

核融合炉用第一壁タングステン被覆の レーザー衝撃試験法による剥離強度評価

鬼柳 任*・佐藤 学**

論文要約

核融合炉用第一壁被覆に関する基礎的研究の一つとして、低放射化フェライト鋼上へプラズマスプレイ法によって作製されたタングステン被覆の剥離強度について調べた。レーザー衝撃試験法を用いて、対象としたタングステンと低放射化フェライト鋼との接合界面に関する評価が可能であることを示した。レーザー衝撃試験法による定量的な剥離強度測定において、いくつかのばらつきを与え得る要因について検討した

キーワード：核融合、レーザー衝撃試験法、核融合炉材料、タングステン、接合被覆

Evaluation of Adhesive Strength of Tungsten Coating on the First-Wall for a Nuclear Fusion Reactor by means of Laser Shock Spallation Method

Tamotu ONIYANAGI* and Manabu SATOU**

ABSTRACT

Adhesive strength of the interface between reduced activation ferritic steel and tungsten coating made by vacuum plasma spray was studied from fundamental view points of the R & D of the first-wall of nuclear fusion reactors. A successful attempt was shown that a laser shock spallation method was able to evaluate the interface of the coating. Possible factors to obtain more accurate evaluation of the adhesive strength of the interface were discussed.

Keywords : *Nuclear fusion, Laser shock spallation method, Fusion reactor materials, Tungsten, Bonding and joining*

平成 25 年 2 月 28 日受理

* 機械・生物化学工学専攻博士前期課程

** 機械・生物化学工学専攻・教授

1. 緒言

1.1 核融合炉による発電システム

1.1.1 世界のエネルギー需要と原子力の役割

世界人口の爆発的な増加に伴う世界の経済規模の拡大は多大なエネルギー需要を生み出している。地球環境あるいは文化的生活を維持しながらの持続可能な発展は、すべての人々に求められている。そのためには化石燃料にかわる新しい基幹エネルギーが必要である。原子核反応が生み出すエネルギーを電気として利用する技術は、日本では1963年に動力試験炉（JPDR, Japan Power Demonstration Reactor）が初めて原子力発電に成功して以来、およそ半世紀にわたって技術開発が進んで来た。関西電力美浜原子力発電所の1号炉は1970年に、東京電力福島第一原子力発電所の1号炉は1971年に運転開始し電力供給してきた。2011年3月の東日本大震災に伴う事故までは54基の原子力発電所が稼働していた。日本全国で1300以上ある発電所の中でこれらの原子力発電所が約3割の日本のエネルギー需要を支えた¹⁾。

1.1.2 原子力エネルギーを用いた発電システム

原子核反応が生み出すエネルギーを電気として利用する技術には、原子力発電所で利用されているウランなどの核分裂反応によるものほか、太陽などの恒星でも生じている核融合反応による技術がある。太陽で生じた核融合反応により生じた太陽エネルギーは地球まで届き、太陽電池で直接的に電気エネルギーに変換したり、風力や水力として利用されたりしている。原子力エネルギーの研究開発の着実な進展は、1億5千万キロメートル彼方で生じている核反応と同様な核融合反応を制御し地上で実現させようとする技術にまで近づきつつある。燃料としての重水素（D）と三重水素（T）を数億度の高温で高密度に保持することによって生じる核融合反応では、生じるエネルギーの約8割が核反応で生じる中性子の運動エネルギーとなる。核融合反応が生じる炉心を取り囲むように配置したブランケットと呼ばれる機器で中性子の運動エネルギーを熱エネルギーに変換する。熱は冷却材によって核融合炉の外に取り出され、発電に利用される。核融合炉から取り出された熱エネルギーを利用した蒸気タービンにより発電機を駆動させる。熱源となる反応以外は原子力発電所や石炭・天然ガスなどの化石燃料による火力発電所と同様なシステムと言える。

1.2 核融合炉の構造

1.2.1 核融合のしくみ

重水素（D）と三重水素（T）を燃料とする核融合炉で核融合反応を生じさせるためには、これら粒子を数億度の高温に保たなければならない。このような高温状態では原子を構成する原子核と電子がばらばらになったプラズマ状態として存在することになる。このプラズマを

高密度にするためには容器が必要であるが、プラズマの高温状態を保ったまま保持できるものはない。プラズマを固体容器の壁から離して存在させるために強力な磁場が用いられている。どの原子核もプラスの電荷を持っており、粒子の運動に伴う電磁気力と外部からの磁場との相互作用により容器から離してプラズマを保持することができる。

