

## 様式 C-19

# 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8日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360473

研究課題名（和文）超高エネルギー粒子の挙動と照射効果に関する実験的研究（JASMIN）

研究課題名（英文）Experimental study on behavior and radiation effect of very high-energy particles in matters

研究代表者

中島 宏（NAKASHIMA HIROSHI）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・副ディレクション長

研究者番号：20354764

研究成果の概要（和文）：米国フェルミ国立加速器研究所における高エネルギー加速器施設において、120GeV 陽子で生成した二次粒子線を用いた物質内粒子線挙動測定実験を行った。このデータを元に、高エネルギー加速器施設開発、宇宙線照射効果研究などにかかる、高エネルギー粒子輸送計算システム開発を行うと共に、粒子線照射効果評価法の確立に関する基礎研究を行った。

研究成果の概要（英文）：A series of experiment on radiation behavior and effects in matters with the secondary radiations generated by 120 GeV proton at high-energy accelerator facilities in Fermi National Accelerator Laboratory of U.S.A. Based on the data, high energy radiation transport calculation systems have been developed and basic study of estimation methods on radiation effects has been carried out for development of high energy accelerator facilities and study on radiation effects due to cosmic rays.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2010年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2011年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
年度			
総計	12,900,000	3,870,000	16,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：超高エネルギー、粒子、挙動、照射効果、実験

### 1. 研究開始当初の背景

100GeV 以上の超高エネルギー領域において放射線挙動解析が求めている高エネルギー粒子輸送計算システム開発及びその背景にある加速器、宇宙工学の分野においては、精度検証に足る測定がないことから、

OECD/NEA の加速器遮蔽専門家会合において、以下の測定データの必要性が示された。

・新たに提案されている 100GeV を超える超高エネルギー加速器施設では、ビームの強度化が図られ、設計精度の高度化が求められており、そのための遮蔽設計基礎データが

必要である。

・特に、100GeV のエネルギー近辺は、計算モデルとして共鳴モデルから Strings モデルや Dual Parton モデルへ移行する領域である。現在の計算結果のコード間の差は、モデルパラメータ設定の差により生じるものであり、これらを実験データによって検証する必要がある。

・これらの計算システムは素粒子・原子核物理実験における検出器設計にも用いられており、放射線損傷等の放射線照射効果を評価する観点からも計算精度の向上は重要である。

・米国フェルミ国立加速器研究所 (FNAL) の照射場は、CERN の中性子照射場に比して、更に多様な強度、スペクトル場を構築でき、放射線照射効果を研究する場として相補的でありうる。この照射場は、線量評価技術や粒子線照射効果評価法開発に資することができる。

これらの背景の基に、加速器遮蔽専門家会合のメンバーを中心として、FNAL における 100GeV 以上の超高エネルギー粒子による生成二次粒子線の物質内挙動解析にかかる実験を計画した。

実験開始に際しては、平成 19 年度に科研費を取得し、FNAL と JAEA を代表として研究覚書を締結したことにより、FNAL において Japanese-American Study of Muon Interactions and Neutron detection (JASMIN) Project (実験番号:T972) として承認された。実施に際しては、JAEA、KEK、九大、京大及び FNAL 等の約 40 名の研究者・技術者からなる FNAL-日本放射線物理共同実験チームを結成した。これは、放射線遮蔽、中性子工学、放射線計測、放射化学等の放射線工学に横断的に関わる分野の専門家から構成されており、多角的な視点から研究を計画し、平成 19 年度から実験を開始した。

## 2. 研究の目的

本研究では、先に取得した科研費により 2 年間に得られた成果をもとに、更に 100GeV を超える広範囲のエネルギー領域で生成される二次粒子、特に中性子のエネルギー分布を精度良く測定する手法を検討して、超高エネルギー粒子の物質内における挙動にかかる基礎データを取得することを目的とする。

## 3. 研究方法

本研究では、米国 FERMI 国立加速器研究所 FNAL の 150GeV シンクロトロンから供給される 120GeV 陽子を用いて、反陽子生成ターゲットステーション (Pbar)、ニュートリノ実

