

7

若狭湾エネルギー研究センターにおける 高エネルギービーム利用研究 (若狭湾エネルギー研究センター)

(公財)若狭湾エネルギー研究センター 所長
岩瀬 彰宏

若狭湾エネルギー研究センターでは、3台のイオン加速器（シンクロトロン、タンデム加速器、イオン注入器）を用いて、陽子線がん治療、イオンビーム育種、イオンビーム材料分析・改質、宇宙機器や原子力材料の放射線耐性などの研究・開発を行っている。また、原子炉廃炉技術の一環として、高強度レーザーによる材料切断や表面除染の研究を行っている。本講演では、これら、高エネルギービームを利活用した研究開発を紹介する。

若狭湾エネルギー研究センターにおける高エネルギービーム利用研究

若狭湾エネルギー研究センター

岩瀬彰宏

1. はじめに

若狭湾エネルギー研究センターは、平成10年の開所以来、設立目的である「エネルギーに関連した科学技術の地域産業への普及などによる地域活性化」のため、種々の活動を行っており、事業計画において3本柱と位置付ける「研究開発」、「産業支援」、「人材育成・交流」に基づく事業運営を進めている。このうち、「研究開発」においては、加速器からのイオンビームを用いた研究のほか、原子炉廃止措置におけるレーザー技術の応用、水素社会実現に向けた技術開発なども行っている。また、「産業支援」では、原子力発電所廃止措置への県内企業参入に向けた情報交換会開催や嶺南地域の企業を中心とした新製品開発への支援、「人材育成・交流」では、国際原子力機関（IAEA）などと連携した諸外国技術者への研修や研究者受け入れ、国内大学院生の海外留学支援などの原子力人材育成や、スーパーサイエンスハイスクール（SSH）などを通じた地元教育現場への科学技術教育振興などに取り組んでいる。

当センター研究開発部は、加速器室、生物資源研究室、粒子線医療研究室、照射支援室、エネルギー材料グループ、エネルギー開発グループ、レーザー技術開発室の7つのグループより構成されている。最近の研究活動は大きく6つに分けられ、医療分野、育種分野、レーザー分野、宇宙開発分野、エネルギー分野、多様な分野の活動を支える技術開発に関するものである。本講演では、これらの成果のうち、特に、本研究センターが所有する3種類の加速器からのイオンビームを用いた研究・開発について、その現状と将来展望を紹介する。また、併せて、高強度レーザービームの原子炉廃止措置への応用技術開発についても触れる。

2. 若狭湾エネルギー研究センターにおけるイオン加速器

2-1 タンデム加速器 シェンケル回路により高圧を発生し、最大端子電圧は5MVである。2台のイオン源（ヘリウムイオン源、プラズマスパタイオン源）が設置されており、水素、ヘリウム、炭素、ニッケル、銅イオンの加速が可能である。また、材料中の水素の分析のために、窒素の同位体イオン（ ^{15}N ）の生成、加速も現在試みている。加速されたイオンビームは、材料の分析、改質、宇宙機器や原子力材料の放射線耐性評価などに使われている。

2-2 シンクロトロン タンデム加速器をインジェクターとして、水素イオンで最大200MeV、 He^{2+} 、 C^{6+} で核子当たり最大55MeVのエネルギーのビームを得ることができる。これらの高速イオンビームは、がん治療研究、イオンビーム育種研究、宇宙デバイスにおけるシングルイベント評価などに使われている。

2-3 イオン注入装置 10-200keVの水素、炭素、窒素イオン、希ガスイオンを加速できる。また、照射中の試料温度を室温から最高温度850°Cに保持できるのも大きな特徴である。材料改質、宇宙用機器や原子力材料の放射線耐性評価などに使用される。

3. 粒子線医療研究

シンクロトロンを利用して、2003-2009年に陽子線がん治療の臨床研究を実施し、累計患者数は62例であった。これらの成果を受けて、福井県立病院陽子線がん治療センターが2011年に開設され、がん治療に関する知見、経験を同治療センターへ引き継いだ。その後、陽子線がん治療の高度化に向けて、照射野の拡大、簡便かつ効率的な陽子線量測定技術の開発、リアルタイム2次元線量分布測定システム開発などを試みた。さらに、陽子線の生物影響の詳細な解析やモデル動物を用いた治療効果の検証など、陽子線がん治療の高度化に向けた基礎研究も実施している。特に最近では、異種放射線の併用によるがん治療の高度化と臨床応用に向けた細胞生物学的な検討に取り組んでいる。現在までに、陽子線とX線の併用照射による細胞致死効果は、両者の単独照射効果の単純な足し合わせよりも大きくなり、陽子線とX線の照射の順番や照射の時間間隔も細胞致死効果に影響を与えるなど、興味ある結果が得られている。今後は併用照射による細胞死増大の最適化条件を見出し、その分子機構の解明を目指す予定である。