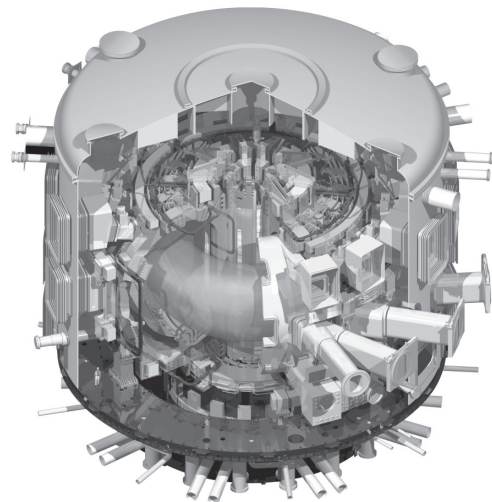
核融合炉の実現のためには、高温のプラズマを生成すること、このプラズマを安定に制御すること、これに必要な超伝導磁石を開発することが求められる。中性子の運動エネルギーを熱エネルギーに変換するブランケットでは中性子などの高エネルギー粒子の衝撃に耐えられる材料開発をすること、燃料として使用する三重水素の製造と安全取扱い技術の開発も必要である。

1.2.2 核融合炉の研究開発の現状

これらの技術開発のひとつとして、現在、日本、欧州連合、米国、ロシア、中国、韓国、インドの国際協力による熱核融合実験炉（ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor）の建設が進められている²⁾。ITERでは長時間にわたるエネルギー発生がなされる計画であるが、大規模な発電計画はない。実用的な発電システムとしての実証はさらに次の装置である核融合原型炉の課題となる。核融合原型炉の設計等に関する研究開発のひとつとして、青森県上北郡六ヶ所村にある国際核融合エネルギー研究センター（IFERC, International Fusion Energy Research Center）では動力用原型炉（DEMO）の早期実現にむけて、概念設計や主要な課題に係る研究開発が行われている³⁾。

1.2.3 核融合炉の構造

国際核融合実験炉（ITER）では、核融合反応が生じるプラズマは中心部分の真空容器内に形成される。真空を保ったり、必要な燃料を投入したりするためのポート



Credit © ITER Organization, <http://www.iter.org/>

図1 国際熱核融合実験炉の全体図

があり、ブランケットは核融合反応によって生じたエネルギーを熱エネルギーに変換したりするための機器である。ITER では遮へい機能を有する部分と各種試験のためのブランケットが設置される。また核融合反応によって生じるヘリウムを排出するためのダイバータがある。周辺に配置されているトロイダル磁場コイルやポロイダル磁場コイルによる磁場でプラズマが安定に制御される。磁場コイルはいずれも超伝導磁石で冷却の必要がありクライオスタットが配置されている。エネルギー取り出しにはブランケットモジュールが機能する。最新の状況は ITER 機構の公式ウェブページで知ることができる²⁾。図 1 に、ドーナツ状のピンク色でプラズマを表し、真空容器や各種ポートの外観図を示す。

プラズマ中の荷電粒子、すなわち燃料である重水素や三重水素の原子核や核融合反応によって生じるヘリウムの原子核は磁力線に沿って運動する。磁力線が容器内壁に接しなければ荷電粒子も容器内壁に接することはない。しかしながら比較的低エネルギーの粒子は一部容器内壁に衝突することがあり、また電荷を持たない中性子は容器内壁に衝突する。これらの粒子が固体である容器内壁に衝突すると条件により、表面への衝突粒子の堆積やスパッタリングによる表面損耗、結晶格子欠陥の導入などの照射損傷が生じる場合がある。

1.3 核融合炉第一壁の被覆

1.3.1 プラズマと壁の相互作用

核融合炉のプラズマとこれに面する部分の材料との相互作用（PWI, Plasma Wall Interaction）を把握することは、核融合プラズマの安定した制御に不可欠である。プラズマに対向する材料という意味でプラズマ対向材料または最初に面する壁という意味で第一壁と呼ばれる。第一壁のスパッタリングによる表面損耗で生じる粒子あるいは原子はプラズマに混入し、プラズマ温度を低下させる。プラズマへ混入したとしても温度を低下させにくい物質すなわち質量数の小さいベリリウム（Be）や炭素（C）を第一壁材料とするか、あるいはプラズマへの混入が少ないすなわちスパッタリングされにくい物質すなわち質量数の大きいタングステン（W）を第一壁材料とするかの選択枝がある。いずれの場合も機能材料としての第一壁を支える構造材料は機械的性質ほかの観点から別の材料が選択される。したがって、適切な構造材料を用いて作製したブランケットなどの内壁を適切な材料で被覆することになる。

1.3.2 第一壁材料としてのタングステン

タングステンは質量数が 183.8 で大きく、金属では最高の融点 3410℃である。優れた耐粒子損耗性を示すので ITER では、最も厳しい熱及び粒子負荷にさらされるダイバータの材料として採用される計画がある⁴⁾。タングステンでは結晶粒界が弱いことによる再結晶脆化や照

