

〔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、耐熱性の改善や、熱収縮チューブの形状記憶効果の安定化、タイヤ用ゴムシートの流動性の改善など、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（数百kV～5MV）の電子線照射装置（EPS: Electron beam Processing System）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。

2025年は、世界経済成長が鈍化し、地政学リスクが常態化する中で、米国の追加関税などにみられるように保護主義が強まった年となった。しかしながら、当社における装置販売事業は2024年に引き続き、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の受注が増加した。当社では市場の要求に応えと共、新たに低エネルギー分野で設置スペースや導入コストの低減を図ることができる非常にコンパクトなEPSの開発を進めた。この分野に対してもEPSの導入を提案していく。

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。2025年は、電子線（EB）架橋技術を用いたフッ素樹脂代替材料開発を着手し、新たな工業利用の可能性を模索した。今後、電子線照射のさら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）が事業を展開している。NPEが代理店を務めるヘフリー社製のEPS：Electronic Power Supplyは、電力用変圧器の試験用電源として従来の電動発電機（MG：Motor Generator）に代わる、新たな試験用電源として電子化・高精度化・省スペース化を実現しており、注目を集めている。

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 小型EPS「Table EB」の開発

今日、電子線照射装置（以下EPS）は多岐にわたる産業分野に適用されている。特に低エネルギー分野は、塗膜硬化や殺菌滅菌などの表面改質に関する分野での新市場展開が期待できる。しかし、設置スペースや導入コストの問題により、小規模な施設や企業においては経済的な負担が大きな障壁となっている。

当社では、そうしたニーズに対応するため、導入が比較的容易であるテーブルサイズのEPS「Table EB⁽⁴⁾」を開発した。

この「Table EB」は、従来型の装置に比べ、省スペース

スでの設置・購入コストの低減が可能となる。

当社の同定格帯である150kVの従来型EPSは照射ヘッド部直径がφ560mmであるのに対し、「Table EB」（250mAタイプ）は直径φ320mmと、大幅な小型化を達成した（図1）。

一般的に、照射ヘッドに印加する電圧を変えずに直径を小さくすると電界強度が増加するため、照射ヘッド内で放電が発生し、安定してEPSを使用できなくなる。しかし、「Table EB」では以下の改良を行うことで、出力の安定化と小型化を両立させることに成功した。

- ①高い電界強度に面する箇所の表面処理には「電解複合研磨」を用い、より微細な表面を形成することにより、放電の原因を排除した。
- ②照射ヘッド内部は真空状態であり、清浄度が求められる。部材の清浄度を徹底して高めることで、内部真空度を1桁以上向上して、より高電界を印加しても放電が発生しない状態を実現した。
- ③内部構造物（電子の発生源）の構成も見直し、小型化を図った。

これらの改良により、「Table EB」は出力の安定性を維持しながら小型化を実現した。今後は、小型化された

照射ヘッド部を表面改質装置へ組み込むなど、低エネルギー分野での市場拡大を図っていく所存である。



図1 Table EB照射ヘッド部のモデル（左）と従来型装置の照射ヘッド部（右）の外観図

7.2 フッ素樹脂の代替材料開発における電子線照射技術の活用

EB照射は、高分子材料に高エネルギーの電子を照射することで、材料にさまざまな効果をもたらす。主な効果として、EB照射によって高分子鎖同士が結合し、橋掛け構造を形成させることで、材料の耐熱性や機械的強度が向上する「架橋」がある。この架橋技術は、従来から工業用途で広く利用されてきた。

近年、有機フッ素化合物（PFAS）に対する規制の強化により、フッ素樹脂（PTFEなど）の代替材料開発が急務となっている。代替となる高分子材料の中でも、PMP（ポリメチルペンテン）は耐熱性や透明性などの特長からPTFEの代替候補として注目されており、さらなる耐熱性の向上が求められている。

