

# J-PARCにおけるRaDIATE国際協力



## J-PARC, KEK & JAEA:

(KEK) S Makimura, T Nakadaira, T Ishida, S Matoba, Y Sato, H Takahashi, E Watanabe, M Yoshida,

(JAEA) S Meigo, T Naoe, K Masuyama, T Morishita, T Nakanoya, S Saito, T Wakui, and J-PARC RaDIATE members

Tokyo University: S Kano

## National Institutes for Quantum Science and Technology:

H Matsuda

## Fermi National Accelerator Laboratory:

S, K. Ammigan, F. Pellemoine, K. Yonehara

## Pacific Northwest National Laboratory:

D.J. Senior, A.M. Casella, A Roy, D. J. Edwards

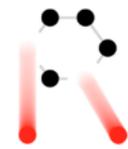
## Brookhaven National Laboratory: M. Palmer, D Kim

RaDIATE collaboration meeting @  
Brookhaven national laboratory, 26-30 June 2023

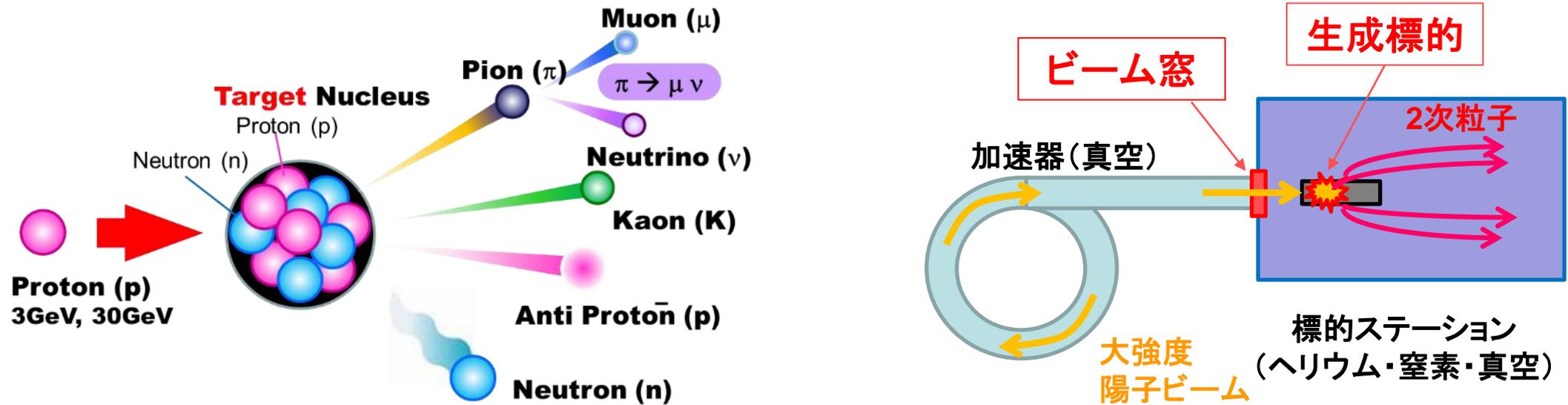
2023年8月31日@加速器学会2023

R a D I A T E C o l l a b o r a t i o n

R a d i a t i o n D a m a g e I n A c c e l e r a t o r T a r g e t E n v i r o n m e n t s



# 陽子加速器における標的とビーム窓



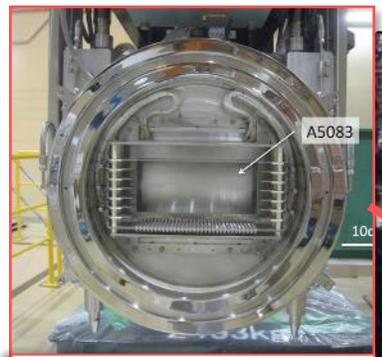
- 標的：高い熱負荷・照射損傷
- ビーム窓：高い耐圧、低密度（高い比強度）

- 二次粒子生成標的、雰囲気を隔離するビーム窓の成立性がビーム強度・運転時間を律速する。
  - 標的材・窓材の耐照射損傷性能 & パルスビームによる耐熱衝撃性能