射脆化に課題があるため厚いバルク材料として利用された実績はないようである⁵⁾。しかしながら、タングステンの他の材料に無い優れた性質は有望であり、損耗や耐熱性の観点から適切な皮膜厚さが得られれば、第一壁被覆材料としてのタングステンの利用が考えられる。

1.4 被覆方法とその特徴

核融合炉用プラズマ対向壁材料としてタングステンは有望であり様々な被覆方法の適用が考えられる。接合・被覆方法のうち、接合法として文献⁶⁾では材質的接合を次のように分類している。(1) 溶融接合：アーク溶接やガス溶接など、(2) 固相接合法：拡散接合や圧接、(3) 液相-固相接合法：ろう接や液相拡散接合、(4) 気相-固相接合法：物理蒸着（PVD, Physical Vapor Deposition）や化学蒸着（CVD, Chemical Vapor Deposition）。一方、被覆法では酸化皮膜作製などのように気相を利用する方法やゾル-ゲル法のように液相を利用する方法、コールドスプレイ法のように固相微粉末を用いる方法などに分類できる。方法により成膜速度や形成される皮膜の性質が異なる場合がある。この中でプラズマスプレイ法は成膜速度が早いことから、大面積の被覆にも適用可能であることが特徴である。また被覆対象とする基板材料との整合性や接合・被覆時の環境条件によっても接合・被覆材料の性質が異なる場合がある。動力用原型炉ではブランケットの構造材料として低放射化フェライト鋼が想定されるので、この場合、基板材料としての低放射化フェライト鋼との接合被覆の健全性の検討把握は重要である。

1.5 被覆の評価方法と課題

被覆の健全性、特に皮膜と基板材料との接合強度について評価する方法にも様々な手法がある。応力の負荷条件にはせん断、引張、ねじりなどがある。皮膜が十分に厚い場合には該当部分を切り出すなどして、着目する接合界面部分に適切な応力を負荷させる試験片を作製することができる。日本工業規格（JIS, Japanese Industrial Standards）にも規定されている、引張試験法（JIS Z2242, JIS H8402）^{7) 8)} や曲げ試験（JIS Z3122）⁹⁾、スクラッチ試験（JIS R3255）¹⁰⁾ を用いた試験法が用いられている。しかしながら比較的薄い皮膜と基板材料との間の界面の強度評価には応力を付加するための工夫が必要となる。着目する界面だけではなく、周辺の変形なども考慮する必要がある場合も生じる。

本研究では、これらの課題解決に有効な方法としてレーザー衝撃試験法¹¹⁾を用いることとした。試験片の皮膜へ非接触で応力を負荷できることや単軸引張応力条件となること、比較的早い変形速度であるので塑性変形の影響を無視できる可能性があることなどに特徴がある。

1.6 核融合炉用第一壁の被覆に関する研究

プラズマプレイ法を用いて作製した皮膜の接合強度に関するレーザー衝撃試験法を用いた研究には H.Kim ら^{12) 13)}、A.Kobayashi ら¹⁴⁾ および H.Akamatsu ら^{15) 16)} の報告がある。

H.Kim らは、低放射化フェライト鋼 (F82H) を基板材料としてタングステン皮膜を減圧プラズマプレイ (VPS, Vacuum Plasma Spray) 法により作製した。熱間等方加圧法 (HIP, Hot Isostatic Pressing) 法によって作製した場合と比較し、HIP 法で作製した試料が VPS 法で作製した試料よりも高い強度を示したことを報告している。また、VPS 法での試験片ではタングステン皮膜中にクラックが生じていたことも指摘している。

A.Kobayashi らは SUS304 鋼にジルコニア皮膜をプラズマプレイ法で作製し、皮膜作製条件によって約 50MPa の強度の違いがあることをレーザー衝撃試験法により測定している。

H.Akamatsu らは、バナジウム (V) 合金を基板材料としてイットリウム酸化物皮膜を VPS 法で作製した試料についてレーザー衝撃試験法で評価した結果を示した。およそ 950MPa の強度があることや皮膜内のクラックなどを含む剥離様式について検討した。さらに、皮膜厚さを薄くすることによって皮膜内クラックの界面強度評価への影響を避けることができることを示した。

1.7 本研究の目的

核融合炉用第一壁へのタングステン被覆に関する技術開発は、将来の基幹エネルギー源として期待される核融合炉発電システムの実現に向けた開発課題のひとつとなっている。成膜速度が早く大面積への適用が可能な被覆方法のひとつである減圧プラズマプレイ法を用いて、低放射化フェライト鋼上へ作製したタングステン被覆を対象とし、皮膜と基板材料との接合強度評価に関する基礎的知見を得ることを本研究では目的とする。具体的には以下の3項目を実施した。