そこで、本稿はEB照射による架橋反応技術を活用してPMPの耐熱性を高めることで、フッ素樹脂の代替としての可能性について報告する。

1. 架橋の原理

EB照射による架橋反応とは、高分子材料にEBを照射してエネルギーを与えると励起し、結合が切れて活性点（ラジカル）が生成されるというものである。これらのラジカル同士が反応することで分子鎖間に新たな結合（架橋）が形成される（図2）。これにより高分子材料は三次元的な網目構造となり、分子鎖の動きが抑制されることで、熱による変形や軟化が抑えられ、耐熱性が向上する。

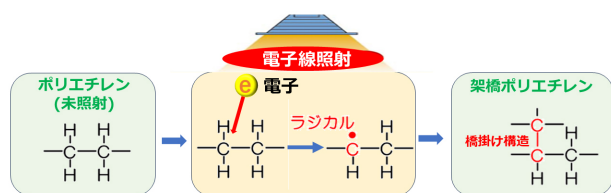


図2 EB照射による架橋反応の概要

2. PMPのフッ素樹脂代替における課題とEB架橋の意義

PMPは、低比重・高透明性・良好な電気特性を持つ高分子材料であり、PTFEの代替候補として注目されている。しかし、耐熱温度は一般に220～240℃とPTFE（～270℃）よりやや低く、高温用途への展開にはさらなる耐熱性の向上が必要である。EB架橋技術を適用することで、PMPの分子鎖間に橋掛け構造を形成し、耐熱性および高温機械特性の向上が期待できる。

そこで、PTFEに相当する270℃以上の耐熱性を有するPMPの開発に着手した。

3. 試験方法および評価方法

試験サンプルは、PMPペレットに架橋剤（トリアリルイソシアヌレート：TAIC）を二軸混練押出機^{※1}で混練したのち、熱プレスにより所定の厚さに成形したシート試料を用いた。EB照射は当社のEPSを用い、適切な照射条件を設定したうえで、所定の吸収線量（以下、線量）を照射した。

架橋度合の評価は、ゲル分率測定を用いた。キシレンなどの溶剤に対して不溶となる成分（ゲル）が増えていけば、架橋が進んでいる。架橋度合はサンプル全体に対してこのゲル成分が占める割合（ゲル分率）で架橋度合を評価できる。すなわち架橋しているほど、ゲル分率が高いということである。なお、測定方法はJIS K 6796に記載された方法に従った。

また、熱的特性の評価として吊り下げ加熱試験と動的粘弾性（DMA）による貯蔵弾性率を測定した。貯蔵弾性率は、材料が外力を受けた時に示す弾性を測定できるものである。貯蔵弾性率が小さくなるほど、材料が柔らかくなり、弾性的な変形能力が低下していることを表す。

4. EB架橋の評価結果

4.1 EB照射による架橋度合いの影響

図3に照射線量によるゲル分率の変化を示す。

架橋剤未添加のPMPサンプルにEB照射した（架橋剤未添加EB照射PMP）場合、250kGy以上の線量でゲル分率が50%付近になることが確認できた。線量増加に伴いゲル分率は頭打ちになっており、500kGy照射では脆化が顕著となった。これは過度な線量により分解反応が進行するためと考えられる。

一方、架橋剤入りのPMPサンプルにEB照射した（架橋剤添加EB照射PMP）場合、架橋剤未添加EB照射PMPと比較して低線量で立ち上がりが見られ、10kGyで架橋剤未添加EB照射PMP250kGy以上とほぼ同等のゲル分率と架橋を確認することができ、架橋剤の効果が明確となった。さらに線量を上げた100kGyではゲル分率が83.5%となり、架橋剤により低線量ではゲル分率が向上することが確認できた。