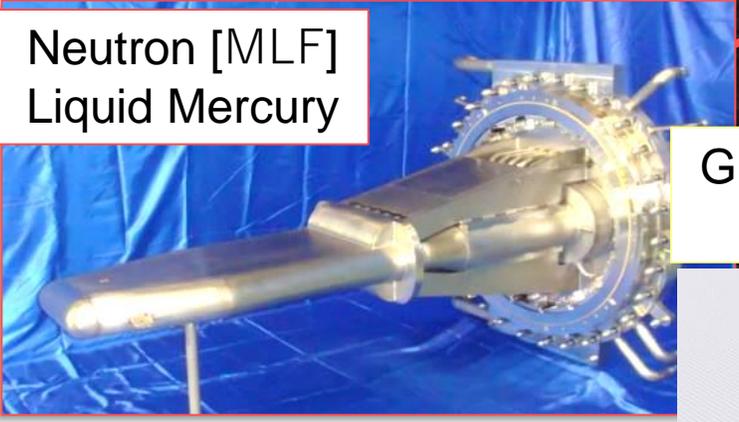
# J-PARC施設の生成標的とビーム窓



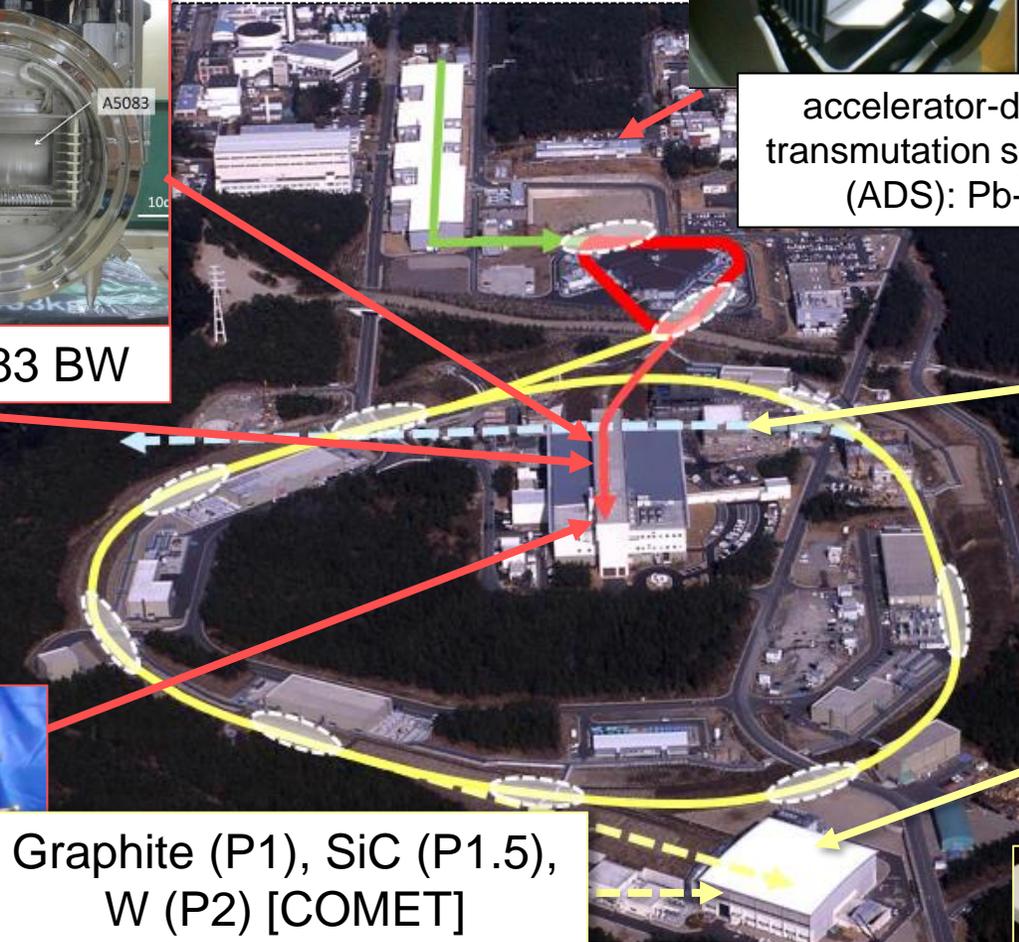
Muon [MLF-MUSE]  
Rotating Graphite



Al A5083 BW



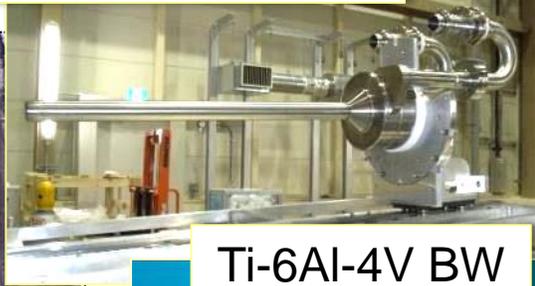
Neutron [MLF]  
Liquid Mercury



Graphite (P1), SiC (P1.5),  
W (P2) [COMET]



