

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(探索研究期間)

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]

[国立大学法人 東京工業大学物質理工学院・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4年4月1日～令和5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°C~1000°C)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

組織設計・強度 G においては、ガスタービン用 Ni-Cr-Mo-W 四元系状態図の構築から、Mo と W 濃度の大きく異なる P 相 (oP56: TCP 相) と α_2 -W 相 (bcc) が独立して粒界に析出し、二相による粒界析出強化を機能させる組織設計が可能であることを見出した。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) の更なる高強度化を図るべく、相平衡に及ぼす V および Ta の効果を検討し、基本系への両元素を適量添加は ALS のさらなる高強度化に有効であることを見出した。また、ALS の室温での3点曲げおよびシャルピー衝撃試験を行い、その延性・靱性は、粒内に GCP 相のみを析出させた ALS 材では IN718 と同等以上となるが、粒界被覆率の増加にともない低下する。一方、800°Cでのクリープ破断強度は IN718 のよりも高く、昨年度の知見と併せて俯瞰すると、ALS は粒界被覆率と粒径を適切に制御すれば、IN718 よりも耐用温度の高い代替材料となり得ることを示した。また、ガスタービン用固溶強化型 Ni-Cr-W 系モデル合金の 1000°C/104h を越えるクリープデータを取得し、本合金は α_2 相の粒界析出強化により、既存合金 HX や N 263 よりもはるかに優れたクリープ強度を示すことを示した。

耐環境特性 G において、腐食研究では、湿性 CO₂ 雰囲気における炭素鋼の電気化学測定、腐食速度評価装置を構築し、30~80°C, 0.1 M NaHCO₃ 中、炭素鋼の腐食速度に及ぼす CO₂ バブリングの効果を評価した。バブリング有りではいずれの温度においても全面腐食となり、60°C の腐食重量減少量 Δw は板厚減少量に換算すると約 480 $\mu\text{m year}^{-1}$ に相当すること、一方、バブリング無しではいずれの温度においても局部腐食が観察され、バブリング有りと比較して腐食速度は極めて低いことを見出した。また、超臨界 CO₂ 環境において電気化学測定ができるように導入したオートクレープ試験装置に適合する腐食試験用の治具の設計等装置開発を実施した。高温酸化研究では、21 年度から実施している大気酸化実験に加えて、アルゴンなどのキャリアガスを用いない水蒸気酸化装置を作製し、酸素水素量論燃焼環境 (100%H₂O) における開発材および比較材の高温水蒸気酸化を実施した。ガスタービン用として提案したモデル合金の大気酸化特性は HX に比べてやや劣るが水蒸気酸化雰囲気においては HX よりも安定した酸化挙動を示した。これは、Cr₂O₃ 皮膜が HX に比べて厚く、保護性を発揮したためであり、したがって、モデル合金は 1000°C 長時間使用に適している可能性が示唆された。現在、「燃焼環境に水素や酸素などの不凝縮ガスが残る雰囲気」における酸化実験に着手している。

【代表的な原著論文情報】

1. 袁 哲韜, 李 博喧, 山形遼介, 中島広豊, 小林 覚, 竹山雅夫: Vol. 64, 1 (2023), p. 29-37.
2. 中島広豊, 福田理佳子, 永島涼太, 竹山雅夫: 学振 123 委研究報告, Vol. 64, 1 (2023), p. 47-55.
3. 若林英輝, 野津直人, 阿波和希, 永島涼太, 中島広豊, 竹山雅夫: 学振 123 委研究報告, Vol. 64, 1 (2023), p. 67-73.