

低合金鋼の照射マイクロ組織変化と局部共振高調波強度との相関

Correlation between Microstructural Changes of Low Alloy Steels Irradiated by High Energy Electrons and Acoustic Nonlinear Intensities by Local Resonance Harmonic Measuring

小島 敦子 (Atsuko Kojima) *¹ 藤井 克彦 (Katsuhiko Fujii) *¹
石田 仁志 (Hitoshi Ishida) *¹ 川嶋 紘一郎 (Koichiro Kawashima) *²

要約 原子炉容器の照射脆化評価に対する非線形超音波法の適用性の検討を目的に、電子線照射した低合金鋼についてマイクロ組織変化と局部共振高調波強度の照射量依存性を調べた。板厚に応じた共振周波数で測定した自由振動中の高調波共振エネルギー（時間積分量）は、照射量に伴い増加する傾向があり、Cuリッチ析出物が高密度に形成した高照射量の試料で高調波強度が大きくなった。照射脆化要因である溶質原子クラスタの形成と高調波強度の相関が確認された。

キーワード 非線形超音波法, 高調波, 照射脆化, 共振高調波法

Abstract The applicability of the nonlinear ultrasonic technique for evaluating irradiation embrittlement of reactor vessel steels was examined by the comparison between microstructural changes of low alloy steels irradiated by high energy electrons and measured acoustic nonlinear intensities by local resonance harmonic. The acoustic nonlinear intensities compensated by the specimen thickness increased with increasing dose. The largest acoustic nonlinearity intensity was detected in the specimen in which fine Cu-rich precipitates of 2 nm diameter were observed with high number density by atom probe tomography, irradiated to the highest dose of 0.022 dpa at 290°C. It was found that the acoustic nonlinearity intensity related to the formation of solute atom clusters causing radiation hardening and embrittlement.

Keywords nonlinear ultrasonic technique, embrittlement, low alloy steel

1. はじめに

原子炉容器を構成する低合金鋼は、中性子照射により延性-脆性遷移温度の上昇と上部棚エネルギーの低下が生じること（中性子照射脆化）が知られており⁽¹⁾、原子炉容器と同一の材料から製作された監視試験片を炉内で照射し、定期的に取り出して破壊試験を実施することで、健全性の確認がなされている^{(2)~(4)}。しかし、原子力発電所の運転期間が認可により40年から60年へ延長された場合には、炉内で照射された監視試験片が不足する可能性があり、使用済み監視試験片の再生などの研究が進められている⁽⁵⁾。また、監視試験片の脆化の非破壊的な評価手法の研究も実施されており^{(6)~(13)}、その1つに超音波法⁽¹³⁾がある。

超音波法のうち線形超音波法では、欠陥部からの散乱波振幅が、粒界散乱波あるいは異種材料界面の散乱波振幅より十分大きい場合には欠陥を検出できるが、密着き裂界面や連続体内の微小な異質部からの散乱波振幅は、粒界散乱波あるいは異種材料界面の散乱波振幅より小さく検出が困難である⁽¹⁴⁾。このような線形超音波法による検出が困難である内部欠陥及び異質部の検出に適用できる方法として、非線形超音波法がある。非線形超音波法は、単一周波数の大振幅正弦波パースト波により励起される繰返し応力が材料内の異質部・不健全部を揺り動かしたときに生ずる、正弦波からの波形のゆがみを高調波（入射周波数の整数倍）あるいは分調波（入射周波数の分数倍）として抽出し、その振幅を用いて欠陥を検出・評価する方法である。材料内不健全

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 (有)超音波材料診断研究所

部あるいは部分接触面における引張側と圧縮側応力ひずみ応答の差が大きいほど、波形のゆがみが増大する⁽¹⁴⁾。

一方、原子炉容器鋼の照射脆化因子として、ナノメートル (nm)・スケールの極めて微細な溶質原子クラスタの形成やマトリックス損傷と呼ばれる照射欠陥集合体の形成がある。材料変化に対する高調波の感受性に着目して、中性子照射された原子炉容器鋼に対する測定がMatlackらによりなされており⁽¹⁵⁾、この中で、照射量と照射温度、銅 (Cu) 含有量の異なる試料について2次高調波の振幅が測定され、照射量の増大にともなう高調波振幅の増大とCu含有量が高い材料において大きな振幅が確認されている。また、照射後の回復焼鈍と再照射によっても2次高調波の振幅が変化することが示されており、非線形超音波法により微細構造の変化を検出することが可能であると報告しているが、まだ研究例は少ない。

