

MPGD を用いた中性子・硬 X 線画像装置開発

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

宇野 彰二

shoji.uno@kek.jp

2011 年 8 月 16 日

1 はじめに

素粒子・原子核実験では荷電粒子を検出するために、ガスを充填した容器内に金属細線を張ったワイヤーチェンバーが、広く一般的に使われてきた。しかし、近年の微細加工技術の進歩にともなって、より計数率が高く、位置分解能のよい Micro Pattern Gas Detector (MPGD) の開発が世界中で行われてきている。MPGD には、Micro Strip Gas Chamber (MSGC) と呼ばれるプリント基板上に微細加工を施してガスチェンバーとして利用するものと Micromesh Gaseous Detector (MICROME GAS) と呼ばれる金属メッシュと読み出し基板とを狭いギャップで配置したものと Gas Electron Multiplier (GEM) と呼ばれる多数の細孔を利用したものがある。現在の世界的な傾向として、MICROME GAS と GEM は、単純な平板 2 次元検出器をはじめとして、Time Projection Chamber (TPC) の読み出し部に利用しようとするなど多くの研究がなされていて、実際に、T2K の ND280 の TPC にも利用されている。日本独自の開発として、MSGC の発展形[1]やキャピラリープレートを使ったガスカウンター[2]の開発も行われている。

従来のワイヤーを使った検出器では、ワイヤーそのものが 1 次元的であるので、どうしても入射位置の測定精度がワイヤーにそった方向とそれに垂直な方向とは違ったものになってしまう欠点がある。一方、MPGD は 2 次元平面内に一様に高位置分解能を得られることから、素粒子・原子核実験だけでなく、広く他の分野への応用も期待されている。ここでは、高エネルギー加速器研究機構の測定器開発室プロジェクトの一環として行っている、MPGD を中性子や硬 X 線の 2 次元画像検出器に応用する例を紹介する。

2 開発した検出器システム

2.1 GEM 検出器

われわれは、MPGD の中でも 10 年ほど前に、欧州合同原子核研究機構 (CERN) のサウリ (F. Sauli) によって放射線検出器として提案された GEM[3] を中心に開発を進めている。この検出器は図 1 に示すように、通常のフレキシブル両面基板 (絶縁体としてポリイミドが使用されていて、その両面

に銅箔が付けられているもの) に多数の細孔をあけ、その両面間に高電圧を印加して細孔内に形成される高電場を利用してガス増幅を行うものである (図 2)。典型的なものでは、

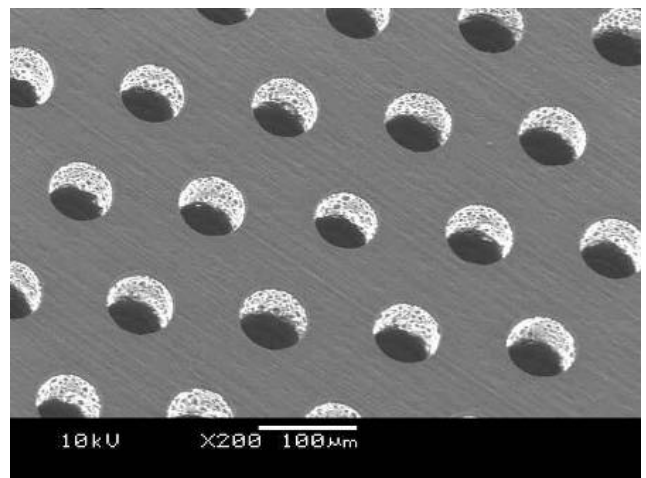


図 1 GEM の電子顕微鏡写真。

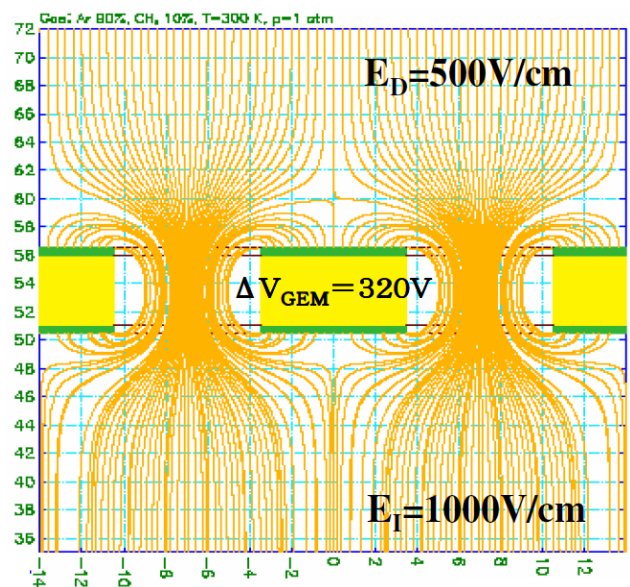


図 2 適当な電圧がかけられた時の電気力線の様子。この図では、GEM の上 (下) の電場が 0.5 kV/cm (1.0 kV/cm) で、GEM の両面の間に 320 V の電圧が印加されている。

