

平成23年度合同研究会
7月20-22日、筑波

QUEST装置におけるPWI研究

九州大学 応用力学研究所
渡辺英雄、吉田直亮
QUESTグループ

高温センター共同研究の実施概要

----- 共同利用・共同研究 -----

“応用力学”研究拠点形成

特定領域研究

マルチスケールのプラズマ・壁相互作用に関する研究
(坂本先生) H22年度まで

国際化推進研究(H23-) 海外から数件程度

----- 双方向型共同研究 -----

基幹装置QUESTを用いた定常プラズマの学術基盤
研究運営の透明性の確保と学会からの意見集約

⇒ 東北大との双方向研究が開始(H23-)

⇒ 仮想実験室の構築(データの共有)

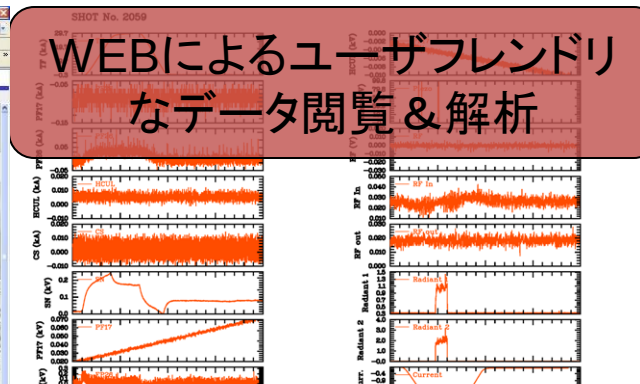
Officeが仮想実験室へ

遠隔実験参加を目指して

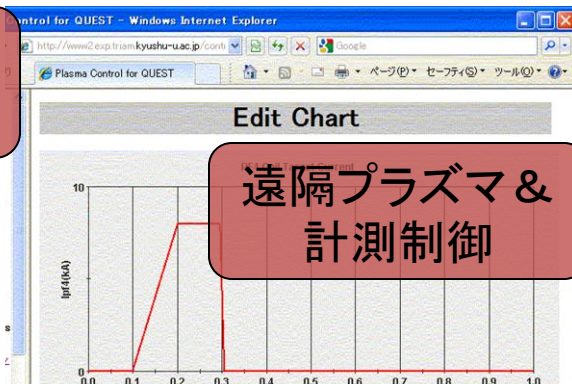
QUEST制御室との 遠隔コミュニケーション



WEBによるユーザフレンドリ なデータ閲覧&解析

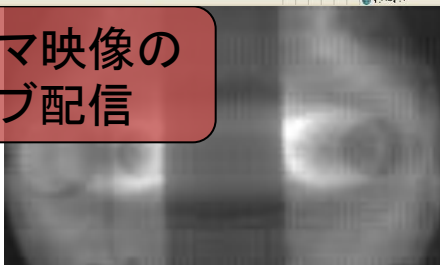


遠隔プラズマ& 計測制御

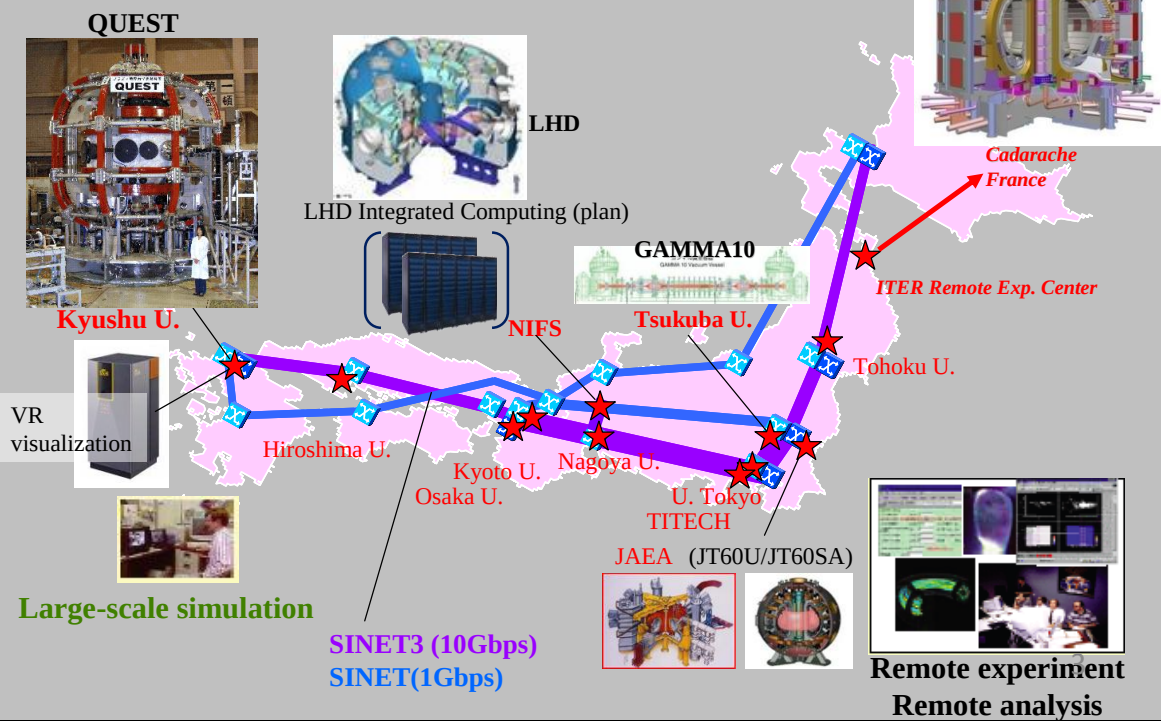
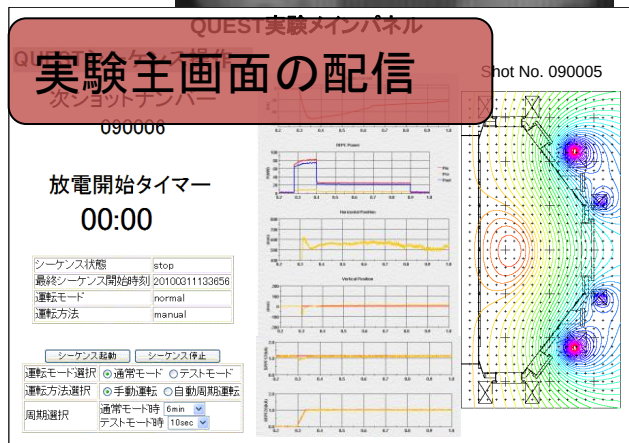


