

特 集 論 文

関連するSDGs



電子線照射装置の技術と展望

Present Status and Future View of Electron beam
Processing System濱野 勝 島村 純夫
Hamano Masaru Shimamura Yoshio

概要

電子線照射装置が工業利用されてからすでに半世紀以上が経過した。当社では1957年に電子線照射装置の開発を手掛け、その後多くの装置を全世界の顧客へと供給した。その間、当社は顧客の要望に応じて装置の改良に努め、世界有数のメーカーとなった。本稿では当社の電子線照射装置の現状を説明するとともに今後の展望について報告する。

Synopsis

It has been more than half century since Electron beam Processing System (EPS) started to be used for industrial purpose. We started to develop EPS in 1957, and then supplied many EPSs to the world. In the meantime, we was improving EPS for customer's requests, and growing up one of the leading companies of EPS. This report describes the present status and future view of EPS.

1. はじめに

放射線化学反応は物質に放射線を照射して、そのエネルギーにより化学反応を促すもので、従来の触媒を用いた熱化学法よりも技術的、経済的に格段に有利なものである。その放射線化学反応を利用した装置の一つが加速した電子を照射する電子線照射装置 (EPS: Electron beam Processing System) であり、工業用に使用され始めてから既に半世紀以上が経過している。

わが国では、1957年に当社が他社に先駆けてEPSの開発に着手し、その後、EPSの製造販売を開始した。そして、1970年には、米国ハイボルテージ・エンジニアリング社と技術提携し、両社の技術を合わせて世界トップクラスのEPSの供給を開始し、その後も顧客のニーズに応えるべく、EPSの改良や製作範囲拡大を進めてきた。

EPSの工業使用が始まって以降、EPSの使用台数は、増加の一途をたどっており、応用分野についても電線被覆の耐熱性向上から始まり、タイヤ、発泡シートなどの材料の改質用途のほか、医療用器具の殺菌・滅菌手段としての利用、パワー半導体の特性改善などへの利用など、幅広い分野で活用されており、今後も

応用分野は広がり続けることが予想される。

当社はこれらの広範な応用分野に対応し、最適なEPSを提供すべく開発・改良を積み重ね今日に至っている。本稿では、これらEPSについて現在の状況を述べるとともに今後の展望について紹介する。

2. EPSの原理と特徴

2.1 EPSの原理

EPSは電子を人工的に発生させ、高速に加速させて物質に照射する装置である。その原理を図1に示す。

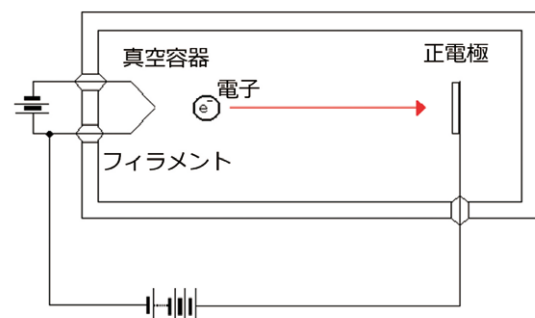


図1 電子の加速原理

真空容器内に設けた金属（フィラメント）を加熱すると金属内部の自由電子の運動が激しくなり、金属表面から真空中に放出される。フィラメントから離れた位置に電極を置き、フィラメントと電極間に電極が正となる直流高電圧を与えると、電子はその間に与えられた電界により加速されエネルギーを受ける。そのエネルギーを持った電子を材料（被照射体）に当てると、電子のエネルギーが材料に与えられ化学反応が起こる。これが電子線照射の原理である。

実際の装置で、電極に相当する部分は真空チャンバの開口部であり、金属箔が取り付けられ内部を真空に保持している。真空中で加速された高エネルギーの電子は金属箔を透過して大気中に飛び出し材料に衝突し化学反応を生じさせる。電子線照射を行うには、電子を100~5000kVと非常に高い電圧で加速することが必要であり、EPSには電子を加速するための高電圧を作る高電圧技術、電子を加速する真空領域を作る超高真空技術、電子を安定して加速させるための加速技術や、電子線照射した際発生するX線を防護する技術など、多くの高度な技術が使われている。

