

入門講座

画像検査・計測技術-2

非破壊検査用X線検出器と鉄鋼業への応用

X-ray Detectors for Non-Destructive Tests and their Applications to Steel Industry

瀧日真二
Shinji Takihi

浜松ホトニクス(株) システム事業部
第1設計部 第4部門 部員

1 まえがき

PL法(製造物責任法)が施行されてから、各種生産された製品の安全性を要求する声が高まり、それまでの抜き取り検査から全数検査へと品質を守るための検査はその検出の方法や内容を大きく変更することが求められている。また、検査装置自体にも取り扱いの安全性が必要とされ、検査装置製造メーカーも取り扱いが簡単で安全性の高い検出器を求めている。

品質を維持するための検査に必要な検査には外観検査と内部構造の検査にわけられるが、多くの場合に内部構造の検査は破壊検査によって行われるため、市場に提供される製品に対しての検査の実施が難しく、また、製品の全数を検査することも容易ではない。この製品を壊すことなく検査ができる方法として非破壊検査が生まれた。

この製品を破壊しないで検査するために用いられる検出器としては、超音波センサーや磁界を利用したセンサー、そしてX線センサーを搭載した検出器があげられる。その中でもX線を用いることで正確な内部の構造や形状が画像として得られるため、より精度の高い検査が可能になった。

2 X線検出器

2.1 X線検出器の現状

X線の歴史は100年以上だが、その画像を得る方法としてはフィルムによる撮影が長きにわたって行われており、現在でも検出エリアが広い場合には特に用いられる機会が多い。しかし、フィルムを用いた場合の欠点として、現像するまでの時間が必要なことと、リアルタイムな画像として得られないことがあげられる。また、最近の検査にはコンピュータを用いた画像解析ソフトが用いられており、画像は直接コンピュータに取り込まれる必要がある。

2.2 X線検出器の種類

X線画像を得るための検出器としては直接撮影用と間接撮影用がある。間接撮影は蛍光板でとらえた画像を鏡などを使って可視カメラで画像取得する方法で感度や解像度に不利な点がある。直接撮影はX線のエネルギーをダイレクトに検出器が受けてしまい、検出器の寿命に影響を与える弱点はあるが、高感度で高解像度が得られる利点があり代表的な検出器としては以下の4種がある。

(1) X線イメージンシファイア(X線I.I)は蛍光体を受光面に施した真空管式の2次元X線検出器である(写真1)。X線I.Iは古くからリアルX線イメージングを行う検出器として使われている。X線I.IカメラユニットはX線I.Iの出力面をCCDカメラで読み出すX線カメラであり、様々な受光面サイズがある。X線I.Iカメラユニットの最大の特長は高感度な点であり、マイクロフォーカスX線源(焦点サイズの小さいX線源)と組み合わせた高精細リアルタイムX線イメージングには最適なX線検出器である。このため工業用X線検査装置にこれまでも数多く使用されている。また、X線I.Iカメラユニットの出力ビデオ信号は従来アナログ信号であったが、最近ではデジタル信号タイプも使用されている。デジタル信号タイプ



写真1 X線I.Iカメラユニット

ブでは解像度とダイナミックレンジの向上が期待できる。

- (2) フラットパネルセンサ (FPS) はC-MOS光半導体技術を駆使した薄型2次元X線検出器である (写真2)。FPSは広いダイナミックレンジを有し、画像歪のないX線イメージングを実現する。また、小型 (薄型)・軽量なためX線検査装置を構築する上では小型化や、カメラ移動式など従来では不可能であった装置デザインをも可能にする。FPSは用途に応じて、入力面サイズ、フレームレート、長寿命、高感度タイプなどがあり、幅広い用途に利用されている。
- (3) X線CCDカメラは可視光用高分解能CCD素子の入射窓部にFOS (ファイバーオプティカルプレートに蛍光体を施したX線を可視光に変換する光学系部品) を結合し、X線に十分な感度を持たせたX線カメラである (写真3)。使用するCCD素子はピクセルサイズが極めて小さくかつCCDの面積より大きな受光面を持てるため、比較的広い範囲において高精細、高ダイナミックレンジのイメージングを実現することができるデジタルカメラである。また、その他に蛍光体を用いずX線をダイレクトに入射して画像化が可能なCCDを搭載したタイプもある。
- (4) X線ラインセンサカメラ (LSC) は1次元検出器である (写真4)。LSCの最大の特長は一度に広範囲を高速にイメージングできることである。このため、高速検査が要

