

Photo M. Abe

Index

| マンモクラフィの女主を文える緑重計測【2】 | | |
|---|-----|----|
| ~マンモグラフィ用X線の線量標準の確立と標準供給体制の構築· | ~ | |
| 田中 隆宏・黒澤 忠弘・齋藤 則 | 生 | 1 |
| 凍るウランバートルと紺碧の空町 未 | 男 | 6 |
| 新しい気体放射線画像検出器-Glass GEM A new radiation imaging detector-Glass GEM高橋 浩 | 之 | 7 |
| 個人モニタリングサービスの歴史(その 4) ~ サービスの成長期 II ~松本 | 進 · | 13 |
| 「2013国際医用画像総合展出展」のご案内 | | 18 |
| (サービス部門からのお願い) 4月1日はガラスバッジの交換日です | | 19 |

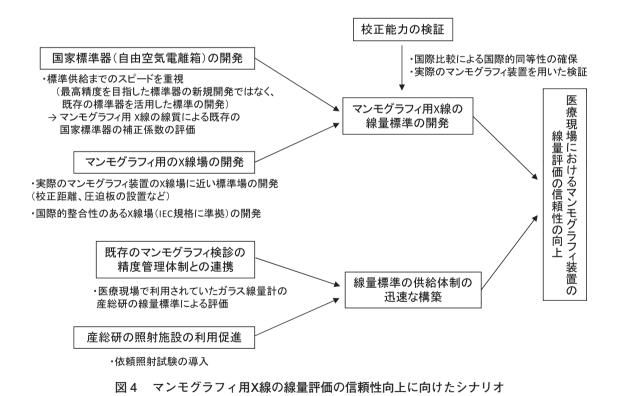
マンモグラフィの安全を支える線量計測【2】

~マンモグラフィ用X線の線量標準の確立と標準供給体制の構築~

田中 降宏*1、黒澤 忠弘*2、齋藤 則生*3

3 研究開発のシナリオ

マンモグラフィの医療現場における線量測 定の信頼性の向上には、現場で使われている X線の線質に基づいた線量標準の確立は当然 のことながら、線量標準を社会に円滑に供給するための体制作りも必要となる。マンモグラフィの線量測定の信頼性向上のために策定したシナリオを**図4**に示す。



* 1 Takahiro TANAKA

独立行政法人産業技術総合研究所 計測標準研究部門 量子放射科放射線標準研究室 研究員

* 2 Tadahiro KUROSAWA

主任研究員

* 3 Norio SAITO

同 量子放射科長

出典: Synthesiology vol. 5, No. 4 (2012) P. 222~P. 233 独立行政法人産業技術総合研究所(AIST)提供

社会的ニーズに素早く対応するため、マンモグラフィ用X線の線質に最適化した国家標準器を新たに開発せず、既存の国家標準器の活用による標準の開発期間の短縮化を図った。標準の主な供給先である医療現場での線量評価の不確かさの低減を図るため、実際のマンモグラフィ装置に近いX線場を開発した。また、標準の国際的な同等性の確保に必要な国際比較に参加するため、IEC規格に準拠したX線場の開発も同時に行った。開発した線量標準の校正能力を検証するため、国際比較への参加に加えて、この標準で校正した複数の線量計で実際のマンモグラフィの線量を計測し、それらの評価を行った。

マンモグラフィでは線量評価を含めた精度 管理がすでに多くの医療現場で行われていた ため、この中で利用されているガラス線量計 を評価することにより、迅速かつ広範な標準 供給を目指した。そのために、産総研は、精 度管理で利用されているガラス線量計をその まま校正する方式の確立に努めた。

また、これまでの線量標準供給体制では、校正事業者が所有する標準線量計(二次標準器)の校正を産総研が行い、この二次標準器を介して標準供給がなされていた。その際、医療現場の線量計の校正を行う校正場(X線場)が、校正事業者が保有するこれまでのW/A1線質のままでは、あまり意味がない。しかし、マンモグラフィ用X線の線質に準拠した校正場の整備には、照射装置の導入等に数千万円規模の設備投資が必要となってしまう。そこで、産総研は依頼試験制度により、産総研の照射装置を活用してスムーズな標準供給ができるような環境を整備した。

このようなシナリオを策定して、国際的な同等性のある線量標準が迅速かつ広範に医療 現場に供給され、線量評価の信頼性向上につ ながることを意図した。

4 国家標準の開発

マンモグラフィに特化したX線線量の国家標準の整備には、線量の絶対測定(単位の定義に沿った測定)が可能な国家標準器の開発と、マンモグラフィ用X線の線質と同じX線標準場の開発が必要となる。以下では、国家標準器の開発とマンモグラフィ用X線標準場の開発について述べる。

4.1 国家標準器の開発

マンモグラフィを含めた軟X線(ここでは 50kV以下の管電圧)の場合、物理的に明確に定義された空気カーマ $^{H\bar{m}4}$ (もしくは照射線量 $^{H\bar{m}5}$)の単位Gy(もしくはC/kg)で標準供給がすでになされている。

照射線量の絶対測定が可能である自由空気 電離箱が一次標準器として世界的に採用され ている。現在のところ、産総研の軟X線の線 量の国家標準も自由空気電離箱を採用してい る(図5)。

自由空気電離箱では、電離体積内で生成されたイオンの電荷を測定し、照射線量(または空気カーマ)を求めている。電離体積内の空気の質量をmとすると、照射線量率X(C/kg/s)は次の(1)式によって得られる。

$$\dot{X} = \frac{I}{m} \prod_{i=1}^{10} k_i \quad \cdots \quad (1)$$

ここで、(1) 式のIは自由空気電離箱で測定されるX線による空気の電離電流、 k_i は補正係数である。補正係数は、実際の実験条件を、線量の定義される理想的な条件に補正するための係数で、この標準では全部で10種類ある。マンモグラフィ用X線では、それらの補正係数のうち、規定面と集電極中心間の空気層による吸収に対する補正が約 $1.5\sim2\%$ と最も大きく、その他に散乱線に対する補正が少し($\sim0.5\%$)あるのみで、他の補正係数に関してはかなり小さい($\sim0.1\%$ 未満)。散