2. 2 電子線照射の効果

電子線照射の効果には次のものがあり、目的に合わせて種々の効果を使い分けている。

(1) 架橋

照射により材料（高分子）の高分子鎖同士が橋掛け（部分的につながり）し、網目構造となり耐熱性や強度などの特性が向上する。電線の耐熱性強化、プラスチックシートなどの耐熱性、機械強度改善などに使用されている。

(2) 硬化

短い分子鎖を照射により繋ぐことで高分子にする技術である。樹脂硬化、粘度向上などの利用用途があり、塗料、ハードコート材料の硬化に用いられる。即効性、無溶剤化などの特徴がある。

(3) グラフト重合

プラスチックシートや繊維などに親水性、防曇性、撥水性など、その材料が持たない機能を持った分子を照射により植え付けることで、それら機能を材料に付加する技術である。照射により機能を付加することで、他の方法よりも機能が長持ちする点で特徴がある。

(4) 崩壊

照射により高分子を分解する。化学的に安定なポリテトラフルオロエチレン（PTFE）の分解や殺菌・滅菌などで使用される。

当社では、これらの効果を活用した用途開発を進め、多くの照射製品の開発に寄与してきた。また、このような照射製品の開発には、照射技術に関する知見や試験設備が必要となるが、当社EBセンターでは顧客のニーズに合わせた設備や技術の協力を行っており、現在も多くの製品、用途の開発に携わっている。

また、製品・用途により必要となるエネルギー量は異なるため、適切な照射を実現するためには、EPSの出力選定も重要となる。EPSの定格値には、電子を加速する電圧である加速電圧（kV）と加速された電子の量である電子流（mA）がある。

加速電圧は電子を加速させるエネルギーを表し、このエネルギーの大きさにより、電子が物質を透過できる深さが決まる。例えば、1000kVの加速電圧であれば電子線は最大4mmの深さまで透過することができる。加速電圧ごとの電子線の透過能力を示したものを図2に示す。なお、図中の相対線量は最大線量の点を100%として各深さでの線量を示したものである。

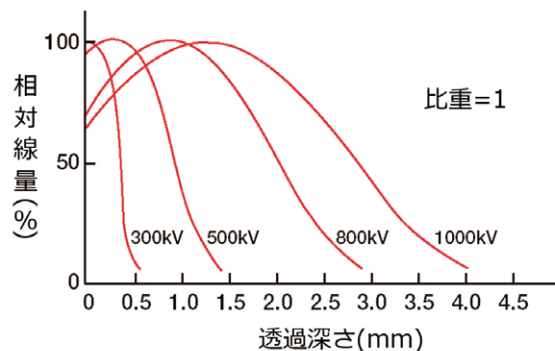


図2 電子線の透過能力

照射に必要な加速電圧は、照射方法や目的により異なるが、材料の厚みが2~2.5mmの場合には、その厚みを十分透過できる加速電圧1000kVを選択するのが通常である。

電子流は照射する電子の量を表し、この値が大きいほど照射効果が大きく、処理できる材料の量が多くなる。

当社では顧客での照射製品の厚み、照射内容、生産量などから最適な加速電圧、電子流を選定し、適切な照射が可能なEPSを提供できるよう製品開発を進めている。

2. 3 電子線照射の特徴

電子線照射を利用した化学反応は他の熱エネルギーなどによる化学反応と異なり、次のような特徴を持つ。

- (1) 反応の開始/終了を電子流のON/OFFにより容易に行うことができる
- (2) 常温でも反応を起こすことができる
- (3) 触媒を使用しなくても反応を起こすことができる
- (4) 反応が速く、処理能力が高い

また、放射線を利用した化学反応としては、電子線照射のほかにUV（紫外線）やγ線を使用したものがある。UVは、電子線照射に比べて透過能力が低いため、塗膜、インクの硬化など材料表層の加工に限られるほか、付与できるエネルギーも小さいため加工に時間を要することが難点である。しかし、電子線照射にて生じるX線は発生せず、遮蔽室が要らないため装置が小型となる利点がある。このため、塗膜の表面硬化など、限定した用途ではUVが利用されるケースがあるが、照射物が厚くなる場合や生産量が多い場合などは、必要なエネルギー量が大きく、電子線照射が必要である。

