V. 絶 縁 材 料

正 員 田 中 祀 捷 (絶縁材料技術委員会委員長)

1. はじめに

絶縁材料の分野では新素材の利用やコンピュータの応用が新しいトレンドと見られるが、一層切りつめた絶縁設計への要望や、ますます拡大していく使用環境などを底流として、21世紀に向けて再び革新的な大きな変化が起ころうとしている。

ガッタ・パーチャやアpfアルトのような天然材料から多少加工を施した材料はかつては革新的な絶縁材料であった。現在では、材料合成技術の進歩のおかげで性能の優れた絶縁材料が出現し、固体ではポリエチレン樹脂、エポキシ樹脂、液体ではアルキルベンゼン、種々のPCV代替絶縁油、気体ではSF₆、フロン、複合絶縁では油浸絶縁、マイカ・エポキシ樹脂絶縁などが使われている。この状況からは電気絶縁は一つの成熟段階に達していると考えられる。しかし、絶縁設計の合理化・高度化や絶縁材料の使用環境の拡大に伴い、今後は大きな変化・進展が期待できる。それには続々現われる新素材の積極的活用や発展するコンピュータ技術の徹底的な援用が望まれる。

このようなトレンドの中で、絶縁材料技術委員会は発展していく絶縁材料技術の調査研究活動を推進して質的な成果を上げると共に、取扱う範囲を順次拡大する努力を重ね量的な成果も上げてきた。更に若手研究者の育成、欧米との技術交流にも留意し、種々の活動を行ってきた。これらの活動や成果は絶縁材料技術の向上や発展に大きく貢献してきたものと確信している。更に、今後は新しい試みとして歴史的展望やアジア諸国との交流といった異質の側面の模索も行うつもりである。

一方、変化は別のほうからも生じてきた。それは電気学会の四部門制への移行である。絶縁材料分野はA部門(基礎・材料・共通)に属し、新しいスタートを切ることになるが、一層フレキシブルな活動ができるようになることを期待したい。技術委員会からみた

四部門制での微視的な変化は第2種専門委員会の発足であるが、この拡大された自由度による委員会活動が、調査研究活動に活性を与え、将来発展的姿をとることを期待したい。大きな集団から多少解き放されて、一つの自律分散集団として小回りのきく柔軟な思考能力をもったものに成長していくことも期待したい。

2. 絶縁材料研究分野の展望

2.1 絶縁材料技術委員会の役割

絶縁材料技術委員会の芽生えは、絶縁技術のうち絶縁材料の基礎研究の成果が上がってきているにもかかわらず、電気学会には適切な討論の場が形成されていなかった昭和40年代初期にさかのぼる。電気材料技術委員会の下部機構として、誘電材料・導電特性調査専門委員会をやや変則的ながら現在の研究会スタイルで始めた。

当時の犬石嘉雄大阪大学教授(現、近畿大学)、家田正之名古屋大学助教授(現、愛知工業大学)、矢作吉之助早稲田大学助教授(物故)が中心になって発案され、実現に向けて努力された。

誘電材料・導電特性調査専門委員会は発展して、昭和45年9月に絶縁材料常置専門委員会に昇格し、独立して活動ができるようになった。更に電気学会内での常置専門委員会と調査専門委員会の見なおしが行われ、昭和54年10月に現在の形である絶縁材料技術委員会となった。

この一連の活動の中で、調査専門委員会の発足の次の年、すなわち昭和43年に第1回の電気絶縁材料シンポジウムを主催した。平成元年度には第22回を行った。このシンポジウムはもともと、アメリカの「電気絶縁と誘電現象の会議」(Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena—CEIDP)やイギリスの「誘電体討論グループ会合」(Dielectrics Discussion Group Meeting—現在 Dielectrics Society Meeting)を手本にしたものであるが、手本の基礎面ばかりでなく応用面も意識してとり入れた日本流のシンポジウムの確立を図ってきた。このコンセプトは後年アメリカに逆輸入され

V. Electrical Insulating Material. By Toshikatsu Tanaka, Member (Chairman of The Technical Committee on Electrical Insulating Materials).

