

# 压力容器鋼における 照射欠陥挙動のCU濃度依存性

九大総理工 ○荒瀬 史朗 進 崇一郎  
九大応力研 渡辺 英雄 吉田 直亮  
UCSB 山本 琢也 G.Robert Odette

# 背景、目的

## 低合金鋼の照射脆化メカニズム

1. 銅析出物
2. マトリクス欠陥 (I, V 転位ループ等)

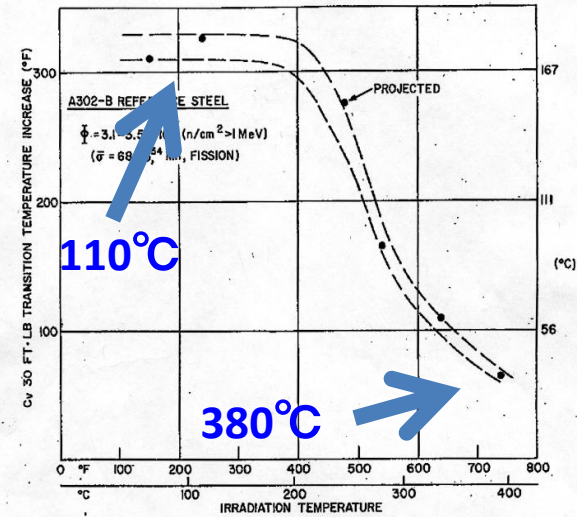
● 照射初期の硬度上昇はCuの析出、照射後期にはマトリクス欠陥(高経年化に影響)が要因の一つ → 脆化予測式

● 圧力容器の入口、出口付近では定常温度288°Cから数十度異なる温度になっている

右図: 脆性遷移温度の変化量と照射温度の関係  
照射温度が高くなるにつれ脆性遷移温度の変化量が下がる

横軸: 照射温度

縦軸: 脆性遷移温度の変化量



\*L.E.Steele, IAEA Technical Report Series No.16 Fig.58(p.124)

本研究では、IVARプログラム(UCSB)で使用されたCu含有量の異なる3種類の圧力容器鋼に温度を変えて鉄イオン照射を行い、Cu含有量の違いが照射量や照射温度にどのような変化を及ぼすのかを検討した。

# IVARプログラム

米国カリフォルニア大学(UCSB) Odette教授

UCSBが米国原子力委員会のサポートのもと実施したプログラム。

種々の化学組成の鋼材を種々の条件下で中性子照射し、照射脆化への材料因子(化学組成)及び環境因子(照射量、照射速度、照射温度)の影響を検討。

## 中性子照射結果

種類	ID	Cu	Ni	Mn	Mo	P	C	Si	S	Fe
A533B	LG	0	0.74	1.37	0.55	0.005	0.16	0.22	<0.015	Balance
	LH	0.11	0.74	1.39	0.55	0.005	0.16	0.24	<0.015	
	LI	0.2	0.74	1.37	0.55	0.005	0.16	0.24	<0.015	

照射温度; 290°C

■ HF (High Flux)

