



省スペース、メンテナンス性を向上させた 新型電子線照射装置 EB-XW

EB-XW : New Compact and Maintainable Electron Beam Processing System

永井 雅浩*
Masahiro Nagai

馬場 隆
Takashi Baba

水谷 睦
Atsushi Mizutani

林 泰隆
Hiroataka Hayashi

電子線照射技術は、電線被覆の耐熱性やタイヤ用ゴムシートの流動性の改善などの多くの工業的プロセスで利用されている。(株)NHV コーポレーションはこれまでに、広範なエネルギー領域（100kV～5MV）の電子線照射装置（Electron Beam Processing System：EPS）を国内外の顧客に多数納入してきた。近年、持続可能な開発目標の達成に向けた取り組みにより、EPS に対して環境への配慮や作業者の安全確保、装置小型化の要求が高まっている。これらの要求に対応するため、我々は環境負荷の高い鉛材の使用量を大幅に削減し、保守作業の安全性を向上させた省スペースな新型の EPS（EB-XW）について報告する。

Electron-beam irradiation technology has been used in various industrial processes, including enhancing the heat resistance of wire coatings through cross-linking and improving the flowability of rubber sheets for tires. NHV Corporation has supplied numerous electron beam processing systems (EPS) within an extensive energy range of 100 kV to 5 MV to customers globally. In pursuit of the Sustainable Development Goals, there is growing demand for environmental considerations, worker safety, and equipment downsizing. In response, NHV Corporation reports on the development of a new compact EPS (EB-XW) that drastically reduces the use of hazardous lead and enhances maintenance safety.

キーワード：EB-XW、一体型タンク、鉄遮蔽、遮蔽計算、モンテカルロ法

1. 緒 言

電子線照射装置 (Electron Beam Processing System：EPS) は多種多様な製品の加工に使用されている。これまで EPS には大出力化や安定稼働が求められていたが、近年の持続可能な開発目標の達成に向けた取り組みにより、環境への配慮や作業者の安全確保、装置小型化の要求が高まっている。このような要求に応えるべく、(株)NHV コーポレーションでは主遮蔽材として鉛を使用せず、メンテナンス時の安全性を向上させ、かつ省スペースを実現した、800kV 新型 EPS（EB-XW）を開発した。

2. EB-XW の仕様

EB-XW の仕様を表1に示す。

表1 EB-XW仕様

項目	仕様
加速電圧／電子流／走査幅	800kV/100mA/120cm
直流電源方式	Cockcroft-Walton回路
遮蔽方式	自己シールド形（鉄遮蔽）
照射方向	水平照射

3. 従来装置との違い

従来装置と EB-XW の外形比較を図1に示す。

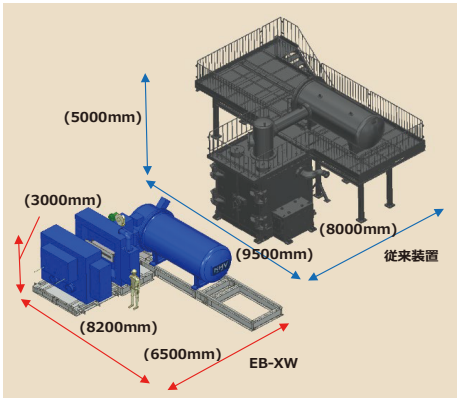


図1 EB-XWと従来装置の外形比較

3-1 照射方向

従来装置では、図2に示すように、電子線（EB）をフロアレベルに向かって垂直に射出する垂直照射が多く採用さ

れていた。垂直照射は重力方向と電子の進行方向が同一であるため、ビームラインの据付やアライメントが行いやすい。しかしその構造上、装置全体の高さが増加し、定期メンテナンス項目である加速装置部のメンテナンスが高所作業となる。そのため、EB-XW では電子をフロアレベルに対して水平に射出する水平照射を採用した。水平照射では装置全体の高さが抑えられるため設置高さの制限が緩和され、加速装置部のメンテナンスは高所作業とならない。

