

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2020

課題番号：16K06945

研究課題名（和文）核融合炉中性子環境における温度・ひずみセンサーの特性変化、使用限界予測技術の確立

研究課題名（英文）Study on techniques for examination of property changes and application limits of temperature and strain sensors in fusion reactors

研究代表者

田中 照也（Tanaka, Teruya）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：30353444

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：熱電対等の金属センサー材料を核融合炉内の中性子照射環境下で使用した際に想定される核変換に伴う組成変化の影響を調べるための技術として、組成を変化させた溶解インゴット試料の製作が有効であることを確かめ、また、炉内で長期使用した際に想定されるK及びN熱電対の温度測定精度の低下割合を評価した。はじき出し照射損傷効果の影響を調べる技術としては、スパッタリング成膜によるイオンビーム照射用薄膜試料の製作が、高温・重照射条件においても適用できる有効な技術であることを確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究対象とした2つの中性子環境下材料状態変化の模擬手法は、核融合発電炉以外の中性子発生システムも含めて様々なセンサー材料の特性変化を評価するための技術として適用できる。また、核融合炉を対象にこれら手法を用いて今後蓄積される特性変化のデータについても、核変換量やはじき出し損傷量を共通パラメーターとして、エネルギーや強度の異なる中性子発生環境における特性変化予測につなげることができる。

研究成果の概要（英文）：It has been confirmed that fabrication of ingot specimens with altered compositions is applicable for examination of property changes of metal sensor materials, e.g., thermocouples, due to nuclear transmutation in fusion reactors. The response degradation of K and N-type thermocouples has also been evaluated by altering the compositions based on transmutation calculations assuming long-term usage in a fusion blanket region. Regarding techniques to examine the effects of irradiation damages on sensor responses in ion beam irradiations, thin film specimens fabricated with a sputtering method is applicable. Responses of thin film specimens of K-type thermocouples can be examined at high temperatures and high-fluence ion beam irradiation conditions.

研究分野：核融合炉工学

キーワード：核融合炉 熱電対 センサー 核変換 照射損傷

1. 研究開始当初の背景

高温の液体溶融塩や液体金属をトリチウム燃料増殖材、兼、冷却材（以下、増殖/冷却材）として循環させる核融合発電ブランケットシステムでは、定常運転中に加えて運転開始時や異常事象時にも、これら高温液体の温度を常に融点以上に保ち、固化させずに適切に流動させることが必須となる。そのため、熱電対温度センサーを核融合炉内の各所に設置して、増殖/冷却材配管の温度分布管理を行うことが必要になると考えられる。原子炉の中性子環境下においては、照射中性子フルエンス $2.5 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ までの使用においてクロメル・アルメル熱電対の応答に顕著な変化がないことなどが報告されている^[1]。しかし、核融合炉においては炉心プラズマに面したブランケット表面における中性子フルエンスが、ブランケットの想定寿命である約 7 年の間に $\sim 1.8 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ に達する。この核分裂炉と比較しても格段に過酷な核融合炉環境に置かれた際の熱電対の応答について、核変換及び照射損傷の影響を調べ、適用限界を明らかにしておく必要がある。

2. 研究の目的

ゼーバック効果を利用する熱電対温度センサーや電気抵抗値の変化から材料の伸びを計測するひずみセンサー等、金属センサー材料の核融合中性子環境下における特性変化を調べ、使用限界を明らかにしていくために必要となる研究手法の確立を目指す。中性子照射下での核変換に伴う材料組成変化の影響については、組成変化を模擬した成分調整溶解試料の製作技術と評価手法の確立を、また、中性子照射損傷の影響については、イオンビーム照射実験用の薄膜センサー試料の製作技術と評価手法の確立を目指す。また、並行して、金属センサー材料の組成変化に伴う温度計測特性変化のメカニズム解明や特性変化を予測する手法として、電子状態の理論計算の適用可能性について調べる。

