

放射線計測の基礎と応用研究—或る研究職人 40年の歩み

青山 隆彦

私は本年3月末で名古屋大学を定年退職した。私の研究人生は、昭和44年、大学4年生の卒業研究まで遡る。私は昭和41年、名古屋大学工学部原子核工学科に第一期生として入学した。4年生になった時、放射線の工業利用、放射能定量がご専門の渡辺 鑑先生の元へ弟子入りしたが、そこで与えられた卒業研究テーマは、磁場を使ったβ線スペクトロメータで、β線検出器として使用するための低バックグラウンド端窓型GM計数管を開発せよと言うものであった。当時、工学部生は4年生になるとほとんど授業が無くなり、4月から毎日研究室で卒業研究に没頭した。GM計数管の構造や動作原理は既に良く知られていたもので、私はそれに倣って計数管を機械加工して組み立て、10分の1気圧ほどの低気圧で計数管を動作させるため、希ガスに混ぜる有機ガスを10倍ほど高濃度にしたGM計数管用ガスを充填したが、良好な動作特性がどうしても得られなかった。計数管内の電場の様子と、β線によって作られる平均の電離数を理論計算した結果、計数有効容積内で作られる平均電離数が僅か2、3個しかなく、このためGM放電発生確率が100%にならないことが特性を悪くしている原因と判明した。そこで、GM計数管の陽極線に沿って電場を一様にし、GM放電確率を高めるために、陽極線終端部に電場補正リングを設置することを考案して実施したところ見事に動作特性が改善し、所期の目的を達成した。小さな成功体験であったが、これがその後の道を決定することになった。

昭和45年、大学院に進学したが、師匠からはテーマを自分で見つけるように言われ、当時、素粒子実験の分野で、従来の写真フィルムに代わる高エネルギー放射線の入射位置検出器として開発された放電箱（スパークチェンバ）が目新しく面白そうに思え、これを通常の高エネルギー放射線用として使えるようにするための研究を実施することにした。素粒子実験用のスパークチェンバは、放射線の入射を別の検出器で検知し、平行平板電極間に瞬時に高電圧を印加して火花放電（スパーク）を発生させるものであるが、高エネルギー放射線用では、平行平板電極間に常時高電圧を印加しておき、放射線の入射によるスパーク発生毎に瞬間的に電圧を落としてスパークを消す方式にならざるを得ない。

この場合、安定したスパークを発生させることは非常に困難で、何をどのように研究したらよいかさっぱり分からなかった。結局、大学院の2年間は、電気学会に入会して気体放電の基礎的勉強をし、放射線によるスパークの発生メカニズムを解明するだけで終わってしまった。昭和47年、修士課程修了と同時に研究室の助手になり、安定したスパークを発生させる研究に着手した。それまで放射線として低比電離の β 線やオージェ電子を使っていたが、高比電離の α 線をスパークチェンバに入射させてみたところ、スパーク発生電圧が大きく低下すると同時に、安定したスパークが発生することが分かった。理論解析から、 α 線では初期電子数が β 線やオージェ電子に比べ圧倒的に多いことが原因と考えられた。そこで、 β 線やオージェ電子のような低比電離放射線が入射する場合でも、スパークチェンバの前段に電子増倍領域（プロポーショナルチェンバ）を付加して、スパークをトリガーする初期電子数を多くすることを可能にした複合スパークチェンバを作製したところ、安定した、しかも歪みの無い放射線（放射能）分布像を得ることに成功した。この発明は名古屋大学長を特許権者とする国有特許が成立し、アロカから「ベータクロマトグラムカメラの」商品名で実用化された。この装置は、従来の写真フィルムに代わる高感度二次元放射能分布測定器として、医学、生物、薬学分野で利用され、昭和57年には、この研究に対して新技術開発財団から市村賞・学術貢献賞が授与された。

