

## 〔9〕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、電子線照射技術は工業的に広く利用されてきている。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）と名付けられ、当社が1950年代から商品化し市場に提供してきた。

電線のポリエチレンやポリ塩化ビニルの被覆部分を架橋させて耐熱性を改善したり、熱収縮チューブの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プロセスが、これまでに広く実用化されている。当社は、このような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お客様に多数納入してきた。また、国内3拠点（京都、前橋、鳥栖）に保有するEPSを使用して、お客様のニーズに応じた機能の付加などを目的とした実験照射や、お客様の製品を照射してお返しする受託加工のサービスを行っている。

2017年は、米国の政権交代や英国のEU離脱などの世界経済への影響が懸念されたが、米国を中心とする景気回復基調の中で、電子線照射装置事業は順調に推移し、米国、欧州、アジア圏などに多数のEPSを納入した。米国においては、国内外のタイヤメーカーなどが新工場の建設を進めており、複数のEPSを受注し現在も継続して納入している。一方、国内においては、タイヤメーカーや新材料分野などにおいてEPSの導入が進み、新設・増設に対応した装置を納入することができた。日本発の技術を適用した新材料である炭化ケイ素（SiC）繊維の製造用途向け増設機を2016年に国内工場に納入したが、軽量で高強度かつ超高耐熱性のSiC繊維が次世代の航空機エンジン用材料として採用され、米国のSiC繊維製造メーカー向けのEPSも受注し製作中である。中国経済の成長鈍化や欧州経済の先行き不透明感などの懸念材料はあるが、好調な米国市場や新興国市場を中心に引き合いが継続しており、今後もEPSの導入拡大が期待される。

中国では、当社製品の拡販を図るべく、子会社である日新馳威輻照技術（上海）有限公司で事業展開を強化してきた。2012年10月に開所した新工場でのEPS生産も軌道に乗り、ユニット機器や装置一式の輸出も始めており、今後、中国国内はもとより世界市場への製品販売も更に強化して行く。

照射サービス事業においては、エアコン等に用いられるパワー半導体のデバイス特性改善を目的とした受託照射が、中国市場での家電製品の需要回復に伴って増加傾向となった。材料の改質などを目的とした受託照射については、対象製品の技術動向や市場環境の変化により増加するものと減少するものがあったが、全体としては概ね好調に推移した。この他、材料の性能向上や新エネルギー、自動車用部材に関連する材料の開発用途などで電子線の利用が検討されており、実験照射を通じてお客様の材料開発に貢献している。

電子線応用製品については、グラフト重合技術を応用して高分子材料に親水性、はっ水性、吸着性などの機能を付与する方法について種々の試験を実施しており、各種新材料への適用を期待している。環境に優しい生分解性高分子材料であるCMC（カルボキシメチルセルロースナトリウム）を電子線架橋することにより得られる優れた吸水性・保水性を持つCMCゲルが、建築分野でのセメント養生用途や吹き付け和紙などに利用されており、この他の用途への利用拡大にも取り組んでいる。

高電圧試験装置については、子会社である日新パルス電子株式会社で事業を展開しており、中国、東南アジア、インド、中近東などの新興国におけるインフラ整備に関連する電力機器や電力ケーブルの高需要を背景に、重電機器メーカーや電線メーカーなど、国内ユーザの新規および更新の需要に対応している。2017年は、交流、直流およびインパルスの試験装置を数台と分圧器や各種計測器などの関連機器を納入した。同社では、高電圧半導体スイッチ応用電源システムやインバータサージ試験用パルス電源など、パルスパワー技術を駆使した製品をお客様の多様なご要望に応じて製作・販売しているが、これらの製品に関連する高電圧・大電流半導体スイッチやインバータサージ電圧試験用の部分放電測定器などの新製品開発にも注力しており、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）

