

KEK Preprint 2004-44
August 2004
R

計算と測定の間にあるもの
- X線・ガンマ線検出器について -

Physics Phenomena Generally not Considered in Calculation

- In the case of X-ray and Gamma-ray Detector -

平山 英夫

H. Hirayama

KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1-1, Oho, Ibaraki, Tsukuba, 305-0801, Japan

To be published in J. At. Energy Soc. Japan



High Energy Accelerator Research Organization

計算と測定の間にあるもの

- X線・ガンマ線検出器について -

Physics Phenomena Generally not Considered in Calculation

- In the case of X-ray and Gamma-ray Detector -

平山 英夫

H. Hirayama

KEK, High Energy Accelerator Research Organization

1-1, Oho, Ibaraki, Tsukuba, 305-0801, Japan

計算機の性能の大幅な向上と計算コードの発展に伴い、計算に基づく放射線検出器の特性研究や開発への活用の可能性が飛躍的に増大してきている。計算コードの使用により、実測では得ることができない情報を調べたり、実際に測定器の試作を行う前に特性の検討を行い、より効率的に目的とする検出器の開発を行うことも可能になっている。一方、計算コードを用いて得られた情報を無条件に正しいものとして、その限界や使用条件を考慮しないで使用している例も増えているように思われる。しかしながら、計算コードを用いて得られる情報は、現実の放射線検出器の中で生じている複雑な現象に比べると限られたものであり、計算結果の解釈や、そこから得られた情報に基づき放射線検出器の開発を行う場合には、このことを十分理解しておく必要がある。

本解説は、代表的なX線・ガンマ線（以下、「ガンマ線」という。）検出器について、計算で得られる情報と検出器中でのエネルギー吸収後、実際に「出力」として得られるまでに存在する様々な物理現象についての紹介を通じて、計算コードを使用する上で知っておく必要があると思われることの理解を深めることを目的としたものである。

I. ガンマ線検出器の応答計算

ガンマ線が「間接電離放射線」の一つであることは、放射線に関連した分野の研究者であれば誰でも知っていることである。しかしながら、間接電離放射線であるガンマ線や中性子は、そのままでは人や物質に影響を与えたり、検出器の出力の要因となることはできず、これらの効果は、あくまで、間接電離放射線が物質と反応することにより発生する二次荷電粒子（電子・陽電子や反跳陽子等）によって起こることは、往々にして忘れられている場合が多い。ガンマ線検出器の応答計算においては、質量エネルギー吸収係数¹といった便利なマクロ量が古くから算出されていたことも影響し、原子力関連分野では、二次荷電粒子である電子・陽電子（以下、「電子」という。）の輸送計算を行わず、ガンマ線の量から得られる情報により評価することが長く行われてきた。

1. ガンマ線の量に基づく検出器の応答計算

ガンマ線の量に基づいた検出器の応答計算（検出器中でのエネルギー吸収量の計算）の手法としては、次の2つの方法がある。

1-1 カーマを計算する方法（カーマ近似）

カーマは、次式で定義される量で、単位体積中で間接電離放射線によって荷電粒子に与えられた運動エネルギーである。

$$K = \frac{\Delta E_{tr}}{\Delta m} \quad (1)$$

ここで、 ΔE_{tr} は、微少質量 Δm 中で、間接電離放射線によって荷電粒子に与えられた運動エネルギーの総和である。モンテカルロ計算の場合を例にとると、反応により生成した荷電粒子の運動エネルギーが、反応の場で全て吸収されるとするのが、この方法である。カーマ近似による計算結果は、荷電粒子平衡条件が成立している²状況で、微少体積中で荷電粒子が制動輻射を起さない場合に吸収エネルギーと一致するので、一致の程度は、ガンマ線のエネルギーや検出器の構造・大きさに依存する。(1)式で、 ΔE_{tr} からの制動輻射によるエネルギー損失部分を除いて、荷電粒子の衝突エネルギー損失のみを対象としたカーマを、衝突カーマという。

