

「検出器シリーズ」を振り返って

田中義人 独立行政法人理化学研究所 播磨研究所・放射光科学総合研究センター
E-mail: yotanaka@riken.jp

岸本俊二 高エネルギー加速器機構・物質構造科学研究所
E-mail: syunji.kishimoto@kek.jp

1. はじめに

放射光学会誌では、第21巻2号(2008年3月発行)に始まり前号まで、合計12回にわたり、特別企画「検出器シリーズ」として用途別に検出器について解説を連載してきました(Table)。放射光実験分野において、その光源性能や実験手法に適した検出器を選定して、正しく使用することはたいへん重要です。この観点から、本企画では著者の方々に、何を知りたいときに、どんな動作原理の検出器を、どのように使用して、どんなデータが得られるのかと

いうことを強く意識した執筆をお願いしました。それ故、著者の方々にはずいぶんご負担をお掛けしたケースもあったと存じます。また、現在開発が進められている最新の検出器状況についても、紙面の関係で詳細とまではいきませんでした。なるべく触れて頂きました。放射光分野では、X線自由電子レーザーなど、より高性能の光源開発が進められています。これらに対応できる検出器が必要なことは言うまでもありません。新しい検出器を要求する際にも現存の検出器について良く知り、そして適切に利用しているかを確認、何が本当に必要なかを考える際にも、本企画がその一助になればと思います。

さて、本シリーズでは用途別に検出器を紹介してきましたが、一つの用途に対しても複数回設定したものもあり、各回で原則2種類の検出器を取り上げました。これらの検出器を比較する際に、その検出器の性能として、感度、ダイナミックレンジ、空間・時間・エネルギー分解能などの言葉が登場しました。これらのパラメータについて、第2章で簡単に整理してみることにします。一つのパラメータについてもいろいろな評価方法があることなどの理解のもと、これらの用語を利用することによって、検出器についてのコミュニケーションが少しでもよりスムーズになればというのが目的です。また、用語をイメージしやすくするために、これまで登場してきた検出器の典型的な数値も掲載したいと思います。もちろん、検出器の性能は、これらのパラメータだけで選択できるものではなく、その形や使い勝手など、様々な要素があって、トータルで選択されるものですので、あくまでも例示させていただく程度にとどめます。

また、本シリーズでは、質問を受け付けてきました。回答は、本シリーズの執筆者に作成してもらいました。その中で、特に参考になると思われるものについての質問、回答を第3章に掲載します。

2. 検出器の特性を現すパラメータ

本シリーズに頻出した検出器の特性を現す用語として、感度(検出効率)、ダイナミックレンジ、計数率、空間分

Table

| 回 | タイトル | 著者(敬称略) |
|----|--|--|
| 1 | 光の強度を測る I (電離箱とフィルム) | 成山展照(JASRI) |
| 2 | 光の強度を測る II (シリコンフォトダイオード) | 加藤昌弘(産総研) 齋藤則生(産総研) |
| 3 | エネルギーを測る I (半導体検出器) | 伊藤真義(JASRI) 谷田肇(JASRI) |
| 4 | エネルギーを測る II (極低温検出器) | 浮辺雅宏(産総研) 大久保雅隆(産総研) 北島義典(KEK) |
| 5 | 光の数を測る (APD 検出器とシンチレーション 検出器) | 岸本俊二(KEK) |
| 6 | タイミングを測る I (MCP 検出器) | 足立純一(KEK) 彦坂泰正(分子研) |
| 7 | タイミングを測る II (ストリークカメラと高速フォト ダイオード) | 田中義人(理研) 足立伸一(KEK) |
| 8 | イメージを写す I (CCD 検出器) | 上杉健太郎(JASRI) 竹内晃久(JASRI) 星野真人(JASRI) |
| 9 | イメージを写す II (イメージングプレート) | 山本雅貴(理研) |
| 10 | イメージを写す III (最新の2次元検出器) | 豊川秀訓(JASRI) 兵藤一行(KEK) |
| 11 | 信号を処理する I (アナログ回路系) | 工藤統吾(JASRI) |
| 12 | 信号を処理する II (デジタル回路系) | 田中真伸(KEK) |

解能, エネルギー分解能, 時間分解能を取り上げ, これらによって表される性能について簡単に整理してみます。詳細については, カッコに書いてある「検出器シリーズ」の回数に該当する記事をご覧ください。