求される異物検査装置を中心に幅広く利用されている。X線の量子ノイズにも強く、高いS/Nがインライン検査のためのコンピュータ上でのソフトウェアによる自動検査に対して有効である。

- (5) X線TDIカメラ (写真5) はラインセンサカメラの出力でありながら時間軸方向に128画素のセンサーを持つCCDカメラである。このため、 $48\mu\text{m}$ という高精細なセンサーの弱点である低い電気信号を128回加算できることにより大幅に感度を改善したカメラである。これにより高解像度と高感度を両立した画期的なカメラといえる。(TDI=Time delay integration) このカメラは、これまでは実現できなかった高精細な画像による検査がインラインの環境で可能になった。

3 X線の幾何学的拡大

X線イメージングにおいてはレンズを用いた拡大視が極めて困難であるため、通常は点光源 (X線源) による幾何学的拡大の手法が用いられる。

図1は、X線イメージングにおけるX線源、X線カメラと被検査体の位置関係を示している。胸部レントゲン撮影など従来のイメージングでは被検査体がX線カメラの直前点cの位置にある。被検査体はX線源から見てX線カメラの位置点

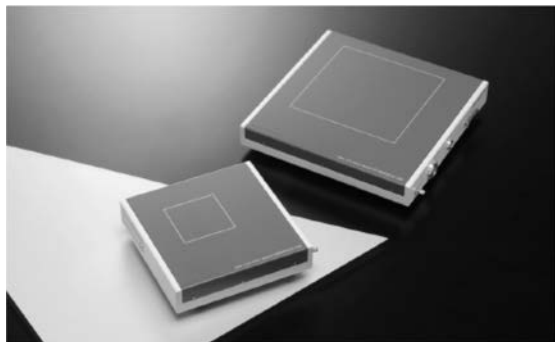


写真2 フラットパネルセンサ



写真4 X線ラインセンサカメラ



写真3 X線CCDカメラ



写真5 X線TDIカメラ

dとほぼ同じ位置にあるため、ほぼ1倍率のX線像が得られる。一方、被検査体を点cから点bへとX線源に近づけた場合は、 $D0/D1$ の倍率で表される拡大像が得られる。ここで重要な技術はX線の発生ポイントの大きさである。図2は、X線の発生ポイント（焦点）の大きさと画像鮮明度の関係を示している。写真6はマイクロフォーカスX線源（右側）とミリフォーカスX線源（左側）を使用した際の画像の鮮明度を表している。

従来のX線源における顕微拡大視の問題点を説明する。従来のX線源では焦点S1がミリメートルレベルの無視できない大きさであるため、被検査体のある一点を透過したX線がX線検出面に到達する際に、U1の大きさまで広がり、これがX線画像上のボケとなる。ICを透視した実例を写真6に示す。写真から顕微拡大視下では従来のX線源では不鮮明な拡大像になってしまうが、マイクロフォーカスX線源を使用し