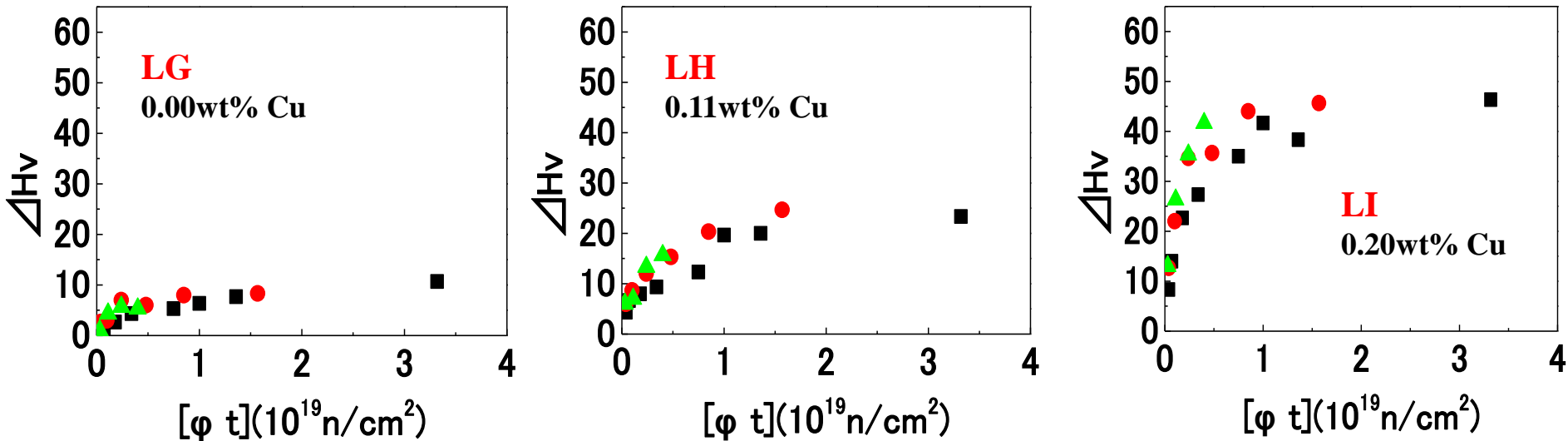
● MF (Middle Flux)

▲ LF (Low Flux)

$0.51 \sim 0.97 \times 10^{16} \text{ n/m}^2\text{-s}$

$0.21 \sim 0.36 \times 10^{16} \text{ n/m}^2\text{-s}$

$0.07 \sim 0.12 \times 10^{16} \text{ n/m}^2\text{-s}$



● 横軸:照射量 縦軸:ビッカース硬さ  $Hv = \sigma_y / 3$ で換算

● Cu含有量が多い順に硬度が上昇している → 銅析出の影響

● 少ない照射量で硬化の進行が飽和している

温度域を広げて、  
詳細に検討してみた

# 実験方法

## ◇ 熱処理条件

- 900°C・1Hr + 644°C・4Hr + 600°C・40Hr  
3段階焼鈍

## ◇ 重イオン照射

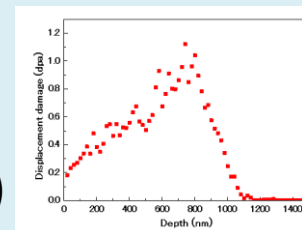
- 照射装置：タンデム型加速器(九大応研)  
照射イオン：Fe<sup>2+</sup>(2.4MeV)  
照射速度：1.5~2.25 × 10<sup>-4</sup>dpa/s  
照射温度：RT, 290°C, 320°C, 350°C  
照射量：0.1dpa, 0.3dpa, 0.5dpa, 1.0dpa  
試料サイズ：直径3mmφ



タンデム型静電加速器(九大応力研)

## ◇ 硬度試験

- 測定装置：  
超微小押し込み硬さ試験機  
(ERIONIX社製 ENT-1000)  
荷重条件：9.8 × 10<sup>-3</sup> (N)  
B (Gpa) ≙ 0.287 × Hv  
稲村の式よりHvに換算



