

J-PARC における RaDIATE 国際協力

PAST ACTIVITIES AND PROSPECTS OF RaDIATE COLLABORATION AT J-PARC

牧村俊助^{#, A)}, 中平武^{A)}, 明午伸一郎^{B)}, 直江崇^{B)}, 石田卓^{A)}, 的場史朗^{A)},

佐藤洋一^{A)}, 高橋仁^{A)}, 渡邊瑛介^{A)}, 吉田誠^{A)}, 涌井隆^{B)}, 斎藤滋^{B)},

森下卓俊^{B)}, 仲野谷孝充^{B)}, 増山 康一^{B)}, and RaDIATE collaboration

Shunsuke Makimura^{#, A)}, Takeshi Nakadaira^{A)}, Shinichiro Meigo^{B)}, Takashi Naoe^{B)}, Taku Ishida^{A)}, Shiro Matoba^{A)},

Yoichi Sato^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Eisuke Watanabe^{A)}, Makoto Yoshida^{A)}, Takashi Wakui^{B)}, Shigeru Saito^{B)},

Takatoshi Morishita^{B)}, Takamitsu Nakanoya^{B)}, Koichi Masuyama^{B)}, and RaDIATE collaboration

^{A)} J-PARC center, KEK

^{B)} J-PARC center, JAEA

Abstract

In proton accelerator facilities, targets are irradiated by proton beams, and experiments in particle nuclear physics and material life science are being conducted using the secondary particles. However, irradiation damage and thermal shock in the target, beam window, and other beam-intercepting components limit the beam intensity and the operation time in future facility. Research of material resistance to irradiation damage and thermal shock is an important issue common to all advanced accelerator facilities in the world. So, the international cross-disciplinary collaboration, RaDIATE, Radiation Damage In Accelerator Target Environments, was established in Japan, the North America., and Europe. J-PARC officially participated in the project in December 2017. So far, J-PARC has conducted the research mainly under collaboration with Fermi National Accelerator Laboratory by performing high-energy proton irradiation at Brookhaven National Laboratory, Post Irradiation Examination at Pacific Northwest National Laboratory, and thermal shock experiments at CERN-HiRadMat. In this presentation, the past activities and the prospects of RaDIATE collaboration will be presented.

1. はじめに

陽子加速器では光速近くまで加速した陽子ビームの照射によって標的上で生成された中性子・ミュオン・ニュートリノ・K 中間子などの二次粒子を、検出器まで輸送して、実験に利用する。標的は多くの場合、冷媒ガスまたは水によって冷却されるため、加速器真空を隔離するビーム窓は陽子ビームが直接、透過する。標的材、ビーム窓材は陽子ビームに晒されることによって発熱するため、標的・ビーム窓は冷却される必要があり、それに加えて、陽子ビームに晒されることによって材料が原子レベルで損傷され、熱伝導率や強度が低下したり、寸法が変化したりする。また、陽子ビーム照射によってこれらの機器は放射化するため、標的・ビーム窓が故障し、交換する際には、多くの場合は遠隔操作による保守の必要がある。一方で、陽子加速器の大強度化への要請に伴い陽子ビームに直接、晒される二次粒子生成標的(以下、標的)、ビーム窓に対する要求は、ますます高度化しており、これらの機器の成立性が、ビーム強度・運転時間を律速することとなっている。

世界の先端大強度・高エネルギー加速器施設において、標的やビーム窓に用いられる材料の照射損傷や熱衝撃による影響の解明が共通課題であると認識されている。しかし、照射実験や照射後試験には膨大な予算と労力が必要であるため、国際協力体制のもとに一元的に実施することが効率的である。加速器標的環境における照射損傷の研究協力 RaDIATE (Radiation Damage In

[#] shunsuke.makimura@kek.jp

Accelerator Target Environments) [1]は、各国の機関が有する加速器施設や原子炉・核融合炉材料研究機関の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、設立された。

本報告では、茨城県東海村で運転されている大強度陽子加速器施設 Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) の二次粒子生成標的とビーム窓が直面するこれらの課題と、その課題を克服するために RaDIATE 国際協力で展開する活動に関して報告する。

