

最近の増感紙システムと今後の動向

安国宗直 赤木茂夫

I はじめに

今日X線被曝線量低減に対し、臨床面の社会的要望によるX線写真の高感度化Typeが開発されている。X線→光変換効率も在来のCaWO₄の4に対し、Tb(テレビウム)を附加したGd₂O₂S:Tb(酸硫化ガドリウム)の18とその差4.5倍の効率を示し、X線フィルム面ではRegular type blueの4500 Åから、Green type フィルムの5400 Åへと感度増幅とあいまって被曝線量1/5 ~ 1/15低減が開発実用化されている。その反面臨床診断の高度化に伴い、鮮鋭度、粒状性の諸問題点が取り上げられ、超高感度(1/15低減)製品は社会的需要の面で現在30%程度に減少したともいわれている。然しX線画像の要素である Contrast (Film γ 値、スクリーン蛍光体物質の物理的要素、管電圧による吸収係数、散乱線除去率)、鮮鋭度(スクリーン蛍光体のMTF及幾何学的要素)、粒状性RMS(蛍光物質及Filmの粒状状態、またそのMTF及 γ 値)等については、数多く研究並に実験データが発表されており画像の使用目的別による臨床診断に対応する問題点との比較検討はされており表題の従来のRegular type からOrtho type へと飛躍発展開発されたがGd(ガドリウム)系列の今後の動向について論説を加え度い。

II CaWO₄と稀土類との比較

今日まで長い間CaWO₄ 蛍光体と青色感光性のRegular type film が使用されて来た。しかしながらこのCaWO₄ + Regular blue film の組み合わせは、これ以上の進歩開発は限界に達したともいわれている。

先づ新しく開発されたGd₂O₂S:Tb + Ortho green film の組み合わせによる特性と従来のCaWO₄ + Regular film 特性との比較を知る必要がある。

X-Ray Exposure Reduction Using Rare-Earth
Oxysulfide Intensifying Screens[†]

Robert A. Buchanan, Ph. D., Solon I. Finkelstein, M.D., and
Kenneth A. Wickersheim, Ph.D.

INDEX TERMS:—Screens—Diagnostic Radiology, apparatus and equipment
Radiology 105:185-190, October 1972

文献 (Radiology 105:185-190 October 1972) の原文 (酸硫化稀土類増幅スクリーン使用上のX線照射条件) を参考とするためそのまま引用、以下表、グラフ同様

keV	X-Ray Absorption in a 100 μ m Screen (%)			Intrinsic Efficiency (%)
	40	60	80	
Gd ₂ O ₂ S:Tb	37	51	28	18
La ₂ O ₂ S:Tb	73	33	17	13
CaWO ₄	33	13	27	4

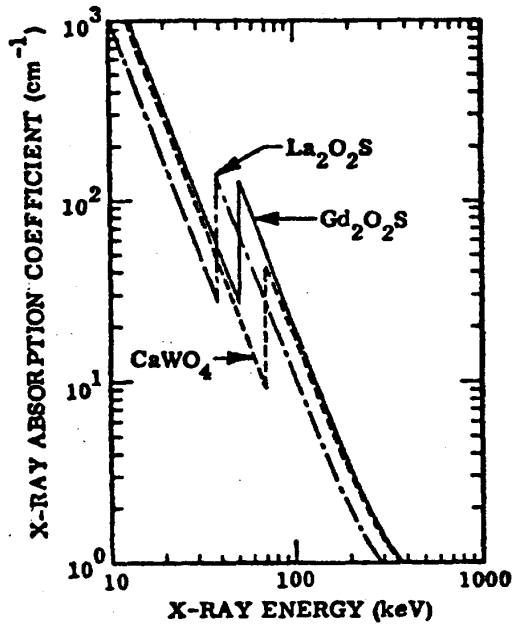


Fig 1 Lower figure. X-ray attenuation coefficient of La₂O₂S, Gd₂O₂S, and CaWO₄ versus energy. Upper figure. Absorption coefficient of screens 100 μ m thick at three x-ray energies and the intrinsic x-ray-to-visible light conversion efficiencies.

