

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19360432

研究課題名 (和文) 高エネルギー粒子の物質内挙動に関する実験的研究

研究課題名 (英文) Experimental study on behavior of 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・安全デベロップメント・副デベロップメント長

研究者番号：20354764

研究成果の概要：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い、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に資すると共に、粒子線照射効果評価法を確立に関する基礎データを取得した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2008 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

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：高エネルギー、加速器、粒子、物質内挙動、実験、照射効果

1. 研究開始当初の背景

2005 年に OECD/NEA 主催の加速器遮蔽専門家会合 SATIF (Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities) において、米国 FERMI 国立加速器研究所 (FNAL) の N. Mokhov から FNAL における高エネルギー加速器施設での 120GeV 陽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的研究について提案がなされた。この提案における実験の意義は以下の通りである。

・100GeV を超える高エネルギー加速器施設が世界的に提案されているが、遮蔽設計に関わる実測による基礎データが得られてい

い。

・近年の加速器施設ではビーム電流の大強度化が図られているため、設計目標の線量率に対する裕度が少なく、設計精度の高精度化が求められている。これに対し研究機関で開発を進めている高エネルギー粒子に対する輸送計算コード間には、計算結果の差異が生じており、実験結果を基にその精度を検証する必要がある。しかし、未だこのエネルギー領域において、計算コードの精度検証に適用しうる実験が行われていない。

・特に、100GeV 近辺のエネルギーは、粒子輸送に関する物理モデルの境界領域である。計算コード間の結果の差異は、物理モデルの

パラメータ設定の差により生じているものであり、二次粒子の生成断面積測定等の薄いターゲットによる微視的実験によってこれらを求めていたものを、粒子輸送現象が関与する厚いターゲットによる積分実験としてこれらのパラメータを検証する必要がある。

- ・これら計算コードは素粒子物理実験における検出器設計等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。
- ・スイスのジュネーブ郊外にある欧州原子核研究機構 CERN の中性子照射場に比して FNAL の中性子照射場はさらに多様な強度及びエネルギースペクトルの場を構築できる可能性があり、高エネルギー放射線照射効果を研究する場として FNAL の個々の照射場は相補的でありうる。これにより、線量評価技術や粒子線照射効果の評価法開発に資することができる。

そこで、N. Mokhov 等と共に、FNAL の高エネルギー加速器施設において、120GeV 陽子による生成二次粒子線を用いた物質内粒子線挙動測定実験を開始した。

2. 研究の目的

本研究では、加速器施設、宇宙工学の技術開発等で必要とされる高エネルギー粒子による影響解析に係る基礎データの取得を目的として、100GeV を超える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。これにより、高エネルギー粒子輸送計算システム開発に資すると共に、粒子線照射効果の評価を行う場を構築し、粒子線照射効果評価法を確立する。

3. 研究の方法

本研究では、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) 及びニュートリノ実験施設 (NuMI) ミュオンビームダンプ下流の 2 箇所で実験を行った。

Pbar 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のターゲットに当て、テバトロンの実験期間中、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黒鉛製のビームダンプで吸収される。このターゲット設備は、図 1 に示すように、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外側において、二次粒子束 (主に中性子束) の強度分布の測定を Cu、Al、Bi 等の試料の放射化量測定により行った。また、ターゲット近辺から漏洩する空気中の放射能測定も行った。さらに、BF₃ 中性子検出器を用いた多減速材 (ボナー球) 検出器により、パルス信号処理及び電流信号処理で中性子エネルギースペクトル測定も試みるとともに、陽子ビームの瞬間強度が非常に強いところでの NE213 シンチレーション検出器の使用の検討を行った。

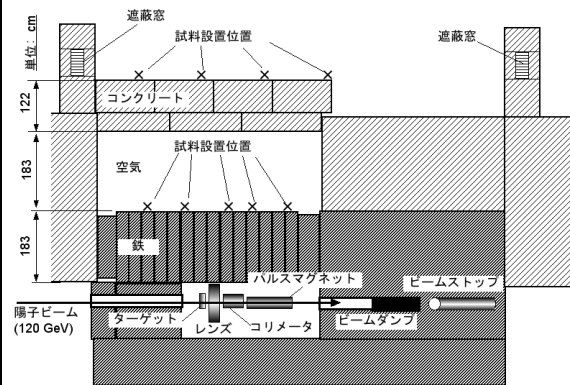


図 1 反陽子生成ターゲットステーション (Pbar)

