



KYUSHU UNIVERSITY 2011
100th Anniversary

高速重イオン照射に伴うセラミックスの 微細構造変化の定量解析

九州大学 工学研究院

安田和弘

日本原子力研究開発機構 タンデム研究会
於 日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 2009年1月6-7日



KYUSHU UNIVERSITY



共同研究者

- 九州大学： 安永 和史、椎山 謙一、松村 晶
- 電力中央研究所： 園田 健、木下 幹康
- 日本原子力研究開発機構： 石川 法人、知見 康弘

□ 本研究の成果の一部は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として九州大学が実施した平成18年および19年度「長寿命核種変換処理用酸化セラミックスに関する研究開発」の成果を含みます。

□ 本研究は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施された成果を含みます。



酸化物セラミックスの照射損傷

- 軽水炉燃料
- 不活性燃料母相 (例えば、岩石型Pu燃料)
- 長寿命核種変換処理材料
- その他

➡ UO_2 , MgAl_2O_4 , Stabilized ZrO_2 , (CeO_2)

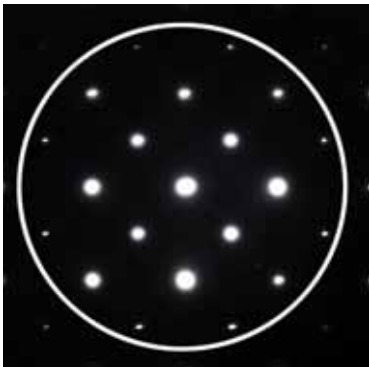
照射環境

- 弾性的はじき出し損傷
高速中性子(一次はじき出し原子)、核分裂生成物
- 電子励起
高密度電子励起・・・核分裂生成物
低密度電子励起・・・電子($\sim \text{eV/nm}$)、ガンマ線、イオン



トピックス

- 高速重イオン照射により MgAl_2O_4 結晶中に誘起されるイオントラックの構造解析
- CeO_2 結晶中に導入したはじき出し損傷、注入不活性ガス原子と高速重イオンの相互作用
～核燃料リム組織形成に関する基礎的研究～



MgAl_2O_4

Au ion $S_e=35$ keV/nm

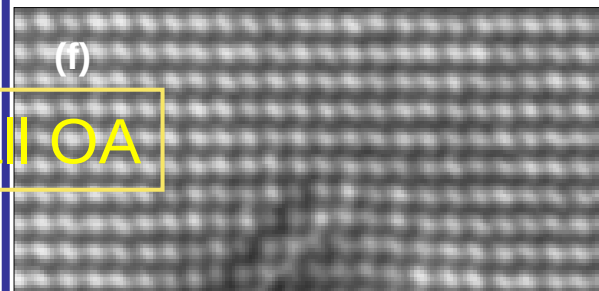
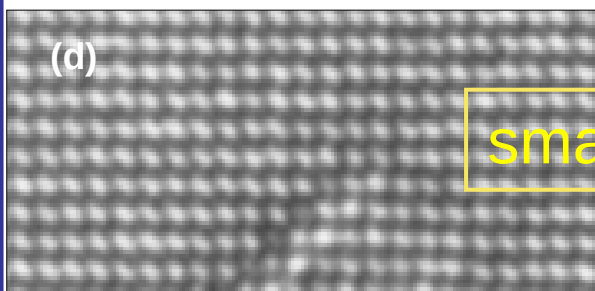
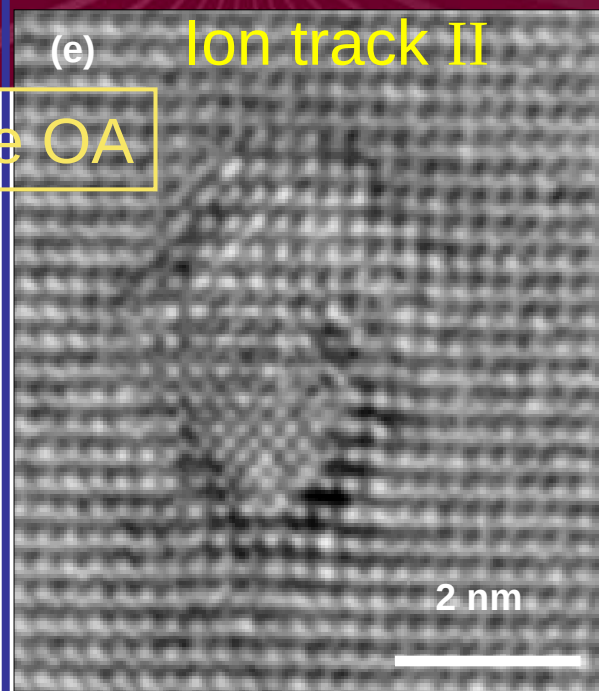
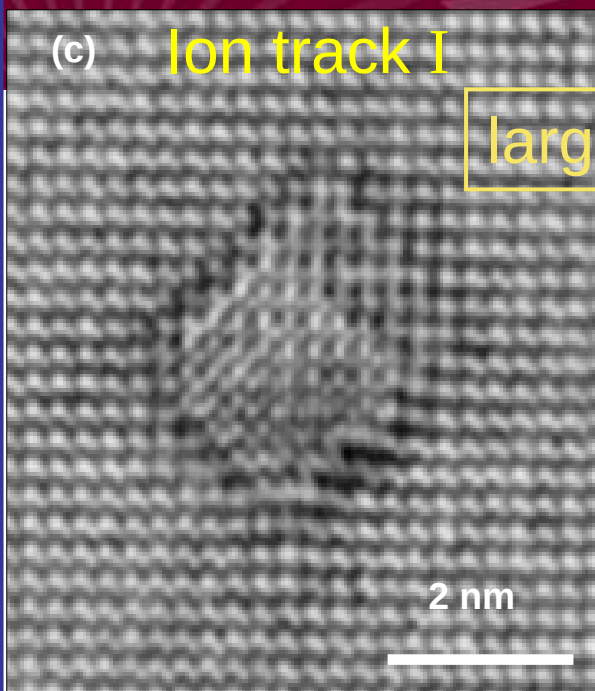
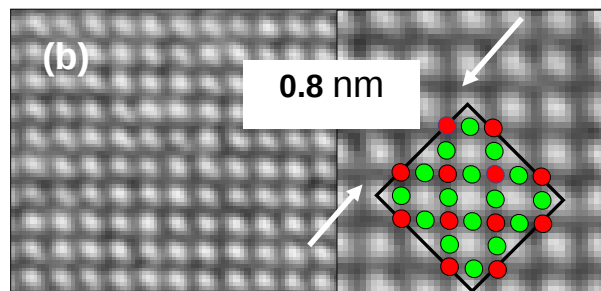
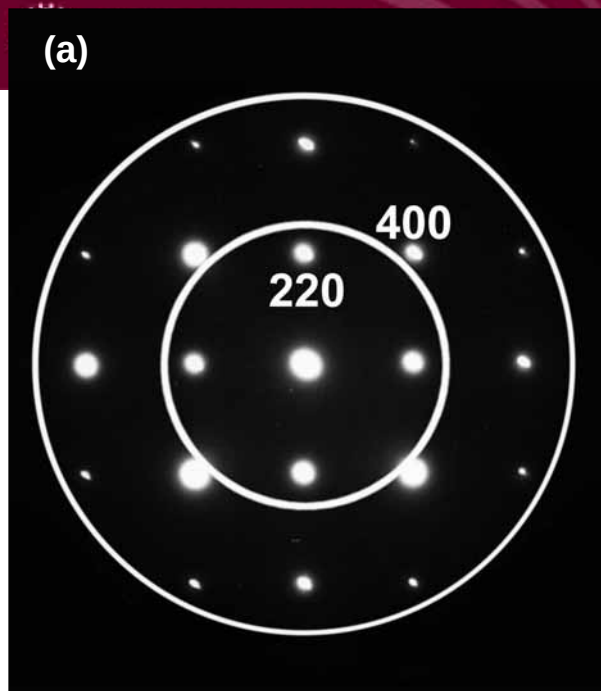
5.0×10^{15} ions/m²

