

## 加速器標的分野における照射損傷研究の重要性と国際協力

### IMPORTANCE AND INTERNATIONAL COLLABORATION OF RADIATION DAMAGE RESEARCH IN ACCELERATOR-TARGET FIELD

若井 栄一<sup>#, A)</sup>, 牧村 俊助<sup>B)</sup>, 石田 卓<sup>B)</sup>, 勅使河原 誠<sup>A)</sup>  
Eiichi Wakai<sup>#, A)</sup>, Shunsuke Makimura<sup>B)</sup>, Taku Ishida<sup>B)</sup>, Makoto Teshigawara<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC Center, JAEA

<sup>B)</sup> J-PARC Center, KEK

#### Abstract

The research of Radiation Damage In Accelerator Target Environments (RaDIATE) under high-intensity beams is recognized as an important subject in high energy accelerator-target field. The RaDIATE international collaboration started from 2013 in several research institutes, and J-PARC and CERN will joint officially in the collaboration within this year. In this paper, the related recent activities of the RaDIATE collaboration are introduced. The 4<sup>th</sup> collaboration meeting of RaDIATE will be held on 20<sup>th</sup> - 22<sup>th</sup> September 2017 in Tokai-mura, and the further details can be obtained in the meeting.

#### 1. はじめに

Figure 1 に J-PARC センターの各施設の標的機器の外観を示している。J-PARC センターは主に、加速器施設、物質・生命科学実験施設、ニュートリノ実験施設、及びハドロン実験施設からなり、これらの施設のこのような大強度の加速器標的施設を利用した科学や産業の発展のためには、生成標的やその収納容器、陽子ビーム窓等の機器が長期に安定した性能を保つとともに、より高い加速器出力に対応していく必要がある。これらの機

器は、高エネルギー粒子の通過や反応によってもたらされる損傷の蓄積により、材料強度特性等が徐々に劣化していく[1,2,3,4]と推測される(Figure 2 参照)が、その挙動を正確に把握するためには、照射損傷のデータの拡充や定量的評価方法の確立などが必要であり、各国の施設において急務の共通課題であると認識され始めた。

Targets at J-PARC in operation

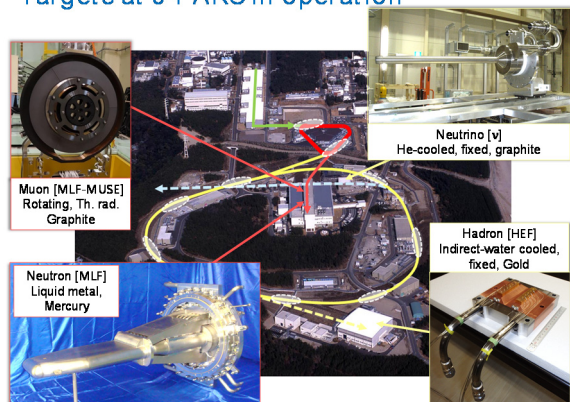


Figure 1: Target appearance of each facility at J-PARC. It has three proton accelerators: a 400 MeV linear accelerator (currently operating at 180 MeV), a 3 GeV rapid-cycling synchrotron (RCS) and a 50 GeV (currently 30 GeV) main ring. In each case, target materials and designs are employed to maximize the efficient production of the desired secondary particle beams in the materials and life science experimental facility (MLF), neutrino experimental facility, and hadron experimental facility.

<sup>#</sup> wakai.eiichi@jaea.go.jp

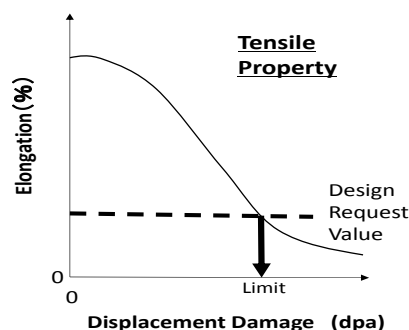


Figure 2: Degradation behavior by radiation damage.