皮膜と基板材料との接合強度評価には、非接触で応力を負荷できることや単軸引張応力条件となること、比較的速い変形速度であるので塑性変形の影響を無視できる可能性があることなどが特徴のレーザー衝撃試験法を適用する。作製された被覆試験片へのレーザー衝撃試験法の適用可能性を明らかにする。また、レーザー衝撃試験法での剥離強度評価に及ぼす解析条件の影響について検討する。

レーザー衝撃試験法を減圧プラズマプレイ法で作製するタングステン皮膜の評価に適用する場合は、皮膜内のクラックの形成が界面の強度評価に影響を及ぼすと考えられる。皮膜内のクラックが生じない試験条件を明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

2.1 タングステン皮膜作製

タングステン皮膜はプラズマプレイ法を用いて作製された。フェライト鋼 (F82H, Fe-8Cr-2W-0.1C, 配合値) の厚さ 8 mm の基板上に、アルゴンと水素の混合ガスのプラズマジェット中で溶けたタングステン粉末を吹き付けた。スプレイ中の基板温度は 550℃ に制御し真空槽中で行われた。核融合科学研究所 LHD 計画共同研究「低放射化構造材料の W 被覆プロセス技術開発研究」(代表 京都大学 木村晃彦 教授、平成 21 年度 - 平成 24 年度) の一部として供された。タングステン皮膜の厚さは標準で約 0.6 mm であったが、本研究では 2 パスの被覆として皮膜厚さを薄くした試験片を用いた。図 2 にプラズマプレイ法によるタングステン被覆作製の概要を示す。図 3 には作製された試験片を示す (寸法: 50 mm × 55 mm × 7 mm)。図 3 の左はレーザー衝撃試験のため、さらに 25 mm × 30 mm × 2 mm に切り出したものである。

2.2 レーザー衝撃試験法の概要

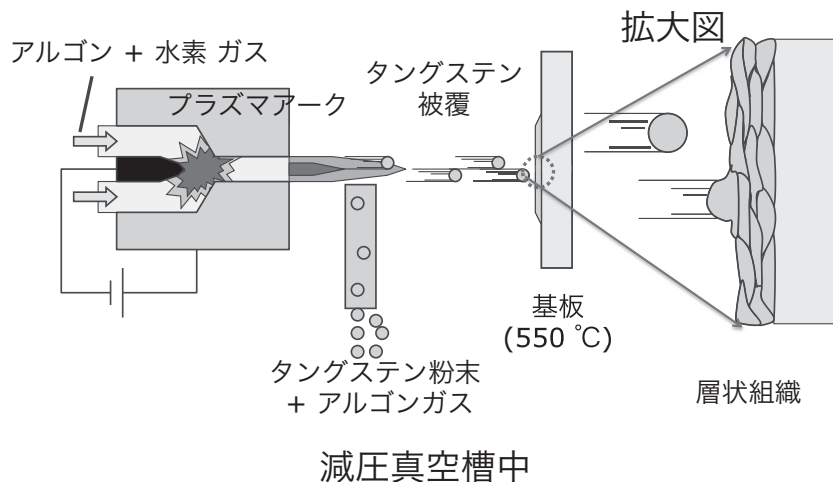


図2 プラズマプレイ法によるタングステン皮膜の作製

本研究ではパルスレーザーの照射によって発生させる衝撃力を用いて皮膜界面の剥離強度を測定するレーザー衝撃試験法を適用した。皮膜面の裏側へレーザー照射す

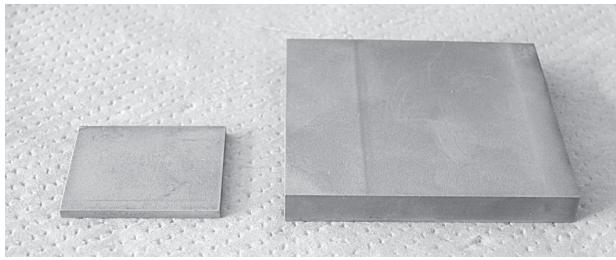


図3 プラズマスプレイ法によりタングステンを被覆したフェライト鋼試験片

ることにより生じる熱膨張に伴う圧縮波が試料表面自由端で反射し引張波として界面に作用し皮膜が剥離することを利用する。図4に示すように配置した光学系を構成した。試験片の異なる箇所を照射し、その都度、ビームサンプラーで分岐したレーザー出力をパワーメーターで測定した。パルス幅 7ns、最大出力 1.6J の Q スイッチ Nd:YAG レーザー（波長 1064 nm）を用い、皮膜剥離する照射条件を求めた。レーザーはコンティニューム製 Powerlite8100 を用いた。界面に負荷される応力は表面の変位速度を求め、圧縮波と引張波の重ね合わせから算出評価する。剥離が生じる条件での応力が剥離強度に相当すると考える。

