本ずつ取り付け付けた。なお、相間スペーサは、絶縁アームの高分子がいしユニットと同様な構造である。

(1) 自然風応答特性

懸垂形絶縁アームおよび耐張形絶縁アームの自然風応答試験期間はいずれも約6カ月間とした。各絶縁アームの試験期間中に得られた最大風速は、懸垂形絶縁アームの試験時は約12m/秒、耐張形絶縁アームの試験時は約18m/秒であった。この場合の、懸垂形絶縁アームおよび耐張形絶縁アームの軸方向の最大応力の変動分は $0.1\text{kgf}/\text{mm}^2$ 以下であった。これらの結果と両径間の張力差をもとに推定した風速40m/秒の時の絶縁アームの発生応力は、約 $0.7\text{kgf}/\text{mm}^2$ であり、非常に小さいストレスとなることが分かった。

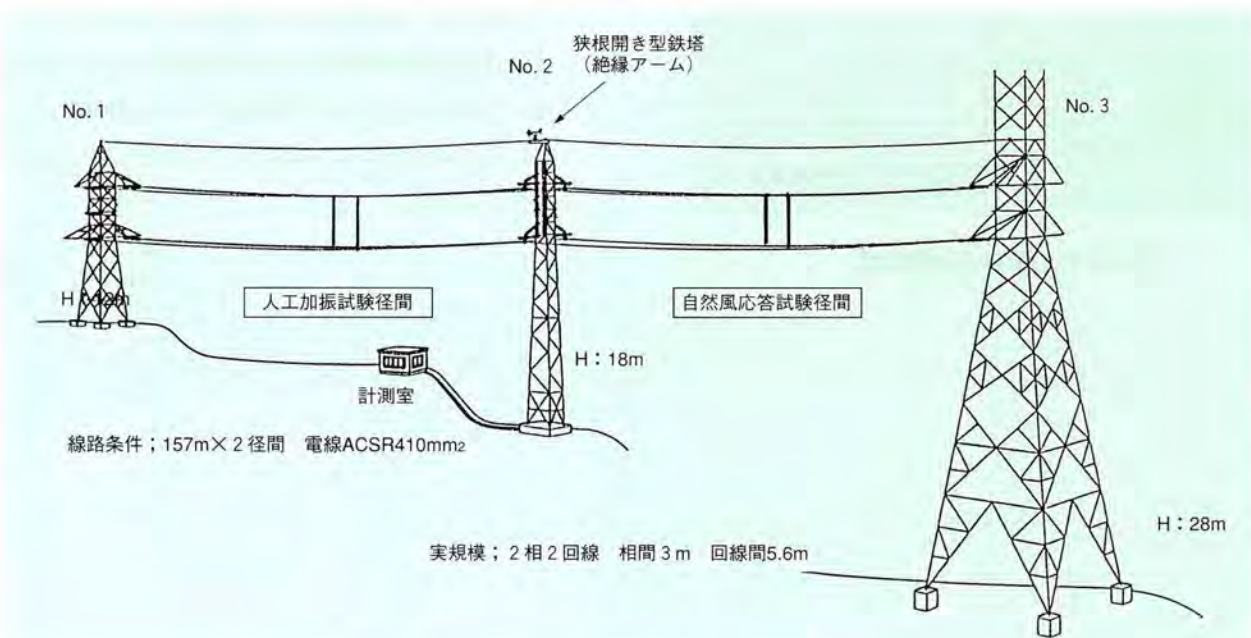


図2-3-1 絶縁アーム等の機械力評価用試験送電線



図2-3-2 154kV高分子絶縁アームおよび相間スペーサの取付け状況

(2) スリットジャンプに対する特性

電線に雪や氷が付着した後、電線から脱落すると、電線の跳躍振動（スリットジャンプ）が発生する。この時の絶縁アームへの機械的ストレスを把握するため、模擬試験を実施した。

試験は、電線の着氷雪重量と等価な重りを1径間当たり等間隔に8箇所取り付け、電磁石により切り放して一斉脱落させることにより、スリットジャンプを模擬した。

試験により得られた脱落着雪荷重に対応する電線張力差と、耐張形絶縁アーム水平ユニットの軸方向応力変動との関係を図2-3-3に示す。同図には、自然風応答試験の結果も併記したが、耐張型高分子絶縁アームに発生する最大軸方向応力変動は1 kgf/mm²程度で、許容応力に比較し小さい値である。

(3) 相間スペーサによる電線動揺抑制効果

スリットジャンプの模擬試験時に得られた、相間スペーサの有無に対する電線の相間距離（垂直間隔）の関係を図2-3-4に示す。相間距離の測定は、1/2径間（図2-3-4(a)）に相間スペーサをとりつけた場合と、とりつけない場合について、1/2径間と1/4径間の位置で行った。試験結果は、懸垂形絶縁アーム装柱時（同図(b)）および耐張形絶縁アーム装柱時（同図(c)）のいずれにおいても、75m間隔で相間スペーサを取り付けると、相間距離を相間スペーサがない場合に対して約75%~50%に短縮できることがわかった。

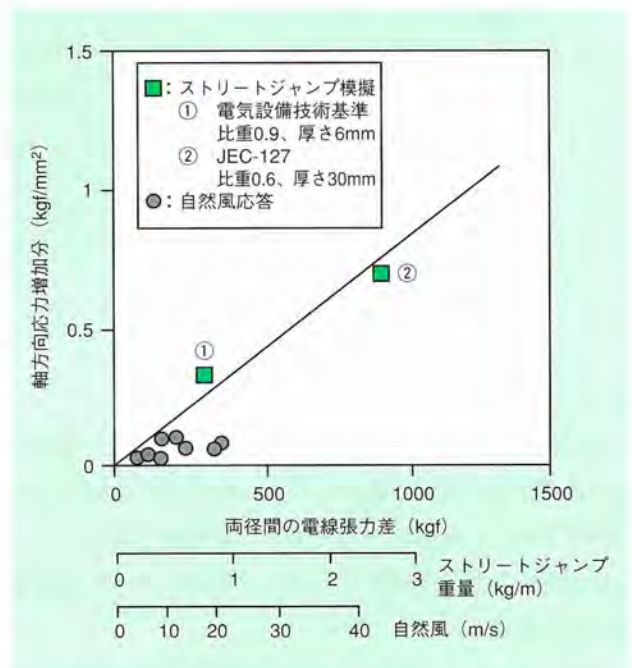
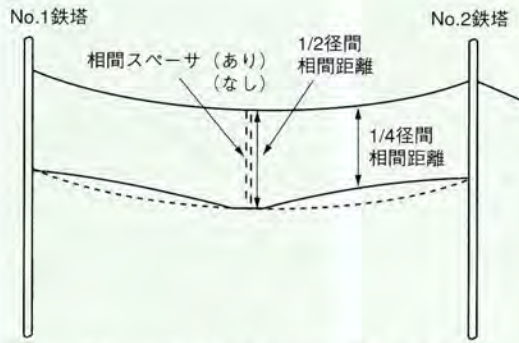


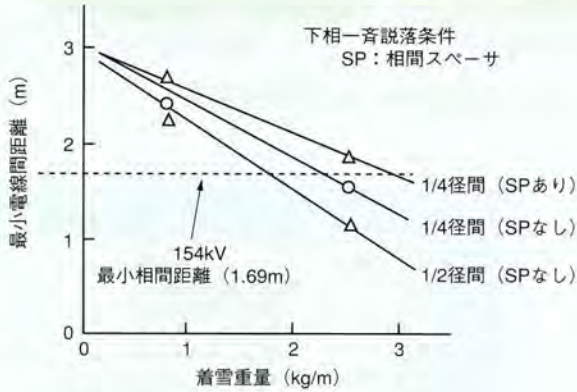
図2-3-3 試験線による154kV用耐張形高分子絶縁アームの軸方向応力

2-3-2 鉄塔および送電線系の応答シミュレーション

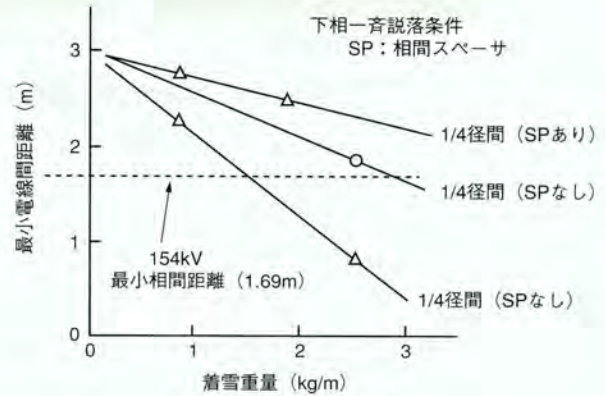
長距離の送電線を対象として、絶縁アームや電線の挙動を把握するためには、鉄塔および電線を連成系として考え解析する必要がある。ここではこれらの動的応答解析手法の開発について述べる。



(a) スリートジャンプ時の相間距離測定箇所



(b) 懸垂形絶縁アーム



(c) 耐張形絶縁アーム

図2-3-4 スリートジャンプ模擬試験における相間の電線間距離

(1) シミュレーション手法の概要

送電線路は、剛性が低く可撓性に富む電線と、剛性の高い鋼管単柱あるいは鋼材の立体骨組み構造の鉄塔とから構成される。絶縁アームを用いた送電線では、さらに、高分子がいし製の絶縁アームおよび相間スペーサが構造系に含まれる。

このため、異なる物性、形状の部材が任意に組み合わせられた構造系の解析に有効な有限要素法を用いた送電線路の応答シミュレーション手法を提案した。

(2) シミュレーション手法の検証

シミュレーションの対象とした送電線解析モデルは、前掲の図2-3-1のとおりであり、スリートジャンプ試験について解析した。シミュレーションでは、初期釣合状態にある解析モデルに対し、重りの重量に相当する静的な外力を作用させた後、落下させる重りの位置に衝撃荷重を作用させることにより、試験を模擬した。

なお、本モデルは、実規模試験線をトラス要素およびはり要素を用いて離散化したものである。

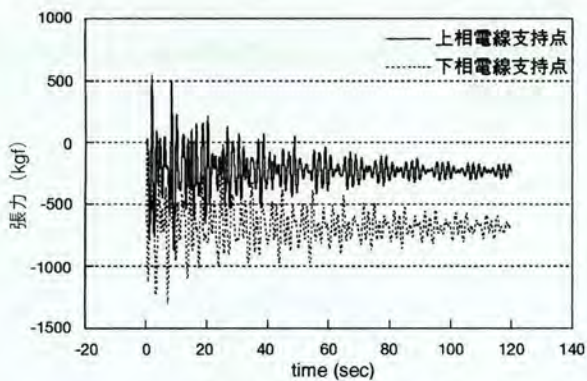
シミュレーション結果と試験結果を対比して、図2-3-5および図2-3-6に示す。これらの図から、シミュレーション結果と試験結果は概ね一致していると考えられる。

以上のことから、開発した手法により、高分子絶縁アーム方式送電線の応答シミュレーションがほぼ可能であることが検証された。

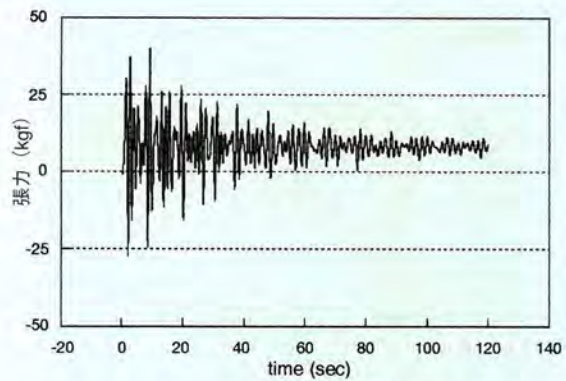
2-3-3 地絡アークの進展様相

架空送電線のコンパクト化に当たっては、線下幅や相間距離など電線間隔の縮小が必要である。一方、相間距離を縮小した送電線では、落雷等による絶縁アーム部での1線地絡故障を想定すると、地絡アークの気流上昇による浮上により、2線地絡故障に波及することが考えられる。この進展現象を把握するため、154kVコンパクト送電線を模擬した電線配置により、絶縁アーム部で地絡アーク発生試験を行った。

絶縁アームは、相間距離を3mとして模擬鉄塔に2基取り付け、電線を各1条平行に架線した。下相の電線に

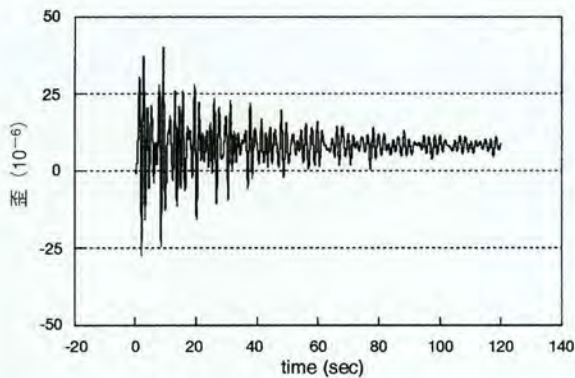


(a) シミュレーション結果

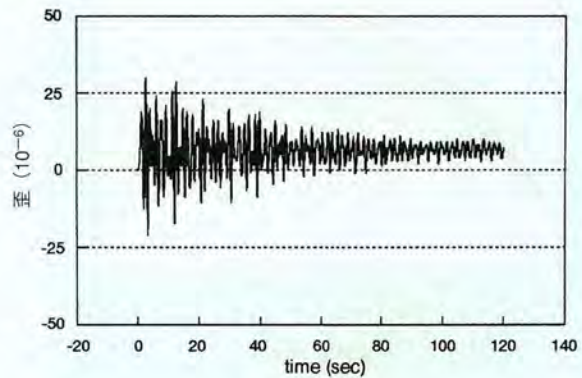


(b) 試験結果

図2-3-5 シミュレーション結果と試験結果との比較：電線支持点張力



(a) シミュレーション結果



(b) 試験結果

図2-3-6 シミュレーション結果と試験結果との比較：絶縁アーム軸ひずみ

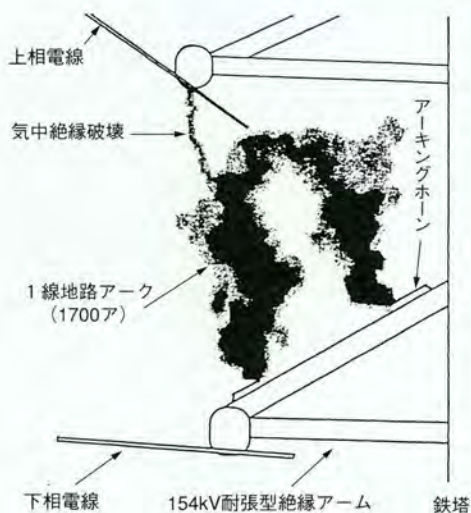


図2-3-7 2線短絡へ移行時の状況

は地絡アーク用電源として約30kVの電圧を印加し、上相の電線には、1線地絡時の健全相の最高電圧に相当する電圧161kVを印加した。1線地絡アークは、絶縁アームの吊りユニット部または水平ユニット部のアーキングホーン間に細銅線を張って発生させた。下相の絶縁アームのアーキングホーン間で発生した1線地路アークが上昇し、アークの上部と上相電線間で絶縁破壊が発生して、2線短絡へ移行した時の状況を図2-3-7に示す。