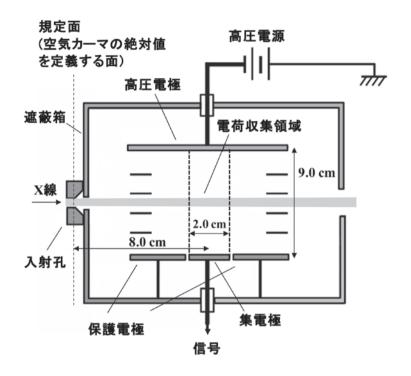


図5 国家標準器(自由空気電離箱)の概略図

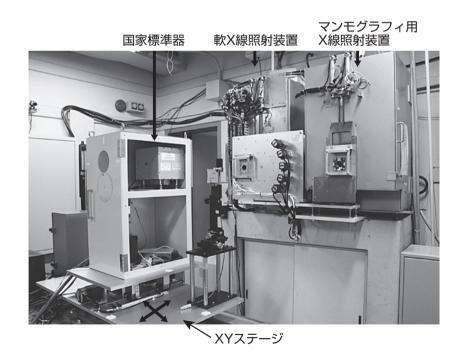


図 6 開発したマンモグラフィ用X線の線量標準の装置図

乱線に対する補正等の実測評価が困難な補正 係数は、モンテカルロシミュレーションによ り評価している。

図6に開発したマンモグラフィの線量標準の装置図を示す。マンモグラフィの国家標準を整備する際、マンモグラフィ専用の新しい国家標準器(自由空気電離箱)を開発せず、既存の自由空気電離箱(軟X線の線量の国家標準器)の補正係数をマンモグラフィ用のX線の線質で評価する方法を採った。これは標準の開発から供給までの時間を極力短くし、素早く標準供給の社会的要請に応えるためである。図6に示すように、自由空気電離箱はXYステージ上に設置し、軟X線(W/AI線質)の線量標準と共用できるようになっている。

4.2 マンモグラフィ用 X 線標準場の開発

標準場として設定するマンモグラフィ用X 線の線質は、現場で最も利用されている線質 から重点的に開発を進めた。前述のとおり、 線質は主に、X線管球のターゲット材、管電 圧、付加フィルタの材料と厚さによって決ま る。ただし、線質を規定する際、国内だけで なく国外も意識した。国外を意識した線質と は、ISOやIEC規格等に代表される世界的に 共通に使うことができる線質である (マンモ グラフィでは、IEC61267で規定されている) [13]。このような線質は、各国の線量標準の 同等性を確認するために実施される国際比較 に参加する際に必要となる。一方、国内の精 度管理マニュアル等ではIEC 規格以外の線 質も使われていて、これに準拠することが円 滑な標準供給へとつながる。このように、標 準を整備する際に国外と国内の両方を意識す ることが、国際的な同等性の担保された線量 標準の円滑な供給にむけた第一歩となる。

また、マンモグラフィに用いられる低エネルギーX線は空気による単位長さ当たりの吸収量が他の診断X線と比べて大きいため、校

正距離(焦点-規定面間距離)による線質の変化が大きく、校正距離の設定も重要となる。我が国よりも先に標準供給を行っていたドイツやアメリカ等では校正距離は1mであったが、実際のマンモグラフィ装置の照射距離を考慮して、産総研では校正距離を60cmと設定した(その後に国際度量衡局も校正距離を60cmに設定した)。

また、我が国独自の設定として、圧迫板を透過した線質に基づいた線量標準も開発した。 実際の乳房撮影では圧迫板を透過したX線が乳房に照射される。マンモグラフィで使用されるようなエネルギーの低いX線は圧迫板に吸収されやすく、線質も大幅に変わる。乳房に照射する線量の把握も重要と考え、このような独自の線質も開発した。この線質は精度管理用に使われている線量計を校正するためにも必要であった。

5 線量標準の供給体制の構築

医療現場で評価される線量の信頼性向上に は、標準供給体制の構築が必要不可欠となる。 そこで、産業界・学会等の協力を得て、複数 の標準供給体制を構築した。

5.1 精度管理に利用されるガラス線量計 の性能評価

マンモグラフィが我が国の乳がん検診に導入される以前から、関連学会を中心としたマンモグラフィ検診の精度管理がされていた。この精度管理において必要な線量と線質を簡便に評価できるよう、マンモグラフィ用ガラス線量計が開発された。

ガラス線量計は、ラジオフォトルミネセンス現象^{用語6}を利用した積算型の線量計であり、 蛍光ガラス素子には銀活性リン酸塩ガラスが 用いられている。マンモグラフィ用のガラス 線量計の写真を図7に示す。

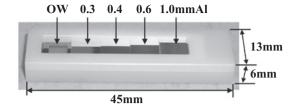


図7 マンモグラフィの精度管理用に開発され たガラス線量計(協力:㈱千代田テクノル)

マンモグラフィ用のガラス線量計は、蛍光ガラス素子と、素子の表面に4種類の厚さの異なるアルミニウムフィルタをかぶせた構造となっている。各アルミニウムフィルタの厚さは0.3、0.4、0.6、1.0mmとなっており、1回の照射で減弱曲線が測定できる。この減弱曲線から半価層と管電圧を求め、OW(open window、Alフィルタが無い)のガラス素子の蛍光量から空気カーマを求めることができる。つまり、このガラス線量計では1回の照射で精度管理に必要な平均乳腺線量の評価ができる。このガラス線量計の性能評価をこの標準場で行った。

その結果、半価層、管電圧、空気カーマともに、95%の信頼度で不確かさ2%以内で産総研の値と一致することを確認した^[14]。

5.2 産総研の照射施設の利用促進

マンモグラフィの線質での線量計の校正を校正事業者が実施するためには、マンモグラフィ用X線の発生装置が必要となる。しかし、X線発生装置の導入には少なくとも数千万円規模の設備投資が必要となり、事業として成り立たない可能性が予想された。そこで、校正事業者が産総研のマンモグラフィ用の標準場に、各自の標準線量計(国家標準とトレーサブルであることが前提)と校正事業者が依頼を受けた被校正線量計を持ち込んで校正を行う照射依頼試験を開始した。これまで産総研での校正料金は、被校正線量計の数に応じていたが、この試験では照射装置の使用日数

に応じて課金するため、校正事業者の経済的な負担が軽減される。この照射依頼試験の導入により、校正事業者への負担軽減を図り、円滑な標準供給を促進した。

— 用語解説 -----

用語4:空気カーマ:非荷電粒子線の相互作用 によって単位質量あたりの空気から発 生した二次荷電粒子線の各発生時点で の運動エネルギーの総和。SI単位系で は、J/kgと表されるが、特別な単位Gy (グレイ)が用いられる。

用語5: 照射線量: 単位質量あたりの空気と相互作用した光子が生成した二次電子が完全に停止するまでに空気中で生成するイオン対のうち、一方の符号の電荷を合計した電荷量の絶対値。SI 単位系ではC/kg で表される。

用語 6: ラジオフォトルミネセンス現象: 放射線照射によってガラス中に生成した蛍光中心に対して紫外線を照射すると、ガラスに照射された放射線の線量に比例した蛍光が発生する現象。この現象を利用して、個人線量計としても使われている。

参考文献 -----

- [13] IEC61267 Ed. 2.0, Medical diagnostic X-ray equipment-Radiation conditions for use in the determination of characteristics, IEC (2005).
- [14] T. Tanaka, T. Kurosawa, N. Nouda, T. Matsumoto, N. Saito, S. Matsumoto and K. Fukuda: Reference X ray field for mammography dosimetry in Japan, Proceedings of the International Symposium, Standards, Applications and Quality Assurance in Medical Radiation Dosimetry, 2, 43-51 (2011).

