ADS 実現に向けた材料の照射挙動研究とイオン加速器を利用した研究展開について

- 加速器駆動システム（ADS）とは
- ADS実現に向けた材料の研究課題
- ADS材料データ取得について
- タンデム加速器を用いた照射実験

日本原子力研究開発機構
原子力科学研究部門
原子力基礎工学研究センター
照射材料工学研究グループ
大久保成彰

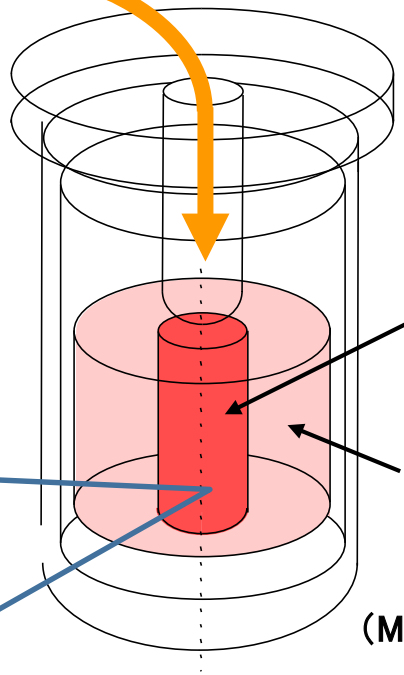
加速器駆動核変換システム

超伝導陽子加速器

ADS：Accelerator Driven System

陽子ビーム

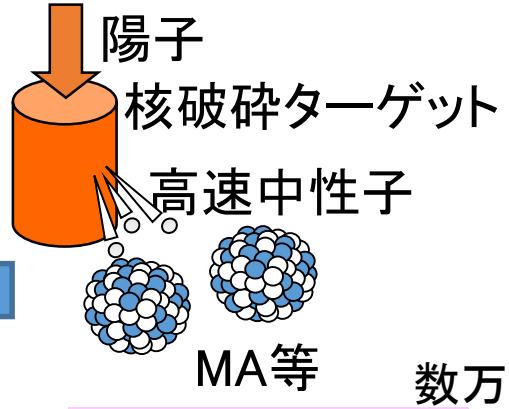
未臨界原子炉

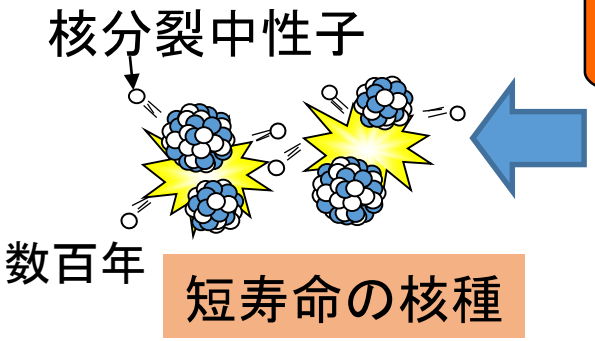


（MA：マイナーアクチノイド）

ADSによる核変換の原理

未臨界状態での核分裂連鎖反応を利用

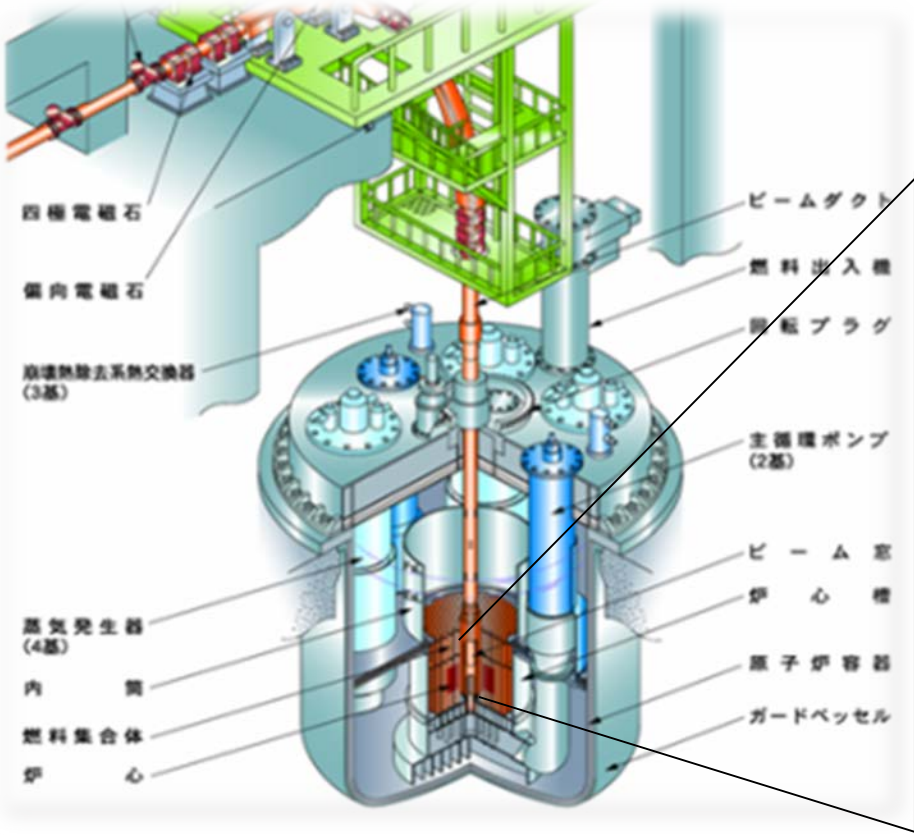