スパークチェンバの研究が一段落するころ、次にやるべき研究を考えた時、これまで蓄積してきた気体放電の知識を生かして、それまで不可能と言われてきた空気で動作する計数管の開発を研究対象に選んだ。計数管は古くから放射線の測定に多用されており、さまざまな種類のものがあるが、希ガスを主体とする特殊なガスを使って動作するようにできており、空気で動作可能なものは、例外的に高比電離 α 線検出用のものが1種類あるだけであった。もし、 β 線や γ 線に対しても計数管が空気で動作可能なら、例えば通気式の大気中放射能汚染検出器として、従来の電離箱式よりはるかに高感度のものができるはずであるが、それまで、 β 線や γ 線による二次電子のような低比電離放射線では正常に動作させることが不可能とされてきた。その理由は、放射線によって空気中で電離された電子がすぐに空気中の酸素に付着し、安定な負イオンになって放電を引き起こさないためであるが、私は、理論計算と実験的検証から、電子が計数管中で付着を逃れるためには、円筒形計数管ではその半径を数 mm 以下と非常に小さくすれば良いと言う単純な結論を得た。ただ、これでは計数管の容積が小さく、放射線の検出効率が低いので、これを多数本平行に並べた多線陽極型空気計数管を作り、これに β 線を入射させたところ、安定して β 線を検出

することに成功した。早速、これを欧米の学術専門雑誌に発表するとともに、トリチウム表面汚染検出器への応用を試みた。トリチウムは水素の放射性同位体で、生命科学実験室でよく利用されているが、 β 線しか放出せず、そのエネルギーもほんの僅かの物質で吸収されてしまうほど低いので、これによる汚染の検出は非常に困難である。開放型空気計数管なら β 線の入射を妨げる窓がいらないので、高感度でトリチウム汚染の検出が可能になり得る。この論文を米国の学術雑誌に発表すると、米国ロスアラモス国立研究所から講演の依頼が来た。ロスアラモス研究所は、第2次世界大戦末期、原子爆弾を開発した研究所として知られ、現在も米国における核兵器開発の中心的存在であるが、兵器研究以外に、人類の将来のエネルギー源として重要視されている核融合研究にも力を注いでいた。トリチウムは、核融合の燃料として大量に取り扱われる放射性物質であるため、閉じ込めと、漏れた場合の空気中の放射能濃度測定は大問題である。従来、トリチウム濃度の測定には通気式電離箱が使われてきたが、これでは感度が低く、原理的に感度の向上も望めないので、私の空気計数管を使いたいから話を聞かせてほしいとのことであった。私はロスアラモスで話した構想をその後3年ほどかけて具体化し、米国での学会で発表した。内外の放射線防護機器メーカーから問い合わせがあったが、装置の製作に職人芸を要することもあり、また、肝心の核融合開発が遅々として進まないこともあって、未だ製品化には至っていない。

私は、その後、突如世界中にセンセーションを巻き起こした常温核融合の、真偽を確かめるために実施した微弱中性子の計測（1年間の研究で常温核融合の存在を否定する結果を得て公表した）から、中性子エネルギー spektrometers の開発、新素材による中性子個人被ばく線量計の開発を経て、工学部から医療技術短期大学部に所属を移すことになった。医療技術短期大学部での私の所属は一般教養で、担当は情報科学であったが、医用放射線計測の研究をしたいと思い、専門分野が最も近い前越久先生のグループとの共同研究を考えていたところ、先生から、治療用高エネルギー電子線のエネルギーを素早くチェックする方法を考えるように依頼され、これにのめり込んだ。工学部から異動する頃、当時開発されたばかりのプラスチックシンチレーションファイバーをメーカーから寄贈され、利用を試みたが、何しろ信号強度が微弱で、放射線を一個一個測定することはほとんど不可能と感じていた。しかし、医療で使う治療用や診断用のX線は束になっていて放射線強度が強いので、シンチレーションファイバーが使えるに違いない。私は、前越久先生、津坂昌利先生、小山修司先生と共同で、シンチレーションファイバーと光信号読み出しにフォトダ

イオードを組み合わせた治療用高エネルギー電子線のエネルギー測定器を皮切りに、電子線深部線量分布測定器、高エネルギーX線用ポイント線量計を開発して、米国の医学物理専門雑誌に論文発表するとともに、平成11年ギリシャで開催された医学物理国際会議で成果発表した。その後、診断X線による患者の被ばく線量測定に関心に移り、シンチレーションファイバーと光電子増倍管を組み合わせた診断X線用ポイント線量計、X線CT用長尺等感度線量計、また、フォトダイオードを用いた診断X線で高感度且つ感度の方向依存性が無い線量計を開発した。後者は人体等価ファントム中に設置して人体の組織・臓器の吸収線量を測定するための開発である。

