

カラーアナライザーを用いた核融合研究への応用事例 —プラズマ対向壁に形成される堆積層分布同定—

Application of color analyzer to fusion research

~Identification of deposition layer distribution formed on the plasma facing wall

核融合研, 総研大・(非) *本島 厳

Gen Motojima*,**

*National Institute for Fusion Science, **The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

海水を資源とする核融合（フュージョン）エネルギーの実現に向けた研究が世界中で行われている。内閣府は 2024 年 6 月に閣議決定した「統合イノベーション戦略 2024」の中で、世界に先駆けた 2030 年代の発電実証の達成に向けて、必要な国の取組を含めた工程表を作成するなど、フュージョンエネルギーの早期実現を目指すことを公表した[1]。現在、官民間問わず、世界における実用化への競争が高まっている。

フュージョンエネルギーの実現に向けては、水素を 1 億度以上の高温プラズマ状態にする必要があるが、そのプラズマを閉じ込める方式として多様な形式が存在する。例えば、岐阜県土岐市にある大学共同利用機関法人・自然科学研究機構・核融合科学研究所では大型ヘリカル装置(Large Helical Device: LHD)が 1998 年よりプラズマ実験を行っている[2]。LHD では、高温プラズマを閉じ込める際に螺旋状の超伝導コイル(ヘリカルコイル)による磁場の力を使っており、ドーナツ型をした高温プラズマを真空容器の中に生成することができる。基本的に高温プラズマは、真空容器を含めたプラズマ対向壁に囲まれており、高温プラズマとプラズマ対向壁は相互に密接な関係性を持つ。この関係性をプラズマ-壁相互作用(Plasma Wall Interaction: PWI)と呼ぶ。PWI では、高温プラズマ由来の粒子がプラズマ対向壁をスパッタリングし、プラズマ対向壁材料を損耗させる。スパッタリングによって弾き出された粒子は様々な対向壁表面に輸送され、最終的に堆積物となって対向壁表面に堆積層を形成する。堆積層が形成される際、燃料である水素粒子が同時に吸蔵されることもあれば、対向壁の温度などの条件によっては、吸蔵されていた水素粒子が放出されることもある。このような堆積層による燃料粒子吸蔵・放出は、燃料粒子制御に大きく影響を与えるため、堆積層の形成機構を理解、および堆積層の形成分布を評価することは燃料粒子制御をしていく上で重要な課題である。この理解のために、小さな試料片をプラズマ対向壁表面に設置し、プラズマ実験終了後に取り出し、微細構造分析をする方法が用いられている。しかしながら、この方法では、設置できる試料片の枚数が限られていることもあり、全領域の対向壁を調査することは不可能である。そこで、カラーアナライザーを使った真空容器表面部の反射率測定を本研究では提案している。この方法を採用することにより、広範囲な堆積層分布の推定が可能である。

本研究では、常陸金属株式会社製のカラーアナライザーDM-1 を用いている。カラーアナライザーによって対象物の反射率を、赤 (Red)、緑 (Green)、青 (Blue) の各波長領域において定量的に評価することができる(それぞれ 10 ビット精度 (0-1023 a.u.))。RGB 値は、これらの測定値の平均として算出される。カラーアナライザーの重量は 160 グラム、測定時間は 3 秒であるため、短時間に多くの点の反射率を真空容器に入室して測定することができる(図 1)。また、内部メモリによる連続データ保存が可能であり、充電式バッテリーを採用することで、常時 AC 電源を必要としない設計となっている。測定に先立ち、強度較正は白色標準紙(光沢なしのマット紙、白色度 91%以上)を基準として R, G, B の最大値を 1023 に較正することで実施した。また、事前に、カラーアナライザーの精度評価のため、R, G, B 値が既知の約 400 色のカラーチャート(DIC カラーガイド第 19 版 PART1, 3)を用いた較正を行った。

堆積層の厚みは、(1)真空容器表面の反射率をカラーアナライザーで測定、(2)単一層モデルを仮定、というプロセスを経て評価される。すなわち、本モデルでは、堆積層の厚さが反射率と関連付けられ、大気層、堆積層、基板層の 3 層から構成される単純な構造を前提としている[3]。反射率は以下の式で定義される。

$$\phi = \frac{2\pi N_f d \cos \theta}{\lambda} \quad (1)$$

$$r = \frac{r_0 + r_1 e^{i2\phi}}{1 + r_1 r_0 e^{i2\phi}} \quad (2)$$

$$R_{ref} = |r^2| \quad (3)$$



Figure 1: Measurement using a color analyzer

ここで ϕ , λ , θ は、それぞれ位相差、入射光の波長、入射角を表す。また、 N_f , d は、それぞれ堆積層の屈折率および厚さである。 r は入射光に対する反射光の電場の比を示す。さらに、大気-堆積層境界および堆積層-基板境界におけるフレネル反射係数は、それぞれ r_0 , r_1 と表される。式(1)-(3)を見ると反射率 R_{ref} が堆積層の厚さ d に対して非線形に依存することがわかる。ここでは、光の偏光については、S波とP波の比が1:1であると仮定した。

