

複合ビーム材料照射装置DuETを用いた核融合炉材料研究の展開  
**Research on fusion reactor materials**  
**using the Dual-beam facility for Energy science and Technology DuET**

○笠田 竜太<sup>1</sup>, 近藤 創介<sup>1</sup>, 藪内 聖皓<sup>2</sup>, 檜木 達也<sup>3</sup>  
 Ryuta KASADA<sup>1</sup>, Sosuke KONDO<sup>1</sup>, Kiyohiro YABUUCHI<sup>2</sup>, Tatsuya HINOKI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東北大金研, <sup>2</sup>京大工ネ理工研, <sup>3</sup>京大オープンイノベーション機構  
<sup>1</sup>IMR, Tohoku Univ., <sup>2</sup>IAE, Kyoto Univ., <sup>3</sup>OII, Kyoto Univ.

世界中の国立研究機関や大学において、核融合炉材料や核分裂炉材料における中性子照射効果を模擬するためにイオン加速器施設が広く利用されている。京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター（以降センター）の高度エネルギー機能変換実験装置として開発された複合ビーム材料照射装置DuET（Dual-Beam Facility for Energy Science and Technology）は、将来の基盤エネルギーシステム開発に関わる基礎研究のために設置された2台のMV級静電加速器を中心とする施設である。材料の照射効果を理解するために、イオンビームのフラックスとフルエンス、材料の温度などの照射条件を精密に計測・制御するだけでなく、超微小試験技術（USTT: Ultra-Small Testing Technology）を用いて、イオン照射されたマイクロメートル領域の微細構造変化、力学特性、寸法安定性、環境影響などの照射後実験を展開することに努めてきた。

DuETは、1999年にセンターの基幹装置として、ヘリオトロンDの置かれていた建屋に導入が開始されるとともに、CREST事業「低環境負荷エネルギー用複合機能構造材料の開発研究（代表：香山晃）」の枠組み等において促進された。その後、センターにおいて外部資金によって整備したマルチスケール材料評価基盤装置群（MUSTER: Multi-Scale Testing and Evaluation Research）とともに、受益者負担による施設の持続性向上を見据えた有償利用制度を全国的にも一早く導入し、文部科学省先端研究施設共用促進事業等による体制構築を進めつつ、産業界にも共用を拡大した。エネルギー理工学研究所において共同利用・共同研究拠点「ゼロミッションエネルギー研究拠点」が

採択されると、DuETの学術利用は国内外に広がり、国際共同研究については、米国、欧州、韓国等の研究者との国際共著論文が得られている。



図1 DuETのHVEE社製のタンデム型加速器（写真中央）とスパッタ型およびデュオプラズマ型のイオン源（写真左）。



図2 DuETのシングルエンド加速器。

DuETの最大の特徴は、図1, 2に示す2台の汎用加速器そのものというよりは、重イオンビームとヘリウムイオンビームの同時照射によって核融合中性子照射の模擬が可能であることはもちろんのこと、他の汎用重イオンビーム加速器施設では運用上困難な重照射研究を可