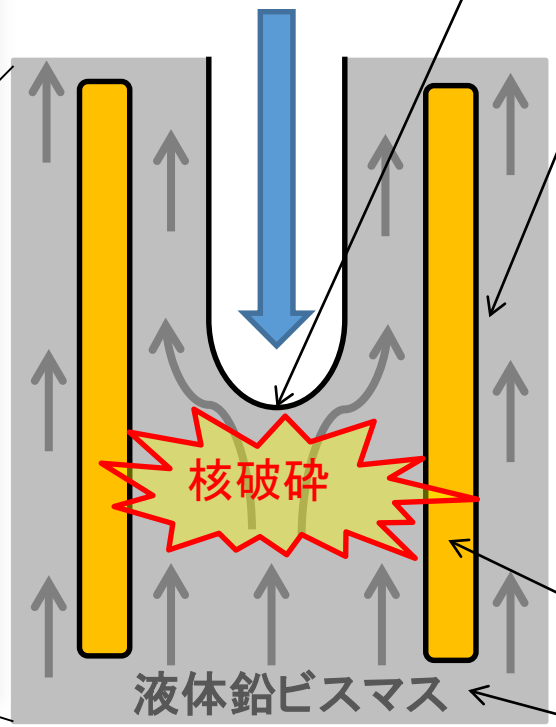
ADSの特徴：

- ✓ 加速器を止めれば連鎖反応は停止 → 核反応の暴走の心配が無い
- ✓ MA濃度の高い燃料が使用可能 → 1基で**軽水炉10基分**のMAを核変換
- ✓ **鉛ビスマス**は化学的に不活性

ADS炉心部材料への照射影響



JAEAが提案しているADS概念図



ADS炉心部模式図

ビーム窓 (2mmt)

陽子照射＋中性子照射
（～30 dpa, 450-550℃）

燃料被覆管 (0.5mmt)

中性子照射
（～100 dpa,400℃）

材料への影響

- 照射（硬化）脆化
- スウェリング
- クリープ・疲労
- 液体金属脆化
- 腐食・浸食

MA+窒化物燃料

酸素濃度制御も重要

ADS環境特有の影響評価が必要
①高い照射損傷と高濃度の核変換生成ガス（He,H）の重畳影響
②液体金属脆化やLBE中材料腐食挙動の影響
③照射と腐食の影響　→素過程を理解することが本研究の目的