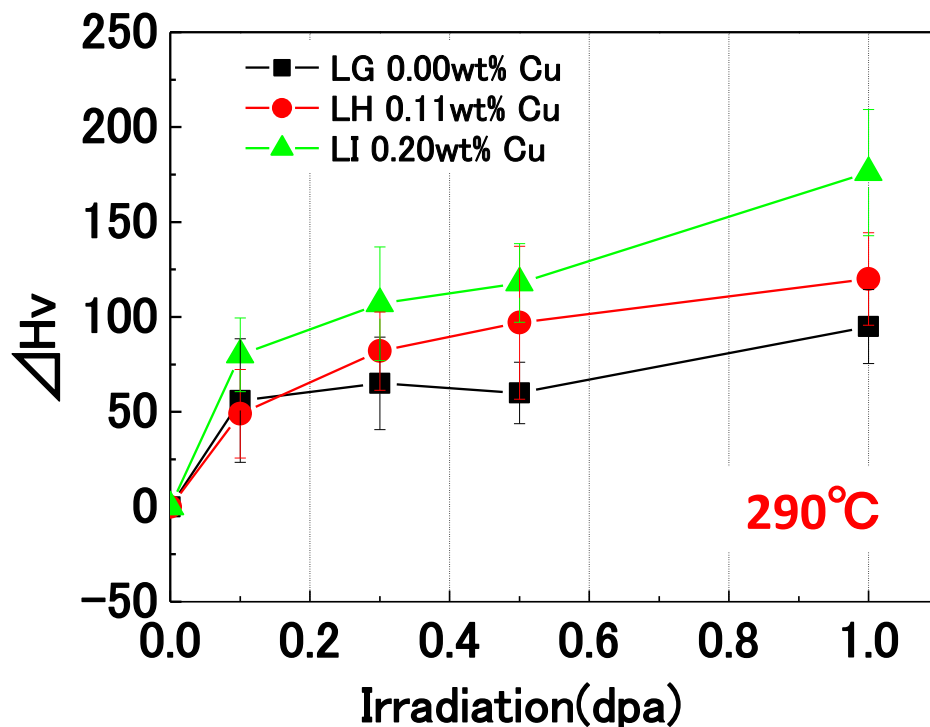
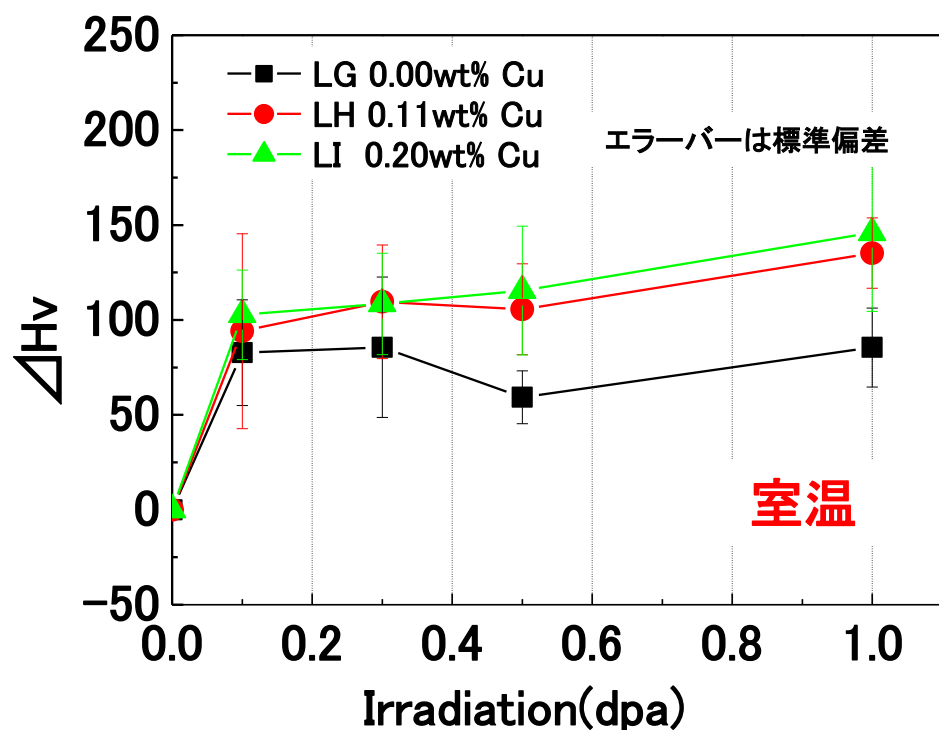
材料表面から200nmまでの  
硬度を測定

## ◇ 電子線照射

- 電子線照射その場観察実験：  
超高压電子顕微鏡(HVEM)  
九大超高压電子顕微鏡室設置  
照射強度条件：2.4 × 10<sup>23</sup>e<sup>-</sup>/m<sup>2</sup>s  
照射温度：290°C、350°C  
照射速度：2.5 × 10<sup>-4</sup> dpa/s  
加速電圧：1000kV  
薄膜試料