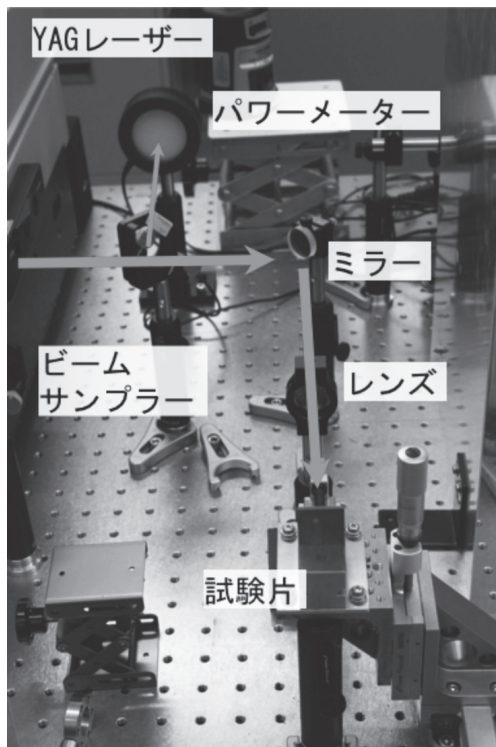


図4 パルスレーザーを用いた皮膜の剥離強度測定のための試験装置

2.3 レーザー衝撃試験装置の構成

レーザー衝撃試験装置の構成は図5に示す。パルスレーザーにより衝撃を発生させる系とパルスレーザー照射による衝撃力により発生する表面変位を干渉計で測定する系からなる。レーザー衝撃による剥離面の変位速度の時間変化はシングルモードの半導体レーザー Laser QUANTUM 製 torus を用いて干渉計を構成し測定する。測定面と固定された基準面との間で生じる干渉による光の強度変化は、浜松フォトニクス製 Si PIN フォトダイ

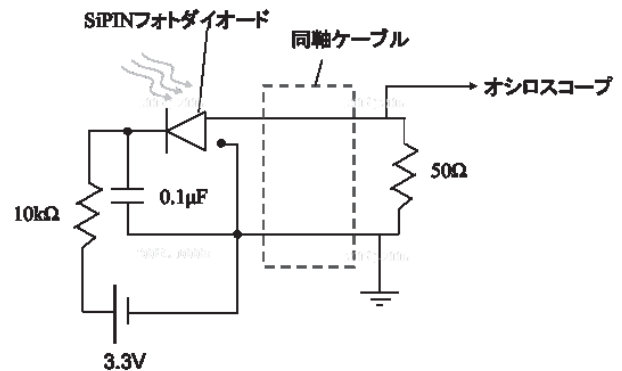


図6 フォトダイオードによるレーザー強度の計測回路

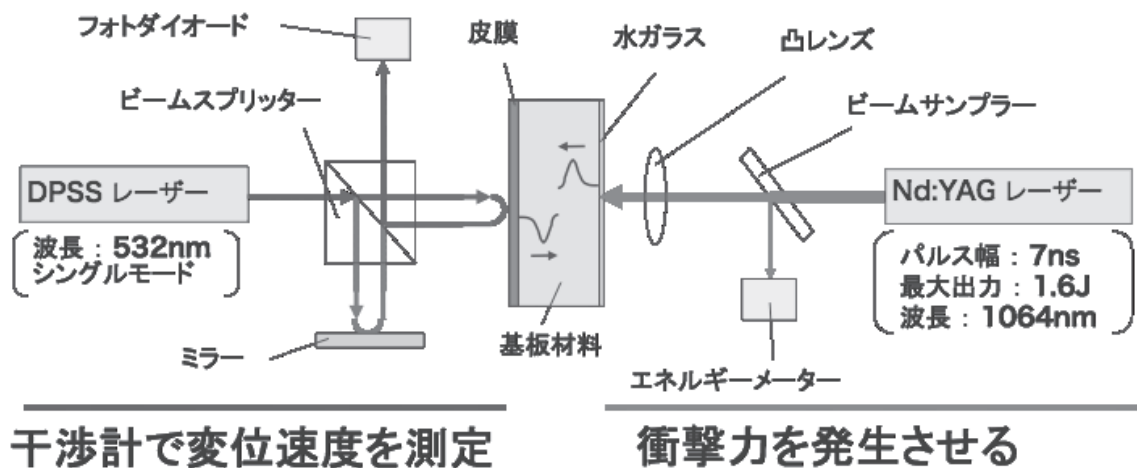


図5 レーザー衝撃試験装置の構成

オード S5973-02 を用いて図6の計測回路で測定した。

2.4 剥離強度の算出方法

測定面と固定された基準面との間で生じる干渉による光の強度変化は、フォトダイオードを用いて測定する。フォトダイオードからの出力電圧は次の式(1)のように表すことができる。

$$A(t) = \frac{(A_{\max} + A_{\min})}{2} + \frac{(A_{\max} - A_{\min})}{2} \sin[2\pi f(t) + \delta] \quad (1)$$

