

機関番号：82118  
 研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20244038  
 研究課題名（和文） 超高頻度荷電粒子の運動量測定のためのシリコン半導体測定器技術の研究開発  
 研究課題名（英文） Research and Development of silicon semiconductor detector technologies for measuring momentum in very high radiation environments  
 研究代表者  
 海野 義信（UNNO YOSHINOBU）  
 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授  
 研究者番号：40151956

## 研究成果の概要（和文）：

高度耐放射線性を持つ p 型シリコン半導体位置測定器の基本技術を完成させた。シリコンマイクロストリップセンサーは平方センチ当たり  $10^{15}$  個の積分通過粒子数の高度耐放射線性を、更にシリコンピクセルセンサー技術では  $10^{16}$  レベルまでを評価。各種構造や信号収集の放射線量依存性を明らかにし、ホットエレクトロン解析・TCAD 解析による細部構造最適化により、照射前で耐電圧 1 kV を達成する設計を完成。新開発の高集積・高熱伝導・低質量のハイブリッドを設計し両面読み出しモジュールを完成、熱および電気特性等の性能を評価した。

## 研究成果の概要（英文）：

Technologies for highly radiation tolerant p-type silicon semiconductor position measuring detectors are established. Silicon microstrip sensors were evaluated up to a fluence of  $10^{15}$  1-MeV neutrons-equivalent (neq)/ $\text{cm}^2$  and pixel sensors to  $10^{16}$ . Irradiation dependence of various structures and charge collection were demonstrated. Optimization of structures in detail with hot electron analyses and TCAD simulation achieved holding 1 kV bias voltage before irradiation. New, high-density, high-thermal conductivity and light-weight hybrids were fabricated and double-side modules were constructed and thermal and electrical performance was evaluated.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	12,600,000	3,780,000	16,380,000
2009 年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
2010 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	7,800,000	33,800,000

## 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：粒子測定技術

## 1. 研究開始当初の背景

現代高エネルギー物理学の基本問題、「基本質量の起源」・「物質・反物質の非対称性 (CP 比保存則)」・「宇宙の暗黒物質の候補解明」に向けて大きな実験計画が進行中である。大型陽子・陽子衝突加速器「LHC」では衝突輝度を

10 倍上げる「スーパー-LHC (SLHC)」計画が、また、陽子・陽子加速器と相補的な電子・陽電子衝突型線形加速器による「リニアークライダー計画 (LC)」も国際的に進行中である。電子・陽電子円型加速器「B ファクトリー」では、衝突輝度を 30 倍に増強する「スーパー

Bファクトリー (SuperB) の研究開発を進めており、また、大強度陽子加速器施設「J-PARC」でも大量のK中間子崩壊から超新しい物理を探究しようとしている。これらの環境に共通するのは高頻度粒子環境であり、積分通過粒子数で平方センチ当たり  $10^{15}$  から  $10^{16}$  個、電離ドーズ量で 500 k から 5 M Gy が想定される。シリコンマイクロストリップ型やシリコンピクセル型のシリコン半導体位置測定器はミクロン単位の高度位置検出能力を有し、コンパクトな運動量測定装置や衝突点近傍の粒子崩壊点の測定には必須な測定器であり、このような高頻度粒子環境下で動作する高度な耐放射線性を持つシリコン半導体位置測定器が必要とされている。また、高頻度粒子環境に対応するには測定素子の更なる細分化や、読み出し回路部分 (ハイブリッド) の高集積化・効率の良い冷却や電力供給法等の技術も必要となっている。

## 2. 研究の目的

(1) 積分通過粒子数で平方センチ当たり  $2 \times 10^{15}$  個・電離ドーズ量で 500 kGy の放射線環境に耐え、高度耐放射線性を持つ p 型基材によるシリコン半導体位置測定器および関連する技術を開発する。これまでのシリコン半導体位置測定器は、諸々の理由により「n 型」半導体基材に「p 型」読み出し電極を作り込んでいる。放射線損傷は基材を「p 型」に変質するため、「p 型」に変質したのちの読み出しには「常に全空乏化」が必要となる。更に、積分通過粒子数  $2 \times 10^{15}$  個/cm<sup>2</sup> ではシリコン基材によっては 1 kV をこえる逆バイアス電圧が必要となってくる。「常に」全空乏化し「1kV」を超えるような高電圧型のシリコン半導体測定器を作ることは、現実的ではない。発想を転換し「全空乏化を要しない」シリコン半導体測定器、即ちこれまで使用を避けてきた「p 型」半導体に「n 型」ストリップを作り込んだ p 型半導体測定器を開発する。放射線損傷は、シリコン基材だけではなく、電離化によりシリコン半導体測定器の表面にも損傷を残す。表面損傷の研究は、SuperB のシリコンストリップセンサーの開発にも適用出来る。

