

Cuクラスタ形成に対する応力下照射の影響

原子力安全システム研究所

藤井 克彦、福谷 耕司

京都大学

木村 晃彦、笠田 竜太

物質・材料研究機構

大久保 忠勝

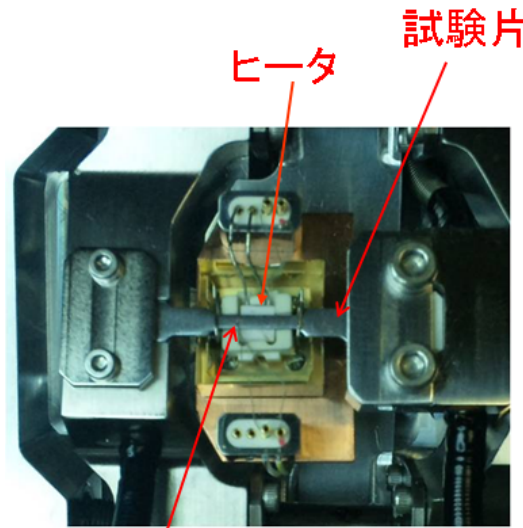
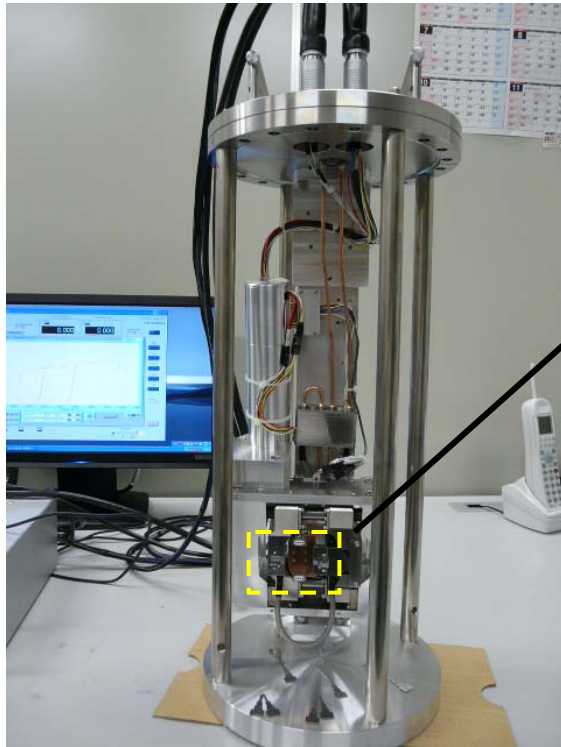
- 原子炉容器は内圧(PWR約15MPa)に起因する外部応力(150MPa程度の周方向引張応力)が作用した状態で中性子照射を受ける
- 照射脆化の評価に用いられる監視試験片には照射中に応力は作用していない
- 1960年代の照射脆化に対する応力効果に関する幾つかの研究結果からその影響は無いか小さいと考えられてきた
- メカニズムに基づいた応力影響の評価は行われていない

原子炉容器鋼の照射脆化に対する外部応力の影響とそのメカニズムを解明し、照射脆化予測の高度化に資する。

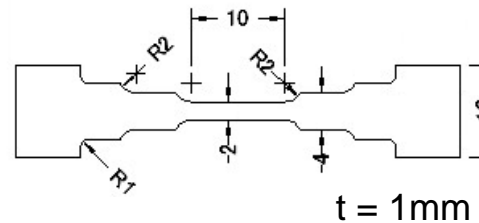
Fe-Cuモデル合金に対して単軸引張応力下でイオン照射を行い、Cuクラスタ形成に対する応力の影響を3次元アトムプローブでマイクロ組織観察することで調べ、クラスタ形成による照射硬化に対する応力影響の基礎課程を検討する。

引張応力下イオン照射ステージ

INSSと京都大学の共同研究で、京都大学のイオン照射設備DuETの照射チャンバーに組み込むことができる温度制御が可能な引張応力下イオン照射ステージを開発



微小引張試験片の形状



【主な性能】

- 最大荷重 2kN
- 引張速度
0.0002~0.2
mm/min
- 試験温度
室温~500°C

供試材: Fe-Cu合金(0.6%Cu)

