

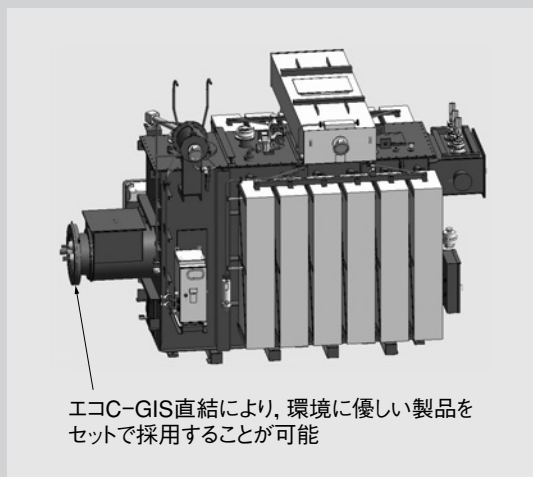
植物由来のパームヤシ脂肪酸エステル（PFAE）を用いた環境配慮型変圧器の特長

🔗 変圧器, 環境調和, パームヤシ脂肪酸エステル, PFAE, 植物油

* 脇本 聖 Kiyoshi Wakimoto

概要

近年、地球環境への配慮や脱石油化への要求の高まりに対応して、鉱油の代替として生分解性に優れたエステル系絶縁油を用いた変圧器の開発が進められている。当社では、植物由来のパームヤシ脂肪酸エステル（PFAE）を用いた環境配慮型変圧器を製造・販売している。PFAEは高い環境性を備えながら変圧器絶縁油としても高性能が期待できる絶縁油である。鉱油に比べ動粘度が低く（0.6倍）、比誘電率が高い（1.3倍）ため、油入変圧器に適用した場合、コンパクト化が期待できる。絶縁油としての供給安定性・酸化安定性の点でも優れている。現在、製品化の範囲としては、窒素密封式で無電圧タップ切換器付きタイプだけでなく、コンサベータと真空バルブ式負荷時タップ切換器にも対応している。



エコ-GIS直結により、環境に優しい製品をセットで採用することが可能

パームヤシ油入変圧器

1. ま え が き

電気絶縁油の使用量は、全世界で年間100万kLにのぼると推定されるが、ほとんどは従来から実績の多い石油由来の鉱油である。近年、異常気象や地球温暖化など環境問題が頻繁に議論され、重電分野でも環境への配慮・脱石油化が求められている。これに伴い、生分解性に優れたエステル系絶縁油の開発が盛んになり、海外ではIEC規格化も進められている。

（株）日本AEパワーシステムズ（（株）日立製作所・富士電機（株）・（株）明電舎の合弁会社で、2012年に合弁を解消、以下AEパワー）は、ライオン（株）と共同で、鉱油に替わる変圧器用絶縁油として、2006年にパームヤシ脂肪酸エステル（PFAE：Palm Fatty Acid Ester, ライオン（株）製品名：パステルNEO）を開発した。また2009年から、これを絶縁油に採
*変圧器工場

用したパームヤシ油入変圧器（製品名：エコトランス）の販売を開始した。コンセプトは、植物由来で環境に優しいだけでなく、従来の鉱油と同等以上の性能も両立することである。

昨年4月1日の合弁解消以降は、出資会社3社がAEパワー時代に開発した技術を引き継いでいる。当社では、環境配慮型変圧器としてパームヤシ油入変圧器の製品開発を継続し、製造・販売可能な体制をとっている。製品化の対象範囲としては、窒素密封式で無電圧タップ切換器付きタイプだけでなく、コンサベータ（以下、OC）と真空バルブ式負荷時タップ切換器にも対応している。本稿では、環境配慮型変圧器の特長について紹介する。

