

## 創立100周年記念論文

## 電子線照射装置事業のあゆみ

History of Electron Beam Processing System

濱野 勝\* 星 康久\*  
M. Hamano Y. Hoshi

## 概要

日新電機グループにおける電子線照射装置事業は、1957年日新電機によるNS型加速器の開発を手掛けたことによりスタートした。その後1970年に米国ハイボルテージ・エンジニアリング社と技術提携し、日新ハイボルテージ株式会社を設立し、加速器製造販売事業を強化した。1980年代に日新電機の得意とする電源技術を更に高め、メンテナンス性に優れたSF<sub>6</sub>ガス絶縁電源を開発し海外への販売を本格化した。1999年に前橋に設立した照射サービス会社を2003年に統合し、社名を株式会社NHVコーポレーションと改め、現在世界30カ国に400台以上の装置の納入実績を持つ世界有数の加速器メーカーに成長している。

## Synopsis

Electron beam processing system business in Nissin Electric Group started in 1957, when Nissin Electric started to develop NS type electron accelerator. In 1970, Nissin-High Voltage (NHV) was established as a joint venture between Nissin Electric Co., Ltd. and High Voltage Engineering Corporation in USA. The New NHV then focused to expand the accelerator business in wire and cable industries mainly in Japan. In the 1980s, NHV developed the SF<sub>6</sub> gas insulated power supply using Nissin Electric's power supply technologies. Since the power supply had many unique features as an industrial system such as low electrical power consumption, reliability and minimal maintenance, NHV were able to expand its Electron Beam business in foreign countries. In 2003, NHV Corporation was jointly established by unifying NHV and Nissin Electron Service Co.,Ltd. (NESCO) who had provided EB Irradiation Service in Maebashi. To date NHV Corporation has manufactured more than 400 electron beam processing systems and has exported them to 30 countries. NHV is becoming a world leader as a manufactures of electron beam processing system for an industrial application.

## 1. はじめに

電子線照射装置（EPS：Electron beam Processing System）が工業的に使用され始めてから半世紀以上が経過した。わが国では1957年に日新電機が最初にNS型加速器の開発を手掛け、加速器製造販売事業への道を開いた。その後1970年に米国ハイボルテージ・エンジニアリング社（以下、HVEC社）と技術導入契約を締結し日新ハイボルテージ株式会社（NHV）を設立、生産増強を目指す顧客のニーズに応えるため加速器の大出力化に取り組み販売を拡大した。

その後、海外での需要が増加する中、1983年現地でのメンテナンスが容易となるSF<sub>6</sub>ガス絶縁電源を開発し、海外への販売を本格化した。また静電加速器としては世界最大級の5MV EPSを製作販売するなど新しい装置の開発にも力を入れ製品を拡充していった。

一方1981年には照射技術の利用拡大を図るため、EB加工技術センターを開設し、EB（Electron Beam）の効果を検証するための実験照射やお客様の生産の一助となる受託照射サービスを開始した。1999年には、照射サービス事業を拡大すべく、ラジエ工業株式会社と

\*株式会社NHVコーポレーション

の合併で日新エレクトロニクス株式会社(NESCO)を前橋に設立し照射サービスの拡大を図った。

2003年には日新エレクトロニクス株式会社で実施していた照射サービス事業を吸収・統合する形で、株式会社NHVコーポレーション(NHVC)を設立した。その後もNHVCは拡大する海外市場に対しEPSの販売の強化及び照射サービスの拡充につとめ、2003年には300kVタイヤ製造用小型機を開発、2008年には半導体ウェーハへの照射需要に応える形で九州EBセンターを設立するなど事業を拡大していった。

当社は、3拠点の照射サービスセンターにより、お客様のEB照射業務をサポートすると共に、世界で最大級の5MV EPSを開発するなど数多くのEPSを国内外に供給、現在では400台超の装置を世界30カ国に納入する世界有数の加速器メーカーに成長した。

一方、当社は1973年にはハイボルテージ・エンジニアリング・ヨーロッパ社と提携しイオン注入装置の技術を導入、国内でのイオン注入装置の販売も手がけた。当初は40~350kV級の小電流機を中心に販売してきたが、1979年に顧客の生産ラインに200kV中電流機を納入、以降半導体業界の急速な生産拡大とデバイス微細加工化を受け、200kV中電流機を中心にイオン注入装置の販売を拡大した。イオン注入装置事業は更なる発展が期待され、1983年には装置需要の拡大に迅速に対応するために日新電機に事業移管した。

また、1987年にはHVEC社の技術を用い、農水省食品総合研究所に2.5MV 250 $\mu$ Aバンデグラフ型電子加速器を開発し納入した。以降、バンデグラフ型電源の特長である低電流出力だが小型で比較的容易に電圧が発生できる利点を生かし、2.5MVイオン加速器・後方散乱測定器や1.7MVタンデム加速器など試験用途の高電圧(MeV級)イオン加速器を数多く供給した。1999年には癌治療用シンクロトロンへの入射器として5MVタンデム型陽子加速器を納入するなど多くの粒子加速器を納入してきたが、2002年、海外での需要が急増していた電子加速器に技術を集中するために、MeV級イオン加速器事業から撤退した。

