

マイクロ波加熱による非平衡場での結晶構造挙動と物性物理 Crystal structure behavior in non-equilibrium fields by microwave heating

高山 定次

Takayama Sadatsugu

核融合科学研究所

National Institute for Fusion Science

1. はじめに

核融合炉材料開発の課題の一つに、物質中を超高流束のエネルギーと物質粒子が輸送されると物質の構造が非平衡状態となり、そのために生じる不均一で多様なメゾスケール構造がもたらすマクロな材料特性の理解が未だ進んでいないことである。これまで、マイクロ波加熱を応用した材料開発に取り組んできたが、このマイクロ波の選択加熱により、非平衡状態を模擬できないか、検討を進めている。

マイクロ波とは、1GHz~30GHz(波長 1cm~30cm)の電磁波の一種である。通常加熱に用いる赤外線は材料表面で吸収され、表面からの熱伝導で材料内部を加熱する。一方、マイクロ波は材料内部で少しずつ吸収されながら透過する。この透過性により、体積発熱や選択加熱と言われるマイクロ波特有の加熱現象が現れる。選択加熱は材料組成で決まる誘電損失の違いによって起こるが、粒界や欠陥などの結晶不整合でも起こると考えられる。元々、材料は粒界や結晶欠陥など非平衡構造を持っている。そのため、マイクロ波が均一でもエネルギー状態は非平衡となる。このマイクロ波加熱による非平衡場で高流束エネルギーが引き起こす非平衡場を模擬できるのではないかと考えた。

そこで、これまでの研究で得られたマイクロ波加熱による非平衡下での結晶挙動の一例を紹介する。マグネタイト(Fe_3O_4)に代表されるハーフメタル磁性体は、スピントロニクス分野で注目されている材料の一つである。今回、ハーフメタル磁性体であるマグネタイトをシングルモード共振器の最大磁場と最大電場で加熱し、その加熱後に結晶構造の比較をした。

2. 実験方法

今回用いた粉末は高純度化学社製の Fe_3O_4 粉末(粒径1 μm 以下, 純度99.9%)を使用した。サンプルは、直径10mm、厚さ約3mmの円柱状ペレットにプレス成形した。成型したサンプルをシングルモードキャビティの最大電場と最大磁場の位置に設置した。シングルモードキャビティの構成を図1に示す。発振器はEWIG社(東京・目黒)製のPRJ-1000Lであり、周波数は2.450 GHz, 定格出力CW1.5 kWである。マイクロ波は、マグネトロンからアイソレータ、方向性結合器、そしてアイリスを経てキャビティに入る。マイクロ波キャビティはアイリスと終端部であるプランジャの間に、TE₁₀₃モードの定在波を形成する。

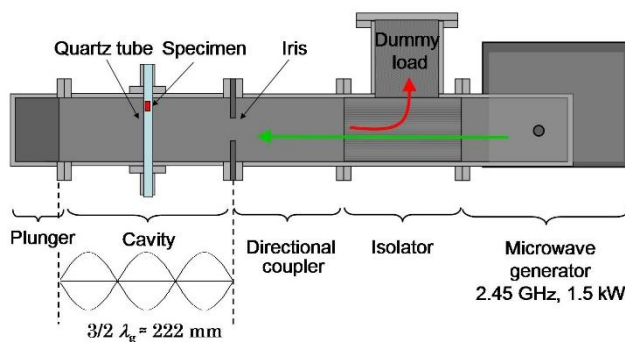
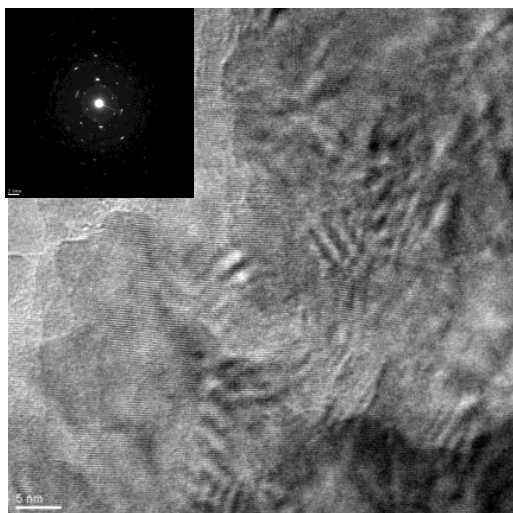


