



Hirotsubashi University  
Institute of Innovation Research



## 一橋大学イノベーション研究センター

東京都国立市中2-1  
<http://www.iir.hit-u.ac.jp>

本ケースの著作権は、筆者もしくは一橋大学イノベーション研究センターに帰属しています。本ケースに含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、もしくはコピーを行う場合には、一橋大学イノベーション研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【連絡先】一橋大学イノベーション研究センター研究支援室  
TEL: 042-580-8423 e-mail: chosa@iir.hit-u.ac.jp



放射線イメージングのイノベーション

# イメージング・プレートとその開発

一橋大学 イノベーション研究センター

宮原 諄 二



## イメージング・プレートとは

イメージング・プレートとは放射線を検出する柔軟なシート状の画像センサーである。輝尽性蛍光体という特殊な蛍光物質がフィルムの上に塗布されている。一般に六ツ（20×25cm）から半切（35×43 cm）サイズまでの各種の大きさが用意されていて、レントゲン写真フィルムと同様な使い方をされることが多い。

このイメージング・プレートに放射線が照射されると、そのエネルギーが輝尽性蛍光体の結晶の中に蓄積される。この状態で赤いレーザー光を照射すると、放射線エネルギーは青い光となって放出される。この青い光を検出し、デジタル電気信号に変換したあとで画像処理を行い、デジタル放射線画像として再生される。イメージング・プレートは光を照射されることにより初期状態に戻り、繰り返し使用する事ができる。

イメージング・プレートを用いたデジタル放射線イメージングシステムは、従来の放射線イメージング方法を革新する手段として、医療画像診断分野ばかりでなく、科学、学術、技術、産業のあらゆる分野で世界的に使用されるようになっている。



放射線イメージングのイノベーション  
イメージング・プレートの開発

	ページ		ページ
はじめに	1	CIをとるか、Brをとるか	
放射線		被写体の話	
表彰式		蛍の光の話	
短い開発史		鉱山（やま）探しの話	
構成		相手を知る	
		不思議な縁	
<b>1.構 想</b>	<b>3</b>	<b>3.商品化</b>	<b>29</b>
発端		商品化プロジェクト	
異分野を集める		組織の変質	
レントゲン写真の技術進歩		放射線医のニーズに応える	
1970年代とは		放射線技師のニーズに応える	
新しいモダリティの登場		公 表	
レントゲン写真を越えるもの		発売へ	
写真感光メカニズム		開発された技術	
写真フィルムの限界		そして、今	
開発競争始まる		受 賞	
新システムの検討			
なぜ始めたのか		<b>おわりに</b>	<b>35</b>
チームの発足		<b>開発の意義</b>	
トップの承認		・技術、そして事業の安全保障	
基本コンセプト		・新規分野への進出	
実現のカギ		・新しい学問や技術分野への発展	
共同研究の開始		<b>なぜうまくいったのか</b>	
		・素人であり、注目されなかった	
<b>2.探索</b>	<b>17</b>	・知識の蓄積、そして集中がうまくいった	
センサーの条件		・時代、そしてニーズに合っていた	
原理は何か		・運、そして黒幕の存在	
輝尽発光とは		<b>新たな技術の登場</b>	
必要な発光特性とは		<b>補足：メンバーのその後</b>	
材料の基本特性			
ドグマ：捨てられたものの中にある			
まずは評価測定装置の開発から		<b>添付：技術資料</b>	<b>40</b>
取っかかり		オートラジオグラフィとラジオグラフィ	
悩み		イメージング・プレートとその応用	
実験から仮説へ、そして検証へ		(RADIOISOTOPES、47, 2(1998)41-52より)	





## はじめに

### 放射線

「放射線」と言うと、多くの日本人はよい印象を持っていないらしい。マスコミ報道もチェルノブイリ原発の事故とか、高速増殖炉の事故だとか、動燃の事故隠しとか、毎年8月に新たに印象づけられる広島・長崎の原爆の話があるくらいである。

しかし今や日本の電力のおよそ1/3が原子力発電によって行われ、日常の病気の診断の多くがX線画像によって行われているとか、現代文明を支えているテレビとかコンピューターの映像が放射線の一種である電子線によって作られていることとか、生活を明るく照らす蛍光灯がこれまた放射線の一種である紫外線で光っていることなど、気づく人はほとんどいない。まして太陽や水や空気存在に気づかないように、日常浴びている宇宙線とか土や岩、それにコンクリートや家の壁からの自然放射能とか、自分の体の中から発生している自然放射能、料理の素材に使われる肉とか野菜からの放射能などを気にしている様子はまったくない。放射線は周囲に満ち満ちているのに、目に見えないし、感じない。放射線の世界は日常の世界からはほとんど無縁なのだ。

日本で最初に開発され、世界にその技術が提供され、科学や技術、医学や工業の広い領域で、その専門家から革新的と評されてきた放射線イメージングシステムがあることは、多くの日本人はほとんど知らないであろう。

### 授賞式

1992年3月11日午後2時、第38回(1991年度)大河内賞の授賞式が東京・丸の内の日

本工業倶楽部で始まった。個人・グループに贈られる最高賞の大河内記念賞は富士写真フイルムの「放射線イメージングシステムの開発」(園田・高野・宮原・加藤)に贈られることになっていた。代表として賞を受け取ることになっていた宮原は落ち着かなかった。同じ技術屋としてこれはすごいイノベーションだと思っていた抗高脂血症薬開発で驚異的な業績を上げている三共の「プラバスタチン(商品名メバロチン)」(生産賞)や日本語ワープロの基礎を作った東芝の「日本語ワードプロセッサ」(技術賞)よりも高く評価されたからである。

受賞対象はイメージング・プレートと呼ばれる新しい放射線画像センサーを用いた放射線デジタルイメージングシステムである。このシステムは医療診断分野において従来のレントゲン写真方式に代わるFuji Computed Radiography(FCR)として、また放射線を解析手段として用いるサイエンス分野ではBio-Imaging Analyser(BAS)として、日本ばかりでなく世界で広く使われ、放射線イメージング分野において革新的と評価されてきたのであった。

### 短い開発史

富士フイルムで行われたこのシステム開発の概略は下記の通りである。

- ・ 1971年 長期研究計画構想の立案
- ・ 1975年 探索プロジェクト スタート
- ・ 1979年 商品化プロジェクト スタート
- ・ 1981年 臨床試験開始/公表
- ・ 1983年 医療用デジタルX線イメージングシステム発売 (FUJI COMPUTED RADIOGRAPHY, FCR)

- ・ 1987年 理化学分野 デジタル放射線イメージングシステム発売 (Bio-Imaging analyser, BAS)

最初の構想はすでに28年前のことである。また探索プロジェクトがスタートし、最初の製品が発売されるまでに8年を要した。システムが発売されてからすでに16年の歳月が流れている。

この日本発のイノベーションは世界に受け入れられてきた。しかし技術は時と共に陳腐化する運命を背負っている。このシステムに代わろうとする新たな挑戦も活発に行われている。この開発がいかに行われて来たかを記録にとどめておく時期に至ったのではないかと思う。

## 構成

イメージング・プレートは新規なデジタル放射線イメージングシステムの要素技術の一部である。このシステム開発ではその他に画像読み取りシステム、医療診断用画像処理システム、画像出力システム、画像ファイルシステムなどの数多くの技術イノベーションが行われた。本来ならばこのシステム開発におけるすべての事例を述べるべきであるが、筆者はイメージング・プレート開発の責任者であったにすぎず、他の技術イノベーションのすべてを知っているものではない。またこのシステム開発は探索段階（研究）と商品化段階（開発）の2つのプロセスを経て行われた開発であったが、商品化段階の詳細を語るにはなお時期尚早の感がある。またその任ではない。

従って本稿では特にこの放射線イメージングシステムの特徴となっているイメージン

グ・プレートとその探索段階を中心にして、この開発の発端となる構想の段階、探索の段階、そして商品化の段階のそれぞれについて実際の活動や社内の決定プロセスを述べ、最後にこの開発の意義について述べたい。

なお本稿ある程度の理解が必要であると思う。イメージング・プレートの原理、輝尽発光現象のメカニズム、画像化の方法、イメージング・プレートを用いた放射線イメージングシステムの医療分野、理化学分野、産業分野などへの応用などについて総説を添付したので参照されたい。さらに詳しく知りたい方はこの総説の引用文献を調べていただければ、技術の全体像がさらに明確になると信ずる。

## 1. 構 想

### 発 端

1970年の前後にかけて、富士フィルムの足柄研究所ではレントゲンフィルムに代わる新しいイメージング方式を検討していた。放射線像をセレン化カドミウム CdSe などの光導電体 (Photo-Conductor, PC) で受け、それと積層した電場発光体 (Electro-Luminescence, EL) で光に変換する PC-EL 方式の検討や、X線イメージインテンシファイアー/酸化鉛 PbO ビジコン系の検討などである。

1971年になり、レントゲンフィルム研究開発の責任者であった園田は10月22日に長期研究計画を提出した。その中で従来の方式とは全く異なる「X線像を蛍光スクリーンで光に変換し、その像を電気的に画像処理した後に電気信号から再び画像として記録出力する方式」を提案した。レントゲン画像診断の能力ををさらに向上させるためである。

しかしこの新しいシステムの具体的な検討は1974年まで行われることはなかった。なぜならレントゲン写真フィルムの改良に追われ、新システム開発に着手する余裕もなかった。それにもまして新システムを実現する具体的な技術も当時は思い浮かばなかったのである。

### 異分野を集める

足柄研究所は富士フィルムの中でも乳剤屋と呼ばれている化学系出身の研究者が幅を利かせている特殊な集団である。乳剤屋とは例えば硝酸銀  $\text{AgNO}_3$  と臭化カリウム  $\text{KBr}$  等の水溶液をゼラチン水溶液中で反応させて写真感光の素材である臭化銀  $\text{AgBr}$  結晶、いわゆる写真乳剤を作り、目的とする写真フィルムを商品として作り上げる一連の仕事をしてい

る研究者たちを指している。

例えばカラーフィルムは100種類を越える素材が巧みに組み合わされている。大学を卒業した新人は先輩について手取り足取りその複雑な乳剤処方法の訓練を受ける。その処方にはそれ以前のノウハウが詰め込まれており、それを知っている師匠とそれを教えて貰う弟子との関係がきちりと確立されている。生え抜きの乳剤屋の中に途中から入ってくる者は全くいないと言っていいほどの特殊な世界であった。

しかし園田の考えている新しいイメージング・システムは乳剤屋では無理だった。物理屋、光学屋、電気屋、材料屋などを必要とした。園田は乳剤屋の集団の自分の研究室によるその世界を知っている異質の分野のメンバーを次第に集めていった。

後に後半の新システム商品化プロジェクトのリーダーになっていく高野は高校を卒業してすぐに新聞社の印刷工として就職した。しかしその封建的な環境に絶望し、大学に入り直して物理を学び、富士フィルム足柄研究所の画像解析研究室に配属された。医療画像研究で立派な成果を上げた来たものの、しかしその長と意見が合わず、写真乳剤研究室長の園田に「来ないか」と呼ばれたのである。

後にイメージング・プレートと呼ばれる新しい放射線画像センサー開発のリーダーになっていく宮原は前に勤務していた会社で原子炉核燃料被覆管材料開発の経験を持つ。しかしその開発が中止になり、まったく異質の富士フィルムに飛んできた金属材料屋である。最初は小田原工場オフセット印刷材料部の所属であった。たまたま園田の研究室に実習に来ていて、戻る段になって帰りたくないと言って園田に引き取られたのである。

画像処理アルゴリズム開発のリーダーになっていく応用物理屋の加藤は入社後生産技術部で工程機器の開発をしていたが、社内の留学制度を利用してスタンフォード大学に行き、会社の仕事とは無関係の画像処理の研究をやっていた。留学が終わり、帰る先を探しているとき、園田が自分の乳剤研究室に引っ張ってきたのである。

応用物理の博士課程出身として初めて富士フィルムに入社した松下も園田のもとにいた。松下は新システムの立案に参加したが、開発のスタート直前に大学に戻った。園田は松下がいなくなったことを今でも残念がっている。

1974年になり、レントゲンフィルムの商品化研究の主体がそれまでの足柄研究所から富士宮工場に移ることになった。レントゲンフィルム製造をしている第4製造部技術課がレントゲン写真乳剤研究を、富士宮研究所がカラーレントゲンフィルム研究を担当した。さらに中央研究所ではXONIX方式と呼ばれる電子写真方式のレントゲン写真の研究をやっていた。

園田にとって、3年間暖めていた新しいシステムをじっくり考える機会がやっとまわってきたのである。

### レントゲン写真の技術進歩

1896年の発明以来、レントゲン写真システムの感度向上に関する技術的進歩は大きく4つのステップに分けられる<sup>8)</sup>。

最初のブレークスルーは1920年代、それまでの厚いガラスを用いた写真乾板から薄い透明のセルロイドフィルムの両側に写真乳剤を塗布したレントゲンフィルムの完成である。

Estman Kodak 社によるこの発明により、

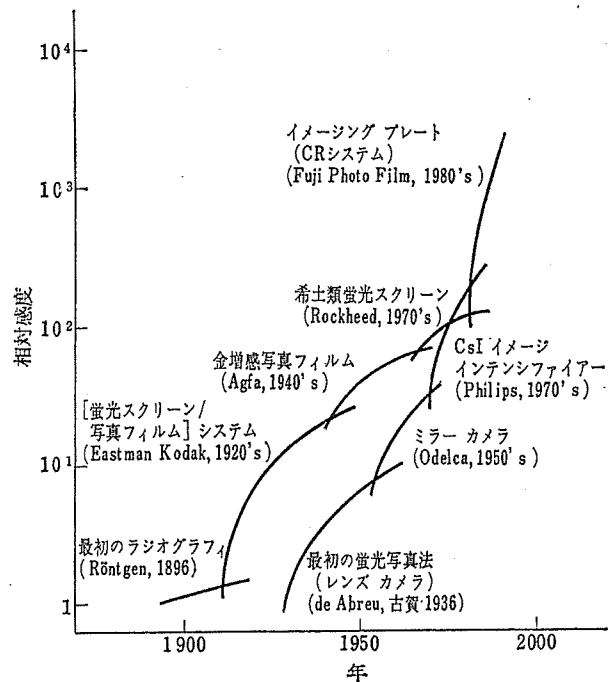
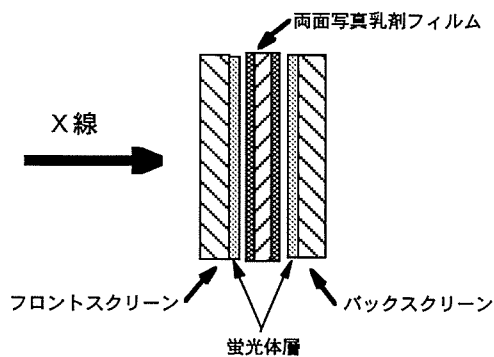


図 X線ラジオグラフィの進歩。最初のレントゲン写真(1896年)から現在のイメージング・プレートによるデジタルX線写真に至る約1世紀の間に4回のブレークスルーが行われ、1000倍に近い感度の進歩があった。

レントゲンフィルムの前後を2枚の蛍光増感スクリーンで挟むことができるようになったのである。それまでX線はガラス製の写真乾板上の10 $\mu$ mほどの薄い写真乳剤層に数%しか吸収されなかった。

新しいシステムはX線を2枚の蛍光スクリーンにより一旦光に変え、レントゲンフィルムの両側から感光させる方式となった。X線吸収量は一挙に50%以上も向上した。被爆線量は減少し、撮影時間は短くなって動きによるボケはなくなり、画質が飛躍的に向上した。この方式は「フィルム/スクリーン」システムと呼ばれ、医療X線撮影法式のドミ



図：現在、レントゲン写真は1920年代に完成したこの（フィルム/スクリーン）システムで撮影されている

ナント・デザインとして今日まで踏襲されている。

1940年代に入ると写真フィルムの大きな感度の向上があった。AGFA社（ドイツ）の金増感法の発明である。これはハロゲン化銀結晶の表面に金化合物を存在させ、増感核として利用する技術である。感度は画期的に1桁近く上がった。このドイツの技術は第2次大戦の終了後、公開されて世界に広く知られることになった。

さらに1970年代に入り、航空宇宙企業のロッキード社によつて希土類元素を用いた蛍光増感スクリーンの発明がなされた。それまで一般的に使われていた蛍光体タングステン酸カルシウム  $\text{CaWO}_3$  に代わり、硫酸化ガドリニウム  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$  系の蛍光体を用いた蛍光増感スクリーンである。これによって感度は4~8倍の向上がなされた。そして蛍光体の緑の発光に合わせてレントゲンフィルムもそれまでの青感受性から色素による増感処理を施された緑感受性に代わった。今日の「フィルム/スクリーン」システムはこの“グリーン・システム”が主流となっている。

そして最後は新しい放射線画像センサー“イメージング・プレート”によるデジタル

イメージングシステムとなる。しかしその発表は1981年まで待たねばならない。

### 1970年代とは

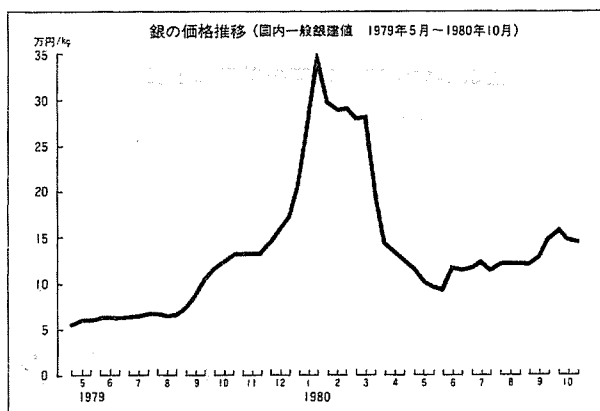
1970年代は社会的な面でも、技術の面でもレントゲンフィルム事業を揺れ動かすような出来事が起こっていた。

1972年にローマクラブが「成長の限界」を発表した。「現在のような幾何級数的な世界人口増加と経済成長がこのまま続けば、21世紀には破滅的な危機に陥る可能性が強く、物質的な意味でのゼロ成長を実現する必要がある」と警告し、社会に大きなインパクトを与えていた。後の新システムの開発提案

(1975)において、園田は「写真業界が使用する銀量の約1/3をレントゲンフィルムが占めている。その消費量と資源の限界から見て、将来価格と供給の上で社会的困難を来す恐れがある。何らかの省資源型新システムが必要となるのは当然と思われる」と述べたのも、ローマクラブの「成長の限界」が彼の頭の中にあっただからであろう。

石炭を凌いで石油が世界のエネルギー源の第一位になったのは1967年である。1973年10月に第一次石油ショックが起こった。その時日本のエネルギー源に占める石油の割合は77%にも達していた。石油価格は2回値上げされて4倍に跳ね上がり、燃料や原材料が値上がりし、物価は上昇し、日本経済は戦後初めてマイナス成長となった。銀価格も例外ではなかった。それ以前のkgあたり1万円台から、1974年3月には5万7000円にまで跳ね上がった。「銀ショック」である。銀を主原料とし、その価格が製品コストの大きな割合を占めている写真フィルム会社にとってその痛手は大きかった。特にレントゲン

フィルムは他の製品よりも大量の銀（平方メートル当たり 12g）を消費しており、レントゲン・フィルム事業は赤字に陥り、事業の存続自体が問われるようになったのである。しかしこれは序の口であった。後日談になるが、1980年1月には kg あたり最高 34 万 6000 千円まで急騰した<sup>2)</sup>。市場ではレントゲンフィルムを買って、その塗布されている銀を取り出して売った方が儲かるという事態にまで陥ったのである。新システムの開発がスタートして4年目のことであった。



銀価格はそれまでの1万円台から、35万円/kgまで高騰した

### 新しいモダリティの登場

1970年代はまた医療画像分野において画期的なイメージングシステムが不思議なほど続々と登場してきた時代でもあった。

日本は超音波断層装置の発祥の地である。超音波による人体の画像化研究はすでに1950年代から始まっていた。今日使われている電子スキャンによる実時間処理可能な超音波断層装置が開発されたのは1971年であった。

核医学イメージングと言う分野がある。ラジオアイソトープで標識された放射性医薬品

を患者に投与し、放射されるガンマ線を検出して体内のラジオアイソトープ分布を画像化する分野である。核医学イメージング分野ではX線CTに先だってコンピューターを用いた断層撮影法(Computed Tomography,CT)が研究され、医療現場で用いられていた。この分野で先端的にデジタル断層イメージングが行われていたのは、核医学イメージングでは一つの画素が大きく、総画素数が少ないため当時のコンピューターでも処理が可能であったからである。これらは今日のポジトロンCT(PET)やシングルフォトンCT(SPCT)などとなって発展している。