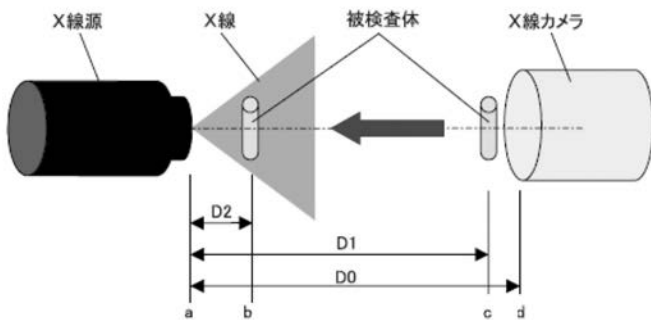


図1 X線源、X線カメラと被検査体の位置関係

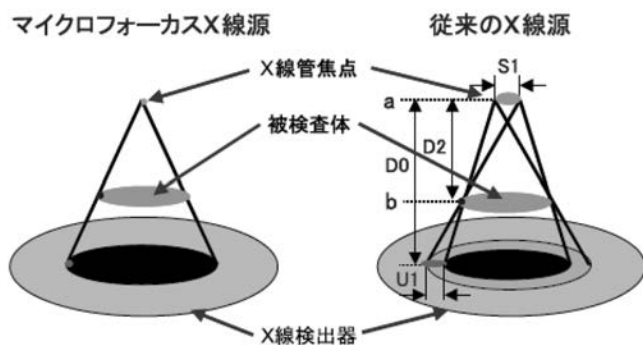


図2 X線発生ポイントの大きさと画像鮮明度

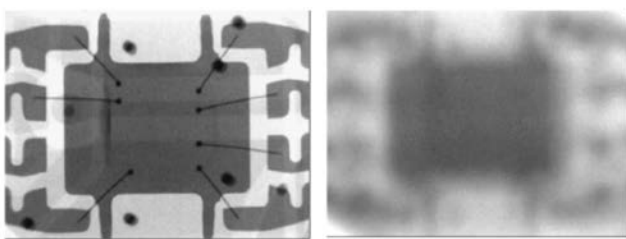


写真6 X線源のフォーカスサイズによる画像の比較（ICの内部）
左：マイクロフォーカスX線源との組み合わせ画像
右：ミリフォーカスX線源との組み合わせ画像

た場合は鮮明な画像が得られることがわかる。このような背景から小型部品や、高密度部品の内部観察においてはマイクロフォーカスX線源が必要不可欠となっている。

高画質な画像を得るためには、高解像度の検出器と高精細のフォーカスを有したマイクロフォーカスX線源が必要になる（写真7）。被検査物の要求検出サイズに応じたX線源とカメラの選択が重要な課題となる。

4 X線のリップルによる画像への影響

2次元カメラに比べ、ラインセンサカメラはスキャン速度が高速で蓄積時間が短いため、X線の出力にリップル（変動）がある場合には画像に影響が現れる。2次元カメラは長い蓄積時間の中でリップル分は平均化され1フレーム当たりの輝度に大きな違いが出ない。しかし、ラインセンサカメラでは1ラインごとの輝度が変わってしまうため、走査方向に縞状のノイズとして輝度差が現れる。このため、ラインセンサで高画質を求めるためにはリップルの少ない出力のX線源の選択が重要となる（図3）。

5 X線の管電圧、管電流の関係

X線の出力を制御する方法は、X線管球（X線を発生させる真空管）に加える管電圧と管電流を制御することで行うことができる。管電流はその変化に応じて比例的にX線の出力を制御することができる（図4）。それに対して管電圧はその変化に対して指数関数的にX線の出力を変化させる（図5）。

X線で得られる画像は、検査物を透過したX線で作られる画像、いわゆる「影」である。そのために、検査対象物ごとにX線の出力を変化させ最適なエネルギーを選択する必要がある。これによって透過したX線の画像は高いダイナミックレンジを持つカメラによって、これまでになかった高輝度分解能の画像として得ることができるようになった。写真8は樹脂から金属まで幅広い素材を一度に表現可能できる12