次章以降では、当社の主力事業製品である電子線照射装置に関する技術発展の歴史を詳報する。

## 2. 電子線照射技術

### 2.1 放射線の発見

放射線の研究は1895年にレントゲンが陰極線を研究中に偶然X線を発見したことにより始まる。1896年ベクレルがウラン化合物から放出される放射線をベクレル線と名付け、その後ベクレル線は $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線の3種類であることがわかった。更に $\alpha$ 線はヘリ

ウムの原子核であり、 $\beta$ 線は電子線、 $\gamma$ 線はX線と同等であることが明らかになった。1898年にはキュリー夫妻がウランを含む鉱石からラジウム等を発見し、その後、放射線の応用は医学・理学の分野で拡大していった。

このようにして設立された放射線化学は1945年以降、原子炉建設のための各種材料に対する放射線劣化の研究を中心に進展していたが、1952年にチャールスビーによりポリエチレンの放射線架橋が発見されて以来、この効果を利用して新しい分野を切り開く動きが活発になった。放射線の工業利用の幕開けである。1961年にはわが国でもEPSを利用したポリエチレン被覆電線やテープの生産が開始された。

高速の電子が物質内を通過するとき、そのエネルギーは物質に与えられ、自らのエネルギーは減衰する。エネルギーを与えられた物質は、分子の励起やイオン化などを生じて化学反応を起こす。このような化学反応を利用して従来の熱や光では出来なかった特徴のある化学処理を行うのがEB照射であり、1970年から現在に至るまで様々な分野で利用されるようになった。

### 2.2 加速器

図1に自然放射線に代わり、高速の電子を発生させる電子線加速器の原理について説明する。

金属(フィラメント)を加熱すると自由電子のエネルギーが高くなり、電子が金属表面から飛び出すようになる。電子は負の電荷を帯びており、金属に負の電圧を与えれば、反発力により電子はさらに飛び出しやすくなる。一方、少し離れた場所に電子が飛び出した

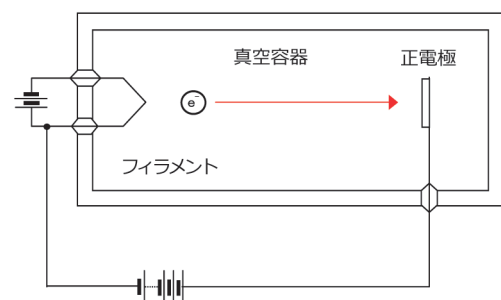


図1 電子の加速原理

金属に対し正の電位を持った電極を置くと、電子は金属と電極の間に与えられている電圧により加速され、運動エネルギーを得る。運動エネルギーを持った電子を様々な物質にあてると電子のエネルギーが物質に与えられ、数々の反応が発生する。これがEPSの基本的なしくみである。

EPSには直流高電圧を発生させる高電圧技術、電子

を加速するビーム光学技術、超高真空を実現させる真空技術、所定の機能・性能が発揮できるよう制御するシステム制御技術、及び電子が物質に当たった際発生するX線を遮蔽するX線遮蔽技術など多くの先進的な技術が適用されている。

現在、当社のEPSは電子の加速システムの違いにより走査型とエリア型の二つに分類される。

### 2. 3 走査型EPS

走査型EPSは、真空中でフィラメントを加熱することにより放出された電子を、ガラスと電極を複数段積層した加速管により作られる均等静電界によって加速し、走査コイルにより必要な照射幅に拡げ、被照射物に照射している。照射幅を広げるため電子を走査することから走査型と呼ばれている。

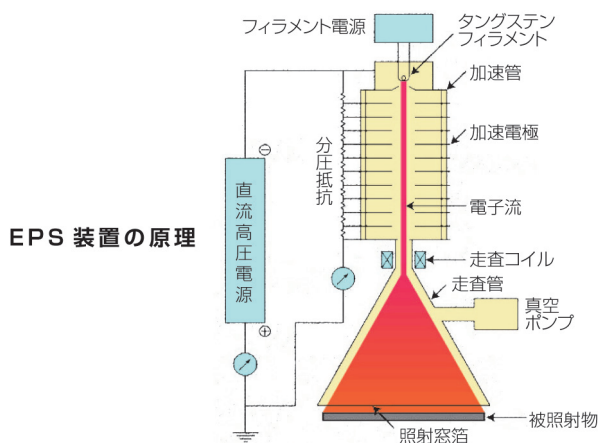


図2 走査型EPSの原理

#### 2. 3. 1 走査型EPSの始まり

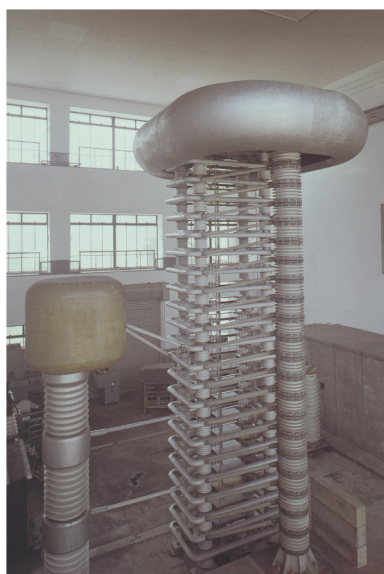


図3 NS型静電加速装置 CI27C

1950年代に入り放射線の工業利用が注目され始め、ポリエチレンに放射線を当てて耐熱性を改善する、医療品や食料品の殺菌を従来の加熱、薬品処理に代え放射線で行うなど様々に利用され始めた。日新電機はコッククロフト型直流高電圧発生装置の製作実績が多く、国内向けの1mA級装置を数多く製造してきた。その技術を基礎に1956年400kV直流電源を開発し、1957年より通商産業省の応用研究補助金を受けて加速器の研究を進め1959年6月にNS型静電加速装置を開発した。この装置は、直流高電圧電源と加速管を組み合わせたもので出力6kWは当時世界最大級であり、大手電線会社に3台納入した。