¹ 質量エネルギー吸収係数は、ガンマ線の反応により生成した荷電粒子のエネルギーの内、制動輻射に移行する部分を除いたものであり、平均的には、ガンマ線のエネルギーフルエンスに質量エネルギー吸収係数を掛けることにより、その物質の吸収エネルギーを求めることができる。質量エネルギー吸収係数は、一様な物質内で考えられた量である。質量エネルギー吸収係数については、文献1を参照。

² 微少体積中に、荷電粒子として流入する運動エネルギーの総和と、微少体積中で生成した荷電粒子が、微少体積から持ち出す運動エネルギーの総和に等しい時、荷電粒子平衡条件が成立しているという。荷電粒子平衡条件は、厳密には、均一物質中で成立する条件である。

1 - 2 ガンマ線のエネルギーフルエンスと質量エネルギー吸収係数から計算する場合

検出器中の平均エネルギーフルエンスと質量エネルギー吸収係数を用いることにより、衝突カーマに相当する量を計算することができる。この量を吸収エネルギーとして用いるのが、この方法である。衝突カーマは、生成した荷電粒子の運動エネルギーから、制動輻射により非荷電粒子に移行する平均の運動エネルギーを除いたものである。古くから用いられてきた照射線量は、空気の衝突カーマに対応する量である³。質量エネルギー吸収係数は、制動輻射の効果を加味して計算されたマクロ量であるので、ガンマ線のエネルギーが高い場合には、カーマ近似よりも実際に近く、荷電粒子平衡が成立している条件の下では、物質の吸収エネルギーと等しくなる。しかし、質量エネルギー吸収係数そのものが、均一物質について算定されたものであるため、放射線検出器の様な非均質物質で構成されている系の場合における一致の程度は、ガンマ線のエネルギーや検出器の構造・大きさに依存する。⁴

2. 電子の輸送に基づく検出器の応答計算

上記から明らかな様に、ガンマ線検出器の応答計算を厳密に行うには、ガンマ線の反応により生成した電子の輸送を加味した計算が必要である。電子の輸送を扱う計算コードは、モンテカルロ計算が中心で、汎用のコードとしては、ETRAN[2]、ITS[3]、EGS4[4]、PENELOPE[5]等がある。MCNP[6]では、当初は電子を扱っていなかったが、医学分野への利用拡大等の必要性から、電子の輸送についてはITSを使うことができるようにしている。電子は物質中で非常に多数回の弾性散乱をするため、最新の計算機でもガンマ線の様に個々の散乱を扱うことが難しく、通常は電子の飛程を短いステップに分け、その間の多数回の弾性散乱の影響を、多重散乱モデルを用いて補正するという方法が用いられている。多重散乱モデルは、均一媒質中で考えられたモデルであり、どの様なモデルを使用するかということと併せて、非均質境界での扱いが、各コードの特色の一つとなっている。