1線地絡アーク電流と2線短絡への移行時間特性は、図2-3-8に示すように、アーク電流が大きいほど移行時間は短くなり、また上相電線までの距離が短い吊りユニット部での発弧の方が、移行時間が短い。同図から最も厳しい条件での移行時間は、0.65秒であることが分かる。一方、現用154kV送電線の主保護遮断器の代表的な動作時間は約0.17～0.24秒であることから、相間距

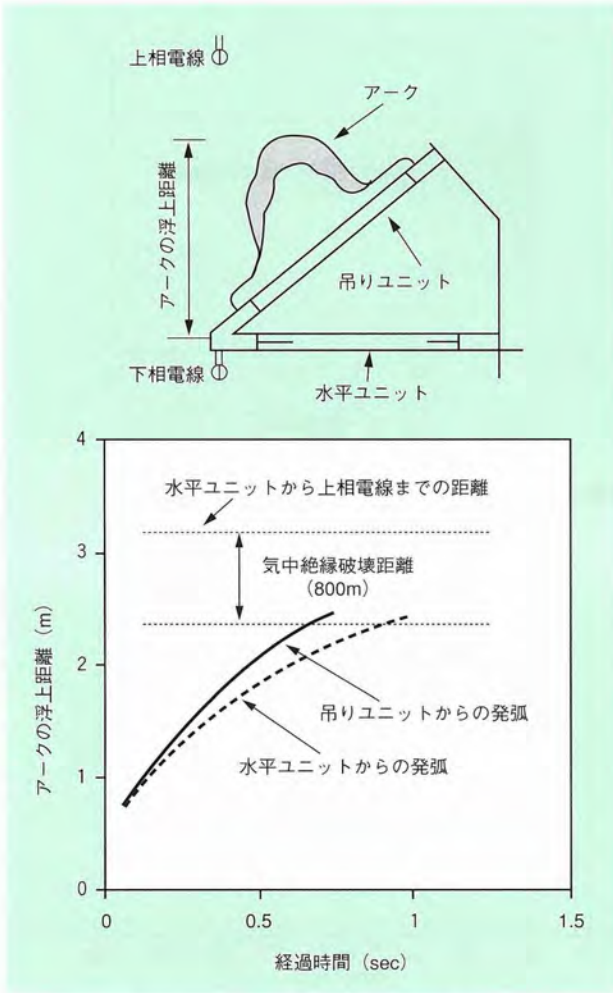


図2-3-8 1線地路アーケの浮上特性

離を 3 m に縮小したコンパクト送電線においても、2 線短絡へ移行する前に 1 線地絡故障は除去できるものと考えられる。

2-4 150kV級架空送電線の概念設計

154kV高分子絶縁アームを適用した154kVコンパクト送電線の概念設計結果を図2-4-1に示す。同図には現用66kVおよび154kV送電線鉄塔形状も示した。設計は、径間長300mを想定し、また、市街地を通過するものとし、住宅など建造物から規定の長さだけ離れた条件としている。これらの条件および絶縁アームの取り付け長が約2.3mであることから、狭根開き鉄塔や鋼管単柱鉄塔などを採用して、絶縁アーム取り付け部分の塔体幅を約1mとすれば、2回線ルート幅が約5.6mとなり、現用66kVのルート幅内に154kV送電線の建設が可能となる。なお、鉄塔上部の塔体幅1mを有する狭根開き鉄塔、あるいは鋼管単柱鉄塔の製作は、既存技術で十分可能である。

る。

今後の課題としては、コンパクト送電線の点検・保守方法があげられる。現用の送電線では、鉄塔やがいしおよび電線等に異状がないか、定期的に点検が行われている。また、異状があった場合は事故を未然に防止するため、不良個所の保守作業が実施されている。この点検・保守作業は、一般に作業者が鉄塔に昇って行う場合が多いが、コンパクト送電線では、鉄塔から電線までの絶縁距離が縮小されているため、作業者の安全を確保することが重要である。したがって、今後は高分子がいし等の異状診断技術を開発するとともに、作業者の安全や作業性を考慮した点検・保守方法を検討する予定である。

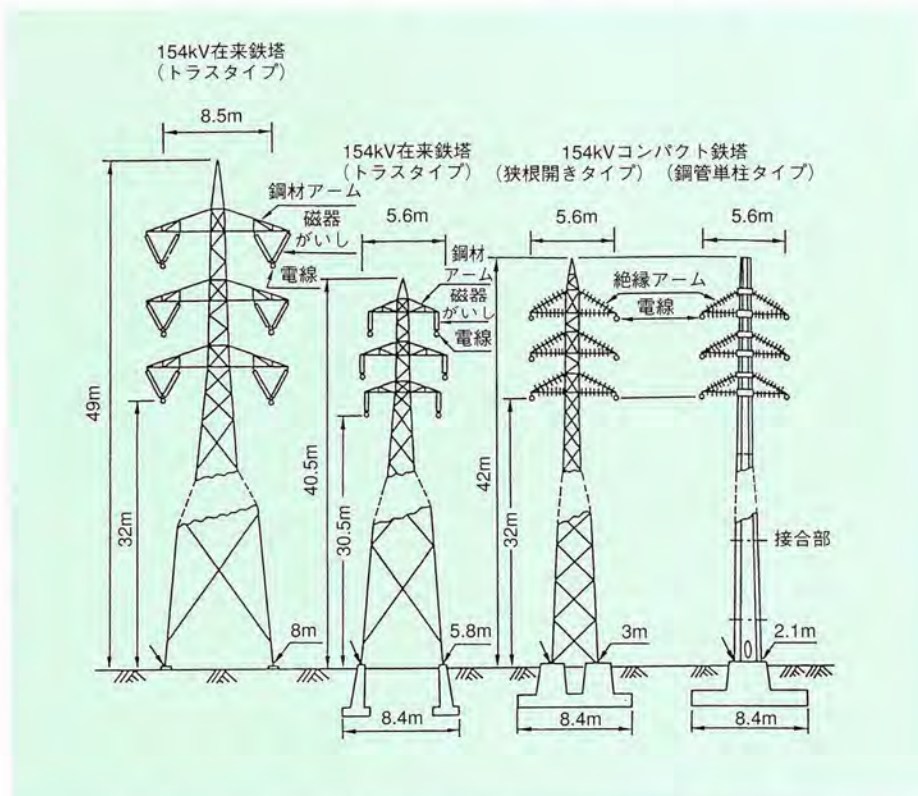



図2-4-1 154kV用コンパクト送電線用鉄塔形状（試設計結果）



第 5 章

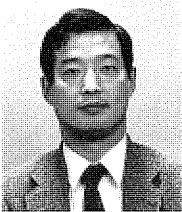
5

CVケーブルのコンパクト化

第3章 CVケーブルのコンパクト化 ● 目次

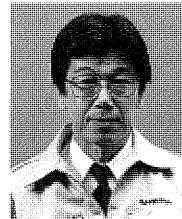
横須賀研究所電力部 上席研究員 岡本 達希
横須賀研究所電力部 主任研究員 穂積 直裕
横須賀研究所電力部 主任研究員 鈴木 寛

3-1	CVケーブルの絶縁層界面改質材	43
3-2	界面拡散法のCVケーブルへの適用法検討	49
3-3	絶縁厚半減154kV CVケーブルの試作と性能評価	51
3-4	150kV級地中送電線の概念設計	55



岡本 達希 (1976年入所)

これまでは主に、電子顕微鏡等を用いた高分子絶縁材料の絶縁破壊・劣化機構や高電圧機器等の絶縁診断方法の開発研究に携わり、最近では材料の改質による超高圧CVケーブルのコンパクト化手法の開発とその実証を進めてきた。今後も、高電圧機器等のさらなる高性能化研究や、診断技術の開発研究に取り組んでいく予定である。



鈴木 寛 (1977年入所)

これまで、極低温ケーブルの電気絶縁特性、各種の新型超高圧ケーブルの長期信頼性評価に関する研究に従事してきた。今後は、今回開発のコンパクトCVケーブルの長距離線路への適用に向けて、同ケーブル用接続部の開発を進める予定である。



穂積 直裕 (1983年入所 '96年6月より中央電力協議会に出向中)

主として電力機器・ケーブルの絶縁材料の劣化、破壊に関する研究に携わってきた。特に、絶縁破壊の起点の解明や、劣化、破壊の原因となる内部帯電現象の解明を行うとともに、その成果を生かし、絶縁診断手法の開発および材料の高性能化に取り組んできた。

3-1 CVケーブルの絶縁層 界面改質材

CVケーブルの絶縁厚さを薄くするためには、絶縁破壊機構の詳細な解明と、それに基づく絶縁材料の改質または電氣的弱点の発生の抑制が重要である。そこで当研究所は、CVケーブルの絶縁に使用される低密度ポリエチレンの電氣的・物理的特性を調査するとともに、CVケーブルの絶縁破壊の発生・進展の過程を、ポリエチレンの結晶構造との関係として明らかにした。その結果、半導電層界面の絶縁体の結晶性を高め、破壊が発生しやすい半導電層界面に接する薄い層を高密度化する手法を考案し、このための材料研究を行った。

3-1-1 絶縁破壊の起点と結晶構造

CVケーブルは、15ページの図1-3-2に示す構造をしており、その絶縁破壊は、半導電層から絶縁層に突き出した極めて小さな突起などを起点として発生し、樹枝状（トリー状）の細い絶縁破壊痕を残すので、電気トリー（以下トリーと略記する）と呼んでいる。絶縁性能を向

上させるためには、このトリーがどのように発生、進展するかを明らかにする必要がある。このため、図3-1-1に示す微小電気トリー観測装置を開発し、トリーの発生直後、長さ数 μm （ $1\mu\text{m}$ は千分の 1mm ）、太さ $0.1\mu\text{m}$ 程度に成長した時点で、印加電圧を高速遮断し、トリーの成長を停止させ、トリー進展機構を解析した。その結果、図3-1-2に示すように、トリーは突起電極先端における数 10nm （ 1nm は百万分の 1mm ）程度の微細な凸部（同図(a)の左下部分）から、ポリエチレンの薄い（ 20nm 程度の）板状の結晶であるラメラ（図(b)中の白いすじ(b)参照）に沿って伸び出していることが明らかになった。ラメラの模式図を図3-1-3に示す。従って、絶縁性能を向上させるためには、ラメラの成長や並び方が重要であることが示された。

一般に、CVケーブルの絶縁層に使用される低密度ポリエチレンは、結晶性が高いポリエチレンの方が密度が大きく、密度が大きい方が絶縁破壊強度が大きい。しかし、結晶性の高いポリエチレンは硬さが増し、ケーブル

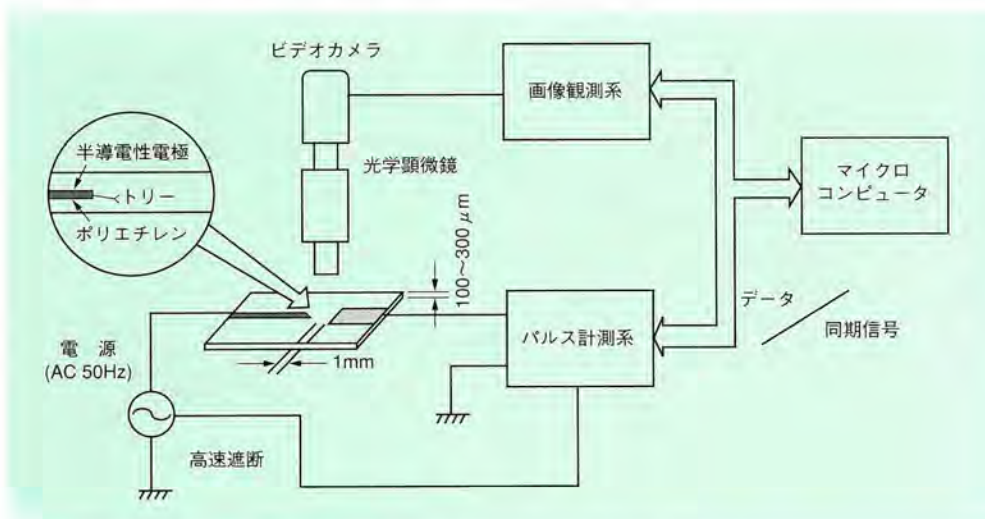


図3-1-1 微小電気トリー観測装置



(a) 200nm



(b) 200nm



(b)