4. イオンビーム育種研究

イオンビーム照射による生物の品種改良では、福井大、理研、福井県立大など外部の試験研究機関や大学、種苗会社などと共同で、観賞用草花や薬剤を作るための微生物など、有用な生物品種開発の研究を行っている。またその基礎研究として、イオンビームによる突然変異形成のメカニズム、有用な生物を見分けるためのDNAマーカーに関する研究も実施している。主要な成果としては、まず、観賞用草花、施設園芸用野菜、穀類等、農産物のイオンビームによる品種改良が挙げられる。今までに9品種が品種登録または登録出願中であり、市場で入手が可能である。また、福井県内の栽培に適した酒米イネ品種のイオンビームによる開発などが試みられている。微生物（真菌類、細菌類）の品種改良では、抗がん剤成分の生産性を高めた冬虫夏草菌の開発等の成果をあげ、有害重金属元素をあまり蓄積しないシイタケの開発なども行っている。今後は、イオンビーム照射により、実用的で地域社会に貢献できる品種改良に取り組むとともに、イオンビームの特性を強化する品種改良手法の開発や、染色体レベルでの突然変異を高頻度で誘発する育種手法の開発に取り組む予定である。

5. イオンビームによる材料分析・材料改質研究

イオンビーム分析法の開発では、通常のラザフォード後方散乱法（RBS）、弾性反跳粒子検出法（ERDA）に加えて、多層薄膜の高精度分析用に、重イオンRBS法を開発し、1nm程度の深さ分解能を持つ分析が可能になった。また、マイクロイオンビームを用いた材料中の元素の2次元分布評価や、大気中においた試料での水素分析が可能なIn-Air-ERDA、ERDAと飛行時間測定を組み合わせたTOF-ERDAによる材料中の軽元素分析技術の開発を行ってきた。これらの手法を用いて、Li酸化物における水素の吸蔵・放出特性、ダイヤモンド様炭素（DLC）薄膜の含有水素分析、全固体リチウムイオン電池におけるリチウム原子挙動などを分析・評価している。イオンビームによる材料改質研究では、MEMSへの利用に適した鉄白金薄膜永久磁石の性能を向上させる試みを行った。鉄と白金を交互に製膜して作成した多層膜試料の保持力は、窒素イオン注入により、11.4kOeから17.2kOeへと、1.5倍向上することができた。また、鉄ロジウム合金において、50keV Arイオンを照射することにより、低温での磁性が、照射量の増加に伴い、反強磁性から強磁性、常磁性へと変化し、照射後の熱処理により、イオン照射によって発現した常磁性状態が、強磁性、反強磁性へと回復する様子もとらえられた。

6. 原子力材料の放射線耐性評価

原子炉の安全性の確保のためには、中性子による照射環境におかれる圧力容器、炉内構造物、燃料被覆管などの劣化挙動の評価が重要である。しかし、現状では、中性子照射効果の研究に、国内の研究用原子炉を使用するのは困難な状況にある。加速器による重イオン照射は、損傷速度やPKAスペクトルが中性子照射と大きく異なり、損傷の材料表面への局在化など、中性子照射と異なる効果をもたらすが、それらを十分考慮したうえで照射実験を行うことにより、原子炉材料の照射損傷評価に有用なデータを得ることができる。軽水炉の主な経年劣化事象の一つである照射誘起応力腐食割れは照射硬化が主要因と考えられている。金属や合金の硬さは転位の動きにくさが大きく関係しているため、軽水炉の炉内構造物として用いられるSUS316Lに10 MeVのNiイオンを照射して転位の動きをピン止めする照射欠陥の導入を行い、透過型電子顕微鏡内で転位の動きを「その場」観察する実験が行われている。また、同じく軽水炉の燃料被覆管で用いられるジルコニウム合金（ジルカロイ2）中に存在する水素化物の重イオン照射効果を走査型透過電子顕微鏡（STEM）により観察し、水素化物の体積密度が、照射により大きく低下する現象を見出している。

7. 宇宙用機器の放射線耐性評価

宇宙空間においては、地上に比べて大量の、また多種多様の放射線が存在し、これによる各種半導体デバイスの誤作動、性能劣化を地上で評価することは、宇宙ミッションの遂行上不可欠である。若狭湾エネルギー研究センターの加速器施設では、これまでに、X線・ガンマ線測定用のCMOSイメージセンサー、MPPC（シリコン光電子増倍管）、ASIC（特定用途向けの集積回路）、電子基板、高電子移動度トランジスタ（HEMT）、シンチレータ、CCDイメージセンサー、太陽電池といった宇宙用電子機器のシングルイベント効果、トータルドーズ効果、はじき出し損傷効果など、宇宙放射線に対する耐性を評価してきた。また、「はやぶさ」で話題となった太陽系の衛星で水が生成される現象をイオン照射で模擬する実験も行っている。

