

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540297

研究課題名(和文) 地下深部花崗岩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

研究課題名(英文) Secular variation of cosmic rays in past ten million years using muon induced radionuclide in deep underground granite rocks

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙空間から地球に降り注いでいる高いエネルギーをもった宇宙線は、過去1千万年の間、現在と同様な強度であったかを探索することを目的としている。そのため高エネルギーミュオンが地下深部の岩石中に生成する半減期の長い宇宙線生成核種Be-10(136万年)、Al-26(72万年)を加速器質量分析法により調べた。古い岩体である土岐花崗岩コア試料にミュオンを照射し花崗岩の石英中の核種生成率の様相が明らかにされた。

研究成果の概要(英文)：The research objective is to detect the secular variations in high-energy cosmic rays, because the variations provide us an indication about movements of the earth in the galactic space for the last ten million years. High-energy cosmic muons produce long-lived radioactive nuclides in deep underground rock, such as Be-10 and Al-26, which have half-lives of 1.36×10^6 yr and 7.2×10^5 yr, respectively. Therefore, the concentrations of Be-10 and Al-26 in the rocks provide us with an indication of the long-term variations in high-energy cosmic rays over a few million years. We investigated the muon induced Be-10 and Al-26 in the extracted silica from high-energy muon exposed Toki-granite core samples, using Accelerator Mass Spectrometry. The behavior of production rates of muon induced nuclides was found out for the granite core.

研究分野：宇宙線

キーワード：宇宙線生成核種 ミュオン 加速器質量分析 Be-10 花崗岩

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙線の永年変化は、超新星の出現頻度および宇宙線の銀河円盤内の閉じ込めと滞在時間に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) 地球が属している太陽系は銀河系のオリオンアームにあり、銀河中心に対して250 km/sの速度で回転していて約2.5億年で1周する。従って、1千万年の間に太陽系は銀河系の異なる磁場分布を経験していると考えられる。

(3) 地下深部まで進入するミュオンを生成する一次宇宙線のエネルギーは1 TeVを超えるが、そのラーモア半径は太陽磁場の勢力圏である太陽圏(100AU)より大きくなる。それゆえ、高エネルギーミュオンは、銀河のスパイラルアームなどにトラップされている高エネルギー宇宙線が太陽磁場変動を受けることなく地球に入射して生成したものである。また、チベットでの宇宙線観測から 10^{15} eV程度の宇宙線は、アームにかなりよくまきついて定常的であることが分かってきた(Amenomori et al., Science 314, pp439, 2006)が、1千万年のスケールに渡って定常であるかは未知である。

2. 研究の目的

(1) 100 GeVを超える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長半減期の宇宙線生成核種 Al-26(72 万年), Be-10(136 万年)を加速器質量分析法(AMS)により測定して、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ことを目的

としている。

(2) 1億年前に形成され1千万年前に岩体上部が堆積物で覆われた土岐花崗岩は、1千万年の間、一定の状態地球に入射してくる宇宙線変動を記録している。この花崗岩を試料として高エネルギーミュオンにより生成される生成核種の特性を調べる。

3. 研究の方法

(1) 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。花崗岩中の石英を抽出して、石英中に生成されるミュオン生成核種を測定するため、土岐花崗岩の鉱物組成をXRF分析により調べた。

(2) 宇宙線ミュオンと岩石との衝突により生成される核種の特性を調べるため、CERNのCOMPAS実験における160GeVのミュオンビームを直接照射した土岐花崗岩(図1)について生成核種分析を行った。

