

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
東北大・金研 小黒 英俊, 淡路 智
H. Hashizume¹, S. Ito¹, M. Aoyagi¹, H. Oguro² and S. Awaji²
¹ Faculty of Engineering, Tohoku University
² Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

現在、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。様々な形式の核融合炉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、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]。金属層の存在により、絶縁層にクラックが生じても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。複層コーティングを施さない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、さらに金属層を薄くすることにより圧力損失が低減される結果が得られたが、実験結果と数値解析結果は完全には一致しなかった[4]。この原因としては壁と流体の界面での接触電気抵抗などの影響が示唆されている。ブランケット配管においても同様に壁面の接触抵抗が問題となる可能性があり、さらに流動実験時の接触抵抗値の計測は行われておらず、接触抵抗値と圧力損失の定量的な関係は明らかになっていない。そこで、本年度は接触抵抗値と圧力損失の関係を実験により明らかにした。

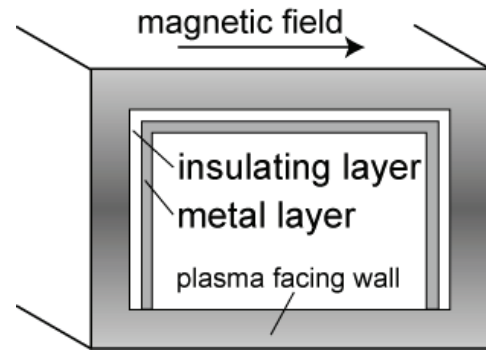


Fig. 1. Three-surface-multi-layered channel

2. 研究方法

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 0.1 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。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。流路は開流路であるが、液面変化のない自由表面における境界条件は対称条件と等しいため、チャンネル流れの半領域を模擬した状態である。平均流速が 0.1 m/s、磁場の強さが 3 T の条件で実験を行う。実験の間、作動流体である BiSn 合金は溶融した状態を保持し、1 日のみのものと、4 日間のものの 2 度実験を行う。

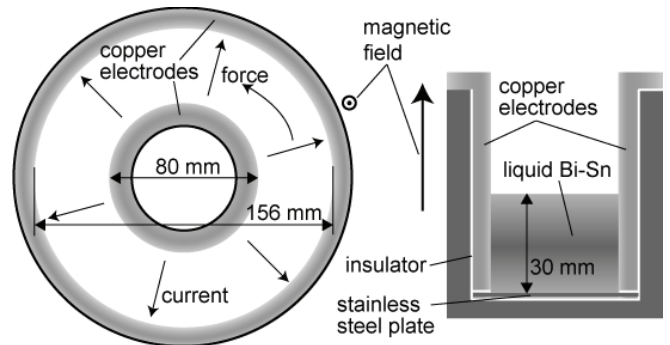


Fig. 2. (a) Top and (b) cross-sectional schematic views of the channel test section

2-2. 測定原理

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_m)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。

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

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

接触抵抗を測定するために、Fig. 3 のようにステンレス底板には通電および計測用のリード線が取り付けられている。磁場をかけていない状態で両電極からステンレス底板に通電させ、その電位差を測定することで接触抵抗値を算出する。

2-3. 数値解析方法

支配方程式は円筒座標系の定常 2 次元の周方向成分に関するナビエーストックス方程式 (Eq. 3) および静電ポテンシャルの式 (Eq. 4) である。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) - \mu \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) + J_r B_z = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\sigma r u_\theta B_z) = 0 \quad (4)$$

ここで、 μ は粘性係数、 u_θ は周方向の流速、 J_r は径方向の電流、 B_z は軸方向の磁場、 σ は導電率、 ϕ は静電ポテンシャルである。環状流路であるため軸対象を仮定でき、周方向の勾配はゼロとなるため、断面内の 2 次元解析である。有限体積法により支配方程式を離散化して解く。自由表面における境界条件はフリースリップ条件として、液面の変化は考慮していない。計算格子は壁近傍に多く配置した不等間隔格子で、格子点数は流体内で 253×136 (半径方向 \times 軸方向) である。流体と壁の界面にごく薄い電気抵抗層を配置して接触抵抗を模擬する。