基板厚 $50\mu\text{m}$, 孔径 $70\mu\text{m}$, 孔間隔 $140\mu\text{m}$ となっている。その 1 個 1 個の細孔がガス増幅器として動作するので、ワイヤーチェンバーと比較すると遥かに高計数率に耐えられる (1cm^2 当り 10^7 カウント以上)。また、荷電粒子の通過に伴い生成された電子を、電気力線にそってフレキシブル基板の上から下へと通過させることができることから、複数枚を積層にすることによってガス増幅度をより高くすることが可能である。これまでに一つの検出器の中に 3 枚の GEM を組み込むことによって、安定して高いガス増幅度 (10^5 以上) が得られている。CERN では、実際の原子核実験にも使われている[4]。

国内では、東京大学原子核研究センターや理化学研究所が微細加工を得意とする会社[5]と共同で、CERN の製作方法[6](通常の化学エッチング)とは異なるプラズマエッチング[7]やレーザーエッチング[8]の方法を開発し、独自に GEM の製作を行っている。さらに、レーザーエッチングの特徴を活かして、1 枚の GEM でより高いガス増幅度が得られるフレキシブル基板の厚みのあるもの[9](この場合、加工の容易さから絶縁材料として、ポリイミドの代わりにリキッドクリスタルポリマー(LCP)が使われている)や、より高い位置分解能が得られるように、孔径や孔間隔がより小さいもの[8]も製作ができるようになってきている。

2.2 GEM 検出器の基本特性

GEM 検出器を使いこなすためには、その基本特性を知る必要がある。まず図 3 に、測定された ^{55}Fe からの X 線に対するパルス信号を示す。負側に出ているのが、読み出しアノードからの信号で、正側に出ているのが読み出しアノードに一番近い GEM フォイルそのものからの信号である。

見てわかるように、この二つの信号は、正負が違っただけでタイミングを含めて、まったく同じ信号波形を示している。このことから、GEM 検出器からの信号は、最後の GEM

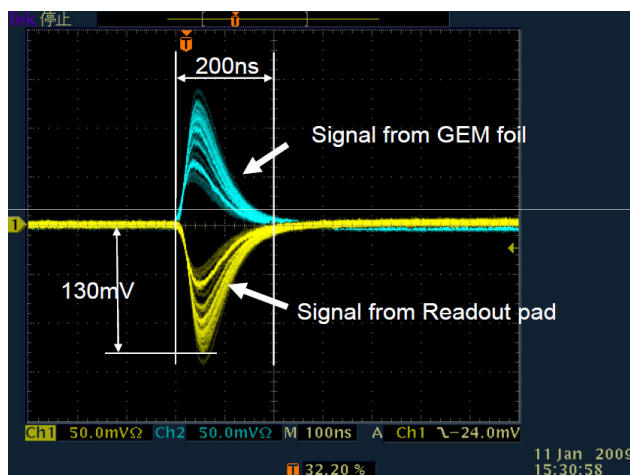


図 3 GEM 検出器からの信号波形。負の信号が読み出し基板からの信号で、正の信号が GEM フォイルからの信号。

とアノード間を電子が移動する様子を見ていると理解できる。決して、電子がアノード電極に到達した様子を見ているのではないことに注意がいる。

また、ワイヤーチェンバーのセンスワイヤーへの印加電圧に当たる GEM 間電圧、TPC のドリフト領域に相当するカソードと最初の GEM との間の領域の電場などいろいろなパラメータに対して、ガス増幅度がどのようにふるまうかを知る必要がある。さらに、アノード上で測定する電荷の拡がりはどうなっているかを知ることは、読み出しストリップやパッドの大きさを設計する上で重要である。それらに関する詳しい測定結果は、参考文献[10]を見てもらうとして、当たり前のことであるが、電子は、電気力線にそって流れ、その拡がりは、ガス中の拡散によって決まっているということである。GEM には孔構造があるが、GEM 間のギャップが孔ピッチや GEM の厚みよりも十分に大きければ、電場によって電子は動くので、GEM の孔のアライメントは気にする必要はないし、孔構造が電子の拡がりに影響はしない。

