



JAEA-Research

2006-014



JP0650341

## 個別読み出し型中性子ガス検出器の 位置分解能に関する研究

Study on the Spatial Resolution of Position Sensitive Neutron Gas Detector  
with Individual Readout

田中 浩基 中村 龍也 山岸 秀志 曽山 和彦 相澤 一也

Hiroki TANAKA, Tatsuya NAKAMURA, Hideshi YAMAGISHI  
Kazuhiko SOYAMA and Kazuya AIZAWA

量子ビーム応用研究部門  
中性子制御・検出系開発研究グループ

Neutron Detectors and Optical Devices R&D Group  
Quantum Beam Science Directorate

JAEA-Research

March 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。  
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4  
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,  
Intellectual Resources Department  
2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN  
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

個別読み出し型中性子ガス検出器の位置分解能に関する研究

日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門中性子産業利用技術研究ユニット

田中 浩基\*・中村 龍也・山岸 秀志・曾山 和彦・相澤 一也

(2006年1月30日受理)

大強度パルス中性子源を用いた中性子散乱実験で要求される検出器性能を満たすために個別読み出し型マイクロストリップガス検出器の開発を行ってきた。本稿では個別読み出し方式による位置分解能評価シミュレーションの構築・実験値との比較について報告を行う。このシミュレーションは中性子ビームの形状とガス条件から位置分解能を評価することができ、中性子ビームを用いた実験値と良い一致を示した。また本実験で得られた位置分解能( $\sim 1.0$  mm)とピークカウント数の均一性( $\pm 10\%$ )について併せて報告する。

Study on the Spatial Resolution of Position Sensitive Neutron Gas Detector with  
Individual Readout

Hiroki TANAKA\*, Tatsuya NAKAMURA, Hideshi YAMAGISHI,  
Kazuhiko SOYAMA and Kazuya AIZAWA

Neutron Technology R&D Center  
Quantum Beam Science Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 30, 2006)

To meet the detector performance requirements for neutron scattering experiments using intense pulsed neutron source, we have been developing the micro-strip gas chamber with individual readout. In this paper, we report the simulation results of the spatial resolution of the chamber. This simulation can calculate the spatial resolution by using the distribution of neutron beam and gas condition. The simulation results agreed with the experimental data using the collimated neutron beam. In addition, the results of the spatial resolution( $\sim 1.0$  mm) and uniformity( $\pm 10\%$ ) about the peak counts were described.

**Keywords:** Micro-strip Gas Chamber, Individual Readouts, Position Sensitive Neutron Detector, Spatial Resolution

---

\* Post-Doctoral Fellow

## 目次

1. 序論 -----	1
2. マイクロパターン検出器 -----	1
3. 個別読み出し型中性子ガス検出器 -----	3
3.1 検出部 -----	3
3.2 データ処理部 -----	4
4. 位置分解能評価シミュレーション -----	5
4.1 中性子と $^3\text{He}$ との核反応を起こす位置の導出-----	6
4.2 生成核のプロトンとトリトンの射出方向の導出-----	7
4.3 混合ガス中におけるエネルギー損失の導出-----	7
4.4 プロトンとトリトンの軌跡の両端の決定-----	8
5. 中性子ビームを用いた位置分解能実験 -----	8
6. 考察-----	13
6.1 シミュレーションと実験値との比較-----	13
6.2 理想的な位置分布の応答-----	15
7. まとめ-----	16
謝辞 -----	16
参考文献 -----	17

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Micro-patterned detector.....	1
3. Neutron detector with individual readouts.....	3
3.1 Detection part.....	3
3.2 Data acquisition part.....	4
4. Simulation of spatial resolution .....	5
4.1 Position of the nuclear reaction ${}^3\text{He}(\text{n},\text{p})\text{t}$ .....	6
4.2 Emission angle of protons and tritons .....	7
4.3 Energy deposition in the gas medium.....	7
4.4 Edge of track of protons and tritons.....	8
5. Spatial resolution experiments using the neutron beam.....	8
6. Discussion.....	13
6.1 Comparison with the measured data and simulation results.....	13
6.2 Ideal position response.....	15
7. Conclusion.....	16
Acknowledgement.....	16
Reference.....	17

## 1 序論

現在日本の J-PARC[1]、米国の SNS[2]、英国の ISIS Second Target Station[3] といった大強度パルス中性子源を用いた中性子散乱実験施設の建設が進行中である。一方定常原子炉を用いた中性子散乱実験においても大強度化が不可欠となっている。しかしながら既存の中性子検出器では  $10^6$  cps を超える大強度中性子フラックスに耐えることができない。さらにパルス中性子散乱実験では中性子のエネルギーを時間に置き換えて測定するので、一つのパルス内の様々なエネルギーの中性子を弁別する必要があり高速性が要求される。さらに、一つのサンプルに対する測定時間の短縮するためには広い立体角で覆う必要がある。同じく広い立体角を保ち、検出器の数を減らすには高位置分解能化が必要となる。またサンプルから散乱されてくるプラッギピークを精度良く弁別するために優れた位置分解能を持つ検出器が必要である。中性子散乱実験においてはガンマ線の影響を無視することができないので、中性子とガンマ線の弁別を行う必要がある。さらに高い検出効率で測定するのはいうまでもない。

各分光器によって中性子検出器に対する要求は異なってくるが、我々が目的としている小角散乱実験及び反射率実験においては位置分解能  $< 1 \text{ mm}$ 、検出効率  $> 80\%$  (for thermal neutron)、高速性  $< 1 \mu\text{s}$  といった性能が要求される。上記の性能を満たすために我々は個別読み出し方式を用いた中性子ガス検出器の開発を行い、これまでにマルチワイヤ検出素子を用いた個別読み出し方式のシステムについて報告を行ってきた [4]。

この論文ではマイクロストリップ検出素子を用いた個別読み出し方式中性子位置検出器の位置分解能を予測するためのシミュレーションの構築、実験値との比較を行うことを目的とした。併せて検出システムの性能として中性子ビーム実験において得られた位置分解能とピークカウント数の均一性について述べる。

## 2 マイクロパターン検出器

ILL の A.Oed が 1988 年に Micro Strip Gas Chamber(MSGC)[5] を提案してからこれまで約 20 年間、高エネルギー物理実験、中性子散乱実験、エックス線散乱実験等といった分野においてマイクロパターン型の検出器の開発が世界中で活発に行われてきた。

開発初期においては MOS を製造するのに必要な技術を用いて、シリコンウェハ上に形成された直径  $20\mu\text{m}$  のアノードとその周りを囲むようにして形成されたカソード間の電界によってガス増幅を行う Micro DOT gas avalanche detector(MDOT)[6] の開発が MSGC と並んで行われた。

1990 年代後半になると有感面積の大面積化を行うことを目的としてプリント基板(Print Circuit Board:PCB) 技術を用いた Micro Slit Gas Detector(MSGD)[7], Micro Wire Detector( $\mu$ WD)[8], Micro Groove Detector(MGD)[9], WELL detector(WELL)[10] といったマイクロパターン型検出器が開発された。いずれの検出器もカプトンのような薄い絶縁体をエッチングして立体構造にしているものである。MSGD,  $\mu$ WD のカプトンの表面にはカソード電極面があり、カソード電極面及びカプトンを格子状にエッチングし、カプトンの背面に形成されたアノード電極を剥き出しする。エッチングによってできた空間で形成される電界によってガス増幅をおこす構造となっている。

一方 MGD はカプトンの背面にアノードのストリップ電極を、前面にアノードと直交してカソー

ドのストリップを配置し、次にカソード間のカプトンをエッティングすることにより、アノードが剥き出しになりアノードとカソード間に空間が形成されガス增幅が起こる。WELLはカプトンの片面にアノード電極を配置し、もう片面にはカソード面を配置し、それぞれアノードのストリップの真上にあるカソード電極とカプトンを丸くエッティングすることにより空間を形成し、ガス增幅を起こす構造となっている。