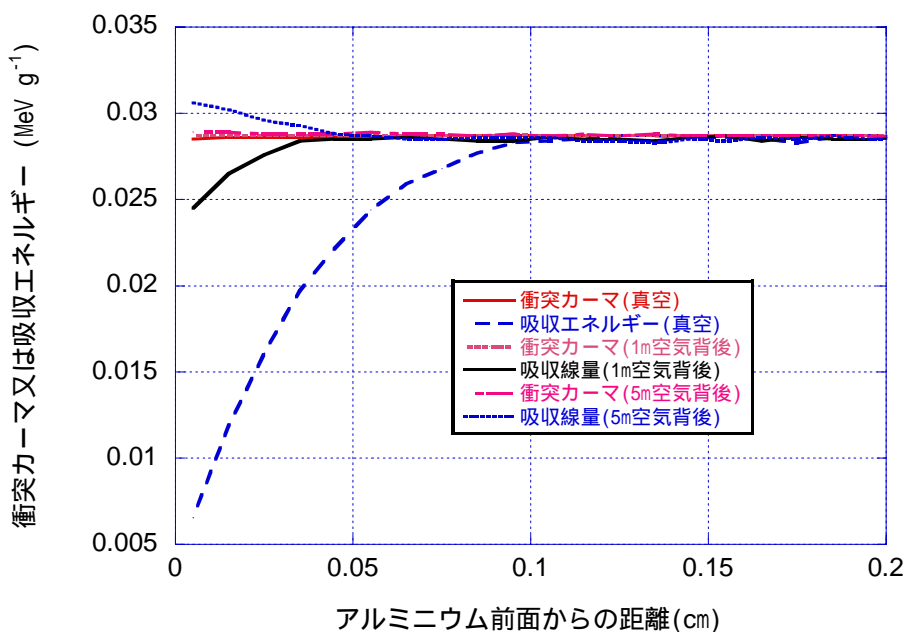
電子の輸送を扱う場合には、電子の電離及び励起エネルギー損失を、物質の吸収エネルギーとするのが普通である。チェレンコフ光の様に光の発生量が検出器中での電子の飛程距離に比例する現象の場合には、電子の飛程長を計算して使用することもできる。ガンマ線の情報から応答計算する場合に比べると、検出器の非均質構造の影響を加味した計算を行うことが可能であるが、測定値との比較を行う場合には、考慮しなければならない別な要因が出てくる。検出器の応答計算を行う場合、検出器の外側は真空として計算をするのが普通である。ガンマ線の情報から応答計算をする場合には、周りの空気の影響は無視できるが、電子の輸送を扱う場合には、空気中で生成した電子の影響を考慮しなければならない場合がある。影響は、ガンマ線のエネルギー、線源からの距離、線源の容器、検出器の大きさや構造に依存する。

第1図に、EGS4により計算したアルミニウム中の衝突カーマ及び吸収エネルギーの比較を示す。衝突カーマは、厚さ0.01cmの領域中におけるガンマ線の平均エネルギースペクト

³ 照射線量は、微小体積中で生成した荷電粒子によって空気中に作られる正負いずれかのイオンの電荷量である。荷電粒子平衡条件が成立している場合には、微小体積中の電荷量と一致することになる。

⁴ カーマ、衝突カーマと吸収線量(吸収エネルギー)との関係が文献1に例示されているので、参照。

ルと、アルミニウムの質量エネルギー吸収係数[7]から求めたものである。入射ガンマ線は、1MeV のエネルギーを持った平行ビームとし、アルミニウムの前が真空の場合、1m 及び 5m の空気層がある場合についての比較である。衝突カーマは、空気によりあまり影響を受けないが、電子による前面近傍の吸収エネルギー分布は、アルミニウム平板前の空気により変化していることが判る。入射エネルギーが 1MeV の場合は、1mm より深い場所では、空気の厚さに関係なく、両者の値が一致していることが判る。



第1図 1MeV の平行ガンマ線によるアルミニウム中での衝突カーマと吸収エネルギーの比較(EGS4 による計算結果)

3. 計算による応答計算の利点

計算による応答計算の最も優れた特徴は、実測できない途中経過を知ることができるということである。例えば、代表的なガンマ線スペクトル測定器であるNaI(Tl)検出器の入射ガンマ線のエネルギーに対応する出力は、光電ピークと呼ばれてはいるが、入射ガンマ線の光電吸収に伴い発生した光電子が全てのエネルギーを検出器中で失ったという単純なものではなく、Cs-137 の 0.662MeVガンマ線の場合でも以下の様な複雑な現象の組み合わせにより構成されているものである⁵。

- (1) 入射ガンマ線が直接の光電吸収を起こした場合
 - ・ K X-線等の特性 X 線の発生を伴わない場合

⁵ このことを視覚的に理解する方法の一つに、高エネルギー加速器研究機構から提供されている飛跡表示システム[8]を活用することがある。文献 9 の中に、このシステムを使ってNaI 検出器中での現象を調べる例が取り上げられている。これも、計算による応答計算の利点の一つである。表示システムとその使用マニュアル及び、教育への活用例は、<http://ccwww.kek.jp/kek/rad/egs4/egs.html>からダウンロードすることができる。

