

## X線厚み計用X線発生器の異常予兆検出システム

Abnormality Prediction System for X-Ray Generators of X-Ray Thickness Gauges

川島 優樹 KAWASHIMA Yuki 米川 栄 YONEKAWA Sakae チャラ デ アポロニヤ Chara DE APOLONIA

鉄鋼・非鉄金属などの圧延ラインで板厚測定に用いられるX線厚み計は、圧延材の形状制御や品質保証に不可欠な計測機器である。X線厚み計の故障は圧延ラインの停止につながり、特に、X線発生器の故障では交換・調整に約1日を要するため、故障前に交換を促す機能が求められている。

東芝インフラシステムズ(株)は、X線発生器の管電圧・管電流データから、故障部位による異常発生パターンを独自のアルゴリズムで統計的に分析し、異常予兆を検出・通知する異常予兆検出システムを開発した。これにより、故障前に交換を計画することで、板厚測定中の故障リスクの低減とともに圧延ラインの安定稼働の実現が可能になる。

X-ray thickness gauges play a key role in rolling lines at steel and nonferrous metal plants, measuring the thickness of metal sheets in order to control product dimensions and quality. The failure of an X-ray thickness gauge in these rolling lines generally leads to a suspension of operations. In particular, about one day is required to replace and adjust an X-ray tube in the event of failure of its X-ray generator, causing a reduction in productivity. Demand has therefore been increasing in recent years for functions to facilitate the timely exchange of X-ray tubes by means of abnormality prediction.

Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corporation has developed an abnormality prediction system for X-ray generators based on its long accumulation of experience in the development of X-ray thickness gauges for rolling lines. This system provides the user with information about abnormalities predicted by a statistical analysis method, utilizing our proprietary algorithm based on patterns of abnormal conditions from the X-ray tube voltage and tube current data collected during operation. This contributes to a reduction in operational risks caused by failures and supports stable plant operations.

### 1. まえがき

東芝インフラシステムズ(株)は、鉄や、アルミニウム、銅、チタンなどの圧延ライン向けに、厚み計や、幅計、欠陥検出装置などの計測機器を提供している。これらの計測機器は、寸法計測や欠陥検出をリアルタイムで行うことができ、圧延材の形状制御や品質保証のために不可欠となっている。

近年、設備投資・更新を効率的に行うために、設備の異常予兆検出への要求が高まっている。X線厚み計に使用しているX線発生器の異常予兆を捉えることができれば、定期メンテナンス時にその交換をあらかじめ計画することが可能となり、厚み測定中の故障リスクの低減、及びライン停止時間の短縮につながる。

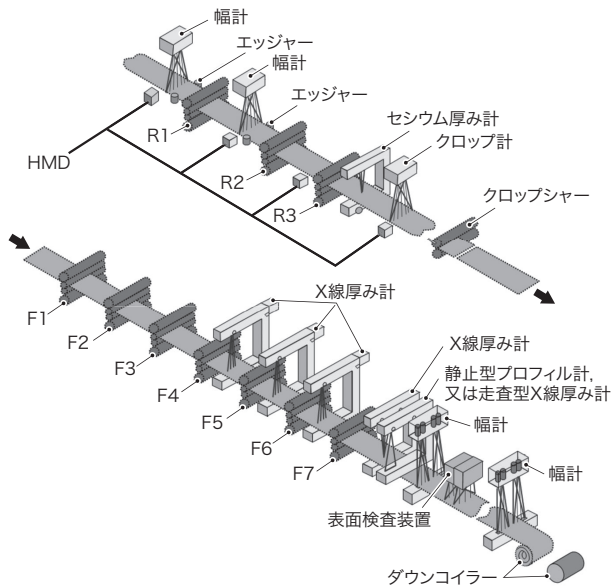
そこで当社は、X線厚み計に用いられるX線発生器の異常予兆検知システムを開発した。ここでは、X線発生器の状態パラメーターである管電圧や、管電流など4種類のデータを基に、独自のアルゴリズムにより異常レベルを計算・表示し、ユーザーに通知する異常予兆検出機能について述べる。