Core region is not amorphous state
but maintain crystallinity.

K. Yasuda et al, NIM B. 250 (2006) 238.

10 nm

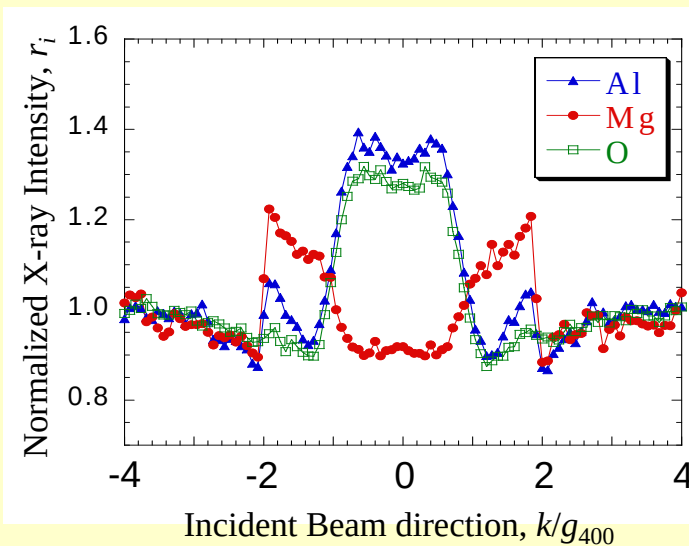
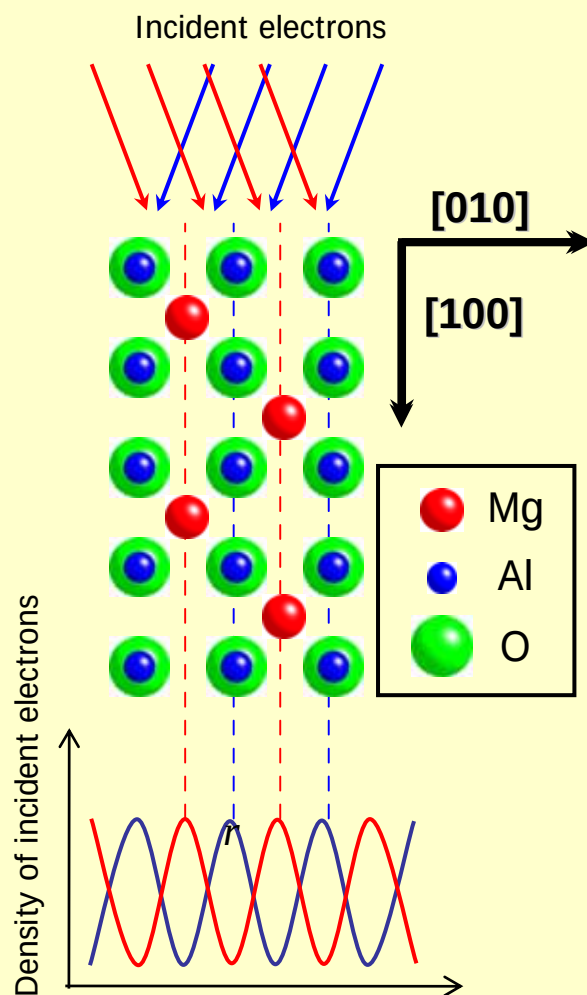
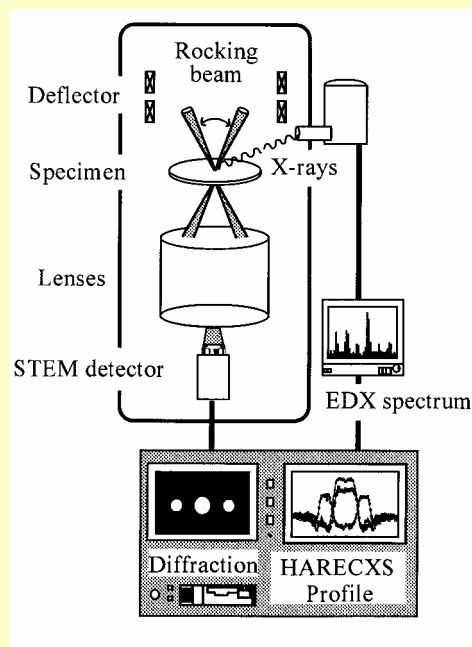




- The core region is considered to undergo phase transformation into defective rock-salt structure
- The cause for the phase contrast in BF image is the decrease in the atomic density at the core region?