# 硬度変化の照射量依存性(室温、290°C)

照射イオン; Fe<sup>2+</sup>



- 室温、290°Cいずれの温度でもCuが添加されているLH, LIがLGより硬度が上昇している

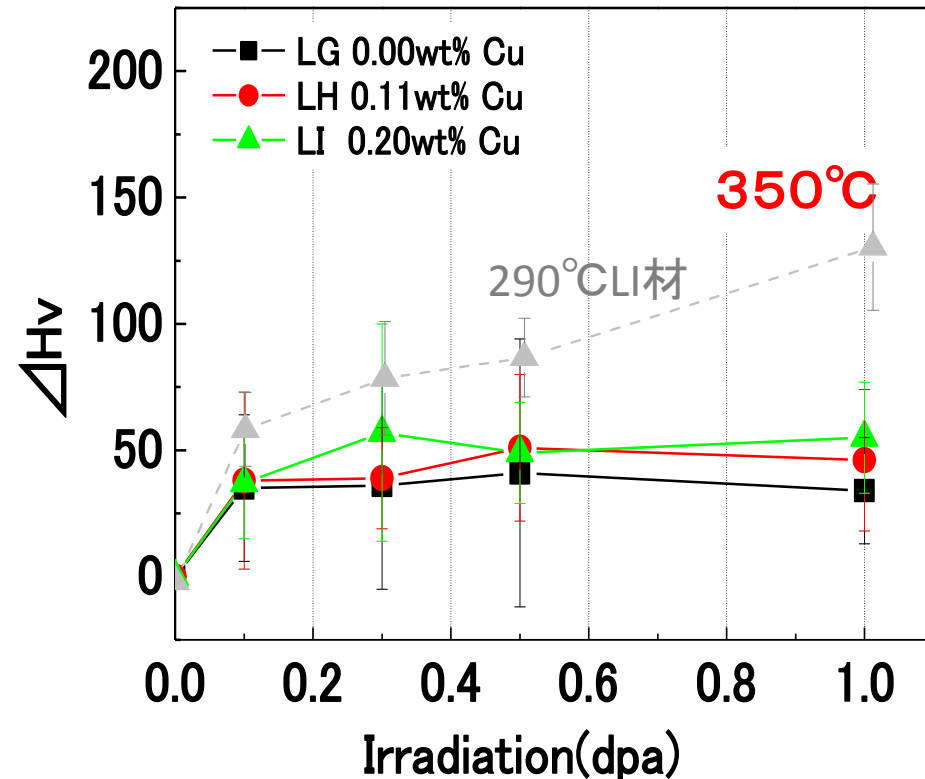
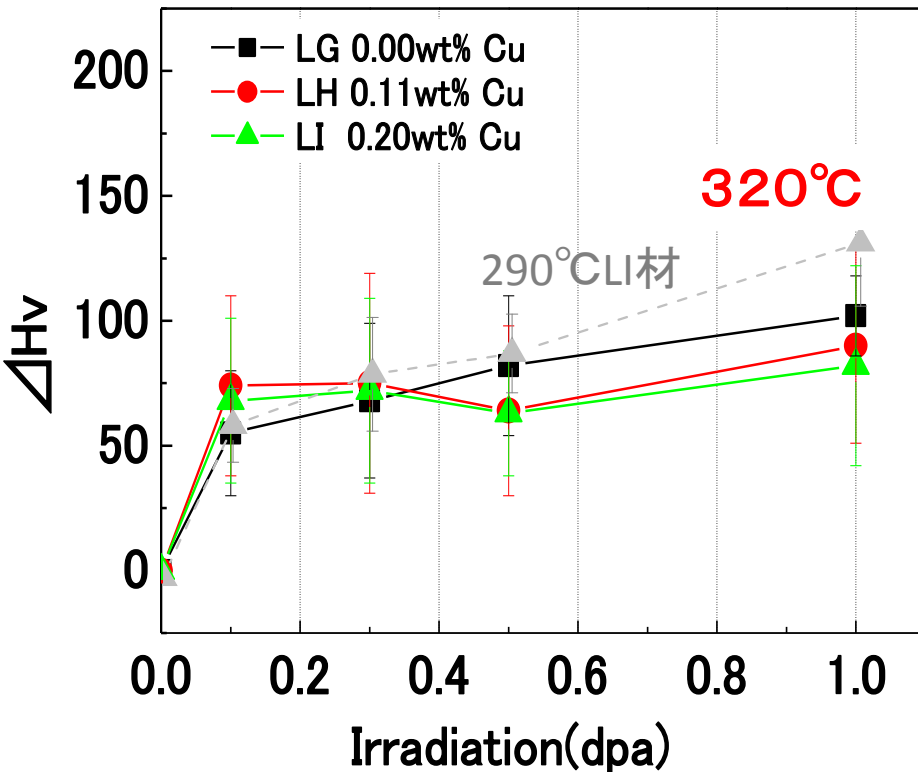
銅含有量 ↑ ΔHv ↑