#### 2. 3. 2 HVEC社と提携

その後、コッククロフト型直流高電圧電源を使用した2.0/1.2MV 10mAクラスの高エネルギー加速器（サガトロン）を開発するなど、加速器の普及に努めてきたが、この間、EPSの工業利用面での用途は飛躍的に増大し、更に大電流装置の開発や装置の小型化が急務となってきた。

そのため、当時加速器のトップメーカーであった米国マサチューセッツ州バーリントン市のHVEC社から大電流電子線照射装置の技術を導入することを決断し、1970年5月に技術導入契約を締結、1970年6月に合弁会社NHVを設立した。HVEC社からは、フィラメント部・窓箔部の技術を含んだ加速器の技術を導入し、ソリッド直流高電圧ケーブル、加速管など一部の部品をHVEC社より供給を受けることとした。

HVEC社の装置は加速器メーカーとして培った技術が随所に施されていた。特に加速管はコンパクトに設計されており、この技術の導入により装置の小型化が進み、当社の装置販売の促進につながった。HVEC社の技術の導入に際しては、図面がインチ表記であったことに加えインコネル（耐食性に優れ磁性小）、フェライトコアなど新しい材料が使用されており、日本での図面化、製作には多大の労力を費やした。また当初、輸入していたソリッド直流高電圧ケーブルについては、端末処理後に絶縁不良が発生するなど技術課題がいくつかあったが、日新電機他の協力を得て解決することが出来た。多くの人々の努力により、HVEC社技術と国内技術を融合して当時の世界最高レベルの加速器を供給できる体制が作られていった。

HVEC社との提携は1970年から13年間継続し、NHVC社はその間加速器メーカーとしての地位を固めていったが、1983年HVEC社より加速器事業から撤退するため提携を解消したいとの打診があり、日新電機がNHVの全株を取得し提携を解消した。



### 2. 3. 3 ガス絶縁電源の開発

HVEC社よりの技術導入以降、1000kV以下の装置は新規加速器と日新電機製変圧器型油絶縁直流電源とを組み合わせ、また1,000kV超の装置は、日新電機製碍子型コンデンサを使用しSF<sub>6</sub>ガス絶縁対称型コッククロフト回路を構成して、最大2MVまでの装置を開発・納入していた。

1970年代後半、電子線照射利用の範囲が広がり、収縮チューブ製作工程で、高電圧大出力のEPSが必要となった。これに対応するため当社にて3MV 100kW EPSの開発を開始した。

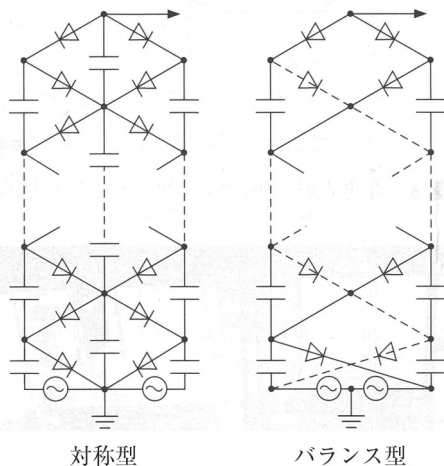


図4 コッククロフト回路の種類

直流電源は実績のあるコッククロフト回路を使用する事とした。しかし、3MV発生のためにはコッククロフト段数を多数積上げる必要があり、普通型コッククロフト回路では電圧効率の低下及び内部抵抗の増加により、3MV 100kW運転が困難となることが予想された。この様な場合、段数増による電圧効率の低下及び内部抵抗の増加が少ない対称型コッククロフト回路を使用すべきだが、対称型コッククロフト回路では、1段あたりコンデンサが3台必要となり装置形状が大きくなる欠点がある。これを解決するため、対称型コッククロフト回路を改良し、1段あたり2個のコンデンサで対称型と同等の性能を実現した当社独自のバランス型コッククロフト回路を開発し採用することとした。更に100kW実現のためコンデンサ容量も大きくする必要があり日新電機製缶形コンデンサを採用した。1980年日新グループの技術を結集し3MV 100kW EPSを完成させ納入した。以降2.0MVクラス以上の装置はバランス型コッククロフト回路を使用し装置納入を進めている。

一方1MV以下の装置については油絶縁直流高圧電源を使用していた。1980年代に入り、海外での商談が

増えてきたが、油絶縁変圧器型直流電源は、現地でのメンテナンスが困難であり、海外への適用は難しかった。これに対応するためメンテナンスの容易なSF<sub>6</sub>ガス絶縁電源を開発することとした。電源は部品点数の少ない普通型コッククロフト回路を採用、缶型コンデンサ、油絶縁高周波トランス及び、当時誘導加熱炉に使われていた3kHz高周波発電機を組み合わせ、1983年750kV EPSを製作し台湾に納入した。その後、高効率を目指し高周波発電機を半導体スイッチを利用した高周波インバータに置き換え、電源周波数を3kHzから1kHzに下げ、高周波トランスの損失を低減し油絶縁トランスからガス絶縁トランスに置き換えるなどの改善を加えたEPSを開発した。この改善を適用し1986年800kV 100mA EPSを国内タイヤ会社に納入、また800kV 110mA EPSを米国タイヤ会社に納入した。以降1MV以下クラスの装置はガス絶縁コッククロフト式に切り替えた。