8. 原子炉廃止措置における高強度レーザービーム応用研究

原子力発電所や研究用原子炉の廃止措置においては、放射化した部材の切断や表面除染が必要となる。レーザービームは単色で位相のそろった光であり、指向性、収束性に優れているため、非常に高密度のエネルギーを極短時間に材料に付与することができる。これらレーザービームの特徴を活用した切断や除染技術は、原子炉解体の工期短縮や解体作業時に発生する二次廃棄物量低減などに適していると期待される。そこで、本研究センターでは、高出力レーザーを用いて、廃止措置適応を目指した切断や除染技術開発に取り組んでいる。切断では、最大出力30kWのファイバーレーザーを使用した厚鋼板切断や、配管の切断を想定した機材の開発を、除染では、遠隔操作レーザー除染ロボットの開発や発振方式の違いによる除染の効率化を行ってきた。また、レーザービームは、材料表面の錆や各種被膜除去、表面処理など、原子炉部材以外にも多く応用できるため、一般産業への活用に関しても、上記の技術を展開し、企業などと連携して研究開発を進めていく予定である。

9. まとめ

本稿では、若狭湾エネルギー研究センターにおけるイオンビーム、レーザービームを利用した各種研究の一端を紹介した。いずれの研究も、ターゲットの微小領域に非常に短い時間

で高密度のエネルギーを付与できる、という高エネルギーイオンビーム、大強度レーザービームの特徴を活用したものである。このようなエネルギー付与により、ターゲット中には多くの場合、熱平衡から大きく離れた状態が発現する。このような特異な状態は、通常の手法では実現できないものであり、それゆえに非常に幅広い分野にわたったイオンビーム、レーザービームの有効利用が可能となる。加速エネルギーの大きく異なる3種類のイオン加速器と高強度レーザー装置を有する本研究センターの特徴を生かして、今後とも、幅広い研究開発分野で社会・産業に貢献していく所存である。

参考文献

若狭湾エネルギー研究センターのイオンビーム加速器や利用に関する詳しい内容は、
A. Iwase, S. Hatori, T. Kurita, K. Kume, M. Maeda, K. Takagi, M. Hatashita, R. Ishigami, K. Suzuki,

“Current status and prospects of the research using energetic ion beams at the Wakasa-wan Energy Research Center”, Trans. Mat. Res. Soc. Japan 45(2020) 89-96、およびその引用文献を、

イオン加速器を用いた宇宙機器のシングルイベントなどの放射線耐性評価については、
S. Hatori, R. Ishigami, K. Kume, K. Suzuki,

“Ion Accelerator Facility of the Wakasa Wan Energy Research Center for the Study of Irradiation Effects on Space Electronics”, Quantum Beam Sci. (2021) 5, 14、およびその引用文献を参照のこと。

レーザービームによる切断、除染に関しては、
Koji Tamura, Ryoya Ishigami and Ryuichiro Yamagishi,

“Laser cutting of thick plates and simulated steel components using a 30 kW fiber laser”, Journal of Nuclear Science and Technology, 53(2015) 916-920、
遠山伸一、峰原英介、

「高出力ファイバーレーザーを用いた切断及び除染の技術開発」デコミッションング技術
56号(2017) 55-65、
を参照のこと。

講演者略歴



岩瀬 彰宏 (いわけ あきひろ)

所 属 (公財) 若狭湾エネルギー研究センター

住 所 〒914-0192 福井県敦賀市長谷 64-52-1

連絡先 TEL/FAX : 0770-24-5611/0770-24-5605、E-mail: aiwase@werc.or.jp

学 職 歴 1975 東京大学 工学部 物理工学科卒業
1978 東京大学 工学系研究科 博士課程 中途退学
1989 理学博士 (東京大学) 「FCC 金属のイオン照射損傷における電子励起効果」
1978 特殊法人 日本原子力研究所 研究員
1993-1994 (米国アルゴンヌ国立研究所 研究員)
2003 大阪府立大学 先端科学研究所 教授
2005 大阪府立大学 工学研究科 教授
2018 (一社) 大阪ニュークリアサイエンス協会 専務理事
2019 (公財) 若狭湾エネルギー研究センター 所長 現在に至る

研究・活動分野など イオンビーム、電子ビーム、X線(放射光)を用いた物質と放射線の相互作用の基礎研究、材料改質、材料分析に従事