## 9. 1 電子線照射装置の最近の動向

2017年は前年に引き続き工業用電子線照射装置（EPS）の世界各地への展開が拡大し、タイヤメーカーを中心に欧米やインド・メキシコなど新興国への装置導入が進んだ。一方、国内向け装置の需要は近年減少傾向にあったが、タイヤ・電線・発泡など多様な分野からの受注があり、国内においてもEPS導入拡大の兆しがある。

このような状況の中で、航空機用素材の一つとして利用拡大が期待されている炭化ケイ素（SiC）繊維の製造用途で、NGSアドバンストファイバー株式会社向け2号EPSを2016年に納入し、順調に利用頂いている。

SiC繊維は、比重が金属の1/3程度でありながら金属と同等以上の耐熱性、強度、耐久性などを有する材料であり、特殊な条件下で電子線照射による架橋反応を行うことで、従来材料よりも高い超高耐熱性を実現している（図1参照）。

これらの優れた性能を活かして、航空機用エンジンのタービンブレード部品に適用することにより、機体の軽量化による燃費低減が期待されている。SiC繊維は次世代航空機用エンジン「LEAP」の材料として採用されており、今後、多数の需要が見込まれている。さらなる生産能力増強のため、NGSアドバンストファイバーからライセンス供与を受けた米国のSiC繊維製造メーカーからもEPSを受注しており、2019年の装置稼働に向けて、現地据付工事が進められている。

SiC繊維を使用したセラミックマトリクス複合材料（CMC）はこの他の用途への利用も検討されており、EPSの更なる利用分野の拡大が期待される。

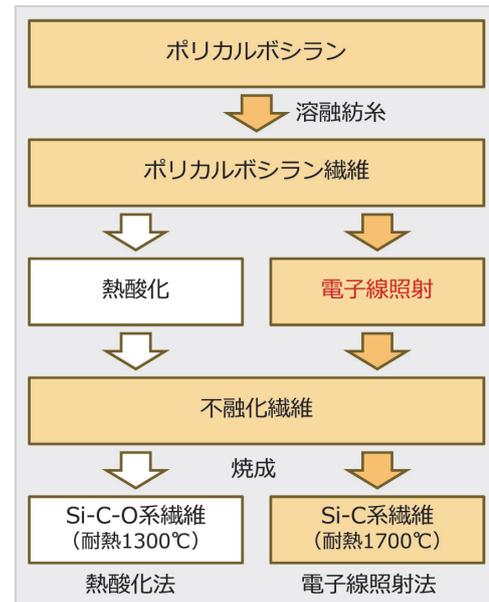


図1 SiC繊維の製造工程と耐熱温度

## 9. 2 低エネルギー線量測定技術の確立

電子線（EB）照射工程の品質管理や照射製品の品質保証において、線量測定技術は従来にも増してその重要性が高まっている。当社においては、従来、線量計として、三酢酸セルロース線量計（160 $\mu$ m）（以下、CTA）やブルーセロファン線量計（32 $\mu$ m）（以下、

BC）を用いてきた。しかし、塗膜の硬化などに低エネルギーを用いる場合は、線量計が厚すぎて分解能が悪い。そこで、B3線量計（20 $\mu$ m）（以下、B3）とラジオクロミック線量計（10 $\mu$ m）（以下、RCD）を用いた線量測定技術を確立すべく、その検討を行った。

### 1. B3線量計

B3は図2に示すように照射により透明部を赤紫に発色させて、吸光度の変化量から線量を測定するものであるが、問題点として、室内光でも反応して発色すること、吸光度が時間経過に伴って増加することがあげられる。室内光での発色に関しては、露光時間を極力短くすることで問題は生じないことを確認した。時間経過による吸光度増加の問題については、B3を加熱処理することで、安定化させることができた。

