

氏名	なかみち まさる 中道 勝
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成20年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)量子エネルギー工学専攻
学位論文題目	核融合炉用セラミック機能材料の開発研究
指導教員	東北大学教授 四竈 樹男
論文審査委員	主査 東北大学教授 四竈 樹男 東北大学教授 橋爪 秀利 東北大学教授 笹尾眞實子 東北大学教授 長谷川 晃 東北大学准教授 永田 晋二

論文内容要旨

本研究におけるセラミック機能材料とは、基材そのものの表面では得られない耐食性、耐磨耗性、熱的特性、機械的特性、化学的特性、電気的特性、磁気的特性、光学的特性、生体的特性等の特定の希望特性を得るため、材料表面にコーティング層を形成し、「希望する性質の表面をつくる」ものであり、時代の要請に応え、基材の高性能化・多機能化を可能にするものである。

セラミック機能材料は、原子力分野、特に核融合発電炉の研究開発分野においてもその適用性が期待されている。核融合発電炉については、その実用化に向けた国際的な研究活動として、国際熱核融合実験炉 (ITER) の設計・建設が国際事業として、日本、欧州連合 (EU)、ロシア、米国、韓国、中国、そして、インドを交えた7極体制で進められている。その ITER では、テストブランケットモジュール (TBM) を持ち込んで装荷して、ITER プラズマの核融合反応により発生する中性子を用いて、トリチウムの生成、発電の実証を行い、核融合炉発電用ブランケットの設計に資する計画である。ブランケットにおいては、トリチウム増殖材から生成・放出されるトリチウムが、ブランケット容器や冷却用配管等を透過して漏洩する。その透過を低減するためにブランケット容器へのセラミック機能材料の適用として、ブランケットに適用可能で透過低減効果が大きい緻密なセラミック皮膜を成膜することにより透過を低減することを考え、その皮膜の特性評価を実施した。そして、トリチウム透過低減皮膜の炉内機能性評価試験のため、ITER のパルス運転を模擬できる特殊な照射試験体を設計するとともに、設計した体系を実現し、炉内における特性を評価した。また、ITER では、プラズマ消滅時にブランケットから支持構造部へ負荷される電磁力を緩和するために、ブランケットと支持構造材間を電氣的に絶縁する必要がある。このためセラミック機能材料の適用として、電気絶縁材としてのセラミック皮膜について、その成膜性から特性評価を実施した。核融合炉用セラミック機能材料の開発研究の概要を図1に示す。