イオン照射: 京大DuET, 6.4MeV Fe, 1dpa @ 600nm深さ

照射温度	290°C	RT
引張応力	60MPa なし	60MPa なし

耐力 120MPa、耐力の1/2相当の引張応力下で照射

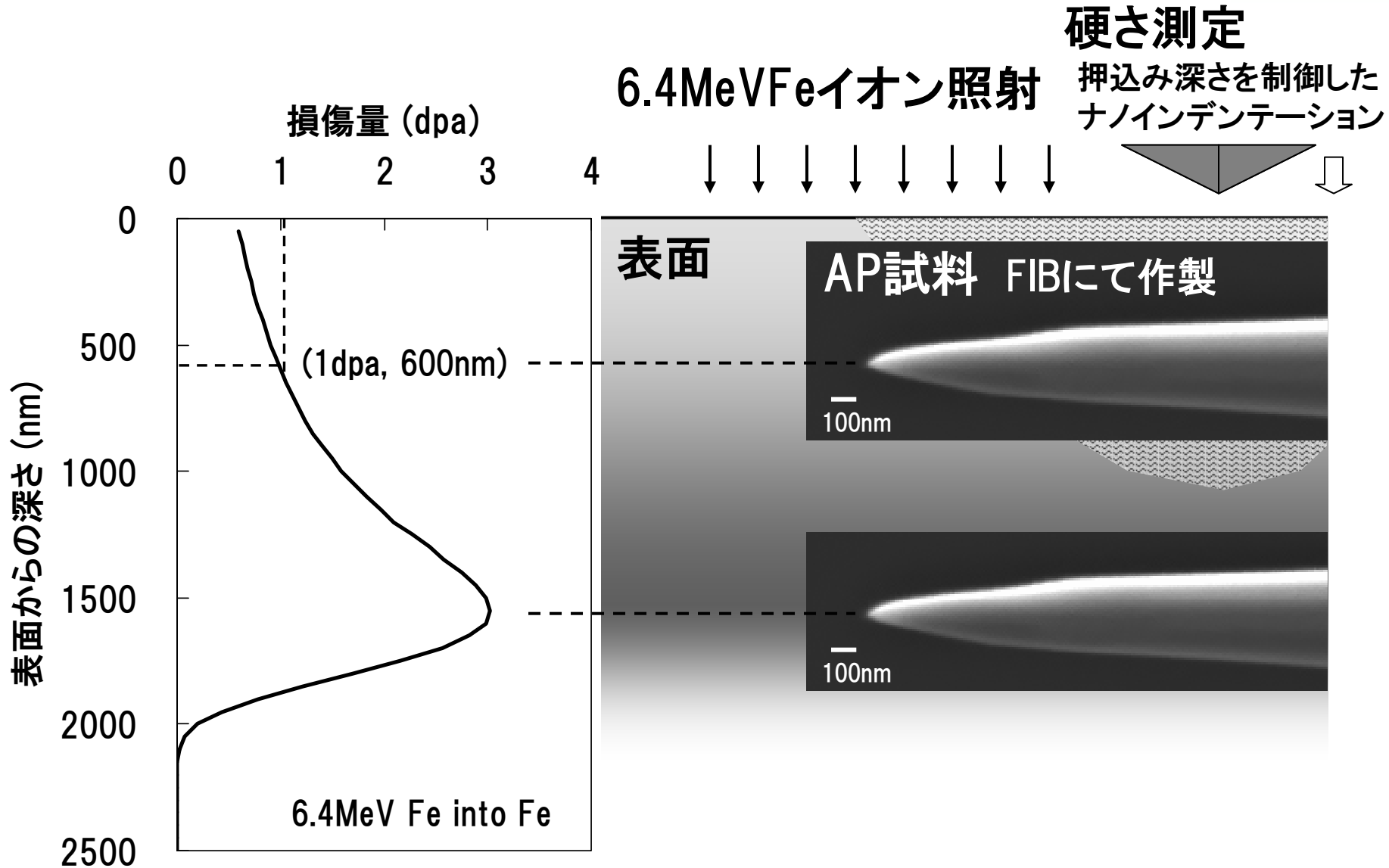
機械的特性の測定: ナノインデントー硬さ測定

マイクロ組織分析: 3次元アトムプローブ観察 & クラスタ解析

LAWATAP @NIMS

LEAP3000HR-X @ふげん

損傷分布と材料試験・分析の関係



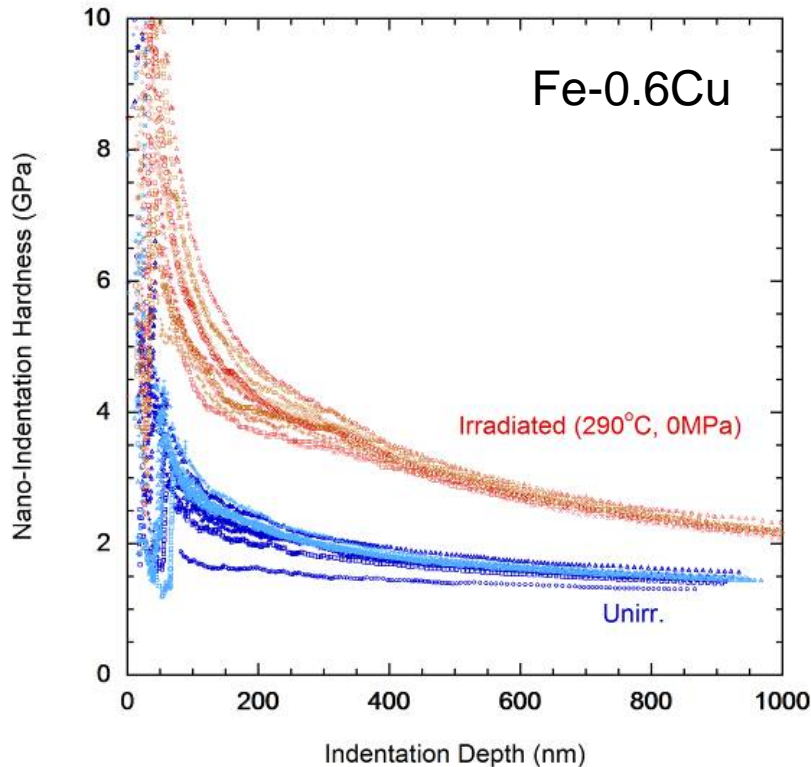
ナノインデンテーション硬さ測定結果



深さ方向への硬さの連続測定 (Agilent G200)

