

材料部会セッション

今後 10 年に向けた国内照射施設を活用した原子力施設の技術高度化のための研究と
開発方向性Research and Development for the Technology Advancement of Nuclear Facilities Using Domestic
Irradiation Facilities

(2) 国内照射施設の現状と今後の展望

(2) Current Status and Future Prospects for Domestic Irradiation Facilities

*柴山環樹¹¹北海道大学大学院工学研究院附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センター

1. はじめに

国内で、燃料や材料の中性子照射を担ってきた、日本原子力研究開発機構の材料試験炉 (JMTR) が、廃炉となり、大学では京大炉(KUR)のみとなることから、新しい中性子照射施設が設置されるまでは、海外の材料試験炉やイオン加速器等のシミュレーション照射施設を利用して、高照射量の材料研究を継続する必要がある。しかしながら、海外でも老朽化により廃炉あるいは廃止が検討されている試験炉も多いことから、既存の照射施設を整備し高度化することによって、当面の間は、革新的原子力材料の研究開発だけでなく、発電用軽水炉の長寿命化に関する材料研究等、次の世紀まで長期的に材料照射研究に携わる人材育成にも注力する必要がある。そこで、今後 10 年に向けた国内照射施設を活用した原子力施設の技術高度化のための研究と開発方向性を議論するために、これまで長期間にわたって材料照射研究に用いられてきたイオン加速器や超高圧電子顕微鏡等の国内照射施設の現状と今後の展望について、特に大学等の照射施設について述べる。

2. 大学の照射施設について

2-1. イオン加速器

大学や国立研究所などに設置され、共同研究や課金利用等の共用事業に提供されている、施設とイオン加速器について、情報共有・相互扶助・人材育成を進めることを目的に、2017年4月に大学加速器連携協議会が発足した。2017年7月に開催された第一回大学加速器連携協議会総会において、データベースを作成することになり、2017年12月に「大学の加速器施設一覧」が発行された¹⁾。その中では、東北大学のサイクロトロン・ラジオアイソトープセンター²⁾と高速中性子実験室³⁾、東京大学大学院工学研究科原子力専攻の重照射研究設備(High Fluence Irradiation Facility, The University of Tokyo, HIT)⁴⁾が材料照射に利用可であると紹介されている。材料部会でなじみのあるイオン加速器で掲載されていない装置は、量子科学技術研究開発機構のTIARA(Takasaki Ion Accelerators for Advanced Research Application, TIARA)⁵⁾は、東北大学金属材料研究所、京都大学エネルギー理工学研究所(Dual-Beam Facility for Energy Science and Technology, DuET)⁶⁾、九州大学応用力学研究所のタンデム型イオン加速器⁷⁾で、何れもHigh Voltage Engineering Europa B.V. (HV) 社製である。金研の装置を除き、現在も利用可能である。東大と京大の装置は、シングルエンドのイオン加速器を連結し、水素あるいはヘリウムイオンと共に金属イオンなどを同時に照射することが可能で、核融合等の核変換を模擬したシミュレーション照射が可能である。材料照射試験炉で中性子を照射する場合は、組織観察用のTEMディスク、機械特性評価用のミニチュア試験片が一般的である。点欠陥の生成、成長、その後の離合集散などの基礎研究に材料試験炉を用いる場合は、中性子束や照射量だけでなく、試料の温度の履歴が重要である。桐谷、義家らの精密温度制御照射に関する提言から、国内ではJMTR、常陽、KURなどで、原子炉起動当初から試料温度を制御し、一定の温度で中性子照射する技術を確立した。その後、日米協力事業等を通じて、海外炉でも精密温度制御が一般的になった。そのため、イオン加速器による材料照射試験においても、一般的なガウシアン分布したイオンビームを掃引して平坦化し、複数のTEMディスクやミニチュア試験片を一度に照射することが出来ると共に、精密に温度制御出来る様に電子ビーム加熱やヒートシンクの適用や、各部位でイオン電流値を詳細に測定出来る様にミニチュアサイズのファラデーカップを複数配置するなど、様々な

工夫が凝らされている。

材料試験炉での中性子照射に関して、特にミニチュア試験において日本は多くの経験を有し成果を挙げてきている。ミニチュアサイズの引張試験片を用いたミニチュア引張試験だけでなくミニチュアシャルピー試験、ミニチュアCT試験、ミニチュア疲労試験など様々な試験方法に対応可能である。一方、イオン加速器を用いる場合、イオンの飛程から材料照射試験炉で用いるミニチュア試験片サイズでも大きいため、更にイオンの入射方向の試料厚さを薄くし体積を小さくしたミニチュア試験片を用いる。最近では、FIBで加工したピラー状の試験片をピエゾ素子で駆動する試験器やナノインデントを応用した試験方法が開発されて、様々な材料に用いられている^{8,9)}。同一試料を利用して、機械試験後の照射欠陥と転位の相互作用についても評価出来ることから、ミニチュア試験片を更にFIBで加工してTEM観察や3Dアトムプローブで元素マッピングを行うことが国内外で進められている。

2-2. 超高压電子顕微鏡

1980 から 1990 年代にかけて、10 台を超える超高压電子顕微鏡が国内で稼動し、それぞれの機関や施設で特徴ある研究が進められてきた。現在は、材料照射目的の場合、北海道大学、東京大学、名古屋大学、大阪大学、九州大学の超高压電子顕微鏡が、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業や各大学独自の共用システムを通じて利用可能である。紙面の関係から、北海道大学の超高压電子顕微鏡について紹介する。