また前段増幅器としてPCB技術を用いたGas Electron Multiplier(GEM)[11, 12]、高精度ガラス加工技術を用いたCapillary Plate(CP)[13, 14]、さらに電鋳技術を用いたMICRO MEsh GASEous Structure(MICROMEGAS)[15]といった検出器の開発が行われている。GEMの構造は厚さ $50\mu\text{m}$ のカプトンの両側に厚さ $5\mu\text{m}$ の銅電極を配置し、表面に $50\mu\text{m}$ 程度の無数の穴をエッティングにより形成したものである。上下の電極に電圧を印加することで穴の中に強い電場が生じガス增幅を起こす。一方CPも同様の原理を用いており、数 $10\mu\text{m}$ 径のガラスの毛細管(キャピラリ)が規則正しく整列してきた板状のガラスプレートの上下の電極に電圧を加えることによってガス增幅を起こす。MICROMEGASは収集電極の上方 $100\mu\text{m}$ の位置にマイクロメッシュと呼ばれる電鋳技術によって作られた厚さ $3\mu\text{m}$ のニッケル製のグリッドを設置する。ガス増幅はグリッドと収集電極間の電界によって起こる。Table.1に上述のマイクロパターン検出器の性能をまとめる。

Table. 1 Performances of micro patterned detector

detector	anode width	gain	applied voltage(V)	gas condition
MSGC	10	1000	500	I-butane 0.3 atm
MDT	20	6000	550	Ar:DME=50:50 1atm
MSGD	30	600	550	Ar:DME=50:50 1atm
uWD	25	15000	550	Ar:DME=50:50 1atm
MGD	7-35	12000	550	Ar:DME=50:50 1atm
WELL	15	12000	550	Ar:DME=50:50 1atm
GEM	-	5000	500	Ar:DME=50:50 1atm
MICROMEGAS	-	40000	750	Ar:CH <sub>4</sub> =90:10 1 atm
CP	-	1000	1150	He:C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> =90:10 1atm

この中で中性子散乱実験への応用が進んでいるのはMSGC、MICROMEGAS、GEM、CPを用いた検出器である。中性子検出実験ではエックス線、荷電粒子検出と違い、中性子コンバータを必要とするため実機への実現が困難となっている。

中性子ガス検出器において中性子コンバータは固体、気体と分けられる。<sup>157</sup>Gd、<sup>10</sup>B、<sup>6</sup>Liなどの固体を使用した際にはコンバータ内でエネルギーを損失してしまうため検出されるエネルギー情報は連続分布になり、ガンマ線との弁別が困難となる。一方<sup>3</sup>Heガスは比較的中性子吸収断面積が大きく安定に動作するためよく用いられる。<sup>3</sup>Heガスを用いた場合検出効率と位置分解能を向上させるにはガスを高圧にする必要があるがガスゲインが小さくなるので信号を取り出すのが困難となる。このように中性子検出器にはトレードオフがあり、使用する検出条件によって性能を選択する必要がある。

またこれまで位置敏感型中性子ガス検出器において用いられてきた信号読み出し方法として電

荷分割型及びディレイライン方式があるがこれらの検出方法は検出される電荷の大きさに位置分解能が大きく左右されることになる。ガスゲインを大きくする必要があるのはいうまでもないが、検出器の大きさに位置分解能が影響を受ける。我々は個々の信号を独立に処理する個別読み出し方式を採用することで位置分解能を保ち大面積化できると考えている。また個別に処理することで高速性を向上することが可能である。

### 3 個別読み出し型中性子ガス検出器

我々が開発を行っている検出システムの全体図を Fig.1 に示す。検出システムは 541 チャンネル フィードスルーを有する 11 気圧耐圧の圧力容器、マイクロストリップ検出素子、Amplifier-Shaper-Discriminator(ASD) ボード、中性子位置検出エンコーダ、リアルタイムデータ処理装置から構成される。次に検出部とデータ処理部に分けて説明を行う。

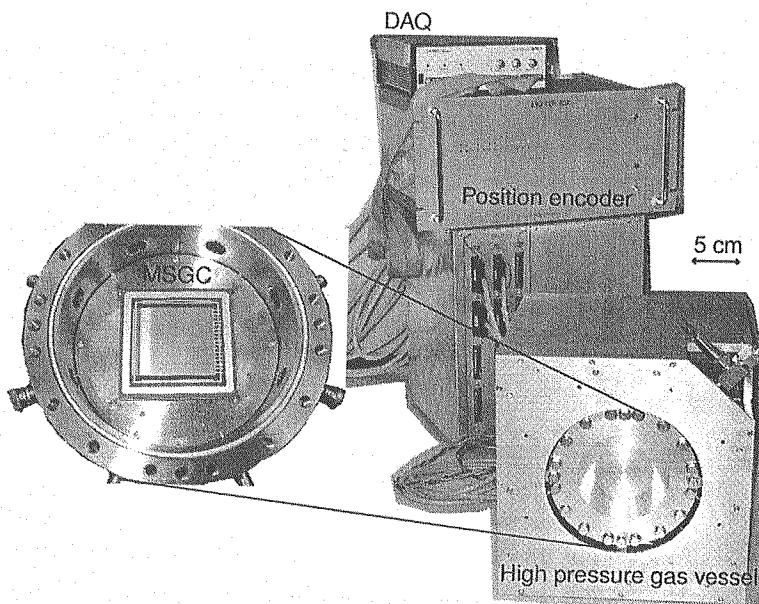


Fig. 1 Photo of the developed neutron gas detector system with individual readouts.

#### 3.1 検出部

マイクロストリップ検出素子は元々エックス線イメージング用に開発された素子 [16] で、LSI 等の集積回路を製造する際に用いられるマルチチップモジュール技術によって製造されている。マイクロストリップ検出素子の概略図を Fig.2 に示す。厚さ  $17 \mu\text{m}$  のポリイミド上に幅  $10 \mu\text{m}$ 、厚さ  $1 \mu\text{m}$  のアノードストリップと幅  $100 \mu\text{m}$  を持つカソードストリップが  $45 \mu\text{m}$  の間隔を隔てて対となり、 $200 \mu\text{m}$  ピッチで形成されている。一方ポリイミドの背面には幅  $100 \mu\text{m}$  をもつバックストリップがアノードと直交して  $200 \mu\text{m}$  ピッチで配置してある。アノードとバックストリップによって二次元位置検出を可能としている。またカソードは 15 本を一つの読み出しチャンネルとし、合計 17 チャンネルの出力を有する。今回分解能を議論することに言及するためアノード方向のみに限定し一次

元測定を行うことにした。

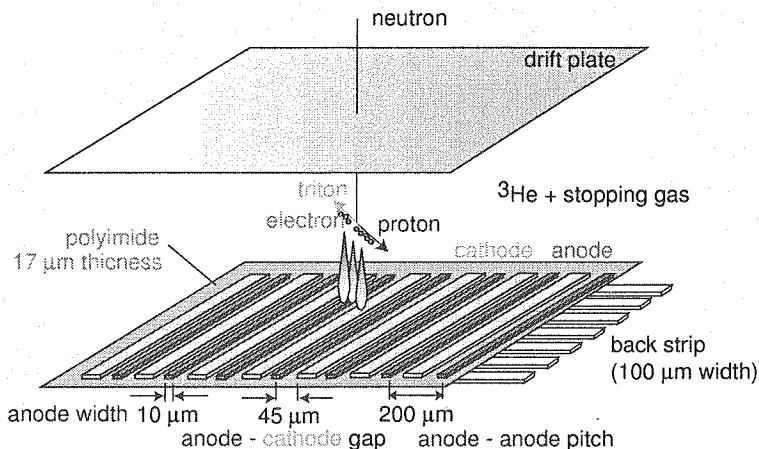


Fig. 2 Schematic layout of MSGC.