験施設 (NuMI) ミュオンビームダンプ下流及びメソンビームファクトリー (Meson) の 3 箇所で行った。

反陽子生成ターゲットステーション (Pbar) では、1TeV シンクロトロン (テバトロン) に反陽子を供給することを目的としている。ここでは、120GeV 陽子をニッケル合金ターゲットに当て、テバトロンの実験期間中、常に反陽子を生成している。生成された反陽子は、ターゲット後方に設置された電磁石を用いてテバトロンに導かれ、実験に供されると共に、残りの陽子や前方方向に放出された二次粒子は炭素製のビームダンプに吸収される。この一連のターゲット設備は、183cm 厚さの鉄及び 122cm 厚さのコンクリートで遮蔽されている。今回の実験ではターゲット周囲の鉄及びコンクリート遮蔽体の内部及び外側において、二次粒子束 (主に中性子束) 分布の測定を Cu、Al、Bi 等の試料を用いた放射化法により行った。また、ターゲット近辺から漏洩する空気中の放射能測定及び冷却水中の放射能測定も行った。さらに、BF<sub>3</sub> を用いたボナー球検出器を用いて、パルスモード及びカレントモードによる中性子スペクトル測定も試みるとともに、ビームの瞬間強度が非常に強いところでの NE213 検出器の使用の検討を行った。

ニュートリノ実験施設 (NuMI) は、ニュートリノ長期軸振動実験を行うことを目的として、約 750km 離れたミネソタ・スーダン鉱山に設置された検出器にニュートリノを射出するための実験施設である。ここでは、Main Injector と呼ばれるシンクロトロンで加速した 120GeV 陽子を黒鉛ターゲットに入射し、生成した二次粒子のうち、パイオンが電磁ホーンによって収束され、下流の崩壊領域 (Decay pipe) を飛行中にニュートリノとミュオンに崩壊する。ニュートリノは、下流のアブソーバー (Absorber) 及び岩石を透過し実験に供される。一方、ミュオンや崩壊領域を抜けてきた二次粒子は、アブソーバーや岩石を透過中に減衰する。本研究では、ビームダンプ下流の岩石中に設置されたトンネル (Alcove) に置いた放射化検出器等により粒子反応率分布及び生成放射能分布を測定した。また、各種線量計を用いて、中性子、 $\gamma$ 線等の線量分布の測定も行った。

メソンテストビームライン (Mtest) は、100GeV 級の陽子や $\pi$ メソン等を用いて、高エネルギー物理学実験や関連検出器の開発及びそれらに関する基礎研究を行う、ビームラインが複数集まった実験施設である。ここでは、専用マシンタイムが取れることから、ビ

ームエネルギー、強度、加速粒子の種類を実験に合わせて選択できる。本実験では、この専用ビームラインを用いて、120GeV 陽子入射による熱いターゲットからの中性子及び陽子エネルギースペクトルの測定を行った。併せて、本測定にかかる大強度パルス状陽子ビームによる二次粒子測定法の開発を行った。更に、超高エネルギー陽子入射による放射化断面積と生成核種の質量数分布に関する測定を行った。

#### 4. 研究成果

1) Pbar を用いた遮へい実験  
 本実験においては、放射化法を用いた反応率測定」によって、得られた反応率分布を Moyer モデルに適用し、モデル中で使われている中性子減弱距離・及び角度分布パラメータ  $b$  の決定を試みた。図 1 は、コンクリート遮蔽体内における反応率分布測定結果である。ここでプロットした値は生データではない。Pbar ターゲットを中性子発生源とした場合、FP の位置はその直上にないため、ターゲット位置から見た各測定位置の角度は微妙に違っている。即ち、正確な値を算出するためには、その違いを補正する必要がある。そこで、生データによって、 $\cdot$  を算出し、 $\cdot = 142 \text{ g/cm}^2$  という値を得た。それを使って体系表面のデータから角度分布パラメータ  $b$  を求め、さらにその  $b$  を使って、各反応率を  $\theta = 90^\circ$  位置まで補正した。その結果、減弱距離として  $\cdot = 145 \sim 155 \text{ g/cm}^2$ 、 $b = 3.1 \sim 4.4$  が得られた。