これまでのイオン照射実験でも同様の結果が出ている  
Ref. [H Watanabe, RADIATION INDUCED HARDENING OF ION IRRADIATED RPV STEELS, JNN 2011](#)

- 照射初期(~0.1dpa)にすべての試料で大きく硬度が上昇している

# 硬度変化の照射量依存性(320°C、350°C)

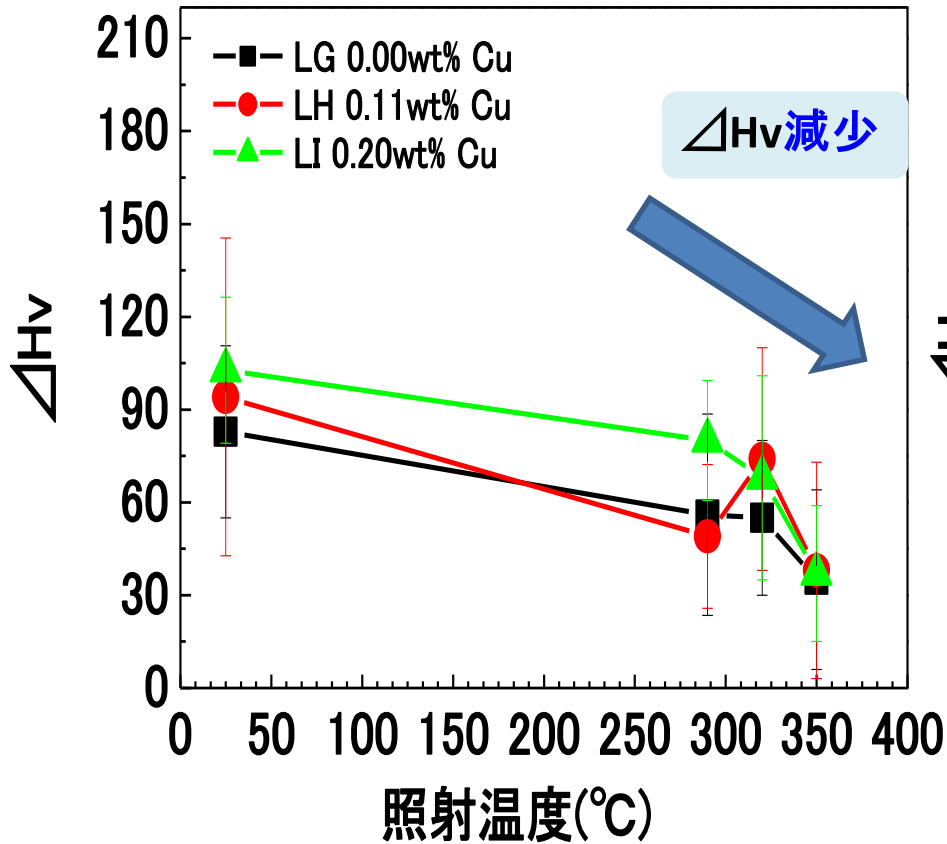
