

MPGD プロジェクト

宇野 彰二

1. はじめに

最近の高エネルギー実験や原子核実験では、高粒子密度や高バックグラウンド環境下でよりよい性能を得るために、より高い計数率に耐えられて、よりよい位置分解能が求められている。そこで、最近の微細加工技術の発展と相まって、新しいガス放射線検出器が開発されつつある。このグループでは、Micro Pattern Gaseous Detector (MPGD) の1つである Gas Electron Multiplier (GEM) の開発を中心に行ってきた。GEM は、10年ほど前に、CERN の F.Sauli(1)によって提案された放射線検出器で、図1に示すような市販の両面フレキシブル基板に多数の細孔が開けられたものである。絶縁体が $50\mu\text{m}$ 厚のポリイミドで、銅箔の厚みが $5\mu\text{m}$ 、孔径が $70\mu\text{m}$ 、孔ピッチが $140\mu\text{m}$ のものが標準である。このフォイルの両面間に高電圧を印加すると、図2に示すように、通常のワイヤーチェンバーのセンスワイヤー近傍のような高電場が孔内に形成され、これを利用してガス増幅を行う。多数の孔がフォイル上に一様に広がっていて、それぞれの孔がガス放射線検出器として働くので、高計数率に耐えられ、2次元的に一様な性能が得られる。この特徴から画像データが得られ、いろいろな応用が期待されている。これまでに、GEM 検出器の動作に関する基本パラメーターの測定や電子回路を含めた検出器システムの開発やその応用を試みてきたので、その開発状況の報告を行う。

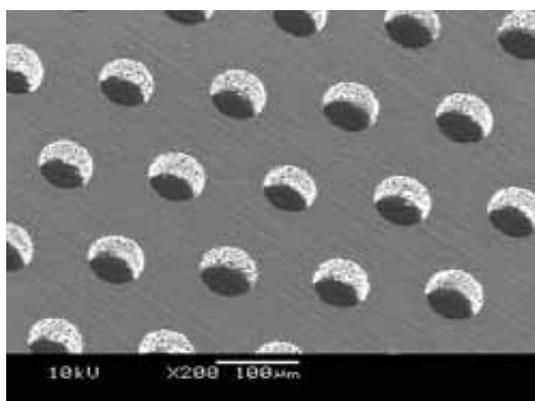


Fig.1 Photo of GEM foil taken by an electron microscope.

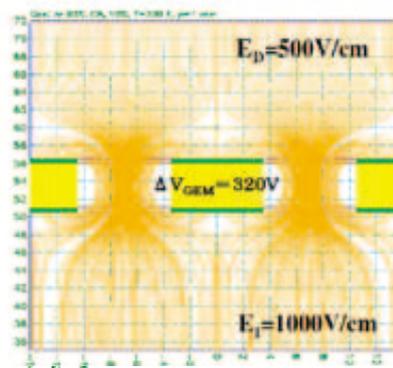


Fig.2 Electric field.

GEM は、CERN などで化学エッチング法(2)によって作られてきた。最近、日本の会社(4)で CERN とは違うプラズマエッチング法(3)により GEM が作られた。また、より放電を少なくするために、レーザーエッチング法(5)との組み合わせによって、同じ会社により新しい GEM が製作されるようになってきた。我々のグループで使われている GEM はすべてその会社から購入したものである。さらに、新しい製作方法により、厚手の GEM ($100\mu\text{m}$ 厚など) も製作可能になり、少ない枚数でより高いガス増幅度得るのに役に立っている。その GEM の場合、ポリイミドの代わりに新しい材料 Liquid Crystal Polymer (LCP)が使われたり、孔径が少し大き目 ($90\mu\text{m}$) のものを使ったりしている。

開発の流れとして、まず、チェンバーの基本動作を理解するための測定を行った。それには、さまざまなパラメーターに対するガス増幅度の測定と読み出しパターンを決める上で重要なパラメーターである電荷分

