

XR75 シリーズ X 線検査機の開発

Development of XR75 X-ray Inspection System

八木将博 Masahiro Yagi, 木場廣幸 Hiroyuki Koba, 菊池壽晃 Toshiaki Kikuchi, 斎藤直也 Naoya Saito,
井上 学 Manabu Inoue, 永塚一毅 Kazuki Nagatsuka, 三谷 聡 Satoshi Mitani

[要 旨]

長寿命とクーラーレスを特長とする新型の X 線検査機を開発した。長寿命を実現するために、従来に比べ X 線の検出感度を大幅に改善した X 線検出器を新たに開発した。本検出器を用いて装置を構成すると X 線発生源の出力を低減させることが可能となり、X 線発生源を構成する X 線管の寿命を従来機の 3 倍とした。また、X 線発生源の出力を低減させることにより装置の発熱を大幅に抑制することができ、新たな熱設計の工夫を加え、クーラーレスの装置を実現した。

1 まえがき

X 線検査機が食品製造工程の検査に本格的に導入されて十数年が経過した。この間、対象とする食品は、肉、魚介類、農産物などの一次産品に始まり、菓子、冷凍食品、麺類などに代表される加工食品へと幅広く用いられるに至っている。対象とする食品の範囲を広げるためには、対象食品の幅、高さなどの形状や、材質に応じて装置の構造や性能を工夫し、装置にバリエーションを持たせていくことが重要であった。対象食品の大きさに対応するため複数のベルト幅の製品ラインナップを揃えてきたのはその一例である。また、厚みが 100 mm 以上のチーズなど分厚い食品の検査では、X 線が十分に透過するように 100 keV の X 線が出力可能な X 線発生源の導入を進めたこともこの一連の開発の流れのうえにあった。このように初期の開発では、まず検査が可能な装置を具現化し、検査対象を広げるために製品ラインナップを充実させることを中心に進めてきた^{1)~4)}。

ところが、実際に装置を導入されたお客さまからは、装置のコア部品である X 線発生源と X 線検出器の寿命が短く、短期間での交換が必要であること、装置の冷却に用いているクーラの電気代が予想以上に掛かることなど、ランニングコストの改善を望む声が聞かれるようになってきた。この要望に応えるため我々は、長年にわたり基本性能の改良に取り組んできたが、今回この課題を改善できる技術の獲得に成功した。この技術は、検出感度の優れた X 線検出器と低出力の X 線発生源とを組み合わせることで成り立っている。本技術を導入した装置は、X 線発生源の出力が小さいため X 線管に与えるダメージが抑えられ、また冷却用絶縁油の耐久性が向上し、結果的に X 線発生源の寿命を延ばすことが可能になった。また X 線発生源の出力が小さいため、X 線にさらされる X 線検出器のダメージも抑えられ、結果として X 線検出器の寿命を延ばすことにもつながった。さら

に、X 線発生源の消費電力が小さいため、発生する熱量が小さくなり、新たな熱設計の工夫を加えることにより、従来の装置で必需品であった装置冷却用のクーラを省略することも可能になった。本稿では、本装置の概要を紹介する。また、装置の改版に当たり装置の使い勝手も改良したのでその内容も併せて紹介する。



図 1 X 線検査機の外観

2 X 線検査機

新たに開発した X 線検査機は、これまでの当社の装置と同様に X 線発生源、X 線検出器、搬送ベルトより構成され、搬送ベルトで搬送される被検査品の X 線透過画像を採取し、この画像を画像処理する基本機能を踏襲している。この章では、装置の動作原理を紹介するとともに、X 線発生源と X 線検出器の寿命について解説する。