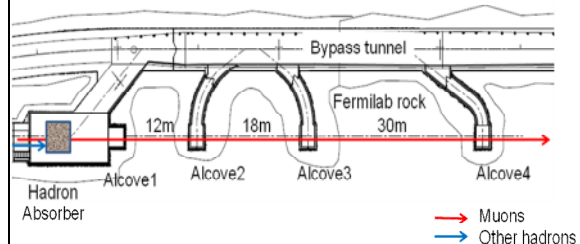


図 2 ニュートリノ実験施設 (NuMI)

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、FNAL から約 750km 離れたミネソタ州スーダン鉱山に設置された検出器に向けてニュートリノを出射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、生成された二次粒子のうち、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。

4. 研究成果

1) Pbar における測定

放射化法を用いて測定したコンクリート及び鉄のバルク遮蔽体の背後における漏洩二次粒子強度の空間分布及びエネルギースペクトルについては、原子力機構等が開発中の粒子・重イオン輸送計算コード PHITS、FNAL が開発中の高帯域モンテカルロ計算コード MARS 及び米国ロスアラモス国立研究所が開発した MCNPX コードによる解析を、現在進めている。代表的な計算値と実験値（黒点及び点線）との比較を図3に示す。PHITS コード（青線）は過大に、MCNPX コード（赤線）は過小に評価していることがわかる。この違いは、計算コード間でコンクリート内の減衰の評価が異なっていることに起因すると考えられる。一方、鉄遮蔽体表面では、MCNPX コードの結果は PHITS コードの結果に比べて実験値と比較的良好一致を示していた。それにもかかわらずコンクリート表面で反応率が過小となるということは、MCNPX コードはコンクリート内の中性子減衰距離を過小に見積もっているということになる。

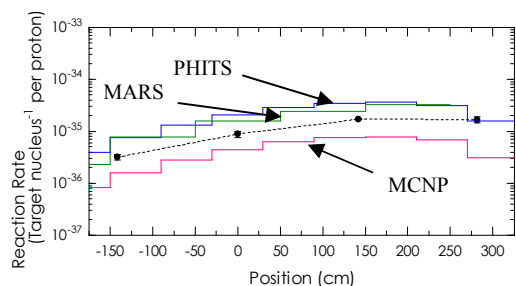


図3 コンクリート遮蔽体表面における $^{209}\text{Bi}(n, 6n)^{204}\text{Bi}$ 反応率

遮蔽体背後では、化学分離法を併せた放射化法を用いて、より広範囲なエネルギー領域におけるスペクトル測定も行うとともに、その解析を進めている。

ターゲット側方の鉄遮蔽体内における二次粒子の強度空間分布及びエネルギースペクトルの測定に関しても、放射化法を用いた体系内の中性子分布測定結果から、中性子の減弱距離を算出し、簡易遮蔽計算法の適用範囲について検証を進めた。図4に反陽子ターゲットから試料までの距離の関数として主な反応に対する反応率を示す。計算の形状モデルは、2次元円筒体系である。反応率の遮蔽体深さに対する傾きは、遮蔽体での中性子