キーワード: 電気絶縁, 材料・展望

International Symposium on Electrical Insulation となった。第2回シンポジウムから欧米より1~2名の研究権威者を招へいし、我が国の絶縁技術研究者の国際的センスの向上をねらった。昭和56年には水トリーについて国際的なミニワークショップを開催し、昭和63年には1日間の International Day を設定し、中国の研究者も招へいして、大いに国際交流を図った。

昭和40年代中ごろには、絶縁材料シンポジウムはいまだ欧米には知られていなかったもので、情報の流れとして欧米からの招へい者による帰国後のPRや連系を期待すると共に、しばらくしてシンポジウム予稿の要約版を英文アブストラクトとして欧米の研究者に送付してきた。いまや本絶縁材料シンポジウムは世界の情報の発信地となったと自負している。そのおかげで昭和63年には International Day をもてた。通常2日のところ3日のシンポジウムとなったが、予稿はすべて英文で作成した。

絶縁材料（のちに誘電・絶縁材料と改称）に関する若手セミナーは、シンポジウムに遅れること3年、すなわち昭和46年から開始した。このセミナーの実施にあたっては、絶縁材料の若手研究者が自らの問題意識で自らのために行うよう配慮し、委員会はガイダンスを行う程度にとどめている。筆者は初期の立上げ時に参画し、自由な雰囲気での議論ができたことと鮮明に記憶している。この若手セミナーの経験者が、続々この分野の第一線級の研究者になってきていることは喜ばしいことである。

情報の発信という点に再び戻ると、種々のことを行ってきた。IEEEが出すEI Newsletter（現在、DIES Magazineに包含されている）のEI News from Japan（またはEI News in Japan）として我が国の電気絶縁の状況を寄稿し、価値ある情報提供として高く評価されてきた。更にアメリカのCEIDP, International Symposium on Electrical Insulation, イギリスの International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Application, ドイツのISHなど数多くの国際会議に続々と委員を送り込んで、国際的なリエゾンに貢献すると共に、国際的な情報ネットワーク作りに努力してきた。

さて、絶縁材料技術委員会の現在の主な活動を整理すると表1のようになる。表1中の1, 4, 5の項目については既に述べた。6についてもこれまでに積極的に行ってきた。平成元年度電気学会全国大会では、「最近の固体絶縁材料に対する要求性能と添加剤・充填剤の役割」、平成元年度電気・情報関連学会連合大会で

表1 絶縁材料技術委員会の主な活動

1. 絶縁材料シンポジウムの開催
2. 調査専門委員会活動
3. 絶縁材料研究会の開催
4. 誘電・絶縁材料に関する若手セミナーの開催
5. アメリカ, IEEE DEIS マガジンへの「日本のEIニュース」の寄稿
6. 電気学会全国大会や関連学会連合大会のシンポジウムの企画
7. 見学会

は「絶縁材料技術のエキスパート・システムの現状と展望」のシンポジウムの企画を行った。見学会は他の委員会と同様、委員の知見の向上に役立てるよう努力してきた。

そこで、二つの重要な活動として絶縁材料に関する調査専門委員会の活動と絶縁材料研究会の開催について述べる。常置専門委員会の時代は調査専門委員会は独立した組織であったが、その当時からゆるい関係をもって示唆を与える活動をしてきた。技術委員会となって2~3の調査専門委員会を統括することになり、数々の調査専門委員会を企画・運営し、これまでに表2に示すような電気学会技術報告をだしてきた。参考のため表3に平成元年に活動している調査専門委員会の名称を示す。平成2年1月現在では、上の三つの委員会は終了している。

