

デュアルエナジー方式 X 線異物検出機の開発

Development of Dual-Energy X-Ray Inspection System

綿引 広明 Hiroaki Watabiki, 武田 俊一 Toshikazu Takeda, 三谷 聡 Satoshi Mitani, 山崎 健史 Takeshi Yamazaki,
井上 学 Manabu Inoue, 木場 廣幸 Hiroyuki Koba, 宮崎 格 Itaru Miyazaki, 斎藤 直也 Naoya Saito,
和田 俊介 Syunsuke Wada, 金井 貴志 Takashi Kanai

[要 旨]	デュアルエナジー方式とアンリツ独自の信号処理技術を搭載し、困難とされていた被検査品の一部が重なった状態でも高感度に異物を検出可能な KD74 シリーズ X 線異物検出機を開発した。本方式は医療分野で応用例があったが、その技術を食品生産ラインなどで使用される異物検査装置に応用し、性能を飛躍的に向上させた。また、本機は異物検査機能だけではなく、噛み込みや欠品等の形状検査機能も搭載し、高度な品質管理に貢献できる検査装置とした。
[Summary]	By applying a dual-energy method and our original signal process technology, we have developed a new KD74 Series X-ray inspection system with enhanced sensitivity. The system can detect contaminants inside partially-piled products, which was extremely difficult for conventional systems. We applied the dual-energy technology that had been already used in medical field to our inspection systems for food production, and dramatically improved the contaminant detection. Additionally, the new machine provides with shape detection functions such as package check or missing product detection, which will surely contribute to high quality control in food production.

1 まえがき

食の安全、安心に対する消費者の意識は、昨今の食品事故を背景に高まっている。特に、食品への異物混入事故は、異物の種類によっては消費者に健康被害を与える場合があるため、食品メーカーは異物の混入を防止する生産ラインや、誤って異物が混入した場合、それを検出し排除するための異物検査装置の導入に力を入れている。

従来から食品生産ラインでは異物を検出するために金属検出機が数多く導入されてきた。金属検出機は、被検査品がセンサを通過する時の磁界の変化を計測することで、金属異物が混入した食品を検出することができる。しかし、食品の素材や形状の違い、包装材の違いなども磁界の変化に影響を与えるため、小さな金属異物の検出に限界がある。また、食品に混入する異物は、生産装置由来の金属だけではなく、原材料由来の石やプラスチック、骨、ガラスなど様々であり、それらの異物は検出する事ができない。

当社は上記の顧客要求に応えるため、約 15 年前から X 線を使用した X 線異物検出機の販売を開始し、2000 年には従来機の性能を約 4 倍に向上させ、かつ、価格を約 1/2、設置スペースを約 1/3 に抑えた KD72 シリーズの販売を開始した。それまで食品生産ラインの異物検査装置として金属検出機が一般的だったが、X 線異物検出機もラインに本格的に導入されるようになった。

その後の KD73 シリーズでは対象被検査品を拡大するためのラ



図 1.1 デュアルエナジーセンサ搭載 X 線異物検出機の外観

External view of Dual-Energy sensor X-Ray inspection system

インナップの拡充とさらなる高感度化を行い、最新の KD74 シリーズでは内容物がシール部分に噛み込んでいないかを検査する噛み込み検査機能、製品の梱包数の不足を検出する欠品検査機能、製品の欠けや割れを検出する形状検査機能を搭載することで、異物を検出する装置から多機能な検査により高度な品質管理を支援する装置へと進化している。

一方で、X線による検査装置は、その透過量の濃淡情報を基に被検査品や検出対象の特性に合わせて最適化する画像処理技術の進歩により性能が向上したが、基データである透過量を制御することが困難なため飛躍的な性能の向上には限界があった。この課題を解決するために、新しくデュアルエナジー方式の新機種 KD7416DWZ(図 1.1)を開発したので、その概要を紹介する。