凍るウランバートルと紺碧の空 元・原子力委員 町 末 男



マイナス25度を体験

2月4日強い西風で1時間遅れて22時にウランバートルに着陸した。機内放送で、空港の気温はマイナス25度と知らされた。長く住んだウィーンでも最低はマイナス15度程度だったので、マイナス25度まで低い気温は初めてだった。空港出口からモンゴル原子力庁の迎えの車まで歩いたとき顔に感じた透明で鋭い寒さは、東京の寒さとはまさに質が違うという感じだ。前回の訪問は一昨年の9月下旬であったがすでに雪が降っていた。この国の冬は長い。

モンゴルは人口約290万で、まだ貧困な人も 多い。牧畜で暮らす遊牧民が約半分で、その ほかは首都ウランバートルに集まっている。空港 からの道路もまだせまく、舗装も不十分だ。

次の朝マイナス25度、空はよく澄んで紺碧に美しく輝いていた。

若い原子力エネルギー庁長官

まず、予定通り原子力エネルギー庁と日本共催の「発展のための原子力エネルギーの利用」セミナーで3つの講演を行った。約100人の参加者が熱心に聞いてくれた。

午後、数か月前に就任した原子力エネルギー庁(首相の直下)の若いTegshbayar新長官と会談した。首相とも親しく週に1回は会っているという。ざっくばらんで話し好きな長官だ。物理が専門でモンゴルにとっての原子力の必要性を主張している。日本に対しては特に人材育成への協力を強く求めている。モンゴル人は親日家が多く、それだけに日本への期待も大きい。

遊牧民の国モンゴルにとって「馬」は大切な 家畜である。新長官も子供の時から乗馬をやっ ており、名手のようだ。ホテルなどにかかってい る絵も走る馬を描いたものが大部分である。伝 統的な楽器「馬頭琴」の弦は馬の毛でできて



マイナス25度のウランバートル市街



中央が原子力エネルギー庁長官、その左が筆者

おり、楽器の一番上は馬の頭の形になっている。 この楽器の伴奏で歌うモンゴルの伝統の歌には 不思議な哀調が感じられる。

モンゴルの原子力

かなりのウラン資源を持っているモンゴルはウランの採鉱と輸出を計画しており、いずれは自国でも原子力を発電や地域暖房に活用したいと考えている。ロシア、フランス、日本、韓国などが協力をしている。美しい環境を守るためにも石炭の利用を減らして原子力や再生可能エネルギーの利用を進める必要がある。

IAEAやFNCAの協力で癌の放射線治療、 作物の品種改良などにも取り組んでいる。

(2013年2月13日稿)

新しい気体放射線画像検出器-Glass GEM A new radiation imaging detector-Glass GEM



高橋 浩之*

1. はじめに

1.1 背景

電離箱やGM計数管に代表される気体放射 線検出器は、放射線防護・線量計測に広く用 いられているが、放射能や放射線の分布を手 軽に計測することのできる放射線画像検出器 はまだ一般に普及していない。これは、放射 線画像検出器の構造が複雑であり、高価であ り、動作が安定しないことなどが主な原因で あると思われる。最近、マイクロパターンガス 検出器(MPGD)と呼ばれる、微細加工によ り製作した非常に小さな検出器構造を多数並 列して動作させるデバイスが出現してきてお り、これを用いた気体放射線画像検出器の研 究が進展している。本稿では、ガラスを微細 加工により加工し構造材として用い、アウトガ スを生じず原理的に封じ切りの検出器として GM計数管等の代わりに用いて放射線画像を 手軽に得ることができる可能性のある、新し いGlass GEM検出器について紹介する。

1.2 マイクロパターンガス検出器の登場

気体を用いて放射線画像が得られる検出器としては、1968年にG. Charpakにより発明された、比例計数管の陽極線を多数並列に配置した構造をもつ多線式比例計数管(Multi Wire Proportional Counter: MWPC) がある。しかし、MWPCで位置分解能を得るには、要求される分解能に応じた数だけ陽極線を張ら

ねばならない。たとえば、10cm程度の大きさ の検出器で1mmピッチで陽極線を張った場 合、100本もの数になり、これらの心線を増幅 度を高くとるために高電圧を印加した状態で 検出器内に安定に保持・配置することはそれ ほど容易なことではない。したがって検出器 構造が複雑となり、検出器が大型化するとと もに、安定性やコストの点でも問題がある。 そこで、半導体の加工などに用いられる最新 の微細加工技術を駆使した、ワイヤーを用いな いタイプの検出器であるマイクロパターンガス 検出器(Micro Pattern Gas Detector、以下 MPGD) が考案された。最初のMPGDは、ガ ラス基板上にフォトリソグラフィを用いて陽極 線の代わりをする10 µm程度の幅のストリップ 電極を形成し、やはり基板上に生成した陰極の ストリップ電極を対向し、保持したMicroStrip Gas Counter (MSGC)^[2]である。しかし、MSGC では、放電によるストリップ電極の損傷が起こ りやすく、多くの研究者が開発を断念した。ス トリップ電極は、一部が損傷を受けると大きな 面積が影響を受けるため、放電の影響を局所 的にとどめるようなピクセル型検出器の検討 が次になされた。その一つが、基板に多数の 穴をあけ、穴を通過する電子により電子増倍 を起こさせるMPGDである。本原理を最初に 提案したのは、山形大学のCGPCである[3]。こ れは、Micro Channel Plateなどに使われる、 キャピラリプレートを用いた気体検出器である。

^{*} Hiroyuki TAKAHASHI NPO法人 放射線安全フォーラム 副理事長

フォトリソグラフィにより、多数の細孔をあけて比例計数管として動作させるものが、1997年にCERNのF. Sauliによって開発されたガス電子増幅器(Gas Electron Multiplier:GEM)^[4]である。GEMは薄いカプトン箔を用いた構造からなる安価なデバイスであるが、本構造の多段接続を行うことで、電子増倍を起こした電子を用いて更に高い増幅度を実現させることができることが期待され、国内外の多くの研究者が現在に至るまで本検出器の開発に取り組んでいる。