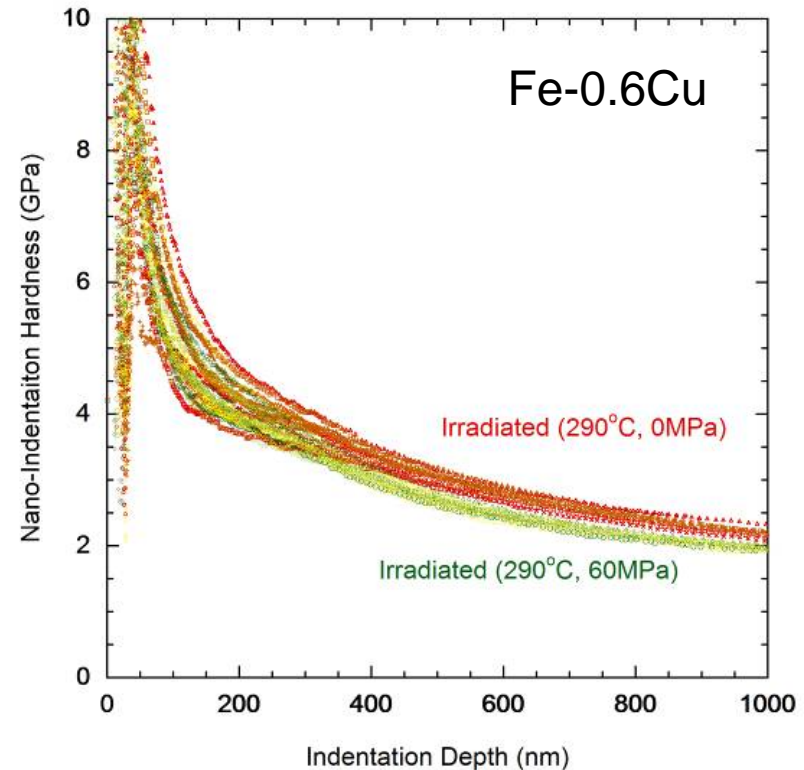
照射による硬さの変化

照射材 > 未照射材



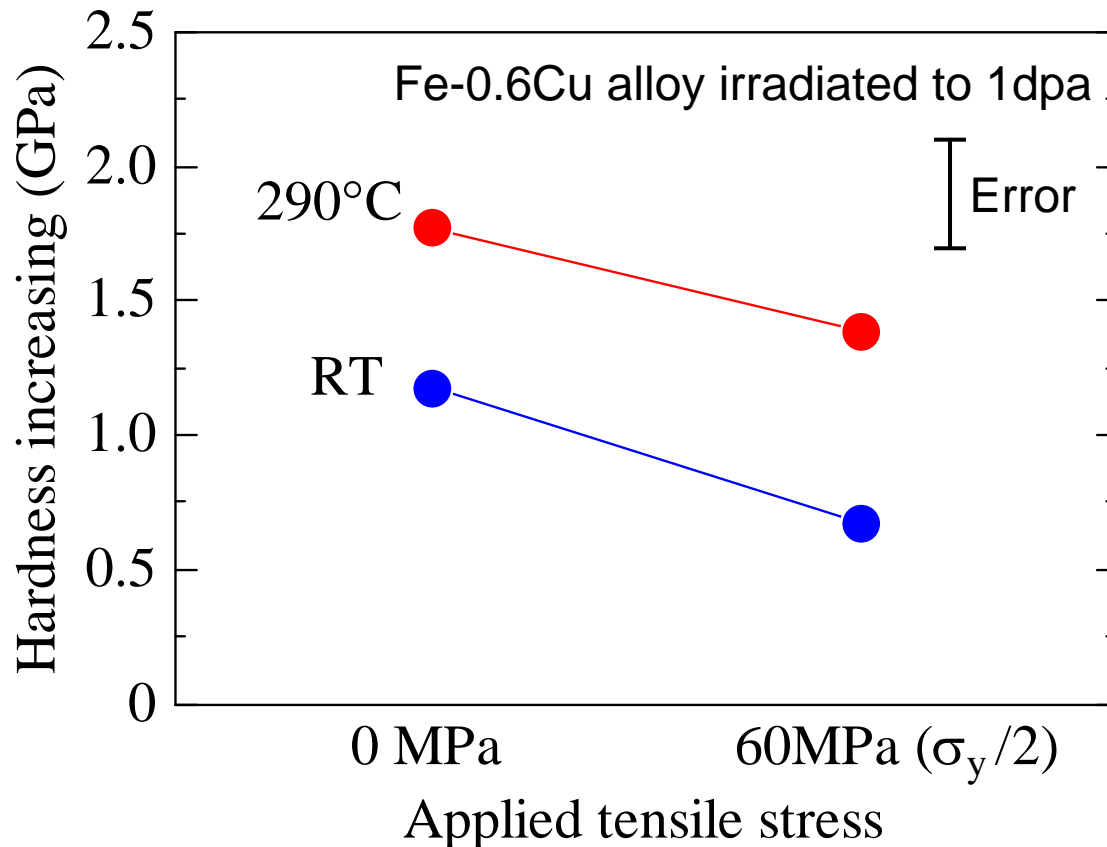
応力下照射の影響

応力あり > 応力なし



照射硬化に対する応力下照射の影響

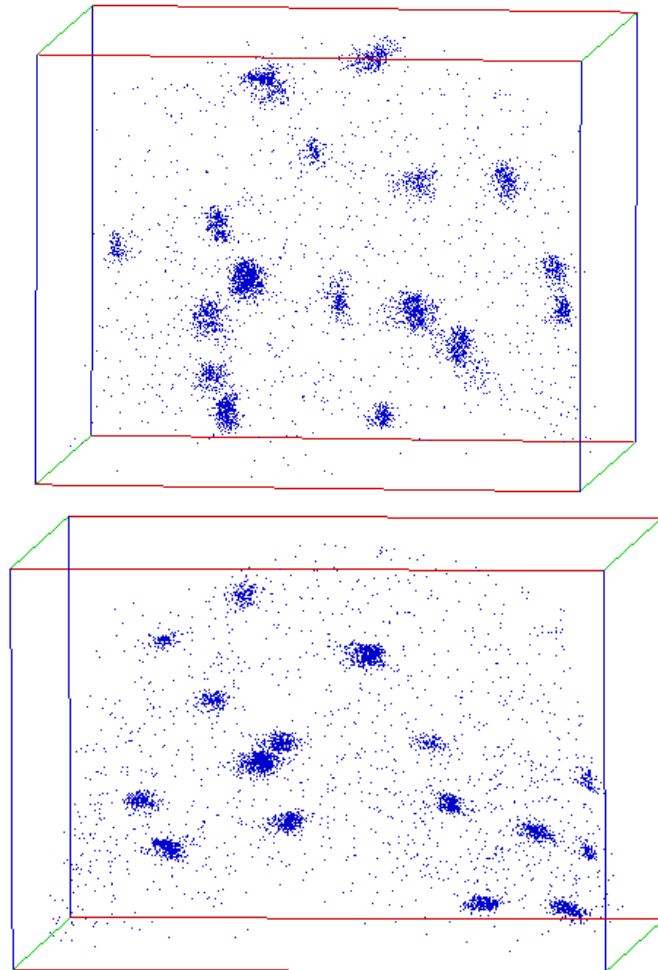
- 300nm深さの硬さを基準に照射硬化量を比較
- 290°Cと室温照射でともに応力ありの方が硬化量が小さい
- 応力下照射で照射硬化が抑制される



