

照射過程での純鉄・低合金鋼の磁気特性変化 -冷間圧延した純鉄の磁性-

* 鎌田康寛¹, J N Mohapatra¹,
菊池弘昭¹, 小林悟¹, 渡辺英雄²

¹ 岩手大学工学部マテリアル工学科

² 九州大学応用力学研究所

背景・目的

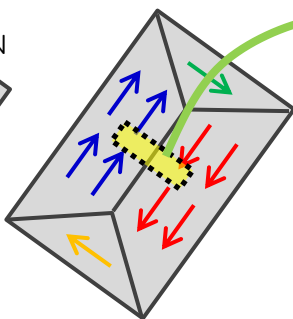
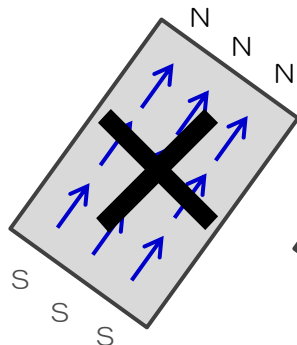
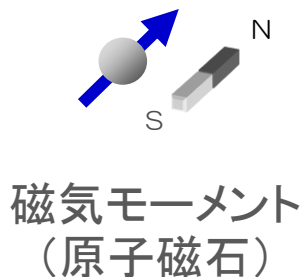
- 中性子照射による原子炉圧力容器鋼の磁気特性の変化
(磁気ヒステリシス曲線)
 - … 照射脆化の非破壊評価の可能性を探る

● 報告内容

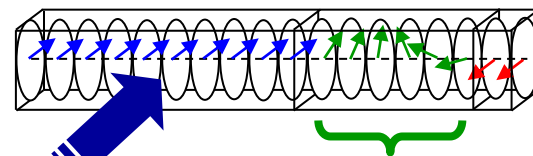
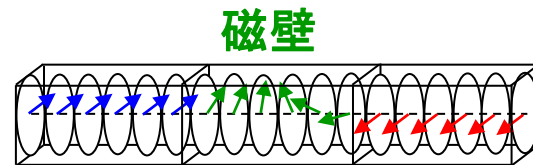
- ① 磁気特性と照射欠陥
 - … 考え方、磁区・磁壁の可視化
- ② これまでの研究
 - … 中性子照射中のその場磁気計測
- ③ 冷間圧延した純鉄の熱時効・中性子照射と磁性
 - … 照射前に存在する転位の影響

① 磁気特性と照射欠陥 (考え方)

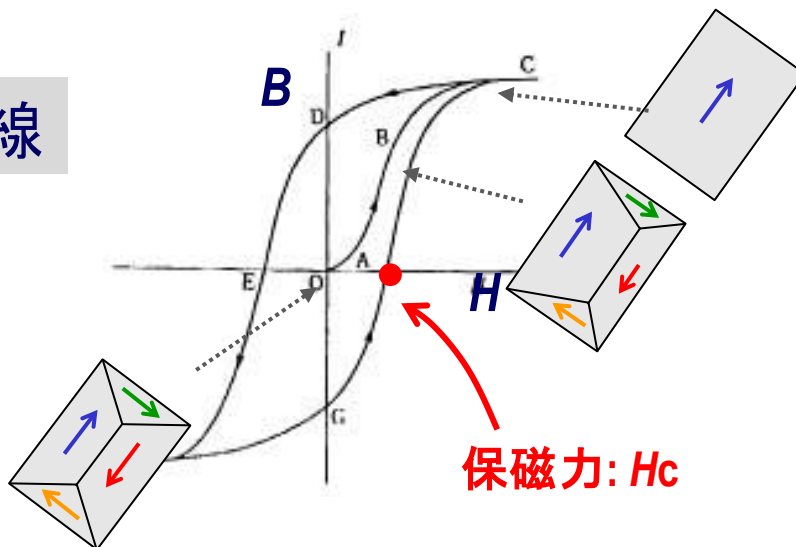
鉄・・・強磁性体



還流磁区



磁気ヒステリシス曲線

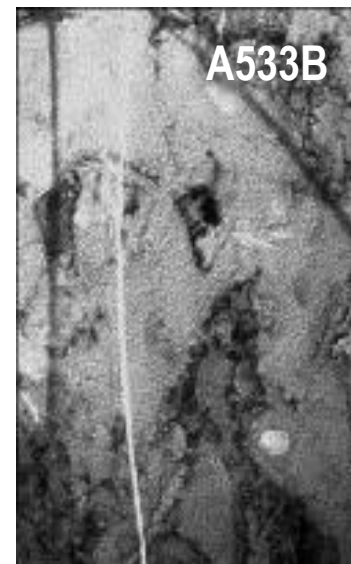
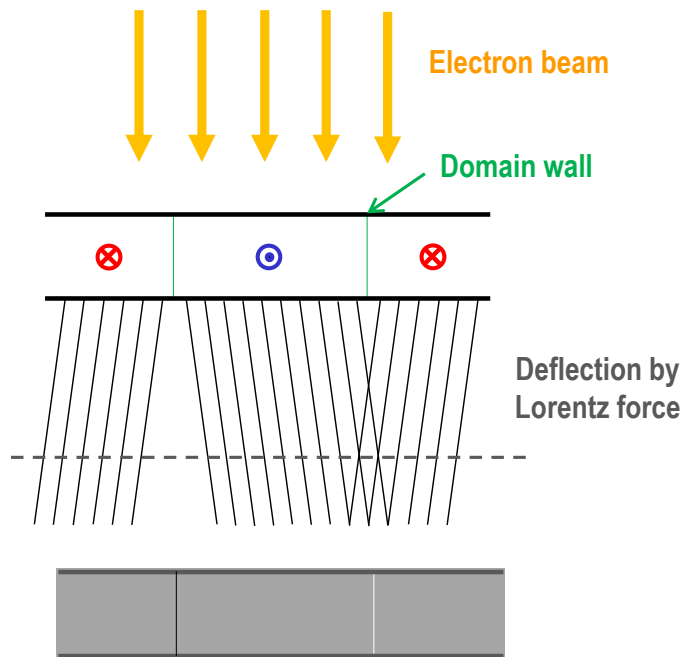


磁区・磁壁の可視化

Lorentz-TEM

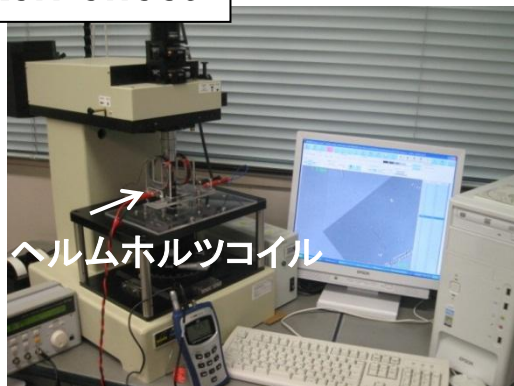


岩大 (Philips Tecnai30, 300kV)

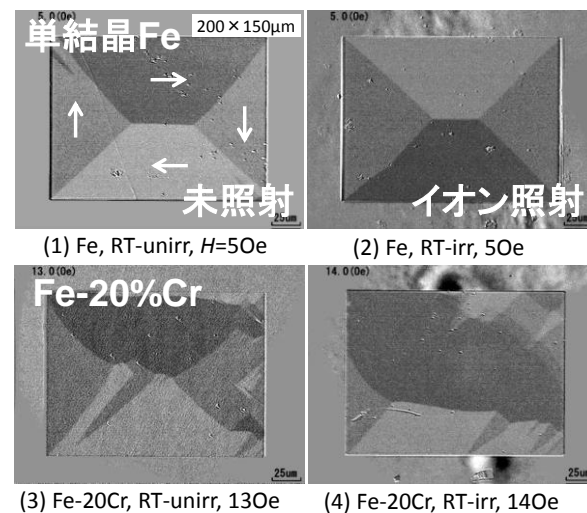
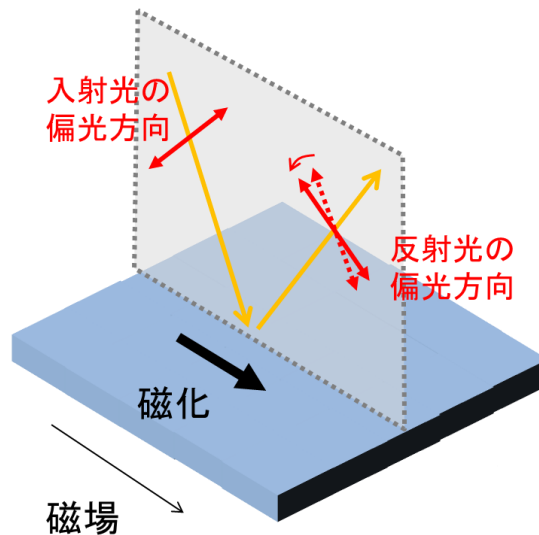