高角度分解電子チャンネリングx線分光法:HARECXS

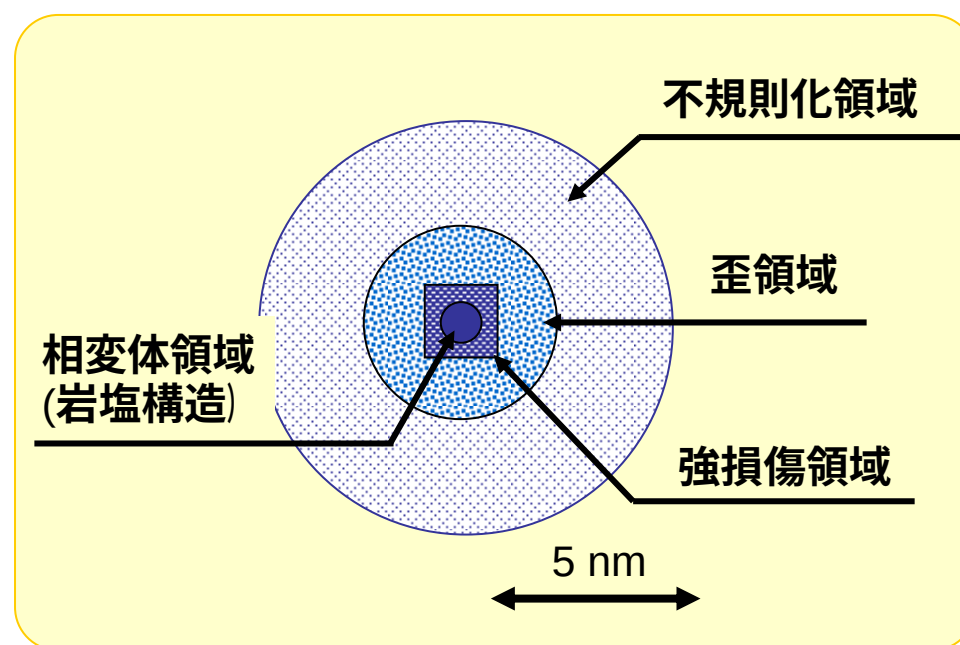
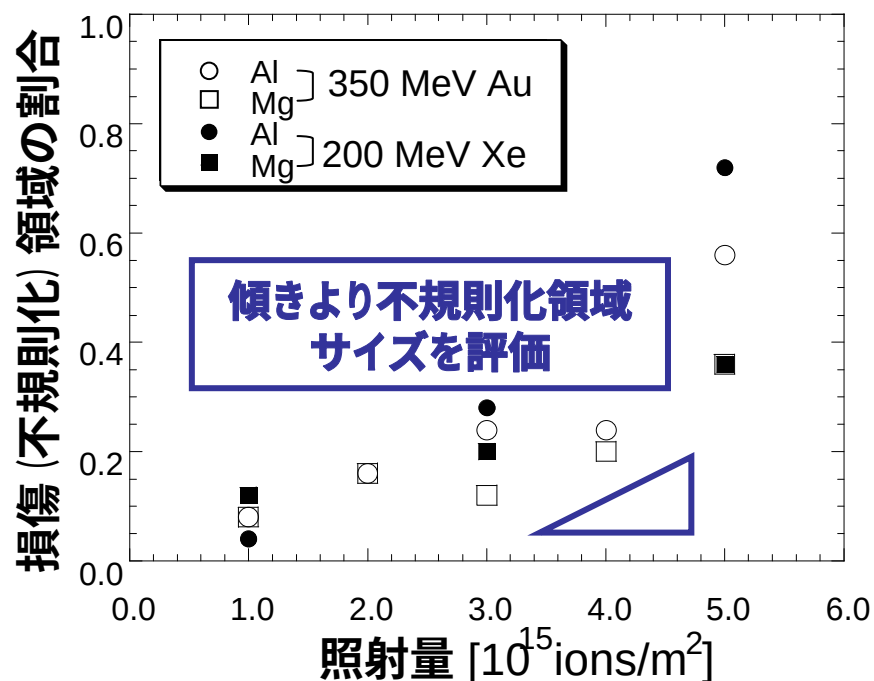
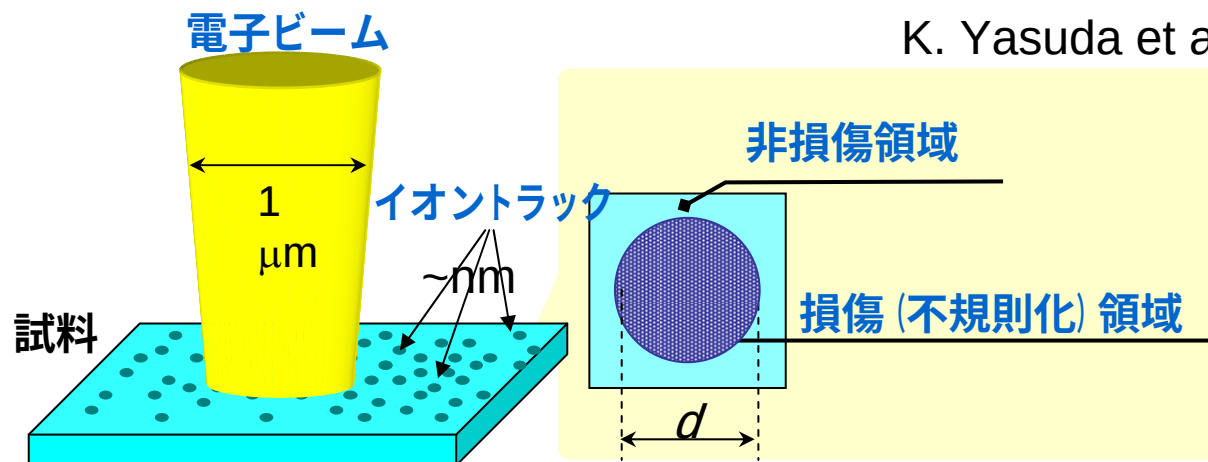


