

氏 名 芦 川 直 子

学位 (専攻分野) 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大甲第590号

学位授与の日付 平成14年3月22日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 **Development of Infrared Imaging Bolometer and  
Measurement of 3-D Plasma Radiation Structure  
in LHD**

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 小森 彰夫  
教授 伊藤 公孝  
教授 須藤 滋  
教授 関子 秀樹 (九州大学)  
教授 中村 幸男 (核融合科学研究所)  
主任研究 杉江 達夫 (日本原子力研究所)  
員

## 博士論文の要旨

A new bolometer system using an infrared (IR) camera has been developed to measure the 3-D structure of plasma radiation. This bolometer is called the IR imaging bolometer (IRIB) and of this diagnostic there are two types of the mask pattern that are known as the Segmented Mask Infrared Imaging Bolometer (SIB) and the Infrared Imaging Video Bolometer (IRVB). The incident radiation power coming from the plasma is collimated by an aperture and then absorbed by a thin foil located in the vacuum vessel. An IR camera outside of the vacuum vessel measures the temperature rise of the foil by means of the thermal radiation that passes through the vacuum interface by means of an IR vacuum window. Therefore, this system does not use electrical vacuum feed-throughs, and has a very simple design as described above, compared to conventional resistive bolometers. The difference between the two IR bolometer systems is in how the spatial channels are determined. The spatial channels of the SIB foil are physically defined and separated by the segmented mask and those of the IRVB are determined by numerically dividing up the space on a single large foil exposed to the plasma radiation.

In this study, the design, production and installation of the two differential types of IRIB systems were made for LHD.

The mask was designed by taking into consideration the incident power of the radiation. For a sufficient signal-to-noise ratio of the detected foil temperature, a thin metal foil was used in the mask, aluminum with a thickness of about  $0.8\ \mu\text{m}$  for the SIB system and gold with a thickness of about  $1\ \mu\text{m}$  for the IRVB system were selected. The other parts of these systems including the aperture plate, the size and position of the aperture, the light shielding pipe and the support of the IR camera were also designed.

After the installation of these IR bolometers, an in-situ calibration experiment was done. The common parameters for the both systems, the calibration factor (K/mW) and the cooling decay times, were measured using a He-Ne laser as a known radiation source. For the SIB system, the calibration was done for each channel and for the IRVB system, a combination in-situ calibration and model profile of the temperature rise of the foil was used.

Using these coefficients, the plasma radiation power density at the foil was calculated from the two dimensional temperature distribution of the foil as measured by the IR camera. This resulted in images of the plasma radiation intensity with a sufficient signal and a time response to demonstrate the usefulness of this two-dimensional diagnostic system for plasma radiation.

The merits of the IR bolometer are as follows:

1. Broad two-dimensional radiation brightness profiles are measured by one IR camera using infrared camera imaging technology.
2. Electrical vacuum feed-throughs are not necessary in this system as the

information about the foil temperature is passed as IR radiation through an IR vacuum window to the IR camera.

3. One IR bolometer has over one hundred spatial channels.

4. For the case of the IRVB, these spatial channels can be determined after the plasma experiments with flexibility depending on the experimental objectives and the conditions of the plasma.

In the latter half of this thesis, some experimental results are shown using the IRVB data. At present two IRVBs are installed, one at an upper port and the existing IRVB with a tangential view, and were started to measure the plasma radiation from two directions simultaneously during the 2001-2002 experimental campaign in LHD. Both of these IRVB view the same field period and use a 1  $\mu\text{m}$  thick gold foil. The frame rates of these IR cameras are 15Hz for that with the tangential view and 60 Hz for that with the view from the upper port.

Initial measurements with the IRVB at the tangential port show the variations of the radiative structure as two-dimensional brightness profiles and are compared to data from resistive bolometer arrays, the visible CCD camera and the magnetic field line simulation. Images from two different limiter experiments show the source of the radiation to be localized near the plasma-limiting surface. Also comparison with the magnetic field line calculation shows the structure of a hollow radiation profile in the helical geometry of LHD during standard discharges using the natural helical divertor. In particular, the change in the radiation structure was observed as a continuous series of images or movie made by the IRVB as the discharge passes through asymmetric radiative collapse.

Finally, using data from the two IRVBs, the three-dimensional position of the radiation source in the field of view of the two cameras was determined during the collapse. The brightness source region of the inboard asymmetric collapse was observed to be below the horizontal midplane at the vertically elongated cross-section of the plasma and this region continued in an axisymmetric manner in the field of view of the two cameras (approximately half of a field period). This was confirmed by qualitative agreement of the measured images with a calculation of the two-dimensional brightness profiles at each camera resulting from an axisymmetric model of the radiation source localized at the lower inboard side of the torus.