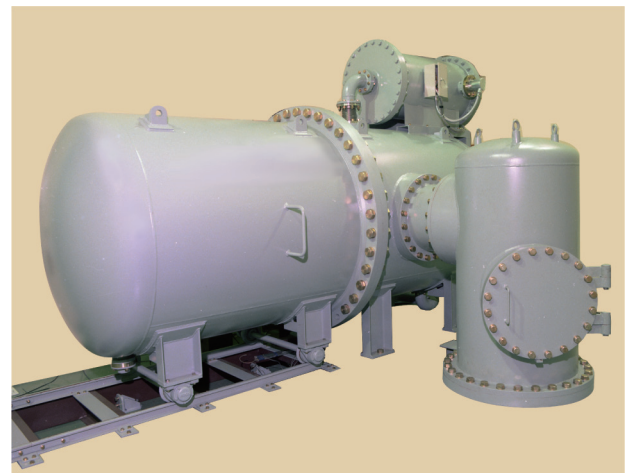


図5 ガス絶縁式750kV EPS

6067③

### 2. 3. 4 HVEC社技術の改良

当社は、独自の技術で加速器を開発・供給してきたが、1970年加速器の大電流化、小型化を求めてHVEC社の加速器技術を導入した。導入当初はHVEC社技術をそのまま使用したが、その後は、HVEC社の技術を取得し、それに当社固有の技術、日本の技術を融合する改良を加えて行った。HVEC社より部品供給を受けていたソリッド直流高圧ケーブルは高粘度の絶縁油を使うこともあり端末処理で苦勞したが、住友電気工業株式会社の協力を得て低粘度の絶縁油を用いたOFケーブルに置き換えることにより品質向上をはかった。またコラム抵抗器等の加速管周囲部品について、HVEC社製はモールド抵抗及び導電性ゴムリングを用いていたが部品の信頼性向上のため、モールド抵抗器をより耐電圧の高い高電圧用皮膜抵抗器に変更、電界緩和のためアルミリングを用いる等の構造へ変更を行った。

ビームを走査するための波形調整機能をもった走査電源もシーケンサなどからの外部信号で出力調整できる機能を付加した製品を開発し置き換えをおこなった。多くの改良を行った結果、1975年当時、HVEC社から導入した技術は、加速管を除いて当社の技術で置き換えられるようになっていた。

1980年代、EPSの用途の広がりから、顧客からの要望も多岐に渡るようになり、新しい定格・仕様の製品開発が必要となってきた。このため大電流対応できるなどの特長を持った新型加速管を独自で開発し、安定した製作ができる体制を作ることとした。

1984年、加速管製作検討に着手、絶縁物材料、接着剤材料の選定をすすめた。加速管の製作では寸法精度を守ることと、正確なアライメントを実現することが重要で、専用組立て治具の開発等を行い、試行錯誤を繰り返し、要求性能を満足する加速管を製作することが出来た。この技術により当社で設計した新たな定格電圧の加速管製作も可能となり、1986年、HVEC社の標準には無いが、電線・発泡照射でよく使用される800kV加速管を製作、800kV EPSを客先へ納入した。後述する5MV照射機装置の加速管についても、この技術により可能となったものの一つである。

### 2. 3. 5 自己遮蔽型EPSの開発

EPSはビームを発生する際にX線が発生するため、X線が外部に漏れ出さないようX線を遮蔽する遮蔽室が必要となる。遮蔽室の構造には厚いコンクリートの壁を用いたコンクリートシールド型が古くから広く利用されている他、遮蔽材に鉄・鉛などの金属を用いEPSに遮蔽室を組み合わせた自己遮蔽型がある。自己遮蔽型は高エネルギー装置では遮蔽のために鉛等の厚みが大きくなり製作が困難となるが、低エネルギー装置では装置を小型化できること、また現地にて遮蔽室建築など大掛かりな工事が不要となり早期立ち上げが可能となるなどのメリットがある。

当社は加速器開発当初から自己遮蔽タイプに注目し、1968～1970年に300kV自己遮蔽型EPSを3台製作、電線会社及び製鉄会社に納入した。これらの設計・製作にあたり、被照射物の出入りする開口部の遮蔽構造など多くの技術を習得、また1970年HVEC社から技術導入したX線遮蔽計算技術なども合わせ遮蔽設計技術の向上を図った。

1970年代は比較的高エネルギーの加速器の需要が多く、自己遮蔽型の需要は少なかったが1980年代に入り、後述するエリア機の需要が増加した。エリア機は最大電圧が300kVであり、小型化が図れる自己遮蔽型のメリットを生かし、多くの自己遮蔽装置を納入した。

また走査型EPSにおいても小型化、省スペースへのニーズが高まり、それまで300kV以下の装置に限定していた自己遮蔽型の適用電圧の拡大（高電圧化）に取り組んだ。高電圧化に伴う鉛厚みの増加に対し、重量を支える構造変更、組立て方法の改善を行い、1984年500kV自己遮蔽型EPSを国内電線会社へ納入、1991年には800kV自己遮蔽型EPSを化学会社に納入した。

