

画像診断装置の発展を支える医療用X線デバイス

X-ray Devices Contributing to Sophistication of X-ray Diagnostic Systems

井手 秀樹 山本 豊雄 鬼橋 浩志

■ IDE Hideki ■ YAMAMOTO Toyoh ■ ONIHASHI Hiroshi

X線を発生させる医療用X線管装置、並びにX線像を画像データとして出力するX線イメージンシファイア（I.I.）及びX線平面検出器（FPD：Flat Panel Detector）は、高度化する医療を支える画像診断装置のキーデバイスである。

東芝電子管デバイス（株）は、患者の被ばくを低減させるためのI.I.とFPDの高感度化技術、より微細な病変部を検出できる高画質化のためのX線管焦点設計技術及びI.I.とFPDの高解像度技術、並びに患者や医師のストレスを低減し快適な医療環境を実現するためのX線管静音化などの技術革新を継続的に進め、顧客に価値ある商品を提供し続けている。

X-ray tubes to generate X-rays, as well as X-ray image intensifiers (I.I.s) and X-ray flat panel detectors (FPDs) to convert X-ray images into electronic signals, are key devices in X-ray diagnostic systems, which are playing a major role in the advancement of diagnosis and treatment.

Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd. has been offering optimal products incorporating the most advanced technologies to customers through continuous technological innovations. These include a high-sensitivity technology for X-ray I.I.s and X-ray FPDs to suppress patient exposure doses, a focal spot design technology for X-ray tubes and high-resolution technologies for X-ray I.I.s and X-ray FPDs that enhance image quality and make it possible to detect smaller lesion areas, and a noise reduction technology for X-ray tubes to realize a comfortable medical environment with reduced stress on both patients and medical staff.

1 まえがき

東芝電子管デバイス（株）は、1915年にわが国初のX線管を開発して事業化して以来、コアコンピタンスの深耕と拡張により、最先端の性能と高い信頼性のある製品を開発、製造、及び販売し2015年で100年を迎える。

ここでは、医療分野における当社の主力製品であるX線管装置、I.I.、及びFPDについて、動作原理、求められる特性、当社が採用している独自の主要技術、及び将来展望を述べる。

2 医療用X線管装置

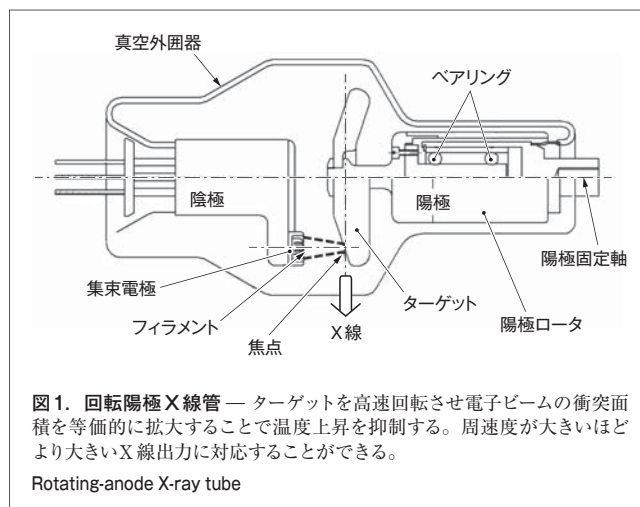
2.1 動作原理

X線管は、真空中で電子ビームを陽極（ターゲット）に衝突させることでX線を発生する真空管である（図1）。X線管装置とは、電気・機械安全機構、X線防護機構、及び診断装置とのインタフェースを持つ管容器にX線管を封入したものであり、用途ごとに最適な装置を提供している（図2）。