### 2. ラジオクロミック線量計

RCDもB3と発色原理が同じであるため、B3と同様の作業手順で問題なく測定できることを確認した。

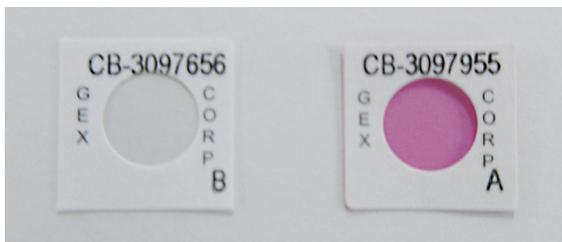


図2 B3線量計の外観（左:未照射、右:照射後）

### 3. 透過能力曲線

当社のEBC-300（300kV機）を用いて、加速電圧130kVでの透過能力を測定した。図3に、B3とこれまで使用していたBCを積層して比較した結果を示す。B3がBCと同等の性能を有することが確認できた。厚さはB3は20 $\mu\text{m}$ 、BCは32 $\mu\text{m}$ であり、薄いB3の方が高い分解能での測定が可能になるので、透過能力が小さい低加速電圧でも精度の高い線量測定が可能になった。

### 4. まとめ

上述した線量測定技術の確立により低加速電圧での透過能力測定の分解能を上げることが可能となり、EB照射工程の品質管理に有効な手法を確立することができた。

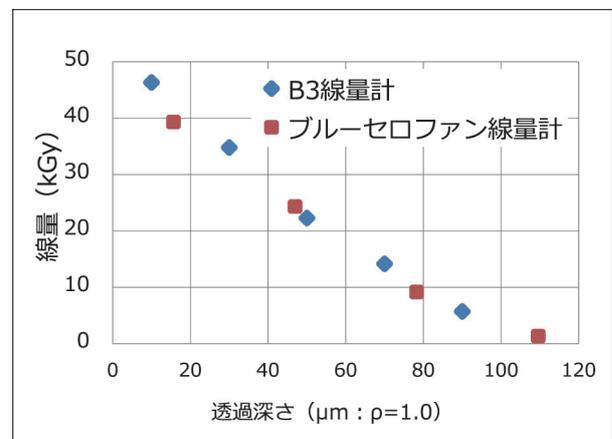


図3 線量計の相違による130kVでの透過能力曲線

## 9. 3 高電圧大電流半導体スイッチの開発

加速器や核融合実験用電源装置などで使用されている大電力パルス電源の重要部品であるスイッチとして、電子管の一種であるサイラトロンやイグナイトロンが使用されてきたが、装置性能の向上、メンテナンス性の改善、環境問題への対応などの観点から、これらの半導体化が望まれていた。日新パルス電子株式会社（NPE）において、サイラトロンやイグナイトロンに替わる高電圧大電流半導体スイッチの開発に成功したので、以下に報告する。

### 1. サイラトロン代替スイッチ

サイラトロンを数多く使用している施設として、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構（つくば市、以下、KEK）と国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学総合研究センター（兵庫県佐用郡、以下、SACLA）があり、それぞれ気中または油中仕様に100台弱のスイッチが稼働している。

サイラトロンについては、定格電圧、電流の他に繰り返し通電性能が求められる。表1にKEK向けスイッチの開発仕様、検証値、ならびに、顧客要求仕様を示す。

表1 サイラトロン代替スイッチ仕様

	開発仕様	検証値	KEK仕様
定格電圧	50kV	47kV	43kV
定格電流	6kA	4.3kA	4.3kA
パルス幅	8 $\mu$ s	6 $\mu$ s	6 $\mu$ s
繰返し	60pps	50pps	50pps
使用環境	気中or油中	気中	気中

今回採用したサイリスタ素子は非繰返し仕様であり、繰返し使用に対する電流耐力が未知数であったため、社内にて素子単品の試験を実施した後、KEK B-Factory（60台）での使用を目的にしたスイッチを試作し、同所のテストスタンドにてフィールド試験を行った。その結果、素子破壊の指標となるジャンクション温度の上限値が150℃であるのに対して、実測値は60℃程度であったので、十分な通電耐力を有していることが確認できた。図4と図5に従来品であるサイラトロンと開発品である半導体スイッチの電流・電圧波形を示す。