そこで、当研究グループでは非線形超音波法のうち水浸局部共振高調波法を適用して、高調波による照射マイクロ組織変化の評価を開始した。適用した方法は、集束させた縦波の垂直入射により超音波ビーム照射域だけを厚さ方向に共振させる厚さ方向局部共振高調波法であり、高調波の画像化により塑性変形の可視化⁽¹⁶⁾などに成功している方法である。原子炉容器鋼の照射組織変化への適用を検討するため、高エネルギーの電子線で照射された低合金鋼 (0.16 wt% Cu) とその非照射材について、照射による高調波振幅の変化を調べた結果、直径が数nmのCuを含む溶質原子クラスタが高密度 ($3.2 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$) に形成した電子線照射試料において高調波の振幅が大きくなり、電子線照射の有無による差が生じることを確認した⁽¹⁷⁾。本研究では、電子線照射量の異なる低合金鋼 (0.12 wt% Cu) の5試料について、マイクロ組織変化と局部共振高調波強度の照射量依存性を調べ、これらの関係を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材には、Cu含有量が0.12 wt%のA533B鋼材を用いた。化学組成 (wt%) は、Fe-0.25C-1.20Mn-0.25Si-0.014P-0.58Ni-0.08Cr-0.54Mo-0.12Cuである。照射は5 MeV電子で行い、照射温度は $290 \pm 5^\circ\text{C}$ 、

損傷速度は $2 \times 10^{-8} \text{ dpa/s}$ である。電子線照射実験の詳細は既報⁽¹⁸⁾にまとめて示されている。図1に電子線照射した試験片の形状を示す。この試験片から比較的均一な照射を受けた中央部が $20 \times 5 \times 1 \text{ mm}$ の試験片の先端に位置するように、図1の斜線部から高調波測定用と硬さ測定・マイクロ組織観察用の試料2個を切り出した。厚さ方向局部共振高調波法では、板厚や試料表面の凹凸によっても、水平面内に振幅の変動が現れるため、測定用試料の両面を研磨紙で#1200まで研磨した後にDP-懸濁液 $9 \mu\text{m}$ で研磨して測定用の試料とした。また、硬さ測定・マイクロ組織観察用の試料も同様に研磨した。

図1の斜線部に示す高調波測定用試料の左端からの距離に対する電子線照射量の分布を図2に示す。図1の高調波測定用試料左端から18 mmの位置が、電子線照射した試験片の中心であり、電子線照射量が最大となる位置である。電子線照射量が最大の位置を中心に両側2 mmにおいて、電子線照射量がほぼ一定とみなせる。なお、試料面における短辺方向には照射量は一定である。5試料の最大照射量と電子線照射量がほぼ一定である領域の板厚値を、表1にまとめて示す。

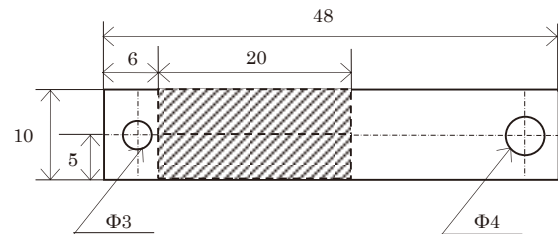


図1 試料形状⁽¹⁸⁾ (厚さ1mm)

表1 各測定用試料の電子線照射量と板厚値

試料名	電子線照射量 (dpa)	板厚値 (mm)
A-1	0.0001	0.935
A-2	0.0009	0.906
A-3	0.0027	0.910
A-4	0.0090	0.924
A-5	0.0217	0.928

2.2 硬さ測定

硬さは、ミットヨ社製の微小硬さ試験機(HM-221)を用い、ビッカース硬さ試験により測定した。試験荷重は、0.5 kgとした。ビッカース硬さ計測位置は、図2で示す電子線照射量がほぼ一定の領域内の24

