

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760716

研究課題名（和文） 希ガス蛍光を利用したパルス中性子2次元位置検出器の開発

研究課題名（英文） Developmnt of two dimention positiono sensitive detecotor for pulsed neutrons using scintillation from rare gases

研究代表者

齋藤 究 (SAITO KIWAMU)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター・助教

研究者番号：40370077

研究成果の概要（和文）：ヘリウム/キセノン混合ガスにおけるシンチレーション過程を研究してきた。その中で時間スペクトル、発光スペクトルを明らかにした。また、シンチレーション収量と同時にイオン化収量も測定し、物質中での放射線エネルギーの分配過程に関する知見を得た。以上の知見を元に、ヘリウム/キセノン混合ガスを検出器媒体とし、希ガス蛍光(シンチレーション)を利用した、高許容計数率・高時間分解能といった性能を持つパルス中性子2次元位置検出器の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：Scintillation mechanism in helium mixed with xenon were studied. In this study, the time profiles and the luminescence spectra of scintillation in the mixture were measured. Scintillation and ionization yields in He/Xe were measured simultaneously. And, the purpose of this study is to develop a position-sensitive detector on the basis of these experimental results.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：放射線物理

科研費の分科・細目：総合工学、原子力学

キーワード：放射線物理、放射線計測、シンチレーション

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は、高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構が共同で建設し、運営を行っている大強度陽子加速器施設 J-PARC の共同利用が始まる前であった。J-PARC では、核破砕を利用した大強度パルス中性子源の利用が目的であり、現在は建設は完了し、共同利用が開始されている。パル

ス中性子源は、原子レベルの物質構造の解明・構造生物学的研究による生理学的機能解明のための中性子回折・散乱実験、産業・農業・考古学等へ応用される中性子イメージング等への利用などが期待されている。パルス中性子源の特徴は、原子炉・放射性同位元素を利用した定常中性子源と比較し、ピーク中性子束が大きいことであるが、飛行時間法を

用いた中性子のエネルギー弁別が不可欠となる。さらに大強度パルス中性源の特徴を最大に生かすためには高許容計数率・高時間分解能・高位置分解能・高ダイナミックレンジなどの性能が中性子位置検出器に要求される。

中性子回折実験・中性子イメージング等に用いられている代表的な中性子検出器としては ^3He 比例計数管がある。しかしながら、 ^3He 比例計数管は放射線によって発生した電荷を電極に収集する際に生じる電気信号を測定する方法であるため、信号の立ち上がり立ち下がりが数マイクロ秒と遅いため時間分解能に劣り、かつ、数マイクロ秒から十数マイクロ秒の間に中性子が多数検出器に入射すると数え落としを起す(つまり許容計数率が低い)問題がある。

そこで、大強度パルス中性子源の特徴を最大限に生かす、2次元中性子位置検出器の開発が望まれていた。中性子検出器には、高許容計数率、高時間分解能といった性能が要求された。

2. 研究の目的

そこで、大強度パルス中性子源の特徴を最大限に生かすために、希ガスシンチレーションを利用した2次元中性子位置検出器の開発を行った。希ガスシンチレーションを利用した放射線検出器は、放射線によって発生した電荷を電極に収集する際に生じる電気信号を測定する方法に比べ、信号の立ち上がりが数ナノ秒以下、かつ、信号の立ち下がりが早い、高許容計数率、高時間分解能といった特徴を持つ。しかしながら、中性子検出器媒体に利用されるヘリウムでは、その大気圧以上での圧力におけるシンチレーションは励起2原子分子からの発光であるが、その寿命は約 $10\mu\text{s}$ と遅く、発光波長も 60nm から 100nm と極めて短く、検出器媒体として使用するには難がある。これらの問題点は、ヘリウム中に少量のキセノンを混合させ発光の主体をキセノンに移すことにより改善する。例えば、アルゴンに少量のキセノンを混合させた場合、励起状態のアルゴン2原子分子とキセノン原子との衝突によりキセノンが励起される。図1にアルゴン/キセノン混合ガスにおける発光スペクトルを示す。つまりアルゴンに付与された放射線のエネルギーがキセノンに移行することにより、キセノンのシンチレーションが起きている。キセノンを選択した理由はシンチレーションの発光波長が長波長側(発光中心波長 172nm 、FWHM 13nm)にあり、ヘリウムのシンチレーションと比較して検出しやすいため、かつ、希ガスシンチレーションの中ではキセノンのシンチレーションは発光の寿命が最も短