2. 鉱油と比較したPFAEの特長

第1表にPFAEと鉱油の物性値を示す。PFAEは、以下に示す優れた特長を備えている。

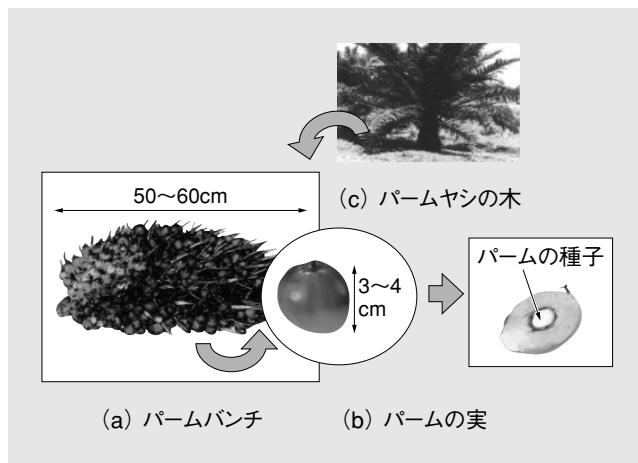
第1表 PFAEと鉱油との物性値比較

PFAEは粘度が低く、鉱油より優れた種々の特性を持つ。

項目	PFAE	鉱油	備考(条件)
密度 (g/cm ³)	0.86	0.88	15℃
動粘度 (mm ² /s)	5.06	8.13	40℃
引火点 (℃)	176	152	開放式
流動点 (℃)	-32.5	-45	
酸価 (mgKOH/g)	0.005	<0.01	
比誘電率	2.95	2.2	80℃
体積抵抗率 (Ω・cm)	7.1×10 ¹²	7.6×10 ¹⁵	80℃
絶縁破壊電圧 (kV)	81	70~75	2.5mm

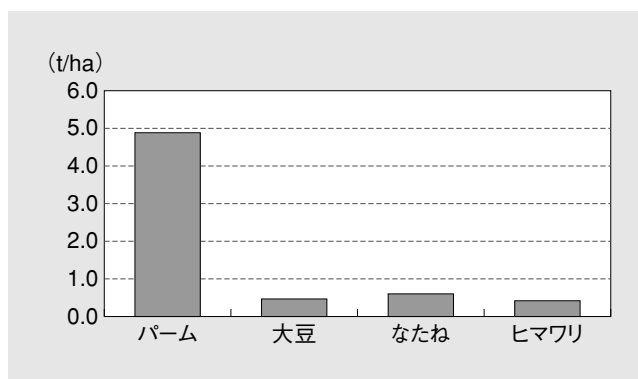
- (1) 植物を原料とした油であるため、鉱油のように枯渇の心配がない。パームヤシ油は単位面積当たりの収穫率が高く、また植物油の中で生産量が最も多いため、安定供給が可能である。
- (2) PFAEは化学的に安定な飽和脂肪酸100%の絶縁油であり、鉱油に比べて酸化安定性が高い。
- (3) 比誘電率が高く、絶縁物との誘電率整合効果で油側の電界集中が抑えられるため、複合絶縁系の絶縁破壊電圧が上昇する。
- (4) 硫黄を含まないため、硫化腐食を生じない。
- (5) 体積抵抗率が鉱油に比べて低いため、流動帯電を生じにくい。
- (6) 鉱油及び従来の植物油に比べて動粘度が低いため、変圧器に適用した場合、冷却効率が高くなる。
- (7) 鉱油に比べて引火点が高い。
- (8) 生分解性があり、万が一土壌に漏れた場合でも速やかに水と二酸化炭素に分解される（エコマークの認定を取得）。
- (9) 使用後は、バイオディーゼル燃料として二次利用ができる。
- (10) 鉱油に比べて負荷時タップ切換器（OLTC）で重要となる油中での金属間摺動時の耐摩耗特性が優れている。
- (11) 密度が水（0℃で0.917g/cm³）に比べて低いため、低温環境下で油中水分が氷として析出しても油中を浮上しない。また軽量化を追及する移動用変圧器には、低比重油が向いている。

以上の優れた特性を持つPFAEを変圧器に適用した場合、環境への配慮に加え、鉱油と同等以上の絶縁・冷却性能による変圧器のコンパクト化も期待できる。東日本大震災後の安全性に対する意識変化も踏まえると、省エネルギーや再生可能工



