

〔7〕 電子線照射装置・高電圧試験装置

1952年に電子線照射によるポリエチレンの架橋反応が発見されたことに端を発した電子線照射技術は、今日、工業的に広く利用されるようになった。真空中で加速した高速の電子を大気中に取り出し、種々の材料に照射する設備は、電子線照射装置（EPS: Electron beam Processing System）と名付けられ、当社は1950年代から商品化を行い市場に提供してきた。

電子線照射技術により、ポリエチレンやポリ塩化ビニル等の電線被覆を架橋させ耐熱性を改善したり、熱収縮チューブの形状記憶効果を安定させたり、タイヤ用ゴムシートの流動性を改善したりする等、これまで多くのプロセスが実用化されている。当社は、これらの用途に使用される広範なエネルギー領域（数100kV～5MV）のEPSを、国内はもとより世界各国の顧客に多数納入してきた。また、当社は国内3拠点（京都、前橋、鳥栖）に保有するEPSを使用して、顧客のニーズに応じた多様な機能の付加などを目的とした実験照射や、顧客の各種部材や製品の受託照射加工を行っている。

2023年は、新型コロナウイルスの国内感染症法における位置付けが第5類に移行し、経済活動の正常化が進んだ。一方、世界に目を向ければ、長引くウクライナ危機や中東情勢の激化等、地政学問題への注目度が一層高まる年となった。当社における装置販売事業では、EPSの需要が落ち込んでいたが、自動車のEV化が進みバッテリーケーブルやセンサー用ケーブルが増加傾向にあること、また、1970年代・1980年代に設置されたEPSが更新時期を迎えていることなどから、電線用途向けEPSの受注が増加し、堅調な回復が見られた。この状況を受け、当社では電線用途向け新型EPS二機種の販売を開始した。

また当社では、電子線照射技術の普及と用途拡大のため、新たな照射製品の開発にも力を入れている。2023年は、電子線（EB）照射による架橋反応（EB架橋）を理解する上で非常に重要な要素となるラジカルの挙動について、京都工芸繊維大学にご協力いただき、電子スピン共鳴（ESR）測定装置を用いて解析することで、EB架橋を効率的に行う条件を見いだすことができた。今後、電子線照射の更なる用途拡大につながるよう推進する所存である。

高電圧電源および高電圧電源応用製品については、関係会社である日新パルス電子株式会社（NPE）にて事業を展開している。NPEの主力製品である高電圧試験装置は、電力機器や電力ケーブルの試験用途で幅広く使用され、世界的な電力需要の増加に伴い設備の増強やBCP対策としてメンテナンス需要が急激に増加している。また、国内での高電圧試験装置に係る規格改定や、重電機器メーカーの品質管理体制・検査方式の見直しも相まって、高電圧測定用機器への需要も拡大している。

PCB（ポリ塩化ビフェニル）廃棄物の法定処理期限が2027年3月末と迫る中で、更新需要が急激に増加しているほか、当社が独自開発したEV用モーターの評価試験装置（インバータパルス試験器）を中国で開催された展示会に出展し、海外への販路拡大に向けた活動も活発化させている。

当社は、今後も社会の多様なニーズに応えられる技術と製品を開発し提供していく所存である。

（株式会社NHVコーポレーション）

7. 1 新製品（ハイブリッドシールド型EPSおよびEB-XW）を活況な電線業界へ納入

EB照射は、多種多様な製品の加工に使用されている。最も利用されているのは高分子の架橋反応であり、電線被覆の耐熱性向上や、タイヤに使用される天然ゴムの強度向上、発泡シートの品質向上等に利用されている。

図1に、当社が受注した電子線照射装置（EPS）の台数について、分野別の比率の推移を示す。EPSが工業用として利用され始めた当初は電線業界での需要が多かったが、タイヤに使用される天然ゴムへの照射が開始した80年代以降はタイヤ業界からの受注が増加し、長らく最も利用される用途であった。2020年代に入って、その傾向に変化が出初め、急激に電線業界からの受注が増加している。