候補材料
SS316L鋼
T91鋼

ADS材料データ（照射損傷、鉛ビスマス共存性）取得について

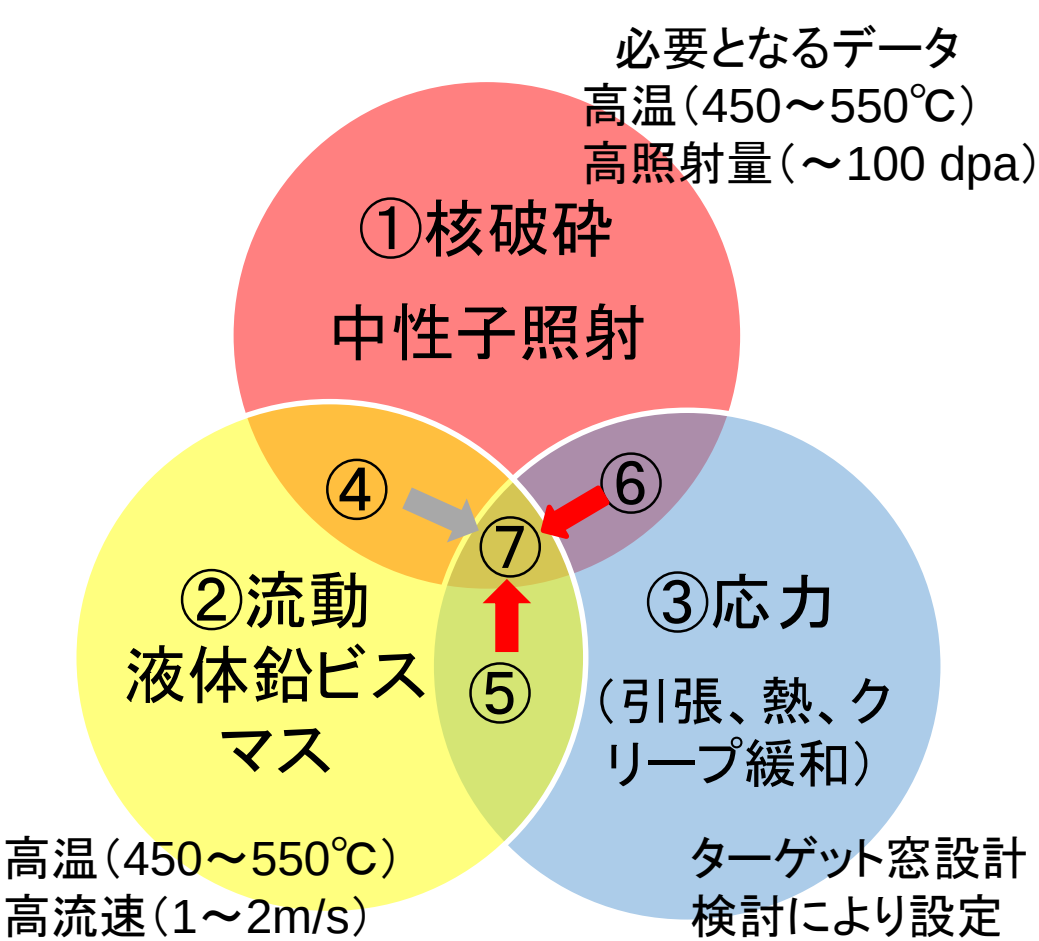


図　ADS材料の晒される環境因子

① 陽子+核破砕中性子照射（PSI）

実験炉照射（BR-2）

ADS模擬イオン加速器照射

（TIARA、タンデム加速器）

② OLLOCHI、IMMORTAL

③ 鉛ビスマス中強度試験装置

（引張、クリープ、疲労）

④ <u>実証試験施設が必要</u>

⑤ 応力付加流動下腐食試験

（OLLOCHIへ整備予定）

⑥中性子照射後試験

⑦ <u>ADS実機環境</u>

鉛ビスマス（LBE）中の材料照射研究について

➢ 過去のプロジェクト研究

LBE（鉛ビスマス共晶合金）

主機関	プロジェクト	照射施設	照射量dpa	照射温度（℃）	備考
SCK・CEN	LEXUR-Ⅱ	BOR-60	6	350	高速中性子 LBE封入キ
SCK・CEN	Twin-ASTIR	BR-2	1.5	200,350,450	キャプセル
NRG	IBIS	HFR	1.3/2.3	300/5	熱中性子 LBE封入キャプセル
PSI	MEGAPIE	SINQ	0.8～3.9	～350	陽子+核破砕中性子 流動LBE
PSI	LiSoR	SINQ	～2.5	400	72MeV陽子、流動LBE

ADS実機よりも低照射量、低温

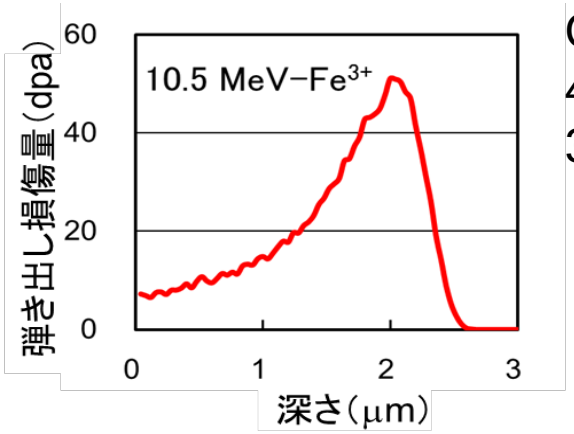
➢ JAEAにおける照射研究計画

- ◻ PSI　核破砕中性子照射　1～2 dpa, 250℃ LBEなし⇒　照射中　2018.6～2021.12
- ◻ PSI　陽子+核破砕中性子照射　20 dpa, 550℃、LBE封入キャプセル　2022～計画中
- ◻ TIARA　核破砕模擬イオン照射　～20 dpa 350～550℃　照射後LBE中腐食試験
- ◻ タンデム加速器イオン照射（本課題）　～数dpa ～400℃　LBE界面照射試験