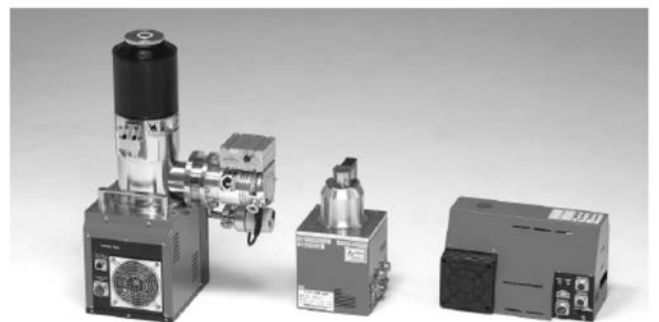


写真7 マイクロフォーカスX線源（開放管型：左 密閉管型：中、右）

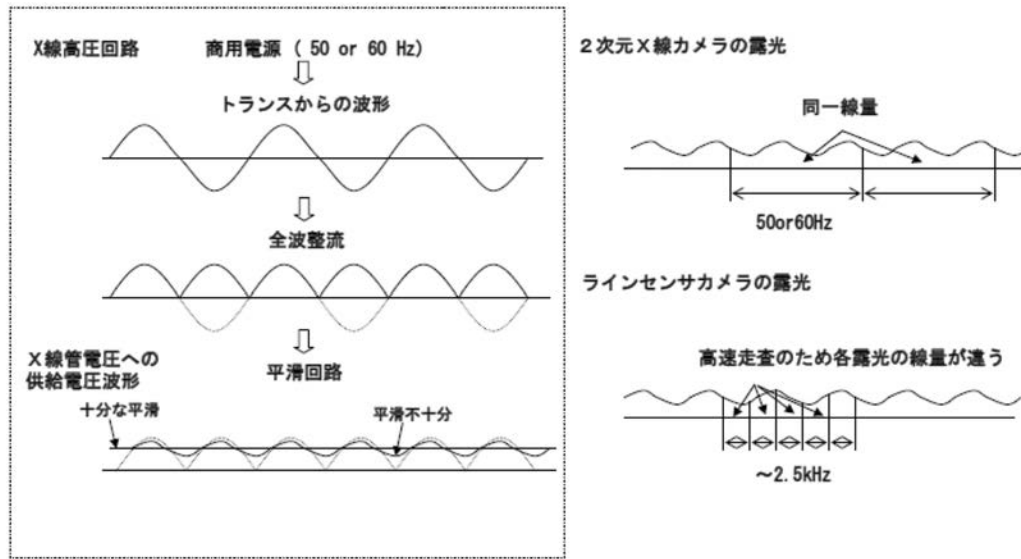


図3 X線のリップルが与える画像への影響

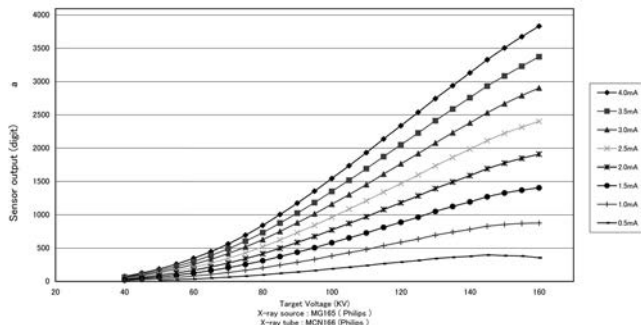


図4 X線の管電流を変化させたグラフ

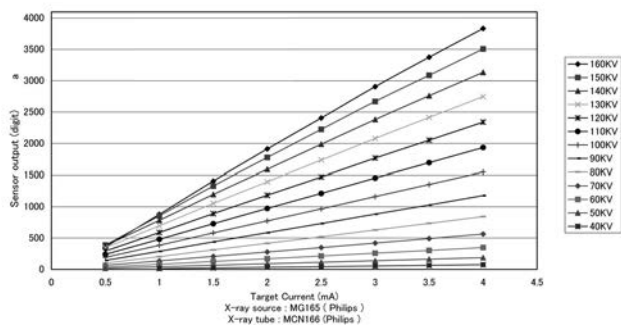


図5 X線の管電圧を変化させたグラフ

ビットの参考画像である。（12ビットは4096階調の輝度分解能がある。）

6 ラインセンサカメラによるX線の漏洩線低減

X線ラインセンサカメラはX線の照射域をスリット状にすることで、被検査物の被曝量を少なくできるだけでなく装置からの漏洩線を少なくすることができるので装置の安全性を実現することができる。特にインライン検査にX線