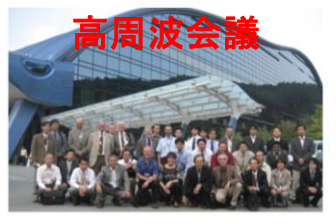
SINETを利用した高速データ転送

プラズマ映像の ライブ配信



実験主画面の配信





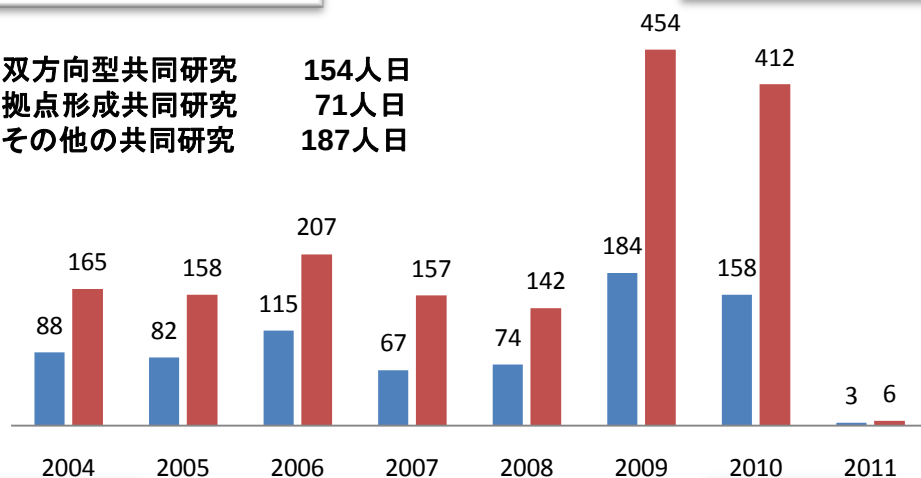
共同研究実績

■ のべ人数 ■ のべ日数



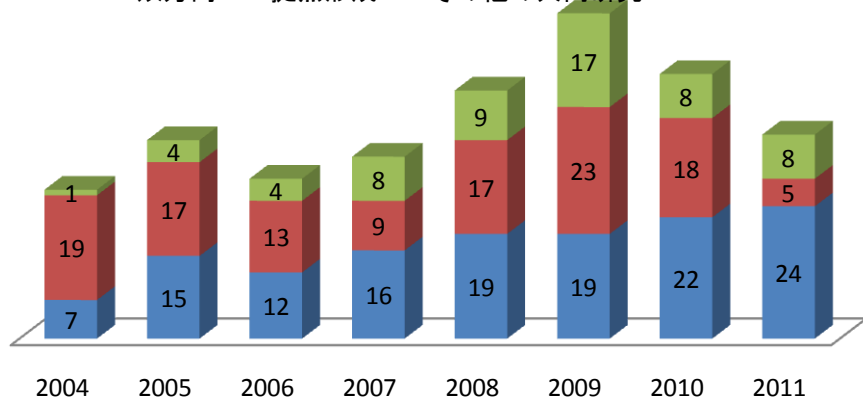
双方向型共同研究
拠点形成共同研究
その他の共同研究

154人日
71人日
187人日



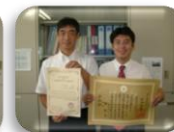
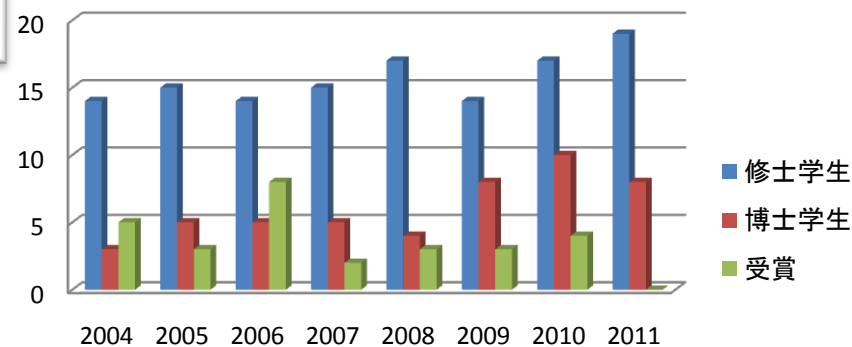
共同研究課題数

■ 双方向 ■ 拠点形成 ■ その他の共同研究



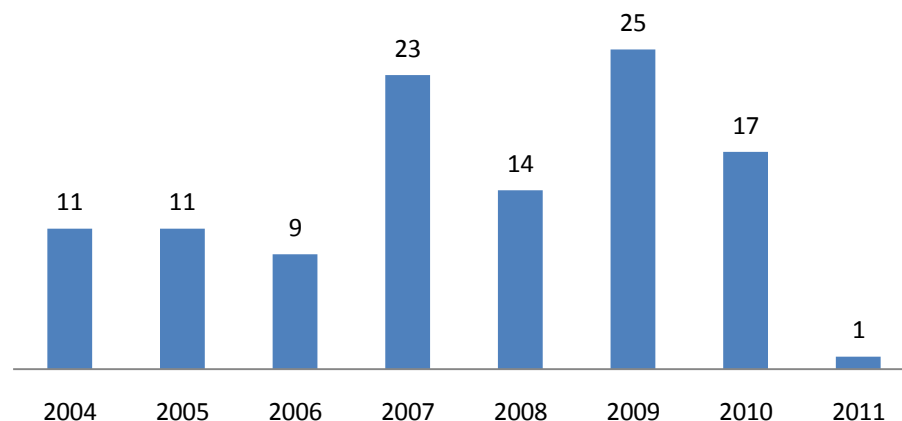
大学院生、留学生の受入

資料1



査読論文

■ 査読論文



QUESTにおけるPWI研究の意義

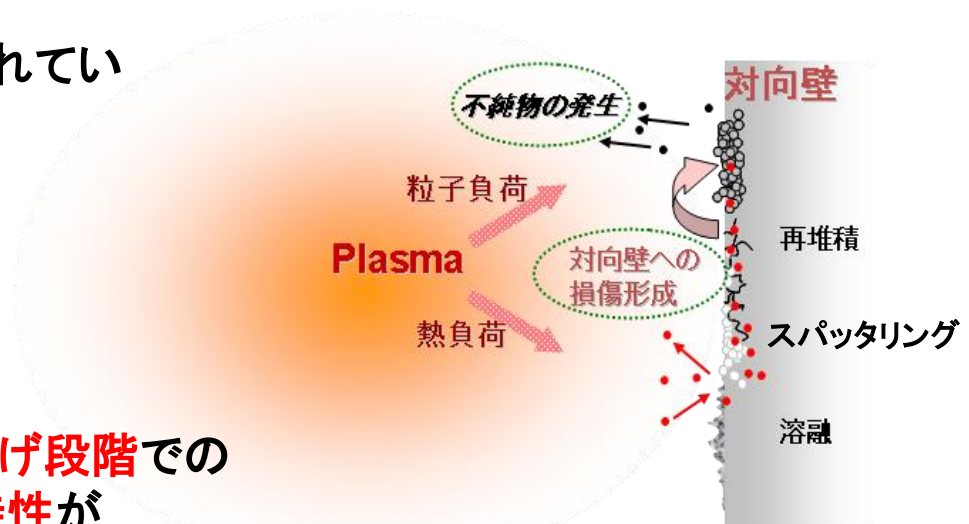
現在、核融合炉材料に関する研究は、
模擬実験を中心として、世界中で進められている。