電子線入射方位



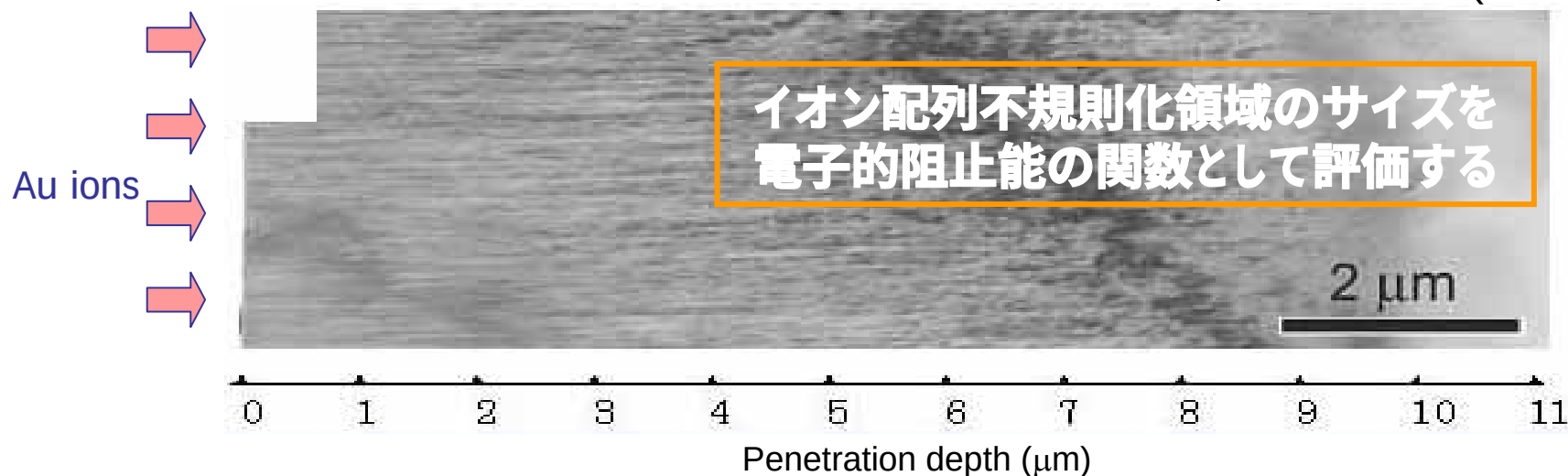
不規則化領域の体積分率の評価

K. Yasuda et al, NIM B. 250 (2006) 238.

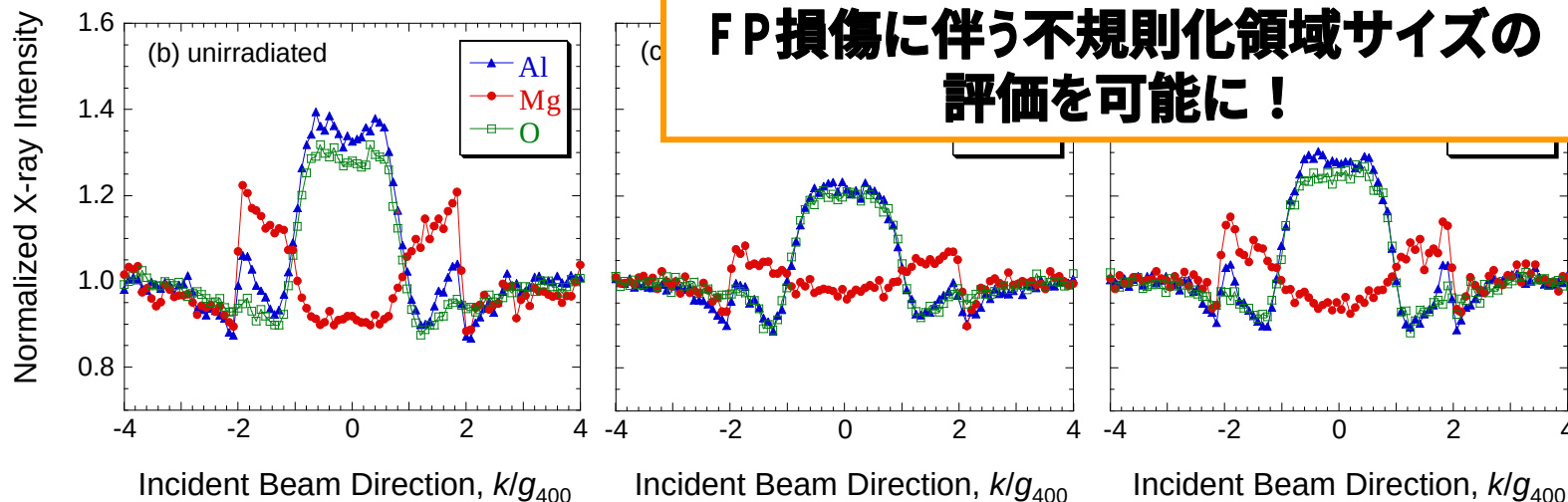


イオン飛跡に沿ったイオン配列の定量解析

K. Yasuda et al, NIM B. 266 (2008) 2676.



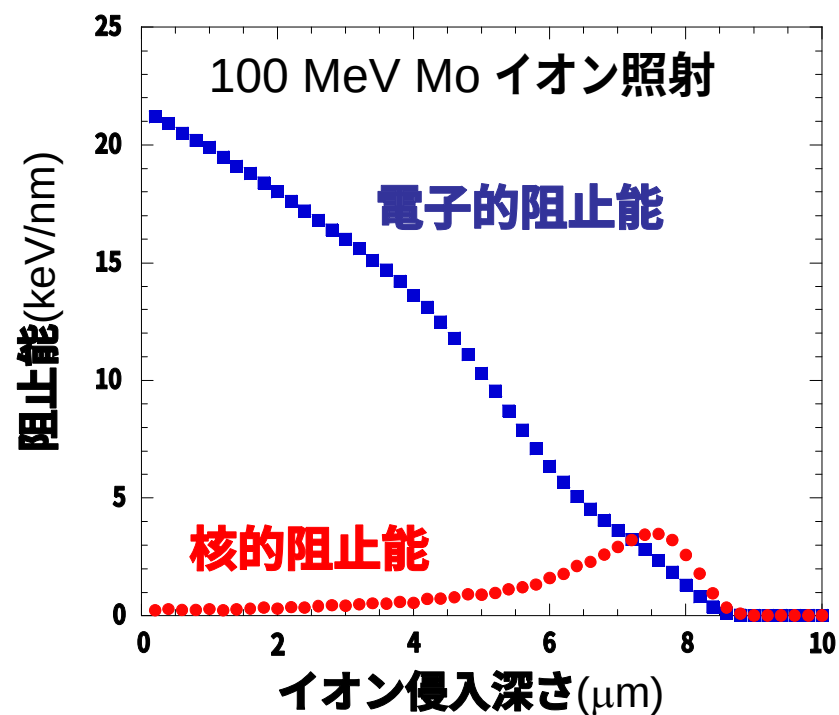