2 従来の X 線透過検査とその課題

X 線異物検出機¹⁾は、X 線発生源、コンベアベルトと X 線検出器から構成されている(図 2.1)。コンベアベルトにより搬送される被検査品に X 線を照射し、被検査品と異物の X 線の透過度合いの違いから、異物混入の有無を判定している(図 2.2)。実際の被検査品は図 2.2 のような単純な形状の被検査物は少なく、表面に様々な凹凸があり、これにより被検査品の厚さが変化することで X 線の透過度が不均一となり、異物が混入している事と誤判定するケースが多々ある。そのため、透過度が低い領域の面積や、その周辺領域との透過度の変化の差から、同じ透過量でも異物と厚さを区別する画像処理技術を高度化させてきた。しかし、複数の被検査品が重なりかつその部分の大きさが異物と同程度の大きさである場合(図 2.3)、画像処理技術だけで対応するのは困難であった。

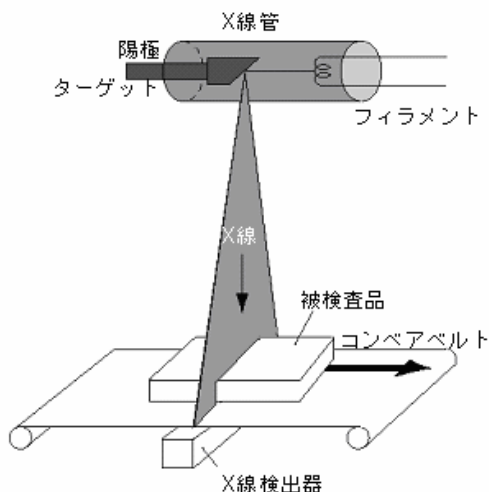


図 2.1 X 線異物検出機概略図

Principle of X-Ray inspection system

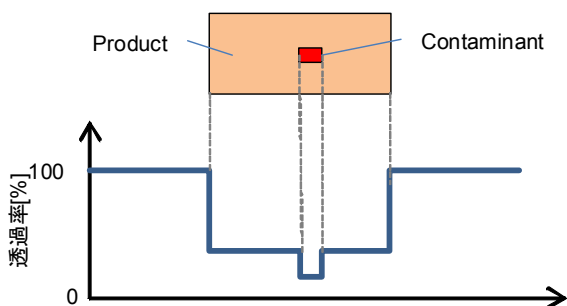


図 2.2 被検査物と異物に X 線照射したときの透過率の模式図

A schematic view of x-ray transmittance by irradiating a product and a contaminant

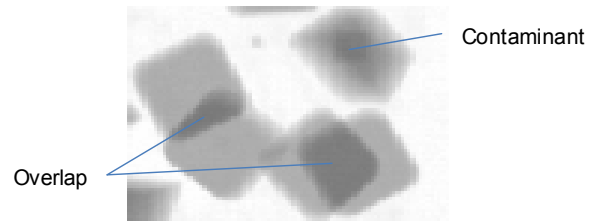


図 2.3 X 線透過画像に写った被検査物の重なりと異物

The overlaps of the products and the contaminant on the x-ray image

3 デュアルエネルギー法

(1) 原理

デュアルエネルギー法は、エネルギーサブトラクション法とも呼ばれ、2 種類のエネルギー(波長)の X 線透過情報の差を利用した検査方法である。

ある物質に強度 I_0 の単一エネルギーの X 線を照射したとき、透過後の強度 I は以下の式で表される。

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

μ は減弱係数、 x は物質の厚さを示す。それぞれの単位は一般的に $\text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 cm である。両辺の対数を取ると以下の式で表される。

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\mu x \quad (1)$$

左辺の透過率を表す式が減弱係数と厚さとの積となり、単純な画像コントラストでは物質を区別できないことを示す。

それに対して、2 種類のエネルギーの X 線の透過率の対数を除算あるいは減算すると、厚さの影響を取り除くことが可能である。減算の場合は以下の式で表される。

$$I_L = I_{0L} \exp(-\mu_L x), \quad I_H = I_{0H} \exp(-\mu_H x),$$

$$\ln\left(\frac{I_L}{I_{0L}}\right) - k \cdot \ln\left(\frac{I_H}{I_{0H}}\right) = 0$$

$$k = \mu_L / \mu_H \quad (2)$$

下付き文字の L と H はそれぞれ、低エネルギー側と高エネルギー側を示す。(2) 式のとおり、被検査物を構成する物質の μ_L / μ_H を利用すれば、減算結果は 0 となる。一方、異物を構成する物質の μ_L / μ_H が被検査物のそれより大きいか小さいとき、両者の区別が可能となる。例えば、アルミニウム(異物)と水(被検査物: 食品)の場合、25 keV と 50 keV の減弱係数の比 μ_L / μ_H はそれぞれ 5.4、2.4 となり(図 3.1)、区別は可能である。