図3-1-2 初期微小トリーの電子顕微鏡観察

に使用すると、硬くて曲げにくいケーブルになってしまう。そこで絶縁破壊の起点となる半導電層に接する、わずかなポリエチレン部分のみ結晶性を高くすれば、ケーブルの硬さはほとんど変化させずに、絶縁破壊強度を向上させることが可能となる。

そこで、CVケーブル半導電層中に添加剤を混入し、ケーブル製造中に絶縁層に浸み込ませて、半導電層に接するわずかな絶縁層部分の架橋ポリエチレンの結晶性を高める「界面拡散法」を考案した。この方法は、半導電層材料中に、分子量の大きい界面活性剤系の添加剤を少量添加し、ケーブルの架橋*時の高温工程中に、架橋ポリエチレン絶縁層中へこの添加剤を若干量だけ拡散浸透させるものである。この添加剤は、架橋ポリエチレンの結晶成長を促すとともに、架橋ポリエチレン中の非晶質部分を充填補強し、絶縁破壊強度を向上させるものである。さらに、この方法は、従来から開発されている各種の絶縁性能向上技術と併用することが可能である。

3-1-2 添加剤による半導電層界面のラメラ配向と絶縁破壊特性

添加剤による、半導電層界面近傍のポリエチレン絶縁体中のラメラ配向への影響と、絶縁性能の変化を明らかにするために、直径80mm、厚さ5mm、絶縁部分の厚

*架橋：鎖状の分子構造を立体編目状の分子構造にする。耐熱変形性が改善される。

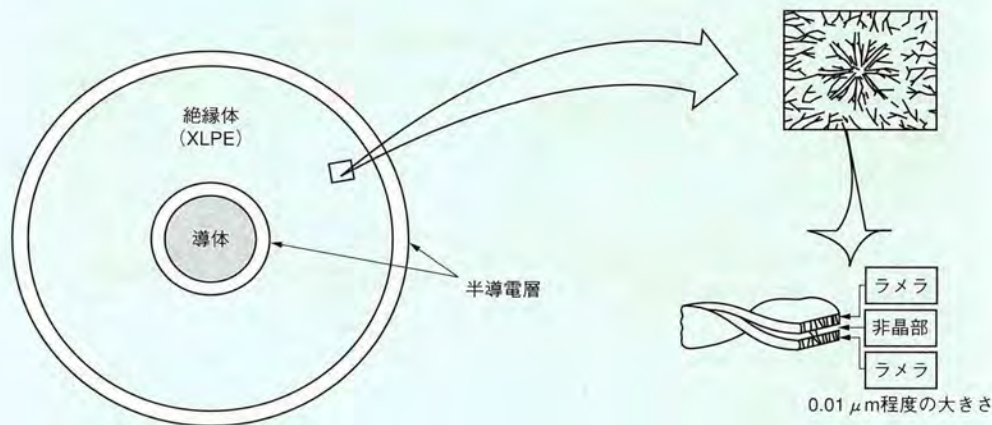


図3-1-3 CVケーブル絶縁体の結晶構造

表3-1-1 半導電層材料に加えた添加剤の例

添加剤番号	成分	分子量
0	無添加	—
1	ステアリン酸系界面活性剤	758
2	ステアリン酸系界面活性剤	1250
3	シノレイン酸系界面活性剤	2980
4	オレイン酸系界面活性剤	1080
5	ポリシノレイン酸系界面活性剤	2940
6	ポリシノレイン酸系界面活性剤	2550
7	ポリシノレイン酸系界面活性剤	2770
8	マイレイン酸系界面活性剤	1850
9	酸化プロピレン系界面活性剤	2800

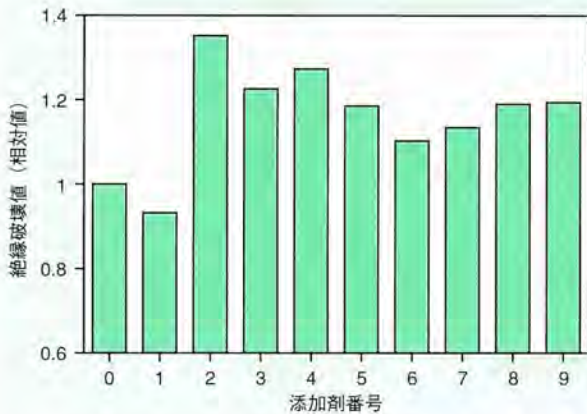


図3-1-4 ディスク試料における絶縁破壊強度

さが約0.5mmの円板状試料（ディスク試料と呼ぶ）を用いて、絶縁破壊試験を行った。この試料の半導電電極に添加剤を加えた、改質半導電層材料を使用した。添加剤は、表3-1-1に示すように、分子量の異なる界面活性剤系の添加剤を9種類使用した。試料は、添加剤を加えない試料と合わせて計10種類を製作した。各試料について10個ずつ絶縁破壊強度を測定した結果を図3-1-4に示す。この半導電層材料の改質により、50%ワイブル破壊電界強度*が最大1.6倍向上した。このワイブル分布は、n個のリングからなる鎖の、破断確率を計算するために考え出されたものであり、鎖等の破断強度が最も弱い部分で決められることから、最弱点破壊確率分布とも呼ばれている。

改質半導電層界面近傍のラメラ配向を定量的に検討するために、半導電層界面とその近傍の架橋ポリエチレンについて、10万倍程度の透過型電子顕微鏡写真を撮影し、

*50%ワイブル破壊電界強度：横軸を破壊電界強度、縦軸を累積頻度にしたグラフを作り、このグラフ上の累積頻度50%に相当する電界強度のこと。



図3-1-5 半導電層界面の電子顕微鏡写真例

解析した。半導電層界面近傍の架橋ポリエチレン中には、図3-1-5に示す様に、厚さ20nm、見掛けの長さ数百nm程度のラメラ（図中の横方向に伸びた白い線）が、半導電層中のカーボン粒子から垂直に多数伸びている。ラメラの両側の黒い部分は非晶質部分で、ラメラ部分よりも染色剤に染色されやすいので黒く見える。また半導電層材料中には、カーボン粒子が凝集して出来た、大きさ100nm程度の集合体が黒い塊として見える。

ラメラの向きを定量的に評価するために、図3-1-6に示す様に、界面の垂線とラメラが作る角度をラメラ角と定義する。界面から0.1μmきざみの各帯状範囲の中で、界面からの距離とラメラ角の関係を求めた例を図3-1-7に示す。同図の様に平均ラメラ角は界面のごく近傍では45~50度であるが、界面から離れるに従って20度~30度に集中する様になり、ラメラ方向が垂直に近づく。平均ラメラ角は、全くランダムに配向する場合は45度になるので、同図に示す様に、半導電層界面では、界面の粗さが影響しほぼ45度程度、界面から0.5μm付近では、成長したラメラが競合しあって絶縁体中へ並んで成長しているため、最小値の20度程度となっている。さらに界面から遠ざかるにつれて、界面から成長したラメラと、ポリエチレン絶縁体中で成長したラメラの競合が始まり、ラメラが並んで成長することを妨げているため、平均ラメラ角も増加している。このように、界面から1μm以

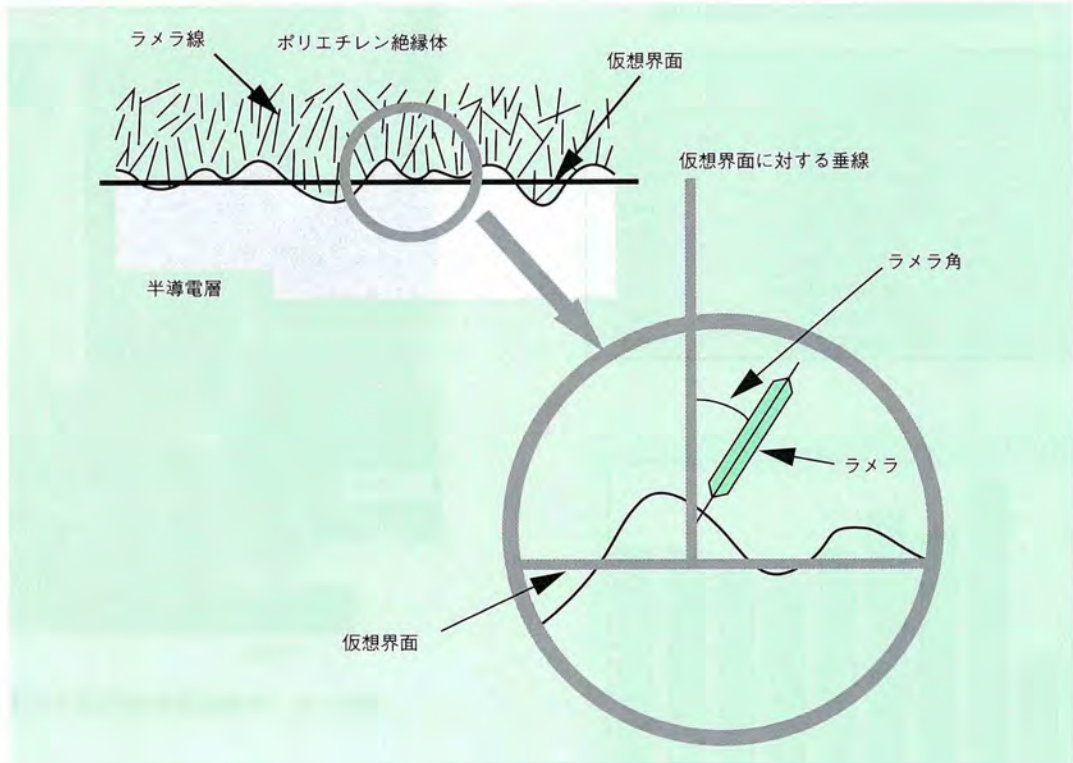


図3-1-6 平均ラメラ角の定義

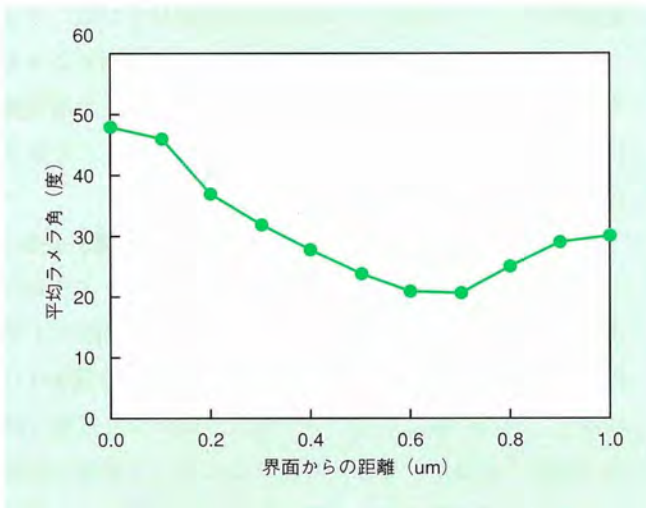


図3-1-7 平均ラメラ角の界面近傍での変化例

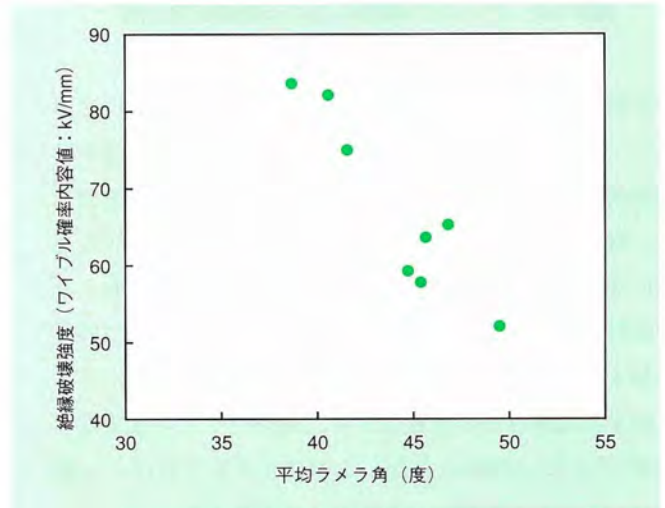


図3-1-8 ディスク試料における絶縁破壊強度と平均ラメラ角の関係

内のラメラ配向は添加剤の影響を強く受ける。

界面から0.1 μmの帯状範囲の平均ラメラ角と、絶縁破壊強度の関係を図3-1-8に示す。同図に示す様に、従来の材料（無添加材料）では平均ラメラ角が50度程度であるのに対し、改良半導電層材料では平均ラメラ角が小さくなり、破壊電界強度が最大1.6倍程度向上している。

これから、平均ラメラ角が小さい試料では、ラメラが半導電層界面に垂直に密集して成長するために、ラメラの密度が大きい。すなわち結晶性が高くなり、ポリエチレンの局所的な密度が向上するため、絶縁破壊強度が高くなったと考えられる。

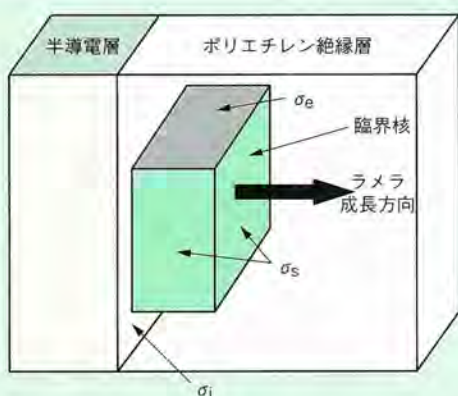
3-1-3 添加剤による半導電層界面のラメラの成長促進

平均ラメラ角が小さい（絶縁破壊強度が高い）試料では、半導電層界面のラメラ密度が高いことが示された。また、平均ラメラ角を小さくする方法を経験的に模索し、いくつかの半導電層材料と添加剤の組み合わせについて効果が確認されたことを前節で述べた。そこで、添加剤の効果を結晶成長の観点から理論的に検討した。