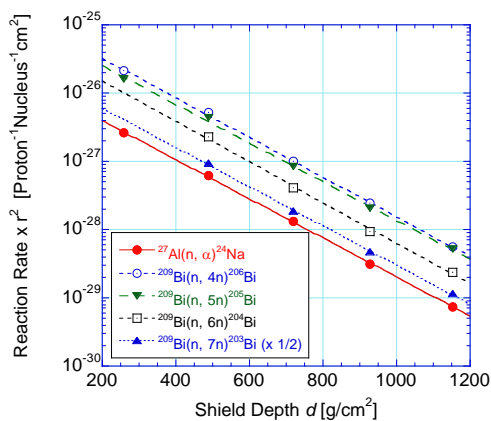


図 1 反応率分布測定結果

ボナー球による測定における初期スペクトルと Unfolding スペクトル、及びそれぞれのスペクトルに対する検出器応答及びしきい反応率 (C) の実験値 (E) に対する割合 (C/E) を図 2 に示す。初期スペクトルと比較して、Unfolding スペクトルの C/E 値は著しく改善

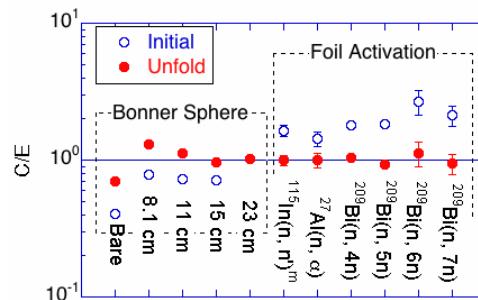


図 2 ボナー球と放射化法の比較結果

されている。全く違う手法で測定したデータをつなげたにもかかわらず、それらは矛盾無くつながって、広いエネルギー範囲の中性子スペクトル再現していることがわかる。このことは、2 種類の独自測定不尾による結果が一致しており、実験値の妥当性を裏付けるものである。

#### 2) NuMI におけるミューオン照射実験

本実験では、ミューオンビームにより照射された放射化箔中の生成放射能から核種の収率  $Y(Z, A)$  を得た。これに Rudstam によって求めた核破砕による核種の収率に対する半経験式

$$Y(Z, A) = \frac{\partial PR^{2/3} \exp[PA - R|Z - SA + TA^2|^{3/2}]}{1.79(\exp(PA_t t) - 1)}$$

を適用し、最小二乗フィッティングによりパラメータ  $P$  を求めた。Rudstam の半経験式のパラメータ  $P$  は入射エネルギー・入射粒子に依存する。本実験によって得られたパラメータ  $P$  の値を図 3 で示し、光子とハドロンのパラメータ  $P$  のエネルギー依存性と比較した。

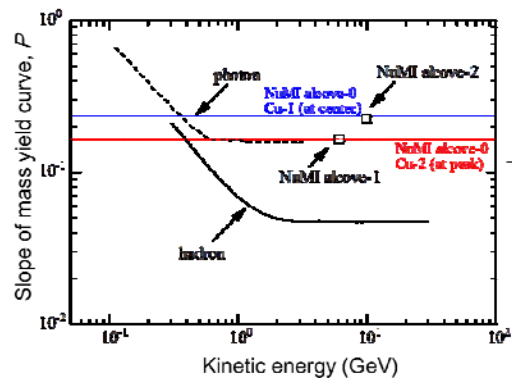


図 3 実験値と、光子、ハドロンのパラメータ  $P$  のエネルギー依存性ととの比較

その結果、高エネルギーの光子、または低エネルギーのハドロンによる核破砕のパラメータ  $P$  に相当することがわかった。尚、図

中の青及び赤線は、ビームの空間分布による違いを示している。起こっている核反応が高エネルギーミュオンによる核反応とすると、ミュオンと原子核との相互作用が仮想光子を介した電磁相互作用であり、高エネルギー光子による反応に近いことは矛盾しない。