布の測定を行った。次に、実際の粒子を測定するための検出器の開発を進めている。その方針は、できるだけ開発室の他のグループと協力して、そこで開発した（または、しようとしている）ものを利用しようとしている。また、できるだけ簡単なものからはじめて、開発が進むのに従ってより難しいものへと発展しようとしている。具体的には、GEM そのものに関しては、厚みは、標準的な $50\mu\text{m}$ 厚のものからはじめ、別の厚みのものを製作、テストする。現在では、 $100\mu\text{m}$ 厚のものを定常的に使用している。大きさは、 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ を標準としてテストを行ってきた。今は、 $20\text{cm}\times 20\text{cm}$ のもののテストを開始しようとしている段階である。読み出しパターンは、電子回路の関係から XY のストリップを用いることによって、2次元位置情報を得ている。パッド読み出しに関しては、今後、電子回路の多チャンネル化に合わせて、徐々に進めていく方針である。ストリップピッチは、最初は、 1.6mm であったが、現在は、 0.8mm である。今年度中には、 0.4mm ピッチを手掛けることができると思っている。ピッチサイズと相関しているが、読み出し電子回路は、最初は、ハイブリッドアンプを並べていたが、現在は、8ch の ASIC を利用している。今後は、32ch ASIC へと進みたいと考えている。データ収集システムも CAMAC を用いたものから初めて、今では、FPGA を利用した CPU 無しの TCP/IP プロトコル (SiTPC) で高速データ転送を行うシステムである。今後は、これを並列化してスケールアップしたいと考えている。検出する粒子は、ガス増幅度がさほど要求されない初期電子数の大きなものからということで、最初は中性子（ボロンとの反応で発生するアルファ粒子）、次は、X 線、それから高速の荷電粒子、最後は紫外線（1 個の電子）までも検出すること考えている。現在までのところでは、中性子検出器、X 線検出器に関しては、あとで示すように成果があがりつつある。今後は、高速の荷電粒子の検出にも力を入れていきたいと思っている。

2. 基本パラメータの測定

2.1 ガス増幅度

高い増幅度で安定に動作させるためには、一般的に 3 層構造をとることが多い。その場合、チェンバーを動作させるのに多くのパラメータがある。そこで、図 3 に示すような 3 層構造のテストチェンバーを製作して、それぞれのパラメータに対してガス増幅度がどのように変化するかを Fe-55 からの 5.9keV の X 線を利用して測定した。GEM チェンバーでは、図に示されているように、それぞれのギャップを DRIFT、TRANSFER、INDUCTION と呼ばれている。図 4 に GEM の表裏に印加された電圧に対してガス増幅度がどう変化するかを示している。この図では、3 枚の GEM に同じ電圧が印加されている状態であるが、通常のワイヤーチェンバーと同様に、印加電圧に対して、指数関数的にガス増幅度が大きくなるのがわかる。

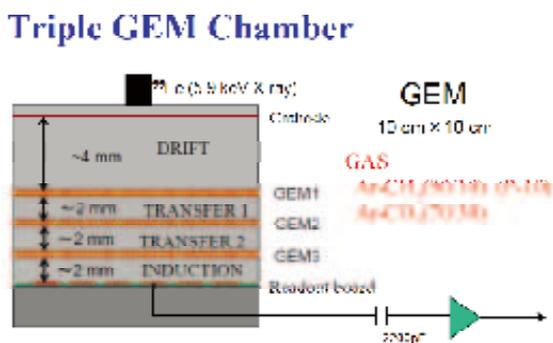


図 3 3 層 GEM 構造

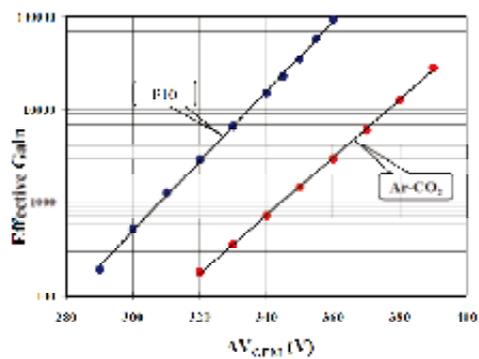


図 4 ガス増幅度の μVGEM 依存性

図 5(a)に DRIFT 領域の電場に対するガス増幅度の変化が示されている。低い電場領域では、ほとんど一定であるが、電場が高くなるとガス増幅度は低下する。それは、DRIFT 領域で生成された電子が GEM に向かって移動する際に、図 2 の電気力線からわかるように、電場が高すぎると電子が孔に入らずに GEM の表面に到達してしまう割合が増えてくるからである。よって、発生した全電子を収集するためには、DRIFT 電場は低目の方がいいことがわかる。図 5(b)に INDUCTION 領域の電場に対するガス増幅度の変化が示されている。電場が高くなるにしたがって、ガス増幅度が大きくなる。それは、図 2 からわかるように、INDUCTION 領域の電場があまり弱いと孔内で増幅された電子の一部が GEM の表面に戻ってしまって、読み出し基板の方へ流れる割合が減るからである。電場がある程度以上になると今度は INDUCTION 領域でガス増幅が始まり、急激なガス増幅度の増加がみられる。図 5(c)には、TRANSFER 領域の電場依存性が示されている。この領域は 2 枚の GEM に挟まれているので、ガス増幅度の振る舞いは、DRIFT 領域と INDUCTION 領域の両方の特徴を兼ね備えている。図 5(d)には、INDUCTION 領域のギャップ長を変えたときにガス増幅度がどうなるかを示している。図からわかるように基本的には、ガス増幅度は電場だけにより、ギャップ長には寄らないことがわかる。ただし、あまり短いギャップ長の場合（特に、0.5mm）は、急激なガス増幅度の増加がみられる。これは、孔径、孔ピッチに比べて、ギャップ長が十分に小さくなく、孔付近の電場も変化するためだと思われる。これらの性質は、CERN GEM を利用したものと同様である(7)。さらに詳しい測定データは、修士論文(8)にまとめられている。