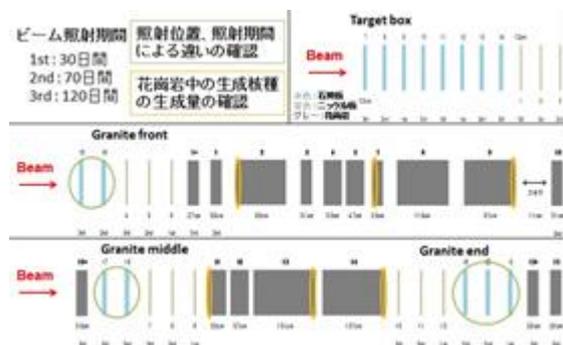


図1 ミュオン照射した花崗岩の配置

(3) ミュオン照射した土岐花崗岩の非破壊ガンマ線測定を行い短半減期核種の濃度特性を測定した。

(4) ミュオン照射した土岐花崗岩は、弘前大学にて化学処理をしてAl-26およびBe-10の分析試料を作成して東京大学MALT AMSにより分析測定を行った。



写真 1 ミューオンビームラインに置かれた土岐花崗岩コアサンプル

4. 研究成果

(1) 土岐花崗岩

ミューオン照射した土岐花崗岩は、ミューオンの到達最小エネルギーが 1 TeV となる 1000 m 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 千万年前に堆積物で覆われたことが分かっており、過去 1 千万年の素性は地質および鉱物学的に明らかである（小松・中島、「筑波大学・核燃料開発機構」研究報告、2004）。そのため、土岐花崗岩は過去 1 千万年の間、大規模な移動は無いと考えられ、岩石中の宇宙線生成核種の変化について調べる試料として最適である。

(2) ミューオンビーム照射

深度が 300 m から 1000 m の間にある 15 個の花崗岩コアサンプルにミューオンビームが照射された。写真 1 は花崗岩の配置の様子である。ミューオンが照射された花崗岩コア試料は直径が 64 mm、15 個全部で約 1 m である。

(3) 入射ミューオン強度と生成核種量

Ni 板にミューオンを照射して入射ミューオン数と Ni 板に生成されるガンマ線放出核種の生成量の関係を調べた。Ni 板は非破壊で極低バックグラウンドゲルマニウムガンマ線検出器により測定している。図 2 は入射ミューオン数に対する生成核種 Co-56、Co-57、Co-58 の濃度の関係を示しており、良い一次の相関

があることが分かる。

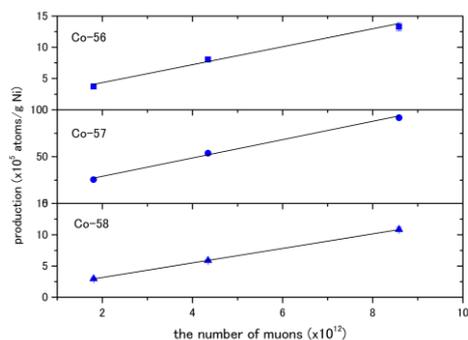


図 2 ミューオン数と生成核種量の関係

照射ミューオンのビームサイズは、花崗岩コア試料の前に Ni 板を置き、照射後、Ni 板に生成された放射性核種の濃度分布を放射線強度の積分記録型検出器イメージングプレートにより撮像して調べた。図 3 は全ミューオン強度の 50% が集中しているビーム部分を示している。そのビームサイズは水平方向が 66 mm、垂直方向が 114 mm であり、花崗岩試料を十分カバーしている。

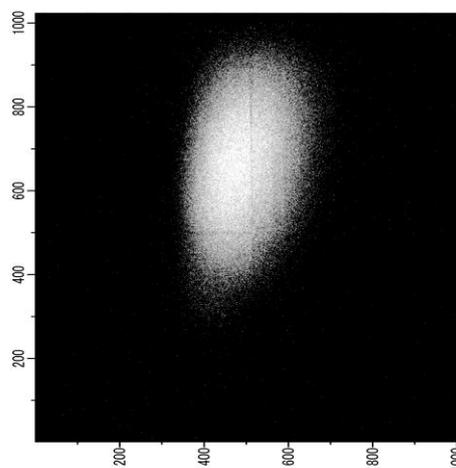


図 3 ミューオンビームサイズ

(3) 土岐花崗岩の組成

土岐花崗岩から石英を抽出して、その中の Be-10 および Al-26 を AMS により分析するため、花崗岩試料の X 線元素分析により測定した元素強度から鉱物組成を求めた。表 1 は分析結果であり、岩石標準試料の組成とほぼ同様であった。組成を使ったノルム計算から、

石英は30.7重量%であった。

組成	割合[wt.%]
SiO ₂	75.74
Al ₂ O ₃	12.99
Fe ₂ O ₃	1.48
CaO	0.96
Na ₂ O	3.94
K ₂ O	5.10