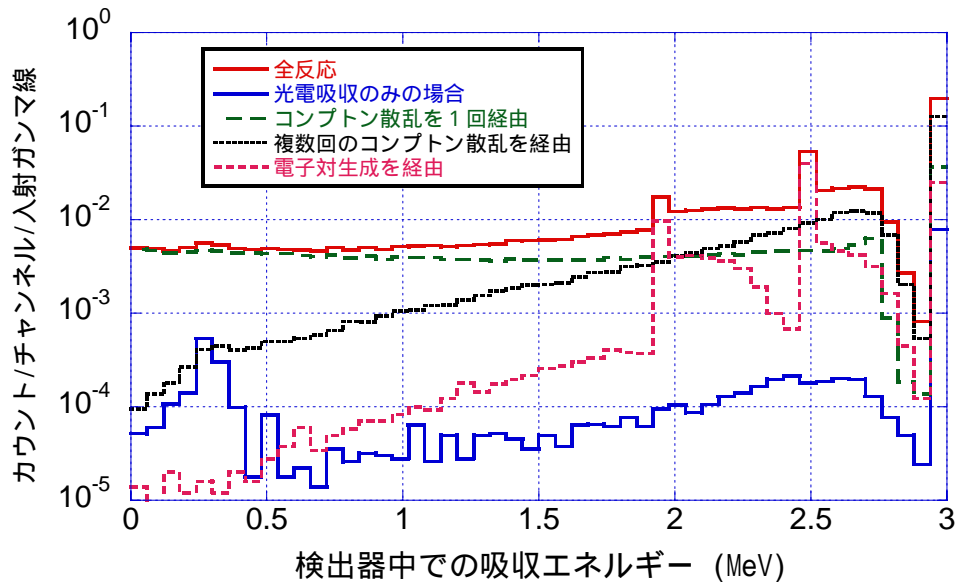
- ・特性 X 線が発生し、特性 X 線による光電吸収が生じる場合
- (2) 入射ガンマ線がコンプトン散乱を 1 回又は複数回行った後に、散乱ガンマ線が光電吸収を起こした場合
- ・コンプトン反跳電子が、デルタ線と呼ばれるエネルギーの高い二次電子を発生する電子・電子散乱や制動輻射反応を起こさずエネルギーを失う場合
 - ・コンプトン反跳電子が、デルタ線を生成し、共に検出器中で全てのエネルギーを失う場合
 - ・コンプトン反跳電子が、制動輻射反応を起こし、制動輻射が光電吸収や、コンプトン散乱経路後光電吸収を起こし、エネルギーを全て検出器中で失う場合
 - ・光電吸収で、特性 X 線の発生を伴わない場合
 - ・光電吸収で、特性 X 線が発生し、特性 X 線による光電吸収が生じる場合

ガンマ線のエネルギーが高くなると、電子対生成が加わることから、現象は一層複雑となる。上記のどの様な場合も、検出器の全吸収エネルギーは入射ガンマ線のエネルギーに対応した同じ値であるので、シンチレーション光子の発生効率が電子のエネルギーに依存しなければ、出力は変わらない。しかし、現実には発生効率にエネルギー依存性がある[10]ため、発生するシンチレーション光子数に違いが生じる。

コンプトンテイルと呼ばれている連続部分についても、実際は、1 回のコンプトン散乱反跳電子のエネルギー分布ではなく、複数回のコンプトン散乱反跳電子及びそれらのエネルギーの一部が電子や制動輻射の形で検出器外へ出たものの複合である。これらのことを初心者理解させるためには、第 2 図の例の様に計算でしか示すことができないガンマ線の反応毎に分けた波高分布が有効である。第 2 図は、3MeV のガンマ線ペンシルビームが、アルミニウムカバー付きの直径 3 インチで長さ 3 インチの NaI(Tl) 検出器に入射した時の応答を EGS4 で計算したものである。検出器中で、直接光電吸収を起こした応答が広いエネルギー範囲に分布しているのは、アルミニウムカバー等 NaI(Tl) 検出器周辺の物質中での散乱ガンマ線によるものである。放射線検出器の開発では、様々なフィルター等を用いて検出器応答を目的とするものに近いものとする場合がある。この様な場合にも、出力の要因毎の結果が、使用するフィルター材料の選択に役立つ場合がある。