電線業界からの受注が増加していることには、次のような要因があると思われる。

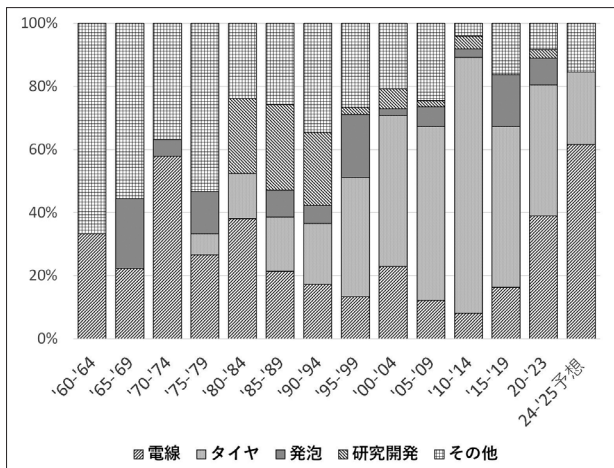


図1 分野別受注台数比率の推移

- ① 自動車用電線ではEB架橋を行った製品が主として使用されるが、電気自動車使用されるバッテリーケーブルや、自動車内でのセンサーやモーターの増加もあり、電線の使用量自体が増加している。
- ② 1970～80年代に数多く納入されたEPSが、更新時期を迎えている。
- ③ 自動車工場の新興工業国での開設が増加しており、電線業界の現地工場の新設や、ローカル電線メーカーによるEPSの採用が増加している。

この状況を受け、当社では電線業界向けにEPS二機種の販売を開始した。以下にそれぞれの特徴を説明する。

1. ハイブリッドシールド型EPS

線径が大きい電線への照射には、電子の加速エネルギーが高い装置が使用される。そのような装置の場合、EB照射により二次的に発生する制動X線のエネルギーも高くなる。また、装置構造として電子の加速部分と直流高圧電源を一体の容器に収納している関係上、電子線照射に伴い発生する制動X線の遮蔽には図2の右側に示すような大きなコンクリート建築物が必要であった。

今回、2,000kV EPSを新たに開発するにあたり、加速部分と直流高圧電源を分離した構造を実現するとともに、X線の遮蔽検討に粒子輸送シミュレーションソフトを活用し、二階部分の遮蔽室が不要な「ハイブリッドシールド型EPS」の構造を導いた。コンクリート遮蔽を工場建屋の一階部分のみに適用することで、コンクリートの使用量を約50%削減した。

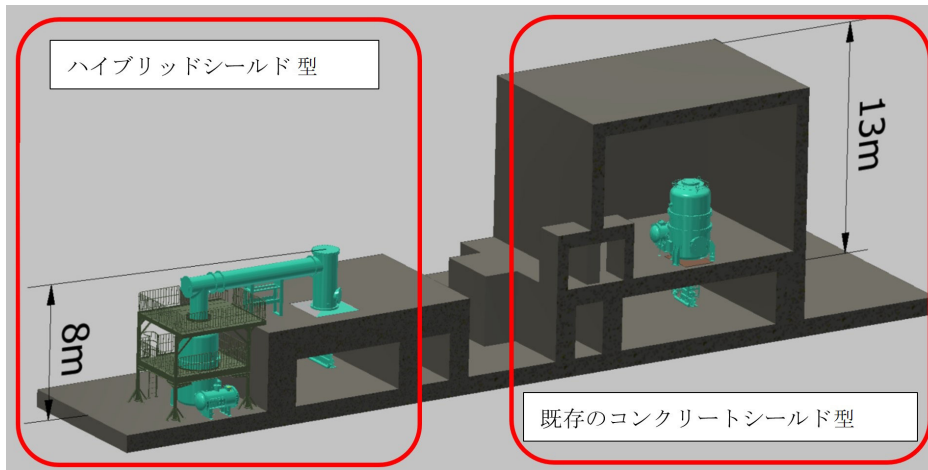


図2 2,000kV電子線照射装置のサイズ比較

また、「ハイブリッドシールド型EPS」は図2の左側のように装置全高を低くできることから、比較的工場建屋の低い電線工場への適用が容易となっている。コンクリート削減と、工場全高が低くなることで建築費を削減できるため、新規に装置の導入を行いやすくなっている。今回のハイブリッドシールド型EPSの開発によって、電線業界のみならず、他の業界でも高エネルギーEPSの導入拡大が期待される。

2. EB-XW

線径の細い自動車用電線には、電子のエネルギーが800kV~1,000kVで出力電流が大きいEPSが用いられる。これらの用途に向け、今回当社が新たに開発した800kV EPS「EB-XW」(図3)は以下の特徴を持つ。