↑ black ↑ white

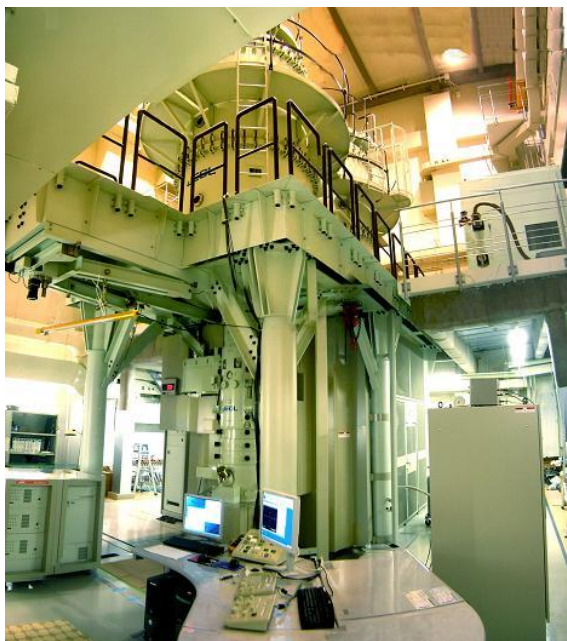
Kerr effect



岩大 (Neoark Domain-scope)



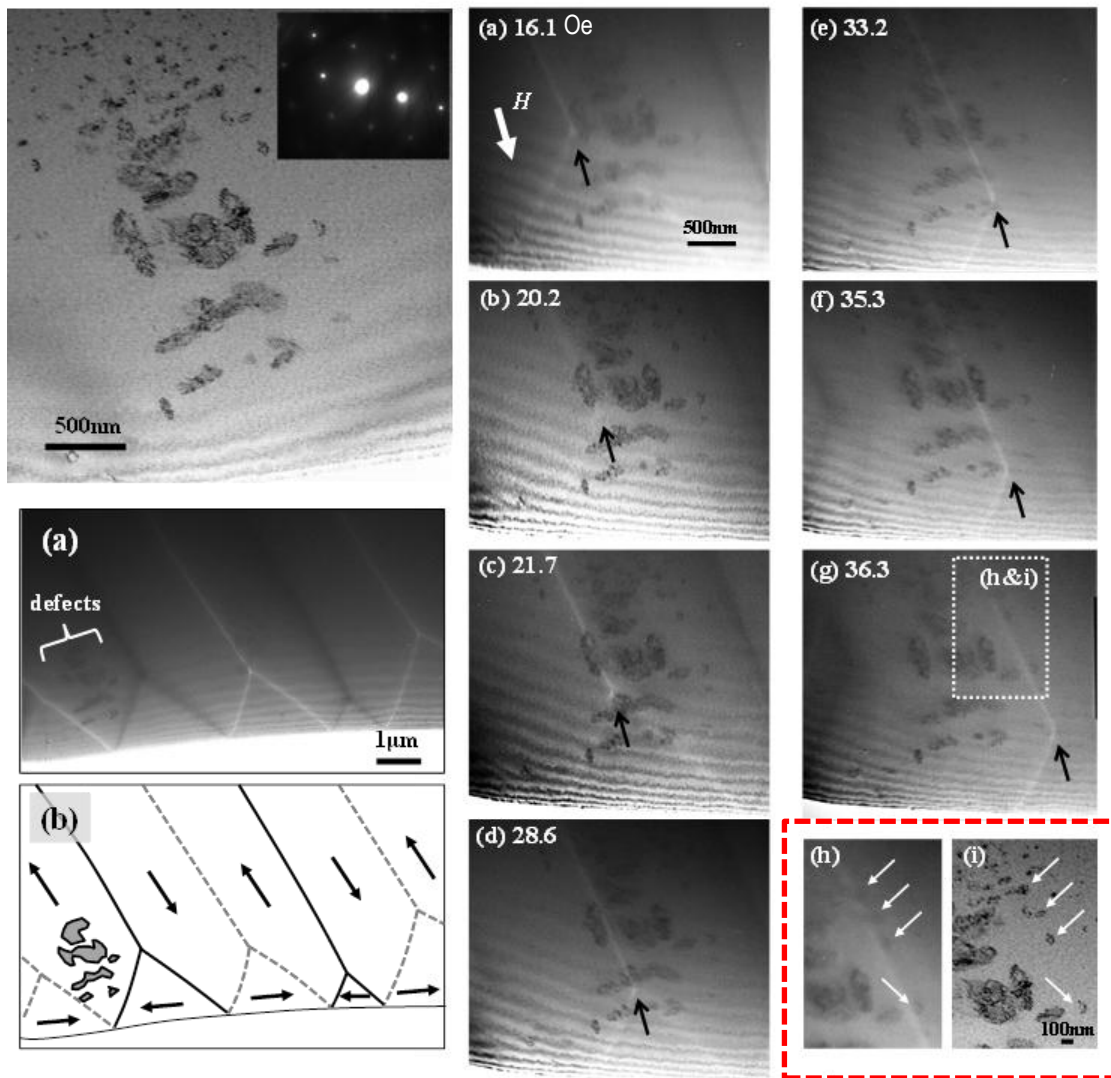
① 磁気特性と照射欠陥 (電子線照射＋磁壁観察)



Kyusyu Univ. HVEM

Fe, 200°C, 0.15dpa
(2.5×10^{-4} dpa/s)

Fig. Interaction between dislocation loops of e-irradiated iron & magnetic domain wall (Lorentz-TEM images).



照射欠陥が磁壁の移動を妨げている
(弾性磁気相互作用) → 保磁力の増加

② これまでの研究 (中性子照射中のその場磁気計測)

Irradiation : at Japan Materials Test Reactor

Materials : (1) pure-Fe (4N), (2) RPV steel (A533B)

(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo
0.19	0.19	1.47	<0.003	0.001	0.64	0.14	0.16	0.51

N:880°C・60min (AC) +T:670°C・80min(AC) (old-type RPV steel)

Temp : 290°C, Fluence : 5×10^{19} n/cm²

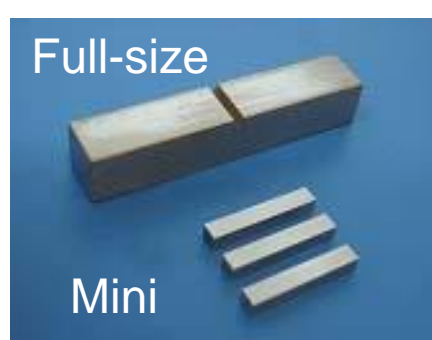


Magnetic Properties



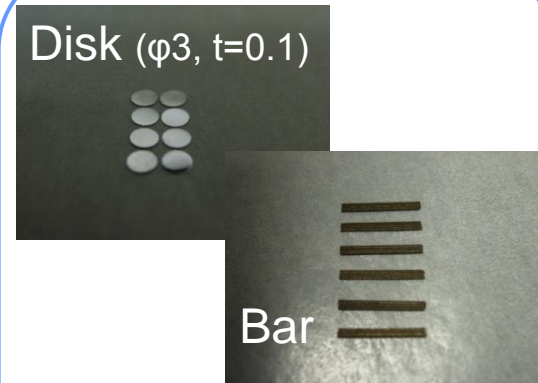
Hysteresis meas.