#### 2. RaDIATE 国際協力とその概要

世界の大強度粒子加速器の標的や窓材料の照射損傷の研究を推進し、各国の機関が有する加速器施設や照射後試験施設を相互に利用・活用し、技術者や研究者が施設横断的に協力することを目的として、加速器標的環境下における照射損傷に関する国際協力活動が2013年5月より開始された。この国際協力は、**RaDIATE**(Radiation Damage In Accelerator Target Environments) 協力[5]と呼ばれ、大強度粒子加速器の標的や窓材料の照射損傷の研究を推進するため、フェルミ国立加速器研究所、英国科学技術施設会議とオックスフォード大学、ブルックヘブン国立研究所、パシフィックノースウェスト国立研究所、オークリッジ国立研究所、ミシガン州立大学、欧州核破砕中性子源有限責任

公社(ESS-ERIC)、ロスアラモス国立研究所、アルゴンヌ国立研究所、スペインエネルギー環境技術研究センターが参画しており、2017 年度中に J-PARC(高エネルギー加速器機構(KEK)、日本原子力研究開発機構(JAEA))及び欧州原子核研究機構(CERN)がこの国際協力で正式に加わる予定である。

本国際協力では、大強度粒子加速器標的施設における照射損傷に対する材料応答性の研究協力を実施する。また、協力機関は、照射損傷メカニズムや、将来の高出力加速器標的施設に対して、興味ある材料に対する熱的、機械的特性に関してより良い理解を発展させるように本活動の中で相互の興味を理解し、本協力研究の中で、(1)様々な材料、(2)それらの特性および、(3)典型的な照射環境、を可能な範囲で協力する。また、その対象範囲には制限は設けないとしている。

### (1) 様々な材料

多結晶の微細粒のグラファイト、商業的に利用できる構造用グレードのベリリウム、タングステンと高密度のタングステン合金、炭素-炭素複合材料、チタン合金、オーステナイトステンレス鋼、タンタル、アルミニウム合金、ニッケル基超合金、フェライト-マルテンサイト鋼、他のターゲット、ビーム窓やコレクターの候補材

### (2) それらの特性

熱拡散(熱容量、伝導)、引張特性(降伏強度、最大引張強度、弾性率、延性)、破壊靱性、疲労/クリープ疲労、熱膨張、寸法安定性(スワリング、ボイド成長)と照射クリープ、その場及び照射後の焼鈍特性、一般的な腐食特性(質量損失)、微細組織発達

### (3) 典型的な照射環境

粒子のエネルギー(1 MeV~400 GeV)、照射温度(100~2000°C)、雰囲気(不活性ガス、真空、低湿度空気、水)、はじき出し損傷(0.1 DPA 以上)

この国際協力で得られたデータや知見は次のような施設に有効的に活用するものとしている。

1. ニュートリノスーパービーム (例えば、長いベースラインを持つニュートリノの施設、J-PARC のニュートリノ実験施設(Figure 3 参照)、及び、ビーム窓材などで活用されている Ti 合金の照射損傷による強度増加と延性低下の例を Figure 4 に示す)
2. パルス高出力陽子ビーム源 (米国フェルミ研究所の PIP-2)の実験施設
3. ニュートリノファクトリのための国際設計研究
4. ミュオンコライダーの設計研究 (米国フェルミ研究所を中心とした設計研究)
5. ISIS パルス中性子源の重要な将来のアップグレード(英国ラザフォード研究所)
6. 希な同位体のビームのための施設 (The Facility for Rare Isotope Beams(FRIB)、米国ミシガン州立大学)
7. 核破砕中性子源(SNS)の第一ターゲットステーション (米国オークリッジ国立研究所)

8. SNS の第二ターゲットステーション (米国オークリッジ国立研究所)
9. 欧州核破砕中性子源のターゲットステーション
10. LANSCE 同位体製造施設 (米国ロスアラモス国立研究所)
11. Lujan 中性子散乱施設 (米国ロスアラモス国立研究所)
12. 国際核融合材料照射施設(IFMIF)