絶縁材料研究会は伝統的に年10~12回行ってきた。初期の段階では問題点を検討し適宜テーマ化して研究会を開催してきたが、問題のすい上げが調査専門委員会へと行われるようになる10年ほど前からは、研究会と調査専門委員会とのテーマの有機的なつながりが強くなってきた。新しい調査専門委員会をつくる前段として研究会を行ったり、調査専門委員会の中間成果を中心に研究会を行ったり、オープンな場での電気学会会員へのサービスにも心がけてきた。表4は平成元年に開催した研究会のテーマである。

絶縁材料技術委員会の携えるテーマは、指導者と構成員の関係上、どちらかといえば重厚長大の電力機器の絶縁技術に重点を置いたものであった。技術の成熟と共に研究者の減少・高齢化は避けられないとの兆しを感知し、その突破口として昭和59年、電子絶縁の道を開くため調査専門委員会を設置し、活動を行ったが、現在拡大的に研究が行われ、参加人口の維持に大いに役立っている。

絶縁材料技術委員会は、昭和61年に将来の絶縁材料の研究展望を行うためタスクフォース活動を行い、種々の分野で将来課題を摘出したが、共通の問題として新素材とコンピュータの利用という大きなテーマが

表2 絶縁材料に関する電気学会技術報告一覧
(昭和45年より)

技術報告Ⅰ部

有機絶縁材料のトリイニングについて——樹枝状放電劣化の調査と研究—(第100号, 昭46)
絶縁材料の部分放電(コロナ)による劣化(Ⅲ)内部放電劣化についての予備的検討(第106号, 昭48)
有機絶縁材料における水トリーについて(第111号, 昭49)
短時間耐熱性試験予備試験結果(その1)耐熱温度標準物質を用いた使用熱分析装置の検定(第118号, 昭52)
短時間耐熱性試験法予備試験結果(その2)ワニス塗膜の熱分析(第121号, 昭52)
有機絶縁材料における水トリーについて(3)——ボウタイ状水トリー——(第134号, 昭57)

技術報告Ⅱ部

絶縁ワニス耐熱性試験法の検討(第28号, 昭49)
絶縁材料の部分放電(コロナ)による劣化(Ⅳ)内部放電による寿命試験結果(第43号, 昭51)
絶縁材料の放射線劣化と耐放射線性試験法の現状(第86号, 昭54)
有機絶縁材料の水トリーについて(第95号, 昭55)
固体絶縁材料の商用周波数による高電圧小電流耐アーク性試験方法の検討(第101, 昭55)
IEC Publication 112による絶縁材料の耐トラッキング性試験方法(第115号, 昭56)
短時間耐熱性試験方法の検討(熱重量測定について)(第134号, 昭57)
原子力発電所電線ケーブルの環境試験方法ならびに耐延焼試験方法に関する推奨案(第139号, 昭57)
部分放電劣化(第164号, 昭59)
絶縁劣化診断試験方法(第182号, 昭59)
電気絶縁材料の熱刺激電流(第194号, 昭60)
原子力発電所用絶縁材料の耐放射線性および環境試験法の現状(第214号, 昭61)
最近の油浸絶縁と将来展望(第224号, 昭61)
絶縁システム複合劣化要因に関する研究の現状(第225号, 昭61)
複合環境下における絶縁材料の放射線劣化(第233号, 昭61)
有機絶縁材料のトリイニング(直流電圧およびインパルス電圧によるトリイニング)(第237号, 昭61)
極低温絶縁技術(第260号, 昭63)
有機機能性絶縁材料の現状と発展方向(第268号, 昭63)

表3 平成元年における絶縁材料に関する
調査専門委員会

絶縁材料トリイニング性試験方法
固体絶縁材料の添加剤・充填剤効果
誘電・絶縁新素材
絶縁材料のエキスパート・システム
誘電・絶縁材料の分析・計測技術
運転中における絶縁劣化診断
有機超薄膜作成技術
機能性有機絶縁薄膜
エンジニアリング・プラスチックの機器・ケーブルへの応用
放射線など環境下における誘電性材料
有機複合材料の電気・電子絶縁への適用
無機誘電・絶縁材料
絶縁材料技術開発の歴史的展開

