《特集：イメージングプレートの放射線管理への応用》

イメージングプレートの開発

なぜ、どのように開発されたか

宮 原 諄 二^{*1}

Development of Imaging Plate

Junji MIYAHARA^{*1}

はじめに

イメージングプレートとは

イメージングプレートとは輝尽性蛍光体が塗布されたフィルム状の放射線画像センサーである。これを用いたデジタル放射線イメージングシステムは医療におけるX線画像診断システムをはじめ、科学と工業における放射線画像計測解析システムとして、日本ばかりでなく世界各国で広範囲に用いられている。

これらのシステムは従来の方法に比べ高感度で低雑音、広いダイナミックレンジと良好な直線性、広い有感面積と高い分解能、高い計数効率、コンピューターとの結合が容易、写真フィルムと異なりくり返し使用可能などの特徴を持つ。

イメージングプレートは輝尽発光 (Photo Stimulated Luminescence) 現象を世界で初めて実用化した事例であり、また結晶欠陥のFセンターを実用化した初めての事例でもある。

画像の作り方

放射線露光されたイメージングプレートは画像読み取り装置によりその表面をレーザーで走査 (励起) される。放射線強度に比例して発生した輝尽発光は光電子増倍管に集められ、デジタル電気信号に変換される。この信号を再構成し、目的とする情報処理を行った後、CRTある

いは画像プリンターにより放射線画像を出力する。残存していた放射線情報は可視光により消去され、イメージングプレートはくり返し使用される。

輝尽発光メカニズム

【放射線情報の記録】(励起過程)

イメージングプレートには $\text{BaFX} : \text{Eu}^{2+}$ ($\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) 系輝尽性蛍光体が使用されている。この結晶に放射線が照射されると、結晶中に電子と正孔が発生する。電子は結晶中のXイオン (実用系では主として $\text{X} = \text{Br}$) 空孔に捕獲されFセンター (着色中心) を形成する。正孔は結晶中の発光センターの Eu^{2+} イオンに捕獲されて Eu^{3+} となる。

【放射線情報の読み出し】(輝尽励起過程)

Fセンターに吸収される赤い光 (例えば He-Ne レーザ) により電子は伝導帯に解放され、 Eu^{3+} に捕獲されていた正孔と再結合する。そのエネルギーにより発光センターの Eu^{2+} が励起され、基底状態に戻るときに青い (400 nm) の輝尽発光現象が生ずる。

短い開発史

本開発の発端から発売までの概略は下記のとおりである。

- ・1971 年 長期研究計画構想
- ・1975 年 研究プロジェクト スタート
- ・1979 年 開発プロジェクト スタート
- ・1981 年 市場テスト開始
- ・1983 年 医療用 X 線画像診断システム発売
- ・1987 年 理化学分野画像解析システム発売

本稿はなぜこのような開発が行われたのか、どのよう

^{*1} 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 (〒186-8603)
Institute of Innovation Research, Hitotsubashi University ; 2-1, Naka, Kunitachi 186-8603, Japan.

にして行われたのか、どのような意味を持っていたのか、イメージングプレートの開発初期を中心にして述べる。

1 時代の背景

多くのモダリティの出現

過去、医療画像診断はレントゲン写真法が唯一の手段であった。1970年代から1980年代にかけて、この分野には新しいモダリティが続々と登場した。X線CT、核医学イメージング、MRI（核磁気共鳴イメージング）、超音波イメージングなどである。レントゲン写真システムはエレクトロニクス化されない唯一のモダリティとして取り残されていった。

レントゲン写真を越えるものはなかった

しかし現在でもレントゲン写真システムは医療画像診断分野において、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) 100年の歴史の中で無数の症例と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できて上がっている。
- 2) レントゲン写真システムは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。
- 3) レントゲン写真の画像情報量は数MBあり、これを解決する技術的手段が見つからなかった。

新たな挑戦が開始された

しかしながら従来のレントゲン写真に代わり、1) 被爆量が低減でき、コンピューターと結合することにより 2) 画像診断の質的向上と 3) 診断業務の効率化などを目指す新しいデジタルX線イメージングシステムのニーズは高まり、1970年代から1980年代にかけて新しいシステム開発競争が始まった。参加したのはベンチャーと異分野のアメリカ企業5社、日本企業1社であった。世界の、そして日本の巨大な放射線機器メーカーはこの開発競争を傍観した。