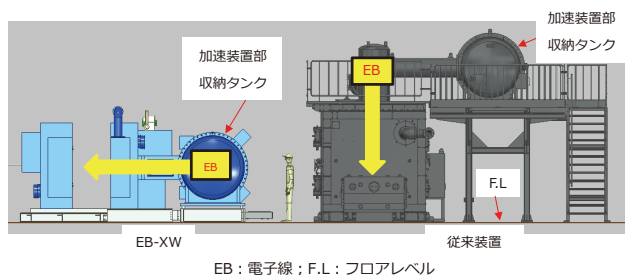


図2 照射方向比較

3-2 タンク構造

従来装置は、図3に示すように、直流高圧電源と加速装置部を個別のタンクに収納し、その間を接続用タンクによって繋ぐ管路接続形を一般的に採用している。管路接続形の場合、接続用タンクを変更することにより、直流高圧電源用タンクと加速装置部用タンクの設置場所を自由に変更することができる。しかし、タンクが小型になり、かつ加速装置部のメンテナンスが閉所空間作業となるため、メンテナンスに高いスキルと長時間を必要とする。

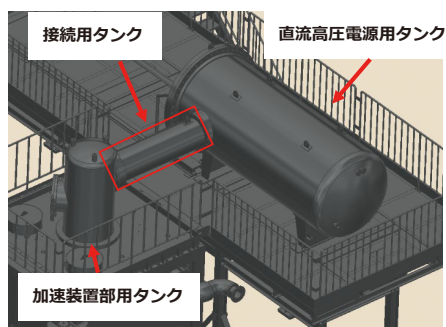


図3 従来装置のタンク構成

近年、特に海外では安全規格上閉所空間作業が制約される場合もあるため、EB-XWは図4に示すように、直流高圧電源と加速装置部を同一タンク内に横並びで収納する一体

型タンクを採用した。図5に示すように、タンクを二分割構造にすることにより、タンク解放時に直流高圧電源全体が露出され、メンテナンス性が向上している。さらに、直流高圧電源と加速装置部を切り離し、直流高圧電源を分割された片方のタンクに収納することで、加速装置部のメンテナンスが閉所空間にならないようにした。

このような構造は、従来装置よりも更に安全性が向上し、かつメンテナンスに高いスキルと長時間が不要となり、メンテナンスコストの削減に繋がると考えられた。しかし、直流高圧電源と加速装置部を同一タンク内に横並びで収納する構造は、(株)NHV コーポレーションでは初めての試みであり、直流高圧電源と加速装置部間の絶縁能力や加速装置部の冷却能力が十分に確保できるかが課題であった。

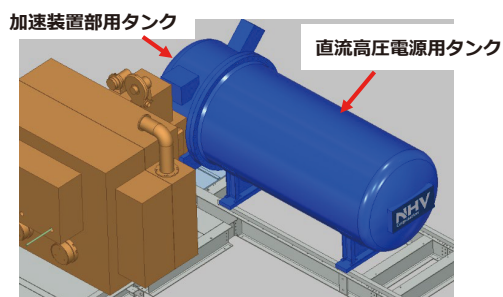
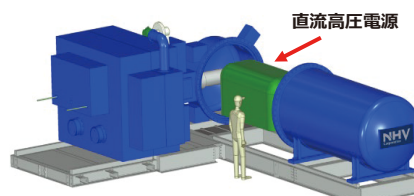
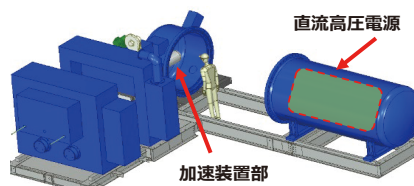


図4 EB-XWのタンク構成



(a) 直流高圧電源メンテナンス時



(b) 加速装置部のメンテナンス時

図5 直流高圧電源、加速装置部のメンテナンス

3-3 主遮蔽材

従来装置は遮蔽能力が高い鉛材を主遮蔽材とし、高強度な鉄と組み合わせた遮蔽構造体を採用していた。主遮蔽材に鉛を使用すると遮蔽体の厚みが薄くなり、装置の小型化に繋がる。しかし鉛は人体と環境に有害であり、また柔ら

かいため構造体としては扱いにくい。そのため、EB-XW ではより安全であり、加工性および流通性のある鉄材を主遮蔽材として採用した。ただし、鉄は鉛より遮蔽能力が劣るため、遮蔽体の厚みが増す。そこで遮蔽解析を行い、遮蔽厚みを最適化した。

4. タンク内冷却能力

3-2節で述べたように、EB-XWは直流高圧電源と加速装置部を同一タンク内に横並びで収納する一体型タンクを初めて採用したが、その懸念点の一つとして、タンク内の仕様温度以下への冷却が挙げられた。

EB-XWでは、直流高圧電源の熱源と電子源部の熱源が同一タンク内にあるため、双方から発生する熱を冷却する構造が必要である。冷却能力が不十分であれば、電子線加速性能が不安定になり装置故障に繋がる。