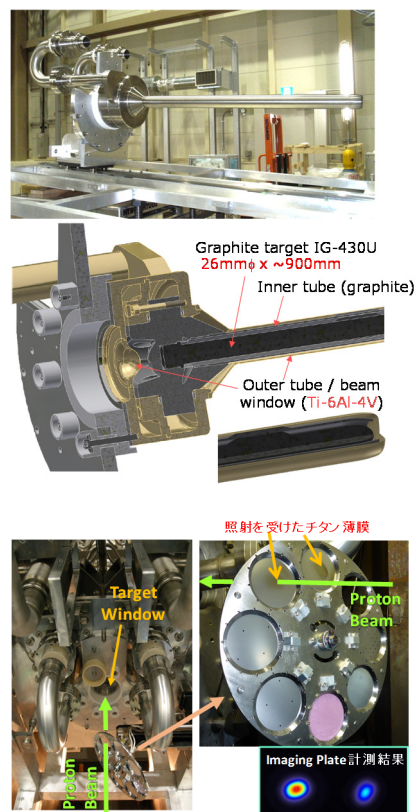


Figure 3: Graphite target and the outer tube and the beam window (upper images). OTR(Optical Transition Radiation) beam monitor (Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al alloy foil) (lower images) [6,7].

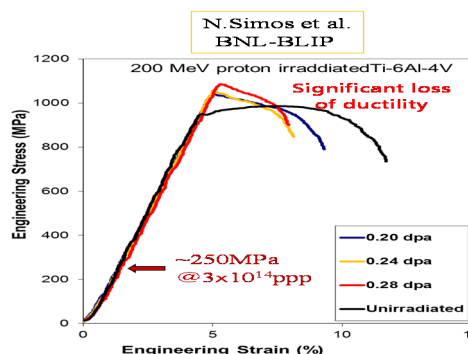


Figure 4: Tensile tests of Ti-6Al-4V alloy irradiated by 200 MeV proton [4].



13. 中間電圧の電子顕微鏡(IVEM)のタンデム施設(米国アルゴンヌ国立研究所)
14. 極端な物質のビームライン(XMAT) (extreme materials beamline for the Advanced Photon Source Upgrade)に関する米国の計画
15. CERNの大型ハドロンコライダー(LHC)
16. CERNの陽子サイクロトロンと超陽子サイクロトロンコンプレックスと関連した固定標的プログラム
17. 将来の円形コライダー(FCC)研究(CERNの計画)
18. J-PARCの物質・生命科学実験施設(MLF)
19. J-PARCのハドロン実験施設(HEF)
20. J-PARCの核変換実験施設(TEF)の設計研究

### 3 最近のRaDIATE国際協力の状況

本国際協力の運営会議は年に1回開催され、技術検討会は約1カ月ごとにビデオ会議で開催されている。2016年9月に第3回会合が米国のパシフィックノースウ

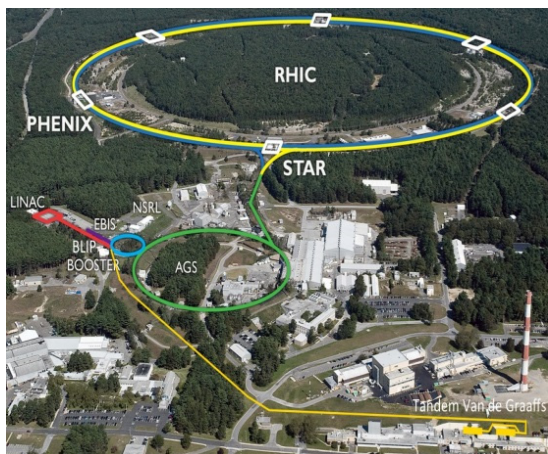


Figure 5: Brookhaven Linac Isotope Producer (BLIP) in Brookhaven national laboratory (BNL).



Figure 6: Status for assembling of capsules in Brookhaven national laboratory (Feb. 2017).