3. 研究の方法

3.1: 核変換の影響評価手法^[2]

最初に図 1 に示すヘリカル型核融合発電炉の発電ブランケット周辺における中性子スペクトルを中性子輸送計算コード MCNP により算出した^[3]。この中性子スペクトルを核変換計算コード FISPACT-2005 に入力することで、炉内で最も厳しい中性子照射環境に置かれる発電ブランケット第一壁や放射線遮蔽体の前面（ブランケット背面）における K 及び N 熱電対材料の組成変化を算出した。この組成を模擬するために、市販の熱電対線材に金属微粉末を混合し、アルミナるつぽを用いて 1600°C で溶解させることで、組成調整を施した小型インゴットを製作した。インゴットを薄く圧延した後に切断することで、核変換を模擬した熱電対センサーを製作し、大気中において室温～800°C までの温度範囲で温度測定値を取得した。市販熱電対線材の温度測定値と比較することで、核変換に伴う温度測定値のずれの大きさを評価した。

3.2: 照射損傷の影響評価手法

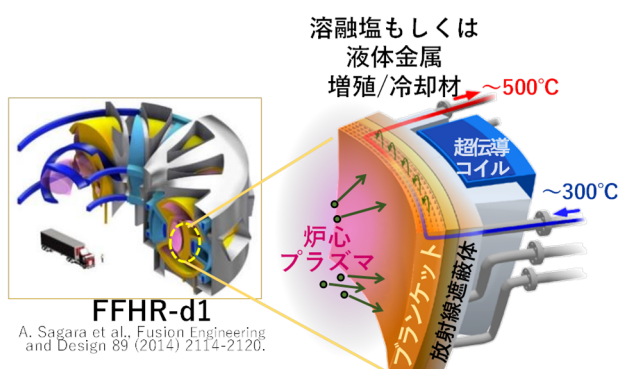


図 1. ヘリカル型核融合発電炉 FFHR-d1 における発電ブランケットと放射線遮蔽体の配置

中性子照射環境下で材料中に生じるはじき出し損傷の効果をイオンビーム照射実験により模擬するため、アルミナ基板上へ熱電対材料をスパッタリング成膜し、薄膜センサー試料の製作を行った。スパッタリングに用いる円形ターゲット材は、市販の K 熱電対線材を圧延して得られる細い板材を多数スポット溶接で接続することにより製作した。薄膜のアルミナ基板上への密着性、予備的なイオンビーム照射を実施しての照射下健全性、熱処理によるセンサーと

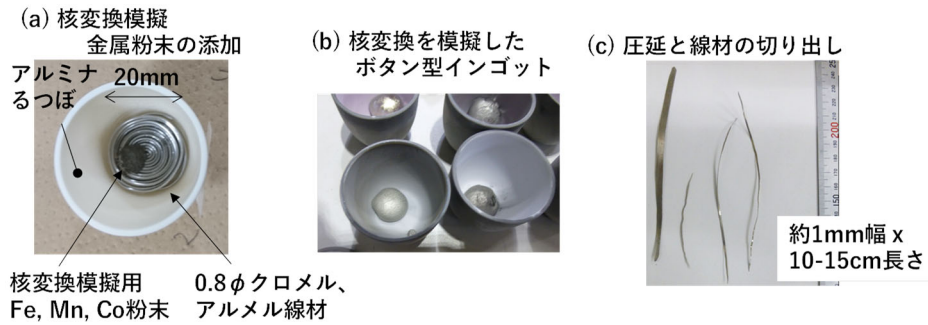


図 2. 核変換に伴う組成変化を模擬した熱電対線材の製作

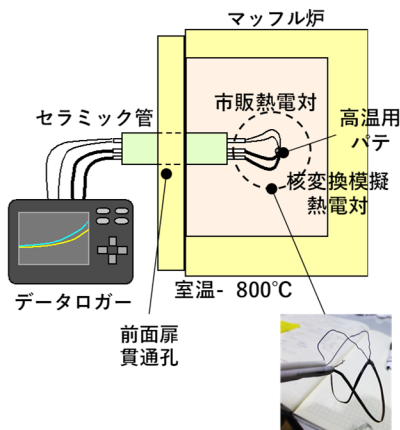


図 3. 核変換を模擬した熱電対線材の温度計測特性評価の概略図^[2]