一般に、高分子中の結晶の発生・成長は、臨界核（ポリエチレンの結晶が成長するきっかけとなる核であり、結晶成長を持続させるのに必要な最小核をいう）の発生と、その後の成長に依存する。そこで、半導電層界面での臨界核の発生を図3-1-9に示す様にモデル化した。半導電層界面での臨界核の発生に必要な最小の自由エネルギー（ $\Delta\phi^*$ ）は次式で表される。

$$\Delta\phi^* = 2\sigma_e (4 \cdot \sigma_s - \sigma_i) 2 / \Delta f$$

ここで、 Δf 、 σ_e 、 σ_s 、 σ_i はそれぞれポリエチレンの単位体積当りの融解自由エネルギー、ラメラの折り畳み面の表面自由エネルギー、ラメラの側面の表面自由エネルギー、半導電層界面の表面自由エネルギーである。同式は、表面自由エネルギー（ σ_i ）が大きい半導電層界面を、表面自由エネルギー（ σ_s ）が小さい臨界核で



臨界核の発生に必要なパラメータ

- σ_e : 臨界核上下面 [ラメラ折り畳み面] の表面自由エネルギー
- σ_s : 臨界核側面の表面自由エネルギー
- σ_i : 半導電層の表面自由エネルギー

図3-1-9 半導電層界面における臨界核の発生モデル

覆う方が臨界核の発生に必要な自由エネルギー（ $\Delta\phi^*$ ）が低下し、ラメラが発生しやすくなることを示している。

添加剤濃度等を変えた試料における、表面自由エネルギーと平均ラメラ角の測定値を図3-1-10に示す。同図に示す様に、表面自由エネルギー（ σ_i ）の大きい試料の方が、平均ラメラ角が小さくなる。これは、半導電層材料中の添加剤濃度を制御し、表面自由エネルギーを増加させたことにより、ラメラの成長が促進された結果であることを示している。

3-1-4 半導電層界面の添加剤濃度分布と絶縁破壊特性

通常、ポリエチレン中の非結晶性部分は、密度が低く、これはミクロの空隙が多く存在すると考えられている。この空隙は、ラメラの熱運動等により形状や大きさが常に変化していることから、「自由体積」と呼んでいる。一般に、自由体積が大きいと、絶縁が破壊しやすいと考えられており、結晶性が高くなって自由体積が減少したり、添加剤が拡散浸透して自由体積部分を埋めると、絶縁破壊強度が向上することが考えられる。そこでフーリエ変換赤外分光分析装置（FTIR）を用いて、半導電層界面から架橋ポリエチレン層へ拡散浸透する、添加剤の濃度分布と絶縁破壊強度の関係を調べた。

11種類の試料について、半導電層界面から50 μm ～250 μm の範囲の平均添加剤濃度と絶縁破壊強度の関係

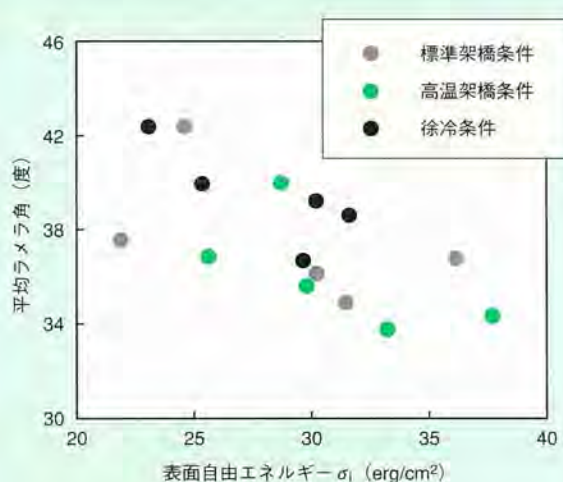


図3-1-10 架橋条件の異なる半導電層材料の表面自由エネルギーと平均ラメラ角

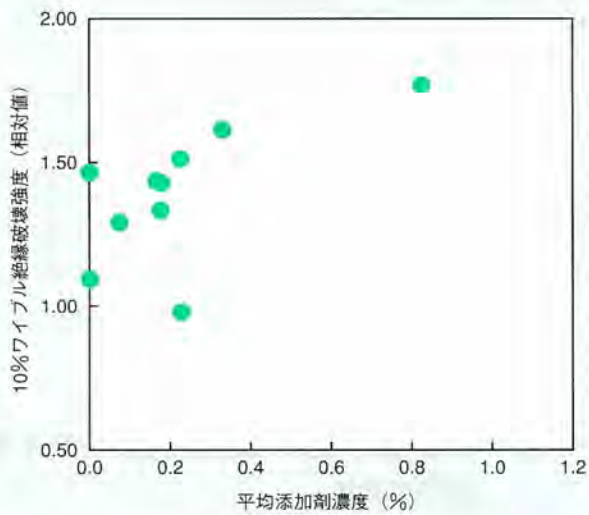


図3-1-11 界面近傍の平均添加剤濃度と絶縁破壊強度の関係

を図3-1-11に示す。縦軸は無添加試料の絶縁破壊強度を1とした相対値で示してある。一部の例外はあるが、絶縁体中に拡散している添加剤濃度と交流電圧絶縁破壊値との相関性は高い。添加剤濃度1%以内の範囲で添加剤濃度が大きい試料ほど絶縁破壊強度も大きい。

添加剤の効果が単に自由体積の充填によるものならば、架橋ポリエチレンに添加剤を直接添加しても、同様に絶縁破壊強度の向上効果があるはずである。そこで、図3-1-11において最も絶縁破壊強度が大きかった添加剤を用いて、架橋ポリエチレンへ直接添加した場合と、界面拡散法を適用した場合との違いを検討した。添加剤濃度と絶縁破壊強度の関係を図3-1-12に示す。平均（50%ワイブル）破壊強度は両方法とも添加剤濃度1%以下で最

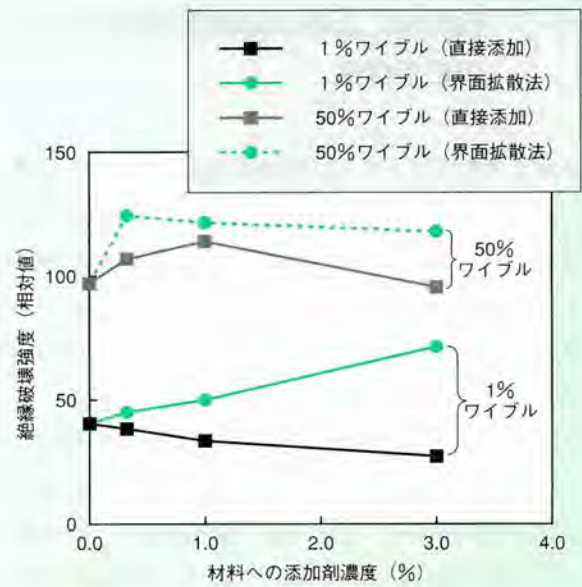


図3-1-12 材料への添加剤の混入方法の違いによる絶縁破壊強度の違い

大であり、添加剤により破壊強度は無添加試料に比較して1.3倍程度増加している。一方、1%ワイブル破壊強度は、界面拡散法では添加濃度の増大とともに増加しているが、直接添加した場合は徐々に低下している。直接添加した場合は、架橋ポリエチレン絶縁体中に添加剤の微小な凝集塊が見られ、これが電氣的欠陥になると予想されるのに対し、界面拡散法ではこのような塊が見られなかった。従って、半導電層から架橋ポリエチレン絶縁層へ拡散浸透させる界面拡散法は、単に自由体積の充填効果だけではなく、絶縁を低下させる凝集塊の生成もないことが示された。

3-2 界面拡散法のCVケーブルへの適用法検討

3-2-1 実規模154kVCVケーブルの目標

地中送電線のコンパクト化には、CVケーブルの絶縁厚を低減する界面拡散法が有効である。この界面拡散法を実用化するためには、CVケーブルの製造工程に適用する際の課題を摘出し、CVケーブルに適する添加剤の種類と濃度等を選択しなければならない。ここでは154kVCVケーブルのコンパクト化を目指して、商用周波絶縁破壊と雷インパルス絶縁破壊の設計破壊強度を、それぞれ50kV/mm、100kV/mm以上とすること、またこれによって現用の同一電圧階級のCVケーブルの絶縁厚である23mmと比較して、半分以下の9mmにすることを目標とした。

実ケーブルと同じ構造の1mm絶縁厚のミニチュアモデルケーブルを用いた実験により、10種類の添加剤の中から数種類の添加剤を選択した。これらの添加剤を用いて、より実際の製造工程に近い条件で3mm絶縁厚のモデルケーブルを製作し、特に高温絶縁破壊強度の向上効果が大きい添加剤や架橋条件を選択した。そして選択された添加剤や条件を用いて、絶縁厚9mmのCVケーブルを製作し、長期課通電試験による電気性能の検証や、半導電層界面の材料分析を行い、界面拡散法の有効性を検証した。

3-2-2 界面拡散法のCVケーブルへの適用条件

添加剤を加えた6種類の半導電層材料を用いて、絶縁厚約1mmのミニチュアモデルケーブルと、絶縁厚約3mmのモデルケーブルを製作した。これにインパルス電圧を印加し、絶縁破壊強度の測定と材料分析を行った。

ミニチュアモデルケーブルとモデルケーブルの絶縁破壊強度を図3-2-1に示す。

絶縁破壊強度が向上した添加剤は前述のディスク試料の場合と同様、半導電層界面から絶縁体中へ拡散浸透し、同図の試料番号7の様な浸透量が多い試料ほど絶縁破壊強度が大きい。

絶縁性能向上効果の大きい親油性添加剤の中から、耐

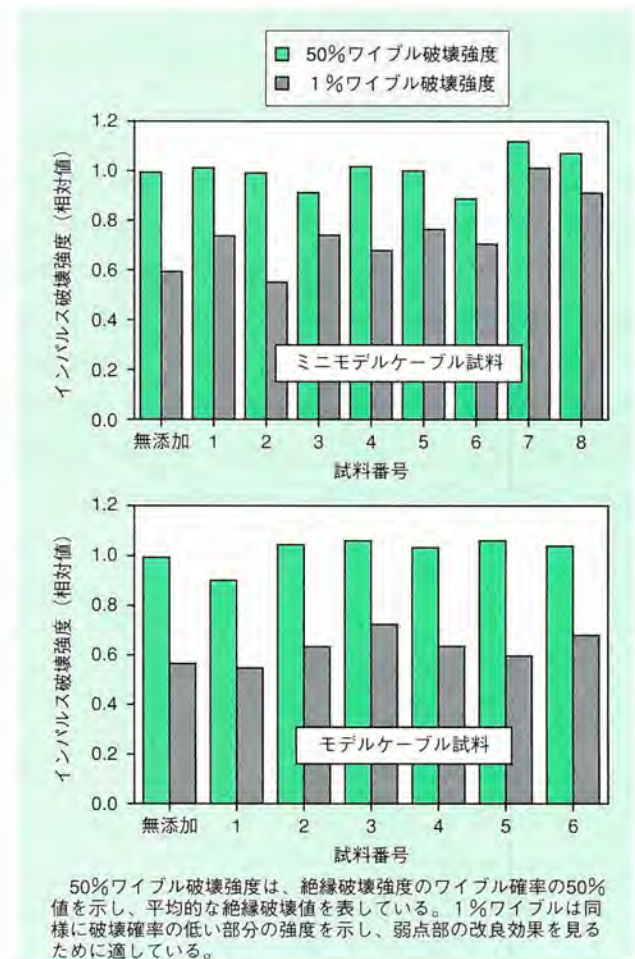


図3-2-1 ケーブル形状の試料における絶縁破壊強度の比較

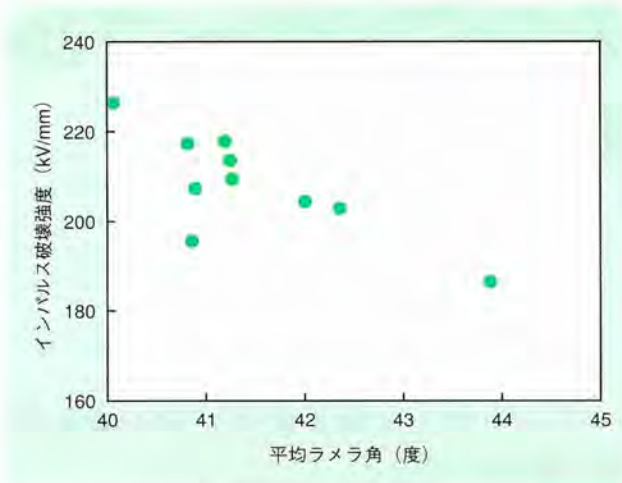


図3-2-2 添加剤や架橋条件の異なるケーブル試料の絶縁破壊強度と平均ラメラ角の関係

熱性に優れた添加剤を数種類用い、その内の1種類の添加剤については、架橋条件も変えてモデルケーブルを製造した。これらを用いて、絶縁破壊強度と平均ラメラ角の関係を求めた結果を図3-2-2に示す。同図の絶縁破壊強度が最も大きくなった条件を、9 mm絶縁厚のCVケーブルの基本的な製造条件とした。

CVケーブル試料は製造条件を少しずつ変えて製造しその平均ラメラ角を図3-2-3に示す。同図の無添加試料は従来の半導電層材料で従来のCVケーブル製造条件と同じである。「添加剤+通常架橋条件」試料は、半導電層材料に添加剤を加え、従来と全く同じ条件で製造された試料、「添加剤+低温架橋条件」試料は、半導電層材料に添加剤を加えて架橋温度を若干低く抑え、その代わりに架橋時間を長くして製造した試料、「添加剤+架橋剤増量+通常架橋条件」試料は、半導電層材料に加える

