

課題目標・目的及び研究成果

1. 当初の目的・目標	<p>【研究開発目標】</p> <p>液体ナトリウム冷却高速炉は、軽水炉とは異なり、ナトリウムを常に液体状態に維持する必要があり、供用期間中の検査においても 200℃以上の高温に保持されることになる。したがって、高温環境及び、高放射線下で主容器や 1 次配管に対してき裂の有無及びサイジングが可能な非破壊検査技術が要求される。このような厳しい環境条件における検査技術の有力候補として、高温・高放射線下で実績を有する電磁超音波法が挙げられる。しかし、現時点では、永久磁石で磁場を印加する方法が多用され、超音波強度を支配する磁場強度は磁石寸法の減少につれ弱まる場合が多いため、探触子の小型化が困難である。さらに、電磁超音波探触子を用いた検査法は、周波数も低いため、実用化高速炉で要求されるき裂サイジング精度に達しておらず、その具体化が望まれる。そうした現状を踏まえ、本研究開発では実用化高速炉の保全技術のベースとなる高周波対応の電磁超音波探触子の開発技術を確立するために、電流駆動方式で高磁場を発生する薄膜型電磁超音波素子によるき裂検出技術の開発を目的とする。</p> <p>【全体計画】</p> <p>本研究開発事業では、電流駆動方式の薄膜型電磁超音波素子を新たに開発し、それを用いてき裂サイジングに適用できるき裂検出技術の開発のため、下記内容について研究開発項目を実施する。</p> <p>(1)薄膜型電磁超音波素子の開発</p> <p>①薄膜生成に関する実験</p> <p>マグネトロンスパッタリング法を用いたプラズマ成膜装置を設計・製作し、絶縁性薄膜と導電性薄膜に対して、結晶性や成膜速度など薄膜型電磁超音波素子を構成するために必要となる成膜条件を検討する。</p> <p>②単層構造電磁超音波素子の試作</p> <p>電磁超音波素子を構成するために必要となる薄膜の密着性や表面状態について検証する。また薄膜に回路パターンを製作し、成膜から加工までの一連のプロセスにおける導電層が 1 層となる単層構造電磁超音波素子の製作性を評価する。</p> <p>③多層構造電磁超音波素子の試作</p> <p>電磁超音波素子の超音波強度を向上させるために、絶縁性薄膜と導電性薄膜を複数層堆積させた多層薄膜を構成し、密着性や薄膜間の電気的特性を明らかにし、多層構造電磁超音波素子の製作性を評価する。</p>
--------------------	--

	<p>(2)超音波き裂検出性能評価</p> <p>①薄膜型電磁超音波素子の設計 薄膜型電磁超音波素子の大きさや形状に対する超音波伝播特性から、き裂検出に適する薄膜型電磁超音波素子の配置構造や寸法形状の評価を実施する。</p> <p>②動作特性評価 電磁超音波素子の性能に影響を与える導電性薄膜や絶縁性薄膜に対する熱的特性、電気的特性等について、実験的及び数値計算により評価する。</p> <p>③超音波伝播解析 薄膜型電磁超音波素子にパルスのな大電流を通電して超音波を発生させて探傷実験を実施する。また、得られる超音波信号を利用して開発した薄膜型電磁超音波素子のき裂サイジング性能を評価する。</p>
<p>2. 研究成果</p>	<p>(事実関係)</p> <p>【事業項目1】薄膜型電磁超音波素子の開発</p> <p>電流駆動方式によって磁場を発生させる薄膜型電磁超音波素子は、導電性薄膜と絶縁性薄膜を交互に積層させ、薄膜回路パターンに大電流をパル的に通電して超音波を発生させる構造である。そうした積層構造をもつ薄膜を構成するために、マグネトロンスパッタリング法によるプラズマ成膜装置を設計・製作した後、絶縁性薄膜となる窒化アルミ薄膜の成膜特性を評価するための実験を実施した。窒化アルミによる絶縁性薄膜形成の見通しを得ることに加えて銅薄膜の成膜も確認し、プラズマプロセスによる薄膜型電磁超音波素子の成膜に向けた準備を整えた。薄膜で構成される電磁超音波素子の試作に取り組んだところ、数μmとなる膜厚に対して薄膜成長過程で生じた内部応力の増加による薄膜剥離、絶縁層を挟んだ導電層間の導通という問題が生じた。そこで、新たな成膜方法を取り入れて問題に対処した。基板剥離に対しては、基板と薄膜間の密着性を高めるため基板へ高周波電圧を印加してプラズマによる表面改質を行い、窒化アルミ薄膜の剥離抑制に有効であることを明らかにした。ただし高周波電圧の印加は薄膜成長過程に損傷を与え続けるので、成膜開始直後の一定時間に限定した。内部応力の緩和に対しては、成膜中の窒素混合量を段階的に増やす成膜方法を取り、成膜開始直後のアルミニウム薄膜に内部応力の緩衝機能をもたせた。この成膜方法により、発生する内部応力は対処前の1/10以下へ低減することに成功した。また、窒化アルミ薄膜の膜厚が増加しても内部応力が低減された状態を保ち続けることがわかった。導通に対しては、窒素ガス混合量を変える</p>