自己遮蔽型は現地での工事が容易となるため発展途上国での装置導入に向いている。1993年韓国へ500kV自己遮蔽型EPSを納入したことを皮切りに多くの自己遮蔽型が海外へ納入されるようになり、2000年以降海外へ納入が増加したが、その装置の80%近くは自己遮蔽型である。前述のSF<sub>6</sub>ガス絶縁電源の投入と共に海外進出の大きな柱であった。

自己遮蔽型EPSの遮蔽室は鉛などを扱う専門メーカーに発注していたが、より顧客のニーズにマッチした遮蔽室を提供するため、2009年NHVCの中国現地法人NHV-ATにて設計を開始した。以降鉛の使用量を減らした遮蔽室を用いた自己遮蔽型EPSを中国地場のタイヤ工場に納入している。



図6 自己遮蔽型EPS

### 2. 3. 6 5MV EPSの開発

放射線殺菌は、コバルト60を使用した施設が一般的である。コバルト60は透過能力が高いなどのメリットがあるが、常時放射線を発生していることから未使用時は水槽に沈め保管するなど扱いが煩雑であること、また線源には寿命があり定期的な交換が必要だが線源価格の高騰、輸送時の安全対策など維持管理の難しさがある。EPSは、電源をオフすることで放射線を零に出来るメリットがあり、扱いも容易で、殺菌用途に対応できる高電圧EPSが製作できれば、今後需要が拡大することが期待された。1989年静止型のEPSとしては最大とされ殺菌用途として使用可能な5MV EPSの開発



に着手した。昇圧回路は当社独自のバランス型コッククロフトを採用、3MV電源回路をベースに昇圧回路を積上げることで対応した。压力容器は3MVをベースに圧力タンク上部を電圧に合わせて段階的に径を大きくし耐電圧を緩和するタンク形状を採用した。5MV加速管は、2本直列接続とし、フィラメント用電源も絶縁軸5直列のMG (Motor Generator) を採用、当時のNHVの技術を結集して設計・製作した。引き続き実証試験を始めたところ過去実施した3MV開発時には経験しなかった新たな技術課題が発生した。電源タンク内壁のチャージアップに起因する放電現象や加速管内の真空内放電など高い電圧特有の課題である。設計の再検討、使用材料の見直し、加工方法の変更などを行い種々の対策を実施した。また操作性についても煩雑なコンデショニング作業を自動で行うなど、多くの改良を加えた。これら対策の検証のため、性能検証試験に長期間を費やしたが1991年3月完成し、照射サービス会社にお引渡した。



図7 5MV EPS

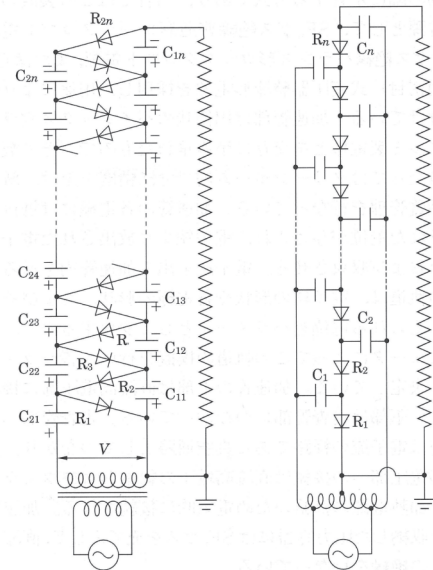
### 2. 3. 7 CNE加速器の開発

1999年排煙照射用大電流電源で回路の振る舞いと保護回路の検討などのため日新電機と直流電源プロジェクトを実施し、過渡時過電圧抑制回路 (NSP) などを開発・実用化してきた。2002年には現行よりも高い高周波 (50kHz) を使用し小型化・低コスト化を目指した高周波電源プロジェクトが発足した。

高周波を用いた昇圧回路としてシェンケル型コッククロフト回路を採用し工業用装置として負荷変動に強い最適回路設計を実施、それにあわせ部品設計及び選定を行った。2006年1.5MVシェンケル型加速器の開発試験を行い、最大120kW出力 (1.5MV 80mA) を確認、良好な結果を得た。

一方、2005年中国進出を目指し、上海地区に現地法

人日新馳威高能電機 (上海) 有限公司を立ち上げEPSでの中国販売を開始した。しかしながら先行する中国メーカーとの価格差が大きく受注は伸び悩み、これを打開する為には、低価格の加速器の新規開発が必要になった。



コッククロフト回路 シェンケル回路

図8 昇圧方式の比較

そこで2009年、前述のシェンケル型加速器に中国部材を適用しコストを大幅に下げるコスト0.5プロジェクトを開始し対応を図った。中国で製作する500kVタイヤ生産用EPSにこの技術を適用、「CNE」と名付け中国市場へ投入し、2010年CNE 1号機を中国青島のタイヤ会社に納入した。

CNEは、800kV 1.5MV機とラインアップを拡充し、開発途上国でコスト競争が激化する中、低価格の日本品質照射装置として好評価を得ている。



図9 CNE 500kV 100mA

## 2. 4 エリア型EPS

エリア型EPSは、真空中に線状フィラメントを必要照射幅にあわせて複数本並べて配置、このフィラメントを加熱することにより照射幅分の熱電子を発生、フィラメント部と真空チャンバ間に印加した電界により加速し被照射物に照射している。またフィラメント部分は高電圧が印加されるため、真空中において高圧ブッシング(碍子)で支えられている。加速電圧は走査型に比べ低く、ビーム取り出しに使用する箔は、走査型より薄い箔を用いている。電子を照射幅(エリア)全体で発生していることからエリア型EPSと名付けた。