この手法を X 線画像に応用すると、被検査物の重なり部分の画像コントラストは重なっていない部分と同程度になり、異物が混入している部分の画像コントラストはそれより濃くなることが期待される。そうなれば、異物の検出性能が向上する。

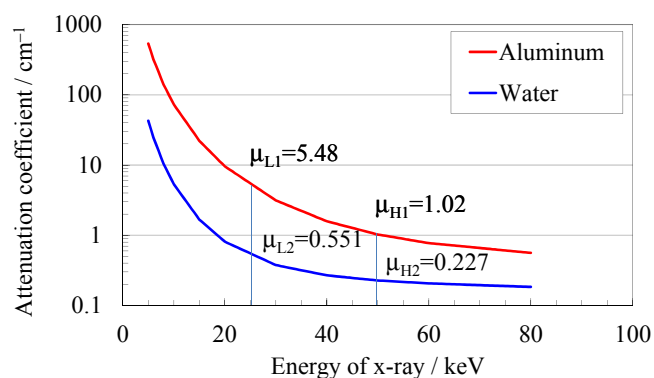


図 3.1 アルミニウムと水の減弱係数 μ
Attenuation coefficients of aluminum and water

(2) 実現手段

デュアルエネルギー法の実現には 2 種類のエネルギーの X 線画像が必要である。実現手段としては以下の 2 点が考えられる。

- ① 2 組の X 線発生源と X 線検出器を用いて、異なるエネルギーの X 線撮像を行う。
 - ② 1 つの X 線発生源と、高低 2 つのエネルギー画像を同時に出力する X 線検出器で X 線撮像を行う。
- 前者は高いデュアルエネルギー法の効果が期待できるが、2 組の X 線発生源と X 線検出器による 2 回の撮像の位置

精度を検出分解能以上に維持するための搬送上の工夫が必要である。一方、後者は低エネルギー画像と高エネルギー画像の差が前者に比べて小さく、デュアルエネルギー効果に制約があるが、撮像が 1 回のため搬送の影響を受けない利点がある。今回は、後者の利点を重要視し、一つの X 線発生源と X 線検出器(デュアルエネルギーセンサ)の組み合わせを選択した。

4 従来機との感度比較結果

開発した装置 KD7416DWZ のデュアルエネルギー法の効果を従来機種 KD7416DWH と比較した。比較項目は、3 章で説明した重なりのある被検査品への効果がわかるように、ブロック状のチョコレートを選定した。図 4.1 に新機種と従来機種の異物の検出結果を示す。図において赤い表示が異物を検出できたことを示している。図で分かるように新機種は従来機種に比べ圧倒的に赤い斑点の数が多く、多くの異物を検出できている。特に、従来機種にくらべガラスプレートやゴムなどの比較的密度が低い異物の検出率が高いことが分かった。これらの結果から、デュアルエネルギー法は、X 線異物検出の高感度化に大変有効な手法であることが確認できた。表 4.1 に新機種と従来機の性能を数値にしてまとめた。

5 設計の要点

商品化においては、デュアルエネルギー法の利点を最大限に生かし、かつお客様の使いやすさと安全性を考慮した設計と機能設定を行った。以下にその内容を説明する。

表 4.1 従来機との感度比較データ(被検査品:チョコレート)

Sensitivity comparison data with conventional machine (Test sample : Chocolate)

新機種(New machine): KD7416DWZ, 従来機 (Conventional machine): KD7416DWH

ガラス板厚み	機種	ガラス板サイズ(1 辺の長さ)					
		2.0mm	3.0mm	5.0mm	6.0mm	7.0mm	10.0mm
t=0.8mm	KD7416DWZ	100%	60%	100%	80%	90%	100%
	KD7416DWH	0%	0%	0%	0%	0%	0%
t=1.0mm	KD7416DWZ	70%	100%	100%	100%	100%	100%
	KD7416DWH	0%	0%	0%	0%	0%	0%