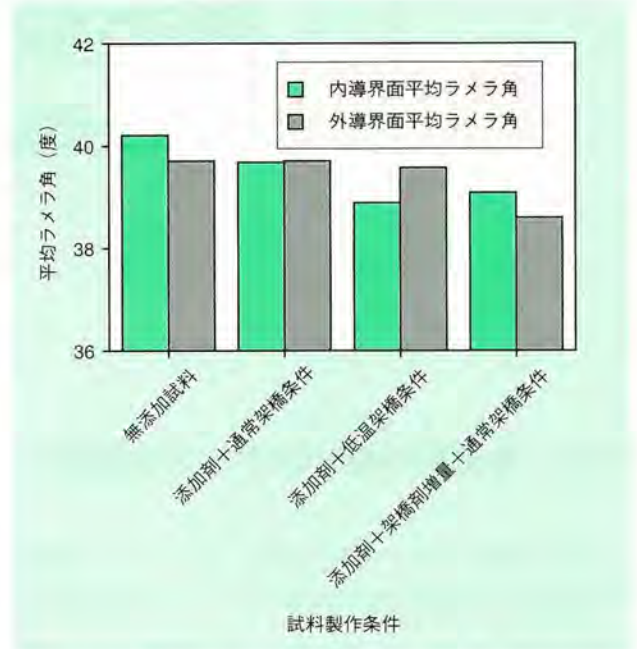


図3-2-3 製造条件等の違いによる平均ラメラ角の変化

添加剤と架橋剤の配合を変えて従来と同じ条件で製造された試料である。ここで「添加剤+低温架橋条件」試料は、図3-2-2に示した室温で絶縁破壊強度が最も大きかった試料である。同図に示す様に、添加剤を変えずに製造条件(架橋)を変更することにより平均ラメラ角が小さくなって、半導電層材料の改良が進んでいることがわかる。

同図の「添加剤+架橋剤増量+通常架橋条件」試料は、室温での絶縁破壊強度は若干低下したが、高温での絶縁破壊強度が十分に向上した。そのため、この添加剤と架橋剤の配合を変えた製造条件を154kVCVケーブルの添加剤適用条件とした。

3-3 絶縁厚半減154kV CVケーブルの試作と性能評価

3-3-1 絶縁厚半減154kV CVケーブルの試作

ケーブルを試作するに当たり、前節で説明した様に、絶縁厚の薄い試料を用いて各種の検討を行い、実規模CV



図3-3-1 絶縁厚9mmの実規模CVケーブル試料

ケーブルの試作条件を決めた。試作した154kV CVケーブルは、絶縁厚9mmであり、その断面写真を図3-3-1に示す。このケーブル試料の絶縁破壊強度（常温）の測定に当たって、6種類の試料を試作した。各試料の絶縁破壊電圧における、内部半導電層のすぐ外側の電界強度を図3-3-2に示す。商用周波絶縁破壊強度では、従来試料の平均値84.4kV/mmに対して、添加剤入り試料の平均値は90.7kV/mmであった。また、雷インパルス絶縁破壊強度では、同様に133.6kV/mmに対して183.0kV/mmであり、添加剤入り半導電層材料を用いることにより、絶縁破壊強度が向上することを確認した。

これら6種類のケーブルの、絶縁破壊強度と平均ラメラ角の関係を図3-3-3に示す。図中の●はそれぞれの内部半導電層における平均ラメラ角である。同図から明らかなように、各製造ラインについて添加剤により平均ラメラ角が減少し、絶縁破壊強度が向上することが明確に

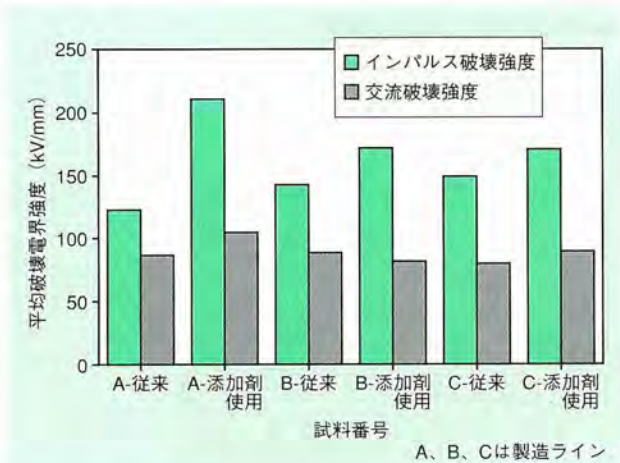


図3-3-2 絶縁厚9mmの試料における添加剤の効果

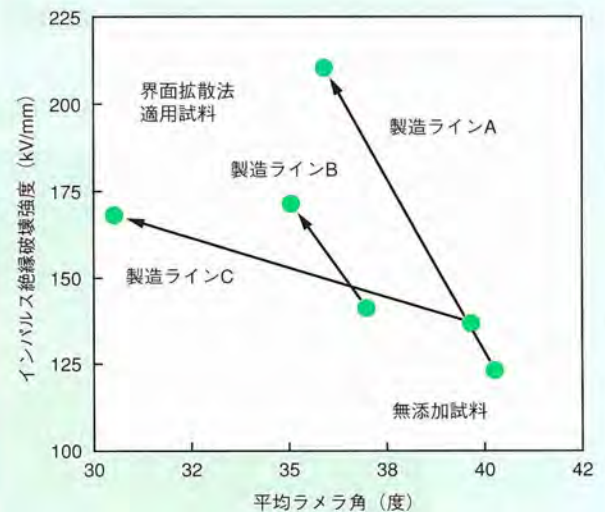


図3-3-3 絶縁厚9mmのCVケーブルにおける平均ラメラ角と絶縁破壊強度に与える界面拡散法の効果

なり、従来から行ってきたディスク試料、ミニモデルケーブル試料、モデルケーブル試料の全ての場合に共通する結果が得られた。これより、平均ラメラ角は、半導電層界面近傍のポリエチレンの絶縁性能の評価パラメータとして有効であることが示された。

3-3-2 絶縁厚半減154kV CVケーブルの長期絶縁性能

上の結果に基づき、最も絶縁破壊強度の高かったA製造ラインの試料について、さらに高温絶縁破壊強度を向上させるために、添加剤と架橋剤の配合調整をしたCV

ケーブル試料を製作した。このCVケーブルの長期絶縁性能を評価するため、50年相当の長期課通電試験を行った。

試験線路は図3-3-4に示すように、長さ約100mのケーブルをループ状に構成してコンクリートトラフ内に布設した。また、試験期間6ヶ月で等価年数50年相当以上の長期絶縁性能を検証するため、試験条件は表3-3-1に示すとおり、電圧加速9乗則*を適用して課電電圧160kV（154kV系統の常規対地最高電圧の約1.7倍）とし、また導体には、実線路で想定される最も過酷なヒートサイクル

*電圧加速9乗則：CVケーブルの絶縁性能の劣化が印加電圧の9乗で加速されるという条件設定であり、現在のケーブルにとっては過酷側の条件。

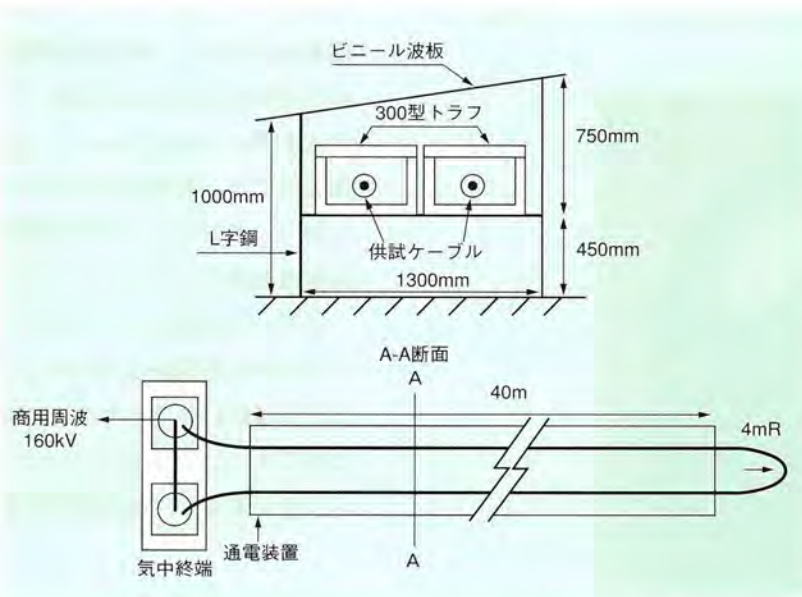


図3-3-4 実規模モデルCVケーブルの長期試験レイアウト

表3-3-1 実規模モデルCVケーブルの長期試験条件と結果の概要

項目	年月		平成5年				平成6年			結果
	9	10	11	12	1	2	3			
試験条件	課電電圧 160kV		160kV				3/12			累積時間3375時間 (等価年数50年相当)
	ヒート サイクル		90℃				常温~90℃ 125回			
tan δ 測定	●	●		●			●		経時変化もなく安定した特性を示した。	
	初期	5年相当		25年相当			50年相当			

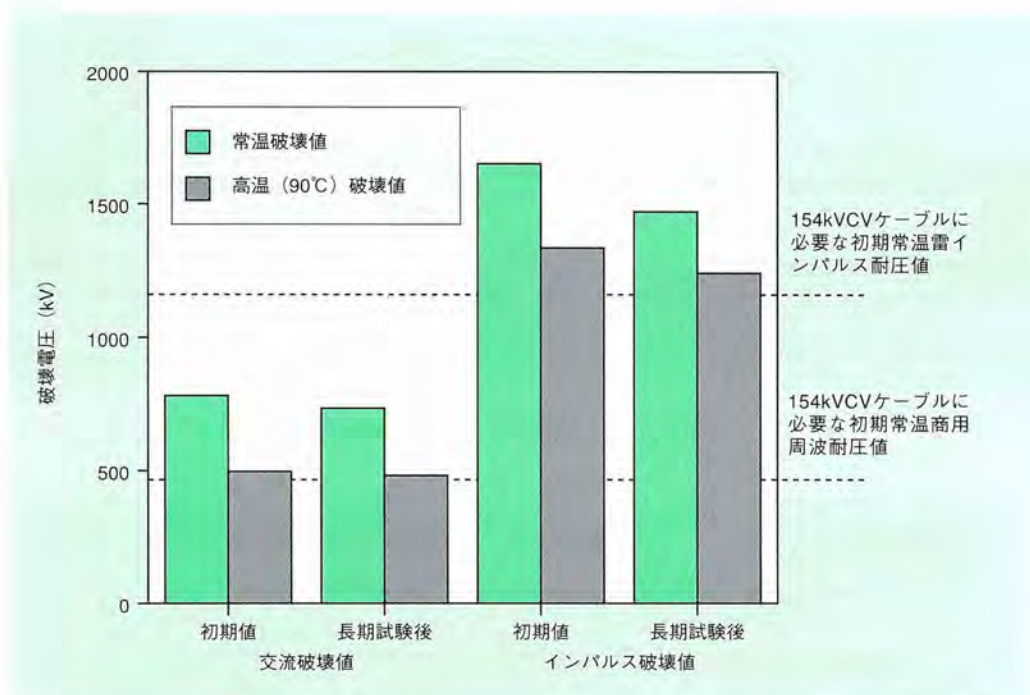


図3-3-5 絶縁厚 9 mm CVケーブルの長期課通電試験による絶縁破壊電圧の変化

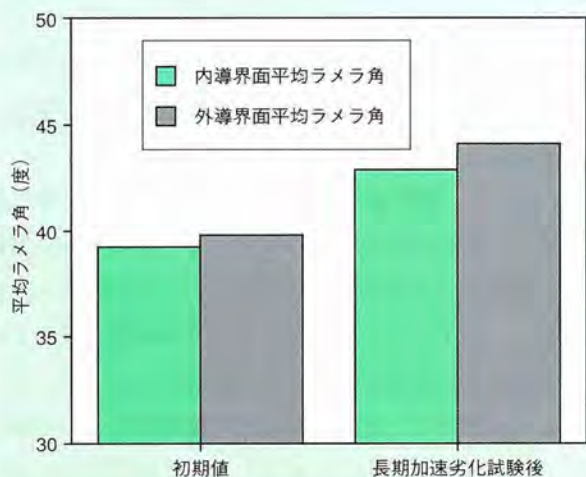


図3-3-6 絶縁厚 9 mmのCVケーブルの平均ラメラ角の変化

ル（常温～90℃、1回/日）の熱を加えた。同表に試験の結果も示しているが、試験中、ケーブルには何等のトラブルも発生しなかった。

長期課通電試験前後における商用周波と雷インパルス絶縁破壊電圧を図3-3-5に示す。試験前後の絶縁性能の変化はほとんどなく、いずれも154kV CVケーブルとしての必要性能を満足している。また、表3-3-1に示したとおり、長期課通電試験中に絶縁特性変化の指標となる

$\tan \delta$ （誘電正接）の測定を合計4回実施した。各測定温度における $\tan \delta$ 値は、0.02%以下の電圧依存性のない良好な特性と、経時変化のない安定した特性を示した。

これらの結果から、試作した絶縁厚 9 mmのCVケーブルは 154kVケーブルとして実使用に対する長期信頼性を有するものと判断される。

長期課通電試験前後のケーブル試料の平均ラメラ角を、内部半導電層界面からの内導界面として図3-3-6に示す。概略の傾向としては、試験前試料では、内部半導電層（内導）側、外部半導電層（外導）側ともにケーブル軸方向に縦割りした断面の平均ラメラ角が小さく、試験後の試料では内導側と外導側の縦割り断面および輪切り断面の平均ラメラ角が増加し、45度より若干小さい値に収束している。