表1 土岐花崗岩の鉱物組成

(4) 花崗岩バルク試料中の生成核種
 照射ミュオンにより花崗岩に生成される核種の岩石中の特性を調べるためには花崗岩バルク試料を用いて非破壊で測定することが重要である。そのため、岩石中にミュオンにより生成されるNa-22に着目して極低バックグラウンドゲルマニウムガンマ線検出器により、非破壊で照射花崗岩試料の直接測定を行った。
 Na-22は半減期が2.6年のγ線放出核種である。Na-22は花崗岩における生成は鉱物組成のSi、Alが主要なターゲットとなって生成される。

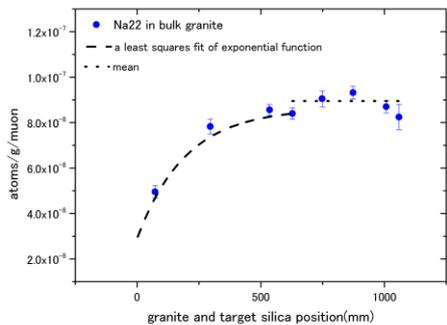


図4 花崗岩バルク試料に生成されたNa-22濃度プロファイル

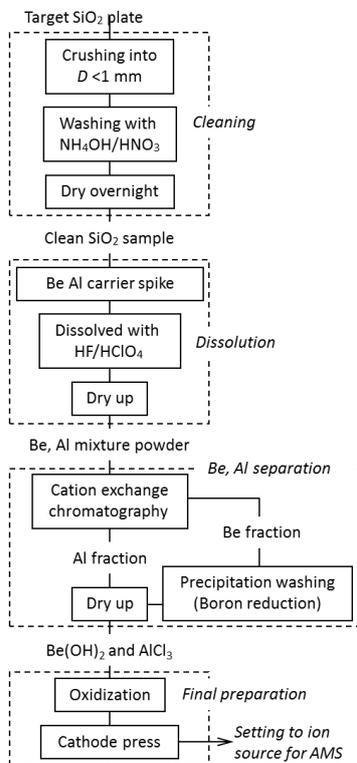
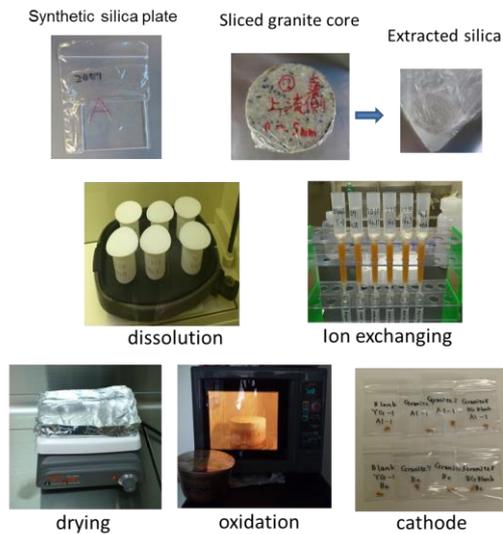
図4は花崗岩バルク試料中に生成された

Na-22の花崗岩の長さ方向に対する濃度分布である。花崗岩の長さとともにNa-22濃度が指数関数的に増加し約500mmでは飽和している。ミュオンの入射部に比べて約3倍の増加であった。

(5) 花崗岩からの石英抽出

Chemical treatment process of sample preparation

@ Hirosaki Univ.



上図は花崗岩を粉碎して石英を抽出した後

AMS 測定用カソードを作成する工程とその写真である。花崗岩から石英の抽出率は 27%から 30%の間であり、XRF 分析で得られた石英の重量%である 30.7%に近い値である。高純度の石英が抽出されていると考えられる。

(6) 花崗岩から抽出した石英中の生成核種
 図 5 の青い点は花崗岩から抽出された石英中に生成された Be-10 の生成断面積の花崗岩の長さ方向に対するプロットである。生成断面積は花崗岩の長さ方向に指数関数的に増加し 300 mm 付近で 0.019 mb に飽和している。増加度は 2.4 倍であった。花崗岩後部における増加部分は飽和部に比べて約 30%程度大きい。