イオン照射による腐食挙動への照射影響（TIARA）

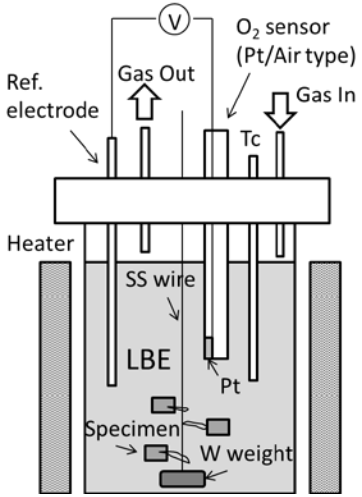
試料：SS316L鋼　(20mmLx5mmDx0.5mmT)

飽和酸素濃度：10^{-4}　wt%

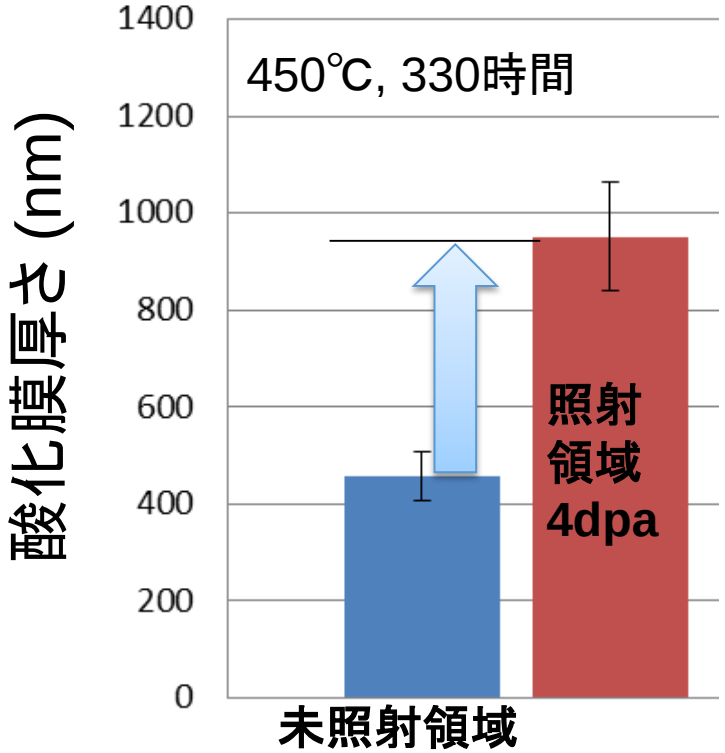


SRIMコードによる損傷分布

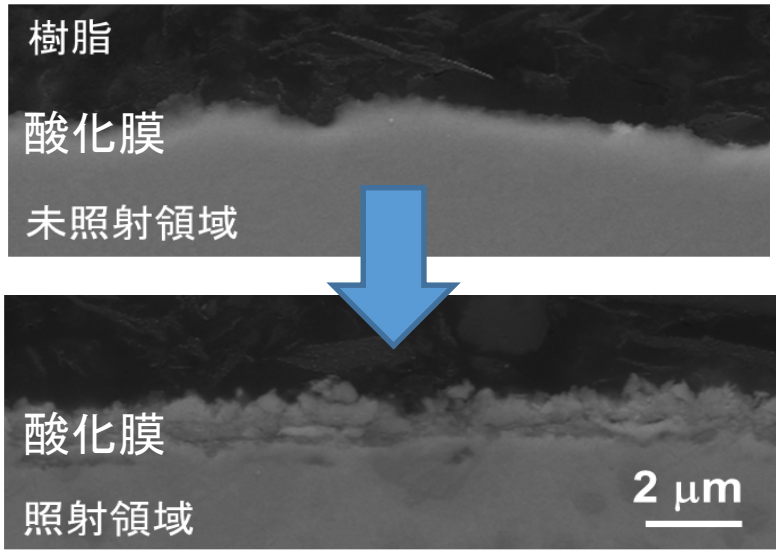
QST-TIARA　450℃照射後に、
450℃のLBE中にて
330時間の浸漬試験実施