Fig 1 の Upper figure は 3 種類の X 線エネルギーにおける厚さ 100 μ m のスクリーンの吸収係数と本来の X 線を可視光への変換係数である。

註：厚さ 100 μ m スクリーンの X 線吸収は Gd、80 Kev で 28 を示している。

また、Fig 1 の Lower figure では La₂O₂S、Gd₂O₂S 及び CaWO₄ の X 線エネルギーに対する X 線吸収係数である。

註： Fig は 3 種類のスクリーンに対する 10Kev~200 Kev の X 線エネルギー領域の X 線吸収係数である。±70 Kev 領域では Gd₂O₂S : CaWO₄ の X 線吸収係数値比は約 4.5 倍である。線質依存の実効波長領域は La₂O₂S の 35 Kev~70 Kev の Gd₂O₂S である。

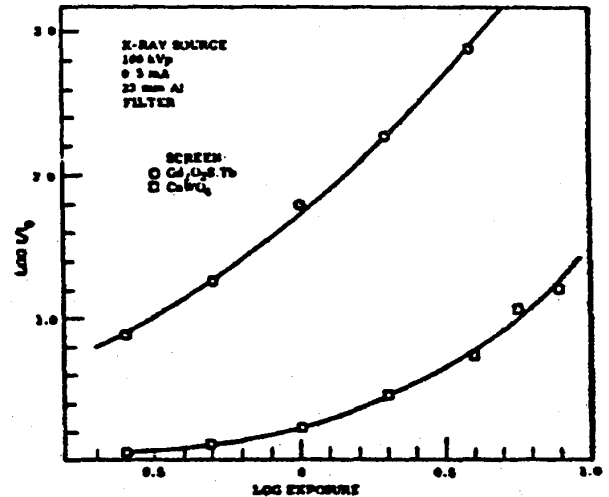


Fig 2 Measured film density versus exposures; Kodak medical x-ray, green-sensitive, photofluorographic film (single coated).

Fig 2 は X 線曝射に対する正確なフィルム濃度；コダック医療 X 線、緑色感度、蛍光写真フィルム。Fig より log E = 0 点をとると I/I₀ = 1.8 の Gd₂O₂S : Tb に対し CaWO₄ は I/I₀ = 0.2 でその差 9 倍である。

Fig 3 は曝射に対する正確なフィルム濃度：コダック医療 X 線、青色感度フィルム。

医療 X 線フィルムタイプで青色感度フィルムを用いた場合管電圧 80 kvp における RIF (相対感度係数)、Gd₂O₂S : Tb と CaWO₄ では 2 であり、緑色感光性フィルムでは 80 kvp で 1.25、100 kvp では RIF = 2.0 となる。

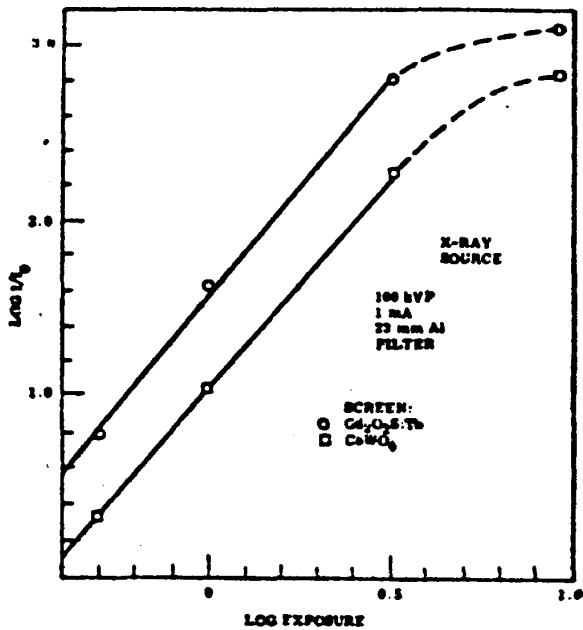


Fig 3 Measured film density versus exposure; Kodak medical x-ray, blue-sensitive film (single coated).