2. 標的・ビーム窓材と要求される性能

標的とビーム窓では、材料に要求される性能が異なる。標的では、多くの二次粒子を生成するために、大きな核破砕が起きるような厚みを選定する。そのため、高い熱負荷、照射損傷が起きる。一方で、熱応力や熱衝撃以外の応力に関しては厳しくないことが多い。ビーム窓では、ビームラインの領域の隔離を目的としているため、隔離する雰囲気との差圧(多くの場合は 1 気圧を超える)に耐える必要がある。それと同時に、ビーム窓上でのビームロスを減らすため、窓材の密度と厚みの積をなるべく小さくする。すなわち、密度の小さな材料で、なるべく薄くする必要がある。その結果として、ビーム窓では、発熱の総量が小さく、大きな表面で冷却されるため、標的と比較すると耐熱の観点では過酷ではない。その一方で、薄い窓で差圧に耐える必要があり、密度当たりの強度である比強度の高い材料が選定される。J-PARC には、それぞれの実験施設に目的に応じた標的とビーム窓が設置

されており、それぞれの材料に対して、照射による影響を調査する必要がある。

金属材料は組成(成分比)でその種類が決まるが、材料の性能は結晶粒の大きさや形状、固溶状態や析出状態といった結晶構造や組織にも依存する。結晶構造や組織は強塑性加工や熱処理で制御できるので、材料選定の際には、組成だけでなく、どのように製造されたかにも留意する必要がある。機械特性では、理想的には降伏応力、引張応力が高く、伸びが大きな材料が望ましい。熱応力は、ヤング率、熱膨張係数、温度差に比例するため、特に標的では大きくなる傾向にある。一方で、熱応力はわずかな塑性変形に伴い緩和されるため、伸びの大きな材料を採用することが望ましい。また、材料中に発生した微小な亀裂の進展を防止するためにも、伸びは大きい方が望ましい。一方で、変形に依存しない静的な荷重に耐えるためには、降伏応力、引張応力が高い方が望ましい。よって、ビーム窓には伸びだけでなく高い降伏応力や引張応力も要求される。一般に降伏応力が高くなると伸びは小さくなる、すなわち硬化する関係にある。材料が照射されると材料中に導入された欠陥によって塑性変形が妨げられるため、通常、材料は照射に伴い硬化し、この現象を照射脆化と呼ぶ。

陽子ビームの時間構造がパルス状の場合には、ビーム照射によって瞬間的に昇温されたビーム経路の体積が、温度の低い周辺に拘束されることによって圧縮応力が発生する。標的や窓が固体である場合は、瞬間的な圧縮応力の伝搬が引張応力との交番荷重となり、材料の疲労特性を超えると破損する。産業機器での熱衝撃は、時間構造が比較的緩やかで、多くの場合、応力は表面に発生するため、マイクロ秒以下の時間幅をもつ陽子加速器における熱衝撃を加速器以外で模擬することは、困難である。先に述べたビーム照射によって発生する性能の劣化と標的材・ビーム窓材が局所的に瞬時に加熱されて発生する応力波(熱衝撃)の繰り返しとの相乗効果によって破損することが危惧されている。

3. RaDIATE 国際協力

RaDIATE 国際協力による大強度陽子ビーム照射実験が2017-2018年にBrookhaven National Laboratoryの線形加速器 RI 製造施設(Brookhaven Linear Iso-tope Producer, BLIP)において実施された。この試験では各研究機関がベリリウム・シリコン・チタン合金・TZM・イリジウム・CuCrZrなど、標的・窓・コリメータ・ビームダンプの材料を持ち込み、8週間の181 MeV・154 μ Aの陽子ビーム照射を行い、マクロからミクロスケールに渡る照射後試験を実施した。

J-PARC ニュートリノ施設では高強度の64 チタン(Ti-6Al-4V)が採用されているが、僅かなビーム照射量でも、著しく脆化してしまう事が明らかになった[2]。そのため、高密度で微細な析出相によって耐照射性能を向上させると予測されるベータチタン合金の研究を進めている[3]。J-PARC 物質生命科学実験施設の黒鉛製ミュオン標的では、陽子照射によって生成されたトリチウムがビームライン真空中に放出され、保守を複雑化している。また、運転時に、予期せぬ大気導入が発生すると高温になった黒鉛が急激に酸化し、トリチウムが放出される可能性が