また、実際に測定に使用できる線源は、エネルギーや核種が限られていることから、検出器の詳細なエネルギー依存の応答特性は、計算でなければ求めることができないと言える。

試作前に様々な組み合わせについて計算で評価を行い、方向を出した上で試作に移るという最も一般的に使用されていることも、計算による応答計算の利点である。



第2図 3MeV ガンマ線に対する3インチ直径、3インチ長さのNaI(Tl)シンチレーション検出器のガンマ線の反応別吸収エネルギー分布 (EGS4による計算)

・ 検出器中での物理現象

検出器の応答計算で得られる量は、検出器中での吸収エネルギーあるいは、電子の飛程長を用いて得られる量であるが、実際に検出器でこれらの量を直接測定することは、ほとんどなく、計算では通常考慮されていない様々な物理現象が関与している⁶。計算で得られる応答と実測との比較を行う場合には、このことを理解しておく必要があるので、以下に代表的なガンマ線検出器について紹介する。

1. 電離箱

電離箱は、ガンマ線との相互作用により生成した二次電子による対象ガス中での正負いずれかのイオンの電荷量を測定することを目的とした検出器である。照射線量を測定対象とする場合には、対象ガスは空気となる。電子がガス中で失った全てのエネルギーが、イオン対生成（電離）に繋がるわけではない。励起等非電離のエネルギー損失は、イオン対生成に寄与しない。また、生成された電子が再び電離を起こすエネルギーを持つ場合には、二次電子によりイオン対が生成される可能性がある。従って、電荷量を正確に評価するためには、これらの個々の反応の寄与を知ることが必要となる。1個のイオン対生成に必要な平均エネルギーは、W値と呼ばれる。W値が判っていると、測定電荷量から対象ガス中の吸収エネルギーを求めることができる。空気の電子に対するW値としては、古くは35.0eV

⁶ 検出部分の温度上昇を測定するカロリメータが、吸収エネルギーを直接測定している場合に対応するが、厳密には、局所的な吸収エネルギーから検出器の温度上昇に至る過程や、温度測定の過程に別な物理現象が関与している。

が使用されていたが、現在は、Boutillon とPerroche-Rouxが 1987 年に見直した値 33.97eV[11]が採用され、ICRUでの標準となっている[12]。吸収エネルギーをW値で割ることにより得られるイオン対の生成数は、あくまで平均値であり、実際に生成されるイオン対数は分布を持っている。イオン対の生成数を N_0 としたとき、イオン対数の分散（標準偏差の自乗）は、

$$\sigma^2 = F \cdot N_0 \quad (2)$$

である。Fは、ファノ因子と呼ばれるものである⁷。

生成したイオン対が電極に達するまでには、拡散や再結合等の現象を経ることになる。従って、計算と実測を絶対値で比較するためには、計算でガス中の吸収エネルギーとそれに伴うイオン対生成数を精度良く求めると共に、生成したイオン対が電極に至るまでの経緯を精度良く評価しておく必要がある。

空気中でのガンマ線の反応に伴い生成した電子による電荷量を測定するタイプの電離箱は、低エネルギー用の自由空気電離箱など限られた場合であり、ほとんどの電離箱は、固体の壁の内側にガスを挿入した形式となっている。この場合には、壁材とガスの組成の関係及び空洞の厚さと壁中で生成した二次電子の飛程との大小関係によって測定している量の意味が違ってくる⁸。ガスの領域（空洞）の大きさが、壁中で生成した二次電子の飛程に比べて大きく、ガス中に生成する電荷量が、ほとんどガス中で発生した二次電子によって作られる場合以外は、当然のことながら、ガンマ線による応答計算とは、得られた結果の意味が異なることになる。