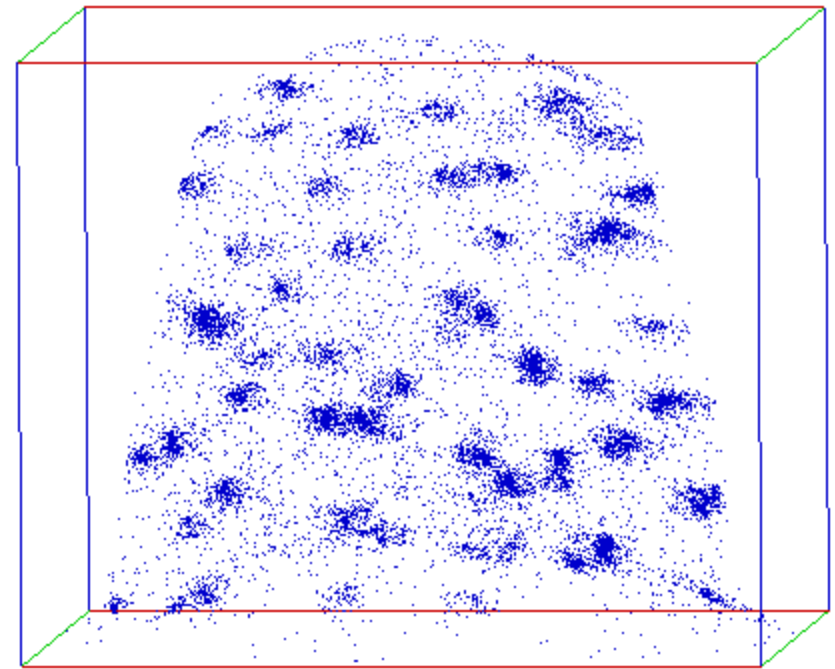
アトムプローブ(LAWATAP)観察結果

照射量 1.0dpa (600nm深さ) のCu原子マップ

0MPa



60MPa



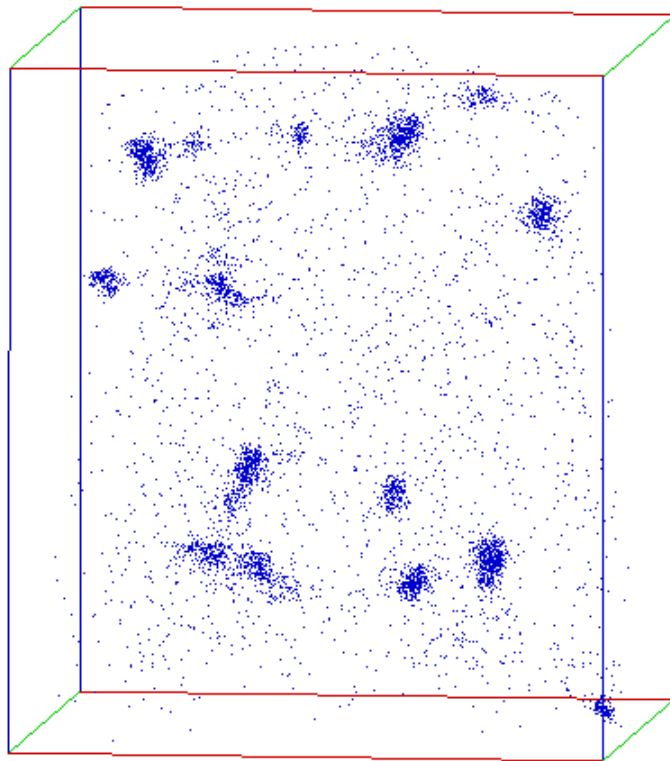
10nm

測定: LAWATAP
レーザーパルスモード

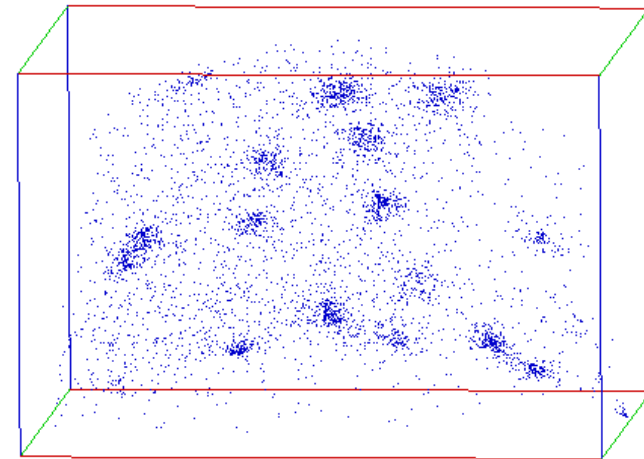