LHDにおける真空容器表面の堆積層分布について実験結果を紹介する。ヘリカルコイルに沿った螺旋状の真空容器表面の反射率を、大気開放後に真空容器内でカラーアナライザーを用いて測定した。測定対象としたステンレス製の保護板は530枚であり、測定を2回実施することで、再現性を確認した。図2(a)に、反射率測定の結果を示す[4]。ドーナツ型の装置中心（トーラス）から外側では、ほとんどの保護板のRGB値が低く、反射率も低い。一方で、トーラス内側では、RGB値が高く反射率も高い。この結果をより明瞭に示すため、図1(b)には、測定対象となったステンレス製保護板の展開図を示した。図1(b)を見ると、トーラス外側では堆積が支配的であり、トーラス内側では損耗が支配的であることを示唆している。堆積層の反射率は、損耗と堆積のプロセスのバランスによって決まり、プラズマからの距離やダイバータ板(周辺プラズマと接触するコンポーネント)からの視野に依存する。実際に、ステンレス製保護板がプラズマに近いほどRGB値が高く、遠いほど低くなる傾向が観察されている。カラーアナライザーによって測定された反射率を基に、堆積層の厚さが単一層モデルに従うと仮定して、ヘリカルコイルに沿った螺旋状の真空容器表面上の堆積層の厚さ分布を評価した。図1(c)に、反射率測定結果から導出した堆積層の厚さ分布を示す。反射率の測定結果から予測されるように、トーラス外側では堆積が支配的であり、トーラス内側では損耗が支配的であった。堆積層の分布を詳しく見ると、全体の37%が厚さ10 nm、44%が10~100 nm、19%が100 nm以上であった。また、真空容器表面の60%が堆積層に覆われていた。この結果は、堆積層に覆われた領域が燃料粒子の壁吸蔵・放出において重要な役割を果たしていることを示唆しており、堆積層を形成しないための方策を議論する上で重要な知見を与えている。本講演では、LHDだけではなく、ドイツ・マックスプランクプラズマ物理研究所との国際共同研究により実施した他の実験装置の色分析結果についても報告する予定である[5]。

このような色分析は、フュージョン研究のみならず、トライボロジーの分野に応用可能であると考えられる。例えば、トライボロジー分野においては、摩耗や潤滑油の劣化を検出することが重要であり、これらの状態変化を可視化する手法の一つとして色分析が活用できると考えられる。カラーアナライザーを用いることで、潤滑油の変色を定量的に測定し、オイル交換時期の最適化や異常摩耗の早期発見の可能性がある。

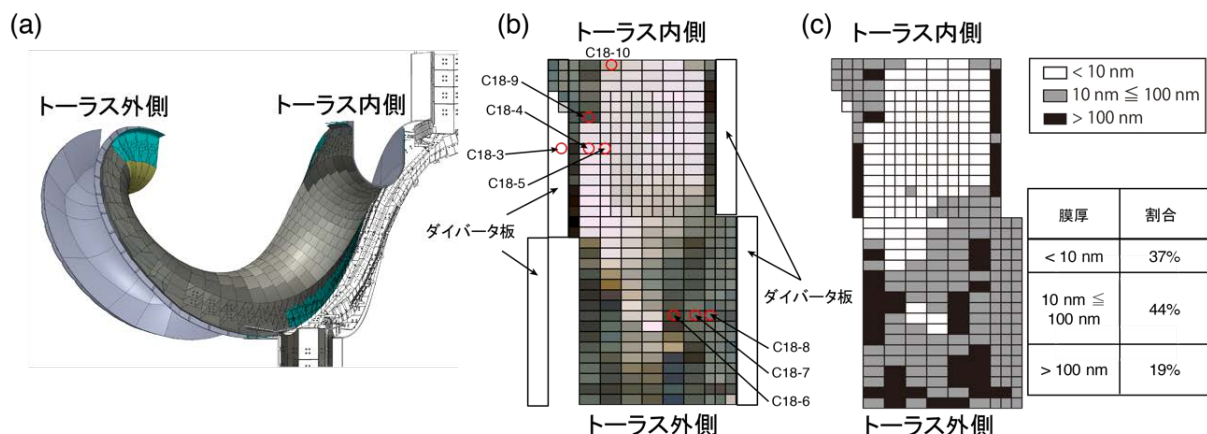


Figure 2 (a) CAD showing the measured reflection rate, (b) developed view, and (c) deposition layer thickness distribution evaluated from reflection measurements [4].

謝辞

色分析の手法について検討段階から実施に至るまで様々な場面で議論させていただいた、九州大学名誉教授 吉田直亮教授に感謝いたします。また、カラーアナライザーを開発された東京電機大学 松本謙司教授に様々なご助言を頂きました。ここに感謝いたします。本研究の一部は、自然科学研究機構 国際研究交流支援事業の支援を受けて実施されました。

文献

- 1) 統合イノベーション戦略 2024, 内閣府, https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/togo2024_zentai.pdf
- 2) K. Ida et al., 2024 Nucl. Fusion 64 112009.
- 3) O. S. Heavens, 1960 Rep. Prog. Phys. 23 1.
- 4) G. Motojima et al., 2017 Nucl. Mater. Energy 12 1219.
- 5) G. Motojima et al., to be accepted to Nucl. Mater. Energy.