

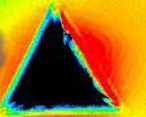
J-PARC大強度陽子加速器用 チタン合金製ビーム窓開発の経験から

石田卓¹・若井栄一^{2,3}・叶野翔^{4*}

牧村俊助¹・明午伸一郎²

江村聡⁵・土谷浩一⁵・古谷一幸⁶・長谷川明^{5**}

阿部弘亨⁴・柴山環樹⁷・クリス・デンシャム⁸



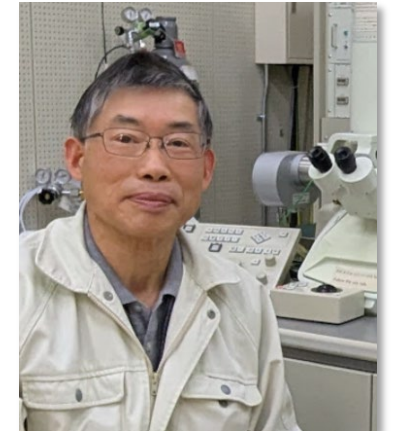
1. 高エネルギー加速器研究機構 KEK / J-PARCセンター
2. 日本原子力研究開発機構 JAEA / J-PARCセンター 3. ミシガン州立大学-FRIB
4. 東京大学大学院工学系研究科原子力専攻 5. 物質・材料研究機構 (NIMS)
6. 八戸高等専門学校 7. 北海道大学 8. STFC ラザフォード研究所
※現 量子科学技術研究開発機構 QST ホケ所フュージョンエネルギー研究所
**現 高エネルギー加速器研究機構 KEK

RaDIATE Collaboration

Radiation Damage In Accelerator Target Environments

ムーンショット目標10 奥野プロジェクトKick-Off
核融合分野に貢献する加速器の仕様と実現可能性ワークショップ
2025年4月17日 JST東京本部別館 (K's五番町) 1階ホール

ビーム窓用耐照射性チタン合金材料開発メンバー



※Association of Shape Memory Alloys [形状記憶合金協会](#)

J-PARC (KEK + JAEA) のターゲット施設関係者



- 各施設のターゲット・ビーム窓・ビームダンプといった、**ビームの直撃を受け過酷な熱負荷や熱衝撃(繰返し疲労)・照射損傷に耐えなければならない機器を開発・運用。**
- 特に、**材料の照射損傷の問題**は、加速器の大強度化に伴って近年明らかになった加速器技術と並ぶ技術的なボトルネック。
- **だが、材料について加速器業界は素人。**

J-PARC (KEK + JAEA) のターゲット施設関係者



原子力学会材料部会部会長
原子力・核融合材料開発ロードマップ策定
Journal of Nuclear Materials 編集委員
IFMIF/EVEDA液体リチウム標的の工学実証
MLF水銀標的改良・FRIB標的・ダンプ開発



RCS運転
RCS⇒MLFの輸送ラインの水冷式アルミ合金ビーム窓開発
高エネルギー陽子に対するdpa＝低エネルギー中性子
(NRTモデル)の～1/3(Athermal Recombination Correction)
を実測で証明。



- J-PARCがJAEA(原子力研究施設)との共同組織であったことが幸いし原子炉核融合用極限材料や標的の開発手法を加速器標的環境材料の開発に生かすことが可能だった。
- 施設運転開始(2009)の後。(～2016年)



Japan Proton
Accelerator
Research
Complex
大強度陽子
加速器施設

400 MeV H-
ライナック

L=330m

核変換用材料試験施設
(計画中)

円周350m

3GeV RCSブースター

2 バンチ, 25Hz,

$333\mu\text{A} \times 30\text{GeV} = 1,000\text{kW}$

ニュートリノ実験施設

295 km 神岡へ

ビームダンプ

vターゲット
ステーション

MLF物質生命研究施設

円周 1,568m

30GeV 主リングシンクロトロン (MR)

8バンチ, 1.16秒周期で早い取出し

$25\mu\text{A} \times 30\text{GeV} = 750\text{kW}$ 達成 (2009~2024)

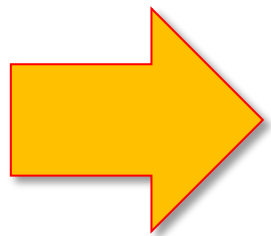
$43\mu\text{A} \times 30\text{GeV} = 1,300\text{kW}$ を2027に実装

ハドロン実験施設

<https://j-parc.jp/c/en/facilities/accelerators/index.html>

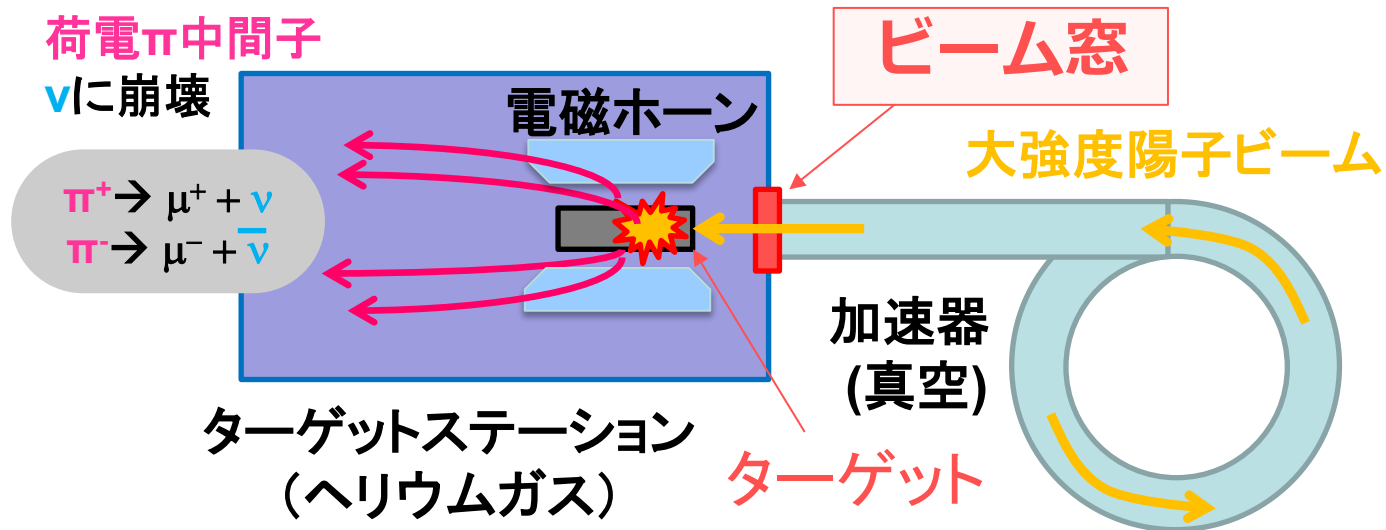
研究の概要

- 世界の大強度陽子加速器施設では、ビームが直接当たり周期的熱衝撃にさらされるターゲットやビーム窓の耐照射性能が運転強度（＝物理成果）に直結する。
- 日本が世界をリードする長基線ニュートリノ振動実験のビーム窓には2相型64チタン合金(Ti-6Al-4V)が用いられているが、照射損傷ですぐ硬化・脆化してしまう。
- ニュートリノの物質・反物質対称性破れの検証を目指し2027年に開始される、ハイパーカミオカンデ実験や米国LBNF実験のための加速器大強度化のボトルネックとなる恐れがあり、2016年頃より日米欧の国際連携RaDIATE研究協力度高エネルギー陽子ビーム照射実験と国内イオン照射実験でチタン合金の耐照射性に関する系統的な調査を進め、耐照射性チタン合金とその加工熱処理法を調査してきた。



チタン合金の α 相と β 相の低温下での照射損傷に対する振舞いには明瞭な違いがあり、これには4族遷移金属の β 相に特徴的な ω 相前駆体（＝athermal ω 相）とその照射による変容が深く関与していることが分かってきた。

J-PARCチタン合金製ビーム窓



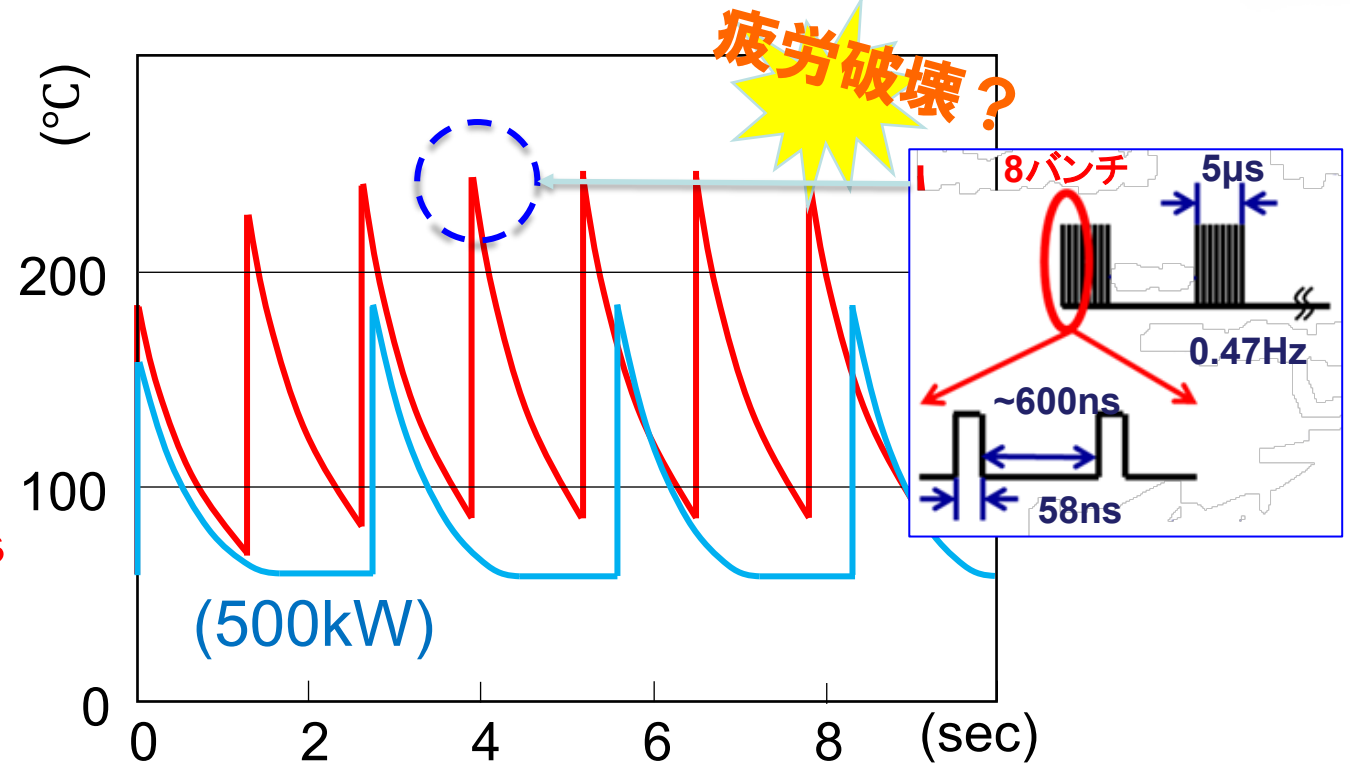
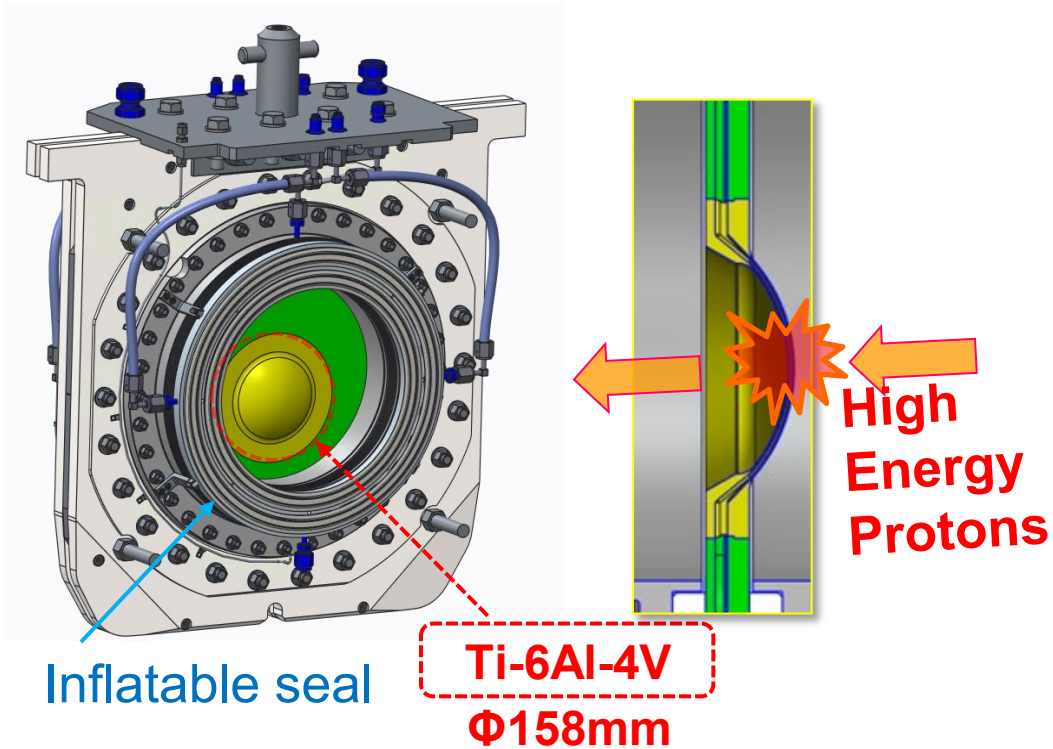
64チタン(Ti-6Al-4V)合金製ビーム窓