2. 半導体検出器

Ge検出器に代表される半導体検出器は、結晶内で電子により生成された電子正孔対を電極に集める検出器である。電子正孔対を生成するのに要する平均エネルギーは、 E_{dep} 値と呼ばれ、Ge検出器の場合は 2.69eVである。従って、検出器中に吸収されたエネルギーを E 値で割った値($N = E_{dep} / E$)は、生成される電子正孔対の平均値となる。生成される電子正孔対数の分散は、電離の場合と同様にファノ因子による。しかしながら、ほとんどの場合、半導体検出器の応答計算と測定値の比較は、エネルギー既知のガンマ線で校正した波高分布の測定値と、計算から得られた検出器中の吸収エネルギーに、回路系を含めた検出器系のエネルギー分解能を加味したものとの間で行われている。

Ge 検出器の場合は、エネルギー吸収の生じた場所にほとんど依存しない電荷の収集が可能なので、上記の様に検出器中でのエネルギー吸収と直接比較することが可能であるが、例えば、CdTe 検出器の様に正孔が途中で捕獲される割合が高い検出器では、エネルギー吸収の生じた場所により、同じ吸収エネルギーでも収集される電荷量が異なる。従って、この様な検出器の場合には、計算による応答は、単純に検出器中での吸収エネルギーではな

⁷ ファノ因子については、イオン対の様な電荷キャリア数の純粋なポアソン統計からのずれを定量化するために導入されたという解釈もある[13]が、本来の意味は、上記の様に、電荷分布の分散そのものを示すものであり、ガス中でのエネルギー損失中、非電離のエネルギー損失の程度を反映したもので、W値と同じようにガス固有のパラメータである[14,15]。

⁸ ガス中の電荷量から、壁材の吸収線量（吸収エネルギー）を測定する場合には、空洞原理[16,17]に基づく補正が必要となる。

く、エネルギー吸収の生じた場所の影響を加味したものにする必要がある[18]。

3. シンチレーション検出器

古くからガンマ線のスペクトル測定に使用されてきたNaI(Tl)シンチレータに代表されるシンチレーション検出器では、ガンマ線の反応により生成した電子により検出器媒質(物質)中に生じた励起状態から元の状態に戻る際に放出される可視又は近可視光(以下、「シンチレーション光子」という。)を利用するものである。励起エネルギーの全てが、シンチレーション光子に変換されないこと、励起状態には、電子・イオン対又は電子・正孔対の再結合によって発生する励起状態も含まれることなどから、発生するシンチレーション光子の量を計算で求めることは難しい。電離の場合のW値や半導体の場合の W_s 値に相当するシンチレーション光子1個を生成するのに必要な平均吸収エネルギーが、シンチレーション効率(W_s)である。NaI(Tl)及びCs(Tl)については、宮島等が系統的な測定結果を報告している[19,20]。エネルギー吸収量とシンチレーション効率から得られるシンチレーション光子数は、半導体検出器の場合と同様に、あくまで平均値であり、検出器の応答を正確に評価するには、発生数のばらつきを考慮する必要がある。シンチレーションの場合、ファノ因子は1であり、考慮する必要はないが、発生したシンチレーション光子の検出器内での光の散乱や、後述する光電子増倍管による効果が加わるため、応答計算と測定値の比較は、エネルギー既知のガンマ線で校正した波高分布の測定値と、計算から得られた検出器中の吸収エネルギーに、回路系を含めた検出器系のエネルギー分解能を加味したものとの間で行われている。

シンチレーション光子の発生量は、吸収エネルギーに直線的に比例するのではなく、電子のエネルギーに依存することが知られており[10]、俵等は、このことを加味して、NaI(Tl)シンチレータのエネルギー分解能が、 W_s から推定される光子数の統計値より悪いことを証明する研究結果を発表している[21]。