### 3) Mtest 実験

ここでは、NE213 による TOF 法により測定した、厚いターゲットから生成する中性子のエネルギー・角度分布に関する測定結果について示す。図 4 はその測定結果の一例であり、10cm 厚さのタングステンに関する 90° 方向の実験値と PHITS, FLUKA, MARS による計算値の中性子エネルギースペクトルにかかる比較結果である。各計算結果とも前方角においては、実験値と非常に良い一致を示し、計算結果の妥当性が検証された。しかし図に示すように 90° 方向では、全ての計算値が実験値を過小評価した。これは、超高エネルギー物理モデルにおいて強い粒子放出の前方性を持つためであり、各コードに改善すべきところがあることが示された。

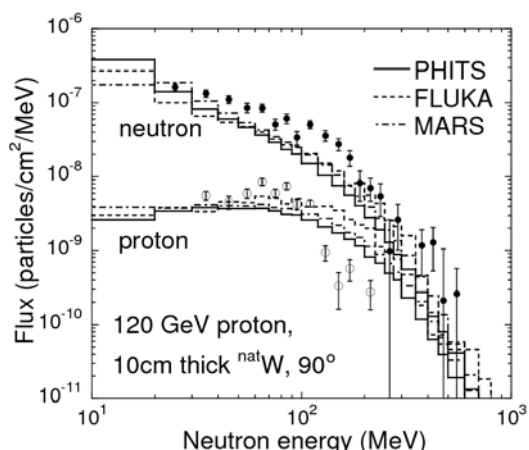


図 4 120GeV 陽子入射反応における 10cm 厚さのタングステンから生成する 90° 方向の中性子エネルギースペクトル

### 4) 放射性エアロゾルの挙動とその生成機構

本実験では、インパクター法により、120 GeV の陽子ターゲットステーション中の放射性エアロゾルの分析を行った。その結果、ターゲット由来と考えられる <sup>56</sup>Co, <sup>57</sup>Co, <sup>58</sup>Co, <sup>54</sup>Mn, <sup>51</sup>Cr などの核種が確認され、それらの粒径分布を示すことにより、放射性エアロゾルの生成機構を考察した。

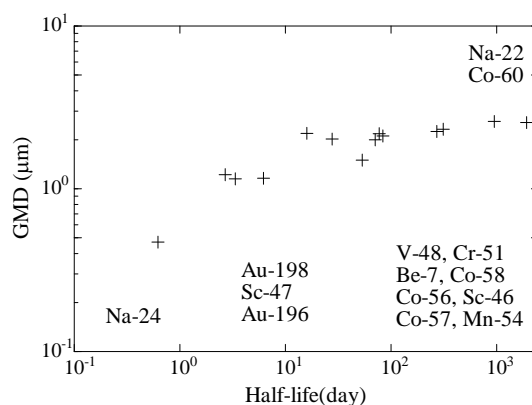


図 5 各放射性核種の半減期と幾何平均粒径の関係

図 5 に放射性核種の半減期と幾何平均粒径の関係を示す。その結果、その中央径がこれまでに報告された低エネルギー加速器施設で得られた結果よりもほぼ 1 桁大きいこと、これらの核種の半減期と粒径に比例関係があることがわかった。この結果は、これまでの低エネルギーの加速器施設での研究では見られなかった結果であり、前者の原因については現在も検討中である。後者の結果からは、以下の加速器ターゲット室内におけるエアロゾル成長過程が考えられる。

1. ターゲット室において放射性核種が生成
2. 生成した放射性核種を core として周りの非放射性エアロゾルを取り込むことにより成長 (radiolysis 等により)
3. 半減期の短い核種を core として成長した放射性エアロゾルは、生成から時間が経過すると (成長すると) 検出されないが、半減期の長い核種を core として成長した放射性エアロゾルは、生成から時間が経過しても検出される。それをサンプリングした結果が図 5 に示される、幾何平均粒径と半減期の比例関係であると考えた。またある程度の大きさでエアロゾルの成長が止まるため、半減期の長い核種については、同様の幾何平均粒径を持つと考えられる。

### 5) 冷却水中の放射性コロイド生成

ポリ瓶の中に銅標的を入れた後、純水でポリ瓶を満たし、FNAL の M01 ビームラインで 3.250 時間 120GeV 陽子を照射した。照射後の水を 3nm の限外濾紙で濾過し、濾紙と濾液に対して Ge 半導体検出器を用いたガンマ線スペクトロメトリーを行った。濾紙上の放射能と濾過前の水中の放射能の比及び濾液中の放射能と濾過前の水中の放射能の比を、それぞれ放射性核種のコロイド率及びイオン率として求めた。