過去装置では、ガス冷却装置をタンクと外部接続し、ガス循環冷却によってタンク内温度を一定に保つ。しかし、このガス冷却装置は高価かつガス冷却装置用の設置スペースが必要となるため、EB-XWではガス冷却装置を使用しない、タンク内にラジエータとファンを設けてタンク内を強制循環冷却させる方式を採用した。加速装置部や直流高圧電源部を効率よく冷却させるためにラジエータとファンの位置、整流板の形状を検討した。図6に示すように流体解析を行い、最適な冷却機構を設けることができた。

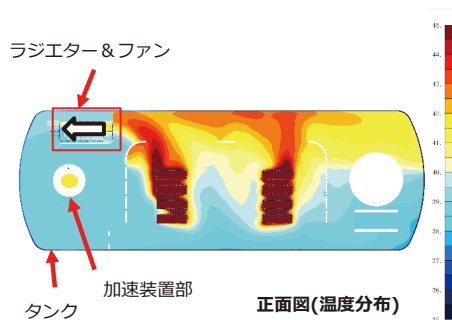
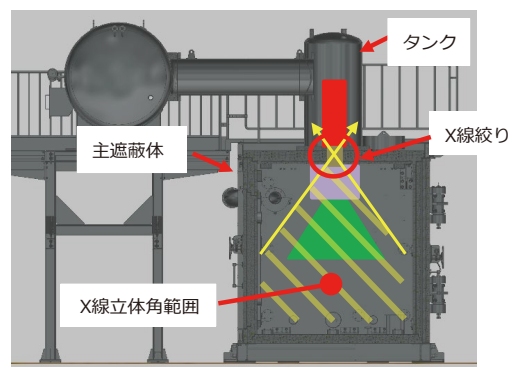


図6 タンク内温度分布解析

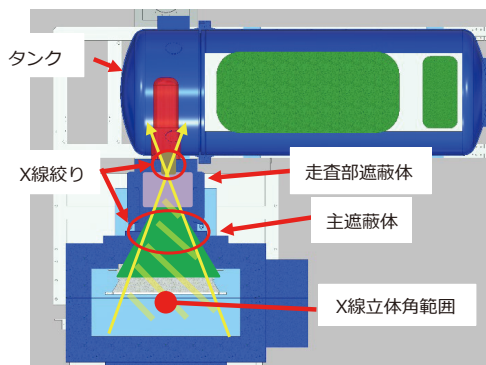
5. 遮蔽部材削減の検討

3-3節で述べたように、EB-XWでは加工性および流通性のある鉄材を主遮蔽材として採用した。さらに、加速装置部を収納するタンクに使用する補助鉛を削減すべく、ビームライン箇所の遮蔽構造の検討を行った。従来装置は、図7に示すように、走査管部全体を主遮蔽体の中に入れた構造を有する。単純な構造であるが、加速装置部から主遮蔽体が見える立体角の広がりが大きいため、主遮蔽体内で発生したX線の減衰量（絞り）が少なく、タンク壁面全体に多くの補助遮蔽鉛が使用されていた。EB-XWは走査管中

央部を主遮蔽体に貫通させ、はみ出た走査部に小さな走査部遮蔽体を設ける構造とした。これによりX線の絞り箇所が主遮蔽体と走査部遮蔽体の2箇所となり、加速装置部へのX線量が従来装置に比べて少なくなった。



(a) 従来装置（側面図）



(b) EB-XW（平面図）

図7 遮蔽構造の比較

5-1 X線遮蔽計算手法

遮蔽設計では、人が立ち入る場所の線量値を安全レベル（法令基準値以下）まで減衰させるような遮蔽材とその厚みを決定する。しかし、実環境では計算の精度に影響する要素がいくつも存在するため、安全側に数値を設定することになる。従来の遮蔽設計手法は簡易手法と詳細手法の2種であり（表2）、どちらも古くに策定されたもので、近年の計算機の進歩に対するリバランスはできていなかった。

簡易手法は、過去の実測データや経験則に依存するもので1970年代に策定され、どのような複雑な形状でも一律評価となっている。

表2 X線遮蔽設計手法毎の特徴（従来手法）

計算手法	利点	欠点
簡易手法	誰でも安全な遮蔽が設計できる	構造によらず評価が一律
詳細手法 (アルベド方式)	精度よい計算ができる	複雑構造の評価時間が 指数関数的、実質評価不可

詳細手法は、アルベド方式の理論式⁽¹⁾に従っており平面での散乱線を非常に精度良く計算できる。ただし、精度を担保するには平面かつ方向性が無視できる小さな領域に限られ、複雑構造の場合は評価時間が指数関数的に増加していくため実質評価不可である。