浮かび上がってきた。その結果, エキスパートシステムや無機材料・複合材料へも展開することとなった。

表4 平成元年に開催した絶縁材料研究会のテーマ

電気設備・絶縁診断(1月30日, 31日), 高電圧技術委員会と共催
国際会議報告(2月21日), IEEE DEIS 東京支部と共催
耐熱性ポリマーと試験法(3月14日)
エンジニアリング・プラスチックの機器・ケーブルへの適用(5月23日)
絶縁材料構造と伝導・劣化・破壊(6月20日)
トリイニングとトラッキング(7月7日, 8日), 放電研究会, IEEE EIS 東京支部と共催
新しいケーブル絶縁技術(7月18日)
絶縁薄膜の形成と応用(8月29日), 東京支部連合研究会
誘電新機能材料(9月11日)
モールド絶縁機器(11月21日)
液体と極低温絶縁(11月28日), 放電研究会と共催
耐放射線性(12月11日~13日)
有機薄膜一般(12月), 通信学会有機エレクトロニクス研究会と共催

更に, ある程度成熟期に入った絶縁分野の将来をみえるため歴史の勉強をすることにした。

これらの活動の中で1991年にパン・パシフィックの性格をもつICPADM(誘電材料の特性と応用に関する国際会議)を日本で開催することが要請され, IEEEと連携して準備を始めた。これまで欧米とのつきあいが濃厚であったが, 今後はアジアが重要になると思われる。

2.2 絶縁材料技術の進歩

ファラデー(1791~1867年)は電気絶縁材料としてガッツ・パーチャを考えた。それは1850年海底通信ケーブルに用いられたが, 耐水性, 柔軟性, 被覆性を兼備しているということで当時では画期的であった。絶縁材料の技術進歩は, このように優れた材料を適切に採用(改良も含め)していくことの繰返しであったといえる。

電力技術の分野では, 電力需要の増大で送電電圧の上昇と電力機器・ケーブルの信頼性の向上という時代の要請があった。電力機器・ケーブルの絶縁は高電圧化・大容量化の技術開発の中でコンパクト化と信頼性が求められたが, これに対応できたのは主に新しい優れた人工材料が続々現われたためであろう。現在, 電力機器・ケーブルに使用されている絶縁材料の主なものを表5に示す。

空気絶縁を加圧SF₆に置き換えた技術は画期的であった。変電所が何十分の一にも小さくなり, 地下にもぐってしまった。初め1950年代にSF₆の消弧性能を利用してガス遮断器が開発されたが, 1960年代に入ってSF₆の絶縁性能を活用して, 非常に小形で信頼度の高い密閉形の開閉装置であるGISの開発・実用化が行われた。これがなければ都心の変電所の建設は不可能に近かったと思われる。地下での防災対策として

表5 電気機器と絶縁材料の例

	気 体	液 体	固 体	複 合
大形回転機			ポリイミド シリコン (マイカ) (エポキシ)	マ イ カ + [エポキシ ポリエステル]
大形変圧器	SF ₆ ガス フロンガス	(鉱油) (合成油)	エポキシ [モールド絶縁]	油浸セルローズ [油浸紙 プレスボード]
電力ケーブル		(鉱油) (合成油)	架橋ポリエチレン EPR (セルローズ紙)	油浸紙 油浸ポリマーラ ミネート紙
電力用コン デンサ		(鉱油) (合成油)	(セルローズ紙) ポリプロピレン	油浸紙 油浸ポリプロピ レン
遮 断 器 開 閉 器	空 気 SF ₆ ガス 真 空	絶縁油		
屋外絶縁が いし・がい 管	空 気		磁器, ガラス エポキシ ゴム プラスチック	
GIS	SF ₆ ガス			絶縁性スベサ が必要
電子絶縁			SiO ₂ , Si ₃ N ₄ ポリイミド [LB膜]	
特 殊 環 境 下	放射線		ゴムプラスチック エポキシ ワニス 光ファイバ (SiO ₂)	CFRP [炭素繊維 強化プラスチ ック]
	極低温	真 空	液体ヘリ ウム 液体窒素	架橋ポリエチレン (合成紙) 液体窒素含浸の セルローズ紙 合成紙