Mechanical Properties



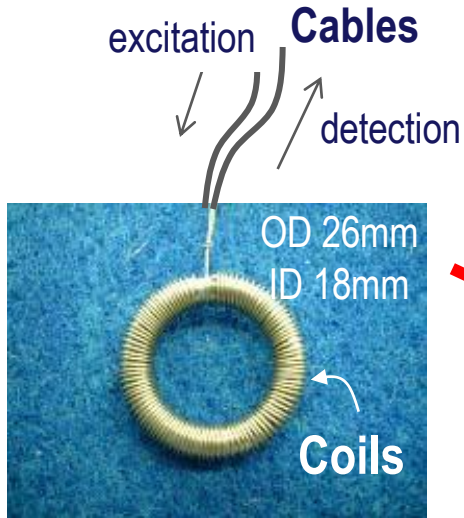
Charpy & Hardness

Microstructure



TEM & Atom-Probe

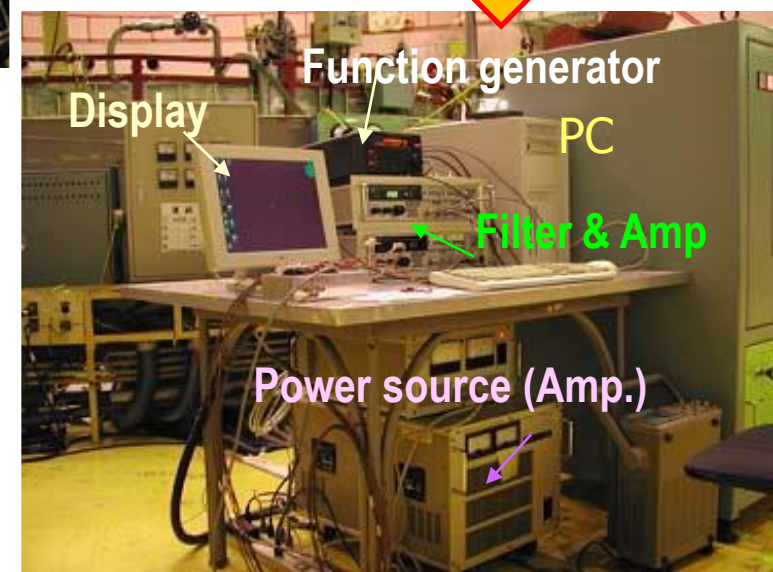
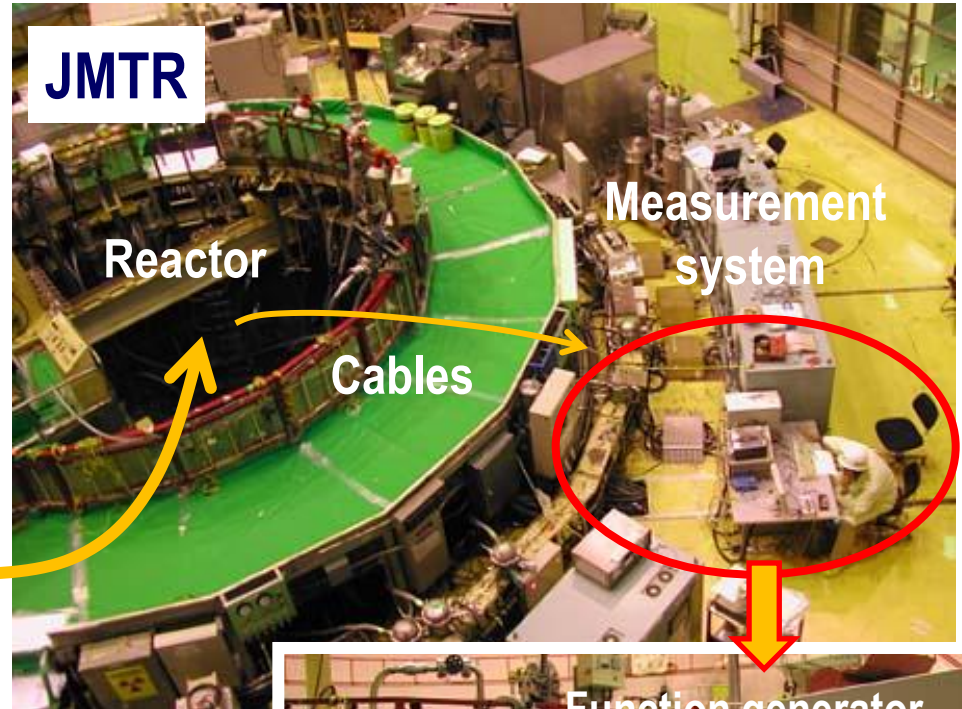
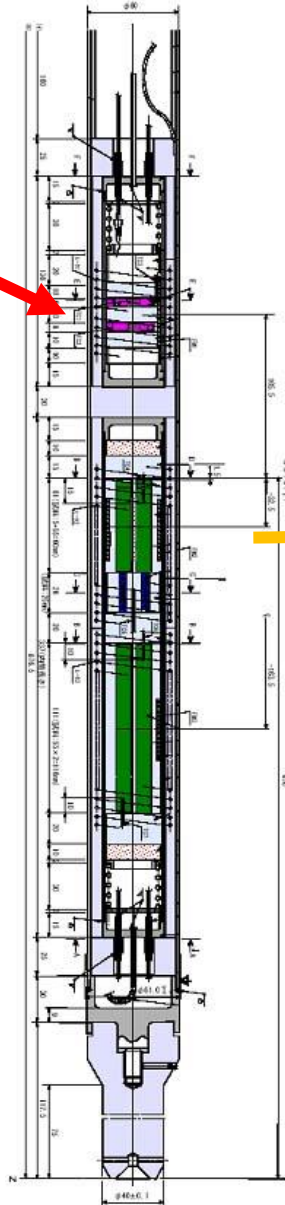
② これまでの研究 (中性子照射中のその場磁気計測)