か所を測定した。

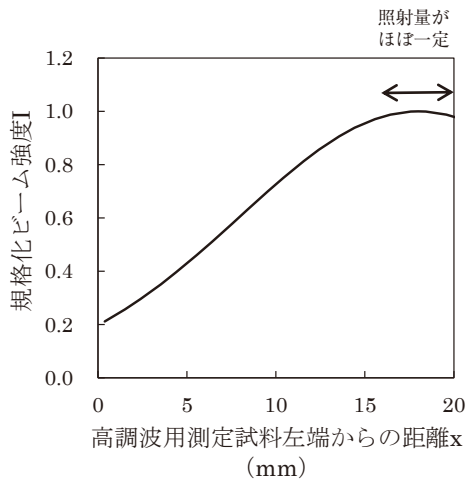


図2 測定試料の高エネルギー電子線照射量分布⁽¹⁸⁾

2.3 ミクロ組織観察

溶質原子クラスタの測定にはアトムプローブ (atom probe tomography, APT) を用い、各試料の図2で示す電子線照射量がほぼ一定となる領域に対して実施した。

APT測定には、日本原子力研究開発機構の新型転換炉原型炉ふげんの管理区域内にある高経年化分析室のCAMECA社製のLEAP3000XHRを用いた。測定は電圧パルスモードとレーザーパルスモードで行った。電圧パルスモードでは、試料温度を -223°C 、パルス比を0.15として測定を行った。また、レーザーパルスモードでは、試料温度を -238°C 、レーザー出力を0.2 nJ、パルス周波数を250 kHzとして測定を行った。測定用の針状の試料は、HITACHI製の集束イオンビーム (focused ion beam, FIB) 加工装置 (NB5000) を用いて作製した。FIB加工装置を用いて、 $2 \times 2 \times 10 \mu\text{m}$ の角柱状に切り出した微小サンプルを、タングステン (W) ニードルの先端にW蒸着で固定し、リング状にビームを走査して円錐状に加工した。なお、加工の進行に伴いリングの大きさとイオンビームの強度と加速電圧を小さくすることで、加工ビームの影響を極力排除しつつ先端径が $0.1 \mu\text{m}$ の針状に加工した。

APT測定で収集したデータは、質量/電荷比ごとに元素の種類を決定した。なお、元素の3次元像 (原子マップ) のz方向長さを最適化するために、電圧パルスモードでは電界蒸発場 (Evaporation Field) 33.0 V/nm とアトムマップの伸長係数 (Image Compression Factor) 1.20、レーザーパルスモード

では 30.0 V/nm と1.65をそれぞれ用いた。

多くの元素において、質量/電荷比は元素固有の値となるが、いくつかの元素では、異なる元素が同じ質量/電荷比を持つ。鉄鋼に含まれる元素の場合、質量58のFeとNiが同じ質量/電荷比を持つことになり、質量/電荷比からは個々の原子がどちらの元素であるかを決定することは不可能である。バルクの平均組成を調べる場合には、質量/電荷比が持つ元素の濃度を同位体の存在比を基に配分することで値を求めることができるが、個々の元素の局所的な濃度変化を評価する場合にはこの方法は妥当ではない。そこで本研究では質量58の元素として取り扱った。

2.4 水浸局部共振高調波法

入射した正弦波のゆがみを高調波として測定することによって材料特性の変化などを評価することが可能な非線形超音波法の一つである水浸局部共振高調波法を用いた。数サイクルの短いバースト波入射では困難な、本研究で測定するような薄肉の試料に対して、板厚方向に入射した数十～数百サイクルの長いバースト波を試料内で共振させることにより、入射正弦波からの微弱な変調が増幅され、材料特性変化の検出が期待できる。水中で集束探触子を用いることで、水距離の変化によって試料の板厚内に焦点を設定し、超音波をビーム径と板厚の領域に集中させて共振させ、局所的な材料特性の変化や劣化部を検出する。

水浸局部共振高調波計測装置の構成を図3に示す。大振幅正弦波バースト波の発生装置にはRITEC製のRPR-4000、探触子には公称周波数35 MHz、水中焦点距離20 mm、素子径6 mmの集束探触子、画像化および波形処理・記録にはInsight製のデータ採取ソフトウェアInsightScanを用いた。また、基本波振幅の1%程度の微弱な高調波成分を抽出するためのアナログハイパスフィルタには、Insight製の高調波抽出用フィルタを用いた。記録した測定データの測定後の画像化および波形処理には、Insight製のデータ解析ソフトウェアInsightAnalysisを用いた。

水中に水平に置いた板状の試料に、集束探触子を用いて縦波を垂直入射し、スキャナで集束探触子を水平方向に走査し、アナログハイパスフィルタにより抽出した高調波振幅を、スキャナで得た探触子の