### 3.2 データ処理部

541 チャンネルフィードスルーからの信号(今回使用したのはアノード 128×カソード 17 チャンネル)はそれぞれ Amplifier-Shaper-Discriminator(ASD) ボードに入力され、増幅、整形(積分時定数 80 ns)、弁別され Low Voltage Differential Signaling (LVDS) 信号として出力される。中性子位置検出エンコーダでは ASD ボードからの LVDS 信号を Field Programmable Gate Array (FPGA) を用いてデジタル信号処理を行う [17]。さらに市販されている MPA-3(Fast Comtec 社製) を用いてデータ表示及び取得を行う。

データ処理回路の概略図を Fig.3 に示す。中性子が有感体積 ( $50 \times 50 \times 22 \text{ mm}^3$ ) に中性子が入射すると  ${}^3\text{He}$  ガスと核反応を起こし二次粒子のプロトンとトリトンを放出する。二次粒子は  ${}^3\text{He}$  とストッピングガスである  $\text{CF}_4$  の混合ガス中をドリフトし、混合ガスを電離しながらエネルギーを損失する。電離電子はドリフトプレート及びアノードに印加された電圧によって形成される電界によってドリフトしアノード近傍でガス増幅を起こす。いくつかのアノードストリップに電流が流れ、ASD-ASIC での出力は LVDS 信号列となりエンコーダへと導かれる。一方カソードでは正イオンが収集され ASD-ASIC へと導かれる。エンコーダでは二次粒子の飛跡情報を含む ASD-ASIC からの LVDS 信号列の両端をデジタル信号処理し検出する。両端のチャンネルは 8bit の TTL 信号として MPA-3 へと送られる。MPA-3 では両端のチャンネルから中心を計算し、中性子の入射位置としてヒストグラム化する。

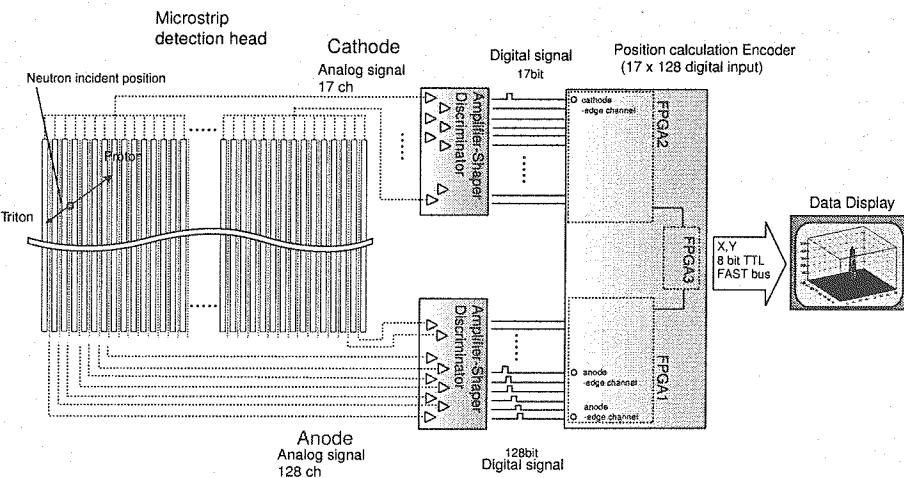


Fig. 3 Schematic layout of individual readout circuit.

#### 4 位置分解能評価シミュレーション

分解能評価シミュレーションのフローチャートを Fig.4 に示す。このシミュレーションはモンテカルロ法を用いた確率論に基づくプログラムで次の 5 つに大別される。1. 中性子と  ${}^3\text{He}$  との核反応を起こす位置の導出、2. 生成核のプロトンとトリトロンの射出方向の導出、3. 混合ガス中におけるエネルギー損失の導出、4. プロトンとトリトロンの軌跡の両端の決定、5. 軌跡の重心をヒストグラム化。次に各プログラムの概略について説明を行う。

##### A Monte Carlo simulation flowchart

###### 1. Determination of 3-dimensional interaction point



###### 2. Emission angle of protons and tritons



###### 3. Calculation of the energy deposit of protons and tritons in the gas medium



###### 4. Calculation of track length and edge



###### 5. Histogram of the centroid of the track

Fig. 4 Flowchart of the Monte Carlo simulation.

#### 4.1 中性子と<sup>3</sup>Heとの核反応を起こす位置の導出

<sup>3</sup>He(n,p)t核反応の三次元位置を決定するために、任意の中性子ビーム幅もしくは実測したイメージングプレートから得られるx,y方向二次元分布及び<sup>3</sup>Heの中性子吸収断面積から得られるz方向の位置が計算される。任意のビーム幅もしくはイメージングプレートの結果から得られたx,y方向の分布関数を $f_x(t), f_y(t)$ とし、有感面積の大きさをX,Y方向それぞれX1,Y1とすると二次元の核反応の位置(X,Y)は以下の式で求められる。

$$\int_0^X f_x(t) dt = Rnd \int_0^{X1} f_x(t) dt \quad (1)$$

$$\int_0^Y f_y(t) dt = Rnd \int_0^{Y1} f_y(t) dt$$

ここで $Rnd$ は $0 < Rnd < 1$ なる乱数である。

イメージングプレートの測定によって得られた中性子ビームの分布をFig.5に示す。それアノード方向及びバックストリップ方向の射影成分の分布を示している。次の5章中性子ビーム実験でも述べるが、今回シミュレーションと実験結果と比較するために6つのガス条件で計算を行った。それアヘリウムガスとストッピングガスであるCF<sub>4</sub>の全圧を4 atmに保ちながらCF<sub>4</sub>の分圧を実験I~VIについてそれぞれ20,30,43,45,55,58 %とした。上から実験I,IIで使用した中性子ビーム、次にIII,IVで使用した中性子ビーム、下の分布が実験V,VIで使用した中性子ビームの分布である。