2.1 動作原理

図2に本装置に採用されているインライン式X線検査機の基本構成を示す。装置は、X線発生源、ラインセンサ型のX線検出器、ベルトコンベアなどの搬送機構から構成されている。X線管から出力されたX線がベルトコンベア上に照射され、ベルトコンベア下に配置されたX線検出器で連続的に撮像している。X線検査機は、被検査品をベルトコンベアで搬送し、X線検出器上を通過させることで、被検査品のX線透過画像を取得する。X線検査機で食品に混入した異物を検出する場合、この被検査品のX線透過量の情報をもつ画像に、画像処理アルゴリズムを適用することで食品の影響を低減し、高感度な異物検出を実現している。

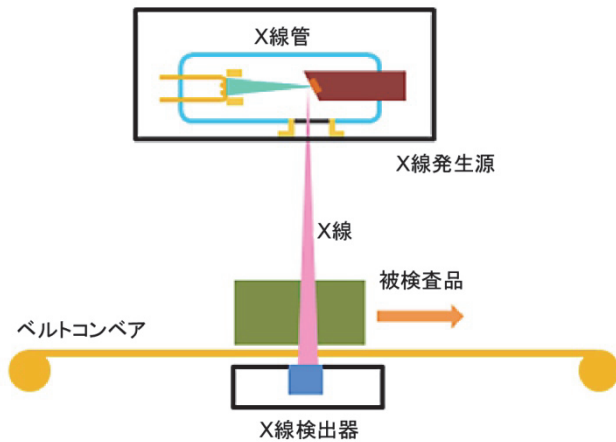


図2 X線検査機の構成

2.2 X線管の寿命

図3に本装置に採用されているX線管の基本構造を示す。X線管は主に、フィラメント、ウエネルト、ターゲット、アノード、ベリリウム窓、フランジより構成されている。これらの部材はガラス容器の中に設置され、 10^{-6}Pa 程度に真空封止されている。X線を発生させるには、フィラメントを加熱し熱電子が放出できる状態を維持し、フィラメントとターゲットの間に数十kVの高電圧を印加する。フィラメントから飛び出した熱電子は、ターゲットに衝突した段階で急激に運動エネルギーを失い、このとき、制動X線が発生する。ターゲットの角度は、 90° 方向にX線が発生されるように設計されており、発生したX線はベリリウム窓に到達し、その後この窓を透過し必要な場所に照射されることになる。

X線管の寿命を左右するのは2つの要素である。その1つは、フィラメントの断線であり、もう1つはX線管の真空度の低下である。フィラメントの断線の対策は、長年にわたり改良が進められ、今日では主材料であるタングステンに副材を混ぜることで寿命を延ばす工夫が行われている。一方、真空度の低下は、X線管に用いられて

いる部材の中に含まれるガスが真空封止した管内部に出てくるアウトガスが原因である。製造段階で部材に混入したガスを十分に取り出す処理が行われるが、処理には限界があり、完全に取り除くことはできない。このアウトガスはX線管の動作中においては、フィラメントから飛び出す電子が周りの部材に衝突することで副次的に部材からはじき出されるが、X線管球の出力を上げX線を多く発生させる場合に、より多くのガスが飛び出すことになる。従ってX線管の出力を下げる、すなわちX線量を下げるとアウトガスが少なくなり、結果的に真空度の低下を緩やかにすることができる。この対策により、X線管の寿命を延ばせるのである。このように、X線管を高出力ではなく低出力で使うことが寿命を左右する重要なポイントである。