() 内: 単独では使用しない

SF₆ガス絶縁変圧器も既に実用化されている。新しい絶縁として低沸点フロンの Vapor Mist が検討されているが、地球環境への影響が懸念される。

固体絶縁では 1940 年代以降高分子合成技術の恩恵を受け、電力機器・ケーブルにポリエチレンやエポキシ樹脂といった高分子材料が優れた特性の絶縁材料として続々使用されていった。電力機器の使用電界強度は数 kV/mm 程度であるが、その範囲の中で数倍の改善が行われた。

電子デバイスの絶縁（電子絶縁と呼ぶ）はすべて固体絶縁である。使用電圧は数ボルトと低いが、アクティブ素子の実装の高密度化により絶縁膜の薄膜化が行われ、使用電界強度は極端に高くなり、いまや数

MV/cm に達している。電力機器絶縁も含めて高電界絶縁と呼ばれるゆえである。ゲート絶縁やキャパシタ絶縁には SiO₂ や Si₃N₄ のような無機材料であるが、層間絶縁や保護膜にはポリイミド、封止材料にはエポキシ樹脂のような有機材料が用いられている。今後ポリイミド LB 膜、ラダー・シロキサン、PPS、液晶ポリマなども新しい絶縁体として用いられていくと考える。

世の中の変化につれて電気絶縁の用いられる環境はますます拡大している。今後考えていかなければならないのは宇宙、屋外、極低温、高温、放射線場であろう。一方、高分子材料として昨今エンジニアリングプラスチック（五大エンジニアリングプラスチックは PA, POM, PC, PBT, PPO）の開発が著しいが、これらは新しい用途の絶縁材料としてもそれぞれの特性を生かして大いに利用されていくものとする。

液体絶縁の主流は鉱油（パラフィン系とナフテン系）およびアルキルベンゼンのような合成絶縁油である。PCB は難燃性や誘電特性が優れていたが、我が国では 1972 年に使用禁止となった。現在は用途に応じた代替油が開発されている。

電気絶縁の特性データ、設計、保守などにコンピュータが使われ始めた。この分野は未成熟であるが、その必要性は大なので今後ますます拡大・充実させていく必要がある。現在コンピュータ利用の対象となるのは

- (1) 絶縁材料データベース
- (2) 絶縁設計エキスパートシステム
- (3) 絶縁計測・試験エキスパートシステム
- (4) 絶縁診断エキスパートシステム

などである。

以上述べてきたように、絶縁材料技術はある程度成熟しているが、新しい絶縁材料の出現、新しい使用環境への対応、コンピュータ技術の援用などこれまでに経験しなかった事象に遭遇しているので、これが新たなスプリングボードとなって、第二段階への成熟へと展開していくものと思われる。

3. 部門誌への期待

3.1 部門活動への期待

A 部門は基礎・材料・共通部門と定義されているが、その中身として技術委員会をながめると教育・研究、電気物理、放電、光応用・視覚、計測、絶縁材料、金属材料、マグネティックスが含まれている。

このように A 部門は何となく基礎・基盤となるものが集まったとみられるが、これが一つの部門かという

疑問を起こさせる。今後は各セクションは相互に有機的な関連性をもつように工夫することが必要であり、何らかの方法論が提案されるのを期待したい。その過程を経て次第に一つの部門として成長していくことを望みたい。