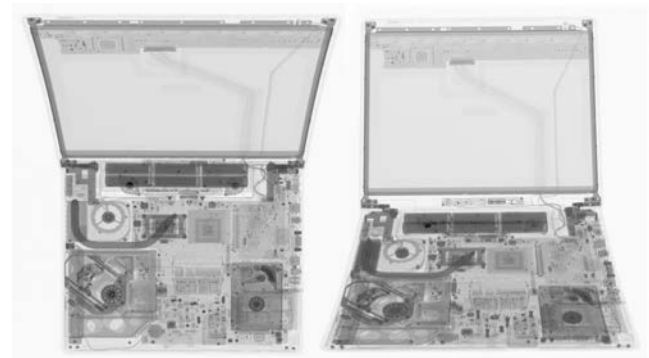


写真8 ノートパソコンのX線高輝度分解能画像

を用いた場合、装置に被検査物の入口と出口を設ける必要がある。この開口部からのX線の漏洩が安全性に大きく影響がある。今まではそれぞれの開口部に長いトンネル状のX線防護カバーを設ける必要があったが、X線ラインセンサカメラを用いることで長い防護壁は必要なく装置の全長も短くすることが可能になった。これは、たとえばX線の照射を5 mmの幅のスリット状にして、250 mm平方を検出する場合と、同じ250 mm平方を二次元検出する場合では実際の検出域に対して照射域の面積は約1/50になるので散乱線もその比率で少なくすることができる。つまり開口部への散乱線も大幅に低減することができるのである（図6）。さらに、X線ラインセンサカメラは1ラインのスキンスピードを最高240 μ sまで早くすることができる。これにより、被検出物に対しては0.4 mm幅当たり240 μ sの被曝に抑えられるので散乱線の漏洩、被検出物への被曝量の両方を少なくすることができる。

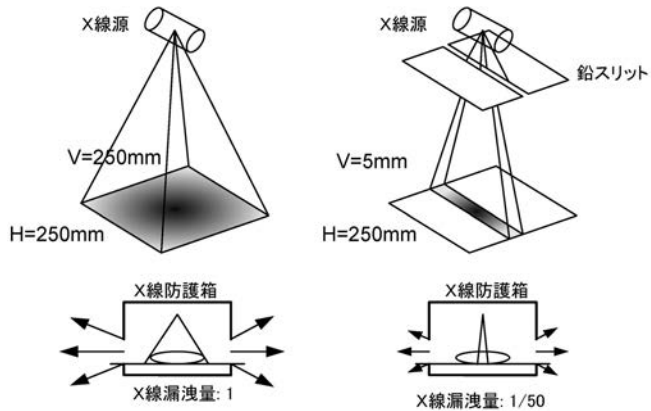


図6 二次元照射と一次元照射の比較

7 参考画像から方向付けられる インライン検査

7.1 実取得画像

ここでは実際の検査サンプルの取得画像によってX線による検査の可能性に関して紹介する。

- (1) 写真9は、プレスされた板金の厚みをX線によって計測した例である。矢印で示された部分は、基準より薄くなった部位を示し、強度を失っていることを示している。このように、X線は同一な素材であれば厚みを計測する手段として用いることが可能である。
- (2) 写真10は、250 mm厚のコンクリート壁内の鉄筋と水道用塩ビパイプ、電気配線用の樹脂フレキシブルパイプを画像上に一度に表現した例である。管電圧160 kVでコンクリートとその他の組込まれた異なる材質を同時に画像化できている。現状のフィルム検査では現像までに時間がかかることや、検査箇所の特定を推測で行わなくてはならないなどの欠点がある。また、超音波方式は水の入った水道管と鉄筋を誤認する可能性があり、破断した鉄筋を確認できない欠点がある。このX線ラインセンサカメラを用いる方法であれば短時間で画像化できるほか、デジタル画像として保存することや、輝度値の違いによるコンクリートの密度や内部構造の解析評価を行うことが可能になると考えられる。
- (3) 写真11は、配管の溶接ムラとボイド不良の例を示している。X線ラインセンサカメラを用いることにより、長尺な検査物を連続して検査することが可能になる。
- (4) 写真12は、炭素鋼の溶接部位を検査した例である。16 mmの厚みの炭素鋼に施されたV字溶接箇所内にある空間を検出することができる。