ことで結晶粒のサイズを制御した。表面粒状の最大高さと同平均高さはともに、ガス流量比 $\text{Ar}:\text{N}_2=3:1$ の場合に比べ $\text{Ar}:\text{N}_2=1:1$ の方が小さな値となり、より緻密な薄膜表面状態を得ることに成功した。窒化アルミ薄膜と銅薄膜の 4 層構造からなる薄膜に対する導電層間の絶縁はアルゴン流量が大きいほど良好であり、ほとんどの積層薄膜で $10\text{M}\Omega$ 以上の抵抗値をもつことがわかった。上述した新たな成膜方法より薄膜型電磁超音波素子を試作し超音波を発生することに成功した。しかし、薄膜回路は導電層間の導通を確実に避ける必要があることから、回路パターンを製作後、導電層間で導通がなかったものを薄膜型電磁超音波素子として使用した。

【事業項目 2】超音波き裂検出性能評価

き裂探傷に向けた薄膜型電磁超音波素子の設計のため、探触子の配置や寸法構造を数値解析により検討した。き裂に対する信号強度の変化は超音波周波数および電磁超音波素子の大きさに依存する。そこで、き裂位置で超音波収束性の向上が期待できる非対称性電磁超音波素子について検討したところ、周波数や電磁超音波素子の全長に応じた回路幅を設定することで、磁石幅が一定である電磁超音波探触子の性能を超える特性が得られることを明らかにした。有限要素法解析により熱応力等を解析した。薄膜型電磁超音波素子に対する電圧印加が短時間であるため、導電層からの熱伝導が限られ導電層の温度上昇に比例した熱応力が発生する。導電層と絶縁層が重なった多層構造電磁超音波素子は、積層方法によって通電で生じる熱応力を抑制しつつ大きな起磁力を確保し、電磁超音波素子に加わる電磁力の低減が期待できることがわかった。

薄膜型電磁超音波素子の製作に向けた絶縁層となる窒化アルミの薄膜特性を事業項目 1 で示した成膜条件ごとに評価した。ガス流量が一定で成膜した窒化アルミ薄膜の抵抗は薄膜温度に依存せず、 250°C の温度でも非常に大きな抵抗値と絶縁耐力が得られ電磁超音波素子を構成する絶縁層として十分な性能であった。窒素混合量を段階的に増加させていく成膜方法を採用する場合、温度の上昇に伴い耐電圧と抵抗値はいずれの成膜条件でも低下したが、 250°C の温度で $1\text{M}\Omega$ の抵抗と 400V の耐電圧が得られた。ガス流量を変えた成膜では抵抗値が格段に小さくなったが、銅薄膜で製作される薄膜回路の抵抗は膜厚 $20\mu\text{m}$ で 1Ω を越えることはなく、 $1\text{M}\Omega$ 以上の抵抗があれば電磁超音波素子の絶縁層として機能する。したがって、成膜中に窒素ガス流量が増加する成膜方法は薄膜型電磁超音波素子を作製する要件を満たすことがわかった。製作した薄膜型電磁超音波素子による超音波伝播特性は磁石型電磁超音波探