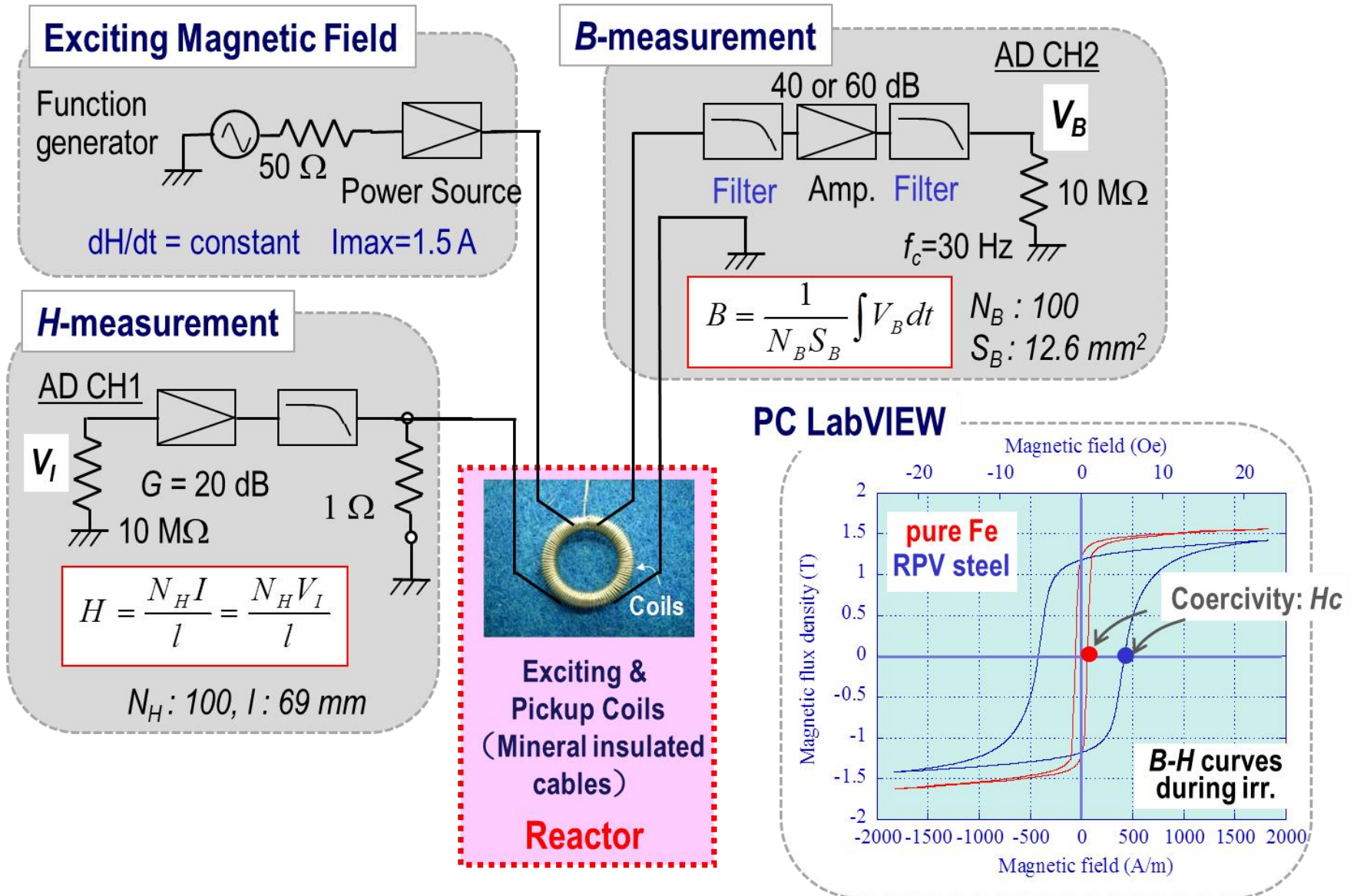
Specimen

Capsule

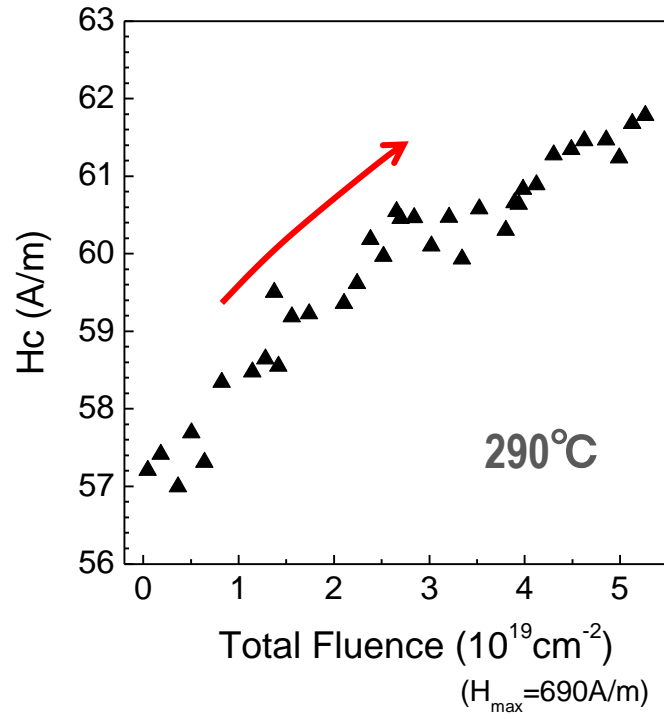
Temperature
-controlled



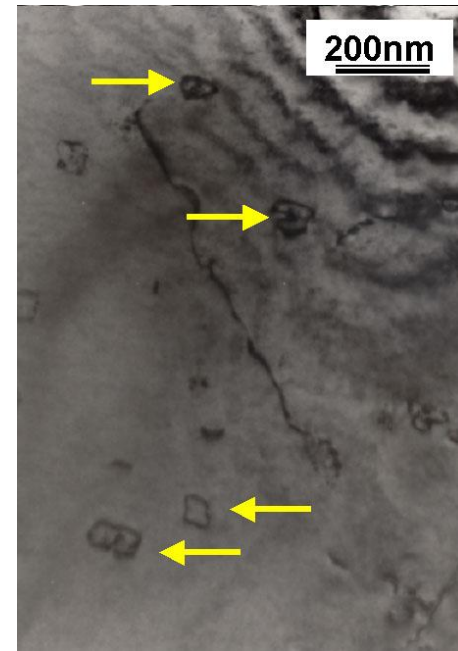
② これまでの研究 (中性子照射中のその場磁気計測)