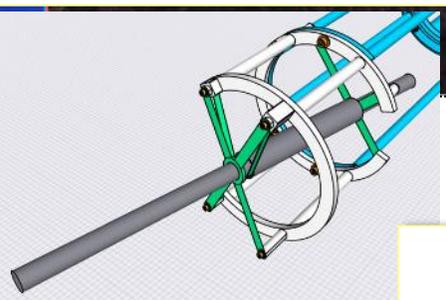
Neutrino [ $\nu$ ]  
He-cooled graphite



Ti-6Al-4V BW

accelerator-driven  
transmutation systems  
(ADS): Pb-Bi

Hadron [HEF]  
Water cooled gold/ high-Z  
rotating target



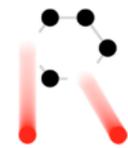
3D-printed Ti-6Al-4V BW



Beryllium BW



# 金属材料



## 金属材料の性質の決定

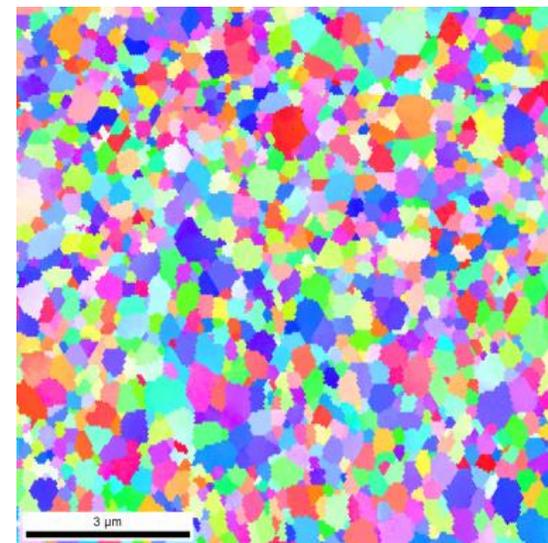
- ① 組成(成分比)
- ② 結晶構造(相)
- ③ 組織(単結晶と多結晶)

- 結晶粒と粒界
- 固溶
- 析出

相図に従って、完全に混ざり合う(固溶)か析出するかが決まる

## 強塑性加工と熱処理で組織制御できる

H. Kurishita et al., Mater. Trans. 54(2013)456



五十嵐廉: マテリア, 10(2001)390

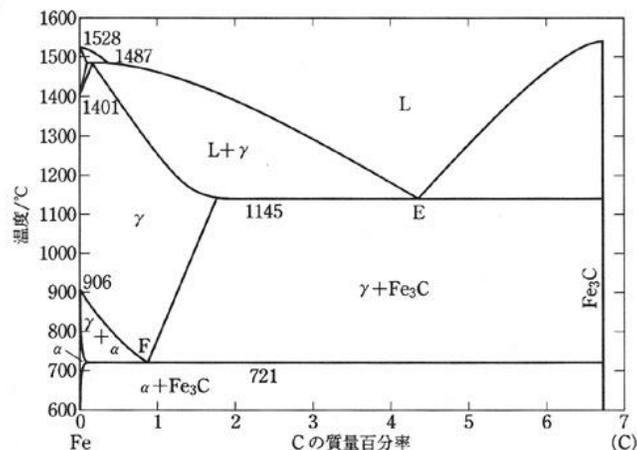
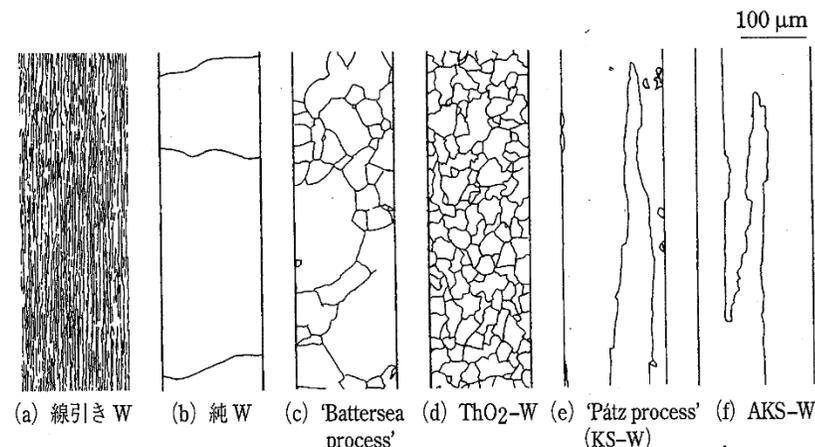
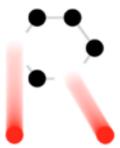