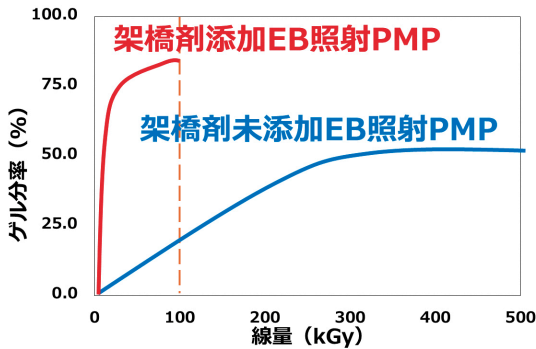


図3 EB架橋による架橋度合いの比較

4.2 EB架橋PMPの熱的特性

架橋剤を添加したEB架橋PMPの熱的特性を評価するため、高温下での吊り下げ試験を行った。吊り下げ試験の概略図を図4に示す。

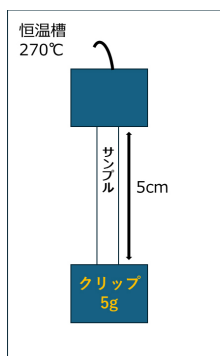


図4 吊り下げ試験の概略図

まず、10cm×2cmの厚さ1cmのPMPサンプル片を、クリップ間の距離を5cmにした状態で270℃の恒温槽内に5分間吊り下げる。そして、5分後のつかみ具間の距離の伸び率 $[= (加熱後のつかみ具間の距離 - 5cm) / 5cm] \times 100$ を測定した。

比較として架橋剤未添加のEB未照射PMP（架橋剤未添加EB未照射PMP）は融点以上の温度のため伸び切ってしまったが、架橋剤未添加EB照射PMPと架橋剤添加EB照射PMPは270℃でも伸び率は0%と伸びが抑えられた。架橋剤未添加EB照射PMPの方は架橋と同時に崩壊も起こり、加熱途中でサンプルが切断されたが、架橋剤添加EB照射PMPは切断することなく形状を維持していたことから高温での機械特性が向上したことを確認した。

さらに、動的粘弾性（DMA）試験を行い、架橋剤未添加EB未照射PMPと架橋剤添加EB照射PMPの温度掃引^{*2}における貯蔵弾性率（E'）の変化を比較した（図5）。EB未照射品は融点（220℃）近傍で軟化し、E'が0.06MPaとなった。一方、EB架橋PMPは融点近傍でもE'が0.3MPaと高く、250℃までE'が急降下せず維持され、形状が維持できていることが確認できた。

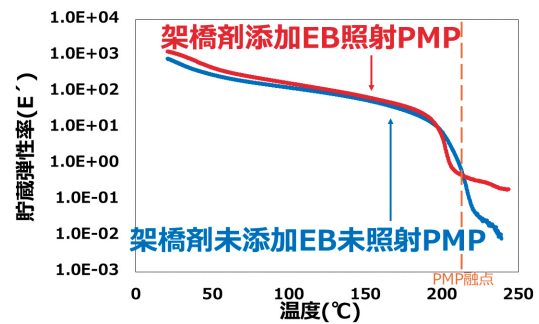


図5 EB照射による貯蔵弾性率への影響

5. まとめ

本稿では、EB照射を用いてPMPに反応させることで、ゲル分率83.5%という高い架橋度を達成した。また、熱的特性の向上とPTFEに近い耐熱性を実現できる条件を確認した。架橋剤の添加により低線量で効率的な架橋が可能となり、270℃という高温環境下でも形状保持性と機械的強度の向上が認められた。

これらの成果は、PFAS規制強化を背景としたフッ素樹脂代替材料の開発において、PMPへのEB照射技術が有効であることを示している。今後は、さらに高温域での物性安定化や連続成形プロセスへの適用などを進めることで、電線チューブや高温透明部材などへの実用展開が期待される。