ここで $A(t)$ がフォトダイオードの出力、 A_{\max} や A_{\min} は最大最小の出力で $f(t)$ は干渉縞の数、 δ は位相角である。 $f(t)$ が求まると測定面の変位 $u(t)$ は次の式(2)で表される。

$$u(t) = \lambda_0 f(t) / 2 \quad (2)$$

λ_0 は連続レーザーの波長でここでは 532 nm を用いた。変位速度 $V(t)$ が次の式(3)で表されると仮定し、未知パラメータ A,B,C をフォトダイオード出力データから求めると、

$$V(t) = \frac{du(t)}{dt} = C(e^{-t/A} - e^{-t/B}) \quad (3)$$

応力波によって試料中に加えられる応力 $\sigma(t)$ は変位 $u(t)$ を用いて一般的に式(4)のように表すことができる¹⁷⁾。

$$\sigma(t) = \rho c_f^2 \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4)$$

ここで ρ は接合層の密度、 c_f は接合層中の縦波速度である。式(5)に時間依存の一次元波動方程式を表す。

$$c_f^2 \frac{\partial^2 u_f}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u_f}{\partial t^2} \quad (5)$$

応力波は自由端反射をすることから、次の境界条件を満たす。

$$\begin{cases} \sigma(x=0, t) = 0, \\ v(x=0, t) = 2v(t) = V_0(t) \end{cases} \quad (6)$$

ここで x は自由面からの位置、 $V_0(t)$ は自由面の変位速度である。この条件を満たすように式(5)を解くと次のように表すことができる。

$$\begin{cases} u(x, t) = u_f\left(t + \frac{x}{c_f}\right) + u_f\left(t - \frac{x}{c_f}\right), \\ v(x, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = v_f\left(t + \frac{x}{c_f}\right) + v_f\left(t - \frac{x}{c_f}\right) \end{cases} \quad (7)$$

よって、試料中に負荷される応力は式(8)のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma(x, t) &= \rho c_f^2 \frac{\partial u}{\partial x} = \rho c_f \left\{ v_f\left(t + \frac{x}{c_f}\right) - v_f\left(t - \frac{x}{c_f}\right) \right\} \\ &= \frac{1}{2} \rho c_f \left\{ V_0\left(t + \frac{x}{c_f}\right) - V_0\left(t - \frac{x}{c_f}\right) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

$x = h$ を代入することで皮膜厚さが h の試料の界面に加わる応力は次のようになる。

測定面の変位速度を用いて、1次元の波動方程式から、時刻 t で表面から深さ x での応力 σ_f は次のように表される。

$$\sigma(h, t) = \rho c_f^2 \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2} \rho c_f \left\{ V_0\left(t + \frac{h}{c_f}\right) - V_0\left(t - \frac{h}{c_f}\right) \right\} \quad (9)$$

ただし、 c_f は応力波の速度、 ρ は密度である。剥離が生じる最小のレーザー出力条件で得られる対象とする界面での最大応力が接合強度に対応する。

2.5 剥離強度の算出例

図7にフォトダイオードからの出力の時間変化の例を示す。フォトダイオードからの出力データを式(3)に対応したパラメータ A,B,C を用いてフィッティングした関数も合わせて示している。求められた変位と表面変

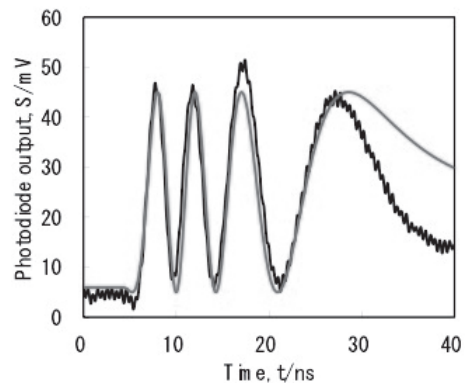


図7 フォトダイオード出力の例、青線が出力信号、紫線がフィッティングした出力関数

位速度の時間変化は図8に示す。干渉縞に伴うフォトダイオードの出力の変化、すなわち明暗のピークが図7では4つある。レーザー波長 λ_0 が532 nmであったので、図7での変位の最大値は式(2)からも計算されるように、およそ1 μm 強となっている。式(9)を用いれば、皮膜厚さ h の試料の界面に加わる応力が求められる。図9には異なる厚さでの界面に加わる応力の評価例を示す。厚さによって最大引張応力が異なる。