ある。そのため、耐酸化性能およびトリチウム放出を抑制する目的で炭化ケイ素被覆を施した黒鉛に関する研究を進めている。

パルス状の陽子ビームでは、先述のように熱衝撃が発生する。CERNのHiRadMat施設(High Radiation to Materials)は、Super Proton Synchrotron (SPS)加速器からの440 GeV大強度・強収束陽子ビームパルスを材料や加速器機器に直射して世界最大強度の熱衝撃による影響の解明を目指す施設である。BLIPではビーム照射量は得られるが、直流ビームのため熱衝撃は模擬できない。HiRadMatで熱衝撃は模擬できるが、多くの照射量は得られない。このため、BLIPで陽子ビームを照射した材料を、米国の原子力研究機関Pacific Northwest National Laboratory(PNNL)の遠隔操作室(hot cell)において照射容器に組み込んでCERNに輸送、HiRadMatでビーム熱衝撃試験を実施した。HiRadMatで照射を受けた試験片はふたたびPNNLに返送され、照射損傷により硬化・脆化した材料の、熱衝撃への応答の評価を実施している。その他、炭化ケイ素複合材料などの次世代標的候補材の照射試験も進められた[4]。

照射が機械特性に与える影響は、理想的にはダンベル形状試験片の引張試験で破壊強度などを測定し、確認する。しかし陽子ビームの照射面積は小さく、引張試験片を使い多くの条件を網羅的に調査することは難しい。そのため、陽子ビームではなく、数MeVのイオンビーム照射によって、温度と原子の弾き出し損傷量を制御した下で照射効果を評価している。イオンビーム照射では、照射損傷を与える領域が1~数 μ mの深さに集中するため、半日程度で大強度陽子ビーム照射の数分分に相当する照射損傷を与えられる上、試料が放射化しないという利点がある。このような微小材料の解析では、微小押し込み試験機(ナノインデンタ)による照射領域の硬さ変化、照射領域を集束イオンビームで加工した試料の透過型電子顕微鏡による観察、マイクロメートルサイズの試料の機械特性測定で、照射損傷の傾向を網羅的に評価する。照射効果は、材料特性を劣化させるだけでなく、条件によっては照射前よりも良好な特性へ改善[5]する場合もあり、奥の深い、興味深い研究が展開されている。

その他、関連する研究として高エネルギー陽子による弾き出し断面積測定を国内外の研究機関で展開しており、世界から注目されている[6]。

4. RaDIATE 国際協力の将来展望

J-PARCは2017年12月にRaDIATE国際協力に参画し、日米協力事業や各自の研究費などで上記の活動を展開してきた。2022年12月には、それまでの活動に関して内部レビュー委員会を開催し、評価を受けた。その結果、活動の意義が理解され、今後は、よりJ-PARC-wideな活動として組織的に活動を進めることとなった。

4半期に一度のJ-PARC RaDIATEメンバーによる定例会合、J-PARC全体向けの1年に一度の会合、RaDIATE collaboration meetingへの報告内容の調整、関連する覚書締結への支援、照射研究に対する費用の支援、J-PARC陽子照射施設(旧ADS)への要望の作成を進めている。

謝辞

本研究は日米科学技術協力事業(高エネルギー物理学分野)の助成を受けています。

参考文献

- [1] RaDIATE collaboration website,
<https://radiate.fnal.gov/>
- [2] T. Ishida *et al.*, “Tensile behavior of dual-phase titanium alloys under high-intensity proton beam exposure: Radiation-induced omega phase transformation in Ti-6Al-4V”, *Journal of Nuclear Materials* 541 (2020) 152413.
doi:10.1016/j.jnucmat.2020.152413
- [3] T. Ishida *et al.*, “Study of the radiation damage effect on Titanium metastable beta alloy by high intensity proton beam”, *Nuclear Materials and Energy*, 15 (2018) 169-174.
doi:10.1016/j.nme.2018.04.006
- [4] J. Maestre *et al.*, “High intensity proton beam impact at 440 GeV/c on Mo and Cu coated CfC/graphite and SiC/SiC absorbers for beam intercepting devices”, *JINST* 17 (2022) P01019.
doi:10.1088/1748-0221/17/01/P01019
- [5] E. Wakai *et al.*, “Effects of Helium Production and Heat Treatment on Neutron Irradiation Hardening of F82H Steels Irradiated with Neutrons”, *J. Nucl. Mater.* (2006), 356, 95.
doi:10.2320/matertrans.46.481
- [6] H. Matsuda *et al.*, “Measurement of displacement cross-sections of copper and iron for proton with kinetic energies in the range 0.4 – 3 GeV”, *J. Nucl. Sci. and Technol.* 57 (2020) 1141-1151.
doi:10.1080/00223131.2020.1771453