LBE中浸漬試験装置



照射+浸漬後断面SEM像



照射が、酸化腐食（酸化皮膜成長）を促進

照射により導入された照射欠陥（空孔や格子間原子集合体等）が、浸漬試験中に、構成原子の拡散を促進し、酸化皮膜が成長したと考えられる

照射下ではさらに促進？

照射後引張強度に及ぼす鉛ビスマスの影響

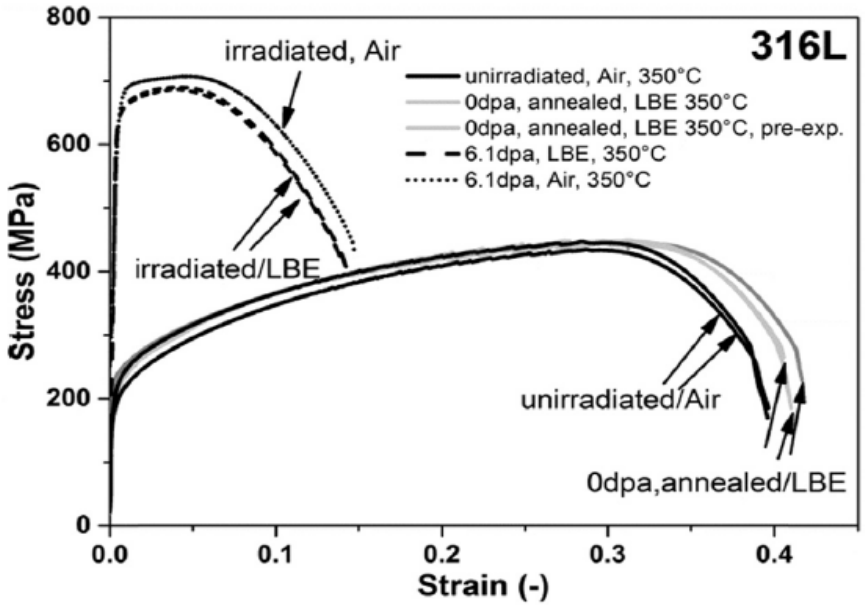


Fig. 4. Tensile tests of irradiated and non-irradiated 316L in different environments. Samples marked with unirradiated/Air are samples without any treatment and the sample marked with pre-exp. was exposed to LBE at 450 °C for 20 h prior to being tested.

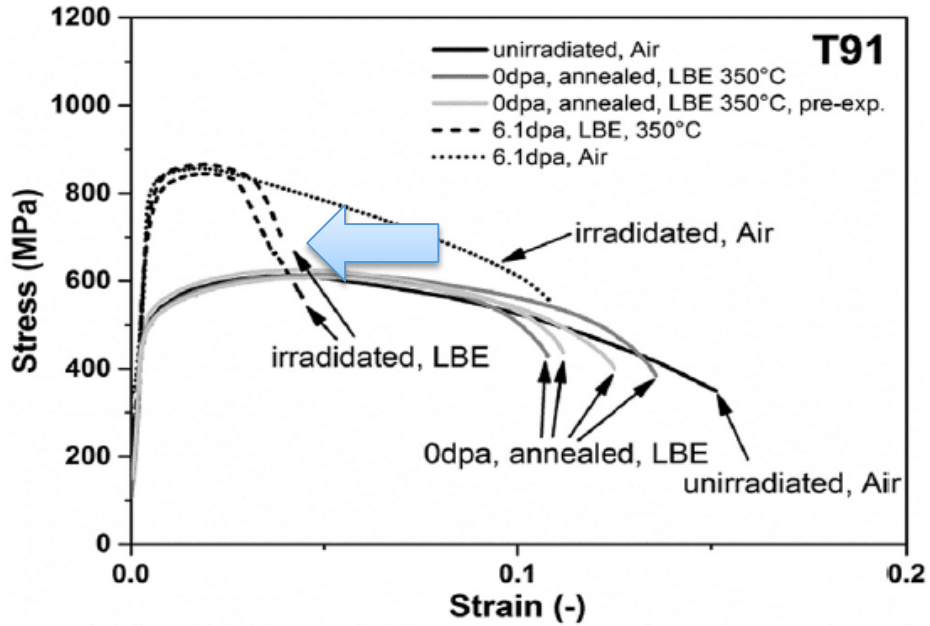


Fig. 2. Comparison of Tensile test results of irradiated and non-irradiated T91 tested in air and LBE. Annealed refers to samples from the furnace test. The term pre-exp. marks samples which received an additional pre-exposure treatment to LBE for 20 h at 450 °C.