図 7-11 鉄-炭素系の融点図



(a) 線引き W (b) 純 W (c) 'Battersea process' (d) ThO<sub>2</sub>-W (e) 'Pätz process' (KS-W) (f) AKS-W



# 照射効果

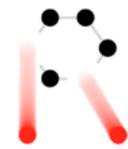
- ① 弾き出しによる照射損傷
- ② 核変換・核破砕元素による影響  
(特に高エネルギーでは水素、ヘリウム)

機械特性・熱特性の劣化、寸法変化、Etc...

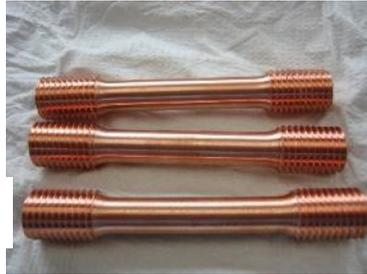
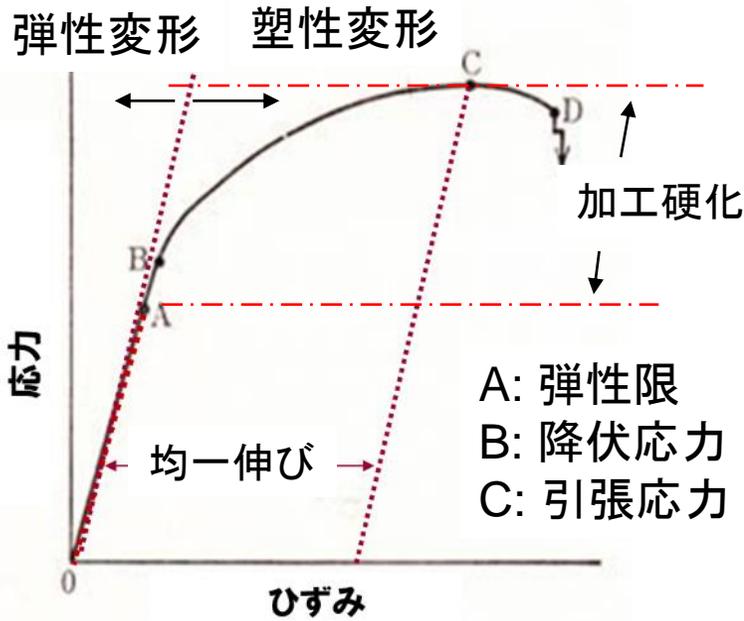
## 耐照射性能の高い材料

- 弾き出された原子や空孔の逃げ場(シンクサイト)が多い

- 金属結晶の微細粒化
- 高密度分散粒子・微細析出相の導入

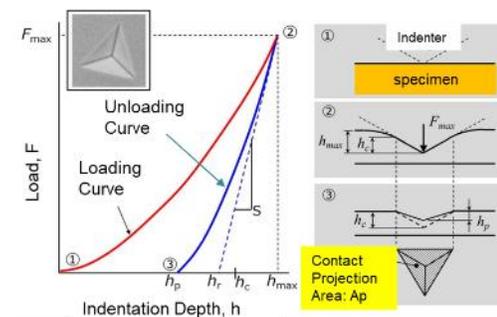
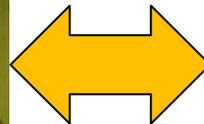