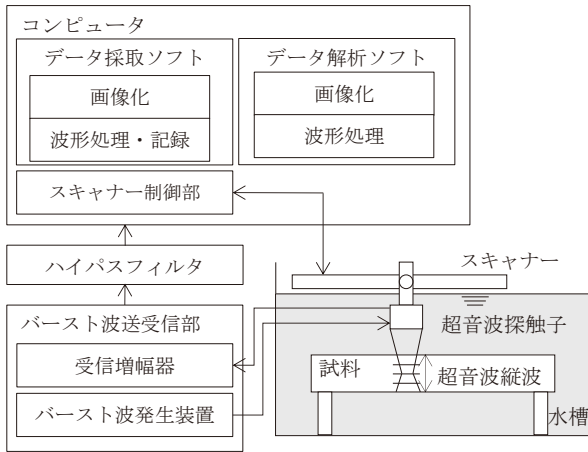


図3 水浸局部共振高調波計測装置の構成

位置情報に対してマッピングし画像化を行った。走査ピッチは0.1 mmとし、サンプリング周波数は1000 MHzとした。

水浸局部共振高調波法測定を試料の配置を図4に示す。治具に固定した試料の先端が、各試料の図2に示す電子線照射量がほぼ一定の領域である。また、左から右に照射量が大きくなるように試料を配置した。

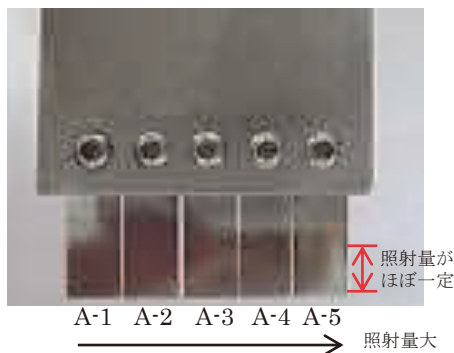


図4 水浸局部共振高調波法測定を試料配置

3. 結果

3.1 硬さ測定

照射量に伴う硬さの変化を図5に示す。エラーバーは測定値の標準偏差である。硬さは照射量の増加とともに大きくなり、最大照射量であるA-5試料の硬さは、照射を受けていない試料と比べて35増加した。

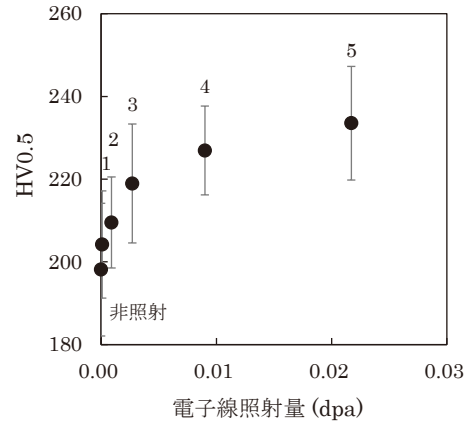


図5 照射量に伴う硬さの変化

3.2 ミクロ組織観察

図6には、レーザーパルスモードで測定したCuの原子マップの例を各試料について示す。A-4試料とA-5試料でCuの微細な集積した箇所が観察され、Cuを含む溶質原子クラスタが形成していることが分かる。レーザーパルスモードでの測定では、Si等の軽元素の分布にレーザー照射によるイオンの表面移動によるアトムマップへの影響が生じる場合がある。また、SiはCuを含む低合金鋼に照射で形成するCuリッチ析出物に含まれる元素として知られている。そこで、A-4試料とA-5試料については、溶質原子クラスタの大きさおよび組成を評価するために、電圧モードでのAPT測定を実施した。

図7には、電圧パルスモードで測定したA-4試料とA-5試料の原子マップの例を示す。照射量の低いA-4試料では微細なCuのクラスタが観察されるのに対して、照射量の高いA-5試料ではより成長したCuクラスタが観察される。今回の測定では、Cuクラスタの位置にMnやNi、Siが明確に集積したもの

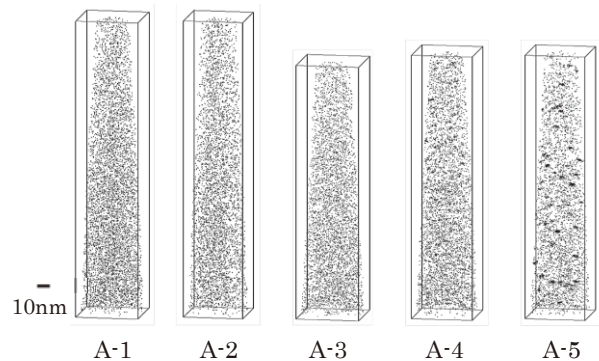


図6 Cuの原子マップの比較 (測定条件：レーザーパルスモード)