E. Stergar et al. / Journal of Nuclear Materials 473 (2016) 28–34

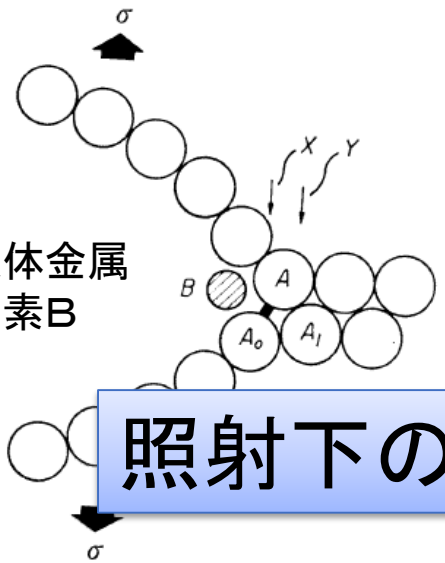
図　中性子照射後Pb-Bi中引張試験結果　by SCK

BOR60　350℃照射後に450℃×20時間鉛ビスマス中浸漬後に引張試験した結果

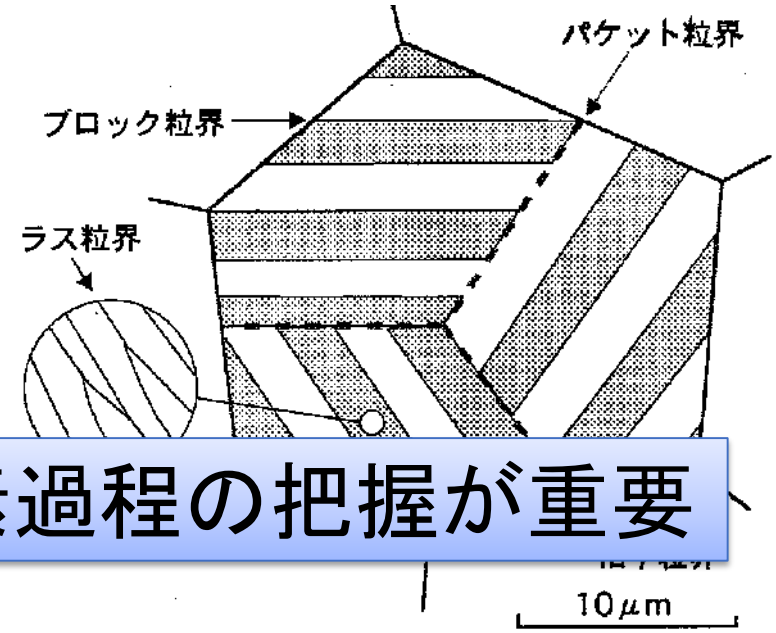
316Lは液体金属脆化感受性なし

T91は感受性あり

液体金属脆化機構と焼き戻しマルテンサイト組織



液体金属
元素B



照射下の拡散等素過程の把握が重要

日本金属学会会報8(1969)235 - 242.