密度4.8、強度1GPa 高比強度で熱衝撃に大変強い。
純チタン以外、市場でストックが入手が可能な唯一
の汎用高強度なチタン合金。
加工性が悪く、バルクからの削り出し。
購入して、応力除去焼鈍後、機械加工。

ニュートリノ実験施設の詳細:

- <https://j-parc.jp/Neutrino/ja/nu-facility.html>

チタン合金製ビーム窓の過酷な運用環境



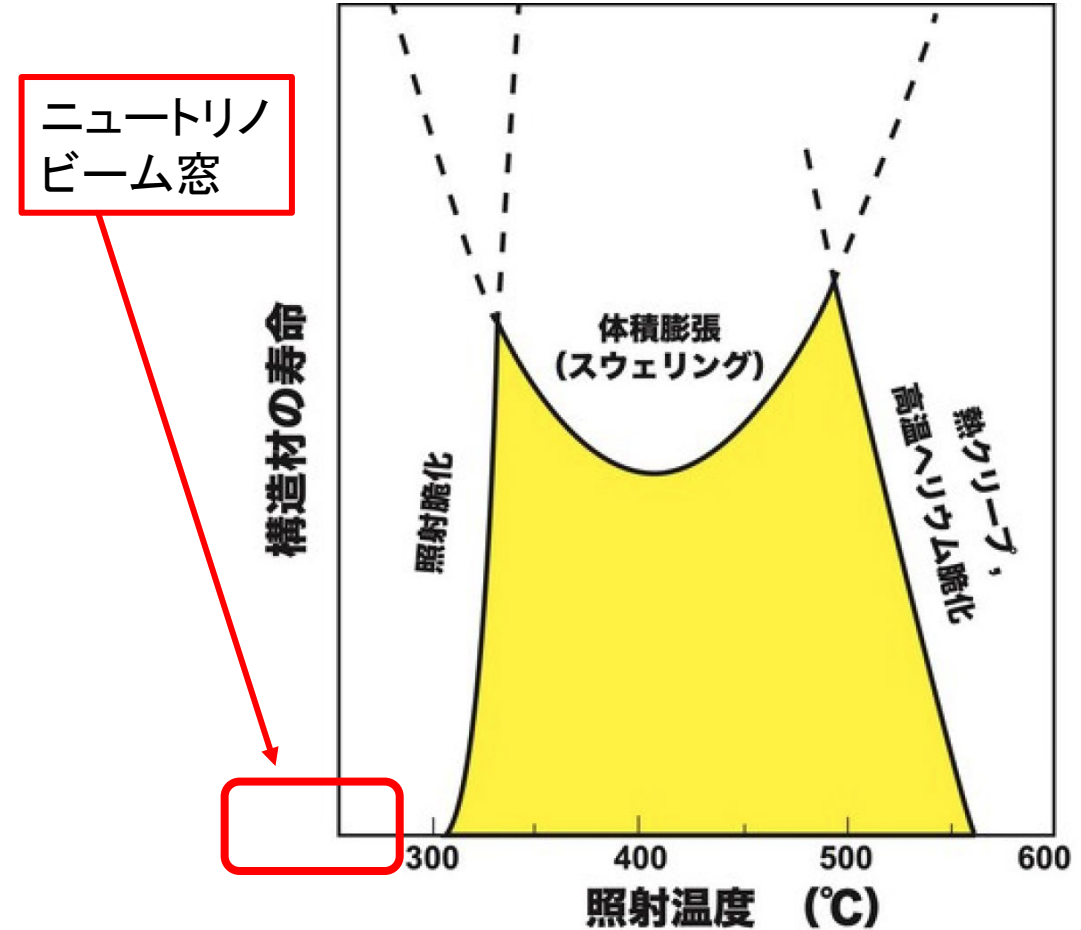
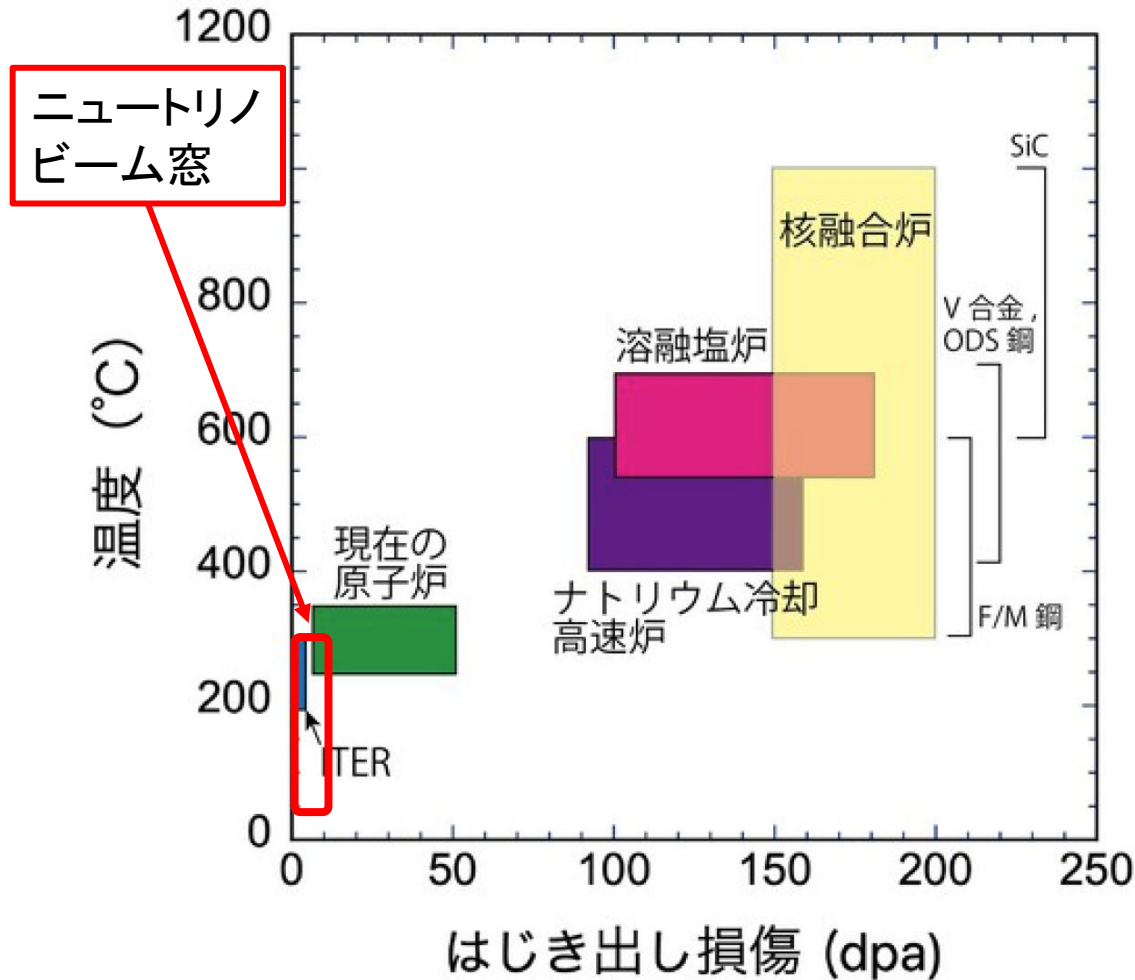
核融合炉を遥かに凌駕する
核破砕生成物と熱流束
ギガサイクル高繰返し疲労
比較的低温領域でappmよりdpaがきく。

T.Ishida et al,
JPS Conf. Proc. 28,041001(2020)

ビーム エネルギー	ビーム 強度	パルス当 り陽子数	周 期	年間パルス数 (100日)	年間 積分陽子数
30GeV	1.3 MW	3.2×10^{14}	1.16 s	7.4×10^6	2.4×10^{21}
核破砕生成物 294・179 H・He appm/dpa	熱流束 20 GW/m ² ($\sigma=0.43\text{cm}$)	熱衝撃 100~250 MPa		パルス内共振 $\times 10 \sim 100$ $10^8 \sim 9$ サイクル	照射損傷 5 dpa (ARC補正 2 dpa)

核融合発電 ここがキモ (2) : 核融合炉の過酷な環境に耐えられる究極の材料とは？

<https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2503/12/news021.html>



RaDIATE Collaboration Radiation Damage In Accelerator Target Environments

加速器標的環境における照射損傷研究の国際協力

- 本RaDIATE協力は、大強度粒子加速器施設共通の課題である標的やビーム窓材料への粒子ビームによる照射損傷や熱衝撃の影響に関する研究を推進するため、各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、技術者と研究者が施設横断的に協力することを目的とする国際協力体制である。

2013年7月に本協力を締結した機関(5機関):

1. Fermi National Laboratory, 2. Science and Technology Facilities Council, 3. the Chancellor Masters and Scholars of Oxford University, 4. Brookhaven National Laboratory, 5. Pacific Northwest National Laboratory

改定1回目(2015年5月)に本協力に参画した機関(6機関):

6. Oak Ridge National Laboratory, 7. Michigan State University, 8. European Spallation Source, 9. Los Alamos National Laboratory, 10. Argonne National Laboratory, 11. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Center of Energy, Environmental and Technological Research)

改定2回目(2017年12月)に本協力に参画した機関(2機関):

12. European Organization for Nuclear Research (CERN), 13. Japan Proton Accelerator Research Complex (KEK and JAEA)

改定3回目(2022年12月(予定))に本協力に新たに参画する機関(6機関):

14. TRIUMF, 15. UK Atomic Energy Authority (UKAEA), 16. University of Bristol, 17. University of Birmingham, 18. University of Wisconsin-Madison, 19. Centre de recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique (CIMAP)