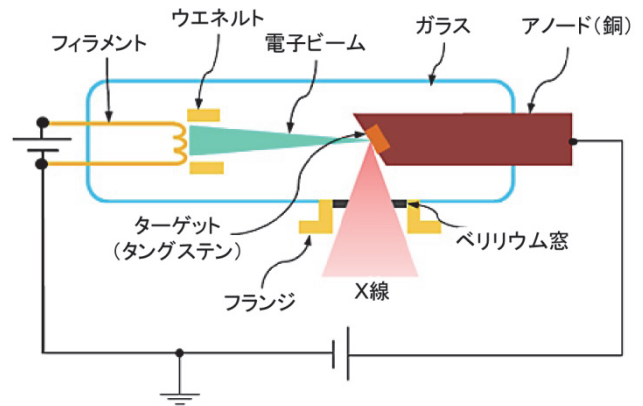


図3 X線管の構成

2.3 X線検出器の寿命

図4に示すようにX線検出器は、シンチレータ、フォトダイオードアレイ、読み出し回路より構成される。X線の検出原理は以下のとおりである。まず、入射してしてきたX線がシンチレータに到達するとX線は可視光に変換されフォトダイオードに到達する。フォトダイオードは、可視光を電荷に変換し、その電荷を接続された読み出し回路へ導く。読み出し回路は電荷を貯めるコンデンサとこの電荷を外部に取出すスイッチング回路が設けてあり、スイッチング回路をコントロールすることにより必要に応じて電荷を取り出すことができる。この電荷の量を測ることにより透過したX線の強度を測定することができる。

X線検出器の寿命を左右する要因はシンチレータの劣化と、フォトダイオードの劣化の2つである。シンチレータの劣化は、X線の照射により、X線を可視光に変換する効率が低下する現象である。一方、フォトダイオードの劣化は、X線の照射により感度そのものが低下する現象である。X線検出器をシンチレータとフォトダイオードの組み合わせとして捉えた場合、2つの劣化の合成が検出性能のトータルの劣化として現れる。最終的にこれらの現象は、セ

ンサである X 線検出器のダイナミックレンジの低下に繋がり、あるレベルより低下した場合に検出器を交換する必要があるため、X 線検出器の劣化は、X 線の照射のトータル線量により進行の度合いが決まるため、X 線検出器の寿命を延ばすには X 線のトータルの線量を減らすことが肝要である。従って、出力が小さな X 線源を装置に用いるとトータルの X 線量を抑えることができ、その結果として X 線検出器の寿命を引き延ばすことにつながる。

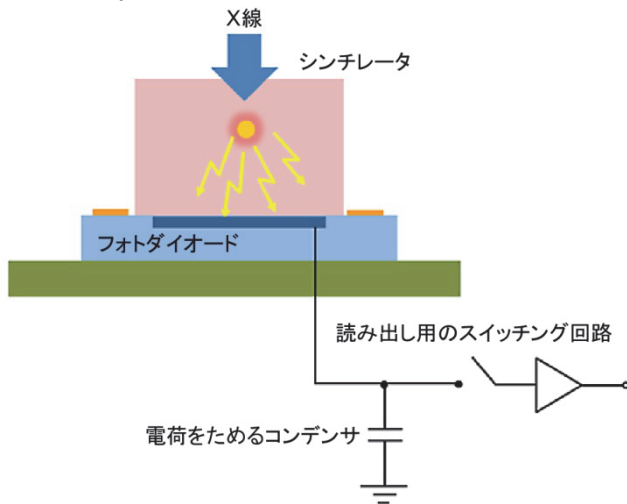


図4 X線検出器の基本構成

2.4 X線発生源の発熱

当社の X 線発生源は、絶縁油で満たした容器に X 線管を設置した構造である。絶縁油には 100 kV 程度の高電圧に印加される X 線管の放電を防ぐための絶縁の役割と、X 線管から放出される熱を冷却する 2 つの役割がある。図 5 に X 線発生源の基本構造を示す。図で分かるように、X 線管は、容器の底部に設けられた穴の上に X 線管のベリリウム窓が一致するように固定されている。容器の中には、X 線管を余裕を持って浸す量の絶縁油が入れている。容器の上部には放熱フィンが取り付けられており、このフィンを通して油の温度が許容値を超えないように熱を放出している。絶縁油は、高温により炭化が進行し、絶縁性能の低下が起きる。この現象は、高温状態が長く続くほど進行し、絶縁性能が下がってくると絶縁油の交換が必要になる。劣化により絶縁性能が低下してしまうことを防ぐことが長期にわたり X 線発生源を連続的に使用することになり、最終的にランニングコストを下げるのが可能になる。このためには、X 線管の出力を押さえた状態で運用できる X 線検査機の設計が大変重要な課題となってくる。

