

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  
研究開発年次報告

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3年10月1日～令和4年3月31日

## § 1. 研究開発実施体制

本研究は、図 1-1 に示すように、組織設計・強度グループと耐環境特性グループに分けて実施する。

組織設計・強度 G は、酸素水素燃焼ガスタービンと蒸気タービン部材の開発に資する状態図、クリープ強化機構および組織設計指導原理の構築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、腐食については超臨界 CO<sub>2</sub> サイクル発電を念頭に、CO<sub>2</sub> 環境下における材料の劣化評価と機構を、また、酸化については高温(800°C~1000°C)でも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(企業との協力)を視野に、探索研究期間から素材メーカー、重工メーカー、電力会社と情報交換を行い、素材の提供等の協力を得ながら、企業側の意見を取り入れて実施するとともに、NEDO にて実施しているプロジェクトとの情報交換も行う。以下に各 G の内容を記す：

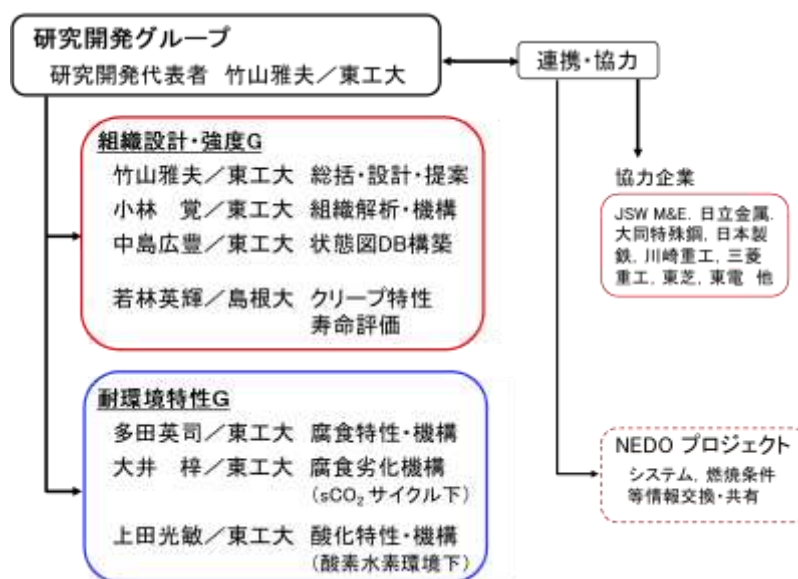


図 1-1 研究開発実施体制

### (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)**

- 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
    - ・ 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

本研究は、CO<sub>2</sub>無排出と電力の安定供給を両立する超高効率な「酸素水素燃焼発電プラント」の実現に不可欠となる耐クリープ性に優れたガスタービン部材(1000°C)および蒸気タービン(750°C)部材の開発に資する組織設計指導原理の構築とクリープ強化機構の解明を行う。また、材料の水蒸気環境下における酸化特性評価および超臨界 CO<sub>2</sub> サイクル発電における湿性 CO<sub>2</sub> 環境下で生じる腐食特性と劣化機構の解明を行う。ここで得られた基礎的知見は、実用化を見据えた本格研究の要素技術開発課題の解決に活用する。以上より、本研究は、組織設計・強度グループと耐環境特性グループに分け、互いに連携しながら進める。

組織設計・強度 G は、状態図の研究に基づいてガスタービン用の固溶強化型 Ni 基合金 (Ni-Cr-W 系) の設計を行い、協力企業にてそのモデル合金の溶解・鍛造を行った。モデル合金のベンチマークとなる Hastelloy X と Nimonic 263 また、リフェレンス合金となる SSS113MA (Ni-Cr-W 系) も企業の協力により入手し、1000°Cにおけるクリープ試験を開始した。一方、蒸気タービン側については、先行研究(ALCA)にて提案した金属間化合物強化型 Fe 基超耐熱鋼(ALS)を用いて組織形成に及ぼす合金元素(Ta, Zr)の効果を明らかにした。また、その知見に基づいて ALS の組織を意図的に制御し、Laves 相による粒界被覆がクリープ強度の向の重要な組織因子であることを検証した。また、ALS の Inconel 718 の代替材料としての可能性を探るべく、力学的・物理的特性評価試験を開始した。

耐環境特性 G において、腐食研究については、湿性 CO<sub>2</sub> 雰囲気における炭素鋼および低合金鋼の腐食反応機構を電気化学的測定により明らかにするため、超臨界 CO<sub>2</sub> 環境での腐食速度評価できる実験システムの構築を開始した。また、予備試験として、0.1 M NaHCO<sub>3</sub> 中における炭素鋼の 30~60°Cの範囲での腐食重量変化測定を実施した。一方、酸化研究については、酸素水素量論燃焼環境を模擬した水蒸気酸化実験を装置の構築を行うとともに、予備実験として、組織設計・強度 G が設計したモデル合金の比較材となる Hastelloy X, Nimonic 263, SSS113MA の 1000°Cにおける大気酸化実験を実施した。

### 【代表的な原著論文情報】

1. S. Oh, H. Nakashima, R. Yamagata, S. Kobayashi, M. Takeyama: ISIJ International, Advance Publication by J-STAGE, DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-309.
2. 三屋悠太, S. Oh, 若林英輝, 中島広豊, 竹山雅夫: 学振 123 委研究報告, Vol. 63, 1 (2022), p. 1-12.
3. 永島涼太, 中島広豊, 竹山雅夫: 学振 123 委研究報告, Vol. 63, 1 (2022), p. 65-74.