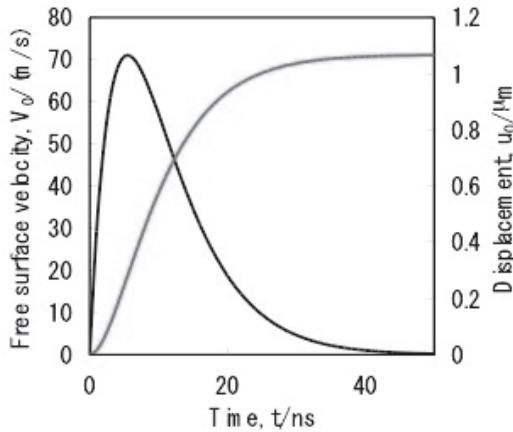


図8 表面変位と表面変位速度の時間変化の例

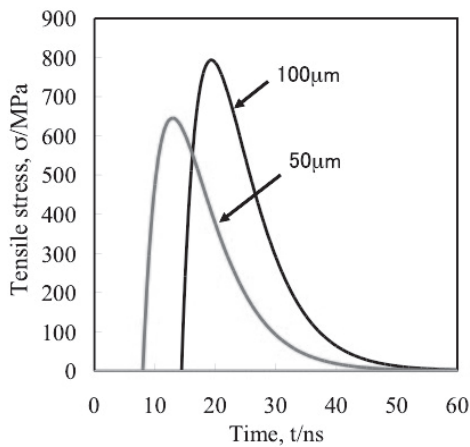


図9 皮膜厚さと応力の時間変化の例

3. 実験結果と考察

3.1 レーザー照射による剥離挙動

低放射化フェライト鋼上に作製されたタングステン皮膜に対して、裏面からレーザー照射した結果、201 mJおよび92mJのレーザー出力条件でタングステン皮膜は剥離し、67mJでは剥離は見られなかった。図10にタングステン皮膜の外観を示す。左上は92 mJでの剥離状況を拡大して示している。

レーザー出力が201 mJの条件では、裏面からのレーザー照射のスポットサイズである径3 mmの円形に相当する箇所がすべて剥離しているのに対して、92 mJの

条件ではいびつな形状となっている。また、図10の左上の拡大図で示されるように、皮膜がめくれあがるような塑性変形が見られる。

3.2 プラズマスプレイ法による皮膜の厚さ

図11はレーザーマイクロスコープにより段差計測した結果を示している。皮膜表面の算術平均粗さ (Ra) は約5 μm 、厚さは約40 μm であった。

3.3 レーザー衝撃による応力伝播の検討

図12に典型的なレーザー照射条件での衝撃力の伝播の時間変化の計算値を示す。最大の引張応力は深さ方向に時間とともに次第に大きくなりほぼ一定値に近づく。プラズマスプレイ法で作製された皮膜では層状組織が形成され、層同士の間の界面が弱いことが指摘されている。対象とするタングステン皮膜と低放射化フェライト鋼との界面の評価には、皮膜内の層間の界面が剥離することなく、対象界面に応力が負荷されることを期待している。計算の条件では、約40 μm の皮膜厚さは十分薄く、皮膜よりも対象とする接合界面に最大の応力が負荷されることを示している。