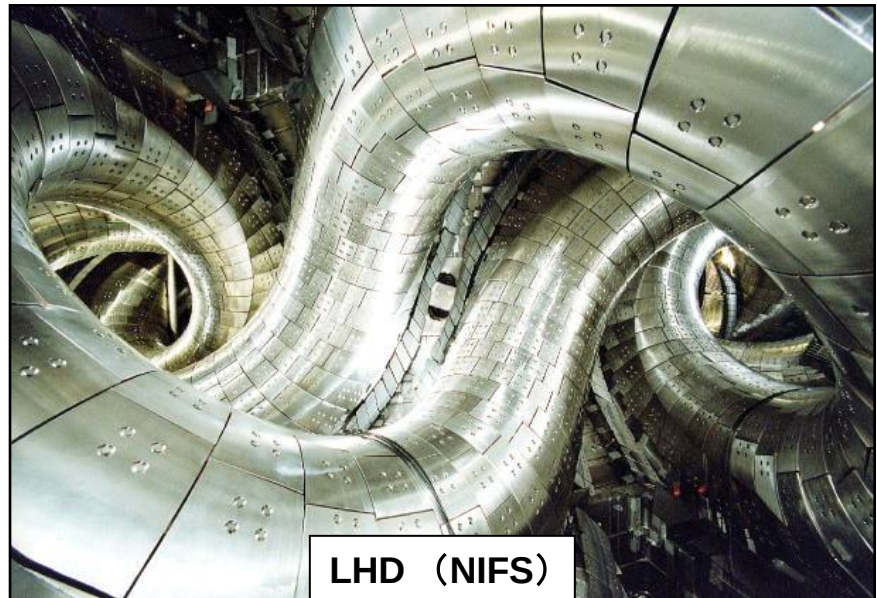
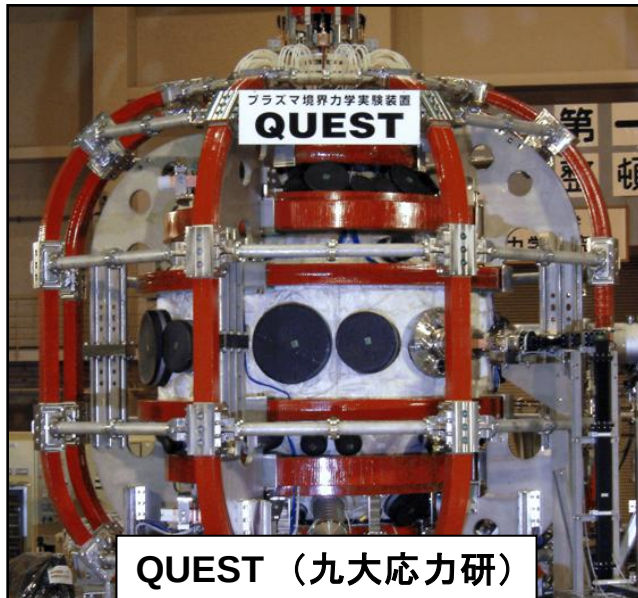
しかし、核融合実験用実機内では、
様々な影響が複雑に絡み合うため、
実機でのPWIの理解が重要である。



QUEST実機に試料を設置し、**装置立ち上げ段階**での
プラズマ対向壁の物理的・化学的材料特性が
どのように変化するのかの理解が目的。



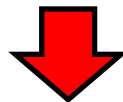
プラズマ・壁相互作用(PWI)の模式図



実験手法

○プラズマ曝露後の試料に対して以下の手法で分析・評価した

分析手法	分析内容	詳細	目的
TEM	試料の表面や内部の 微細組織観察	転位ループや ボイド	プラズマの 温度・密度の指標
		堆積層の構造	真空特性・ 水素同位体保持 放出特性 への影響の理解 堆積メカニズムの 理解
GD-OES (富山大学双方 向型共同研究)	試料の深さ方向の 元素分析	堆積層の 組成・厚さ	
XPS (QUEST双方 向型共同研究)	試料の深さ方向の 元素分析と 堆積元素の化学状態 分析	堆積層の組成・ 堆積元素の 化学状態	



○プラズマ制御に影響を与える、水素同位体保持放出特性が
どのように変化するのか。

重水素注入放出実験を用いたTDSにより評価を行った。

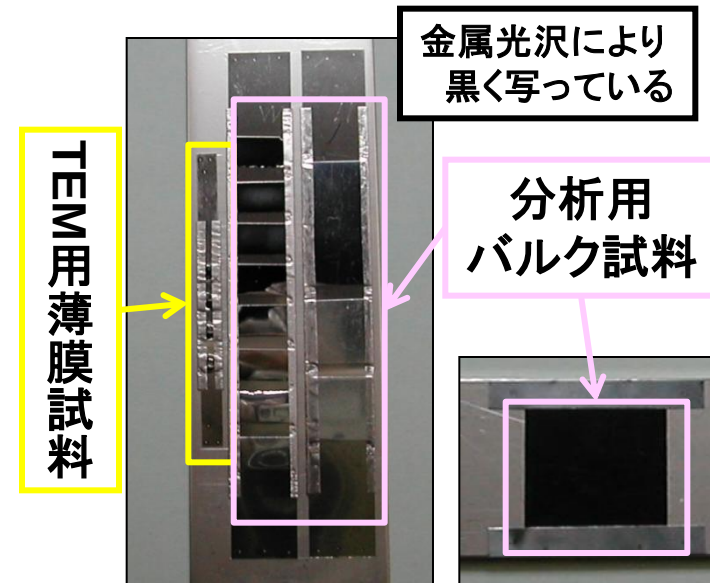
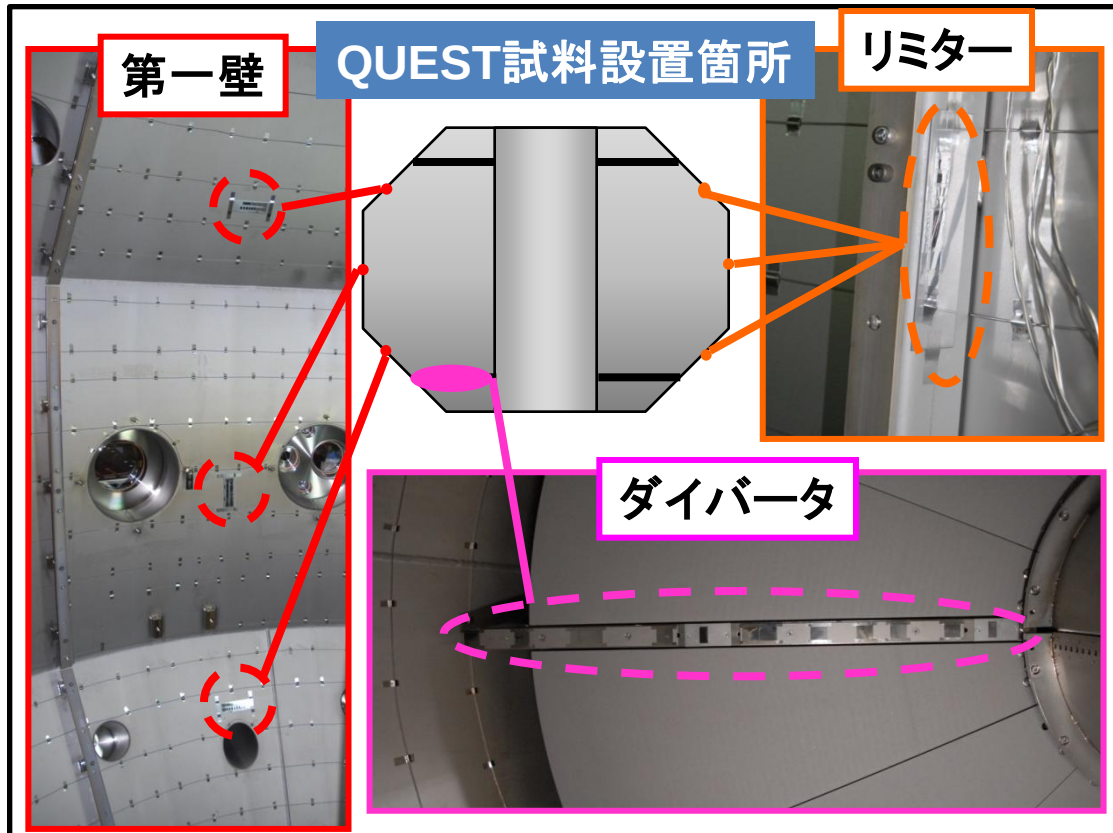
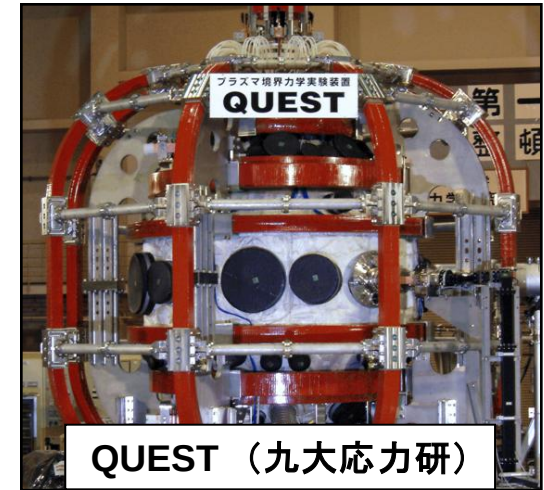