2.1 感度, 検出効率など

光のパワーを $P(W)$, 検出電流値を $I(A)$ としたときの感度 $r(A/W)$ は $I(A)/P(W)$ で与えられ, シリコンフォトダイオードの場合は, $0.27 A/W@3.0 keV$ (第2回) です。イオンチェンバー(電離箱)の場合は, 透過型であるが故, $10^{-4} A/W$ 程度@ $20 keV$ (第1回) になります。計数型検出器の場合は感度を, 出力パルス数と検出器に入射した放射線の数の比によって(固有)検出効率として表します。

また, DQE が用いられることもあります。これは, 入力側の S/N と出力側の S/N の二乗の比, $(S_0/N_0)^2/(S_i/N_i)^2$ で表されます。フラットパネルで $0.5-0.8$ 程度のものがあり, IP では 0.9 近い値が示されています(第9回, 第10回)。

2.2 ダイナミックレンジ, 計数率など

ダイナミックレンジとは, 識別可能な信号の最小値と最大値の比率のことです。積分型の場合, CCD カメラでは数千程度です(第8回)。IP はこのダイナミックレンジに優れ, 最大6桁程度です(第9回)。

計数型のダイナミックレンジは一定時間あたりの計数率で比較します。例えば, Si-APD だと, 検出効率 $76\%@16.5 keV$ で, $1 s^{-1}$ から $10^9 s^{-1}$ を超える強度まで測定可能です(第5回)。また, 2次元検出器でも, カウンティング型ピクセルアレイ検出器で $10^6 s^{-1}$ の計数率で積算することができます(第10回)。計数型検出器が識別可能な強度比: ダイナミックレンジは, 積分型とくらべると1光子を区別できるために弱い方へ広げやすいという特徴があります。しかし, 強い方は計数率による制限がかかり飽和・麻痺しますので, 計測時間をのばしても無制限ではありません。

2.3 空間分解能

変調伝達関数(MTF)等で評価されています。X線CCDカメラでは, 数ミクロンのものがあります(第8回)。IPでは, $100-150 \mu m$ 程度となっています(第9回)。これらの評価には, Point spread function, Line spread function が用いられ, 比較されます。

2.4 エネルギー分解能

エネルギースペクトル信号のピークの半値全幅で定義されます(第3回)。HPGe-SSD で $\Delta E < 0.5 keV@20 keV$ です。極低温検出器(熱平衡型)では, $1-2 eV@0.1-2 keV$ (第4回) となります。

2.5 時間分解能

極短パルス放射光に対し, その持続時間が短く検出できればできるほど, 放射光の時間構造が正確にわかることとなります。一方, タイミング精度は, 立ち上がり時間, 立ち下がり時間で決まります。パルス持続時間幅で比較すると, ストリークカメラが最速で, 半値全幅が $1 ps$ 以下@ $2 keV$ です(第7回)。MCPには立ち上がりがサブナノ秒のものがあり, $100 ps$ -数百 ps でのタイミング測定が可能です(第6回)。また, ショットキー型フォトディテクタでは, 立ち上がりおよび立ち下がりの応答時間が $30-40 ps$ のものがあります。

3. まだまだ知りたい検出器のこと

これまでに編集委員等にお送りいただいたご質問について, 検出器シリーズ執筆担当者より回答してもらいました。主なものを Q&A の形で, 以下に列挙させていただきます。() は主回答者のイニシャルです。

Q1 リナグラフに代わるお薦めの簡便なシート状検出器はありますか?

A1 第一回で取り上げたガフクロミックフィルム(HD-810)が良いでしょう。およその位置で良ければ, より安価な蓄光テープ(ルミノール等)もお薦めです。照射後もしばらくはほのかに光っています。(NN)

Q2 ポラロイドフィルムに代わるお薦め検出器は?

A2 高感度な受動型2次元検出器としては, 他にガフクロミックフィルム(EBT)やイメージングプレートがあります。イメージングプレートはずっと高感度ですが, EBTは直接, イメージを視認できる利点があります。(NN)

Q3 シンチレーションカウンタやイオンチェンバーの配線について, よくBNCのケーブルを使っていますが, ターミネータを入れないと問題あるのでしょうか?