- ① 直流高圧電源、加速装置、遮蔽室等各構成ユニットの配置を見直し、装置設置スペースを30%削減した。
- ② X線の遮蔽検討に粒子輸送シミュレーションソフトを使用し、遮蔽材の使用量が最小となるような

構造を実現。また、遮蔽材料に鉄材を採用。環境負荷の高い鉛材の使用量を大幅に削減した。

- ③ 直流高圧電源はSF₆ガスを充てんした圧力タンク内に収納されるが、加速装置も同タンク内に収納する構造を採用した。この構造では、メンテナンス時に暗渠になることが無く、保守作業の安全を向上している。

この「EB-XW」は、新規開設工場への導入計画が既に数件あり、今後この用途での主力製品になると期待する。

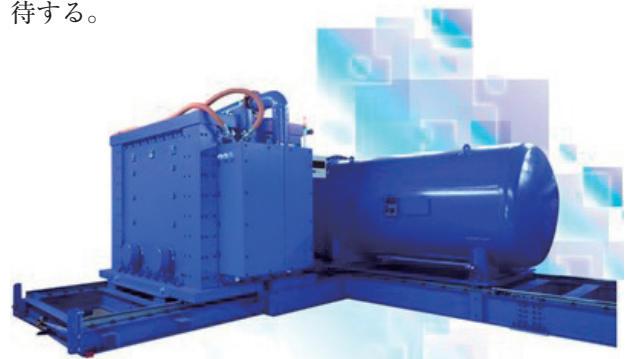


図3 800kV EB-XW

7. 2 電子線照射により生成されたラジカルの解析

EB照射は、主に高分子材料の耐熱性向上や加熱時の流動性の制御などに利用されている。このような改質は、EB照射で起こる反応の一つである、高分子鎖同士を結合して橋掛け構造を形成する架橋反応(図4)がもたれている。EB架橋は、EB照射により生成するラジカルという活性種が反応起点となっているが、ラジカルは高分子の種類によって生成や消失の挙動が異なり、ラジカルの挙動を把握することは架橋反応を理解する上で非常に重要な要素となる。

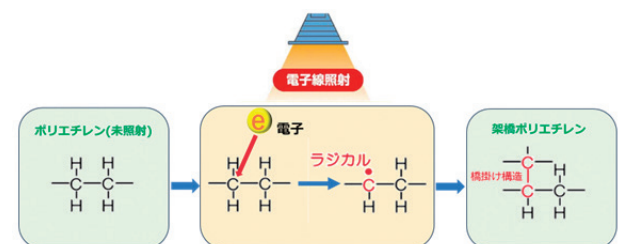


図4 EB照射による架橋反応の概要

当社は京都工芸繊維大学のご協力をいただき、ESR測定装置を用いて、EB照射により生成したラジカル

の解析を行っている。本稿ではラジカルの挙動を解析することで、EB架橋を効率的に行う条件を見いだすことができた事例を紹介する。

1. ESR測定

高分子材料にEB照射すると、不対電子をもつラジカルが生成する。不対電子は磁性を有しており、この磁気モーメントに起因するマイクロ波の吸収を観測するのがESR測定である。ESR測定ではラジカル分子そのものの量や分子構造などを知ることができるほか、ラジカルを取り巻く環境に関する情報を得ることができる。ラジカルは通常、常温、大気中ですぐに失活してしまう。そこで、当社ではEB照射後、ESR測定を行うまでの間、 -75°C 、窒素雰囲気下で保管することによりラジカルの消失を防いで、EB照射によるラジカルの生成量やその消失（減衰挙動）を解析した。

2. ポリプロピレン（PP）に生成したラジカルの解析

2. 1 PE、PPに生成するラジカルの減衰挙動

ポリエチレン（PE）はEB架橋し易い高分子である一方、PPはEB架橋しにくく、架橋剤を添加してEB照射することが一般的である^{(1),(2)}。そこで、PE（低密度PE）とPPについてEB照射後のラジカルの減衰挙動をESR測定で経時的に観察した。図5にEB照射後の経過時間に対する相対的なラジカル量の変化を示す。PEは約5時間でラジカルが10%以下に、24時間後には5%以下になった。一方、PPは120時間後も約20%のラジカルが残存しており、ラジカルの寿命が長いことが判明した。