QUESTにおける長期プラズマ曝露実験

QUEST実験の目的

- ・QUESTにおける**装置の立ち上げ**時のPWIを理解。
⇒装置立ち上げ時のPWIについての知見を得る。
- ・QUESTのプラズマの高性能化への寄与
- ・高温壁装置化への貢献

設置時期: 2009年夏・冬・2010年夏の実験



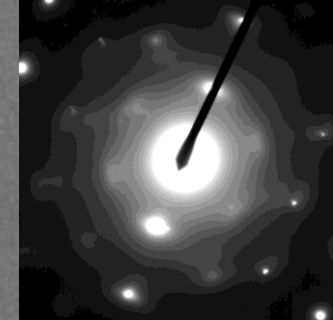
QUEST設置試料のTEMによる内部組織の観察

2009年冬の実験で第一壁中央部に設置した試料

⇒TEMで観察可能な原子はじき出しによる照射損傷はない。

第一中央部に設置したSUS316L試料

明視野像



20nm

ターゲット原子	W	Mo	Fe	Cr	Ni
はじき出しの閾値	2555eV	858eV	318eV	364eV	364eV

※W・Mo・SUS316Lで原子はじき出しによる格子欠陥はない。

⇒300eV以上の粒子が大量には入射していない。

第一壁中央部に堆積した不純物の組成

XPSによる分析結果(Mo試料)

2009年夏: C・Oの共堆積層

60秒スパッタ後もCが82%程度

⇒非常に厚い堆積層

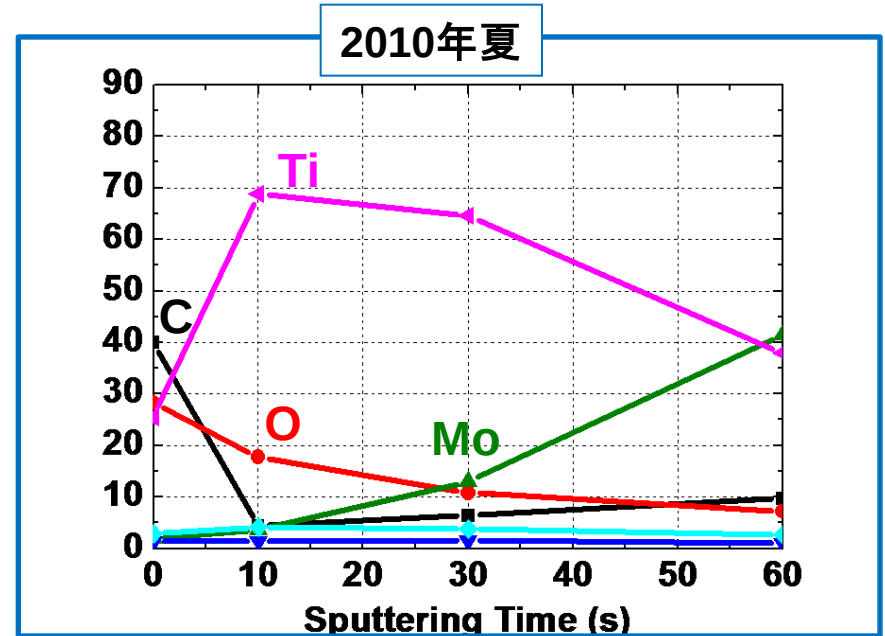
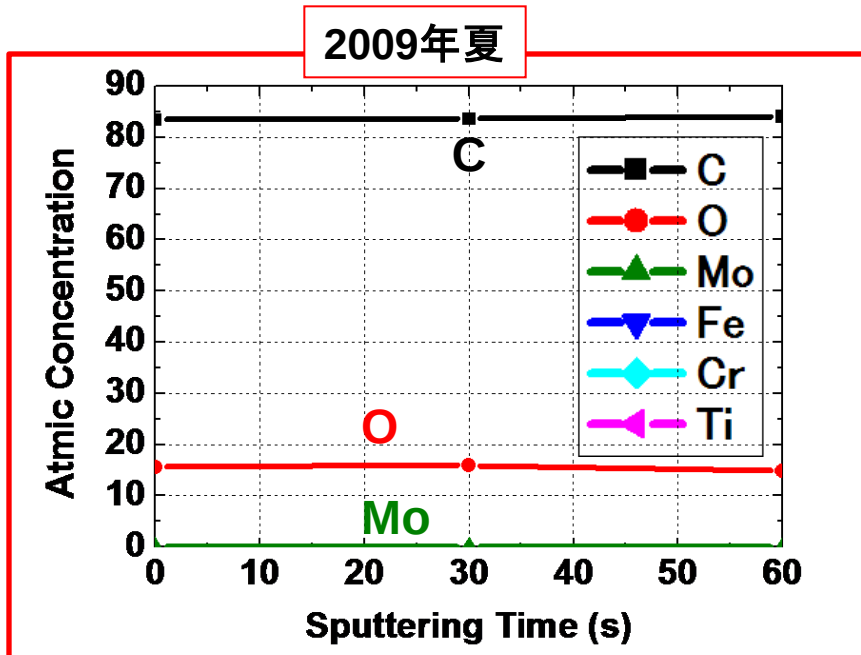
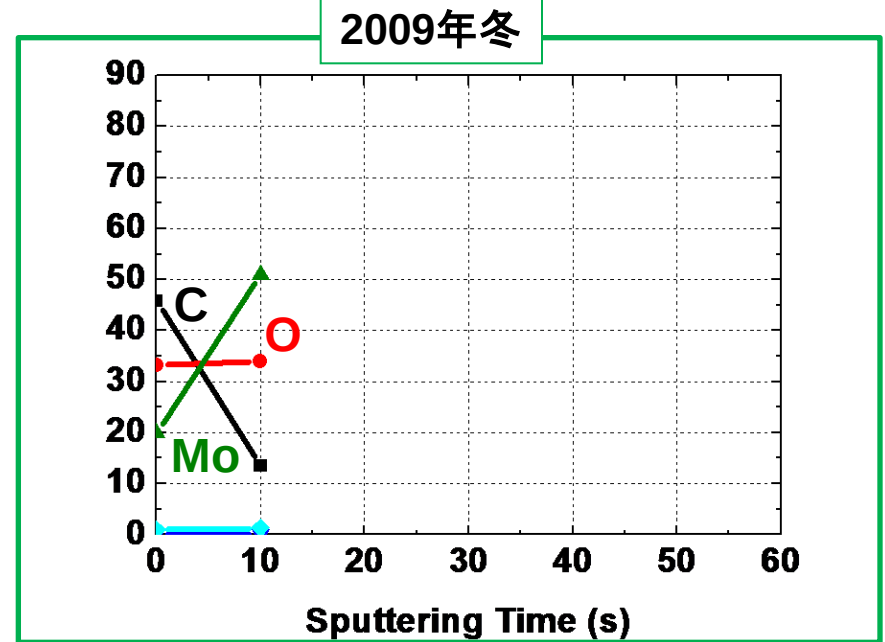
2009年冬: C・Oの共堆積層