7.3 ヘフリー社製EPSを用いた変圧器試験システム

電力用変圧器の試験用電源として、従来は既設モータ・ジェネレータ（電動発電機：以下MG）方式が広く用いられてきた。しかし、MG方式には以下のような課題がある。

- ・大型で重量がある
- ・可動部に起因する保守の負荷が大きい
- ・故障時の停止リスク
- ・波形品質の制約
- ・50/60Hzと200Hz帯の出力を1台でカバーできない

本稿では、MG方式の変圧器試験設備を、ヘフリー社製Electronic Power Supply（以下EPS）および計測システム（以下TMS）へ置き換えることで、試験用電源の電子化・高精度化・省スペース化を実現する技術の妥当性について述べる。

EPSは500kVAユニットの並列構成により最大12MVAまで拡張可能で、故障時の継続運用や保守の容易性を実現する。二次側分圧器を用いた波形歪みフィードバック補正機能や、部分放電測定時には高圧フィルタによる20kHz～2MHzで-40dBのノイズ減衰機能を備える。また、容量別の置換提案に対しては、EPSの選定根拠と補償コンデンサ容量の推奨を示し、TMSによる計測精度と運用性を確認する。

1. 変圧器試験システムの概要

試験システムは主にヘフリー社製のEPSとTMSにより構成される。図6に試験システムの基本構成を示す。主要試験項目は以下のとおりである。

- ・短絡インピーダンス、負荷損失測定
- ・無負荷損失、電流測定

- ・零相インピーダンス測定（YN/ZN巻線）
- ・負荷時タップ切替器試験
- ・誘導耐電圧試験
- ・部分放電測定を伴う誘導耐電圧試験

また、システムの構成は、制御信号を介することにより、昇圧変圧器や補償コンデンサなどの既存設備との組み合わせが可能である。これにより、顧客の事情に応じて継続して使用したい機器をそのまま活用できる提案をすることが可能となる。

2. EPSの構成と機能

EPSはコントロールキャビネットとインバータ電源ユニット（EPU）で構成され、1ユニット当たり500kVAで最大24台接続することができ12MVAまで拡張可能である。入力電圧は三相480V（47-63Hz）、出力電圧は三相480V、出力周波数範囲は、変圧器試験で使用される50Hz～200Hzであり、さらに欧州の鉄道用途の16.66Hzもカバーしている。

長所として、(1) ユニット化による省スペース化、(2) 故障ユニットの切り離しにより継続運転が可能、(3) 機械可動部の少なさによる保守の容易性、(4) 同じ電源を使用して50/60Hzでの測定と任意の周波数での誘導耐電圧試験が可能であることが挙げられる。

さらに、二次側分圧器を用いた波形歪みのフィードバック補正機能を備え、試験中の電圧波形品質の向上が図れる。部分放電測定時のノイズ抑制のための高圧フィルタは、バックグラウンドノイズを20kHz～2MHzで約-40dBの減衰を提供する。