※J-PARCは
2017より参加

2022年12月より参加の機関

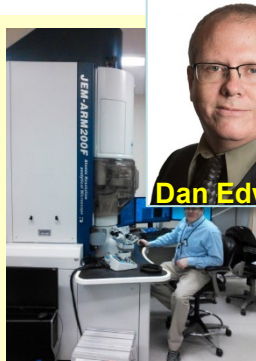
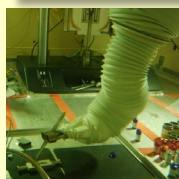
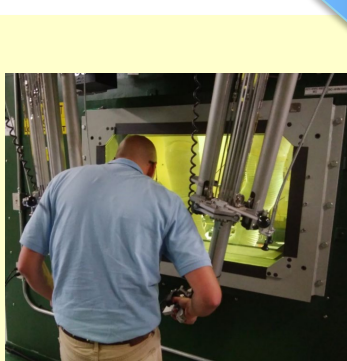
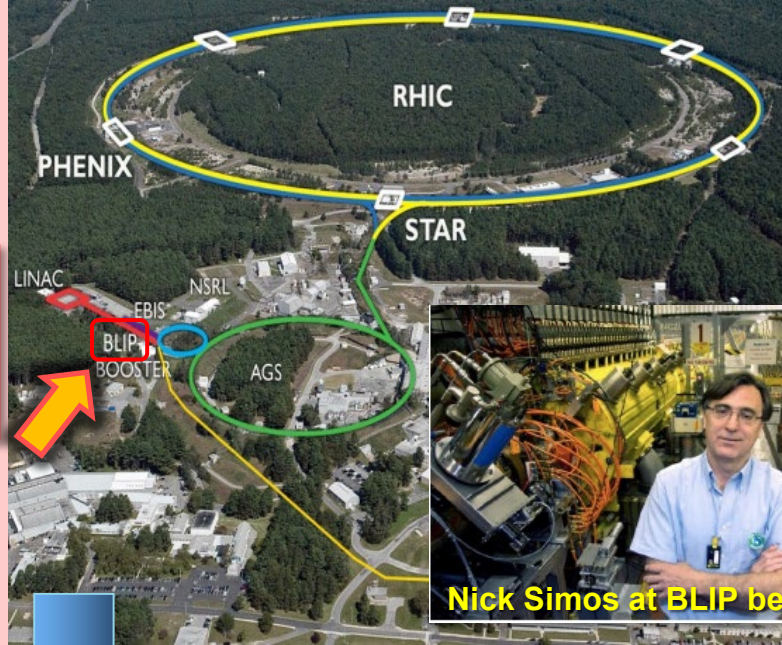
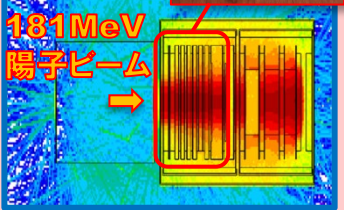


RaDIATE 国際協力による照射実験とPIE(概要)

6機関200以上の試験片に大強度陽子ビームを照射 (2017・2018)

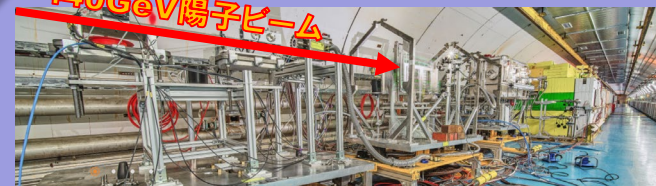
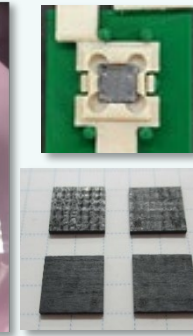
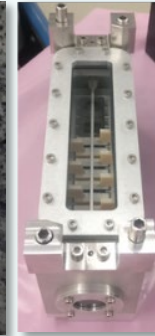


Brookhaven Linac Isotope Producer



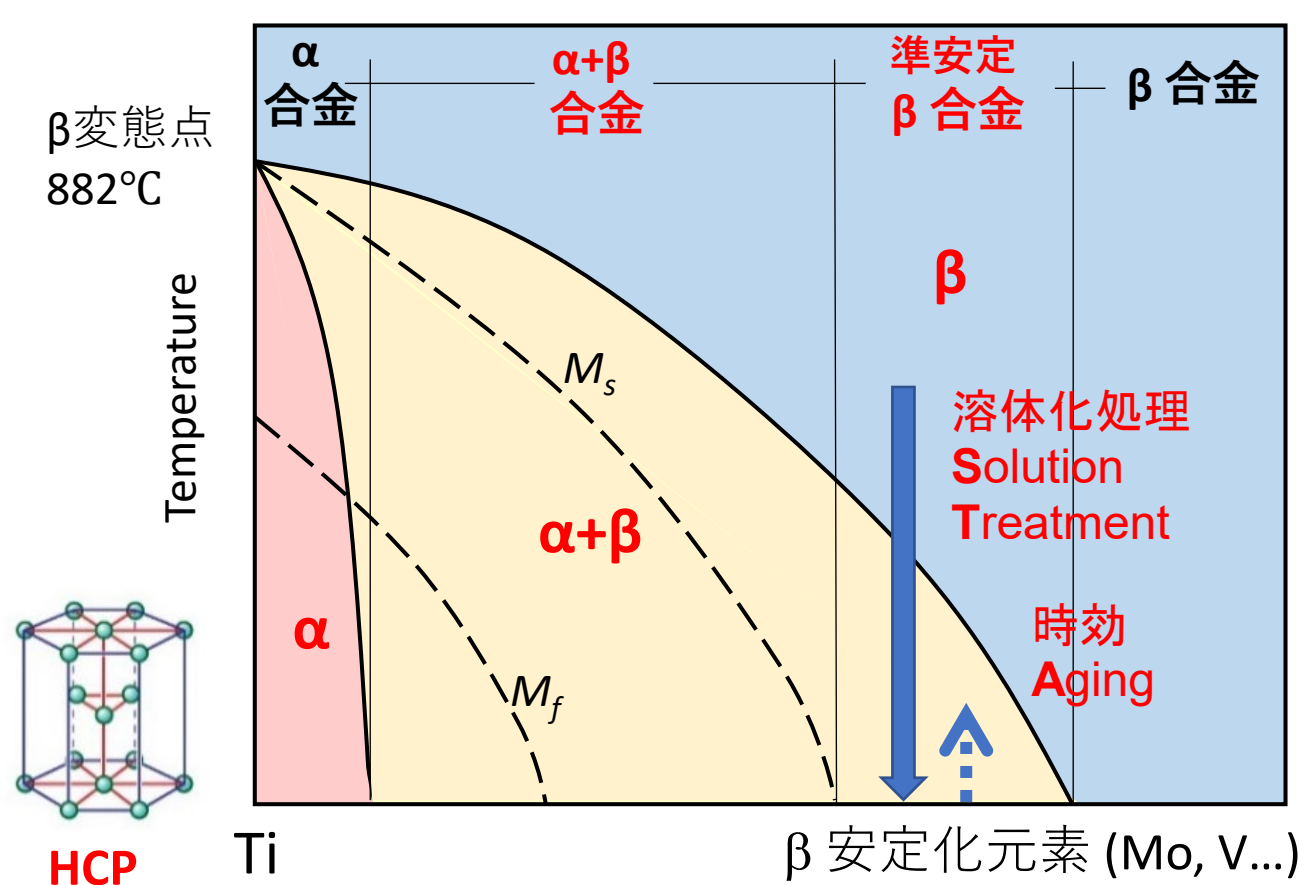
ホットセル内での機械特性試験
最先端電子顕微鏡による照射損傷組織観察

標的・ビーム窓材料試験片を加速器機関が製造・組立

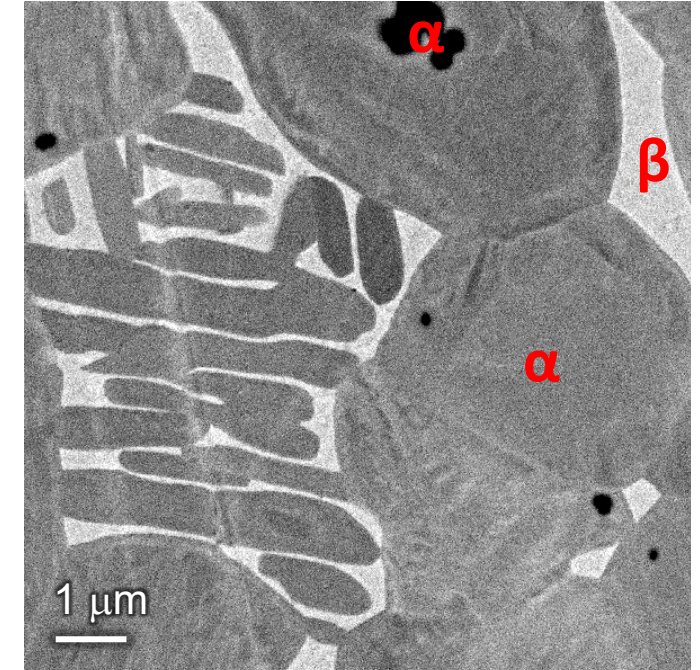


世界最大強度のビーム熱衝撃による材料破壊試験を実施
(第1回目: 2015, 第2回目: 2018, 第3回目2022)

チタン合金の分類

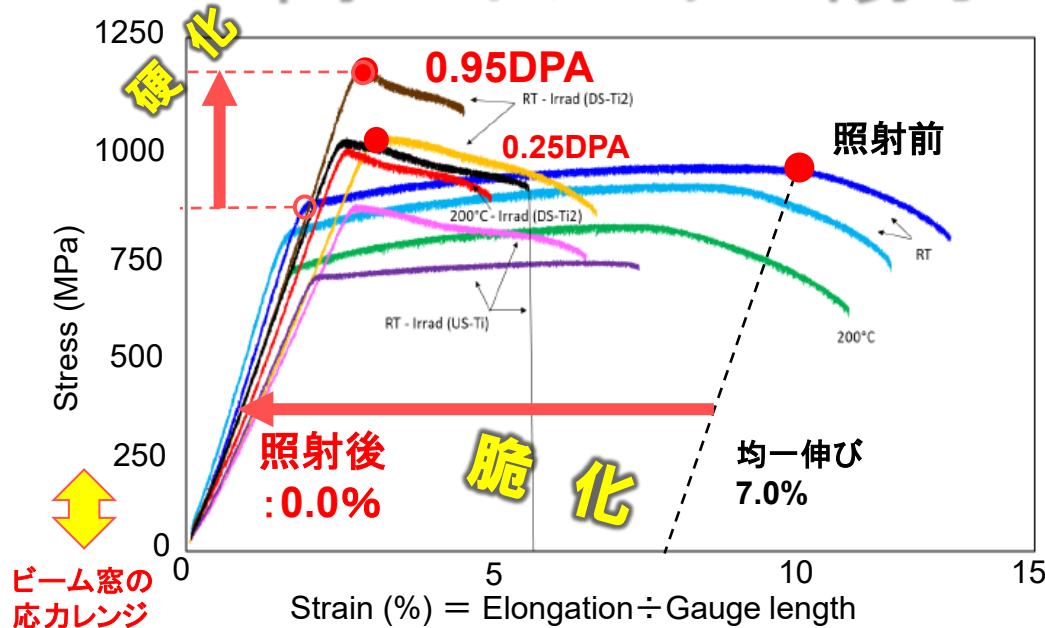


α+β2相型Ti-6Al-4V合金焼鈍材



- 非磁性
- 準安定β合金は冷間圧延が可能：ヘリカルの真空容器など、複雑な形状の加工に適する(?)