ラス (0.2μm) : 小角粒界　旧γ粒 (20μm)、パケット (10μm)、ブロック (1μm) } 大角粒界

https://astamuse.com/ja/published/JP/No/2001073064

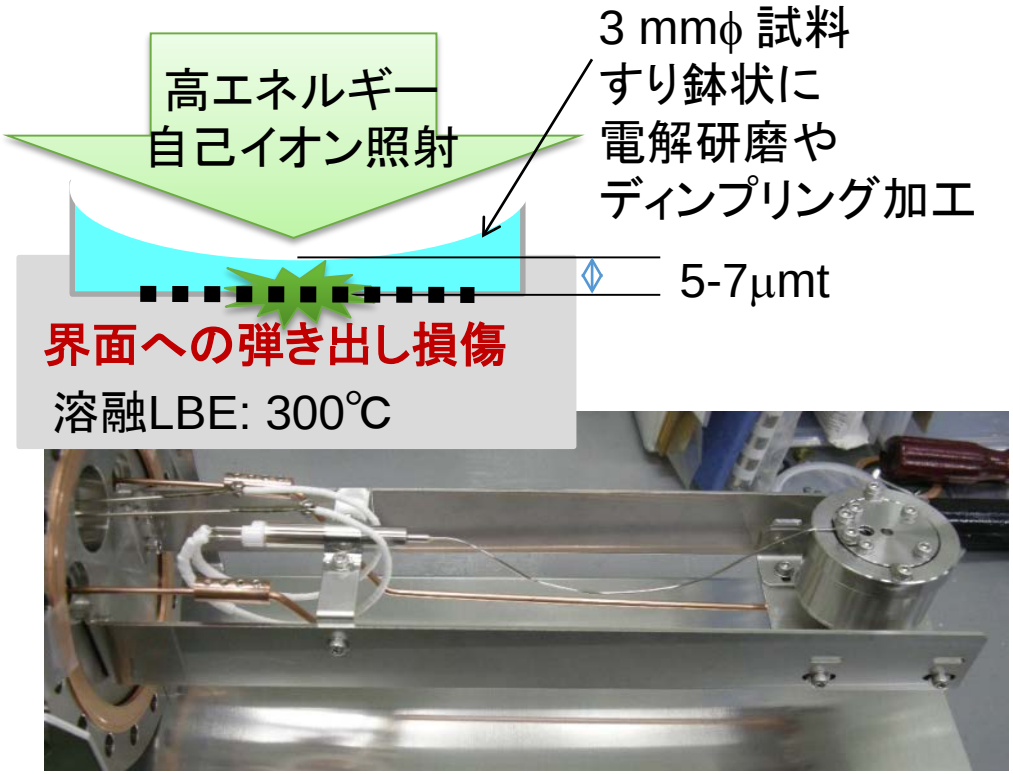
提案されている
液体金属脆化機構

T91鋼やF82H鋼等の組織

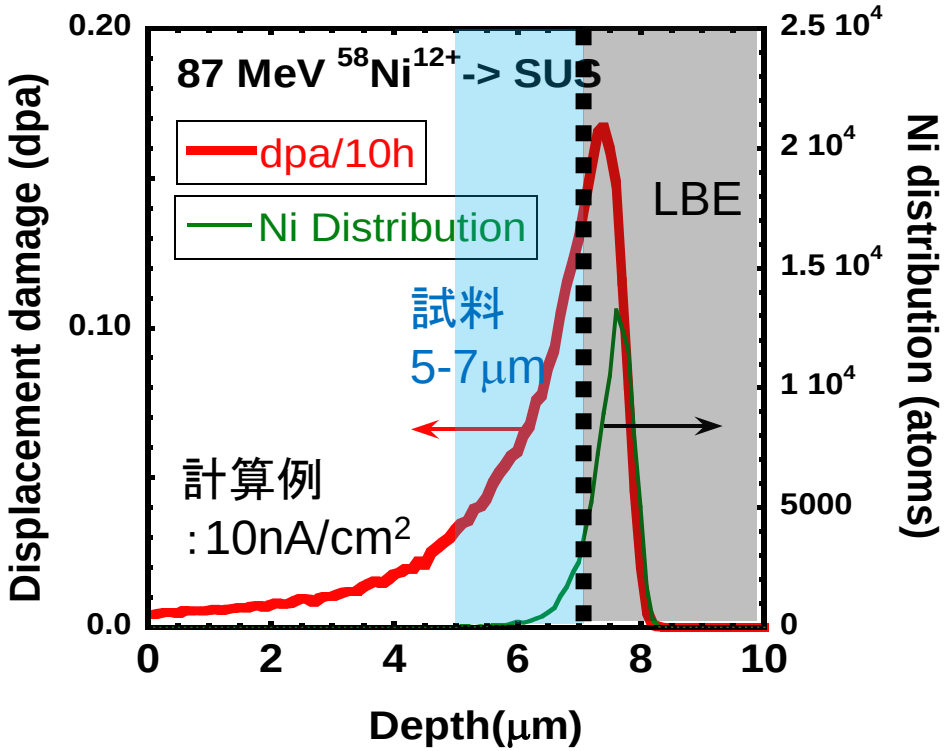
どこで液体金属脆化が起きやすいか？
組織制御で抑制できるか？

ADSビーム窓材-LBE界面での照射下物質移行に関する研究

目的：高エネルギーイオン照射により、材料/LBE界面に弾き出し損傷を与え、照射下腐食挙動や液体金属脆化の素過程である、原子の弾き出し損傷による拡散過程の実験的検証を行い、拡散や溶解による材料/LBE間の物質移行に関する知見を得る。