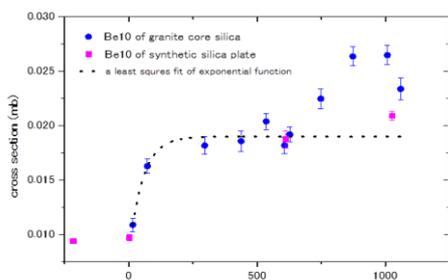


図 5 花崗岩石英中の Be-10 生成断面積プロファイル

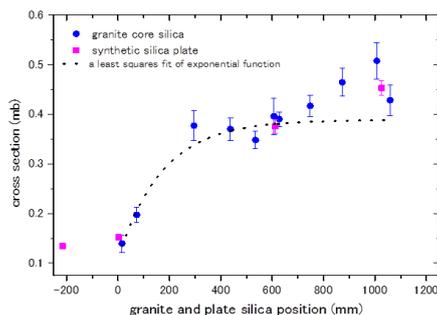


図 6 花崗岩石英中の Be-10 生成断面積プロファイル

図 6 の青い点は花崗岩から抽出された石英中に生成された A1-26 の生成断面積の花崗岩の長さ方向に対するプロットである。生成断面積は花崗岩の長さ方向に指数関数的に増加し 300 mm 付近で 0.39 mb に飽和している。増加度は 3.6 倍であった。花崗岩後部における増加部分は飽和部に比べて約 14%程度大きい。

い。

花崗岩後部の生成断面積の増加部分は花崗岩の直後のミュオンビームダンプのために置いてあるコンクリートブロックの影響が考えられる。

両方の図においてピンクの点は、各々、花崗岩の前後および間に置いた合成石英板中に生成された Be-10 および A1-26 の生成断面積を示している。それらは、各々、花崗岩から抽出した石英中に生成された Be-10 および A1-26 とほぼ同じ断面積を示している。このことから、石英板前方の物質量が生成に影響をおよぼしていることが分かった。

また、指数関数的な増加から深部花崗岩における Be-10、A1-26 の生成量は 0.3 m 程度までの前方にある花崗岩量（物質量）に影響されることが分かった。

Be-10 はミュオンが花崗岩石英中の酸素と衝突して生成されるが、中性子と酸素の衝突による Be-10 の生成断面積は 2 mb 程度なので、ミュオンによる生成断面積は中性子の約 100 分の 1 であった。同様に A1-26 は花崗岩石英中のケイ素との衝突により生成されるが、中性子に対しては 30 mb 程度なので、こちらも約 100 分の 1 であった。即ち、ミュオンと中性子の核子との相互作用の違いが表れている。

花崗岩に対するミュオンによる生成断面積から Be-10 の生成率は 3.8×10^{-7} atoms/g 石英/ミュオンとなる。約 600 m 深度の土岐花崗岩試料の Be-10 試験分析は $(4.1 \pm 3.7) \times 10^3$ atoms/g 石英を示した。数百万年の間宇宙線強度は一定であったと仮定すると宇宙線ミュオン強度は $(7.6 \pm 6.9) \times 10^{-5}$ ミュオン/cm²/sec となり、現在の強度 2.2×10^{-7} ミュオン/cm²/sec より大きい。今後、深度に対する Be-10 濃度を分析することにより過去数百万年の宇宙線強度変化を調べる道筋が明らかになった。

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 5 件)

- ① 紅林泰, 櫻井敬久, 他、ミューオンによる in-situ 宇宙線生成核種 III、日本物理学会、2013/3/26、「広島大学 (広島県・東広島市)」
- ② 紅林泰, 櫻井敬久, 他、ミューオンによる in-situ 宇宙線生成核種 IV、日本物理学会、2013/9/21、「高知大学 (高知県・高知市)」
- ③ 紅林泰, 櫻井敬久, 他、ミューオンによる in-situ 宇宙線生成核種 V、日本物理学会、2014/3/28、「東海大学 (神奈川県・平塚市)」
- ④ 紅林泰, 櫻井敬久, 他、2000 年から 14 年間の宇宙線生成核種 Be-7 の観測、日本物理学会、2014/3/28、「東海大学 (神奈川県・平塚市)」
- ⑤ Y. Kurebayashi, H. Sakurai, et. al., Induced nuclide ^{10}Be , ^{26}Al , and ^{22}Na in a granite core exposed by 160 GeV/c muon、The 13th Int. Conf. on Accelerator Mass Spectrometry、2014/8/28、「Aix-Marseille University-Montperrin Campus (Aix en Provence・France)」

[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：
出願年月日：
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
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
- (3) 連携研究者
松崎 浩之 (MATSUZAKI HIROYUKI)
東京大学・総合研究博物館・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

中島 和夫 (NAKASHIMA KAZUO)
山形大学・理学部・教授
研究者番号：70159060