## 論文の審査結果の要旨

本学位論文は、プラズマからの放射損失光を計測するための赤外線カメラ（IRカメラ）を用いた2次元イメージングボロメータ装置（IRボロメータ）の開発研究と、これをヘリオトロン型プラズマ閉じ込め装置である大型ヘリカル装置（LHD）に適用して行った3次元放射損失光分布計測の基礎研究をまとめたものである。LHDのような3次元構造の磁場配位を持つヘリカル型装置における放射損失光分布の特性は、軸対称系のトカマクなどとは異なる可能性があり、3次元計測は3次元構造磁場配位のような複雑な磁場配位を持つ核融合実験装置の閉じ込め研究に新たな展開をもたらす可能性がある。従来のボロメータは金属フィルム抵抗計測法を用いているため、高真空中の配線、真空とのインターフェースである真空導入端子などが不可欠であり、複数方向からの視野、多数の素子を必要とするトモグラフィ的3次元計測には適していない。本論文では、プラズマからの放射損失光を金の薄膜で受け、その金の薄膜の温度上昇分布を薄膜からの赤外発光として計測するIRボロメータシステムを製作し、それを用いて実験を行っている。この方法は、赤外線を透過するZnSeの真空窓とIRカメラしか必要としないため、3次元計測で問題となる真空配線、真空導入端子などが不要となる大きな長所がある。また、素子1個当たりの価格が廉価となるなどの長所もある。IRデジタルカメラは数万ピクセルの計測素子を有しているため、多数の空間点を計測することが可能であり、金属フィルム抵抗計測型ボロメータに比べ、素子数を飛躍的に増大させることができる。このため、2次元計測に適しており、さらに、複数方向からの視野を確保すれば容易にトモグラフィ的3次元計測が可能である。

本論文では、まず、薄膜によるプラズマからの放射損失光の吸収や熱伝導方程式による薄膜の温度分布・時間変化の評価などを行い、IRボロメータシステムでプラズマからの放射損失光を計測できることを確認している。開発初期には、素子間のクロストークを避けるため、素子部分に対応したところに孔（セグメント）を開けた伝熱性の良いマスクで薄膜を挟み込む方式（SIB）を設計・製作している。マスクの使用には薄膜の強度を補強する目的も含まれている。このSIB方式を用いてプラズマからの放射損失光の計測には成功したが、LHDの放射損失光の計測には感度が十分でないことが明らかとなった。これを受けて、開発研究の後半では、セグメントに分けずに1枚の薄膜を単フレームで挟み込んだ方式（IRVB）の開発を行っている。IRVB方式のノイズ等価パワーの評価を行った結果、IRVB方式の方がSIB方式に比べて感度が5倍程度良いこと、また、当初危惧された薄膜の強度についても実験を行った結果十分に使用に耐えることなどが明らかとなり、LHDの計測にはIRVB方式を採用するのが妥当と判断して実機的设计・製作を行っている。IRボロメータシステムでは信号校正なども重要であることから、He-Neレーザーをスポット状に熱源として入射させ、温度上昇と冷却時定数を観測することによって必要な校正を行い、妥当な結果を得ている。このように、本論文では、計測機器の開発に不可欠な事項が適切に行われ、IRボロメータシステムの実用化に成功している。

本論文の後半では、製作したIRボロメータシステムをLHDの計測に適用した結果がまとめられている。まず、1台のIRボロメータシステムでLHDプラズマの2次元放射

損失光分布計測を行い、実用性を実験的に実証している。さらに、この計測器の特徴を生かして、プラズマの放射崩壊などの物理的に興味深い現象について計測し、他の計測機器の測定値、磁力線の計算結果などとの比較検討を行っている。また、放射崩壊現象の3次元構造を調べるため、ほぼ同じプラズマ領域を見込む2方向にIRボロメータシステムを設置し、同時測定を行っている。その結果、放射損失光の強度の強い領域がドーナツ状をしたプラズマの内周側下部に局在していることを初めて見出している。この発見はLHDの放射崩壊現象を解明する上で非常に重要であり、今後の研究の進展が期待されている。

このように本論文は、これまで金属フィルム抵抗計測法を用いて行われていたプラズマからの放射損失光の計測にIRカメラを用いた2次元IRボロメータを実用化すると同時に、実用化したIRボロメータを用いた2方向からの同時測定により3次元情報が容易に得られること、また、LHDの放射損失現象の解明には3次元情報が必要不可欠であることなどを明らかにし、今後の放射損失光分布計測の向かうべき方向を示している。従って、本論文は、内容に独創性と新規性が認められ、得られた知見はこの分野の発展に寄与するものと認められる。よって、本論文が博士学位論文として十分な水準にあり、本専攻にふさわしい内容を持つものであると判断した。