次にγ線（コバルト60照射）について、電子線照射との比較を表1に示す。コバルト60照射は、線量では電子線照射に及ばないものの、透過能力が高い。このため、照射時に影となり照射できないところや照射むらが発生しにくく、殺菌・滅菌用途で広く使用されている。しかし、線源（コバルト60）からは常にγ線が発生しており、電子線照射のように簡単にON/OFFできず、使用しない場合はγ線を遮蔽する設備が必要となるなど、取り扱いが煩雑である。

表1 コバルト照射と電子線照射との比較

	コバルト60照射	電子線照射
放射線種類	γ線	電子線
透過能力	高い	低い、加速電圧により異なる
線量	電子線照射に比べて低線量	高線量
線源の経時変化	時間と共に低下	線源の低下無し
運転・停止	線源を水槽（遮蔽体）から出し入れする作業性が悪い	電源のON/OFFによるため、作業・操作が簡単、安全
線源の保守	線源の追加が必要であり、作業が大変難しい	フィラメント交換のため、作業が比較的容易

電子線照射は透過深さこそ制限はあるが、反応速度が速く、処理能力が高いなど優れた特性を

持っており、また運転のON/OFFも容易で扱いやすいシステムであることから、工業用途で広く利用されている。

3. EPSの種類と構成

EPSは電子の加速システムの違いから走査型とエリア型の二つに分類される。本章では、それぞれのシステムについて説明する。

3. 1 走査型EPS

走査型EPSは真空中でフィラメントから発生したスポット状の電子を加速管によって加速し、その後走査コイルによって走査し、必要な幅に広げて材料に照射するEPSである。電子の取り出し口である照射窓は、電子が透過できるよう薄い必要があるが、真空を保つため強度も必要で高い強度を持つ合金チタン箔（30～50μm）を使用する。電子を走査することから走査型と呼ばれ、当社では300kV以上のEPSに適用している。走査型EPSの構成を図3に示す。

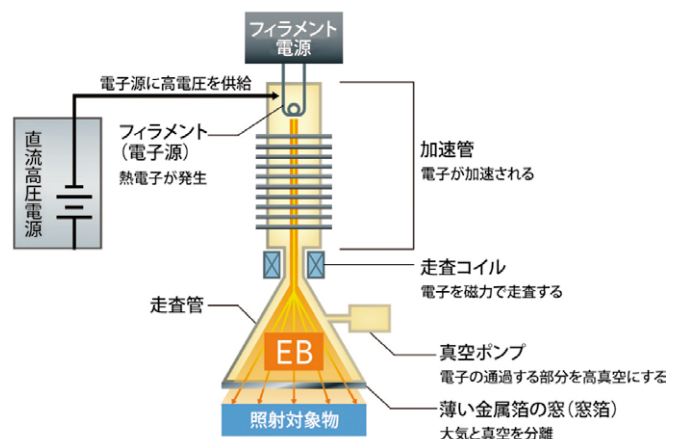
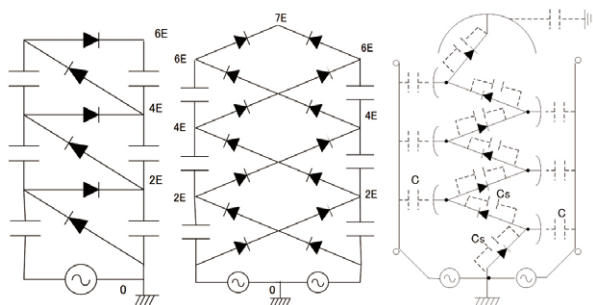


図3 走査型EPSの構成

走査型EPSに使用する直流高圧電源にはガス絶縁式（SF₆ガス使用）のコッククロフトウォルトン回路（CW回路）などを採用している。ガス絶縁式電源はガスを回収することによりメンテナンスを容易に行うことができ、EPSの海外での需要が増加する中で開発されたものである。当社で使用する走査型EPS用の電源回路には普通型CW回路、バランス型CW回路、シェンケル型回路の3種類あり（図4）、その内容について以下にて説明する。