エスト国立研究所(PNNL)で開催された。主に、本国際協力の中で様々な施設におけるターゲット材やビーム窓材などの照射損傷の評価を行うため、Figure 5 に示すようにブルックヘブン国立研究所のリニアック同位体施設(BLIP)にて、約 180 MeV の陽子ビームの照射試験とその後の照射後試験の詳細を定める議論が行われた。この照射試験には、各機関の加速器の窓材や標的材料である各種材料(ベリリウム、グラファイト、Si や SiC をコートしたグラファイト、Al 合金、Ti 合金、Mo 合金や Ir 及びグラファイト)を6キャプセルの中に装荷して2017年中に約数週間の照射を計画し、各種準備を密接に協力して進めることとした。BLIP 照射は主に医療用アイソトープ製造に使用されている施設であるが、効率よい施設の使い方として、アイソトープ製造に影響を及ぼさない範囲で加速器標的材料の照射体積を考慮して、アイソトープ製造と材料の照射損傷の実験を同時に行うこととしている。

Figure 6 は、ブルックヘブン国立研究所にて BLIP 用の試験片の準備とキャプセルの装荷前の立会い等をしている様子を示す。対象試験片には引張試験片、曲げ疲労試験片、TEM(透過型電子顕微鏡)試験片、SEM(走査型電子顕微鏡)試験片、光学観察用試験片などがある。強度試験片は基本的に通常サイズのものよりも小さいサイズの試験片を用い、限られたスペースに様々な試験片をセットして、多くのデータを取得できるようにしている。

J-PARC のニュートリノ施設で使われたビーム窓材の照射による材料のマイクロ組織変化や機械的特性の照射後試験について、パシフィックノースウエスト国立研究所(PNNL)で行っており、最新式の日本電子製 TEM によってビームモニター材(Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al alloy foil)に形成された照射欠陥を解析している様子を Figure 7 に示す。これまでにあまり良く知られていない本合金組成の Ti 系合金の照射損傷機構の解明に取り組んでいる。この詳細な解析結果は、2017年11月に青森市で開催される第18回国際核融合炉材料国際会議(ICFRM-18)等で石田らによって報告される。

### 4 第4回RaDIATE協力会合

第4回 RaDIATE 協力の会合は、各国の大型加速器タ標的施設を有する機関の専門家らが数多く集まり、2017年9月20日から22日まで茨城県東海村の東海駅前東海村産業・情報プラザ(アイヴィル)で開催される。主なアジェンダ(予定)は以下の通りである[8]。

現在、米国 BNL の BLIP 施設を利用した共同の加速器標的材料の照射試験を行ったところであり、その輸送や照射後試験などの協力が適切に進められるようにいろいろな議論が行われる予定である。さらに、次期照射計画やそれ以外の施設での照射実験を含めた研究協力などについての、発展的な将来計画について、様々な議論が行われる予定である。

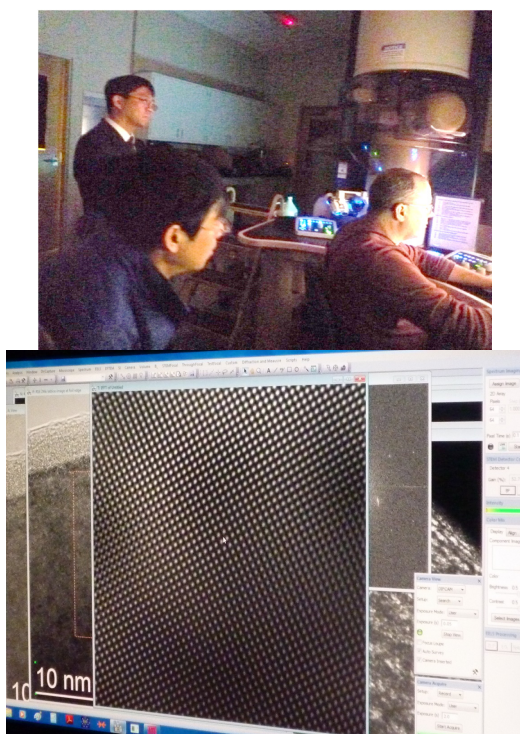


Figure 7: TEM analysis of OTR Ti alloy foil operated at 200 kV and the images of high resolution atomic arrangement image of this foil (RIM region) on Feb. 2017.