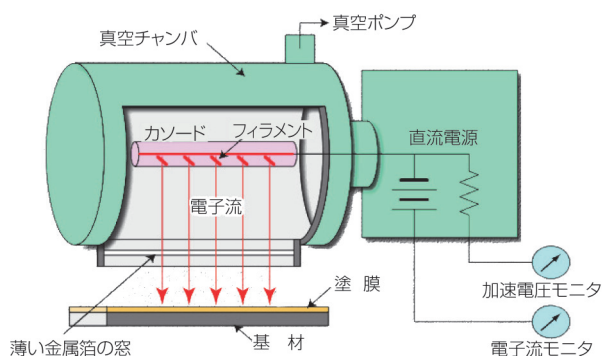


図10 エリア型EPSの原理

### 2. 4. 1 エリア型EPSのはじまり



図11 200kV実験機

1970年代後半、米国にてカーテンビームと呼ばれた新しい電子線照射装置が使用され始めた。電子線の走査をしない照射装置で加速管も不要となる。加速電圧は低電圧(最大300kV)となるが、安価な装置を作ることが出来、印刷、フィルムの改質、コーティング、磁気テープなどの広い分野で利用されることが期待された。当社はこの新しいニーズに着目、装置開発に取り組むこととした。新用途での装置販売を進めるには顧客の製品開発を促進する事が第一歩となることか

ら、まず顧客にて試験を容易に出来るよう、照射器と15cm×15cmサイズの材料を搬送できるパレットコンベア設備を一体にした、小型、コンパクト低価格の実験用照射装置(以下、実験機)を開発した。フィラメントは必要とされる照射幅の電子ビームを発生させるため、セラミックで保持された短い直線フィラメントを照射幅にあわせて均一ピッチで平行に配置した。高圧部分を支える碍子は、直流高圧に使用されるケーブルブッシング(アルミナ充填エポキシ製)を本製品用に改良し採用した。

加速電圧は200kVとし、コッククロフト回路は使用せず、3相カスケード倍電圧整流回路を採用、ガス絶縁昇圧トランスと整流回路で構成した。1983年1号機を鉄鋼メーカーに納入、以降1990年には加速電圧250kVの実験機もラインナップに加え、現在までに約60台を販売、エリア型EPS普及に大きく貢献した。

### 2. 4. 2 実験機からパイロット機・生産機へ

実験機販売の結果、エリア機での照射による効果が確認され、より大きな出力の加速器にて試験生産及び生産を始めたいとの需要が出てきた。そのため実験機より大きな生産用途に見合った設備を開発し当社京都工場内に設置した。定格は、加速電圧は実験機と同様に200kVとなるが電子流は100mA照射幅を100cmとした。フィラメント構造、窓箔部分の構造は、実験機と同じ方式でスケールアップし対応し、直流電源は走査型で当初使用していた油絶縁変圧器型電源を採用した。この加速器に、フィルム照射を目的として、搬送ロール、搬送機を準備し1985年、当社EB加工センターに設置、照射試験、委託照射を受け入れることとした。また同時期に日本原子力研究開発機構より300kVエリア機の照射試験設備依頼があり、1985年には300kV 100mA 60cm加速器が群馬県高崎の同機構内に設置された。これらの結果、1980年代後半には試験生産用途(パイロット設備)も多く設置されるようになった。また1987年に東京都立アイソトープ研究所へエリア機を用いたコンバーティングシステムを納入している。

### 2. 4. 3 300kVエリア機の開発と技術開発

タイヤメーカーでエリア機をタイヤ生産に使用する事が検討され、1995年当社はこれに対応するため300kV大電流(500mA)のエリア機の開発を開始した。300kVエリア機は試験照射用途として国立研究開発法人日本原子力研究開発機構向けに製作・納入していたが、工業生産ラインへの導入としては初めてであり、より高い信頼性と大電流化が必要となった。直流電源は変圧器型電源の回路構成を用いて、油絶縁をSF<sub>6</sub>ガ



ス絶縁に変更した新設計品とし300kV 500mAを実現した。またフィラメント部分を支える碍子は、材質を従来のエポキシ樹脂からガス発生が少なく、より安定に高電圧を印加できるセラミックに変更し、多段に積み重ねた多段碍子を新規開発した。また、大電流化のためには、フィラメント部とビームを透過させるウィンドー部の性能向上が必要となる。フィラメント部分は従来のフィラメントを1列並べたもの（シングルガン）から2列並べたもの（ダブルガン）に変更、ウィンドー部もこれにあわせ開口部が2列となる構造（ダブルウィンドー）とした。

これら新規技術を導入し300kV 500mAエリア機の試作を進めた。試験運転では、放電による高圧部機器の損傷、大電流による箔劣化などの不具合が発生したが、それぞれサージ対策強化、冷却系統改善などの対策の社内検証を実施し1997年1月、1号機をタイヤメーカーへ納入した。