# 機械特性と照射硬化



- 理想的な材料:  
高い降伏応力・引張応力・伸び
- 照射硬化: 降伏応力が上昇。伸びを失う。
- 降伏応力は硬さに比例。硬さの上昇で照射脆化を検証可能。

- ホントは、引張試験を行いたい
- 小さな試料では硬さで代用



引張試験  
降伏応力、引張応力、伸びを計測可能

硬さ試験(ナノインデーター・マイクロビッカース)  
降伏応力の劣化から照射損傷の傾向を計測可能

# RaDIATE国際協力による陽子照射研究

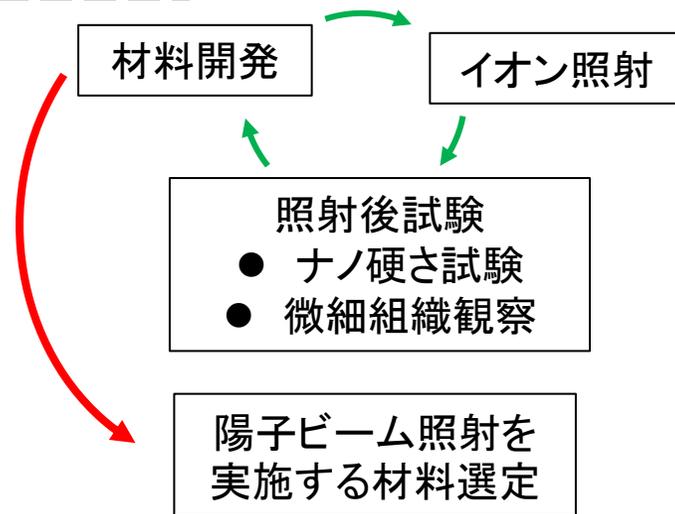


東大HIT照射施設におけるイオン照射試験

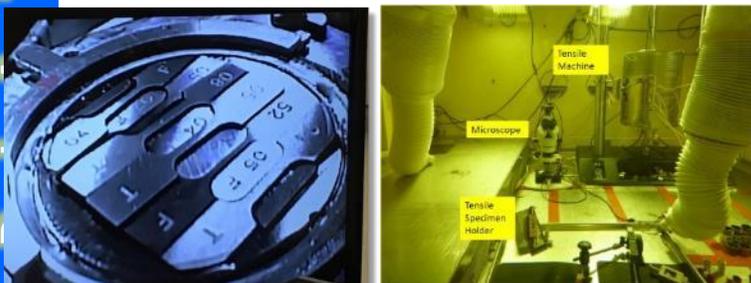
- スクリーニングテスト
- 放射化無し、高照射速度、数μmの局所損傷
- ナノ硬さ試験、微細組織観察

- RaDIATE: Radiation Damage In Accelerator Target Environments
- 日米(加)欧の加速器施設・原子力核融合研究13 (+ 6) 機関で締結
- 加速器施設・照射後試験施設を相互に利用・活用