・検出器以降

多くの検出器の場合、検出器の後に、発生した光や、電荷量を増幅するものが使用され、出力となる。シンチレーション検出器の場合は、発生したシンチレーション光子をそのまま検出するのではなく、光電子増倍管やフォトダイオードを使用して電気信号に変換するのが普通である。ここでも、別な物理現象が関与することになる。光電子増倍管では、シンチレーション光子を光電極面での光電吸収により電子に変換し、その電子を管内で増倍し、電気出力とする。シンチレーション光子の光電子増倍管窓での反射や散乱の影響に加え、光電極の光電子への転換効率は、入射角度及び波長依存性があるため、同じシンチレーション検出器でも使用する光電子増倍管により効率や分解能が異なることになる。

半導体検出器や、光電子増倍管からの電気信号は、前置増幅器及び増幅器等の回路系を経由して解析されることになるが、この過程で回路系固有の雑音が出力のばらつきに加わることになる⁹。

⁹ Liu達は、CdZnTe検出器について、検出器中でのファノ因子による出力のばらつき及び回路系の雑音を加味した応答計算の結果を実測値と比較した発表を行っている[22]。

・計算により得られる検出器の応答特性を使用する上での留意点

ガンマ線検出器の応答特性計算は、先に述べたように放射線検出器の研究において有効な研究手段であるが、計算結果を解釈する上では、以下の点に留意する必要がある。

- (1) 応答計算で得られる結果(多くの場合、検出器中での吸収エネルギー分布)と実際の信号との間には、上記で紹介したように、様々な物理現象が介在しており、多くの場合、エネルギーや強度が既知の線源による校正を介した相対的な比較となる。
- (2) ガンマ線の情報による応答計算を使用する場合には、使用の前提となっている条件が、適用可能かどうかの判断が必要である。
- (3) 電子の輸送を考慮した応答計算では、線源容器や途中の空気中で発生する荷電粒子の影響について調べておく必要がある。
- (4) 実測で得られる信号は、センサーである検出器部分だけでなく、信号の増倍系等を含んだものであるが、センサーとしての特性と、回路系まで含めた特性とは区別して考える必要がある。様々な検出器の吸収エネルギーや検出感度等の特性を比較検討する場合には、基本的にセンサーとしての検出器部分の特性について行うべきである¹⁰。

V. 最後に

計算機と計算コードの進歩に伴い研究において計算コードが有効な手段となっていることは疑う余地のない事実である。一方、計算の限界や制限を検証せずに使用したり、現実性のない計算から実験条件や結果のシュミレーションを行い実験結果を評価する等、計算コードを間違っ使用して使用例も多くなってきている様に思われる。コードの制作者側が、計算コードの限界や制限を明確に示し、限界や制限を超えた使用ができないようにする事も重要であるが、同時に、使用する側が、自分が計算しようとしている現象を理解して、計算結果の意味を正しく理解して評価することも重要である。本解説では、ガンマ線検出器を例にしたが、上記の問題は計算コードを使用するあらゆる研究分野において重要な事である。計算コードを使うことのメリットと限界を正確に理解し、有効な研究手段として活用する上で、本解説が少しでも役に立てば幸いである。

謝辞

早稲田大学名誉教授の道家忠義氏からは、ファノ因子に関する資料を紹介して頂きました。また、高エネルギー加速器研究機構の佐々木慎一、俵裕子両氏には、原稿を読んで頂き、放射線検出器の専門家の立場から貴重なご意見を頂きました。厚くお礼申しあげます。

¹⁰ 高エネルギーX線CT用の検出器の検討において、シンチレーション検出器の場合に、使用する光ダイオードの変換効率を含めて、検出器中での吸収エネルギーが論じられている場合があるが[23]、吸収エネルギーの様なセンサーとしての検出器と特性比較と、システムとしての特性は分けて検討する必要がある。