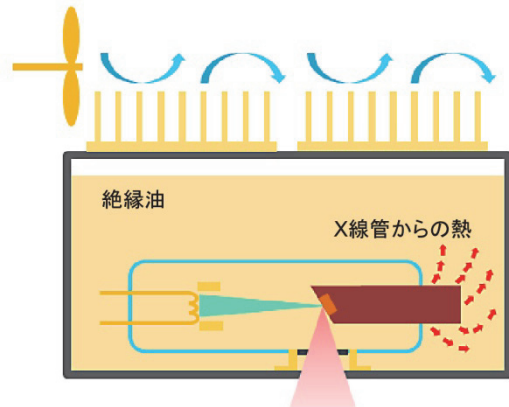


図5 X線発生源の構成

3 開発のポイントと実現手段

本装置の開発の目的は、センサ部である X 線発生源と X 線検出器の性能を見直し、長寿命とランニングコストを下げることであった。以下にその実現に向けた開発の実際の手続きを説明する。また、装置の開発に合わせて画面操作の改良を進め使い勝手を改良した。その具体例についても併せて説明する。

3.1 長寿命化

X 線検査機の部品の中で寿命が短い部品は、X 線管である。先にも述べたように故障モードは大きく 2 つあるが、重要なのは、真空率の低下により放電が発生し、安定的に X 線が発生できなくなる故障モードへの対策である。この対策は、X 線管の製造品質を向上させ、真空度の低下を防ぐ方法をまずは思い付く。改良には、X 線管の部材を厳選したり、X 線管の製造段階でエージングの時間を長くするなどの方法を取るようになるが、コストや歩留まりを考えるとほぼ限界にあり現実的な解決方法ではない。これに代わる方法は、X 線管の装置での運用条件を緩やかにし、真空率の低下をできるだけ遅くすることにより寿命を引き延ばす方法、すなわち延命措置である。この方法は、X 線管の出力をできるだけ下げ、X 線管内で発生するガスの量を低下させることで実現できる。具体的には、X 線管のフィラメントに流す電流量を押さえることで、ガスの発生を抑制することができるのである。今回の X 線検査機の開発では、X 線の出力を下げた状態で運用する方式の実現を最大の目標とした。

上記の目標を実際の装置で実現するには、X 線量の低下による装置の検出感度の低下を補う必要があるが、これを可能にするには必然的に X 線検出器の検出感度を向上させることが必要となる。この X 線検出器の開発こそが、今回の装置の開発の成否を左右する最大の技術的な課題であった。そこで我々は、試行錯誤を繰り返して、最終的に検出感度を向上できる X 線検出器の開発に成功した。

この結果、X線管の出力を押さえながら従来の検出感度を維持するという本装置のコア技術を獲得することができ、目的を達成することができた。図6に新規開発のX線検出器を含むこの装置のセンサ部の構成を模式的に示す。図で明記しているようにX線検出器の感度を工夫により2倍程度に改良し、X線管から発生する熱量を抑えることが可能になり、X線管を3倍長寿命化することに成功した。