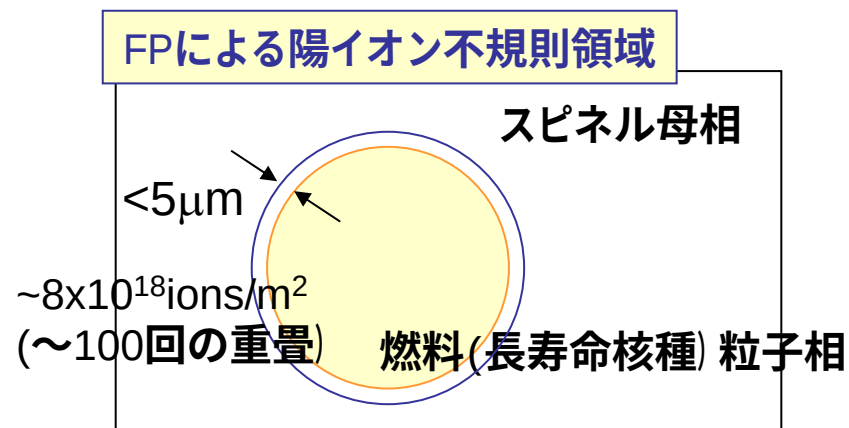
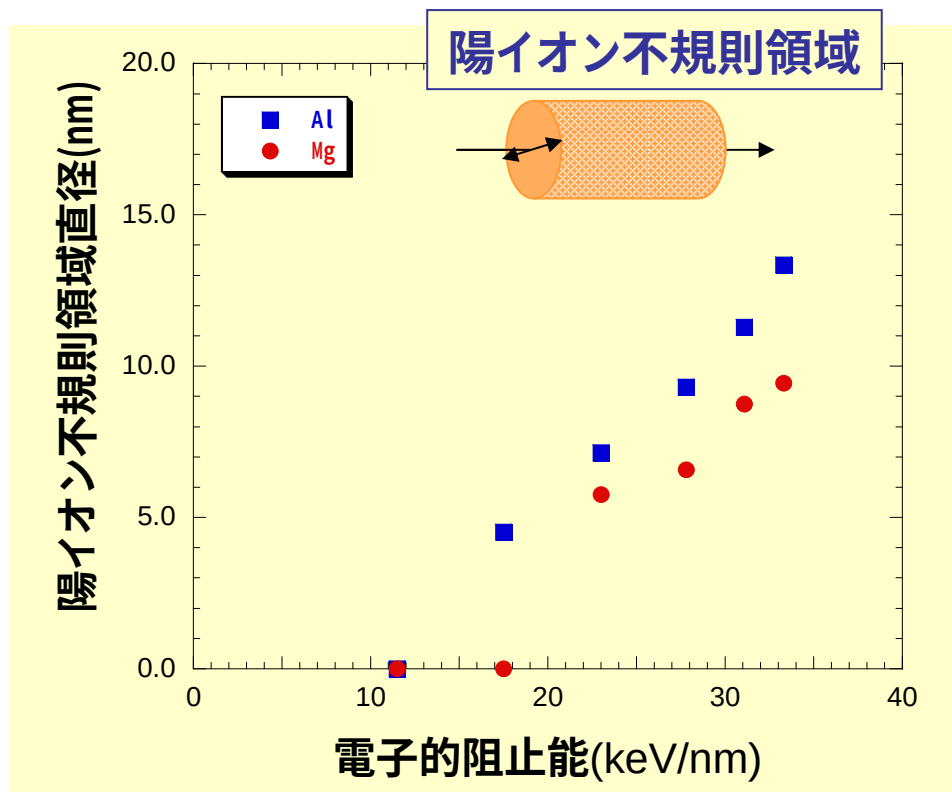
規格化特性X線強度



F P 損傷に伴う不規則化領域サイズの
評価を可能に！

電子線入射方向

不規則化領域サイズ vs 電子的阻止能



K. Yasuda et al, NIM B. 266 (2008) 2676.

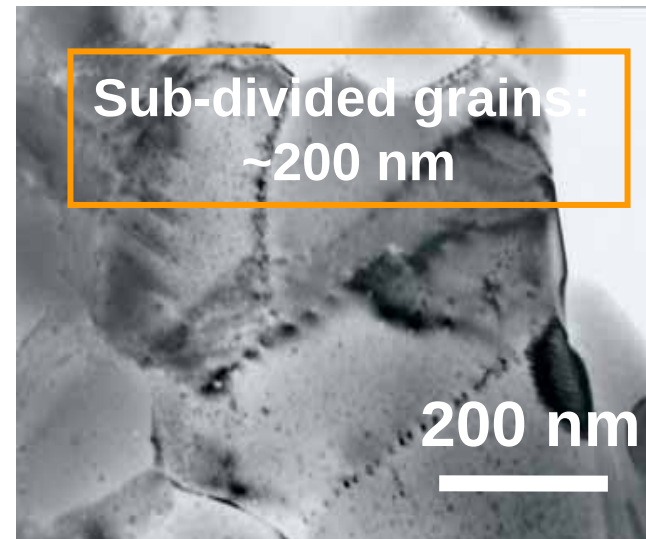
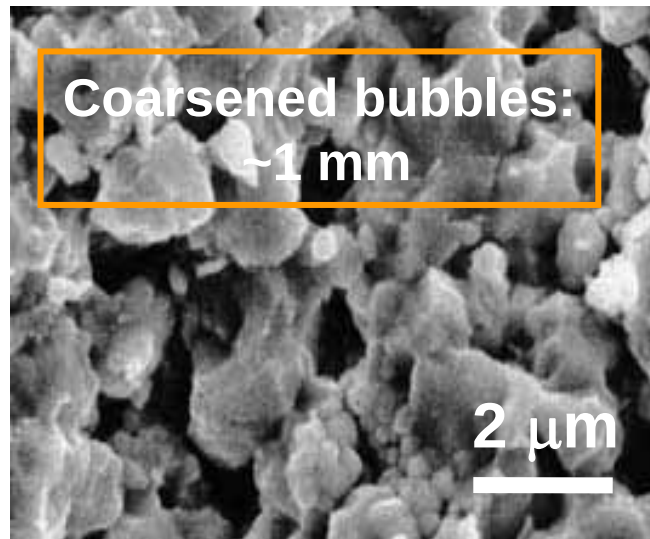