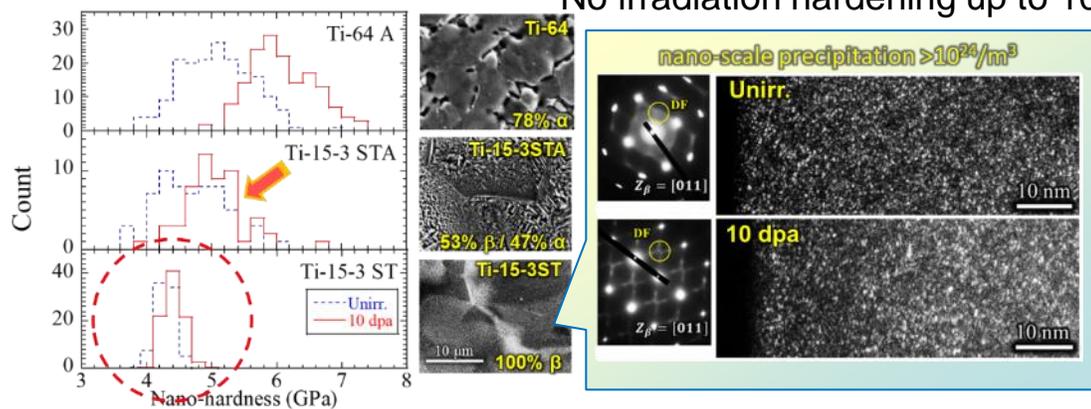
## ■ 陽子照射研究は手間とお金がかかる



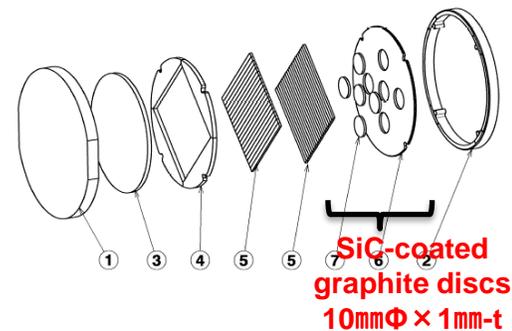
# これまでの活動のハイライト①



No irradiation hardening up to 10 dpa



- 高エネルギー陽子照射で現在のTi-6Al-4Vの劣化を発見
- イオン照射によってTi-15-3の高い耐照射性能を確認
- ビーム窓試作機を製造

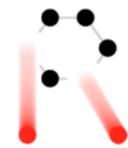


昇温脱離試験

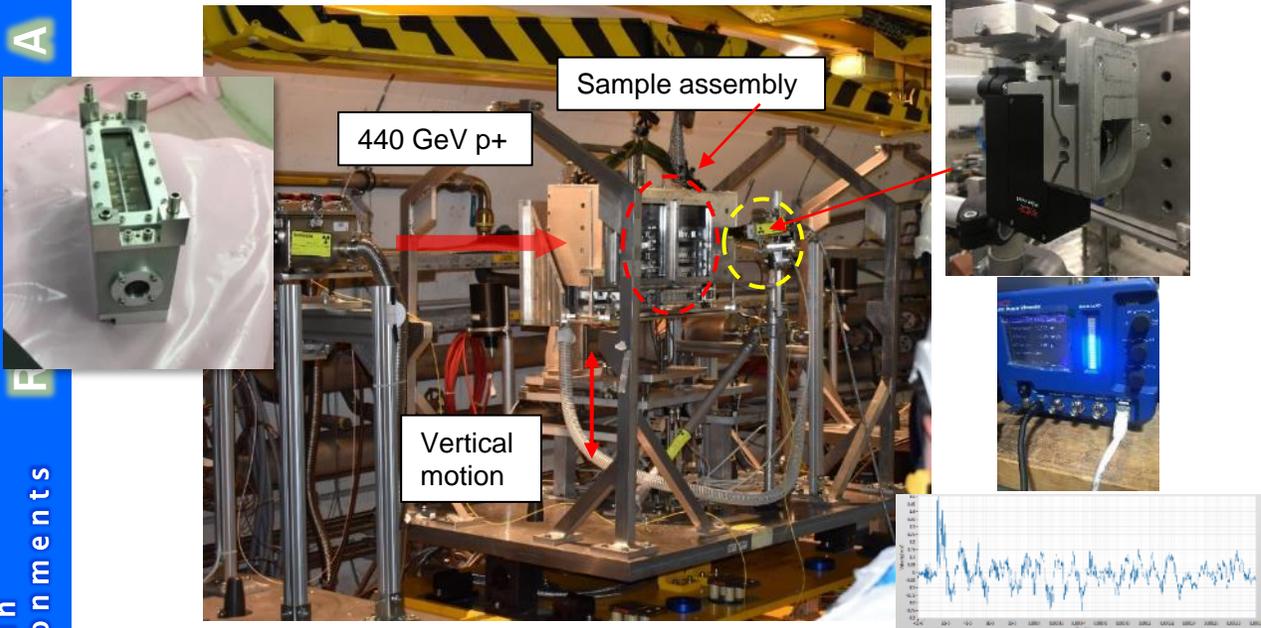
- 高エネルギー陽子照射
- SiC被覆はトリチウム封じ込めバリアとして働く
- 封じ込めのため黒鉛が大きく膨張する

