

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03668

研究課題名（和文）ラドン検出器による暗黒物質探索の高感度化

研究課題名（英文）Improvement of sensitivity for dark matter search by using Rn detector

研究代表者

竹田 敦 (Atsushi, Takeda)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：40401286

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：イタリア・グランサッソ国立研究所で行われている世界最高感度での暗黒物質直接探索実験の感度を決定する中性子vetoカウンター中のラドンによるバックグラウンドを定量し暗黒物質探索の高感度化を行った。
そのため、中性子vetoカウンター中のガドリニウム水溶液中に含まれるウラン系列の放射性同位体であるラドン222の濃度をリアルタイムにモニター可能なシステムを開発し、ラドンが暗黒物質探索に与える影響について、モンテカルロシミュレーションを用いて定量・評価することで、暗黒物質探索の高感度化に貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

暗黒物質は、宇宙空間において我々の身の回りにある通常の物質の5倍以上を占めており、我々の周囲にも1リットルあたり数個程度存在していると考えられているにもかかわらず、その正体が全く分かっていない。この暗黒物質の正体を解明することは、我々の住む宇宙の創成メカニズムを理解することにつながる。本研究成果によって暗黒物質探索を大きく妨げているノイズ事象である自然放射性不純物によるバックグラウンド事象の理解と低減が進み、探索の感度が向上されたことで、暗黒物質発見に向けての大きな前進となった。また、本研究によって確立された高感度水中ラドン検出器の技術は、日常での放射能測定に応用可能である。

研究成果の概要（英文）：We evaluated backgrounds from radon in the neutron veto counter which is indispensable for the world's most sensitive dark matter search conducted at Laboratori Nazionali del Gran Sasso in Italy and contributed to increasing the sensitivity of the dark matter search. We have developed a system that can monitor the concentration of radon 222, a radioactive isotope of the uranium series, contained in the gadolinium aqueous solution in the neutron veto counter in real time. We have contributed to increasing the sensitivity of dark matter search by quantifying and evaluating the effect of radon on dark matter search using Monte Carlo simulation.

研究分野：素粒子、原子核、宇宙線および宇宙物理に関連する実験

キーワード：暗黒物質 バックグラウンド 放射性不純物 ラドン 暗黒物質探索 高感度ラドン検出器 ガドリニウム

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

イタリア・グランサッソ国立研究所で準備が進められていた暗黒物質の直接探索実験である XENONnT 実験において、Time Projection Chamber (TPC) 内で中性子が一回散乱するような事象は、暗黒物質の有力候補である WIMP による信号と見分けることができないため、中性子を veto するための中性子カウンターの開発が急務であった。中性子カウンターは、宇宙線ミュオンや岩盤からのガンマ線・中性子等のバックグラウンド事象を低減するために TPC を取り囲む水タンク内に 0.2% 程度のガドリニウムを溶かすことにより、TPC 内で一回散乱した中性子が水タンク内のガドリニウムに吸収された後に放出する合計約 8 MeV の複数のガンマ線を光電子増倍管で検出することで、中性子によるバックグラウンド事象を同定する。中性子カウンターによって TPC との反同時計測で中性子によるバックグラウンド事象を低減するにあたって、TPC での暗黒物質探索時間の不感時間を最小にするために、中性子カウンター自体が何かしらの事象を検出する頻度、つまり中性子カウンター自体のバックグラウンドを低く抑える必要がある。中性子カウンターのバックグラウンドとしては、光電子増倍管中に含まれる放射性不純物による寄与の他に、水タンク内に溶かされるガドリニウムパウダー中の放射性不純物や、水中に溶け込むウラン系列のラドンガスによる影響がある。中性子カウンターを開発するにあたって、それらのバックグラウンドへの寄与を定量し、十分に低く抑えることが重要であった。

2. 研究の目的

本研究では、ガドリニウム水溶液で満たされた水タンク中のラドン濃度をモニターするシステムを構築するとともに、ラドンをはじめとする水中の放射性不純物が、TPC の不感時間に与える影響及び、TPC 内に直接エネルギーを付与して電子散乱型のバックグラウンドに与える影響についてのシミュレーションによる見積を行うことで、暗黒物質の直接探索の高感度化に寄与することを目的とする。前者は、原子核反跳型のバックグラウンドを直接低減するため中性子カウンターのパフォーマンスを最大にするために必要で、後者は、電子散乱型のバックグラウンドの原子核反跳領域へのしみだしを低減するために必要となる。水タンク中で許容されるラドン濃度は、 20 mBq/m^3 レベルであることがシミュレーションによりわかっているため、水中のラドン濃度を 10 mBq/m^3 以下の感度でモニターできるようなシステムの構築が必要となる。