2.2 求められる特性

医療用X線管装置では、基本的な特性としてのX線出力に加えて次のような特性が求められる。

- (1) 高画質化のための焦点設計
- (2) 検査中の安定性
- (3) 患者及び医師のストレス低減のための静粛性

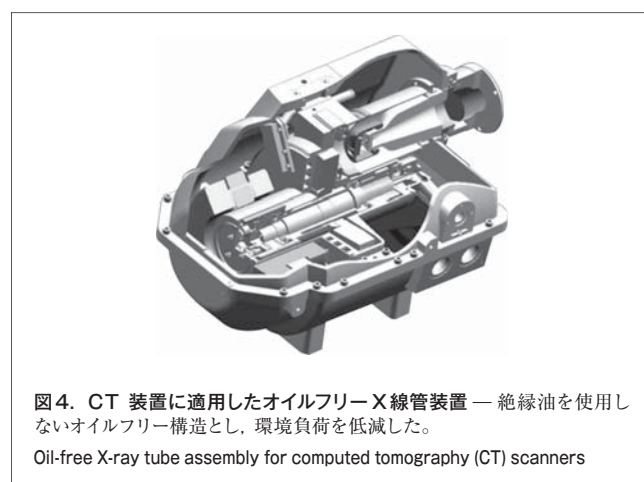
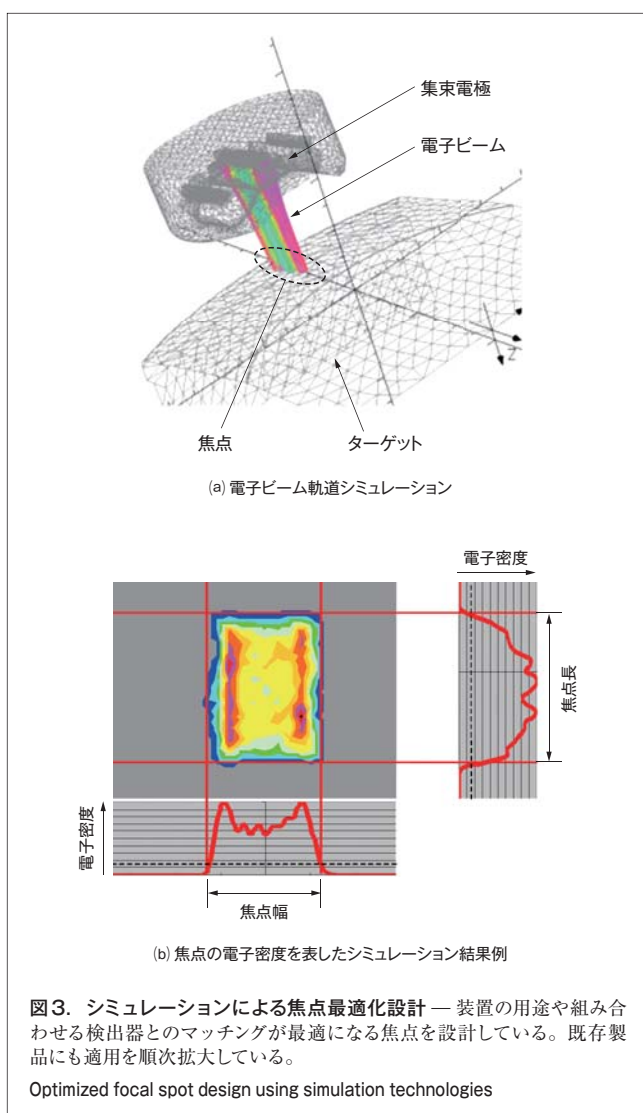
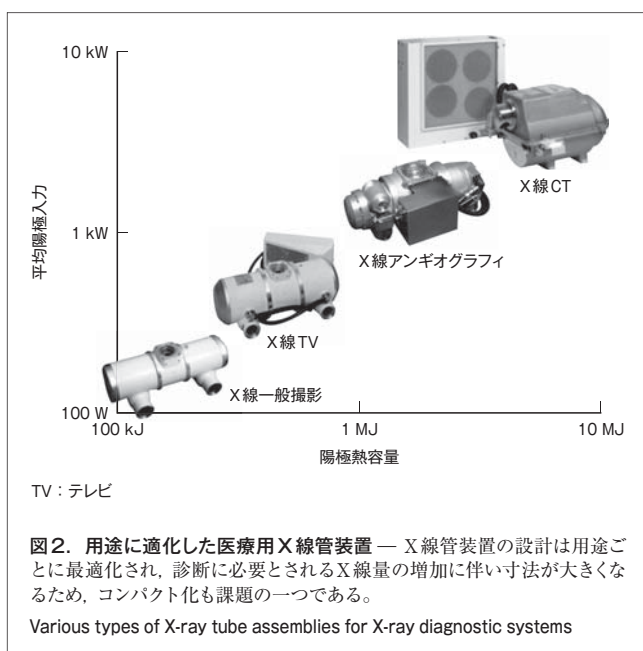