SiC被覆黒鉛からのトリチウム放出研究

ニュートリノ用タン合金製ビーム窓研究



# これまでの活動のハイライト②

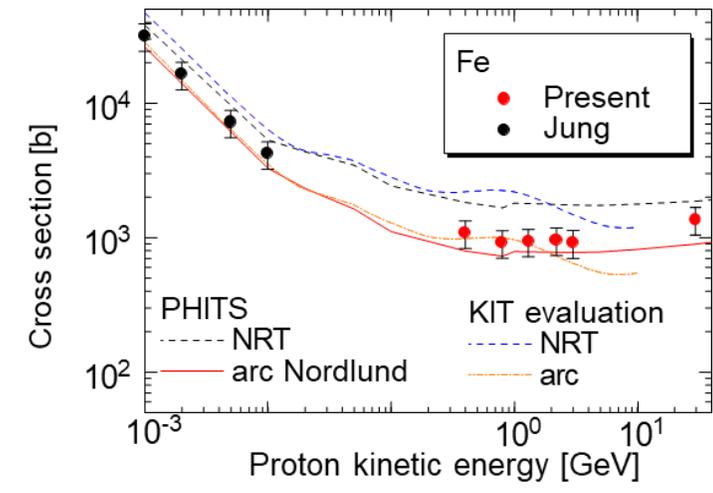


- SiC複合材料、タングステン合金に照射
- 高靱性タングステンには破損しなかった
- 陽子照射試料に対して熱衝撃試験を実施

照射時の振動測定

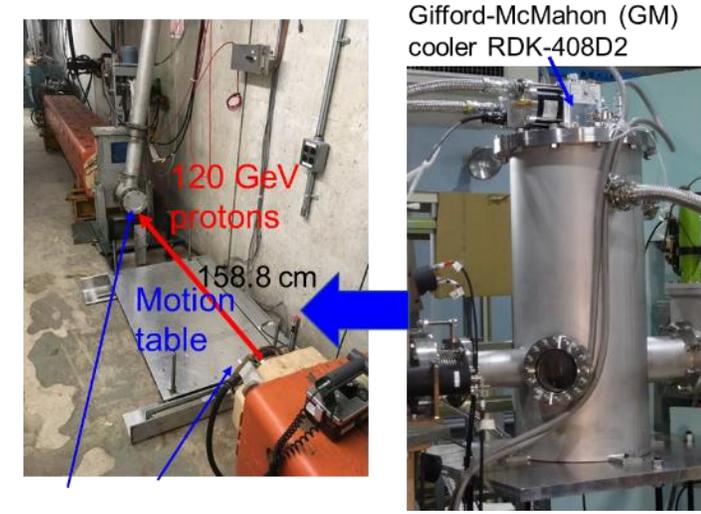


## CERN HiRadMatによる熱衝撃試験



J-PARCで測定した弾き出し断面積(鉄)

Matsuda et al.



フェルミラボにおける照射実験を完了

- 極低温の試料に陽子を照射し電気抵抗の変化により弾き出しによる欠陥数を測定

## 弾き出し断面積測定



# J-PARCにおけるRaDIATE活動の変遷

J-PARCはRaDIATE国際協力に2017年12月に参加

- ニュートリノ用ビーム窓
- パイオン、ミュオン生成標的材
- 弾き出し損傷測定、、、

主に日米協力の元、実施

2022年12月のRaDIATE覚書の延長に合わせて  
J-PARC内にてレビュー委員会を実施

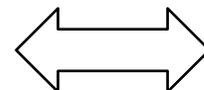
- 委員会にて活動を理解されたが、これまでは個人の研究の延長であった
  - 今後はJ-PARCセンター長の元でJ-PARC-wideな活動として進める



# 2023年4月に新たな体制で活動を開始

## ■ 活動方針

照射試験 & 照射後試験



ビームライン機器の設計へ反映

## ■ メンバー: All J-PARC

- KEK側代表: 牧村俊助(ハドロンS)、中平武(ニュートリノS)
- JAEA側代表: 明午伸一郎(核変換S)、直江崇(中性子源S)
- 各実験施設と加速器施設
- 共通技術グループ: 低温S、放射線管理S

## ■ 活動内容

- J-PARC RaDIATEメンバーによる4半期に一度の定例会合
- J-PARC全体向けの1年に一度の会合、RaDIATE collaboration meetingへの参加
- J-PARCセンター長室への報告
- 覚書等への対応
- 予算も配分。RaDIATE活動へのサポート
- J-PARC陽子照射施設(IBADS)への要望作成