(2) SLHC や LC のような TeV 領域の物理を狙う場合、運動量を測定する飛跡測定器には約  $100 \text{ m}^2$  以上のシリコンストリップ測定器が必要となる。また、平方センチ当たり約 30 Mz の高頻度の粒子測定では、許容オキュパンシーを 2%程度とすると、ストリップピッチ 50-100  $\mu\text{m}$  で、ストリップ長は「2.5 cm 程度」となる。一つのセンサー内に区分された複数のストリップ区間を設け、6 インチ (150mm) ウェーハによる、高度耐放射線技術を組み込む「大面積・多区分型シリコンマイクロストリップセンサー」技術を開発する。

(3) シリコン半導体位置測定器、特にショットストリップ型のシリコンマイクロストリップセンサーで  $100 \text{ m}^2$  の大面積を覆うことを考えると、読み出しチャンネル数が数千万と膨大になる。これらの読み出し LSI は飛跡測定器内に分布されることになり、読み出し回路となるハイブリッドは、出来るだけ高集積化し物質量を最少に押さえ、飛跡の多重散乱を最少にすること、また、高熱伝導性を持ち LSI の発熱を効率良く冷却部に伝熱することが必須となる。カーボン・カーボン素材と銅・ポリミド材のフレキシブル回路基板技術を発展させ、最適化をはかる。

## 3. 研究の方法

(1) 高度耐放射線性を持つシリコンマイクロストリップセンサー技術の開発

①高耐性最適シリコンウェーハの評価：磁場有りチョクラルスキー法基板 (MCZ) 材は製法から高濃度の酸素を含み、酸素は放射線損傷による基材の空乏化電圧の上昇を低減する効果があると言われている。P 型フロートゾーン法基板 (p-FZ) と p-MCZ の 2 種のウェーハで試験サンプルを比較し、全空乏化電圧の放射線量依存性を明らかにする。また、成績の良い方の p 型ウェーハにて最終試験サンプルを製造する。

②n 型ストリップ間絶縁の最適化：シリコンの表面には自然酸化及び表面保護のための二酸化シリコン膜が形成され、界面には不整結晶構造等から正電荷に帯電した格子原子が存在する。これらの正電荷に引きつけられた電子伝導層 (electron inversion layer) が n 型ストリップ間を導通する。この電子伝導層を切断或は排除するシリコン表面に「p 型インプラント」の最適な構造を研究・検証するため、各種構造にて、p-spray 法及び p-stop 法の p イオン打ち込みを行い、予期される放射線照射量との依存性を明らかにする。引続き、成績の良い構造と p イオン打ち込み濃度及び製造法にて最終試験サンプルを製造し、最適解を求める。

③マイクロディスチャージ研究：ストリップ自身の構造・周囲の構造・それらの相対距離・形状等により、印加電圧に依存した強電界がストリップエッジや周辺のエッジ部に発生する。強電界がシリコンの雪崩発生閾値電界 (約  $30 \text{ V}/\mu\text{m}$ ) を超えると、シリコン内で微小な雪崩現象 (マイクロディスチャージ) を発生させる。ホットエレクトロン赤外線カメラを使用してマイクロディスチャージ発生点を同定し、設計不良箇所を解析する。また、半導体シミュレーションプログラム (TCAD) 等を活用し、ストリップ構造・ストリップ分離構造・エッジ電圧保持構造等の最適化を図る。