このラジカルの寿命の違いは、PE、PPそれぞれの結晶性および分子運動性が大きく影響していると考えられる。測定したPEは結晶性が低く、非晶部分が多い。そのため、EB照射により生成するラジカルも非晶部分に多く生成する。またPEの非晶部分のガラス転移温度は -100°C 以下と低いため、非晶部分に生成したラジカルは反応し易く、素早く消失していく。一方、PPは結晶性が高く、ラジカルも反応性に乏しい結晶部分に生成しやすい。さらに、PPのガラス転移温度は 0°C 付近と比較的高いため、酸素との反応を主として、比較的ゆっくりと消失していく。これらの違いが、PPがEB架橋し難い要因であると考えられた。また観測されたESRスペクトルの形状は、PEでは炭化水素ラジカルに起因する対称的な成分が多く、早く減衰したのに対して、PPはペルオキシラジカルに由来すると思われる異方性成分が比較的多く、減衰時間も非常に長かった。これらの観測結果は、上記考察を裏付けている。

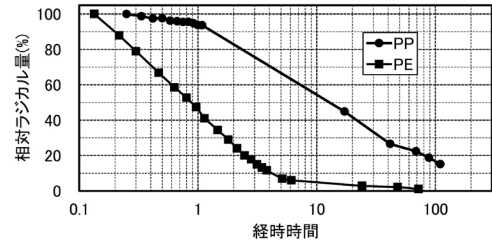


図5 PE、PPに生成したラジカルの減衰挙動

2. 2 PPのEB架橋方法の改善

前項のようにEB照射によりPPに生成したラジカルの多くは消失しにくく、酸化されやすいことがESR測定により明らかとなった。そこでラジカルが消失するまでの間、ラジカルが酸素と反応しないようにすることで、架橋反応を促すことができるのではないかと考えた。

厚さの異なるPPフィルムへEB照射し、その後不活性ガス雰囲気下で1週間保管した。そして、EB照射後に大気中で保管したPPフィルムと架橋度合いを比較するために、ゲル分率をそれぞれ測定して、ラジカルがEB架橋へ与える影響を調査した。その結果を図6に示す。厚さ1mmの場合、架橋度合いは、大気中保管との差異はほとんどなかった。これは厚いフィルム内部には酸素が拡散せず、ほとんどのラジカルが酸素との反応により消失しなかったためと考えられる。一方、厚さ0.1mmにおいて、大気中保管のPPフィルムは架橋がほとんど進まなかったのに対して、不活性ガス中で保管した同じ厚みのPPフィルムは、厚さ1mmと同等程度に架橋した。このことから、酸素との接触を回避することで、架橋が大幅に促進されることがわかった。このようにESR測定によるラジカルの解析をもとにして、PPのEB架橋の条件を改善することができた。

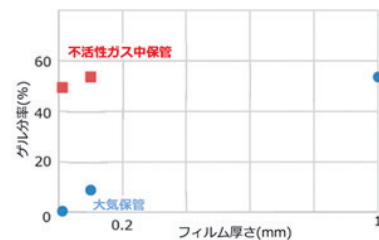


図6 PPの保管雰囲気の影響

3. 最後に

EB照射において、高分子材料の構造やEB照射の雰囲気、温度といったさまざまな要因が効果に影響を与えることは知られているが、そのメカニズムについては未だ明らかになっていないことが多い。当社は新しい材料開発の一助となるべく、今後もさまざまな高分子材料についてEB照射により生成するラジカルの特性を解析し、EB効果との関係性を調査していく所存である。

7. 3 JEC規格改定に適應した各種計測器

当社では、高電圧電源の設計・製造技術を活用したユニークな製品の開発・販売や高電圧試験関連の知識と経験を用いて、ヘフリー社（スイス）の高電圧試験装置および各種計測装置の輸入代理店販売と技術サービス提供を行っている。

2022年1月に測定技術の一つである部分放電測定の規格“JEC-0401”が改定、さらに2022年9月に高電圧試験および測定システムの規格“JEC-0203およびJEC-0204”が旧規格を統合・廃止される形で制定された。本稿では、このような規格改定に関連して、今後需要の増加が期待されるヘフリー社製の各種計測器について報告する。

1. インパルス試験用波形解析システム

インパルス波形解析システムは、電力系統の主要機器である変圧器、開閉器、電力ケーブル等の電気性能確認試験の1つであるインパルス耐電圧試験に使用されている専用の測定器である。