の減衰距離を示す。実験値に比べて、PHITS コードが示す減衰距離は長く、また MCNPX コードが示す減衰距離は短いことがわかる。

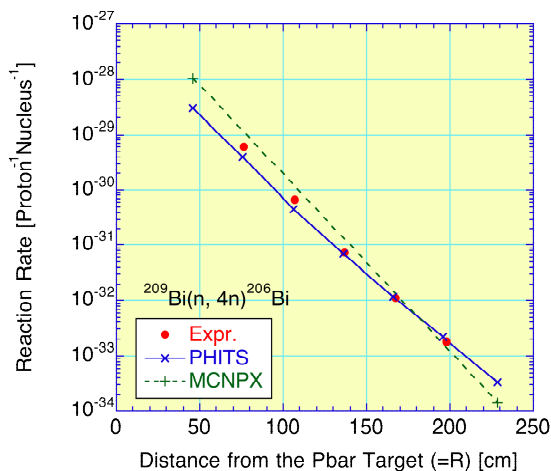


図4 鉄遮蔽体中の $^{209}\text{Bi}(n, 4n)^{206}\text{Bi}$ 反応率

反陽子生成ターゲットの周囲における二次粒子生成強度については、試測定で想定以上に放射化が進み、試料設置場所へのアクセスとその取り扱いが困難であることから、今後の検討課題とした。さらに、ここでは、ビームライン周辺の空気中で生成される放射性核種の分析を行った。既設のサンプリングラインと吸引ポンプを利用してターゲット周辺から空気を採取し、今回持ち込んだ各種のフィルターを通して、空気は再びビームライン中に戻される。フィルターに捕集されたビームライン内生成放射性ガス及び粒子の放射能を測定することによって、ビームライン空気中での生成核種を同定するとともに、それらの生成量の分析を行った。従来のターゲットでは、空気放射化核種、ハロゲン核種及びターゲット物質が由来となる質量数が50以上の核種がそれぞれ観測された。また、ベリリウムで被覆された新型ターゲットでは、ターゲット物質由来の核種はほとんど観測されなかった。今後、データ解析を進めることにより、加速器環境での生成放射性ガスの輸送挙動を解明することが期待できる。

ケーブル貫通孔での中性子ストリーミングの測定に関しては、予備測定を行い、本格測定の可能性について検討を進めている。

中性子検出器からの信号を実時間で処理するカウンター測定に関しては、様々な測定器の適用の可能性について検討を行った。

液体シンチレーション検出器及びホスフィッチ検出器による測定では、パルス当りの中性子強度（シグナル）が非常に大きく、回路系を含めて適用範囲を大幅に超えるもの

で、その適用性の検討を断念した。

ボナー球検出器（図5参照）は、初年度（2007年）に4種類の厚みのポリエチレン減速材にBF₃検出器を組み合わせたものを、2年度（2008年）には10種類の厚みの減速材にLi-glass検出器を組み合わせたものを試験した。Pbarターゲットステーションでは65kWの陽子ビームがニッケル合金ターゲットに照射される。このビームは、1.6μ秒の時間幅の中に80バンチを有するパルスが約2.2秒間隔となっており、2次粒子も同様の時間構造をもっている。一般に事象毎に数10~100μ秒の処理時間が必要なパルス測定は難しい。本測定では初年度にBF₃検出器からのシグナルの読み出しに、電流読み出し法と波形読み出し法を適用し、高計数率場でのボナー球検出器の適用を試みた。2年度では時間応答特性に優れているLi-glassシンチレータ検出器を用い、検出器本体の時間特性を改善するとともに、中性子断面積の異なる⁶Liと⁷Liの検出器を併用し、熱外中性子や光子線の影響を除去する試みも行った。Li-glassシンチレータの結果については現在解析中である。

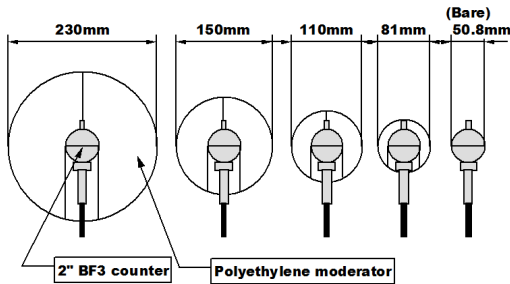


図5 ボナー球検出器模式図

これらのボナー球検出器の計数値から中性子のエネルギースペクトルを推定するためにはアンフォールディング法を用いる。事前に各減速材厚さと検出器の組み合わせに対して検出器の応答関数を求めるとともに、反陽子ターゲットステーションをモデル化し初期の推定スペクトルを導出した。応答関数の計算には、MCNPXコードとLA150断面積データを用いるとともに、PHITSコードを用いた反跳核や中高エネルギー帯での荷電粒子生成を加味した計算も現在進めている。また、初期の推定スペクトル導出にはMARS15コードを用いた。さらに、アンフォールディングにはSANDIIコードを用いた。

図6にターゲット上部での中性子エネルギースペクトルを示す。このスペクトルは電流読み出し法によるボナー球検出器の測定値から導出したものである。本測定で用いたボ

ナー球検出器は約20MeVまでしか有効な応答特性を有していないために高エネルギー領域はシミュレーションで得られた初期の推定スペクトルの形状をそのまま保持しており、その絶対値だけが実験値で調整されている。初期推定スペクトル計算の体系モデルの不完全性の影響や電流読み出し法の誤差などについては今後の検討が必要であるが、実験値と計算値の一致度はMeV領域ではファクター以内に収まっている。