いためである(99ns)。

ヘリウム/キセノン(He/Xe)混合ガスにおけるシンチレーションの発光スペクトル・発光時間プロファイル・絶対蛍光効率(1光子を生成するのに必要な放射線のエネルギーとして表される値)といった、シンチレーション特性は検出器の設計・性能評価という実用上、かつ、放射線のエネルギー消失過程・原子衝突によるエネルギー移行過程・発光過程を解明するという放射線物理学上重要である。また、希ガスは放射線による電離と蛍光が同時に測定可能な数少ない物質の一つであるので、電離収量(放射線と物質との相互作用の基礎的な過程の一つである電離過程の結果であり、電離機構の解明につながるものである)についても測定を行い、He/Xe混合ガスにおけるシンチレーション過程を解明する。以上の結果をもとに、 $^3\text{He}/\text{Xe}$ 混合ガスを中性子2次元位置検出器媒体として利用し、中性子2次元位置検出器を開発する。

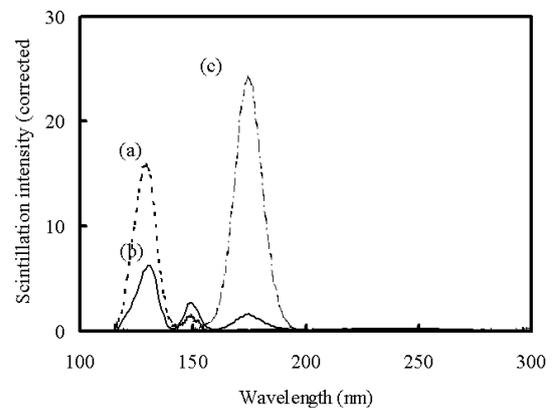


図1 Ar/Xe 発光スペクトル。全圧は9気圧で一定。(a)純アルゴン、(b)キセノン0.003%、(c)キセノン3%混合。キセノン3%の混合でアルゴンの蛍光(126nm)は消滅し、全てキセノンの蛍光(172nm)となっている。

3. 研究の方法

検出器媒体として最終的には、 $^3\text{He}/\text{Xe}$ 混合ガスを利用するが、まずは、 $^4\text{He}/\text{Xe}$ 混合ガスを用い、混合希ガスのシンチレーション特性(発光スペクトル、発光時間プロファイル、絶対蛍光効率)を全圧・混合比を変えながら、明らかにする。これらの特性の測定は、パルス中性子の検出器媒体としての最適条件の決定に重要であり、精度の向上を念頭にデータを積み重ねる。上記で述べた発光スペクトルは中性子検出器と光検出器とをマッチングさせるために重要である。発光スペクトル測定は真空紫外分光器と高エネルギー加速器研究機構にある放射線照射棟のX線発生装置を用いて行う。図1に発光スペクトル測定装置の概略図を示す。図2には電離収量・シ

シンチレーション収量同時測定装置の概略図を示す。発光時間プロファイルは検出器の許容計数率・時間分解能を評価する上で、絶対蛍光効率 η は検出器の出力・エネルギー分解能を評価する上で重要である。希ガスシンチレーションの絶対蛍光効率を精度良く求めるために、低雑音の電荷有感型前置増幅器を用いる。発光スペクトル・発光時間プロファイル・絶対蛍光効率は上記で述べたように実用上重要であるばかりでなく、放射線のエネルギー消失過程・原子衝突によるエネルギー移行過程・発光過程を理解する上でも重要であり、以上のデータから He/Xe 混合ガスにおけるシンチレーションの発光メカニズムを解明する。

以上の知見をもとに、He/Xe 混合ガスの最適な全圧・混合比を煮詰め、その後、発光波長に適応したマルチアノード光電子増倍管(MA-PMT)を用い、中性子 2 次元位置検出器を開発する。