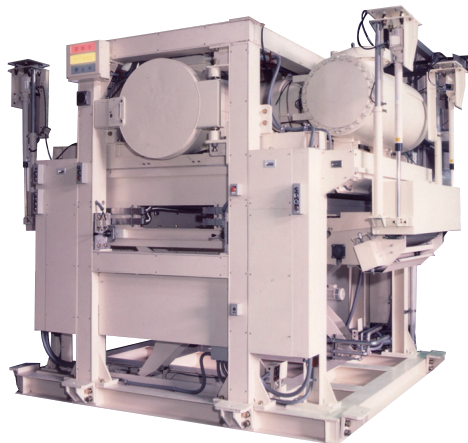


図12 300kV 500mA エリア機

現地では、客先搬送ラインと組み合わせ試験を行い、放電等によるトラブルもあったが、サージ対策・コンデショニング・各種保護回路の微調整を実施し装置安定性を改善した。その後、長期運転試験を実施、装置安定性をご確認戴いた上で、完成させた。その後同種の装置は性能改善され、20台以上の装置が生産ラインで休み無く稼働している。

#### 2. 4. 4 300kV小型機の開発

2002年、タイヤなどの製造用途でコンベア搬送機を一体化した小型の照射装置に対する要望が増加し、開発に着手した。主な仕様は、

- ① 装置を一体化して出荷が出来る様、コンパクトな設計をすること
- ② 現地組み立て時間を極力短縮し、短期間据付を達成すること

③ 加速電圧は300kVとする

④ メンテナンスが容易かつ短時間で出来ること  
 など、高度化してきた製造ラインや海外進出に対応するためのものである。今後同様の要求が増えることも予想されたため、要望に応じて、次世代につながる小型化装置の開発を行うこととした。

仕様実現には機器の小型化設計が必要となる。電源は定格100mAであったため小型化を目指し実験機で使用した3相カスケード倍電圧整流回路を採用、シミュレーションにて最適な回路定数を選択した。また真空チャンバは電界計算により形状を検討し小型化を図った。また、小型化により加速器のメンテナンス性が損なわれない様コンベアと加速器が容易に切り離せる構造とするなどの改良を加えた。2003年多くの改良を取り入れ1号機が完成し納入した。

以降現在まで、本使様の装置を約30台納入している。当社では実験機に次ぐ台数である。



図13 300kV 100mA エリア機

#### 2. 4. 5 低エネルギー機開発

フィルムの表面処理、コーティングした樹脂の硬化等、厚みが薄い材料への電子線照射は、エリア機の得意とするところである。当社でも、このような需要が増加してきたことから、2004年には100~150kVエリア型照射装置の開発に取り組むこととした。低エネルギーEPSでは、電子ビームの透過能力が低下することからビームを大気中に取り出す為の窓箔についても、エネルギーロスの少ない薄い箔を使用する事が必要であり、従来15 $\mu$ m前後のチタン箔を使用していたが、10 $\mu$ m以下の極薄チタン箔の使用を検証した。

照射量の測定においても、従来使用していたCTA線量計は、測定フィルムの厚みが125 $\mu$ mと厚く透過能力の低い低電圧電子ビームの測定は困難であったため低エネルギー用線量計ブルーセロファン (BC)、ラジオクロミック (RCD)、ガフクロミック (GAF) の評価を行い低エネルギー機開発に向けての試験を進めた。



フィラメント部分は200~300kV装置にて培ったフィラメント形状を踏襲、直流電源は、200~300kV用直流電源をスケールダウンするなど、既存の技術を組み合わせ、2005年完成した。

## 2. 5 EB加工技術

### 2. 5. 1 EPS利用分野の変遷

1952年にチャールスピーがポリエチレンの放射線架橋を発見した後に、これを利用して新分野を開拓する動きが電線メーカーを中心に活発となったことは先にも述べたが、わが国でも大手電線メーカーにて被覆電線の照射が開始され、次に照射技術を使った熱収縮チューブの生産が開始された。また大手化学メーカーにて発泡ポリエチレン生産への応用が開始された。

その後、塗料塗膜の瞬時硬化が着目され、いくつかの塗料メーカーにパイロットプラントが設置され、鋼板塗装などへの利用も始まった。更にイオン交換膜の製造も開始され1960年から1970年の間に放射線化学の架橋重合、ラジカル重合、グラフト重合のなど多くの技術が実用化の段階へと進んだ。

そのなかで、塗料塗膜の瞬時硬化については、UV（紫外線）法が主流となったため、最初の注目から停滞していたが、1980年代に入って当社より実験機が供給され、塗料メーカーをはじめ各社の研究所などに設置され実験が進められた。リリース紙や凹版印刷、粘着剤、転写フィルムなどに利用されている。

また、ゴムタイヤの製造ラインにEBによるゴム架橋を利用する技術は当初米グッドイヤー社や米ファイヤーストーン社で始められたが、国内タイヤ会社では1980年頃より利用が始まり現在では国内外で90台以上が稼働している。タイヤへのEB照射の利用は、現在では先進国から新興国のタイヤ会社へ広がり、更なる拡大が期待されている。

また、地球環境保護の立場から、一般に広く使用されているエチレンオキサイドなどの有毒ガスによる医療機器ほかの殺菌・滅菌に変わる手段としてEBが注目されており、わが国でも1980年代より電子線殺菌の実用化を目指す動きがでてきた。

1990年代より電子線照射の半導体ウェーハの特性改善への利用が始まり、モータ制御にて省エネ効果が期待されることから広く使われるようになった。

近年は、機能性フィルムと布帛など、グラフト技術により機能を付加し、より性能改善に利用するなど、電子線照射は今後も利用拡大が期待されている。

### 2. 5. 2 EB加工技術センターの開設

1981年に当社京都工場に走査型750kV 65mA 120cm

幅のEPSを設置しEB加工技術センターを開設（現在の京都EBセンター）、EB（Electron Beam）の効果を確認するための実験照射やお客様の生産の一助とする受託照射を開始した。