A3 イオンチェンバーなどの電流出力検出器は, 多くの場合, 電流アンプやピコアンプにつなぎます。これらの入力段は第11回で紹介した電流アンプとなっています。この入力にターミネータを入れると, 信号とグランドの間に電流の通路が付け加わるので, 電流の測定値が不正確になります。したがってターミネータはつけないほうがよいでしょう。一方, 多くのAD変換ボードやデジタルボルトメータの入力インピーダンスは $1 M\Omega$ など高い値に設定されています。高い入力インピーダンスの装置につないだケーブルをT分岐などで分けた先がブラブラしていたりすると, アンテナになります。アンテナはノイズを拾いますので, はずしておくべきです。入力インピーダンスの高い装置はノイズをひろいやすいので, ターミネータを

つけて入力インピーダンスを下げるとノイズに強くなります。しかし、どんな場合でもターミネータをつければよいというわけでもありません。第11回の本文中にインピーダンス整合について述べていますので参考してください。(TK)

Q4 シンチレーションカウンタの出力信号をオシロで見ると、検出器によって信号の形状が違います。また、アンプ、ケーブル、検出器本体全部を新品でそろえると単色X線を入れた際に比較的同じ高さの信号が出るのですが、ビームラインで長年使用されてきたシンチレーションカウンタは単色X線を入れてもかなりピーク高さがばらつきます。原因や対策を教えてください。

A4 シンチレーション検出器では電荷増幅器内蔵型と光電子増倍管(PMT)の出力を直接取り出すものがあります。たとえば、前者は50 μ sの時定数で減衰する比較的遅いパルス、後者は幅が数10 nsの速いパルスを出力するものです。信号の極性も変わります。放射光実験で使われるとき、誤ってX線ビームを検出器に直接入射してしまい出力パルス波高を低下させることがあるようです。たいていはPMT光電面の損傷が原因です。PMT交換が可能なら、それをお勧めします。(SK)

Q5 シンチレーションカウンタなどの配線ですが、アンプを通した後、BNCをT字で分岐してオシロに入れたりレートメーターに入れたりしています。必要以上に分岐させてしまって問題が起こったりしないでしょうか？(信号が減衰して読めなくなるとか、跳ね返ってカウント数が違って見えるとか)

A5 T字で分岐させるとケーブルの特性インピーダンスが正しくなくなり、反射が起きます。反射が起きると計数が異常になることがあります。シンチレーションカウンタなどの信号は高速パルスなので、Tで分岐させるべきではありません。波形を確認したい場合は、差し替えて行います。そのときオシロスコープの入力インピーダンスをレートメーターの入力インピーダンスと同じ値にして観測します。周波数帯域の低い(直流的)信号では、T分岐を使うことは大きな問題とはなりません。しかし、たくさんの分岐をさせると、信号は減衰します。特に入力インピーダンスが低い装置をT分岐でつなぐ場合は要注意です。信号が減衰していないかチェックしなくてはなりません。インピーダンスと信号の減衰についても第11回本文を参考にしてください。(TK)

Q6 検出器によってバイアス電圧がプラスとマイナスものがありますが、その極性によって特性の違いがでるのでしょうか？統一できないものなのでしょうか？

A6 検出器の原理が違うので極性を統一することはできません。また、たとえば半導体検出器を例にとりますと、

バイアスは必ずダイオードに対して逆バイアスになっています。バイアス電圧の極性は、ダイオードのアノード、カソードのどちらから信号を取り出しているかによって決まります。集める電荷が正孔か電子かにより時間応答にも差が現れます。(TK)

Q7 SSDが数え落しをしているかどうか、どのように調べたらいいでしょうか。

A7 例えば、適当な厚みに折ったアルミ箔をX線の光路上、試料前に入れて、入射強度を半分にしたときに、増幅器出力パルスの計数率が半分になるかを確認します。入射光強度はイオンチャンバーなど、数え落としをしないと見なせる検出器でモニターしておきます。インチャンバーの強度が半分になったときに、増幅器出力パルスの計数率が、半分より大きな値になっていると、数え落としをしていると考えられます。検出器の数え落としが大きいほど、増幅器出力パルスの計数率はアルミ箔を入れる前の値と比べ、その強度の減り具合が小さくなります。(HT)