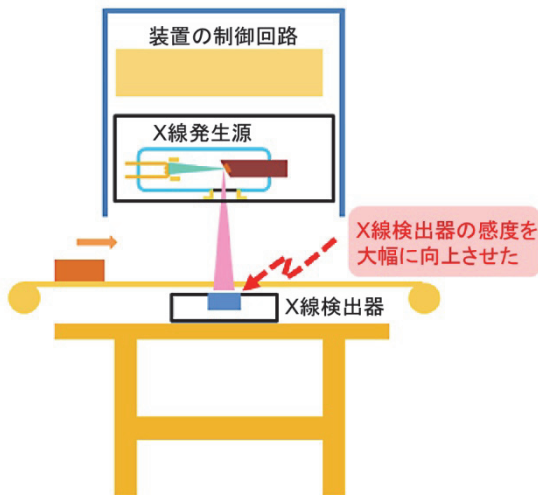


図6 センサ部の模式図

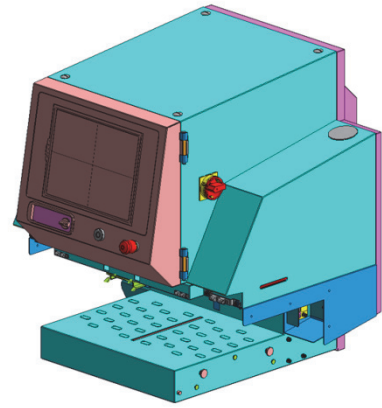
3.2 熱設計

X線管の出力を低下させ、X線管から発生する熱を減少させることは、装置の熱設計を大幅に簡略化することにつながった。前章でも述べたように今回の開発では、具体的に発熱量を30%減少させることができた。また、シミュレーションを用いた新たな熱設計の工夫を加えることにより、従来のX線検査機で必要であった冷却用のクーラを省略することが可能になった。ここでは、シミュレーションを用いた熱設計について解説する。

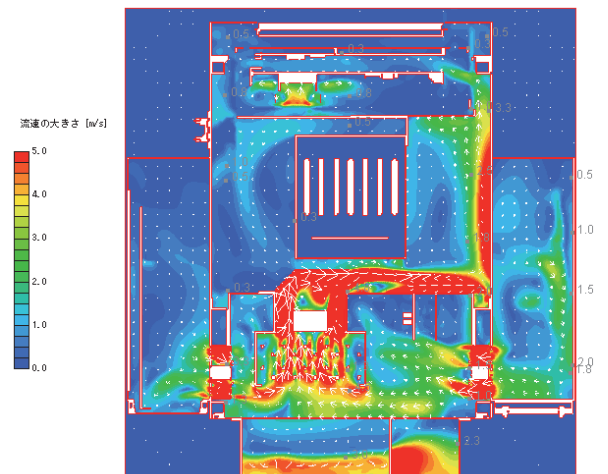
図7に装置の主要部の概略図と設計に用いた流体解析シミュレーションの一例を示す。熱設計では、有限要素法をベースとする熱解析シミュレーションと流体解析シミュレータを駆使し、クーラレスの冷却構造を実現した。図7(a)は、装置のセンサ部を含む主要な部分を示している。この形状を実際にシミュレーションし、熱の分布、ファンを付けた場合の空気の流れなどを総合的に評価し設計を進めた。図7(b)は、流体解析シミュレーションの一例である。赤く表示される部分は空気の流量が多いことを示している。熱を放熱するために装置内にどのような流路を設計し、どこに放熱ファンを配置すると効果的であるかなどの具体的な形状を数値的に比較することで最終的な形状を設計することができた。

以上述べたように、実際の開発では熱設計にシミュレーションを

導入することにより、空気の流れを最適にコントロールすることが可能になり、センサ部のX線の出力を減少させ発熱量を減少させる改良と合わせることで、冷却用のクーラを必要としない、クーラレスの装置を実現することができた。この結果、消費電力を抑えるランニングコストの低い装置を提供することが可能になった。



(a) 装置の主要部の概略図



(b) 流体解析の一例

図7 流体解析シミュレーションの一例

3.3 操作性の改善

装置を新規設計するにあたり、装置の操作性の改善にも取り組んだ。ここではその例を2つ紹介する。まず最初の例は、自動設定機能の追加である。新たに開発した自動設定の機能を従来機と比較した形で表1に示す。表1に示す機能は、装置を適切に運用するために必要な主な機能をリストアップしている。従来の装置では、基本的な「異物検査」と「質量検査」の2つの機能は自動設定が可能であったが、そのほかの9項目は、必要に応じて1つ1つ手動で行っていた。これに対し、新規に開発した装置では、検査対象領域を適切に設定する各種のマスク機能や品物の個数や欠品の検査、さらには、包装材への食品の噛み込みを検査する機能など合