3. 研究の方法

本研究は、2つの部分からなる。一つは、ガドリニウム水溶液中のラドン濃度を 10 mBq/m^3 以下の感度でリアルタイムに常時モニターできるシステムを構築することであり、もう一つは、ラドンをはじめとする放射性不純物が、中性子カウンターや TPC 自体に与える影響をシミュレーションにより評価することである。

- (1) **ガドリニウム水溶液中のラドン濃度モニターの構築:** 本研究に先立って、日本で行われていた暗黒物質直接探索実験である XMASS 実験において、宇宙線ミュオンや岩盤からのガンマ線・中性子等のバックグラウンドを低減するための水タンク中のラドン濃度を長期にわたってモニターしていた静電捕集型の高感度水中ラドン濃度検出器を、ガドリニウム水中で使用可能なように改良する。さらに、安全管理の厳しいグランサッソ地下実験室において、ラドン検出器システムから万一水漏れが発生した場合にシステムへの水循環を自動で停止するための装置の追加などを行う。
- (2) **シミュレーションによるバックグラウンド評価:** Geant4 をベースとして開発がすすめられている XENONnT 検出器のシミュレーションコードを用いて、中性子カウンター中に分布する放射性不純物による TPC 不感時間の評価と、TPC に直接エネルギーを付与する影響についての評価を行う。特に、ガドリニウムパウダー中に含まれる放射性不純物(主としてウラン・トリウム・アクチニウム系列およびカリウム)量を、ICP-MS および高純度ゲルマニウム検出器を用いて定量し、それらの値をもとにしたシミュレーションを走らせることで、ガドリニウムパウダー中に含まれることが許される放射性不純物量の条件を算出し、ガドリニウムパウダーの選定に役立てた。

4. 研究成果

(1) **ガドリニウム水溶液中のラドン濃度モニターの構築:** 神戸大学の研究チームが、既存の静電捕集型高感度水中ラドン検出器の通水部分の全部品について、ガドリニウム水溶液への不純物溶出による透過率の低減度合いの測定を行った結果、封止用のシーリング材が興味のある波長領域において透過率を有意に低減させることと、透過率低減が大幅に改善される代替シーリング材の存在がすでに分かっていたため、そこから引き継いでその代替シーリング材をラドン検出器に用いる(2 箇所)にあたって、ラドン検出器のバックグ