トピックス

- 高速重イオン照射により MgAl_2O_4 結晶中に誘起されるイオントラックの構造解析
- CeO_2 結晶中に導入したはじき出し損傷、注入不活性ガス原子と高速重イオンの相互作用
～核燃料リム組織形成に関する基礎的研究～



‘Rim structure’ of high burnup LWR fuel



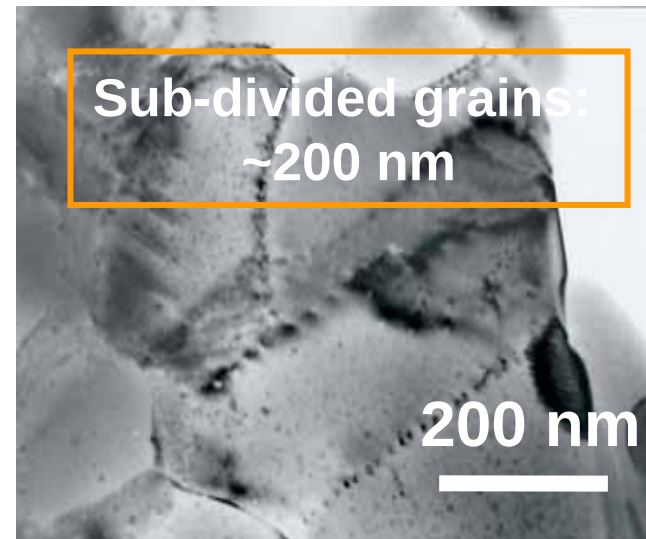
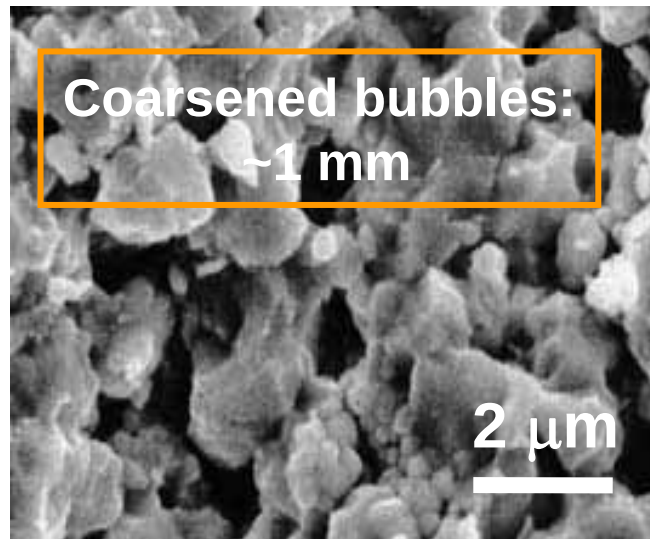
T. Sonoda et al. NIMB 191 (2002) 622.

Rim structure formation (~70 GWd/t)

- Displacement damage level: ~2500 dpa
- Amount of fission product: ~14 at.% FP (2 at.% Xe)



‘Rim structure’ of high burnup LWR fuel



T. Sonoda et al. NIMB 191 (2002) 622.

□ Simulation experimental study with CeO_2

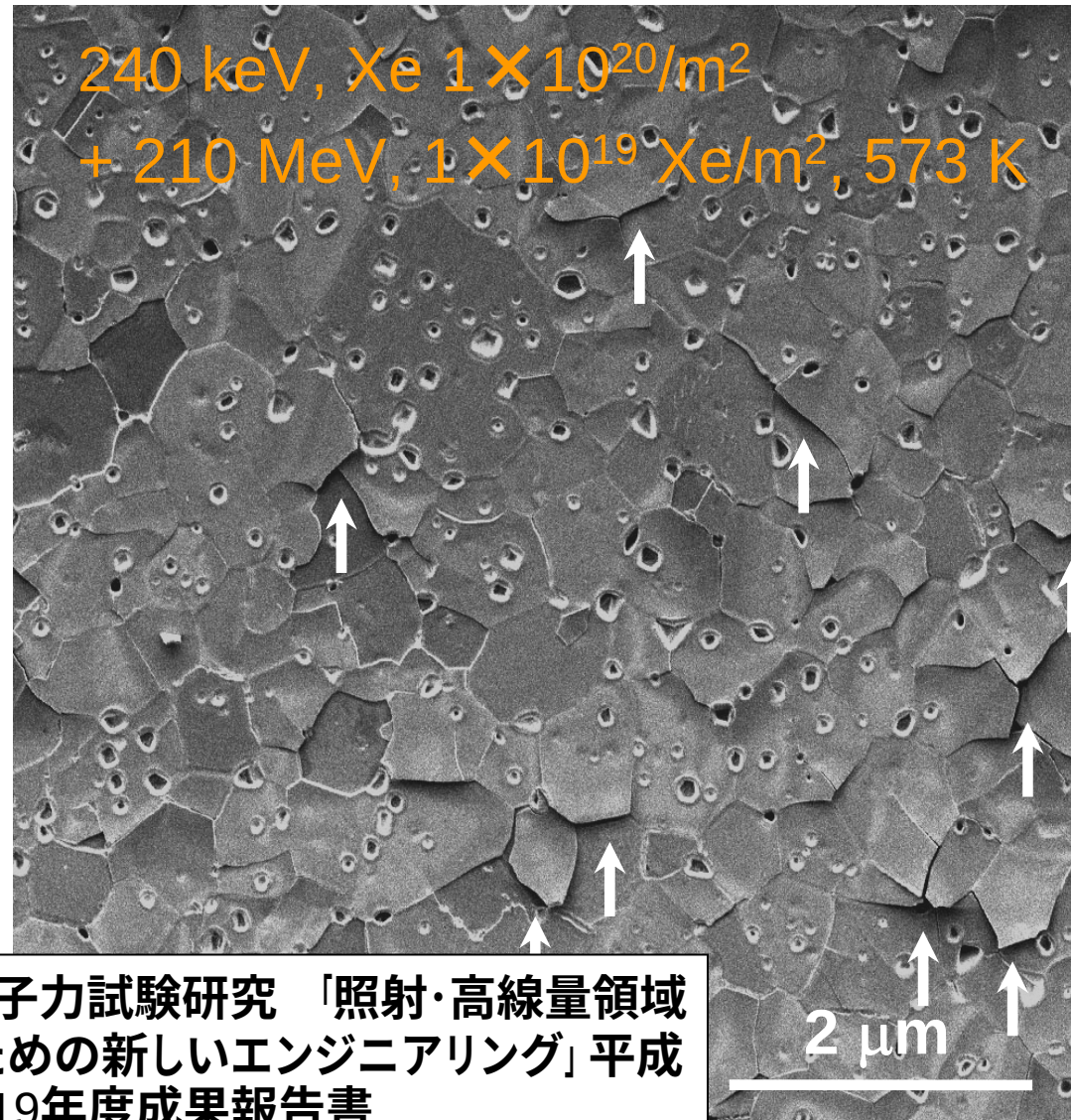
➤ **240 keV Xe ions** (130 dpa (disl. Networks) +2 at% Xe)