2 イメージングプレートの開発

2.1 きっかけ

将来への夢

1971年当時、富士フィルムのレントゲンフィルム研究部門において、X線像を何らかの方法で電気信号化し、画像情報処理の後に画像再生するシステムが構想されていた。しかしそれを可能にする技術的な具体論がなかった。現実の研究開発の現場では、レントゲンフィルムの

感度と画質のバランスは限界に近づき、何をやっても技術の壁を大きく越えられない技術の飽和感が存在していた。研究陣は革新的なシステムを開発したいとの機運にあった。また日本自体が市場追随型から、技術や市場を創造していこうとするパラダイム転換が期待されていた時代でもあった。

経営の危機感

この状況の中で、銀価格が30倍以上高騰する「銀ショック」が写真フィルム会社を襲った。レントゲンフィルムは最も銀を使う。事業そのものが成立しなくなる危機感が生じた。銀を使わない新しい概念のレントゲン写真システム開発が経営の緊急課題となったのである。

2.2 システムのデザイン

基本コンセプト

目指すシステムの基本コンセプトは「従来の病院におけるレントゲン写真撮影から画像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」であった。他の競合システムにはこのコンセプトはなかった。この要件は後に新システムの市場導入障壁を低くする決定的な要因になったのである。

センサーの条件

システムを実現する放射線画像センサーは次の3つの条件が必須であった。

- 1) センサーのサイズ：X線は縮小光学系が使えない。従って少なくとも人の胸サイズ（半切サイズ 35×45 cm）である必要があった。
- 2) メモリー機能：撮影の瞬間（1/10～1/1000 秒）に情報を取り出し、画像処理を行うことは技術的には不可能である。センサー自体にメモリー機能を持たせ、撮影後に画像を読み出す必要があった。
- 3) 高速応答：病院の撮影・診断業務を妨げないため、画像情報をセンサーから1分以内に取り出す必要があった。

予備実験

センサーの具体的手段として、X線イメージインテンシファイヤー、X線TV、PC-EL（光導電体/電場発光体の積層構造）、熱ルミネセンス（TL）、SSD（固体検出器）、PSPC（位置感受性比例計数管）、MCP（マルチチャンネルプレート）、イオノグラフィなど多くの候補を調査し、実験した。しかし条件を満たす画像センサーは存在していなかった。

最終的な結論は熱ルミネセンス（TL）の機能を持ち、高速化・高密度化を可能にする光で読み出しが可能な材料であった。つまり輝尽発光（Photo-Stimulated Luminescence；PSL）現象を原理とする実用材料の発見が開

発の成功の鍵を握ることがわかった。

プロジェクトのスタート

1975年に3年間の限定プロジェクト（最初は実質4人）がスタートした。目的は下記技術の原理確認である。

- 1) 目的とする【放射線画像センサー】は現実にあるのか。
- 2) その放射線画像センサーから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】は可能なのか。
- 3) 画像診断能が向上し、実時間処理が可能な【画像診断アルゴリズム】は可能なのか。

2.3 輝尽発光現象とは

蛍光体は現代文明を支える

蛍光体は、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 線増感スクリーン等に広く使われて、現代文明を支えるキーマテリアルと言って良い。この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。

輝尽性蛍光体とは

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、輝尽発光とは光や放射線などの最初の刺激を終了した後に、発光波長よりも長波長の第二の刺激によって最初の刺激の強さに応じた蛍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。輝尽性蛍光体は P. LENARD を中心に ZnS や SrS などの硫化物系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 NaI や CsI などのアルカリハライド系の輝尽性蛍光体についても1920～30年代に研究が行われた。しかしながら近年になって輝尽発光に関する研究やこの現象を利用したシステム開発は行われていなかった。手を尽くして調査しても、利用できる情報はなかった。

2.4 どのように探すか

必要な発光特性とは

- 1) 輝尽励起波長は赤領域にあること：
当時、半導体レーザーはなく、使用可能な唯一の安定な実用レーザーは He-Ne レーザ（波長 633 nm）であった。
- 2) 発光波長は青領域にあること：
最も高感度でノイズが低い光検出器は光電子増倍管である。その検出量子感度は青領域で最も高い。さ