普通型CW回路 バランス型CW回路 シェンケル型回路

図4 直流電源回路方式

普通型CW回路は部品点数が少なく、小型化が可能であるが、電圧が高くなる（段数が増える）と効率が低下するため、1500kV以下（500～1500kV）のEPSに適用している。また、本回路を使用すると、500kV 170mA、800kV 150mAなどの大電流電源が製作でき、専用に開発された大電流電子源と組み合わせて大電流EPSを構成することが可能である。

バランス型CW回路は当社独自の方式であり、電圧が高くなっても（段数が増えても）、効率が比較的低下しないため、2000～5000kVのEPSに適用している。また、本回路は大出力用途にも適しており、5MV 30mA（150kW）や、3MV 73mA（220kW）などの大出力電源も製作可能である。

本回路を用いた大出力のEPSの実現にあたっては、高い電圧に耐えられる加速管の開発が求められた。

電子ビームを加速させる加速管は、円筒状の耐熱強化ガラスとアルミ製電極を交互に積み重ねたものである。大出力電源を使用し加速電圧が高くなると、ガラスや電極の段数を増やし高電圧を印加できるようにしなければならないが、高電圧用の加速管製作には長尺となる加速管の寸法精度を確保することが必要となる。また、長尺とすることで、加速管内で電子ビームが散乱する恐れがあり、これを防ぐために加速管内を高真空に保つことが必要となる。当社では、加速管部品の精度や組み立て方法の改善を行うとともに排気コンダクタンスを高くする工夫を施し、最大で5MVまで対応した加速管を製作できる技術を開発した。

このような電源技術と加速管技術を組み合わせることで静止型加速器としては当時世界最大級の5MV 30mA（150kW）のEPSを開発し納入した（図5）。



図5 5MV 30mA EPS

シェンケル型回路は50～100kHzの高周波電源を用い、電源内の浮遊容量をコンデンサとして用いることで部品点数の少ない電源構成を実現している。

出力は500kV 100mAや、1.5MV 65mAなど、CW回路に比べ、最大出力が小さくなる点や、電源効率が悪い点などの欠点もあるが、部品点数の少なさを活かして小型化できる特徴を備えている。

当社では、これら3つのタイプの異なる電源を顧客のニーズに合わせて選択し、最適な走査型EPSを提案している。

3. 2 エリア型EPS

エリア型EPSは必要な照射幅に応じてフィラメントを複数本並列に配置し、真空中でフィラメントを加熱して照射幅と同じ幅の電子を発生させ真空チャンバ内で加速し材料に照射するEPSである。電子を走査することなく、必要な領域（エリア）の電子を発生・加速させることからエリア型EPSと呼んでいる。エリア型EPSの構成を図6に示す。

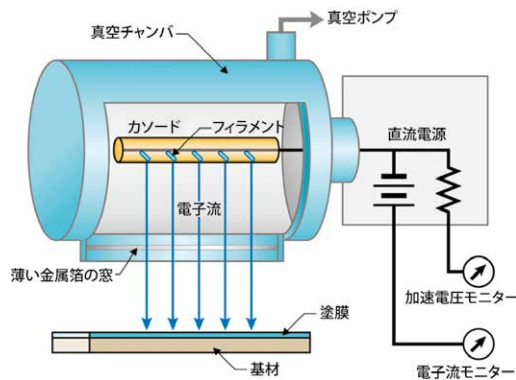


図6 エリア型EPSの構成

エリア型EPSは、加速管のように電界を均一にする電極を持たないため、構造は簡単となるが印加電圧には制限があり、製作範囲は加速電圧150～300kV、電子流500mA未満である。電子を取り出す照射窓は加速電圧が低く、透過能力が小さくなることから8～17.5 μ mと、走査型EPSと比べて薄いチタン箔を使用する。

走査型EPSでは、照射窓部の開口は180cm×10cmなど大きな開口が用いられるのに対し、薄い箔を使用する必要があるエリア型EPSでは、7cm×2～3mm程度の短冊状の小さな開口を多数並列に設けたグリッドウインドを用いて箔の保持を行っている。また直流電源には、変圧器型電源を採用している(図7)。