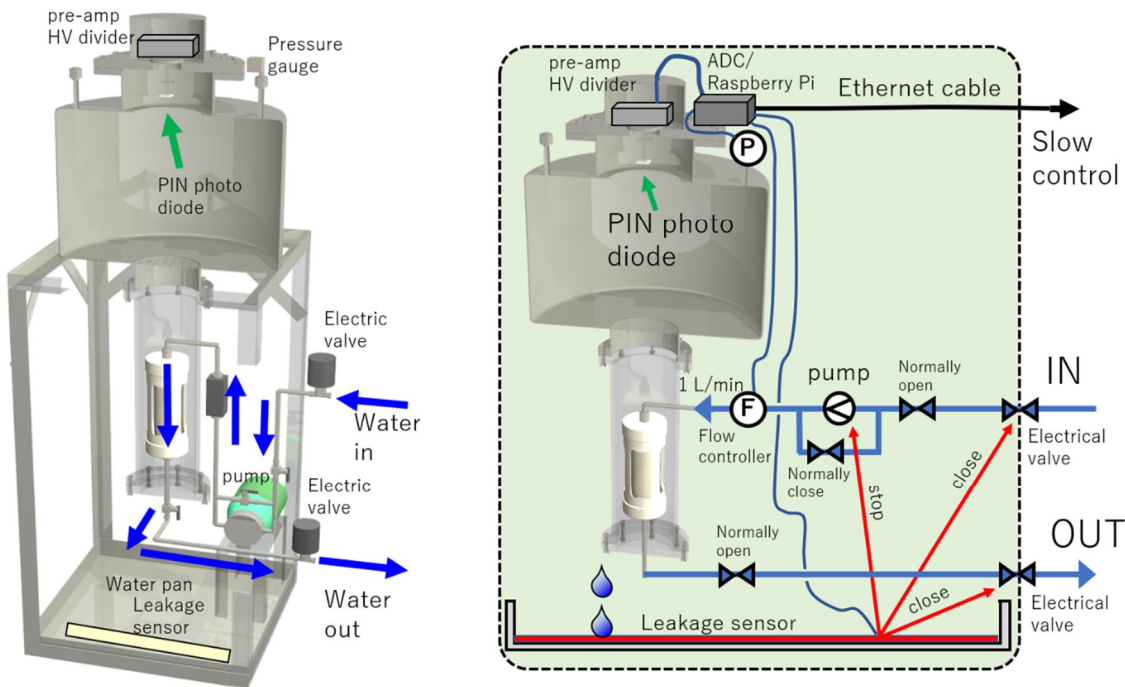


図1: 本研究で開発された高感度水中ラドン濃度モニターシステムの概略を示す。

ラウンドを悪化させないように、シーリング材からのラドン放出率の測定を行った。測定の結果、ラドン放出率は、 $0.17 \pm 0.08 \text{ mBq/m}^3$ (2 個)となり、水ラドン検出器自体のバックグラウンドレベル($\sim 10 \text{ mBq/m}^3$) に比べて十分に低いことが確認されたため、このシーリング材を本検出器に使用することを決定した。

図 1 に、開発したラドンモニターシステムの概略を示す、XENONnT 検出器の水タンクから水をサンプルし、水ラドン検出器に導入する。ポンプとフローコントローラーによって 1 L/min に制御された水が膜脱気モジュール内を通過する際に脱気されたラドンガスの子孫核種である ^{218}Po , ^{214}Po (一般に空気中で正に帯電している) が、 -1500V の高電圧に保たれた PIN フォトダイオードの周囲に捕集され、そのあとに放出するアルファ線を PIN フォトダイオードで検出することでラドン濃度がモニターされる。膜脱気モジュール部分は、アクリル製のハウジングでカバーされており、万一、ハウジングが破損してサンプル水が漏れた場合のために、水センサーと自動弁によって水の流れが停止されるようになっている。アルファ線のエネルギースペクトル情報は、水の流量・検出器内圧力・水漏れセンサーの状態などの情報とともに、スローコントロールシステムによって常時記録される。

(2)シミュレーションによるバックグラウンド評価:

Geant4 をベースとして開発がすすめられている XENONnT 検出器のシミュレーションコードを用いて、中性子カウンター中に分布する放射性不純物による TPC 不感時間の評価と、TPC に直接エネルギーを付与する影響についての評価を行った。ガドリニウムパウダー ($\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$) 中にわずかに含まれる U/Th 系列とカリウムの放射性同位体を中性子カウンターのガドリニウム水溶液中に一樣に分布させて、各光電子増倍管のヒット数を求め、ある時間幅内に同時にヒットする光電子増倍管の数とその時の事象レートが求められた。そこから、TPC との反同時計測器としての性能評価が行われた。そこから、ガドリニウムパウダー中の不純物として、 ^{238}U は 5 mBq/kg 、 ^{232}Th は 10 mBq/kg 、 ^{40}K は 100 mBq/kg の条件を満たした場合に、中性子カウンターの事象レートが光電子増倍管からの事象レートに比べて約 1 桁小さい寄与におさえられることが分かった。その際の事象レートは、同時ヒット数 10 の場合に 8 Hz 程度であることが分かった。また、放射性不純物が TPC に直接エネルギーを付与して生じる電子散乱型のバックグラウンド量についても見積りが行われ、上記の条件を満たしている場合には、TPC 内の光電子増倍管からのバックグラウンドに比して無視できることが確かめられた。ガドリニウムパウダー中の ^{238}U 5 mBq/kg を中性子カウンターに 0.2% 濃度に溶かすと 24 mBq/m^3 相当になるため、放射平衡を仮定した場合に、ラドン濃度として 10 mBq/m^3 以下の感度で常時モニターをすれば、暗黒物質探索を高感度に遂行することが可能となることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 竹田敦
2. 発表標題 XENON実験：中性子veto内の放射性不純物モニター
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹田敦
2. 発表標題 Development of high-sensitivity radon detector in water with continuous measurement
3. 学会等名 XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹田敦
2. 発表標題 XENONnT 中性子vetoカウンターにおけるガドリニウム水中のRn濃度モニター
3. 学会等名 日本物理学会 2020年第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹田敦
2. 発表標題 XENONnT 中性子vetoカウンターにおけるガドリニウム水中のRn濃度モニター
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹田敦
2. 発表標題 XENONnT 遮蔽水タンク中のラドン濃度モニター
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (九州大学伊都キャンパス)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹田敦
2. 発表標題 XENONnT 水タンク中ラドンの影響評価とモニターシステムの構築
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会 (信州大学松本キャンパス)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	竹内 康雄 (Takeuchi Yasuo) (60272522)	神戸大学・理学研究科・教授 (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------