そのような状況の中で、1972年にイギリスのレコード会社EMI社から突然に頭部X線断層スキャナーが発表された。EMIスキャナーである。もちろん従来のレントゲン写真撮影法でも人体の縦断層像や横断層像は可能であったが、EMIスキャナーで得られた横断層画像はその鮮明さにおいて、はるかに従来の方法を凌駕していた。医療画像研究者にとってこの衝撃は大きかった。Godfrey Hounsfieldのこの発明は現在では心臓の動きを止めるほどの高速のスピードで人体の任意の部位をイメージングするX線CTとなって大いに発展していく。この画期的なシステムが放射線医療機器メーカーではない異分野の企業で最初に開発されたことはイノベーションを考える上で非常に興味深いことである。

また1971年に、それまで物質の分析手段の一手法としてのみ知られていた核磁気共鳴法(Nuclear Magnetic Resonance,NMR)を応用した断層撮像装置(NMR-CT)の特許出願がアメリカのRaymond Damadianによってなされた。このアイディアは1973年には早くもイギリスにおいて医療診断に実際に

使われている。しかしこの方式が人体の任意の断面として物理的な形態画像でイメージングしたり、体内の反応とか物質代謝まで表現する機能画像までイメージングできるシステムに発展するとは予想もできなかったであろう。今日、このシステムはMRI (Magnetic Resonance Imaging) と呼ばれるようになって普及している。この画期的なMRIもまた専門の医療機器メーカーからは生まれなかったことを指摘しておいていいだろう。

こうして、1970年代前半には今日の先端的な医療画像診断システムのほとんどが出そろっていたのである。

### レントゲン写真を越えるもの

これらの新しいモダリティはこれまでのレントゲン写真を駆逐するであろうと多くの人々は予想した。エレクトロニクス化されていない唯一の画像診断法として取り残されてしまったのである。

しかしながら1980年代におけるアメリカの医用画像診断\_\_調査においても、画像診断件数の1億8110万件のうち90.9%は従来からのレントゲン写真が占めていた。新しいモダリティの超音波診断は4.0%、核医学イメージングが3.2%、X線CTが1.8%であった<sup>7)</sup>。現在において、これらの新しいモダリティの比率は次第に増加しているとはいえ、レントゲン写真システムは、現在においても集団検診などのスクリーニングから精密診断に至る広範囲な領域で圧倒的な優位性をもって利用されている。

それは次のような理由からであろう。

1) レントゲンの発明以来、100年以上にわたるその歴史の中で、無数の医学症例とレントゲン写真との対応がレントゲン画像診

断法として体系化され、それに沿った医学教育体系が出来上がっていること

2) レントゲン写真システムは、X線CTやMRIとは異なり、原理が単純でわかりやすく、シンプルで使いやすく、処理能力が高くコストが安いこと

3) レントゲン写真の画像情報量は他のデジタルイメージングシステムに比べて桁違いに大きく、これを解決する技術的手段が見つからなかったこと

などであろう。

### 写真感光メカニズム

写真フィルムの研究開発を担当していた研究者たちはレントゲンフィルム技術の限界を薄々感じていた。感度を上げると画質が劣化し、感度を下げなければ画質が向上しないという技術の壁であった。

写真フィルムとはハロゲン化銀結晶  $\text{AgX}$  ( $\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ) の感光特性を利用した写真感光材料である。ハロゲン化銀結晶の感光メカニズムはおおよそ次のように考えられている。

ハロゲン化銀結晶には感光核と呼ばれる電子トラップがもともと存在している。電子トラップとは電子が静電場によって引きつけられ動けなくなるような結晶中の場所である。

光が吸収されると結晶中に電子と正孔が発生する。電子は結晶中を移動し感光核に捕獲され、感光核はマイナスとなる。これを電子過程と言っている。

結晶中には本来ならば結晶の格子点にあるべき銀イオンが格子間銀イオンとなって多数存在している。このプラスの格子間  $\text{Ag}$  イオンはマイナスの感光核に引き寄せられ、そこで中性の銀原子となる。一方電子と共に発生したプラスの正孔はゼラチンや結晶中の正孔

トラップに捕獲され、電子との直接的な再結合が防止される。これをイオン過程と言っている。この2つのプロセスがくり返されて感光核は次第に銀原子からなる集合体（クラスター）に成長し、安定な潜像（現像核）となるのである。この潜像は現像処理液中で触媒作用をし、ハロゲン化銀結晶はすべて還元されて金属銀に変化して、光の当たった部分は黒くなって目に見えるようになる。

理論的な考察によると、最小の潜像は4個の銀原子からなるクラスターと考えられている。このことは、光子4個以上ならばその1個の結晶は現像可能となること、逆に4個以上の光子が吸収されても1個の結晶しか現像されないことを意味する。ハロゲン化銀結晶がこの光子の「しきい値」を持っていることは、この材料が室温において熱的ノイズを自動的に除去する特別な機構が自然に備わっていることを意味する。このメカニズムはこの材料が写真撮影可能な唯一の高感度感光材料として150年以上にもわたって用いられてきた大きな理由である。

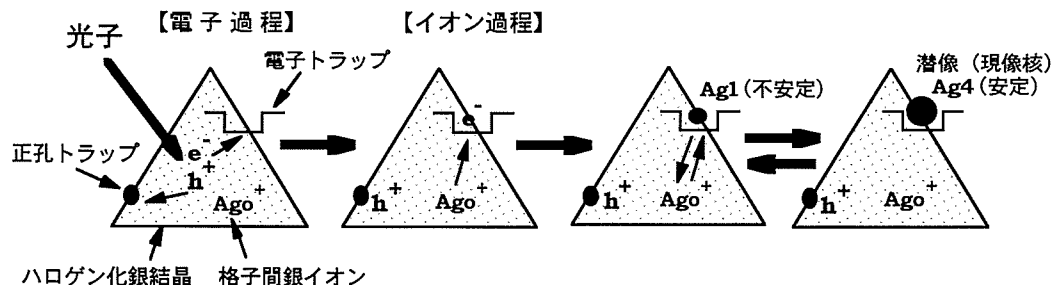
実用的な高感度写真フィルムの最小の潜像はすでに10個程度の銀原子からなるクラスターに到達していると考えられている。潜像となる最小の銀原子の集合体（クラスター）の理論限界は増感技術の発達により2個の銀

原子と考えられている。しかし感度は無限に向上するのではなく、次第に理論値に近づいて来ていることは確かであった。

### 写真フィルムの限界

ハロゲン化銀自体の感度の限界ばかりではない。ハロゲン化銀結晶が塗布された写真フィルムも、化学システムとしてその構成上から限界がまた生じてきていた。一枚の写真フィルムは CCD などの他の電子的撮像システムと異なり、それ自身でセンサー・メモリー・ディスプレイの機能が三位一体となったスマートなイメージングシステムである。しかしこれら3つの機能が分離できないが故に、写真フィルム自身の限界が生まれてきたのである。

第一は高感度化の限界である。写真乳剤層中でハロゲン化銀結晶は互いに独立して存在していなければならない。互いに接触するほど密に充填すると、光が当たっていない未露光結晶までが現像されてしまう。このため感度を上げようと乳剤層に結晶を高密度に充填することは技術的な限界があった。また現像液やその反応生成物が乳剤層を物質移動する必要があるため、乳剤層を厚くして感度を上げる手法に限界が生じる。たとえこれらの難問が解決され高感度化が可能になったとして



図：ハロゲン化銀の感光メカニズム。結晶に光が入射すると、電子過程とイオン過程がくり返されて安定な銀原子クラスターが生成する。これが潜像、すなわち現像核となり結晶中の銀イオンは還元されてすべて銀原子となる。



も、感度を上げるほど周囲からの自然環境放射線によるノイズ（カブリ）が不可逆的に増加し、画像の S/N が低下して、高感度化に限界を与える。

第二は定量計測の限界である。写真フィルムでは、光（放射線）強度と写真黒化濃度の関係は一般に比例せず、非線形である。比例する範囲は黒化濃度がごく低い場合に限られる。また現像による黒化濃度のばらつきも不可避である。そのため写真フィルムは位置を正確に計測できても、照射された光（放射線）強度の精度良い測定は困難であった。特に写真フィルムで得られる黒化濃度を放射線量に換算して科学的なデータとして使う場合にその定量性が問題となっていた<sup>13)</sup>。

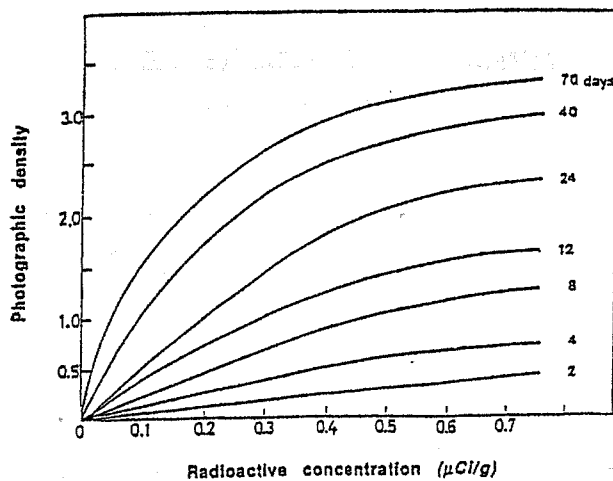


図 放射線 ( $^{14}\text{C}$ からの $\beta$ 線) に対して写真フィルムは非線形な応答特性を示す。

第三はデジタル化の困難性である。写真フィルム画像はアナログである。従って写真フィルムの画像情報をコンピューターで処理する場合は、マイクロデンシトメーターなどを用いて間接的にデジタル情報に変換する必要があった。デジタルイメージングの時代になり、

これは写真フィルムの短所として浮かび上がってきた。

### 開発競争が始まる

このような状況の中で、新しいデジタルX線イメージングシステムのニーズは高まっていた。これは従来のレントゲン写真法よりも被曝量低減が可能となり、急速な進展を示してきたコンピューターを利用して画像処理による画像診断の質的向上をはかり、さらにレントゲン写真の保管や検索、他の診断情報との結合などを実現することによる病院の診断業務効率化などを目指していた。そして1970年代からこのシステムの実現を目指す開発競争がアメリカで密かに始まっていたのである<sup>9)</sup>。これらはその後1979年から1983年にかけて6社から順次公表されていった<sup>14)</sup>。1979年にAS&E社、1981年にPicker社と富士フィルム、1982年にADAC社、1983年にXONIX社、DIGIRAD社である。この中で勝ち残ったのは富士フィルムであった。

特徴的なことはこの分野を専業とする放射線機器の大メーカー（ジーメンス、フィリップス、GEの3社、日本では日立メディコ、東芝、島津製作所の3社）がこの開発競争を無視したことである。X線CTを武器として異分野から医療画像診断分野に参入しようとしたEMI社は最終的には事業化できず、GEなどの他のメーカーにその技術は移転してしまった。これらの放射線機器メーカーは他の異種企業が成功したらその技術を奪い取ればよいと考えていたのかもしれない。もっとも彼らは当時X線CTの開発競争に明け暮れていて、従来のレントゲン写真に代わるデジタルX線イメージングシステムの開発にまで手が回らなかったことも事実であろう。

医療用デジタルX線イメージングシステムの開発競争

メーカー	富士写真フイルム (日本) FCR 1981年	DIGIRAD (米国) SYSTEM ONE 1983年	ADAC (米国) PDX-4800 1982年	PICKER (米国) DIGITAL CHEST 1981年	XONICS (米国) DR-2000 1983年	AS & E (米国) MICRO-DOSE 1979年
システム名称 発表	FCR	SYSTEM ONE	PDX-4800	DIGITAL CHEST	DR-2000	MICRO-DOSE
X線照射システム ・X線ビーム形状 ・最小照射時間 (s)	錐ビーム 1/100以下	錐ビーム 1/100以下	錐ビーム 1/100以下	扇ビーム 4	扇ビーム 1.5	点ビーム 5
X線像検出システム ・原理 ・検出器形状	PSL 2次元	PSL 2次元	PC 2次元	PL 1次元	PL 1次元	PL 点
・像検出方法	輝尽性蛍光プレート (BaFBr:Eu) ↓ レーザー光走査 ↓ PMT	輝尽性蛍光プレート ( ) ↓ レーザー光走査 ↓	光導電性プレート ( $\alpha$ -Se) ↓ マイクロエレクトロ メータ走査	1次元蛍光プレート (Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Tb) ↓ PDアレイ	シンチレータアレイ (CsI) ↓ II ↓ PDアレイ	シンチレータ (NaI) ↓ PMT
・画素数/ライン ・画素密度 (画素/mm) ・検出分解能 (ビット) ・像読取り時間 (s)	2510~1760 5~10 10 35~55	2048 6 12 30	1024 3~5 12 90	1024 2 12 4	2048 4 12 1.5	1024 2.5~6 10 5
画像表示システム ・表示方法 ・総画素数 ・濃度分解能 (ビット)	フィルム (レーザー画像記録) Max. 2510×2000 10	CRT 512×512 (6)	CRT 1024×1024 (6)	CRT 512×512 (6)	CRT 1024×1024 (6)	CRT 640×512 (6)
備考	市販中	発表のみ	発表のみ	市販中	開発中止	臨床テスト中

FCR (Fuji Computed Radiography), PSL (Photo-Stimulated Luminescence: 輝尽蛍光), PC (Photo-Conduction: 光伝導), PL (Photo-Luminescence: 蛍光), PMT (Photo-Multiplier Tube: 光電子増倍管), PD (Photo-Diode: フォトダイオード), II (Image Intensifier: イメージングシリンジフアア)

彼らがなぜこの分野に参入しようとしなかったのか、事業戦略や技術戦略から見て興味深い問題である。

### 新システムの検討

1975年4月29日天皇誕生日の休日にもかかわらず、朝9時から富士フィルム足柄工場の古い木造の社員研修施設、第2けいはつクラブに園田の下でレントゲン写真を研究していた7人が「第1回 New X-ray system 検討会」に集まった。園田、高野、宮原、加藤、松下と、一年前に入社していた高橋、富士宮工場から移ってきた福岡である。目的は園田が4年前に描いていた新しいシステム、すなわち「X線を光に変え、画像処理をし、画像再生して診断を行うシステム」の具体的な検討であった。終わったのは午後四時半。この7時間半に及ぶ検討会によって将来の新システムの基本概念が決定づけられたのである。

### なぜ始めたのか

このシステム開発は、その時代の、社会の、企業の、そして技術のイノベーションへの強いニーズがあったことは確かである。しかしこの種のニーズはどの時代でも、どの局面でも頻繁に起こっているものである。先が読めない新たなことを始める前方にはいつも高い壁がそびえている。やっとそこまでたどり着いた幸運な者でも、多くの場合はその壁の前から戻ってしまう。越えられなかった正当な理由は実際に無限に転がっているのである。

研究部長になっていた園田自身はその時に社内で将来が約束されている乳剤屋の道をそのまま選ぶこともできた。レントゲンフィルム研究室でも開発すべき技術は数多く残って

いた。しかし100人を越える研究員を統括する研究室長がなぜそれを捨て、一人になっても先の読めない新しいテーマをやりようとしたのか。

「純粋に技術的な理由からだよ」と園田は言う。レントゲン写真システムをブレークスルーしないと、レントゲン写真の将来がない。ブレークスルーのポイントは画像処理を行うことであり、そのためにはX線を電気信号に変換することが必要だった。これは乳剤屋の技術ではできない。だから新しいテーマを選んだ。しかし本当に出来るのか心細かったと当時を振り返っている。

「それに」、と園田は言う。「高野、宮原、加藤の3人がいなくなったら始めなかったよ」と言い切っている。3人から言わせれば、園田だからついていったとの返事が返ってくるだろう。3人は年齢、専門領域はもとより性格が大きく違う。共通していることは、足柄研究所という長い歴史の中で確立された組織に紛れ込んだ異分子であったことであろう。いずれも自分で自分の道を作ってきた人生経験を持ち、決して順調な会社生活を送ってきたのでもなかった。しかしここで何か新しいことを自分でしなければとの強い思いは共通して持っていた。

チームが発足する前のある日、宮原は足柄研究所長室に呼ばれた。研究所長から、これからは乳剤屋としてやっていくか、新しいテーマを取るかを迫られたのである。私についてくるか、園田についていくかとの微妙な問いでもあった。それまで乳剤屋として周囲から成果を認められてきたとの自負もあった。が、彼は即座に新しいテーマを選択した。

そのまま真っ直ぐに行けば、よく知っている大きな道であったのに、なぜ未知の小さな

分かれ道の方を選んだのか。「その小道がどこに続いているか誰も知らない。崖や急流で行き止まりになっているかもしれない。様子が分かっている真っ直ぐな大きな道を早足で歩いて行くよりは、時間がかかるかもしれないが曲がりくねった小道を歩いていった方が、見たこともない美しい場所を発見できる可能性があるだろうと思った」と宮原は後にその時の気持ちを語っている 11)。

### チームの発足

6月になって園田はこの新しいシステムの話の研究開発担当常務の三浦に持っていった。もと乳剤屋の三浦はこの新しいシステムの中味を理解できなかったようだったと園田は言う。三浦は「やりたいなら副社長のところに行って話を通しておけ」と勧めた。副社長の福田は当時技術に関する富士フィルムの総責任者であった。福田ももと乳剤屋である。園田によると副社長は話を理解したとは思えないが、結論は「やってみろ」だった。技術のトップの二人から新システムの開発の非公式な了解が得られたのである。ただし三浦からは「やるなら中央研究所でやれ」との条件がついた。足柄研究所から遠く離れた中央研究所の方が伝統とられずに新しいことを行えるだろうとの読みであった。また福田からは「3年間で見込みをつけろ」との条件が付いた。

やりたいと思ひ、やれるかもしれないと思っても、会社が認めると限らない。テーマ自体は、社会の、そして会社の、技術開発の、必然性はあることは確かだった。しかしそれがあるからと言って、トップから承認されるとは限らない。ここにも大きな壁が存在する。なぜ園田の提案を会社は認めたのか。技術の

内容を理解したとは思えないと園田が言っている技術のトップの副社長や研究開発担当専務が、なぜ「やってみろ」と承認したのか。

富士フィルムは昭和9年に映画用フィルムを国産化しようとして設立された。コダック社からの技術導入はコダック社から拒否された歴史を持つ。創業以来、技術を志向した。困難なその当時の事業創造を肌で感じ取ってきた技術屋が1970年代は技術のトップになっていた。彼らはマーケットが急速に拡大した高度成長時代に育った技術屋に比べ、技術への思い入れが違っていたことは確かである。

「私は信用されていたんだよ」と園田は事も無げに言う。それまでの実績・成果、人柄・言動などが調和されたその人の徳性に対して、技術のトップは信用し決断したのだろう。やりたいとの思いと、やれそうだという感じと、やるだろうとの相互の信頼感が、イノベーションの最初の壁を越す原動力になった。

8月になり、園田、宮原、加藤、高橋、そしてその年に入社した寺岡に中央研究所への異動辞令がでた。高野には兼務の辞令が出た。高野はその時すでに富士宮工場第4製造部の検査課長として赴任していたのである。

中央研究所にとって、このテーマは思いもかけない招かれざる客であった。技術のトップの福田、三浦に突然に押しつけられたのである。まだ全社的に公認されていなかった。

8月25日、園田は中央研究所長の水木にこの「Mini X-ray system 研究計画」の説明を行った。研究は3つに分かれる。

- 1) 診断能と画質に関する品質目標の研究
- 2) X線を電気信号に変える蓄積型発光板の開発
- 3) 画像処理技術と発光板から情報を取り出し再生する装置の開発

の3つである。スケジュール目標は1979年4月に各要素技術をまとめて実験機による試験品検討会を行う。その時点で商品化すべきかどうかを判断し、GOなら1981年4月に商品化プロトタイプの試作検討会を行って市場導入テストを開始すると言う園田の案である。

後日談になるが、この園田のスケジュール案は実際の開発の実態とぴったり一致していた。現実には1979年6月15日に商品化ステップに進めることが経営トップにより承認され、1981年3月29日に市場導入テスト、すなわち臨床試験を目的として試作機が国立ガンセンターに搬入された。計画時点で4年後、6年後を読んだ園田のスケジュール目標は実際と1~2ヶ月の狂いしか生じていなかったのである。まだ原理的にこのシステムが可能かどうかはわからなく、具体的な技術もない研究スタート以前であることを考えると、これは恐るべき予測であり洞察と言えよう。