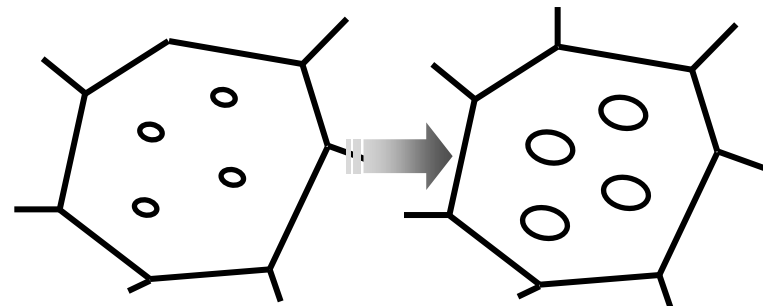
●その場磁気計測 アニールした純鉄



保磁力: 増加

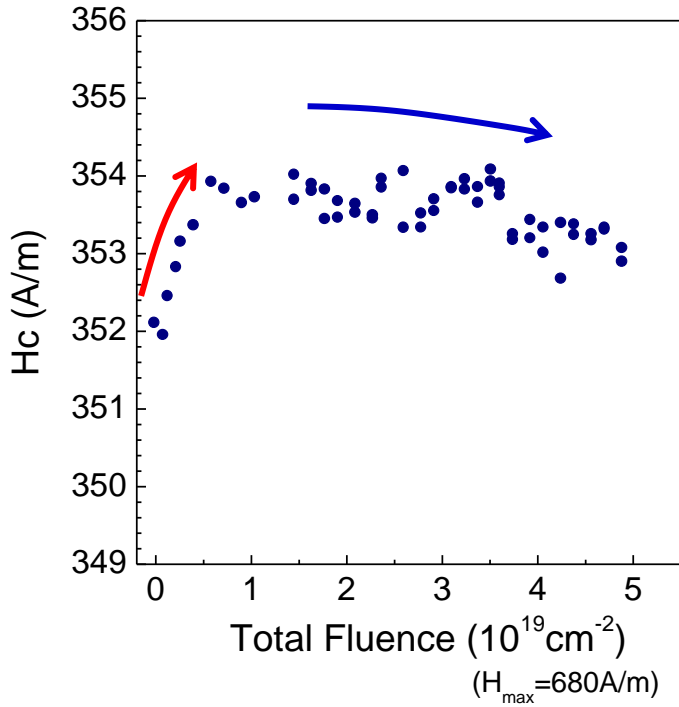


Large dislocation loops

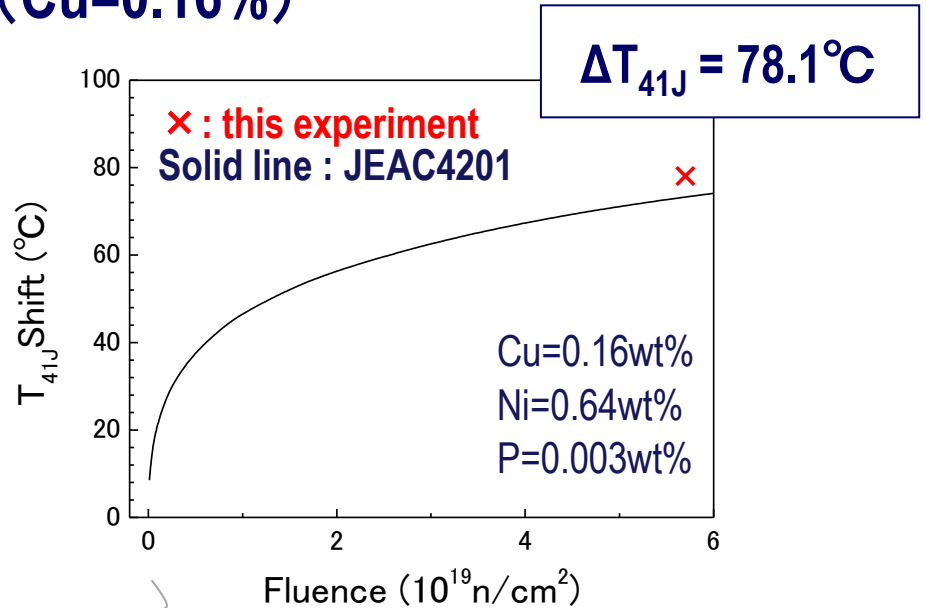


Growth of dislocation loops

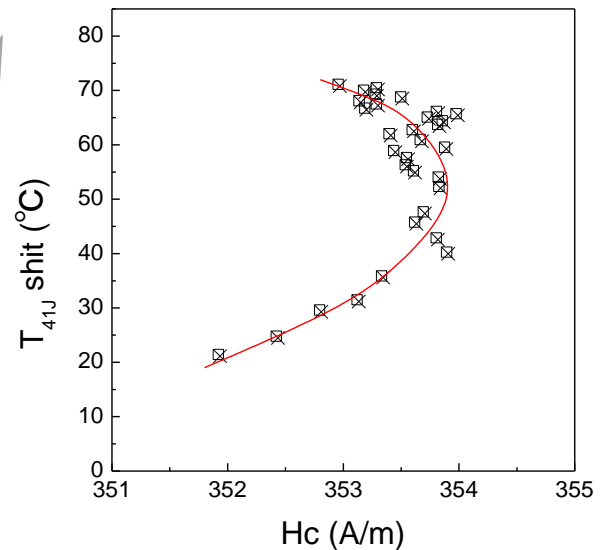
●その場磁気計測 A533B鋼 (Cu=0.16%)



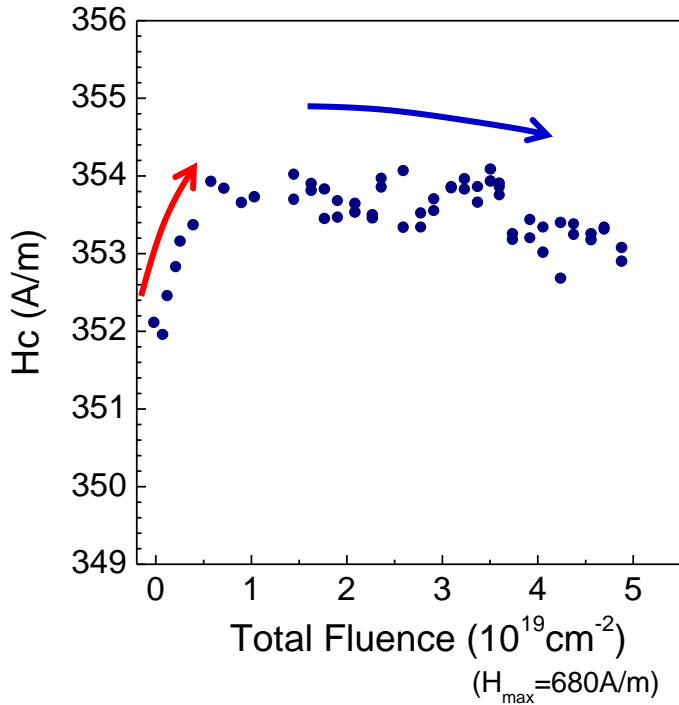
保磁力: 増加
減少



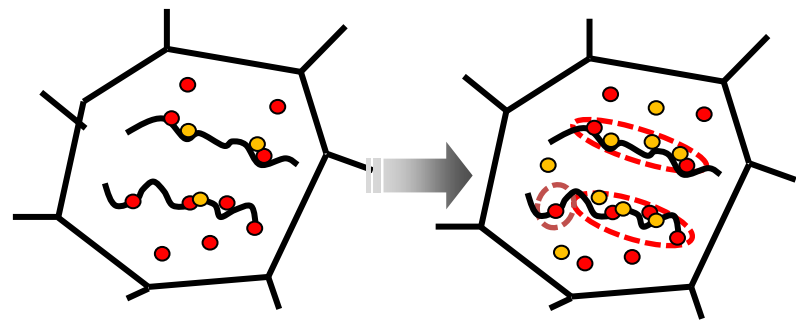
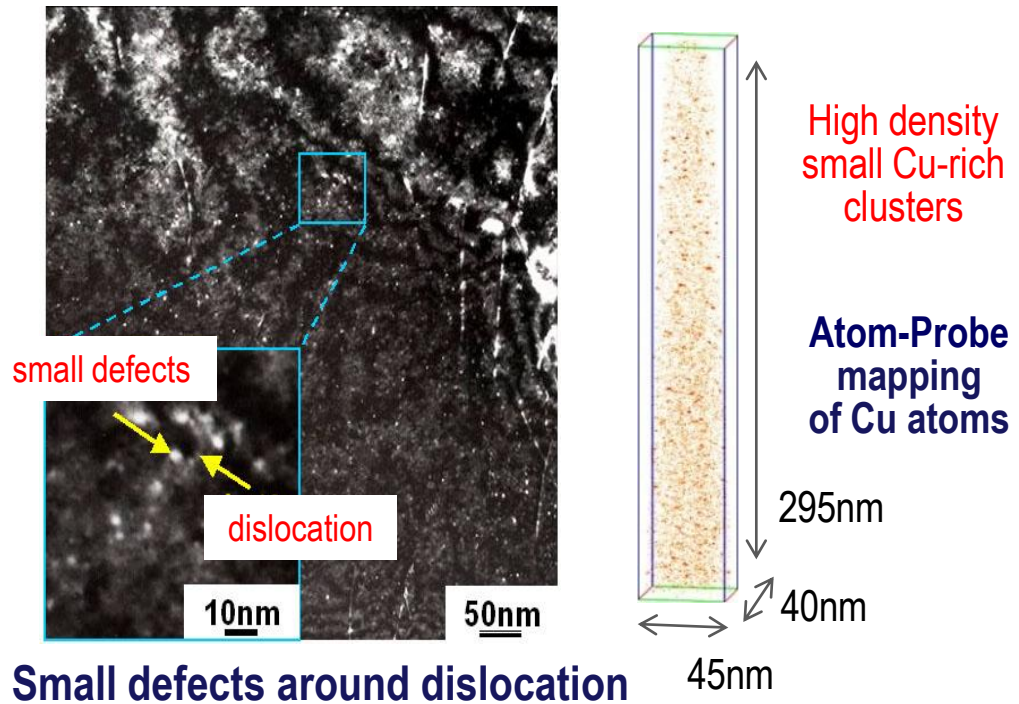
$$\Delta RT_{NDT} (^\circ\text{C}) = (-16 + 1210P + 215Cu + 77\sqrt{Cu \cdot Ni}) \times f^{0.29 - 0.04 \log f}$$



●その場磁気計測 A533B鋼 (Cu=0.16%)



保磁力: 増加
減少



Cuリッチクラスター— 照射前から存在する
転位の応力場の緩和?