Q8 SSD信号が数え落ししている場合、どのようにして真の計数値を求めたらいいでしょうか。

A8 具体的な計算方法について、SPring-8 BL01B1における方法を紹介します。入射光強度が1/2, 1/4, 1/10, 1/20, 1/50, 1/100程度になるように数種類の厚みのアルミ板を用意し、それぞれのアルミ板の厚みで入射光強度、ICR, SCAを記録します。(ここでICRは、C Canberra社のスペクトロスコープ・アンプ2024や2026の出力のひとつで、推定される入力計数値が得られる。SCAはシングルチャンネルアナライザーからの出力計数値を表す。)入射光強度はイオンチャンバーを用いて計測します。得られたデータを用い、横軸にイオンチャンバー強度、n, 縦軸にICR, m, をプロットすると、第3回 Fig. 10(b)の補正曲線を得ることができます。実用的にフィットする理論式として

$$m = n(1 - n\tau) \quad (1)$$

(τ : 不感時間)

を用いて、

$$n_{ICR} = a_{ICR} n_{IC} \quad (2)$$

(a_{ICR} : 比例定数; n_{IC} : イオンチャンバーの計数値)

とし、式を展開すると、

$$m_{ICR} = a_{ICR} n_{IC} - a_{ICR}^2 \tau_{ICR} \cdot n_{IC}^2 \quad (3)$$

となり、 m_{ICR} は n_{IC} の二次曲線として表せるので、補正曲線を二次式でフィッティングし、得られた係数から、 $\tau_{ICR} = -(2 \text{ 次の係数}) / (1 \text{ 次の係数})^2$ として求めることが

できます。

次に、横軸に ICR、縦軸に SCA をプロットすると、第3回 Fig. 10(a)の補正曲線を得ることができます。ICR と SCA の関係は、

$$m_{SCA} = a_{SCA} m_{ICR} (1 - m_{ICR} \tau_{SCA}) \quad (a_{SCA} : \text{比例定数}) \quad (4)$$

と表され、式を展開すると、

$$m_{SCA} = a_{SCA} m_{ICR} - a_{SCA} \tau_{SCA} \cdot m_{ICR}^2 \quad (5)$$

となり、 m_{SCA} は m_{ICR} の二次曲線として表せるので、補正曲線を二次式でフィッティングし、得られた係数から、 $t_{SCA} = -(2 \text{ 次の係数}) / (1 \text{ 次の係数})$ として求めることができます。

最後に、 $n_{SCA} = a_{SCA} n_{ICR}$ の関係より、

$$n_{SCA} = m_{SCA} (1 - m_{ICR} (\tau_{ICR} + \tau_{SCA}))^{-1} \quad (6)$$

となり、実測の ICR の値と SCA の値から、補正後の SCA の値を得ることができます。(HT)

Q9 SSD (半導体検出器) よりも、高速に計数できる検出器にはどのようなものがありますか。

A9 SSD は、エネルギー分解能を重視する目的でよく使われます。その場合、発生電荷量に比例した電圧信号を得るように電荷収集時間を設定するため、シリコンドリフト検出器 (SDD) のように速い応答を得るため電極構造を工夫したもので 10^6 s^{-1} 程度が計数率の限界です。SSD の仲間ですが有感部を薄くして十分な電界強度を生じさせ電荷収集の速さを最大限に利用するのがシリコン・アバランシェフォトダイオード (Si-APD) です。電流を増幅して高速電圧パルスに変換する回路を使用すると 10^8 s^{-1} の計数率が得られます。プラスチックシンチレータのようにナノ秒で減衰する速い発光を利用するシンチレーション検出器は 10^7 s^{-1} の計数率が得られます。

Q10 ノイズ対策やアースの取り方などに関して、放射光利用特有の問題や、そのためのコツや工夫などがあるでしょうか。また、例えば施設として専用のアース線等が用意してあるなど、何か特別に工夫されていることがあるのでしょうか。

A10 放射光施設特有といえるかは難しいところですが、多くの信号線は微小電流を取り扱います。微小電流を取り扱うときに、外来のノイズもさることながらケーブルの静電気が問題となり、これについては第11回の5.2でも述べた半導電層を持つ同軸ケーブルが効果的です。また信号の周波数帯にもよりますがツイストペアケーブルを用いた並行伝送も効果的です。このツイストペアの並行伝送の典型