TABLE I: EXPERIMENTAL DETERMINATION OF RELATIVE INTENSIFICATION FACTORS FOR BLUE- AND GREEN-SENSITIVE FILM AS A FUNCTION OF kVp SETTINGS

Medical X-Ray Film Type	kVp	RIF = $\frac{T(\text{CaWO}_4)}{T(\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb})}$
Blue-sensitive	80	2
Green-sensitive	80	12.5
Green-sensitive	100	20

Fig 1~3 まで述べたが、Fig 1でもう一つ重要なことは CaWO_4 と Rare Earth phosphors (稀土類蛍光体) との有効管電圧使用領域の長所短所である。次に参考資料として Fig 4, 5 で日本アグファ、ゲバルト KK の MR シリーズの感度特性曲線と、サクラHI-ORTHO SYSTEMの感度管電圧依存曲線を検討すると、80 kVp 以下では効率が悪い(倍率)が80 kVp 以上になると $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ の方が CaWO_4 に比し散乱線の影響が大幅に低減されていることを意味する。従ってX線写真の情報量低減如何がX線-光変換効率 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ の 1.8 に対し CaWO_4 のそれは 4 であり、その比は約 4.5 倍である。

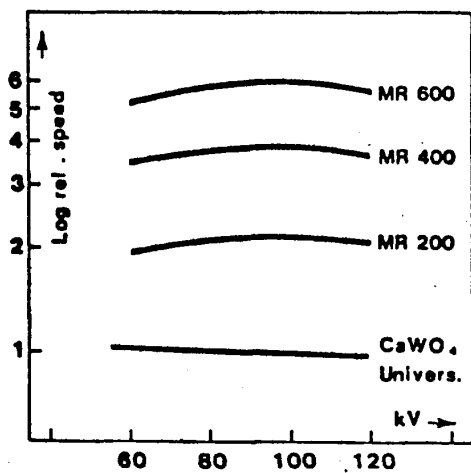


Fig 4 青色感色性の X-レイ・フィルムの感色性とMR増感紙の青色発光との関係

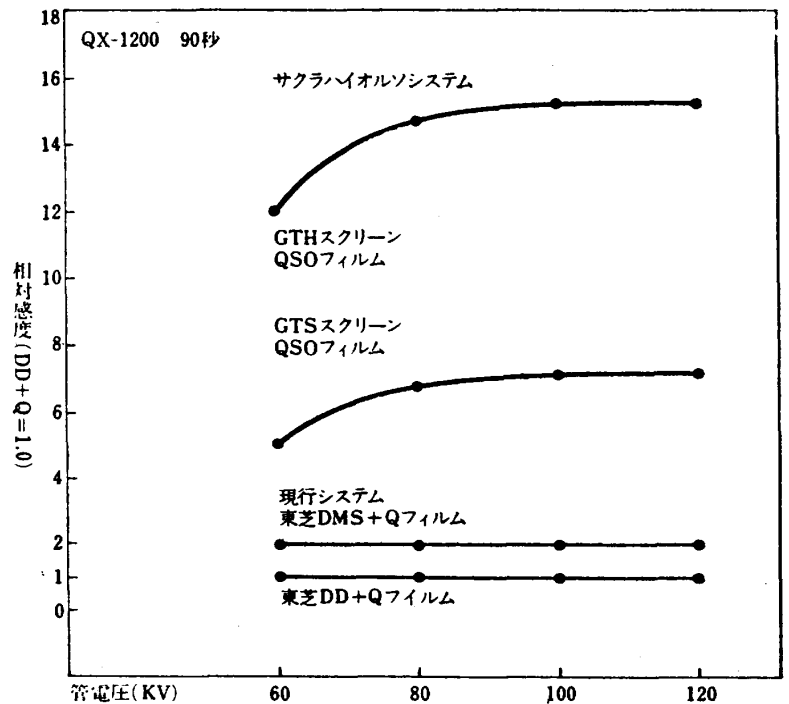


Fig 5 サクラハイオルソシステムの感度・管電圧依存性

III MTFとRMSとの関係(鮮鋭度と粒状性)