③ 冷間圧延した純鉄の熱時効・中性子照射と磁性（方法）

● 試料：

多結晶純鉄 (99.99%)

未圧延材、70%圧延材

リング状 (OD=10, ID=6, t=0.4mm) … 磁性 (熱時効)

板状 (20 × 6 × 0.4 mm) … 磁性 (照射)、硬度測定

● 熱時効：

(1) 70°C、(2) 300°Cで1000hrs

● 中性子照射(BR2):

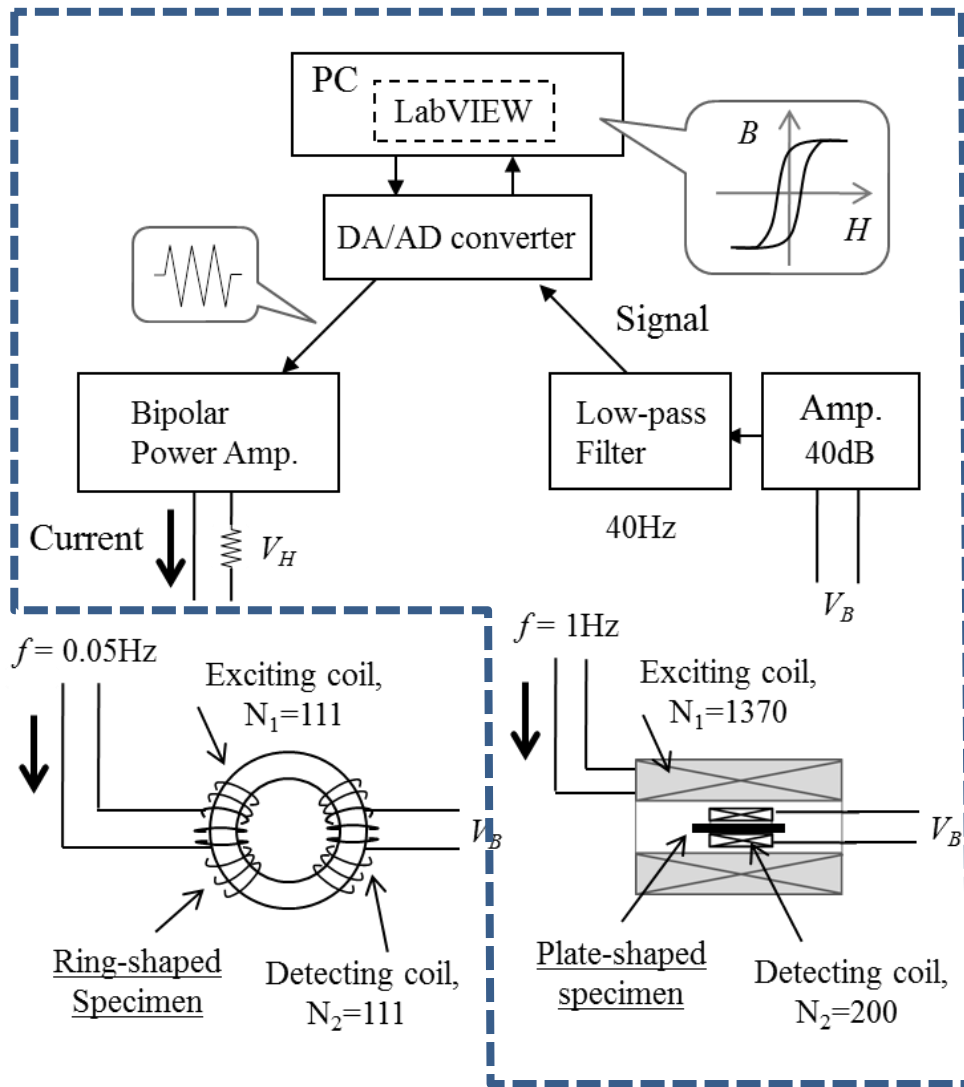
(1) at 70°C up to 1.5×10^{24} n/m² (715hrs)

(2) at 300°C up to 1.0×10^{24} n/m² (1195hrs)

● 硬度・磁気測定

Temp. (°C)	Hardness measurement				Magnetic measurement			
	unaged	TA	unirr.	irr.	unaged	TA	unirr.	irr.
70	Plate1		Plate3	Plate4	Ring1		Plate4	
300	Plate2			Plate5	Ring2		Plate5	

③ 冷間圧延した純鉄の熱時効・中性子照射と磁性（磁気計測）



熱時効材

中性子照射材

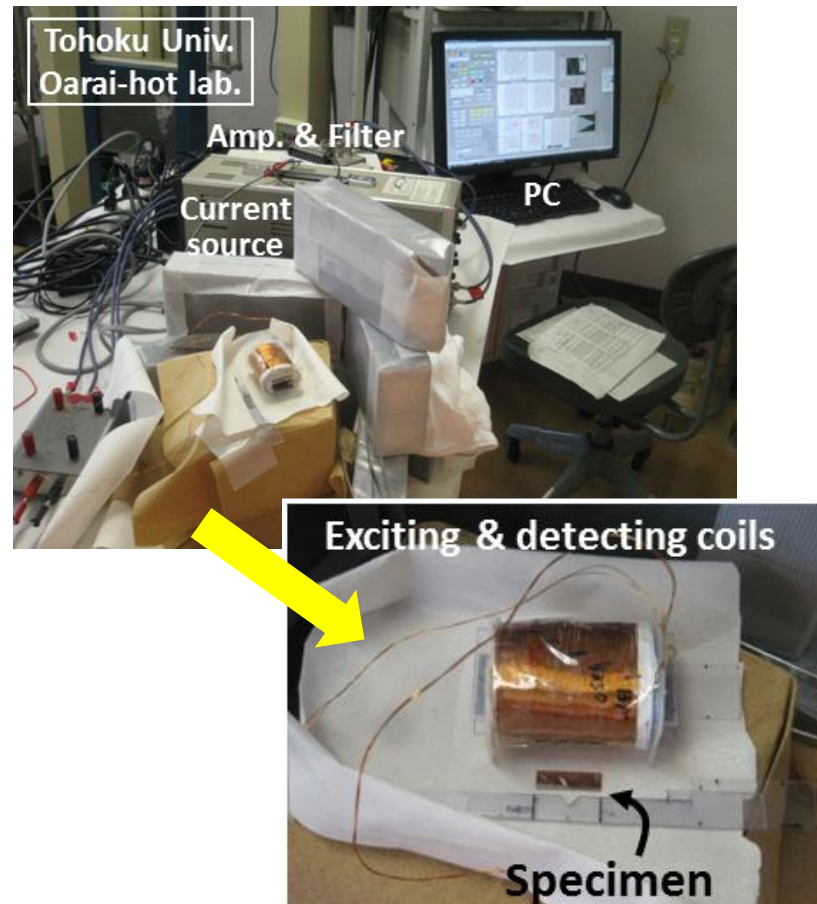
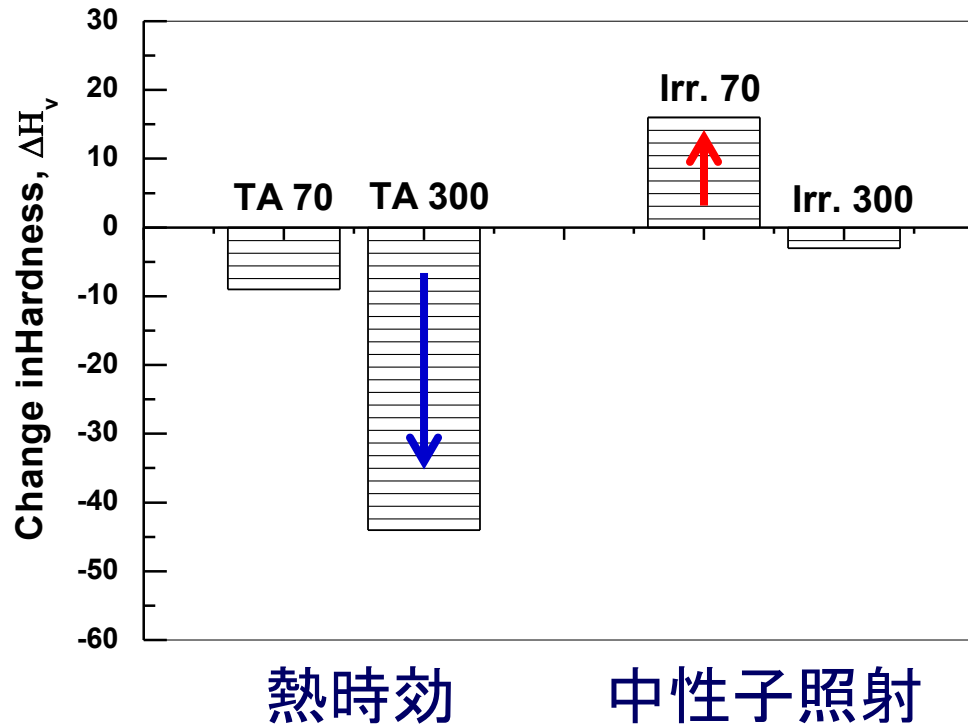