アトムプローブ(LAWATAP)観察結果

照射量 0.7dpa (200nm深さ) のCu原子マップ

0MPa



60MPa



10nm

測定: LAWATAP
レーザーパルスモード

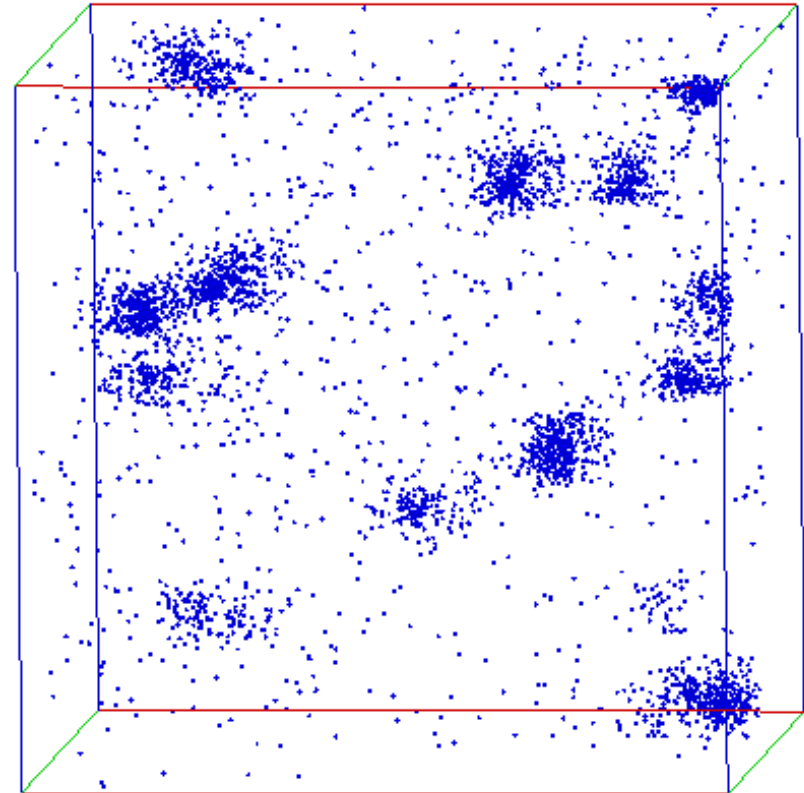
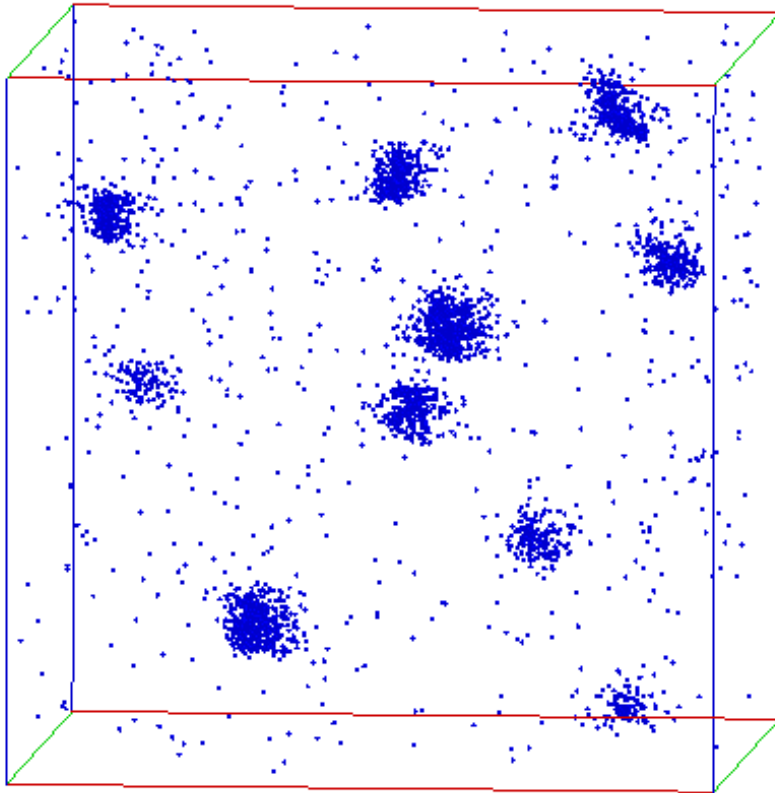
Cuクラスタリングに対する応力の影響