絶縁材料を担当している者としては材料関係の充実を夢みるわけであるが、超電導材料、半導体材料、セラミックス、機能性材料などが明示的でないのはさみしい。最近ではセラミックス超電導材料が研究対象となっているが、とりあえず超電導材料の分野を積極的に起こしていったはどうだろうか。

電気工学は100年前に欧米から導入されて、我が国もその後の発展にそれなりの寄与をしてきたわけであるが、その技術発展の根源や評価について十分な探索はされていない。共通部門をもつA部門では、その歴史的展望の活動を行うことを推奨したい。その探索過程は今後の手本のない研究に大きな灯をともしることになると信じる。絶縁材料技術委員会では「絶縁材料技術開発の歴史的展開調査専門委員会」を発足させたが、電気材料一般の歴史研究も必要ではなかろうか。

更にこのようなことを深めてA部門での共通のテーマを創造し、A部門が一体感がもてるよう展開していくことが望まれる。このことを考えると、更に一つのことが心に浮かぶ。電気工学の歴史は他の分野と同様に基本的には欧米からの技術導入の歴史であった。追いつき追い越せの活動で、既に追い越している分野とあると思われる。欧米からの100年の恩恵を今度は返すときである。欧米に互角で付き合い、与えるものもあるというのは良いことであるが、アジア近隣諸国に目を向けて、彼らの進展の一助となる努力も必要なのではないだろうか。当学会の国際交流基金の中で外国学会との交流という項目である程度の基金が用意されるようであるが、欧米ばかりでなくアジアの人たちとの交流にも、拡大的に使用されていくことを望むものである。

3.2 部門誌への期待

基本的には前節で述べた事柄などが部門誌にも反映されていくことを期待する。

部門誌は基本的には論文誌であり、それに雑誌記事が追加されているものと定義されている。論文には特集論文と一般論文があるということであるが、特に特集論文集は会員のサービスには最高であるので大い

に期待している。絶縁材料技術委員会からの特集テーマの提案に積極的でありたい。現在は表立って含まれていない超電導材料、半導体材料、セラミックス、機能性材料などは特集号を組むことによって会員の注意を喚起し、分野の拡大成長を図ることが大切である。

学問の専門化が深まりますます細分化する傾向の中で、A部門内といえども他分野の論文を理解することは困難となってきた。そこで総合報告や解説記事が非常に重要な役割を果たすものと期待される。充実を望みたい。新しいジャンルの開拓にも役立つと思う。

一方、国際化の世の中である。海外からの生のニュースの掲載も面白いと思う。筆者はIEEEの雑誌にEI News in Japanを10年以上寄稿したが好評だった。現在も他の人が継続している。海外の寄稿者を委嘱し、News from USA, News from Europe, News from China, News from Koreaなどのコーナーがあると興味深いのではないだろうか。アジアにも目を向けるべきであることはいうまでもない。

部門誌がフロッピー化できれば会員の皆様は大変便利になるのではないだろうか。

終りに、小さな集団になったのだから、いったん決定したことにこだわらず、発展のためにフレキシブルな考えで進めることができるよう期待したい。

(平成元年10月16日受付)

文 献

- (1) 「特集：最近の絶縁材料」, 電学誌, **95**, 1 (昭50-5)
- (2) 田中：「小特集：電気材料技術の将来展望IV, 絶縁材料」同上, **108**, 305 (昭63-4)
- (3) 電気工学100年史 p. 221 (昭63-5)
- (4) 「技術史よりみた電気工学の歩み」, 電学誌, **109**, 5 (平元-1)
- (5) 田中：「新絶縁材料の展望」, OHM, p. 25 (平元-3)

田 中 祀 捷 (正員)

昭和14年1月2日生。39年3月大阪大学電気工学科修士課程修了。工学博士。同年(財)電力中央研究所入所。現在同所開発部長。主として絶縁材料、超電導、電池技術の開発に従事。電気学会より論文賞2件、著作賞1件受賞。物理学会会員。