### 2. X線厚み計

X線厚み計は、被測定物にX線を照射し、透過したX線量から被測定物の厚みを算出する非接触の測定装置である。主に、鉄・非鉄金属プラントにおいて鋼板の板厚を測定し、品質検査や圧延機器のフィードバック制御のために使用されており(図1)、板厚制御や品質保証に関わる品質計器として扱われている<sup>(1)</sup>。

圧延ラインの稼働中にX線厚み計が故障すると、鋼板の板厚測定ができなくなり、圧延ラインが停止する。稼働中の圧延ラインでは、短い時間の停止でもライン全体の生産効率に影響を与えるため、各機器には高い信頼性が求められる。特に、消耗品のX線発生器が故障すると、用品交換を行った後、厚み計の測定精度の再確認や関連パラメーターの調整作業が必要となる。このため、ライン復旧までに約1日を要し、生産効率への影響が大きい。

そこでX線発生器の異常予兆を検出し、故障前に交換を計画できることは、圧延ラインの安定稼働や生産効率の向上を実現するために重要である。



HMD: Hot Metal Detector (熱塊検出器)  
 R1~R3: 粗ミル  
 F1~F7: 仕上げミル

### 図1. 圧延ライン概要

X線厚み計は、高温・多湿や振動・衝撃などの厳しい環境下に設置された圧延ラインにおいて、高速かつ正確な鋼板の板厚測定を可能にしている。

Outline of rolling line at steel or nonferrous metal plant

## 3. X線発生器の故障

X線発生器は、正常時には管電圧と管電流が一定値を保つように制御を行っている。X線を放射するために常に高電圧を印加しているため、X線管球やフィラメントなどの内部部品が劣化する。また、X線発生器に充填された絶縁ガスは放射線によって分解され、X線管球のガラスと反応して絶縁物を生成し、管球内側のガラス表面に付着する。図2に示すように、絶縁物がガラス表面に徐々に堆積することで、絶縁不良が発生する。

内部部品の劣化や絶縁不良に伴って、X線発生器の内部で放電が起こり、管電圧と管電流には急峻(きゅうしゅん)な変動(スパイク)が発生するようになる。図3(a)に正常時の管電圧例、図3(b)に放電が起こっている異常時の管電圧例を示す。

図3(b)の0~500sにおいてひげ状に発生している数十V程度の細かいスパイクは、部分放電の一種であるコロナ放電が起こっていると考えられる。

コロナ放電は、気中に対して起こる放電であり、断続的に放電することが多いためこの放電現象と一致する。

更に劣化が進むと、スパイクの発生頻度が増えるとともにその振幅も大きくなり、図3(b)の750~900sのように数百V程度の大きなスパイクが発生するようになる。これは、沿

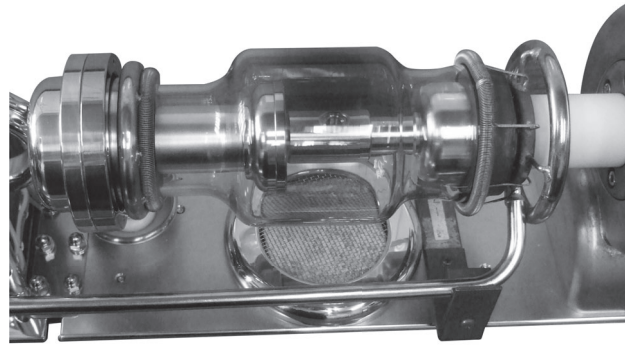
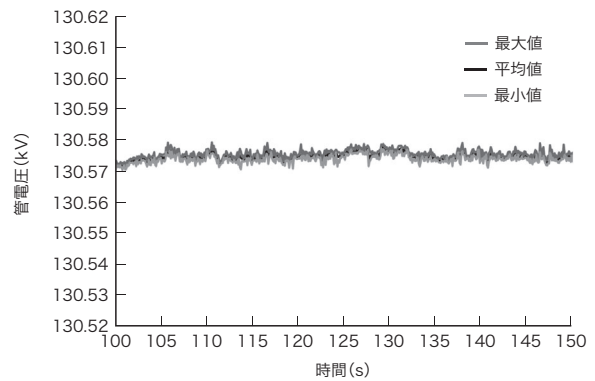