第1図 パームヤシ（木と実）

パームヤシの実にはバンチと呼ばれる塊で収穫される。パームヤシの実からはパーム油を、種子からはパーム核油を採油する。



第2図 油種別単位面積当たりの収穫率

植物を原料とした油であるため、鉱油のように枯渇の心配がなく、植物油の中で生産量が最も多く単位面積当たりの収穫率も高いため、安定供給が可能である。

エネルギーなどとの組み合わせも含め、今後のパームヤシ油入変圧器の普及拡大が考えられる。

なお鉱油と同様に、PFAEの場合も油中ガス分析で変圧器の異常診断ができることは検証済みである。

3. 供給安定性

数十年間運転される変圧器の絶縁油の供給安定性は、長期的な事業継続性・メンテナンス対応・性能保証の観点から重要である。

第1図にパームヤシ（木と実）を示す。PFAEの原料となるパームヤシは熱帯地域で栽培され、実はバンチと呼ばれる塊で一年を通じて収穫される。パームの実からはパーム油を、種子からはパーム核油を採油できる。パームヤシ油は、植物油の中で生産量が最も多い。また第2図に示すように、単位面積当たりの収穫率もトップで、他の植物と



第3図 酸化安定性試験結果 (JIS C 2101 : 120°C × 75H)

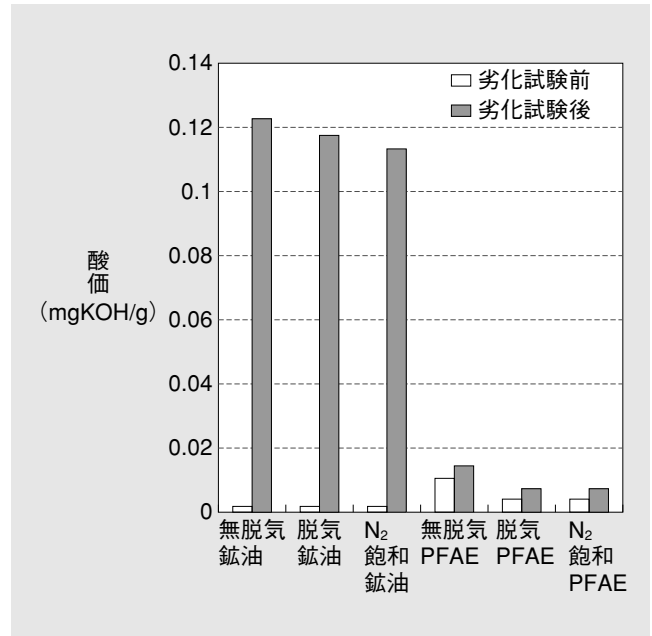
3種類の油処理条件 (開放: 水分300ppm未処理, 脱気: 脱気処理し水分10ppmに低減, N2: 脱気処理し水分10ppmに低減後窒素飽和) で, PFAEは無色透明のまま試験前後の変化が認められない。

比べ群を抜いている。主として、洗剤や石鹼などの工業原料として、あるいは食用として使われ、生産量の増加に連れて消費量も急増している。特に酸化や加熱に対する安定性が高く、油で揚げる加工食品に用いると、油の酸化による変質を抑制し、安定性が長く維持されるという利点があり、利用が進んでいる。また最近では、バイオディーゼルへの利用も広がっている。

このように、高い生産性や用途の多様性によって、植物油の国際市場でパームヤシ油は優位を保っており、安定的に供給されている。

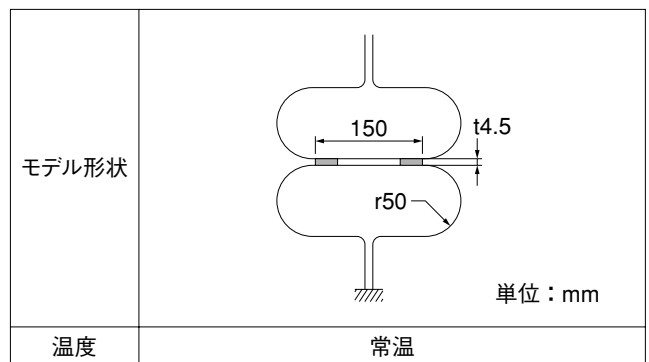
4. 酸化安定性

鉱油とPFAEについて、JIS C 2101で規定されている酸化安定性試験を実施した。第3図に鉱油及びPFAEを3種類の条件 (開放: 水分300ppm未処理, 脱気: 脱気処理し水分10ppmに低減, N2: 脱気処理し水分10ppmに低減後窒素飽和) で処理した時の試験前後の状態を示す。鉱油がいずれの油