触子と同様の特性が得られた。超音波発生は磁場と渦電流によるローレンツ力を起源とする。磁石を薄膜回路による電流駆動方式に置き換えた薄膜型電磁超音波素子は磁石型と同様に超音波探傷に適用できることを示している。薄膜回路に印加される放電電圧に対する超音波強度はほぼ比例的に増加しており、薄膜回路の温度上昇の影響は小さかったと考えられる。また、単層構造電磁超音波素子に比べて、導電層が2層となる多層構造電磁超音波素子の超音波出力は約2倍に増加した。多層化は一層あたりの印加電圧を抑え、薄膜コイル加熱の影響を抑える効果があることを示した。周波数3MHzに対する超音波発生を確認したが、高周波化に伴う超音波強度の減少により1MHzでのき裂探傷を実施した。異なるき裂深さをもつ50mm厚の試験片に対し超音波伝播経路におけるき裂の有無を信号強度変化量で比較したところ、板厚5%に相当する2.5mmのき裂検出目標に対して概ね誤差1mmとなる検出精度を得られ、薄膜型電磁超音波素子によるき裂検出技術の高精度化への知見が得られたと言える。

【事業全体】 電流駆動の薄膜型電磁超音波素子は、磁石型電磁超音波探触子に代わる新しい超音波発生方式であり、小型軽量化に非常に適している。また、薄膜型電磁超音波素子は導電層と絶縁層を積層しその部分に薄膜回路が構成して励磁するという単純な構造をしており、薄膜回路の設計自由度は高いと考えられる。このような構造をもつ電磁超音波素子開発のために、プラズマプロセスによる多層薄膜成膜を実施した。電磁超音波素子として薄膜に要求される性能を満たすためにさらなる検討は必要であるが、製作した薄膜型電磁超音波素子によって超音波探傷できたことは、電流駆動方式で生じる薄膜回路の温度上昇が必ずしも超音波に対して影響を与えるものではなく、高性能の電磁超音波素子として磁石型電磁超音波探触子に代わって利用できる知見が得られた意義は大きい。また、窒化アルミ薄膜は高耐熱材料でもあり、高速炉の共用期間中検査温度より高い温度に対しても比較的対応が取りやすく、運転中の超音波探傷にも貢献できると考えられる。

【得られた成果の外部発表】

- (1)大塚 裕介、”き裂測定に向けた薄膜型電磁超音波素子の構造検討”、日本原子力学会 2009 年秋の大会、2009 年 9 月、仙台
- (2)大塚 裕介、” マグネトロンスパッタ源を用いたシリコン基板上への窒化アルミ薄膜の製作”、平成 22 年電気学会全国大会、2010 年 3 月、東京
- (3)大塚 裕介、” 窒素ガス流量を制御したマグネトロンスパッタ法に

	<p>よる窒化アルミ薄膜の特性”、高温学会平成 22 年度春季総合学術講演会、2010 年 5 月、吹田</p> <p>(4)大塚 裕介、"き裂探傷に向けた薄膜型電磁超音波素子の開発"、平成 22 年電気学会基礎・材料・共通部門大会、2010 年 9 月、沖縄</p> <p>(5)大塚 裕介、"き裂探傷に用いる薄膜型電磁超音波素子の超音波伝播性能解析"、日本原子力学会 2010 年秋の大会、2010 年 9 月、札幌</p> <p>(6)Y. Ohtsuka, "Evaluation of aluminum nitride films deposited by using magnetron sputtering technique under controlled gas flow", 7th International Conference on Reactive Plasmas, Oct.4-8, 2010, Paris, France</p>
--	---

参考