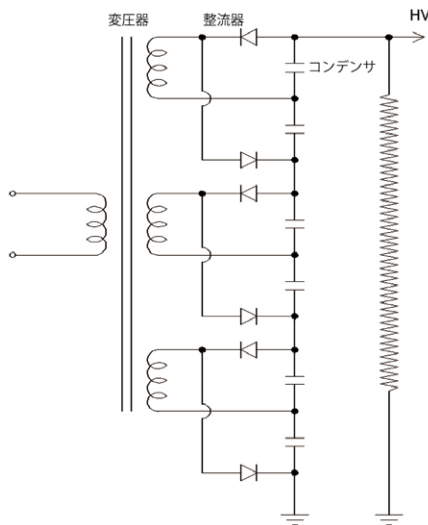


図7 変圧器型電源

変圧器型電源は、変圧器の2次コイルに整流回路を繋ぎ、それらを直列に接続することで直流高電圧を発生させる電源である。本電源は、1次・2次コイル間に出力側の直流高電圧が印加されるため、電圧が高くなると構造が大きくなる傾向があるが、エリア型EPSは出力電圧が300kVまでと低いため、SF₆ガス絶縁を用いることで電源は比較的小型化できる。また、直流出力と交流入力の変圧器で結合しているため、大出力の変圧器を設計する事で大電流化は比較的容易に行える。

EPSの生産能力を高くするためには、出力電子流を大きくすることが必要であるが、そのためには大きな電子流を引き出せる電子源（フィラメント部）が必要である。大電流電子源には多数のフィラメントを使用することになるが、この場合被照射体に均等な電子ビームを当てるために、各フィラメントから均等にビームを引き出す技術と多数のフィラメントを使用することによる発熱と真空・耐電圧への悪

影響を最小にすることが必要となる。

当社では、照射幅に対して、必要最低限のフィラメント本数でビームを均等に発生するよう最適化したフィラメント構造の開発と、電子を引き出す方式として電界を調整して電子流を制御する方式（グリッド制御）を採用することにより、エリア型EPSにおける大電流化を実現した。

この技術に大電流化に有利な変圧器型直流電源を組合せて、300kV 500mAのエリア型EPS(図8)を開発し、シート照射用としてタイヤ工場に納入した。この装置は、商用電源を使用して直流高電圧を発生させることで、電源効率90%以上の、高効率を実現した。

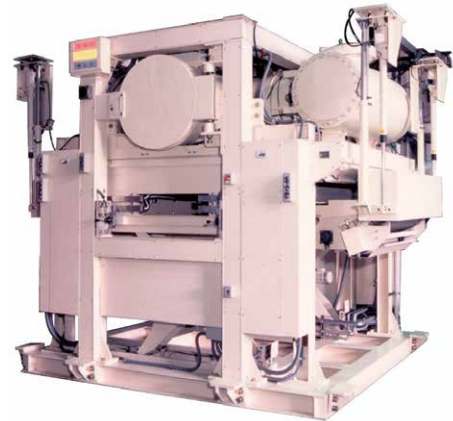


図8 300kV500mA EPS

エリア型EPSは、走査型に比べ加速管、走査管が不要であることや加速電圧が低いためX線のエネルギーが小さくX線遮蔽構造物を小さくできることから小型化が可能な装置であり、設置のしやすさなどから今後さらに採用が拡大すると期待されている。

3.3 当社EPSの製作範囲

当社EPSの製作範囲を図9に示す。走査型、エリア型を合わせて加速電圧100～5000kVまで製作でき、今後も製作範囲は拡大していく計画である。

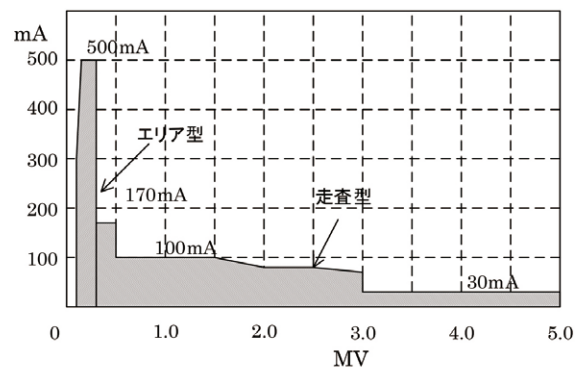


図9 当社EPSの製作範囲

3. 4 メンテナンス

EPSの適用分野は先述のとおり多岐にわたっており、納入先は全世界へ広がっている。また、EPSを構成する技術は高電圧技術、高真空技術、ビーム発生制御技術など多岐にわたり、装置を安定稼働させるためには専門技術を有する技術者による定期的、計画的なメンテナンスが必要である。