第4図 酸価の比較

PFAEの方が鉱油よりも試験前後の酸価に変化が無く低い値を保っており、PFAEは酸化安定性に優れていることが分かる。



第5図 セクション間モデル形状

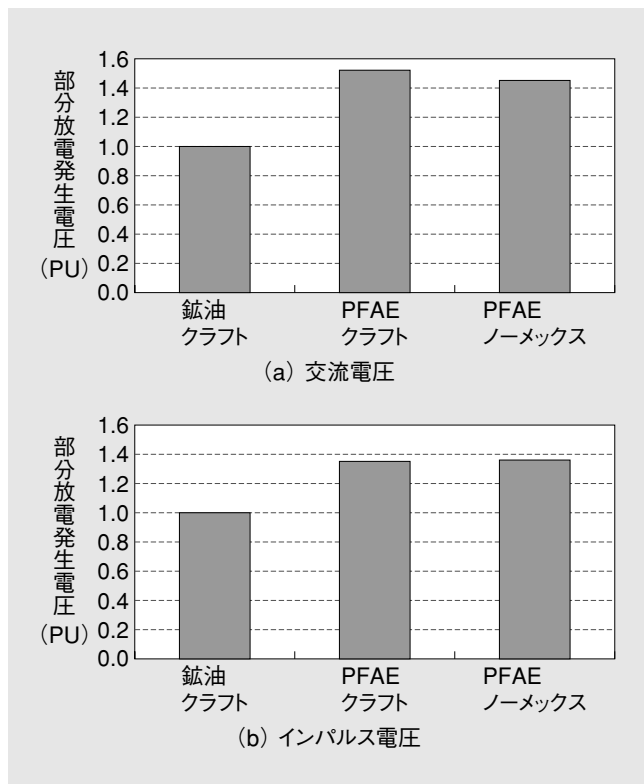
3×13mmの平角銅線に0.3mm厚さのクラフト紙絶縁を施し、スペーサは4.5mm厚さの高密度プレスボードを使用した。

処理条件でも変色しているのに対し、PFAEは無色透明のまま試験前後で変化が認められない。

第4図に酸価の比較を示す。PFAEの方が鉱油に比べて試験前後の酸価に変化がなく、低い値を保っている。この結果から、PFAEは酸化安定性に優れていることが分かる。

5. 絶縁特性

変圧器の複合絶縁モデルとしてセクション間モデルを用い、AC及びインパルス絶縁試験を実施した。第5図に形状を示す。モデル電線は3×13mmの平角銅線に0.3mm厚さのクラフト紙絶縁を施したものである。スペーサは、4.5mm厚さの高密度プレスボードを使用した。第6図に試験結果を示



第6図 セクション間モデルの部分放電発生電圧
PFAEのAC及びインパルスの部分放電発生電圧は、鉱油に比べ約1.3~1.5倍程度高い値を示している。これはPFAEと絶縁紙との誘電率整合効果によって、クサビ状油隙部の電界集中が緩和されたためと考えられる。

す。PFAEのAC及びインパルスの部分放電発生電圧は、鉱油に比べ約1.3~1.5倍程度高い値を示している。これはPFAEと絶縁紙との誘電率整合効果によって、クサビ状油隙部の電界集中が緩和されたためと考えられる。

このほかに、PFAEは以下に示す絶縁に関する優れた特長を備えている。

- (1) 最近、温度の高い条件において絶縁紙表面に硫化銅が析出する新しいタイプの硫化腐食が問題になっている。これに対し、PFAEは硫黄を含まないため、硫化腐食を生じない。
- (2) PFAEは鉱油に比べて体積抵抗率が低く、絶縁油中の電荷緩和が起こりやすいことから、生じた余剰電荷が消滅しやすいため、流動帯電も生じにくい。