後年、このシステム開発が成功した後で、なぜスケジュールを予測できたのかとの質問に対し、園田は「その時はエイヤと決めただけだよ」と答えていた。事実、確実なことは何も分からなかったであろう。しかし技術屋としての体験と幅広い知識がそうさせたことは確かである。

### トップの承認

メンバー5人が足柄研究所での残務処理を終えて、神奈川県南足柄市から埼玉県朝霞市にある中央研究所に赴任したのは1975年10月だった。それまでの足柄研究所の3フロアーに及ぶ園田が管轄していた総勢100人を越える広い研究室と違って、中央研究所では5人の机がやっと入る部屋と倉庫を整理した

狭い実験室しかなかった。環境はがらりと変わった。とにかく新しいX線イメージングシステム開発研究がスタートした。

スタートしたとは言え、まだ経営トップが公式に承認したテーマではなかった。その場は11月7日にやってきた。経営最高決定の場の常務会である。常務以上が本来出席することが定められている常務会では、説明は中央研究所長の水木が行うものと園田は思っていた。しかし部長になったばかりの園田にその役が回ってきた。

園田は「ミニXレイイメージングシステムの研究開発計画（小サイズ診断用X線写真撮影システム）」を提案した。常務会では異例なほど薄い提案資料だった。ほとんど議論はなかった。技術のトップの二人からはすでに了解を貰っていた。「小サイズで本当に診断が出来るのか」との会長の小林節太郎の質問程度だったと言う。最後に社長の平田九州男がGOを決めた。「平田さんの太っ腹な決定だった。奇跡的に通ったと思っている」と園田は述懐する。

この提案テーマは新たにNDX(New Diagnostic X-ray)開発推進チームと名付けられ、11月13日に社長通達によって正式に発足した。11月28日には中央研究所で電子写真方式によるX線イメージングシステム研究をしていた松本以下6名が専任で加わった。リーダーは園田、サブリーダーは富士宮工場第4製造部検査課長の高野が兼務した。

園田はスタート直後に、中央研究所の所員の前でこのNDXシステム開発計画の開陳式を行っている。

「このシステムの目的はレントゲン写真システムに比べ優れた診断能を持ち、低被爆線量で、大幅な省資源が達せられること、ユー

ザーにとって診断情報が向上しランニングコストが低下すること、富士フィルムにとって省資源になり、ハロゲン化銀感材メーカーからの脱皮がはかれることを目指す」のだと。長い道のりの第1歩がスタートした。

ところがスタート直後の12月、富士宮工場ではレントゲンフィルムの製造故障が多発し、大問題になっていた。工場長の那須は、この故障は園田でないと直らないと副社長の福田に直訴し、福田は園田の製造部長への異動を即座に決めてしまった。園田は拒否したが、だめだった。ものになるかわからない新テーマよりも、会社としては現業の方が重要だったのである。園田は条件闘争に持ち込んだ。研究の場所とメンバーを富士宮工場により近い足柄研究所に移すこと、プロジェクトのリーダーを兼務することである。足柄研究所には画像処理研究に必要な大型コンピュータがあった。また蓄積型発光板の材料研究にも便利だった。福田はその案を飲んだ。

1976年の6月になり、メンバーは埼玉県朝霞市にある中央研究所に半年ほどだけで、もとの神奈川県南足柄市にある足柄研究所に移った。転勤ができない2人はチームを離れ、中央研究所の他のテーマに移った。再発足したとは言えリーダーの園田もサブリーダーの高野もレントゲンフィルムの製造現場の業務に忙殺され、チームの面倒を見る余裕はほとんどなくなることは目に見えていた。

### 基本コンセプト

1970年代に出現した新しいモダリティ、すなわちX線CT、超音波CT、MRIなどはすべてレントゲン写真とは質的に異なる新しい診断情報を付加することで医療診断に貢献している。しかしこれから開発しようとする

デジタルX線イメージングシステムはそうではない。アナログのレントゲン写真そのものをデジタル画像に置き換えようとしている。あらゆる特性でレントゲン写真システムに劣ってはならないことが要求されていた。これが新しいシステムの宿命だった。

システムの基本は、【X線照射】→(人体)→【センサー】→【画像処理】→【ディスプレイ】の流れの4つのサブシステムより構成される。この技術のポイントは「レントゲン写真」の持つ莫大な情報量を落とさずにいかにデジタル信号化するかにあった。デジタル化技術とは得られた情報をいかに捨てるかの技術でもある。特に被写体を透過してくるX線の2次元位置情報をデジタル化する技術がキーを握っていた。すなわち撮影システムとその画像化の問題である。

医療の現場で日常的に用いられているX線撮影装置はX線が一点から放射される円錐ビームのX線である。円錐ビームX線の場合は大きな2次元のエリア・センサーを必要とする。このセンサーがデジタル化を可能にする機能を持っていればよい。一方、2次元位置情報のデジタル化は一点から線状に放射される扇状ビームX線と一次元のラインセンサーを組み合わせる被写体を走査する方式、あるいは点状のペンシルビームX線と点センサーを組み合わせる被写体を二次元に走査する方式も可能である。

新しいシステムに要求される項目は、従来の“スクリーン/フィルム”システムに比べて、

- 1) 診断画質 (広いラチチュード・視覚的な診断の確かさ)
- 2) 撮影感度 (被爆線量)
- 3) 撮影処理能力

- 4) 撮影コスト  
5) 撮影の自由度（部位・体位・X線照射野・撮影管電圧・他）

などが同等以上出なければならない。

さらに既存システムと整合をとりつつ移行し得ること、つまり、

- 1) 既存のX線撮影装置、撮影技術が使えること（断層撮影・拡大撮影・造影撮影・サブトラクション像など）
- 2) 既存のX線画像診断学体系に急激な変化を生ぜしめないこと

が求められる。

従って目指す放射線画像診断システムの基本コンセプトは、既存のX線撮影装置の使用を前提とした上で、「病院における従来のレントゲン写真の撮影から診断までの流れを変えない“デジタルX線イメージングシステム”」でなければならない。

現実にはこのコンセプトが、新しいシステムの現実の医療現場への導入障壁を低くした決定的な要因になる。後にわかったことであるが、他の競合システムはこのコンセプトが徹底していなかったのである。

#### 実現のカギ

3年間に限定されたNDXプロジェクトの目的は、システムを構成する主要な技術が原理的に可能であるかどうかを確認することにあった。すなわち下記のような課題である。

- 1) レントゲン写真並の大サイズで画像情報をデジタル電気信号として取り出す事が出来る【放射線画像センサー】は実際にあり得るのか。
- 2) 放射線画像センサーからレントゲン写真と同等以上の画像情報を高速に高精度に取り出す【画像読み取りシステム】は実際に

可能なのか。

- 3) 画像診断能力が向上でき、短時間処理が可能な【画像診断アルゴリズム】はありうるのか。

それぞれ担当の責任者は、放射線画像センサー開発が宮原、画像読み取りシステム開発は松本、画像診断アルゴリズム開発は加藤と決まった。

#### 共同研究の開始

しかし園田はこれだけでは成功しないと考えていた。外部の人たちとの協力関係を作っておくことが必須であると考え、2つの研究会を発足させた。

一つは放射線画像センサーに関する共同研究である。このセンサーは特殊な蛍光体であると予想された。園田は従来から富士フィルムブランドの蛍光増感スクリーン供給元でもあり、蛍光体のトップメーカーであった大日本塗料をその相手先に選んだ。大日本塗料の蛍光体部門は足柄研究所から10kmほどの近い距離の小田原工場にあり、打ち合わせにも便利であった。蛍光体部門責任者の坂本と園田は旧知の仲だった。坂本は園田の申し出でを即座に受け入れた。

しかしこの大日本塗料の共同研究は最後まででは続かなかった。途中で挫折したのである。当時、富士フィルムの独壇場であったオフセット印刷材料（PS版）市場に三菱化成工業が参入し始めた。富士フィルム社内は強力な侵入者に神経質になっていた。しかも三菱化成は富士フィルムの最大のライバルである小西六写真工業に資本参加していた。この三菱化成が富士フィルムの共同開発相手先、つまり大日本塗料の小田原工場を突然買収し、社名も化成オプトニクスに変更してしまったの

である。1979年3月のことであった。富士フィルムの経営陣はこの事態を極めて重大に受け取った。富士フィルムの極秘プロジェクトに関する情報が小西六写真工業に漏れることを恐れたのである。直ちに共同研究契約は破棄され、共同研究はご破算になった。

もう一つの重要な共同研究は「診断画質研究会」である。画像診断アルゴリズム開発を行うためには放射線専門医がどのように画像を見て診断しているかを知る必要がある。画像処理技術者のだけの判断は医者を受け入れられる可能性はない。放射線医との共同研究が必須であると園田は考えた。レントゲンフィルム医療営業部門である富士Xレイ株式会社の助けを借りて4人の放射線医が選ばれた。条件は、将来有望な若手の放射線医であること、専門分野が異なること、勤務先が異なること、学閥が異なることである。専門分野とは、胸部診断、骨部診断、ガン診断、マンモグラフィ（乳ガン）診断となった。この若手の専門医は目指す新しいシステムが将来成功した時に新システムの積極的なファンになってくれるであろうとの読みもあった。

「診断画質研究会」の目的は、診断画像のサイズはどこまで小さくできるのか、X線のエネルギー情報は診断画質を向上できるのか、診断に適した画像処理とは何かの3つであった。しかし最も重要なことは、放射線医が画像を見たときに何を見て、何を考え、なぜそのような診断をしたのかとのプロセス、つまり医者の画像診断ノウハウを知ることであった。彼らが人体の解剖図を頭の中に描き、過去の症例と対比させながら、実際には見えていないものまで見ようとしていると知ったのも「診断画質研究会」であった。ぼやけたところはぼやけたなりに画像処理しなくては行

けない。はっきり見えるように画像処理をしてはいけないのだ。加えて重要だったのは医療の現場で放射線技師や放射線医が実際に何を作業しているのか、何を欲しているのか、つまりマーケットの現場のニーズを開発メンバーが肌で知ることだった。ユーザーである放射線医がシステムの仕様作りに関わってくれることは、マーケットのニーズを的確に捉えることになる。

「診断画質研究会」は「診画研」と略称され、毎月1回開催された。この研究会を続けていく内に、開発メンバーは次第にレントゲン写真を“読める”ようになって行くのである。もちろん新しいシステムは形もないので、従来のレントゲン写真を放射線医から借り、それを印刷製版用のドラムスキャナーでデジタル画像情報に変換し、大型コンピュータにより画像処理をして専門医に提示するのである。従来と異なる珍しいレントゲン写真を提示するので「診画研」はいつの頃からか「珍画研」と呼ばれるようになっていた。

探索研究も後半に進んだ頃に、新しい放射線画像センサーによる胸部画像を放射線医に黙って提示した。ブラインドテストである。放射線医はたちどころにそれを見破った。心臓の裏側の肺の画像が鮮明に描写されていたからである。この時点に至って、放射線医は初めてこの「診断画質研究会」の真の目的を知らされ、開発メンバーはこの新しい方式が放射線医にとってインパクトがあることを知ったのである。



## 2. 探 索

### センサーの条件

NDX プロジェクトは放射線画像センサー、画像読み取りシステム、画像診断アルゴリズムの3つのテーマを持っていた。いずれもスタート時はどこから手を付けていいのかもわからないテーマだった。それぞれ独立に進めつつ、しかし3年後のゴールではシステムとして商品化の可能性が確認されていなければならない。

その中で放射線画像センサーは“発明”ではなく、未知の物質を“発見”するという他のテーマにない特異的な探索研究となった。

放射線画像センサーとしては次の3つの条件が必要であった。

1) **大サイズであること**：X線は光と違って、レンズ、凸面鏡、凹面鏡のような光学系を使ってX線像を拡大したり縮小することが出来ない。従ってセンサーを人体に密着して撮影することになる。既存のX線撮影装置の利用が前提になるため、少なくとも人の胸サイズ、すなわちレントゲンフィルムの規格である半切サイズ(35×45cm)と決められた。そのようなデジタル画像センサーは当時は存在していなかった。

2) **メモリー機能をもつこと**：X線撮影は臓器などの動きによるボケを防止するため、1/10～1/1000 秒の短時間で行われる。その瞬間に画像情報を取り出し、同時に画像処理を行うことは現在の技術を持ってしても不可能である。従って撮影後に画像を読み出すオフライン処理が必要になる。これはセンサーそのものに画像情報を保持できる能力、すなわちメモリー機能を持つことを意味する。保持する能力はシステムが金曜日に故障し、休

日の土、日曜日に修理が可能となる最悪の場合を想定して3日間と決められた。

3) **高速に読み出せること**：病院の放射線部はレントゲンフィルムの撮影からプリントアウトまで行う一貫生産ラインを持っている生産工場であり、その生産効率が要求されている。その業務を妨げないために、センサーから少なくとも放射線画像情報を電気信号として1分以内に取り出すことと決められた。

### 原理は何か

センサーの条件は明確になっても、具体的な技術が想定できなければ探索の着手はできない。1971年に園田が最初の構想を長期計画として提案して以来、NDX プロジェクトがスタートするまでの間、社内の複数の部門でレントゲンフィルムに代わるようなセンサー技術が調査され、また予備実験が行われていた。技術の選定にこの調査が役に立った。X線イメージインテンシファイアー(XII)、X線TV、固体撮像素子(SSD)、位置感受性比例計数管(PSPC)、マルチチャンネルプレート(MCP)、電子写真方式のイオノグラフィ、そして熱蛍光線量計(TLD)などである。

この中で、写真材料会社が持っている化学をベースにした技術が応用でき、また自社で製造可能なセンサーで、かつ目的とする機能に最も近かった原理として、熱蛍光線量計(TLD)に使われていた熱蛍光(Thermo-Luminescence, TL)現象が抽出された。

熱蛍光線量計はフィルムバッジと同様に個人の被曝線量管理に現在でも多用されている。検出素材はフッ化リチウム LiF、硫酸カルシウム CaSO<sub>4</sub>、フッ化カルシウム CaF などの熱蛍光体である。これを加熱することにより蓄積された放射線量に比例した熱蛍光が

発生し、その光量を計測することにより被曝線量が計測される。

この熱蛍光現象を利用すれば、熱蛍光体からなる2次元センサーに放射線が照射された後で炭酸ガス CO<sub>2</sub> レーザーなどの赤外線レーザーでそのセンサー表面を走査すれば、発生する熱蛍光を検出して放射線画像を得るシステムは可能であった。しかし熱によるこの方式は高速で高密度に情報を取り出すことは不可能であると容易に予測できた。熱の伝導と拡散がイメージングの高速化と高密度化を妨げるからだ。もしも熱ではなく、光で走査できればセンサーの要件を満たす。1975年4月29日に7人のメンバーが集まって新システムの構想を検討した結論の一つは、この光読み出し可能な情報蓄積型の具体的な蛍光体材料を見いだすことにあった。すなわち、光による輝尽発光 (Photo-Stimulated Luminescence, PSL) 現象を原理として用いることであり、実用に耐えうる新規な材料の発見がセンサー開発のカギを握ることになったのである。

### 輝尽発光とは

蛍光体は現代文明を支える隠れたキーマテリアルと言ってよい。蛍光体の三大用途は、①テレビやコンピューター用表示装置としてのブラウン管、②照明用の蛍光灯、③医療用 X 線撮影においてレントゲンフィルムと併用される X 線蛍光増感スクリーンである。蛍光体技術と製造において日本は世界のトップにあることは意外に知られていない。

これらの実用蛍光体は電子や紫外線、X 線などにより刺激されている間だけ効率よく発光する特性が求められている。一方、輝尽発光をする蛍光体はこれとは違い、刺激されて

蛍光体の三大用途と代表的な組成

発光色	ブラウン管	蛍光灯 (三色タイプ)	X線スクリーン
青	ZnS:Ag,Al	Sr <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl:Eu <sup>2+</sup>	CaWO <sub>4</sub>
緑	ZnS:Cu,Al	LaPO <sub>4</sub> :Ce <sup>3+</sup> ,Tb <sup>3+</sup>	Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Tb <sup>3+</sup>
赤	Y <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Eu <sup>3+</sup>	Y <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Eu <sup>3+</sup>	

【昼光色蛍光灯】 3Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/Ca(F,Cl)<sub>2</sub>:Sb<sup>3+</sup>,Mn<sup>3+</sup>

いるときは発光しない方がいい。輝尽発光とは光や放射線などの最初の刺激を終了した後、発光波長よりも長い第二の光 (輝尽励起) によって、最初の刺激の強さに応じた蛍光 (輝尽発光) を発する現象である。この現象は1889年 Philip E.A. Lenard により発見された。言い直せば、最初の光や放射線などの情報がメモリーされ、その情報を光で読み出すことのできる現象である。

輝尽性蛍光体は発見者の P.Lenard を中心に硫化亜鉛 ZnS や硫化ストロンチウム SrS などの硫化物系蛍光体の研究が古くから行われていた。第二次大戦中の日本では夜間進入してくる敵機を見つけるための赤外線検出材料としての研究も行われた。またヨウ化ナトリウム NaI やヨウ化セシウム CsI などのアルカリハライド系蛍光体の輝尽発光現象についても1920~30年代に研究が行われていた。しかしながら近年になって輝尽発光現象に関する研究やこの現象を利用した実用化研究はほとんど行われていなかった。手を尽くして調査しても、既知の化合物は目的とする特性に合っていないことことも確かであった。

誰もやっていない全く新しい技術なのか？ それともあきらめて捨てられた技術なのか？ お手本がないことだけは確かであった。どのようにして求める材料を探すか。宝くじは誰かが当たるが、この探索は答がないかもしれなかった。

開発メンバーは蛍光体に関しては知識が全くない。まずは蛍光体の勉強を全員で一から始めることになった。蛍光体研究に必要な試作設備、評価設備、候補となる化合物が見つかった場合に備えて小型の連続塗布機的设计や購入手配を始めた。

### 必要な発光特性とは

要求される発光特性はその当時利用できる技術により決まってくる。

#### 1) 輝尽励起波長は赤領域にあること：

既知の輝尽性蛍光体の励起はほとんど赤外光で行われていた。励起光として強力な光源、すなわちレーザーは必須であった。しかし1970年当時はまだレーザー技術の揺籃期である。赤外線領域の半導体レーザー、固体レーザーなどは実用化されておらず、使用可能な唯一安定な長波長の実用レーザーは波長633nmのヘリウム・ネオン He-Ne レーザーであった。つまり赤色である。従来の常識であった赤外光で励起するのではなく、可視光の赤で励起可能な未知の材料を発見する必要があった。また目に見える可視光なら実験もやりやすいし、将来の製造にも都合がよかった。

#### 2) 発光波長は青領域にあること：

当時、また今でもそうであるが最も高感度でノイズが低い光検出器は光電子増倍管 (Photo-multiplier Tube, PMT) であった。その検出量子感度は波長の短い青領域で最も高い。従って発光波長が青領域ならば、PMTに最も適した特性になる。もしもそうなれば赤の輝尽励起波長と青の発光波長は波長で200nm以上離れることになる。そうなれば光学フィルターなどにより発光のみを効率よく分離し検出することができる。もしこれが

実現すれば、得られる画像品質を向上させる大きなメリットがあった。

#### 3) 発光応答速度はマイクロ秒以下：

大きな半切サイズからすべての画像情報をS/Nよく1分以内に読み出すためには、サイズ100~200 $\mu\text{m}$ サイズの1画素あたり発光の応答速度は1マイクロ秒以下が望ましいと容易に計算される。これは蛍光体の中でも非常に早い応答特性が求められていることを意味した。

### 材料の基本デザイン

実用化されている蛍光体は複雑な組成になっているものが多い。しかし輝尽性蛍光体の基本デザインは次第に単純な【母体結晶+発光センター】系に絞られていった。この方が材料設計を論理的に考えやすいからである。もちろんこの系で素材が見つからない可能性はあった。その時はまた戻ればいいのである。

X線を吸収する母体結晶は重金属元素を主体とする組成にする。なぜならレントゲン写真の撮影はぎりぎりまでに高感度化され、その画質はX線量子の数に依存する量子ノイズ律速の領域にすでに入っていた。感度を上げるとX線量子は減り、画像が荒れて来るのである。いかに多くのX線量子をセンサーが捕らえるかが、画像のS/Nを決めていた。従って原子番号は大きいほどいい。しかし大きければ大きいほどいいと言うものでもない。原子番号が大きくなると原子の不安定さが増加して、その中に放射性同位元素を含むようになる。この放射性同位元素からの放射線で画像のノイズが増加することになる。従って放射性同位元素を含まないで、出来るだけ原子番号の大きな元素となる。