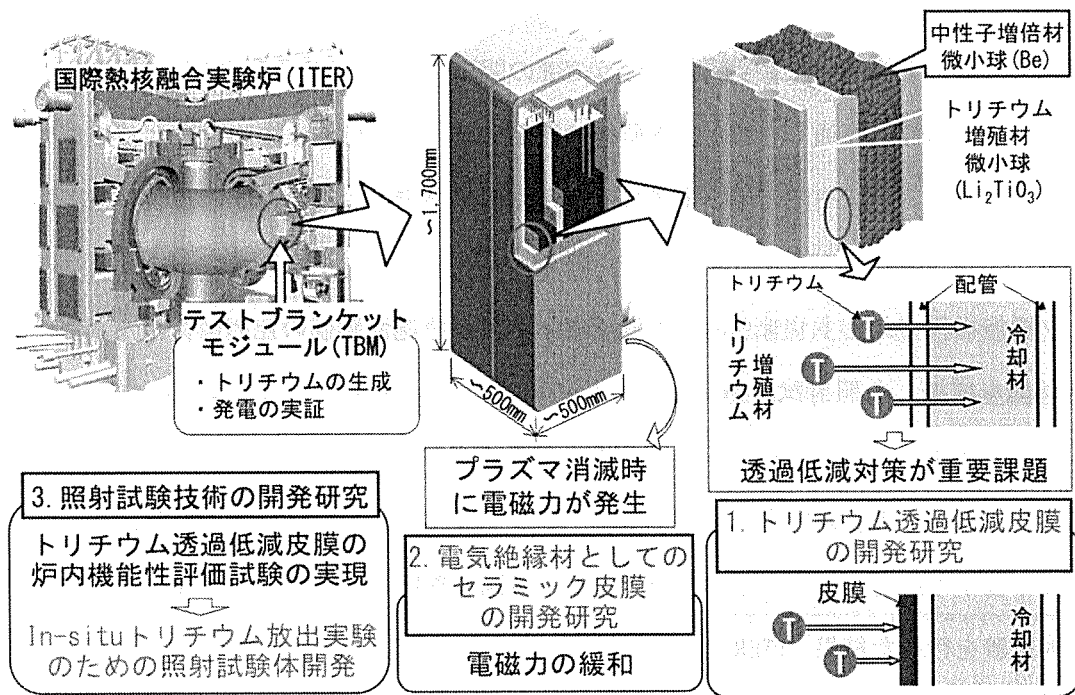


図1 核融合炉用セラミック機能材料の開発研究の概要

先ずトリチウム透過低減皮膜の開発研究について述べる。成膜法としては、化学緻密化法の適用を提案した。本法は、基材寸法に制限が無く、容器内面や狭隘部への成膜が可能で、かつ、成膜温度が約 450℃と比較的低いなどの利点を有している。最初に SiO_2 を骨材にして Cr_2O_3 を主成分とした気孔の少ない $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 皮膜の成膜に成功したが、本皮膜には皮膜表面から基材に通じる貫通欠陥が存在しやすいことが明らかになった。そのため、ガラス化材である CrPO_4 を添加することによって更なる緻密化を図ることを考案し、その結果、 $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CrPO}_4$ 皮膜では、気孔と貫通欠陥を低減させることに成功した (図2 参照)。また、本皮膜は、耐熱衝撃性にも優れ、皮膜の密着性も高い結果が得られた。本研究により実現した $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CrPO}_4$ 皮膜は、容器の内面等にも成膜可能で、かつ、中性子照射下におけるトリチウムの透過低減率が約 300 と、低照射量ではあるが核融合炉発電ブランケットにおける開発目標である透過低減率 100 以上を満足するものであることから、ブラン

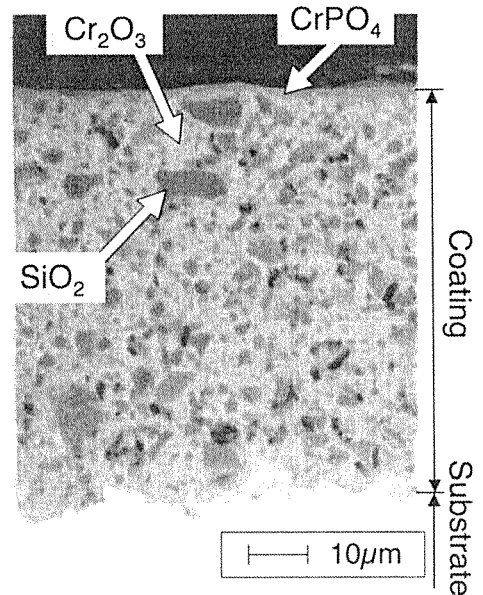


図2 $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CrPO}_4$ 皮膜断面写真

ケット内で生産されたトリチウムの有効利用及びトリチウム処理設備の規模の適正化に寄与するものである。そして、ITER を利用した工学試験を行う TBM の開発における重要課題でもあるトリチウム透過低減対策としての有用性に見通しを得た。本研究の波及効果としては、水素脆化により短期間での定期交換が必要な石油精製プラント配管等へ本皮膜を適用することで、設備の長耐用化、稼働率向上等が期待できる。

セラミック機能材料であるトリチウム透過低減皮膜の炉内機能性評価のために行った、JMTRにおいて ITERパルス運転を模擬した照射試験を実施するための特殊照射試験体の設計研究及び炉内性能評価について述べる。定常運転のJMTRにおいてパルス運転を模擬するため、中性子吸収体であるHfをトリチウム増殖材の廻りに配置して、入射する中性子を遮へいし、そのHfの一部に窓（開口部）を設け、その窓を回転させて中性子の照射を制御する方法を考案した（図3参照）。開発した特殊照射試験体を用いて炉内予備照射試験を行った結果、ITERパルス運転を模擬した照射試験がJMTRを利用してできることを実証した。

