

複層コーティングを用いた MHD 圧力損失低減化技術の基礎研究

Fundamental study on technology to reduce MHD pressure drop using multi-layer coating

東北大・工 橋爪 秀利, 伊藤 悟, 青柳 光裕, 稲毛 義樹
東北大・金研 小黒 英俊

H. Hashizume¹, S. Ito¹, M. Aoyagi¹, Y. Inage and H. Oguro²

¹ Faculty of Engineering, Tohoku University

² Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

核融合炉の実現に向けて、その重要な機器のひとつであるブランケット開発が進められている。様々な形式のブランケットが提案されているが[1]、本研究ではトリチウム増殖材となる液体リチウムを冷却にも用いて、構造材をバナジウム合金とする Li/V ブランケットに着目する。Li/V ブランケットでは、燃料プラズマを閉じ込めるために必要な磁場の影響により、ブランケット中での液体リチウムの流れに電磁力が抵抗力として働く MHD 圧力損失が生じるという問題があり、この MHD 圧力損失を低減させることが重要な課題となっている。流路の内側を電氣的に絶縁すれば、流体に作用する正味の電磁力はゼロとなるため MHD 圧力損失は大きく低減できる。しかし絶縁材は金属と熱膨張率が異なるため、クラックが生じる可能性が高く、そのクラックを通して金属壁に電流が流れることが懸念される。また、高熱負荷や放射線照射にさらされるプラズマ対向面に絶縁を施すのは不都合であり、さらに流路内面の 4 面すべてに絶縁コーティングを施すのは技術的にも困難である。そこで、プラズマ対向面以外の三面のみに絶縁を施し、絶縁層の流路側にさらに薄い金属層を加えた三面複層コーティング流路 (Fig. 1) が提案されている[2]。絶縁層にクラックが生じて、金属層の存在により、流路壁内への電流パスの発生を防止できる。

過去の研究では数値解析による評価が行われ[2][3]、三面複層コーティング流路によって MHD 圧力損失がブランケット設計可能な値まで低減できることが確認されている。さらに実験と数値解析の両面から核融合炉ブランケットへの適用性を評価することを最終目標として、昨年度までの共同研究では複層コーティング流路、絶縁壁流路および導電壁流路での圧力損失測定を行い、並行して実施した数値解析結果との比較を行った。導電壁流路での結果と比較すると、複層コーティング流路では圧力損失が低減されることが示された[4]。実験結果と数値解析結果は一致しなかったが、これは流体と壁の間の接触電気抵抗と、自由液面上にある酸化物の影響であり、これらの影響を定量的に評価することで、実験結果を数値解析は良く一致した[5]。

これまではテフロン樹脂により絶縁した模擬流路での検証を行ったが、本年度は実機と同じくセラミック絶縁での三面複層コーティング流路を用いて、テフロン絶縁の場合と同様の圧力損失低減効果があるか検証した。また、これまでに行っている流動特性の観点だけでは現実的な流路の提案とはならない

可能性があるため、製作試験を行い流路の製作性も併せて検証することが必要となる。本年度は流路製作の基礎技術の確立を目的として、短尺流路の製作試験を行った。

2. セラミック絶縁流路での圧力損失特性

2-1. 実験方法

Fig. 2 に実験に用いた流路の鳥瞰図および断面図を示す。流路は厚さ 0.02 mm のステンレスの底板と銅側壁からできており、内径 80 mm、外径 156 mm、深さ 30 mm の環状自由表面流路である。ステンレス底板には、セラミック絶縁材としてシリカ(SiO₂)が流体に接しない面に約 0.05 mm の厚さでコーティングされている。作動流体は Bi-Sn 共晶合金 (融点 138 °C) で、銅側壁中に設置したヒーターを用いて 150 °C まで昇温させる。この流路を 6T-CSM マグネットに挿入することで流れに対して垂直方向の磁場を印加する。側壁は電極としての役割も持っており、磁場と内外の銅電極を通して流す径方向の電流により、流体に周方向の駆動力を発生させる。