北海道大学では、1995 年度から 3 年間をかけて基礎・萌芽研究を目的とした COE 形成のための研究環境高度化支援化プログラムの一環として 2 台のイオン加速器を連結したマルチビーム超高压電子顕微鏡が設置された。その後、3 種類のレーザー (CW He-Cd、ナノ秒、フェムト秒) を増設して連結し、現在は、複合量子ビーム超高压電子顕微鏡としてリニューアルして運用している。原子力材料の照射研究には、従来からの高エネルギー電子による原子の弾き出しと同時に照射するイオンとの重畳効果について、その場観察出来るということが秀でた特徴である¹⁰⁾。照射温度は、2 軸傾斜ホルダーを利用した場合、約-190°C (液体窒素による冷却) から約 700°C (無誘導ヒーターによる加熱) での照射が可能である。2018 年の北海道胆振東部地震で被災し、しばらく修理や調整を進め、現在では、フルスペックで実験が可能である。また、SiN 隔膜でセル室を真空と切り離れたガスループの雰囲気制御ホルダーやイオン液体を利用した液中観察などが可能である。FIB で加工したピラー状試料を利用した電頭内のその場機械的試験についても研究開発を進めている。

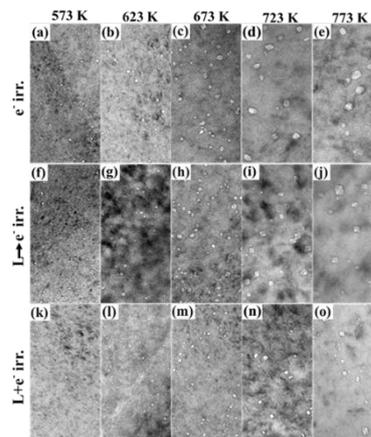


図 1. 複合量子ビーム超高压電子顕微鏡の高圧タンク部 図 2. SUS316L の(a)電子照射、(b)レーザー照射後電子照射、(c)レーザー/電子同時照射¹¹⁾

図 1 に、複合量子ビーム超高压電子顕微鏡の高圧タンク部の俯瞰写真を示す。手前から、コックロフトの昇圧装置の高圧タンク、その奥が加速管の高圧タンクで、昇圧時のリップルノイズが影響しない 2 タンク方式で SF₆ ガスが充填されている。イオン加速器のビームラインに挟まれた中央部の黒い箱は、前述した 3 種類のレーザー照射装置が設置されており、3 つの内いずれかのレーザーと電子、あるいはイオンと電子を同時に照射することが可能である。紫外線レーザーでは、励起、ナノ秒レーザーでは、局所加熱や過飽和空孔の導入、フェムト秒レーザーは、高速現象の研究に取り組みつつある。図 2 は、SUS316L の(a)電子照射、

(b)レーザー照射後電子照射、(c)レーザー/電子同時照射におけるボイド形成・成長のその場観察結果である。電子照射のみの場合と比較して、ナノ秒パルスレーザーを予照射し過飽和空孔を凍結した状態で電子線を同量照射するとボイドの数密度とサイズは大きい傾向になることが明らかになった。また、レーザー/電子同時照射の場合、電子照射によって形成した格子間原子とナノ秒パルスレーザーで形成した空孔と再結合する確率が上昇し、その結果ボイドのサイズは低く抑制され、スエリングは照射温度を上昇させても抑制される傾向にあることが明らかになった。空孔を主体とした振る舞いについては長い間研究手法が無く課題であったが、この装置の開発により初めて可能となり、今後の展開が期待される。

3. まとめ

材料照射研究に用いられてきた大学照射施設であるイオン加速器や超高压電子顕微鏡について現状と今後の展望について概説した。それぞれの装置の性能や利用方法などについては、別の機会にまとめて報告する予定である。30年前には、頭の中のアイデアにすぎなかった研究手法が、現実になっており、今後も思いもよらなかった研究手法が出現すると考えられる。しかし、最新の機器は非常に高価でその運転、維持管理にも莫大な費用を必要とし、それに対応する技術職員の人材確保と人材育成も重要な課題である。そのため、今後も国際的な枠組みで常に研究機器の整備、更新を進めると共に、研究者や技術職員の交流、流動化に加えて大学院生の研究、教育にも取り組み、材料照射研究を継続して進められる場の整備が是非とも必要である。特に、国内の常陽は、高い中性子束が得られるだけでなく、FFTF/MOTAで実績のあるバナナチップタイプの材料照射キャプセルの設計思想を受け継いだ温度制御型材料照射装置MARICOを利用出来るので、現在の環境に適合する様にバージョンアップなどの改良を進め、イオン加速器や超高压電子顕微鏡による材料照射研究と相互補完的に研究が進められればと期待する。

参考文献

- 1) https://www2.kek.jp/accl/KEK_University/files/catalog.pdf
- 2) https://www.cyric.tohoku.ac.jp/index_j.html
- 3) <http://www.qse.tohoku.ac.jp/intro/facility/index.html>
- 4) <http://www.tokai.t.u-tokyo.ac.jp/hit/>
- 5) <https://www.qst.go.jp/site/taka-riyoukanri/2163.html>
- 6) <https://admire.iae.kyoto-u.ac.jp/facilities.html>
- 7) 吉田直亮ら、プラズマ・核融合学会誌、77(7) (2001) pp.736-738
- 8) P.D. Edmondson, et al., Journal of Nuclear Materials, 462 (2015) pp. 369-373.
- 9) D.E.J. Armstrong, et al., Journal of Nuclear Materials, 462 (2015) pp. 374-381.
- 10) 柴山環樹、渡辺精一、顕微鏡、54(3) (2019) pp. 116-121.
- 11) Subing Yang, et al., Journal of Nuclear Materials, 488 (2017) pp. 215-221.

*Tamaki Shibayama¹

¹Center for Advanced Research of Energy and Materials, Faculty of Engineering, Hokkaido University