2.3 検出器システム

この研究紹介では、KEK 測定器開発室で開発している中性子検出器と硬 X 線検出器の 2 種類について述べるが、その検出器システムは共通する部分がほとんどであるので、まずはその共通する部分を説明する。後述する複数のビームテストの結果などは、細かい違いは省略すると、ほとんど同じ検出器構成である。電子回路についても、数年にわたってシステム全体をよりコンパクト化するために改良を重ねてきているので、それぞれのテストで違いがあるが最新のものを説明する。

検出器全体は図 4 の写真に示されたような形状をしており、実際に粒子を捕らえて電気信号を発生する検出器本体部分とそれを読み出す電子回路の部分からなっている。検出器前面は $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ の大きさであるが、内部の GEM の有効検出領域は $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ である。電子回路基板の大きさは $16\text{cm} \times 20\text{cm}$ あり、後述のようにこの 1 枚の基板にすべての読み出し電子回路が組み込まれている。

検出器本体の内部構造は図 5 に示す。これは、中性子検出器の例であるが、基本的な構成は共通である。上からカソードプレートと呼ばれるアルミニウム薄板 (0.2mm 厚)、その下に、荷電粒子変換層と呼んでいる特別な GEM が複数枚(この図では 4 枚)設置されている。一般的に、ガス中における中性粒子の荷電粒子への変換ではその反応断面積から考えると大きな検出効率を得られない。そこで、固体コンバーターを利用することが考えられるが、その場合は発生する荷電粒子の固体中の飛程が問題となる。そこで、薄い固体コンバーターを複数層用意することでこの問題を解決したのが、ここで紹介している検出器の特徴である。