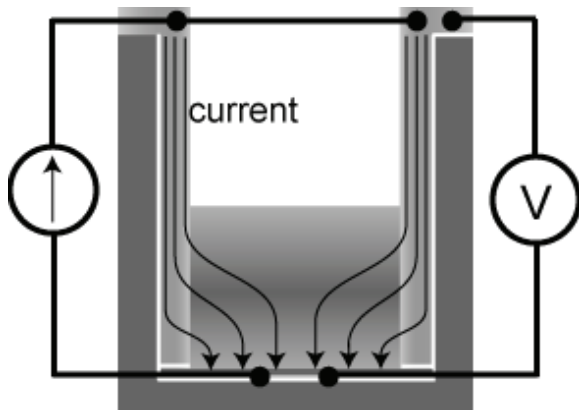


Fig. 3. Contact resistance measurement system

3. 結果と考察

Fig. 4 はステンレス底板の表面に接触抵抗があると仮定して、Fig. 3 のように銅電極からステンレス底板に 10 A 通電させた場合に発生する電位差を数値解析により求めたものである。接触抵抗値に対して電位差が比例しており、実験においては電位差を計測することによって、壁面の接触抵抗が得られると考えられる。

Fig. 5 に接触抵抗値と圧力損失の関係を示す。全体としては接触抵抗と圧力損失の間に相関関係があることがわかる。また、接触抵抗を仮定した数値解析結果と比較すると、よく一致している。実験結果は全体的に数値解析結果よりも 0.5 kPa/m ほど大きい値を示しているが、これは液面の酸化物による摩擦力が作用しているためであると考えられる。酸化物の圧力損失への影響はこれまでの共同研究により約 0.45 kPa/m であることが確かめられている[4]。

比較的接触抵抗の小さい場合の実験データ 2 では、同程度の接触抵抗であっても圧力損失に大きなばらつきが見られる。これらの測定結果は数日間にわたって実験を行った結果であり、Fig. 6 に示すように時間とともに圧力損失が増大している。当初はほとんど存在していなかった液面の酸化物の生成が原因のひとつであると考えられる。しかし、酸化物の影響は大きくても 0.45 kPa/m 程度であるが、今回得られた結果は 1.5 kPa/m ほど変化しているため、接触抵抗の変化もあり、これが圧力損失に影響した可能性もある。これまで接触抵抗は底部のステンレス壁面上のもののみが影響するという仮定のもとに実験を行ってきた。しかし、内外の電極間に通電させ、そのときの電極間の電位を測定すると、銅側壁と流体の間にも $1 \mu\Omega\text{m}^2$ 程度の接触抵抗があることが確認された。したがって、ステンレス底板の接触抵抗が比較的小さい場合には、その接触抵抗の測定の際に計測される電位差は銅電極の接触抵抗によるものが支配的となっていたと考えられる。そのため、ステンレス底板上の正確な接触抵抗値が測定できていなかった可能性がある。