1.3 GEMの概要

GEMは50~100μm程度の薄いポリイミド(カプトン) 箔の両面を銅で被覆したものであり、直径70μm程度の多数の細孔を持つものである(図1)。この両面の銅電極に電圧が印加されると孔内に強い電場が形成される。入射放射線が気体と相互作用を行った結果生じた電子は、細孔の中に入るとこの電場によって加速され、エネルギーを得て、気体分子との衝突により、電子雪崩による増幅を生じる。GEMは各細孔が独立に動作するため、初期生成電荷の位置分布を保持したまま、信号を取り出すことができ、高い位置分解能を実現することが可能である。また、電子雪崩により生成した電子は、各細孔を抜けた後に更に利用

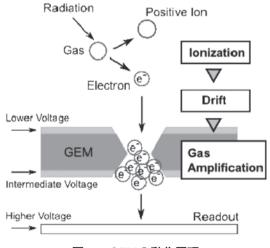


図1 GEMの動作原理

可能な信号を生成するので、信号読み出し部分に更にGEMやその他のMPGDを用いることもできるし、あるいは信号読み出し専用に最適化されたプリント基板を配置することができる。GEM単体の増幅度は数10~数100倍程度であるが、多段接続の原理を用いれば、2段で数千倍、3段で数十万倍の高い増幅度を得ることも可能である。GEMは高エネルギー物理学の分野で生まれた検出器であるが、汎用性があり、中性子検出器として、He-3がス中で原子核反応により生じた荷電粒子の飛跡構造を測定した例^[5] や医療分野でのイメージング、宇宙物理学分野でのX線偏光計測など原理的に幅広い分野で用いられるデバイスである。

1.4 GEMの問題点

従来のカプトン箔を用いたGEMは、薄い構造とカプトン自身の性質に起因する次のような問題点が残っている。

- 1) GEMはポリイミド製のホイルからなる薄く柔らかい構造をしており、検出器内に設置する際にドリフト電場や信号読み出しのために与える電場の影響を受けて、たわみが生じるため、張力を与えて張る必要があり、その際に孔の形状が変化する可能性がある。
- 2) ポリイミドは有機素材であり、封じ切りの カウンターにする場合に、素材自身から生 じるガス (アウトガス) があり、長時間動 作に伴い、計数ガスの純度を下げ、電子 雪崩の性能を落とすなどGEMの動作に悪 影響を及ぼしてしまうものと考えられる。
- 3) GEMの構造は極めて薄いポリイミドを誘電体として銅電極で挟んだコンデンサであり、GEMの裏表間にもつ静電容量が非常に大きくなっており、電圧印加時には局所的に多くの電荷が蓄積された状態となる。したがって、GEMの動作時に放電が生じた際には、この大量の電荷が放出されてGEMの孔をショートさせ大きな損傷を与える危険性がある。

2. Glass GEMの開発

さきに述べたように、GEMは本質的に優れ た気体画像検出器であるが、基板材質である ポリイミドによる問題を抱えている。そこで、 東京大学においては、従来用いられていたポ リイミドの代わりに変形しにくく、アウトガス も少なく安定性に優れたガラス基板を利用し、 更に電極構造を工夫することで、静電容量の 問題を回避することまでを狙った、新たな Glass GEMを考案した^[6]。これにより、従来 のGEMの抱える問題点を解決することを考え た開発を進めている。特に上記の問題を解決 できれば封じ切りのカウンターで長時間の安 定した動作が可能となり、放射線の位置分布 を簡便に得るための気体検出器として、放射 線防護の分野においても広く活用することが できると思われる。

Glass GEMでは、絶縁部の素材としてHOYA 株式会社製の感光性ガラス基板であるPEG3を 用いることとした(図2)。本基板を用いるこ

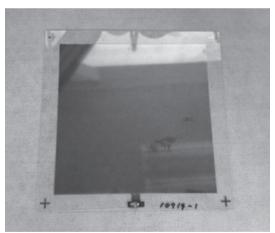


図 2 Glass GEMの外観

とで数 100μ mからmmまでの厚さのガラス基板において、微細な孔をフォトリソグラフィ技術によって精度よく製作することができる。PEG3とポリイミドの物性値の比較は**表**1に示す通りであるが、ポリイミドに比較してPEG3は体積抵抗率が低いため、基板に付着する電荷を効率よく取り除くことができるため、高計数率時におけるガス増幅度の変化を小さく抑えることができ有利である。検出器の静電容量に関しては、例えば大きさ $15 \text{cm} \times 12 \text{cm}$ 、厚さ 400μ mのPEG3ガラスの場合約2 nFの静電容量となる。

基板が変形しにくいガラス素材であるため、Glass GEMはたわみにくい。これは従来のGEMの取り扱いの難しさの問題に対する解決策となる。加えて、有機系の素材であるポリイミドから生じるアウトガスの問題は、無機材料であるガラスを利用するため発生せず、密封したカウンターで長時間動作を行うことに適している。このことは、また、気体を用いた光電子増倍管などの応用分野につながる可能

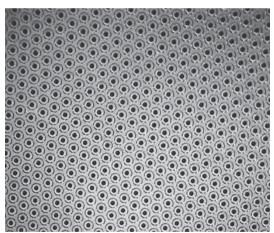


図3 Glass GEMの表面に形成したパターンの例

表1 PEG3とポリイミドの物性値

| | 単位 | 測定条件 | PEG3 | PEG3C% | ポリイミド |
|-------|-------|------|----------------------|------------------------|------------|
| 熱伝導率 | W/m K | 25°C | 0.795 | 2.72 | ~0.3(20°C) |
| ヤング率 | Gpa | | 79.7 | 90.3 | 18.6 |
| 比誘電率 | | 1GHz | 6.28 | 5.26 | 3.55(1MHz) |
| 体積抵抗率 | Ω·cm | 25°C | 8.5×10^{12} | 4.5 x 10 ¹⁴ | ~1018 |

※PEG3を希温加工によって結晶化したもの

性がある。さらに表面がフラットなガラス基板である特徴を生かして、フォトリソグラフィによって自在な金属パターンをGlass GEMに施すことができる。たとえば、微細なガードリングやリム構造を描くことにより、孔周辺に生じる電場を和らげたり、基板に対して直列に静電容量を入れることで蓄積電荷の影響を緩和させ、放電の生じにくい構造をとることも可能であると考えられる。

3. Glass GEMの電場シミュレーション

3.1 解析手法

Glass GEMの孔付近と内部の電場の様子を 調べるためにシミュレーションによる電場解析 を行っている。本解析にはエルフ社のELFIN というソフトウェアを用いた。ELFINでは積 分要素法によるシミュレーションが行われる。 積分方程式をもとにした解析手法は積分方程 式法と呼ばれ、電場解析には境界要素法や磁 気モーメント法などの方法があるが、それらを 統合した汎用的な手法が積分要素法である。 積分要素法ではマクスウェル方程式の積分形 を解くため、空間メッシュを作成する必要がな く、電位勾配の大きな構造におけるシミュレー ション計算に有効であると考えられる。すなわ ち、有限要素法を用いた解析では高い精度を 必要とする部位は多数のメッシュを作成しな ければならないのに対して、積分要素法では 細かなメッシュを作成せずとも高い精度での シミュレーションが原理的に可能である。した がって細かな孔や線といった微細な形状を持 つMPGDの電場解析に有利であると言える。 解析に際しては、Glass GEMの孔1個を模し た3次元モデルを作成し、周期構造をもつも のとしてシミュレーション計算を行った。

