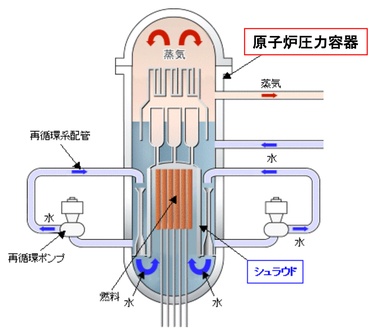
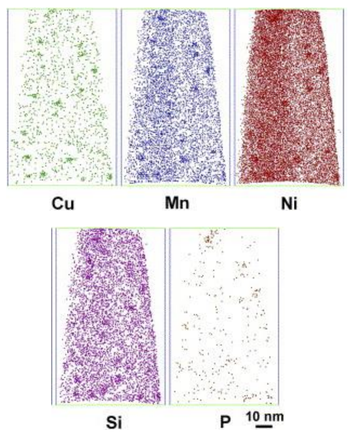
～放射線環境下での金属材料の劣化を、超音波で非破壊に検査する技術を開発します～

高経年化で生じる原子炉内の析出物の超音波測定技術の開発

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻　　沖田　泰良

研究の背景



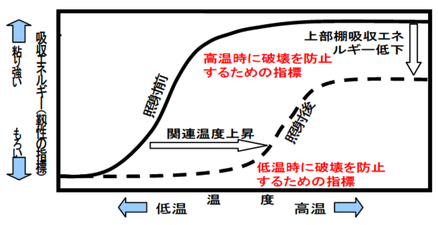


圧力容器鋼の微細組織 [1]

[1] M.K. Miller et al., JNM 351(2006) 216.

原子炉圧力容器鋼 (*) は，放射線に曝されることで内部の微視的な構造（微細組織）が変化し，これに伴い脆くなることが知られている（照射脆化）．

＊ 圧力容器とは，核燃料を収納している鋼製の容器である．

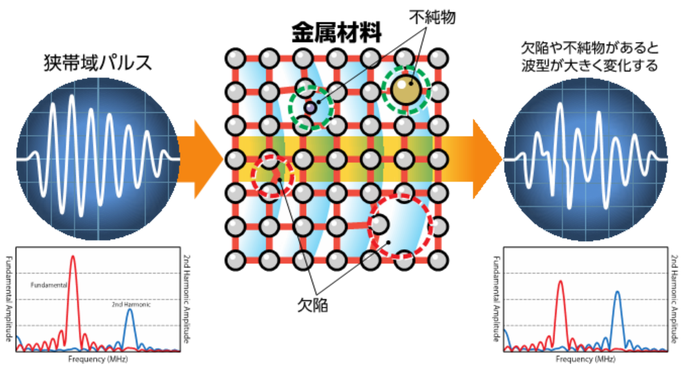


照射脆化の模式図

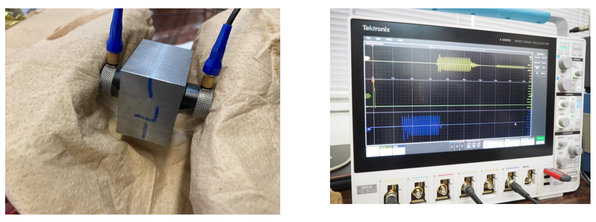
- 脆化は，運転と共に進んでいくため，長期の運転には脆化の進行を適切に把握することが重要である．
- 従来，監視試験片 (*) を定期的に取り出し，衝撃試験等により実際に試験片を破壊し，得られたデータから脆化の進行具合を測定してきた．
- 今後の長期運転を踏まえると，試験片有効利用の観点からも，脆化を非破壊で検出する技術の開発が望まれる．

＊ 監視試験片とは，脆化測定を行うため，原子炉の運転開始前から，炉心に挿入していた圧力容器鋼と同一の材質を持つ試験片である．

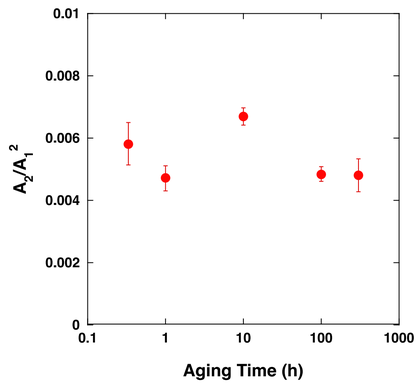
非線形超音波



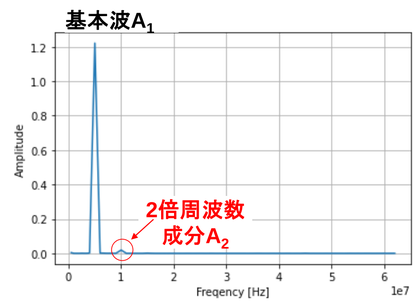
非線形超音波とは，送信波と異なる周波数成分を測定する手法で，2倍周波数（2次高調波）成分を測定する検査技術は，ナノ組織を検出しうる手法として，注目を浴びている．



