

平成 21 年 5 月 19 日現在

研究種目：科学研究費補助金（ 特定領域研究 ）  
 研究期間：2004 年度～2008 年度  
 課題番号：16082207  
 研究課題名（和文） 核燃焼プラズマ中の損失アルファ粒子計測のためのイメージングボロメータ開発  
 研究課題名（英文） Development of imaging bolometer for a lost alpha diagnostic in a fusion reactor  
 研究代表者 B. J. Peterson (B. J. Peterson)  
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授  
 研究者番号：00280595

## 研究成果の概要：

5 年間の科学研究費補助金交付期間に、我々は以下に示す 7 つの主要な成果を挙げた：

JT-60U の DD 中性子環境下でイメージングボロメータの試験を成功裏に実施した。具体的には、赤外ペリスコープと遮蔽構造を用いることで、高中性子束・強磁場環境から DT 核融合炉の生体遮蔽装置外側に近いレベルへと赤外線信号を取り出すことができた。

2 種類の損失アルファ粒子計測器の試作品について、東北大学高速中性子実験室で試験を行った。1 つは 1 チャンネルの赤外検出器と 1 枚の減速薄膜から成るもの、もう 1 つは多層膜の熱検出器とイメージングボロメータを用いたものである。

イメージングボロメータ薄膜と赤外カメラのための較正法を開発した。

高温運転によるイメージングボロメータの高感度化を実証した。

金、プラチナ、タンタルといった様々な薄膜について詳細に調べた。

二層薄膜とその製作技術を開発し、特許を申請した。

トカマクにおける接線視線をもつイメージングボロメータに対する二次元トモグラフィ法を開発した。

## 交付額

(金額単位：円)

|         | 直接経費       | 間接経費 | 合計         |
|---------|------------|------|------------|
| 2004 年度 | 5,700,000  | 0    | 5,700,000  |
| 2005 年度 | 18,800,000 | 0    | 18,800,000 |
| 2006 年度 | 20,900,000 | 0    | 20,900,000 |
| 2007 年度 | 8,900,000  | 0    | 8,900,000  |
| 2008 年度 | 5,100,000  | 0    | 5,100,000  |
| 総計      | 59,400,000 | 0    | 59,400,000 |

研究分野：特定領域研究

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：ボロメータ、損失アルファ粒子、赤外線イメージング、ITER、LHD、プラズマ計測、JT-60U

## 1. 研究開始当初の背景

磁場核融合炉のためのプラズマ診断の点から、損失する粒子の計測についての解決策はまだ見つかっていない。本研究課題の申請者らは

最近、複層の箔を用いた熱計測 (Multi-Foil Thermal Detector : MFTD) [A.G. Alekseyev, D.V. Portnov, F.E. Cecil ECA 27A P-1.71 (2003)] をイメージング・ボロメータ [B.J.

Peterson, Rev. Sci. Instrum. **71**(10), (2000) 3696]と組み合わせることを提案した。概念図を図1に示す。つまり、薄い箔の数を変えた層構造を持つMFTDによって 粒子のエネルギーを弁別し、イメージングポロメータによって 粒子のパワーを計測する。

## 2. 研究の目的

MFTD を通過した 粒子は黒化処理した白金箔によって止まり、 粒子のエネルギーは赤外線領域の放射へと変換される。吸収された粒子による箔の温度変化は赤外線カメラによって計測する。イメージングポロメータの2次元計測の特長を生かして、図1にあるように1次元方向はエネルギーの弁別に用いると同時にもう一つの次元を使って分布や磁力線に対する粒子方向の傾斜角を測定することに用いることができる。これによって、時間と空間およびエネルギーについて解像度をもった 粒子の診断が可能となると期待できる。MFTD は既存の金属箔とファラデーカップを用いた測定器[F.E. Cecil, B. Roy, et al, Rev.Sci.Instr. **70** (1999) 1149]と同様の感度と分解能を有しているが、さらに2次電子放出の影響、通過イオンの荷電交換による変化およびそれらによる誘起電流についての懸念がより少ない。0.5  $\mu\text{m}$  の厚さを持つ11枚の白金箔を用いた MFTD の微分阻止能曲線の例を図2に示す。この MFTD のエネルギー分解能は約500keV である。箔の材質、厚さおよび箔の枚数