能とする高いビーム強度と照射条件の安定性を実現した図3に示すような独自の制御・計測システムである。

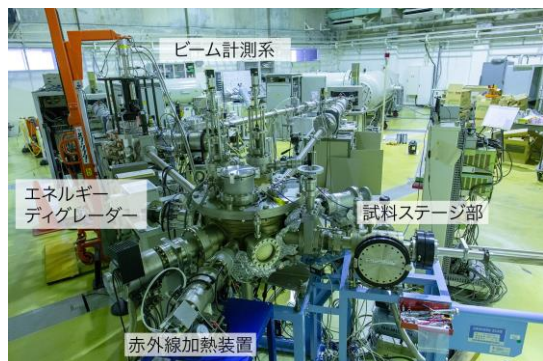


図3 DuMIS照射ステーション。写真奥のタンデム加速器側ラインから重イオンが、左側シングルエンド加速器ラインからHeイオンが主に照射される。

MeV級の重イオンビーム照射では、弾き出し損傷の与えられる深さが数マイクロメートルに制限される代わりに、原子炉中性子照射と比して極めて短時間で高い弾き出し損傷量 (dpa: displacement per atom) を得ることができる。DuET設置以来、先進核融合炉材料として期待される炭化ケイ素 (SiC) 材料およびSiC複合材料を対象として、最高1600°Cまでの照射実験を可能とする照射システムを開発し、照射下寸法変化機構、高温水腐食への照射影響等、先駆的な研究成果を得てきた。また、低放射化フェライト (RAF: Reduced Activation Ferritic) 鋼のヘリウム脆化発現限界照射量についても、DuETでの系統的な同時照射研究が貢献して明らかにされた。RAF鋼よりも高い高温強度を有する酸化物分散強化 (ODS: Oxide Dispersion Strengthened) 鋼における優れた耐ヘリウム脆化特性について、ナノ酸化物粒子の影響を明らかにしている。加えて、タングステン材料やトリチウム透過防止被膜の水素同位体リテンションに及ぼす照射効果に関する共同研究が進められてきた。更に、重イオンビーム照射研究では困難な機械的特性評価に向けて、数マイクロメートルサイズの試験片加工と評価を可能とする超微小試験技術開発が進められてきた。また、核融合炉材料研究以外についても、次世代原子力システム用の材料開発や軽水炉の安全性に関わる基礎研究、照射効果基礎研究など、多様な研究が展開されている。

以上のように、通常のエネルギープラント機器においてさえ数10年は必要とする構造材料開発の中でも、追加的に照射データベースを必

要とする核融合炉や先進原子力システムの構造材料の開発は、DuETによって文字通り加速されたと言える。

約20年間にわたる上記の研究を通して、DuETを直接的に利用した学位論文により博士の学位を取得した学生は京都大学だけでも少なくとも13名に上っており、シミュレーション研究や他機関所属者も含めるとより多くの国内外で活躍する研究者の育成に貢献したことも特筆すべき成果である。

本講演では、以上の成果について時間の許す限り紹介する。また、DuETの維持管理に関する中心メンバーの著者らの殆どが他機関・他部局へ転出しており、イオン加速器施設を用いた核融合材料科学の展開は新たなステージを必要としている。核融合コミュニティと活発に意見交換したい。

## 謝辞

本プロジェクトレビューをまとめるにあたり、DuET の設置から運用に関わった多くの皆様のご協力に深く感謝申し上げます。香山晃、木村晃彦、加藤雄大、神保光一、岸本弘立、橋富興宣、大村高正各氏とは装置建設時や運転初期よりプロジェクトを進めてきました。DuETにおける実験では、多くの国内外の共同研究者に参加頂きました。特に、谷川博康、安堂正巳、PARK Kyeong Hwan、小沢和己、小柳孝彰、荻原寛之、末石裕一郎、湯谷健太郎、高橋宏昌、高山嘉幸、姫井善正、HA Yoosung、ZHANG Zhexian、HASENHUETL Eva、SONG Peng、GAO Jin、NOH Sanghoon、藤井克彦、近田拓未、大矢恭久、波多野雄治、大野直子、深見一弘、叶野翔、KAI Ji-Jung、YAMAMOTO Takuya の各氏に感謝申し上げます。また、DuETを用いた研究を実施するにあたり、京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究、同じく京都大学エネルギー理工学研究所共同利用・共同研究拠点ゼロエミッションエネルギー研究拠点、先端研究施設共用イノベーション創出事業、同じく先端研究施設共用促進事業 (文部科学省)、原子力システム研究開発事業および原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ (文部科学省)、戦略的創造研究推進事業 CREST (科学技術振興機構)、科学研究費補助金 (24760715, 17H04977, 19H02643, 16H02443, 15K14280, 25630432, 18760654, 14780390, 19K15310, 18H01915 等)、他の支援を受けました。ここに感謝の意を表します。

## 関連論文

[1] 藪内聖皓, 近藤創介, 檜木達也, 笠田竜太, プロジェクトレビュー「複合ビーム材料照射装置 DuETを用いた核融合炉材料研究と関連材料研究の展開」, J. Plasma Fusion Res. 97 (2021) 403-418.