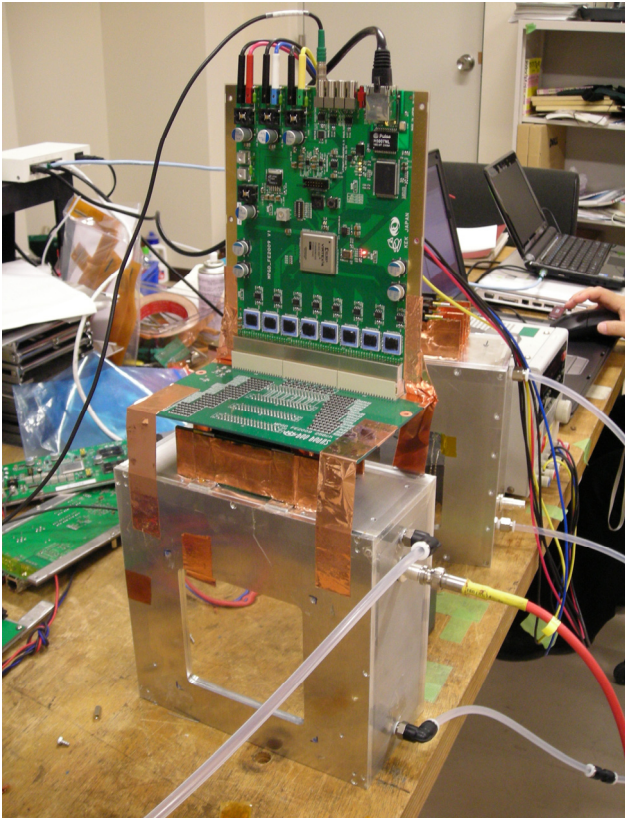


図 4 開発した検出器システムの写真。下部の四角い箱の部分が GEM が内蔵されている検出器本体で、上部に読み出し電子回路が設置されている。

チェンバー内構成

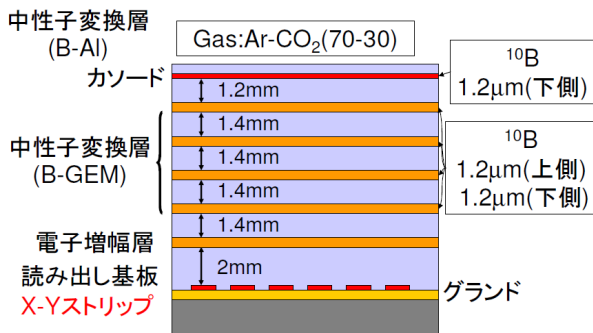


図 5 中性子検出器の GEM や読み出し基板の配置。

最終段に増幅を担う一般的に使われている GEM がセットされていて(図 5 では 1 枚であるが、必要に応じて複数枚使用する場合もある)、一番下にはアノードとなるストリップパターンが配置されている読み出し基板が組み込まれている。カソードプレートに最も高い負の高電圧を印加し、読み出し基板(接地)に向かって、抵抗チェーンによる分圧を利用して、それぞれの場所に適正な電圧が与えられるようにしている。最終的に得られる信号の大きさが、何層目の GEM で荷電粒子に変換されたかに依存しないように、荷電変換層の GEM の有効増幅度は 1 になるような電圧が選ばれていて、最終段の通常 GEM だけが信号を読み出しに必要となる大きな増幅度が得られるようになっている。

読み出しパターンは X と Y が同時に読み出せるように、X ストリップと Y ストリップが配置されている。ストリップ間隔は X, Y とともに 0.8mm で、それぞれ 120 本の合計 240 チャンネルで 10cm × 10cm の領域をカバーしている。もちろん、0.8mm 角のパッドにすれば、より高い計数率まで対応できるのであるが、ここでは電子回路を簡便化するためにストリップで対応している(パッドの場合は 14,400 チャンネル分の電子回路が必要)。ストリップとはいっても単純な形状ではなく、特殊な工夫がされている。0.8mm 角(実際はもう少し小さい)のピクセルを二つの三角形に分け、それぞれの三角形を X と Y に対応させる。そして、それぞれの X 担当部を表面でつないで X ストリップとし、Y 担当部はスルーホール技術を利用して、裏面にもつないで Y ストリップとする。こうすることによって、表面に X と Y のパッド面がありながら、X と Y が交差することなく端までそれぞれがつながっていることを実現している。

各ストリップは、それぞれ後続の電子回路につながっている。信号増幅には ASIC を、デジタル信号処理には FPGA を用いて、大量のケーブルや CAMAC, VME などの大掛かりな電子回路は一切使わないコンパクトな設計となっている。ASIC としては KEK で開発中の FE シリーズ[11]を用いているが、これには信号の増幅、パルス整形、波高弁別の機能があり、1 チップに 32 チャンネル分が組み込まれている。アナログ信号は、選択された 1 チャンネルしか出力されないが、ここではモニターとして利用している。1 枚の読み出し基板にこの ASIC チップを 8 個配置して、256 チャンネル分とし、240 本のストリップの信号を処理している。ASIC からのデジタル信号は、読み出し基板に搭載された FPGA に送られ、デジタル信号処理がなされている。100MHz のクロック信号を用いることにより、信号のタイミング計測、信号の継続時間の測定、X ストリップと Y ストリップの同時性から XY 座標の計算などの処理が行われている。さらに、最後に CPU を介さずに、TCP/IP 規格で通信し、イーサネットケーブルを通して直接 PC にデータを転送する機能[12]も持っている。

チェンバーストリーとして、アルゴンと二酸化炭素を 7 対 3 の割合で混合したものを使用している。この混合ガスは GEM チェンバーには一般的に用いられているもので、不燃性である。比例計数管用ガスとして有名なアルゴンとメタンを 9 対 1 で混合したガスと比較すると多少高め電圧が必要であるが、拡散係数が小さく、GEM をたくさん積層した時に位置分解能への影響が小さくなり好都合である。しかも、高電場でドリフト速度が速いので、GEM チェンバーにおいて信号の立ち上がりが速くなる特徴を持っている。

3 中性子検出器

3.1 開発した検出器の特徴

ここで取り上げる中性子検出器は、主に物性研究に使われる熱(冷)中性子を検出するものであり、茨城県東海村で稼働し始めた大強度パルス中性子源である J-PARC などの実験で利用されるものである。パルス中性子源の場合は、飛行時間法により、中性子の速さ、即ち、波長を知ることができるので、検出器システムが 1 個 1 個の中性子に対して、2 次元位置と飛行時間を同時に精度よく測定できる必要がある。