1984年にはエリアビーム型EPS 200kV-100cmとマルチコーターを設置し、EBコーティング試験、生産を実施できるように設備を増強した。現在は主に印刷フィルムのコーティングに使われている。

また、1997年には300kV-60cmパッチコンベア付属のエリア型EPSを京都工場内に設置した。最大60cm×60cmの材料が搬送でき広く試験照射に利用されている。

2002年には800kV-60cm幅の走査型EPSを京都工場内に設置し、医療用チューブ照射やタイヤ用ゴムシートの受託加工を開始し、事業拡大を行った。京都EBセンターでは実験照射及びそれから派生した受託加工を主要業務としており、照射技術に関する専門家が常駐、照射技術の普及に努めている。

1999年、関東地区への電子線照射サービス事業の展開を進めるため、コバルト60や電子線を用いた照射サービスを提供されていたラジエ工業株式会社と日新エレクトロニクス株式会社（合併会社）を群馬県前橋市に設立、日新電機前橋製作所内に3MV高エネルギーEPSを設置し照射サービス事業を開始した。設置した装置は加速電圧が1.0~3.0MVと広い範囲で照射でき、照射幅も180cm広く（京都EBセンターは最大120cm）、広幅フィルムから厚物材料まで幅広い製品に照射できた。このため関東地区のお客さまはもとより京都EBセンターで照射できない特殊品の照射も行っている。

2003年にNHVC設立後も、NHVC前橋EBセンターとし引き続き東日本方面のお客様の照射サービスに勤めている。

また、京都EBセンター（NHVC本社工場内）で実施していたパワー半導体ウェーハへの照射（半導体スイッチの応答性改善）はスイッチング素子の効率改善に大きな効果があり、省エネやCO<sub>2</sub>削減といった世界的な潮流を受けて、大きなマーケットに成長した。この需要に応えるため2008年パワー半導体ウェーハへの照射サービスを主要業務とする九州EBセンターを佐賀県鳥栖市に開設した。半導体ウェーハは埃を嫌うことから、クリーンルームの設置、また大量の半導体ウェーハを扱うことから、専用ロボットによる半導体ウェーハのハンドリングなど過去経験の無い事が多く、苦勞したが、顧客の指導、グループ会社の協力を受け、対応する事が出来た。ここで経験したクリーン化の技術は、クリーン化が求められている現在、他のEBセンターへも適用している。



図14 九州EBセンター 200818®

2003年以降、照射サービスと共に電子線照射のアプリケーションの開発にも力を入れるようになり、グラフト重合技術にてイオン交換機能を付与し有害物質を吸着する吸着材料の開発や天然素材であるCMC（カルボキシメチルセルロース）を架橋し吸水性能を強化したハイドロゲルの製品化も行った。引き続き市場ニーズにマッチしたアプリケーションの探索を行い電子線照射による材料特性の向上や改質など新たな材料製品の創出を目指している。

現在は、各種受託照射及び実験照射や新規材料開発を担う京都EBセンター、3MVの高エネルギー照射を特徴とする前橋EBセンター、半導体ウェーハ照射に特化した九州EBセンターの3拠点で、お客様のニーズに適したサービスを提供している。

### 3. むすび

電子線技術の応用範囲の広がりにあわせ、当社は数多くの装置を供給してきた。電子線照射装置メーカーにおいて、100kVから5MVまでの広い範囲の装置を供給しているのは当社のみである。

電子線照射技術は更なる適用分野の拡大が見込まれ、従来の架橋・加硫・発泡等の用途に加え電子線の殺菌作用を利用した食品や医療分野のメーカーへの装置販売も増加していくことが期待される。当社は一貫して電子線加速器設計製造を行ってきたが、ビーム加速技術、計測技術などの技術の蓄積がある。これら技術を駆使し、EPSの総合メーカーとして、装置市場の裾野を広げるべく、高エネルギーの加速器からコンパクトで使い易い装置の開発まで広くお客様のニーズに応えながら更なる拡大を目指している。また、EB加工事業は、電子線照射によるグラフト重合反応を利用した新素材の開発支援や新たな用途開発で、照射技術の普及をめざすとともに、海外での事業展開も視野に更なる拡大を図っていきたい。

#### 参考文献

- (1) 「人と技術の未来をひらく」日新電機75年史(1992.3)
- (2) 「限りなき挑戦 世界を駆ける」NHVC30周年記念誌
- (3) 坂本 他：「最近の電子線照射装置の進歩について」、日新電機技報、Vol.25, No.3、(1980.7)
- (4) 「日新電機創立70年に当って当社の技術・製品を展望する」、日新電機技報、Vol.32, No.2 (1987.4)
- (5) 水澤 他：「電子線照射装置の歴史と将来展望」日新電機技報、Vol.40, No.2、(1995.7)
- (6) 柏木、星：「電子線照射装置の技術とその利用」SEIテクニカルレビュー、No.181 (2012.7)

#### 執筆者紹介



濱野 勝 Masaru Hamano  
株式会社 NHVコーポレーション  
技師長



星 康久 Yasuhisa Hoshi  
株式会社 NHVコーポレーション  
代表取締役社長