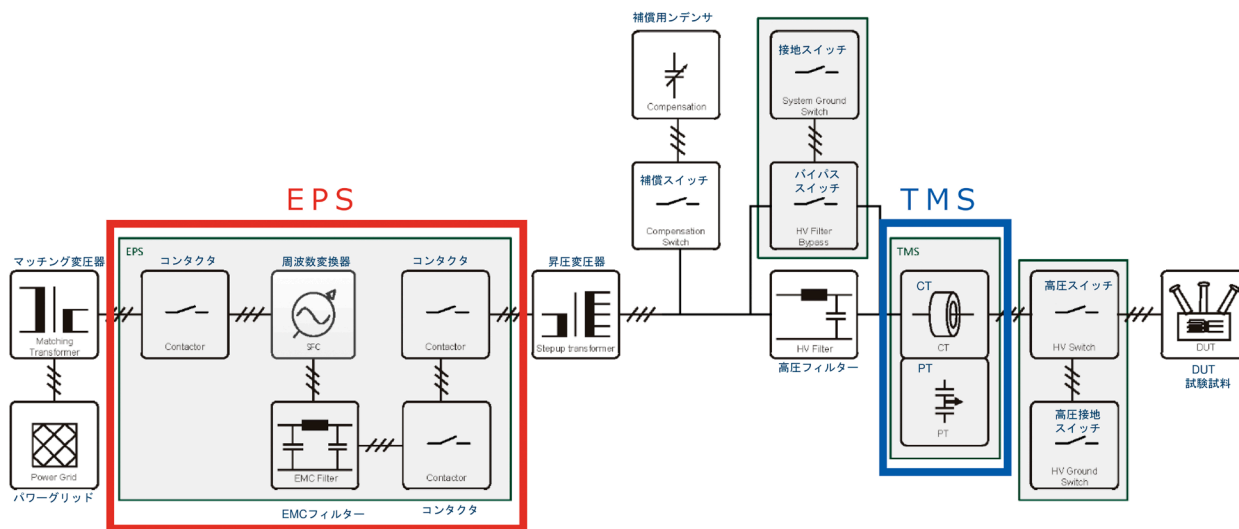


図6 変圧器試験システムの基本構成

3. 既設MG方式からの置換提案

更新対象のMGセットの容量定格はラインアップに基づいている場合があり、また構成におけるモーターの電力定格が実質的に試験のために供給できる有効電力である。実際の試験条件を聞き取り、適切に補償コンデンサを組み込むことで、より小さな最適化された容量のEPSでの提案が可能となる。以下にEPSおよび補償コンデンサの容量の選定例を示す。

- 【24MVA MG置換】実際の試験条件としてヒートラン3.6MW、誘導耐電圧試験4.6MVを踏まえ、さらに既存コンデンサ補償ステップを考慮してEPS6000 (6MVA) を提案する。このとき必要な補償コンデンサ容量は300MVAとなる。
- 【5MVA MG置換】ヒートラン468kWを踏まえ、EPS1000 (1MVA) を提案する。このとき必要な補償コンデンサ容量は7.2MVAとなる。
- 【1MVA MG置換】ヒートラン108kWを踏まえ、EPS500 (500kVA) を提案する。このとき必要な補償コンデンサ容量は3.3MVAとなる。
- 屋外設置のために空調機付き20ftコンテナ内に収納する (最大2MVAシステムまで可能)。

4. レイアウトと拡張性

ユニットの並べ替えにより、多様なレイアウトが可能であり、設置環境に応じたフレキシブルな構成を実現できる。表1にEPSのモデル例と、図7にレイアウト例を示す。

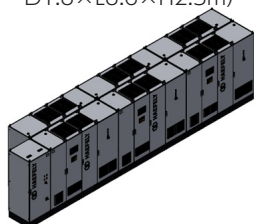
表1 EPSモデル例 (横一列とした場合)

| モデル例 | 皮相電力 | 奥行 | 長さ | 高さ | 質量 | EPS台数 |
|-----------|--------|-------|-----|------|-----------|-------|
| EPS 500 | 500kVA | 0.86m | 4m | 2.3m | 約2,100kg | 1台 |
| EPS 3000 | 3MVA | | 16m | | 約11,600kg | 6台 |
| EPS 12000 | 12MVA | | 64m | | 約45,800kg | 24台 |

○実際にはユニットを並び替えて自由に配置可能
(EPS12000 上面図、D4.6×L32.6×H2.3m)



(EPS3000 俯瞰図、
D1.8×L8.6×H2.3m)