中性子の入射位置を検出するためには、これまではヘリウム-3 ガスを充填したワイヤーチェンバーが一般的に用いられてきた。その場合、中性子がヘリウム-3 と反応して、荷電粒子である陽子とトリチウム原子核(トリトン)が生成されることを利用しているが、われわれは、ボロン(ボロン-10 を 99% 以上に純化したもの)を GEM の表面に付加することによって、中性子を荷電粒子であるアルファ線とリチウム原子核に変換して、それをガス中で捕らえる方法をとっている。反応によって放出されたアルファ線(または、リチウム原子核)はボロン内での飛行が $1\mu\text{m}$ 程度と非常に短いために、ボロン層をそれ以上厚くしても検出効率は向上しない。せっかく中性子がボロン内で荷電粒子に変換されても、その荷電粒子がボロン内で止まってしまって、ガス中に飛び出さなくては意味がないのである。そこで、検出効率を上げるためには、薄くボロン付加した GEM を多数重ねる必要がある。中性子がボロンでアルファ線に変換され、それがガス中を通過することによって電子が生成される。その電子は、形成されている電場によって、いくつかの GEM を通過しながら、最終段の GEM まで導かれる。最後に、電気信号として取り出せるまでガス増幅されて、その下に配置した任意の形状の陽極パターンで読み出しを行う。具体的な検出器本体の内部構造は図 5 に示すように、上からカソードプレートと呼ばれるアルミニウム薄板(0.2mm 厚)の片面にボロンが $1.2\mu\text{m}$ 付加されたものがあり、その下に、両面にボロンが $1.2\mu\text{m}$ ずつ付加された GEM が 4 枚設置されていて、全体のボロンの厚みは $10.8\mu\text{m}$ になっている。最終段に、厚みが $100\mu\text{m}$ ある GEM が 1 枚セットされていて、一番下には陽極となるストリップパターンが配置されている読み出し基板が組み込まれている。

このような中性子検出器は、以下のような特徴を持っている。(1)中性子は固体のボロンで荷電粒子のアルファ線に変換されるので、チェンバーガスとしてヘリウム-3 ではなく、安価なガス(たとえばアルゴン)を主体とすることができる。しかも、大気圧で使用できるので、検出器の壁を薄く作ることが可能である。(2)信号を読み出すための陽極用基板がガス増幅を起こさせる GEM から独立しているので、

読み出し形状を自由に選択できる。(3)高い位置分解能と高い時間分解能が得られる。(4)使用している材質が原子番号の小さいものだけであるので、ガンマ線に対して不感である。(5)高い計数率まで耐えることができる。

このような中性子検出器はドイツ[13]でも開発が進められているが、今のところ未だ実際の実験には使用されていない。

3.2 中性子ビームによる基本特性

中性子を出す放射線源を利用した基本実験からボロンの厚みを増すと検出効率が増加し、その GEM を重ねるとさらに検出効率が増えるなどの結果が得られている。それらを踏まえた上で、研究原子炉から得られる単色化された中性子ビームを用いて、検出効率や位置分解能などの基礎データを取得し、良好な結果が得られた[10]。ここでは、この検出器の特徴を活かしたパルス中性子源でのビームテストの結果を示す。

図 6(a)は、J-PARC の BL21 のビームライン上に検出器を設置して得られたビームプロファイルである。2 次元位置情報が得られていることがわかる。さらに、図 6(b)は、同時に得られる中性子ビームの波長分布である。加速器からのビームがターゲットに入射された時間を基準として、中性子を検出するまでの時間を計測することによって、1 個 1 個の中性子の速度(波長)を計算している。また、ピンホールなどを利用して、半値全幅で 1mm 程度の位置分解能が得られることも確かめられた[14]。このように、開発した中性子検出器システムは、2 次元位置情報と飛行時間を同時に精度よく測定できることが示された。

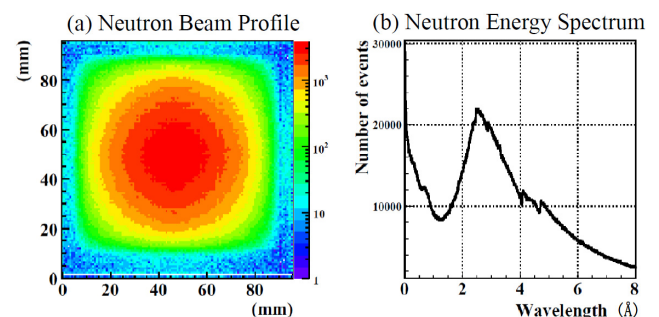


図 6 J-PARC の MLF 棟 BL21 ビームラインでのビームプロファイルと(b)波長分布。

3.3 中性子波長別ラジオグラフィへの応用

このシステムを使って色々な試験がなされているが、その中でここでは最も注目されている例を紹介する。それは、波長別中性子ラジオグラフィといわれるもので、X 線ラジオグラフィのような単なる吸収画像をとるだけでなく、パルス中性子源を使って、吸収断面積を波長別に測定できる