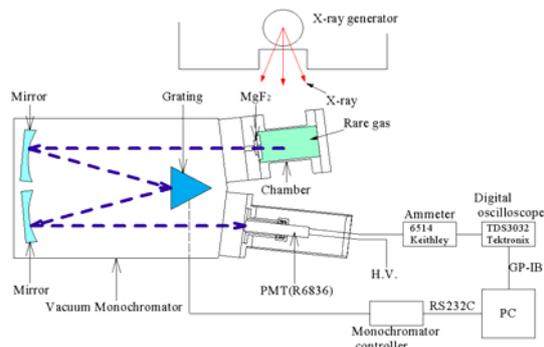


図 2 発光スペクトル測定装置

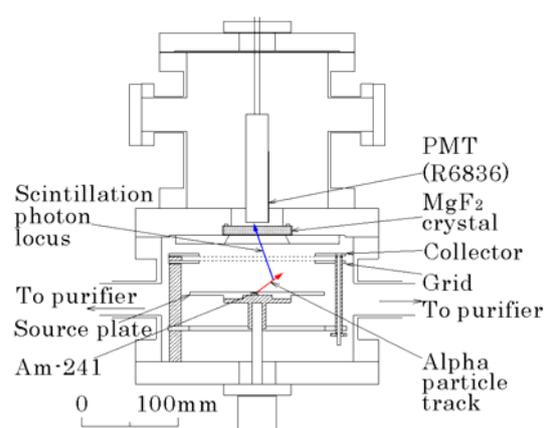


図 3 電離収量・シンチレーション収量同時測定装置

4. 研究成果

中性子 2 次元位置検出器の検出器媒体として最終的には、 $^3\text{He}/\text{Xe}$ 混合ガスを使用するが、まずは、 $^4\text{He}/\text{Xe}$ 混合ガスを用い、混合希ガスのシンチレーション特性(発光スペクトル、発光時間プロファイル、絶対蛍光効率)・電離収量を全圧・混合比を変えながら測定した。全圧は 1.0MPa と 0.657MPa、キセノン分圧は 10^2Pa から 10^6Pa の範囲で測定を行った。以下に明らかにしたことを述べる。

図 4 に発光スペクトル測定結果の一部を示す。混合ガスの発光スペクトルは 174nm 付近にピークを持つ発光であることが分かった。また、図 4 に示すように、発光スペクトルの形はキセノンの圧力のみならず、ヘリウムの圧力の分圧にも異存することを明らかにした。

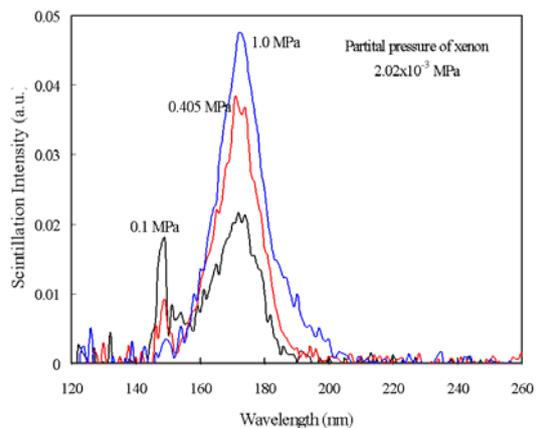


図 4 He/Xe 混合ガスにおけるシンチレーションの発光スペクトル

174nm 付近のシンチレーションに着目すると、シンチレーションの立ち上がり時間は 4nsec. 以下であり、タイミング信号として優れていることが分かった。また、測定したシンチレーション光の減衰時間を図 5 に示す。He/Xe 混合ガスにおけるシンチレーションの減衰時間は、ヘリウム励起 2 原子分子の発光寿命(10usec.)より早く、1%のキセノンの分圧比でキセノン励起 2 原子分子の寿命(99nsec.)に近づく。発光スペクトルの測定結果と併せて、174nm の発光はキセノンの励起 2 原子分子からの発光だと結論づけられる。ヘリウムからキセノンへのエネルギー移行過程の時間はキセノン励起 2 原子分子の寿命より十分短い時間に起きたためであり、He/Xe 混合ガスを利用することにより、時間分解能に優れ、許容計数率が大きいといった優れた特性を持つ放射線検出器を開発することが分かった。

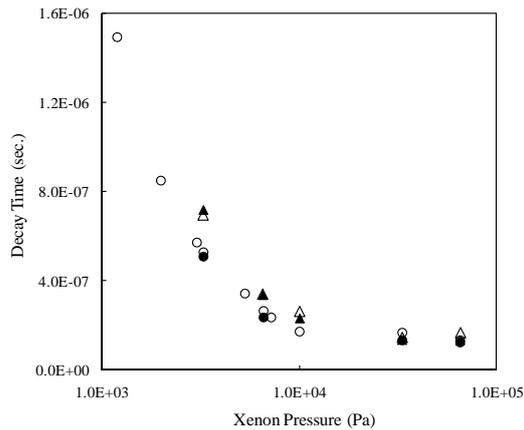


図 5 シンチレーションの減衰時間。全圧 1.0MPa(円)、0.657MPa(三角)。

174nm を中心波長とするシンチレーションの発光量を図 6 と図 7 に示す。図 6 は横軸がキセノンの圧力、図 7 は横軸がキセノンの割合である。図 6 に示すように、わずかなキセノンの添加で発光量が增大してゆき、0.0659MPa のキセノンの分圧で、キセノン 1MPa と同程度の発光量となることが分かった。図 7 中の実線は、キセノンへのエネルギー分配を計算し、ヘリウムからキセノンへのエネルギー移行がなかった場合の発光量を計算したものである。実験値は計算値を大きく上回り、ヘリウムからキセノンへのエネルギー移行が起きていることを示しており、飽和していることから、ヘリウムに分配された放射線のエネルギーがほぼ 100%キセノンに移行し、キセノンの励起 2 原子分子からの光として発光していることが分かった。