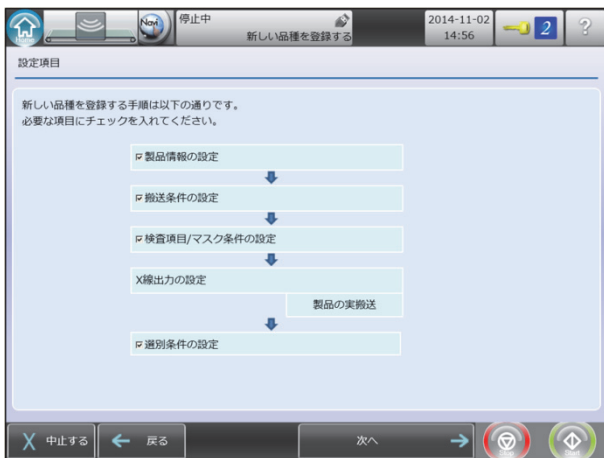
計で6つの機能が新たに自動設定できるようになり、装置の扱いに慣れていない作業員でも容易に使えるようになっている。

表1 自動設定が可能な機能

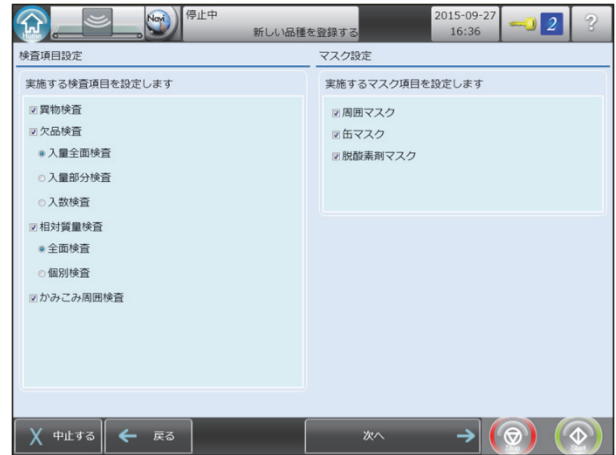
○:対応 未:未対応

No.	機能	新型 X 線検査機	従来機
1	異物検査	○	○
2	質量検査	○	○
3	周囲マスク	○	未
4	缶マスク	○	未
5	脱酸素剤マスク	○	未
6	欠品検査	○	未
7	個数検査	○	未
8	噛み込み検査(範囲)	○	未
9	割れ検査	未	未
10	欠け検査	未	未
11	噛み込み検査(形態)	未	未

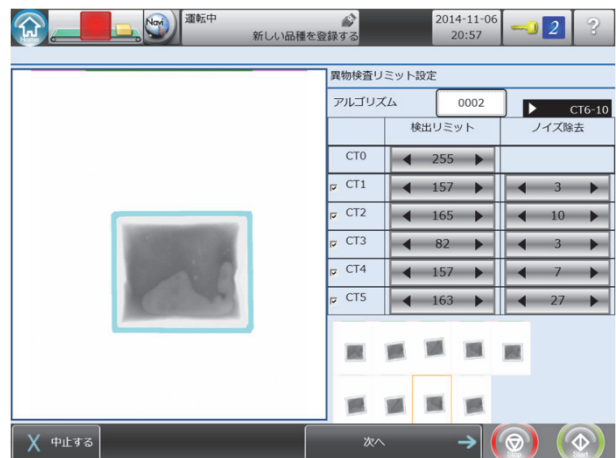
図8に検査対象であるレトルトカレーの設定画面の例を自動設定の一例として示す。図中の(a)初期画面は、自動設定のための初期画面である。全体の設定項目とそのフローが示してある。(b)は、必要な検査項目とマスク機能を設定する画面である。続く(c)は、実際に検査するレトルトカレーを装置で複数回搬送し画像処理アルゴリズムを自動で設定している画面である。最後の(d)は、自動設定した項目を通知し設定内容を確認する画面である。このように自動設定機能を利用することにより煩わしい設定が不要になり、作業効率が飛躍的に改善された。