3.2 解析結果

上記の3次元モデルに電圧を印加し、ガードリングつきのGEMに関する解析を行った一例を図4に示す(GEMの片面のみを示す)。 曲線は等電位曲線を表しており、明るい部分

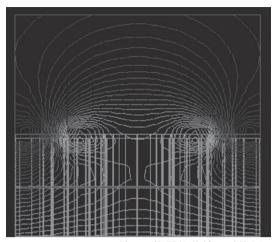


図 4 Glass GEM断面の等電位曲線の計算例

は電位が高く、暗い部分は電位が低い。GEM の孔入口付近で若干電位の勾配が緩和されている様子が見られるが、これによって入口周 辺での放電が抑制されると考えられる。入口付近で和らいだ電位勾配は孔内部で再び急激になり、ガス増幅に対して十分な強さの電場が得られるものと考えられる。

4. 試作したGlass GEMの特性試験

4.1 実験体系

種々のパラメータのGlass GEMを試作し、 それらの特性を評価するために放射線源を用 いて測定を行った。 α 線、 β 線、X線など種々 の放射線に対して、低いガス増幅度から高い ガス増幅度に至る範囲での試験を行った。 実 験体系を図5に示す。検出器容器内にGlass GEMと信号読み取り電極が配置され、Glass GEMの両面と信号読み取り電極の片面に正の 高電圧を印加する。電圧は読み取り電極が最 も高く、次にGlass GEM裏面、表面の順になり、 電子を下方に導くように配置している。容器 内にはアルゴンとメタンの混合ガス(混合比 7:3)を導入し、特性を測定した。実験に 際してはガスを常に流し続けるガスフローに て行った。X線・β線は容器外部から検出器 窓を通して入射させるが、 α線源は容器内部 に配置したシャッターの開閉により線源のON/

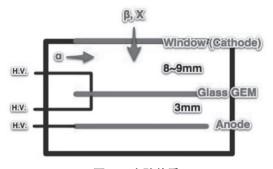


図 5 実験体系

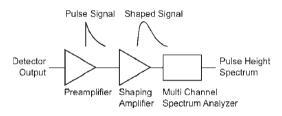


図 6 信号測定系

OFFが切り替えられるような機構を製作し、これを用いて、ガス増幅度を1倍から測定するようにした。

信号読み取り電極であるアノードに生じた信号は、CMOSプロセスを用いて製作した増幅度1V/pCの電荷有感型前置増幅器、波形整形増幅器、波高分析器を用いて測定し、波高スペクトルを記録した。

有感領域100mm×100mmのサイズにおいて、

4.2 Glass GEMの特性評価

様々なパラメータを有するGlass GEMを試作し、それらの特性の評価を行った結果について示す。表2はGlass GEMのパラメータである。まず、図7に印加電圧とガス増幅度の関係を示した。ガス増幅度は各1500~5000程度が得られた。これらは単体のガス増幅度として十分高い値である。図8はGlass GEM#1について、55Fe線源の5.9keVのX線を用いてエネルギースペクトルを取得したものである。有感領域全面への一様照射において18.8% (FWHM)のエネルギー分解能が得られており、増幅度の均一性もよいであろうということが分かった。また、Glass GEMにおいては、基板抵抗が低

表 2 評価したGlass GEMのパラメータ

| Glass GEM | 電極金属 | 厚さ | 孔径 |
|-----------|------|-------|-------|
| #1 | 銅 | 700um | 170um |
| #2 | 銅 | 700um | 140um |
| #3 | 銅 | 580um | 120um |
| #4 | クロム | 580um | 120um |
| #5 | クロム | 420um | 120um |

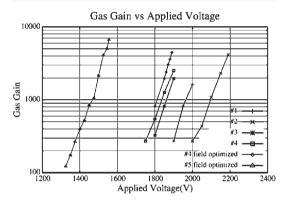


図7 各Glass GEMに関して測定された ガス増幅度と印加電圧の関係

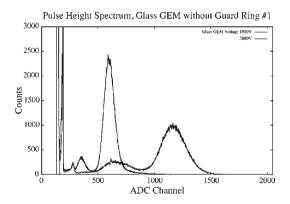


図 8 55FeのX線測定によりエネルギースペクトル

いため、電荷の付着によるゲイン変動の影響も少ないと考えられる。 #5のGlass GEMに関して長時間動作時のガス増幅度の安定性を評価した結果、図9に示すように12時間の測定において安定した挙動を示した。最後に、Glass GEMを1枚のみ用いてX線のイメージングを行った結果を図10に示す。イメージングには電荷分割法の原理を利用し、読み出し電極には、 $10k\Omega/\square$ 以上の面積抵抗をもつITO

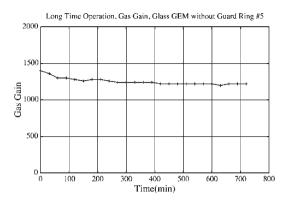
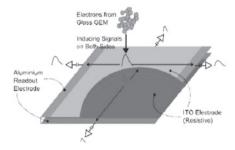
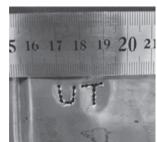


図9 長時間動作時のガスゲインの変動





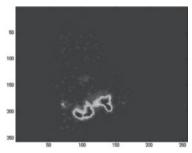


図10 電荷分割法により求めたX線画像 (上:読み出し基板、中央:銅マスク、下:X線画像)

膜を両面に蒸着したガラス基板を用いて、 上下の電極から信号を読みだして位置分布を 得た。概ね0.5mm程度の位置分解能が得られ ている。

5. 結 論

本稿ではHOYA株式会社製の感光性ガラスであるPEG3を用いた気体画像放射線検出器であるGlass GEMの開発について、東京大学においてこれまでに得られた結果について簡単に紹介した。ガス増幅度・安定性など気体検出器としての基本特性については良好であり、電荷分割法によるイメージング結果も得られたところである。今後は更なる大面積化も可能であり、封じ切りのカウンターにより、手軽に放射能分布・放射線分布の得られるような新しいサーベイメータ等の応用が開けるのではないかと考えているところである。

謝辞

本検出器においては、アスペクト比と一様性に優れたガラス基板による3次元構造を用いる必要があり、このための基板試作においてHOYA株式会社の多大なご努力をいただいておりますことを感謝いたします。

参考文献 =

- [1] G. Charpak, R. Bouclier, T. Bressani, J. Favier and Č. Zupanič, Nucl. Instr. and Meth. 62 (1968) 235.
- [2] A. Oed, Nucl. Instr. Meth. A 263, 351 (1988).
- [3] H. Sakurai, T. Tamura, S. Gunji, M. Noma, Nucl. Instr. and Meth. A 374 (1996) 341.
- [4] F. Sauli, Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A 386 (1997) 531.
- [5] F. A. F. Fraga L.M.S Margato, et al, Nucl. Instr. and Meth. A478 (2002) 357.
- [6] H. Takahashi et al., "Development of a new glass Gem with a guard ring", Imaging 2010, Stockholm, Sweden, June 8 - 11, 2010.