MFTD design

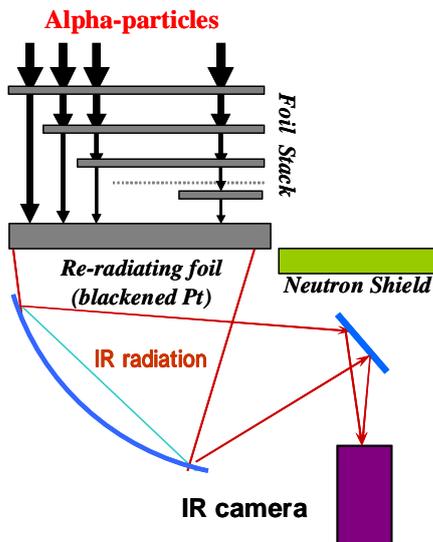


図1 イメージングポロメータを持つ MFTD 設計

によってこの解像度は改善することができる。例えば、125  $\text{g}/\text{cm}^2$  の炭素箔を21枚用いれば250keV のエネルギー分解能を得ることができ

る。この概念は核融合炉の損失 粒子診断において十分な解決策となることが有望であるが、いくつかの問題点が現時点では存在する。イメー

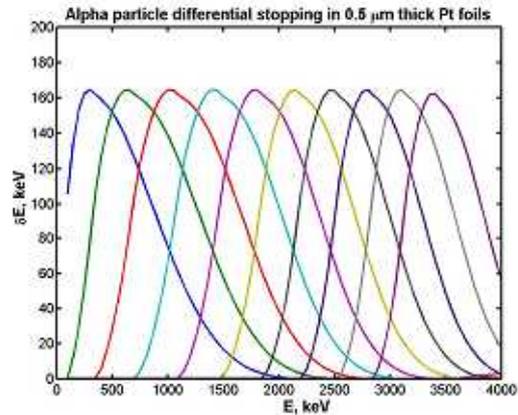


図2 0.5  $\mu\text{m}$  の厚さを持つ11枚の白金箔を用いたMFTDの微分阻止能曲線[A.G. Alekseyev, D.V. Portnov, F.E. Cecil ECA **27A** P-1.71 (2003)].

ジグポロメータの精査な較正法を開発すること、中性子照射やトカマクにおけるディスラプションがある環境下においてこれらの薄い箔が耐久性を有しているか試験することなどが挙げられる。したがって、本研究課題では現在稼動中のトカマク実験装置(JT-60U, 日本原子力研究所)においてイメージングポロメータを試験することおよび、このイメージングポロメータを組み合わせた MFTD のプロトタイプを製作し、振動と炉心レベルの中性子照射に対する耐久試験を実施することを目的とする。さらに測定システムのプロトタイプの性能試験を、高エネルギーイオン源を用いて行い、イメージングポロメータの定常動作試験を核融合科学研究所の大型ヘリカル装置において2次元発光強度測定について行う。