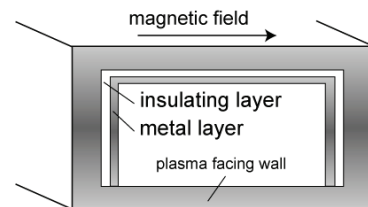


Fig. 1. Three-surface-multi-layered channel

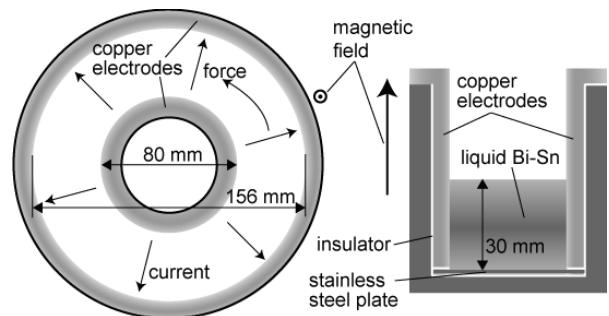


Fig. 2. (a) Top and (b) cross-sectional schematic views of the channel test section

平均流速は MHD 流量計の原理で測定できる。これは流れと磁場の相互作用により電場が発生することを利用するものであり、電極間の電位差(V)と距離(w)、磁場の強さ(B)により平均流速(U)が求められる (Eq. 1)。また、圧力損失(dp/dx)は駆動電磁力と等価なため、印加する電流(I)と磁場、流路の深さ(h)と周長(L)から求められる。

$$U = \frac{V}{Bw} \quad (1)$$

$$dp/dx = \frac{IB}{hL} \quad (2)$$

実験条件は平均流速が 0.1-0.6 m/s、磁場の強さが 1-5 T である。測定は 2 日間行い、その間に作動流体の Bi-Sn 合金は液体の状態を保つ。これは固化させると流体とステンレス壁の間の接触状態が悪化することで、接触抵抗が増大して圧力損失に影響を及ぼすからである。また酸化物の影響により摩擦力が増大し、得られる圧力損失は過大評価となることが予測されるが、摩擦力の増大は絶縁壁流路を用いてこれまでに評価しており、酸化物の影響を差し引くことで、MHD 圧力損失を正しく評価できる。

2-2. 圧力損失測定結果

Fig. 3 に圧力損失の測定結果を示す。前述のように酸化物の影響を除去するために摩擦力の寄与分を差し引いて、電磁力のみによる圧力損失を図示している。電磁力は磁場の 2 乗と流速に比例するので、いずれの場合でもほぼ線形的な変化を示しており、摩擦力以外では電磁力が圧力損失に対して支配的となっていると考えられる。

また、セラミック絶縁での圧力損失はテフロン絶縁の場合と比較すると、増大することはなく、むしろ低下する結果が得られた。接触抵抗値の違いが、セラミック絶縁の場合の圧力損失低下の一因であると考えられる。接触抵抗が存在する壁と流体の間の状況は絶縁方法による違いはないものの、接触抵抗値は用いるステンレス壁の個体によって大きな違いがあることが示されている[5]。さらに、これまでに接触抵抗値は時間と共に減少して圧力損失は増大していくことが確認されているが、2 日目の実験結果で圧力損失が増大しており[5]、接触抵抗が時間と共に変化する傾向と同じである。

3. 流路製作試験

本研究はバナジウム合金(V 合金)を構造材として用いたブランケットに着目しているが、V 合金は材料開発中であり、流路を試作するほどの量は入手できないため、本製作試験ではオーステナイト系ステンレス鋼を構造材として用いる。実際の材料と本製作試験で用いる材料は異なるが、オーステナイト系ステンレス鋼の製作性と V 合金のそれに類似性があれば製作方法のひとつの候補とできる可能性がある。