なお、長期試験後にラメラ角が若干増加し、絶縁破壊強度が少し低下したが、問題のある変化ではなかった。

3-3-3 接続部の試作

絶縁厚 9 mmの154kV CVケーブルを長距離線路へ適用するためには、従来より高電界で使用できる、ケーブルの接続技術の開発が必要である。一般に、超高圧級のCVケーブルの接続部は、図3-3-7に示すように、導体を

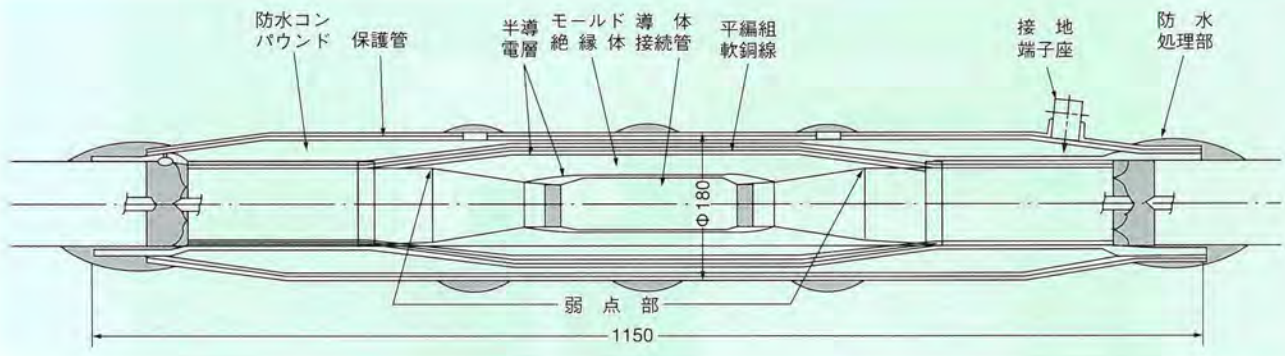


図3-3-7 154kV CVケーブル接続部の例

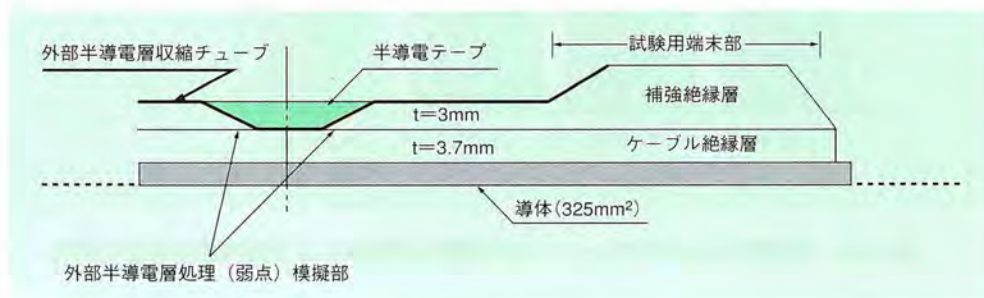


図3-3-8 CVケーブル接続部モデル試料

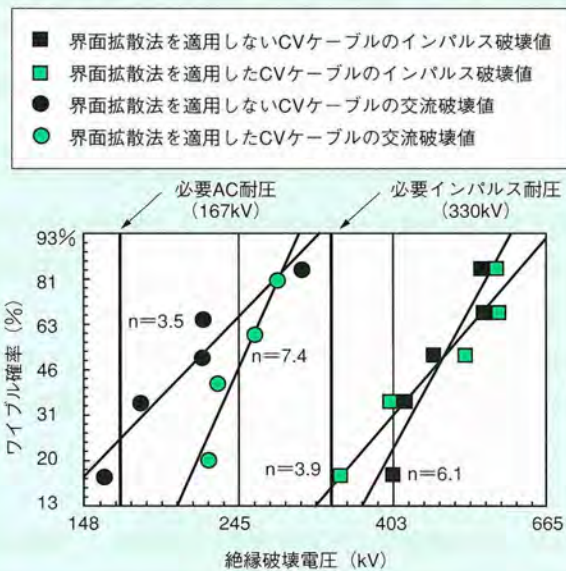


図3-3-9 高温絶縁破壊強度のワイブル分布

接続した圧縮スリーブを内部半導電層で覆い、その上を補強絶縁層で絶縁し、その外周を外部半導電層で覆うものであり、ケーブルと同様の構造となっているが、絶縁面に課題がある。特に高電界で設計された接続部の絶縁の弱点は、ケーブル外部半導電層処理部にある。そのた

め、同処理部の弱点を補強する手法として、ケーブルの絶縁性能向上に用いた界面拡散法を接続部に適用することを検討する。

CVケーブル接続部の絶縁の弱点である外部半導電層処理部は、図3-3-7中の弱点部分であり、この部分を模擬した接続部モデル試料を図3-3-8のように作製し、商用周波電圧、雷インパルス電圧による絶縁破壊試験および、半導電層界面の絶縁体のラメラ角度解析を行った。これまでの基礎検討で、絶縁厚3.7mmの接続部モデル試料を用いて絶縁性能向上効果を確認した。界面拡散法を適用した試料と従来の方法による試料の、高温条件(90℃)における商用周波および雷インパルス電圧の破壊強度のワイブル分布を図3-3-9に示す。破壊強度のばらつきの逆数に相当する図面の傾きは、商用周波破壊電圧の場合に関しては、従来方法の場合は3.5であったが、界面拡散法を適用すると6.5と大きくなる。結果として弱点部の商用周波および雷インパルス破壊電圧が、目標とした交流耐電圧以上に向上した。今後は、今回の成果に基づいて、絶縁厚9mm CVケーブルを用いた実規模接続部モデルを試作して、絶縁性能向上効果を検証する予定である。

3-4 150kV級地中送電線の 概念設計

(1) 設計電界の向上

CVケーブルの絶縁厚を決める基礎的な値である設計電界は、CVケーブル製造技術とともに年々向上している。その様子を図3-4-1に示す。当研究所は、研究の当初より交流電圧と雷インパルス電圧に対して、それぞれ50kV/mmと100kV/mmの設計電界を目指して、界面拡散法による絶縁性能向上技術の開発を進めてきた。この設計電界を用いて154kVCVケーブルの概念設計を試みる。

(2) 概念設計とリプレース

絶縁厚9mmの154kVCVケーブルの設計例を表3-4-1に示す。導体断面積を現用154kVCVケーブルと同程度の800mm²とすると、仕上り外径は約70mmとなる。これは、現用154kVCVケーブルの約70%の太さであり、ドラム巻き長さを約2倍にすることが可能となり、接続間隔も2倍に延長可能となる。一方、仕上り外径を現用ケーブルと同一とすると、導体断面積を2,000mm²と2.5

倍に増大できるので、送電容量も約1.6倍が見込める。また、絶縁厚9mmのCVケーブルは現用66kVCVケーブルと同一であることから、66kVCVケーブルのリプレースをすれば、送電容量は約2.3倍に増大可能となる。

絶縁厚9mmの154kVCVケーブルを現用154kVOFケーブル（導体断面積800mm²、送電容量150MVA）または、現用66kVCVケーブルとリプレースした適用例を図3-4-2に示す。また、これに用いる接続部の長さは現用

表3-4-1 絶縁厚半減154kVCVケーブル設計例

	(A)現用154kV OFケーブル	(B)現用66kV CVケーブル	絶縁厚半減154kVCV	
			(A)のリプレース	(B)のリプレース
管路内径 (mm)	250	200	250	200
導体断面積 (mm ²)	800	800	2000	800
絶縁厚さ (mm)	12.5	13	9	9
仕上り外径 (mm)	97	72	93	70

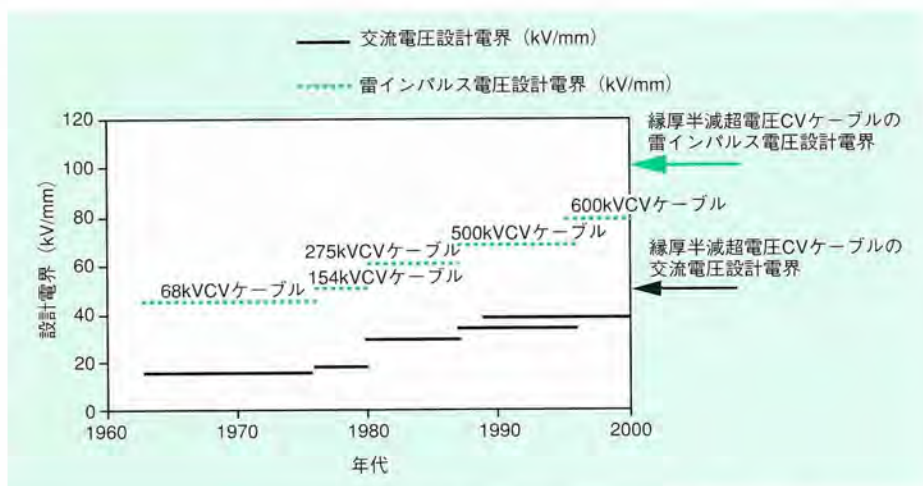


図3-4-1 CVケーブルの絶縁設計電界の変遷

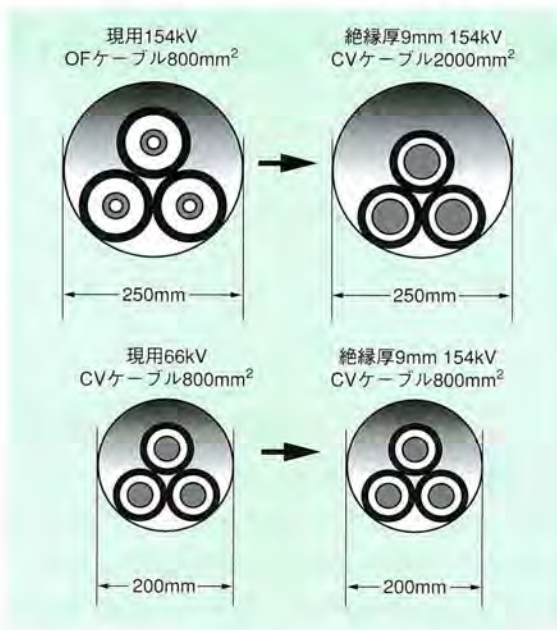


図3-4-2 絶縁厚9mm 154kV CVケーブルの適用例

154kV OFケーブルのものより小型となることが予想されることから、現用のケーブル収納設備を活用した送電容量の増大が可能となる。さらに、現用66kV CVケーブルとリプレースすれば、大幅な送電容量の向上が可能と

なる。

(3) 今後の課題

本研究で得られた界面拡散法による絶縁性能向上技術は、ケーブル接続部やケーブル端末部におけるケーブル外部半導電層処理部を補強する手法として適用でき、CVケーブル線路の信頼性向上にも大いに貢献できる。そのため界面拡散法を適用した接続部や端末部を試作し、長期絶縁性能評価を行い、界面拡散法の有効性を検証する予定である。またコンパクト化された送電用CVケーブルは、従来よりも高い電界で使用されるため、半導電層界面から入った電子が、ポリエチレン絶縁体の絶縁性能を劣化させる。そのため、自由体積理論*等に基づいて絶縁劣化機構を解明し、送電用CVケーブルの高電界下における長期絶縁寿命予測方法を開発していく予定である。

*自由体積理論：ポリエチレンなどの高分子には分子間に微小なすき間（自由体積）がとびとびに存在している。この自由体積は電氣的な弱点となるので、この自由体積が連続してたくさんつながると絶縁破壊強度が低下する。自由体積理論は自由体積のつながり方と絶縁破壊強度の関係を定量的に表した理論。



第 4 章

**送電線コンパクト化技術
の適用メリット**

第4章 送電線コンパクト化技術の適用メリット ● 目次

横須賀研究所電力部長 上席研究員 今城 尚久
横須賀研究所電力部 上席研究員 泉 邦和

4-1	電力輸送力向上とコスト低減効果	59
4-2	研究成果の適用拡大	62

今城 尚久 8ページに掲載
泉 邦和 18ページに掲載

4-1 電力輸送力向上とコスト低減効果

これまでの研究結果から、架空送電線のコンパクト化については、高分子絶縁アームと狭根開き鉄塔や鋼管単柱鉄塔などのスリム化鉄塔を組み合わせることにより、現用66kV架空送電線のルート幅内に、154kV架空送電線の建設が可能になるとの見通しが得られた。また、地中送電線については、CVケーブルの半導電層界面の絶縁体の結晶配向を改良することにより、絶縁厚さを半減し、154kVケーブルを現用の66kVVCVケーブルと同等に細くできること、また長距離線路に必要なケーブルの接続部の開発の見通しが得られた。

ここでは、電力輸送力の向上に伴う効果と建設コストの低減効果について概要を述べる。

4-1-1 電力輸送力の向上

一般に、電力輸送力は、同じサイズの電線またはケーブル導体を使用すれば（電流値が同一ならば）、電圧に比例する。従って、今回の架空線コンパクト化技術の開

発によって現用の66kV送電線ルート幅内で154kV送電が可能となることから、電力輸送力は約2.3倍の増強が可能となる。

地中送電においても、現用の66kVVCVケーブルと同一太さで154kVVCVケーブル送電が可能となることから、電力輸送力は約2.3倍の増強が可能となる。また、現用の154kVVCVケーブルまたは154kVOFケーブルのリプレイスとして、今回の絶縁厚9mmのCVケーブルを用いれば導体断面積を約2.5倍に増大可能であり、送電容量は約1.6倍に増大できる可能性がある。

4-1-2 建設コストの低減効果

(1) 架空送電線の建設コスト低減効果

架空送電線の建設コストは表4-1-1の条件と、図4-1-1の鉄塔形状をもとに概算した。現用154kV鉄塔、現用66kV鉄塔ならびに、高分子絶縁アームを適用した狭根開き鉄塔と鋼管単柱鉄塔で建設した場合の、送電線建設