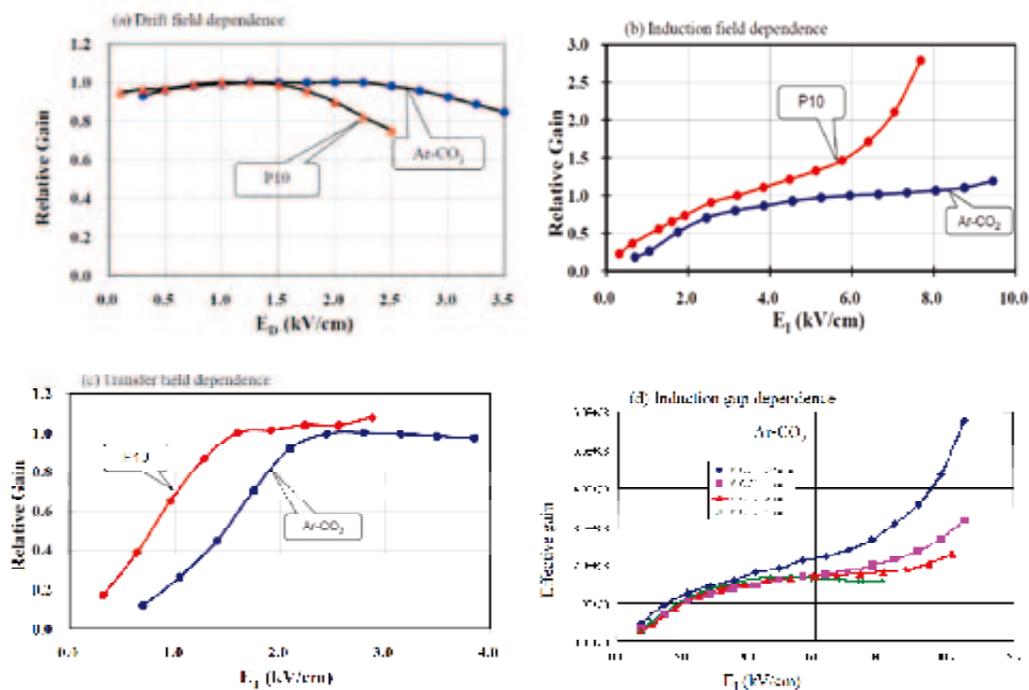


図 5 各場所の電場を変えた時のガス増幅度の変化

2.2 電荷分布

読み出し基板上での電荷分布は、検出器を設計する上で重要な項目である。そこで、図 3 に示すような 3 層構造のテストチェンバーに細かいピッチのストリップが配置された読み出し基板を組み込んで、電荷分布を測定した。ここでは、測定を簡便にするために、ガス増幅度の測定と同じ Fe-55 からの 5.9keV の X 線を用いて行われた。読み出し基板には、0.1mm 幅、0.1mm ギャップ（つまり、0.2mm ピッチ）で長さ 50mm の 64

本のストリップが真ん中に配置され、他の部分は接地してあるものを用いた。ストリップのからの信号は、ハイブリットアンプで増幅された後、30m のケーブルを通して電荷積分型 CAMAC-ADC で電荷量を記録した。測定された典型的な電荷分布が図 6 に示されている。このような分布をガウスフィットして、そのシグマを電荷の拡がりとして定義してこれからの議論を行う。図 7 は、拡がりの 2 乗をギャップを変えながら測定した結果である。2 種類の混合ガスに対して、いずれも線形性があるので、電荷の拡がりには、ガス中を移動する際の拡散が大きく寄与していることがわかる。GEM の孔構造などは考慮されていない単なる平行電場が仮定されている Magbolts(9)によるシミュレーション結果も図中に示されているが、データとよく一致していると言える。アルゴンと二酸化炭素の混合ガスに対しては、少しのずれが認められるが、これは、かなり小さな拡がり (0.2mm 以下) となっているので、ストリップピッチ(0.2mm)やガス中での電子の飛程 (0.1mm) が影響していると考えられる。さらに、詳しい解析方法やデータに関しては、修士論文(10)を参照してもらいたい。