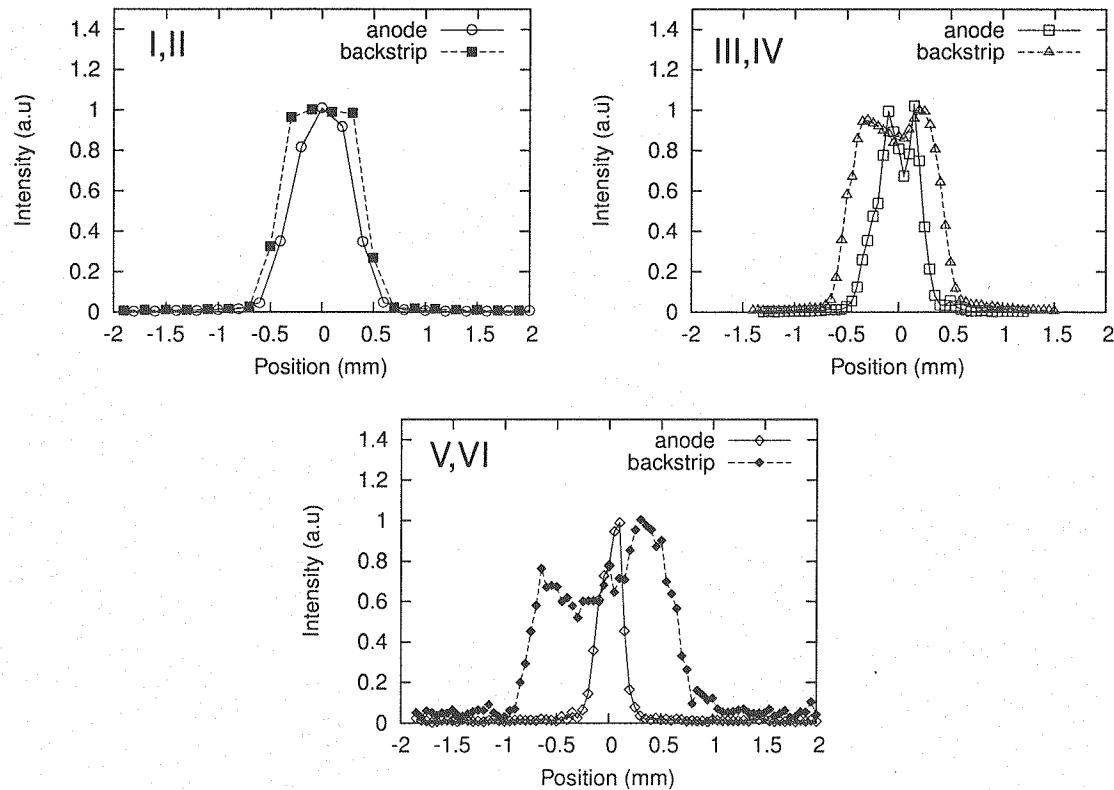


Fig. 5 Beam profiles of imaging plate in the anode and backstrip direction.

入射中性子の数は中性子吸収断面積をパラメータとして指数関数的に減少するので核反応を起こす位置と等価に扱うことができる。z方向の位置Zは以下の式で決定される。

$$\int_0^Z \exp(-N\sigma t) dt = Rnd \int_0^{Z1} \exp(-N\sigma t) dt \quad (2)$$

ここでNは<sup>3</sup>Heの密度、 $\sigma$ は中性子吸収断面積、Z1はドリフトプレートとマイクロストリップ検出素子とのギャップ間隔である。

#### 4.2 生成核のプロトンとトリトンの射出方向の導出

核反応の三次元位置(X,Y,Z)が決定した後に、180度方向に射出するトリトンとプロトンがマイクロストリップ検出素子面となす角を決定する。プロトンとトリトンはFig.6に示すようにz軸に対し $\phi$ の傾きを持ち、x-y平面の投影上で $\theta$ の角度を持って射出する。射出する方向は全立体角 $4\pi$ に対する乱数を振ることによって決定されるので以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \theta &= 2\pi Rnd \\ \phi &= \arccos(1 - 2Rnd) \end{aligned} \quad (3)$$

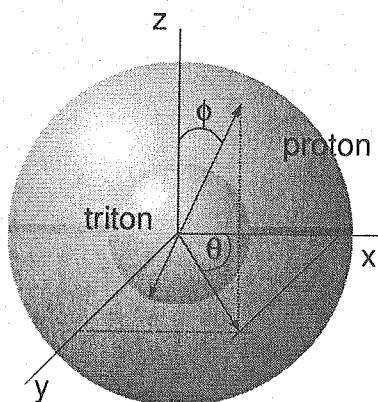


Fig. 6 Calculation of emittance angle for protons and tritons.

#### 4.3 混合ガス中におけるエネルギー損失の導出

混合ガス中のプロトンとトリトンのエネルギー損失はStopping and Range of Ions in Matter(SRIM)コード[18]で計算される。SRIMコードは任意の物質中におけるイオンとイオンまたは原子との衝突理論に基づく計算で、任意のエネルギー(2GeV/amuまで)を持つイオンの阻止能及び飛程を導出することができる。

ここでは中性子と<sup>3</sup>Heの核反応後に放出される574 keVのプロトン及び191 keVのトリトンの混合ガス中における阻止能をインプットパラメータとして使用した。この際プロトン及びトリトンはエネルギーを損失しながらガス中のイオンと衝突を繰り返して移動するので、軌跡の途中にお

ける初期のエネルギーよりも低いエネルギーを持つプロトン及びトリトンの阻止能も併せてパラメータとして代入した。

SRIM コードによる阻止能の計算結果を Fig.7 に示す。

上で計算された阻止能に従いプロトンとトリトンはエネルギーを損失し最終的には完全にエネルギーを失い停止する。もし完全にエネルギーを失う前にドリフトプレートもしくはマイクロストリップ検出素子にプロトンまたはトリトンのいずれかが到達した際にはその位置を軌跡の端として計算した。

実際の測定では電子ノイズと分離するためにディスクリレベルが設定されている。そのことを考慮するために計算上では閾値を設定し、中性子入射位置からある距離をもつアノードストリップ上でのエネルギー損失が閾値よりも下回るストリップは信号として扱われない。すなわち Fig.8 に示すようなディスクリレベルよりも上にあるストリップが信号の対象となる。Fig.8 は今回計算を行った各ガス条件におけるそれぞれのアノードストリップ上でのエネルギー損失を示している。0 の位置に中性子が入射したと仮定すると、プロトンがエネルギーを損失しながら軌跡の最後にブレーキピーカーを形成している様子が計算されている。またトリトンはブレーキピーカーを形成せずにプロトンの軌跡の終端に比べて緩やかに減少していることがこの計算からわかる。このことから個別読み出し方式の位置分解能向上について次のことが説明できる。中性子の実測入射位置はプロトンとトリトンの軌跡の重心をとるので、同じガス条件において位置分解能を向上させるにはディスクリレベルを電子ノイズに掛からないぐらいに出来るだけ下げるか、もしくはガスゲインを向上してトリトンの端を出来るだけ長くとる必要がある。なぜならみかけ上トリトンの飛程だけが短くなることで、プロトンの飛程の半分の位置に実測位置がシフトし中性子入射位置と実測位置のずれが大きくなってしまうからである。これはストッピングガスである  $\text{CF}_4$  の量が少ないとき、すなわち飛程の長いときに顕著に現れると考えられる。

#### 4.4 プロトンとトリトンの軌跡の両端の決定

前節 4.2 で導出されたトリトンとプロトンの放出角  $\phi, \theta$  の結果よりマイクロストリップ検出素子面でのアノード方向 ( $R_x$ )、バックストリップ方向 ( $R_y$ ) の射影成分が以下の式より求められる。

$$\begin{aligned} R_x &= R * \cos(\phi) * \cos(\theta) \\ R_y &= R * \cos(\phi) * \sin(\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで  $R$  は前節 4.3 で求められたプロトンもしくはトリトンの飛程を示しており、中性子の入射位置 ( $X, Y$ ) にそれぞれの射影成分を加えることで軌跡の両端とした。最終的には両端の重心を実測位置としてヒストグラム化し分布を求めた。

#### 5 中性子ビームを用いた位置分解能実験

実験は JRR-3 ビームホール内 C2-2 冷中性子ポートで行った。原子炉減速体系からガイド管で導かれた  $4 \text{ \AA}$  付近にピークを持つ冷中性子ビーム内から  $3.9 \text{ \AA}$  の中性子をモノクロメータで反射して