※上記数値は異物を付着させた被検査品を 10 回流したときの検出回数の検出割合を示している

機種	テストピース				
	SUS304 球	SUS304 線×2mm	SUS304 線×5mm	ガラス球	シリコンゴム球
KD7416DWZ	φ0.7mm	φ0.4mm×2mm	φ0.4mm×5mm	φ1.5mm	φ4.0mm
KD7416DWH	φ0.6mm	φ0.4mm×2mm	φ0.5mm×5mm	φ4.0mm	φ8.0mm 超

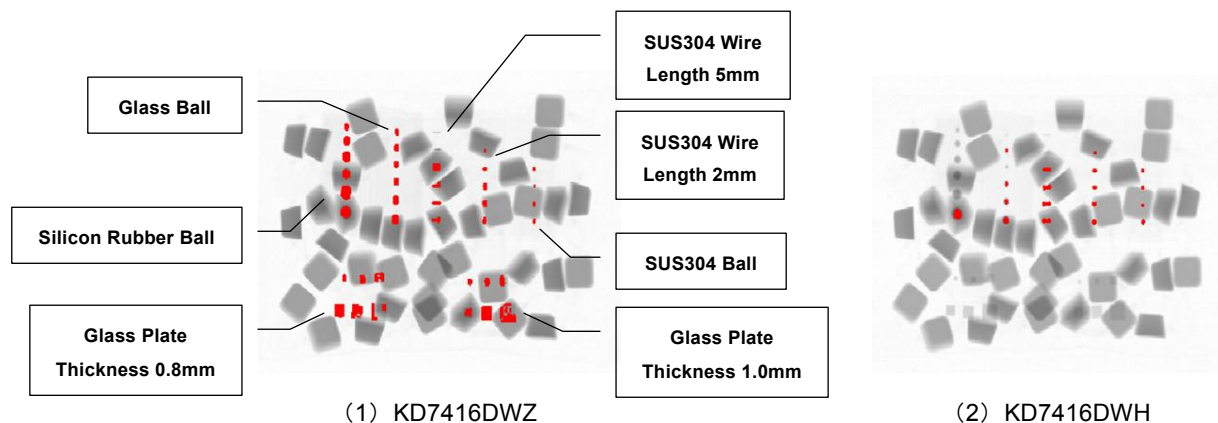


図 4.1 異物検出画像
Test sample and contaminants image

5.1 高出力 X 線発生源の放熱/漏洩防止

デュアルエネルギーセンサの性能を最大限に発揮させるためには、高エネルギー、低エネルギーの X 線を十分に照射させる必要があり、高出力の X 線発生源が必要である。X 線のエネルギー変換効率は 1% 程度と低く 99% は熱エネルギーとなるため放熱構造を適応されると共に、漏洩防止構造の強化が必要である。

一方で、ほとんどの食品生産ラインでは近年の品質管理高度化に伴い多くの検査装置が導入されており、占有面積の小さい装置が望まれている。

そのため、X 線管球からの熱交換部品であるヒートレインの新規開発と、筐体の板厚、X 線散乱を考慮した照射部周辺構造、開口部の X 線漏洩防止用のカーテンを見直した。これにより従来機と同じ機長 800 mm を維持し、既設の生産ラインを変更せずに入れ替えることができ、導入コストや制約を低減した。

5.2 高機能化の実現

(1) 噛み込み検査機能

レトルト食品やハム・ソーセージの包装等は、内容物の品質を保持するために包装の袋を完全に密閉（シール）している。シール部分に内容物が噛み込んだ状態は、見た目だけの問題ではなく、噛み込み部分が包装の密閉度が低下し、内容物の腐敗に繋がる重大な欠陥で、食品メーカーは目視による検査を実施している。CCD カメラによる自動検査装置が実用化されているが、光の透過度合いを利用しているため、包装材の種類により検査対象が限定的である。

噛み込み検査機能は被検査品のシール部分の内容物の噛み込みや、噛み込むことによる製品形態の崩れを検査する機能である。X 線を使用した検査のため、包装材の影響を受けにくく、目に見えない噛み込み部分を検出できた

め、検査対象を限定されない万能な検査方法である（図 5.1）。

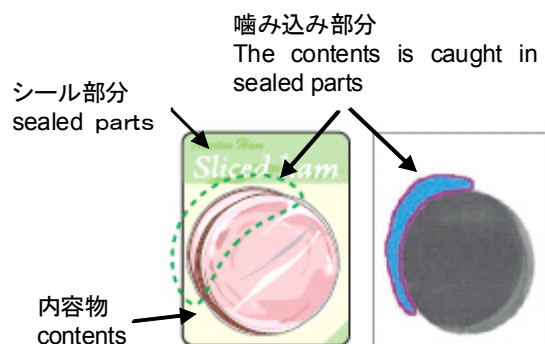


図 5.1 シール部分に内容物が噛み込んだ例
Example of the contents caught in sealed parts.