当然ながら、製造適性から見て、また製品

として化学的安定性が良くなければならなかった。

一方、発光センターは発光波長と応答速度の機能を分担している。発光センターとしては母体の結晶場に影響されにくい電子構造を持つ希土類元素が望ましい。希土類元素ならば母体結晶とは独立に波長と応答速度を理論的に推測できるからである。それだけ材料設計の自由度が増す。

しかしこれだけでは探索の指針にはならない。候補となる化合物は無数にある。取っ掛かりとして何から始めるかが問題であった。

#### ドグマ：捨てられたものの中にある

テレビ/蛍光灯など普通の実用蛍光体は励起された時に瞬時発光する。これから探そうとする輝尽性蛍光体の場合は励起した時には光らず、そのエネルギーを蓄えていて欲しい。通常の蛍光体粒子はすぐ光るために完全結晶に近い単結晶、つまり「きれいな結晶」を目指して作られている。一方、輝尽性蛍光体は結晶中にエネルギーを蓄えるための何らかの結晶欠陥のある「きたない結晶」の中にありそうであった。

目指す「きたない結晶」の輝尽性蛍光体の候補は過去の「きれいな結晶」の実用蛍光体開発の中で捨てられていった材料の中にあるはずだろうとの予測はなりたった。しかしそのような捨てられていった材料は公表されない。良い結果だけが報告される。探索のこのドグマが成り立ったとしても、具体的に探す指針としては余りにも漠然としすぎていた。

#### まずは測定評価装置の開発から

必要な発光特性は明確である。極微弱な輝尽発光のこれらの特性を検出する測定評価装

置が最初に必要となった。装置は1) 目標とする発光特性に合った材料を効率的に拾い出し、それ以外の材料を効率的に捨てるという定性的な評価機能と、2) 発光応答特性のように目的の特性を精度よく計測する定量的な評価の二つの機能が求められた。当然ながらこのような特殊な装置は市販されていない。自ら開発することになった。市販の装置を使っているは大したことは出来ない。独自の実験装置とか評価装置が独自の発見を生み、イノベーションに結びついていくものだ。

装置の一つは回転楕円面鏡の一方の焦点にセットされた試料に、密閉型X線管からX線を照射し、次に高輝度光源から分光器により波長の異なる光を瞬時に走査して、他の焦点にセットされた光電子増倍管でその輝尽発光を検出する。つまり輝尽発光の強度とその励起スペクトルを同時に得る測定装置である。これにより光検出感度として当時の市販装置の100倍以上の測定がルーチン作業で可能になった。

評価測定装置を自作する意義は単に材料探索の目的に留まらない。評価装置は将来のイメージングシステムのひな形となる。そのシステムに必要な特性や仕様、問題点を前もって知ると言う重要な意味を持っていた。

さらに3年間では目的とする輝尽性蛍光体が見つからない可能性もあった。そうなった場合、チームは解散である。独自の評価装置や評価技術を構築しておけば、もしその材料が発見できなくても評価技術は大いなる成果として残り、他部門からも評価され、若いメンバーも他部門に喜んで引き取ってもらえるだろうとの読みもあった。背水の陣である。

#### 取っ掛かり

本格的な評価装置が完成する前の話である。最初の試料、テルビウムを発光センターとして微量に添加した珪酸マグネシウム  $Mg_2SiO_4:Tb$  の粉体にX線を照射し、次いで手近にあった赤外線を放出する強力な YAG レーザーを照射した。レコーダーの記録紙の上にほんのわずかにピークが現れた。それを見て担当者は喜んだ。しかしよくよく調べてみると、それは輝尽発光ではなく、強力な赤外線照射により試料が加熱され、熱蛍光が発生したものとわかった。

現象的には熱蛍光(TL)も光輝尽発光(PSL)も励起され発生した電子や正孔を捕捉する結晶中のトラップ現象である。そこで「熱蛍光で知見を得て、輝尽蛍光への探索仮説を作っていこう」と考えた。

熱蛍光体を試料として多くの実験を行い、現象を解析した。しかしながら求めたい輝尽発光の励起光が関与するトラップ現象は、熱蛍光のトラップ現象とは違うらしいとのデータが続々と出始めた。結局、熱蛍光体を手本として輝尽蛍光体を探索しようとする方針は無理ではないかとの結論になった。手がかりを失い、探索は振り出しに戻った。

## 悩み

探索段階ではその次の商品化段階よりも技術的な見通しは不透明である。新たな心配事も見つかってくる。ともすると初期の志と違ってメンバーの気持ちはぐらつく。本当に実現の可能性がある開発なのか。スタート時の夢は現実を垣間見ることで悪夢に変わってくる。正夢はまだまだ遠い先のことである。

足柄研究所で再スタートしてほぼ半年たった1976年9月9日、放射線画像センサー、画像読み取りシステム、画像診断アルゴリズム

の3つのチーム全員が集まった。松本、宮原、加藤、石田、古巻、堀川、高橋、寺岡の専任メンバー8人である。何が問題なのか、何が心配なのか。個々のメンバーの心配事や不満をカードに書き、KJ法でまとめていく。

心配事とは次のようなものだった。システムにどのようなユーザーメリットを付与すればいいのか、何がやらなければならない MUST であり、何が出来ればいいと言う WANT なのか。まずこれがはっきりしていなかった。診断に有効な画像処理は短時間で可能なのか、そもそも新しい診断情報とは一体何なのか、それを得られるようにシステムが組めるのか、それがないと市場性がないのか。放射線画像センサーの実現の可能性は本当にあるのか、そのような輝尽性蛍光体はそもそも存在しているのか、本当に要求される特性とは何なのか。

準備に忙しくて実際の研究をやっていないのではないか、あと1年半で原理確認が間に合うのか、将来の予測が正しくなされているのか。本当に作る意志と能力を持っている会社なのか、作れたとしても売らせてくれる会社なのか。リーダー、サブリーダーは兼務のためほとんど現場には来ない。彼らとメンバーとの相互理解が欠けているのではないか、そもそも彼らの取り組み姿勢がはっきりしない。それにしても失敗しないようにするにはどうするか、失敗したらどうするか。

白熱した議論が続いた。そして最後に、メンバーの力を総結集すべきテーマは放射線画像センサーと新しい診断情報の2つのテーマであること、つまり画像読み取りシステムは後回しにしようということになった。さらにシステムの技術目標を再確認し再検討すること、チームに及ぼす外部の影響を検討するこ

# NDX 4-GX-1の心配事はこれだ!!

1984年1月7日, FCRシステム記念パーティに  
あたり, 8年前の4-GX-1に贈ります。



3. 11-12-70とX-11-1との  
4-GX-1-1, 11-71-1と  
他X-11-1との相互理解が  
なれていなければ  
4-GX-1-1, 11-71-1の  
NDX計画への取組み  
が容易に不明確化する。

# 1. NDX 4-Gの技術目標を再確認・再検討 (再)

① NDXシステム  
の基本仕様は何か?

② 本システムの絶対必要  
条件は何か?

③ 本システムの絶対必要  
条件は何か?

④ エーサーXリットは何か?

⑤ TLに要求される特性を  
具体的に明らかにする

⑥ TL開発が本システムの  
本命となる可能性は何か?

⑦ TLに開発が本システムの  
本命となる可能性は何か?

⑧ TLの開発が本システムの  
本命となる可能性は何か?

# 2. 外部環境の及ぼす影響

(2-1) 作山産業の経営が  
好転(予報)が正しい  
と判断されているか?  
ユーザ情報はほぼ  
正確か? 11-71-1  
の情報は?

(2-2) 当該製品と11-71-1  
との関係は? 当社  
が売れる可能性は  
あるか? システム  
と11-71-1との  
関係は?

(2-3) 当該製品と11-71-1  
との関係は? 当社  
が売れる可能性は  
あるか? システム  
と11-71-1との  
関係は?

(2-4) 当該製品と11-71-1  
との関係は? 当社  
が売れる可能性は  
あるか? システム  
と11-71-1との  
関係は?

(2-5) 当該製品と11-71-1  
との関係は? 当社  
が売れる可能性は  
あるか? システム  
と11-71-1との  
関係は?

(2-6) 当該製品と11-71-1  
との関係は? 当社  
が売れる可能性は  
あるか? システム  
と11-71-1との  
関係は?

(2-7) 当該製品と11-71-1  
との関係は? 当社  
が売れる可能性は  
あるか? システム  
と11-71-1との  
関係は?

# 3. TLの開発が本システムの本命となる可能性は何か?

① TL開発が本システムの  
本命となる可能性は何か?

② TL開発が本システムの  
本命となる可能性は何か?

③ TL開発が本システムの  
本命となる可能性は何か?

④ TL開発が本システムの  
本命となる可能性は何か?

⑤ TL開発が本システムの  
本命となる可能性は何か?

⑥ TL開発が本システムの  
本命となる可能性は何か?

⑦ TL開発が本システムの  
本命となる可能性は何か?

# 4. 予防対策を考へる

① 予防対策を考へる

② 予防対策を考へる

③ 予防対策を考へる

④ 予防対策を考へる

⑤ 予防対策を考へる

⑥ 予防対策を考へる

⑦ 予防対策を考へる

1978-9-9  
NDX 8/象  
(花井・宮原・加ト・石田  
・桂・堀川・高橋・寺岡  
・平山)

と、リーダー層とメンバーとの相互理解を深めること、万が一の場合でも失敗しない対策を考えることとなった。メンバーの不満、心配事は共通の新たな目標となって昇華したのである。

プロジェクトの失敗は、技術上の困難性、上層部からの予算や人員カット、他部門の干渉などのハードな要因だけではない。それ以前にメンバー間の不平・不満・行き違いなどによる内部分裂の要因の方が大きい。失敗させるにはエネルギーはほとんど使わなくて済む。例えば「会社は事業化までやらせてくれないよ」とか「もとの仕事に戻った方がいいよ」などと言われるだけでも、チームは簡単に分裂するのである。NDX というコードネームも「何にも・できない・Xレイ」チームなどとかかわれたりする。特にチームの身になって本気になって心配してくれる善意の第三者のありがたい忠告ほど始末が悪いものはない。メンバー間の十分なコミュニケーションと成功したときの夢を共通に持つことがその分裂を防いでくれる。

この日はすべてを出し切り、愚痴や非難や悲観的な気持ちに陥らないように新たな目標を共有する重要なステップとなった。まさにみそぎの日となった。

### 実験から仮説へ、そして検証へ

母体結晶に用いる重金属元素はタングステン W やタンタル Ta のような原子番号の高い元素から、ストロンチウム Sr などの低い原子番号までが対象範囲になった。カリウム K やカルシウム Ca などは低すぎた。

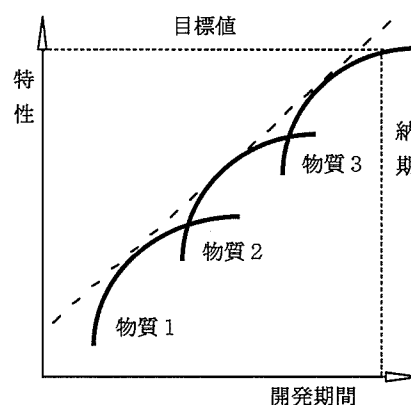
無機化合物の合成は過去の長い歴史がある。それらの文献を参考にしながら、そして元素の周期律表をにらみながら硫化物・酸化物・

リン酸塩・ハロゲン化物・・・などを合成していく。データを蓄積し、実験仮説を作る。

発光センターは青という発光波長の条件と 1 マイクロ秒以下という応答速度の条件から、次第に希土類元素のセリウム 3 価の  $Ce^{+3}$  かユーロピウム 2 価  $Eu^{+2}$  に絞られてきた。同じ Eu でも 3 価  $Eu^{+3}$  になると発光は赤となり、応答速度も遅くなってしまふ。  $Eu^{+2}$  ならば母体結晶は 2 価の重金属元素を主体とする組成であり、  $Ce^{+3}$  ならば 3 価の重金属元素を主体とする組成を探ることになる。

素性のいいものは最初からその片鱗を見せる。それを「改良」とすると特性は一桁（十倍）程度は向上する。しかしそれ以上期待してはいけない。あきらめが肝心である。特性の進歩は時間と共に飽和に近づいていく。こうなると、努力の割に成果が出ない改良段階に入っていく。見極めが重要になってくる。

さらに高度な特性を望むなら、系の違うものをさらに「発見」する必要がある。つまり仮説を作り直して、最初に戻るサイクルを繰り返す。そして許されている納期まで続く。



図：探索とは仮説・検証を繰り返し、目標を満たす新たな物質の発見まで続く。結果として連続した進歩のように見えるが、個々のプロセスは不連続な発見から成り立っている。

特性の向上はミクロ的に見ると個々の“不連続的”な飛躍の集合であるが、探索期間の全体を眺めてみるときわめて順調に“連続的”に変化する開発を取ってきたかのように表現される。

1年、2年と探索を続けるが、次第に手詰まりになってきた。納期が迫った頃、実用として使われたことのある膨大な数の蛍光体を見直すことになった。実用蛍光体は「きれいな結晶」であり、求める「きたない結晶」ではなかった。最初のドグマから外れる実用蛍光体は候補から除外していたのだった。

再評価を進めた結果、アルカリ土類ハロゲン化合物の一種であるバリウムフロクロライドに2価のユーロピウムイオンをドーブした  $\text{BaFCl:Eu}^{2+}$  が、それまでの材料とは一味違う筋の良い輝尽発光特性を示したのである。この結果にメンバーは驚いた。かつてこの蛍光体は Philips 社や DuPont 社により X線蛍光スクリーン用として用いられたことがあった。しかし彼らはこの蛍光体が輝尽発光特性を持っているとは、まったく気づかなかったのである。

#### Clをとるか、Brをとるか

きらりと光る片鱗を見せた  $\text{BaFCl:Eu}^{2+}$  を改良し、その中の塩素 Cl を臭素 Br に置き換えたバリウムフロプロマイド  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$  はさらに望ましい輝尽発光特性を持っていた。しかしこの  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$  は水に溶けやすく、しかも潮解性が大きく、化学的安定性がなかった。過去に Philips 社もその理由により、蛍光スクリーン用蛍光体としては採用しなかったこともわかってきた。実際、最初に合成した試料は空気中に置くと水分を吸収してべとべとになり、加水分解してしまうと

いうひどい潮解性を持っていた。

作りやすく、そして化学的安定性の高い  $\text{BaFCl:Eu}^{2+}$  で発光特性を向上させるか、それとも発光特性の良い  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$  で化学的安定性を改良するか。そのどちらを採用するにしても大きな危険性があった。

化学的安定性はその化合物に付随する本質的な特性であると信じていた。これを改良できる可能性は低いと考えられていた。しかしシステムを実現するには応答速度も含めて優れた発光特性を持つ  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$  が必要であった。どちらを取るか。納期も迫っていた。

1978年6月になり、最終的に臭素 Br が選択された。もしも結晶自体の化学的安定性が改良できなくても、結晶を保護するような製品形態に設計できる可能性もあったからである。それに将来をかけたのである。これが後に幸いした。

実験を進めると、 $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$  を湿度の高い空気中に放置しても発光特性が劣化する試料と劣化しない試料がありそうだとわかってきた。つまりこの材料の組成や合成のやり方によっては劣化しない処方があることを意味する。さらに実験を進めると、潮解性はこの材料を合成していく過程で生じる表面の不純物の種類や組成比の化学量論的な微妙なずれによって生ずるものであった。化学安定性の改良の可能性が出てきたのである。

過去の報告は間違っていた。捨てられていた材料の中に目的の材料はあるはずだと最初のドグマはやはり正しかった。かつて同じ材料を研究していた Philips 社の研究者はそこまで気がつかなかったのである。

フッ素 F と臭素 Br の微妙な組成比によって発光特性が大きく変わることもわかってきた。さらに発光を阻害する不純物を取り除い



たり、効果のある添加物を加えたり、合成時の温度・雰囲気のコントロールなどによって、発光特性は日に日に向上していった。標準試料として用いた最初の輝尽性蛍光体である  $\text{Ba}_3\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}^{3+}$  化合物からはおよそ 1000 倍以上もの進歩となった。

### 輝尽発光強度の進展

(1975~1979)

化合物	相対強度
$\text{Mg}_2\text{SiO}_4:\text{Tb}^{3+}$	~0
$\text{Ba}_3\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}^{3+}$	~1
$\text{BaFCl}:\text{Eu}^{2+}$	~100
$\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+}$	~1000

### 被写体の話

輝尽性蛍光体の特性は次第に向上していく。ある段階に至ったら、最終製品形態に仕上げてその時点での仮の標準画像センサーを作る。これを用いて最終目標レベルと現状とのギャップを明確にする。診療所の放射線技師に頼み、実際に人体を撮影し、感度と画質を評価するのである。だが開発途上の感度は低すぎた。

レントゲンが 1896 年 1 月 23 日に最初の公開講義で公表した有名な X 線写真は彼の友人カリーの右手の画像である。新しい原理によるプロジェクトの最初の画像も手の写真にしようとして画像処理の責任者であった加藤は決めていた。感度はまだまだ低かった。生身の手ではなく、手の骨で作られた撮影用モデル（ファントム）となった。しかし残念なことに、レントゲンの場合と違ってファントムは左手しかなかった。今年中に何とか成果を出したいと、年の瀬も押し詰まった 1977

年 12 月 27 日に最初の画像化実験が行われた。感度は低く画像はひどい状態であったが、画像は立派に再生された。プロジェクトメンバーはこの方式のスジの良さを実感した。

魚屋で買って来たブリを被写体に使ったこともある。これはその夜の酒席のつまみになった。しかし生きた哺乳動物でないと骨の描写や臓器の動きによる影響がわからない。そこでウサギをペット屋から買って来た。あばれるウサギの鼻にクロロフォルム液を押しつけ、麻酔させてから撮影するのである。飼育箱から逃げ出したウサギに実験室を荒らされた。

乳ガン診断のマンモグラフィ用被写体には、ブタがいいだろうということになった。人の皮膚によく似ているとのことで化粧品の評価試験にブタを使っていると誰かが聞き及んだからである。しかしブタの飼育は手に負えないし、社内では飼育の許可も得られないとあきらめた。

最終段階に至った 1978 年 9 月、センサーの感度も上がり、ようやく人体の撮影がようやく可能になった。被写体はセンサー開発の責任者となった。しかし放射線量は通常の 10 倍、画像読み取りは 1 時間、画像処理に 1 昼夜かかった。しかし人体の胸部画像を撮影することによって、目標と現実とのギャップが明確になったのである。X 線からの情報がシステムのどのプロセスでもっとも少なくなっているかが解析された。そしてシステムとしてあと 10 倍のレベルアップが必要とわかった。

プロジェクトは材料屋、機械屋、電気屋、光学屋、そしてソフト屋が一部屋に集まっていた。早速、10 倍のギャップをどのように埋めていくか、システムの要因分析に議論が

沸いた。画像センサー担当グループにはさらに2倍の感度、装置開発担当グループにはさらに5倍の効率向上が割り振られた。画像処理担当グループには1分以内に処理可能なアルゴリズム開発が要求された。納期は迫っていた。

### 蛍の光の話

蛍の発光効率は通常の蛍光体に比べて極めて高い。効率の高い蛍光体を探索している担当者にとって蛍の光は理想的な発光体なのである。「蛍の光の色は何色だろうか。発光スペクトルを測ってあの"ネイチャー"誌に投稿しようじゃないか」と、酒の勢いでミニミニプロジェクトが発足したのは開発も初期の頃であった。幸いにして近くの足柄山は蛍の名所であった。蛍を捕らえる係、飼育する係、測定装置を準備する係が直ちに決まった。測定は皆が帰った夜に行われた。蛍のお尻を測定器に向けさせ、瞬間接着剤で制止させて苦勞して測ったスペクトルは意外にも530nm付近に極大を持つ幅広いスペクトルであった。夜目には青白く見えているのに、実際には純粋な緑色なのだ。人の目は暗闇では白と黒しか区別が付かない杆体細胞が働いていたに違いなかった。

考えてみれば、蛍が太陽のもとで生きてきたからには蛍の目の感度は太陽のスペクトルに合致していることが望ましく、太陽のない夜に緑色に発光していればオスとメスは最も相手を見つけやすい。至極当然であった。このデータ取りに成功して小躍りしたものの、よくよく調べてみるとすでに多くの文献があった。ミニミニプロジェクトは挫折した。