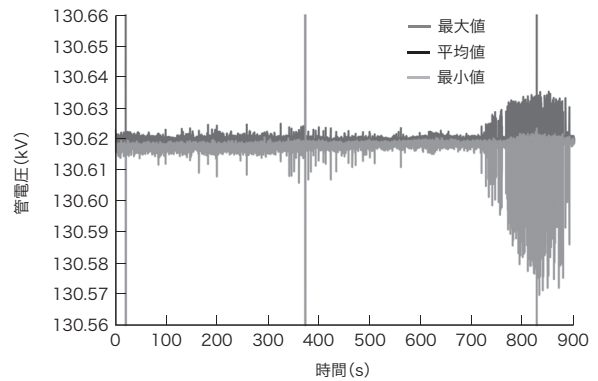
図2. 絶縁生成物が付着したX線管球

絶縁ガスの分解により、管球内側のガラス表面に絶縁生成物が付着し、放電の原因となる。

X-ray tube with insulation product attached



(a) 正常時



(b) 異常時(スパイク発生時)

図3. 正常時と異常時との管電圧の比較

正常時に比べ、異常時の管電圧は大小のスパイクが発生しており、時間経過に従って振幅、頻度ともに増加している。

Comparison of X-ray tube voltage in normal and abnormal conditions

面放電が起こっていると考えられる。沿面放電とは、複合絶縁体の境界面に沿って伸展する放電であり、沿面フラッシュオーバーは沿面放電が更に伸びて電極間を橋絡する現象である。この現象が発生すると、X線管球の電極間で放

電が起こり、数百V～数kVのスパイクが出現する<sup>(2)-(5)</sup>。

いずれの放電においても、発生時には管電圧と管電流にスパイクが現れ、経年劣化が進むにつれてスパイクの発生頻度が増える傾向がある。特に、管電圧では数kV程度の大きなスパイクが発生しやすくなる。そのため、管電圧と管電流のスパイクを検知することで、X線発生器の異常予兆を捉えられる。

#### 4. 異常予兆検出システム

##### 4.1 検出アルゴリズム

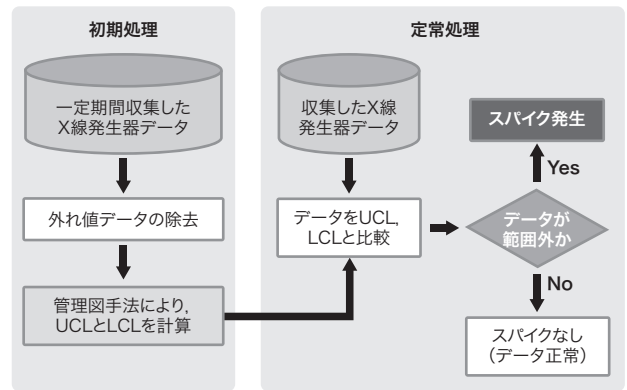
X線発生器の管電圧や、管電流などの状態データを基に、故障部位による異常発生パターンを、独自のアルゴリズムにより統計的に分析し、X線発生器の異常予兆検出を行うシステムを開発した。このシステムでは、X線発生器の状態データをリアルタイムに収集し、収集したデータからスパイクの発生を判定・監視することで、異常予兆を検出する。

まず、図4(a)左側の初期処理に示すように、X線発生器が安定稼働している状態で、管電圧や管電流などの状態データを、正常時の教師データとして一定期間収集する。収集したデータから外れ値を除去した後、管理図手法によって各データの平均値と標準偏差を求め、データの標準偏差に基づいて各状態データを判定するための基準値として、上限管理限界値(UCL)と下限管理限界値(LCL)を決定する。