④放射線試験：試験サンプルに放射線 (陽子、中性子、 $\gamma$  線) を照射し、耐放射線性を定量

的に検証する。

(2) 大面積多区分型シリコンマイクロストリップセンサー技術の開発と検証

① 6インチ(150mm)ウェーハから、面積を最大限有効活用する約10cm×10cm正方形の大面積センサーを設計し、センサー内に約2.5cmストリップに4区分したストリップを置く。4区分の2つはストリップをセンサーに並行に、残りの2つはストリップに角度を持たせた「ステレオ」ストリップとし、2枚を組み合わせた場合の2次元読出しも研究する。  
 ② 不慮の事故等によりビームバンチが直接シリコンマイクロストリップセンサーにダンプされた場合の保護機構として、ストリップインプラントとバイアスリングに電位差が生じた時電位差により自動的に短絡するバンチスルー構造を組み込む。保護機構は前記②の試験サンプルに組み込み、大面積多区分センサーの周囲のスペースを利用して製造する。

(3) 高集積・高熱伝導・低質量のハイブリッド開発と検証

大面積多区分型ストリップセンサーでは、読み出しLSI列は4列となり、2列を一つのハイブリッドに搭載しても、センサー全面をほぼ覆うような形状となる。ハイブリッド構造の高集積化を図りハイブリッドの面積を最小化するとともに多数のLSIを効率良く冷却する高熱伝導化・低質量化を図る。また、試験ハイブリッドを載せたモジュールを稼働させ性能を検証し、最適化された試験ハイブリッドを完成・検証する。

#### 4. 研究成果

(1) 高度耐放射線性を持つシリコンマイクロストリップセンサー技術の開発

① 高耐性最適シリコンウェーハの評価：2x10<sup>15</sup> 1-MeV中性子相当/cm<sup>2</sup>までの陽子線照射後のp型FZ基板とMCZ基板の空乏化電圧を比較した結果および温度を上げて時間を置いたアニール後の結果を比較しても、MCZ基板がFZ基板よりも優位性を持つことは認められなかった。(図1)

② n型ストリップ間絶縁の最適化：6種のn型ストリップ間絶縁分離構造の試験サンプルの陽子線照射後のストリップ間絶縁抵抗のp型インプラントの濃度依存性やストリップ間絶縁抵抗とストリップ間静電容量の相関を調べた結果、p型インプラントの平面濃度は4x10<sup>12</sup>イオン/cm<sup>2</sup>程度で、また構造ではゾーン3(ゾーン4も同値)が機能することが示された。(図2)

