

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]

[所属:東京工業大学 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 5 年 4 月 1 日～令和 6 年 3 月 31 日

§1. 研究開発実施体制

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。研究は以下の2つのグループに分けて実施する。「**組織設計・強度 G**」は、ガスタービンと蒸気タービン部材に適用可能な新たな耐熱材料開発に資する状態図、クリープ強化機構および組織設計に関する基礎研究を東工大と島根大学にて共同で行う。「**耐環境特性 G**」は、本発電システムの実現まで、現状のLNGを燃料とするコンバインドサイクル発電におけるCCUSを念頭に、腐食については超臨界CO₂サイクル発電に向けた湿性CO₂環境下における材料の劣化評価と機構の解明、また、酸化については高温(800℃～1000℃)での水蒸気環境下での特性評価と機構解明を行う。なお、本研究は、本格研究での事業化を視野に、素材、重工、電力各企業との協力を得ながら、企業側の意見を取り入れて実施する：

(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，特任教授）

② 研究項目：

1. 状態図データベース(DB)の構築
 - ・ ガスタービン用 Ni 基固溶強化型合金 (Ni-Cr-W-Mo 系)
 - ・ 蒸気タービン Fe 基超耐熱鋼 (Fe-Ni-Cr-Nb 系)
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 ・ Fe 基超耐熱鋼

(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
2. クリープ寿命評価・強化機構の解明

(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
 - ・ 腐食機構の解明 ・ 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。

「組織設計・強度 G」において、ガスタービン用に提案した固溶強化型 Ni-Cr-W 三元系モデル合金は 1000°C/10 万 h クリープ破断強度 10MPa 以上、Hastelloy X の 3 倍以上の強度目標を達成し、優れたクリープ強度は α 2-W 相の粒界析出強化に起因することを実証した。また、Ni-Cr-Mo-W 四元系の熱力学 DB を精査し、 α 2 相と P 相が粒界析出するモデル合金の設計を行なった。蒸気タービン用材料では、Laves 相強化型オーステナイト系耐熱鋼(ALS)が 700°C/10 万 h の許容応力 100MPa 以上となること、また、粒径と粒界被覆率の制御により、室温での強度・延性ともに IN718 相当となり、ALS が IN718 の代替材料として十分な可能性を有する鋼であることを示した。

「耐環境特性 G」において、腐食研究では、電気化学測定によりアルタイムでの腐食挙動の評価し、CO₂バブリング環境における腐食速度の増加は浸漬初期に形成する不働態皮膜(FeCO₃)の剥離(脱不働態化)に起因し、その速度は皮膜の剥離の抑制により低減でき、炭素鋼は湿性 CO₂環境においても利用できることを示した。また、超臨界 CO₂環境下での腐食速度を電気化学的に測定評価可能な実験システム(オートクレーブ装置)を完成させた。高温酸化研究では、水蒸気環境下における酸化皮膜の形成機構とその対処法について検討し、Ni-Cr-W 系合金における Cr₂O₃の連続層の形成には W が強く関与すること、また、水蒸気酸化雰囲気において皮膜が厚くなるのは、酸化初期に雰囲気中の水蒸気が合金中の酸素透過を促進して内部酸化を誘発するためであることを見出し、耐水蒸気酸化特性の向上には W とある特性の元素の複合添加が有効であると提案した。

【代表的な原著論文情報】

1. 柳屋岳彦, 吉田昌人, 橋 邦彦, 竹山雅夫, 永島涼太:学振 054 委研究報告, Vol. 1, (2023), p. 1-10.
2. 竹山雅夫:学振 054 委研究報告, Vol. 2, 1 (2024), p. 235-243.