10秒スパッタで50%がMo

⇒2009年夏より薄い。

2010年夏: C・O・Fe・Cr・Tiの共堆積

化学状態分析により金属元素は
表面付近で酸化物の形態をとっている。



第一壁中央部に堆積した不純物の組成

XPSによる分析結果

2009年夏: C・Oの共堆積層

60秒スパッタ後もCが82%程度

⇒非常に厚い堆積層

2009年冬: C・Oの共堆積層

10秒スパッタで50%

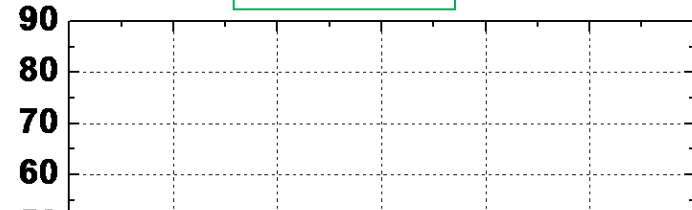
⇒2009年夏より薄い

2010年夏: C・O・Fe・W

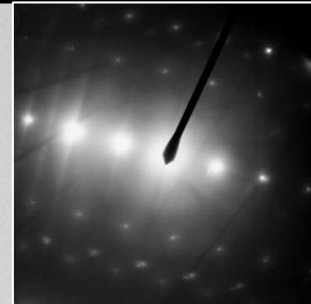
化学状態分析により

表面付近で酸化物の

2009年冬



明視野

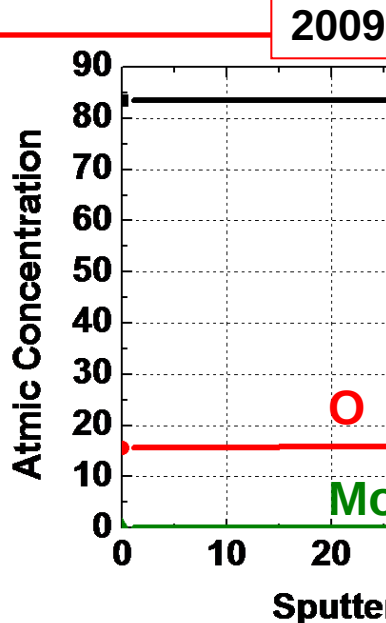


暗視野

1nm以下の微結晶として堆積

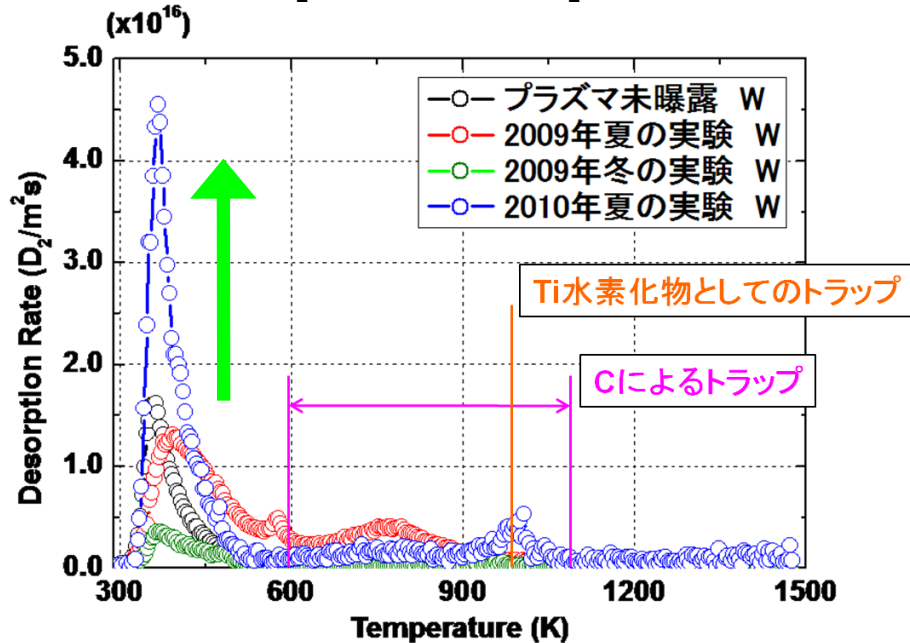
2010年夏の実験で第一壁中央部に設置したW薄膜試料

20nm

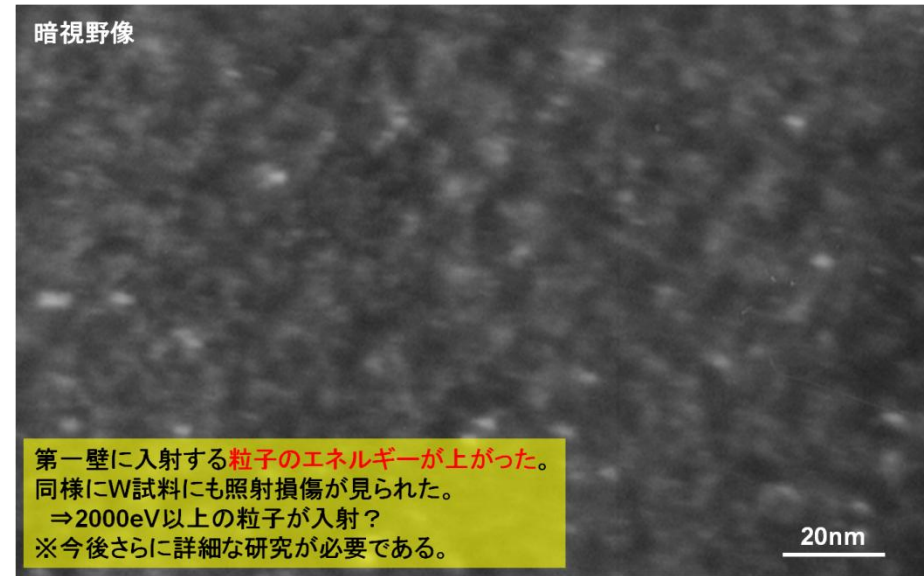


プラズマパラメータの上昇が確認

重水素注入放出実験による**重水素保持放出特性の評価**
(実験方法) 2keV D_2^+ イオンを $1 \times 10^{21} \text{D}_2/\text{m}^2$ 照射後、分析)



2011年冬の実験後のTEM観察 (試料:W)

