

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2013～2015
課題番号：25400297
研究課題名(和文)キセノンからの放射性ラドンの除去の研究

研究課題名(英文)study of radon removal from xenon

研究代表者

小川 洋(Ogawa, Hiroshi)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：20374910

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：液体キセノンは、暗黒物質探索など、低エネルギー、超低バックグラウンド実験用シンチレータとして広く用いられている。本研究は、液体キセノン検出器におけるさらなる低バックグラウンド環境の達成のために、キセノン中からの放射性ラドンの除去を目指した。そのために低バックグラウンドラドン検出器の開発およびラドン除去試験を実施した。その結果、ラドン検出器については従来の10分の1程度の低バックグラウンド化に成功した。また、キセノンの低温における循環のための熱交換機構の開発も行った。活性炭に代わるラドン吸着剤の選定までには至らなかったものの、より効率的なラドン除去システムを開発するための道筋をつけた。

研究成果の概要(英文)：Liquid is widely used as an ultra-low background and threshold experiments for example dark matter search. This study aimed at the removal of radioactive radon from xenon, in order to achieve further low background environment in liquid xenon detector. The development of the low background radon detector and radon removal test were carried out in order that. As a result, the radon detector has succeeded to reduce the background approximately 1/10. In addition, the development of heat exchange mechanism for the circulation of the low temperature of xenon was carried out Even that the material did not be found for radon adsorbent alternative to activated carbon, it make the prospect of the way for the development of more efficient radon removal system.

研究分野：宇宙線実験物理

キーワード：暗黒物質 低放射能環境 ラドン 吸着

1. 研究開始当初の背景

液体キセノンには、暗黒物質探索など、低エネルギー、超低バックグラウンド実験用シンチレータとして広く用いられている。2010年10月からはXMASS実験が開始されており、現在の検出器調整段階を経て、今後の暗黒物質探索を目指している。

XMASS実験における主な放射性不純物として、液体キセノン中に存在するラドンの娘核からの β および γ が挙げられる。XMASS実験におけるバックグラウンドは $1 \times 10^{-4} \text{keV/day/kg}$ 以下を目標としている。この場合、液体キセノン中全体で 1mBq 以下のラドン量が要求される。ラドンは検出器部材からのしみだしが主な源となっている。私が検出器建設前に実施した、検出器部材からのラドンのしみだしの測定では、検出器全体での上限値として 20mBq となっていた。また私は、現状の検出器における液体キセノン中のラドン量の測定も実施した。図1にXMASS検出器実機によるラドンの娘核からの信号を示す。その結果、 $8.2 \pm 0.5 \text{mBq}$ のラドン量が測定された。の量は長時間安定しており、ラドンは検出器内部材から液体キセノンへ定常的にしみだしているものと考えられる。

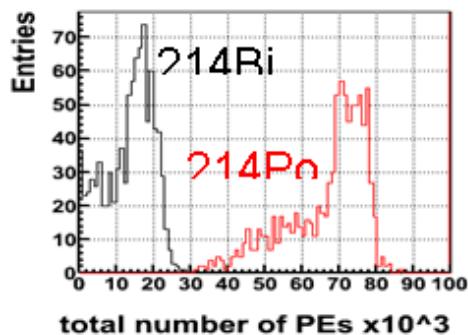


図1：XMASS検出器内液体キセノン中のラドンの娘核 ^{214}Bi および ^{214}Po の光量分布。測定はXMASS検出器の実機で実施された。検出効率を考慮し、 $8.2 \pm 0.5 \text{mBq}$ のラドン量が算出された。

2. 研究の目的

XMASS検出器実機での測定から、暗黒物質探索の為には現状のラドン量を少なくとも $1/8$ 以下にする必要があることがわかった。また、検出器から定常的にラドンがしみだしていることから、検出器内キセノンを循環しながらの除去が要求される。XMASS実験におけるキセノンからのラドン除去としては、XMASS Collaboratorの論文を公表した。(doi:10.1016/j.nima.2011.09.051) 本論文では、キセノンガス中のラドン除去に適した活性炭を選定し、ラドンの除去試験を実施した。その結果、ラドンの除去効率としては非常に大きいことが分かった。しかし、問題点として2つ挙げられる。1つは処理能力がキセノンガスで 1L/min 程度でしかなく、

少量であること。もう一つは、細かい活性炭の粉体が、暗黒物質探索検出器を汚染してしまう可能性があることである。そのため、フィルター選定において、以下の条件が必要となる。よって、本研究では、以下の条件を満たした、新規のフィルターの開発を実施し、キセノンからのラドン除去の性能評価を行う。