(4) 環境負荷の低減

2.3 主要技術

当社は、X線管装置に次の技術を採用して、こうした要求に答えている。

- (1) シミュレーションによる焦点最適化設計 焦点へ衝突する電子ビーム密度を均一化することで、画質を向上させることができ、更に、画像形成に寄与しないX線の発生を低減し患者の被ばくを減らすことができる。当社は電子密度を考慮したシミュレーション技術を駆使し、焦点の最適設計を行っている（図3）。



(2) 陽極温度を抑えて安定性を確保 一般の球軸受を使用した回転陽極X線管は回転体と固定軸がベアリングで断熱されるため、陽極の冷却は熱ふく射に限定される。一方、常温で液体となるガリウム合金を潤滑材に用いた液体金属潤滑動圧軸受（以下、LM軸受と呼ぶ）は、回転体と固定軸が液体金属を介して熱的に接触しているため、伝導冷却により陽極冷却効率を向上させることができ、球軸受に比べて陽極温度を下げやすい。このため、より安定した動作が可能になる。

更に当社は、LM軸受の伝導冷却を積極的に利用することで陽極自体を小型化したX線管を開発している。陽極の小型化により、X線管装置をコンパクトにでき、装置への搭載性を高めることができる。

(3) LM軸受による静音化 回転陽極型X線管の回転機構は、一般には球軸受が使用されるが、当社では陽極が大型となるX線アンギオグラフィ（血管造影）用とX線CT（コンピュータ断層撮影）用のX線管に、LM軸受を採用している。LM軸受は軸受面が直接接触しないため静音性に優れている。

(4) オイルフリーX線管装置 当社はX線管の冷媒に絶縁油を使用しないオイルフリーX線管を商品化した（図4）。オイルフリーX線管は水系冷媒の使用により冷却能力が向上するとともに、環境負荷を低減することができ、多品種への展開を図っている。