しての応答の改善について調べた。

3.3 : 熱電対材料の電子状態計算

K 熱電対のクロメルおよびアルメルの合金組成に対し、ともに核変換によりニッケルが鉄へ変化した場合のフェルミ準位近傍における状態密度分布の定性的な変化を調べるために、第一原理計算を用いて電子状態の計算を行った。クロメルおよびアルメルの主成分であるニッケルをベースにしてそれぞれ合金成分を含んだスーパーセルを構築し、平面波基底擬ポテンシャル法により、最適化した構造に対して電子状態密度を求めた。セル中のニッケルの一部を鉄で置換した場合について同様の計算を行い、電子状態密度の比較を行った。また、クラスターモデルを用いた分子軌

道計算からも電子状態密度を求めた。すべての計算においてスピン分極を考慮した計算を行い、電子状態密度は up, down のスピンの状態密度の和で評価した。

4. 研究成果

4.1 : 核変換の効果検証^[2]

核変換を模擬した組成を持つ K 及び N 熱電対材料の製作の様子を図 2 に示す。最も核変換が著しいブランケット第一壁（前面）において、ブランケット想定寿命である 7 年間使用した後の主な組成変化については、クロメルでは Ni が 89% から 86% に減少し、Fe が 1% から 3.4% へ増加、新たに Co が 0.4% 生じると計算される。アルメルでは、Ni が 94% から 91% に減少し、Fe は 0.5% から 3.2% へ増加、新たに Co が 0.4% 生じる。ナイクロシルでは Ni が 84% から 81% へ減少し、新たに Fe が 2.3%、Co が 0.4% 生じ、ナシルにおいては Ni が 96% から 92% へ減少し、新たに Fe が 2.6%、Co が 0.4% 生じる。これらの組成変化については、Fe、Co 粉末に加えて、さらに微量の変化を示す Mn、V、Cu の粉末を市販の線材に添加し、アルミナるつぼ中において 1600°C で溶解させることでボタン型の小型インゴットを得た。得られたインゴットを圧延し、切断することで幅 1mm の核変換模擬熱電対線材を製作した。同様に、ブランケット第一壁において 3.5 年 (K 熱電対)、4.6 年 (N 熱電対)、放射線遮蔽体の前面（ブランケットの背面）において 40 年使用した際に想定される核変換を模擬した熱電対線材の製作も行った。核変換を模擬した熱電対線材の温度計測特性については、図 3 に示すように、マッフル炉内の大気中で室温から 800°C の範囲で温度測定を行い、市販熱電対線材の応答と比較することで評価した。

図 4 に核変換を模擬した K 及び N 熱電対の温度計測特性の評価結果を示す。両熱電対ともに、核変換による組成変化割合が大きくなるほど、市販熱電の応答との差も大きくなっている。ブランケット第一壁における 7 年間の使用を想定して製作した核変換模擬熱電対線材は、冷却材の想定最高温度に近い 500°C において、K 熱電対では約 18%、また、N 熱電対では約 24%、市販線材よりも低い温度計測値を示すことが分かった。これら核変換模擬熱電対では、市販熱電対線材