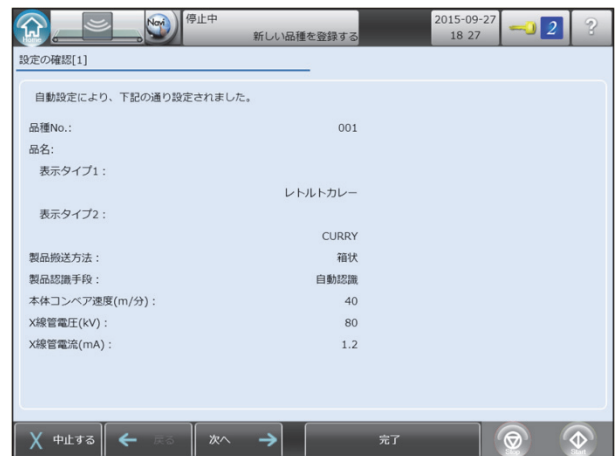
(a) 初期画面



(b) 検査項目とマスク機能の設定



(c) レトルトカレーの検査アルゴリズム自動設定



(d) 自動設定完了を通知する画面

図8 自動設定の画面例

自動設定機能の追加のほかに、今回の開発に合わせて、操作画面の階層構造の構成の見直しを行い、設定時に画面の階層を遷移する回数をできるだけ減少させる工夫を行った。これにより、より設定がしやすい装置に仕上げることができた。表2はその効果を

新型と旧型の X 線検査機で比較した例を示す。表で示すように、画面タッチ、画面遷移の回数を 1/2 以下にすることができ、設定に要する時間を 1/3 にすることができた。

表 2 設定画面の階層の構造見直しによる効果

項目	新型 X 線検査機	旧型 X 線検査機
画面タッチ数	58 回	110 回
画面遷移数	15 回	41 回
所用時間	20 秒	62 秒

以上説明したように今回の操作画面の構造設計では、お客様の要望を元に取扱説明書を参照せず設定を完了できることを意識して行った。その結果、従来機に対し、飛躍的に操作性を向上することができたと考えている。