しかしこの思いは、システム発売後に実現されることになる。バイオサイエンス分野

や医薬開発では放射性同位元素を用いた解析が頻繁行われる。極微量の代謝物を分析するクロマトグラフィ解析や実験動物による薬物動態を解析するオートラジオグラフィ、またX線によるタンパク質の結晶構造解析などである。イメージング・プレートにとって、これらの解析は従来の方法よりも感度や定量精度が画期的に向上することが世界的に知られるようになった。そんなある日、"ネイチャー"誌の編集部からイメージング・プレートに関する記事依頼が舞い込んだ。担当のエディターもワシントンから急ぎよ飛んできて、研究室を見学していった。こうして"Imaging plate illuminates many fields"と題する論文が1988年に念願の"ネイチャー"誌に掲載されたのであった(15)。

### 鉾山(やま)探しの話

イメージングプレートが完成に近づいた頃、出力画像に黒い微少なスポットがランダムに発生していることがわかった。この現象は以前から生じていたのだろうが、システムのノイズが低減され画像の品質が向上し、担当者の目が肥えてきたことによって、問題となって現れたのである。原因は宇宙線や周囲の土壌、建築材料などからの環境放射線、あるいは素材に含まれる不純物中の放射性同位元素から発生する放射線のいずれかと考えられた。このノイズが画像診断に影響するとするとシステムの実用性が問題となる。さらに環境放射線ならばその対策は困難であろうと予想された。原因探しが始まった。

不純物として最も可能性の高い元素は $\alpha$ 線を発生する放射性同位元素のラジウム226( $^{226}\text{Ra}$ )であった。ラジウムはバリウムと同じ元素族に属し、周期律表ではバリウムの

すぐ下に位置している。半減期は 1260 年である。原料中の  $^{226}\text{Ra}$  の存在量を仮定すると半減期から単位時間に発生する  $\alpha$  粒子の数が求められ、画像に現れる黒いスポットの数も予測できる。この予測値は実際のスポットの数と合致していた。原因はほぼ  $^{226}\text{Ra}$  であることは間違いなかった。しかしその量は常識では考えられない痕跡程度の超極微量であることも推定できた。これは一方でこのシステムがいかに高感度であるかを示す証拠にもなった。

システムの特性を向上させるということは、結局のところ情報を持っている信号 S と情報を持たない雑音（ノイズ）N との比、S/N を向上させることにある。例えば感度を上げることは信号 S を増加させることである。この感度向上の結果は担当者の喜びも大きいし、周囲からも評価されやすい。しかしよいシステムが開発できるかどうかは、実はノイズをいかに下げるかという努力にかかっている。この種の技術開発はそのシステムの根幹を握っていることが多い。システムの優位性・差別性が生まれる理由は、結局のところノイズの低減技術にあると言っていい。そしてその技術は他人に知られることなくシステムの中にこっそりとしまい込まれるのである。

黒いスポット問題を解決する方法論は精製技術を新たに開発するか、純度の高いバリウム鉱石（重晶石）を探すかのいずれかである。いずれも難題である。選択が迫られた。はつきりしていたことはどちらの方法を取るにせよ、極微量のラジウム量を正確に分析する新たな手段が必要となる。しかしそのような手法は知られていなかった。新たに分析手法を開発する必要があった。こうして重要な陰の技術開発が始まった。

純度を向上させる方法論としては、結局のところ世界の重晶石鉱山を探すことになった。重晶石は石油の採掘に大量に用いられていることもわかってきた。重晶石は比重の重い潤滑剤としてドリルで採掘する石油井戸の先端部に注入されているのである。さらに鉱床の生成のメカニズムと世界各地の造山活動との関係を調べていくと、地域によって鉱石の不純物量が異なることがわかり、目的とするバリウム鉱石を得られる可能性が出てきた。

新たに開発した高感度分析方法で世界各国の鉱石を購入して評価する作業が始まった。最もラジウム量が低かった鉱石をロット単位で購入する。それを最終の画像センサーまで仕上げて画像の評価を行う。目標とするレベルに至らなかったら、さらに鉱石を探索する。これを繰り返すのである。まさに一か八かの山探しである。

もしも正攻法でラジウム除去のための精製技術開発を続行していたならば、かつてのキュリー夫人の実験のように次第に多量のラジウムが抽出され、いずれ放射線障害の大問題が発生したに違いない。もしもそうならこの開発は社会的にも許されなかったであろう。岐路において開発すべき技術のズジをどう読むかは実に重大な影響を将来に及ぼすのである。

後年、システムが発売され日本の各地に設置されるようになってから、この黒いスポットの問題は不純物のラジウムの影響よりもその地域の自然放射能による影響の方が大きくなってきた。それは偶然にも、また幸いにしてイメージング・プレートの開発が日本で最も自然放射能の少ない地域（箱根山の東側地域）で行われたからである。そのお陰で画像の品質をさらに向上させる陰の技術

が得られたのである。他の地域でこのシステムの開発が行われていたならば、この問題はわからなかったかもしれない。

### 相手を知る

人のやることは似たようなものである。同じようなシステム開発は同時に他の研究者もやっていると考えた方がいい。その最大のライバルはイーストマン・コダック社の研究者 G.W.Luckey だった。彼をマークし、徹底的に調べるのである。大学では何を学び、コダックでは何をやって、彼の社内における評価はどうか、どこに住んで、また引っ越しして、家族はどうか、何が趣味なのか……。こうして彼の人となりがわかってくると、昔からよく知っている友人のような親しみが湧いてくる。彼の考えそうなことが次第に読めてくる。それをコダックという巨大な伝統ある企業風土がどのように扱っようなかが読めてくる。コダック社は重厚長大であり、研究、商品企画、開発、製造、販売などの各部門は互いに独立性が高く、日本の企業のように各部門を相互に巻き込んだ活動をしにくい風土にあった。

後年、システムが公表されたあと、ベルリンの学会で引退間近の G.W.Luckey と会う機会ができた。彼はやはり類似のデジタルX線イメージングシステムの開発をコダックの上層部に提案していた。しかしその提案は予想通り採用されなかったのである。

### 不思議な縁

最後に採用した「ある物質」  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$  とは蛍光体分野の専門家には知られていた材料であった。しかしその中にすばらしい輝尽発光特性が秘められているとは誰も知らな

ったのである。このシステム開発は古くから知られていた輝尽発光現象にレーザーやコンピュータなどの新しい技術の血を入れた温故知新の開発事例の一つであると言えよう。

この輝尽発光現象を示す化合物の探索では納期が物質を決めた。まだまだ素晴らしい材料は自然の中に隠されているはずであった。しかしこの材料が公表されて以来これに代わる材料を世界中の研究者や技術者が 20 年近くかけて探しているが、まだ見つかっていない。なぜそうなのか、その理由はわからない。不思議な縁（えにし）である。

### 3. 商品化

#### 商品化プロジェクト

約束の探索研究の期間は3年間だった。放射線画像センサーに加え、高精度で高密度に画像情報を読みとる画像スキャナー、診断に有効で短時間処理可能な画像診断アルゴリズム、それぞれの技術の原理確認は間に合った。これらの技術をデジタル放射線イメージングシステムとして集大成すれば、何とか商品化が可能である見通しも得られた。

1979年7月になり商品化プロジェクトメンバー25名が決まった。そして8月になり、システム機の試作が正式に社長より承認された。メンバーも次第に増強されていった。商品化プロジェクトのリーダーは探索研究プロジェクトの園田からそれまでサブリーダーであった高野に代わった。園田は自分よりも商品化段階では高野の方が適しているとらんだのである。高野の強力なリーダーシップのもとで波乱に富んだ事業化の第一歩が始まった。

#### 組織の変質

探索研究から商品化研究に移って組織の雰囲気はがらりと変わった。

探索研究の使命は「質」である。方向性を示すことである。組織は新システムを開発しようとする志を同じくした人たちが集まった典型的なタスクフォースチームである。自由な雰囲気の中で、あしたのこと、あさってのことに悩み、議論が飛びかわった。多様な価値観がそこには存在した。失敗も許された。そして失敗が次の飛躍の源泉になった。

しかし商品化研究段階は違った。不確実な新しい技術の適用は極力避け、その時点で確

実な技術だけが用いられる。納期の目標は「今日、あした」となり、コスト・精度・効率などという「量」が求められる。より一層の「機密」が重要視され、情報の統制が引かれる。各部門からランダムに集められた人たちに対してもトップダウンの指示命令が確実に浸透するように階層構造が強化される。このタスクフォース組織からビューロクラシー組織への変化は劇的であった。強権が発動され、そのマネジメントに耐えられない人々も出てきた。次第にそのような人たちはプロジェクトから離れていった。

具体的になればなるほど、それまで潜めていた社内の反対者も急に浮上する。研究資源の取り合いで他部門とのあつれきも大きくなる。まして化学会社である富士フイルムにとっては異質のエレクトロニック・イメージングシステムである。システムの事業化をにらんで、生産技術、製造技術、商品化技術などをゼロベースで作り返し、製造や販売の仕組みを作って順調に動き出させることにエネルギーが使われる。ここに探索段階と違ったシステム開発の醍醐味がある。

#### 放射線医のニーズに応える

商品化研究の段階ではX線画像診断市場というマーケットニーズを徹底的に意識した技術開発が不可欠である。システムを使って診断する放射線医集団と、実際にシステムを操作する放射線技師集団の双方に受け入れられる必要がある。

放射線医のニーズは当然ながらよりよい診断画像品質である。しかし物理的にまた合理的な開発サイドからの提案であっても、受け入れられないことはしばしばある。放射線医の過去からの知識や経験の連続性を妨げては

ならないのである。

システムの出力はデジタル信号になっている。従って高精度の CRT があれば、それに出力して診断する方式でもよかった。しかし従来から放射線医は画像診断をレントゲンフィルムで行っている。その訓練を受けて育っている。システムの出力はレントゲンフィルムに類似したフィルム方式でないと放射線医は受け入れないことは明白だった。しかし画像診断に適する高品位な画像プリンターは世界のどこにも無かった。高精度のレーザープリンターとこれに適する写真フィルムの開発が新たに行われた。現在、この医療用レーザープリンターとその消耗品としてのフィルムは他社の CT や MRI にも使用されるようになり、事業として大きく成長している。

医療画像診断ソフトウェアとは、撮影の部位・症例に応じた適切な画像処理を行い、放射線医の画像診断を助け、その診断を確実にするソフト群である。探索研究初期から行われてきた「診断画質研究会」の成果もこの中に組み入れられた。しかし物理的に意味がある処理でも、見えすぎたら誤診につながる恐れがある。従来レントゲン写真を見慣れた放射線医は画像処理が施されていると分かっただけでも拒否する人たちであった。医療診断の世界は保守的なのである。

しかしこのような放射線医にも新しいデジタルX線写真に慣れてもらう必要がある。そのためにはどうするか。最終的な出力フィルムのフォーマットは従来のレントゲン写真と同じなるように画像処理した画像と明らかに診断に適していると思われる画像処理を行った画像とを一枚の出力フィルムに同時に表示する方式となった。二画像同時表示方式である。これにより放射線医は見慣れた従来画像

と新しい処理画像とを見比べながらその画像処理効果を学習することが出来た。これは新システムの市場導入の障壁を低くする方式として有効であった。

X線画像診断分野では従来から血管だけを描写する血管造影撮影が行われていた。動脈瘤や脳梗塞などの診断には欠かせない診断である。しかしこれは非常に手間のかかる方法であった。まず動脈にX線を吸収しやすい造影剤を注入し、注入する前のレントゲン写真と注入後のレントゲン写真を撮影する。その注入前の写真と未露光の写真フィルムとを2枚重ねて密着露光し、現像する。こうすることによって白黒が逆転したレントゲン写真ができあがる。さらにこの白黒逆転したレントゲン写真と注入後のレントゲン写真、そして未露光の写真フィルムの3枚を重ね合わせて再び密着露光し、現像する。そうすると造影剤を注入する前後で変化した画像部分、すなわち血管像だけが残ったレントゲン写真が得られる。これが血管造影写真である。

新しいシステムでは画像情報がデジタル信号になっているため、造影剤注入前後の2枚の画像を電子的に差し引きすることにより、この血管造影写真が簡単に得られるようになったのである。これだけでも医者と患者の双方にとって大きなメリットとなったが、このシステムではさらに動脈ではなく静脈から造影剤を注入する方式が可能になった。動脈からの造影剤の注入は手術を伴い、入院させられる患者の負担が大きかった。静脈からの注入は注射で簡単に行うことができ、入院も必要としない。これはイメージング・プレートの感度が従来のレントゲン写真システムよりも高いために、静脈から心臓を通り動脈に流れていった薄まった造影剤でも、イメージン

グが可能になったからである。

さらにエネルギー差分画像という新しい診断画像が可能になった。これは高いエネルギーと低いエネルギーで撮影された複数の画像を重み付け演算処理して、必要な画像のみを抽出できる。例えば肺ガンなどでは肋骨に重なって小さな病巣が写り、肋骨の陰影に隠れてガンの診断が難しい。しかしこのエネルギー差分法によれば、骨部を消し肺の軟部組織だけの画像が得られ、病巣の発見が容易になるのである。逆に骨部だけの画像も可能になる。放射線医にとっては診断がしやすい便利この上ないシステムである。

加えてシステムには画像を光ディスクにファイルするサブシステムが取り入れられた。従来のレントゲン写真はその保管に多大なスペースを必要とし、その膨大な数のレントゲン写真の倉庫から再検査したい目的の過去のレントゲン写真を検索し探し出すことは極めて困難であった。しかし新しいシステムでは光ディスクファイルから欲しい過去の症例写真を簡単に検索できるようになった。そして現在の写真と過去の写真とを演算処理することにより、時間的に変化した病巣部のみが明瞭に提示されることになる。まさに放射線医が欲しがっていたシステムである。

デジタル化の威力はそればかりではない。専門医のいない僻地の診療所からレントゲン写真の画像情報を信号回線で放射線医のいる中央の病院に送り、そこで適切に診断を行うことも可能になった。さらにレントゲン写真というもっとも多量に診断に供されている医療画像がデジタル化されたために、CTやMRIの診断画像などの情報を統合した PACS システムや、カルテの情報などのすべての診断情報をコンピューターにより統合化する事が

可能になったのである。これは医師による診断業務ばかりではなく、病院の経営にとっても医療業務のコストダウンのメリットが大きく出てくるものとなった。

### 放射線技師のニーズに応える

病院の放射線科は放射線技師が管理するレントゲン写真製造工場でもある。作業工程の大幅な変更は彼らから拒否される。失敗が無く、生産効率の高いシステムならば、彼らの作業負担も減り、歓迎される。このためには画像読み取りスピードを向上させることがまず第一に必要なだった。当然ながらシステムの故障やシステムに起因する失敗があってはならない。

当時、画像情報を読みとるスキャナーはドラムスキャナーが一般的であった。このドラムスキャナーとは円筒のいわゆるドラムに読みとるべきフィルムを巻き付けて高速に回転させ、一方向に移動する光学ヘッドからレンズで集光したタングステン・ランプの光を照射し、そのフィルムの透過光あるいは反射光をレンズで集光してその強度を計測するタイプである。この方式は次のフィルムを読みとるためにドラムを停止させ、フィルムをはがし、次のフィルムを巻き付け、また回転させるという一連の動作が不可欠になる。すべて自動化するには機構は複雑になり、制御もやっかいだった。それにもまして多数のイメージング・プレートを処理するにはそのスピードは遅すぎた。作業性・効率性を要求される放射線科の画像作成工程にはこのドラム方式は無理だった。読み取りのスループットをあげるためには、取り替え作業なく一方向に順次送られていくフラットベッド型スキャナーが必須だった。しかし現実にはトルクが高く

低速で精度の高いモーターが無かった。開発メンバーはこのモーターの開発から始めることになったのである。

また読み取りスキャナーの成功には特殊な形状の集光ガイドの発明の寄与も大きい。イメージング・プレートからの輝尽発光を集めれば集めるほど画像の S/N は向上することは分かっていた。しかし発光をレンズで集光すると全空間に放射される発光の数%しか得られない。これでは目標の画像品質が得られないことを意味した。この難題はアクリル板の一方の端面を直線とし、他端を丸く曲げた集光ガイドにより解決した。アクリル板の端面からその内部に光を取り入れ、全反射によって光電子増倍管に光を導くのである。後から見ると何でもない工夫だが、このブレークスルーは大きかった。これにより集光効率は2桁近く向上したのである。

病院の撮影は撮影装置や患者の体型などによってばらつく。撮影条件の設定ミスも多い。さらに病院では撮影室まで歩いていける患者ばかりでない。動けない重症の患者は多い。病院では病床まで簡易型の X 線発生装置を運び、ベッドサイドで撮影されることは日常的に行われている。当然ながら撮影のばらつきは多く、失敗も多い。これは放射線技師の責任になる。どのような状態で撮影されても、失敗無く常に適正な画像品質が得られるフル・ブルーシステムは医療現場の熱望でもあった。

この要望は X 線に対する応答範囲が広いイメージング・プレートと画像先読み技術によって実現した。画像先読み技術とは撮影されたイメージング・プレートをまず微弱な強度のレーザーで高速に画像を読みとる。次にこの情報をもとに画像スキャナーの読み取り条

件を修正するのである。そしてこの条件をもとに最適な画像として出力する。この一連の工程は画像スキャナーの中にブラックボックスとして組み込まれている。これによって撮影の失敗のないシステムが可能になった。

国民の被曝線量低減の効果は、イメージング・プレートの高感度特性よりもこの画像先読み技術による再撮影防止効果が大きかったと言っても過言ではないであろう。

## 公表

ようやく出来上がった試作機により、1981年4月から国立ガンセンターで臨床試験が開始された。その臨床結果を含めて6月に FUJI INTELLIGENT DIAGNOSTIC X-RAY (FIDX) SYSTEM と名付けられた新システムの新聞記者発表が経団連会館で行われた。

引き続いてベルギーのブリュッセルで開催された4年に一度の第15回国際放射線会議で新システムが世界に公表された。感度の高さ、診断画質の良さ、加えてデジタル化されている新システムであることが高く評価されたのである。特に Philips 社は富士フィルムのこのシステムの導入を直ちに希望した。Philips 社との関係はその後製品の供給という形となって長く続くことになる。

その年の11月、世界最大の放射線医学会であり、また世界最大の医学放射線機器展示会でもある北米放射線医学学会(RSNA)に発表された。この学会において、開発したシステムは従来のレントゲン写真システムを大きく変革する画期的なデジタルイメージングシステムとして世界的に評価が定まったのであった。

日本発の画期的な新技術は往々にして国内では冷ややかに扱われ、海外での大きな反響



が戻ってきて初めて認知されることが多い。ブーメラン現象である。この場合も例外ではなかった。海外での発表の後で、日本の放射線医学界の人々はこのシステムが将来有望であるとやっと気がついたのである。

### 発売へ

試作機に引き続き正式な商品となるべきプロダクトタイプの開発が2年間で行われた。同時に新しいデジタルX線イメージングシステムの販売体制を作るために、1982年12月、レントゲンフィルム販売部門として従来からあった富士Xレイ株式会社は富士メディカルシステム株式会社として再編成された。

そして1983年11月、鹿児島大学医学部に医療用X線デジタル画像診断システム第1号機が納入された。システム名称はFuji Computed Radiography FCR101と新たに名付けられた。探索研究段階のコードネームNDXから数えて3つ目の名称変更である。このComputed Radiography (CR)には、コンピューターを用いて作られ放射線画像法を意味する一般的な言葉として、CTのように社会に普及してほしいとの開発メンバーの思いが込められていた。

さらにこのCRの技術を応用して、1987年にバイオサイエンスに特化した理化学分野画像解析システム(Bio-Imaging Analyzer, BAS)が発売されるに至った。

### 開発された技術

商品化プロジェクトにより最終的に開発された主要な技術は次のようなものであった。

1. 放射線画像センサー
  - ・輝尽性蛍光体 (BaFBr:Eu<sup>2+</sup>) の開発
  - ・“イメージングプレート”

2. フラットベッド型画像読取りスキャナー
  - ・高精度超低速モーター
  - ・高効率な集光ガイド
  - ・高精度な光学スキャナー
3. レーザー画像プリンター
  - ・高精度な光学スキャナー
  - ・レーザー露光用写真フィルム
4. 医療画像診断ソフトウェア
  - ・診断ノウハウの集積
  - ・新規画像診断方式
5. ユーザー指向のシステム技術
  - ・画像先読み技術 (fool-proof system)
  - ・二画像同時表示方式

これらの技術が総合的に組み込まれ、商品となるプロダクトタイプが完成したのである。

知的財産としての特許の出願数は1991年時点において、下記のような数に上った。

- |                         |       |
|-------------------------|-------|
| ・システムの原理に関する特許          | 40件   |
| ・イメージング・プレートとその応用に関する特許 | 548件  |
| ・ハードウェアに関する特許           | 1518件 |
| ・画像と情報処理に関する特許          | 531件  |
| ・その他の特許                 | 26件   |