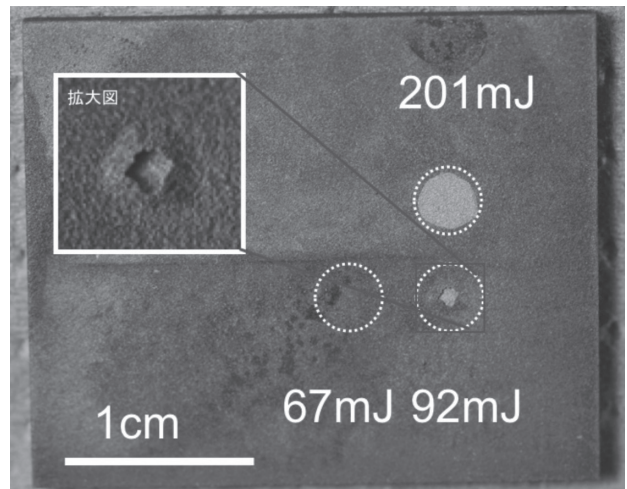


図10 低放射化フェライト鋼上のタングステン皮膜のレーザー照射による剥離挙動

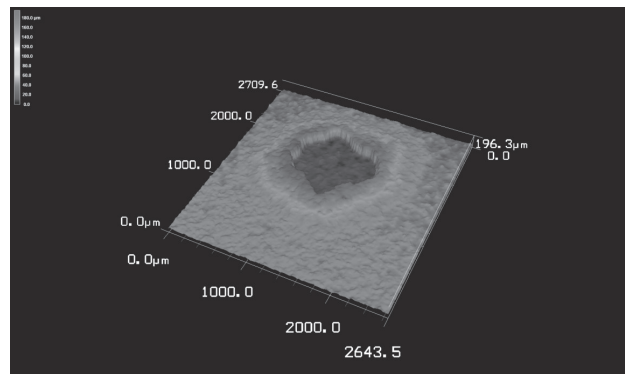


図11 低放射化フェライト鋼上のレーザー照射(92mJ)により剥離したタングステン皮膜の形状

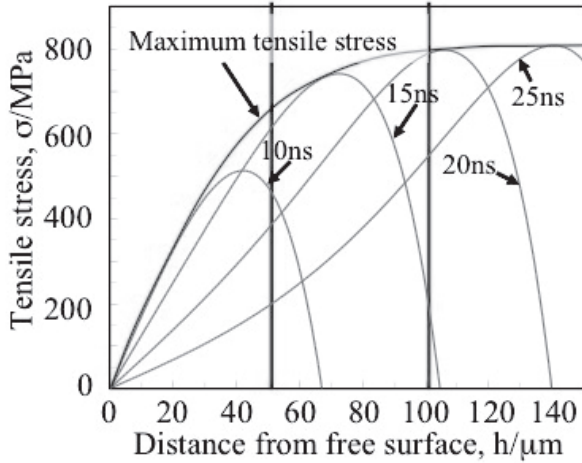


図12 試験片表面からの深さと衝撃力の伝播時間変化の計算値

4. 結言

核融合炉用第一壁被覆に関する基礎的研究の一つとして、低放射化フェライト鋼上へプラズマプレイ法によって作製されたタングステン被覆の剥離強度について調べた。試験片厚さを2 mm厚とし、タングステン皮膜の厚さを40 μm程度とすることによって、対象としたタングステンと低放射化フェライト鋼との接合界面に関する評価が可能であることを示すことができた。レーザー衝撃試験法による定量的な剥離強度測定では、いくつかのばらつきを与え得る要因について検討した。標準となる接合被覆試験片を用いた定量的なばらつきの評価が今後必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、電力事業の現状2012, 電気事業連合会 : <http://www.fepec.or.jp/>
- 2) <http://www.iter.org/>
- 3) 例えば、日本原子力研究所那珂研究所(編): FUSION 地球の未来エネルギー…核融合(2012) <http://www.naka.jaea.go.jp/>
- 4) Takeshi Hirai et.al., ITER Tungsten Divertor Design Development and Qualification Program, 27th Symposium on Fusion Technology (24-28 Sept. 2012) P2.91
- 5) 長坂琢也、栗下裕明, 日本原子力学会誌, 55 (2013) 48-52.
- 6) 最新 接合技術総覧, 最新接合技術総覧編集委員会 (1994)
- 7) JIS Z2241 金属材料引張試験方法
- 8) JIS H8402 溶射皮膜の引張密着強さ試験方法
- 9) JIS Z3122 突合せ溶接継手の曲げ試験方法
- 10) JIS R3255 ガラスを基板とした薄膜の付着性試験法
- 11) Gupta, V., Argon, A.S., Cornie, J.A., Parks, D.M., J. Mech. Phys. Solids 40, (1992) 141
- 12) Hyungil Kim, Jaa El-Awady, Jannifer Quan, Shaharam Sharafat, Vijay Gupta, Nesr Ghoniem, Fusion. Sci. Tech. 52 (2007) 875-879.
- 13) Hyungil Kim, Jaafar El-Awady, Vijay Gupta, Nasr Ghoniem, Shaharam Sharafat, J.Nucl.Mater, 386-388 (2009) 863-865.
- 14) Akira Kobayashi, Amit Jain, Vijay Gupta, V. Kireev, Vacuum 73 (2004) 533-539.
- 15) M. Satou, H.Akamatsu, T.Nagasaka and A.Hasegawa, MRS Proc.,1298, (2011) 55-60.
- 16) Hitoshi Akamatsu, Manabu Satou, Takashi Sato, Amit Jain, Vijay Gupta, Akira Hasegawa, J. Nucl. Mater., 417 (2011) 1253-1256.
- 17) S.N. Basu, H. Wu, V. Gupta, V. Kireev, Mater. Sci. Eng. A 349 (2003) 265-271.