#### 9月20日午後のアジェンダ

1. J-PARC などの施設見学会など。

#### 9月21日のアジェンダ(セッション)

1. Welcome Address for RaDIATE session
2. Neutron Facilities and HPT Radiation Damage Studies
3. Nuclear and Rare Process Physics Facilities and HPT Radiation Damage Studies
4. HEP Facilities and HPT Radiation Damage Studies
5. PIE testing and techniques
6. Monte Carlo Codes for Radiation Damage Estimation
7. NBI Workshop Wrap-Up

#### 9月22日のアジェンダ(セッション)

1. Novel Materials for Targetry Application
2. Low Energy Ion Beam Facilities and PIE Activities in Japan
3. BLIP Irradiation Experiment Status and Plans
4. HiRadMat Thermal Shock Experiment Plans
5. RaDIATE Session Summary

なお、今回の会合は、NBI2017 (10<sup>th</sup> International Workshop on Neutrino Beams and Instrumentation) と合同で一部、開催されることになっていて、幅広く関連する研究の進展などが議論される予定であり、関係する国内外の多くの研究者らが参加され、今後のこの分野の発展の

ために有益な議論が行われることを期待されている。

## 5 2017年度 RaDIATE 協力の主な活動内容

2017年にBLIP照射したキャプセルをBNLのホットラボで開閉し、試料の仕分けを行う予定である。疲労試験片については、BNLでTi合金の疲労試験を実施できるように準備をフェルミ研と協力して進めている。黒鉛材は耐熱性能や耐熱衝撃性の観点から世界中の大強度陽子加速器で軽元素標的材料として、採用されている。しかし、高温で酸化されやすいという課題があるため、本 RaDIATE 協力体制の中において、耐酸化性能を向上させるために SiC 被覆黒鉛を標的候補材料として実証試験を進めている。SiC 被覆黒鉛が良好な耐酸化性能を有していることが分かった。また、SiC 被覆黒鉛の耐照射性能を調べるため、Figure 8 に示すような BLIP 照射用試験片を製作し、照射を完了させ、現在、他の試料も含めて、その PIE 試験の準備を PNNL で進めている。また、SiC 被覆黒鉛材については、Cern の HiRadMat 施設で熱衝撃試験を実施できるように設計研究を行っている。既に PNNL に輸送している OTR 材については PIE 試験を行う予定である。この他に、高照射領域の損傷挙動評価や BLIP 照射材の照射相関等の評価を進めるため、国内の量子科学研究開発機構のイオン照射研究施設 TIARA (Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application) などの実験などの準備や検討などを併せて行っている。



Figure 8: A picture of a graphite filler and five specimens of SiC coated graphite, which are included in an irradiation capsule. The graphite with a diameter of 10 mm and a thickness of 0.8 mm is coated by CVD-SiC with a thickness of 0.1 mm. Several sorts of graphite are installed for comparison.

## 謝辞

本国際協力は、米国フェルミ研究所の P.G. Hurh 氏らの尽力によって加速器標的分野の今後の発展のために、材料の照射損傷の研究とその理解を推進するために、世界の大型加速器分野の主要な機関の専門家によって協力体制が構築され、連携をさらに強めるために日々、

努力が積み重ねられている、このような取り組みの国際協力を J-PARC が参画することを歓迎され、大変感謝している。また、この取り組みを推進している J-PARC の多くの方たちにも深く感謝している。

## 参考文献

- [1] L. Mansur, “Materials research and development for the spallation neutron source mercury target”, J. Nucl. Mater., 318(2003), pp. 14-25.
- [2] S.A. Maloy *et al.*, “Comparision of fission neutron and protpn/spallation neutron irradiation effects on the tensile behaviour of type 316 and 304 stainless steel”, J. Nucl. Mater., 318(2003), pp.283-291.
- [3] E. Wakai *et al.*, “Swelling behaviour of F82H steel irradiated by triple/dual ion beams”, J. Nucl. Mater., 318(2003), pp.267-273.
- [4] N. Simos *et al.*, “Irradiation damage studies of high power accelerator materials, J, Nucl. Mater., 377(2008), pp.41-51.
- [5] <http://radiate.fnal.gov/>
- [6] T. Ishida *et al.*, “Status of post irradiation examination activities and future plan at J-PARC”, 3rd RaDIATE collaboration meeting, PNNL, WA, USA, Sep. 7, 2016.
- [7] T. Ishida, “J-PARC neutrino experimental facility: Status and upgrade plan”, The 6th high power targetry workshop (HPTW 2016), Merton College, Oxford, UK, Apr. 3 (2016).
- [8] <https://www-conf.kek.jp/NBI2017>