③ マイクロディスチャージ研究：バンチスルー保護機構や大面積センサーの試験品にバイアス電圧を印加し、暗電流が急激に増加する

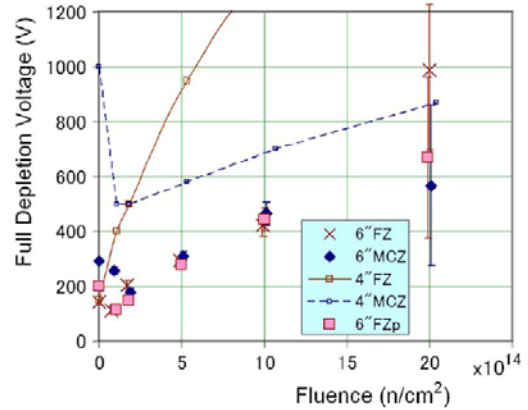


図1 陽子線照射後のp型FZ基板とp型MCZ基板の空乏化電圧の推移

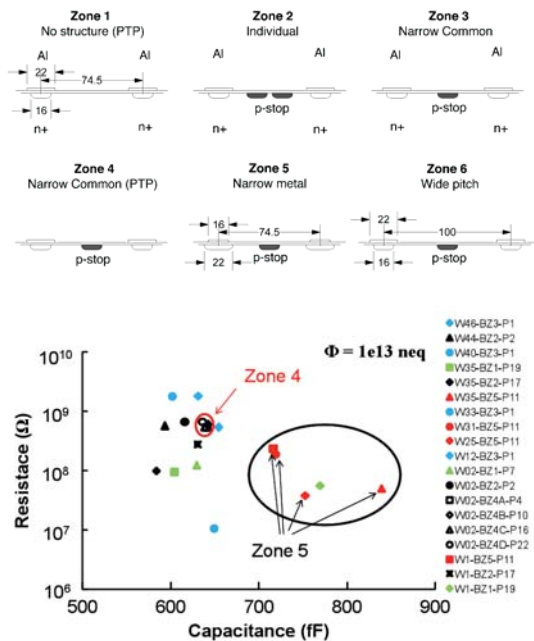


図2 ストリップ間絶縁抵抗とストリップ間静電容量の構造依存性

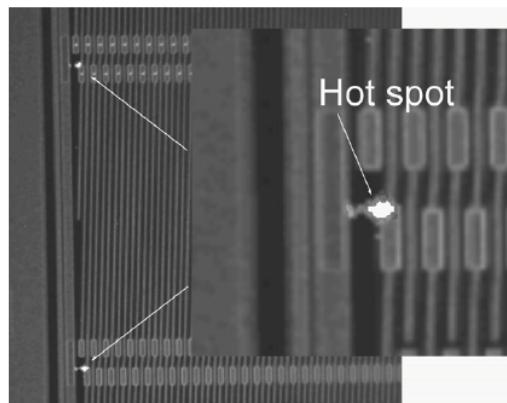


図3 マイクロディスチャージ電流によるホットスポットの一例

マイクロディスチャージ現象を観測し、ホットエレクトロン赤外線カメラを使用してマイクロディスチャージ発生点を同定、また、半導体シミュレーションプログラム (TCAD) を活用し、設計不良箇所を解析した。解析結果をフィードバックした新設計の結果、放射線非照射のサンプルでもマイクロディスチャージ発生電圧を 1 kV 以上に引き上げることが出来た。(図 3)

④放射線試験 : 各種の試験サンプルは東北大 CYRIC 施設の AVF サイクロトロンを使用して、70 MeV の陽子線を照射した。照射はサンプルの準備に合わせてほぼ年 2 回、計 6 回ほど行われ、上記の例を含めて有意義な結果を得ることが出来た。照射サンプルは、今後も引き続き測定を継続して行く。中性子線は、スロベニア共和国リュブリャナ大学の原子炉を利用して照射を行い、ガンマ線は高崎の原子力研究所の協力を得て実施した。

## (2) 大面積多区分型シリコンマイクロストリップセンサー技術の開発と検証

①6 インチ (150mm) ウェーハから、面積を最大限有効活用する約 10cm×10cm 正方形の大面積センサー : 6 インチウェーハに約 10cm×10cm 正方形の 4 区分型大面積センサーを中心に、周辺の余裕領域に 1cm 角のミニチュアセンサーを配置し、n 型ストリップ絶縁構造やパンチスルー構造を設計した(図 4)。マイクロディスチャージ解析を反映した新設計では 1 kV までブレイクダウンしない大面積センサーを完成させることが出来た (図 5)。

②パンチスルー構造 : バイアスリングとストリップ間に p-stop を作り込める可能な構造を試験した(図 6)。結果は、Z4A が最小のパンチスルー発生電圧と最も急峻な電流通過特性を示した。TCAD 等による構造解析の結果、バイアスリングから p-stop 構造を越えてバイアスリングの電位でパンチスルー領域をカバーするフィールドプレート構造が効いていることを解明し、フィールドプレートをもつパンチスルー構造で良好な結果を得ている。

## (3) 高集積・高熱伝導・低質量のハイブリッド開発と検証

4 区分型大型センサーを読み出すハイブリッドは、2 区分を一つのハイブリッドで読み出すよう 20 チップの IC を搭載する。チップの発熱を効率よく周辺の冷却系に伝え、全体として低質量を実現するため、構造と熱伝導を担う基材にカーボン・カーボンと呼ばれる炭素繊維素材を使用し、回路基板は銅・ポリイミド素材のフレックス基板で設計した(図 7)。セラミック素材のハイブリッドと比べると圧倒的に低質量である。更に、フレックス回路