著者プロフィール

1987年 東京大学大学院工学系

研究科修士課程修了

1989年 東京大学工学部助手

1993年 東京大学工学系研究科講師

1996年 東京大学工学系研究科助教授

2000年 東京大学人工物工学研究センター 助教授

2005年 東京大学工学系研究科教授、

現在に至る

2012年よりNPO放射線安全フォーラム副理事長

個人モニタリングサービスの歴史(その4)

~ サービスの成長期Ⅱ~

松本 進*

まえがき (前号までの概要)

昭和25年、国内において放射性同位元素の使用が始まり、それが契機となって昭和30年代に放射線管理関係の法令が整備された。時を同じくして、日本保安用品協会がフィルムバッジサービスを開始した。昭和40年代に入って、協会の他にサービス会社が数社設立され、その競争環境の下で、プログラム電卓の導入など、サービスの合理化が緒に付いた。

10. 標準照射施設(昭和47年)

バッジフィルムの乳剤番号が新たな番号に切り替わる毎に、当時の電気試験所大阪支所を訪問し、照射をお願いした。サービス数の増加と共に、照射データの取得頻度も多くなったため、"自分達のデータは自分達で取得しよう"をキャッチフレーズに、照射施設の必要性を上司に訴えていたところ、会社は、茨城



図27 標準照射研究室棟

県大洗町に3千坪の土地を購入し、X線照射装置 ($20\sim140$ keV) と γ 線照射装置 (Co-60200mCi) を備えた大洗研究所を、昭和47年6月に設立した 31 (**図27**)。

11. コンピュータによるフィルムバッジ 事務処理(昭和49年)

入社時の筆者は、技術業務が主であったが 営業所勤務であったため、事務・営業の業務 も行うことがあった。この経験がフィルムバッ ジサービス業務全体を把握するのに役立った。 習い覚えた手法が、10年、20年後においても 通用するのか、品質・コスト・納期の点で疑 問であった。そこで、サービスの合理化手法 に興味を持ち、関係者に聞き、あるいは展示 会等に出向いて見聞を広めたが、納得できる 手法には出会わなかった。

昭和43年と言えば、日本初の超高層ビルとして霞が関ビル(147m)が完成した年であるが、この頃はコンピュータ神様論の風潮もあり、繁華街ではコンピュータ手相占いが流行っていた。また、コンピュータ学校が雨後の筍のごとく大阪市内に開校していた。このような時に何となくコンピュータに関心を持ち、入門書を手にしたが理解できず、結果としてコンピュータの夜間学校に入学(S44/1)し、プログラミングとシステム開発を習得した。

その知識を基に、営業の移動中など時間があれば、システム構築に没頭していた。閃きは顧客訪問時の歩行中に起った(図28)。それ

^{*} Susumu MATSUMOTO 弊社アドバイザー

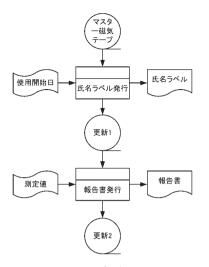


図28 SSN概念フロー

図29 SSN報告書

がきっかけとなり、システムの要件が次々にまとまり、大阪ビジネスコンピュータ(株)の薄井正通社長、(株)滋賀トスバックセンター井門一男会長のご尽力を得て、昭和49年4月からサービスシステムSSN^{32) 33)} が関西で稼動した。その後、"基幹業務は東京で行うべし"との社の方針により、昭和52年4月からは東京にて、日本ビジネスオートメーション(株)本部長・丸山誠一郎氏、SE・佐藤裕一氏のご協力を得て、サービスシステムSSIIを東京で稼動させることができた。このシステム稼動により、報告書(図29)には従来の氏名・使用期間・被ばく線量の報告三要素の他に、線量限度管理用の集積線量等を表示し、サービス品質を一段と向上させることができた³⁴⁾。

12. 線量の測定・管理手法の全国統一 (昭和51年)

図30は、昭和51年3月当時の科学技術庁が発行した「フィルムバッジによる外部被ばく線量管理の手引き³⁵⁾」である。これは、筆者が営業活動中、現場の放射線管理者あるいは従事者から伺った疑問点に対する回答をまとめ、当時の科学技術庁放射線安全課近藤民夫氏に昭和50年の新春に提出したものである。その後、科学技術庁として検討し、マニュアルとして発行するとの連絡を得たのが、数ケ

月後であった。**表13**に示す委員の先生方のご 検討を得て、当の手引きは、放射線取扱主任 者用として、科学技術庁原子力安全局・放射



図30 手引き

表13 手引きの検討にご協力された方

| 有水 昇 | 千葉大学医学部附属病院 |
|-------|---------------|
| 伊藤和男 | 建設省建築研究所 |
| 石原豊秀 | 日本原子力研究所東海研究所 |
| 沼宮内弼雄 | 同上 |
| 三宅敏雄 | 東京芝浦電気㈱ |
| 松本 進 | (社)日本保安用品協会 |
| 安渕四郎 | ナガセ・ランダウア㈱ |
| 竹松 昭 | 産業科学㈱ |
| | |

13. 技術処理の自動処理化(昭和54年)

フィルムバッジサービスの申込書の受付、フィルムの発送、報告書の作成等の事務処理系のコンピュータシステムは昭和49年4月に完成し、稼動していた。技術系の現像・濃度測定・線量計算の自動処理化も、それに做って早い時期に完成を目指したが、多くの課題に阻まれ、困難を極めた。実現できなかったのは、スリムなフィルムバッジを作るために細いバッジフィルムを望んだが、フィルムメーカーの同意が得られず、頓挫した。次に解決すべき課題は、全種類のフィルムバッジの光学濃度を如何に短時間で測定するかであった。これについても外出中に閃き、結果として濃