の総計は2663件になっていた。これらの特許群はその後の事業展開に大いなる財産として貢献していく。

### そして、今

現在、従来のレントゲン写真に代わるデジタルX線画像診断分野では、製品およびロイヤリティベースで富士フィルムが全世界の市場をほぼ独占的している。日本では大中病院を中心としてレントゲン撮影数のほぼ20%がイメージング・プレートを用いたこのシステムに置き換わった。X線画像によるスクリーニングや精密検診などで、多くの人達がこ

のシステムで撮影されている。しかし誰もそのことに気がつかないであろう。それほど静かに浸透していった。

イメージング・プレートは X 線ばかりでなく、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線、電子線、粒子線、中性子線、紫外線などの広範囲な放射線に対しても従来の方法よりも高い感度を持っている。科学研究から産業界の非破壊検査、考古学調査に至るまで広く普及した。例えばタンパク質の X 線結晶構造解析、遺伝子解析や医薬開発の薬物動態解析などにおいて従来方法に替わる標準手法として世界的に公認されるに至っている。

## 受賞

イメージング・プレートやこれを用いたデジタル放射線イメージングシステムに対して、下記のような数々の賞が贈られている。

- ・ 1982 年 日本 ME 学会 新技術開発賞
- ・ 1984 年 日本経済新聞社 優秀製品賞
- ・ 1987 年 厚生科学研究等貢献賞  
厚生大臣表彰
- ・ 1989 年 米国 RADIOLOGY TODAY 誌  
革新的製品トップ 10 受賞
- ・ 1992 年 大河内記念賞
- ・ 1993 年 日本結晶学会特別賞  
米国 RADIOLOGY TODAY 誌  
革新的製品トップ 10 受賞
- ・ 1994 年 日本放射線技術学会 梅谷賞
- ・ 1996 年 日本金属学会 技術開発賞
- ・ 1998 年 日経 BP 技術賞 大賞

(中性子検出用イメージング・プレート)

これらの受賞分野から分かるように、この開発は所期の目的であった医療分野ばかり

でなく、結晶学や材料科学、遺伝学や生化学などのバイオサイエンス、医薬開発、さらには産業分野の非破壊検査などに至る放射線を用いる科学や技術の広い領域にわたって貢献していると言って過言ではないだろう。

## おわりに

### 開発の意義

#### 技術、そして事業の安全保障

この開発は富士フィルムの主要事業であったレントゲンフィルム事業を自ら否定する技術の開発でもあった。開発の途中で「銀ショック」は平静に戻り、レントゲン写真事業はもとの黒字の事業に戻った。その「金のなる木」をつぶそうとするデジタルX線イメージングシステム開発は中止した方がいいとの声も聞こえ始めた。

しかしその否定技術を他社よりも先行構築できたことは大きな意義がある。事業としての単なる成功ではなく、時代の変革の中で技術や事業の安全保障を確立できたことである。現在、写真フィルム各社のレントゲンフィルム事業が低迷する中であって、この医療用デジタル X 線画像診断システムだけは順調に売り上げを伸ばしている。

#### 新規分野への進出

本開発によりそれまでなかったデジタルイメージング技術を社内に獲得する事ができた。加えて化学材料系企業とは異質の機械電気系企業のパラダイムを組織の中に導入できた。これは単なる感光材料メーカーから総合的なイメージングシステムメーカーへの脱皮、さらには他分野の新たな事業への進出の可能性を生んだ。印刷分野においては従来の製版カメラからデジタルスキャナーへの構造転換、従来の写真カメラからデジタルスチルカメラへの市場変化への対応など、デジタル化の波の先兵となった。

イメージング・プレートを利用した放射線画像解析システムによるバイオサイエンス分

野への進出もその一つである。

### 新しい学問や技術分野への発展

それまで知られておらず、あるいは知られていても不可能とされ、見捨てられた技術がどこかで成功すると、しばらくして同時多発的に類似技術が世界各地で発生するものである。この技術に関する情報が爆発的に急増する。そしてその技術分野は社会の中に根を下ろす。ブレークスルーが行われ、イノベーションを生んだのである。最近の事例では、日亜化学工業の青色の発光ダイオードの開発があげられよう。

実際のところ、イメージングプレートの成功は固体物理学ではよく知られている結晶中の点欠陥、カラーセンターを利用した画像技術の最初の実用例となった。カラーセンター現象は古来から多くの科学者・技術者を魅了し、それを応用しようとする無数のアイデアが生まれ、今でもその夢を追っている人達が多い。しかし実用化され、事業として成功しているものは放射線による真珠の着色（黒真珠）程度である。魅力はあるが役に立たない代表例と言ってもいい現象である。イメージングプレートの成功によって、この壁が取り除かれた。

さらに従来カラーセンターに関する研究は塩化ナトリウム NaCl などの単純な一価のアルカリ金属イオン結晶が主たる対象であった。しかしイメージングプレートの成功はより複雑な二価のアルカリ土類金属のイオン結晶までに基礎研究者の興味の対象を広げたのである。複雑な結晶の輝尽発光現象メカニズムも理解できるようになった。それと同時に輝尽現象を応用しようとする技術者が急増した。硫化ストロンチウム SrS:Eu,Sm などの

輝尽性蛍光体を用いるイメージングシステムの開発、書き換え書き込み可能な光メモリーへの応用、人体と放射線等価な吸収特性をもつ輝尽性蛍光体による放射線線量計測素子の開発、可視光領域のカラーイメージングへの試み、超大型天文台“すばる”のイメージングシステムへの応用可能性の検討など、一斉に多様なアイデアが出現していった。

### なぜうまくいったのか

#### 素人であり、注目されなかった

この開発のメンバーはその技術領域では素人であった。蛍光体の専門家も、デジタルエレクトロニクス、コンピューターの専門家もいなかった。利用できる技術は写真フィルムで築き上げられた材料技術と写真画像評価技術にすぎなかった。企業自体も化学材料会社であり、エレクトロニック・イメージング分野では素人だった。逆説的ではあるが、未知の分野であるだけに非常識な試みが可能であったのである。理屈よりは体を動かして実験し、仮説を立てて立証する方法論が取られた。例えば従来技術では実用化できないと思われた蛍光体合成方法、非常にシンプルな画像診断アルゴリズム、高精度なフラットベッド型光学スキャナーの実現などである。

しかしシステムが発売され、技術が公開され、他社が一挙に参入してもよい状態に至った時になって競合他社がもっとも欲しかった技術は、結局は材料技術から派生したイメージング・プレートと画像評価技術から派生した医療画像診断用の画像処理アルゴリズム技術であった。富士フィルムの「技術の核」は実は材料技術と画像評価技術だったのである。

加えて、このシステム開発が周囲から注目されなかったことも、成功の要因にあげていだろう。まずセンサーの原理として技術的には忘れ去られていた輝尽発光現象を利用した。さらに社内的には探索プロジェクトスタート後に銀ショックが元に戻ったため、開発に対する周囲からの期待は低くなっていた。加えて競合相手は写真会社が技術分野の異なるデジタル放射線イメージングシステムまで商品化するとは予想もしていなかった。

すなわち技術的にも、社内的にも、他社からも注目されていたとは言えない開発であった。注目され、周囲から将来を期待される開発は往々にして外部からの不要・不急な干渉を受けやすく、それに対処するだけでもエネルギーを浪費し、失敗する可能性を高める。この開発では注目されなかった結果として、探索段階で生まれ始めた技術の芽を静かに温かく熟成するインキューベーター環境を作ることに役立った。

#### 知識の蓄積、そして集中がうまくいった

開発では分野の異なる技術屋が狭い空間で生活を共にするように活動が行われた。特に探索段階は典型的なタスクフォースチーム活動であった。これは結果として、日常発生する種々雑多な黙示的情報交流がメンバー間で活発に行われ、組織の中に知識の創造とその蓄積が加速されていった。問題点の抽出とその解決は個々に自発的に分野間を越えて行われるようになった。問題の解決のスピードは早く、そのレベルは高くなった。同じ開発でも日常の活動をメンバーの本籍地で行うようなマトリックス組織運営を行っていたら、このような好ましい循環にならなかったことは確かである。

加えて、原理的に可能性があるのかどうかもわからない探索のスタート時から、専門の異なる放射線医との診断画質研究会が毎月行われた。医師が何を見て、何を考えて画像診断を行うのか、医師が何を望んでいるのかとの知識が開発メンバーに共有され蓄積されていったのである。これは医療システムの基本デザインや放射線医が望む診断アルゴリズム開発に極めて有効に反映された。

一方、商品化段階では典型的な階層構造のビューロクラシー組織運営がなされた。メンバーの意識は市場ニーズに焦点が絞られ、蓄積された知識は製品作りに集中されることになった。当然ながらパラダイムの急激な変化により組織内のあつれきが浮上した。マネジメントに合わない者は他の部門に移った。この組織のパラダイム転換と知識の集中化への切り替えは探索段階を引きずることなく強力なリーダーシップのもとで短時間に巧みに行われた。これも開発を成功させた要因であろう。

#### 時代、そしてニーズへの適合

商品そのものが市場導入しやすいシステムコンセプトを持っていた。すなわちユーザーである病院の放射線科の従来の作業の流れを大幅に変えることなく、かつ新たに購入しなければならない設備の経済的負担を低く抑えることが出来た。撮影露出の過不足に影響されない画像再生方式も現場の放射線技師に歓迎された。加えて画像診断の従来の方法論を変えないで、画像処理による新たな診断技術への移行を円滑に行える工夫がなされた。デジタル画像による診断は医師にとって初めての経験である。物理的に意味があっても誤診につながる。そこで従来画像と同じように

“処理”した画像と診断目的に合わせて処理した画像とを並列出力する画像フォーマットが採用された。さらにデジタルイメージングの世界、通信ネットワークの世界が開きつつあり、これを可能にする新しいシステムコンセプトとして、病院のそして社会の時代の流れに適合していた。

しかしながら市場ニーズに合うように製品コンセプトを作り上げることは、どのような製品開発でも当然のことであろう。これに加えて、この開発では開発している期間に周辺の技術が急速に進歩した。自社では作れない外部の技術を素早く取り込む”技術の空中ブランコ”（柳田邦男）ができなかったら成功しなかったであろう。例えばコンピューター技術・オプトエレクトロニクス技術・メモリー等の電子デバイス技術が予期しないほどに進歩して、膨大な画像情報を扱う新しいデジタルイメージングシステム開発に、これらの技術をタイミング良く利用することができたのである。

#### 運、そして黒幕の存在

材料からメカニクス、オプトエレクトロニクス、ソフトウェアなどの広範囲な技術から成り、長期間に渡るシステム開発では“運”の良さが不可欠である。利用できる周囲の技術の予想外の進歩、競合巨大メーカーの予想外の不参入、社会のデジタルイメージングへの急速なトレンドなど、決してあらかじめ予測できたものではない。必要なことは将来を見据えたコンセプトと、周囲の急速な環境変化に迅速に対応できる組織作りとそのマネジメントにあったのであろう。

加えて探索から商品化、そして事業化まで、開発メンバーを社内あるいは社外の荒波から

守り、メンバーから慕われ、目標を常に指し示した“黒幕”であり、パトロンでもあった人物の存在も開発に成功した大きな要因の一つと言えるであろう。

## 新たな技術の登場

イメージング・プレートを用いた放射線イメージングシステムが登場してから 16 年が経過した。レントゲン写真システムに代わる唯一のデジタルX線イメージングシステムとして、世界的に普及している。しかしこのシステムの短所はリアルタイムイメージングの困難性にある。レントゲン写真と同じ画像品質を持ちながら、かつ即時性が欲しいとの放射線医からのニーズは昔から常にあった。しかしその願いを実現する手段はこれまでなかったのである。

技術は着実に進歩する。当時は不可能であった大面積の固体撮像素子も夢ではなくなった。現在、大面積のフラットパネル検出器の提案が続出している。X線源として円錐ビームを使おうか、扇形ビームを使おうかと言う過去の悩みはすでにない。既存のX線発生装置の使用を前提にしているのである。20 年前の開発競争は 6 社ほどだった。しかし今回の競争は日本を含め 15 社を越える。以前は参加していなかった巨大な放射線機器メーカーもこの競争の主要なプレイヤーとして加わった。X線 CT や MRI の性能がほぼ行き着くところまで向上し、医療放射線画像機器として質の異なる新たなモダリティの可能性は見えていない。そのような状況の中で、残された巨大市場はリアルタイムのデジタルX線イメージングシステムしかないと判断したからであろう。

提案されている方法は半導体技術を駆使した固体撮像センサーである。アモルファス・セレン Se やヨウ化鉛  $PbI_2$  で X 線を直接電気信号に変える直接方式と、ヨウ化セシウム CsI や  $Gd_2O_3:S:Tb$  などの蛍光体で X 線を光に変換した後に電気信号を得る間接方式がある。いずれにしてもその共通技術は液晶ディスプレイパネルに用いられているようなアモルファス・シリコンによる大面積の薄膜トランジスタ (TFT) 技術である。まさにエレクトロニクスメーカーならどこでも開発可能な技術分野になった。最終的には病院経営においてどちらのシステムがコスト的に有利であるかによって、市場をすみ分けることになるだろう。

イメージング・プレートとこれらの新たな技術との戦いが始まったのである。

## 補足：メンバーのその後

初期の探索研究に関わっていた主要なメンバーはその後どうなったか。

開発が始まる前に構想に参画した松下は大学に戻り、高エネルギー物理学研究所の教授としてX線結晶解析の EXAFS 分析の世界的権威となった。彼はイメージング・プレートをX線結晶解析に応用し、それを世界的に普及させる立て役者となった。現在は高エネルギー加速器研究機構の物質構造科学研究所の副所長となっている。

画像スキャナー開発のリーダーであった松本は商品化段階になってチームから離れ、1982年に富士フィルムを退社しヤマハ（株）に移った。その後エレクトロニクス研究センターの所長としてヤマハの新製品開発に貢献した。

画像センサー開発のリーダーであった宮原は1985年に開発チームを離れ、イメージング・プレートを応用した新しいサイエンス・システム事業と光デバイス研究を立ち上げた。1998年に富士フィルムを退職し、一橋大学イノベーション研究センターの教授となった。

画像処理アルゴリズム開発のリーダーであった加藤は1998年までの長い間このシステムの開発部隊の部長として多くの製品を世の中に送りだした。現在は機器事業部の商品部長として富士フィルムの機器事業の全体を担っている。

商品化プロジェクトのリーダーであった高野はこの事業の総責任者として基盤を作り上げた後、取締役として販売部門の富士メディカルシステム（株）に移り、システムの普及に活躍している。

このシステムを最初に構想し、開発のすべてにおいて陰のリーダーであった園田は富士フィルムの工場長、研究所長を歴任し、常務取締役機器事業本部長を最後に1997年に退職し、悠々自適の生活を送っている。

総 説



オートラジオグラフィとラジオグラフィ  
——イメージングプレートとその応用——

宮原諄二

Reprinted from

RADIOISOTOPES, Vol. 47, No. 2

Feb. 1998

社団法人 日本アイソトープ協会



総 説



# オートラジオグラフィとラジオグラフィ

## ——イメージングプレートとその応用——<sup>†</sup>

宮原諄二

富士写真フイルム(株)

106-8620 東京都港区西麻布 2-26-30

Key Words: autoradiography, radiography, radioisotope, photo-film, photographic process, Imaging Plate, photo-stimulated luminescence, PSL, micro-radiography, neutron radiography, electron microscopy, X-ray diffraction, bioscience

### 1. オートラジオグラフィとラジオグラフィ

#### 1.1 はじめに

人が感覚器官により入手する情報量は、

視覚 (見る)	10 <sup>6</sup> bit/s
聴覚 (聞く)	10 <sup>4</sup> bit/s
触覚 (触る)	10 <sup>2</sup> bit/s

であるという<sup>1)</sup>。視覚は聴覚の 100 倍の、また触覚よりも一万倍もの情報量を入手する能力がある。まさに古来から賢人の言葉のように「百聞は一見に如かず」であり、「目は口ほどにものを言い」である。

通常、人の見ることのできる情報とは電磁波の中のごく一部、すなわち波長範囲で言うとおよそ 400nm から 700nm の可視光により得た情報にすぎない。しかし人はこの情報を画像として皮革や紙などの上に定着させて歴史を作ってきた。さらに人は目に見えない“光”を用いて、より広い世界を見ようと望んだ。放射線による見えない情報の可視化もその一つであった。

その放射線の画像化方法とはオートラジオグラフィとラジオグラフィの二つに大別される。

#### 1.2 <オートラジオグラフィ>

物質自体からの放射線を用いた  
その情報の画像化方法

オートラジオグラフィは後述のラジオグラフィよりも歴史が古い。1867年に Niepce による写真乾板の上に置いた硝酸ウランや酒石酸ウランの像が見えない“光”によって感光したとの発見が最初と言われる<sup>2)</sup>。1896年には Becquerel がオートラジオグラフィにより放射能を発見し、1898年には Curie 夫人が放射性同位元素 Ra を発見した。オートラジオグラフィ

#### オートラジオグラフィ

放射線源



対象物質

- ・オートラジオグラフィ(狭義)
- ・シンチグラフィ、SPECT、PET
- ・泡箱 etc

#### ラジオグラフィ

放射線源



対象物質

- ・ラジオグラフィ(狭義)
- レントゲン写真など
- ・X線CT
- ・電子顕微鏡、X線回折 etc

図 1 放射線情報の画像化方法の分類

本稿では主として二次元画像センサーを用いた狭義のオートラジオグラフィについて述べる。

<sup>†</sup> Autoradiography and Radiography—Imaging Plate and Its Applications—. Junji MIYAHARA : Fuji Photo Film Co., Ltd., 2-26-30, Nishiazabu, Minato-ku, Tokyo 106-8620, Japan.