- 1) 高いラドン除去効率。
- 2) 細粉体が発生しない。
- 3) フィルター自身からのラドンのしみだしが少ないこと。

キセノンからのラドン除去手法であるが、世界的にも上記論文が初めてとあってよい。以前はキセノンとラドンの相転移温度の違いから、分離は容易と考えられていた。だが、キセノンとラドンは性質が非常に似ており、ラドンの固化温度 -80°C 程度では、汎用のフィルターでは除去が難しいことがわかってきた。液体キセノンは低バックグラウンド実験において、シンチレータとして、暗黒物質探索だけでなく、太陽ニュートリノ観測、 $0\nu\beta\beta$ 探索にも大変有望なものである。よって本研究の達成が急がれる。

3. 研究の方法

- 1) 低バックグラウンドラドン検出器系の開発。

ラドンのしみだし量の測定は本学所有の容量 70L のpin-photo型ラドン検出器内に部材を入れて実施する。ラドンのしみだし量がラドン検出器の検出感度以下(1mBq)であることを要求する。

- 2) フィルター候補の選定、フィルターの製作。

まず、フィルターとなる部材の探索を行う。ラドンに対する高い吸着効率(大きい表面積を持つこと)、細粉体がないこと(具体的には粉体であっても $0.1 \mu\text{m}$ 以上の大きさを持つこと)、高純度部材(ラドンのしみだしが少ないこと)であることが要求される。

- 3) キセノンガスによるラドン除去試験

2)で選定されたフィルター部材からフィルターを製作し、ラドン除去試験装置に組み込む。ここでは2つの吸着方法を試す。1つは通常のように吸着剤を冷却する方法、もう一つは吸着剤とレーザーを使った独自の手法である。ここではまず、冷却による手法の説明をする。

図2は冷却用ラドン除去試験装置の概略である。系内はキセノンガス(本学所有)で満たし、コンプレッサーでラドン検出器、フィルターを循環できるようにする。また、フィルター系は熱交換をしながら冷凍機で低温を保つことが可能なシステムとなっており、低温におけるラドンの吸着効率の増加を見込めるようになっている。系内はすべてメタルシール仕様とし、外部からの不純物の混入を

さげ、真空引きを可能とした。

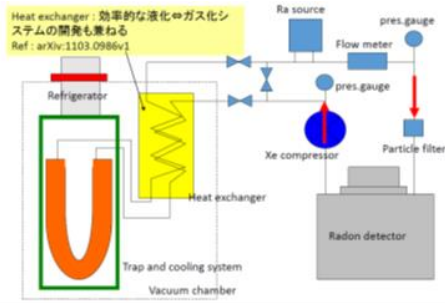


図 2 : ラドン除去装置の概略

また、吸着剤+レーザー手法の説明をする。キセノンガスにエキシマレーザーを当てて、キセノン-ラドンガスの励起を促し、ラドンを吸着剤につけやすくする。図 3 にセットアップを示す。

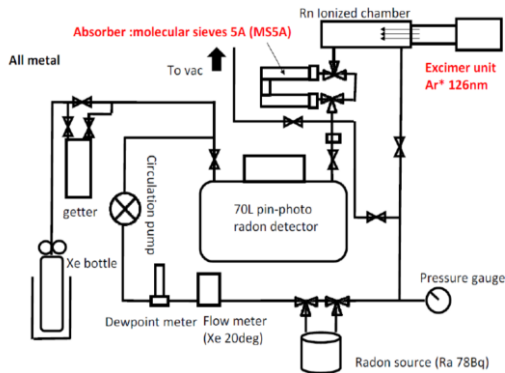


図 3 : 吸着剤+レーザー手法のセットアップ

以前の試験ではモリキュラーシーブス 5A を吸着剤として用いた。その結果が図 4 である。今回の研究にあたり、再現試験を実施した。モリキュラーシーブス 5A が高いラドン吸着能力があることを示した。しかしモリキュラーシーブス自身はラドンの emanation 量が多く、XMASS 実験においてそのまま用いるのは不適である。よって、2) における吸着剤を用いた吸着実験を実施した。

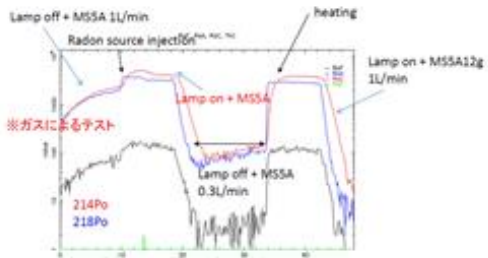


図 4 : モリキュラーシーブス 5A とエキシマレーザーを用いたキセノンからのラドン除去。

4. 研究成果

1) 低バックグラウンドラドン検出器系の開発。

まず、低バックグラウンドラドン検出器系

の開発を実施した。開発した系の flow 図と写真を図 5 に示す。系はすべてメタルシールとなっており、真空引きが可能となっている。サンプル容器、ラドン検出器内は電解研磨を実施しており、壁部からのラドンの湧き出し (emanation) を減らすことに成功した。図 6 にこのラドン検出器とサンプル容器間で循環を行ったときのラドンの emanation のバックグラウンドを測定した結果を、以前のラドン検出器での emanation 測定の結果と比較して載せる。バックグラウンドは 1/10 程度に低減していることが分かった。これによりキセノンからのラドン除去能力測定を非常に高感度で実施することが可能となった。