垂直照射試料ホルダー



はじき出し損傷の深さ分布（SRIM）

推定値　10nA/cm^2→　10h照射～　0.1 dpa

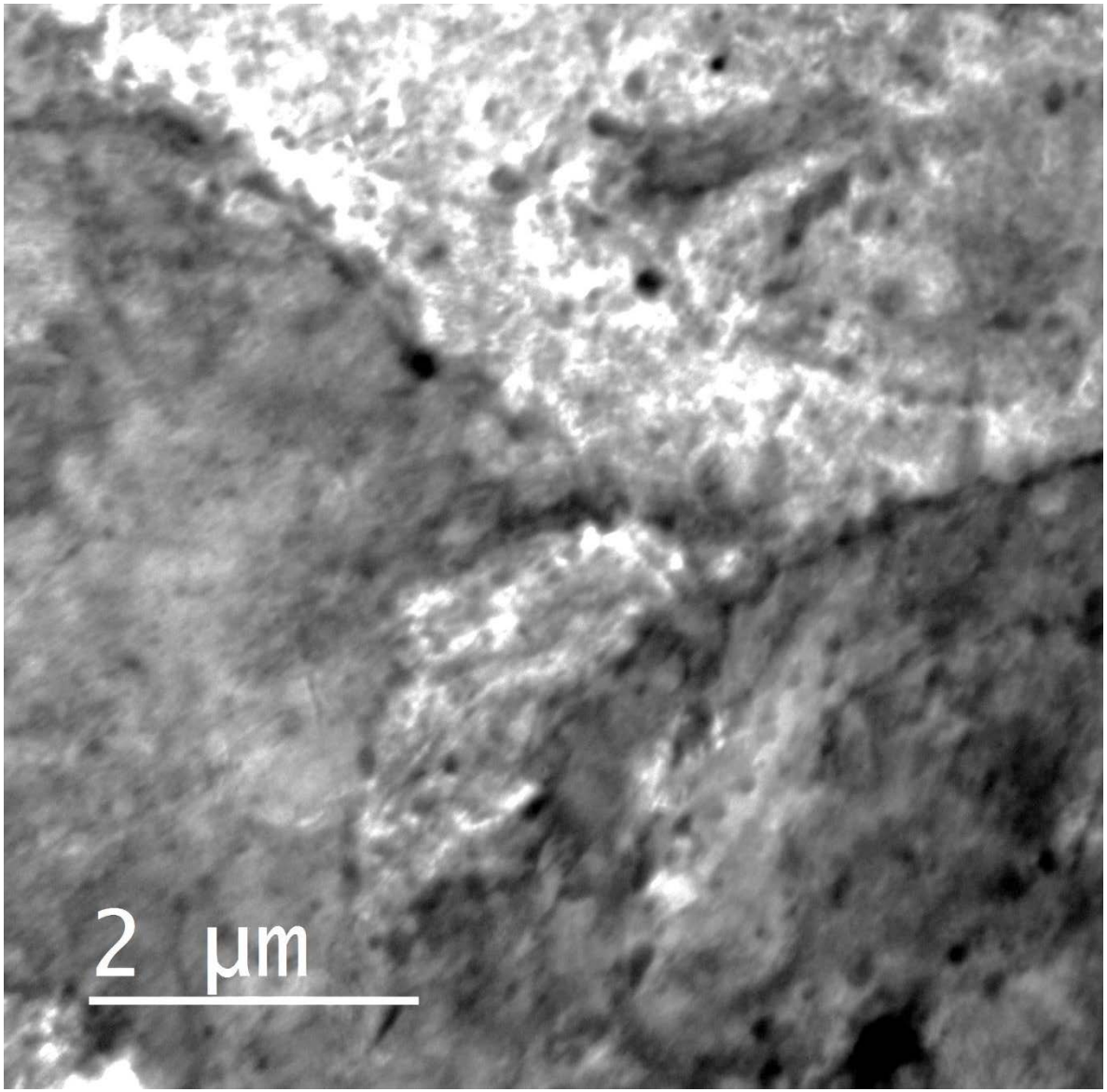
LBE: Lead-bismuth eutectic

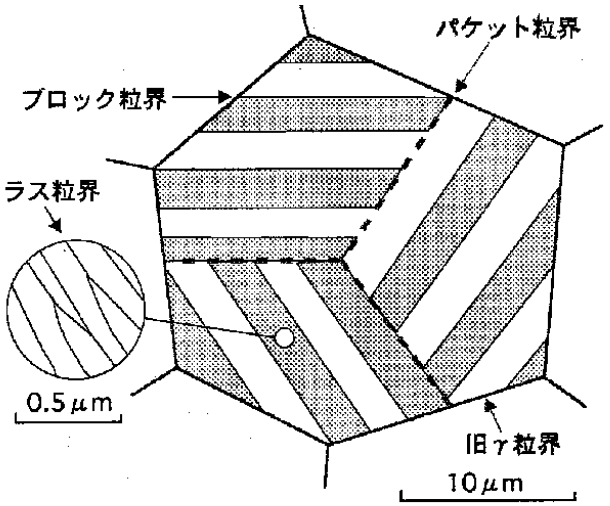
表面形態のSEM観察
断面のTEM観察
EDS元素分析

→

表面形態の変化や
材料構成原子及びPb,Bi
等物質移動（拡散）の把握

照射後のTEM写真　86 MeV-Ni^{9+} →T91@300℃





ラス (0.2μm)：小角粒界　旧γ粒 (20μm)、パケット (10μm)、ブロック (1μm) } 大角粒界

まとめ

- ADSで使用される材料の腐食・照射挙動の把握が、ビーム窓や燃料被覆管等重要なADS炉内機器の健全性評価に必要である。
- タンデム加速器等のイオン照射を用いて、腐食や液体金属脆化機構解明に必要な照射の素過程についての研究を開始した。
- このような詳細な研究は中性子照射材を用いた照射後試験では困難かつ時間がかかるため、タンデム加速器による照射実験は重要である。