の歴史は放射能の発見の歴史でもあった。

しかしオートラジオグラフィの普及と発展は第二次大戦以降の原子力技術およびラジオアイソトープ利用技術の急速な発展まで待たなければならなかった。今日ではバイオサイエンス、医薬開発研究を含め、研究から産業応用分野に至るまで放射線を利用する不可欠な技術として広範囲に利用されている。

「オートラジオグラフィ」の言葉の定義は、「放射線 (radiation) によるその物質自体が描いたもの (autograph)」に由来する。

この定義によると通常のオートラジオグラフィの他に、生体内に放射性物質を投与してその分布を画像化するシンチグラフィ、SPECT (シングルフォトン CT)、PET (ポジトロン CT) なども広義のオートラジオグラフィであり、さらには宇宙線や素粒子を記録する泡箱などもこれに含まれよう。

本稿ではオートラジオグラフィを、「放射性同位元素を含む試料と二次元画像センサーとを密着させることにより、放射性同位元素の分布画像を得る方法」と定義して、話を進める。

### 1.3 <ラジオグラフィ>

#### 他の放射線源を用いた対象物質情報の画像化方法

ラジオグラフィは1895年に Roentgen が X 線を発見し、これによる“レントゲン写真”を端緒とする。以降、X 線によるラジオグラフィは急速な発展を示し、X 線 CT を含めて今日では医療画像診断法の大部分を占めるまでに至った。

この定義によれば、医療分野や産業分野で広く使われている通常のレントゲン写真法の他に、X 線 CT、X 線結晶回折法、透過型や反射型の電子顕微鏡法などをも含む。放射線源としては制動輻射を応用した通常の X 線源の他に、ラジオアイソトープ、原子炉、シンクロトロン放射光、その他多様な線源が利用される。

本稿ではラジオグラフィを「他の放射線源を

用いて、対象物質の情報を二次元画像センサーにより得る方法」と狭義にとらえて話を進める。

### 1.4 放射線画像センサーの比較

現在実用的に広く用いられている放射線二次元画像センサーは、写真フィルム、イメージングプレート (Imaging Plate, IP)、CCD である。いずれも高密度フラックス放射線に対しても数え落としがたい特徴を持つ積分型センサーである。

写真フィルムとイメージングプレートは off-line で用いられ、CCD は on-line で用いられる。on-line 型のセンサーはリアルタイムで放射線を検出する特徴を有するが、検出 (露光) に際し装置を占有する。一方、off-line 型は即時性に欠けるが、露光の際に装置を占有しない。これはときには数か月にわたる長時間の露光が必然となるオートラジオグラフィでは不可欠な機能である。表 1 にこれらの比較を示す。

デジタル放射線画像センサーとしてイメージングプレートか CCD かを選択する際の本質的な基準は、即時性を求めるか、有感面積 (画素数の多さ) を求めるかに帰着しよう。

表 1 放射線画像センサーの比較

	写 真 フィルム	CCD	イメージング プレート
高感度	×	○	○
有感面積	○	×	○
即時性	×	○	×
デジタル化	×	○	○
オートラジオ グラフィ適性	○	×	○
ラジオグラフィ 適性	○	○	○

## 2. 写真フィルムの特徴と限界

### 2.1 感光メカニズム

写真フィルムとは、ハロゲン化銀 AgX (X = Cl, Br, I) 結晶の感光特性を利用した写真感光

材料である。この材料はハロゲン化銀結晶とゼラチンからなる写真乳剤がフィルムベースに塗布された写真フィルムとして一般に利用される。またオートラジオグラフィの場合は容易に乳剤層をフィルムからはがすことができるストリッピングフィルムとして、あるいは乳剤そのものの形で利用されている。

ハロゲン化銀結晶の感光メカニズムはおおよそ次のように考えられている<sup>3)</sup>。すなわちハロゲン化銀結晶には感光核と呼ばれる電子トラップが存在している。光が吸収されて発生した光電子は結晶中を移動し感光核に捕獲される（電子過程）。次に結晶中に多数存在する格子間 Ag イオンを引き寄せてそこに Ag 原子を作る（イオン過程）。これが繰り返されて Ag 原子からなるクラスターに成長し、安定な潜像（現像核）となる。正孔はゼラチンや結晶中の正孔トラップに捕獲され、電子との再結合が防止される。

理論的な考察によると、最小の潜像は4個の Ag 原子からなるクラスターと考えられている。このことは、①光子4個以上ならばその1個の結晶は現像可能となること、②逆に4個以上の光子が吸収されても1個の結晶しか現像されないことを意味する。現在の実用的な高感度写真フィルムの最小の潜像は10個程度の Ag 原子からなるクラスターと考えられている。

ハロゲン化銀結晶が光子の「しきい値」を持っていることは、この材料が室温において熱的ノイズを自動的に除去する特別な機構があることを意味する。この材料が唯一の高感度の撮影材料として150年以上にもわたって用いられてきた理由の一つはここにある。

## 2・2 光露光と放射線露光の違い

放射線のうち、非荷電粒子（X線、 $\gamma$ 線、中性子線など）はハロゲン化銀結晶との相互作用により荷電粒子（電子、 $\alpha$ 線、ポジトロンなど）を発生しない限り、写真フィルムを感光させない。さらに二次的に発生した荷電粒子です

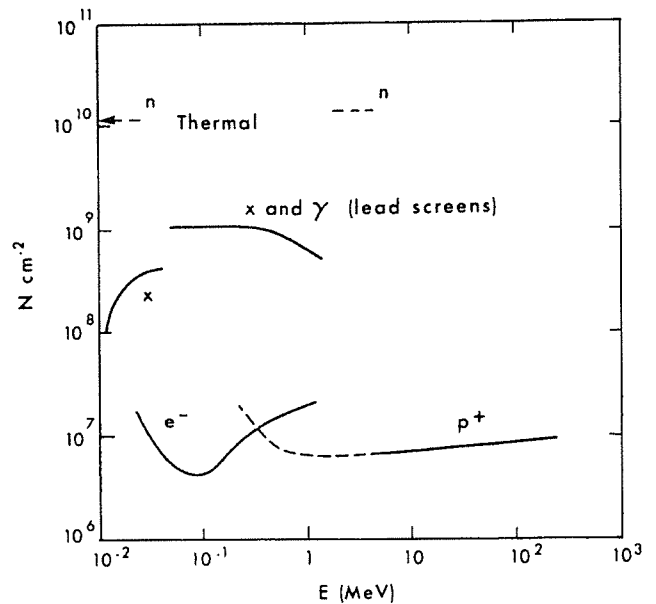


図2 種々の放射線に対する写真感度<sup>3)</sup>

電子、陽子、X線、0.1mmの鉛スクリーンを用いたX線と $\gamma$ 線、熱中性子および高速中性子。縦軸はX線フィルムの単層の乳剤層に対して光学濃度0.5を得るに必要な放射線量子の数( $N/cm^2$ )を、横軸はその放射線エネルギー $E$ である。縦軸は下に向かうほど( $N$ が小さいほど)感度が高い。

ら一般に高速で飛程は大きいため、その粒子1個あたりのエネルギー損失も大きく、一つのハロゲン化銀結晶に荷電粒子が1個吸収されたとしても多数の潜像が形成される。エネルギーが高い場合は複数の結晶にも潜像が形成される。そのため放射線露光においては、光露光と異なる下記の現象が生ずる。

### 【相反則不軌が生じない】

「相反則」とは明るさが一定ならば、露光時間を倍にし、絞りを半分に絞っても同じ感度を示す、つまり反比例の関係があることを言い、「不軌」とはそれが成り立たないことを言う。

微弱な光で長時間露光すると、ハロゲン化銀結晶に安定な潜像が形成される前に Ag クラスターが熱的に分解し、感度低下（低照度不軌）する。一方、高照度の光でごく短時間露光すると、多数の光電子が瞬時に結晶中に発生し、潜像が分散して有効な現像核に成長せず、感度低下（高照度不軌）する。

放射線の場合は1個の放射線量子であってもそのエネルギーが高く、ハロゲン化銀結晶を現像可能にする。このため放射線露光の場合は「相反則不軌」は生じない。

#### 【潜像退行が生じやすい】

潜像退行とは露光後長期間保存することにより、写真感度が低下する現象を言う。これはハロゲン化銀結晶中の潜像、すなわちAgクラスターの熱的解離により現像活性が徐々に低下することによる。X線や $\gamma$ 線での露光の場合は、分散した多数の潜像を作ることにより、一般に潜像退行が生じやすい。

#### 【画像の粒状性が悪化しやすい】

放射線露光では1個の放射線量子によって多数のハロゲン化銀結晶が現像される。このため、特に露光量の少ない場合には光の場合よりも画像の粒状性（ザラツキ）が悪化する傾向にある。すなわち感度を上げるほど、量子ノイズにより画像の品質は劣化する。

### 2.3 写真フィルムの限界

一枚の写真フィルムはそれ自身でセンサー・メモリー・ディスプレイの機能が三位一体となったスマートなイメージングシステムである。しかしこれら三つの機能が分離できないが故に、システム性能に限界が生まれた。

#### 【高感度化の限界】

写真乳剤層中でハロゲン化銀結晶はたがいに独立して存在していなければならない。未露光結晶までが接触現像されてしまうからである。このため乳剤層での結晶充填密度に限界が生ずる。

また現像液やその反応生成物が乳剤層を物質移動する必要があるため、乳剤層を厚くして感度を上げる手法に限界が生じる。たとえ高感度化が可能になったとしても、感度を上げるほど自然環境放射線のノイズ（カブリ）が増加し、S/Nが低下し、高感度化に限界を与える。

#### 【定量計測の限界】

写真フィルムにおいて、放射線強度と写真黒

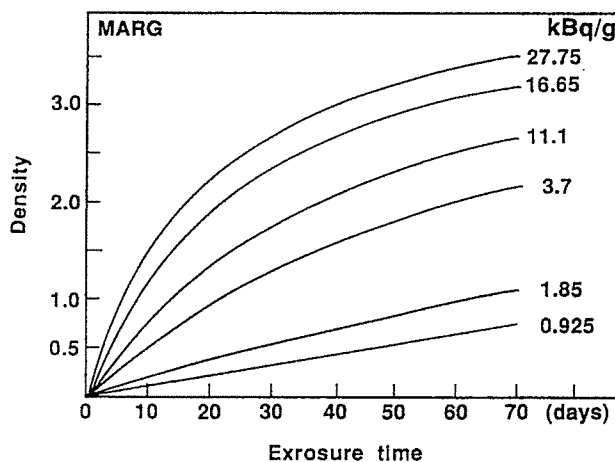


図3 写真フィルムの特性曲線  
放射線線量と光学濃度は一般に比例しない。直線性は光学濃度の低い場合に限られる<sup>4)</sup>。

化濃度の関係は一般に非線形である。比例する範囲は濃度が低い場合に限られる<sup>4)</sup>。また現像による濃度のばらつきも不可避である。したがって写真フィルムの場合には放射線像の位置を正確に計測できても、強度の定量計測は困難であった。さらにコンピュータで処理する場合は、マイクロデンシトメータでデジタル情報に変換する必要があった。

写真フィルムのこれらの限界は、センサー機能に特化したイメージングプレートによりその解決が図られた。

### 3. イメージングプレートの特性

#### 3.1 イメージングプレートとは

イメージングプレートは1983年に医療X線画像診断分野のコンピュータドラジオグラフィ（computed radiography, CR）システムに初めて用いられた放射線画像センサーである<sup>5)</sup>。イメージングプレートには輝尽発光現象（photostimulated luminescence, PSL）を示す特殊な蛍光体がフィルム上に塗布されている。

画像化は次のようにして行う。すなわち放射線露光されたイメージングプレートを精密に搬送し、その表面をレーザーで光走査する。放射

線量に比例して発生した輝尽発光は時系列に光電子増倍管に集められ、電気信号に変換される。このデジタル電気信号を再構成し、目的とする情報処理を行った後、CRTあるいは画像プリンタにより放射線画像を出力する。イメージングプレートに残存していた放射線情報は可視光により消去され、繰り返し使用される。

### 3.2 発光メカニズム

輝尽発光は1889年に Philip E. A. Lenard により発見されたストークスの法則に従わない発光現象である。この現象は、光（放射線など）の第1の刺激の後で、発光波長よりも長波長の第2の刺激によって、最初の刺激の強さに応じた第3の蛍光を発する。

イメージングプレートの発光メカニズムは次のように考えられている<sup>6)</sup>。

#### 【放射線情報の記録】

BaFX:Eu<sup>2+</sup> (X=Cl, Br, I) 輝尽性蛍光体に放射線を照射すると、電子と正孔が発生する。電子はあらかじめ作られた結晶中の X イオン空孔（実用系では主として X=Br）に捕獲され、F センターを形成する。正孔は発光センターである結晶中の Eu<sup>2+</sup> イオンに捕獲され Eu<sup>3+</sup> となる。ハロゲン化銀と同じように、この電子と正孔の効果的な分離過程が重要な意味を持つ。

#### 【放射線情報の読出し】

F センターに吸収される赤い光（たとえば He-Ne レーザー）により、捕獲されていた電子は導帯に解放され、Eu<sup>3+</sup> に捕獲されていた正孔と再結合し、そのエネルギーにより発光センターの Eu<sup>2+</sup> が励起され、基底状態に戻るときに青い光（400 nm）の輝尽発光を生ずる。

#### 【写真フィルムとの違い】

写真フィルムに用いられているハロゲン化銀結晶は1個の放射線量子を吸収するだけで、現像により結晶のすべてがフィラメント状の金属銀に還元される。すなわち1個の放射線量子でも100個の放射線量子に対してでも、1個のハロゲン化銀結晶だけが現像される。

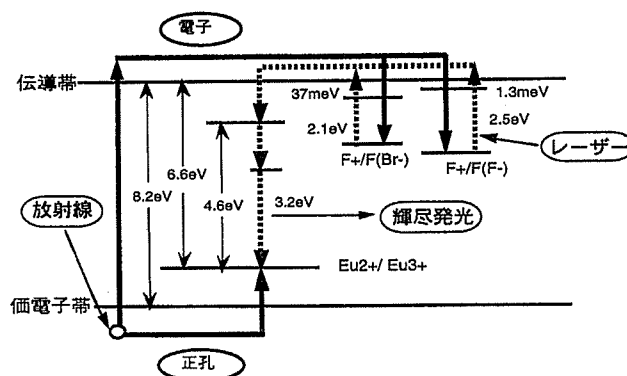


図4 BaFBr:Eu<sup>2+</sup> 輝尽性蛍光体の輝尽発光メカニズム  
実線と破線はそれぞれ放射線情報の記憶過程と読出し過程を示す<sup>6)</sup>。

一方、イメージングプレートに用いられている輝尽性蛍光体結晶は1個の放射線量子が吸収されればその輝尽発光を生じ、100個の量子が吸収されればこれに比例する輝尽発光を生じる。つまり単結晶のシンチレータのように、1個の輝尽性蛍光体結晶は吸収された放射線量子に比例した応答を示す。この応答は発生した光電子（または正孔）が結晶中の X イオン空孔（または Eu<sup>2+</sup>）のすべてを満たすまで続く。

### 3.3 フェーディング/残像

主たる輝尽発光メカニズムは上述のとおりであるが、現実の結晶では X イオン空孔の他に不純物や添加元素、各種の格子欠陥などや種々強度を増加させたり、フェーディングや残像などの現象などが生ずる。

#### 【フェーディング】

記録した情報が時間とともに非線形に減少する現象であり、写真フィルムの潜像退行に類似している。これは不安定な状態でトラップされた電子や正孔が室温で解放されたり、不安定な複合中心が分解して、正孔と電子の再結合が生ずるためと考えられている。

#### 【残像】

消去したはずの画像が時間とともに再びかすかに浮き出てくる現象を言う。未知の準安定なトラップに捕獲された電子が、室温で熱励起や

トンネリングなどによって徐々に X イオン空孔に移動して、読み出されやすい F センターに変化するためと考えられている。

#### 4. イメージングに及ぼす要因

##### 【量子ノイズ】

私たちが通常目にするカラー写真（フォトグラフィ）の画質はシステムの性能、すなわち固定ノイズが支配している。一方、放射線による画像の画質は一般に量子ノイズが支配している。放射線露光においては、感度を上げることは画質劣化を意味することに留意すべきである。

特にオートラジオグラフィでは極微量の放射性同位元素が使用され、画像として見えるか見えないかが問われる。人が見て判別できる信号量は定量計測できる限界値のおよそ 1/10 以下である。量子ノイズが支配する放射線像を二次元パターンとして計測する意義は、人の目のすばらしい識別能力を存分に利用するところにある。

##### 【自然環境放射線】

空気や光が周囲に満ちているように、自然環境からの放射線も太古の昔から私たちの周囲に満ちあふれている。日本人は 1 年間に平均 1.5 mSv の自然放射線の中にいるが、その 1/5 は自分の体の中の  $^{40}\text{K}$  などによるものである。また日常使っている容器や紙、家の床や壁などの建材からもおよそ  $0.15 \mu\text{Sv/h}$  の極微弱な放射線が発生している<sup>7)</sup>。地域的な差も大きく、日本の環境放射線レベルは西日本で高く東日本で低い西高東低型である。もっとも低い場所の神奈川県箱根町と、もっとも高い福井県敦賀市ではそのレベルは 5 倍ほど異なる<sup>8)</sup>。アメリカではコロラド州デンバーがもっとも高く、カリフォルニア州のデスバレイがもっとも低い<sup>7)</sup>。

環境放射線ノイズは写真フィルムのカブリとなり、高感度化を妨げてきた。イメージングプレートは蓄積されたこのノイズを事前に光で消去することにより、この問題を解決した。

イメージングプレートはおよそ  $0.015 \mu\text{Sv/h}$  の放射線をも検出するので、自然環境レベルの極微弱放射線像を容易に検出する。したがって露光に際しては、イメージングプレートに接する材料のみならず、設置場所、地域、宇宙線の方向などの環境に十分留意したい。

##### 【シールドボックス】

極微弱レベルの検出は環境放射線を防ぐシールドボックス中で行う必要がある。ただし鉛を遮蔽材として用いる場合、 $^{210}\text{Pb}$  の崩壊生成物である  $^{210}\text{Bi}$  からの 1.17 MeV の  $\beta$  線によって鉛自体が放射線の発生源となる恐れがある<sup>9)</sup>。

特に吟味された低放射性の鉛ブロックと、二次、三次の放射線をさらに遮蔽するための無酸素銅板/アクリル板からなる複合壁をもったシールドボックスが市販されている。これにより環境放射線レベルは 1/10 以下になり、今まで気づかなかった自然放射能レベル以下の放射線像の検出が可能になる。

##### 【核種の半減期】

短い半減期の  $^{18}\text{F}$  (109.8 min) や  $^{32}\text{P}$  (14.58 day) などを用いた場合、オートラジオグラフィにおける露光時間は長くても半減期の 2 倍程度が限度である。それ以上の露光時間は放射能の減衰により、ほとんど意味がない。したがって短い半減期の核種では高感度のイメージングプレートが不可欠となる。

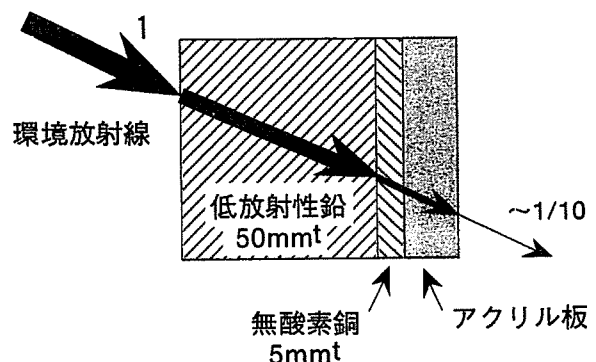


図 5 環境放射線を遮蔽するシールドボックス壁の断面  
これにより環境からのノイズは約 1/10 に低減され、極微弱な放射能の検出が可能になる。

$^{125}\text{I}$  (60 day) や  $^{35}\text{S}$  (87.4 day) などは露光時における半減期の問題はほとんどなく、半減期の長い  $^3\text{H}$  (12.33 y) や  $^{14}\text{C}$  (5730y) などはまったく問題ない。

#### 【フェーディング】

温度が高いほどフェーディングは大きくなる。通常は露光直後に読み出すので実用上の影響は少ない。イメージングプレートの露光中や露光後に  $5^\circ\text{C}$  以下に保持すれば、数か月にわたってフェーディングはほとんど生じない。オートラジオグラフィで厳密な定量計測を行う場合は、標準線源と試料との同時露光が望ましい。

#### 【最大検出感度】

オートラジオグラフィのような数日、数か月にわたる露光を行う場合、試料からの放射線の他に、フェーディング、核種の放射能の減衰、環境放射線ノイズなどの複合した影響が生ずる。このため、核種によって限界露光時間や最大検出感度が存在する。環境放射線を防ぐシールドボックス中において、室温での最大検出感度はおよそ以下のとおりである。低温シールドボックスの使用により、さらに最大検出感度の向上が期待される。

RI	限界露光時間	最大検出感度
$^{32}\text{P}$	4週間	$9.8 \times 10^{-6}$ (Bq/mm <sup>2</sup> )
$^{14}\text{C}$	3か月	$7.7 \times 10^{-5}$ (Bq/mm <sup>2</sup> )

## 5. オートラジオグラフィへの応用

### 5.1 バイオサイエンス/医薬分野

オートラジオグラフィがもっとも使われる領域は医薬開発研究やバイオサイエンス分野である。イメージングプレートは、種々の核種に対して写真フィルムと比べ数十から数百倍の感度がある。この分野ではDNAや蛋白質などのクロマトグラフィ解析や標識薬剤を投与した実験動物の体液の代謝分析がオートラジオグラフィにより頻繁に行われ、またマウスなどの実験小動物の全身オートラジオグラフィもルーチンの



図6 ラットの全身オートラジオグラフィ解析イメージングプレートにより露光時間が数十分の一になり、またCRT画面上で任意の部位の放射線量を簡便に定量計測できるようになった。

業務として行われている。

イメージングプレートにより実験解析期間の大幅な短縮、定量精度の向上、実験動物や放射性廃棄物の低減が可能になった<sup>10)</sup>。特にCRTの画面上で部位を特定し、その放射線線量を定量計測できる利点は大きい。

現在、従来の写真フィルムと同様に、厚生省への新薬申請に際してもイメージングプレートによるデータが認知されようとしている。

### 5.2 自然放射線イメージング

従来ノイズに埋もれて検出できなかった岩石中のカリ長石などに含まれる $^{40}\text{K}$  ( $\beta$ 線 1.32 MeV) の分布や、花崗岩中のU, Th系列の高強度放射能の微小組織の確認もイメージングプレートによるオートラジオグラフィで初めて画像化できた。これは鉱物学にとって画期的であると評価されている<sup>11)</sup>。

また砂漠の砂からの自然放射能(主として $^{40}\text{K}$ )も産地によって異なることが明らかになった。塩化カリウムからの自然放射線強度を100とすると、中国のタクラマカン砂漠は4.0、アフリカのダカール砂漠は0.1であり、また鳥

取砂丘は 4.6, 小田原海岸は 0.7 であった<sup>12)</sup>。塩化カリウムのような身近にある物質がふつうの砂の 20 倍から 100 倍も高い自然放射能を有していることは意外と知られていない。