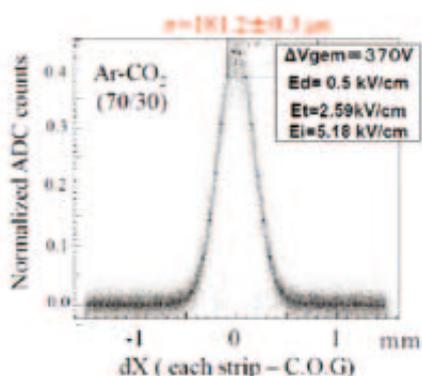


図 6 典型的な電荷分布

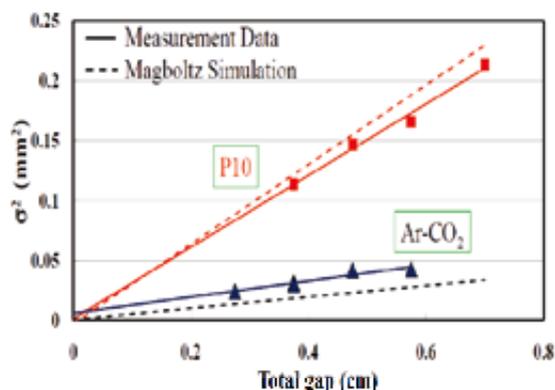


Fig.7 全ギャップ長に対する電荷分布の拡がり具合

3. 中性子検出器

3.1 測定原理と検出器システム

GEM を実際の検出器として使う応用例として、J-PARC のようなパルス中性子源における熱(冷)中性子を検出するガス中性子検出器の開発を行ってきた。ここでの測定器は、2次元位置情報は、散乱する角度を測定する上で重要であり、また、飛行時間から中性子の波長を求めるために時間の測定も同時に行う必要がある。中性子の検出には、GEM の表面にボロン-10 を付加して行っている。中性子は、ボロン層で反応して、荷電粒子(アルファ粒子やリチウム原子核)が生成される。その荷電粒子が、ガス中を通過することによって、中性子の入射位置や時間を測定できる。発生した荷電粒子のボロン内での飛程が非常に短いので、ボロン層の厚みを増やしても、検出効率は上げることができない。そのため、高検出効率を得るためには、薄くボロンを付加した GEM を多数、積層する必要がある。このような構成の中性子検出器は、以下のような特徴を持っている。(1)中性子を検出するための高価なヘリウム-3 ガスを使用しなくてもよく、そのために圧力容器もいらぬ。(2)読み出しパターンを自由に選択でき、2次元読み出しが可能である。(3)よい位置分解能、よい時間分解能が得られる。(4)原子番号の大きな物資を使用していないので、バックグラウンドとなるガンマ線に対して不感な検出器になる。(5)高い計数率に耐えられる。

製作したテストチェンバーには、2種類の GEM が使われていて、ボロンは、50 μm 厚の GEM の両面に付加されていて、ボロンが付加されていない 100 μm 厚の GEM も 1 枚使用されている。また、カソードプレートとしてボロンを片側だけに付加したアルミ薄板を組み込んでいる。ボロンは、中性子と反応しやすいボロン-10 を 99%以上濃縮したものを利用している。

それぞれのボロン層の厚みは、1.2 μm であるが、基本テストのためだけに別の厚みのものも使用している。

ボロン GEM への印加電圧は、有効ガス増幅度が 1 になるようにしている。一方、100 μm 厚 GEM には、信号が現在の電子回路で測定できるように、ガス増幅度が 100 程度になるような高電圧が印加されている。読み出し基板には、それぞれ 0.8mm ピッチの X ストリップと Y ストリップが 120 本ずつ配置されていて、96mmx96mm の範囲をカバーしている。信号の増幅、整形、波高弁別には、開発室の ASIC グループが開発した ASIC チップ(12)を使用している。その 1 チップに 8 チャンネル分あり、それを 1 つの基板に 8 個を配置することによって、1 基板で 64 チャンネル分、この基板 4 枚で 240 本のストリップの信号を処理している。FPGA の配置した基板に 240 本分の信号を集めて、X-Y のコインシデンスなどのデジタル処理を行い、最後は、CPU 無しで TCP/IP の通信プロトコルを利用して、イサネットケーブル 1 本で直接 PC に高速にデータ転送を行っている(13)。