ことを有効利用して、より深い情報を得ることを可能にしたものである。ここでは2種類の応用例を示す。

一つ目が、共鳴吸収を利用して原子別に吸収画像を得ようとするもので、比較的波長の短い領域(1Å以下)を利用している。各原子は、それぞれ特定のエネルギー(波長から換算できる量)の中性子に対して、吸収断面積が大きくなる(共鳴吸収)。それを利用して、そのエネルギーをもった中性子だけを抜き出して吸収画像を取るとその原子だけを際立たせてラジオグラフィを行うことができる。よいデモンストレーションとして、図7(a)のようなユーロコインと小判を開発した検出器の前面にセットして中性子ビームを照射してみた。金の共鳴吸収エネルギーに相当する中性子だけを抜き出して、試料の有無でビーム強度がどう変化するかを調べたものが図7(b)である。図からわかるように、小判の部分だけがよいコントラストで浮き出ている。これにより、この小判は一樣に金を含んだ本物の小判であるが、ユーロコインは金色はしているものの金が含まれていないことがわかる。

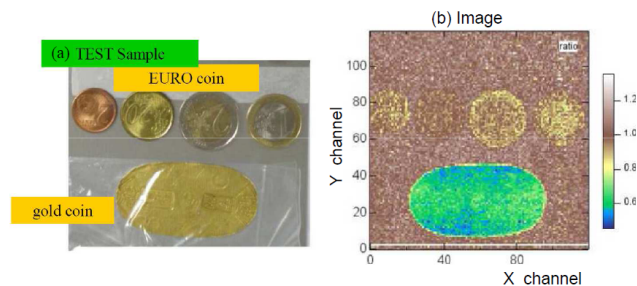


図7 中性子の共鳴吸収を利用したラジオグラフィ。(a)試験サンプルとして検出器前面におかれたユーロコインと小判。(b)金の共鳴吸収に対応する波長の中性子だけを利用して得られた画像。

二つ目の例が、金属(ここでは鉄)の微細構造を画像化することである。金属といえども単結晶として扱える微小単位が存在し、それを結晶子と呼ぶ。結晶子内では結晶面で中性子が散乱するので、吸収断面積を波長別に調べると急激に変化する特徴があり、そこをブラッグエッジと呼んでいる。試料を置いたときのこのブラッグエッジ付近の吸収断面積の変化の様子は、試料内の結晶子の特徴を表している。そこで、試料として、曲げた鉄板を用意した。曲げ方を変えた数種類の鉄板を開発した検出器の前面に設置して、中性子ビームを照射してデータ収集を行った。ブラッグエッジ付近の波長別吸収断面積からピクセル毎に結晶子サイズをフィットして求めた結果が図8である。図からわかるように、曲げられた部分で結晶子サイズが小さくなっている。さらに特質すべき点は、見掛け上は同じ形状をしていても、曲げ戻した鉄板の結晶子サイズは小さいままであることがきれいとらえられている。詳しい計算方法や溶接部の解析例などは参考文献[15]に記載されている。

Bended iron plates

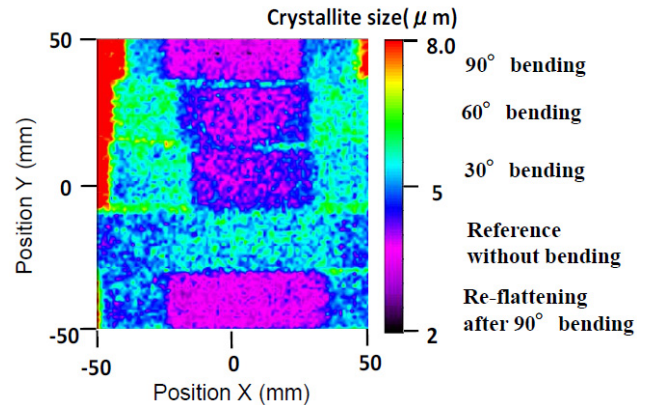


図8 5枚の長さ100mm、幅20mm、厚さ5mmの鉄板をサンプルとして中性子ラジオグラフィを行った例。上から3枚は、紙面に垂直な方向に図中に示された角度で曲げたもの。4枚目は、曲げていないフラットなもの。5枚目は、90度に曲げた後、元のフラットな状態に戻したもの。図は、中性子に対するブラッグエッジ付近の吸収断面積の波長依存性から0.8mmピクセルごとに結晶子サイズを計算して、画像化したもの。