表4-1-1 コスト試算における各種鉄塔の主な仕様

項目	現用鉄塔		154kV用コンパクト鉄塔	
	154kV用	66kV用	狭根開き型	鋼管単柱型
回線・ルート数	2回線・1ルート			
電力線	ACSR410mm ² ・最大使用張力4000kgf			
径間長 (m)	300			
水平線間距離 (m)	8.0	5.6	5.6	
垂直相間距離 (m)	4.5	3.0	3.0	
鉄塔地上高 (m)	49.0	40.5	42.0	
鉄塔の下相地上高 (m)	32.0	30.5	32.0	
がいし装置	磁器製懸垂がいし		高分子絶縁アーム 高分子相間スペーサ	
相間スペーサの取付け間隔 (m)	—		75	
鉄塔用地費	30万円/m ²			

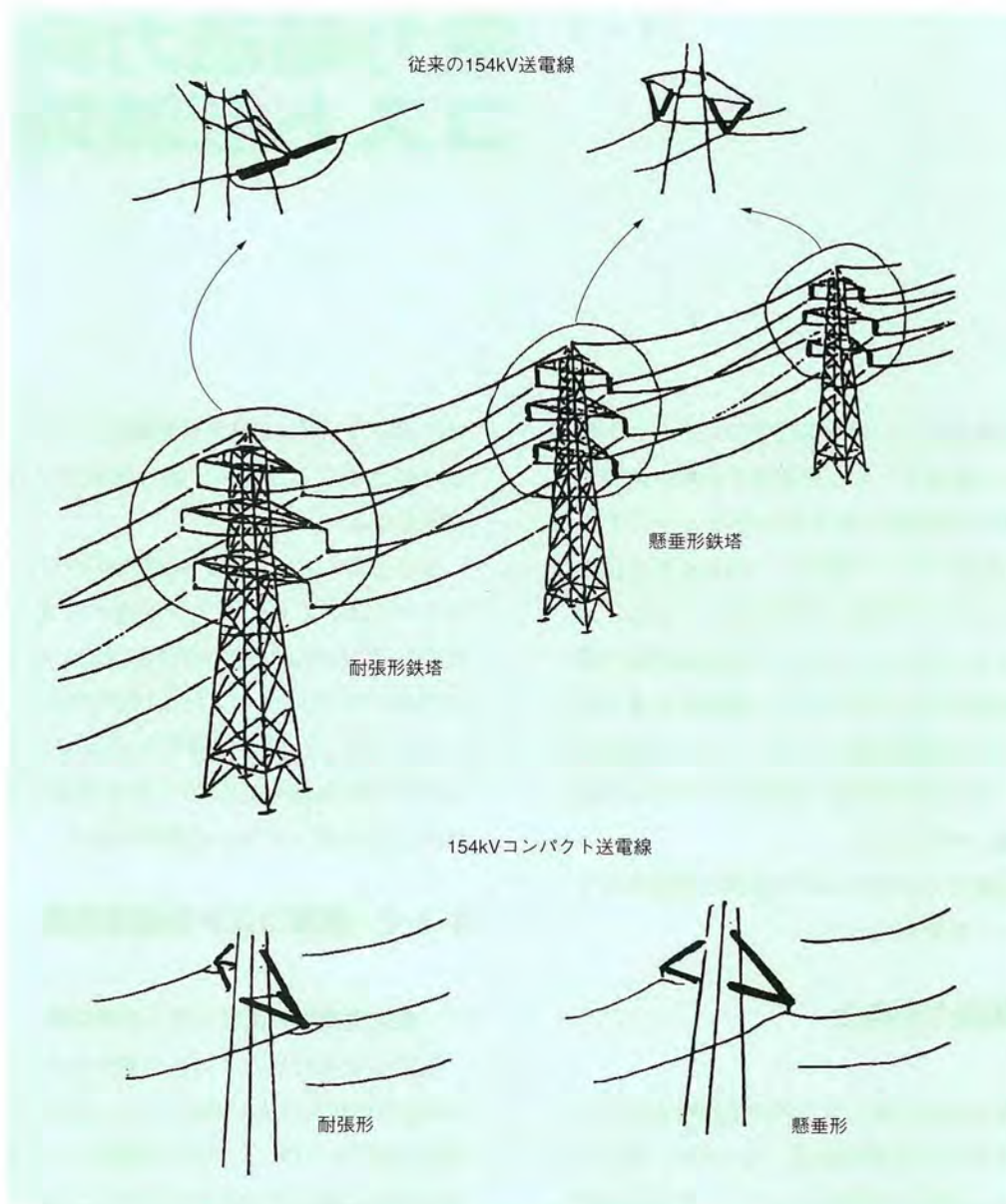


図4-1-1 154kV従来型送電線とコンパクト送電線

コスト例を図4-1-2に示した。同図において、鉄塔費用は材料、組立、基礎関連費用の合計、架線費用は電線、架線工事関連費用の合計、鉄塔用地費用は鉄塔敷地に相当する費用を各々示している。いずれの場合も鉄塔費用および鉄塔用地費用の占める割合が大きいことが分かる。高分子絶縁アームと狭根開き鉄塔から構成される154kVコンパクト送電線の建設費用は、現用66kV送電線建設費用とほぼ同程度となる。これは、現用154kV送電線建設費用に比較し70%程度となり、建設コストの大幅な低減効果が期待できる。なお、鉄塔建設敷地が狭い場合には、高価な鋼管単柱鉄塔の採用は避けられないが、高分

子絶縁アームと鋼管単柱鉄塔から構成される154kVコンパクト送電線の建設費用は、現用154kV送電線の建設費用に比較し、同程度となる。しかし、この場合でもルート幅の大幅な縮小が可能になり、送電線コンパクト化のメリットは大きい。

現用66kV送電線の鉄塔のアーム部分を含めた上半分を狭根開き鉄塔と同様な形状とし、高分子絶縁アームを適用して154kVコンパクト送電線に変更した場合の建設コストの比較例を図4-1-3に示した。同図から、現用送電線建設費用の40%程度の費用増加で、154kVへの昇圧が可能となり、建設コストの低減効果が最も期待できる

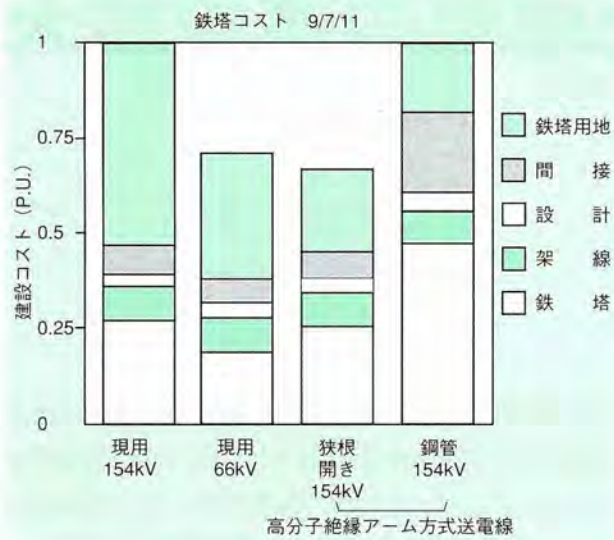


図4-1-2 送電線建設コスト例

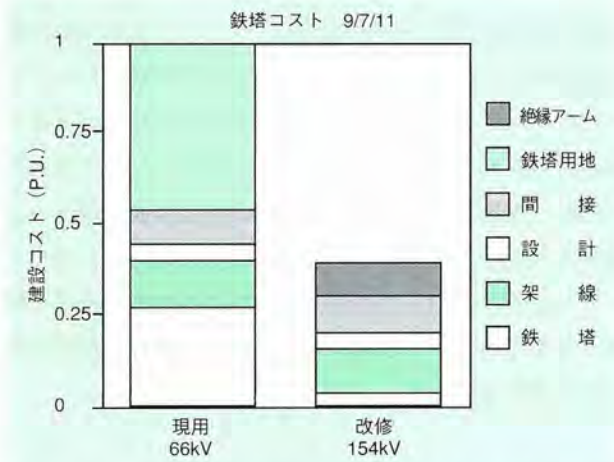


図4-1-3 現用66kV送電線を高分子絶縁アーム方式154kV送電線に改修した場合のコスト例

ケースとなる。

(2) 地中送電線の建設コスト低減効果

地中送電線の建設コストは、表4-1-2に示すように、ケーブルは管路内に3相分を引き入れ、2回線を増設する条件で概算した。管路径は250mmとし、これに引き入れるケーブルは外径約100mmのものを3条より合わせた(トリプレックス)ものにした。この場合、現用154kVVCVケーブルを考えると導体断面積が800mm²となり、現用66kVVCVケーブルの導体面積は2000mm²、また

表4-1-2 地中ケーブルコスト試算条件

	現用154kV CVケーブル	現用66kV CVケーブル	絶縁厚9mm 154kVVCVケーブル
回線/ルート	3回線/ルート		
管径内径	250mm		
埋設深さ	1.5m		
ケーブル外径	約100mm		
導体断面積	800mm ²	2000mm ²	2000mm ²

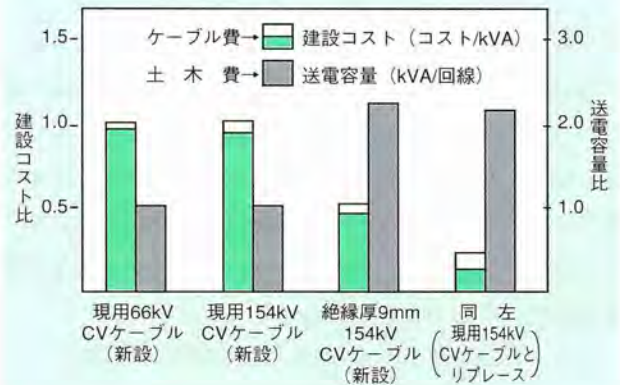


図4-1-4 コストと送電容量の試算例

絶縁厚9mmの154kVVCVケーブルの場合は、2000mm²がそれぞれ引き入れ可能となる。

これらのケーブルの送電容量および建設コストの比較例を図4-1-4に示す。建設コストのうち土木費は管路を車道下に開削により埋設する費用であり、道路の掘削費、管路とその埋設費および道路復旧費用が含まれている。ケーブルの費用には、ケーブルと接続部とそれらの施工費が含まれている。建設費の中で土木費が大部分を占める。

現用66kVVCVケーブルは導体断面積を大きくできることから、送電容量は現用154kVVCVケーブルと同等となり、単位送電容量当たりの建設コストも同等となる。一方、絶縁厚9mmの154kVVCVケーブルの場合には、送電容量が2倍以上となるので、単位送電容量当たりのコストは低減する。さらに既設の66kV用管路を利用し、絶縁厚9mmの154kVVCVケーブルにリプレースする場合は、少ないコストで2倍以上の送電容量の増大が可能となり、極めて大きなメリットが期待できるケースとなる。

4-2 研究成果の適用拡大

(1) 高分子絶縁アームの適用拡大

154kV用高分子絶縁アームの開発に関する成果は、66、77、110kVなどの、より下位電圧系統の送電線についても、電圧に対応して絶縁アーム長さが短くなることから、同アームへの機械的ストレスは小さくなり、より大サイズの電線の採用なども可能になり、コンパクト化と大容量化が図れるものと考えられる。

一方、187kV以上のより高い電圧階級への適用については、絶縁アーム長が長くなることや、これらの電圧階級の電線は多導体化されていることから、機械的ストレスは非常に大きくなる。したがって、現在のFRPの機械的性能を考慮すれば、大サイズでかつ多導体の絶縁アーム方式の送電線の建設は難しいと考えられる。しかし、絶縁アームの要素である高分子がいしについては、現用磁器がいしの代用や相間スパーサ、鉄塔のジャンパ線の支持がいしなどとしての適用拡大が期待できる。

(3) 界面拡散法の適用拡大

界面拡散法によるCVケーブルの半導電層界面の絶縁

性能向上技術は、これまで他研究機関などで行われてきた絶縁体中の異物や微小空隙（ボイド）の除去技術と併用できることから、275kV、500kVといった上位電圧のCVケーブルに適用すれば、絶縁信頼性の一層の向上またはコンパクト化が期待できる。

また、ケーブルの接続作業は現場で行い、かつ高度な技術を要することから、近年は、プレハブ接続技術の開発が盛んに行われている。このプレハブ接続部には、主にエチレンプロピレングムなどのポリエチレンと異なる絶縁材料が使用されている。今後、このプレハブ接続部の絶縁性能向上やコンパクト化のために界面拡散法の適用拡大が期待されている。また、このためには、ポリエチレンおよびその他の固体絶縁材料の絶縁破壊機構の解明が重要であり、自由体積理論に則った絶縁破壊機構の解明も期待される。

お わ り に

理事 狛江研究所長 鈴木 俊男



近年の社会のグローバル化や競争原理導入など変革の流れの中で、電気事業はコスト低減に努めています。当研究所は、持続的な電力需要の増大と用地難に対処するため、大幅な輸送コスト低減に役立つ架空および地中送電線のコンパクト化研究を、材料開発の面から進めてきました。

その結果、高分子絶縁アームとそれを用いて送電線をコンパクト化する技術、界面拡散法を用いて、CVケーブルとその接続部をコンパクト化する技術を開発しました。これらの技術は、わが国独自ともいえる新材料また

は新技術の開発によるものであり、関係方面の暖かいご指導と関係者のたゆみない努力によって、実用に供しうるものとなりました。ここに、電力会社関係各位、および機材開発などご協力いただいた製造会社などの各位に、深く感謝する次第であります。

今後、長期性能の確認や建設・保守技術の開発などの課題についても、電力会社と協力して実用化をはかるとともに、これらの技術により上位の電圧系統への適用法の開発を図り、電力輸送コストの低減に貢献していきたいと考えています。今後とも関係各位のご鞭撻を、心からお願いいたします。