電子回路は、図 8 に示すように GEM チェンバーの背後にコンパクトにまとめられているので、積み重ねることで、検出領域を容易に拡張できるシステムになっている。

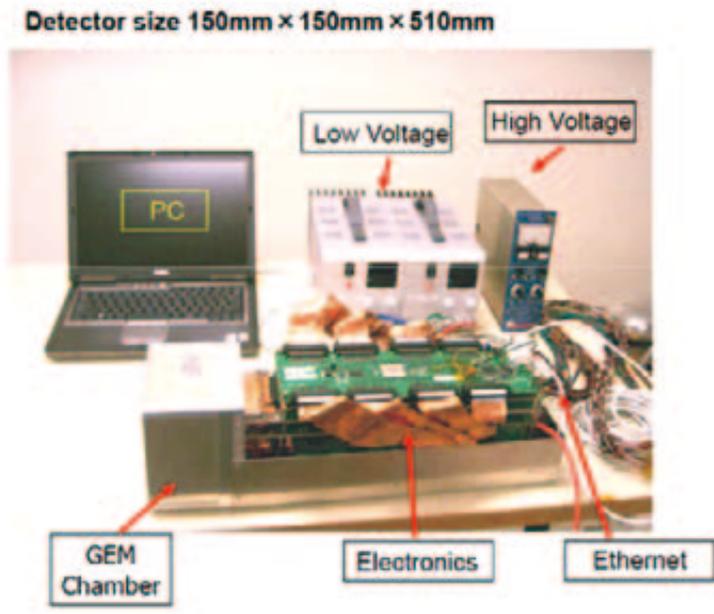


図 8 可搬型コンパクト検出器システム

3.2 放射線源によるテスト

まず、放射線源 Cf-252 を使って原理検証試験を行った。放射線源からの出る中性子のエネルギーは、熱中性子と比較するとかなり高いので、ポリエチレンブロックを利用して、エネルギーを下げることを行ってテストした。まず、最初に、ボロンを付加した GEM を 1 枚だけ検出器の中に入れて、ボロン層の厚みの違いで検出効率がどうなるかを調べた。測定結果は、図 9(a)に示すように、ボロン層の厚みに比例して、測定計数が増えているが、2 μm でかなり飽和現象が見られる。Simulation によれば、3 μm で完全に飽和することが予想

されている。中性子とボロンとの反応で発生するアルファ粒子の飛程は、ボロン層内でもかなり短いので図9(a)のような飽和現象が見られる。そこで、さらに高い検出効率を得るためには、ボロンを付加した GEM を複数枚積層する必要がある。図 9(b)が、その測定結果である。図からわかるように、検出効率が、ボロン GEM の積層枚数に対して線型に増えていることがわかる。もちろん、いずれ、飽和することは明らかであるが、その領域にいたるためには、さらにボロン GEM を積層する必要があることも分かる。これらの測定結果により、ボロン GEM を使った中性子検出器が原理的に動作可能であることが示されたといえる。

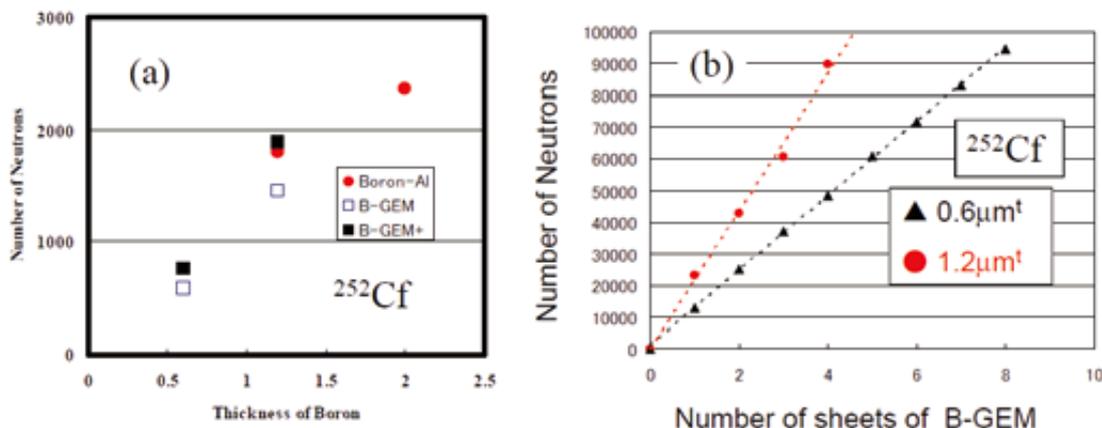


図 9 (a) ボロン厚みに対してと(b)ボロン GEM の枚数に対する測定計数の変化

3.3 ビームテスト

日本原子力開発研究機構の研究原子炉 JRR3 からの中性子ビームを用いて、開発した試作器の性能評価試験を行った。中性子ビームで得られたパルス波形は、十分に短いもので高計数率に耐えられることを示唆している。また、中性子による信号の大きさを放射線源 Co-60 からガンマ線と比較すると、十分におおきく、容易に弁別できることが分かった。