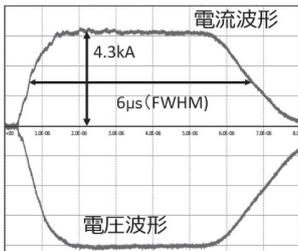


図4 サイラトロン動作波形

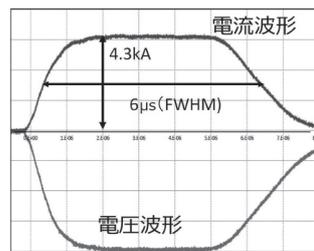


図5 サイリスタ動作波形

両者の出力波形は同等であることがわかる。現在、KEK-Bのテストスタンドにて連続通電試験を継続中であるが、1000時間を超える運転においても問題は生じておらず、サイラトロンの代替としての使用に耐え得る半導体スイッチが完成できたものと考えている。

## 2. イグナイトロン代替スイッチ

大阪大学レーザー科学研究所の慣性核融合用フラッシュランプ励起用電源スイッチ、あるいは、量子技術開発研究機構や核融合科学研究所<sup>(注)</sup>等の磁場閉じ込め方式の電源用クローバスイッチとして、イグナイトロンが用いられている。イグナイトロンは単発（非繰返し）大電流でのスイッチング動作に適した素子であるが、通電媒体に水銀を使用しており、2017年8月に発効された水俣条約により2020年までに製造と輸出入が原則禁止となる。このため、イグナイトロンに替わるスイッチの開発が急務となっている。

今回、NPEが開発したイグナイトロン代替スイッチの開発仕様、検証値、ならびに、顧客要求仕様を表2に示す。

表2 イグナイトロン代替スイッチ仕様

	開発仕様	検証値	阪大仕様
定格電圧	25kV	30kV	25kV
定格電流	80kA	120kA	80kA
パルス幅	1ms	1ms	1ms
繰返し	1shot/1H	1shot/0.5H	1shot/1H

高電圧で80kA以上の大電流通電が要求されるため、サイリスタ素子は高耐圧の平型素子を多段接続することが必須となる。開発にあたっては、各素子の同時点弧とON動作後の導通面積確保のため、下記のようなゲート回路等の工夫を行った。

- 1) ゲート駆動：ゲート電流  $di/dt=4.5A/\mu s$ 以上
- 2) ON動作タイミング：素子間での動作ジッター50ns以内で調整

上記のゲート駆動強化の他に、大阪大学でのフィールド試験を通じて、負荷側の漂遊容量に起因する突入電流の防止が必要なが判明したため、可飽和リアクトルを挿入して、主回路電流が素子の $di/dt$ 定格である $1kA/\mu s$ 以下になるように、スイッチユニットを製作した。

これらの工夫や対策を施して大阪大学レーザー科学研究所にてフィールド試験を行い、500ショットを超える運転で問題ないことを確認しており、イグナイトロンの代替としての使用に耐え得る半導体スイッチが完成できたものと考えている。

図6に実負荷であるフラッシュランプに通電した時の波形を示す。

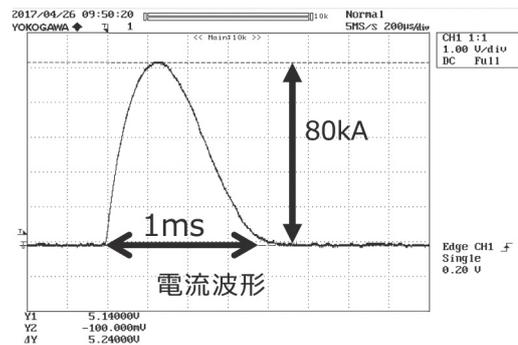


図6 フラッシュランプ通電電流波形

現在、SACLA向け油中仕様のサイラトロン代替スイッチの開発に取り組んでおり、今後も、高電圧大電流パルス電源装置について様々な顧客のご要望に応えられるよう注力する所存である。

(注) 大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所