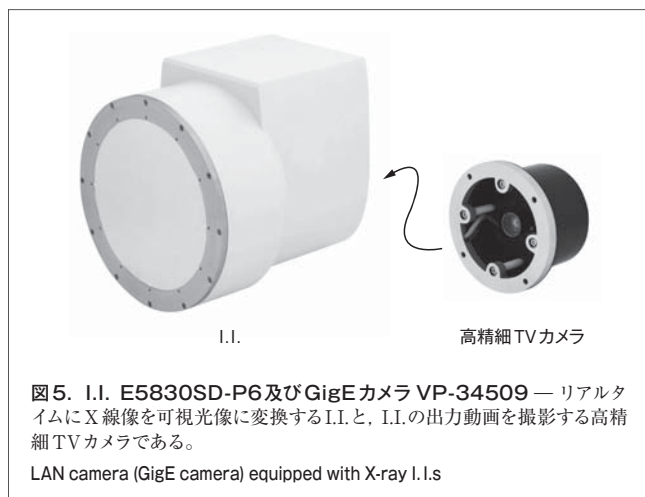
2.4 将来展望

今後も高度化を続ける診断装置に適応した高機能X線管装置を開発していくとともに、よりいっそう品質に磨きをかけ、安心して快適な医療を支え続けていく。

3 I.I.

3.1 動作原理

I.I.は、X線像を可視光像に変換し、動画のX線像を観察で



きるようにする真空管である。また、TV（テレビ）カメラを付加して画像信号として出力する製品は、I.I.システムと呼ばれている（図5）。

近年、X線検出デバイスとしてFPDが製品化されているが、高速応答性や、新興国などにおけるコストパフォーマンスが求められる市場ではI.I.が適している。当社製I.I.は性能、品質、及び供給力が認められ、世界の多くの国や地域で販売されている。

I.I.は、真空容器中にCsI（ヨウ化セシウム）シンチレータと光電面から成る入力面シンチレータ、集束電極、及び出力面が組み込まれた構造を持ち、次の3段階を経てX線を可視光に変換している。

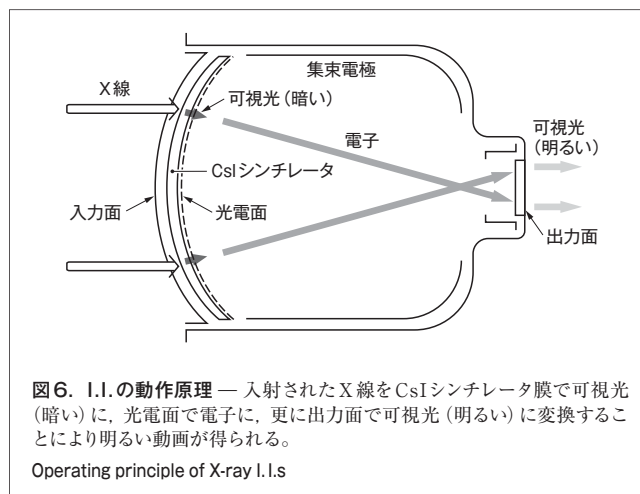
- (1) 入射されたX線をCsIシンチレータで可視光（暗い）に変換する。
- (2) これをシンチレータ表面の光電面で電子に変換して真空管内に放出させる。
- (3) 変換された電子を集束電極により形成された電子レンズにより加速及び収束させて出力面に導き、明るい可視光に変換する。この、電子を加速及び収束させる作用により、TVカメラで撮影可能な明るい動画出力が得られる（図6）。

3.2 求められる特性

臨床現場では、透視画像の細部観察のためにI.I.の高解像度化とTVカメラの高画素化、患者の被ばく低減のためにI.I.の高感度化（X線利用率の向上）が求められている。また、新興国市場では、手軽に画像を表示するためにパソコン（PC）に標準装備されているLANコネクタに接続できるTVカメラ（GigEカメラ）が求められている。

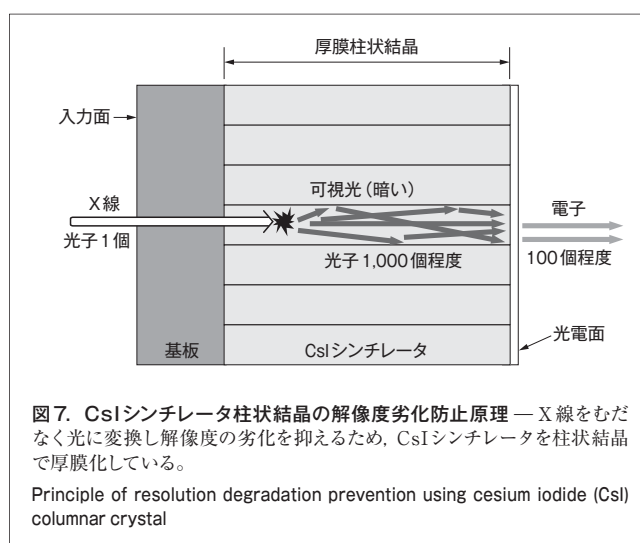
3.3 主要技術

I.I.は増幅作用によりX線光子を一つ一つ検出することができ、点が集まった画像として表示する。このため、検出したX線光子の数が重要である。鮮明な画像を得るためにはX線