検出効率は、よく知られた 10 気圧のヘリウム-3 カウンターと比較すると 2.2\AA の熱中性子に対して、約 30%であることが分かった。このときのチェンバーの構成は、 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 厚のボロンを両面に付加した GEM を 4 枚と同じ厚みのボロンをカソード片面に付加したものを積層した状態である。位置分解能は、直径 0.5mm のピンホールが開いたカドミニウム板を使って評価すると FWHM で 1mm であると見積もられた。

同じ 2.2\AA の単色熱中性子を使って、散乱テストも行った。図 10(a)に示すように、単結晶である NaCl サンプルを回転中心にセットして、サンプルとチェンバーをそれぞれ回転することによって、期待されたそれぞれの回転角に対して、図 10(b)のようなきれいなブラッグピークを測定することができた。また、 8\AA の単色冷中性子を使って、小角中性子散乱テストも行った。図 11(c)に示すように、サンプルのないダイレクトビームと比較すると、サンプルをおくと明瞭な散乱パターンを測定することができた。さらに、詳しいデータは、修士論文(14)にまとめられている。

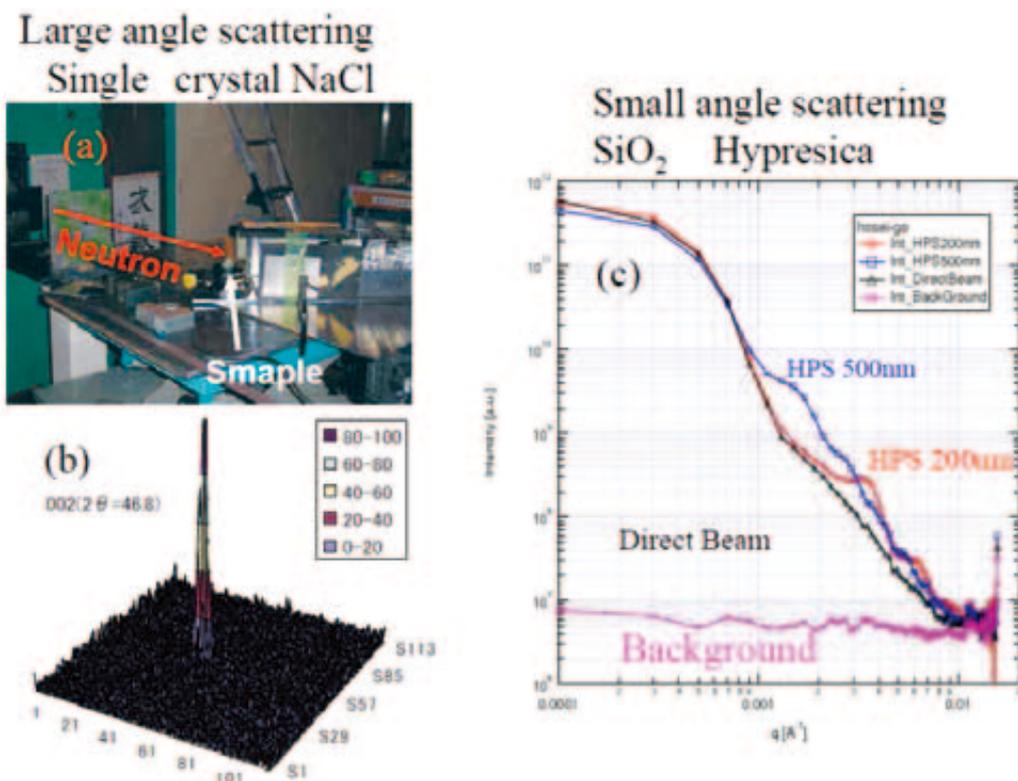


図 10 JRR3 のガイドホールで行われたサンプルテスト
 (a) セットアップ, (b) 単結晶で得られたブラッグ点, (c) 小角中性子散乱の様子

昨年度末に、J-PARC において、パルス中性子源からのビームが使えるようになったので、BL21 でビームテストを行った。図 11 に得られた 2 次元画像と中性子の波長分布を示した。このように、開発中の検出器は、2 次元位置を精度よく測定できると同時に、飛行時間を測定でき、波長分布を求めることが可能である。このような良い結果が得られたので、BL21 では、まず、ビームモニターとして使用することが期待されている。その際に、GEM の高頻度耐性も採用される重要な要素となっている。ビームテストの詳しい結果は、TIPP09 で報告され、論文(15)として公表される予定である。