引用文献・資料等

第1章

- (1) 高橋一弘「21世紀の電力システムと研究課題」電力中央研究所 電力部門研究発表会 予稿集 1997年11月
- (2) 福田努・相原良典「電力技術」オーム社 1991年12月
- (3) 「新版 電気工学ハンドブック」電気学会 1998年 2月
- (4) 「電気事業便覧」電気事業連合会統計委員会編 平成9年版
- (5) 飯塚喜八郎監修「新版 電力ケーブル技術ハンドブック」電気書院 1989年3月

第2章

- (1) 泉邦和・高橋毅・谷口毅・本間宏也・畔柳俊幸・清水幹夫「高分子絶縁アームによる60~150kV級架空送電線コンパクト化技術の開発」、電中研総合報告 W10、1996年10月
- (2) 泉邦和・高橋毅「架空送電線コンパクト化のための高分子がいしの開発動向（解説）」、電学論B、Vol. 115-B、pp5-8、1995年1月
- (3) 本間宏也・高橋毅・谷口毅・門裕之・泉邦和「都市型コンパクト送電線の開発 - その3 66kV用高分子複合がいしの開発」、電中研研究報告 W91019、1992年2月
- (4) H. Homma, T.Takahashi, T.Taniguchi, K.Izumi ; "Study on Surface Degradation of Polymer Insulating Materials caused by Leakage Current", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Arlington, U.S.A., pp373-378, October, 1994
- (5) 谷口毅・高橋毅・本間宏也・畔柳俊幸・泉邦和「66~154kV架空送電線のコンパクト化の研究 - その6 154kV高強度絶縁アーム用FRPコア試作」、電中研研究報告 W95021、1996年6月
- (6) 泉邦和・谷口毅・高橋毅・本間宏也・畔柳俊幸・岩崎康彦「高分子がいし用引き留め型FRPコアの開発」、電学論B、Vol. 117-B、pp1308-1314、1997年9月
- (7) H. Homma, T. Kuroyagi, C. L. Mirley, J. Ronsello, and S. A. Boggs ; "Diffusion of Low Molecular Weight Siloxane from Bulk to Surface", IEEE International Symposium on Wlectrical Insulation, pp.279-282, 1996
- (8) K.Naito, K.Izumi, K.Takasu, R. Matsuoka; "Performance of Composite Insulators under Polluted Conditions", CIGRE 33-301, 1996
- (9) 泉邦和・高橋毅・谷口毅・本間宏也・畔柳俊幸「高分子がいしならびに同がいしを適用した154kV用絶縁アームの汚損絶縁特性」、電気学会論文誌B（1998年5月号掲載予定）
- (10) 高橋毅・谷口毅・本間宏也・門裕之・泉邦和「都市型コンパクト送電線の開発 - その5 複合加速劣化試験による66kV高分子がいしの耐久性評価」、電中研研究報

告W91045、1993年1月

- (11) 高橋毅・谷口毅・本間宏也・畔柳俊幸・泉邦和「66~154kV架空送電線のコンパクト化の研究 - その2 154kV用耐張形高分子絶縁アームの試作」、電中研研究報告 W93028、1994年7月
- (12) 泉邦和・高橋毅・谷口毅・本間宏也・畔柳俊幸・岩崎康彦「154kV用耐張形高分子絶縁アームの機械的特性」、電学論B、Vol.117-B、pp1481-1487、1997年11月
- (13) 高橋毅・谷口毅・本間宏也・畔柳俊幸・合田豊・泉邦和・井上敦之「66~154kV架空送電線のコンパクト化の研究 - その5 154kV用高分子絶縁アームの絶縁特性と耐アーク特性」、電中研研究報告 W95020、1996年7月
- (14) K. Izumi, T. Takahashi, T. Taniguchi, H. Homma, T. Kuroyagi; "Performance of Line Post Type Polymer Insulation arm for 154kV", 10th International Symposuim on High Voltage Engineering, Aug. 1997
- (15) 高橋毅・畔柳俊幸・谷口毅・本間宏也・合田豊・泉邦和「66~154kV架空送電線のコンパクト化の研究 - その3 高分子絶縁アーム部における1線地絡アーク移行特性」、電中研研究報告 W94009、1994年12月
- (16) 高橋毅・畔柳俊幸・谷口毅・泉邦和・清水幹夫・久米田俊昭「66~154kV架空送電線のコンパクト化の研究 - その4 実規模試験線による154kV用高分子絶縁アーム縮小モデルの機械的ストレスの解明」、電中研研究報告 W94029、1995年6月
- (17) 高橋毅・畔柳俊幸・谷口毅・本間宏也・清水幹夫・泉邦和・浅野祐二「66~154kV架空送電線のコンパクト化の研究 - その7 実規模試験線による154kV用高分子絶縁アームの機械的ストレスの解明」、電中研研究報告 W95037、1996年6月
- (18) 清水幹夫・石川智巳・高橋毅・泉邦和・佐藤順一・横山一雄「幾何学的非線形性を考慮した送電線のスリートジャンプの解析」、日本建築学会構造工学論文集、Vol.41B、pp305-313、1995年3月
- (19) 清水幹夫・高橋毅・泉邦和「高分子絶縁アーム方式送電線の動的応答解析手法の検証」、電中研研究報告 U96015、1996年10月
- (20) 泉邦和・谷口毅・高橋毅・本間宏也・畔柳俊幸「66~154kV架空送電線のコンパクト化の研究 - その8 高分子絶縁アームの設計手法」、電中研研究報告 W95014、1996年6月

第3章

- (1) 岡本達希・石田政義・田中祀捷 1986「超高压CVケーブルの半導電層界面の改良」、電中研研究報告 W863013、1986年
- (2) 穂積直裕・岡本達希・深川裕正「ポリエチレン中の電気トリオの発生と微小放電パルスの同時観測」、電中研研

- 究報告 W87006、1987年
- (3) 穂積直裕・岡本達希・深川裕正「ポリエチレンの電気トリリーの発生現象」、電中研研究報告 W87024、1988年
- (4) 穂積直裕・岡本達希・石田政義・深川裕正「ポリエチレンの高次構造と電気トリリーの発生現象」、電気学会論文誌 Vol. 108-A、No. 12、1988年
- (5) N.Hozumi, T.Okamoto, and H. Fukagawa, Simultaneous Measurement of Microscopic Image and Discharge Pulses at the Moment of Electrical Tree Initiation, JJAP, Vol. 27, No. 4, 1988
- (6) N. Hozumi, T. Okamoto, and H. Fukagawa, TEM Observation of Electrical Tree Paths and Microstructures in Polyethylene, JJAP, Vol. 27, No. 7, 1988
- (7) N. Hozumi, M. Ishida, T. Okamoto, and H. Fukagawa, 1990. The Influence of Morphology on Electrical Tree Initiation in Polyethylene under ac and Impulse Voltage, IEEE, El Trans, Vol. 25, No. 4, 1990
- (8) 穂積直裕・岡本達希・今城尚久「ポリエチレン中の初期電気トリリーの成長に及ぼす空間電荷の影響」、電気学会論文誌 Vol. 111-A、No. 4、1991年
- (9) 岡本達希・石田政義「半導電層界面のラメラ構造の改質と絶縁破壊強度の向上」、電中研研究報告 W87007、1987年
- (10) T. Okamoto, M. Ishida, and N. Hozumi, Dielectric Breakdown Strength Affected by the Lamellar Configuration in XLPE Insulation at a Semi-conducting Interface, IEEE, El Trans. Vol. 24, No. 4, 1989
- (11) 岡本達希・穂積直裕・篠原靖志「画像処理によるCVケーブルの半導電層界面ラメラ角の自動検出」、電中研研究報告 W92014、1993年
- (12) 岡本達希・穂積直裕・石田政義・本間宏也・宮下芳次「CVケーブルの半導電層界面におけるラメラ成長の理論的検討」、電中研研究報告 W92030、1993年
- (13) T. Tanaka, T. Okamoto, N. Hozumi, and H. Suzuki, Interfacial Improvement of XLPE Cable Insulation at Reduced Thickness, IEEE, DEl Trans. Vol. 3, No. 3, pp345-349, 1996
- (14) 石田政義・岡本達希「超高圧CVケーブル用絶縁体界面の赤外分光分析」、電中研研究報告 W86020、1987年
- (15) 石田政義・岡本達希・穂積直裕「顕微赤外分光によるXLPE絶縁体中の添加剤濃度分布の分析と絶縁破壊強度に及ぼす効果」、電気学会論文誌 Vol. 111-A、No. 6、1991年
- (16) 石田政義・穂積直裕・岡本達希「CVケーブル絶縁体中への添加剤拡散による交流破壊強度の向上」、電中研研究報告 W87025、1988年
- (17) 石田政義・岡本達希・穂積直裕「CVケーブルの半導電層界面近傍絶縁体の添加剤による改質」、電中研研究報告 W88024、1989年
- (18) 石田政義・岡本達希「界面活性剤がポリエチレン絶縁体の高次構造形成と絶縁破壊強度に及ぼす影響」、電気学会論文誌 Vol. 111-A、No. 11、1991年
- (19) 石田政義・岡本達希・鈴木寛・今城尚久「CVケーブルの半導電層界面近傍での微視的な絶縁体微小高次構造と絶縁性能」、電気学会論文誌 Vol. 112-B、No. 10、1992年
- (20) 石田政義・岡本達希・穂積直裕「絶縁厚低減CVケーブルにおける添加剤分布の長期安定性」、電中研研究報告 W89033、1990年
- (21) 石田政義・岡本達希「XLPE絶縁体の熱履歴による高次構造と絶縁破壊強度の変化」、電気学会論文誌 Vol. 112-A、No. 11、1992年
- (22) 石田政義・岡本達希・今城尚久「紫外～可視分光を用いたCVケーブル絶縁体の球晶径の新しい測定法」、電中研研究報告 W91026、1992年
- (23) 岡本達希・石田政義・田中祀捷「超高圧CVケーブルの半導電層界面の改良」、電中研研究報告 W86013、1986年
- (24) 穂積直裕・岡本達希・石田政義「CVケーブル半導電層の改良によるインパルス破壊特性の向上」、電中研研究報告 W87041、1988年
- (25) 岡本達希・穂積直裕・石田政義「CVケーブルの半導電層界面のラメラ配向と絶縁破壊強度」、電中研研究報告 W91028、1992年
- (26) 岡本達希・穂積直裕・石田政義「CVケーブルの半導電層界面粗さが絶縁破壊強度に与える影響」、電中研研究報告 W89018、1989年
- (27) 石田政義・岡本達希・穂積直裕「絶縁厚低減CVケーブルにおける添加剤分布の長期安定性」、電中研研究報告 W89033、1990年
- (28) 岡本達希・穂積直裕・石田政義・今城尚久「界面拡散法による絶縁厚半減超高圧級CVケーブルの開発」、電中研研究報告 W90042、1991年

第4章

- (1) 泉邦和・高橋毅・谷口毅・本間宏也・畔柳俊幸・清水幹夫「高分子絶縁アームによる60～150kV級架空送電線コンパクト化技術の開発」、電中研総合報告 W10、1996年10月
- (2) 谷口毅・高橋毅・本間宏也・門裕之・泉邦和「都市型コンパクト送電線の開発 - その4 66kVコンパクト鉄塔の試設計」、電中研研究報告 W91027、1992年5月
- (3) 谷口毅・高橋毅・本間宏也・泉邦和「66～154kV架空送電線のコンパクト化の研究 - その1 154kVコンパクト送電線の試設計」、電中研研究報告 W92039、1993年10月

編集後記

電中研レビュー第36号「送電線コンパクト化技術の開発－高分子材料の適用－」をお届けいたします。

都心を離れると、幾筋もの送電線が目につきます。こうした送電線によって送られる電気が、私たちの生活や産業を支えているのですから、送電線は現代生活の命綱となる大変重要な設備です。

当研究所では、2050年の電力需要を予測して、電力輸送技術のあり方を検討してきました。本レビューではその一つ、送電線のコンパクト化技術を材料の面からアプローチした研究成果を特集しました。

架空送電線では、新しい高分子材料を使い、送電鉄塔のアームとがいしを一体化した高分子絶縁アームを開発しました。地中送電線では、CVケーブルの絶縁材を改良し、厚さを半減する技術開発に成功しました。改良のカギとなった絶縁破壊の「トリー」の現象解明に取り組

はじめて20年、現象が解明され、今日の成果につながったわけです。

これらの技術によれば、輸送力を大幅に増強できるとともに、コスト低減の面でも大きく寄与できるものと期待されています。

まだ実用化の一步を踏み出したばかりですが、当研究所では、より信頼性の高い実用化技術の開発に向けて研究を進めていきます。

最後になりましたが、河村達雄東京大学名誉教授に、巻頭の「送電線コンパクト化技術への期待」をご執筆いただきまして、心から御礼申し上げます。

本レビューにより、「送電線のコンパクト化技術」について、皆様のご理解の一助になれば、望外の喜びです。本冊子についてのご意見をお待ちしています。



電中研レビュー NO.36

●平成10年3月25日

●編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報部
東京都千代田区大手町1-6-1 [大手町ビル7階] ☎100-8126
☎ (03)3201-6601 (代表)
●印刷・株式会社 電友社

本部／経済社会研究所 東京都千代田区大手町1-6-1 ☎(03)3201-6601 ☎100-8126 我孫子研究所 千葉県我孫子市我孫子1646 ☎(0471)82-1181 ☎270-1194
柏江研究所／情報研究所／原子力情報センター 横須賀研究所 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 ☎(0468)56-2121 ☎240-0196
ヒューマンファクター研究センター／事務センター 赤城試験センター 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567 ☎(027)283-2721 ☎371-0241
東京都柏江市岩戸北2-11-1 ☎(03)3480-2111 ☎201-8511 塩原実験場 栃木県那須郡塩原町関谷1033 ☎(0287)35-2048 ☎329-2801