## 3. 研究の方法

JT-60U の D-D 中性子核融合炉環境において試作したイメージングポロメータの試験を行う。

イメージングポロメータの較正法を開発する

東北大学高速中性子実験室において1チャンネルIR損失アルファ粒子検出器の試験を行う。

高中性子束、強磁場領域から赤外カメラへ信号を取り出すための赤外ペリスコープを開発する。

様々な薄膜材料について詳細に調べる

トカマクにおけるイメージングポロメータの2次元トモグラフィ法を開発する。新型の多層薄膜とその製作技術を開発する。

イメージングポロメータの高温運用について詳細に調べる。

東北大学高速中性子実験室の設備を用いて多層薄膜と赤外イメージングポロメータに基づく損失アルファ粒子計測の試験を行う。

#### 4. 研究成果

##### 平成16年度

今年度はトカマク装置で計測を行なうため新たに赤外線カメラ (FLIR Omega) を JT-60U へ設置した。JT-60U 本体室内への赤外線カメラの設置に関しては、設置場所への残留磁場が計算結果より 0.3 T であるため、軟鉄による磁気シールドが必須であり LHD での経験則から 6mm 板でシールド箱を作成した。また、中性子による検出器の劣化も無視できないため、30 mm のポリエチレンによる中性子シールドを併用した。信号伝送系は赤外線像のアナログ出力とカメラ制御信号を含むデジタル出力があり、いずれも約 100 m 伝送のため光信号に変換し、光ファイバーによる伝送系を含む。信号同期のずれによる問題からデジタル系は今後改良が必要であり、今回は 2004 年度の JT-60U プラズマ実験時にアナログ系のみによる測定を実施した。軽水素放電時の放射損失測定では、既存の抵抗型ポロメータによる全放射損失 2 MW 以上においてダイバータ板近傍の周辺プラズマ領域の分布が観測された。また、NBI 加熱時に画像が乱れる現象があり、原因については今後検証を行なう。なお本研究に関連して、下記のような出張、および招聘を実施した。2004 年 11 月、芦川が the ITPA Divertor and SOL meeting (ポルトガル, リスボン) に参加し、第一壁における中性子の影響に関して情報収集を行なった。今後損失アルファ粒子計測を行なう上で、炉の第一壁への入射量などを概算する上で有益な情報となる。2005 年 1 月、Alekseyev 博士 (TRINITY, ロシア) が NIFS に滞在し、プロトタイプのマルチ薄膜の開発に関する打合せ、および熱海で開催した第一回「プラズマ燃焼のための先進プラズマ計測」シンポジウムに参会した。本シンポジウムには、Peterson および芦川も参加し、現状に関し報告した。2005 年 3 月、Peterson が the 8<sup>th</sup> ITPA Diagnostics Topic Group meeting (英国, カラム) に参加し、開発経緯、および計画に関して報告した。2005 年 2 月から 3 月にかけて、Liu 博士 (西南物理科学研究所, 中国) が NIFS に滞在した。Liu 博士は 2005 年度に NIFS での長期滞在で本研究に参加することを予定してお

り、その準備として信号較正法の改善を目的としたレーザ径分布計測機器の組み立て、トモグラフィ法に関するコードの改良を行なった。

##### 平成17年度

JT-60U トカマクに設置したイメージング・ポロメータについては、今年度赤外線カメラの遮蔽性能を向上させると共にデータ伝送・収集系の改良を行った。中性子遮蔽として従来 3cm であったポリエチレンの厚さを 9cm とし、磁気シールド用軟鉄の厚さも 6mm から 20mm に増加した。更にガンマ線低減のための厚さ 15mm の鉛を加えた。これらの遮蔽増強により、従来不可能であった重水素放電での高パワー中性粒子加熱実験時において赤外線カメラがほぼ正常に動作するようになった。さらにデータ伝送・収集系を改良して JT-60U の放電と同期した 14 ビットデジタル画像信号データの収集も可能となった。前年度までの手動トリガーによる 8 ビットアナログ画像データでの測定と較べて大きな進展である。JT-60U プラズマのコア及びダイバータ部からの放射損失の空間構造が高分解イメージング・ポロメータによって測定可能となり、トカマク炉の環境下におけるイメージング・ポロメータの運転可能性を実証する、と云う本科研費の一つの目標が達成された事になる。さらに今年度 JT-60U イメージング・ポロメータの詳細な較正データも取得する事が出来た。今後の解析により、イメージング・ポロメータによる測定が絶対値として明らかとなる。一方、多層膜粒子計測における熱検出器としてのイメージング・ポロメータの適用性研究に関しては、東北大学の FNL イオンビーム源を用いて多層膜の材質、厚さ及び層数を変化させる実験を開始した。層数の異なる厚さ 1mm と 2.5mm の金及びニッケル膜について多層膜のビーム阻止性能評価試験を行った。本研究に関連して、木島博士がヨーロッパ物理学会で、ピーターソン博士が米国物理学会と高エネルギー粒子に関する IAEA 技術専門委員会で、またパルチャミ博士が核融合学会で、夫々発表を行った。

##### 平成18年度

前年度得られた JT-60U の赤外イメージングポロメータ (IRVB) の結果を第 17 回プラズマ表面国際会議に B.J. ピーターソンが発表した。薄膜の較正方法を開発して JT-60U IRVB の較正を行なった。この方法は、HeNe レーザー照射で生じた薄膜の温度分布の実測データを、同じ入熱分布に対して有限要素モデルで求めた温度分布の計算結果と比較する方法である。モデル計算分布と実測分布の比較から、較正に必要な薄膜の厚さや熱特性の局所値を得た。この結果は第 16 回高温プラズマ計測国際会議及び第 16 回国際土岐会議 (16th ITC) に H. パーチャーミーが発表した。準接線方向に視野を持つ JT-60U の一

台のイメージングボロメータから、ポロイダル断面上の2次元放射パワー分布を求めるトモグラフィ処理コードを開発した。この結果はY.リュウが16th ITC に発表した。強度と感度を向上するために二重層構造の新しいイメージングボロメータ用薄膜を開発した。試作した薄膜の試験の結果をI.ミロシニコフが16th ITC に発表した。またこの二重層薄膜の特許を日本の特許局に申請した。JT-60U IRVBの性能向上を図るために改造設計を行なうと共に一部の製作を開始した。改造の内容は以下の如くである。受光薄膜を2.5ミクロンの金薄膜から5ミクロンのタンタル薄膜に、また赤外用真空窓を直径58mmのZnSe窓から100mmのサファイア窓に替える。さらにフッ化カルシウムの赤外光学系を用いた3.7mの赤外線潜望鏡を設け、赤外カメラをOmegaからIndigo/Phoenixに交換する。赤外カメラの遮蔽は、軟鉄:2 cm を2 cmに、鉛:1.5 cm を2 cmに、ポリエチレン:9 cm を10 cmに夫々増強する。IRVB研究開発の概要を16th ITC にB.J. ピーターソンが口頭発表した。損失アルファ粒子検出器の試験計画をA. アレクセエフが立案した。また2007年度の東北大学の高速中性子研究室での損失アルファ検出器の試作品試験に必要な機器を設計・製作した。

平成19年度

本年度、診断能力の向上を狙って、JT-60Uのイメージングボロメータをアップグレードしたものに交換した。変更点を以下に示す。空間分解能を向上させるため、開口部を5mm×5mm から2.5mm(水平方向)×2mm(垂直方向)に縮小した。これにより、チャンネル数は12(水平/トロイダル方向)×16(垂直/ポロイダル方向)から、24(水平/トロイダル方向)×40(垂直/ポロイダル方向)に増加した。フォイルの剛性を高めるため、2.5ミクロン厚の金箔から5ミクロン厚のタンタル箔に変更した。フォイルは、以前開発したレーザー較正法を用いて精密な較正を行った。直径63mmのZnSe赤外用真空窓を直径100mmのサファイア窓に変更した。CaF<sub>2</sub>レンズとアルミニウム鏡から成る赤外用ペリスコープを設置した。感度・時間分解能・空間分解能の向上のため、Omega/Indigo社製赤外線カメラ(7.5~13.5ミクロン、30 fps、100mk、120×160ピクセル)をPhoenix/FLIR社製赤外線カメラ(3~5ミクロン、345fps、25mk、256×320ピクセル)に変更した。赤外線カメラのシールドは、磁気シールドとして2cm厚(従来と同じ)の軟鉄、ガンマ線シールドとして鉛を2cm厚(従来は1.5cm)に増厚し、中性子シールドとして9cm厚のポリエチレンから10cm厚のエポナイト(ホウ素ドープ材)に変更することで、増強を行った。アップグレードしたボロメータの設置は2007年12月に完了し、2008年1月に

最初の計測データを取得した。

2007年6月に米国・アルバカーキで開催された第22回SOFEにて、新しいイメージングボロメータの設計についてのポスター発表を研究代表者が行い、また2007年10月に土岐市で開催された第17回国際土岐コンファレンスにて、研究成果した。

平成20年度

JT-60Uにおけるアップグレードしたイメージングボロメータの結果について、第17回高温プラズマ計測国際会議(17<sup>th</sup> HTPD)において招待講演を行った。赤外ペリスコープと性能が向上した赤外線カメラ(FLIR-Indigo/Phoenix)を用いることでイメージングボロメータの感度が30倍改善された。理論で予想されているイメージングボロメータの高温運転の利点を検証するために、核融合科学研究所において実験を行った。開発した複数の低ノイズ較正法は、LHDの放射計測に使用する予定である。較正の手続きは今回開発したタイミングシステムによって高度に簡略化された。このシステムはナショナルインスツルメンツ社のハードウェアとLabviewソフトウェアで構成されている。イメージングボロメータの金属薄膜温度を制御するために、フィードバック制御による温度安定化回路を開発した。イメージングボロメータの高温運転に関する結果は、ICPP-2008国際会議においてE. Drapikoによって報告され、Journal of Plasma and Fusion Research Series誌への論文掲載が承認されている。金と白金薄膜の比較実験により、白金が金より8倍高い感度をもつことが示された。この結果は、B. Petersonによって第18回国際土岐コンファレンス(ITC-18)において報告された。イメージングボロメータを次世代の核融合装置における損失アルファ粒子検出器の一部として使用するための原理検証実験を、東北大学高速中性子実験室(FNL)のイオン加速器を用いてA. Alexeev博士(TRINITI, Troitsk, Russia)との共同研究として行った。この実験は、加熱したイメージングボロメータにアルファ粒子のエネルギー分離のために厚さの異なる薄膜の組を取り付けて行った。

## 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11件)

B. J. Peterson et al., 'Development of Imaging Bolometers for Magnetic Fusion Reactors (invited)', *Rev. Sci. Instrum.* **79** 10E301 (2008) (6 pages).  
L.C. Ingesson, B. Alper, B. J. Peterson,

J. C. Valet, 'Special Issue on Plasma Diagnostics for Magnetic Fusion Research Chapter 7: Tomography diagnostics: Bolometry and Soft X-ray Detection', *Fusion Science and Technology* **53** (2) (2008) pp. 528-576.

B. J. Peterson et al., 'Research and development of imaging bolometers', *Plasma and Fusion Research* **2** S1018 (2007) pp. 1-4.

I. V. Miroshnikov A. Yu. Kostryukov, B. J. Peterson, 'Infrared Imaging Video Bolometer with a double layer absorbing foil', *Plasma and Fusion Research* **2** S1052 (2007) pp. 1-5.

H. Parchamy, B. J. Peterson et al., 'Spatial variation of the foil parameters from in-situ calibration of the JT-60U imaging bolometer', *Plasma and Fusion Research* **2** S1116 (2007) pp. 1-4.

Y. Liu, N. Tamura, B. J. Peterson et al., 'Application of tomographic imaging to multi-pixel bolometric measurements', *Plasma and Fusion Research* **2** S1124 (2007) pp. 1-4.

B. J. Peterson et al., 'Observation of divertor and core radiation in JT-60U by means of bolometric imaging', *J. Nucl. Mater.* **363-365** (2007) pp. 412-415.

A.J. H. Donne A.E. Costley, R. Barnsley, H. Bindslev, R. Boivin G. Conway, R. Fisher, R. Giannella, H. Hartfuss, M.G. von Hellermann, E. Hodgson, L.C. Ingesson, K. Itami, D. Johnson, Y. Kawano, T. Kondoh, A. Krasilnikov, F. Orsitto, B.J. Peterson, 'Progress in the ITER Physics Basis, Chapter 7: Diagnostics', *Nucl. Fusion* **47**(6) (2007) pp. S337-S384.

H. Parchamy, B. J. Peterson, et al., 'Detailed In-situ Laser Calibration of the Infrared Imaging Video Bolometer for the JT-60U Tokamak', *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10E515 (2006) (4 pages).

Y. Liu, N. Tamura, B. J. Peterson, N. Iwama, and LHD Experimental Group, 'Application of Tomographic imaging to photodiode arrays in LHD', *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10F501 (2006) (3 pages).

B. J. Peterson, et al., 'Characteristics of Radiating Collapse at the Density Limit in the Large Helical Device', *Plasma and Fusion Research* **1** (2006) 45 (9 pages).

[学会発表](計22件)

B. J. Peterson et al., 'Comparison of Au and Pt foils for an imaging bolometer', (poster), *18<sup>th</sup> International Toki Conference*, 2008.12.10, Toki, Japan.

E. A. Drapiko, B. J. Peterson et al., 'Advantages of High Temperature Operation of an Imaging Bolometer' (poster), *International Conference on Plasma Physics 2008*, 2008.9.11, Fukuoka, Japan

B. J. Peterson et al., 'Development of Imaging Bolometers for Magnetic Fusion Reactors (invited)' (invited), *17<sup>th</sup> High Temperature Plasma Diagnostics Conference*, 2008.5.12, Albuquerque, New Mexico, USA

B. J. Peterson et al., 'Recent progress in development of imaging bolometers at NIFS and JAEA' (oral), *14<sup>th</sup> Meeting of ITPA Topical Group on Diagnostics*, 2008.4.16, Lausanne, Switzerland

B. J. Peterson et al., 'Development of Imaging Bolometers for 3-D Tomography of Radiation from LHD', (poster), *17<sup>th</sup> International Toki Conference*, 2007.10.16, Toki, Japan.

H. Parchamy, B. J. Peterson et al., 'Comparison of the Au and Ta foil parameters from laser calibration of imaging bolometer foil (LHD&JT-60U)' (poster), *17<sup>th</sup> International Toki Conference*, 2007.10.16, Toki, Japan.

H. Parchamy, B. J. Peterson et al., 'Comparison of the Au and Ta foil parameters from laser calibration of imaging bolometer foils' (poster), *22<sup>nd</sup> Symposium on Fusion Engineering*, 2007.6.20, Albuquerque, New Mexico, USA.

B. J. Peterson et al., 'Design of an imaging bolometer upgrade for JT-60U' (poster), *22<sup>nd</sup> Symposium on Fusion Engineering*, 2007.6.20, Albuquerque, New Mexico, USA.

B. J. Peterson et al., 'Imaging Bolometers for Steady State Fusion Experiments' (invited), *5<sup>th</sup> IAEA TCM on Steady State Operation*, 2007.5.15, Daejeon, Rep. Korea.

B. J. Peterson et al., 'Research and development of imaging bolometers' (oral), *16<sup>th</sup> International Toki Conference*, 2006.12, Toki, Japan.

I. V. Miroshnikov A. Yu. Kostryukov, B.

J. Peterson, 'Infrared Imaging Video Bolometer with a double layer absorbing foil' (poster), *16<sup>th</sup> International Toki Conference*, 2006.12, Toki, Japan.

H. Parchamy, B. J. Peterson et al., 'Spatial variation of the foil parameters from in-situ calibration of the JT-60U imaging bolometer' (poster), *16<sup>th</sup> International Toki Conference*, 2006.12, Toki, Japan.

Y. Liu, N. Tamura, B. J. Peterson et al., 'Application of tomographic imaging to multi-pixel bolometric measurements' (poster), *16<sup>th</sup> International Toki Conference*, 2006.12, Toki, Japan.

B. J. Peterson et al., 'Recent progress in imaging bolometer R&D and future plans' (oral), *11th ITPA Diagnostics Meeting*, 2006.10, Sendai, Japan.

B. J. Peterson et al., 'Observation of divertor and core radiation in JT-60U by means of bolometric imaging' (poster), *17<sup>th</sup> International Conference on Plasma Surface Interactions*, 2006.5, Hefei, China.

H. Parchamy, B. J. Peterson, et al., 'Detailed In-situ Laser Calibration of the Infrared Imaging Video Bolometer for the JT-60U Tokamak' (poster), *16<sup>th</sup> High Temperature Plasma Diagnostics Conference*, 2006.5, Williamsburg, VA, USA.

B. J. Peterson et al., 'Lost alpha diagnostic based on an imaging bolometer and a multi-foil thermal detector' (poster), *9th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles*, 2005.11, Takayama, Japan.

B. J. Peterson et al., 'Imaging bolometer development for application to fusion reactor diagnostics' (poster), *47th meeting of the American Physical Society Division of Plasma Physics*, 2005.10, Denver, USA

S. Konoshima, B.J. Peterson et al., 'Radiated Power Profile Observed by a Tangentially Viewing IR Imaging Bolometer in JT-60U Tokamak', *32<sup>th</sup> EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics*, 2005.6, Tarragona, Spain.

B. J. Peterson et al., 'Lost alpha particle Diagnostic using Imaging Bolometers and Multi-foil Thermal Detectors' (oral), *8th ITPA Diagnostics Meeting*, 2005.3, Culham, UK.

21 B. J. Peterson et al., 'Density Limit Studies in LHD' (oral), *20<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference*, 2004.11, Vilamoura, Portugal

22 B. J. Peterson et al., 'Imaging Bolometry', *2<sup>nd</sup> Japan/Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady state Fusion Plasma*, 2004.8, Daejeon, Rep. Korea

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 赤外線イメージングビデオカメラ、ビデオカメラ用金属薄膜体及びプリズム部材

発明者: B. J. PETERSON

権利者: 自然科学研究機構

種類:

番号: 特願 2007-045711

出願年月日: 平成19年3月12日

国内外の別:

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

B. J. Peterson (B. J. Peterson)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・  
准教授

研究者番号: 00280595