度計を3台並べ、フィルタの上段、中段、下 段用とすることで解決できた(図31中右)。

開発プロジェクト(廿日岩敏文、今井盟、他)を編成し、当時の石川島播磨重工業株式会社(IHI、土井助次、関野和信、三浦晴夫各氏)のご協力により、FAS(Film badge Full Automatic Service)システム(図32)は昭和54年4月に完成した。これにより、フィルムバッジサービスの全システムが完成した³⁶⁾。

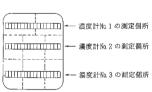
自動現像装置(図31左)では使用液を自動補充し、新鮮な液で、所定の温度・時間で現像処理ができるようにした。また、濃度測定値は測定点の数を増して平均値とした。これらにより、線量の測定精度は飛躍的に向上した。







自動濃度測定装置



濃度測定箇所

図31 フィルムバッジ自動処理システムの現像装置と濃度測定装置

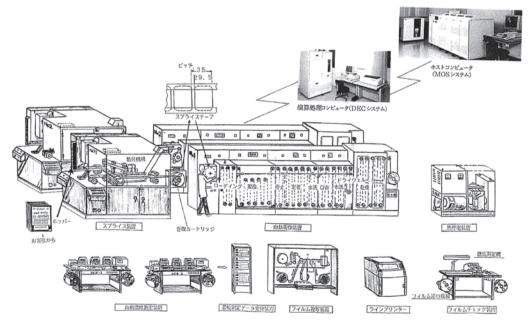


図32 FASシステム概念図

14. 中性子新聞問題(昭和58年)

昭和58年11月19日(土)の毎日新聞朝夕刊 (図33、34) は、フィルムバッジの性能について、 「欠陥あり」、「疑惑あり」と報道した³⁷⁾。

事の起こりは、その2年前の昭和56年7月に 某大学が、シンクロトロンから発生した放射線 を弊社と他社のフィルムバッジに照射し、比較 したことに始まる。 両社とも y 線と熱中性子の 測定値は一致したが、速中性子の弊社の測定値 は、他社に比べて低かった。それに加え、同年8、 9月のシンクロトロン休止中のフィルムバッジ 測定結果に、速中性子線量を報告していた。

某大学から弊社に連絡があり、その後、社 内では対応策を検討していた。速中性子の低 かった原因はフェーディング現象と考え、中性 子フィルムの防湿包装*1)の強化に向け研究開 発中(廿日岩敏文)であった。成果が出る直 前の報道で、真に残念であった。

*1) 当時の中性子フィルムは紙包装であるため、食品包 装用樹脂フィルムで包んで防湿性を持たせていた。

約1月後の12月29日に、科学技術庁から次 の見解が発表された (**図35**)。



図33 毎日新聞 昭和58年11月19日朝刊



図34 同紙夕刊

図35 見解

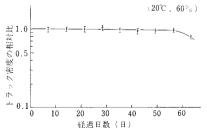
- ①数値のばらつきは、フェーディング現象によ るもので、バッジ自体の欠陥ではなく、取 扱の問題である。
- ②シンクロトロン休止中の問題については、原 因不明としながらも、バッジ会社とユーザ がバッジ使用場所の特殊性など十分に連絡 を取り合い、より厳密な測定を行うように行 政指導する。
- ③通産省(現産業経済省)は、中性子用バッ ジが、IISがないまま使用されていることを 重視し、59年度中にIIS化する。

結果的に社内過失の問題ではなかったが、 対外的信用をより強固なものとするため、いく つかの改善策を実施した。現在でも運用され ているものを次に列挙する。

- ①役所の指導によりフィルムバッジサービス 会社4社にて個人線量測定機関協議会を設 立 (昭和59年2月) し、技術交流の場とした。
- ②研究開発中の窒素ガス封入防湿用の"中性子 フィルムMP型^{38)"} が完成し、実用段階(昭和 59年4月)に入った³⁹⁾。(MP: moisture proof 図36、37)
- ③日本保安用品協会と千代田保安用品㈱(現 (株)千代田テクノル) の業務の棲み分けを明 確にし、協会は業務監査を担当、弊社はサー



中性子フィルムMP型 図36



中MPフィルムの退行特性 図37

ビス業務を担当することになった(昭和60 年4月)。

- ④基準中性子線源(Am-Be 5Ci)を大洗研究所に設置(昭和60年5月)した。
- ⑤固体飛跡検出器を用いた新しい中性子測定 バッジ(ニューピットバッジ)によるサービ スを開始(昭和60年10月)した。
- ⑥技術者の技術品質を一定水準に維持するために資格認定制度を導入した(昭和61年5月)。
- ⑦個人線量測定サービス規約⁴⁰⁾ を制定し、お客さまとサービス会社の責任を明確にした (平成元年4月)。

中性子新聞報道から10年目の平成5年11月19日を期して、この出来事を糧に、より業務品質を向上したいとの思いから、11月19日をフィルムバッジサービス部門の「品質の日」と定めた。以降、部門内では品質改善に関する発表会を毎年実施した。その10年後の平成15年11月からは、会社の方針により、全社の「品質の日」として品質改善運動成果発表会を実施し、今日に至っている。この発表会を通して全社が一丸となり、業務品質向上に邁進している。

15. 中性子用フィルムバッジのJIS化

中性子新聞報道問題において、中性子フィルムバッジの日本工業規格(JIS)が制定されていないことが表面化した。対応策として中性子フィルムバッジのJISを急遽作成することとなり、弊社が原案を提出した。審議を経て昭和61年2月1日に「高速中性子フィルムバッジによる線量当量算出方法JIS Z 4510」(図38)が制定された。その後、数回の改正を行い、



図38 JIS Z 4510



図39 反跳陽子のトラック (NTAフィルム)

表14 高速中性子用フィルムバッジ 改正委員構成表

高速中性子用フィルムバッジによる線量当量算出方法 改正原案作成委員会構成表 (平成元年改正当時) 氏夕 部間 山下久雄 財団法人慶応がんセンター ○ 前田動里 工業技術院標準部 〇 末松恵雄 科学技術庁原子力安全課 資源エネルギー庁 三角逸郎 松村銀仁 労働省労働基準局 本田幸雄 通商産業省機械情報産業局 矮本 宏 社団法人日本放射線技術学会 橋詰 雅 麻布大学 井上武一郎 東海大学 〇 丸山隆司 放射線医学総合研究所 〇 河田 燕 電子技術総合研究所 〇 加藤 朗 東洋公衆衛牛学院 新井 実 財団法人放射線影響協会 〇 大和愛司 動力炉·核燃料開発事業団 東京電力株式会社 〇 久芳道義 三村富雄 関西電力株式会社 〇 西川元之 日本原子力発電株式会社 二字納姓 株式会社東芝 〇 田島雄三 原子カサービスエンジニアリング株式会社 〇 河村正一 社団法人日本保安用品協会 〇 西 健雄 日本原子力研究所東海研究所 斉藤 實 社団法人日本原子力産業会議 千代田保安用品株式会社 〇 松本 進 〇 安渕四郎 長瀬ランダウア株式会社 高村吉彦 富士メディカルシステム株式会社 (事務局) 吉川邦夫 社団法人日本保安用品協会 〇印は、小委員会メンバーを示す。