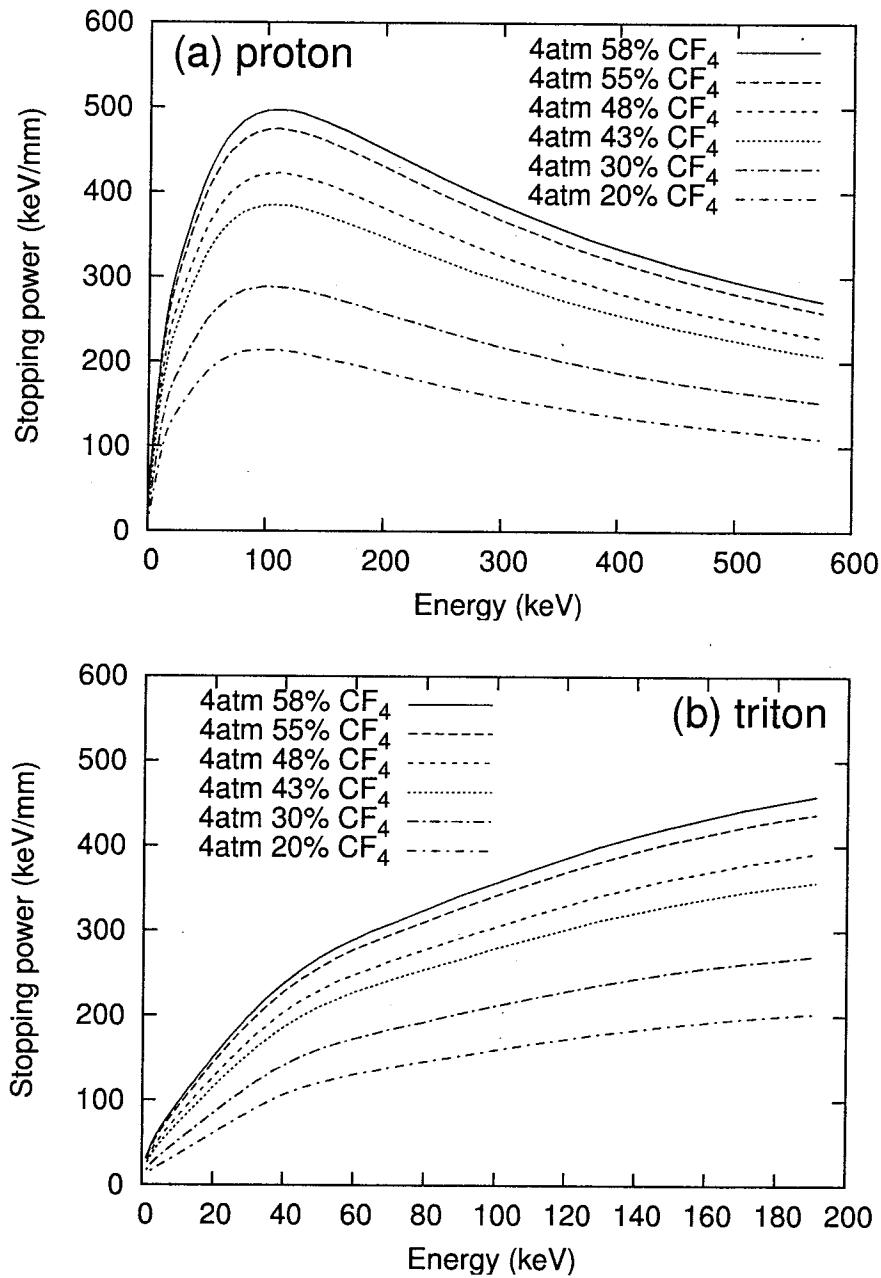


Fig. 7 Stopping power in the mixed gas for (a) proton and (b) triton by the use of SRIM calculation code.

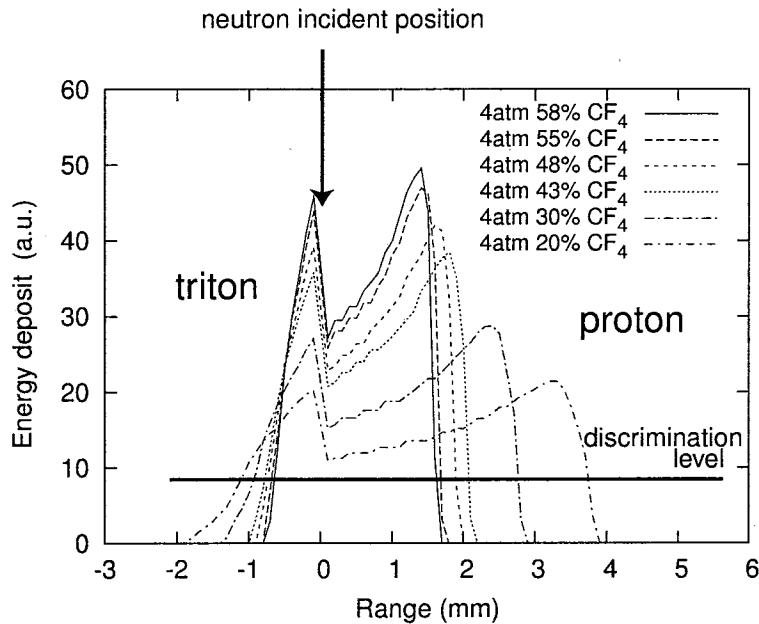


Fig. 8 Calculation of energy deposit at each position located from incident neutron position.

減速体の外へ導きだした。反射した中性子のビーム幅は検出器入射窓上流に設置した<sup>6</sup>Li焼結体のコリメータで調整される。位置分解能を評価するために6つのガス条件と3つのビーム幅について実験を行った。ガス条件とガスゲイン及びプロトンとトリトンの飛程の計算値をまとめたものをTable.2に示す。ここでのガスゲインは加算した全カソード信号をOrtec社製Reasearch Amplifier450で増幅、整形(時定数0.25 μs)し、Fast Comtec社製ADC 7072Tに入力し、得られた全エネルギーピークのピーク値と定義した。飛程はシミュレーションの結果から得られた値を示した。ガス条件はヘリウムガスとストッピングガスであるCF<sub>4</sub>の混合ガスで、全圧を4 atmに固定しCF<sub>4</sub>の分圧比をパラメータとして実験を行った。入射位置依存性を確かめるために条件Iでは10 mm毎に、条件II-VIにおいては5 mm毎に中性子入射位置を変化させてデータを取得した。それぞれの実験において位置分解能評価はアノード方向で行うこととし、検出器の有感面積うちのアノードのほぼ中央に中性子を入射した。

Table. 2 Experimental condition.

	I	II	III	IV	V	VI
gas condition(%)	20	30	43	48	55	58
relative gas gain(-)	33	18	9.8	9.7	7.8	9.8
proton range(mm)	3.8	2.8	2.1	1.9	1.7	1.6
triton range(mm)	1.8	1.3	0.9	0.8	0.7	0.7
total range (mm)	5.6	4.1	3	2.7	2.4	2.3

条件I~VIの実験結果をFig.9に示す。各図における実線はそれぞれのピークをガウシアンフィッティングした結果である。それぞれのピークの高さにはらつきがあるように見えるが、これは分解

能の個々の位置での違いからそう見えるだけである。中性子構造解析においてはサンプルから散乱されたブレッゲー峰の強度及び位置を正確に測定する必要がある。Fig.10にそれぞれの入射位置における(a)実測位置分解能及び(b)ピーカーのカウント数の平均からのばらつきを示す。各ガス条件の位置分解能及びカウント数はFig.9に示したマーカーに対応している。各入射位置において位置分解能はほぼ一定であることが示された。ピーカーのカウント数は平均から最大で±10 %のばらつきが観測されたが感度補正すれば問題ない値である。