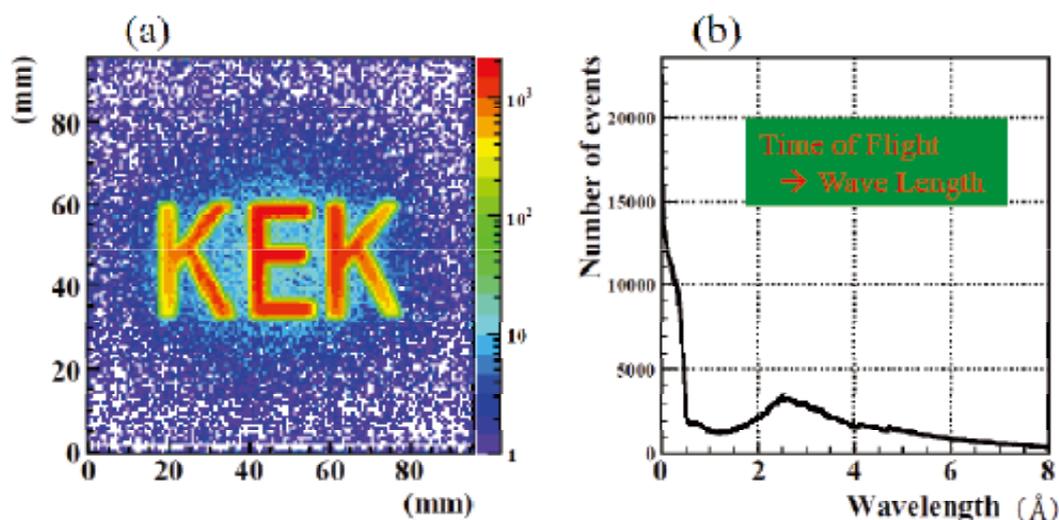


図 11 (a) カドニウムスリットによる 2 次元イメージ (b) パルス中性子源での飛行時間分布

4. 硬 X 線検出器

4.1 検出原理

硬 X 線は、通常の X 線と比べるとはるかに透過力が高いため、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、透過力が高いことの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。しかも、前述の中性子検出器のボ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、検出感度は、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していることを確認することを行った。3 μm 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、100 μm 厚と 50 μm 厚の 2 枚の GEM を利用している。ちなみに、金を付加した GEM では、硬 X 線が電子に変換された場所によって、信号の大きさが大きく変わらないように、有効増幅度が 1 になるような電圧が印加されている。また、GEM 間のギャップは、位置分解能に影響するので 1mm と小さめの値が選ばれている。読み出しストリップのパターンや電子回路は、中性子検出器とまったく同じものが用いられている。

4.2 X 線照射試験

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、120kV で管電流は、1mA 程度である。また、低エネルギーの X 線は今回のテストでは不要であるので、0.3mm 厚のモリブデンフィルターでカットしている。これによって、検出器に照射されている X 線の平均エネルギーは、80keV 程度ある。

鉛板スリットを用いることによって、図 11(a)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 FWHM で 1mm 程度であることもわかった。

硬 X 線検出器として動作していることを明瞭にわかるサンプルを 2 例示す。図 12 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。2 つ目の例が、図 13 で、10cm 厚のコンクリートブロック内の鉄筋の様子を見たものである。3 本の鉄筋が認識できることはもちろんその直径も測定可能であることも分かる。今後、さらに、検出効率を上げたり、照射時間を長くすることによって、さらに厚いコンクリート内の鉄筋の様子を捕らえることが可能になると期待している。さらに、詳しい結果は、修士論文(16)にまとめられている。