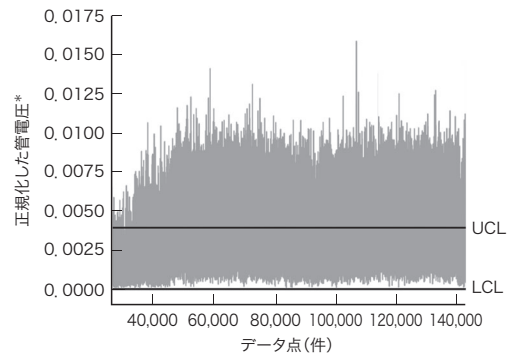
その後、図4(a)右側の定常処理に遷移し、X線発生器の状態データを監視する。データの振幅がUCLとLCLの間の範囲内であればデータは正常と判定し、範囲外のデータが存在する場合はスパイク発生と判定する。スパイクと判定したデータは、その振幅が大きいほど異常予兆として扱い、スパイクのカウント値が大きくなる。そして、スパイクの発生頻度と振幅からX線発生器の異常レベルを計算する(図4(b))。更に、どの状態データにスパイクが発生しているかによって、内部部品であるフィラメントや管球、昇圧回路の劣化や絶縁不良などの故障原因を推定できる。

##### 4.2 システム概要

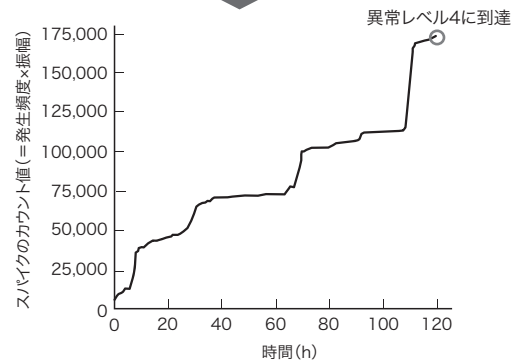
図5に示すように、X線発生器の管電圧、管電流の値は、X線発生器を制御するX線制御ユニットにアナログ信号で入力され、X線制御ユニット内でアナログ値からデジタル値に変換される。その後、デジタル値は、X線制御ユニットから制御部内の厚み演算処理PC(パソコン)を経由し、異常予兆検出処理PCに送信される。異常予兆検出処理PCでこれらのデータの収集・分析を行い、X線発生器の異常予兆を検出する。



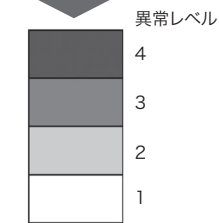
(a) 初期処理と定常処理のフロー



信号監視(異常スパイク検出)  
\*管電圧の最大値・最小値の差分で正規化



しきい値を超えた値のカウント



異常レベルの算出

(b) 異常予兆の検出フロー

#### 図4. 異常予兆検出アルゴリズム

一定時間の管電圧・管電流データを教師データとして収集し、UCLとLCLを計算した後、スパイクの発生を監視・判断することで、異常予兆を検出する。

Algorithm to predict abnormalities in X-ray generator

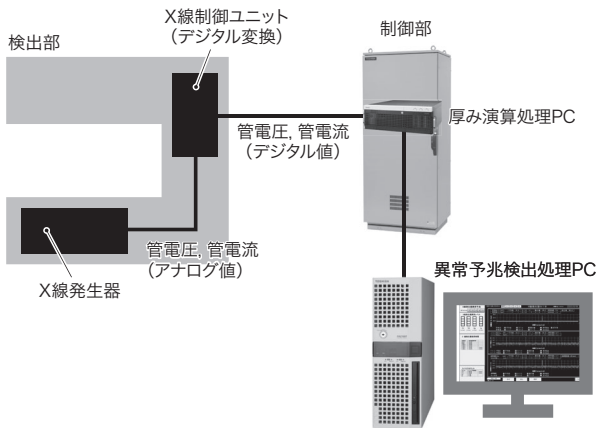


図5. X線発生器の異常予兆検出システムの構成

厚み演算処理PCから異常予兆検出処理PCに、X線発生器の駆動信号（管電圧、管電流）が送信され、異常予兆検出処理PCでデータ分析することで、X線発生器の異常予兆を検出する。