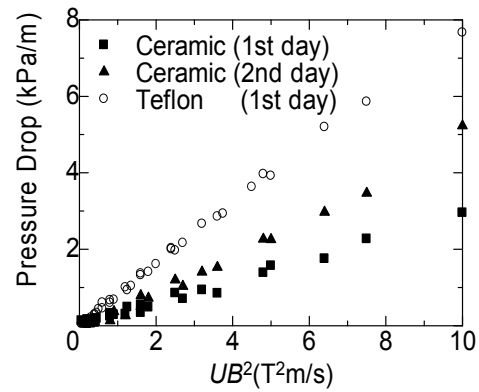


Fig. 3. Pressure drop

製作性検証の第一段階として、本製作試験では比較的製作しやすいと考えられる厚さ 0.1 mm の金属層を用いた。製作方法を Fig. 4 に示す。流路は流路壁および金属層、底板の 3 つを重ねるようにして接合させて製作した。以前に行った三面複層コーティング流路が試作では Fig. 4 左図のように絶縁コーティングを金属層に施し、ろう付けにより接合を行ったが、Fig. 5 のように金属層にゆがみが生じ、流路壁と底板がずれる結果となった。金属層のゆがみはろう付けの際、金属層が高温になったことで生じたと考えられる。金属層が歪むことで絶縁コーティングが剥がれる可能性が高まるため、今回は改善策として Fig. 4 右図のように流路壁に絶縁コーティングを施すこととした。また底板とのずれを防止するため、底板に溝加工を施した。さらに金属層への熱負荷を軽減するため接合方法をろう付けから溶接 (TIG 溶接) に変更した。この結果、Fig. 6 左図のように金属層の歪みも少なく、さらに金属層と底板のずれもなく接合された三面複層コーティング流路を製作することができた。なお、V 合金の TIG 溶接による接合については V 合金や溶接棒を高純度化することにより溶接性が向上するという報告がなされており[6]、TIG 溶接を用いた流路製作は V 合金に対しても適用可能であると考えられる。