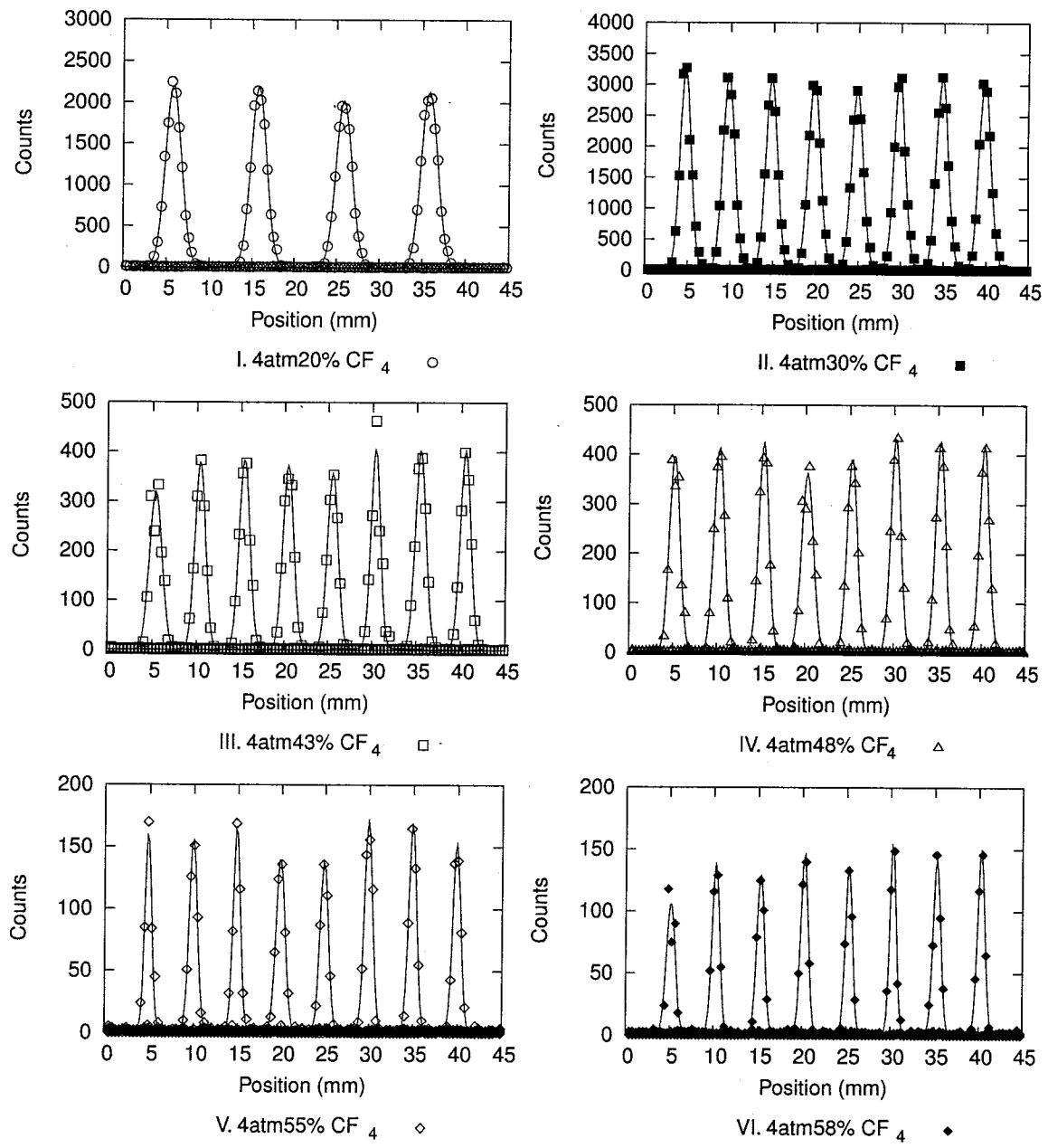
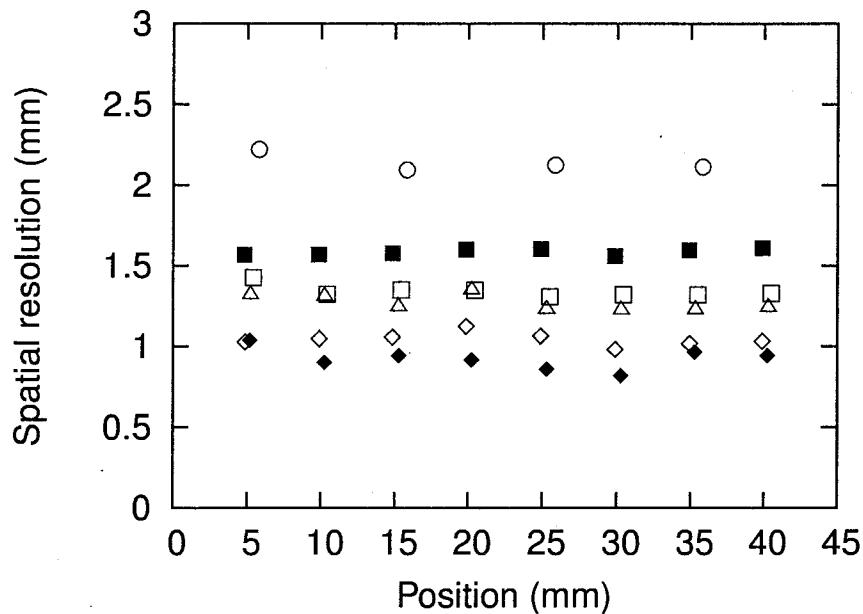


Fig. 9 One dimensional distribution of the collimated neutron beam at the each incident position of MSGC.

I. 4atm20% CF <sub>4</sub>	○	II. 4atm30% CF <sub>4</sub>	■
III. 4atm43% CF <sub>4</sub>	□	IV. 4atm48% CF <sub>4</sub>	△
V. 4atm55% CF <sub>4</sub>	◇	VI. 4atm58% CF <sub>4</sub>	◆

(a) spatial resolution



(b) peak counts

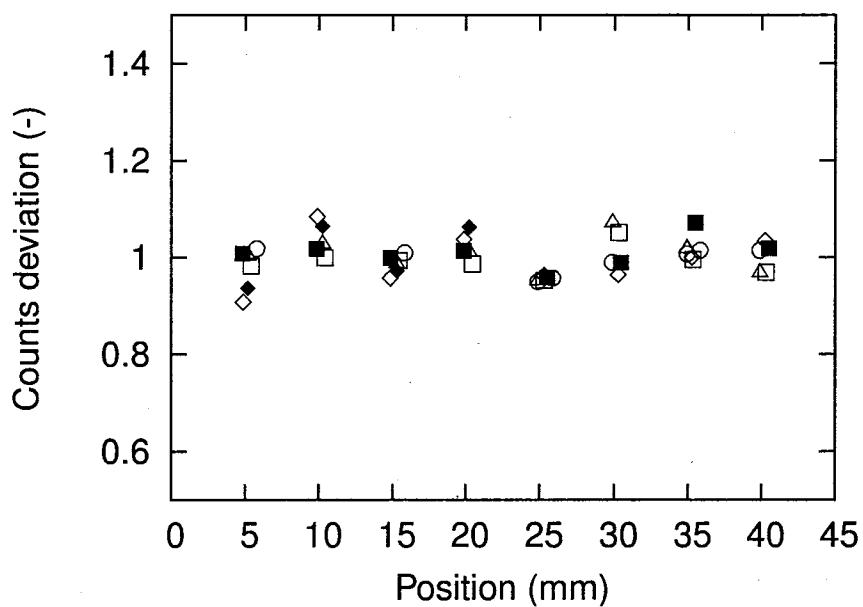


Fig. 10 (a)Spatial resolution and (b)the peak counts deviation from the mean at each incident neutron position .