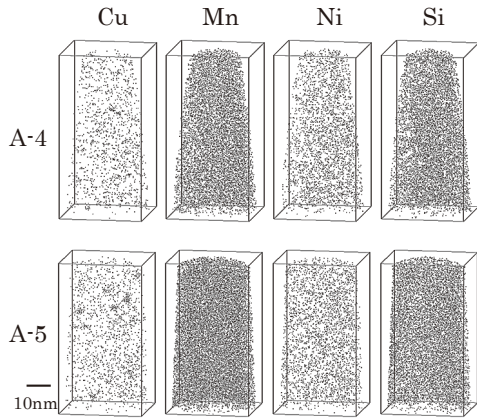


図7 A-4 および A-5 試料の原子 マップの例 (測定条件：電圧パルスモード)

も観察されるが、Cuのみが集積したものも多く観察された。そこで、Cuのみを溶質原子クラスタのコア元素として再帰的探索アルゴリズムに基づくクラスタ解析⁽¹⁹⁾によりクラスタを抽出した。なお、コア原子の抽出に用いるしきい距離には0.7 nmを用い、コア原子が5個以上のものだけをクラスタとして取り扱った。表2に溶質原子クラスタの平均直径、数密度、体積率および平均組成をまとめて示す。照射量の増加に伴いクラスタは成長するとともに、数密度および体積率は大きくなる。また、クラスタのCu濃度も大きくなり、Cuの集積が進んでいることもわかる。

3.3 水浸局部共振高調波法

(1) 共振周波数と板厚の関係

板厚の異なる各試料に対して異なる入射周波数を用いて測定するには、基準を設定し、規格化する必要があると考え、以下に述べる波形の特徴に基づき入射周波数を確定した。図8には、入射周波数19.27 MHz、送信電圧29 V、60サイクルのバースト波を入射し、アナログハイパスフィルタを使用しないA-5試料の波形の例を示す。0.6 μsから3.6 μsがバースト波入射中の振動（以下、強制振動）であり、3.6 μs以降がバースト波の入射終了後の振動（以下、自由振動）である。水距離と入射周波数を変化

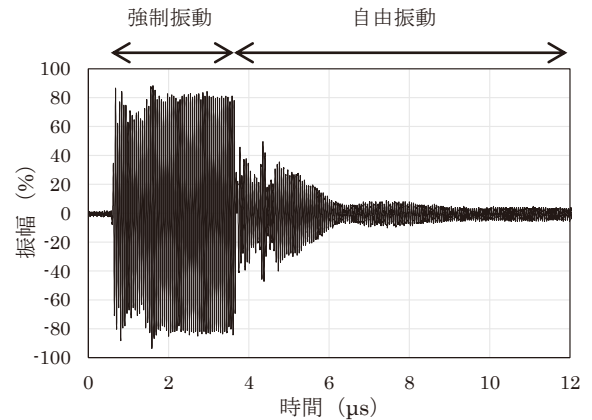


図8 アナログハイパスフィルタを使用しない測定波形の例 (測定条件：入射周波数19.27 MHz, 60サイクル, 送信電圧29 V, 試料：A-5)

させ、強制振動波形の一部の落ち込みや増減などがない一定となる波形によって、定常共振状態にあると判断し、その時の入射周波数を実測周波数とした。なお、以下の結果は共振状態で発生した自由振動を評価の対象とした。