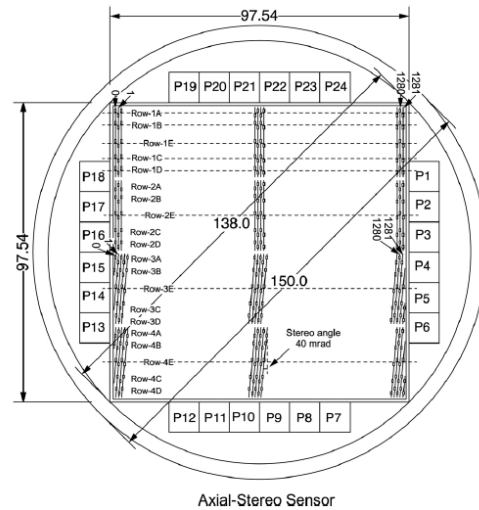


図 4 6 インチウェーハ上の 4 区分型大面積センサー及び周辺のミニチュアセンサー

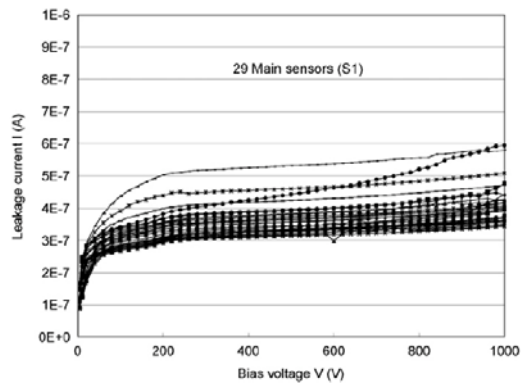


図 5 大面積センサーの暗電流特性

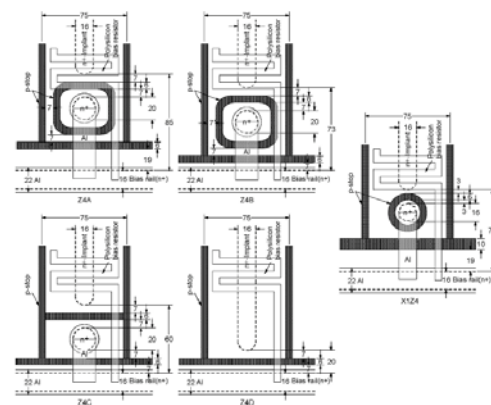


図 6 パンチスルー構造の比較検討

基板の質量を低減するため、スルーホール周りのみをメッキする「ボタンメッキ」法を採用してフレックス基板の約 40%の質量低減を実現した(図 8)。カーボン・カーボン炭素繊維やボタンメッキ法は日本の先端工業技術の





図 7 20 チップ搭載高熱伝導・低質量ハイブリッド

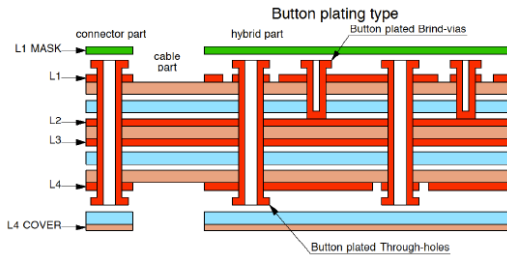


図 8 ボタンメッキ法を採用した銅・ポリイミド回路基板

賜物である。

熱および機械強度設計を経て、新開発の 10cm 角センサーと新開発のハイブリッドを両面に使用する、両面読み出しモジュールを完成し、熱および電気特性共に実使用に耐える性能であることを評価した。

直列給電法の問題点であるハイブリッド/モジュールの必要に応じた定電流の供給および異常時のバイパスの様なフィードバック機構を検討し、また、より柔軟な個別直流・直流変換給電法を実験的に比較検討している。

(4) シリコンピクセルセンサー技術への拡張  
シリコンマイクロストリップセンサーで成就した高度耐放射線技術を、更に一桁上の放射線環境に使用されるシリコンピクセルセンサーへ応用を目指し、p 型基材のシリコン試験サンプルを  $1 \times 10^{16}$  1-MeV 中性子相当/cm<sup>2</sup> の放射線量まで評価した。1 kV 程度のバイアス電圧を印加することにより、電荷収集量は非照射時の約 1/8 に低下するが、それでも約 3000 電子数程度有ることが判明した。(図 9)

