

未来社会創造事業（探索加速型）
「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域
年次報告書（探索研究）

令和 3 年度採択研究開発代表者

[研究開発代表者名:竹山 雅夫]

[東京科学大学 物質理工学院・特任教授]

[研究開発課題名:ゼロカーボン社会に向けた
発電プラント用耐熱金属材料の基盤技術]

実施期間：令和 6 年 4 月 1 日～令和 7 年 3 月 31 日

§1. 研究開発実施体制

(1)「組織設計・強度」グループ(東工大)

① 研究開発代表者： 竹山雅夫 (東京工業大学物質理工学院, 教授)

② 研究項目：

1. 状態図データベースの構築
 - ・ Ni 基固溶強化型合金 (Ni-Cr-W-Mo 系 (ガスタービン))
 - ・ Fe 基超耐熱鋼 (Fe-Ni-Cr-Nb 多元系 (蒸気タービン))
2. 構造解析・組織設計
 - ・ Ni 基固溶強化型合金
 - ・ Fe 基超耐熱鋼
3. 機械的・物理的特性評価・強化機構
 - ・ Ni 基固溶強化型合金 (ガスタービン)
 - ・ Fe 基超耐熱鋼 (蒸気タービン)

(2)「組織設計・強度」グループ(島根大, 東工大)

① 主たる共同研究者： 若林英輝 (島根大学学術研究院, 助教)

② 研究項目

1. クリープ特性評価・変形組織解析
 - ・ Ni 基固溶強化型合金
2. クリープ寿命評価・強化機構の解明
 - ・ Ni 基固溶強化型合金

(3)「耐環境特性」グループ(東工大)

① 主たる共同研究者： 多田英司 (東京工業大学物質理工学院, 教授)

② 研究項目

1. 腐食特性評価と解明
 - ・ 湿性 CO₂ 雰囲気における鉄鋼材料の腐食劣化評価
 - ・ 超臨界 CO₂ 環境における鉄鋼材料の腐食劣化機構の解明
2. 高温酸化挙動の評価と解明
 - ・ 酸化速度評価
 - ・ 酸化機構解明

§2. 研究開発成果の概要

2050 年のカーボンニュートラルに向けて、電力の安定供給, CO₂ 削減, 燃料の自前生成の3つを同時に可能にするのが本研究課題で取り上げる CO₂ 無排出型の超高効率火力発電「酸素水素燃焼コンバインド発電」であり, その実現の鍵を握るのが材料である. 研究は 2 グループに分けて

実施し、昨年度にステージゲートをクリアした。以下に 2024 年度の成果を記す：

組織設計・強度 G: ガスタービン用に提案し、 a_2 相の粒界析出強化により優れたクリープ強度有する Ni-Cr-W 系合金は、(1)粒界のみに a_2 相を析出させる W の過飽和の制御、(2)W の過飽和度に及ぼす微量合金元素の定量評価、(3)複数の粒界析出相による組織制御。によりさらなる高強度化が可能であることを提案し、これらの知見から実験・計算状態図に基づき新たな Ni-Cr-W-M 系の合金設計を行った。蒸気タービン用材料として開発した Laves 相強化型オーステナイト系耐熱鋼(ALS)では、優れたクリープ強度(700°C/10 万 h 許容応力 100MPa 以上)を維持した上で室温での強度と延性をもたらす組織制御法を見出し、IN718 を凌駕する鋼であること、また、この鋼は固相拡散により溶接可能であることを予備実験により確認した。

耐環境特性 G: 腐食特性の評価と解明(研究項目 1)では、酸素/水素専焼ガスタービン実現までの混焼段階において排出される CO_2 を利用した発電を念頭に、湿性 CO_2 環境下における炭素鋼の腐食挙動を体系的に調べ、腐食速度は CO_2 環境下で高くなるが、温度上昇に伴い FeCO_3 皮膜の形成促進により減少することを見出した。また、超臨界 CO_2 環境下における腐食速度評価装置を独自に開発し、予備実験を実施した。高温酸化挙動の評価と解明(研究項目2)では、Ni-Cr-W 系合金の 1000°Cでの大気酸化挙動に及ぼす Mn 添加の影響を調べ、Mn 添加は、Mn-Cr スピネル層の生成により水蒸気酸化時における Cr_2O_3 皮膜の揮発の抑制に有効であることを示した。

【代表的な原著論文情報】

1. A. Latif, M. Ueda, M. Takeyama, "Oxidation Behavior of a Novel Nickel-Based Alloy in Air and Steam at 1273 K for the Oxygen-Hydrogen Combustion Chamber", *High Temperature Corrosion of Materials*, **101**, 203-224(2024). DOI:<https://doi.org/10.1007/s11085-024-10303-5>
2. M. Takeyama, Proceedings from the Tenth International Conference Advances in Materials, Manufacturing and Repair for Power Plants, ASM International (2024), p.1033-1043, DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.am-epri-2024p1033>
3. T. Yanagiya, M. Yoshida, K. Hashi, R. Nagashima, M. Takeyama, Proceedings from the Tenth International Conference Advances in Materials, Manufacturing and Repair for Power Plants, ASM International (2024), p.1257-1268. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.am-epri-2024p1257>
4. R. Nagashima, M. Takeyama, Experimental phase diagram study of the Ni-rich part of the Ni-Cr-Mo ternary system", *Calphad*, **88** (2025) 102802. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2025.102802>