図9に、各試料の板厚と実測の共振周波数の関係を示す。5種類の板厚に相当する共振周波数が選定できた。

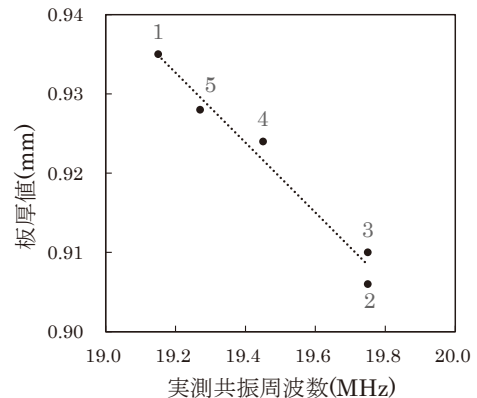


図9 各試料の板厚値と実測共振周波数の関係

(2) 高調波測定画像と波形の例

各試料の共振周波数を表3に示す。各試料に対する実測共振周波数、送信電圧150 V、60サイクルのバースト波入射、遮断周波数30 MHzアナロ

表2 APTで観察された溶質原子クラスタ

試料	平均直径 (nm)	数密度 ($\times 10^{23}/m^3$)	体積率	平均組成 (at%)				
				Fe	Cu	Mn	Ni	Si
A-4	2.1	1.0	0.0005	73.9	6.5	4.8	9.2	5.3
A-5	2.6	2.3	0.0021	73.6	7.1	6.0	8.1	4.2

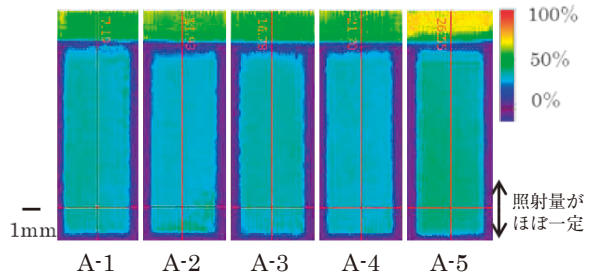
表3 各試料の実測共振周波数

試料名	実測共振周波数 (MHz)
A-1	19.17
A-2	19.80
A-3	19.78
A-4	19.50
A-5	19.29

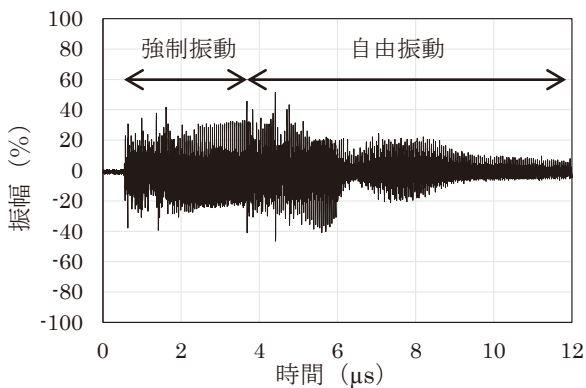
ゲハイパスフィルタ使用による高調波測定画像を図10(a)に示す。高調波測定に際し、最初アナログハイパスフィルタを使用しない測定を行い、強制振動振幅の大きさがデジタルオシロスコープの垂直軸の80%となるようにゲインを調整し規格化した後に、遮断周波数30 MHzアナログハイパスフィルタを使用した測定を行った。照射量の増加に伴う高調波振幅の増大が認められる。

3.4 高調波振幅の定量評価

図10(a)において可視化した高調波振幅を解析対象とし、定量評価を行った。波形の例を図10(b)に示す。高調波の強度として、振幅値の絶対値の時間



(a) 高調波測定画像
(時間5.5~6μsの自由振動の振幅)



(b) 高調波波形
(a)のA-5試料の赤線の交点における波形

図10 各試料の実測共振周波数による高調波測定

積分量を算出した。アナログハイパスフィルタを使用しない測定において強制振動振幅の大きさを一定に調整していることから、高調波の強制振動の振幅も一定であると考え、高調波の強制振動の時間積分量を基準として、規格化した。評価対象は、強制振動終了時から測定終了までの時間3.6 μs~12 μsの自由振動の時間積分量とした。評価では、試料先端から約1 mm、側面から約1.5 mm離れた内部の400点についての高調波自由振動の時間積分量を積算した。図11に、規格化した高調波自由振動の時間積分量と照射量の関係を示す。照射に伴う増加傾向が確認された。

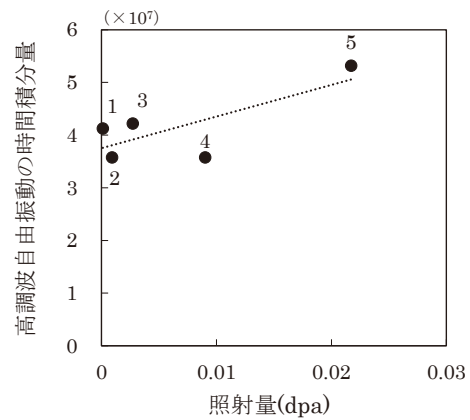


図11 規格化した高調波自由振動の時間積分量と照射量の関係

4. 考察

4.1 測定の改良

厚さ方向局部共振高調波法では、板厚や試料表面の凹凸によっても、水平面内に振幅の変動が現れる。また、板厚が1%変化すると共振周波数も約1%変化することになる。図12に、アナログハイパスフィルタを使用しない場合の入射周波数19.27 MHz