照射イオン; Fe<sup>2+</sup>



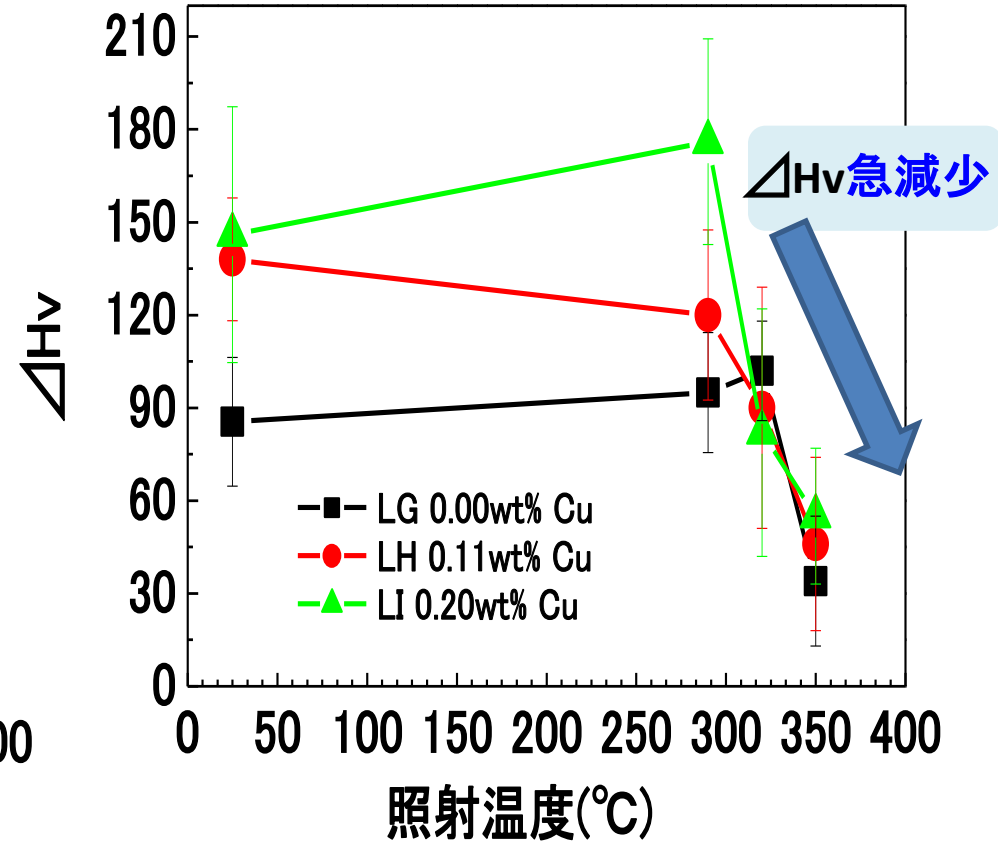
- 室温、290°Cに比べて320°C、350°CではΔHvが抑えられている
- LG, LH, LIのCu含有量の違いによる硬度上昇の変化はあまりみられない
- 室温、290°Cと同様に照射初期(~0.1dpa)にすべての試料で大きく硬度が上昇