## 6 考察

### 6.1 シミュレーションと実験値の比較

シミュレーションと実験値との比較を行うためにガス条件とイメージングプレートで得られたデータをシミュレーションに代入して計算を行った。ビーム入射位置が 25 mm の実験結果について検証した。

中性子入射イベントを 100000 としたときのシミュレーションで得られた検出器の応答を Fig.11 に示す。シミュレーションでは二次元分布を求めることが出来るが今回は一次元で評価を行うので、アノード方向の射影成分の位置分解能について比較を行った。それぞれの分布の比較を Fig.12 に示す。

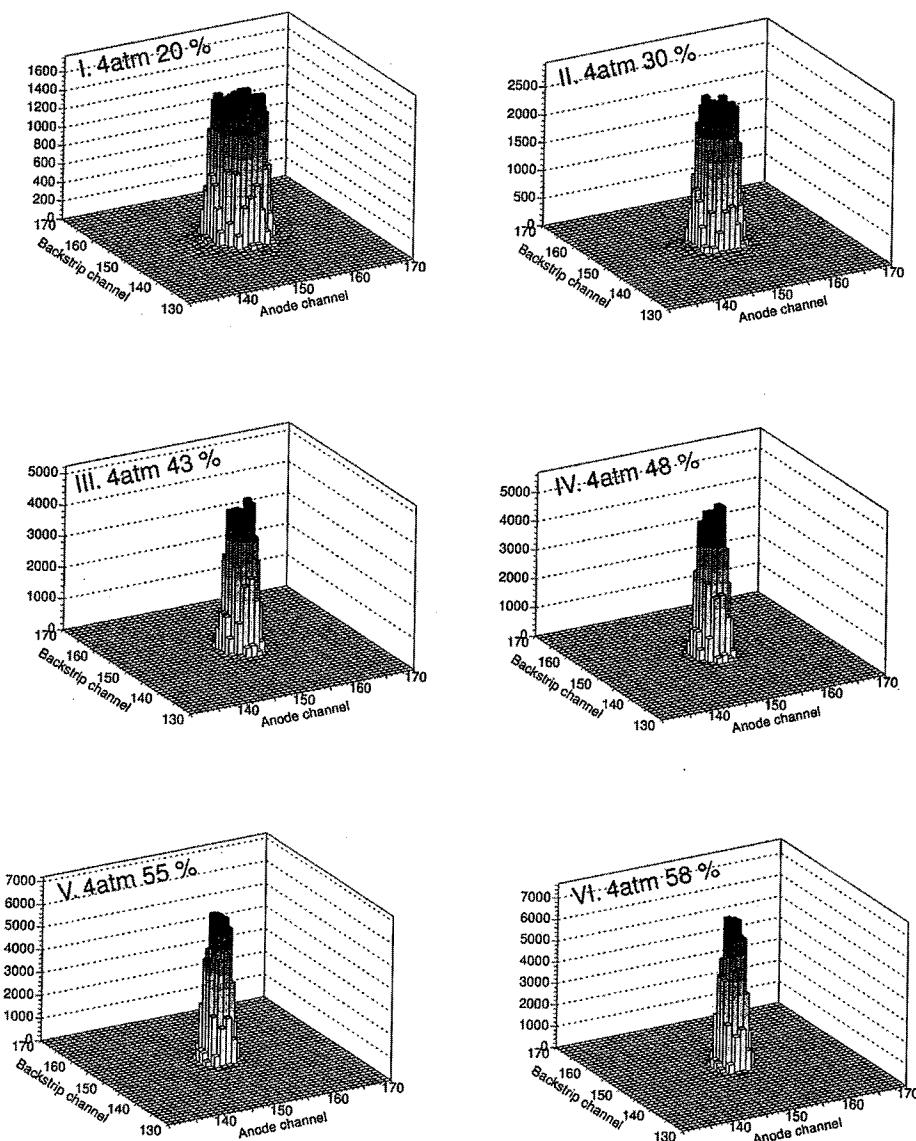


Fig. 11 Simulation results of the response of detector system.

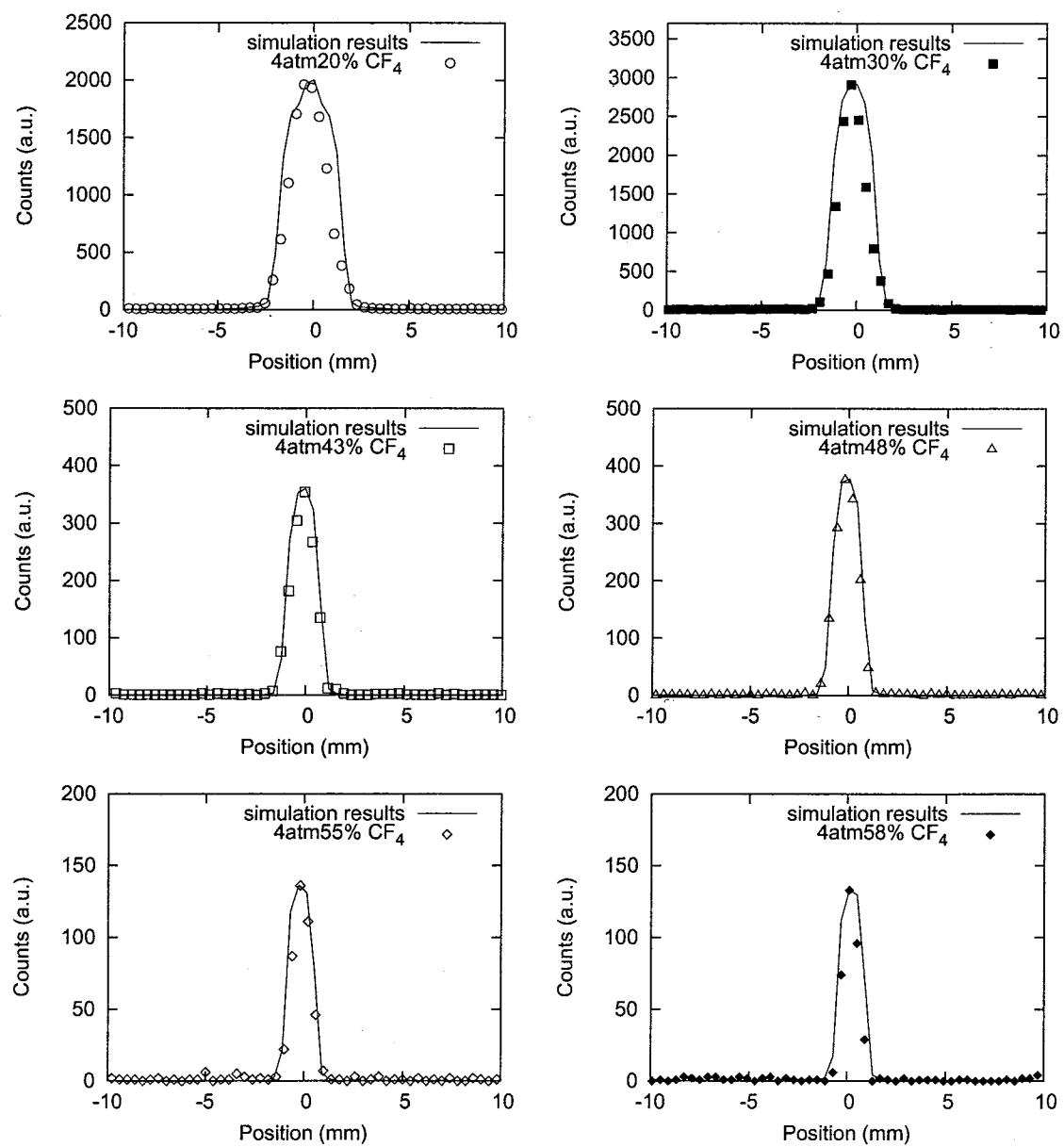


Fig. 12 Comparison with the experimental data and simulation results under the each stopping gas condition.

