

大強度パルスパワー発生装置を用いた通電加熱によって生成した Warm Dense Matterの実験と数値解析を組み合わせた温度計測の検討

Study on temperature measurement by numerical simulation with experimental observation in warm dense matter generation with discharge heating by intense pulsed power generator

宮本泰成¹、鶴山博也¹、田村文裕²、菊池崇志¹、佐々木徹¹、高橋一匡¹、樫根健史³、江偉華⁴、徳地明^{4,5}
 T. MIYAMOTO¹, H. UYAMA¹, F. TAMURA², T. KIKUCHI¹, T. SASAKI¹, K. TAKAHASHI¹, K. KASHINE³, W. Jiang⁴, T. Akira^{4,5}

¹長岡技大, ²長岡高専, ³鹿児島高専, ⁴長岡技大・極限エネルギー密度工学研究センター, ⁵パルスパワー技術研究所
¹Nagaoka Univ. Tech., ²NIT, Nagaoka College, ³NIT, Kagoshima College,
⁴Nagaoka Univ. Tech., Extreme Energy-Density Research Institute, ⁵PPI Lab Ltd.

慣性核融合燃料ペレットの構造として、発泡金属をプッシュャー材として用いることが検討されている[1]。爆縮過程で発泡金属は Warm Dense Matter (WDM) と呼ばれる温度-密度の物性領域を通過する。WDM は相変化や複相の共存、解離、電離などの現象を含み、物性に関わる状態方程式や熱伝導率などの輸送特性の定式化が難しく、その物性を明らかにする必要がある[2]。定積比熱や熱伝導率などの物性値は、温度及び密度の関数で表される。これらの物性値を観測するため、大強度パルスパワー発生装置による通電加熱を用いて、Warm Dense Matter を生成する[3]。本手法は、試料をキャピラリに閉じ込め、密度を定義した定積加熱であることから、WDM の物性の温度を計測し、その依存性を明らかにする必要がある。

本研究では、爆縮時間スケールで発泡銅の WDM をパルス通電加熱により生成し、定積状態においてその到達温度を測定する。WDM となった試料から電極への熱伝導を数値解析し、一方で実測した電極の温度と比較して、WDM の到達温度を算出する手法を提案する。

パルス放電による Joule 加熱で発泡銅は高温になる。加熱された発泡銅を熱源とし、接続されている電極に熱伝導していく。パルス放電による試料の加熱時間は 100nsec のオーダーであり、電極を熱伝導する時間は 100sec 程度であることから、試料の加熱過程は無視できる。このため、加熱後の数 1000K の試料を初期条件として設定した。電極の周囲は真空のため、熱伝導過程は電極の軸方向への一次元非定常熱伝導方程式により解析できる。熱伝導は試料中心に対して対称であるため、試料の中心を原点 ($z = 0$ mm) とし対称境界条件を適用した。発泡銅の密度は実験で用いた固体密度 10% を仮定した。また、電極の物性値は実験で用いた SUS304 とし、初期温度を 300K とした。実験で 7mm の試料を使用するので、 $z = 3.5$ mm までを試料、 $z > 3.5$ mm を電極とした。

以上の条件で、試料の初期温度を 2500K, 3000K, 4000K とした時の数値解析結果を図 1 に示す。この結果、WDM の持つ熱エネルギーが数 100sec かけて電極へ伝播し、試料の初期温度により温度分布と到達温度が異なることが分かる。中心電極の $z = 33$ mm, 53mm, 73mm での最高温度をまとめた結果を図 2 に示す。図 2 より、電極の最高温度は試料の初期温度に対応し、計測位置に近いほど試料温度変化に対して電極の到達温度変化が大きい。これらのことから、電極の温度計測と数値解析を併用することで、発泡銅プラズマの到達温度を推定できる。

次に、大強度パルスパワー発生装置[4]の最後段に図 3 のチャンバーを構成し、照射実験を行なった。大電流-高電圧の高周波パルス計測装置は、ログスキーコイルと抵抗分圧器で構成した。温度計測は電極棒に熱電対を取り付け、真空チャンバー外のデータロガーに接続し行った。

照射実験の結果、電流は 150kA, 電圧は 300kV, 熱電対で測定した電極の温度上昇は 10K 程度となった。電流電圧計測より見積もられた投入エネルギーを用い SESAME 状態方程式より求めた WDM 温度は 4000-5000K であった。一方、熱電対による中心電極の温度計測の結果と図 2 の関係より、WDM 温度は 2000-3000K であった。本提案手法である数値解析と電極の温度計測を組み合わせた WDM 温度計測法では、電圧・電流計測により求めた WDM 温度よりも低く見積もられることがわかった。

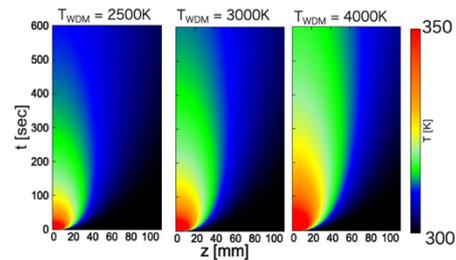


図 1 電極部の温度の時間・空間解析結果

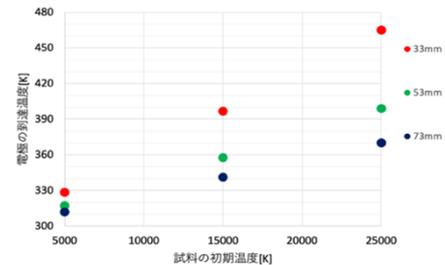


図 2 試料の初期温度と電極の到達温度の関係

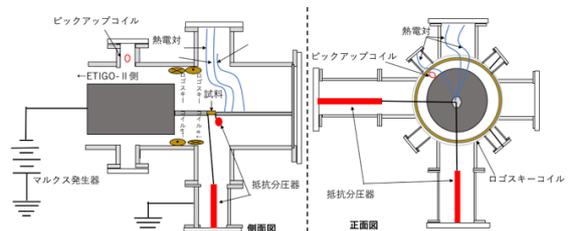


図 3 チャンバーセットアップ

表 1 電圧・電流計測と本提案手法による温度測定の比較

計算手法	温度上昇(Z=33mm)	投入エネルギー	WDM温度
電圧・電流計測	7 - 12.4 K	250 - 300 J	4000 - 5000 K (SESAME EOS)
本提案手法	13.5 K	158 J	2000 - 3000 K (T _{WDM} =2500 K)

参考文献

[1] Y. Iizuka, et al., J. Plasma Fusion Res. Series 8 (2009) 1200.
 [2] K. Horioka, et al., J. Plasma Fusion Res. 86 (2010) 269.
 [3] R. Hayashi, et al., J. Phys.: Conf. Series 717 (2016) 012063.
 [4] W. Jiang, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 32 (1993) L752.