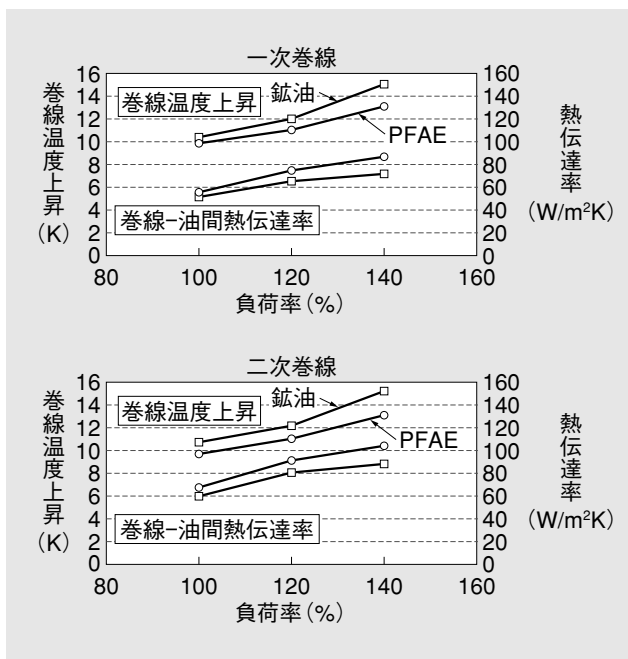
6. 冷却特性

冷却特性確認のため、66kV、2000kVAの実変圧器を用いて、JEC-2200-1995に準拠した温度上昇試験を鉱油及びPFAEの両者で行った。第2表に試験変圧器の仕様を示す。

第2表 試験変圧器の仕様

冷却特性の確認のため、JEC-2200-1995に準拠した温度上昇試験を鉱油及びPFAEの両者で行った。

適用規格	JEC-2200
形式、定格周波数	内鉄形、50Hz
相数	三相
定格容量	2000kVA
定格電圧	66/6.6kV
冷却方式	油入自冷 (ONAN)



第7図 巻線温度上昇と熱伝達率

PFAEの方が鉱油と比べて、巻線温度上昇は低く熱伝達率は約10%高い。また負荷率が大きくなると、巻線温度上昇の鉱油とPFAEの差異は大きくなる。

試験方法は、二次巻線を短絡し一次巻線から損失分を供給し負荷率 (140%・120%・100%) を変化させて巻線温度と油温を測定した。第7図に各負荷率における巻線温度上昇と熱伝達率を示す。試験結果から、PFAEは鉱油に比べて、一次巻線・二次巻線とも温度上昇がより低く、巻線-油間熱伝達率が約10%高いことが分かる。また、負荷率が大きくなると、巻線温度上昇の鉱油とPFAEの差異は大きくなる。これらは、各々の動粘度特性に起因するものと考えられる。

なお、PFAEは原料であるパームヤシ油をアルコールと反応させて、低分子化・低粘度化した絶縁油である。一般的に低粘度化に伴い引火点は低下する傾向を示すが、PFAEは高純度のため、鉱油をしのぐ低粘度化を実現しているにもかかわらず、引火点は鉱油に比べて高い値を示している。

7. 生分解性

油入変圧器は、大地震による油密部（フランジ接合面シール構造）の口開き、使用年数や周囲環境の影響による油密性能の低下や鉄板の腐食などで、漏油が発生する可能性がある。

万が一、河川・湖沼・海・池・ダム・土壌などに油が流出した場合、自然環境や生活環境、さらには産業などにも被害が及ぶ場合がある。これらの被害に対しては多額の賠償が発生する可能性があり、また流出した油の回収には高額な費用が必要となる。国際的にも環境問題への関心が高まる中、油の流出によるイメージダウンは企業の存続にかかわる大きな問題となる。

万が一の流出事故を想定して、OECDテストガイドライン（経済協力開発機構が定めた国際的な化学物質の安全性評価試験方法）301Fに準拠した生分解性試験及びOECDテストガイドライン203に準拠した魚類急性毒性試験を行った。

生分解性試験の結果、第8図に示すように鉱油の30%に比べ、PFAEは77%という高い分解度を示した。ヒメダカ10匹の魚類急性毒性試験では、濃度100ppmでの96時間後死亡率が0%で、半数致死濃度100ppmの条件を満たした。

以上の生分解性試験及び魚類急性毒性試験から、PFAEは第8図に示すエコマークの認定を取得した。これは、万が一PFAEが流出しても毒性がなく、水や土の中にいる微生物によって速やかに水と二酸化炭素に分解されることを示している。

8. 廃油の二次利用

鉱油の場合、廃棄時は焼却処理が一般的であるが、PFAEは植物由来の低粘度の油であることから、バイオディーゼル燃料として二次利用できる。これによって、低炭素社会や循環型社会への貢献が期待できる（第9図）。

9. そのほか

OLTCでは、油中での金属間の摺動時の耐摩耗特性が重要となる。PFAEと鉱油についてASTM D4172で規定される四球摩耗試験（荷重：392N，回転数：1200min⁻¹，試験油温度：75℃，試験時間：60分）を実施した。試験後の鋼球試料（4球）