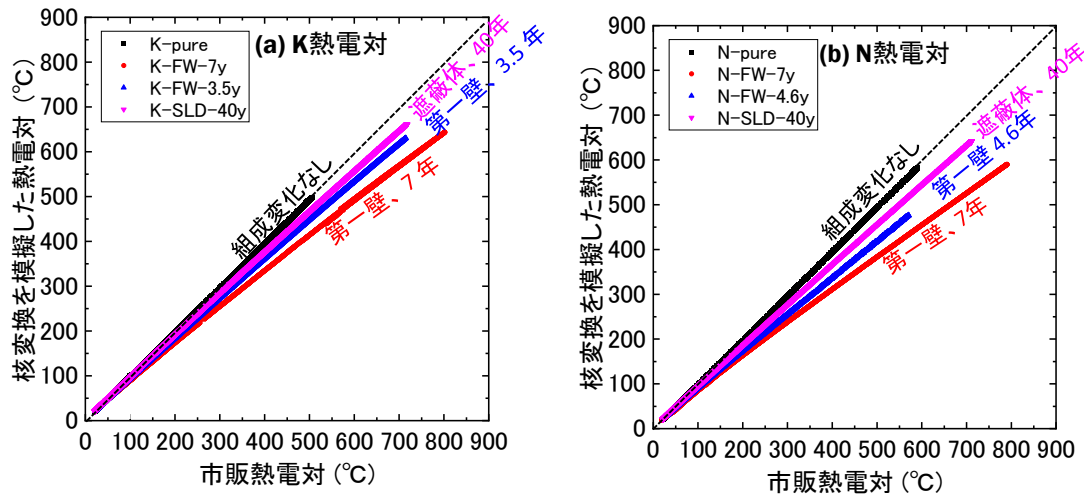


図 4. 核変換を模擬した熱電対線材と市販熱電対線材の温度計測値の違い^[2]

に対して Fe や Co 等の微粉末を約 3% (重量比) 添加している。ブランケット第一壁で 3.5 年、4.6 年、また、遮蔽体前面で 40 年使用した際の組成変化を模擬した熱電対線材についても 500°C における温度計測値を市販線材と比較したところ、核変換を模擬するために添加する金属粉末の重量割合にほぼ比例して計測値が低下することが分かった。

熱電対の温度測定値は、線材中の温度変化が生じる部分における熱起電力により得られる。核変換に伴う組成変化の影響を抑制するために、炉外から導入した熱電対を可能な限り増殖/冷却材配管に接触させる形で測定対象まで敷設することなどを議論した^[2]。

4.2: 照射損傷の影響評価手法^[4]

圧延した K 熱電対線材をスポット溶接で接続して製作したスパッタリング用ターゲット、マグネトロン・スパッタリングによりアルミナ基板上に製作した薄膜 K 熱電対センサー試料、予備的なイオンビーム照射試験後の試料を図 5 に示す。はじき出し損傷を与えるためのイオンビーム照射には、250keV、D⁺ビームを用いることとし、ビーム粒子の飛程より薄くするためにクロメル、アルメルともに約 200nm の膜厚で薄膜センサー製作を行った。

薄膜 K 熱電対層はアルミナ基板に強固に付着しており、真空中における 700°C の加熱においても剥離等は見られず、高温に対する温度測定特性の評価が行えることを確かめた。大気中で昇温した際には、センサー部分の電気抵抗値の変化から、約 200nm 厚の薄膜熱電対層全体が酸化してしまうと考えられ、真空中での高温試験が必要となる。また、予備的に D⁺ビームを 1dpa (displacement per atom) まで照射を行ったが、イオンビーム照射実験においても剥離等の顕著な変化は生じずに使用できることを確認した。一方、薄膜熱電対試料の温度計測精度については、スパッタされた薄膜層の結晶性に大きく影響される。スパッタ後に熱処理を施さない場合にはセンサー測定部を約 90°C に加熱した際に温度測定値は 60°C と非常に低い値となった。真空中での高温熱処理により、同じく約 85°C の加熱に対しての温度測定値は 80°C と大幅に改善した。この熱処理後の薄膜試料を使用することで、温度測定特性に影響が表れ始めるはじき出し損傷量の評価等を進めることができるが、より高精度のデータを取得するために熱処理条件の最適化を継続する。