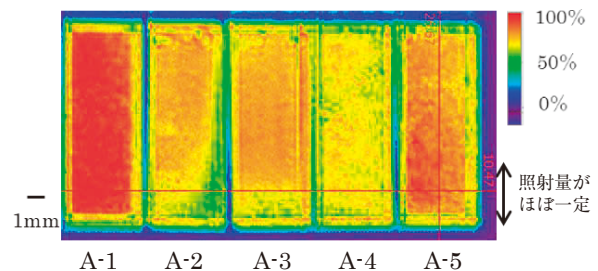


図12 アナログハイパスフィルタを使用しない場合の入射周波数19.27 MHzによる測定画像

による測定画像の例を示す。それぞれの試料の板厚値の違いを考慮して決定した共振周波数で測定した図10(a)に示した高調波測定画像とは異なり、板厚の違いによる共振条件のずれの影響を受けた強度分布となる。前報⁽¹⁷⁾では、試料の板厚値が同じであったためその影響は確認されなかったが、複数の試料を比較する場合には、試料の板厚の違いによる共振条件を調整することが重要であることが分かった。

また、高調波の測定においても、まずアナログハイパスフィルタを使用しない測定を行い、デジタルオシロスコープの垂直軸を統一し、垂直軸に対する強制振動の振幅が同じ大きさとなるようにゲイン値を調整し規格化した後に、入射した周波数成分を持つ波を遮断するため遮断周波数30 MHzアナログハイパスフィルタを使用した測定を行うことで、直接比較できる高調波波形が得られることが分かった。この強制振動の振幅の規格化は、高調波の自由振動振幅の変化を定量的に比較することを可能にするものである。

4.2 ミクロ組織変化と高調波強度

原子炉容器鋼の照射脆化は中性子照射による溶質原子クラスタの形成量と相関することが知られている。そこで、溶質原子クラスタの形成量と高調波波形の関係を検討した。図13には、規格化した高調波自由振動の時間積分量と溶質原子クラスタの体積率との関係を示した。溶質原子クラスタの形成量の増加に伴い高調波強度が増加する傾向にあることがわかる。図11には、規格化した高調波自由振動の時間積分量と照射量との関係を示したが、照射量が0.01 dpaまでは増加傾向が必ずしも明確ではなかったが、溶質原子クラスタの形成量で整理することでより良い相関が確認された。また、同様に電子線で0.022 dpa照射され、直径が数nmのCuを含む溶質原子クラスタが高密度 ($3.2 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$) に形成した低合金鋼 (0.16 wt% Cu) 試料においても、高調波の振幅が大きくなることを確認している⁽¹⁷⁾。これらの結果は、高調波の発生が溶質原子クラスタの形成によることを示唆する。今後、測定例を拡充するとともに、溶質原子クラスタの形成と三次弾性定数の変化との相関などから、溶質原子クラスタによる高調波の発生機構を検討する必要がある。

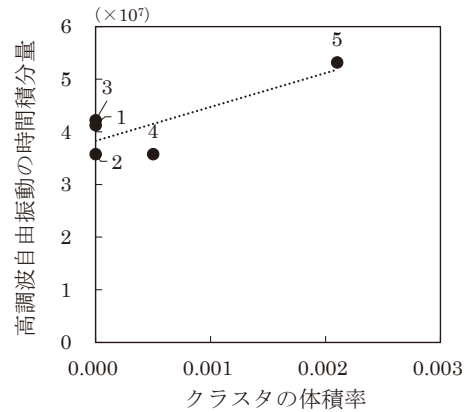


図13 規格化した高調波自由振動の時間積分量と溶質原子クラスタの体積率との関係

5. まとめ

原子炉容器の照射脆化評価に対する非線形超音波法の適用性の検討を目的に、電子線照射量の異なる5試料の低合金鋼についてミクロ組織変化と局部共振高調波強度の照射量依存性を調べた。自由振動中の高調波の時間積分量が照射量に伴い増加した。溶質原子クラスタの形成量と高調波強度により相関が認められた。この結果は、高調波の発生が溶質原子クラスタの形成によることを示唆する。