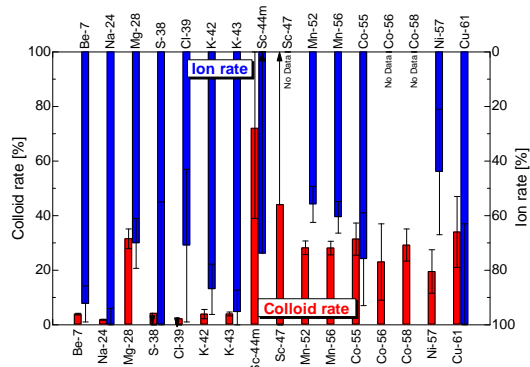


図6 照射後の水中の放射性核種のコロイド率及びイオン率

結果を図6に示す。得られた各々の放射性核種に対するコロイド率とイオン率の関係には矛盾がないことが確認できた。Mg-28と遷移金属の放射性核種のコロイド率はほぼ同じで約30%と高い。一方、水中からいなくなっていたSc, Cr, Feの同位体はコロイド率が高いことがわかった。また、Be-7のコロイド率は約4%と他の金属元素と比べて低いことが分かった。一方、アルカリ金属元素のコロイド率も約2-4%と低かった。最後に、水中に入った放射性核種のコロイド生成は化学的な性質に依存していることがわかった。

#### 6) まとめ

当初目的であった、100GeV以上の超高エネルギー粒子の物質内における挙動を実験的に解明するための、基礎データの取得に関しては、本報告書で記載してきたように概ね達成した。現在、その解析が精力的に行われており、高エネルギー粒子輸送計算システム開発等に供されている。今後もこれらの解析結果を精査し、今後の研究にかかる課題を整理する。

既に、一部研究テーマについては、ミューオン反応の理解を深め、地球科学的観点から研究を進展させるため、以下の今後の計画が、松村、関本らにより、具体化されている。

- ・高エネルギーミューオンの核反応にかかる研究
- ・金属材料と接している水中におけるコロイド形成に関する研究
- ・高エネルギー加速器施設におけるエアロゾル形成に関する研究

また、粒子線照射効果の評価を行う場を構築することに関しては、今後の継続についてFNALと協議している。本件に関連して、日米科学技術協力事業における「先端高強度ミューオン源とミューオン素粒子物理学の展開」

において計画されている、実験装置COMET等における超電導ソレノイド電磁石の製作を目的として、放射線損傷機構解明の研究が並行して開始されている。ここで、研究開発課題の整理を行い、本研究で取得されているデータと併せて、場の構築に資することが検討されている。

#### 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 19 件)

- ① H. Nakashima, et al., “Experimental Studies of Shielding and Irradiation Effects at High-Energy Accelerator Facilities,” 査読有, Nuclear Technology, 168, 482 (2009)
- ② H. Nakashima, et al., “JASMIN: Japanese-American Study of Muon Interactions and Neutron detection,” Proc. on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, tenth Meeting (SATIF10), CERN, Swiss, 2-4 June (2010). 査読無
- ③ N. Shigyo, et al., “Neutron energy spectrum from 120 GeV protons on a thick copper target (JASMIN in Mtest),” Proc. on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, tenth Meeting (SATIF10), CERN, Swiss, 2-4 June (2010). 査読無
- ④ T. Sanami, et al., “Methodology for the neutron time of flight measurement of 120-GeV proton-induced reactions on a thick copper target,” Nuclear Instruments and Methods, B274 (2012) 26-35. 査読有

[学会発表] (計 18 件)

- ① 八島他, FERMI 研究所の高エネルギー加速器施設における遮へい実験 (VIII) 鉄遮へい体中の反応率分布測定, 日本原子力学会, 2009年3月23日, 東京工業大学
- ② 春日井他, FERMI 研究所の高エネルギー加速器施設における遮へい実験 (IX) 高エネルギー中性子スペクトルの導出, 日本原子力学会, 2009年9月16日, 東北大学
- ③ H. Nakashima, et al., “Current status of JASMIN: Japanese-American Study of Muon Interactions and Neutron detection,” American Nuclear Society, Radiation Protection and Shielding Division, Isotopes and Radiation

Division and the Biology and Medicine  
Division Joint Topical Meeting, Las  
Vegas, 22, April, 2010.