(2) 欠品検査機能

製品の内容量や内容個数の過不足は異物混入とは異なるが消費者クレームの対象であり、食品メーカーにとって重要な管理項目である。一般的には重量選別機等の検査装置を導入して、質量計測により管理している。しかし、同方法では、図 5.2 のように、総内容量は基準を満たすが内容個数が不足している製品を検出することが出来ない。

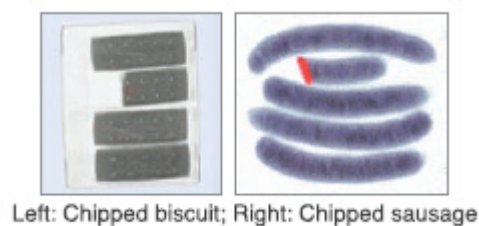


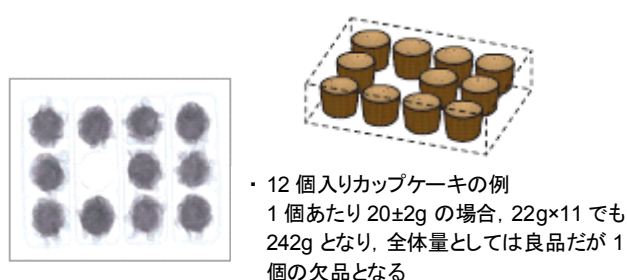
図 5.2 欠けた被検査品の検出例
Samples of the shape detection function.

本機能は、X線透過画像の画像濃度を利用して質量、個数等を推定するため、はかりによる質量計測では困難な被検査品でも管理が可能である。

(3) 形状検査機能

製品の欠けや割れも、異物混入とは異なるが消費者クレームの対象であり、又、ケーキのオーナメント等、その形自身が保たれていなければ製品価値がないものもあり、形状管理は重要な管理項目である。

本機能は、X線透過画像から、被検査品の外形や面積、質量などを画像処理により解析し、異形な製品や、製品の割れ・欠けなどを自動で検査する(図 5.3)。



・ 12 個入りカップケーキの例
1 個あたり $20 \pm 2\text{g}$ の場合、 $22\text{g} \times 11$ でも 242g となり、全体量としては良品だが 1 個の欠品となる

- ・ Example of package containing 12 cupcakes
When each piece weighs $20 \pm 2\text{g}$:
The total weight of 11 pieces each weighing 22g is 242g , which satisfies total weigh, although the number is incorrect.

図 5.3 被検査品の欠品検出例

Samples of the missing product detection function..

5.3 操作性の向上

デュアルエナジーセンサでは、同時に撮像される 2 枚の画像を差分し、その画像に対して画像処理を行うが、その差分処理に必要なパラメータは 10 項目以上ある。デュアルエナジーセンサの性能を最大限に引き出すためには、それらのパラメータを被検査品の特性に合わせて決定する必要があり、操作者が全ての組み合わせを考慮し決定するのは困難である。そこで、本機に自動設定機能を搭載し、装置に被検査品を複数回通過させる、それらのパラメータを自動で設定することで、誰でも簡単に運転することを実現した。

5.4 安全設計

(1) 人に対する安全性 1～X線漏洩量の規制

X線は被曝量によっては人体に悪影響を及ぼす可能性があるため、X線を発生する装置は、漏洩するX線量を規制される。

電離放射線防止規則(昭和 5.7 年 9 月 30 日労働省令第 5.1 号)により、装置からのX線漏洩量が3ヶ月で 1.3mSv

を超過する場合は、その装置が設置される区域を放射線管理区域とし、人が不用意にその区域に立ち入ることがないようにしなければならない。

当社装置は、X線漏洩量を $1\mu\text{Sv/h}$ 以下に抑えることで、労働基準法で定められている3ヶ月の最大作業時間の累積被曝量が 1.3mSv 以下にし、特別な立ち入り管理区域制限なく、現場の作業員のX線被曝量を基準値以下にした。