従来手法の問題点に対処するため、EB-XWの遮蔽計算には、遮蔽厚みの最適化を図るためEGS5^{※1}およびPHITS^{※2}による計算機シミュレーションを使用した（図8）。EGS5とPHITSの基本であるモンテカルロ法での精度は、計算したい領域に辿りついた点数が直接影響する（通常は計算値の標準偏差＝ $\sqrt{\text{点数}}$ ）。そのため、遮蔽評価地点でのX線粒子の到達数が、発生源付近に対して数兆分の1、またはそれより少なくなるような場合や、遮蔽体透過後の低線量値については、計算精度が落ちること懸念していた。計算精度を補完するため、EB-XWは遮蔽体透過後の低線量域は、いくつかのデータからの対数補間を併用した。

解析から必要な遮蔽厚みと範囲を算出し、タンク壁面の補助遮蔽鉛の厚みを最適化することができ、従来装置より75%以上鉛使用量が削減された。

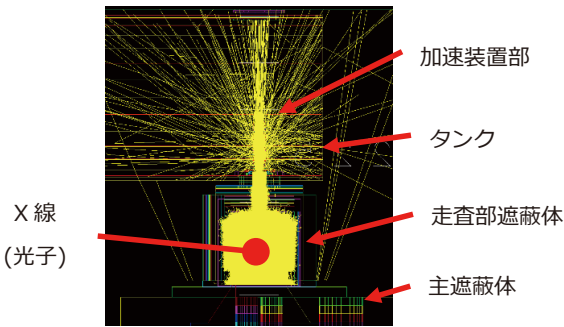


図8 EGS5解析

7. 結 言

近年、産業分野において環境や人への配慮が重要視されてきており、このような時代のニーズに沿えるよう新型EPS（EB-XW）の開発を行った。今後さらに地球温暖化や高齢化などが進むと予想されているため、今以上に厳格な環境や人への配慮が必要になると考えられる。

また、EPSでは絶縁ガスとしてSF6（六フッ化硫黄）が使用されているが、これは温暖化係数が高いため、使用制

限が今後ますます厳しくなると予想される。しかし、同等の絶縁性能を有する代替ガスは現状存在しない。そのため（株）NHV コーポレーションでは、絶縁方式を変更したEPSを開発することが命題であると考えており、現在、二酸化炭素などの自然由来ガスを使用する新たな代替方式の検討を進めている。

最後に、今回開発したEB-XWについては、500kVや1000kVへの装置展開を進める予定であり、今後も時代のニーズの変化に対応したEPSを継続して開発・製造していく。

用 語 集

※1 EGS5⁽²⁾

Electron Gamma Shower Version 5の略であり、モンテカルロ法による電子・光子輸送計コードである。スタンフォード線型加速器研究所（SLAC）を中心に開発されてきた。日本では高エネルギー加速器研究機構（KEK）が管轄している。（株）NHV コーポレーションでは2008年頃より電子線の分布計算用として活用を開始しており、2018年頃よりX線の遮蔽計算用としての活用もはじめた。

※2 PHITS⁽³⁾（論文中で使用した Version は3.320）

あらゆる物質中での様々な放射線挙動を核反応モデルや核データなどを用いて模擬するモンテカルロ法による計算コードである。日本原子力研究開発機構（JAEA）が中心となって開発を進めている。電子・光子（X線）の輸送計算にはEGS5コードを用いている（光子には独自モードもあり）。

・EB-XWは（株）NHV コーポレーションの商標です。

参 考 文 献

(1) 公益財団法人 原子力安全技術センター、「放射線施設のしゃへい計算マニュアル」、pp.2—9-2—11（2015）
(2) H. Hirayama, Y. Namito, A.F. Bielajew, S.J.Wilderman and W.R. Nelson, The EGS5 Code System. SLAC-R-730 and KEK Report2005-8（2005）
(3) T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, H.N. Ratliff, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Ishver and K. Niita, Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135（2024）

執 筆 者

永井 雅浩*：(株)NHV コーポレーション 主任



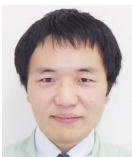
馬場 隆：(株)NHV コーポレーション 取締役
博士（工学）



水谷 睦：(株)NHV コーポレーション 理事



林 泰隆：(株)NHV コーポレーション グループ長



*主執筆者

出典元
永井雅浩 他、「新型電子線照射装置EB-XWの開発」、日新電機技報 Vol69、
No2、PP.29-33 (2024年12月)