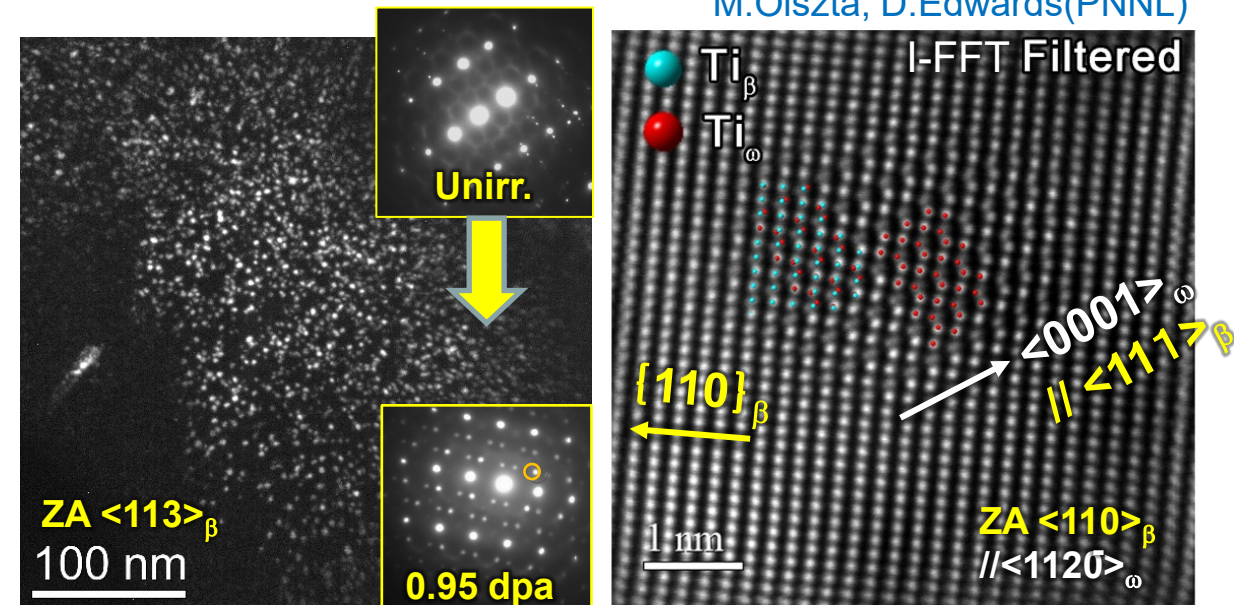
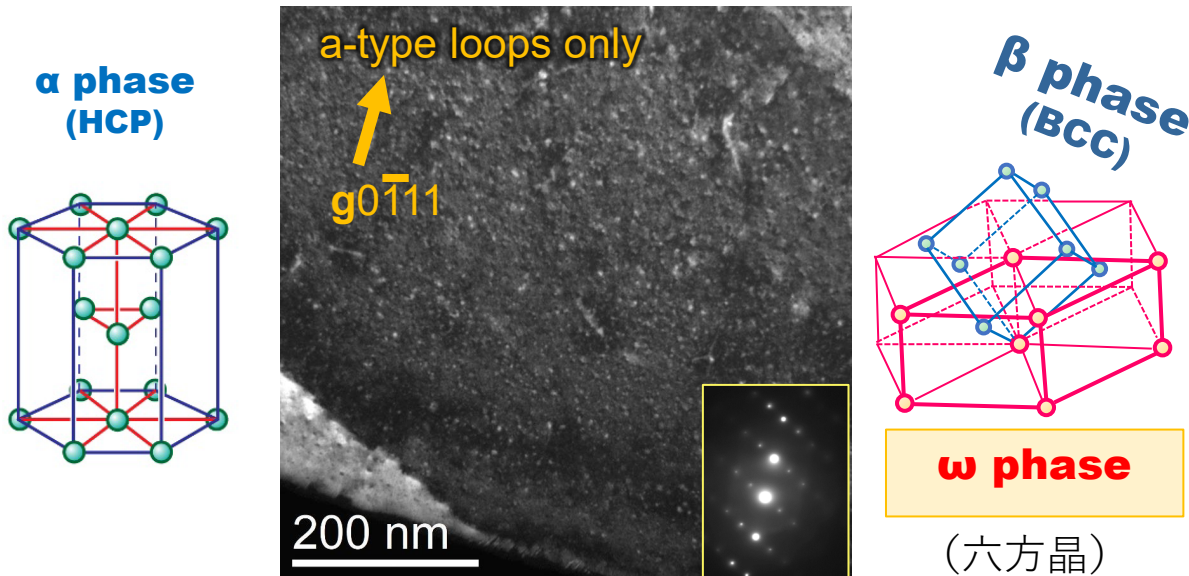
高エネルギー陽子による64チタンの照射損傷



- 照射の直後～0.1 DPAで $\alpha + \beta$ 相型Ti-6Al-4V 焼鈍材は 照射硬化し完全に延性を失う
- 主要な α 相に高密度のナノサイズの α 型の欠陥クラスターが形成：照射硬化・脆化の主要因
- β 相には欠陥クラスターは観察されず、数ナノサイズで高密度に ω 相が照射誘起

T.Ishida, E.Wakai et al. J.Nucl. Mat. 541 (2020) 152413

M.Olszta, D.Edwards(PNNL)



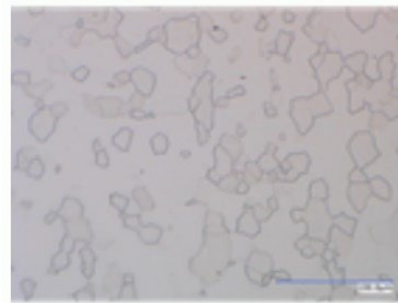
耐照射性能の高い材料とは？

材質劣化の原因： 照射により導入される格子欠陥の蓄積

照射による結晶格子からのはじき出し損傷の点欠陥の消滅場所となる「逃げ場」(**シンクサイト**)を高密度に導入する。

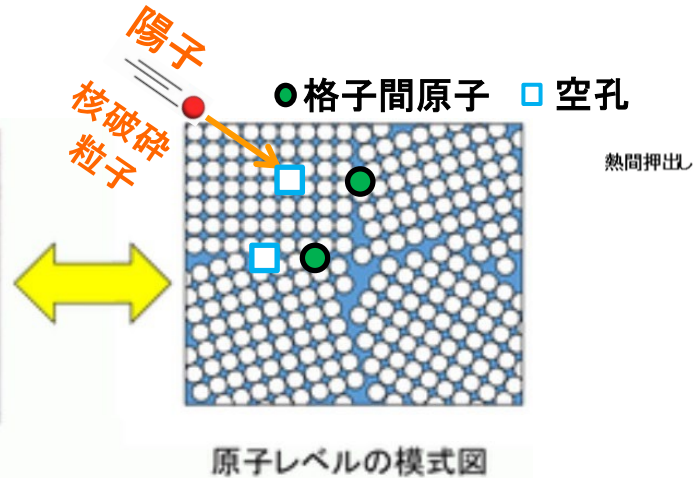
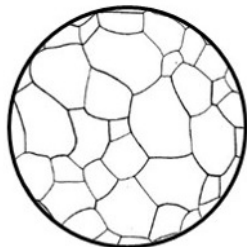
1. 金属結晶の微細粒化

結晶粒界はシンクサイトとして働く

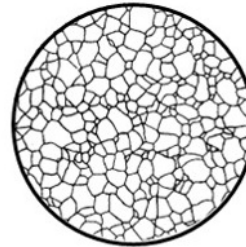


純鉄の組織

結晶粒が大きいので結晶粒界の量も少ない



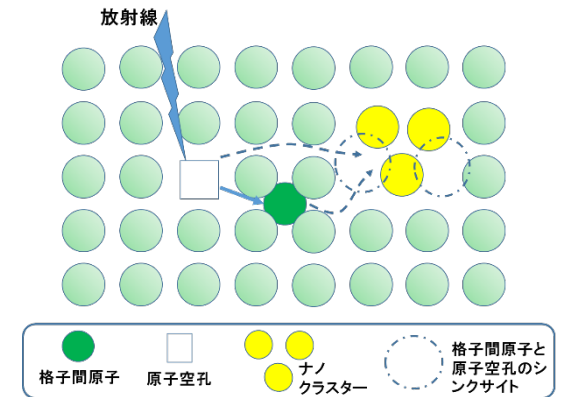
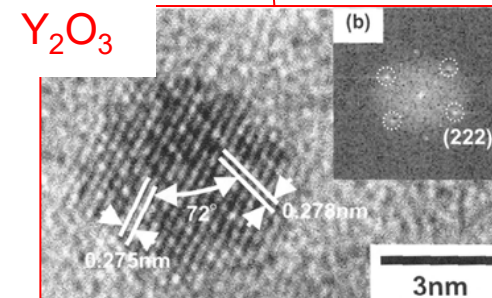
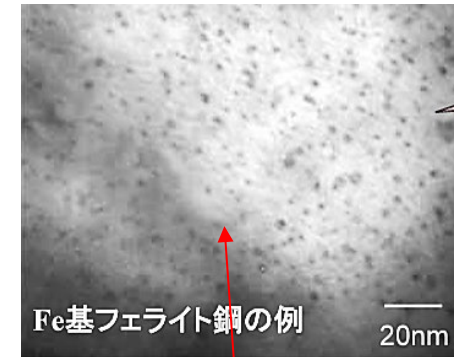
結晶粒が小さいので結晶粒界の量が多い



よりシンク強度が強い

2. 高密度分散粒子・微細析出相の導入

酸化物分散強化フェライト鋼合金

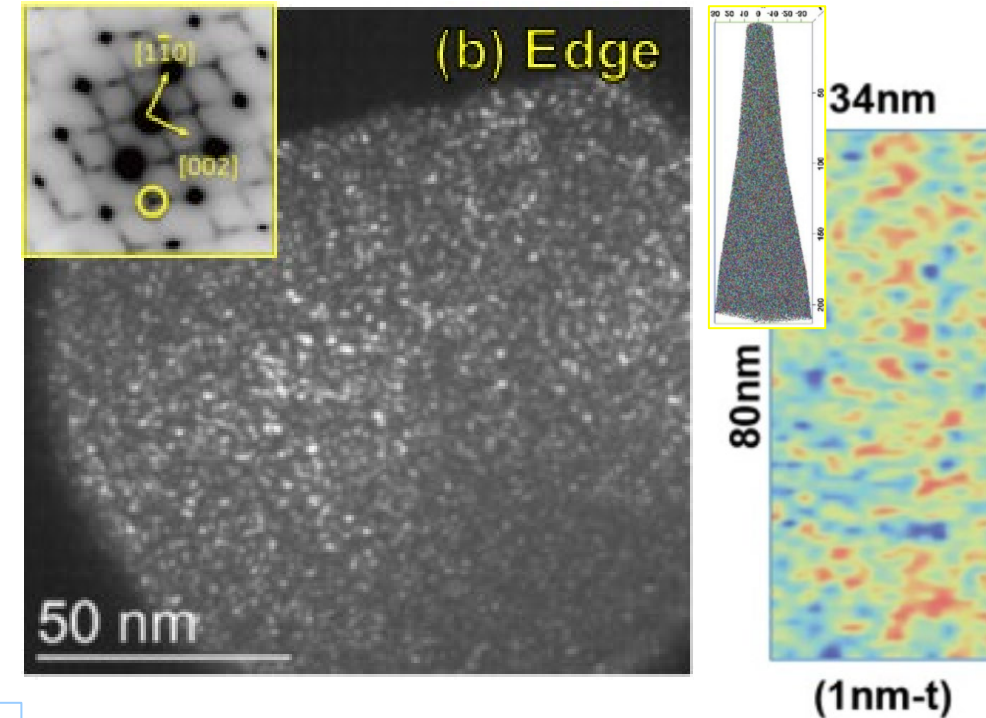
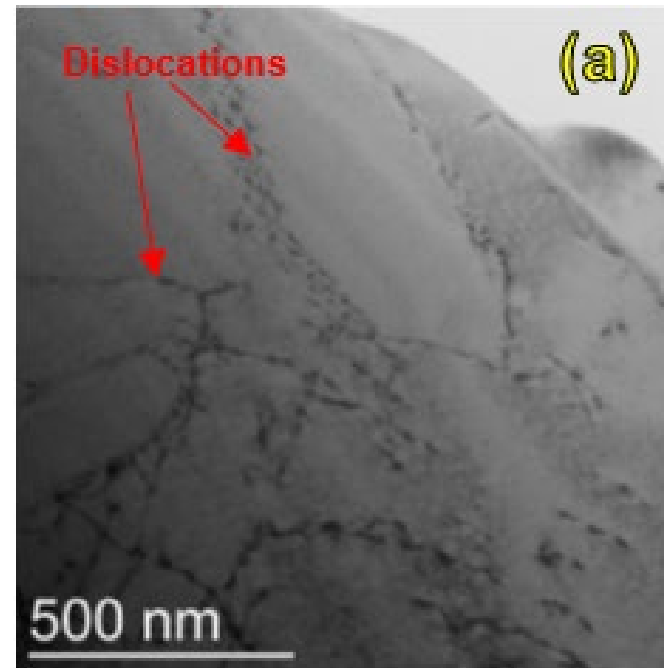
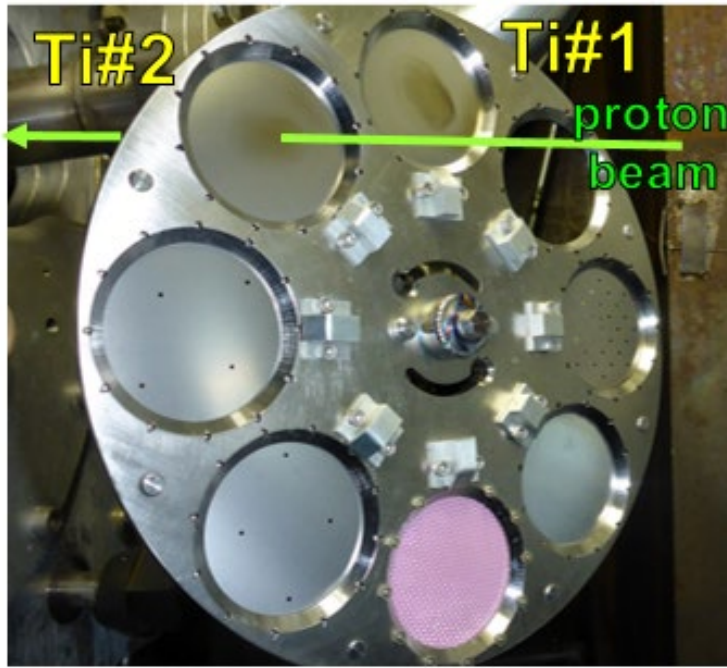