なお、弊社では、平成12年3月に中性子フィルムバッジのサービスを停止した。

参考文献 =

- 31) 標準照射試験研究室完成
 - フィルムバッジニュース No.45 (社)日本保安用品協会(1972)7
- 32) コンピュータによるフィルムバッジ事務処理
- フィルムバッジニュースNo.42 (社日本保安用品協会(1972)6 33) フィルム・バッジのコンピュータサービスについて(1)~(6) フィルムバッジニュース No.56~61
- (社)日本保安用品協会(1974~1975) 34) 松本進 機械化の歩み
 - 千代田テクノル50th Anniversary (2008) 12p
- 35) フィルムバッジによる外部被ばく線量管理の手引き フィルムバッジニュース 号外 (社)日本保安用品協会(昭和51年3月)
- 36) 松本進 FASシステムのご紹介(上)(下) フィルムバッジニュース No.83~84 (社日本保安用品協会(1979)
- 37) よりよいフィルムバッジサービスのために フィルムバッジニュース No.111 (社日本保安用品協会(1983)10
- 38) 新パック中性子フィルム完成 フィルムバッジニュース No.113 (社日本保安用品協会 (1984) 9
- 39) 高速中性子フィルムバッジの現状
 - フィルムバッジニュース No.119 (社)日本保安用品協会(1985)10
- 40) 個人線量測定サービス規約について フィルムバッジニュース No.147 千代田保安用品㈱(1989)12

「2013国際医用画像総合展出展」のご案内

桜吹雪が風に舞う頃、日本放射線技術学会、日本医学物理学会、日本医学放射線学会が今年も横浜で開催されます。弊社は今年も「国際医用画像総合展(ITEM2013)」に出展いたします。お馴染みの製品をはじめ、放射線治療分野においては新商品のご紹介もいたします。

弊社スタッフ一同、日頃ご愛顧を賜っているお客様にお会いできることを心待ちにしております。お客様のお役に立てる製品の展示をいたしますので、学会へお出かけの際はぜひお立ち寄りください。

展示予定商品

①定位放射線治療装置 : Cyber Knife Radiosurgery System

②放射線治療計画システム : Oncentra Brachy

③放射線治療計画支援システム : Velocity

④前立腺癌放射線治療支援システム : Oncentra Prostate、Oncentra Seeds

⑤放射線治療用QA製品 : Dose View 3D、SuperMAX他

⑥粒子線(陽子線)治療システム : MEVION S250 (薬事未承認品)

⑦核医学/診断装置用QA·QC製品 : Co57フラッドソース

Ge68/Ga68用ドーズキャリブレータ用校正線源他

展示品内容は変更する場合もございます。

開催期間

平成25年4月12日(金)~4月14日(日)

会 場

パシフィコ横浜展示ホール

「弊社ブース: No.416 |

学術大会

会期:平成25年4月11日(木)~14日(日) 第72回日本医学放射線学会学術集会 第69回日本放射線技術学会学術大会 第105回日本医学物理学会学術大会



(担当:医療機器営業部 丸山百合子)

サービス部門からのお願い

4月1日はガラスバッジの交換日です

平素、弊社のモニタリングサービスをご利用くださいまして、誠にありがとうございます。

4月1日はガラスバッジ、ガラスリングの交換日です。

ご使用期間が3月31日までのガラスバッジ(ご使用になっている場合はガラスリングも)は、ご使用期間終了後、速やかに弊社測定センターまでご返送くださいますよう、お願いいたします。

平成24年度の個人線量の集計は、平成24年4月1日から平成25年3月31日までのご使用分が対象です。ご使用になったガラスバッジをすべてご返却ください。

法定管理帳票として「個人線量管理票」を出力いた します。関係法令で定められた線量限度を超えていな いことをご確認ください。

編集後記

●新年度に入り、新たな環境で活動を始める方も多いでしょう。阿武隈山地の山間部では根雪も解けて、本格的な除染作業が始まっていることと思います。福島ではまだまだ寒い日が続きますが、住民の皆さんが安心して帰還することができるよう、関係者の皆様にはご尽力をお願いします。

参頭では、前月号に引き続き、マンモグラフィの安全を支える線量計測について、独立行政法人産業技術総合研究所の田中隆宏様、黒澤忠弘様、齋藤則生様にご解説いただきました。開発に至った経緯と時代背景から、今月号はマンモグラフィ用X線の線量標準を開発するまでの解説をしていただきました。国家標準器の開発から始まって、線量標準の供給体制の構築までの過程で、弊社のガラス線量計も標準供給体制構築のお役に立ったのは何よりでした。

■東京大学大学院の高橋浩之先生には、新しい放射 線画像検出器の解説をしていただきました。基板材 質をポリアミドからガラスに変更することによって、 優れた特性を引き出すことができました。今後は大面 積化を実現することで、今までには無い、画期的な、 放射線分布が判るサーベイメータ等も期待できます。 除染作業現場での線量率分布測定や、放射能汚染率 測定等への応用を考えれば、我々放射線測定器販売 を生業とする者にとっても夢の広がるお話でした。

●個人モニタリングサービスの歴史も4回目に入りました。自前の標準照射施設の完成や、事務処理・技術処理の自動化も懐かしいトピックスですが、私ごとながら、中性子新聞問題は、渦中に入社した私にとっては、その後の配属先にも関係した大きな出来事でした。中性子フィルムの品質管理が大幅に改善され、測定基準もJIS化等により一定の水準が保たれた中での測定業務は、バラツキの無い均一な品質の測定値をお届けするという意味で品質改善の大きなきっかけになりました。反跳陽子のトラックを顕微鏡で何時間も計測する作業は、今更ながら感慨深いものがありました。

FBNews No.436

発行日/平成25 年 4 月 1 日 発行人/細田敏和

編集委員/佐藤典仁 安田豊 中村尚司 金子正人 加藤和明 岩井淳 大登邦充 加藤毅彦 小林達也 篠﨑和佳子 根岸公一郎 野呂瀬富也 福田光道 藤﨑三郎 丸山百合子 三村功一 発行所/株式会社千代田テクノル 線量計測事業本部

所在地/ᡂ113-8681 東京都文京区湯島 1 - 7 - 12 千代田御茶の水ビル 4 階

電話/03-3816-5210 FAX/03-5803-4890

http://www.c-technol.co.jp

印刷/株式会社テクノルサポートシステム