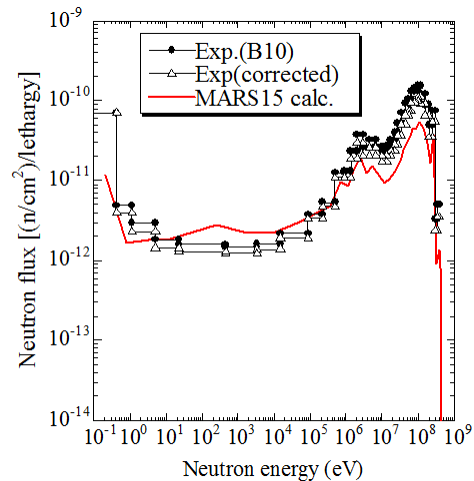


図6 ターゲット上部遮蔽体外側での中性子エネルギースペクトル

(2) NuMIにおける測定

ニュートリノターゲット下流においても、陽子ビーム測定にかかる機器を整備し、本実験における精度良い入射陽子ビーム測定、場の状態把握の条件を整えた。

ターゲット下流における岩石等を透過する二次粒子、特にミュオンについて、化学分離法を用いた放射化法等により、広範囲なエネルギー領域におけるスペクトル及び生成核種質量分布等の測定を行った。図7に各Alcoveに設置した銅試料の核破碎反応率（相対値）をAlcove-1からの距離の関数として示す。Alcove-2~4における減衰率は、MARSコードによって計算したミュオンの岩盤中の減衰の割合と一致している。このことからAlcove-2~4での核破碎反応はミュオンが誘起したものであり、反応率の減衰は岩盤中でのミュオンの減衰を表している可能性が高い。Alcove-2~4の減衰曲線に対して1桁程度大きな値を示しているAlcove-1の実験データについては、中性子などミュオン以外の二次粒子成分が寄与している可能性が高い。これについては、Hadron Absorberからの二次粒子発生特性を詳細に調べる必要があると考え、Hadron AbsorberからAlcove-1までの空間に多数の放射化箔を配置し、それらの

放射化量を測定した。現在、データ処理を進めているところである。

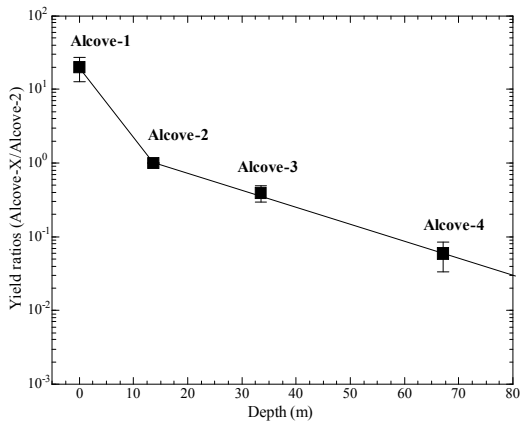


図7 岩石中のミュオンによる核破碎反応率分布

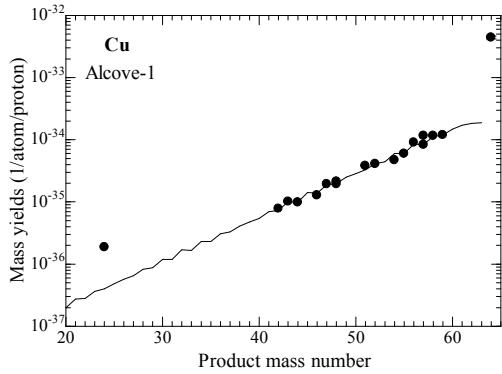


図8 岩石中のミュオンによる核破碎反応による核破碎生成物の質量数分布

また、ミュオンによる核反応機構を解明するために、核破碎生成物の質量分布を測定した。図8に銅試料中の核破碎生成物分布を生成核の質量数の関数として示す。縦軸を反応率の対数にとった場合、データ点はほぼ一直線上に並ぶことがわかる。この直線が示す傾き P は反応機構を解明する上で重要なパラメータとなる。図9に Alcove-1 及び 2 における P の値を試料に入射するミュオンの(スペクトル平均した)運動エネルギー E の関数としてプロットする。(E は MARS コードを使った計算によって評価した。) 図中の実線は光核反応、点線は原子核反応による P を示す。これによると、Alcove で起こった反応の P は光核反応が示す曲線に近いことがわかる。このことから、今回測定した Alcove 中の核破碎反応は、ミュオンが試料中の原子核と仮想光子の交換に起因する可能性が高いことがわかった。今後、さらに解析を進めることにより、詳細な反応機構の解明につながることを期待できる。