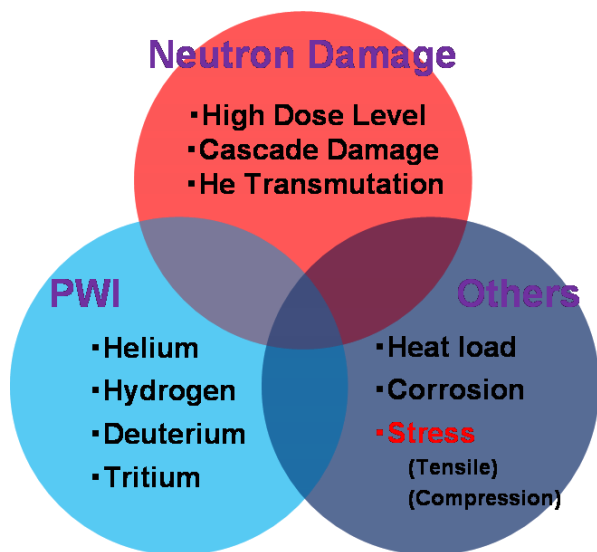


- ・2010年夏の実験以降、**堆積層にFeやCr**などが広く検出されるようになった。
⇒壁(ステンレス製)におけるFeのスパッタ量が増加した。⇒**プラズマ温度の上昇**
- ・**表面微細構造の複雑化**に伴う、**急激な水素保持量の増加**
⇒表面微細構造が複雑な試料での水素同位体保持放出特性の理解が必要。
- ・2011年冬の実験で**原子はじき出しによる照射損傷が観察**。
⇒第一壁やリミターに**入射エネルギーの着実な上昇** ($>3.5\text{keV}$ 成分)
- ・**堆積層中の金属元素の組成比の上昇**に伴う**低温(運転温度)域で放出量の増大**
⇒今後の、高温壁化で回避。

QUEST－PWI関連施設の特徴

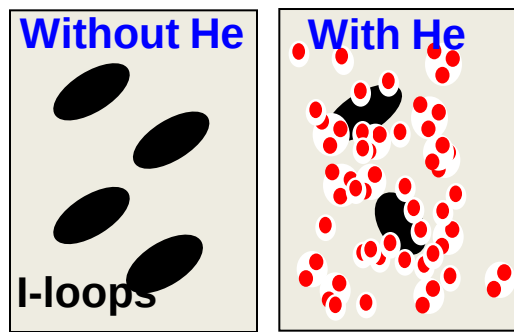
1) He 単独効果 + 重イオン複合照射効果 (純W、873K)

核融合炉環境
複合的照射環境



He ion irradi.	Cu ion irradi.	He and Cu ion irradi.	
873K, $1 \times 10^{22} \text{He}^+/\text{m}^2$	3dpa	$1 \times 10^{21} \text{He}^+/\text{m}^2$	$1 \times 10^{22} \text{He}^+/\text{m}^2$
Formation of dislocation loop	Large I-and V-type dislocation loops Void formation	Small I-type loop formation Void was not detected	

Synergistic Effects Damage and He (H)



Vacancy-He complex
Strong sink for defects
Effects of H (Plasma) ?

デモ炉への貢献

- 1) He(H)、2重イオン照射
- 2) 負荷応力の影響

【施設の特徴】

- ・ ラザフォード後方散乱(RBS), PIXEなどの分析機能及び高エネルギーイオン照射機能を有し、材料の非破壊分析や照射損傷の研究に用いる。
- ・ 平成9年度より全国共同利用施設として、多くの研究者・学生教育に開放。

【主な性能】

- ・ 昇圧方式: コッククロフト回路方式
- ・ ターミナル電圧範囲: 0.1–1.0MV可変
- ・ 最大ビーム電流: ${}^4\text{He}^{2+}$ 0.5pμ A (3.0MeV 時)
 ${}^{58}\text{Ni}^{3+}$ 2.0pμ A (4.0MeV 時)

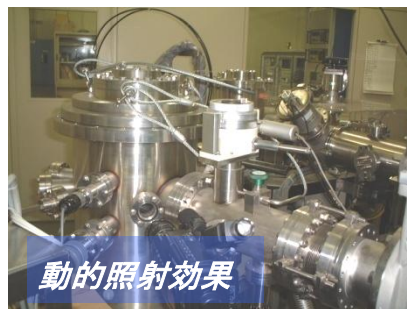
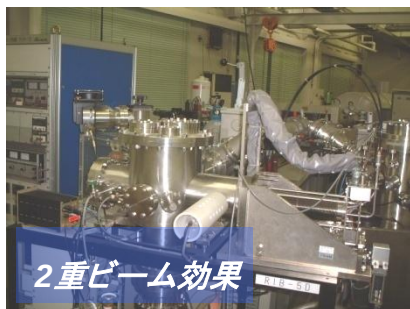
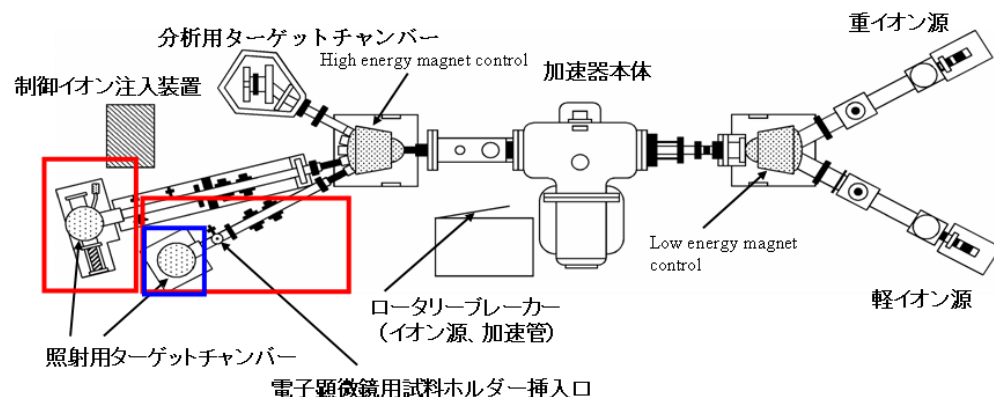
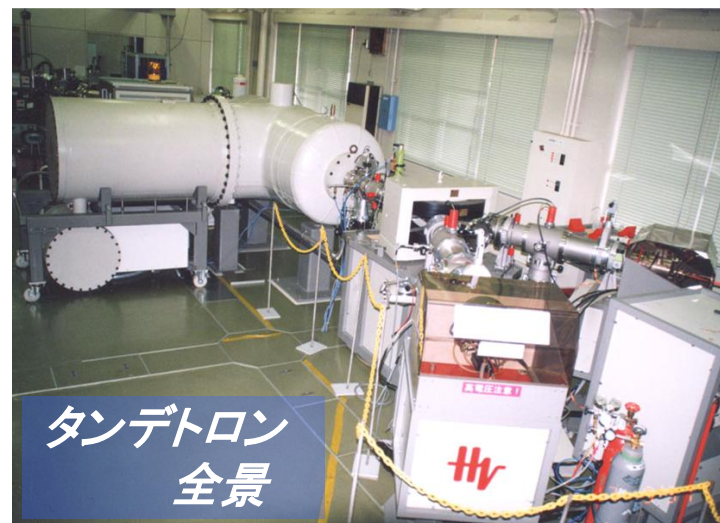
・ 照射機能

高温・重照射 (600°C、100dpa以上)