平成10年に医療短大は医学部保健学科に改組され、私の所属は放射線技術科学専攻になって4年生の卒業研究の面倒を見なくてはならなくなった。第1回生には、以前、工学部時代に行っていた中性子計測の医学応用として、X線治療患者の光中性子による被ばく線量測定を指導した。X線治療用のライナックからは、加速電圧が10MV程度以上になると、ターゲットでの光核反応により中性子が発生し、患者が不要な被ばくをされると考えられるが、どのように、また、どの程度の線量を被ばくするか分かっていなかった。そこで、まず、治療患者の体軸上の中性子強度分布を、インジウム放射化箔を体軸にそって並べ、加速電圧10MVの治療用X線を照射して調べると、光中性子は治療中患者の全身にほぼ一様に照射されていることが分かった。次に、人体を模擬した一辺が30cmで、厚さが20cmのポリエチレンブロック中にインジウム放射化箔を埋め込んだ体系に、同じく加速電圧10MVの治療用X線を照射し、インジウム箔を放射化する熱中性子の深さ方向の強度分布を求めるとともに、同じ体系中にいる異なるエネルギーの中性を打ち込んだ時に得られる熱中性子強度の深さ分布をモンテカルロ計算して応答関数を作成しておき、これらから光中性子のエネルギースペクトルを求めた。これを基に、10MV X線による放射線治療患者の光中性子による全身被ばく線量を求めると、治療線量60Gyでも3.5mSv程度にしかならないことが判明し安心した。この研究では、工学研究科の井口哲夫先生と共同研究を行い、応答関数のモンテカルロ計算とそれを使ったアンフォーリングを実施していただいた。この助けが無ければこの研究は成就しなかった。

光中性子被ばくの研究とほぼ時を同じくして、先に開発したフォトダイオード線量計の応用として、これを人体ファントムに組み込んだ診断X線による被ばく線量測定体系の開発を、小山修司先生、川浦稚代先生の助力を得て始めた。現在、日本人一人当たりの年間被ばく線量の2/3以上は医療被ばくによるもので、

そのほとんどを診断X線による被ばくが占めると言われているが、その実態は良くわかっていない。診断X線による被ばくは局所被ばくで、その影響は被ばくした組織・臓器に発現するので、人体の組織・臓器ごとに被ばく線量を評価する必要があり、この評価には、モンテカルロ計算による方法と、人体ファントム内線量測定が使われる。前者はX線のエネルギースペクトルや強度の空間的及び時間的变化が良く分かっていないと線量計算できない。X線CT装置は、新しいものほど装置が複雑化し、構造は企業秘密である上、スキャン中X線強度が空間的にも時間的にも複雑に変化するので、被ばく線量を正確に計算することは非常に困難である。しかし、後者はどのような状況下でも精度の高い線量測定が可能なので、被ばく線量は人体の物理ファントムを使った実測が基本とされ、私たちもこの方法を採用した。被ばく線量を測定するためには、X線の減弱に対して人体と等価なファントムが必要で、しかも他者による追試が可能であるためには、商品化され誰でも入手可能なものでなくてはならない。こうした人体ファントムは非常に高価で、通常の研究費で買えるものではないので、診断X線による患者の被ばく線量評価が、国民にとっていかに重要な研究課題であるかを切々と訴え、平成14年からこれまで4度の文科省科学研究費補助金を得て、1体が数百万円もする人体ファントムを、成人体幹部、6歳児小児の頭部と体幹部、成人頭部、新生児全身の4回に分け購入した。これらのファントムの種々の組織・臓器位置に線量計を設置し、X線単純撮影、X線CT、消化管造影、心臓カテーテルの被ばく線量測定を、今日まで約10年間実施してきた。この研究の深化には、3名の社会人博士後期課程学生、広藤喜章、藤井啓輔、瀬口繁信の各氏が大きく貢献し、研究成果は欧米の著名な放射線医学および医学物理専門雑誌に発表するとともに、それぞれの学位論文となった。

私は研究生活初期の30年間は放射線測定器の開発研究をしてきた。測定器が完成して論文が出来上がると私の興味は失せ、次の課題に移った。開発した測定器は実用化したものもあったが、多くは実用化に至ることなく論文のままで終わってしまった。これでは研究成果が人の役に立たないことに気付き、研究生活最後の10年は、開発したX線線量計を応用して被ばく線量直読システムを組み上げ、診断X線による患者被ばく線量を自ら精力的に測定・解明した。振り返れば40年余に及ぶ私の研究人生は、私を育ててくれた名古屋大学とともに、恩師や諸先輩、同僚の先生方並びに指導生諸君のお蔭で成り立ったもので、心からの感謝とともに、名古屋大学の益々の発展を祈念して本稿を終える。

(名古屋大学名誉教授)