5. 計測システム TMS

TMSは、負荷・無負荷損失、ヒートラン中の電力、誘導電圧試験中の電圧、零相インピーダンスの測定に対応し、ワットメーター機能を内蔵する。

セルフチェックにより電圧・電流チャンネルの全レンジを校正可能で、標準周波数50Hz、力率0.05の指定電力において最大±0.21%の高い測定精度を達成する。

一般的なOSのユーザーインターフェース (図8) にすることにより、再配線不要・リモートレンジ選択・レポート自動生成など、試験スループットの向上に寄与する。

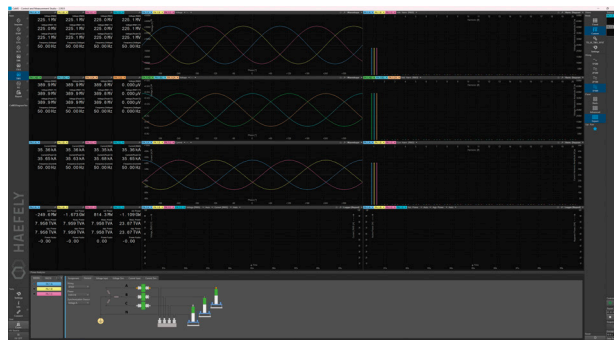


図8 計測システム TMS

6. MG方式との比較検討

MG方式は機械回転を用いるため大型・重量・騒音・振動の課題があり、故障時は停止が必要となる。EPSはユニット式で省スペース、故障ユニットを切離すことができるため、継続運転が可能で、全高調波歪 $\leq 5\%$ の電源品質、分圧器フィードバックによる波形補正、高圧フィルタによる高周波ノイズ低減を実現する。コントロールソフトによるリモート操作性、保守点数の少なさによるランニングコスト低減も優位点である。表2に既設MGとEPSの比較表を示す。

(屋外コンテナ)

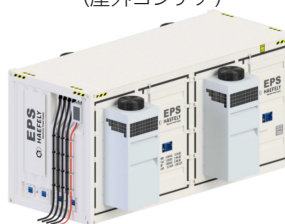


図7 EPSレイアウト

表2 既設MGとEPS比較表

| 項目 | 既設MG (モータ・ ジェネレータ) | EPS (ヘプリー社製) | 根拠/備考 |
|-------|--------------------------|-------------------------------|---|
| 設置面積 | 大型(容量依存による大型化の傾向) | ユニット化により小型化が可能 | EPSはユニット化により小型化を実現 |
| 拡張性 | 機械式のため容量拡張は困難 | ユニット追加で最大12MVAまで拡張可能 | EPSはEPU最大24台で12MVAに拡張可能 |
| 可用性 | 単一機器故障時の継続運用は困難 | ユニット切離しにより継続運用が可能 | EPSは各EPUが独立しているため、故障時も運用可能 |
| 保守 | 機械可動部が多く保守負担が大きい | 可動部が少なく保守が容易、ランニングコスト低減 | |
| 波形品質 | 負荷条件で歪み補正は限定的 | 分圧器フィードバックで波形歪みを補正 | EPSはフィードバック機能により波形品質を向上可能 |
| ノイズ対策 | 高周波ノイズ抑制は別途対策が必要 | 高電圧フィルタにより20kHz~2MHzで-40dBの抑制 | |
| 操作性 | 手動および現地操作が中心 | コントロールソフトにより電圧・周波数をリモート操作可能 | コントロールソフトにより操作性が向上 海外からリモートでトラブルシューティングを実施可能 |

7.まとめ

ヘプリー社製 EPSとTMSを用いた変圧器試験システムは、既設MG方式に対して省スペース性、冗長性、保守の容易性、波形品質、測定精度の観点で優位性を示している。容量別の置換提案により、試験要件に応じた最適な構成が選定可能であり、実運用における試験品質と生産性の向上が図れる。

用語集

- ※1 二軸混練押出機
二本のスクルーを用いて、樹脂と添加剤を熔融状態で均一に混合・分散させる押出混練装置。
- ※2 温度掃引
動的粘弾性 (DMA) 試験において、一定条件下で温度を変化させながら、貯蔵弾性率 (E') などの粘弾性特性の温度依存性を評価する測定方法。

(*) 「Table EB」は、(株)NHVコーポレーションの登録商標です。