Fig.12 で得られたそれぞれの分布をガウシアンフィッティングして位置分解能を導出し、プロトンとトリトンをあわせた全飛程を横軸にしてプロットした図を Fig.13 に示す。シミュレーションの結果と実験結果は良い一致を示しているが全飛程が長くなるとシミュレーションは過大評価していることが分かる。しかしながら、ガス条件とビーム形状を入力パラメータとして実測位置分解能の予測を立てるには十分な精度である。

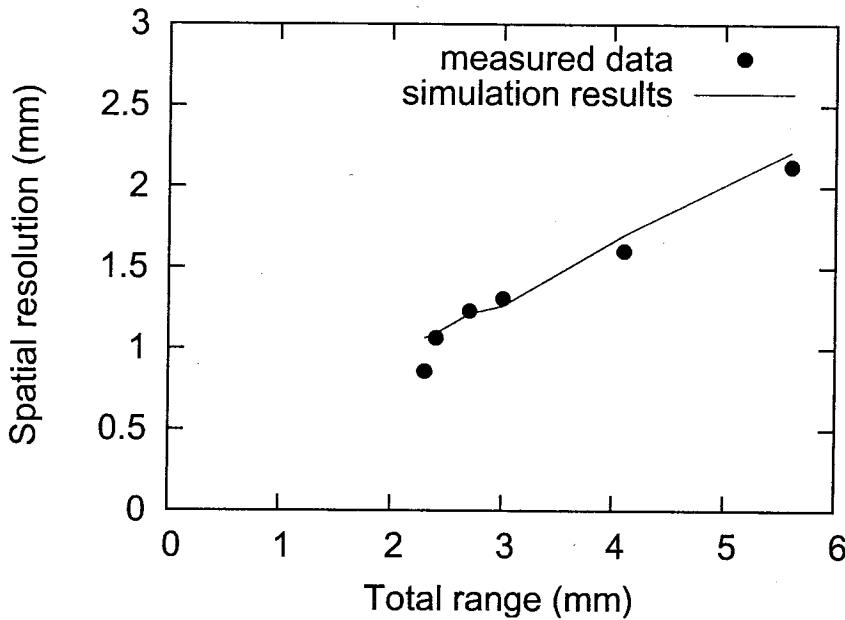


Fig. 13 Spatial resolution comparison between measured data and simulation results as a function of total range of protons and tritons.

## 6.2 理想的な位置分布の応答

中性子散乱実験では使用するビーム幅、入射ビームの指向性及びサンプルの大きさによって必ずブレックピーカーは有限の大きさを持つ。実際には起こりえないことではあるが、検出システムの性能としてビーム幅が限りなくゼロに近いときの応答を検討しておくのは有意義なことであろう。Fig.14 はビーム幅をゼロにした時の各ガス条件に対する応答を示している。左から条件 I の場合の応答で、ストッピングガスである  $\text{CF}_4$  の量が増えるに従い分解能が向上していることが分かる。各応答の真中に見えるピークは壁効果を表している。これはプロトンの飛程の方がトリトンよりも長いため壁に到達するイベントが多くなることから説明できる。見かけ上プロトンの飛程の方が短くなるので位置分解能自体は向上しているように見える。壁効果が無いような理想的な応答は矩形になることがわかる。特に条件 I のような飛程が長い時には矩形分布が顕著に現れるのを確認することができた。

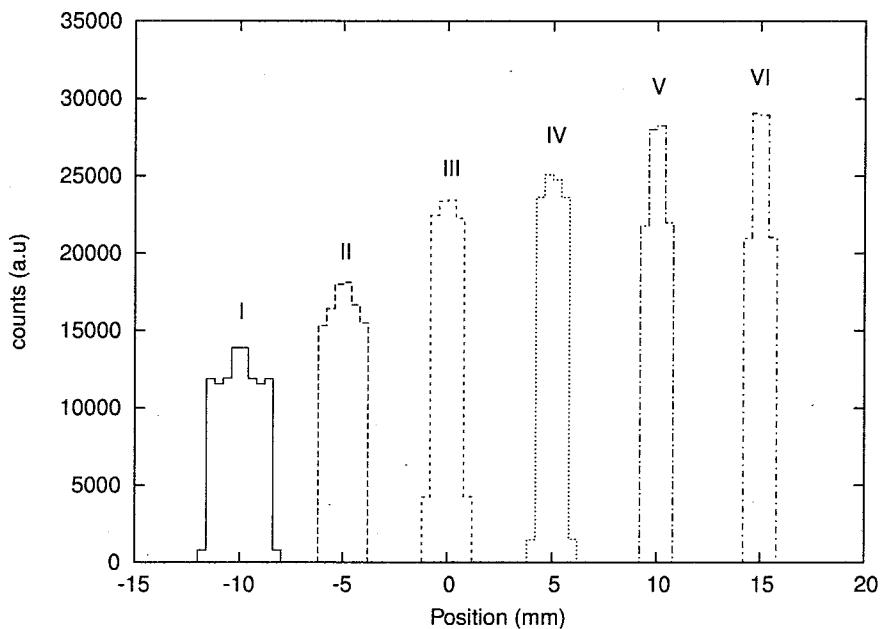


Fig. 14 Simulation results by the use of the neutron beam having no width.

## 7 まとめ

大強度パルス中性子を用いた中性子散乱実験用高速・高位置分解能中性子ガス検出器としてマイクロストリップ検出素子を用いた個別読み出し型中性子ガス検出器の開発を行ってきた。今回の実験では6種類のガス条件で位置分解能とピークカウント数の均一性を調べたが、位置分解能に関しては有感面積に渡ってよい均一性を示すことがわかった。またピークカウントも平均から±10%のばらつきしかなく十分な性能が得られた。

個別読み出し型ガス検出器の位置分解能を評価するためには強度を犠牲にして狭い中性子ビームを用意しなければならないが測定時間などを考えると現実的ではない。そこで位置分解能評価のシミュレーションを構築し、実験で得られた結果と比較したところ良い一致を示した。このシミュレーションを用いることで様々なビーム形状及びガス条件における位置分解能の評価が出来るようになった。

## 謝 辞

中性子実験全般においてご教授いただきました量子ビーム応用研究部門・片桐政樹氏、坂佐井馨氏に厚くお礼を申し上げます。マイクロストリップ検出素子についてご教授いただきました京都大学理学研究科の谷森達教授に厚くお礼を申し上げます。

## 参考文献

- [1] see <http://j-parc.jp>
- [2] see <http://www.sns.gov>
- [3] see <http://www.isis.rl.ac.uk>
- [4] H. Tanaka, et al., Jaeri-Research 2005-010
- [5] A.Oed: Nucl. Instr. and Meth. A263, 351 (1988)
- [6] S. F. Biagi, et al., Nucl. Instr. Meth. A 366 (1995) 76.
- [7] J. C. Labbe, et al., Nucl. Instr. Meth. A 430 (1999) 54.
- [8] B. Adeva, et al., Nucl. Instr. Meth. A 435 (1999) 402.
- [9] R. Bellazzini, et al., Nucl. Instr. Meth. A 424 (1999) 444.
- [10] R. Bellazzini, et al., Nucl. Instr. Meth. A 423 (1999) 125.
- [11] F. Sauli, Nucl. Instr. Meth. A 386 (1997) 531.
- [12] R. Bouclier, Nucl. Instr. Meth. A 396 (1997) 50.
- [13] T. Tanimori, et al., Nucl. Instr. Meth. A 436 (1999) 188.
- [14] T. Nakamura, et al., Nucl. Instr. Meth. A 539 (2005) 363.
- [15] Y.Giomataris, et al., Nucl. Instr. Meth. A 376 (1996) 29.
- [16] T. Tanimori, et al., Nucl. Instr. Meth. A 381 (1996) 280.
- [17] H. Tanaka, et al., Rev. Sci. Instrum., 76 (2005) 093302
- [18] see <http://www.srim.org/>