さらに、パルス運転を模擬した条件下において、熱中性子束の過渡変化が計測可能で小型な中性子検出器が存在しなかったため、高感度・高応答性を有するSPNDとして、CoにPt-13%Rhを被覆したハイブリッド型のエミッタを考案した。試作した同型SPNDの炉内予備照射試験において、Rhエミッタ出力信号に対する相対出力信号が0.3以上で、かつ、応答速度が1秒以下の信号出力が得られ、高感度・高応答性を有することが実証された。

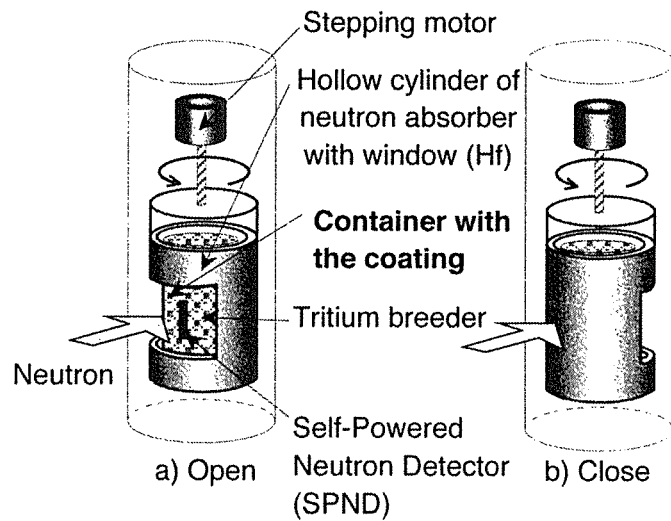


図3 トリチウム透過低減皮膜の炉内機能性評価用の ITER パルス運転模擬照射試験体

また、耐放射線性小型モータとして、構成部材を耐放射線性の高い材料に変更することに加えて、有機系潤滑剤を使用しない構造に変更することによって、 γ 線量で市販品の仕様限度の約700倍と、耐放射線性を格段に向上させることに成功した。本モータは、炉内試験に適用可能で、従来のMIケーブルをコイル材として用いたステッピングモータより小型であることから、中性子照射下におけるIn-situでの材料試験、例えばクリープ試験、引張試験などへの適用も可能で、かつ、中性子を含む放射線環境

下における各種制御用モータとしても使用可能である。これにより、世界で初めてITERパルス運転状態を模擬した照射試験をJMTRで行うことを可能にし、原子炉照射試験技術・計装技術の高度化にも貢献した。

最後に電気絶縁材としてセラミック皮膜の開発研究について述べる。セラミック皮膜は、基材との熱的特性の差により、割れや剥離を生じやすいため、皮膜材の組織構造による熱的特性の違いに着目し、セラミック焼結体を比較材に用いて気孔率をパラメータに、焼結材と溶射皮膜の熱的特性を比較評価し、プラズマ溶射皮膜独特の層状組織が熱的特性に与える影響を明らかにした。また、密着性向上のため基材とセラミック皮膜間に挿入する中間層について、セラミック皮膜との界面性状と密着性に対する溶射始発粉末の粒度と溶射方法の影響を調べ、中間層の最適条件を導き出し、密着性の高いセラミック皮膜が形成できることを明らかにした。

これら得られた知見から、ITER 実機用として用いた Al_2O_3 皮膜は、ITER 条件の2倍の衝撃エネルギーで、3倍の衝撃回数を与えても健全であり、かつ、十分な電気絶縁性を有しており、ITER 使用条件 ($> 10^9 \Omega$) を十分満足することを明らかにした (図4参照)。本研究の結果、セラミック皮膜の剥離特性に影響を与える熱的特性と断面組織構造との関係を明らかにし、ITER 条件下の機械的衝撃に対しても健全な Al_2O_3 プラズマ溶射皮膜を開発することにより、プラズマディスラプション時における電磁力緩和に目処を立て、ITER ブランケット設計へ貢献した。

