

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6月4日現在

機関番号：11501
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21540293
 研究課題名（和文）
 地下深部岩石中のミュオン生成核種を用いた過去1千万年の宇宙線変動の探索法の開発
 研究課題名（英文）
 DEVELOPMENT OF DETECTION METHOD FOR SECULAR VARIATION OF COSMIC RAYS OVER THE PAST TEN MILLION YEARS USING COSMOGENIC NUCLEI BY MUON IN DEEP ROCK
 研究代表者
 櫻井 敬久（SAKURAI HIROHISA）
 山形大学・理学部・教授
 研究者番号：60150265

研究成果の概要（和文）：高エネルギー宇宙線ミュオンの永年変動の探索法を開発した。宇宙線によって生成される高エネルギーミュオンが地下深部の花崗岩中の石英に生成する宇宙線生成核種 Be-10（半減期 160 万年）、Al-26（半減期 74 万年）を探索するため、加速器による 160 GeV/c ミュオンを石英板に照射し Be-10、Al-26 の生成率を加速器質量分析法により求めた。また、花崗岩から分析に使用する石英の抽出効率を調べた。

研究成果の概要（英文）：The rocks in deep underground are exposed by high energy muon for long time and record an accumulation of muon induced cosmogenic nuclides of Be-10 and Al-26. We have measured the cross-sections of production rates of Be-10 and Al-26 for SiO₂ plates using the muon beam with the energy of 160 GeV/c at CERN. Also, the efficiency was investigated for the extraction of SiO₂ from granite rocks.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線永年変動 ミュオン 宇宙線生成核種 Be-10 地下深部岩石

1. 研究開始当初の背景

（1）宇宙線の永年変化は、超新星の出現頻度との関係や宇宙線の銀河円盤内の閉じ込めと滞在時間により宇宙線の起源、伝播の問題と密接に関係している。宇宙線の原子核組成から宇宙線の平均滞在時間は約100万年と考えられているが、数百万年の

スケールでの宇宙線強度変動の実験測定データはほとんど無い。特に高エネルギー宇宙線の永年変化の実験的研究は未知である。
 （2）研究代表者らの年輪を使った研究から大気中宇宙線生成核種の濃度変動は宇宙線強度変動およびスペクトル変動を表しており過去の宇宙線変動を実験的に探索でき

ることが分かってきた。また、加速器質量分析法 (AMS) を使用することにより極低レベル核種の微量試料を多数高精度で測定できることが分かってきた。

(4) しかし、大気中での宇宙線生成核種は低エネルギーの宇宙線強度変動すなわち太陽活動による宇宙線モジュレーションが卓越しており高エネルギー宇宙線の永年変化を隠してしまう。

2. 研究の目的

(1) 過去1千万年間の高エネルギー宇宙線強度および宇宙線スペクトルの変動について探索する実験的研究法を開発することを目的としている。

(2) 過去の高エネルギー宇宙線強度の永年変化を高エネルギーミュオンによる長半減期の宇宙線生成核種を測定する方法を開発する。

(3) 高エネルギー宇宙線ミュオンが地下深部の岩石中に生成する宇宙線生成核種 Al-26 (半減期 74 万年), Be-10 (半減期 160 万年) を加速器質量分析法 (AMS) により測定する。

3. 研究の方法

(1) Al-26, Be-10 は、ミュオンと岩石組成の石英との衝突により生成される。しかし、ミュオン当たりの生成率は Heisinger et al. によって実験的に求められた断面積の値 (EPSL, 200, 2002) のみである。そこで CERN の COMPAS 実験における 160GeV のミュオンビームラインを使用して高純度石英板への照射実験を行った。

(2) ミュオン照射した石英板は非破壊ガンマ線測定を行い短半減期核種 Be-7、Na-22 の濃度を測定した。

(3) 石英板は、(2) の測定の後、弘前大学で化学処理して Al-26 および Be-10 の測

定試料を作成し東京大学 MALT AMS により測定を行った。

(4) 地下深部の岩石試料として石英の多く含まれている花崗岩ボーリングコアが最適である。花崗岩の選定と花崗岩試料から石英抽出法の開発を行った。

4. 研究成果

(1) ミュオンビームのサイズ分布

図1はミュオンビームに対する石英板とミュオン数を計数するPMTシンチレーションカウンターの配置を示している。ミュオンビームの上流は左手である。図2の写真は石英板のターゲットであり、図1のPMT①とPMT②の間に配置している。