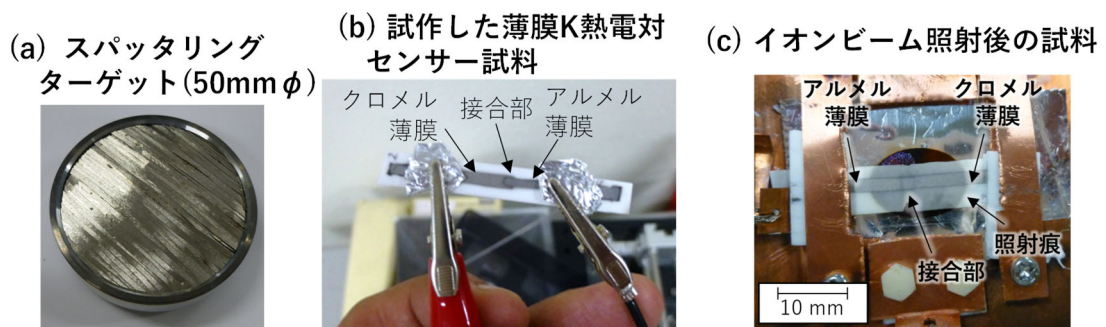


図 5. 照射損傷効果を調べるためのイオンビーム実験用薄膜試料^[3]

4.3: 熱電対材料の電子状態計算

クロメルを模擬した構造モデルでは、フェルミ準位近傍での電子状態密度のエネルギーに対する勾配がニッケルの場合に対して符号が逆転しておりゼーベック係数の符号が異なる傾向を示すことがわかり、また、アルメルを模擬した構造モデルの場合にはニッケルの場合に比べて勾配が小さくなる結果となり、ニッケルのゼーベック係数よりわずかに小さいことを示唆していると考えた。これらに対して、それぞれ一部のニッケルを鉄で置換したモデルでは、クロメルを模擬したモデルでは電子状態密度のエネルギーに対する勾配がわずかに大きくなり、一方でアルメルを模擬したモデルでは勾配が小さくなる傾向を示した (図 6)。ただし、ここでは、スーパーセルに配置した合金元素と鉄の原子位置がランダムであるうちの特定の場合のみを調べた結果であることと、スーパーセルサイズや構造の周期性の影響の考慮なども必要と考えられるため、異なる原子配置、セルサイズ、セル形状での検討が必要と考えている。クラスターモデルを用いた分子軌道計算による電子状態密度でも同様の傾向を示す結果が得られた。

まとめ

Ni を主成分とする K 及び N 熱電対について、組成を変化させた線材を溶解により製作することで、核融合発電炉での使用における核変換の影響を模擬し、その温度測定における特性を評価することができた。得られたデータは、核融合炉のブランケット設計時等における温度管理への熱電対適用の可否や適用限界の検討に直接利用できる。また、核変換量をパラメータとして、核融合炉以外の中性子発生環境における特性変化予測にもつなげられると考えられる。

K 熱電対については、スパッタリング成膜法により、アルミナ基板上にイオンビーム粒子の飛程よりも薄い約 200nm 厚の薄膜温度センサー試料を製作した。真空中での 700°C までの加熱や 1dpa までのイオンビーム照射下においても剥離等は見られず、より高精度のデータを取得する

