

現場での非破壊検査高度化を目指した超小型 エックス線源開発



鈴木良一

すずきりょういち
r-suzuki@aist.go.jp
産業技術総合研究所
計量標準総合センター
分析計測標準研究部門
首席研究員

1987年3月に筑波大学博士課程前期を修了し、同年4月通産省工業技術院電子技術総合研究所入所。工学博士。2001年より組織再編により産業技術総合研究所主任研究員、2015年4月より現職。電子加速器応用技術、陽電子ビームによる材料分析技術、エックス線源開発、放射線線量計開発などに従事。

共同研究者
加藤英俊、藤原健（産総研）

社会インフラや産業インフラ構造物を有効に活用するには現場での効率的な点検・検査が必要です。エックス線を用いた非破壊イメージング技術は、インフラ構造物の主要な検査技術の1つとして期待されていますが、従来のエックス線源を用いた方法では効率的な検査が難しいという問題がありました。現場での効率的な検査を可能にするため、カーボンナノ構造体を電子源とし、小型軽量でバッテリー駆動ロボットに搭載でき、数 cm の鉄の透過イメージングができる超小型エックス線源を開発しました。

1. 研究の背景

日本国内には、高度成長期以降に建設された膨大な社会インフラや産業インフラがあり、それらを有効に活用するためインフラ構造物の効率的な点検が必要とされています。エックス線を用いた非破壊イメージング技術は、肉眼では見えない内部の状態を見ることができることから、インフラ構造物の主要な検査技術の1つとして期待されています。インフラ構造物は検査箇所が膨大にあるため、ロボットを使った自動検査技術の開発が進められていますが、検査の現場では電源確保が難しい場合が多く、小型、軽量、バッテリーで駆動し、かつ検査に必要なエックス線透過能力を有するエックス線非破壊検査システムが望まれています。

特に、産業インフラの主要な構造物の1つであるプラント配管は、鉄製の配管が保温材で被覆されているものが多く、外観からは判断できない配管の減肉が問題となっています。このような配管の減肉を精度良く検査するには、数センチメートルの鉄を透過できるようなエックス線源が必要です。しかし、そのようなエックス線源は、管電圧が 200 kV 以上必要で、従来の非破壊検査用エックス線源は大きく重く、小型のロボット等に搭載することが難しいという問題がありました。

産総研では、これまでカーボンナノ構造体を電子源とした可搬型エックス線源の開発を行ってきました。このエックス線源は、ヒーターやフィラメントが無いため、待機電力不要で、エックス線発生時にしか電力を消費せず、バッテリー駆動エックス線源に最適です。そこで、このエックス線源の管電圧を 200 kV 以上に高めるとともにサイズや重量を抑え、検査に必要なエック

ス線透過能力を有する超小型エックス線源を開発しました。

2. カーボンナノ構造体エックス線源

開発したエックス線源は、針葉樹型カーボンナノ構造体電子源に高電圧を印加して電界電子放出現象により電子を放出させ、ターゲットに電子を入射させてエックス線を発生します。針葉樹型カーボンナノ構造体電子源は、瞬間的に 10 mA オーダーの電流を出して高出力エックス線を発生し、非破壊検査を行うことができます。

針葉樹型カーボンナノ構造体（図1）は、先端がカーボンナノチューブと同等の曲率を持っており、基板側に向かうに従って太く、電界によって生じるクーロン力による破壊耐性が強い構造となっています。この針葉樹型カーボンナノ構造体の電界に弱い部分を処理工程で取り除くことで電子源の出力安定性を向上させ、エックス線管内部の真空環境を改善することでカーボンナノ構造体が破損する頻度を低くしました。これら処理後に寿命試験を行った結果、1000万ショットに相当するエックス線発生を行っても顕著な劣化は見られず、非破壊検査用エックス線源として長期間交換せずに使用できることを確認しました[1]。

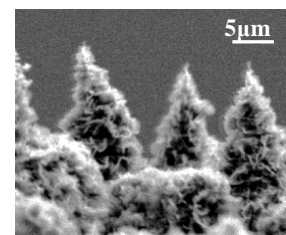


図1 針葉樹型カーボンナノ構造体

このエックス線源の管電圧を上げるため、正及び負の電極にそれぞれ 100 kV 以上の高電圧を印加できるようにエックス線管の絶縁距離を確保し、高電圧ドライブ回路もそれに対応させることで、管電圧 200 kV の高エネルギーエックス線を発生可能なエックス線源を開発しました。開発したエックス線源は、エックス線管及び高電圧部（図2の青いケース内）とドライブ回路（図2の黒いケース内）からなっており、重量は約 3 kg、ヘッド部の最大厚みは最大 7 cm です。従来の非破壊検査用エックス線源に比べて小型軽量で、可搬型の X 線非破壊検査装置や、ロボットなどに組み込むことができるようになっています。