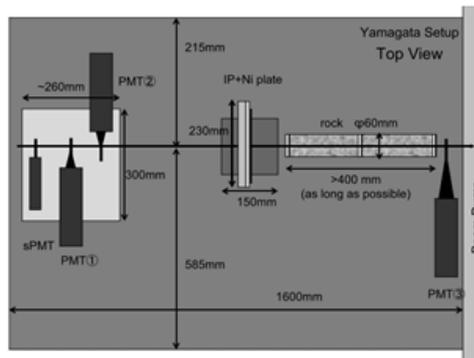


図1 ミュオン照射のセットアップ



図2 照射ターゲットの石英板

ミュオンによる生成率を精度良く求めるため石英板とシンチレータの大きさは等しくしてある。しかし、ミュオンビームの広がり空間分布を知る必要があり、石英ターゲットの後ろにニッケル板を置き、ニッケル板上の生成核種を利用しイメージングプレートにより図3のミュオン照射画像を取得した。これより、ミュオンビー

ムのほとんどがターゲットを通過していることが分かった。

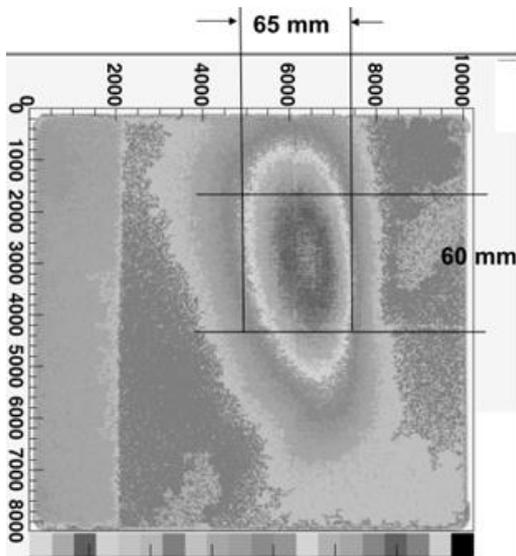


図3 イメージングプレートによるミュオンビームプロファイル

(2) 照射ミュオン数

ミュオン照射実験は2007年と2010年に行った。2007年の全ミュオン数は145日間で 1.8×10^{13} 個で2010年は121日間で 1.3×10^{13} 個であった。図4は照射スピルのミュオン強度を示しており1秒間に約 10^7 個である。

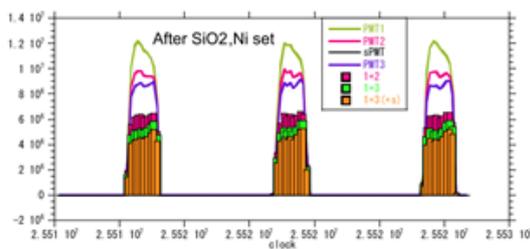


図4 ミュオンの照射スピル

(3) 生成核種

①ターゲット石英板はホルダーに並べている。ビーム下流の石英板が上流側の影響を受ける割合を生成された Be-7 の濃度で調べた。図5はターゲット石英板のミュオンビーム上流からの位置と Be-7 濃度の関係を示している。誤差の範囲ではほぼ一定であるが、平均では石英板6枚に対して約6%の増加がある。これは、1枚あたり約

1%の増加率であり、石英板中でミュオンにより生成された中性子の影響が考えられる。

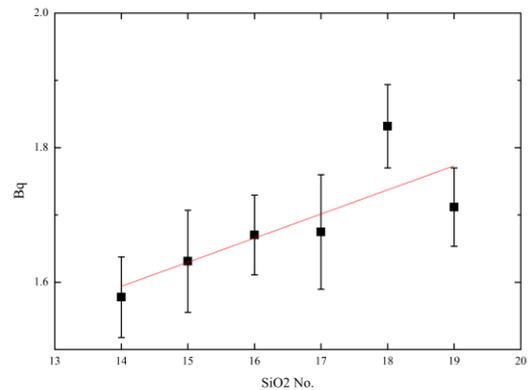


図6 石英板の位置と Be-7 濃度の関係

② Be-10 および Al-26 は、生成量が 10^5 atoms/g 石英の order であった。分析の結果以下のことが分かった。

- 100日照射試料であれば現状でも分析は高精度で可能。 ^{10}Be で感度限界の1桁上, ^{26}Al で4桁上, 誤差 1σ が3%
- 未照射石英板は, 100日照射石英板より3桁以上低い核種濃度を示す
- 石英板に若干の Al が含まれている (0.3 ppm 程度)