Configuration of abnormality prediction system for X-ray generators

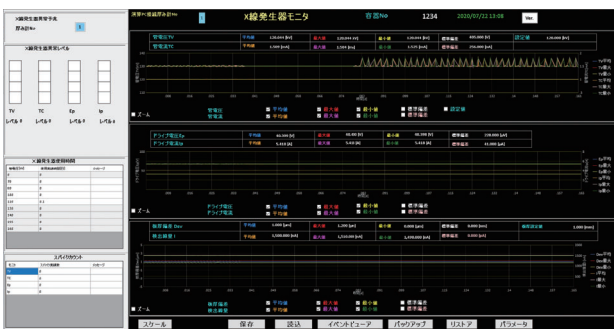


図6. 異常予兆検出処理PCのHMI画面例

管電圧・管電流データのリアルタイム表示や、過去データの表示、異常レベルの通知機能などを備えている。また、X線発生器の累計使用時間やイベントログも表示できる。

Example of human-machine interface (HMI) display of abnormality-prediction PC

### 4.3 異常予兆検出処理PC画面

異常予兆検出処理PCは、厚み演算処理PCから受信した管電圧や管電流などをグラフ表示するとともに、スパイクの発生頻度と振幅から計算したX線発生器の異常レベルをユーザーに通知する。また、X線発生器の使用累計時間の限界値を設定でき、設定した時間を超えて使用した場合は画面に表示される。

更に、図6の異常予兆検出処理PCのHMI (Human Machine Interface) 画面に示すように、厚み計が測定した検出線量と板厚値も併せてグラフ表示できる。X線発生器にスパイクが発生した場合、X線の照射量が瞬間的に変動するため、同時にスパイクが現れ測定誤差を生じる。X線

発生器内のスパイク発生時のX線検出量と板厚値も同時にモニタリングすることで、測定誤差が管電圧、管電流のスパイクによるものなのか、外乱などほかの要因によるものかを把握できる。

## 5. あとがき

今回、当社が開発した、X線厚み計に用いられているX線発生器の異常予兆検出システムについて述べた。このシステムを用いることで、X線発生器が故障する前に交換を計画することが可能となり、厚み測定中に故障するリスクを低減するとともに、ライン停止時間を短縮できる。

今後、正常から異常に移り変わる際のX線発生器データを取得し、異常予兆の検出精度の向上を図っていく。また、ライン稼働後は稼働中のX線発生器から状態データを取得し、異常予兆検出モデルにフィードバックすることで、更に異常予兆の検出精度を向上させていく。

当社は、引き続き圧延ラインや生産ラインの安定稼働や生産品質向上に貢献する計測・検査技術を開発していく。

## 文 献

- (1) 小原 哲. 新型X線厚み計TOSGAGE™-8000Aシリーズ. 東芝レビュー. 2009, 64, 5, p.54-57.
- (2) 湯本雅恵, ほか. SF6ガス分解生成物の生成過程と絶縁破壊に及ぼす影響. 電気学会論文誌A. 1985, 105, 8, p.437-444.
- (3) Melchiorre, J. J.; Mills, I. W. Factors Affecting Stability of Electrical Insulating Oils. IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1967, EI-2, 3, p.150-155.
- (4) 電気学会有機材料劣化専門委員会編. 高分子材料の劣化. コロナ社, 1958, 411p.
- (5) 斎藤幸男, 武 祐一郎共編. 電気絶縁紙. コロナ社, 1969, 621p.



川島 優樹 KAWASHIMA Yuki  
東芝インフラシステムズ (株)  
府中事業所 計測制御機器部  
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



米川 栄 YONEKAWA Sakae  
東芝インフラシステムズ (株)  
府中事業所 計測制御機器部  
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



チャラ デ アポロニヤ Chara DE APOLONIA  
東芝インフラシステムズ (株)  
府中事業所 計測制御機器部  
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.