➤ **210 MeV Xe ions** (28 keV/nm overlapping of ion tracks)



Change in surface SEM morphology

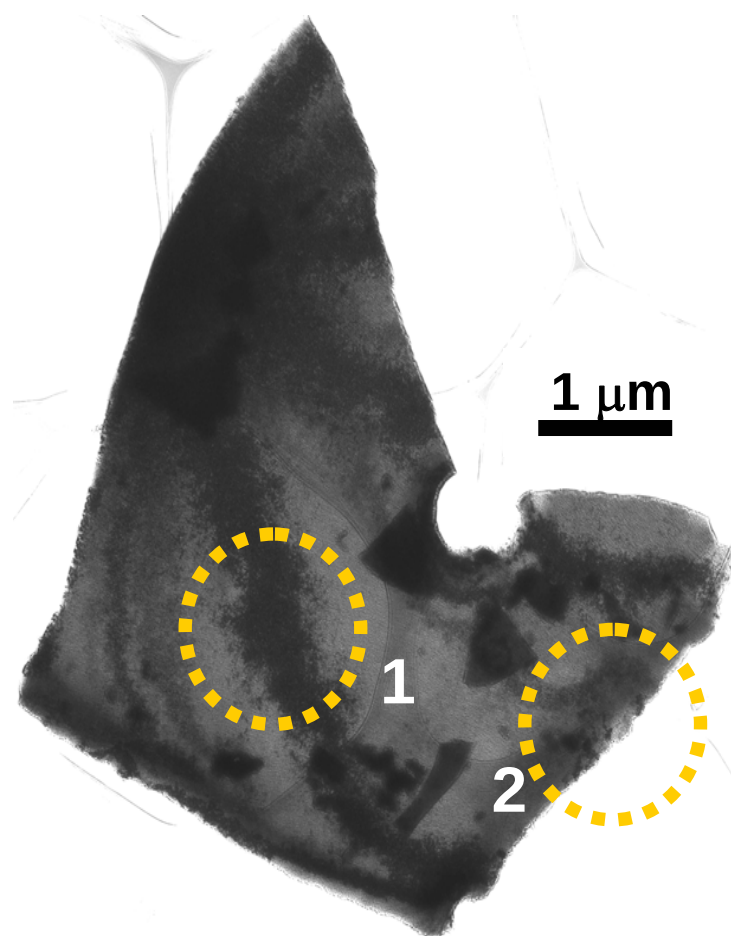


文部科学省 原子力試験研究 「照射・高線量領域
の材料制御のための新しいエンジニアリング」平成
19年度成果報告書

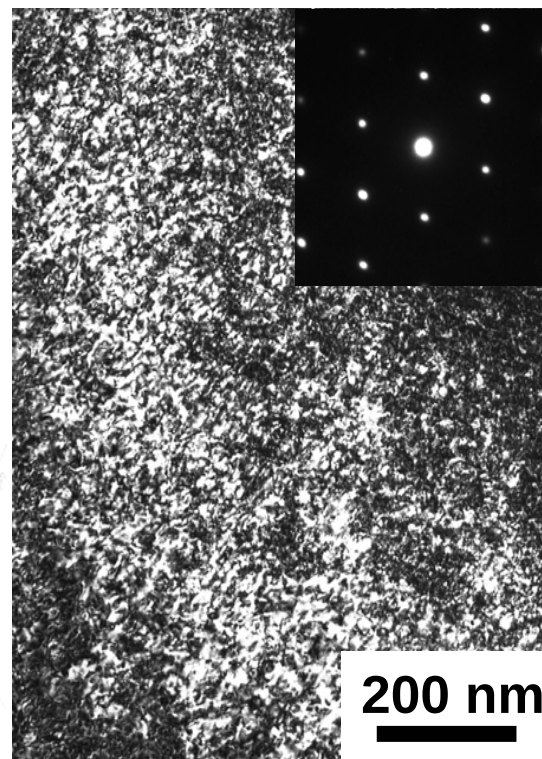


Subgrain formation in CeO_2

文部科学省 原子力試験研究「照射・高線量領域の材料制御のための新しいエンジニアリング」平成19年度成果報告書

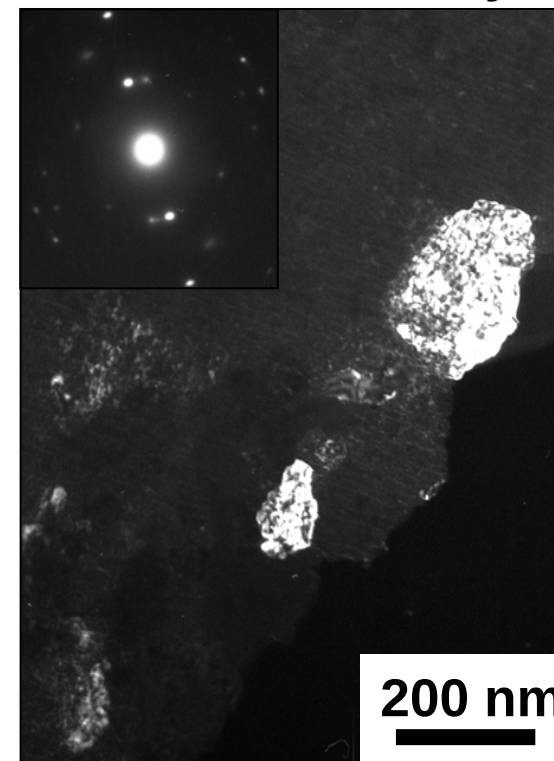


1: Grain



Tangled dislocations with uniform distribution inside the grain.