分散粒子・析出相と母相との界面、粒子・析出相中の格子乱れ等が欠陥を吸収

準安定β相型Ti-15-3合金(ST材)の耐照射損傷性能

J-PARCで少量の陽子ビームを受けた ビームプロファイルモニタ:
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (以降Ti-15-3) 合金 50μm厚フォイルの照射後試験

T.Ishida, E.Wakai et al.
Nucl. Mater. En. 15 (2018) 169-174



Ti-1: 1.4×10^{20} pot
0.12 peak DPA @RT

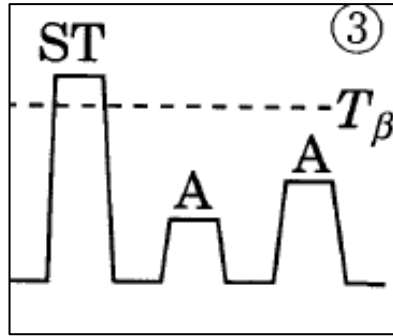
β相には高密度に生成した照射起源の
欠陥クラスターが存在しない
マイクロビッカース硬度に変化がない

ナノサイズω相前駆体(=athermal ω)
が照射・未照射に拘らず一様に存在

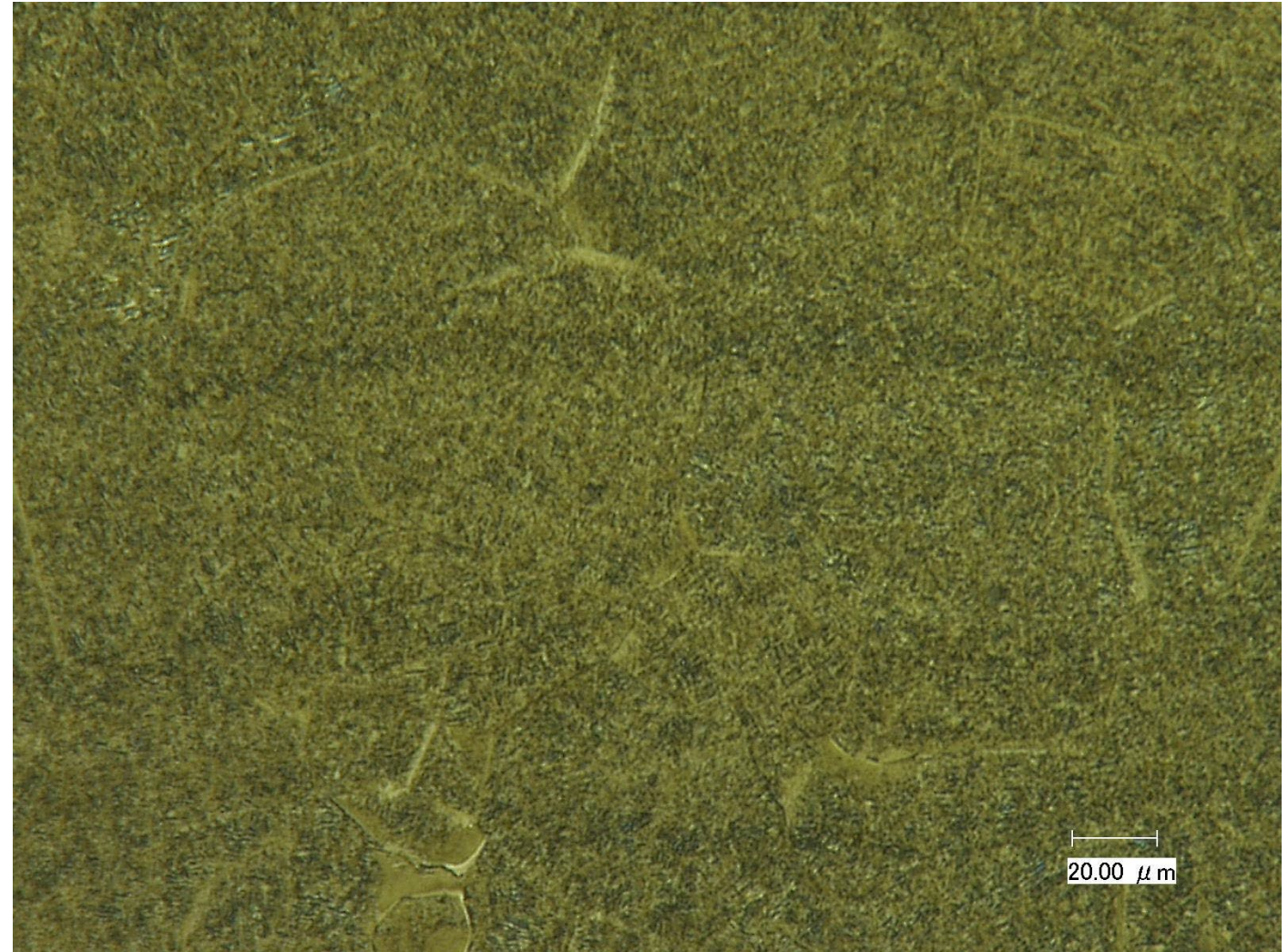
観測当時、「Ti-15-3合金では高密度分散したω相前駆体が点欠陥のシンク
サイトとして働くため高い耐照射性能を持つ可能性がある」と結論

APTによるTiの2次元濃度
マップが5nm以下の振幅で
79~69at%変動(要追試)

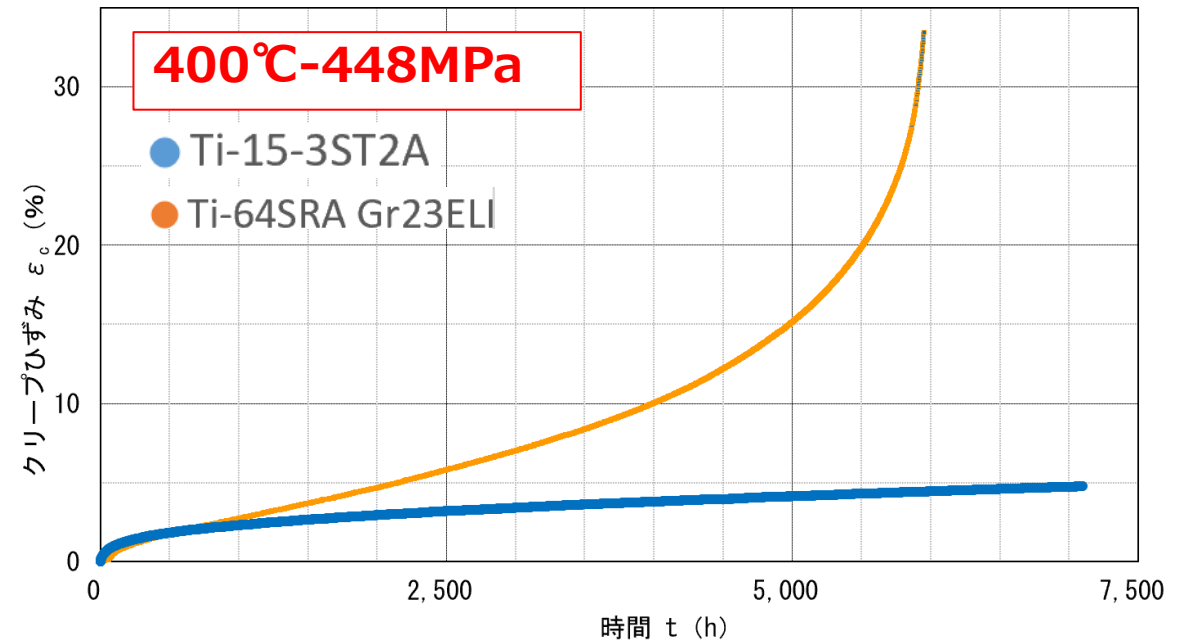
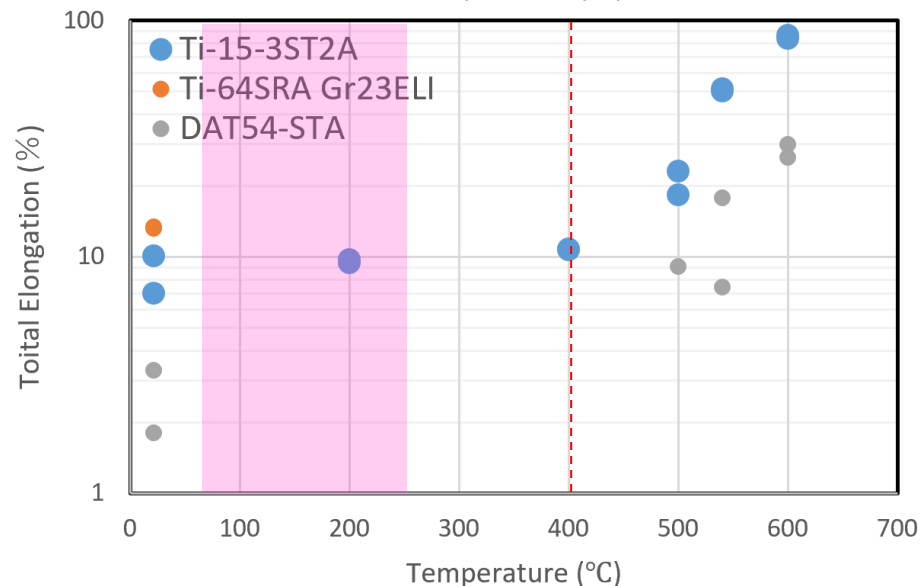
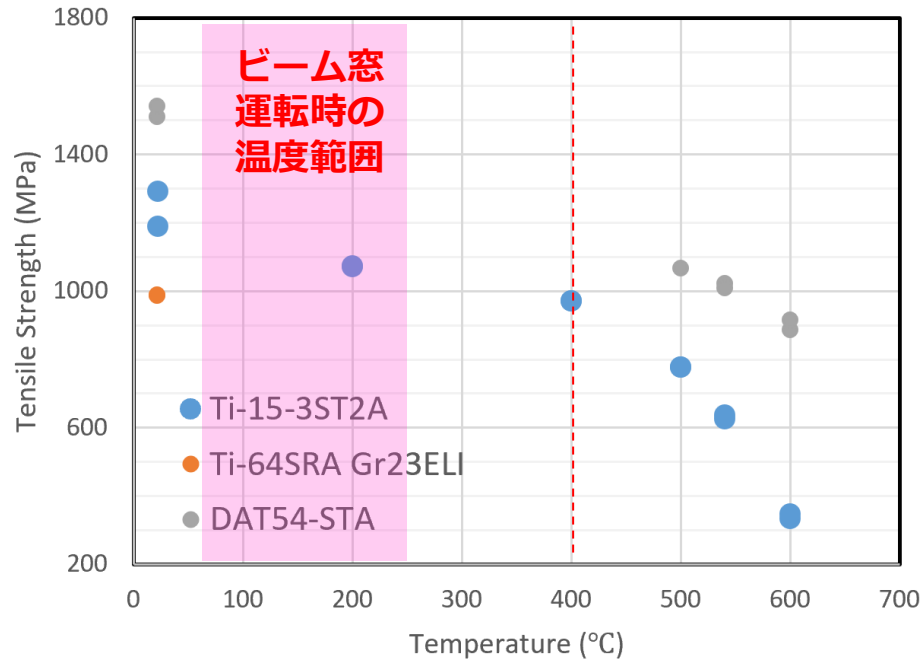
Ti-15-3 2段時効(ST2A)材の高温特性と耐照射性(1)