これまで、当社はEPSを400台以上納入しており、適用範囲が広がっていることから、納入台数は今後もさらに増加することが見込まれる。これら納入品すべてのメンテナンスに対応するためには、専門技術者の育成や効率的なメンテナンス計画の立案が必要である。

当社では、専門技術者の育成プログラムを作成し、研修センターと研修設備を準備して日々技術者の育成・スキルのレベルアップに努めている。

また、効率的なメンテナンス計画の立案には、対象装置の状態を正しく把握する作業が重要である。最近のEPSの制御はプログラマブルロジックコントローラ（PLC）を用いており、EPSの計測・制御に用いられているデータは、PLCの機能を使いログ記録することが可能となっている。加えて、EPSの主要パラメータについてもデジタル記録計にて記録している。

これら機能を活用して、以下のデータを蓄積しメンテナンス計画に反映させる取組みを行っている。

- (1) EPS主要パラメータのトレンドおよび消耗部品の使用時間データ（サンプリング時間1min以上）
- (2) EPSの主要パラメータのデータ（サンプリング時間100mSec程度）
- (3) 装置異常発生前後10秒間のPLC内データ（サンプリング時間10mSec以下）

これらデータはメンテナンス計画時に顧客の協力を得て入手し解析を行うが、その結果不具合が懸念される場合や消耗部品の交換が必要な場合など、それら部品の交換を含めた計画を立案し提案している。

また、これらデータはEPS稼働中にトラブルが発生した場合にも有用であり、データ解析によりトラブルの状況を明らかにでき、より正確な原因究明を行うことが可能となる。当社は、このような取組みにより、適切なメンテナンスを供給している。

4. 現在の取組みと今後の展望

現在、環境問題への関心の高まりから製品に対し新しい要求が生じている。また、EPSの適用分野の広がりから、様々な用途に合わせた新しい製品の開発も必要となっている。当社では、これらニーズに対応した装置・サービスの提供を行っている。本章では、上記の取組みや装置の安定稼働対応などEPSの今後の展開について紹介する。

4. 1 環境対応への取組み

本節では、当社におけるEPSでの環境対応への取組みを紹介する。

4. 1. 1 SF₆ガス排出量の低減

EPSに使用される直流高圧電源には保守性の向上、小型化を目的として、絶縁性能に優れたSF₆ガスを使用している。SF₆ガスはGIS（ガス絶縁開閉装置）などの電力設備をはじめとして、工業用途で幅広く利用されているものである一方、地球温暖化係数が約23500（IPCC 第5次報告書より）と高く、大気へ排出された場合、地球環境に与える影響は大きい。このため、保守点検時などにおいて、SF₆ガスの大気への排出を抑えることが重要である。当社では、保守点検時のSF₆ガス回収の際に、機器に残るガスが従来よりも低い圧力まで回収できる高性能ガス回収装置を開発した。本装置は新規装置を中心に設置を進めている。

また、既存設備に対してはガス回収装置と直流高圧電源との間に設置して、直流高圧電源からのSF₆ガス回収を補助し、回収率を向上させるブースターポンプを開発し、設置を進めている（図10）。



図10 ブースターポンプ

当社では、これら対策によりSF₆ガスの大気への排出による環境への負担を低減している。

4. 1. 2 SF₆ガス代替ガスの使用

前項にて紹介の高性能ガス回収装置の開発に加えて、SF₆ガスの代替ガスを使用したEPSの開発を進めている。まず中エネルギーのEPS（800kV 100mA）から始め、順次、高エネルギー、低エネルギーのEPSに広げていく予定である。

4. 1. 3 電源効率の改善

EPSは電子を加速するため直流高圧電源を使用しており、この部分での電力損失が全体の多くを占める。このため直流高圧電源の電源効率を上げることは環境性能向上の観点から重要である。

当社では従来から、走査型EPSでのCW回路を用いた直流電源回路においては、構成を高周波インバータ+CW回路とすることで電力消費を抑える工夫が行われており、中エネルギークラスのEPSにて電源効率80%以上を達成している。