一方, 野菜や食肉のオートラジオグラフィも可能になる。かぼちゃの種やへたでは放射線強度は他の部分よりも高く, 豚肉では赤身から放射線は検出されたが, 脂肪からは検出されなかった。いずれも放射能の主体は  $^{40}\text{K}$  であり, 放射線強度は  $3 - 5 \times 10^{-3} \text{ cpm/mm}^2$  であった<sup>9)</sup>。

### 5.3 環境放射線イメージング

イメージングプレートは宇宙線の検出にも用いられた<sup>13)</sup>。また成層圏を飛ぶジェット機の座席の下に置いたイメージングプレートには, 機体や人を貫いて来た宇宙線シャワーや重粒子の鋭い軌跡がリアルに画像化される。その量は地上のおよそ 1 桁高いこともわかった。

1945年 8 月 6 日, 広島に投下された原爆によって黒い雨が降った。その黒い雨の跡が残った白壁のオートラジオグラフィを行ったところ, 黒い雨に原因する放射線像が検出された。またその放射能は周辺の自然環境放射線レベルよりも約 1 桁低いこともわかった<sup>14)</sup>。これは黒い雨の放射能を初めて確認した貴重な記録となった。

1989年 4 月 26 日, チェルノブイリ原発事故が発生した。事故が報告された後, ただちに空気中の塵をフィルタ上に吸引し, イメージングプレートによるフィルタのオートラジオグラフィ検査が行われた。事故の 1 週間後, 5 月 3 日になって突然に通常の世界レベルの約 500 倍の放射能 (大半は  $^{131}\text{I}$ ) により画像は真っ黒になった。その後, 5 月 5 日に最高に達し, 次第に減衰していく様子が確認された。

従来より, 放射性同位元素を用いる実験室での汚染状況はカウンタで計測していた。この方法では高強度の微小スポット汚染は計測されず見過ごされる危険性があった。イメージングプ

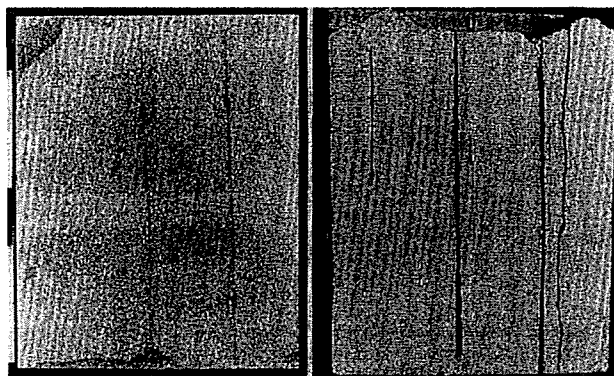


図 7 イメージングプレートによる広島原爆の黒い雨のオートラジオグラフィ  
左が放射線像で黒い雨跡が検出されている。右は黒い雨の跡が残っている白壁の実物写真。放射能は自然環境レベル以下に減衰していることがわかった。

レートによるオートラジオグラフィにより, スリッパの底に付着した汚染や, 実験机の上の汚染状況が一目瞭然に画像化される。

以上の例ばかりでなく, イメージングプレートによる極微弱な放射性物質の画像化とその計測は他に代えられない手法と言えよう。

### 5.4 産業分野

イメージングプレートによるオートラジオグラフィは半導体に用いられる Si ウェハ表面汚染の解析にも応用されている。たとえば DRAM を製造する場合, クリーンルーム雰囲気や洗浄工程などで吸着して残存する Fe, Cu, Na などの汚染が問題となっている。従来放射性同位元素で標識化してシンチレーションカウンタで計測していたが, その分布を可視化し, 定量計測する手段がなかった。イメージングプレートにより, 表面濃度が  $10^8$  原子/cm<sup>2</sup> 以下の超極微量元素分布を画像化し, 定量的に計測することが可能になった<sup>15)</sup>。

## 6. ラジオグラフィへの応用

### 6.1 医学/医療分野

X 線医療画像分野はラジオグラフィの中でもっとも大きな市場規模を持つ。日本では医



療用 X 線写真の撮影数の 15% 近くが、すでにイメージングプレートを用いた CR (computed radiography) システムによって行われている。

CR は診断目的に応じた画像処理により適切な診断画像が得られ、撮影の失敗がなく再撮影防止に役立ち、国民の総被曝線量低減に寄与している。さらに X 線画像のファイリングや検索が容易となり、診断業務や病院の事務管理業務の合理化に寄与している。また新しい診断画像や病院間の医療画像通信、他のモダリティとの結合による総合医療画像診断システム、将来の自動画像診断への道も開けた。

## 6・2 バイオサイエンス／医薬分野

最近になって、イメージングプレートによるマイクロラジオグラフィが可能になった。これは高解像度画像スキャナ (40 pixel/mm) と 8  $\mu\text{m}$  の微小焦点 X 線管球とを組み合わせたシステムである。10 倍の拡大撮影と CRT 上の画像拡大により総合数十倍の拡大像が得られ、実用上の解像度は 10  $\mu\text{m}$  以下が実現した。このシステムはセンサーの有感面積が CCD に比べ圧倒的に大きくとれ、かつ高感度なイメージン

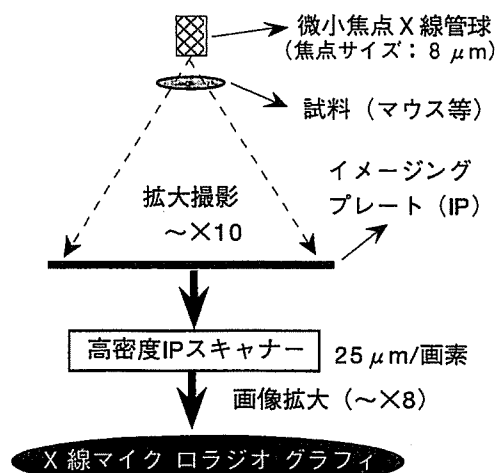


図 8 X 線マイクロラジオグラフィシステム  
拡大撮影と高密度スキャナによる画像  
拡大を併用し、10  $\mu\text{m}$  の対象物の識別  
が可能になる。

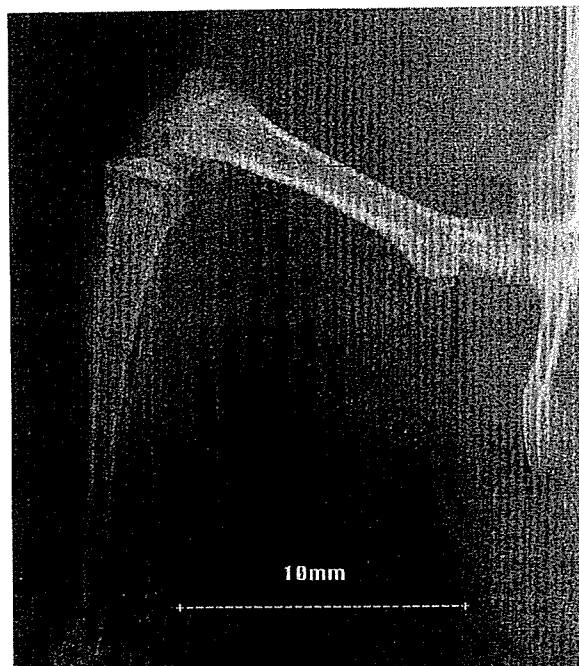


図 9 イメージングプレートによるマウス大  
腿骨のマイクロラジオグラフィ (25  
kVp 80  $\mu\text{A}$  6s)  
人と同様な実験小動物の X 線画像診断  
が可能になる。

グプレートを用いることによって初めて可能になったシステム例と言える。

このシステムの意義は、人間に対して行われてきた X 線画像診断と同様な手法が実験用小動物においても可能になることを意味する。すなわち薬物投与後の実験小動物の骨や臓器や胎児などの経時形態変化を生きたままで観察／診断できる。従来この解析は、被実験集団の中から一定時間ごとに屠殺し、解剖し、薬品処理し、顕微鏡観察用サンプルを作り観察するという膨大な手間と時間とコストがかかっていた。医薬開発研究などの研究期間の短縮や実験精度の向上、研究コストの低減などの直接的なメリットに加え、実験動物を殺さない研究手法として地球環境や社会倫理に対する意義は大きい。

## 6・3 X 線結晶構造解析分野

従来の 0 次元のシンチレーションカウンタ法に比べ二次元のイメージングプレートを用いることにより、X 線回折におけるデータ収集速

度が10-100倍になり、新しいX線結晶構造解析手法の実現や発展に寄与している<sup>16)</sup>。従来の二次元比例計数管はほぼイメージングプレートに置き換えられたと言ってよいであろう。

特筆すべきは、日本において放射光とイメージングプレートの組み合わせにより、蛋白質や筋肉などの生体結晶構造解析研究が急速に進展したことである。世界における蛋白質の結晶構造データベース構築に日本が主導的な立場にあることは意外に知られていない。

非バイオサイエンス領域においても、極点図、表面応力測定、高圧下X線回折、X線トポグラフィ等々にその応用が広がっている<sup>16)</sup>。

#### 6.4 電子線イメージング

透過型電子顕微鏡において、生体試料などの分解能は電子顕微鏡自体の分解能よりもはるかに低く制限されている。これは試料の電子線損傷によるもので、倍率を上げれば上げるほど損傷は激しくなる。

イメージングプレートを用いることにより、電子線損傷に弱い試料の高倍率観察や、X線回折と同様な定量性のある精密な結晶構造解析(電子線回折)が可能になった。さらに写真暗室が不要であること、画像のフェイリングや検索、通信などが容易になる等の特徴あるシステムが実現している<sup>17)</sup>。

また従来から有機/高分子材料や生体試料の無染色観察、および炭素/水素/酸素などの軽元素の定量精度のよいマッピングが求められてきた。最近、非弾性散乱されたエネルギー損失電子を用いる電子分光結像法(electron spectroscopic imaging, ESI)が行われるようになった。ESI分析では求める元素のエネルギー損失電子画像と近傍のバックグラウンド画像の複数画像演算処理により定量性のある元素マッピング像が得られる。イメージングプレートはセンサー面積が大きく、高い感度と高い分解能により、たとえば金属蛋白質であるフェリチン中の炭素と鉄の元素マッピング解析に有効で

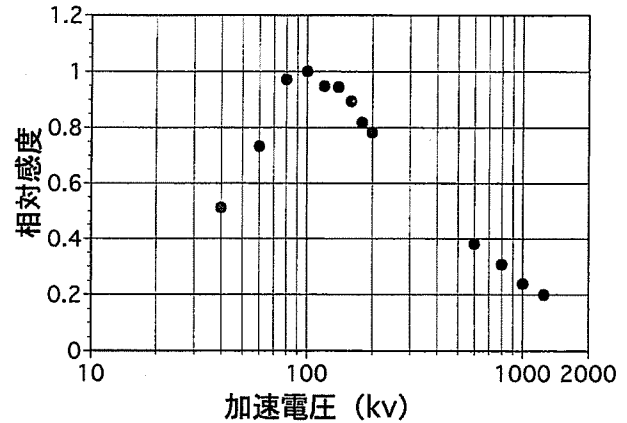


図10 透過型電子顕微鏡用イメージングプレートの電子線エネルギー応答特性  
100 kV 時の感度を1としている。イメージングプレートの感度は常用される100 kV 付近で最適化されている<sup>17)</sup>。

あった<sup>18)</sup>。

#### 6.5 中性子イメージング

イメージングプレートは中性子には感じないので、中性子を荷電粒子に変換するLi, B, Gd等の元素によるコンバータが必要となる。Gdにより変換された主として約70 keVの内部転換電子を利用する中性子用イメージングプレートはすでに1985年に報告されていたが<sup>19)</sup>、実用化されたのは12年後のことである。

蛋白質の主要な構成元素である水素の位置を正確に知ることは、蛋白質の特性を知る上で本質的に重要である。X線では困難であったこの課題は水素との相互作用の強い中性子線回折で可能になる。中性子用イメージングプレートにより、従来の写真フィルム法よりも高感度で定量精度が向上し、水素原子の精密な位置決定の可能が出てきた<sup>20)</sup>。

また高感度特性を利用すると、原子炉に代りアイソトープ(<sup>252</sup>Cf)を用いるポータブルな低出力中性子線源や小型サイクロトロンの使用が可能になる。たとえば固体ロケットエンジンの推進火薬の非破壊検査のように、重金属の容器中に存在する有機物などの検出を可能にする中性子イメージングは他に代えられない手法であ

り、中性子による非破壊検査への応用が拡大する可能性を持っている。

中性子の発生する環境は、通常、 $\gamma$ 線の発生場でもあるため、 $\gamma$ 線によるノイズを常に考慮する必要がある。この問題については、Gd化合物を用いる直接法に代り Dy 化合物を用いる間接法も検討されている。すなわち露光後、イメージングプレートに消去光を照射する。これにより $\gamma$ 線による情報は消去される。次に遮光してこのイメージングプレートを一定時間放置する。この方法により、放射化された $^{165}\text{Dy}$ から発生する $\beta$ 線（半減期 2.33 h）のみによる画像化が可能になる。輝尽性蛍光体と放射化する Dy との組合せの妙と言えよう。

#### 6.6 紫外線イメージング

イメージングプレートは紫外線に対しても高い感度を持つ。この目的に対しては表面保護層のないイメージングプレートが適している。UVSOR を用いて測定した真空紫外光に対する感度は、光子エネルギーが増加するにつれて指数関数的に増加し、ある値以上で飽和し始める。その飽和光子数は照射する光子エネルギーに大きく依存していること、パルス光の方が飽和閾値が高いことがわかった。紫外線感度特性を応用して、ArF エキシマレーザーのビームプロファイルが測定されている<sup>21)</sup>。

#### 6.7 イオン/ポジトロンイメージング

電界イオン顕微鏡において、イメージングプレートを用いることにより、タングステンの原子一個一個を定量的に評価できる He イオンによる鮮明なイメージングが可能であった。応答は広いダイナミックレンジと良好な直線性を持ち、Ne イオンによる輝尽発光量は He イオンに比べ約 2 桁低いことなどが判明している<sup>22)</sup>。

イメージングプレートを用いてポジトロン（陽電子）検出の試みも行われるようになり、陽電子に対しても高い感度と広いダイナミックレンジを有していることがわかった<sup>23)</sup>。陽電子

顕微鏡など、ポジトロンを利用した新分野のイメージング研究などが期待されている。

#### 6.8 産業分野

イメージングプレートは写真フィルムに代って、金属、セラミクス、プラスチック、複合材料などの構造材、部品、橋梁等構造物などの X 線、 $\gamma$ 線による非破壊検査分野にも広く使われるようになった。

大きな構造材の非破壊検査の場合、用いられる放射線は高エネルギーの X 線や $\gamma$ 線であり、通常のイメージングプレートでは吸収率が低くなるため、金属箔増感スクリーンとの併用が試みられている。高エネルギー放射線に対応する特殊なイメージングプレートの開発も必要となるであろう。

また半導体産業においては、Si ウェハ素材およびプロセス後の結晶性評価に対して、イメージングプレートによる X 線トポグラフィ検査が行われ、効果を上げている。

半導体プロセスで多用されているプラズマ処理装置において、プラズマ分布の均一性は半導体生産の歩留まりに大きく影響を及ぼす。イメージングプレートはこのプラズマ分布を効率的に精度よく二次元検出できる可能性を持ち、新たな計測方法としてその実用化が期待される。

#### おわりに

イメージングプレートシステムの課題はさらなる高画質化・高感度化・高速化、そして他の機能とのハイブリッド化による新しい機能の創出であろう。また輝尽性蛍光体の微粒子化・高感度化と同時に、フェーディング特性や消去特性の改良も重要課題であり、輝尽発光メカニズムの解明がその鍵を握るであろう。

イメージングプレートはよく知られた固体結晶中の F センターを初めて画像応用に実用化したと言う意味で、固体物理学上から見ても興味深い例である。イメージングプレートから始

まった輝尽発光現象の実用化は、硫化物系やアルカリハライド系輝尽性蛍光体、あるいはガラス系への展開など、その材料研究も進展している。この分野のさらなる発展を期待したい。

### 文 献

- 1) 吉本千禎：化学と工業, **38**, 406 (1985)
  - 2) Curtis, C. G., Cross, S. A. M., McCulloch, R. J. and Powell, G. M.: "Whole-body Autoradiography", Academic Press (1981)
  - 3) James, T. H.: "The Theory of the Photographic Process 4th ed.", Macmillan Publishing (1977)
  - 4) 泉二奈緒美, 葉山恵美子, 羽鳥泰彦, 穴戸 亮, 重松昭世：薬物動態, **3**, (2), 181-189 (1988)
  - 5) Sonoda, M., Takano, M., Miyahara, J. and Kato, H.: *Radiology*, **148**, 833 (1983)
  - 6) Iwabuchi, Y., Mori, N., Takahashi, K., Matsuda, T. and Sionoya, S.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 178 (1994)
  - 7) Lundh, A.: *Photo. Sci. Eng.*, **18**, 517 (1975)
  - 8) 阿部史朗：保健物理, **17**, 169-193 (1982)
  - 9) Mori, C., Suzuki, T., Koido, S., Uritani, A., Miyahara, H., Yanagida, K., Wu, Y., Nishizawa, K., Yoshida, M., Takahashi, F. and Miyahara, J.: *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **206**, 263-267 (1996); 森 千鶴夫, 小井戸伸吾, 鈴木智博, 宮原諄二, 高橋健治： *Radioisotopes*, **44**, 433-439 (1995)
  - 10) 重松昭世：薬物・精神・行動, **12**, 177 (1992); Nakajima, E.: *Radioisotopes*, **42**, 228 (1993); 森 啓司, 浜岡 勤：蛋白質・核酸・酵素, **39**, 1877 (1994); 中島栄一, 河合賢司, 古田嘉壮：放射線, **23**, 103-123 (1997)
  - 11) 床次正安：鉱物学雑誌, **23**, 151 (1994)
  - 12) 宮原諄二：第5回 RLG 研究会 (1993.3.5) 要旨集
  - 13) 宮原諄二：固体物理, **21**, 172-180 (1986)
  - 14) 宮原諄二：現代化学, No. 223, 29-36 (1989)
  - 15) 村岡久志, 柴部禎巳, 野崎 正, 奥村勝弥：表面科学, **14**, 28813-1 (1993)
  - 16) 雨宮慶幸, 大隅一政, 竹村謙一, 村上洋一, 川田 肇：固体物理, **29**, 789 (1994); 坂部貴和子, 坂部知平：バイオサイエンスとインダストリー, **51**, 730 (1993); 田代孝二：マックサイエンス技報, **17**, 32 (1994); Fujii, N. and Kozaki, S.: *Advances in X-Ray Analysis*, **36**, 505 (1993)
  - 17) 小倉信彦, 山田俊男：電子顕微鏡, **30**, 66 (1995); Taniyama, A., Shindo, D. and Oikawa, T.: *J. Electron Microsc.*, **46**, 303-310 (1997)
  - 18) 八瀬清志, 堀内 伸, 山本和弘, 花田 剛, 矢口 晶, 二重作 豊, 山田俊男, 山平尚広：電子顕微鏡, **33**, 94 (1996)
  - 19) 宮原諄二, 森 信文, 高木郁夫：「第7回中性子ラジオグラフィ短期研究会報告」, p. 109 (京都大学原子炉実験所 1985年8月21日)
  - 20) Niimura, N., Karasawa, Y., Tanaka, I., Miyahara, J., akahashi, K., Saito, H., Koizumi, S. and Hidaka, M.: *Nucl. Instr. Meth.*, **A349**, 521 (1994); 新村信雄： *Radioisotopes*, **44**, 449 (1995); Takahashi, K., Tazaki, S., Miyahara, J., Kurasawa, Y. and Niimura, N.: *Nucl. Instr. Meth.*, **A377**, 119-122 (1996)
  - 21) 黒沢 宏, 甲藤正人, 滝川靖雄, 佐々木 亘：レーザー研究, **22**, 734 (1994)
  - 22) Nishikawa, O., Kimoto, M., Fukui, K., Yanagisawa, H., Takai, M., Akimoto, T. and Tsuchiya, T.: *Surface Sci.*, **323**, 288 (1995)
  - 23) Doyama, M., Takano, J., Inoue, M., Yoshiie, T., Hayashi, Y., Kiritani, M. and Oikawa, T.: *Nucl. Instr. Meth.* **A394**, 146-150 (1997)
- 注) イメージングプレートを含む輝尽発光の特性および応用に関して次のまとまった特集号がある。  
 応用物理学会放射線分科会：輝尽発光 (PSL) と放射線計測の新展望—メカニズムと新しい応用—, 放射線, **23**, (2), Apr. 1997