光子をむだなく変換し多くの点が集まった画像とする必要がある。X線は透過力が強いのでCsIシンチレータを透過することがある。これを防ぐためにCsIシンチレータを厚膜化して効率を上げている。しかし単純な厚膜化は、可視光が自由に拡散する光電面までの距離を長くするため解像度の劣化を引き起こす。これを最小限にするため、CsIシンチレータを入力面に対し垂直方向に柱状結晶化させている（図7）。可視光は柱状結晶内を反射しながら光電面まで導かれるため、拡散が抑えられる。これにより高効率で高解像度の画像が得られる。実際には最適な柱径や隙間となるように成膜条件を独自技術により制御している。当社は他にも、高感度を実現するための光電面の形成技術や、高精細画像を映し出すための出力面シンチレータ、シンチレータ成膜技術などの独自技術を用いてI.I.を製造し、高い性能と品質を実現している。

医療装置に組み込むためにはTVカメラシステムが必要になる。このTVカメラシステムにおいてI.I.の性能を十分に発揮させるためには専用のTVカメラが必要である。I.I.の出力像



は円形なので、カメラのイメージセンサには一般的な長方形ではなく正方形のCCD（電荷結合素子）が使用される。また、白黒画像用で高いSN比（信号対雑音比）が求められる。従来、各種の画像処理は、カメラコントロールユニット（CCU）で行い、PCにキャプチャボードを付けて信号を取り込んでいた。このため従来方式では、画像を得るためにI.I.以外の多くの専用部品が必要であった。そこで当社は、I.I.専用TVカメラの出力を標準のPCに直接接続できるようにしたGigEカメラを開発した。CCUやキャプチャボードなしでPCに直接つなぐことでシステムが構築でき、特に新興国向けの簡素化したシステムに適合した装置が構築可能になる。

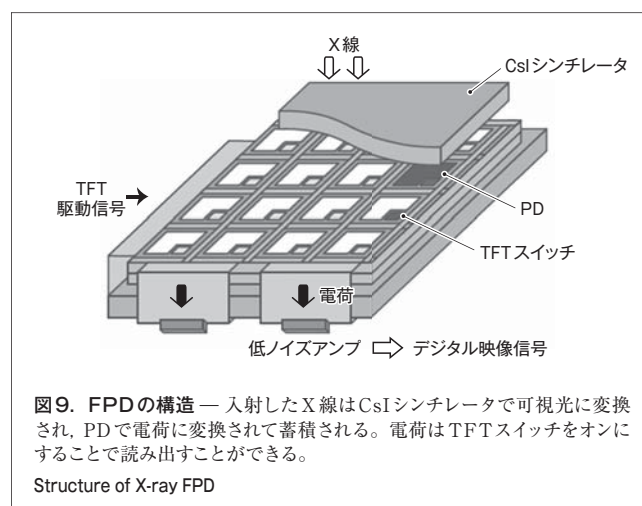
3.4 将来展望

I.I.は歴史の長い製品であり、アナログデバイスとしての多くの技術蓄積が反映された製品である。GigEカメラのようなデジタルデバイスを活用し、新興国で受け入れられるX線画像表示装置として開発を続けていく。

4 FPD

4.1 動作原理

FPDは人体を透過したX線像をX線変換モジュールでデジタル信号に変換し、映像化する平面状の薄型固体センサである（図8）。FPD開発においては、当社製I.I.の開発製造で培ったCsIシンチレータの成膜技術を生かし、CsIシンチレータとフォトダイオード（PD）を用いた、間接変換方式を採用した。FPDの動作原理を以下に述べる。FPDに入射したX線像は、CsIシンチレータでいったん可視光像に変換される。可視光は画素ごとに設置されたPDで電荷に変換され、PDの静電容量部で電荷として蓄積される。その電荷は画素ごとに付属す