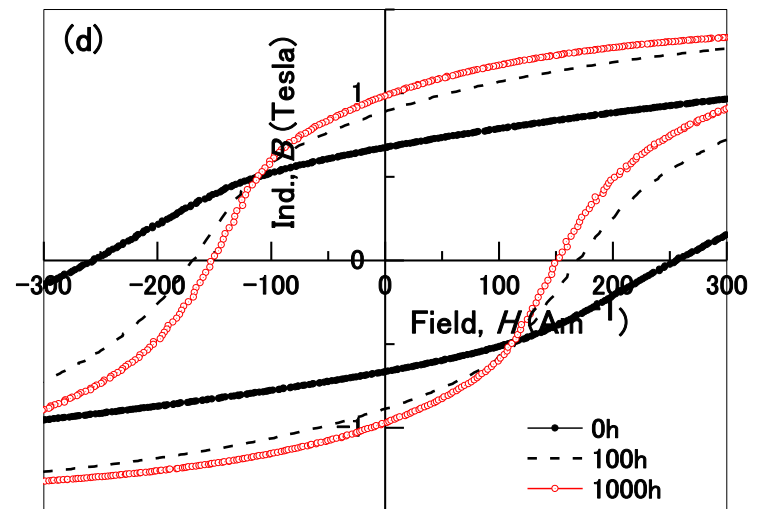
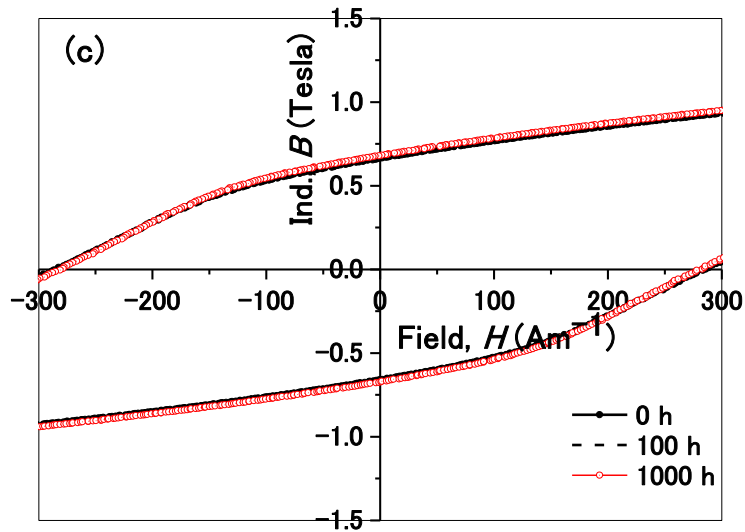
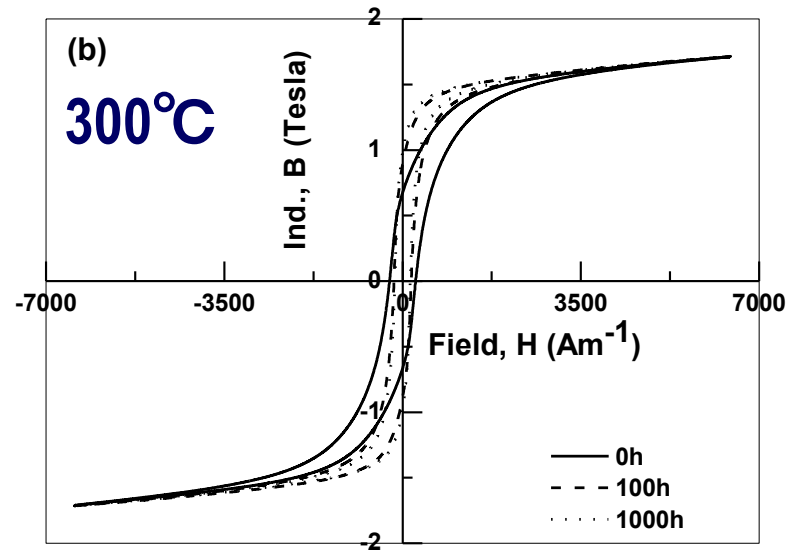
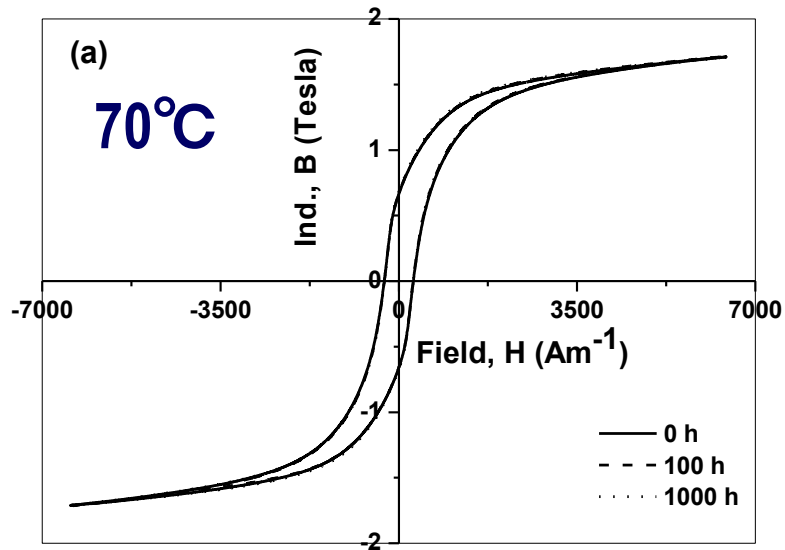
Fig. Pictures of the measurement setup at IMR, Tohoku Univ., in Oarai.