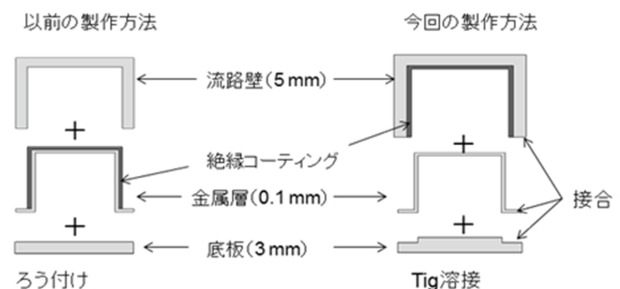


Fig. 4 Fabrication method of the three-surface-multi layered channel

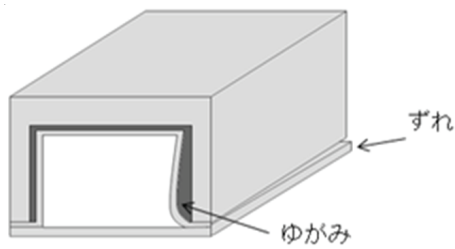


Fig. 5 Schematic view of the Result of the previous fabrication test

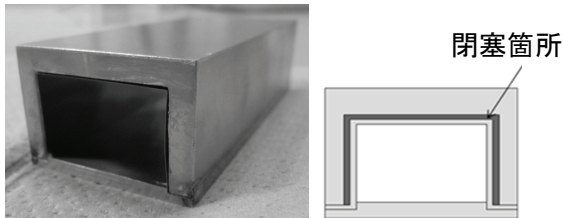


Fig. 6 Improved channel and Closing part

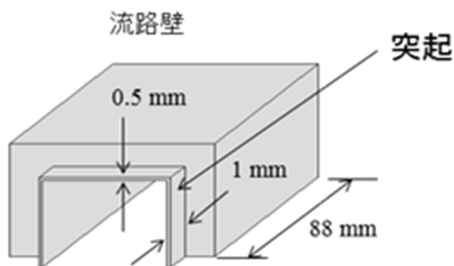


Fig. 7 Forming projections for welding at the both ends

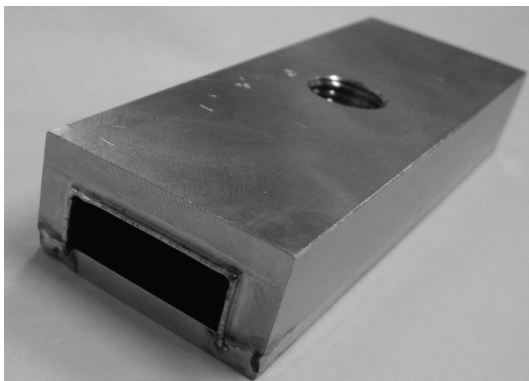


Fig. 8 Prototype channel of the fundamental fabrication

核融合炉ブランケットでは、三面複層コーティング流路と何も施されていない流路が存在するため、両者を接合する箇所が存在する。Fig. 6 のように、金属層と流路壁の間に空間が存在し、そのまま接合するとこの空間に液体リチウムが流入してしまい、複層コーティングの効果がなくなってしまう。したがってこの空間を閉じる必要がある。

端部を溶接することで空間を閉塞させるが、金属層（厚さ 0.1 mm）は流路壁（厚さ 5 mm）と比べて非常に薄く、溶接の際に先に溶けてしまうため、Fig. 6 のように平坦な端部では溶接ができない。そこで端部に Fig. 7 のような突起を作り、溶接する場所での厚さの違い小さくする対策を施した。以上の方法

により製作した結果、Fig. 8 のように端部は完全に閉塞され、上部の通気口を通してリーク試験を行った結果リークが無く、閉塞が確実に行われていることが確認された。ただし、この箇所の溶接は金属層と流路壁との密着度が大きく影響する。流路壁等に変形が生じると確実な接合ができなくなるため、今回は短尺流路の製作試験を行ったが、今後長尺化を行う際には、加工による歪みを小さくする方法を検討する必要がある。

4. まとめ

実機と同じくセラミックを絶縁材として用いても三面複層コーティング流路で圧力損失を低減できることも示された。製作試験において溝を入れた底板と絶縁コーティングを施した流路壁と金属層を TIG 溶接で接合させることができた。しかし、長尺化や流路断面の閉塞方法などに製作の困難さが伴うため、今後はより製作しやすいような方法を考案する必要がある。

参考文献

- [1] M. Enoeda, M. Akiba, S. Tanaka, A. Shimizu, A. Hasegawa, S. Konishi, A. Kimura, A. Kohyama, A. Sagara and T. Muroga, "Overview of design and R&D of test blankets in Japan", Fusion Eng. Des. 81, pp. 415–424, 2006
- [2] H. Hashizume, "Numerical and experimental research to solve MHD problem in liquid blanket system", Fusion Eng. Des., 81, pp. 8-14, 1431, 2006
- [3] K. Yuki, T. Kobayashi, M. Aoyagi, H. Hashizume, "Magneto-Hydro-Dynamic-Simulation of Square Duct Flow with Three-Surface-Coated Multi Layers", International Journal of Fluid Mechanics Research, Vol.36 No.5, pp. 473-487, 2009
- [4] M. Aoyagi, S. Ito, H. Hashizume, T. Muroga, "MHD pressure drop characteristics in a three-surface-multi-layered channel under a strong magnetic field," Fusion Engineering and Design, 85, pp. 1181-1184, 2010
- [5] M. Aoyagi, S. Ito, S. Ebara, H. Hashizume, "Experimental and Numerical Evaluation of the MHD Pressure Drop with Contact Resistance in a Channel", 8th PAMIR International Conference on Fundamental and Applied MHD, Borgo, France, Sep.4-9, 2011
- [6] 室賀健夫, 核融合フォーラム 炉工学クラスター 低放射化材料サブクラスター H18 年度 第 1 回 会合資料、「バナジウム合金の開発戦略」(2006)