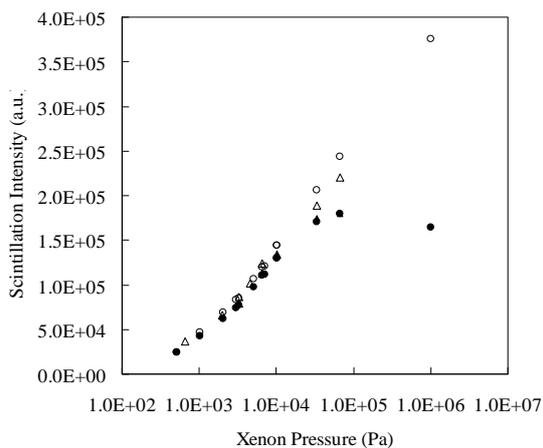


図 6 He/Xe 混合シンチレーション収量。全圧 1.0MPa(円)、0.657MPa(三角)。白抜きは全発光量。黒塗りは励起原子を起源とする発光。

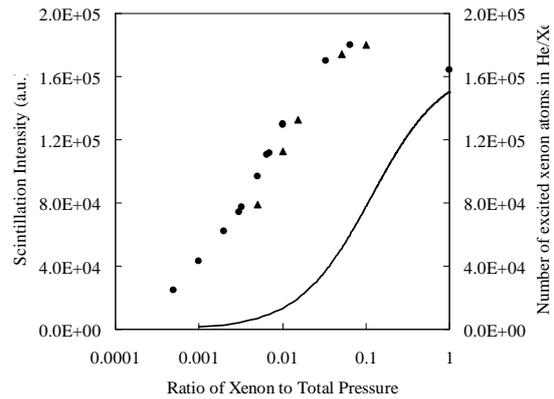


図 7 He/Xe 混合シンチレーション収量。全圧 1.0MPa(円)、0.657MPa(三角)。白抜きは全発光量。黒塗りは励起原子を起源とする発光。

以上の特性から、He/Xe 混合ガスのシンチレーションは中性子検出器として有望であることが分かり、中性子検出器への応用として、2次元中性子検出器を構築した。

検出器部(図 8)はガスを封入し、光検出器であるマイクロチャンネルプレート光電子増倍管(MCP-PMT)を内蔵するチェンバーからなる。

MCP-PMT は位置敏感型 PMT 用モジュール(プリアンプ・波形成形器・ADC が一体となったモジュール)に接続され、チャンネル毎の波高値がデジタル値として出力される。中性子検出イベント毎のデジタル値は VME データプロセッサにより、VME クレートコントローラを介し、PC に保存される。

今後、実用化され、J-PARC などのパルス中性子源を利用した中性子回折実験等で利用されるための実用上の課題としては、検出器の大型化が一つあげられる。J-PARC などの中性子回折実験等では試料を囲んだ大型の検出器で空間的なデッドスペースがない検出器が望まれる。本研究成果でヘリウム/キセノン混合シンチレーションの有用性は示せたが、大型の検出器を開発するためには、空間的デッドスペースがないような、光検出器開発や工夫が必要となってくる。

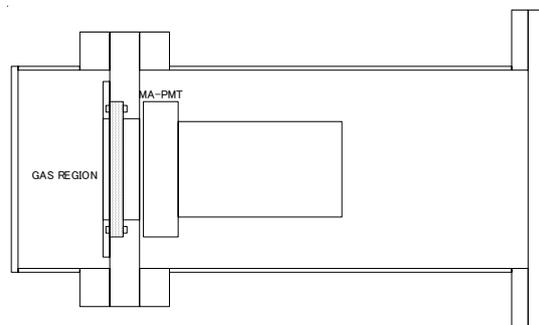


図 8 MA-PMT 内蔵中性子検出器

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計4件)

- ① S. Sasaki, T. Sanami, K. Saito, T. Murakami, Average Energy to Produce an Ion Pair in Gases for High Energy Heavy Ions, 2011 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2011/10/26, Conference Center, Valencia, Spain
- ② Kiwamu Saito et. Al., Application of Scintillation in Helium Mixed with Xenon to a Position-Sensitive Detector, 2010 IEEE Nuclear Science Symposium, Nov. 1, 2010., Knoxville, USA
- ③ 齋藤 究 他, ヘリウム/キセノン混合ガスにおけるシンチレーションメカニズム, 第24回 放射線検出器とその応用, 2010年1月28日, つくば市 KEK
- ④ Kiwamu Saito et. al., Mechanism of scintillation in helium mixed with xenon, 2009 IEEE Nuclear Science Symposium, 2009年10月28日, アメリカ オーランド

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 究 (SAITO KIWAMU)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター・助教
研究者番号: 40370077

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし