

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14689

研究課題名（和文）非接触ダイバータ研究のための高感度プラズマ輻射イメージング計測の実現

研究課題名（英文）Realization of high-sensitivity imaging measurements of plasma radiation for divertor detachment study

研究代表者

向井 清史（Mukai, Kiyofumi）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：90632266

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、非接触ダイバータのエネルギーバランス等の解明に必要な輻射2次元分布計測器である、赤外イメージングビデオボロメータ（IRVB）を高感度化した。ダイバータ模擬実験を行っている筑波大学GAMMA10/PDX装置のIRVBを対象に、(1)薄膜検出器を見込む画素数が最大となる赤外線カメラを導入し、(2)1 keV以下の輻射計測に最適な材料と膜厚の検討から厚さ1ミクロンのチタン薄膜を採用した。高感度化により、これまで計測できなかったNe入射時の輻射計測に成功した。XeではNeの3倍を超える輻射が計測されており、今後不純物ガス種の比較により非接触ダイバータ物理機構解明への貢献が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合発電の実現には装置内壁の局所熱負荷を減らす必要があり、不純物ガスを入射し輻射損失を増やして熱負荷を分散する、非接触ダイバータと呼ばれる運転方法が検討されている。その物理機構の解明には中小型のプラズマ実験装置を活用して知見を蓄積する必要がある一方で、中小型の装置では輻射が弱いため計測器の高感度化が課題であった。本研究では、輻射イメージング計測の主要な構成部品である赤外線カメラや薄膜検出器の材質及び膜厚を検討し、高感度化に成功した。これまで計測できなかった不純物ガス種の条件でも輻射計測が可能となったことで、今後中小型装置を活用した非接触ダイバータの物理機構の解明が進展すると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, I have improved the sensitivity of the InfraRed imaging Video Bolometer (IRVB), which is a 2-D radiation diagnostic necessary for investigating the energy balance of divertor detachment. For an IRVB on GAMMA10 / PDX (University of Tsukuba) that is conducting divertor simulation experiment, (1) an infrared camera was replaced to maximize the number of pixels observing a foil detector, (2) a titanium foil with one micron thickness was selected as the detector by optimizing foil material and thickness for the measurement with the photon energy ≤ 1 keV. By the sensitivity improvement, I successfully measured the radiation profile even in Ne seeded plasmas. The radiation in Xe seeded plasmas is more than three times that of in Ne seeded plasmas. Therefore, it is expected that the high-sensitivity IRVB will contribute to the investigation of the physical mechanism of the divertor detachment by comparing the species of impurity gases in the future.

研究分野：プラズマ計測

キーワード：非接触ダイバータ ボロメータ イメージング 輻射計測

1. 研究開始当初の背景

核融合炉や ITER では、ダイバータの局所熱負荷軽減のため、輻射（放射）損失を増大させ熱負荷を分散する非接触ダイバータが標準運転シナリオとして検討されている。非接触ダイバータの生成・安定維持には、ダイバータプラズマ中の輻射を含むエネルギー輸送の解明が不可欠であり、筑波大学の GAMMA10/PDX 装置などの直線型装置におけるダイバータ模擬実験が重要な役割を担っている。GAMMA10/PDX では輻射計測として赤外イメージングビデオボロメータ（IRVB）の導入が進んでいるが、従来 IRVB は輻射エネルギーの高い大型の実験装置に適用されてきたため、ダイバータプラズマ計測に適した高感度化が必要であった。

2. 研究の目的

IRVB はピンホールカメラと赤外線カメラとをつなげた構造を持つため、高感度化には両者の検討が必要となる。赤外線カメラについて、IRVB の高感度化にはピンホールカメラ部の薄膜検出器を見込む赤外線カメラの画素数を増やすことが有効である。また、ピンホールカメラ部について、必要以上に厚い薄膜検出器を用いると輻射による薄膜の温度上昇が低下し IRVB の感度が下がるため、GAMMA10/PDX のダイバータ模擬実験に最適な材質及び厚さの薄膜検出器を開発する必要がある。そこで本研究では、GAMMA10/PDX の IRVB 計測におけるこれら赤外線カメラと薄膜検出器の改善により、非接触ダイバータ研究のため IRVB 計測を高感度化することを目的とした。

3. 研究の方法

- (1) 赤外線カメラについて、2. で述べたように、ピンホールカメラ部の薄膜検出器を見込む画素数（有効画素数）が最大となる機種を選定・導入した。
- (2) 薄膜検出器について、各種薄膜材料の光子エネルギーに対する光子の減衰距離の関係を求めた。また、計測対象のプラズマの光子エネルギーを 1 keV 以下とし、求めた関係及びプラズマ実験に必要な 50 mm × 50 mm 以上の大きさの薄膜が入手可能であるという条件から、各種材料における膜厚の最小値 t_f^{min} を求めた。
- (3) 膜厚 t_f^{min} での各種材料での検出器について、ANSYS による伝熱計算及び検出器サンプルへの真空中でのレーザー照射試験から感度評価を行った。
- (4) (2), (3)により GAMMA10/PDX での計測に最適と判断した厚さ 1 μm の Ti を用いた検出器を大型化し、GAMMA10/PDX のプラズマ計測に適用した。

4. 研究成果

- (1) 赤外線カメラについて、ピンホールカメラ部の薄膜検出器を見込む有効画素数が最大となる機種を選定した。視野角の狭い赤外線カメラ及びレンズを用いれば有効画素数は増えるが、同時に最短焦点距離が伸びるため、赤外線カメラと薄膜検出器との距離が離れ、有効画素数が減少する。したがって有効画素数には最大値が存在する。検討の結果、FLIR 社製 Tau2（35mm, 9.3°×7.1°）を導入した。有効画素数は、従来の GAMMA10/PDX での汎用赤外線カメラを用いた計測の 113×88 ピクセルに対し、7.3 倍の 306×238 ピクセルとなり、IRVB の感度を 1.7 倍に向上した。
- (2) 各種材料における、光子エネルギーと減衰距離の関係を図 1 に示す。特性の急激な変化は吸収端によるものである。従来の大型ヘリカル装置（LHD）での計測では、検出器に厚さ 2.5 μm の白金を用いており、8 keV までのエネルギーの光子を検出することが可能である。一方で、GAMMA10/PDX の計測では 1 keV までの光子を検出できれば十分である。この場合、1 keV の光子を吸収するのに必要な白金の厚さ $t_f^{1\text{keV}}$ は 0.1 μm まで薄くできる。しかしながら、膜厚が薄くなると、プラズマ実験に必要な 50 mm × 50 mm 以上の大きさの薄膜が保持できないという強度面での問題が生じる。そこで、各種材料における $t_f^{1\text{keV}}$ 及び 3. 方法の(3)で述べた条件から求めた t_f^{min} を表 1 に示す。なお、求めた全ての材料に対する値は引用文献の TABLE I. に記載している。

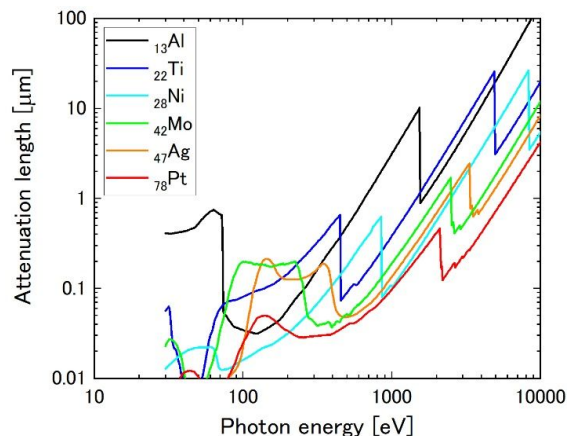


図 1 各種材料における、光子エネルギーと減衰距離の関係

表 1 各種材料での 1 keV の光子吸収に必要な膜厚 $t_f^{1\text{ keV}}$ 及び計測で利用可能な最小の膜厚 t_f^{min}

Material	$t_f^{1\text{ keV}}$ [μm]	t_f^{min} [μm]
13Al	3.0	3
22Ti	0.7	1
28Ni	0.7	1
42Mo	0.2	1
47Ag	0.2	1
78Pt	0.1	2.5

(3) 膜厚 t_f^{min} での各種材料での検出器について、ANSYS による伝熱計算を行った。モデルは、後述する検出器サンプルに合わせ、以下のように設定した。

- ・直径 37 mm の円板
- ・炭素 - 金属 - 炭素の三層構造
- ・膜厚は金属層が t_f^{min} 、炭素層が 5 μm ずつ
- ・円板側面の温度は 300 K で固定
- ・He-Ne レーザーを模擬した熱流束を照射
- ・炭素面から黒体放射

感度の指標として、熱流束を与えた際の薄膜の温度上昇の最大値を、各種材料に対して伝熱計算により評価した結果を図 2 に示す。全体的に原子番号が小さくなるほど感度が高くなる傾向が得られた。一方で、Al などは t_f^{min} が大きいため感度が下がることが分かった。最も高い感度が得られたのは Mn であるが、磁性体であるため磁場閉じ込めプラズマ実験には適さない。そこで、2 番目に高い感度が得られた Ti を薄膜検出器の材料として選定した。

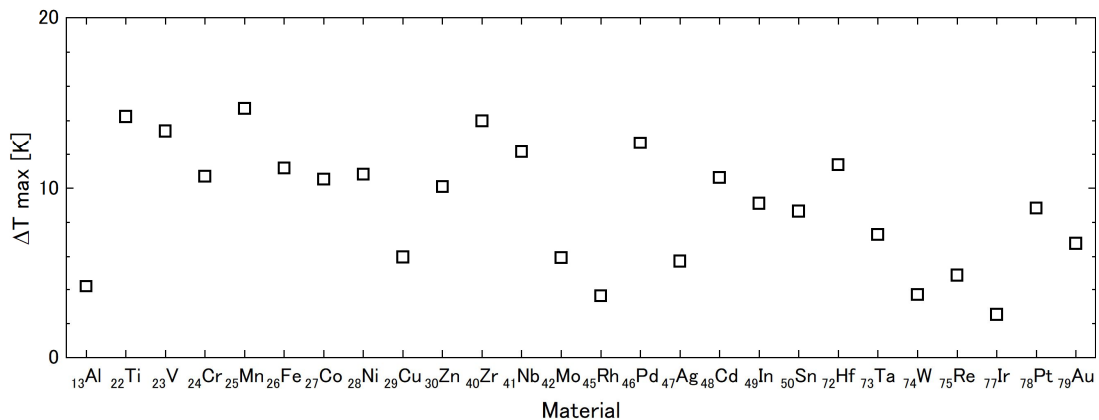


図 2 伝熱計算による薄膜温度上昇の材料依存性

また、検出器サンプルを作製し感度を評価した。図 2 の材料依存性の傾向を確認するため、上述の Ti のほか、Al, Ni, Mo, Ag, Pt を用いて作製した。作製したサンプルを図 3 (左) に示す。大きさは直径 37 mm、厚さは表 1 の t_f^{min} であり、実際には感度改善のため両面を炭素でコーティングしている。サンプルに真空中で He-Ne レーザーを照射し、照射面の裏側から赤外線カメラで観察 (図 3 (右)) して、温度上昇の最大値から感度評価を行った。

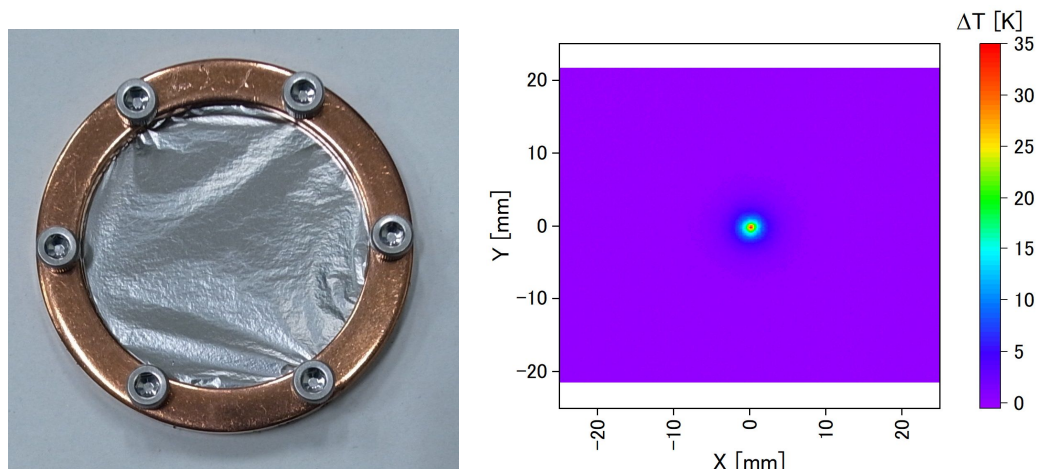


図 3 (左) 作製した薄膜検出器サンプル。(右) レーザー照射試験で得られた薄膜の温度分布。

6 種類の材料に対して、レーザー照射試験と図 2 の伝熱計算により得られた薄膜の温度上昇の最大値を図 4 に示す。材料間の感度の傾向は、実験値と計算値とで一致している。実験値と計算値との差は、金属層及び炭素層の厚さの誤差によるものと考えられる。また、薄膜作製時の圧延工程で塑性変形し、物性値が文献値から変化している可能性も考えられる。図 4 の評価から、従来の Pt を用いた検出器と比較し、Ti を用いた検出器では 2 倍の感度を実現することができた。

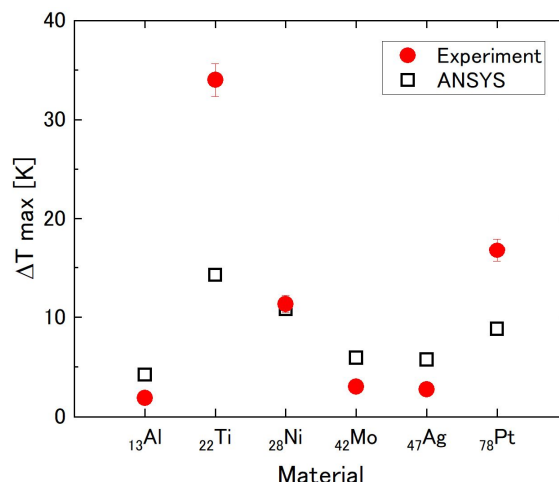


図 4 レーザー照射試験と伝熱計算により評価した薄膜検出器感度の材料依存性。

- (4) (2), (3)により GAMMA10/PDX での計測に最適と判断した厚さ 1 μm の Ti を用いた検出器を、プラズマ計測用の 90 mm × 70 mm に大型化し、GAMMA10/PDX のプラズマ計測に適用した。Xe と Ne をそれぞれ入射したダイバータ模擬実験において観測した薄膜の温度上昇の分布（概ね輻射分布に対応する）を図 5 に示す。高感度化前の IRVB を用いた計測では Ne 入射時には輻射が小さく検出できなかったが、本研究の高感度化により Ne 入射時でも円柱状のプラズマが左右に伸びている構造がはっきりと計測できた。Xe では Ne の 3 倍を超える輻射が得られており、今後 N₂ や Ar を含めたガス種の比較を行うことで非接触ダイバータのエネルギーバランスの解明への貢献が期待できる。

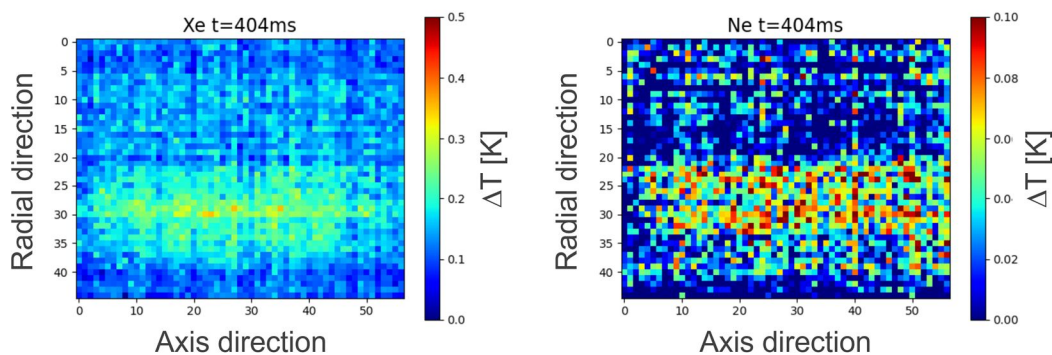


図 5 GAMMA10/PDX ダイバータ模擬実験における（左）Xe 入射時（右）Ne 入射時の輻射分布。

< 引用文献 >

K. Mukai et al., Rev. Sci. Instrum. **92**, 063521 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mukai K., Peterson B. J., Ezumi N., Shigematsu N., Ohshima S., Miyashita A., Matoike R.	4. 巻 92
2. 論文標題 Sensitivity improvement of infrared imaging video bolometer for divertor plasma measurement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 063521 ~ 063521
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0043664	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mukai Kiyofumi, Masuzaki Suguru, Hayashi Yuki, Oishi Tetsutaro, Suzuki Chihiro, Kobayashi Masahiro, Tokuzawa Tokihiko, Tanaka Hirohiko, Tanaka Kenji, Kinoshita Toshiki, Sakai Hikona, Peterson Byron Jay	4. 巻 61
2. 論文標題 Steady-state sustainment of divertor detachment with multi-species impurity seeding in LHD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 126018 ~ 126018
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/ac2bbc	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kiyofumi MUKAI, B. J. Peterson, G. Kawamura, and K. Munechika
2. 発表標題 Feature extraction from two-dimensional radiation images of impurity seeded plasmas on Large Helical Device
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 向井清史、ピーターソンバイロン、河村学思、宗近洸洋
2. 発表標題 LHD不純物入射プラズマの2次元輻射画像からの特徴抽出
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 向井清史、Byron J. Peterson、江角直道、重松直希、大島慎介、宮下顕、的池遼太
2. 発表標題 ダイバータプラズマ計測を目的としたイメージングボロメータの高感度化
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kiyofumi Mukai, Byron J. Peterson, Naomichi Ezumi, Naoki Shigematsu, Shinsuke Oshima, Akira Miyashita, and Ryota Matoike
2. 発表標題 Sensitivity Improvement of Infrared Imaging Video Bolometer for Divertor Plasma Measurement
3. 学会等名 High-Temperature Plasma Diagnostics Conference (HTPD 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kiyofumi Mukai, Suguru Masuzaki, Yuki Hayashi, Chihiro Suzuki, Tetsutaro Oishi, Masahiro Kobayashi, Hirohiko Tanaka, Byron J. Peterson
2. 発表標題 Radiative Divertor Using Impurity Seeding on Large Helical Device
3. 学会等名 22nd International Stellarator and Heliotron Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 向井清史、増崎貴、林祐貴、鈴木千尋、大石鉄太郎、小林政弘、田中宏彦、Byron J. Peterson
2. 発表標題 LHDにおける不純物ガス入射によるダイバータ熱負荷軽減
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------