電子顕微鏡用ホルダー

(高温・引張)設置

He, 水素同時注入効果



構造材料の組織・強度特性変化

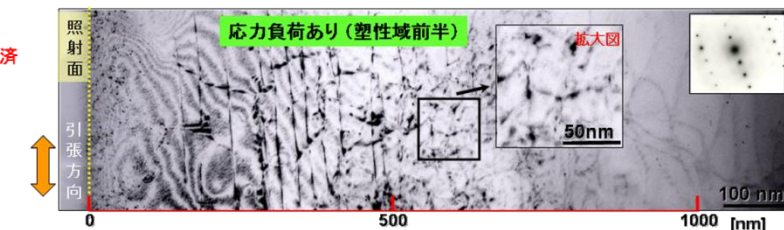
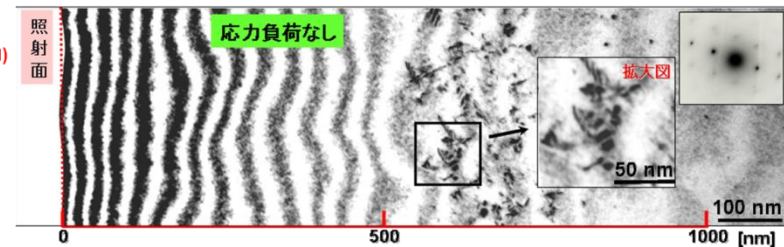
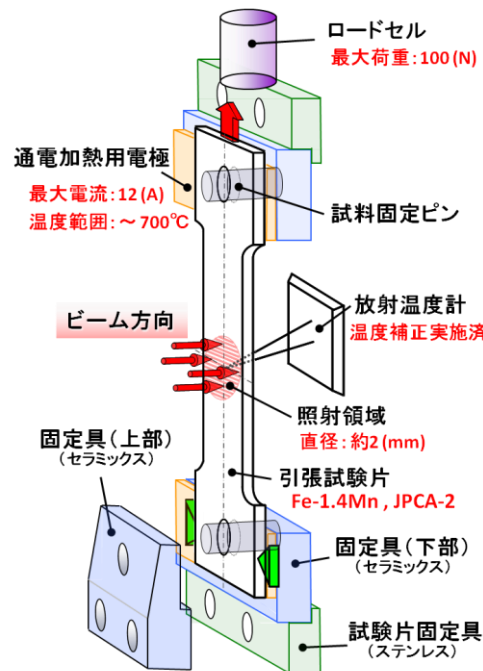
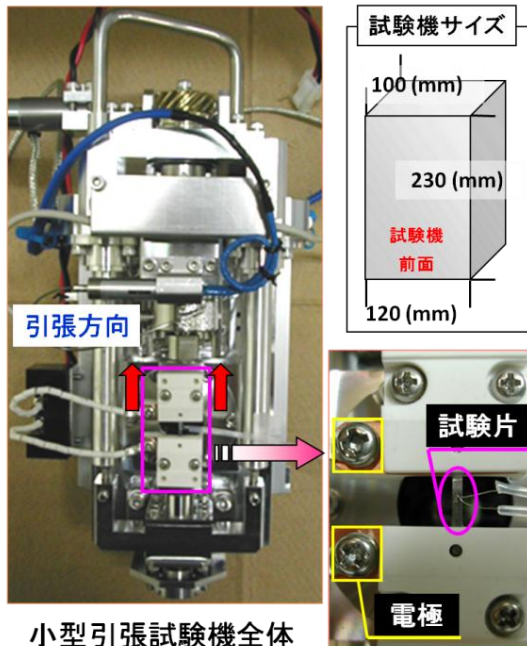
鉄系構造材料を先進炉材料として用いた場合の問題点

→ 構造材料の中性子・応力重畳効果下における照射
組織変化から材料の脆化(低温)、ボイドの形成(高温)



照射装置ビームライン小型引張試験装置を設置しての照射実験

・名称： 動的照射効果観察ステーション



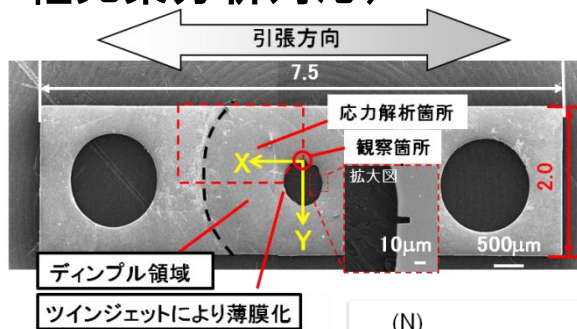
400°C, 25N, SUS316鋼(4dpa)

・低領域においても大きな
組織変化

九州大学・超高压電子顕微鏡(HVEM)

— 電子線照射施設（伊都・箱崎地区）

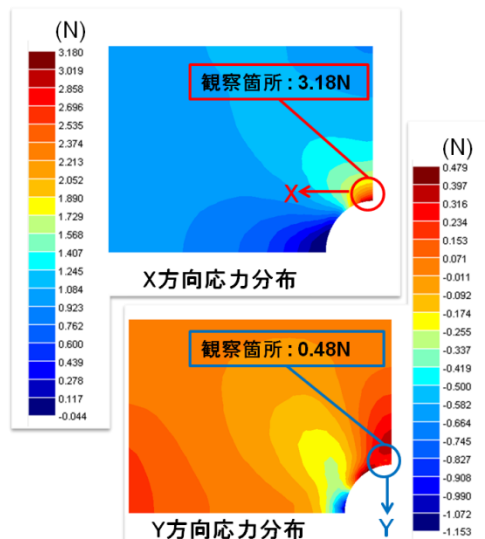
- 伊都地区・新HVEM
（世界最新型、オメガフィルター分析機能
（主に軽元素分析対応）