参考文献

- (1) 福谷耕司, 大野勝巳, 中田早人, “原子炉容器鋼の照射組織変化,” INSS MONOGRAPHS No.1, p.1 (2001).
- (2) (社)日本電気協会, 原子炉構造材の監視試験方法の概要, JEAC4201-2007 (2007).
- (3) (独)原子力安全基盤機構, 高経年化技術評価審査マニュアル 原子炉圧力容器の中性子照射脆化, JNES-SS-0507-04 (2011).
- (4) 例えば, (独)原子力安全基盤機構, 高経年化技術評価等報告に対する技術審査報告書 (関西電力株式会社美浜発電所3号機) (2006).
- (5) (独)原子力安全基盤機構, 原子炉圧力容器監視試験片の再生に関する調査報告書, JNES-SS-0601 (2006).
- (6) 大岡紀一, 石井敏満, “原子炉容器用鋼材の中性子照射脆化の評価 (特集 発電用原子炉の健全性評価)”, 非破壊検査, vol.52, No.5, May2003, pp.235-239 (2003).
- (7) 鎌田康寛, 高橋正氣, 荒克之他, “圧延及び熱時効したFeCuモデル合金の脆化と磁気特性”, 日本保全学会第2回学術講演会要旨集, pp.173-174 (2005).
- (8) 中東重雄, 程衛英, 志波光晴他, “材料劣化評価技術に関する研究 電磁気的手法による圧力容器鋼 (SQV2A) の照射脆化度評価”, 溶接・非破壊検査技術センター技術レビュー, vol.2, pp.34-40 (2006).
- (9) M. Delnondedieu, J.F. Coste, H. Hegeman, et al., “GRETE project-Evaluation of non-destructive testing techniques for monitoring of material degradation,” Article presented at FISA 2003 symposium, Luxembourg, 10-13 November, (2003).
- (10) G. Dobmann, I. Altpeter, M. Kopp, “Nondestructive materials characterization of irradiated nuclear pressure-vessel steel samples by the use of micromagnetic techniques and in terms of mechanical properties,” Russian Journal of Nondestructive Testing, 42, pp.272-277 (2006).
- (11) B. Acosta, L. Debarberis, A. Rito, “Advances in the development of the “STEAM” thermoelectric method for radiation embrittlement assessment,” Proc. 4th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, London, 6-8 December, (2004).
- (12) B. Acosta, F. Sevini, “Evaluation of irradiation damage effect by applying electric properties based techniques,” Proc. Nuclear Engineering and Design, 229, pp.165-173 (2004).
- (13) S. Matsubara, Y. Kawaguchi, “Evaluation of Thermal Aging in Duplex Stainless Steel by nd Velocity Measurement of Surface Acoustic wave,” Proc. The First International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, 1, pp.262-270 (1998).
- (14) 川嶋紘一郎, “水浸超音波法による材料表面近傍及び内部欠陥・異質部の可視化の現状” 非破壊検査, 66, pp.171-177 (2017).
- (15) K.H. Matlack, J.-Y. Kim, J.J. Wall, J. Qu, L.J. Jacobs, M.A. Sokolov, “Sensitivity of ultrasonic nonlinearity to irradiated, annealed, and re-irradiated microstructure changes in RPV steels,” Journal of Nuclear Materials. 448, pp.26-32 (2014).
- (16) 川嶋紘一郎, “非線形超音波法による有孔帯板塑性変形度の画像化”, 非破壊検査, 60, pp.222-223, (2011).
- (17) 小島敦子, 藤井克彦, 石田仁志, 川嶋紘一郎, “非線形超音波法による照射ミクロ組織変化の評価-原子炉容器鋼の照射組織変化-”, INSS JOURNAL, Vol.26, pp.98-105 (2019).
- (18) K. Fujii, K. Fukuya, N. Nakata, K. Hono, Y. Nagai, M. Hasegawa, “Hardening and microstructural evolution in A533B steels under high-dose electron irradiation,” J. Nucl. Mater., 340, pp.247-258 (2005).
- (19) J.M. Hyde, C.A. English, “An analysis of the structure of irradiation induced Cu-enriched clusters in low and high nickel welds,” in: Proc. Mater. Res. Soc. Symp., vol. 650, 2001, p. R6.6.1.