



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Development of F82H-based composite materials with a high thermal conductivity [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	Heo, Jeongwoo
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14871号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/85277">https://hdl.handle.net/2115/85277</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Heo_Jeongwoo_review.pdf, 審査の要旨



## 学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 Heo Jeongwoo

審査担当者 主 査 教 授 橋本 直幸  
副 査 教 授 三浦 誠司  
副 査 教 授 大野 宗一  
副 査 准教授 磯部 繁人

## 学位論文題名

### Development of F82H-based composite materials with a high thermal conductivity

(高熱伝導率を有する F82H 複合材料の開発)

核融合装置において、熱交換器用機器であるダイバータは、表面温度が構成材料の融点あるいは昇華点を超える程の高熱負荷を受けるため、十分な除熱機能が要求される。プラズマ対抗機器の一つでもあるダイバータでは、通常運転時に機器表面から冷却管までの 10 数 mm の距離に 500 °C 以上の温度勾配が生ずる。翻って、核融合原型炉 (DEMO) では高中性子負荷で長期的・連続的の操作が要求されるため、従来の炉構造材料より更に耐照射性の高い低放射化フェライト・マルテンサイト鋼 (RAFM) の開発が進められている。RAFM を DEMO 炉ダイバータとして採用するに当たり最も難しい点は、その熱伝導率の低さ (約 30 W/m/K) と言える。本研究では、高熱伝導性を有する RAFM 材料を開発し、DEMO 炉ダイバータ用構造材料としての成立性について考察した。当該機器構造体全体の熱負荷を軽減することができればこれまで解がなかった DEMO 炉用構造材料の熱伝導性に関する課題をクリアするだけでなく、高熱伝導性を有する鉄鋼複合材料として工学的にも大きな付加価値を持たせることになる。当該材料開発のコンセプト及び目標は、RAFM 材料中に高熱伝導性金属ワイヤーを効率よく配置し、構造材料全体の熱伝導性を RAFM の 2 倍以上に向上させることである。

供試材として、核融合炉構造材料の第一候補材である低放射化フェライト・マルテンサイト鋼:F82H: 31.3 W/(m/K) のバルク体からガスアトマイズ法によって作製した粉末 (125mm 径) を用意し、熱伝導率の高い金属材料として W 及び Cu のワイヤーを用いた。複合材料の目標組成は F82H-xW-yCu (x, y = 0-20, x+y = 20) とし、混合則を用いて計算した熱伝導率は、F82H-20W 及び F82H-20Cu でそれぞれ 60.0 W/m/K 及び 105.2 W/m/K である。成形体の作製には放電プラズマ焼結法 (SPS) を用い、一方向圧力によりワイヤーを二次元配向させることで熱伝導率の向上を図る。SPS 条件は、圧力、昇温時間、保持温度、保持時間をパラメータとして最適化を図った。焼結体を 800 °C で 180 分熱処理した後、当該材料の密度をアルキメデス法、熱伝導率をレーザーフラッシュ法、機械的特性を引張試験、耐照射性をシミュレーション照射実験により調査し、DEMO 炉用構造材料として応用可能な新規複合材料の創製を試みた。

F82H 粉体と W 及び Cu ワイヤーを混合し、SPS にて、圧力 40MPa, 昇温時間 100 °C/分, 保持温度 850 °C, 保持時間 120 分で焼結した結果、測定した熱拡散率から求めた熱伝導率は 2.8 倍程度上昇し、F82H-5W-15Cu で 88.6 W/m/K、密度は 0.986 に留まった。続いて、F82H-5W-15Cu の引張特性を調査した結果、引張強度・伸びともに F82H 母材の 1/10 程度であり、破断面観察からワイ

ワイヤ-母相界面の脆弱性が認められた。SEM 及び TEM による組織観察から、ワイヤと母相との間に拡散層および W 系金属間化合物の形成 (Fe<sub>7</sub>W<sub>6</sub>, Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C, Fe<sub>2</sub>W) が確認され、これらが引張特性の劣化に起因していると結論付けた。焼結体の密度上昇と引張特性向上を見込み、昇温時間 50 °C/分、保持温度 1000 °C で焼結した結果、F82H-20Cu の密度は 0.998、熱伝導率は 3.3 倍 (103.0 W/m/K) まで向上した。SEM による組織観察により、W と F82H 母相界面における金属間化合物の残存が確認され、これが熱伝導率及び引張強度の向上を妨げる要因であることが分かった。一方、F82H-20Cu においては Cu と F82H 母相との間に第 2 相の形成は認められず、加えて、高温焼結により一時的に溶解した Cu が F82H 母相との隙間に侵入し、界面強度の担保に寄与すると推察された。実際、F82H-20Cu に対して引張試験を行った結果、引張強度及び伸びはそれぞれ 556.6 MPa 及び 0.177 と大幅に改善し、F82H 母相と遜色ない引張特性を示した。以上より、SPS 条件及び複合材料組成の最適化が達成され、目的の高熱伝導性を有する F82H 基複合材料を創製した。

作製した複合材料の耐照射性評価については、中性子照射環境及び核融合炉環境における照射損傷 (カスケード損傷) を模擬するため、重イオン (Fe), He イオン及び H イオンを用いた Triple 照射実験を行い、照射後の照射損傷組織を精査した。F82H, W, Cu それぞれにおける照射損傷挙動に加えて、中性子照射によるワイヤと母相の界面強度劣化が耐照射性評価のポイントとなる。核融合炉ダイバータ想定温度 500 °C、想定核変換ガス原子濃度 (15 appmHe/dpa, 50 appmH/dpa) で 20dpa まで照射した結果、F82H-xW-yCu 中の W ワイヤ近傍で He バブル及びキャビティの形成と高密度の転位ループが観察され、ナノインデントによる照射後試料の硬度測定及び Nix-Gao プロットによる解析から、明確な照射硬化が確認された。一方、F82H-20Cu では、Cu ワイヤと F82H 母相との界面近傍における特筆すべき照射損傷は認められず、照射後試料における照射硬化も確認されなかった。

以上より、本研究では F82H-xW-yCu 複合材料の開発に着手し、従来鋼より 3.3 倍高い熱伝導性、従来鋼と遜色ない優れた機械的特性、核融合条件における耐照射特性を有する新規構造材料の創製に成功した。特に、F82H-20Cu 複合材料は、核融合炉ダイバータ用材料として応用が期待される。これらの研究結果は、過酷な核融合条件における熱交換器用材料開発について新たな知見を与えるものであり、材料工学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。