応力下照射の方が、Cuクラスタが不明瞭

290°C/1dpa照射Fe-0.6Cu合金中のCu原子マップ

0MPa

60MPa



10nm

Cuクラスタ解析

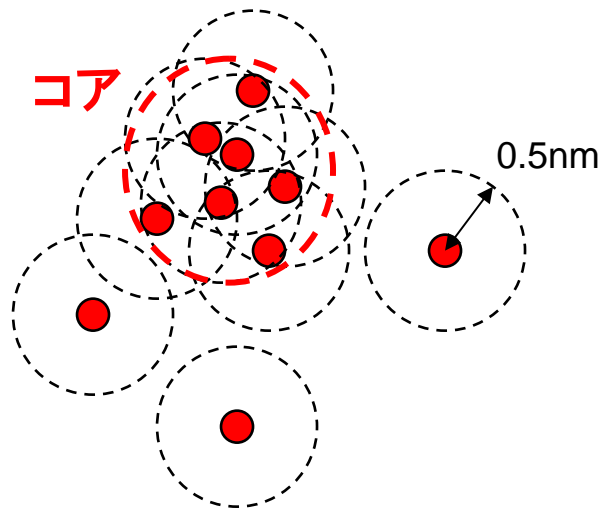
クラスタ解析法 回帰探査アルゴリズム

クラスタの定義

コア元素: Cu

しきい距離: 0.5nm

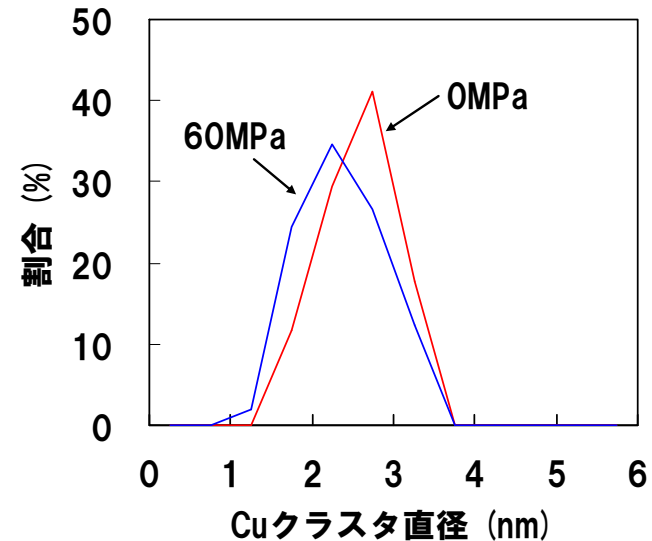
コア原子数下限: 20原子



Fe-0.6Cu合金 290°C, 1dpa照射

応力 (MPa)	Cuクラスタ	
	直径(nm)	数密度(/m ³)
0	2.54	3.5×10^{23}
60	2.35	5.7×10^{23}

応力下照射は低温照射と同様な効果



Orowanモデルによる硬化の検討



Orowanモデル

$$\Delta\sigma = \alpha\mu b\sqrt{N \cdot d}$$

N : 欠陥の密度

d : 欠陥の直径

α : 硬化係数

μ : せん断係数

b : バーガスベクトル

Fe-0.6Cu合金 290°C, 1dpa照射

応力 (MPa)	Cuクラスタ			ΔH (GPa) 測定値
	直径(nm)	数密度(/m ³)	\sqrt{Nd} (/m)	
0	2.54	3.5×10^{23}	3.0×10^7	1.83
60	2.35	5.7×10^{23}	3.6×10^7	1.62