るTFT（薄膜トランジスタ）スイッチにより読み出される。PDに蓄積されていた電荷は、低ノイズアンプによって増幅され、アナログデジタル変換され、デジタル映像信号となる（図9）。

4.2 求められる特性

FPDに求められる主な性能は、次の2点である。

- (1) 患者被ばく線量低減化のための、X線から電荷への変換効率向上によるX線高感度化
 - (2) より微細な病変部の検出のための高解像度化
- 一般にFPDでは、高感度化と高解像度化は相反する特性となる。

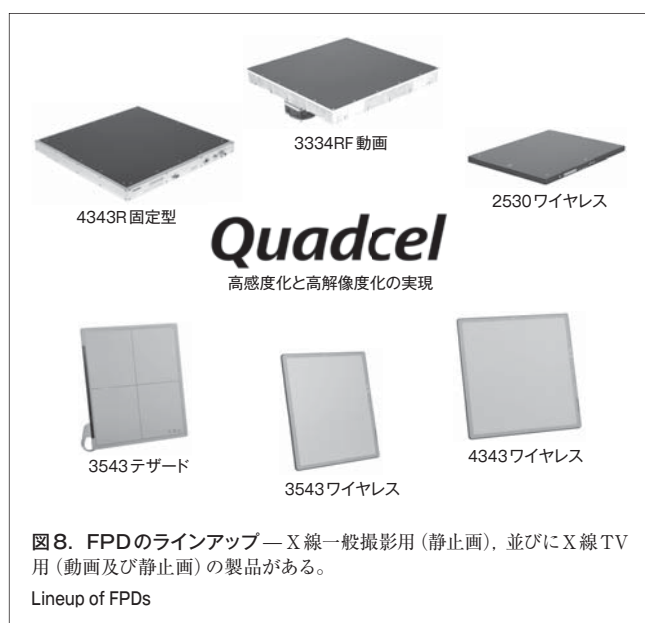
4.3 主要技術“Quadcel”

当社のFPDでは、前述の相反する特性を新たな技術Quadcelを用いることにより両立させた。具体的には下記の四つの技術を指す。

- (1) 高解像度・高感度CsI成膜技術
- (2) CsIシンチレータ直接蒸着技術
- (3) 高反射コーティング技術
- (4) 高防湿シーリング技術

以下にこれら四つの技術の詳細について述べる。

- (1) 高解像度・高感度CsI成膜技術 厚膜化（膜厚600 μm ）した結晶でも柱径が細く（5 μm ）、独立性の高い平面状のシンチレータ膜の開発に成功した（図10）。柱どうしの間隔が狭く、かつ、柱どうしが独立して形成されていることがわかる。これにより、厚膜でも高解像度かつ高感度を実現した。
- (2) CsIシンチレータ直接蒸着技術 一般にFPDで用いられるCsIシンチレータ膜は、PDとは独立に成膜され、後から貼り合わせる手法が採られている。この方法では、シンチレータ膜とPDの間に貼合せ層（接着剤や微小空間）が生じてしまい、貼合せ層における光散乱により、解像度が低下する。これに対し当社は、独自の成膜技術を用いてPD上にCsIシンチレータを直接蒸着することを可



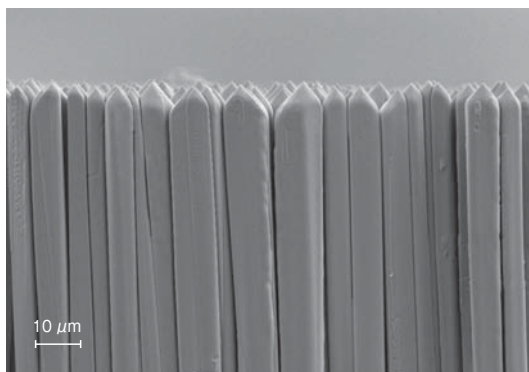


図10. CsIシンチレータの電子顕微鏡写真 — 細く独立した柱状結晶がライトガイドとなり、光の散乱を抑え高いMTF (Modulation Transfer Function) 特性を実現する。柱径は平均5 μmである。