1. 鮮鋭度を左右する因子

- (i) ScreenのMTF
- (ii) 被写体の運動
- (iii) X線量子ノイズ

2. 粒状性を左右する因子

- (i) Screenの粒状
- (ii) ScreenのMTF
- (iii) Filmの粒状
- (iv) Filmの r

次のFig 6~10 までは富士写真フィルムKK 高野正雄文献より引用。

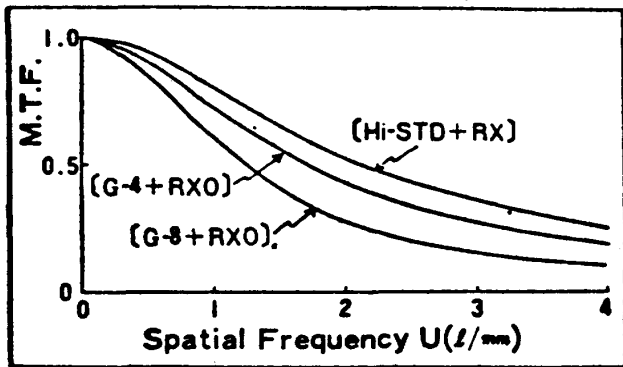


Fig 6 各(増感紙+フィルム)のMTF($R_s(u) \times R_f(u)$)。

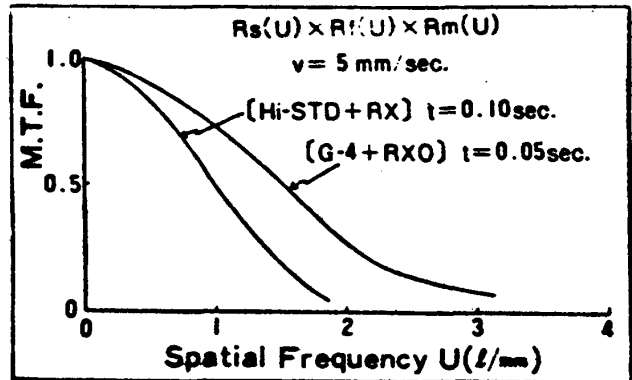


Fig 9 撮影時間tによる(増感紙・フィルム・被写体の運動)のMTF。

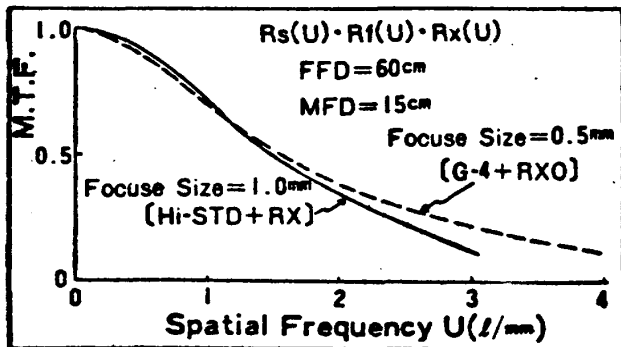


Fig 7 静的被写体時のX線管焦点、増感紙、フィルムの組合わせのMTF。

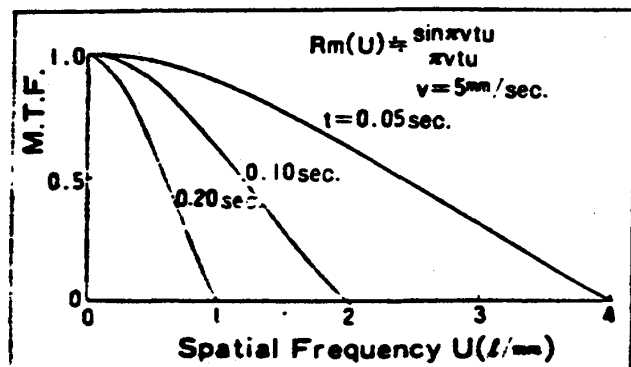


Fig 8 被写体の運動によるMTF。

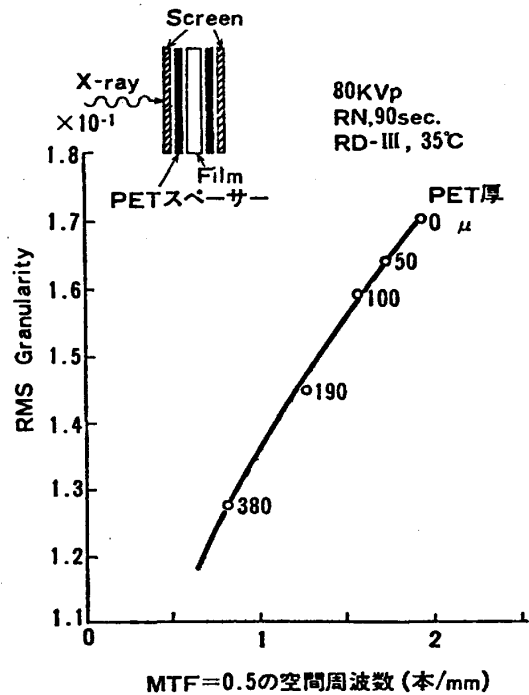


Fig 10 鮮鋭度と粒状性の関係

以上の如く東芝Lシリーズ増感紙、日本アグファゲバルトのMRシリーズ、コダック社のレイネックスレギュラスクリーン、富士写真フィルムのグレネックスG-4及びG-8、小西六写真のサクラハイオルソスクリーンGTS及びGTH等ScreenのMTF及びRMSはいろんな視野から研究発表されている。

Fig 6より(Hi-STD+RX)に対し(G4+RXO)及び(G8+RXO)のMTF。

Fig 7はX線管焦点の大きさ1.0mm、標準ハイスクリーン(極光MSクラス)に対するX線管焦点を0.5mmに小さくした場合の高感度G4+RXOのMTF相対比である。

Fig 8に曝射時間0.05秒、0.1秒、0.2秒に対する被写体の運動によるMTF。