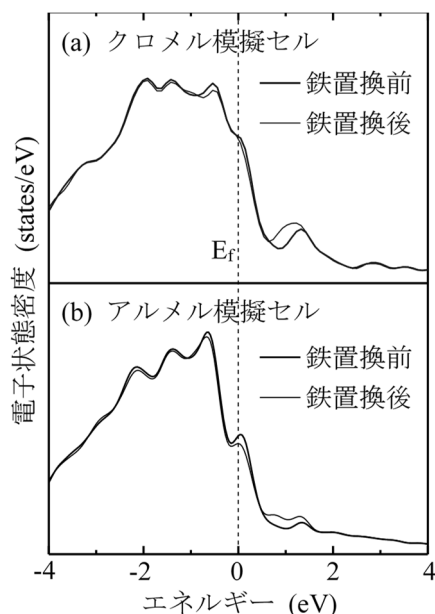


図 6. 鉄置換前後の電子状態密度 (up,down スピンの和)
(a) クロメル模擬セル, (b)アルメル模擬セル (フェルミ準位, $E_f = 0$ eV としている)

ために熱処理条件の最適化の検討が必要ではあるものの、イオンビーム照射実験によるはじき出し損傷効果の模擬とそれによるセンサー応答特性の変化を調べるために有効な技術となる。

以上の本研究遂行で対象とした 2 つの試料製作技術及び特性評価手法は、同じく Ni を主成分とするニクロム V をセンサー材料に用いるひずみセンサー等の核融合炉環境中における特性変化の評価に適用できると考えられる。

実験結果のメカニズム解明及び特性変化の予測への理論計算の適用可能性を調べるために電子状態計算を立ち上げ、引き続き、計算条件の改良と実験との比較により定量的な比較を目指すとともに、本研究分野の学術的な展開につなげる。

- [1] 露崎典平 他、日本原子力学会誌 29(1987)864-869.
- [2] T. Tanaka et al., Fusion Science and Technology 75(2019)1076-1083.
- [3] T. Tanaka et al., presented at 14th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, 22-27 September 2019, Budapest.
- [4] 田中照也 他、「クロメル、アルメル材料の電気特性に対する核変換及び照射損傷の影響評価」日本原子力学会、2018 年秋の大会、2018 年 9 月 5 日-9 月 7 日、岡山大学、2N16.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tanaka Teruya, Noto Hiroyuki, Sato Fuminobu, Hishinuma Yoshimitsu, Sakaue Hiroyuki A., Yoshino Masahito	4. 巻 75
2. 論文標題 Examination of Transmutation Effect on Responses of K-Type and N-Type Thermocouples at Fusion Blanket	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1076 ~ 1083
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/15361055.2019.1658039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Teruya Tanaka, Junichi Miyazawa, Masatoshi Kondo, Juro Yagi, Takuya Goto, Akio Sagara, Hitoshi Tamura, Nagato Yanagi and the FFHR Design Group
2. 発表標題 Applicability Study of Blanket Systems with Liquid Tritium Breeder/Coolant and Liquid Neutron Multiplier in Helical Reactor FFHR designs
3. 学会等名 14th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中照也、能登裕之、佐藤文信、菱沼良光、坂上裕之、吉野正人
2. 発表標題 クロメル、アルメル材料の電気特性に対する核変換及び照射損傷の影響評価
3. 学会等名 日本原子力学会 2018年秋の大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Teruya Tanaka, Hiroyuki Noto, Fuminobu Sato, Yoshimitsu Hishinuma, Hiroyuki A. Sakaue, Masahito Yoshino
2. 発表標題 Examination of transmutation effect on responses of k-type and n-type thermocouples at fusion blanket
3. 学会等名 The Technology of Fusion Energy (TOFE 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tanaka, H. A. Sakaue, Y. Hishinuma, F. Sato, M. Yoshino
2. 発表標題 Fabrication of thin-layered sensor samples for examination of property changes under ion beam irradiation
3. 学会等名 The 18th International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-18) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	菱沼 良光 (Hishinuma Yoshimitsu) (00322529)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	
研究分担者	吉野 正人 (Yoshino Masahito) (10397466)	名古屋大学・工学研究科・助教 (13901)	
研究分担者	坂上 裕之 (Sakaue Hiroyuki) (40250112)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	
研究分担者	佐藤 文信 (Sato Fuminobu) (40332746)	大阪大学・工学研究科・教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------