4 主要規格

図 9 に装置の寸法を、また、表 3 に本開発の X 線検査機の主要規格を示す。

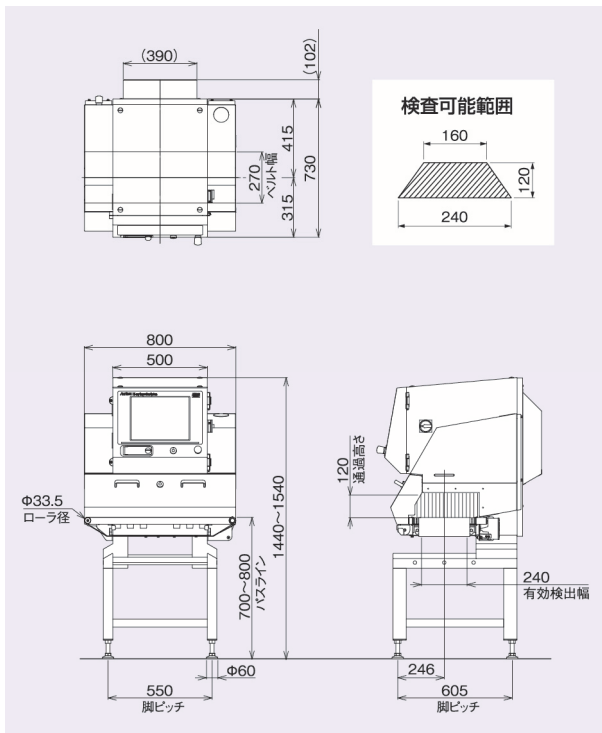


図 9 外観図

5 むすび

食品の製造現場では、X 線検査機の長寿命化が求められてきた。これは、突発的な製造ラインの停止により、生産がストップし、生産計画に多大な影響を与えてしまい、結果的に生産コストの上昇に繋がってしまうからである。また突発的な故障により、高額な部品交換の費用が発生し、お客さまの予算の計画にも多大な影響を与えてしまうことも、課題となっていた。この課題を解決するため、我々は、新規開発の高感度 X 線検出器と従来の X 線発生源を組み合わせることにより、長寿命な X 線検査機を開発した。本装置では、X 線発生源の出力を従来の装置より低減することが可能で、X 線管と X 線検出器のダメージを低減し、2 つの主要部品の寿命を延ばすことで、装置全体の寿命を延ばすことを実現した。また、X 線発生源の出力を押さえることで装置の発熱量を削減することが可能になり、これまで本装置で必需品であった冷却用のクーラを省略し、クーラレスに仕上げることができた。これにより、消費電力を 30% 抑えることができ、生涯コストを 20% 以上削減させることができた。本装置の開発は、お客さまのご要望の一部を解決したにすぎない。さらなるご要望に応えるためにも新たな課題の解決に向けた取り組みを進めて行く予定である。

参考文献

- 1) 阿部:
“X 線異物検出機 KD7203AW の開発”, アンリツテクニカル 80 号, pp.81-89(2002.1)
- 2) 綿引, 武田, 三谷, 山崎, 井上, 木場, 斎藤, 宮崎, 和田, 金井:
“デュアルエナジー方式 X 線異物検出機の開発”, アンリツテクニカル 87 号, pp.53-59(2012.3)
- 3) 金井:
“異物検出機の原理と適切な運用方法”, アンリツテクニカル 89 号, pp.44-52(2014.5)
- 4) 込山, 大森, 酒田, 斎藤, 大津, 井上, 井上:
“医薬品用 X 線検査機の開発”, アンリツテクニカル 90 号, pp.43-49(2015.5)

執筆者



八木 将博
アンリツインフィビス㈱
開発本部
第2開発部
プロジェクトチーム



木場 廣幸
アンリツインフィビス㈱
開発本部
第2開発部
プロジェクトチーム



菊池 壽晃
アンリツインフィビス㈱
開発本部
第2開発部
プロジェクトチーム



斎藤 直也
アンリツインフィビス㈱
開発本部
第2開発部
プロジェクトチーム



井上 学
アンリツインフィビス㈱
開発本部
第2開発部
プロジェクトチーム



永塚 一毅
アンリツインフィビス㈱
開発本部
共通技術部
プロジェクトチーム



三谷 聡
アンリツインフィビス㈱
開発本部
第2開発部
プロジェクトチーム

表3 主要規格

形名	KXS7522AWCLE	KXS7522AVCLE	KXS7534AWCLE	KXS7534AVCLE
X線出力	管電圧 30~80 kV, 管電流 0.4~3.3 mA, 出力 12~100 W			
安全性	1.0 μSv/h 以下 安全装置によるX線漏洩防止			
表示方式	15インチカラーTFT液晶			
操作方式	タッチパネル(タッチプザー付)			
検査可能範囲	最大幅 240 mm 最大高さ 120 mm		最大幅 390 mm 最大高さ 220 mm	
ベルト幅	270 mm		420 mm	
品種数	200 品種			
ベルト速度/搬送能力	10~60 m/min 最大 5 kg		10~60 m/min 最大 5 kg	
	60~90 m/min 最大 2 kg		—	
	10~40 m/min 最大 10 kg(オプション)		10~40 m/min 最大 10 kg(オプション)	
電源/消費電力	100~240 VAC, 単相 50/60 Hz, 700 VA 以下(標準)			
質量	250 kg	255 kg	305 kg	310 kg
使用環境	0~35℃ 相対湿度 30~85%, ただし結露しないこと			
保護等級	コンベア部:IP66 準拠 コンベア以外:IP40 準拠	全面 IP66 準拠	コンベア部:IP66 準拠 コンベア以外:IP40 準拠	全面 IP66 準拠
外装	ステンレススチール(SUS304)			

公知