Electron microscope photograph of CsI scintillators

能にし、PDとCsI間での光散乱がないため高感度化でき、かつ高解像度を達成した。

(3) 高反射コーティング技術 CsIシンチレータ内で変換された光は、CsIシンチレータの結晶内で放射状に伝搬するため、1/2の発光がPDと反対方向に伝搬し、有効に活用されない。PDの反対方向に放射した光をシンチレータ膜の上部で反射させることで、PDでの受光量を向上させることができるが、発生した光を正確に同一の柱状結晶内に戻さないと光が拡散し解像度が低下してしまう。そこで、CsIシンチレータ結晶1本1本からの光が他の結晶に広がることなく、かつ高効率で反射する反射材料及び構造を開発した。この技術により解像度が低下することなく効率的にPD受光量を向上させることができ、反射材料なしの場合に比較して約80%の感度向上を達成した。

(4) 高防湿シーリング技術 CsIシンチレータは湿気に対して敏感であり、湿気を吸収すると潮解し、柱状結晶が崩れ、解像度が劣化してしまう。FPDにおいては、高信頼性及び長寿命を確保するためには水分などの外部環境に対する保護構造が重要である。一般には樹脂系防湿膜を用いているが、防湿特性が十分ではない場合があり、当社はより高い信頼性を持った高気密防湿構造を採用した。シーリング材にはX線減衰の少ない金属箔（はく）を使用し、樹脂系防湿膜に比べ信頼性を向上させた。以上のQuadcelにより、高感度化と高解像度化を両立させた（図11）。

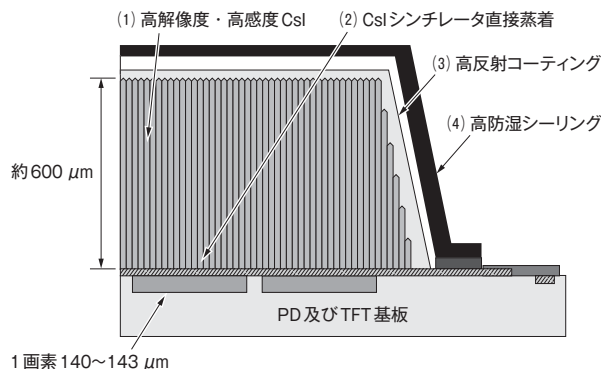


図11. Quadcel — FPDの高性能（高感度＝低被ばく）と高耐久性を実現するための四つの技術である。

Quadcel technologies to improve performance of X-ray FPDs

4.4 将来展望

当社製FPDは、低被ばくと高画質特性により、世界各国の顧客から高い評価を受けている。今後も、画像診断装置の発展を支える継続的な技術革新を行い、医療の発展に貢献していく。

5 あとがき

当社が開発したX線管装置、I.I.、及びFPDはその特性や信頼性により、国内外から高い評価を受けている。

今後も、より安心で快適な医療のために、継続的な技術革新を行い、業界をリードする製品を提供し続ける。



井手 秀樹 IDE Hideki

東芝電子管デバイス（株）X線管技術部主幹。
X線管の設計・開発に従事。
Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.



山本 豊雄 YAMAMOTO Toyoh

東芝電子管デバイス（株）イメージ管技術部主査。
X線イメージインテンシファイアの開発に従事。
Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.



鬼橋 浩志 ONIHASHI Hiroshi, Ph.D.

東芝電子管デバイス（株）デバイス技術部主幹、博士（工学）。
X線フラットパネルディテクタの設計・開発及びシステムのエンジニアリング業務に従事。
Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.