図2 管電圧 200 kV のエックス線源

3. エックス線イメージング試験

プラント配管の減肉検査において減肉量を測定するには、配管外側エッジ及び内側エッジの位置を画像から計測して、その間隔から厚さを計算しますが、化学プラント等で多く使用されている 15 cm 径・7.1 mm 厚の配管の場合、内側エッジを画像化するには配管厚さの約 10 倍の 7 cm 程度の鉄部を透過してイメージングできる能力が必要です。

開発したエックス線源の透過イメージング能力を確認するため、エックス線源と検出器の間に 1 cm 厚の鉄板を複数枚置き、鉄板の間に 3 mm の鉛文字を挟み込んでエックス線透過像を撮像する実験を行いました（図3）。このイメージング試験では、検出器の感度はできるだけ高いことが望ましく、実験で用いた検出器は、当所で開発している長時間画像の蓄積が可能な低リーク型 2 次元フラットパネル検出器を用いました。

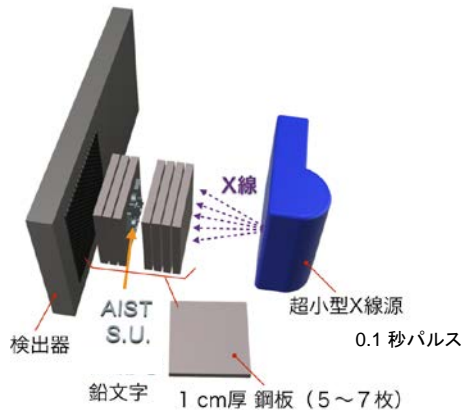


図3 エックス線イメージング試験セットアップ

開発したエックス線源を用いて、イメージング試験を行ったところ、1ショット 0.1 秒のエックス線照射で鉄板 5 枚（5 cm 厚）を透過して鉛文字の画像が得られ、18 ショットを蓄積することによって 7 cm 厚の鉄板を透過した画

像が得られました（図4）[2]。この試験での撮影時のエックス線源の消費電力は平均すると約 40 W で、小型のバッテリーで駆動させることができます。

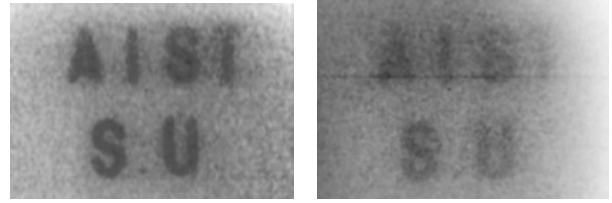


図4 鉛文字の X 線透過像(左)鉄厚 5 cm, (右)鉄厚 7 cm

4. 非破壊検査ロボットへの搭載

開発したエックス線源を搭載する配管検査用ロボットを試作し、保温材付の模擬配管でロボット及びエックス線検査システムの動作試験を行っています（図4）。このロボットは、14.8 V のバッテリーで動作するため、エックス線源及び検出器もロボットと同じバッテリーで駆動できるようにしています。エックス線源と検出器のユニットは、配管の周りを回転しながらエックス線撮影ができるようになっていて、配管サポートを回避しながら移動して検査することが可能です。このロボットにより、配管肉厚計測では保温材を剥がして測定する超音波肉厚計測とほぼ同等な計測が保温材を剥がさずにできることを確認しています。

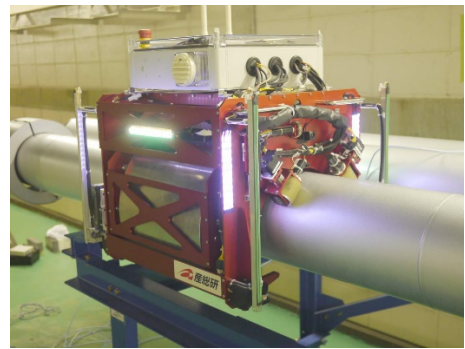


図5 エックス線非破壊検査装置搭載配管検査ロボット

5. 今後の展望

開発したエックス線源は、小型、軽量、バッテリー駆動、数センチメートルの鉄を透過する高エネルギーエックス線発生が可能という特徴があり、高感度エックス線検出器と組み合わせて可搬型エックス線検査装置とすることで、現場でのセッティングや撮像時間が短くなり、従来より効率的な検査が可能になります。また、本稿で紹介したようなロボットに搭載して検査ができるようになれば、作業の効率化だけでなく、検査条件を揃えることができ、再現性・信頼性も優れた検査が可能になると考えられます。今後、実地にて非破壊検査ロボットの性能検証試験を行い、検査の有効性を確認する予定です。

参考文献

- [1]http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2014/pr20140603/pr20140603.html
- [2]http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2016/pr20161221/pr20161221.html