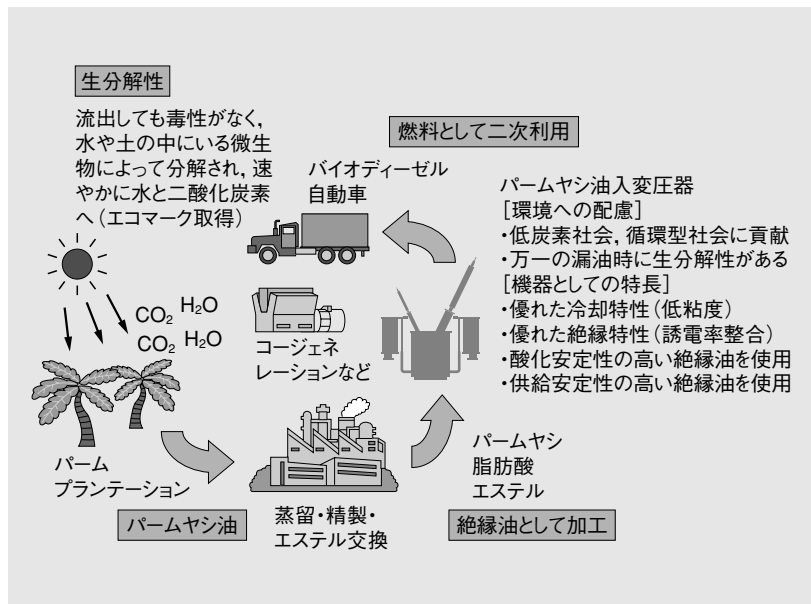


第8図 エコマーク認定取得

生分解性試験及び魚類急性毒性試験から、PFAE（ライオン(株)パステルNEO)はエコマークの認定を取得した。これはPFAEが万が一流出しても毒性がなく、水や土の中にいる微生物によって速やかに水と二酸化炭素に分解されることを示す。

の摩耗痕の直径を計測した結果、PFAEの方が鉱油よりも小さく、耐摩耗特性が優れていることが分かった。

鉱油の場合、密度は15℃で0.91g/cm³以下とJIS



第9図 低炭素社会・循環型社会への貢献
PFAEはバイオディーゼルの燃料として二次利用ができ、低炭素社会・循環型社会への貢献が期待される。

C 2320で規定されており、「非常な低温に置かれたとき油中に浮遊する氷結晶の害を最小にすることを目的」としている。PFAEは鉱油よりも低比重であり、上記を満足している。また、軽量化を追求する移動用変圧器にも、低比重で冷却特性に優れたPFAEは有効である。

10. 製品化の対象範囲

現在、当社製のパームヤシ油入変圧器は、電圧77kV以下、容量30MVA以下をターゲットにしている。当初は窒素密封式で無電圧タップ切換器付きのタイプのみとしていたが、現在はOCとOLTCにも対応できるようになった。

OCは、ゴムセルとPFAEとの相性を調査した結果、引張試験・屈曲試験ともに鉱油と同等の強度を有し、問題ないことを確認した。また、OCは作動回数2万回の耐久試験に耐えた。

OLTCはPFAEが水分を吸いやすいため、ブリー

ザタイプのOCは使わず、切換開閉器室上部に膨張室を設け、無圧密封装置(シール装置)を取り付けた上、窒素を無圧密封して対応した。JEC-2220-2007に準拠した形式試験及び特殊試験を終え、問題ないことを確認した。

製品化に当たり、変圧器の中身や付属品の使用材料は、PFAEとの相性を十分確認して適否を慎重に判断し、採用を決定している。特に接着剤や塗料などの樹脂材料には注意を払い、相性の確認に多大な時間と労力を費やしてきた。

11. む す び

当社は、電圧77kV以下、容量30MVA以下をターゲットに、低粘度で鉱油に比べ優れた種々の特性を持つ、環境配慮型のパームヤシ油入変圧器を製造・販売している。現在は、窒素密封式で無電圧タップ切換器付きタイプだけでなく、OCとOLTCにも対応できるようになった。

今後は普及拡大を進め、広く社会への貢献を目指していく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《執筆者紹介》



脇本 聖 Kiyoshi Wakimoto
変圧器の開発に従事