Fig 9撮影時間tによるレギュラタイプ(MSクラス)とオルソタイプG4+RXO、被写体の運動のMTF。

Fig 10 PET厚さ 0~380 μ , MTF=0.5の l/mm とRMS

註: RMSとは各濃度レベルにおける均一濃度部分をマイクロフォトメータでスキャンした場合の標準偏差量をRMS値で表わす、U(大きい波長~小さい波長までの混合波長全部)=0は低周波領域で、U=5は高周波領域での情報で視覚的に識別不能なためU=0~5間のRMS実用値が用いられる。

IV 参考: II管の蛍光物質

数年前よりII管の蛍光物質がZnCdSよりCsIに置き変へられ改良開発で旧型に対し4倍向上している。

1. II管の変換係数測定

(イ) 入力X線線質

HVLのAlを7mmとすると、管電圧(单相全波整流)70kvp~75kvpでAl 2.2mmのforfilterを付けた場合と大体一致する、すなわち、人体の透過線量の基準を意味する。

(ロ) 変換係数の測定

入力面の線量率をmR/sとし出力蛍光面の輝度を測定した場合の輝度をCd/cm²とすると

$$\text{変換係数 } G_x = \frac{\text{Cd/cm}^2}{\text{mR/s}} = 150 \sim 200$$

2. II管内部における光電増倍作用、量子効率について

- (イ) 入力蛍光面の量子効率(但しZnCdSの場合)..... $\frac{1}{3}$
- (ロ) 入力蛍光面の量子効率..... 3000
- (ハ) 光電面の量子効率..... 0.1
- (ニ) 出力蛍光面の量子効率..... 300

(イ)~(ニ)までの総合量子効率

$$3000 \times \frac{1}{3} \times 0.1 \times 300 = 30,000$$

(ホ) 出力蛍光面の縮小率を1/10とすると出力蛍光面では(1/10)²に逆比例するから効率は100倍となる。故に3×10⁴×100=3×10⁶倍の量子効率となる。