今後、さらなる電源効率の改善を目指し取組みを行っており、インバータ内のスイッチング素子の応答性改善、CW回路に使用しているリアクトルや配線経路での損失改善などにより、より高い電源効率を実現する見込みである。

また、シェンケル型の駆動回路は真空管を使用した発振回路を使用しており、真空管はリニアアンプとして使用しているため電源効率は決して高くない。真空管をリニア動作からスイッチング動作に近づけた改良を施すことで効率改善を目指し、改良を進めていく。

4. 2 安定稼働への取組み

EPSを安定稼働させるためには専門技術を有する技術者による定期的、計画的なメンテナンスが必要であり、また最適メンテナンスを実施するためには装置状況を把握する事が重要である。

先述のとおり現在は、納入装置にデータロギングする機能を付加しており、ロギングしたデータを手動で取り込み、解析することによって、メンテナンス計画を立案する取組みを行っている。現在のシステムでは、データ収集に顧客の協力が必要であり、これらデータの自動取り込みと分析を可能とするシステムの開発を実施している（図11）。

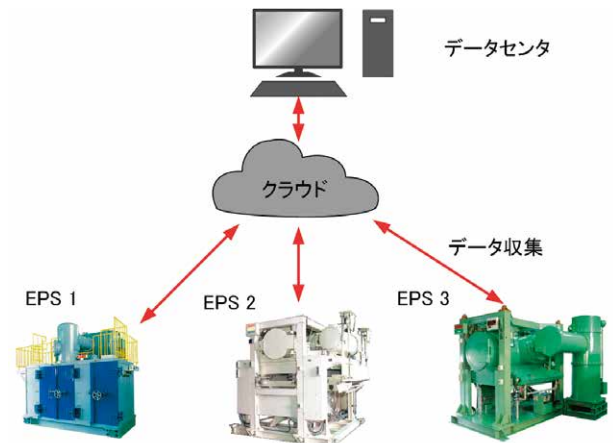


図11 データ収集システム

当社の納入装置は世界中に点在しているが、このシステムにより、各装置のデータを当社のデータセンターに集約し一括管理できるようになるほか、メンテナンスを適切なタイミングで提案できるようになる。さらに現地で実際のメンテナンスの際に、データセンターとリアルタイムでデータ共有することで現地状況の把握および現地への作業指示も可能となる。当社は本システムを通して、世界中どこでも、より良いメンテナンスを供給できる体制を目指す。

4. 3 新しい照射設備の開発

当社は、これまで高エネルギー、高出力のEPSの開発に注力してきた。これは高エネルギー装置の生産性が高く、工業用途で多く利用されてきたためであり、その結果、静止型加速器としては世界最大級の5MV 30mA機などを開発した。

一方、低出力のEPSや低エネルギーEPSについても開発を強化していく。例えば、100~150kVクラスの低エネルギーEPSは、主に印刷、塗装、硬化（キュアリング）用途で使用され、一部UVと競合する部分もあるが、照査材料が厚くなる場合や処理量が多い場合は電子線照射が必要であるため一定の需要が見込める。これら用途に特化した小型エリア型EPSの開発も期待されている。今後も、各種製造ラインにあわせた最適なEPSの開発を進めていく。

5. まとめ

EPSは実用化されてから半世紀以上が経過しており、これまでに多くの装置が開発されてきたが、新しい用途開発が絶えず行われており、今後も引き続き発展していく分野である。また、環境対応への取り組みや、メンテナンス性の向上などによる扱いやすい装置の開発など新しい時代に向けてさらなる改善が必要となっている。

当社では、今後ともこれら様々なニーズに応えられるEPSの開発に取組み、顧客のご希望にこたえていく所存である。

参考文献

- (1) 奥村 他「SDGsの達成に貢献する電子線照射技術」,日新電機技報,Vol.66 No.2,p36(2021)
- (2) 宇都宮 他「電子線照射装置の歴史と取り組み」,日新電機技報, Vol.54, No.2 (2009.10)
- (3) 濱野 他「電子線照射事業のあゆみ」,日新電機技報,Vol.62, No.1 (2017.3)

執筆者紹介



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



島村 純夫 Shimamura Yoshio
株式会社NHVコーポレーション
常務取締役