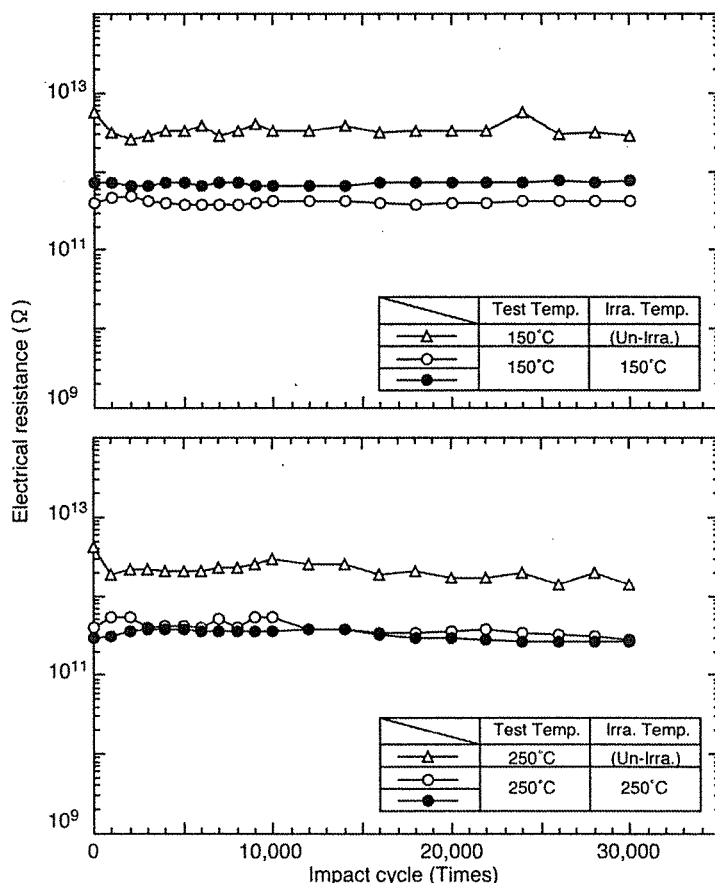


図4 機械的衝撃試験 (照射後試験) の結果

論文審査結果の要旨

核融合炉システムではそれを構成する材料に対して、多様なそして場合によっては両立が困難な特性が要求される。本論文においては、基材にセラミックスを被覆した機能性材料の核融合炉システムへの適用を検討した。特に現在、国際的な協力の下で開発が進められている国際熱核融合実験炉、ITER で実際の適用を念頭に置いた研究を進めた。

核融合炉における重要な技術的課題の一つとして、多量に取り扱われる放射性同位元素、トリチウムのシステム内への安全な閉じ込めが挙げられる。一方、ITER ではその構造物は基本的に工学的立証が進展している金属系材料が用いられるが、ITER 運転条件下での金属系材料内のトリチウム透過率は極めて高いことが予測される。このことは ITER 運転時にトリチウムが使用される場合には環境への放出が重要な工学的課題となることを示している。

本研究では、複雑な構造を持つ ITER 本体への適用が可能な実用的な塗付法により稠密なセラミック皮膜を金属基材状に成膜する手法を確立し、この被覆によりトリチウムの透過率が著しく低下し、ITER 運転条件下での安全基準を満足するものとなることを示した。

研究の最終段階において、国際協力を通じてカザフスタン国の原子炉内でその場測定実験を行い、ITER 設計に重要な工学データを取得している。この研究は現時点では世界において唯一のデータであり、ITER の安全評価に重要な貢献をなすものであると同時に今後の原子力システム高度化に向けて必須の工学課題である、原子炉照射技術開発の重要な一歩となるものである。本論文では関連した材料照射技術開発の主要な記述がなされているが、これらについても今後の原子炉高度利用に重要な貢献をするものと評価される。

セラミック被覆のもう一つの応用は電気絶縁膜としてであるが、本研究ではこの分野でのセラミック被覆材の開発も進めている。ITER においては適切な電気絶縁特性と併せて、過渡時における衝撃力に対して剥離しない特性が要求される。種々の手法によりセラミック皮膜の密着力を改善した上で、工学的に確立された手法に従い皮膜の密着特性を定量評価し、開発されたセラミック皮膜が十分な密着力を持つことを実証した。ITER の安定な運転に対して重要な寄与があると評価される。

以上、本論文は ITER を次の大きなステップとする核融合システム開発に対して、工学的に重要な貢献をなすものと評価される。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。