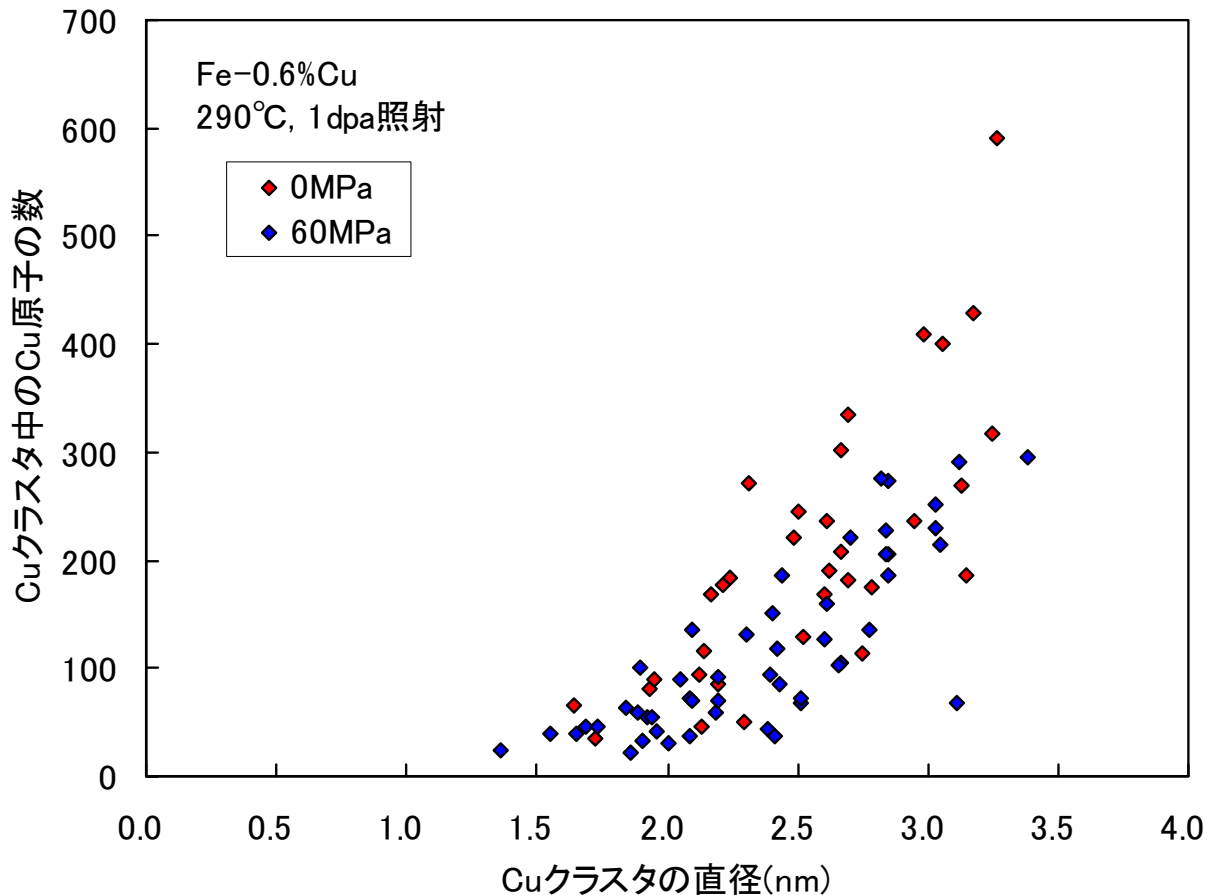
- 観察されたCuクラスタの直径と密度から見積もられる硬化量はナノインデンターの測定結果と逆の傾向
- 異なる硬化係数(応力下照射でより小さい係数)の設定が必要? $\alpha_{60\text{MPa}} = (0.7 \sim 0.8) \times \alpha_{0\text{MPa}}$

Cuクラスタに対する応力の影響(1)



Cuクラスタ直径と含まれるCu原子数との関係

応力下照射で形成したクラスタの方が、同じ大きさのクラスタでCu含有量が小さい(Cu濃度が低い)傾向

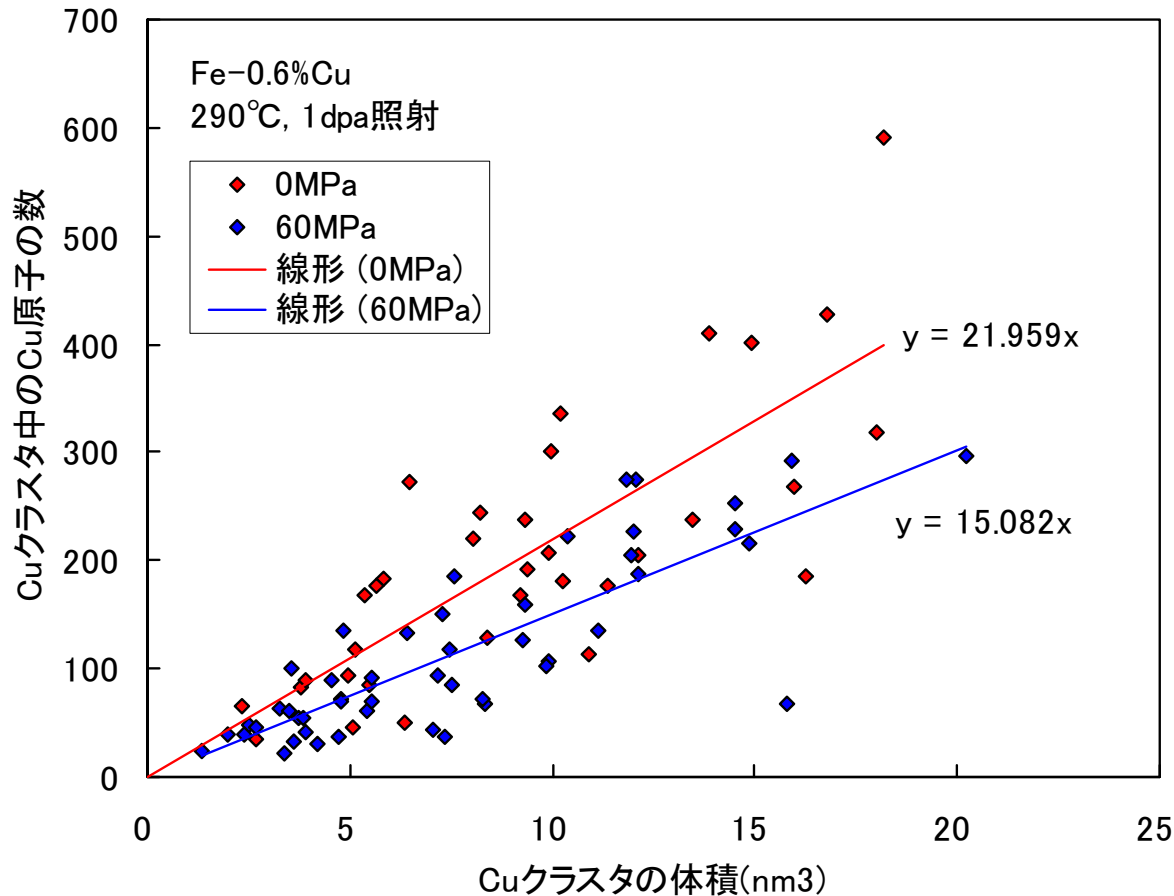


Cuクラスタに対する応力の影響(2)