- ④ H. S. Lee, H. Nakashima et. al.,  
“JASMIN: Shielding Studies on High  
Energy Neutron Produced By 120 GeV  
Protons,” Spring Meeting of the  
Korean Association for Radiation  
Protection, Mungyeng, Korea, 22, 23,  
April. 2010,
- ⑤ S. Sekimoto, et. al., “Correlation  
between the particle size distribution  
of radioactive aerosols and their  
half-lives derived from measurement of  
radioactive aerosols at a 120 GeV  
proton target station,” The 3rd -  
International Nuclear Chemistry  
Congress, Sicily, Italy, Sep. 18-23,  
2011.

[図書] (計 1 件)

- ① 中島宏、「超高エネルギー粒子の挙動と照  
射効果に関する実験的研究 (JASMIN:  
Japanese-American Study of Muon  
Interactions and Neutron detection)」  
研究成果報告書、2012 年 3 月 28 日、331p

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中島 宏 (NAKASHIMA HIROSHI)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・  
J-PARC センター・副ディレクション長  
研究者番号：20354764

### (2) 研究協力者

柴田 徳思 (SHIBATA TOKUSHI)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・特  
別研究員  
研究者番号：80028224  
春日井 好己 (KASUGAI YOSHIMI)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・  
J-PARC センター・物質・生命科学ディレクション・研  
究副主幹  
研究者番号：40354724  
坂本 幸夫 (SAKAMOTO YUKIO)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原  
子力基礎工学研究部門・放射線工学研究グ  
ループリーダー  
研究者番号：90354703  
岩元 洋介 (IWAMOTO YOSUKE)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原  
子力基礎工学研究部門・放射線防護研究グ  
ループ・研究員  
研究者番号：10391327  
松田 規宏 (MATSUDA NORIHIRO)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原  
子力基礎工学研究部門・放射線工学研究グ  
ループ・研究員

研究者番号：80354760  
大島 武 (OOSHIMA TAKESHI)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・量  
子ビーム応用研究部門・半導体耐放射線性  
研究グループリーダー  
研究者番号：50354949  
中村 尚司 (NAKAMURA TAKASHI)  
東北大学・名誉教授  
研究者番号：70026029  
平山 英夫 (HIRAYAMA HIDEO)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・理事  
研究者番号：00044785  
伴 秀一 (BAN SHUICHI)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・教授  
研究者番号：70141976  
佐波 俊哉 (SANAMI TOSHIYA)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・助教  
研究者番号：90321538  
松村 宏 (SAKAMOTO YUKIO)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・助教  
研究者番号：30328661  
萩原 雅之 (HAGIWARA MASAYUKI)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・助教  
研究者番号：10450363  
岩瀬 広 (IWASE HIROSHI)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・助教  
研究者番号：00469876  
八島 浩 (YASHIMA HIROSHI)  
京都大学・原子炉実験所・助教  
研究者番号：40378972  
関本 俊 (SEKIMOTO SHUN)  
京都大学・原子炉実験所・助教  
研究者番号：10420407  
大石 晃嗣 (OISHI KOJI)  
清水建設株式会社・技術研究所・テクノセ  
ンター・放射線遮蔽プロジェクト・上席研  
究員  
研究者番号：70393585  
石橋 健二 (ISHIBASHI KENJI)  
九州大学・大学院工学研究院エネルギー量  
子工学部門・エネルギー量子工学専攻／エ  
ネルギー科学科・教授  
研究者番号：00159760  
執行 伸寛 (SHIGYO NOBUYUKI)  
九州大学・大学院工学研究院エネルギー量  
子工学部門・エネルギー量子工学専攻／エ  
ネルギー科学科・助教  
研究者番号：40304836