

講座

核融合炉材料研究における透過型電子顕微鏡 (TEM)

Transmission Electron Microscope Techniques in Research on Fusion Reactor Materials

1. はじめに

1. Introduction

大宅 諒

OYA Makoto

九州大学大学院総合理工学研究院

(原稿受付：2024年10月31日)

1.1 背景

核融合炉材料の研究では、炉内の各部位に要求される機能を持つような、材料の選定・開発・評価が行われています。例えば、ブランケット構造材料は中性子照射、プラズマ対向材料はプラズマ照射の観点から、特に研究が進められています。また、炉外へのトリチウムの透過防止も、材料に求められる大切な機能です。

このような核融合炉材料の開発において、材料内部の微細組織（格子欠陥や不純物など1 nm～1 μmの大きさ）が、材料全体の振る舞い（脆性や水素吸蔵特性など）を決定づけることがあります。その微細組織を可視化するために、古くから電子顕微鏡が重要なツールになっています。特に、透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope: TEM）は大きな威力を発揮しています。例えば、プラズマ-壁相互作用（Plasma-Wall Interaction: PWI）の研究では、TEMで得られた微細組織の画像データ（TEM画像）から、プラズマ照射による材料の変化やその履歴を読み取ることができます。

一方で、TEM画像自体が多くの情報を含んでいるため、その解釈には専門的な知識が必要とされます。私自身、TEMの専門家ではないのですが、学内外で共同利用機器のTEMを利用することがあります。その際、せっかくなまくTEM画像を取得できても、大事な情報を見落としそうになったり、専門家の先生の助言でやっと理解できたり…、という経験が多々あります。TEMユーザーとしてのこのような経験から、教科書で学ぶことができる基礎知識と、研究現場で実際に行われる議論の間には、ギャップがあることを感じています。

1.2 本講座の目的

本講座は、「TEMで視ることができる微細組織」と「TEMを活用して得られる知見」について、核融合炉材料を例として理解していただくことを目的としています。そのために、TEMを駆使して精力的に研究されている先生方に、研究現場で取得したTEM画像の解説をお願いしました。TEMでできる材料研究について詳しく知りたい方はもちろん、TEMに馴染みのない方にも読んでいただくことを期待しています。そのような方々に、本講座を通じて、教科書と研究現場のギャップを埋める一助になるとともに、TEMを利用してみたいと思ってもらえれば幸いです。

1.3 本講座の構成

TEMは、核融合炉材料中の微細組織（照射損傷やヘリウムバブルなど）を詳細に観察することができます。さらに、TEMの観察技術は、実用材料（表面被覆材料や実機材料など）の研究にも活用されています。本講座では、それらを専門とする先生方に執筆をお願いし、TEM画像の見方とその解釈について、わかりやすく紹介していただきます。

各章の構成は、次のようになっています。

1. はじめに（大宅諒）
2. TEMで視る照射損傷（橋本直幸先生）
3. TEMで視るヘリウムバブル（宮本光貴先生）
4. TEMを活用したセラミックス被覆材料の研究（近田拓未先生）
5. TEMを活用した実機でのPWI研究（吉田直亮先生）

6. おわりに (宮本光貴先生)

まず、第2章および第3章では、TEMで視ることができる微細組織について、基礎的な部分から最近の研究成果も含めて紹介します。次に、TEMを活用した研究として、第4章でトリチウム透過防止膜の開発、第5章で核融合実験装置におけるPWIの複雑現象の理解に向けた研究、について紹介します。最後に、第6章では、TEM観察技術について今後の課題などをまとめていただきます。

また、近年、様々な分析機器等がTEMに併設されるなど、観察技術が進化することによって研究が大きく進展しています。適宜このことにも触れていただく予定です。

1.4 本講座の参考図書・文献

本講座では、取得したTEM画像の解釈とTEM観察技術の活用に焦点を絞りました。そのため、TEMの原理などの全般的な基礎知識については、図書も多く出版されていますので、そちらを参考にしてください。また、電子顕微鏡の関連会社のWebサイトにも、やさしい解説が掲載されています。ここでは、古くから有名な図書[1]と、他学会誌に掲載された関連記事[2-4]をいくつか紹介します。また、九州大学超顕微解析研究センターの技術研修のページ[5]にも、参考図書が紹介されています。

材料をTEMで観察するためには、電子が透過できる程

に薄く加工する必要があります。その加工法も大変重要な技術です。これについても、TEMに関する図書の中に述べられているほか、初学者向けに簡潔にまとめられた解説記事(例えば[6])もあります。ちなみに、核融合炉材料の研究分野では、集束イオンビーム(Focused Ion Beam: FIB)法[7]と、電解研磨法(特にツイングジェット研磨法)がよく使われています。本講座も含めて、これらが皆様のご研究の一助になれば幸いです。

参考文献

- [1] P. B. Hirsch *et al.*, *Electron Microscopy of Thin Crystals* (Butterworth, 1965); 日本語翻訳図書は、諸住正太郎他訳: 透過電子顕微鏡法 (コロナ社, 1974).
- [2] 濱元千絵子: 透過電子顕微鏡の原理とその応用, *化学と教育* **70**, 142 (2022).
- [3] 柴田直哉: 観測技術(電子顕微鏡)のコツ, *応用物理* **84**, 754 (2015).
- [4] 今野豊彦: TEM像の解釈(I), *顕微鏡* **43**, 50 (2008). TEM像の解釈(II) *顕微鏡* **43**, 212 (2008).
- [5] 九州大学超顕微解析研究センター 技術研修のページ https://www.hvem.kyushu-u.ac.jp/training_03.html
- [6] 長迫 実: 透過電子顕微鏡観察の試料調整, *ぶんせき* **3**, 86 (2021).
- [7] 加藤丈晴: 集束イオンビーム装置による薄片試料作製技術, *顕微鏡* **54**, 138 (2019).



お お や ま こ と
大 宅 諒

九州大学大学院 総合理工学研究院 助教.
2017年大阪大学大学院 工学研究科 博士後期課程修了. 博士(工学). 専門はプラズマ-壁相互作用. うどんが好きです.