7.2 環境温度に依存しない出力安定性

これらの画像から、実際にはソフトウェアを用いた画像処

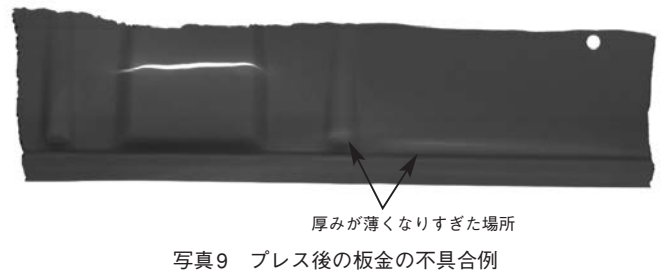


写真9 プレス後の板金の不具合例

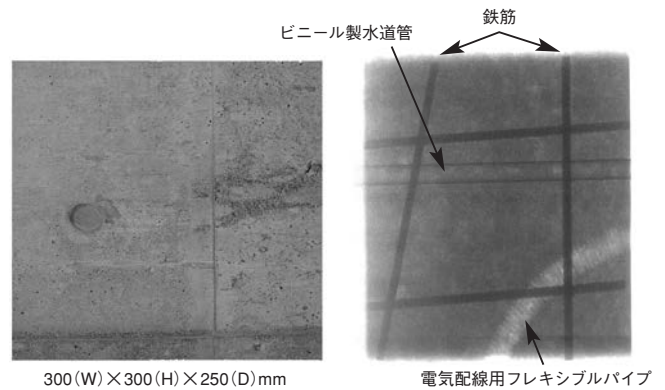


写真10 コンクリート内構造検の査例

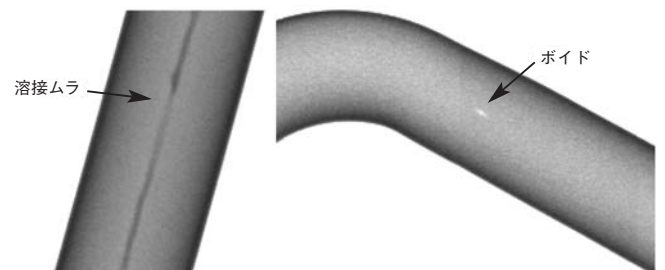


写真11 配管の溶接ムラとボイド不良の例

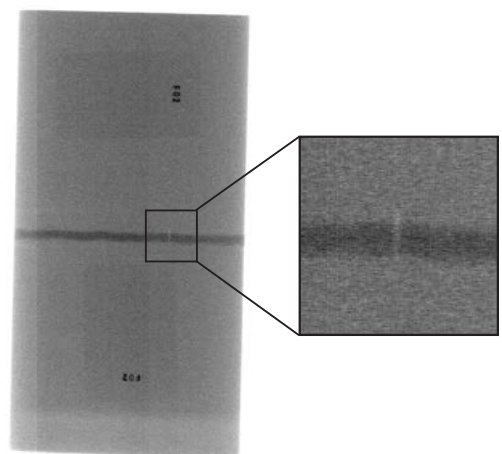


写真12 炭素鋼の溶接部位検査の例

理により全数検査を行う処理系の構築が必要となる。このインライン検査用の検出器としてカメラを使用する際の条件として、環境の温度の変化に対応している必要がある。X線ラインセンサカメラには環境温度が変化しても出力されるデー

タに影響が及ぼされない機能が盛り込まれている。これにより、製品の使用温度範囲内では温度を一定に保つなどの特別な配慮をすることなく安定的に使用することができるのである。このこともこのX線ラインセンサカメラの大きな特徴といえる。

7.3 メンテナンスのタイミングの重要性

インライン検査での重要な項目として、メンテナンス時のラインを止める時間を短くするということがある。このために、このX線ラインセンサカメラには様々な機能が盛り込まれている。その一つに、X線源及びカメラの状態を監視する機能がある。これは、使用時間の経過によるそれぞれの状態を都度確認することによりメンテナンス時期の予測に用いることができるのである。また、装置化した際のアプリケーションにより、ある一定期間その寿命を延ばし、使用を続けることもできるので、その間にメンテナンスの計画をたてられる。ラインが止まることによる生産の支障を軽減することが可能になるものと思われる。また、カメラ自体のメンテナンスも出来る限り短時間で行えるようにインラインを意識した仕様となっている。カメラの信頼性もあがり、長時間のX線照射が行われた場合も未出力となる画素は無く輝度の低下

のみであるので、ゲイン改善回路やX線源のエネルギーを増すことにより良好な画像を長く保つことが可能になる。

8 まとめ

これまで紹介してきたように、X線ラインセンサカメラをはじめとする新しいデジタルX線検出器は検出力やフィールドでの安定性、メンテナンスを計画的に構築できるなどインライン非破壊検査市場において様々な有利な機能を生かして利用をされはじめてきている。しかし、X線の検査という歴史から鑑みれば、デジタルイメージングとしてはまだまだはじまったばかりといえる。今後は可視、赤外、紫外などの今までの多くの市場で既に利用されている検出器やカメラと同様にデジタルX線検出器が簡単かつ安全に扱うことができるようになったことが広く理解され、その検出のノウハウを、それまでに培った既存の画像処理や製造技術など合わせて非破壊検査に応用する技術を、それらを必要とする市場にインライン非破壊検査のスタンダードとして幅広い分野に需要が高まるものと期待される。

(2008年1月7日受付)