らに赤の励起と青の発光は充分に分離していて、発光のみを効率よく検出することができる。

3) 発光応答速度はマイクロ秒以下：

半切サイズからすべての画像情報を1分以内に読み出すためには、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。

材料の基本デザイン

材料の基本デザインを【母体結晶＋発光センター】系に絞った。母体結晶は重金属を主要元素とし、化学的安定性が良く、蛍光体適性を持つ結晶が必要であった。発光センターは母体の結晶場に影響されにくい希土類元素を候補とした。

ドグマ：捨てられたものの中にある

実用蛍光体は励起した時のみに光る。輝尽性蛍光体は励起した時には光らず、情報を蓄えていて欲しい。前者は「きれいな結晶」であり、後者は「きたない結晶」のはずであった。目指す輝尽性蛍光体の候補は実用蛍光体の開発の中で捨てられていった材料の中にあるはずであった。しかしそのような捨てられた材料は当然ながら公表されてはいなかった。

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。最初に極微弱な輝尽発光を検出するための独自の測定評価装置に着手した。この装置は、目的とする発光特性に合った材料を効率的に選択する本来の機能の他に、将来の実用システムのスペックを前もって知る重要な意味を持っていた。

加えて、独自の評価装置が独自の発見を生むものである。さらに材料が見つからない可能性もあった。発見できなくても評価測定技術は成果として残り、メンバーも他部門に喜んで引き取ってもらえとの読みもあった。

取っ掛かり

熱ルミネセンス (TL) 蛍光体は放射線分野では熱蛍光線量計として広く使われていた。現象的には TL も輝尽発光も励起された電子や正孔を捕捉するトラップ現象である。まず「TL で知見を得て、輝尽性蛍光体の探索仮説を構築しよう」と考えた。

TL について多くの実験を行った。しかしながら TL から求めた知見は輝尽発光に適用できないことが分かり、探索は振り出しに戻った。

2.5 探索、そして BaFBr : Eu²⁺ の発見

実験から仮説へ、そして検証へ

母体結晶として重金属元素をにらみながら硫化物・酸化物・磷酸塩・ハロゲン化合物・・・など、文献や周期律表を眺めて組み合わせる。データを蓄積し、実験仮説を作っていく。発光センターはその発光波長と応答速度から

希土類元素の Ce^{+3} か Eu^{+2} に絞られてきた。

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、実用蛍光体を見直すことになった。かつて X 線蛍光スクリーンに用いられていた $\text{BaFCl}:\text{Eu}^{2+}$ がそれまでの材料とは一味違う筋の良い輝尽発光を示した。

探索というもの

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。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。

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。仮説を作り直して、最初に戻るサイクルを繰り返す。そして許される納期まで続く。

蛍の光の話

「発光効率がきわめて高い蛍の発光スペクトルを測って“Nature”誌に投稿しよう」とのミニミニプロジェクトが酒の勢いで発足したのは探索の初期の頃であった。蛍を捕らえ、飼育し、暗闇で制止させて、苦勞して測ったスペクトルは緑領域に極大をもつスペクトルであった。蛍も太陽の下で生き抜いていく以上、考えてみれば至極当然であった。だがすでに多くの文献があった。投稿は断念した。

後年、イメージングプレートによる放射線画像解析法がバイオサイエンス分野において革新的手法であることが知られるようになり、“Nature”誌から論文依頼が直接に舞い込んだ。そして初期の目的通り 1988 年に“Nature”誌に論文が掲載されたのであった。

被写体の話

目標とする材料特性レベルと現状とのギャップを常にチェックして開発を進めた。そのためには人体を実際に撮影し、感度と画質の評価が必要になる。だが開発途上では感度が低すぎた。最初はブリを撮影し、次にウサギを飼い被写体として使った。最終段階に至って、人体の撮影がどうやら可能になった。放射線量は通常の 10 倍、画像の読み取りと画像処理に 1 昼夜もかかった。

鉱山（やま）探しの話

イメージングプレートがほぼ完成に近づいた頃、画像上に発生する黒いスポットに気が付いた。考えられる原因は環境放射線、あるいは Ba 中に含まれる極微量の放射性同位元素である。環境放射線ならば不可避である。不純物ならば高度な精製技術を開発するか、純度の高い Ba 鉱山を探すか選択に迫られた。ノイズを下げる重要な陰の技術の開発が始まった。