このように、開発した中性子検出器を用いることによって、数ミクロンという結晶子サイズを96mm角という広い範囲で画像化するという画期的な結果を得ることに成功した。

4 硬X線検出器

硬X線は軟X線と比べるとはるかに透過力が高いので、重い物質内部の構造解析やコンクリート内の鉄筋の様子を調査するなどの非破壊検査に役立つ。しかし、硬X線は、透過力が高いとの利点とは裏腹に検出することが難しい。一般に、X線検出で高感度にするために、Xeガスが用いられるが、ここでは、金をGEMの表面に付加することによって硬X線を電子に変換してから検出する方法を取っている。このことによって、高価なXeガスを使う必要がなく、しかも、より高いエネルギーの硬X線にまで対応することが可能である。その上、前述の中性子検出器のポロンを金に代えただけで、まったく同じシステムを利用することが可能である。また、薄く金を付加したGEMを複数枚積層にすることによって、高い検出効率を得ようとするところも同じである。このような検出器は、検出効率は結晶型シンチレーターには劣るが、容易に高位置分解能が得られるメリットがある。

実際に、金を付加したGEMを製作して、硬X線検出器として動作することの確認を行った。3μmの金を片側に付加したドリフト面を1枚と両面に金を付加したGEMを4枚積層にすることによって、検出効率の向上を図っている。1万倍程度のガス増幅を得るために、100μm厚と50μm厚の2枚のGEMを増幅段に利用している。ここで違う厚みのGEMを利用しているのは、厚みを変えて実験をした結

果をもとにしているのであるが、1枚目は有効にガス増幅度を稼ぐために厚めのものを使用し、2枚目は放電の起こる頻度から選んでいる。

製作した試作器の性能を調べるために、医療用のX線発生装置を用いたX線照射試験を行った。用いられたX線発生装置の管電圧は120keVで、管電流は1mA程度である。鉛板スリットを用いることによって、図6と同様な2次元画像は容易に得ることができた。また、直径0.5mmのピンホールを利用して、位置分解能を評価すると中性子検出器と同様に半値全幅で1mm程度であることもわかった。図9は、厚さ10mmの鉄板に9つの深さの違った直径6mmの穴をあけたものの吸収透過画像である。9つの穴の場所で透過量が大きくなっている様子がわかり、1mmの深さのものまで明瞭に認識できる。このことから、鉄管の磨耗状態を使用状態のまま非破壊検査できることが分かる。

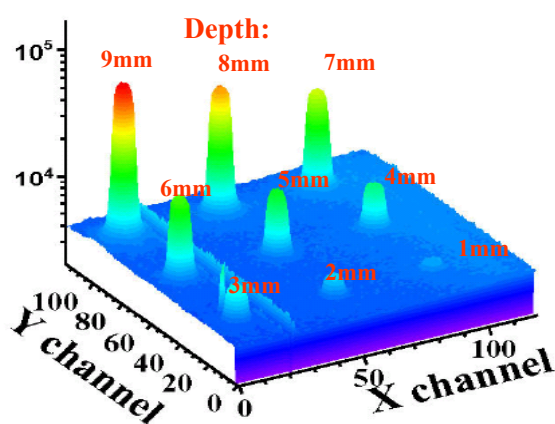
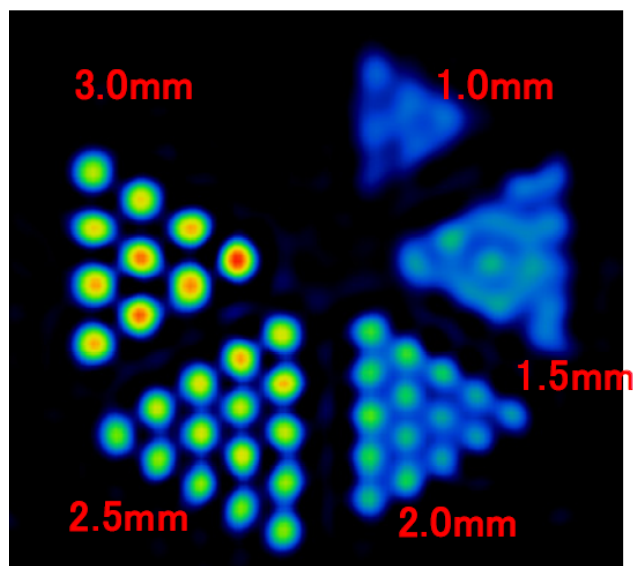