実際の測定の様子



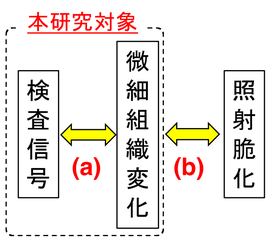
非線形成分の時効時間依存性



- 析出物形成に伴い，非線形成分は減少する傾向にあることがわかる．

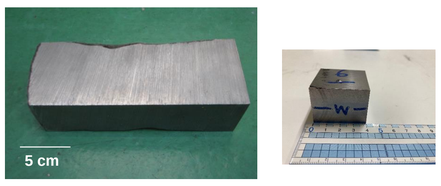
本研究の創意性

照射脆化の非破壊検査による検出技術の構築



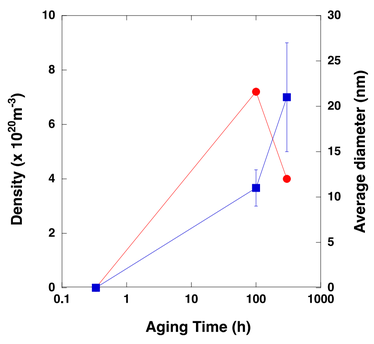
(a) 非破壊検査信号と微細組織の関係
(b) 微細組織と照射脆化の関係

本研究では，特に第二相（析出物）形成に伴う超音波信号の変化を明らかにする．



試験に用いたFe–0.65%Cu

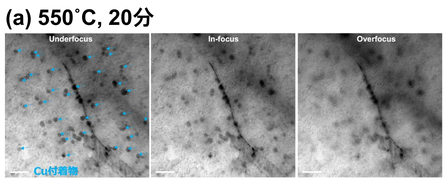
溶解作製したFe–0.65%Cuを高温で保持（時効処理）することで，圧力容器鋼中に形成する析出物を模擬した．



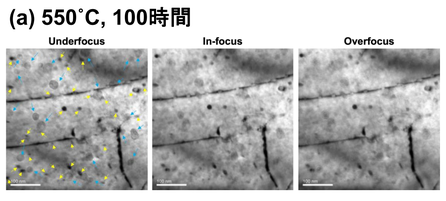
析出物密度と大きさの時効時間依存性

- 時効時間とともに密度，大きさが変化している．

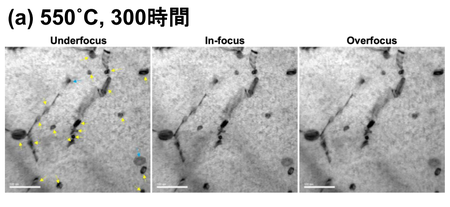
(a) 550˚C, 20分



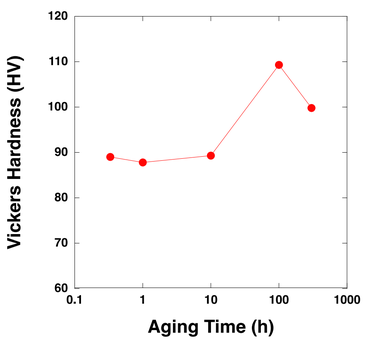
(a) 550˚C, 100時間



(a) 550˚C, 300時間



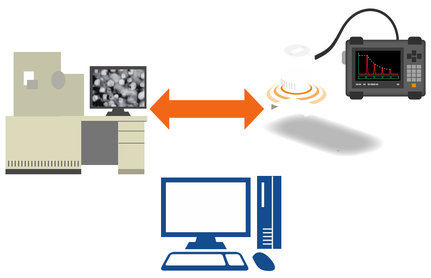
Fe-0.65%Cu時効材の透過型電子顕微鏡による観察
（黄矢印が析出物を示す）



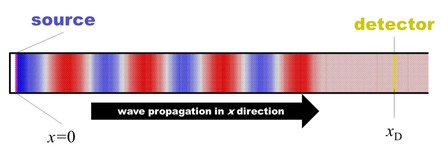
硬度の時効時間依存性

- 析出物形成に伴い，硬度が変化している．

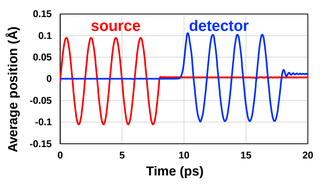
分子シミュレーション

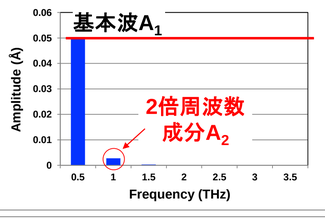


非線形超音波を検出技術として確立するには，ナノ組織と信号の関係を科学的根拠に基づいて定量化することが望まれる．

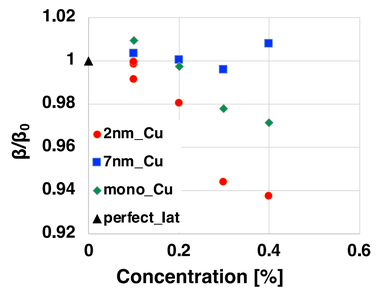


個々の原子・分子の挙動から解析する手法（分子動力学）を用いて，ナノ組織を配置した系で超音波が伝播する過程をシミュレーションした．





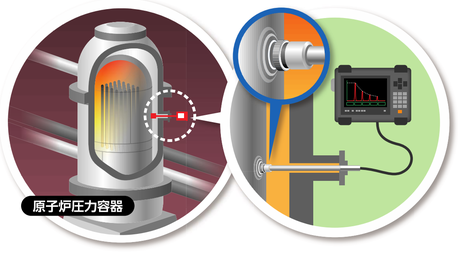
$$\beta = \frac{A_2}{8{A_1}^2k^2x}$$



- 非線形超音波の実験で得られた結果と同様，析出物を配置することで非線形成分は減少することがわかる．

まとめと課題

- 原子炉圧力容器鋼の脆さを測定する非破壊検査技術構築のため，その微細要因の一つである析出物形成に伴う検査信号変化を測定した．
- 析出物形成に伴う超音波の信号変化を分子シミュレーションによって．明らかにした．
- 今後は，表面状態や測定条件などに左右されにくく再現性の高い技術を用いて，放射線環境下で使用された鉄鋼材料を用いた実証試験が望まれる．



将来展望