このような問題が明確になったのは、日本で最も放射能の少ない場所（箱根山の東側地域）で開発をしていた

ことが幸いした。他の地域では不純物よりも環境放射線による影響の方が大きいことが後になって判明した。

相手を知る

類似の開発は他でもやっているはずである。競争企業の有力な研究者を徹底的にマークした。大学では何を学び、その企業では何をやって、彼の評価はどうか、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…。こうしていくと彼が、そしてその企業が何を考え、何をしようとしているかが読めるようになった。

Cl をとるか、Br をとるか

きらりと光る片鱗を見せた $\text{BaFCl}:\text{Eu}^{2+}$ を改良し、Cl を Br に置き換えた $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+}$ はさらに望ましい輝尽発光特性をもっていた。しかし $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+}$ は水に溶けやすく、潮解性が大きく、化学的安定性がないとして過去に捨てられたものであった。作りやすく化学的安定性の高い $\text{BaFCl}:\text{Eu}^{2+}$ 材料で発光特性を向上させるか、それとも発光特性の良い $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+}$ で本質的な化学的安定性を改良するか、決断を迫られた。最終的に後者の Br を選択した。

最初のドグマは正しかった

実験を進めると、 $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+}$ を湿度の高い空気中に放置しても発光特性は変化しないことが分かってきた。化学的安定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化学量論的なずれによって生ずるものであった。過去の報告は間違っていた。捨てられていった材料の中に目的の材料はあるはずだとの最初のドグマはやはり正しかった。

遠回りした道

最後に採用した「ある物質」はその分野の人達には身近でよく知られた材料であった。しかし誰もその材料の中にすばらしい輝尽発光特性が秘められているとは知らなかった。古い材料に新しい血を入れた温故知新の好例と思う。

この探索では開発の納期が物質を決めた。しかしこれに代わる物質を多くの人が 20 年近くかけて探しているが、まだ見つかっていない。不思議な縁（えにし）を感じる。

2.6 商品化への道

3 年間限定の研究プロジェクトにより【放射線画像センサー】、【画像読み取りシステム】と【画像診断アルゴリズム】の原理的可能性が確認され、1979 年に商品化プロジェクトがスタートした。

「ある物質」の発見にはエネルギーはそれほど使わない。人と時間と金が最も掛かるのは商品として開発する

プロセスである。このプロセスではそれ以前の探索プロセスと異なり、確実に作り上げることが求められる。生産技術、製造技術、商品化技術などをゼロベースで作出し、体制・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。ここにまた開発の醍醐味がある。

この4年間の商品開発プロジェクトにより、1) 上述のイメージングプレート、2) フラットベッド型画像スキャナー、3) 医療画像診断ソフトウェア、4) ユーザー指向システム技術の新たな4つの技術が創出された。1983年に医療用X線画像診断システム、1987年に理化学分野画像解析システムが発売されるに至った。

3 おわりに

開発の内なる意義

- 1) 本業であるレントゲン写真フィルム事業の否定技術を他社よりも先行構築でき、時代の変革の流れの中で技術の安全保障を確立できた。
- 2) デジタルイメージング技術を獲得したことに加え、本業の化学材料系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、単なる感光材料メーカーから総合的なイメージシステムメーカーへの脱皮、さらには新たな事業への進出の可能性を生んだ。

なぜうまくいったか

- 1) この開発の特徴は、技術的には誰もが注目していなかった輝尽発光現象という忘れ去られた原理を用いたこと、また社内的には研究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が低くなっていたこと、そして競合相手の放射線機器メーカーは異業種の写真会社がデジタル放射線イメージング機器まで商品化するとは予想していなかったこと等があろう。すなわち技術的にも、社内的にも、他社からも注目されない開発であった。これは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ベーター環境を作ることになった。

- 2) この開発のメンバーはその技術領域では素人であって、かえって非常識な試みが可能であった。たと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光学スキャナーの実現などである。
- 3) 周辺の技術が急速に進歩し、“技術の空中ブランコ”(柳田邦男)ができたことも大きい。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、これらの技術をタイミング良く利用することができた。
- 4) 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花開きつつあり、システム自体のコンセプトが社会のそして社内の時代の流れに合っていた。

最後に、この開発では運の良さ、縁(えにし)に加え、研究メンバーを社内あるいは社外の荒波から守り、リーダーシップをとった“黒幕”の存在が非常に大きかった。