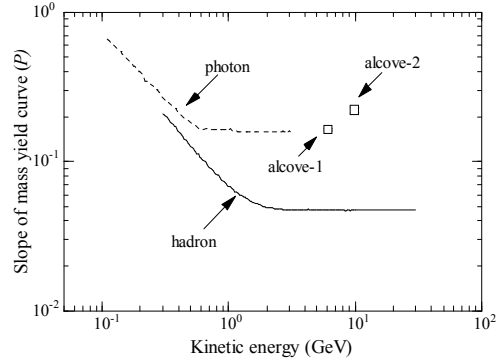


図9 P パラメータの入射粒子エネルギー依存性

これらの解析を通じて PHITS コードにおけるミュオンに係る核反応の取り扱いについて、課題があることが判明し、現在その改良を進めている。

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 1 件)

- ① H. Nakashima, et al., “Experimental Studies of Shielding and Irradiation Effects at High Energy Accelerator Facilities,” Nuclear Technology, 査読有 掲載確定

[学会発表] (計 12 件)

- ① 佐波俊哉他、ボナーボールを用いた 120GeV 陽子による二次中性子の遮蔽透過後スペクトル測定、研究会「放射線検出器とその応用」、2008 年 2 月 5 日、KEK
- ② 松村宏他、FNAL の NuMI ビームライン中の Al 及び Cu 標的上で速ミュオンによって誘起される核反応、「環境放射能」研究会、2008 年 3 月 27 日、KEK
- ③ 中島宏他、FERMI 研究所の高エネルギー加速器施設における遮蔽実験 (I)、日本原子力学会、2008 年 3 月 27 日、阪大
- ④ 佐波俊哉他、FERMI 研究所の高エネルギー加速器施設における遮蔽実験 (II) 能動型検出器の応答試験、日本原子力学会、2008 年 9 月 6 日、高知工科大学
- ⑤ 萩原雅之他、FERMI 研究所の高エネルギー加速器施設における遮蔽実験 (III) 電流読み出し型ボナーボールの FNAL 反陽子生成ターゲットステーションにおける試験結果、日本原子力学会、2008 年 9 月 6 日、高知工科大学
- ⑥ 八島浩他、FERMI 研究所の高エネルギー加速器施設における遮蔽実験 (IV) 反応

- 率分布測定、日本原子力学会、2008年9月6日、高知工科大学
- ⑦ 松田規宏他、FERMI 研究所の高エネルギー加速器施設における遮蔽実験（V）計算解析、日本原子力学会、2008年9月6日、高知工科大学
- ⑧ 松村宏他、FERMI 研究所の高エネルギー加速器施設における遮蔽実験（VI）核反応生成物測定、日本原子力学会、2008年9月6日、高知工科大学
- ⑨ 木下哲一他、FERMI 研究所の高エネルギー加速器施設における遮蔽実験（VII）放射性ガス測定、日本原子力学会、2008年9月6日、高知工科大学
- ⑩ 木下哲一他、Fermilab 反陽子ターゲットステーションでのガス実験、放射化学討論会、2008年9月25日、広島大学
- ⑪ 八島浩他、FERMI 研究所の高エネルギー加速器施設における遮蔽実験（VIII）鉄遮蔽体中の反応率分布測定、日本原子力学会、2009年3月25日、東京工業大学
- ⑫ 木下哲一他、高エネルギー粒子による空気の核反応生成物とその粒子吸着挙動、日本原子力学会、2009年3月25日、東京工業大学

〔図書〕（計 1 件）

- ① 中島宏、「高エネルギー粒子の物質内挙動に関する実験的研究」実験成果報告書、2009年3月25日、256p

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・安全デベロップメント・副デベロップメント長
研究者番号：20354764

(2) 研究分担者

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・放射線工学グループ・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・放射線工学グループ・研究員
研究者番号：80354760

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

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

谷口 真吾 (TANIGUCHI SHINGO)
財団法人高輝度光科学研究センター・ビームライン・技術部門・研究員
研究者番号：90393321

八島 浩 (YASHIMA HIROSHI)
京都大学・原子炉実験所・助教
研究者番号：40378972

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

中根 佳弘 (NAKANE YOSHIHIRO)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・安全デベロップメント・研究主幹
研究者番号：00354762

増川 史洋 (MASUKAWA FUMIHIRO)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・安全デベロップメント・研究副主幹
研究者番号：50354759

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・生命科学デベロップメント・研究副主幹
研究者番号：40354724

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