Cuクラスタ体積と含まれるCu原子数との関係

単位クラスタ体積あたりのCu原子数

0MPa: 22個、60MPa: 15個



Cuクラスタに対する応力の影響(3)



- 単位クラスタ体積あたりのCu原子数は、応力なしとありの場合でそれぞれ**22原子/nm³**と**15原子/nm³**
LAWATAPのイオン検出効率を50%と仮定すると
Cu原子の見かけの数密度は、応力なしとありの場合でそれぞれ**44原子/nm³**と**30原子/nm³**
- 純鉄における数密度は91原子/nm³であるので、数密度の比からCuクラスタ中の見かけのCu濃度を計算すると、負荷応力なしとありの場合でそれぞれ**48at%**と**33at%**になる。

Cuクラスタと刃状転位の相互作用の計算

転位の張り出しに対するクラスタ中のCu濃度の影響

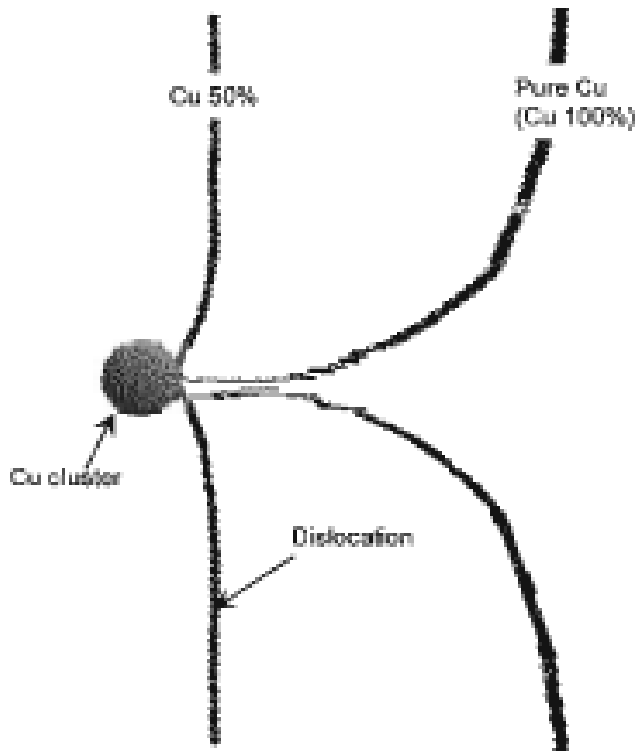


図 4-1: 異なる銅濃度のクラスタにおける転位の最大張り出し形状の比較

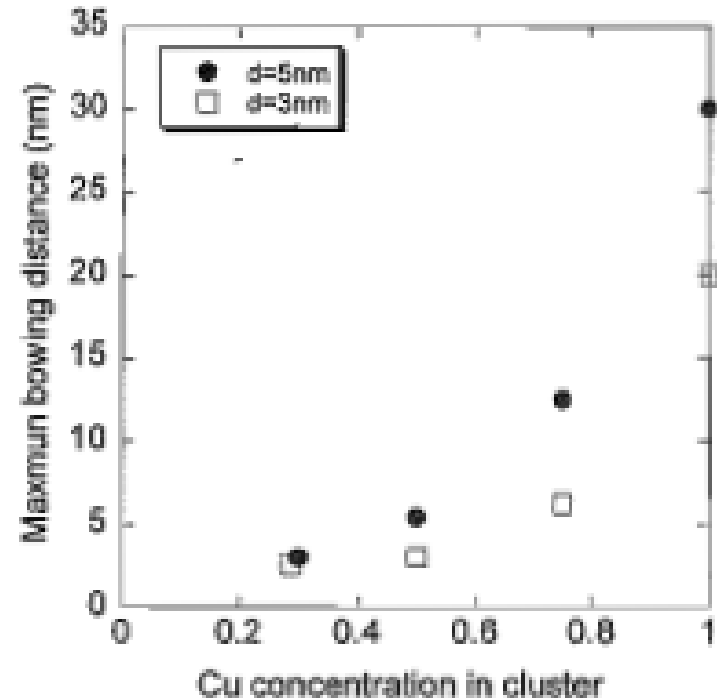


図 4-2: クラスタ中の銅濃度が最大張り出し量におよぼす影響

- Fe-Cuモデル合金を用いて、応力下照射が照射硬化とCuクラスタ形成に与える影響を調べた。
 - ✓ 引張応力(60MPa:耐力の1/2相当)下で照射された方が、照射硬化が小さい。
 - ✓ 引張応力下で照射された方が、Cuクラスタの直径が小さく、数密度は大きい。
 - ✓ 引張応力で照射された方がクラスタが不明瞭である。
- Cuクラスタ中のCu濃度によりクラスタの硬化係数が変化することが実験的に示唆された。
- 引張応力が空孔機構によるクラスタ形成を抑制することが示唆された。