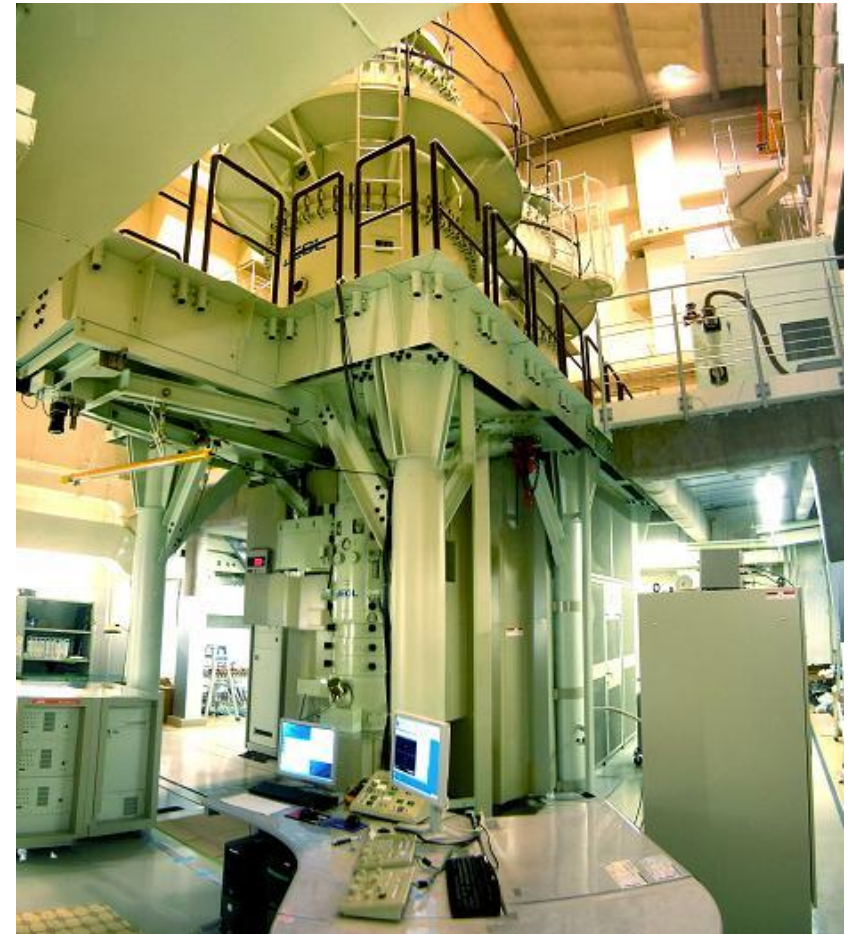
引張試験片特有の
複雑な応力分布



有限要素法による解析

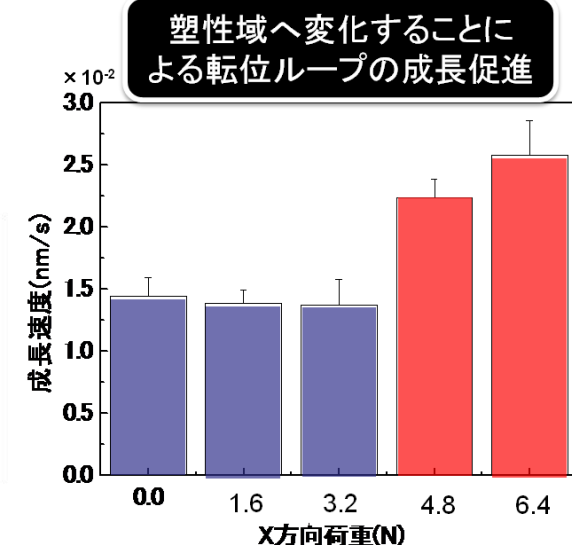
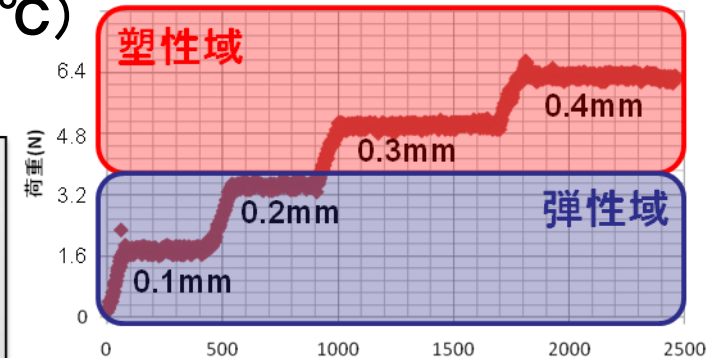
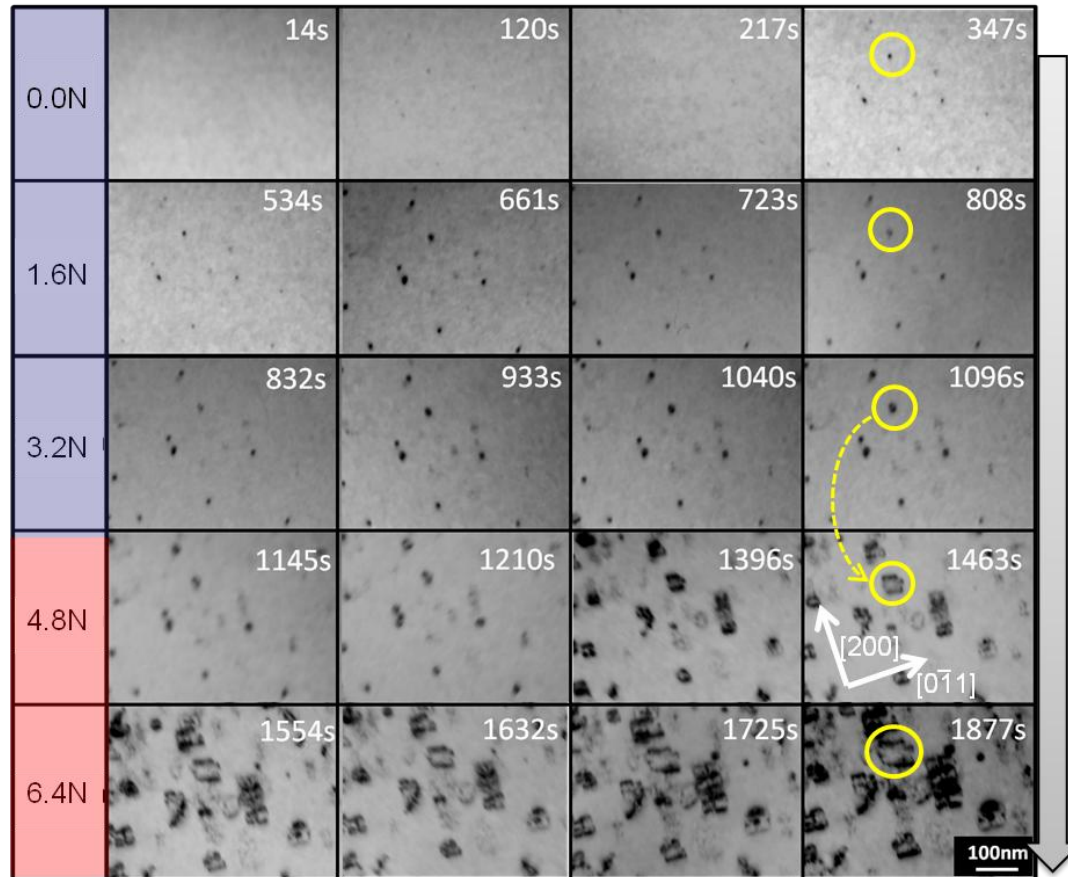


有限要素法を用いた応力解析(1N負荷時)



応力下における転位ループの成長(Fe-1.4Mn)

超高压電子顕微鏡照射下でのその場観察(290°C)



各変位量における成長速度

■弾性域内での転位ループの成長速度に大きな変化は見られなかったが、塑性域に入ることにより急激な転位ループの成長の変化が表れた。⇒ 材料強度に影響

PWI関連材料の中性子照射への取り組み(双方向研究)

- ・ 九大Questグループは、NIFS双方向型研究での既に拠点施設の一つ。
- ・ PWI関連ではQuestプラズマ温度の向上とともに、NIFS, 東北大(大洗)、富山大学、筑波大との連携を進めながら、Quest 照射+中性子照射(イオン)、中性子照射(イオン)+Quest照射などの組み合わせ照射の実験実施予定。
 - ⇒ H23から東北大との双方研究がスタート。
 - QUEST照射による対向材料のプラズマ・中性子(イオン)重畳効果に関する研究

目標の明確化(複合的照射により、何が理解できるか?)

- ・ Quest(水素プラズマ)と中性子照射による点欠陥形成との関連
- ・ 高温領域では、水素は自由に拡散。(Quest壁の高温化、300-500°C)
- ・ プラズマ中の不純物(現状、炭素)の与える影響。
- ・ 九大PWIシュミレーション施設の活用(2重ビームライン)
W; He と空孔との結び付きが大。 → I型ループ核形成や安定性に影響。
水素(プラズマ)が照射組織に与える影響について評価。
- ・ RI施設利用(九大/東北大)及びQuestでの照射の可能性・検討中
RI施設からの搬出可能なレベルまで、微細加工後、Questでのプラズマ照射。
極微小試験片から得られる情報の検討, 中性子照射による核種、量の検討。
九大・RI実験室の確保。中性子の照射条件(Questの壁温度近傍、最大0.1dpa)