- 初段低温時効で β 相の相分離が起こり、2段目の高温時効で相分離で生成した第2相 β' を核として α が析出する⇒ β 粒内への α 析出が著しく促進されかつサイズが極微細となる。

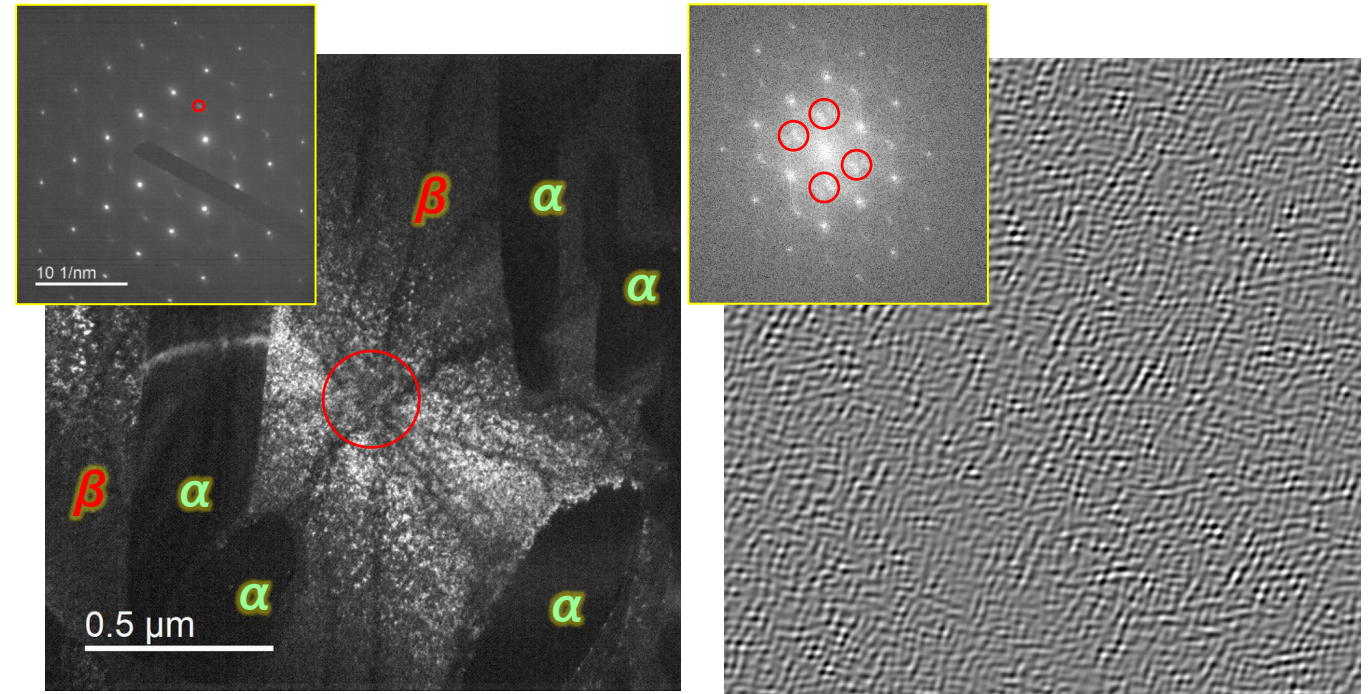
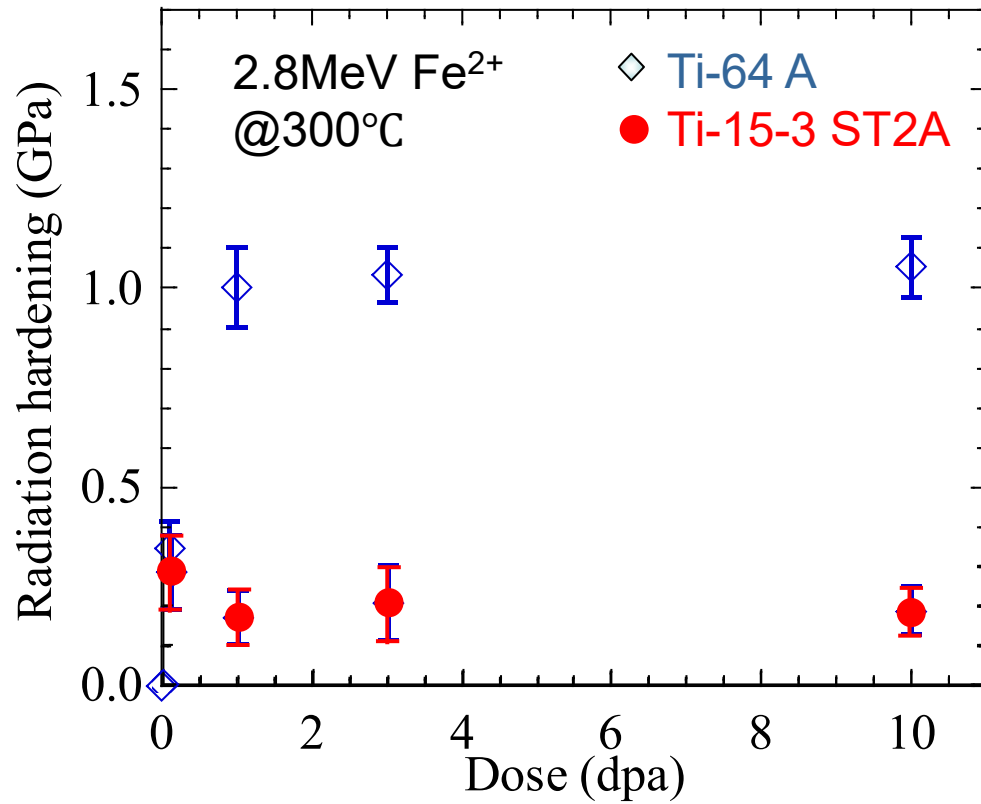


Ti-15-3 2段時効(ST2A)材の高温特性と耐照射性(2)



- 400°Cで1GPa近い引張強度と、室温値と変わらない伸び
- 400°CでTi-64より良好なクリープ特性。

Ti-15-3 2段時効(ST2A)材の高温特性と耐照射性(3)



300°Cでのイオン照射で
ほぼ照射硬化しない

10dpa照射材に転位はなく β 母相に
均一ナノスケール格子歪みを観測

チタン(4族遷移金属)準安定β相の耐照射性に関する可能な解釈

■ サブナノメートルサイズの均質格子乱れによるシンク効果

- ◆ 照射損傷の「シンクサイト」とは、照射によって生じた点欠陥の再結合を促進し、その集中を緩和する働きをする結晶構造で、(1)転位、(2)粒界、(3)粒子状析出物が含まれる。
- ◆ (3)に関して、酸化物分散強化(ODS)合金のようなナノ構造材料は、μmスケール以上の結晶粒を有する従来の材料と比較して、相間境界の体積に対する自由表面の割合が大きいため、優れた耐照射特性を示す。

- ◆ 粒子析出物のシンク強度 S_p [m^{-2}]:

$$S_p = 2\pi N_p d_p = 3.8 \times 10^{16} m^{-2}$$

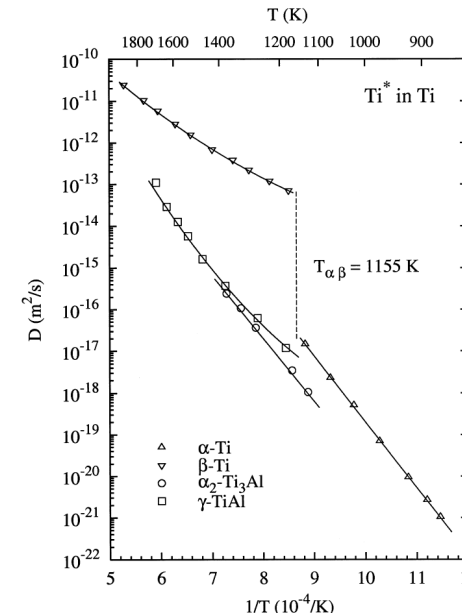
$$d_p = 0.6 nm \text{ and } N_p = 1 \times 10^{25} m^{-3}$$

(cf. ODS Fe-Cr alloys $2.7-6.4 \times 10^{15} m^{-2}$)

BCC準安定ベータ相のω前駆体に相当する格子歪み→自己拡散速度↑→欠陥再結合性↑→ヘリウム・水素蓄積性↓→照射膨張や脆化を抑制(?)

■ “Anomalous Point Defect Recombination”

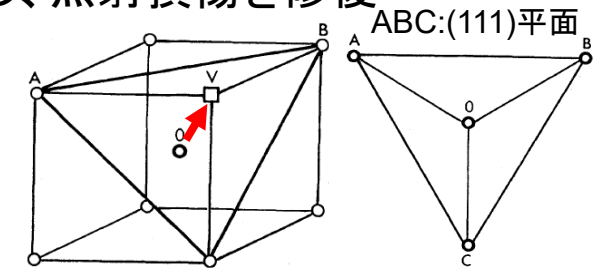
異常な点欠陥再結合: β-Tiの速い自己拡散が点欠陥の再結合を促進し、照射損傷を修復



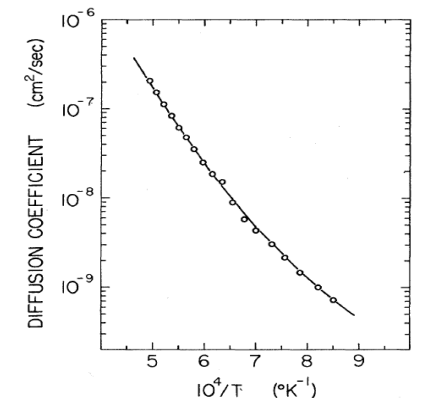
Ti-Al系の異なる相におけるTiの自己拡散のアレニウス図
Y. MISHIN and Chr. HERZIG,
Acta. Mater 48(2000) 589-623