3. ZnCdS を CsI に変へた改良の利点

(イ) ZnCdSの場合は沈降法で製造したが、CsIでは真空蒸着法を採用しているので非常に密度が高くなっている。故にX線吸収効率が約2倍向上する。

(ロ) CsIはZnCdSに対し発光効率が2倍である。

以上(イ)×(ロ)で4倍向上したことになる。

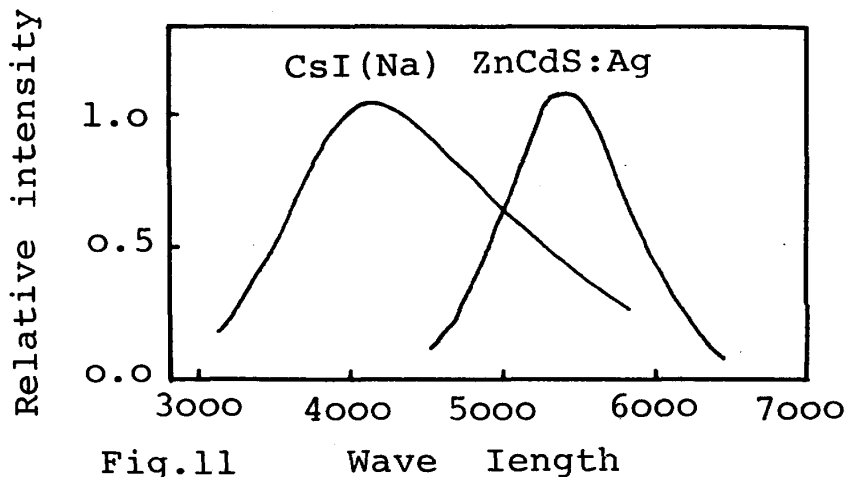


Fig.11

V 稀土類蛍光体の今後の動向

現在のX線写真システムの高感度化はFig1のUpper Figureの通り100μm厚のスクリーンにおけるX線吸収係数は80kvpでCaWO₄=27% Cd₂O₂S=28%でほぼ等しいが発光効率の点ではガドリウム18%に対しCaWO₄は4%と非常に低く、その格差が今日の超高感度X線写真システムの改良開発とも云へる。

X線吸収係数μ、発光効率η、発光体層の透過率T、入射X線量Qとした場合、蛍光増感紙の発光エネルギーEは次式で表される。但し管電圧一定とする。

$$E = Q \cdot \mu \cdot \eta \cdot T \dots\dots\dots (1)$$

発光した蛍光で感光されるフィルムの感度をS_F とすると全体のシステム感度S_T は、

$$S_T = E, S_F = Q \cdot \mu \cdot \eta \cdot T \cdot S_F \dots\dots\dots (2)$$

で表される。

(2)式の S_T を一定にしたときのX線写真の粒状性が、X線量子数、すなわち蛍光増感紙の吸収係数 μ の値の大きさで決まる。富士フィルム高野正雄氏より(また、高感度化に伴う粒状性の悪化はX線量子ノイズによるものが80%ともいわれている。参考文献、土井邦雄、大頭仁：応用物理35、1966)

勿論X線フィルムではGdの緑色発光スペクトル544 m μ に対応したOrtho typeであることは云うまでもない。

酸硫化物蛍光体は青色(Regular type film)に対して極めて少量の発光しかなく、その為フィルムの感色性を544 m μ まで増感しなければならない。今もしCaWO₄と等価な発光スペクトルを持っていたとするならば在来のFSクラスの20倍以上の高感度が得られるであろう。以上の観点から粒状性及びMTFの基として社会の要望する診断能に適合した被曝線量軽減を含むより高感度増感紙の開発が望ましいものである。また現在の増感紙をもつと薄くしCaWO₄増感紙で得られた解像度よりもかなり高解像が得られるならば期待したいものである。

次にII管の蛍光物質CsI(Na)を稀土類に置き換へ出来るならばと期待する次第である。II管の問題点として蛍光面の蛍光像をテレビカメラで撮像する場合欠点は蛍光像が暗いことである。

今後、X線TVの進歩となるには蛍光物質の向上、X線吸収率 μ 、発光効率 η の向上が考えられる。撮像管としてのブランピコンの向上は尙更のことである。(縮少率)²による電子密度の増加は蛍光面の改良開発によって輝度を増し、従って解像度も良くなる。以上の理由から稀土類の採用開発が出来るならば分解能、高解像度が得られるであろうかと思われる。