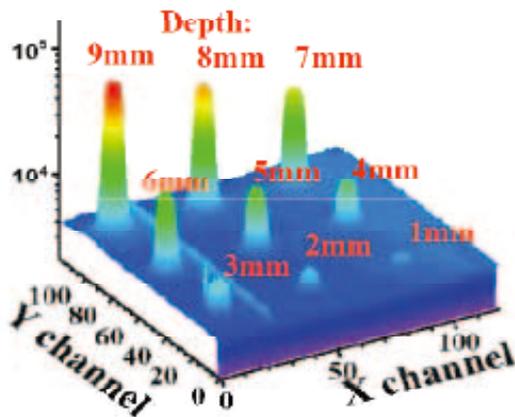


図 12 10mm 厚の鉄板に開けられた深さの違う穴の見え具合

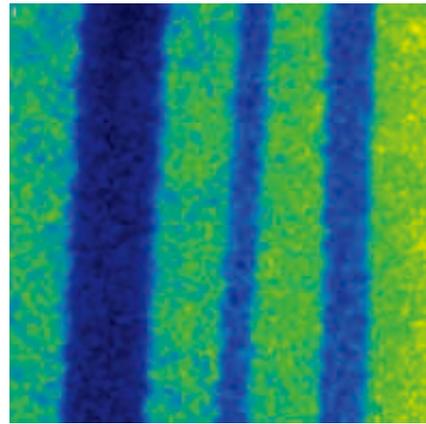


図 13 10cm 厚のコンクリートブロック内鉄筋の透過画像、鉄筋の太さは、左から 16mm、6mm、10mm である。

参考文献

- (1) F. Sauli, Nucl. Instr. and Meth. A 386 (1997) 531.
- (2) The Gas Detector Development Group in CERN (<http://gdd.web.cern.ch/GDD/>).
- (3) M. Inuzuka, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 525 (2004) 529.
- (4) Scienergy Co. Ltd. (info@scienergy.jp) (<http://www.scienergy.jp>).
- (5) T. Tamagawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 560 (2006) 418.
- (6) S. Uno et al., Nucl. Instr. and Meth. A 581 (2007) 271.
- (7) S. Bachmann, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 438 (1999) 376.
- (8) F. Sugiyama, Master thesis in Tokyo University of Science, 2008.
- (9) R. Veenhof, Version 2, CERN April-13, 2005.
- (10) H. Kadomatsu, Master thesis in Saga University, 2007.
- (11) C. Schmidt and M. Klein, Neutron News, vol. 17, pp.12, 2006.
- (12) Y. Fujita, et al., 2007 IEEE Nuclear Science Symposium, N15-19.
- (13) T. Uchida, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 55, pp. 2698, 2008.
- (14) S. Nakagawa, Master thesis in Osaka city University, 2008
- (15) H. Ohosita et al., Nucl. Inst. and Meth. paper is in preparation.
- (16) K. Nagaya, Master thesis in Tokyo University of Science, 2009

成果発表

国内講演

日本物理学会

2006年3月27-30日 愛媛大学 3講演

2007年3月18-21日 鹿児島大学 1講演

2007年3月25-28日 首都大学 1講演

2007年9月21-24日 北海道大学 3講演
2008年3月23-26日 近畿大学 1講演
中性子科学会
2006年12月5-6日 水戸 1ポスター講演
2007年11月27-28日 九州大学 1ポスター講演
2008年12月1-2日 名古屋大学 2ポスター講演
MPGD研究会
2006年1月26-27日 RCNP 2講演

2007年1月26-27日 佐賀大学 3講演
2007年12月14-15日 大阪市大3講演
2008年12月12-13日 理研 3講演 中性子研究会
2008年1月7-8日 中性子デバイスと小角散乱・反射
率研究会 北海道大学 1講演
2008年1月17-18日 中性子制御及びMIEZE/NRSE
合同研究会 京大原子炉実験所

国際会議講演

IEEE: 2006年10月29日-11月4日 San Diego USA 1講演、2007年10月28日-11月2日 Honolulu USA 1講演、2007年10月28日-11月2日 Dresden USA 1講演
VCI: 2007年2月19-24日 Vienna Austria 1ポスター講演
ICANS: 2007年4月25-29日 Dongguan China 1講演

投稿論文

S.Uno, et al., NIM A 581(2007) 271-273
T.Uchida, et al, IEEE TNS 55(2008)2698-2703
宇野彰二 日本物理学会誌 63(2008)687-693
大下英敏、宇野彰二 中性子科学誌 「波紋」 7月号掲載予定

修士論文

門松宏治 佐賀大学 2007年3月卒
中川真介 大阪市大学 2008年3月卒
杉山史憲 東京理科大学 2008年3月卒
長屋慶 東京理科大学 2009年3月卒

現在のグループメンバー

KEK 宇野彰二、関本美知子、村上武、内田智久、
大下英敏（物構研、特任助教）
大阪市大 中野英一
東京理科大 小池貴久
東北学院大、近畿大学、東京農工大学の参加予定

外部資金

科研費 基盤研究B 3年間（2007-2009） 1420万円
NEDO（大友, BL21）からの資金 中性子ビームモニターの開発（2007-2010）
JST 量子ビーム（浦川）からの資金 X線検出器の開発（2008年度）
企業からの共同研究（2社、2007年から）
加速器支援事業 北海道大学（2008、2009年度）