中嶋英雄・小岩昌宏 日本金属学会会報30(1991)526-535

J. M. Sanchez and D. de Fontaine
Phys.Rev.Lett. 35 (1975) 227-230



ω胚: ○位置の原子がABC三角形平面上にcollapseし三角結合を形成。その結果、隣接する空孔Vへの変位が容易になる。



Zrの自己拡散のアレニウスプロット。○: データ、実線は:ω胚形成の現象論的自由エネルギーから導かれる式

まとめ

- ターゲットやビーム窓に採用されている材料の耐久性を評価し、その放射線損傷メカニズムを調査することは、最先端の加速器コミュニティにとって非常に重要である。
 - ◆ チタン合金Ti-6Al-4Vがビーム窓材料として広く利用されているが、照射損傷で急激に硬化・脆化してしまう。異なる合金や結晶構造への依存性に関する研究は非常に限られている。
- 陽子線/イオンビーム照射実験を通して、放射線損傷の影響と合金分類の微細構造の違いとの関係が明らかになりつつある。
 - ◆ β 相は α 相よりも優れた放射線損傷耐性を持つ可能性がある。これは ω 相前駆体に起因する特徴的なサブナノメートルサイズの均質な格子乱れに期待される強いシンク効果か、または ω 相前駆体に相当する原子変位が引き起こす空孔の高い移動度によって誘発される「異常な点欠陥の再結合」のどちらかに起因するのではないかと考えている。
- Ti-15V-3Cr-3Sn-3Alの2段時効材は400℃までの耐用性があり、300℃下のイオン照射での硬化の度合いがごく僅かで、Hyper-K/LBNF時代の次世代ビーム窓材料の最有力候補として実機製造へ向けR&Dを進めている。

4族遷移金属の準安定 β 相が持つ特異な点欠陥挙動は、従来の金属結晶の微細粒化や高密度分散粒子・微細析出相の導入とは根本的に異なる、高温環境でも優れた性能を発揮する核融合炉材料の設計＝MS10の目標である耐照射性材料に関する“破壊的イノベーション”に繋がる可能性が極めて高いと思われる。2050年の発電開始を実現するための即効性のあるアイディアとマイルストーンを検討中

MS10・奥野プロジェクトへの期待とコメント(1)



- 奥野さんは、2023年にハイパワーターゲット研究会をRIKENで主催(J-PARCと共催)されるなど、いち早く標的環境材料開発の重要性を認識されている仲間の一人。<https://indico2.riken.jp/event/3102/timetable/?view=standard>
- 40～400MWという人類未踏の領域を実現するためには、**これまでの常識を打ち破るようなターゲット概念と材料が確実に必要。**
 - ◆ 液体金属リチウムターゲット開発には、MLF(水銀)・ADS(鉛ビスマス)などを運用・開発するJ-PARCのノウハウを生かせるのではないか。
- ビーム熱衝撃試験としてCERN HiRadMat施設の利用？
- J-PARCニュートリノ施設のビーム窓は、2027年に開始予定のハイパーカミオカンデ実験の開始を目指し次世代材料開発と耐用寿命評価が喫緊課題
 - ◆ 核融合炉材料の開発技術であるイオンビーム(鉄+He+H)多重照射実験を進めている(QST-TIARA・東大-HIT)。
 - ◆ **MS10でQST六ヶ所と延性評価のためのμ引張試験協力の開始に合意。**

MS10・奥野プロジェクトへの期待とコメント(2)



■ MS10のような分野横断型の情報交換は大変貴重で重要

- ◆ ニュートリノ施設炭素鋼系冷却水配管の腐食防止のためのLi7濃縮技術によるpH調整(もともとニュートリノ研究のダブルβ核の濃縮のため阪大で開発された技術)
- ◆ 冷却水中のトリチウムを分離する技術(富山大)

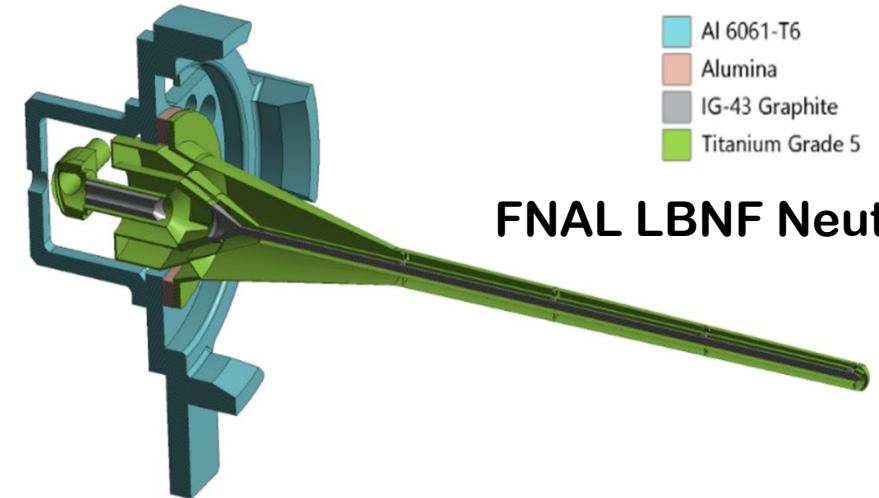
■ RaDIATEはコロナ禍以降の情勢変化で、2017～2018に陽子ビーム照射をして以降、次期陽子ビーム照射計画がない状況であり、世界の加速器標的コミュニティが、大規模照射の実現を待ちわびている。

- ◆ MS10で常陽の高速炉照射について情報交換(He検証は微妙。温度400℃以上)
- ◆ J-PARC—LINAC(400MeV)での照射可能性?: PSI-SINQ(590MeV陽子)のようにdpa・appmが実験可能:核融合材料業界にとって絶好の機会?
- ◆ 法規制の問題が解ければ、LINACで照射 ⇒ 照射後試験施設(RFEF/WSATEFF)でPIEが可能となる。

World's Accelerator Equipment Employing Ti-6Al-4V Alloy

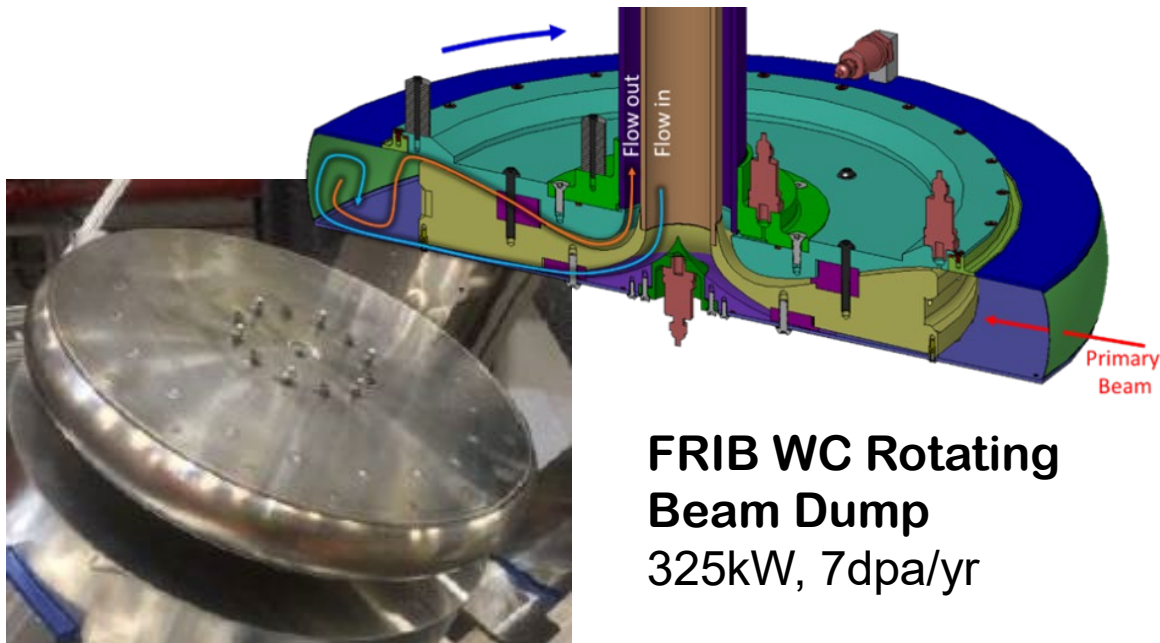
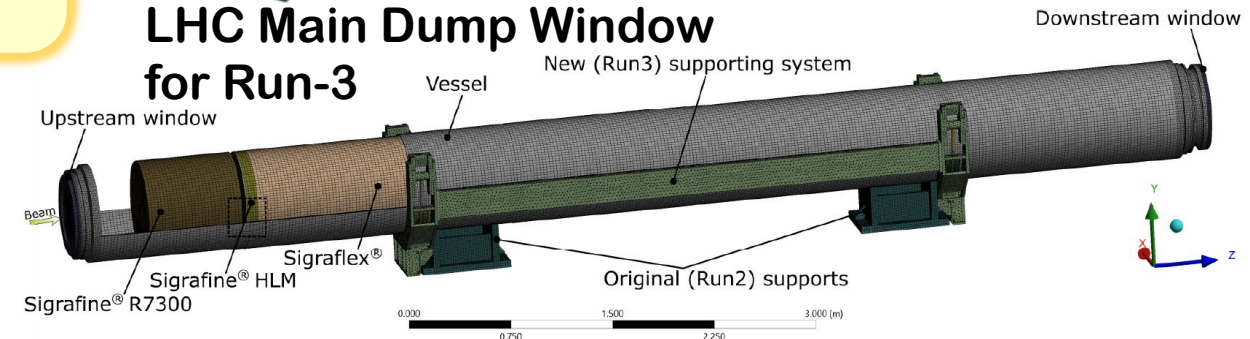
- LBNF target container and beam window
- CERN LHC Main beam dump beam window
- MSU-FRIB beam dump
- ILC 14MW main beam dump (water) beam window

It is vitally important to clarify **phase stabilities against irradiation and their mechanisms** and to find alternative grades of Ti alloys that can maintain **mechanical properties in the high dose (several dpa) range (esp. HCF strength)**