2: Grain boundary

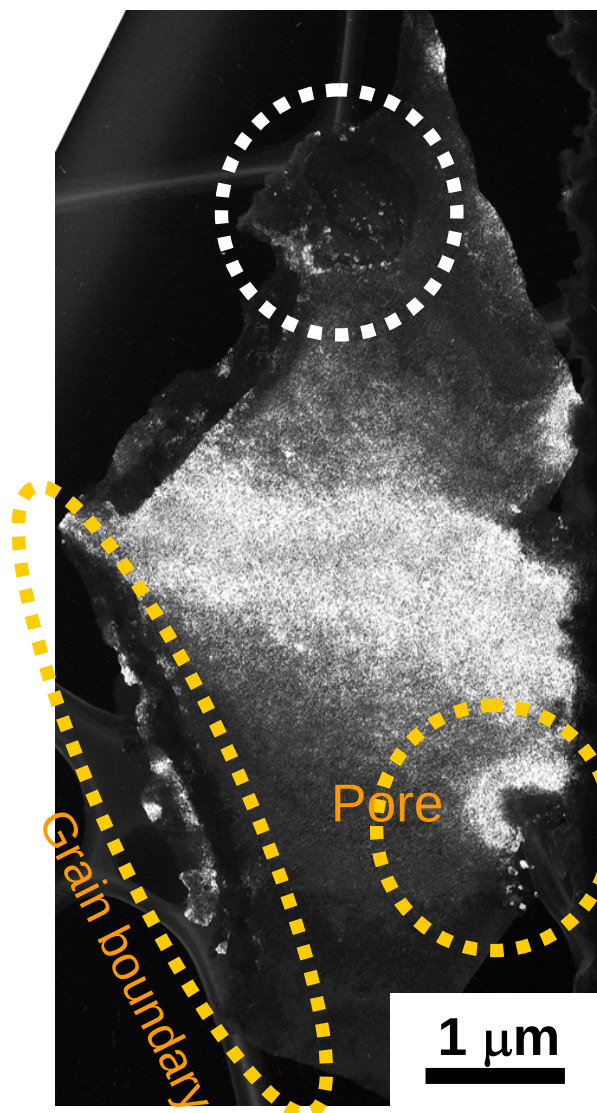


Subgrain formation. Inclined angle is 15 degrees to the original grain.

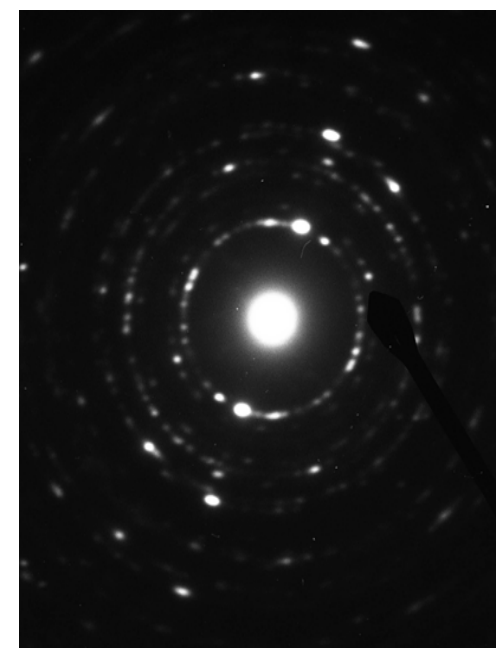
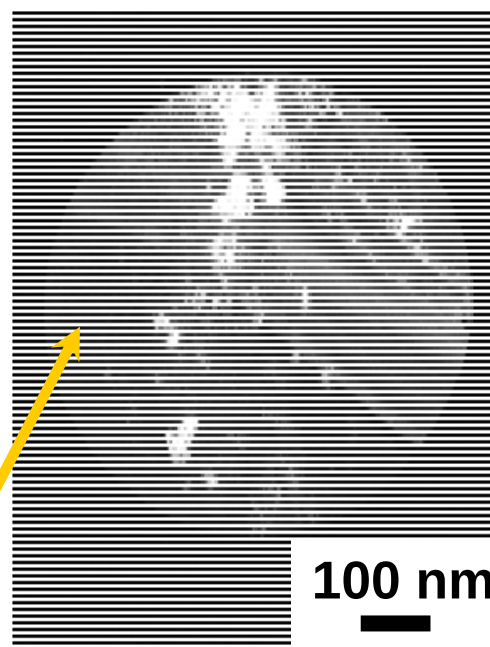
(240 keV, 1.3×10^{20} Xe/m², R.T. + 210 MeV, 1×10^{19} Xe/m², 573 K)



文部科学省 原子力試験研究「照射・高線量領域の材料制御のための新しいエンジニアリング」平成19年度成果報告書



(a) Dark-field image with SAA (b) Diffraction pattern



Many subgrains formation with *random orientation* distribution (below 50 nm in diameter).

関連結果はポスター (安永 和史 他) にて発表



まとめ

- MgAl_2O_4 中に形成されるイオントラックの原子構造とイオン配列を原子レベルで解析した。
⇒ 電子の阻止能値による整理、イオントラックの重畳効果
- 高燃焼度核燃料のリム組織形成に関して、高密度電子励起に伴う転位組織の再配列・回復の重要性を示した。
- JAEAタンデム加速器の有用性
 - ・ 多種、広範囲エネルギー照射
 - ・ 高制御照射チェンバー (照射量、線束密度均一性、温度制御)
 - ・ インplanターとの併用
 - ・ UO_2 の使用
 - ・ その他