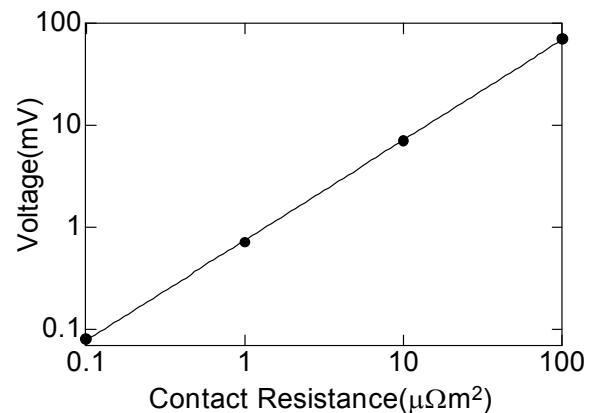


Fig. 4. Voltage-contact resistance property obtained numerically

数値解析結果では、接触抵抗を考慮しない場合の圧力損失は 4.1 kPa/m 程度であるが、Fig. 5 より接触抵抗が小さくなると圧力損失はこの値に収束している。一方で、実験で得られた圧力損失は 4.4 kPa/m ほどであるが、酸化物の影響を差し引けば 4.0 kPa/m 弱である。また、Fig. 7 に示すように、別の測定においては接触抵抗が減少するとともに圧力損失が増大することが確認されている。したがって、実験データ 2 においても同様に、接触抵抗の変化があったとすれば、数値解析で予測されるような結果が得られたと考えられる。

4. まとめ

底壁の接触抵抗値と圧力損失の間に相関関係があることが実験および数値解析によって確認された。また、実験で得られた値と数値解析で得られた値は比較的に良く一致していた。底壁の接触抵抗が小さい場合には側壁の接触抵抗の影響により、接触抵抗が正確に測定できなかった可能性があり、圧力損失との相関が得られなかった。しかしながら、別の測定と同様な接触抵抗の変化があったとすれば、概ね数値解析結果と等しい結果であった。

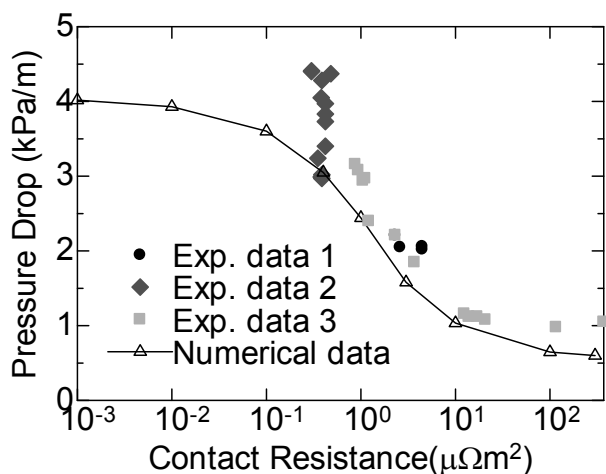


Fig. 5. Relationship between the pressure drop and contact resistance

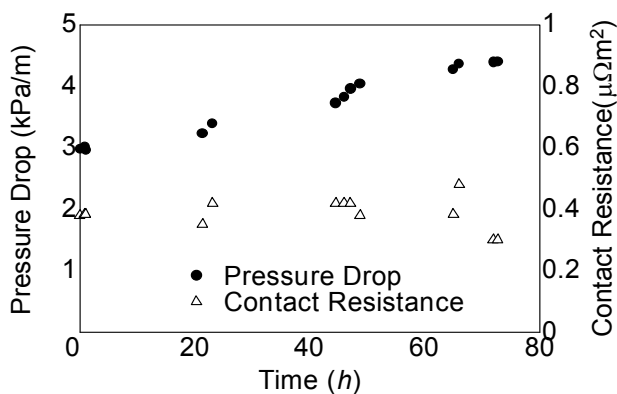


Fig. 6. Pressure drop history of the experimental data 2

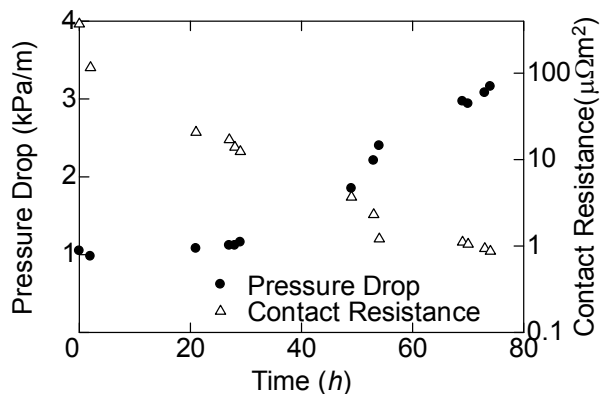


Fig. 7. Pressure drop history of the experimental data 3

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