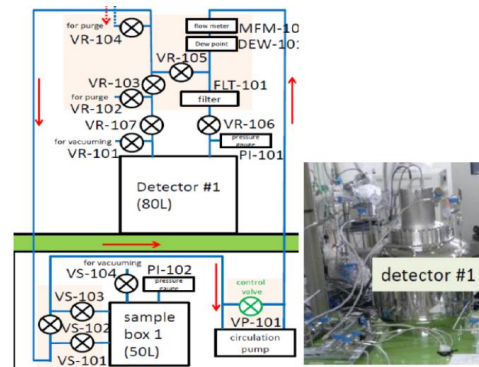


図 5 : ラドン検出器系の flow 図と検出器の写真。

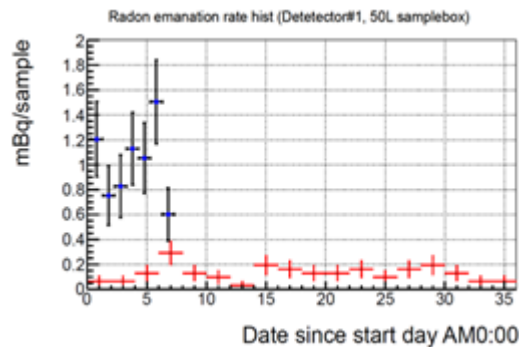


図 6 : 以前のラドン emanation (青黒) と改良ラドン emanation (赤) のバックグラウンド測定の結果。

2) フィルター部材の選定と、フィルターの製作。

フィルター候補部材として、表 1 の部材を購入した。粉状の部材であるが、パーティクルフィルターで止めるところが可能な大きさであり、また、低バックグラウンド化が可能な部材となっている。これらのハウジングとして、ステンレス製 U 字管を製作し、各部材をそれぞれ入れた。また、ハウジング前後にはナノスケールのパーティクルフィルターを装着した。

部材	粒径
Cu powder	75-150um
Cu powder	1um

CuO powder	1um
Si powder	5um
Si powder	300um
SiO2 powder	0.8um
ZrO2 powder	-

表1：フィルター候補部材とそれぞれの粒径

3) キセノンガスによるラドン除去試験

吸着剤冷却によるラドン除去試験のセットアップを製作した。キセノンガスによるラドン除去のためにはフィルターを低温に保つ必要がある。キセノンガスが常温の場合、効率的な熱交換機構が必要となる。今回この熱交換機構を図7の様に開発した。熱交換部分は真空断熱容器内にある。これによりガス上流の常温部からガス下流の低温部（～-100℃）またはその逆が容易となる。

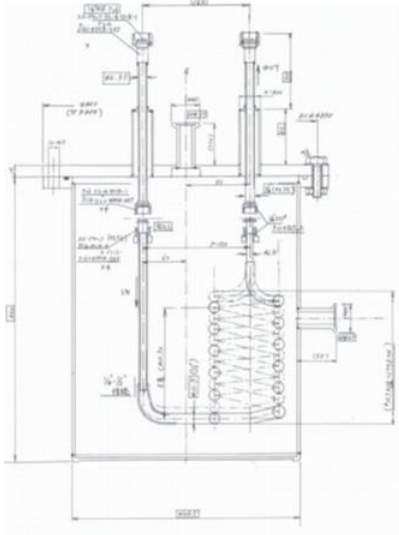


図7：熱交換機構

これと、2) のフィルターを1) のラドン検出系に組み込むことで、高感度なラドン除去効率試験が可能となった。

また、吸着剤とレーザーを使った吸着手法については、銅パウダー、SiO2 パウダーによるキセノン中ラドンの吸着試験を実施した。残念ながら、以上の部材では有意なラドン吸着能力はみられなかった。

以上が本研究の結果となる。残念ながら、キセノン中のラドン吸着剤として、活性炭にかわる部材を見出すまでには至らなかった。しかし、低バックグラウンドのラドン検出器セットアップを開発したことにより、暗黒物質探索実験における低バックグラウンド環境を模したレベルでのラドン除去試験が可能となった。また、今回開発した冷却—高効率な熱交換機構を運用することで、より効率的なラドン除去システムを開発することは可能であると考えられる。

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〕

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 1 件)

キセノンからの放射性ラドン除去

小川 洋

2015年5月15日-17日

「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」2015年領域研究会

神戸大学百年記念館 六甲ホール

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 洋 (OGAWA Hiroshi)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：20374910

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：