的な例は、昨今たくさん使われている LAN ケーブルに見ることができます。高周波の信号に対しての同軸ケーブルの有効性については第11回本文に述べたとおりです。施設の専用アース線の例として、たとえば SPring-8 の実験ホールのアースには、実験ホール全体に埋設された巨大な一枚の金属メッシュが用いられています。これは接地抵抗が非常に低く、加速器施設特有の大電力パルスのノイズなどに強いとされています。利用実験計測装置用の電源ラインには、このアースから分配されたグラウンド線が来ています。(TK)

Q11 BNC, SHV, LEMO コネクタを用いた同軸ケーブルを新規に作製したり、コネクタ部分の修理を自前で رفتりすることがあります。指定通りの採寸、圧着工具で実施しているのですが、正常に製作出来ているか気になります。作製後の検査方法を教えてください。また、長年敷設されている同軸ケーブルの寿命、交換時期についての判断基準を教えてください。

A11 自作のケーブルが正確にできているかの検査ですが、導通チェックと、逆に芯線とシールドの絶縁を見るのが一般的です。また、圧着工具は専用のものを使います。半田型のもは、半田がもりあがるとうまく作れないことがあります。指定どおりの寸法で被覆をはがして作られていればあまり問題はありませぬ。できたケーブルはレセプタクルに差し込んで、実際に信号が伝わるかどうか調べます。また軽く引っ張って、しっかりついているか見ます。

SPring-8 で15年近く使われたケーブルでも放射線環境下などの劣悪な環境でなければ問題なく使えています。屋外に配線している同軸ケーブルは一般的に3~5年を目処に交換するのがよいとされています。しかしながら10年以上不具合なく使われている場合もあるようです。屋外では、外部被覆は紫外線や太陽熱などで見た目は劣化するようです。同じような理由で蛍光灯の直下にあるケーブルの劣化が激しい場合があります。目視でおかしいと思える劣化を見つければ交換すべきです。むしろ、放射光施設で一番問題になるのは放射線耐性ではないでしょうか。絶縁体にフッ素などが含まれているタイプは放射線に非常に弱いとされています。放射線レベルの高いところでは被服や内部絶縁体として架橋ポリエチレンがよいとされています。ただし、少し硬いので扱いにくいといわれています。(TK)

Q12 8ch 積層型 Si-APD 検出器による X 線光計数率測定のためのデータ (第5回, Vol. 21 No. 6 p322, Fig. 4) について横軸の入力レートは、8ch 積層型 Si-APD 検出器よりも高レートの計測ができていますように見えますが、入力レートの計測はどういう方法で行われたのでしょうか。より高レートの計測が可能な検出器があるのでしょうか?

A12 金属箔と X 線を全吸収する厚みのシンチレータを

搭載した NaI(Tl) 検出器を使った測定により入射光子数を換算しました。何枚かの金属箔によって 10^3 s^{-1} 程度まで入射ビームを減衰させて NaI(Tl) 検出器でビーム強度を測定します。これを基準の測定とします。金属箔の透過率は個別に測定しておきます。これら金属箔の組み合わせによって入射ビーム強度が調整できます。そのときのビーム強度は基準測定の計数値との比較、使用した金属箔すべての透過率、電離箱などのビーム強度モニターの相対強度比から求めることができます。(SK)

Q13 CCD, IP, PILATUS についてそれぞれ別々の回に詳細な説明がありました。星取表のようなもので簡単に比較して特徴をまとめていただけないでしょうか。

A13 星取表とまではいきませんが、第2章で簡単にパラメータ別に整理してみましたので、ご参照ください。

4. おわりに

本企画「検出器シリーズ」は、前編集委員長の櫻井吉晴氏のもと、岸本、田中を編集担当として開始させて頂きました。どのような分類方法で紹介するか、どの検出器を取り上げるかについては、編集委員会でも度々議論させて頂きました。もちろん、このシリーズで全ての検出器を網羅することはできませんでしたが、頻繁に使用されているもの、基礎的なもの、話題性のあるものを取り上げさせて頂けたのではと思っております。

著者の方々には、記述内容について強く要望させていただくなど、たいへんご無理をお願いし、そのうえ、シリーズであるが故、執筆期日についても厳しいお願いをして参りました。それに対し、的確にご執筆いただいたこと、かつ、一度も遅れることなく計画通りに出版できたことは、執筆者の皆様、そして事務局の方々のご尽力の賜物です。改めてここに感謝の意を表します。本当にありがとうございました。