2007年および2010年のミュオン照射実験から得られた反応断面積は、Be-10 に対して各々 0.0076 ± 0.0002 mb、 0.0068 ± 0.0004 mb とほぼ同様な結果であった。Heisinger et al (2002)の断面積 0.094 ± 0.013 mb と比べて1ケタ低い値である。我々のターゲットは前方に物質を置かないセットアップであり、前方の物質量の違いが表れていると考えられる。

(4) 花崗岩コア

・岐阜県東濃地科学センターの土岐花崗岩は、約ミュオンの到達最小エネルギーが1 TeV となる1000mの深度までのボーリングコアサンプルである。土岐花崗岩は、

約1億年前の白亜紀後期にマグマが固まって形成され隆起などを経て1千万年前に堆積物で覆われたことが分かっている。従って、過去1千万年の素性は地質および鉱物学的に明らか(小松・中島、「筑波大学・核燃料開発機構」研究報告、2004)であり、過去1千万年の岩石中の宇宙線生成核種を1000mの深度まで調べるために最適な試料である。

・Be-10 に対するAMS測定感度はBe-10/Be-9で約 10^{-14} であり、地下深部のミューオンにより生成されるBe-10は 10^{-4} atoms/year程度であるので約3kg程度の岩石試料を処理する必要がある。このため岩石試料から石英抽出、AMS測定試料作成へのルーチンを開発した。

・試料量865.97gを磁力分離して、非磁性鉱物が604.12g、磁性鉱物が4.17gであった。残り257.68gの内訳は、磁力分離前の試料6.00g、 $>500\mu\text{m}$ で粉碎しなかった粒子(有色鉱物が多かったため)20.1g、超音波洗浄前のふるい分けで $<150\mu\text{m}$ だった粒子178.41g、超音波洗浄後のふるい分けで $<150\mu\text{m}$ だった粒子17.08gなどである。約40gは処理中に飛散したものとジョークラッシュの共洗いに使用したものである。石英抽出に花崗岩から約70%の試料が使えることが分かった。



土岐花崗岩コア

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 2 件)

① H. SAKURAI, Y. TAKAHASHI, N. DOSHITA, T. OE, T. SATO, S. KIKUCHI, K. HORIUCHI, N. SASAKI, K. KONDO, N. IWATA, F. TOKANAI, S. GUNJI, H. MATSUZAKI

“Production rates of nuclide in synthetic silica induced by high-energy mu-on beam at CERN” Proceedings of the 32nd ICRC, Aug.16th, 2011, SH4.3, 0980(1-4) 査読無し

② H. SAKURAI, T. SATO, Y. TAKAHASHI, T. OE, S. KIKUCHI, K. MASUDA, Y. MATSUBARA, H. MIYAHARA, H. OHASHI, W. TAVERA⁵, J. SALINAS

“DAILY VARIATION OF COSMOGENIC NUCLIDE BE-7 CONCENTRATIONS IN HIGH ALTITUDE ATMOSPHERE AT MT. CHACALTAYA AT THE SOLAR MINIMUM FROM 2009”

Proceedings of the 32nd ICRC, Aug.

16th, 2011, SH4.3, 0364(1-4) 査読無し

[学会発表] (計 4 件)

① H. Sakurai, “Production rates of nuclide in synthetic silica induced by high-energy mu-on beam at CERN” the 32nd ICRC, 2011, @Beijing

② H. SAKURAI, “DAILY VARIATION OF COSMOGENIC NUCLIDE BE-7 CONCENTRATIONS IN HIGH ALTITUDE ATMOSPHERE AT MT. CHACALTAYA AT THE SOLAR MINIMUM FROM 2009” THE 32ND ICRC, 2011, @BEIJING

③ 櫻井敬久, 「2000年から11年間の宇宙線生成核種 Be-7 の大気中濃度変動」日本物理学会、2011年9月@弘前大学

④ 櫻井敬久, 「ミューオンによる in-situ 宇宙線生成核種 II」日本物理学会、2010年9月@九州工業大学

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

櫻井 敬久 (SAKURAI HIROHISA)

山形大学・理学部・教授

研究者番号：60150265

(2) 研究分担者

堀内 一穂 (HORIUCHI KAZUHO)

弘前大学・理工学研究科・助教

研究者番号：00344614

岩田 尚能 (IWATA NAOYOSHI)
山形大学・理学部・講師
研究者番号：70302289

(3) 連携研究者

松崎 浩之 (MATSUZAKI HIROYUKI)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：60313194

堂下 典弘 (DOSHITA NORIHIRO)
山形大学・理学部・助教
研究者番号：90451658