## 5. 主な発表論文等

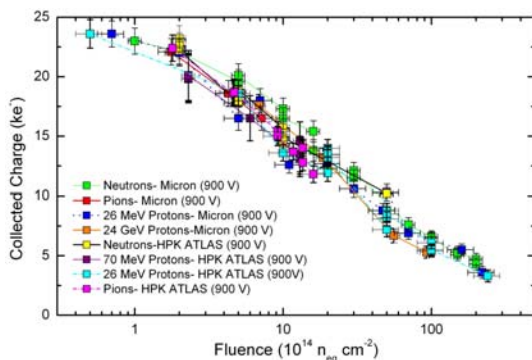


図 9 放射線損傷後の電荷収集量の比較

(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 13 件)

- ① Y. Unno, K. Hara, Y. Ikegami, T. Kohriki, S. Terada et al., (74 名, 1, 30, 34, 40, 67 番目), Development of n-on-p silicon sensors for very high radiation environments, Nucl. Instr. Meth. A636, 2011, S24-S30
- ② K. Hara, Y. Ikegami, T. Kohriki, S. Terada, Y. Unno et al., (74 名, 1, 34, 39, 61, 70 番目), Testing of bulk radiation damage of n-in-p silicon sensors for very high radiation environments, Nucl. Instr. Meth. A636, 2011, S83-S89
- ③ S. Lindgren, K. Hara, Y. Ikegami, T. Kohriki, S. Terada, Y. Unno et al., (73 名, 1, 31, 35, 40, 61, 69 番目), Testing of surface properties pre-rad and post-rad of n-in-p silicon sensors for very high radiation environment, Nucl. Instr. Meth. A636, 2011, S111-S117
- ④ Y. Unno, Y. Ikegami, T. Kohriki, S. Terada, K. Hara, K. Yamamura, S. Kamada, Optimization of surface structures in n-in-p silicon sensors using TCAD simulation, Nucl. Instr. Meth. A636, 2011, S118-S124
- ⑤ Y. Unno, Y. Ikegami, S. Terada et al., (19 名, 1, 2, 3 番目), Development of n-in-p silicon planar pixel sensors and flip-chip modules for very high radiation environments, Nuclear Instruments and Methods, Doi:10.1016/j.nima.2010.12.191
- ⑥ Y. Ikegami, K. Hara, T. Kohriki, S. Terada, Y. Unno et al., (13 名, 1, 7, 8, 11, 12 番目), R&D towards the module and service structure design for the ATLAS inner tracker at the super LHC (SLHC), Journal of Instrumentation (JINST), 5, C12056, 2010, 0-6
- ⑦ Y. Ikegami, T. Kohriki, S. Terada, Y. Unno, K. Hara et al., (9 名, 1, 2, 3, 4, 9 番目), Development of low-mass, high-density, hybrid circuit for the silicon microstrip sensors in high track density environment, PoS RD09:021, 2009, 1-7

[学会発表] (計 32 件)

- ① S. Mitsui、他, Evaluation of lateral depletion in the edge region and evaluation of punch-through protection in the strip ends before and after irradiation, 6th "Trento" Workshop on Advanced Silicon Radiation Detectors (3D

and p-type technologies), 2011年3月2日, FBK-Irst, Trento, Italy

- ② Y. Unno 他, Development of n-in-p silicon strip and pixel sensors for very high radiation environment, 5th "Trento" Workshop on Advanced Silicon and Radiation Detectors, 2010年2月24-2月26日, Manchester, UK
- ③ Y. Unno (on behalf of R&D collaboration), Development of radiation-tolerant silicon microstrip sensor for the ATLAS inner tracker of SLHC, TIPP09, 12 -17 Mar., 2009, Tsukuba, Japan

[図書] (計1件)

- ① T. Ohsugi, H. Sadrozinski, Y. Unno, 7th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, Nucl. Instr. Meth. A636, 2011, S1-S256

[その他]

ホームページ等

<http://jsdhpl.kek.jp/~www/UnnoH20H22KibanA/home.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

海野 義信 (UNNO YOSHINOBU)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授  
研究者番号: 40151956

### (2) 研究分担者

寺田 進 (TERADA SUSUMU)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師  
研究者番号: 70172096  
池上 陽一 (IKEGAMI YOICHI)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師  
研究者番号: 20222862  
高力 孝 (KORIKI TAKASHI)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・前任技師  
研究者番号: 20391732

### (3) 連携研究者

原 和彦 (HARA KAZUHIKO)  
筑波大学大学院数理物質科学研究科 物理学専攻・講師  
研究者番号: 20218613