雷インパルスおよび開閉サージ耐電圧試験では、製品に印加されるインパルス電圧が、その製品に適用される規格に適合した波形、電圧値であることが必要で、これにより製品の電気性能を正しく評価することができる。

この電圧を正確に測定し、規格で規定された時間パラメータで計算し、印加電圧および波形を評価する測定器が、インパルス波形解析システムである。

波形の評価方法は、国際規格であるIEC60060-1（規格第1部：インパルス試験用計器の要求事項）で定められており、2013年の第2版から雷インパルス電圧波形のオーバーシュート振動部に関して処理方法が変更（kファクタの導入）されており、最新のJECおよびJIS規格にも適合している。

インパルス波形解析システム「HiAS744/HiAS744-S」は、電圧信号の測定を行う本体ユニット、測定器の制御や電圧信号の解析・表示を行う自社開発の専用ソフトウェアで構成されている。インパルス波形解析システム「HiAS744/HiAS744-S」専用ソフトウェアは、一般的に使用しているパソコン（PC）にインストールし、光変換ユニットを経由して本体ユニットと接続する。インパルス波形解析システムには、用途に合わせて、振幅分解能（電圧軸）の異なる2機種のラインアップがある。主要な仕様一覧は以下のとおりである（表1）。

また、本システムは規格対応に加えて下記特徴も備えている。

① 安全設計

本装置は、分圧器に繋がる波形取込用の本体ユニット（試験エリア側）と制御・解析用PC（測定室側）を光ファイバーケーブルで接続している。このため、完全な電氣的絶縁が保たれ、サージ発生による機器破損や感電事故等のリスクを大幅に軽減できる（図7）。

② 測定ケーブルの影響を排除

分圧器からの信号を光信号で送るため、ケーブル長による測定波形への影響が軽減できる。

③ 幅広い入力電圧

信号の入力電圧範囲は、 $\pm 5V \sim \pm 2000V$ と広範囲であるため、さまざまな分圧比の分圧器と合わせて使用できる。

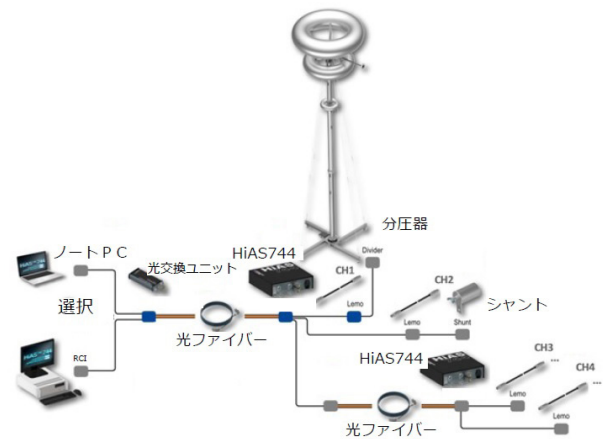


図7 HiAS744 本体ユニット設置例（分圧器下に固定）

表1 インパルス波形解析システムの主な仕様

型 式	HiAS744-S	HiAS744
振幅分解能	16ビット (0.0015%)	11ビット (0.05%)
サンプリングレート	1~250 MS/s	1~125 MS/s
アナログ帯域幅 (-3 dB)	100 MHz以上	50 MHz以上
チャンネル数	2ch/台 (2台まで拡張可)	1または2ch/台 (2台まで拡張可)
入力電圧範囲	$\pm 5V \sim \pm 2000pk$	
信号伝達	光ファイバーまたは同軸ケーブル	
規格対応	IEC 60060, IEC 61083-1:2001, IEC 61083-2:2013	
制御・測定用PC	一般的なPCへ専用ソフトをインストール	

JEC-0203の制定により、複雑な計算を要求するkファクタによるインパルス波形パラメータの処理は、従来のようにオシロスコープによる測定では困難となった

ため、日本国内で多くの実績がある当社取扱いのインパルス波形解析システムの更新・新規需要は、増えてきている。

また、当社ではヘフリー社の現地校正サービスを提供しており、規格で定められた測定システムの性能試験も実施可能で、国内でも年々実施件数は増え、今後この傾向は続くものと考えている。



図8 部分放電測定器、型式DDX9160_9161
(左：DDX9160、右：DDX9161)