第一回会合: 2023/06/07  
第二回会合: 2023年9月開催予定

# 8th High Power Targetry Workshop

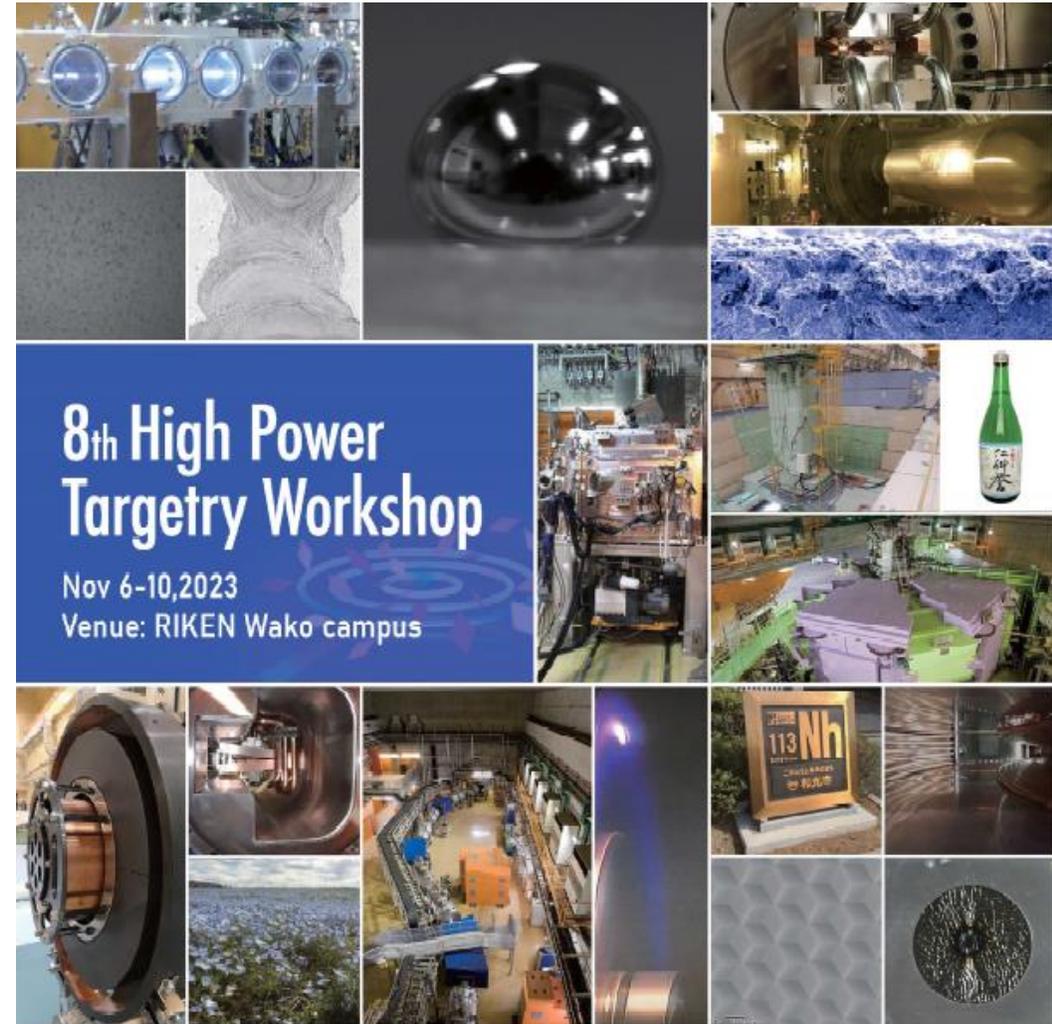


- RIKEN, Nishina Center for Accelerator-based Science, Wako, Saitama, Japan
- hosted by RIKEN and J-PARC
- Nov. 6th to Nov. 10th, 2023.
- Labo tour at RIKEN, and Excursion in Koedo
- <https://indico2.riken.jp/event/3102/>

1. R&D to support concepts
2. Radiation damage in target material and related simulations
3. Post-irradiation examination
4. Target design, analysis, and validation of concepts
5. Target facility challenges
6. Construction, fabrication, inspection, quality assurance
7. Operation of targets and beam dumps
8. Multipurpose use of targets and beam dumps

## Important dates:

2023/06/10 - 08/10 Abstract submission



We are looking forward to seeing you in Japan.

J-PARC tour is under discussion.



# Summary

- 大強度標的・窓材は、陽子照射による材料性能劣化と耐熱衝撃性能が課題
- 高エネルギー陽子照射・照射後試験には大規模施設・コスト・時間が必要
- RaDIATE国際協力で効率的に研究開発を推進
- BLIP照射施設、PNNL照射後試験、CERN-HiRadMat照射試験、東大HIT照射試験、DPA測定を進めてきた
- 今後は、J-PARC wideな活動に拡張

## コメント

- 我々がRaDIATEに参加したとき照射損傷研究の知識は皆無でした。
- KEKの素人が2016年からRaDIATE国際協力に参加し、経験を積み、国際協力体制を構築してきました。

J-PARC以外からもRaDIATEに参加を希望する方は、大歓迎です