# 重イオン照射時の温度依存性

0.1 dpa照射時



1.0 dpa照射時



● 高照射領域(1.0 dpa)では、室温、290°CでのCu含有量の違いが顕著

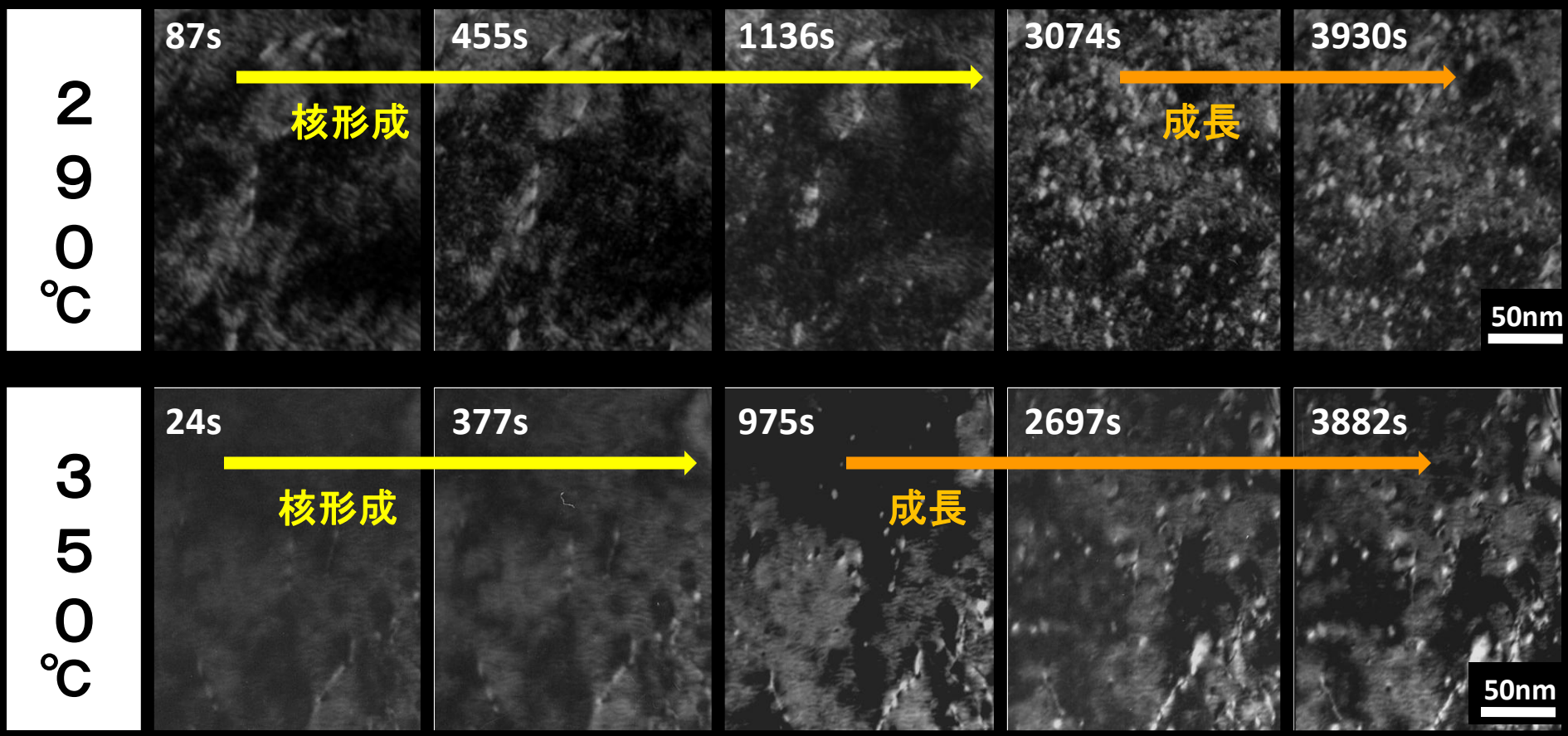
● 高温になるにつれ、 $\Delta H_v$ が減少している

温度  $\uparrow$   $\Delta H_v$   $\downarrow$

# 電子線照射によるその場観察実験

照射条件: 電子線照射強度  $2.4 \times 10^{23} \text{e}^-/\text{m}^2\text{s}$  照射試料: Li材 (0.20wt% Cu)

暗視野像



- 350°Cの転位ループ数密度が290°Cに比べ減少している



# まとめ

## 重イオン照射

- 室温、290°Cいずれの温度でもCuが添加されているLH, LIがLGより硬度が上昇している
- 照射初期(~0.1dpa)にすべての試料で大きく硬度が上昇している
- 照射温度が高温になるにつれ、 $\Delta H_v$ が減少している
- 320°C、350°CではCu含有量の違いによる硬度上昇の変化はあまりみられない

室温、290°C

銅含有量



温度



## 電子線照射連続その場観察

- 350°Cの転位ループ数密度が290°Cに比べ減少

290°C

350°C



転位ループ数密度減少

照射による硬度の上昇の原因は、銅を主体とする溶質原子クラスター並びに格子間原子型の転位ループであるが、転位ループ数密度が290°Cに比べ350°Cでは減少していることから、高温域ではこれらの効果による硬度上昇が抑制されている。