引用文献

1. 平山 英夫：光子の線量概念と実効線量への換算係数との関係 –ICRP90 年勧告の実施にあたって、*J. At. Energy Soc. Japan* **43**, 427-432(2001).
2. M. J. Berger and S. M. Seltzer : ETRAN Monte Carlo Code System for Electron and Photon Transport Through Extended Media, *Radiation Shielding Information Center, Computer Code Collection CCC-107*(1968).
3. J. A. Halbleib and T. A. Mehlhorn : ITS:The Integrated TIGER Series of Coupled Electron/Photon Transport Codes, *Nucl. Sci. Eng.*, **92**, 338(1986).
4. W. R. Nelson, H. Hirayama, D. W. O. Rogers : The EGS4 Code System, *Stanford Linear Accelerator Center Report SLAC-265* (1985).
5. F. Salvat, J. M. Fernández-Varea, J. Sempau, E. Acosta and J. Baró : An algorithm for Monte Carlo simulation of coupled electron-photon transport, *Nucl. Instrum. Meth. B* **132**, 377-390(1997).
6. J. F. Briesmeister, Editor :MCNPTM – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C, *Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M* (2000).
7. J. H. Hubbell and S. M. Seltzer : X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z=1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, *NSTIR 5632* (1995).
8. H. Hirayama, Y. Namito, N. Numajiri, and R. Ikeda : EGS4 Sgower Display System (EGS4PICT), Windows 32 Bits Version, *KEK Internal 2001-4* (2001).
9. H. Hirayama and Y. Namito : Lecture Note : Education of Radiation using EGS4PICT32, *KEK Internal 2001-11* (2001).
10. B. D. Rooney and J. D. Valentine : Scintillator Light Yield Nonproportionality : Calculating Photon Response Using Measured Electron Response, *IEEE Trans, Nucl Sci*, **44**,509-516(1997).
11. M. Boutillon and A. M. Perroche-Roux : Re-evaluation of the W value for electrons in dry air, *Phys. Med. Biol.* **32**, 213-219(1987).
12. Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations, *ICRU Report 47*, International Commission on Radiation Units and Measurements (1992).
13. 木村逸郎、阪井英次 訳：Glenn F. Knoll 放射線計測ハンドブック 第3版、133頁、日刊工業新聞社 (2001).
14. E. Segre Editor : Experimental Nuclear Physics, Vol. 1, pp232-240, J. Wiley & Sons, Inc. (1953).
15. I. K. Broni :W Values and Fano Factors for Electrons in Rare Gases and Rare Gas Mixtures, 放射線, Vol. 24, No. 4, 101-125 (1998).
16. ICRP が使用している主な概念と量の用語解説、*ICRP Publ. 42*、日本アイソトープ協会(1984).
17. 中村 尚司：放射線物理と加速器安全の工学[第2判]第2章、地人書館(2001).
18. H. Nishizawa, K. Ikegami, K. Takashima and T. Usami : Calculation of CdTe Semiconductor Detector Response, Proceedings of the Sixth EGS4 Users' Meeting in Japan, *KEK Proceedings 96-10*, 61-69(1996).

19. M. Miyajima, S. Sasaki and H. Tawara : Numbers of Scintillation Photons Produced in NaI(Tl) and Plastic Scintillator by Gamma Rays, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **40**, 417-423(1993).
20. S. Sasaki, H.Tawara, K.Saito, M.Miyajima and E. Shibamura : Average Energy Required Per Scintillation Photon and Energy Resolution in Inorganic Scintillation Crystals for Gamma-rays, *IEEE Nucl. Sci., Symp., Conf.* **N-27**, 19(2002).
21. H. Tawara, S. Sasaki, K. Saito and E. Shibamura :A Monte-Carlo Method for Determining Absolute Scintillation-Photon Yields and Energy Resolution of Scintillators for Gamma Rays, Proceedings of the Second International Workshop on EGS, *KEK Proceedings 2002-20*,152-160(2000).
22. J. C. Liu, W. R. Nelson and R. Seefred : Response Calculations of the CdZnTe Detector Using EGS4, Proceedings of the Second International Workshop on EGS, *KEK Proceedings 2002-20*, 135-143(2000).
23. H. Miyai, H. Kitaguchi, K. Satou, and S. Izumi : Array Detector for Third-Generation Industrial High Energy X-Ray Computed Tomography System, Proceedings of the First International Workshop on EGS, *KEK Proceedings 97-16*, 199-207(1997).