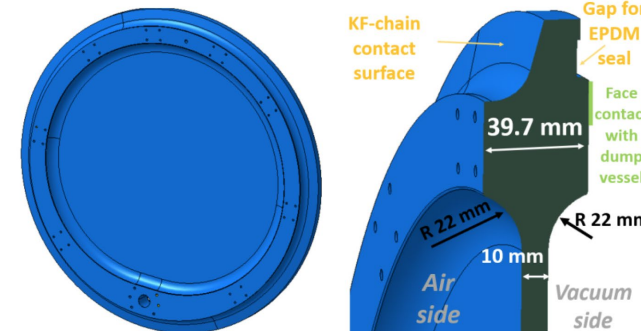


FNAL LBNF Neutrino Target

LHC Main Dump Window for Run-3

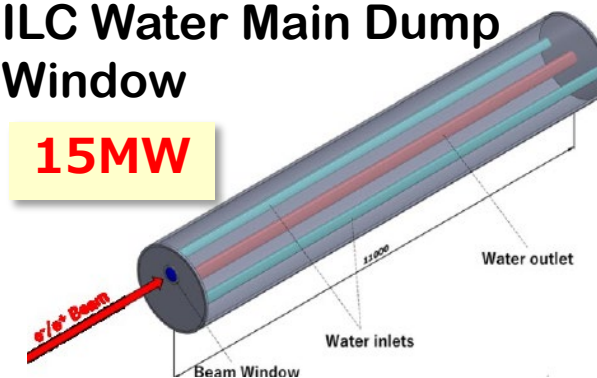


FRIB WC Rotating Beam Dump
325kW, 7dpa/yr



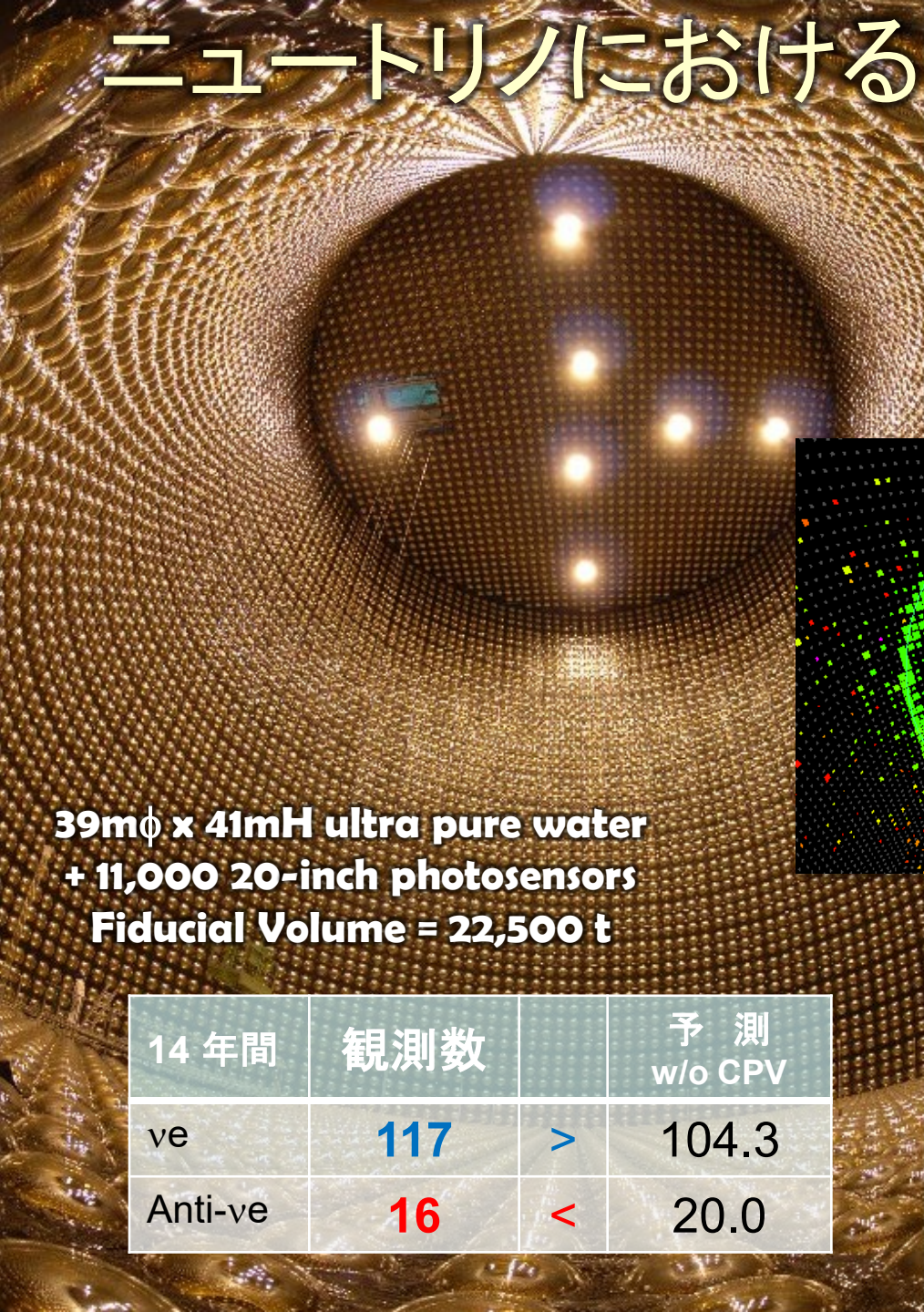
ILC Water Main Dump Window

15MW



ニュートリノにおける物質・反物質対称性の破れ

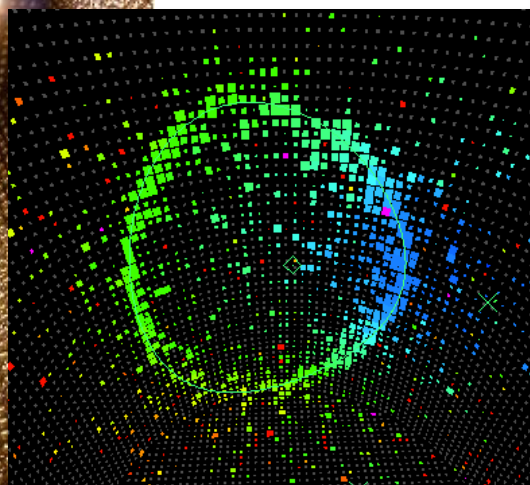
<https://j-parc.jp/c/en/press-release/2020/04/16000517.html>



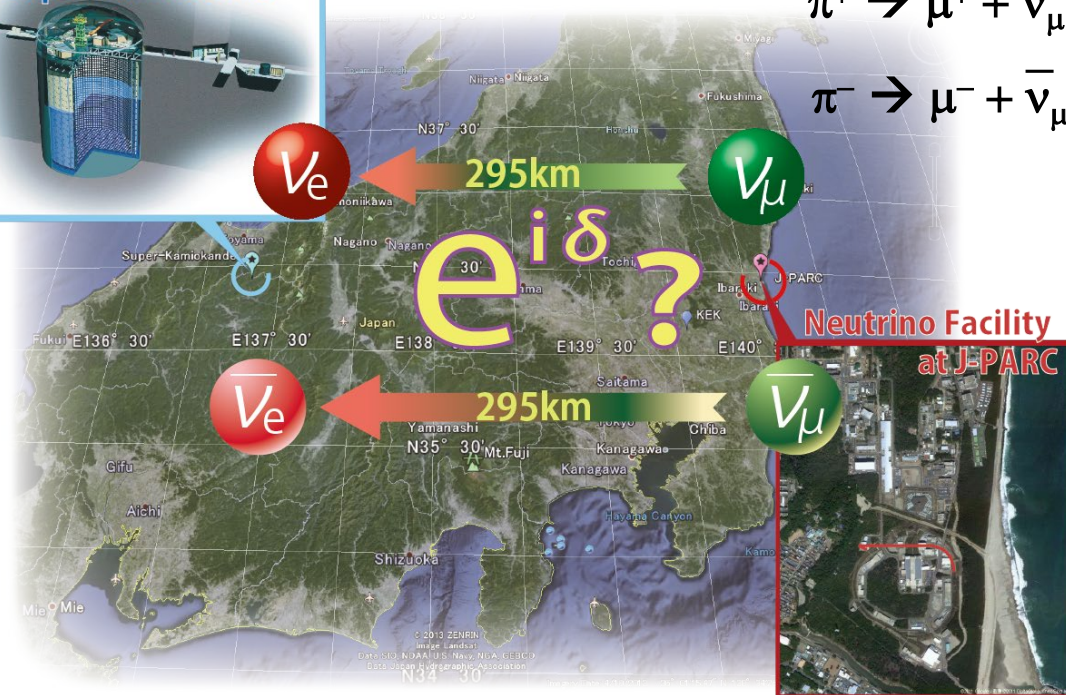
39mφ x 41mH ultra pure water
+ 11,000 20-inch photosensors
Fiducial Volume = 22,500 t

14 年間	観測数		予 測 w/o CPV
ve	117	>	104.3
Anti-ve	16	<	20.0

ve 出現事象



Super-Kamiokande



- J-PARCからスーパーカミオカンデまでの295kmを結ぶ長基線ニュートリノ振動実験により、ニュートリノにおける粒子・反粒子の対称性の大きな破れが示唆されている。物質優勢宇宙の起源である可能性がある。
- この確証のためにはより多くの統計：より高いビームパワーとより大きな検出器が必要 → ×2.6倍の加速器ビームパワー増強と×8倍の有感体積を持つハイパーカミオカンデを建設中(2027年に実験開始)

ニュートリノにおける物質・反物質対称性の破れ

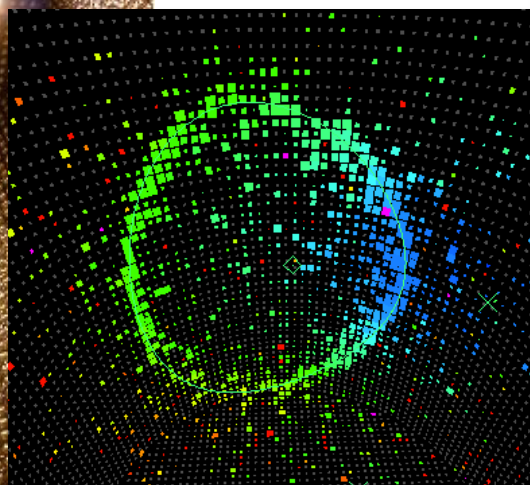
<https://j-parc.jp/c/en/press-release/2020/04/16000517.html>

MS10のanother peak たりえる？

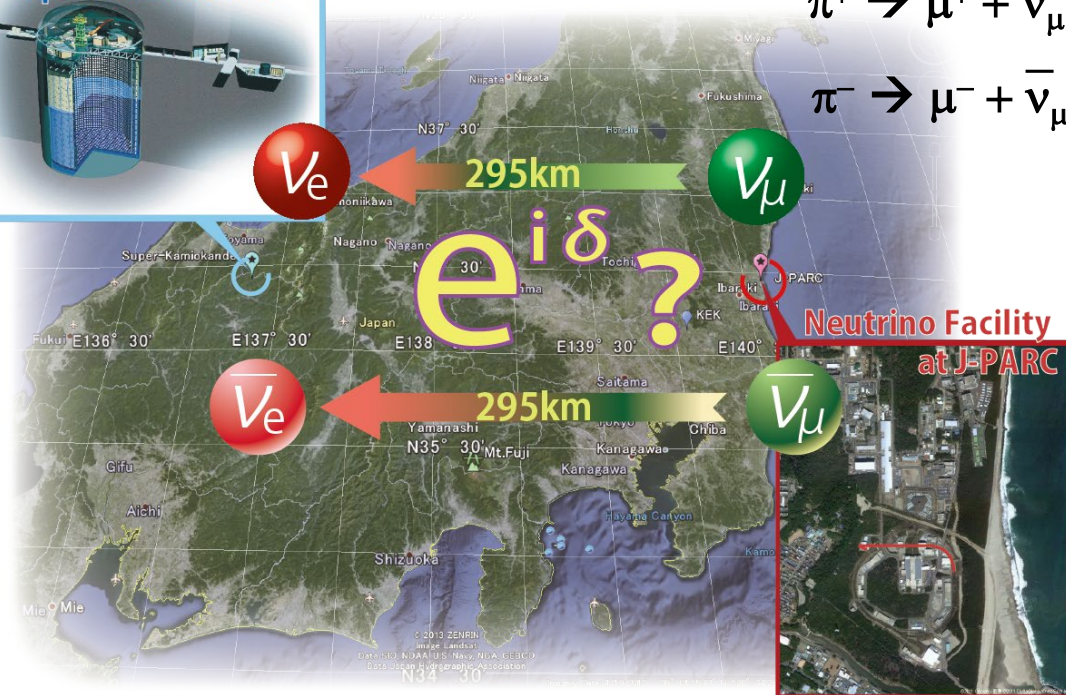
39mφ x 41mH ultra pure water
+ 11,000 20-inch photosensors
Fiducial Volume = 22,500 t

14 年間	観測数		予 測 w/o CPV
ve	117	>	104.3
Anti-ve	16	<	20.0

ve 出現事象



Super-Kamiokande



$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

- J-PARCからスーパーカミオカンデまでの295kmを結ぶ長基線ニュートリノ振動実験により、ニュートリノにおける粒子・反粒子の対称性の大きな破れが示唆されている。物質優勢宇宙の起源である可能性がある。
- この確証のためにはより多くの統計：より高いビームパワーとより大きな検出器が必要 → ×2.6倍の加速器ビームパワー増強と×8倍の有感体積を持つハイパーカミオカンデを建設中(2027年に実験開始)

ご清聴ありがとうございました



本研究は、高エネルギー物理学における日米科学技術協力プログラムおよび科学研究費補助金(A)(**21H04480**および**21H04668**)、つくばグローバル・イノベーション推進機構(**TIA**)連携プログラム探索推進事業「かけはし」の助成を受けています。

本研究は、東京大学大学院工学系研究科原子力専攻における共同研究です。

本研究の一部は、文部科学省「ナノテクノロジープラットフォーム」及び「**ARIM**」のプログラムとして北海道大学で実施されました。

また、本研究の一部は独立行政法人物質・材料研究機構(**NIMS**)電子顕微鏡ユニットの支援を受けました。

HIT施設の運営を支援していただいた小俣隆夫氏(東京大学)、**HREM**観察を実施していただいた大多亮氏(北海道大学)、**TEM**観察用試験片の製作を実施していただいた中山佳子氏(**NIMS**)に感謝します。