図9 厚さ10mmの鉄板に深さの違う穴をあけ、硬X線ラジオグラフィを行い得られた画像。

同じシステムをガンマカメラにも応用する試験も行っている。2個のガンマ線を捕らえる陽電子断層撮影法(PET)はよく知られているが、1個のガンマ線に対しても同様なことができるガンマカメラという装置もある。残念ながら既存の装置では、その位置分解能が悪いため利用範囲が制限されている。われわれが開発している装置は位置分解能がよいので、ピンホールカメラの原理を利用して1個のガンマ線しか放射しない放射線源の分布を画像化するものである[16]。ここで利用する放射線源は、この分野でもっとも利用されている ^{99m}Tc である。そこから放射されるガンマ線のエネルギーは141keVと比較的低いので、硬X線検出器をそのまま利用している。図10に得られた画像の例を示す。これは、穴径と穴間(端と端)が同じになるように並べられた多穴内に液状放射線源を入れたものである。2mm程度まで各穴が分離して見え、既存のものよりよい位置分解能が得られることがわかった。検出効率の改善などまだまだ改良すべき点はあるが、ガスチェンバーの利点である安価で高位置分解能が得られるシステムを目指している。



GEM-type Gamma camera

図10 図中に示された穴径の穴に入れられた液状の放射線源(^{99m}Tc)から放射された141keVのガンマ線を捕らえて画像化したもの。

5 まとめ

素粒子・原子核実験用に提案されたワイヤーチェンバーに代わる新しいガス放射線検出器の一つであるGEMを利用した中性子・硬X線画像検出器の開発状況を紹介した。読み出し電子回路全体を含んだコンパクトな検出器システムの試作器ができ上がっていて、さまざまなテストの結果から、ビーム強度が飛躍的に増大することが期待されるJ-PARCでの中性子実験などに有望な検出器であることが示されてきている。今後は、残された課題を解決しながら、実際の実験に利用されることを期待している。

6 謝辞

ここで紹介した検出器システムの開発は、高エネルギー加速器研究機構の測定器開発室のプロジェクトとして進められており、その室員をはじめ、レビュアーの日頃からの適切な助言に感謝いたします。また、これまでに共同利用でKEKに来ていた数多くの大学院生の活躍なくして、この開発研究はここまで推進できなかったことはいまでもありません。合わせてここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 谷森達, 越智敦彦, 西勇二: 日本物理学会誌 55 (2000) 420.
- [2] 櫻井敬久, 門叶冬樹, 郡司修一: 日本物理学会誌 62 (2007) 337.
- [3] F. Sauli: Nucl.Instr. and Meth. A 386 (1997) 531.

- [4] B. Ketzer, *et al.*: Nucl. Instr. and Meth. A **535** (2004) 314.
- [5] サイエナジー株式会社 : <http://www.scienergy.jp>
- [6] The Gas Detectors Development Group in CERN:
<http://gdd.web.cern.ch/GDD/>
- [7] M. Inuzuka, *et al.*: Nucl. Instr. and Meth. A **525** (2004) 529.
- [8] T. Tamagawa, *et al.*: Nucl. Instr. and Meth. A **560** (2006) 418.
- [9] S. Uno, *et al.*: Nucl. Instr. and Meth. A **581** (2007) 271.
- [10] S. Uno: KEK Proceedings 2009-12 P120-129.
- [11] Y. Fujita, *et al.*: 2007 IEEE NSS N15-19.
- [12] T. Uchida: 2006 IEEE NSS CR N33-6, p1411.
- [13] M. Klein: <http://www.physi.uni-heidelberg.de/physi/cascade/index.html>
- [14] H. Ohsita, *et al.*: Nucl. Instr. and Meth. A **623** (2010) 126.
- [15] H. Sato, *et al.*: Materials Transactions Vol.52 No.06 (2011) pp.1294-1302.
- [16] T. Koike, *et al.*: Nucl. Instr. and Meth. A **648** (2011) 180.