図1 シングルモードキャビティの構成

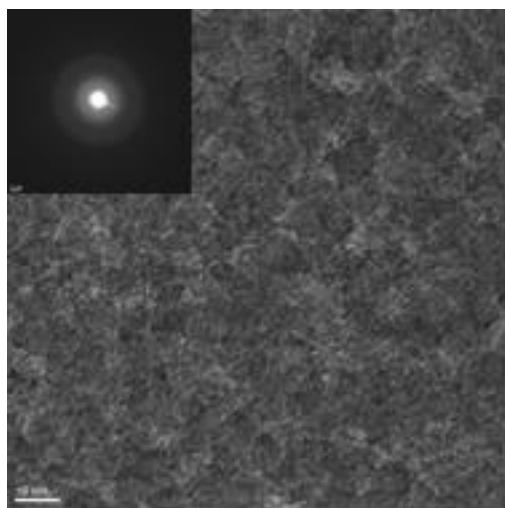
温度測定は、サンプル上面から放射温度計を用いて行った。加熱の前にサンプルを設置している石英管内をロータリーポンプとターボ分子ポンプで真空排気し、真空中で加熱を行った。

3. 実験結果

サンプルのマイクロ波による磁場加熱及び磁場加熱は、1000℃保持で行った。加熱後の試料のTEM写真を図2に示す^[1]。電場加熱では通常加熱と同様な焼結現象が確認され、結晶内歪も見られた。一方、磁場加熱では通常加熱と異なり、微結晶化が観察された。



(a)電場加熱試料



(b)磁場加熱試料

図2 マイクロ波電場加熱後のTEM写真

また、図3にSQUIDによる磁場測定結果を示す^[1]。電場加熱では結晶内ひずみが要因と思われる飽和磁界の減少が、磁場加熱では微結晶化による軟磁性の特性が得られた。

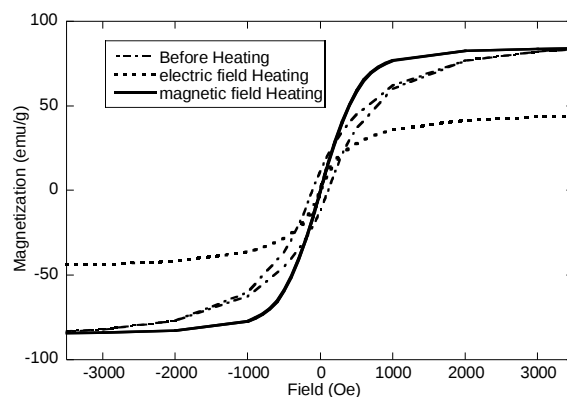


図3 加熱前、磁場加熱後、電場加熱の磁気特性

4. まとめ

今回用いた Fe_3O_4 はハーフメタルである。ハーフメタルは上向きスピンの状態密度が金属的で、下向きスピンの状態密度が半導体的になり、フェルミ面近傍で下向きスピンのバンドギャップを持つ。つまり、フェルミ面では下向きスピンの状態密度がゼロで上向きスピンの電子しか存在しない。磁場加熱のサンプルで観察された微結晶化は、通常加熱では見られない現象であり、非平衡状態によって引き起こされた事例だと考えている。しかし、マイクロ波の光子エネルギーは小さく励起することはできないので、スピンへのエネルギー伝搬ではないかと考えている。ハーフメタルの場合には、上向きスピンの状態密度が金属的で、下向きスピンの状態密度が半導体的と異なっており、格子面に歪を生じることが期待できる。

このように、マイクロ波加熱では平衡加熱では起こらない現象が見いだされているので、非平衡下での物理解明に寄与できる可能性を秘めていると考えている。

参考文献

- [1] S. Takayama, M. Takeda, J. Fukushima, M. Sato, "Influence of Microwave Irradiation on Magnetic Oxide Compact", JPS Conf. Proc. 8, 031003 (2015) [6 pages]