2. 部分放電測定器

当社が取扱うヘフリー社製 部分放電測定器（DDXシリーズ）は、国際規格であるIEC60270:2000+Amd.1:2015、IEC60600 part 1&2の他、ANSI、IEEE Std.等の各種規格にも準拠している。また、部分放電測定の一つであるNEMA、ANSI、CISPR等の国際規格で定めたラジオ障害波電圧（Radio Interference Voltage）の測定にもオプション機能・機器の追加により対応することができる。

この測定器は、部分放電および電圧信号の測定を行う本体ユニット、測定器の制御や電圧信号の解析・表示を行う自社開発の専用ソフトウェアで構成されている。専用ソフトウェアは一般的に使用されているPCにインストールし、光変換ユニットまたはLANケーブルを経由して本体ユニットと接続される。主要な仕様一覧を表2に、外観を図8に示す。

表2 測定器の仕様

型 式	DDX 9160_9161
信号伝達	光ファイバー
設置場所	高電圧試験エリア内
周波数帯域 (-6dB)	30kHz~1.5MHz 300kHz~20MHz
測定感度	<0.01pC
測定チャンネル数	最大4ch
検出インピーダンス	内蔵（最大1A）、又は別置き
機器寸法 (W×D×H)	170×250×55mm (9160) 342×315×86mm (9161)
機器質量 (本体のみ)	1.3kg (9160) 6.0kg (9161)
駆動電源	直流電源 (9160) 商用電源 (9161)
規格対応	IEC 60270, IEC 60600-1.2, ANSI, IEEE等
制御/測定用PC	一般的なPCへ専用ソフトを インストール

部分放電の測定は、被試験体で発生した部分放電が、結合コンデンサに取り付けられた部分放電測定器本体で検出され、光ファイバーケーブルを介して測定室に設置された制御・計測用PCへ送られた後、専用画面上に位相情報とともに部分放電信号が表示される。画面表示例を図9に示す。

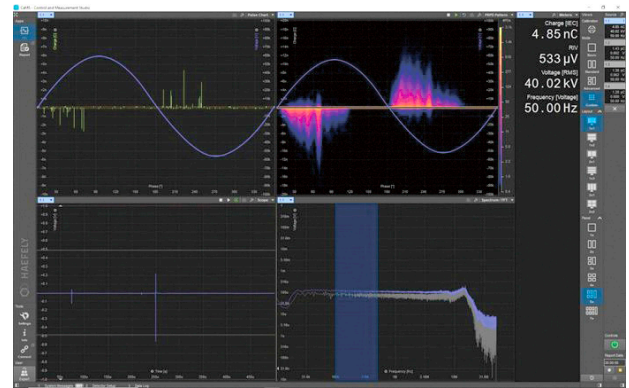


図9 画面表示例

この「DDX9160」および「DDX9161」は、下記の特徴を備えている。

① 安全設計

測定器本体を、高電圧試験エリアに設置された結合コンデンサの近くに設置し、本装置（試験エリア側）と制御・解析用PC（測定室側）間を光ファイバーケーブルで接続することが可能なため、完全な電氣的絶縁が保たれ、異常時の高電圧短絡とサージ発生による機器破損や感電事故等のリスクを大幅に軽減できる。

② ノイズの排除設計

測定器本体から光信号で送るため、同軸ケーブルを使用する場合と比較して外来ノイズによる測定信号への影響を軽減できる。さらに、これまで同社の製品には搭載していない検出インピーダンスの内蔵により、電源部分についても外部由来のノイズの影響を軽減できる。

部分放電測定に必要な検出用高電圧結合コンデンサの他、校正パルス発生器等のオプション類も幅広く取

り揃えており、規格で定義された5年ごとの性能試験にも対応できるサービスを提供している。

3. 今後の展望

JEC規格改定と、重電機器メーカーの品質管理に対する関心が高まる中、規格対応の計測器および付帯

サービスを幅広く提供することで、品質問題の解決に向けた支援を提供していく。また、既存装置のメンテナンスについても、自社製品で培われた技術力をベースに、顧客のご要望に貢献する質の高いサービスの提供を推進していく所存である。

参考文献〔7〕 電子線照射装置・高電圧試験装置

- (1) 奥村康之：住友電工テクニカルレビュー, 第202号, p. 130 (2023)
- (2) 上野山眞代：住友電工テクニカルレビュー, 第160号, p. 63 (2002)