● 熱時効・照射による純鉄(70%圧延)の硬度変化

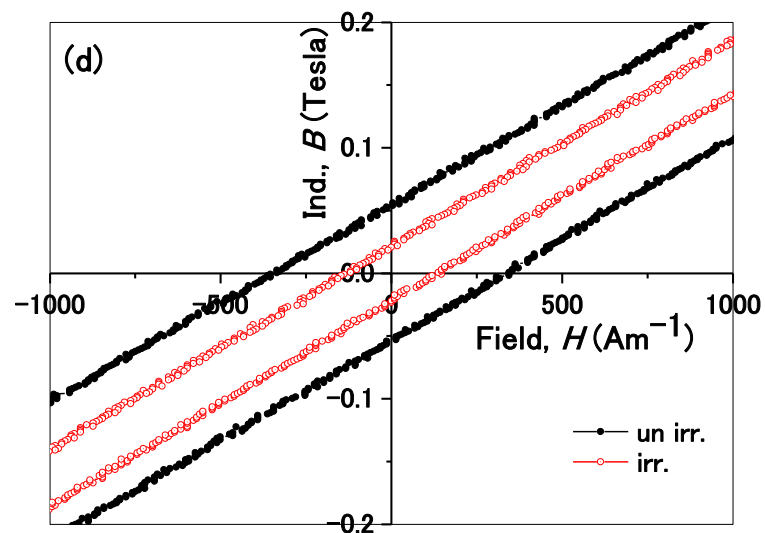
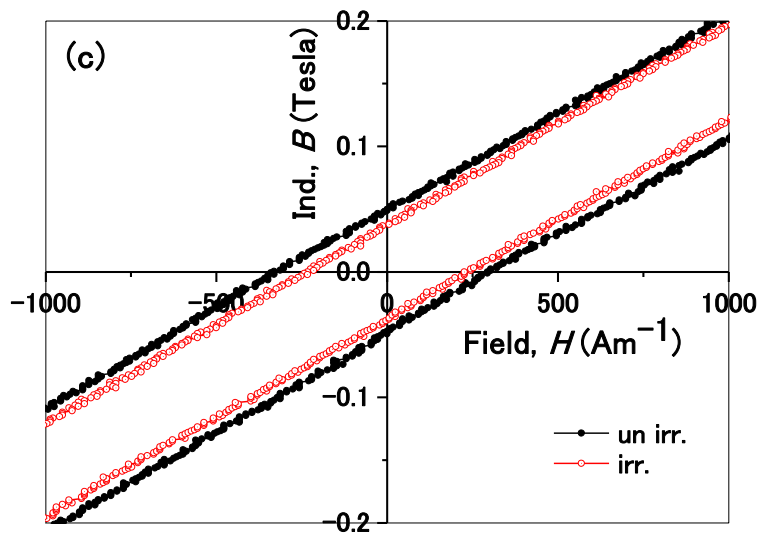
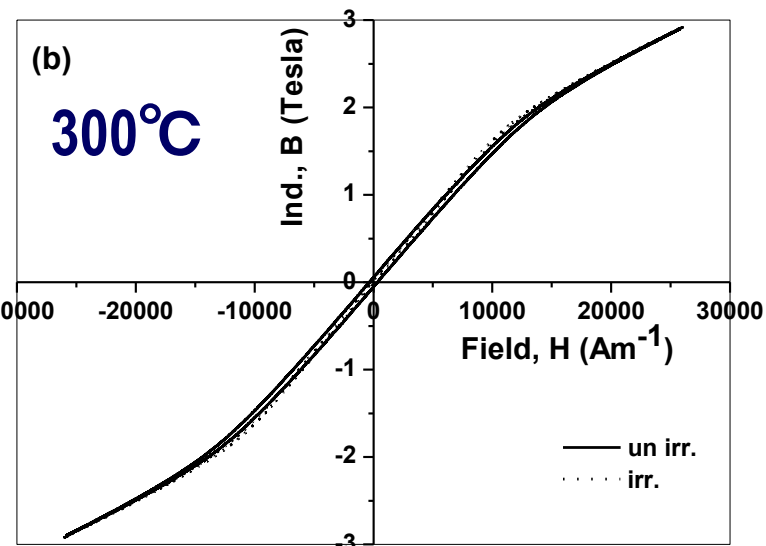
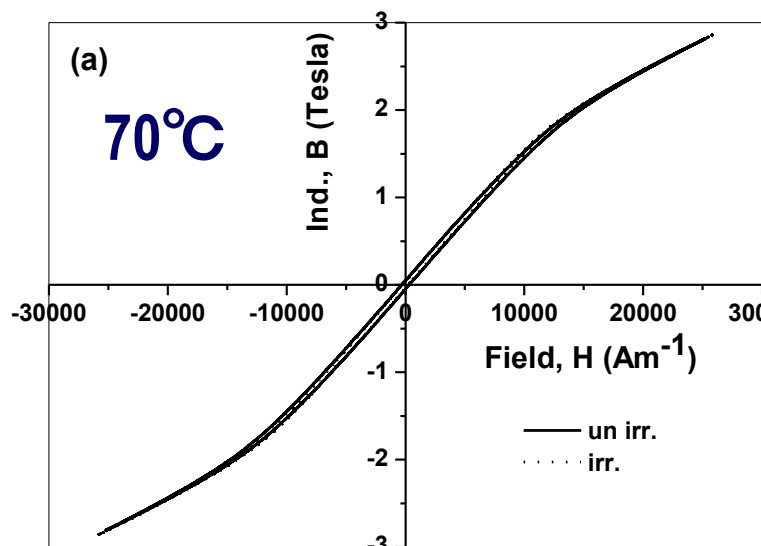


Temp. (°C)	Thermal Ageing			Irradiation		
	Hv		ΔH_v	Hv		ΔH_v
	unaged	TA		unirr.	irr.	
70	173±9	164 ± 8	- 9	178±3	194 ± 9	16
300	150 ± 8	106 ± 3	- 44		175 ± 7	- 3

● 熱時効前後での純鉄(70%圧延)の磁化曲線

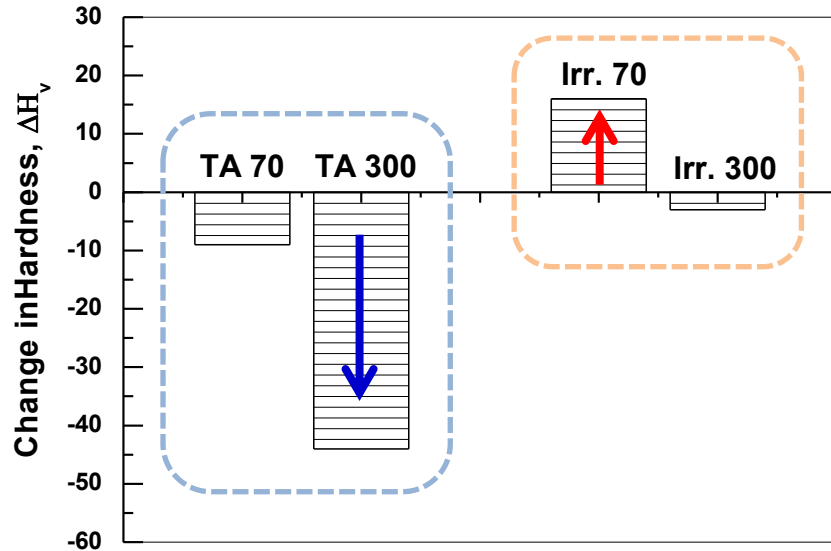


●照射前後での純鉄(70%圧延)の磁化曲線

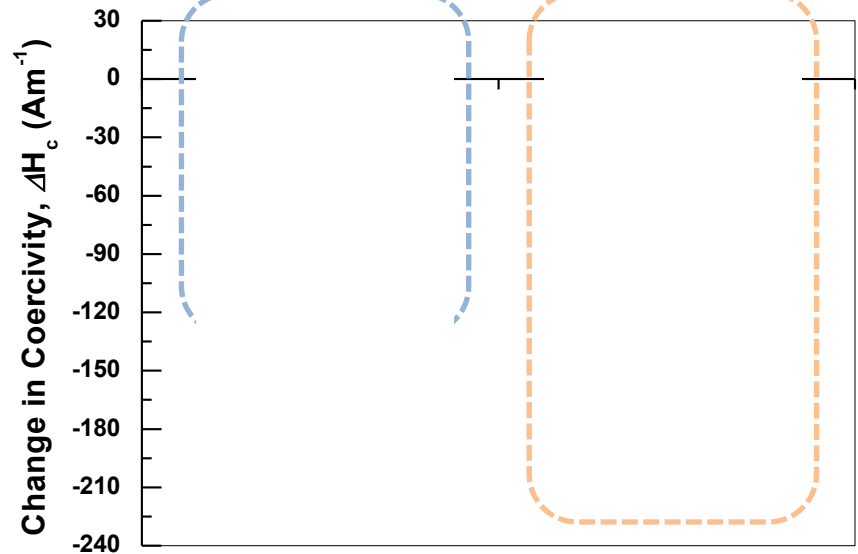


● 硬度と保磁力の変化量の比較

硬度



保磁力



磁気特性・・・照射前から存在する転位の応力場の変化(消滅・緩和)に非常に敏感

Temp. (°C)	Thermal Ageing			Irradiation		
	Hc (A/m)		ΔH_c	Hc (A/m)		ΔH_c
	unaged	TA		unirr.	irr.	
70	285.7	282.0	-3.7	311.9	234.4	-77.5
300	257.3	153.5	-103.8	340.8	132.4	-208.4

まとめ

●照射脆化と磁気特性(ヒステリシス曲線)

① 磁気特性と照射欠陥

・・・電子線照射で導入した純鉄の格子欠陥による、磁壁のピン止めを確認。

② これまでの研究

・・・中性子照射中のその場磁気計測

照射量に対して、純鉄の保磁力は単調増加。

A533B鋼では低照射量で増加、高照射量で緩やかに減少。

③ 冷間圧延した純鉄の熱時効・中性子照射と磁性

70°C熱時効材を除き、すべての試料で保磁力は減少。

→ 照射前に存在する転位の応力場の変化に敏感。