

原子炉压力容器鋼の中性子照射脆化に対する照射温度の影響

- UCSB IVAR プログラム材の原子プローブ分析 -

キーワード：照射脆化，原子炉压力容器，焼鈍熱処理，
三次元原子プローブ，照射温度

報告書番号：Q11019

背景

原子炉压力容器鋼では、運転中の中性子照射を受けて破壊靱性値が低下する（中性子照射脆化）。照射条件の中でも照射温度は脆化に影響を及ぼすことが知られており、UCSB が行った IVAR プログラム^[1]では実機の運転温度付近での照射温度変化に対する機械的特性変化の関係が調べられている。一方で、実機における脆化は溶質原子の集合体である溶質原子クラスターの形成が主要因とされているが、IVAR プログラムにおいてもクラスター形成と照射温度との関係は明らかになっていない。

目的

実機の運転温度付近の異なる温度で照射された材料に対して、溶質原子クラスター形成に対する温度の影響について調べ、さらにクラスターと機械的特性との関係を明らかにすること。

主な成果

IVAR プログラムで照射された材料のうち、照射温度 270、290 および 310 、照射速度 $3.0 \sim 3.6 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2\text{-s}$ で $1.6 \sim 1.7 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$) まで照射された銅含有量が 0.20 あるいは 0.11wt% と異なる 2 種類の材料（表 1）に対して、三次元原子プローブによるナノ組織観察を実施し以下の結果を得た。

(1) 高温で照射された材料に形成する溶質原子クラスターの数密度は低温で照射された材料に比べて明らかに低く（図 1）、270 での照射に対し 40 高い 310 で、銅含有量の異なる両材料とも約 1/8 の数密度になる（図 2）。これは、クラスターの核となる照射欠陥の分解・消失がこの温度域において熱活性であり、温度が高いほどクラスター形成に寄与する核が減少するためと考えられる。

(2) クラスターの平均直径は照射温度が高いほど大きくなる。高温ではクラスター数密度が低く 1 個あたりにクラスターリングできる溶質原子が増えることと、溶質原子の拡散が促進されたためと考えられる。

(3) 結果として、クラスターの体積率は、照射温度が高いほど小さくなる。本研究の条件においては、高温で核形成を抑制する効果が大きいと考えられる。

(4) 照射温度や鋼材の銅含有量に依らず、照射による降伏応力の変化量はクラスター体積率の平方根に比例する（図 3）。特に本研究では、異なる温度で照射されたことによる微細・高密度と粗大・低密度という極端に異なるクラスター形成状態においても、降伏応力上昇量がクラスター体積率の平方根のみで評価できる可能性を示した。

^[1] Irradiation Variable (IVAR) program, 米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校 (UCSB) が米国原子力規制委員会 (U.S.NRC) のサポートのもと実施した。種々の化学組成の鋼材を種々の条件下で照射し、照射脆化への材料因子 (化学組成) および環境因子 (照射量、照射速度、照射温度) の影響を詳細に検討した。

表 1 LI 材および LH 材の化学組成

ID	種類	化学組成 / wt%								
		Cu	Ni	Mn	Mo	P	C	Si	S	Fe
LI	A533B 圧延材	0.20	0.74	1.37	0.55	0.005	0.16	0.24	0.015	Bal.
LH		0.11	0.74	1.39	0.55	0.005	0.16	0.24	0.015	Bal.