(2) 人に対する安全性 2～安全装置の搭載

未包装食品生産ラインで使用される装置は、有害微生物を管理(除去)するため1日数回の頻度で装置を清掃する。清掃時は作業の確実性と効率向上のため部品を取り外せる構造としているが、作業員が誤って電源を入れたまま清掃した場合、取り外した箇所からX線が漏洩し、作業員が被曝する可能性がある。

そのため、本機では、安全回路(インターロック回路)を組み、部品が取り外された場合、即時にX線の照射を停止する。

また、搬送品が装置内部で滞留するなどして生産ラインを緊急で停止させたい場合や、装置に何らかの不具合が生じた場合にX線の照射を停止させるために非常停止スイッチを標準搭載した。

このような安全回路を組み込むことで、いかなる場合でも作業員が被曝しないように安全性が確保した。

(3) 被検査品への安全性

X線は人体だけではなく照射された被検査品に対して影響を与える可能性がある。被検査品に対する安全性の指針は、厚生労働省が食品・添加物等の規格基準(昭和 35.年 12 月 28 日厚生省告示第 370 号)の食品一般の製造・加工及び調理基準で定められており、食品の吸収線量は 0.10Gy 以下であることが要求されている。

X線検査装置内で被検査品が滞留し、X線が照射され続けられた場合、この許容値を越え可能性がある。そこで、本機では滞留を検知し、上記基準値を超える前に画面にメッセージを表示するとともにX線の照射を即時に停止し、被検査品への安全性を確保した。

6 主要規格

デュアルエナジー方式 X線異物検出機 KD7416DWZ の主要規格を表 6.1 に示す。

7 むすび

デュアルエナジー方式 X 線異物検出機 KD7416DWZ は、これまで難しいとされていた重なりがある状態での被検査品の異物検査を実現し、自動検査対象を拡大させ、食品メーカーから高い評価を得ることができた。

今後も先端 X 線技術を応用し、対象とする被検査品の拡大と対象検出異物の拡大を進め、高性能な X 線異物検出機を提供し、さらなる「食品・薬品の安全と安心」に貢献していきたい。

参考文献

1) 阿部俊:

“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(2002.4)

2) 前越久 監修:

光子減弱係数データブック, 社団法人 日本放射線技術学会計測部会(1995.3)

執筆者



綿引 広明
アンリツ産機システム(株)
開発本部 開発部
プロジェクトチーム



武田 俊一
アンリツ産機システム(株)
開発本部 開発部
プロジェクトチーム



三谷 聡
アンリツ産機システム(株)
開発本部 開発部
プロジェクトチーム



山崎 健史
アンリツ産機システム(株)
CS 技術部 設計課



井上 学
アンリツ産機システム(株)
CS 技術部 設計課



木場 廣幸
アンリツ産機システム(株)
CS 技術部 設計課



斎藤 直也
アンリツ産機システム(株)
開発本部 開発部
プロジェクトチーム



宮崎 格
アンリツ産機システム(株)
基板技術部



和田 俊介
アンリツ産機システム(株)
CS 技術部 設計課



金井 貴志
アンリツ産機システム(株)
基板技術部

表 6.1 デュアルエネルギー方式 X 線異物検出機主要規格

Dual-Energy X-Ray Inspection System Specifications

形名	KD7416DWZ
X 線出力	管電圧 25～80kV，管電流 0.5～1.0mA，出力 7.5～350W
安全性	漏洩 X 線量 $1\mu\text{Sv/h}$ 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
被検査品寸法	最大幅 390mm，最大高さ 150mm（但し検出可能範囲に制限あり）
ベルト幅	420mm
品種数	最大 100 品種
ベルト速度・搬送能力	5～60m/min，最大 5kg
電源・消費電力	AC100～120V 又は 200～240V，単相 50/60Hz，1.0kVA，突入電流 80A(typ)（5ms 以下）
質量	280kg
使用環境	0～35℃，相対湿度 30～85%，但し結露しないこと
保護等級	IP66 準拠（但しコンベア部のみ，その他は IP40 準拠）
外装	ステンレススチール（SUS304）

公知