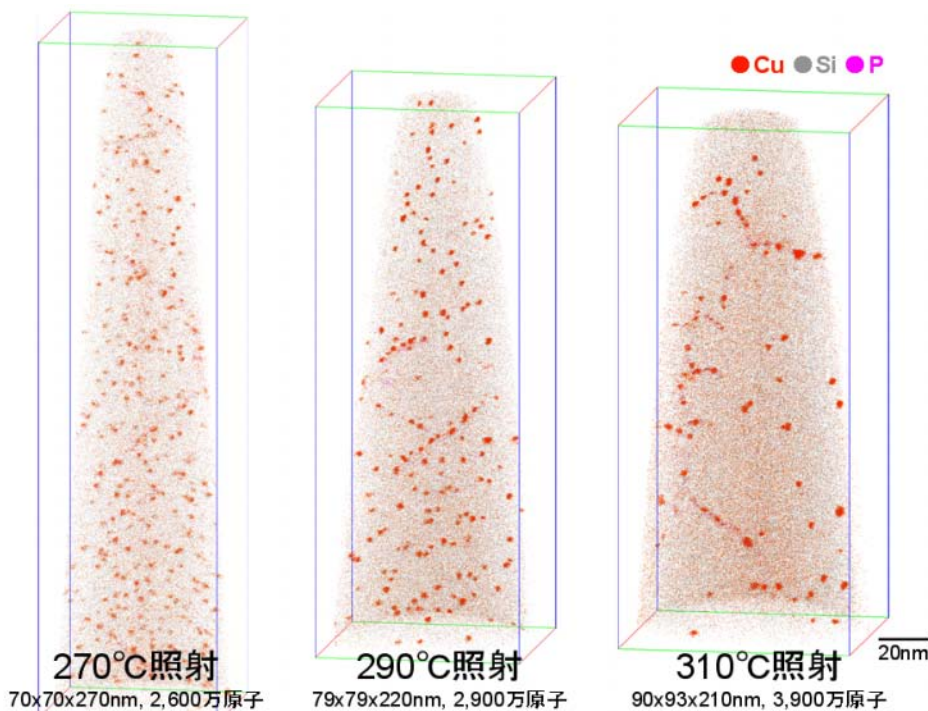


図 1 異なる温度で照射された LI 材 (0.20wt%Cu) の三次元原子マップ

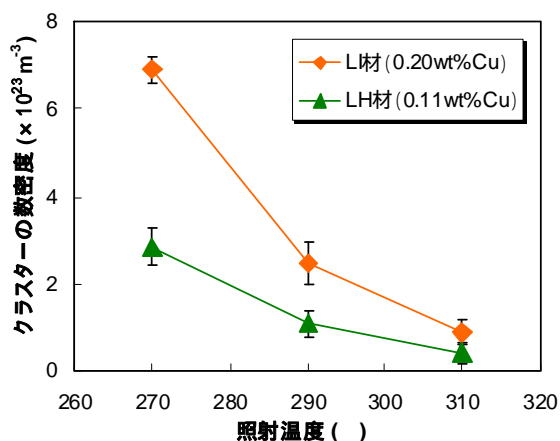


図 2 照射温度とクラスター数密度の関係 (エラーバーは±1)

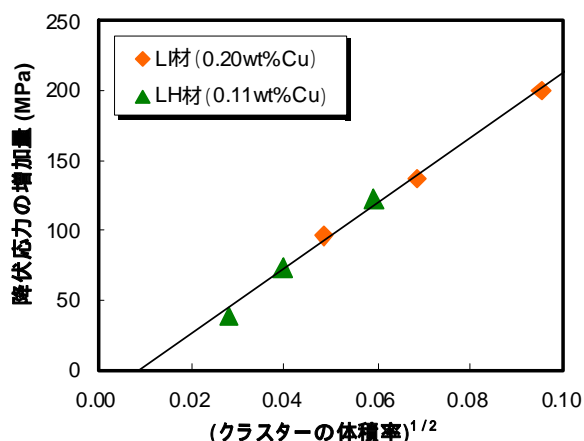


図 3 クラスターの体積率と降伏応力の関係

研究担当者	西田 憲二 (材料科学研究所 原子力材料領域)
問い合わせ先	電力中央研究所 材料科学研究所 研究管理担当スタッフ Tel. 046-856-2121(代) E-mail : msrl-rr-ml@criepi.denken.or.jp