

戦略的創造研究推進事業(ALCA)

技術領域(プロジェクト名)

「低 CO₂ 排出型次世代火力発電用新規耐熱材料の開発(原田分科会)」

課題名「革新的 800℃級火力発電プラント用超耐熱鋼の設計原理」

終了報告書

研究開発期間 平成23年2月～令和2年3月

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)

○報告書要約（和文）

研究開発代表研究者：東京工業大学 物質理工学院 教授 竹山 雅夫
研究開発課題名：革新的 800℃級火力発電プラント用超耐熱鋼の設計原理

1. 研究開発の目的

本研究は、エネルギーの安定供給と CO₂ ガス排出削減の両立をさせるために現在我国で開発が行われている 700℃ 級超々臨界圧火力発電 (A-USC) の更に上をゆく 800℃ 級火力発電プラントを見据え、そのボイラー及びタービン部材に Ni 基合金ではなく、より安価な Fe をベースとした金属間化合物を強化相とする新たなオーステナイト系耐熱鋼（これを超耐熱鋼と呼ぶ）を用いてどこまで高強度化が可能かを追求し、また、その超耐熱鋼の社会実装に向けた要素技術開発を試みる世界での類のない挑戦的研究である。

2. 研究開発の概要

本研究では、東工大がこれまで提案した超耐熱鋼の発電プラントへの適用に向けた要素技術開発を産学連携で有機的に取組む。東工大は、新たなモデル鋼の提案とそのクリープ及び水蒸気酸化特性を評価し、強化機構の解明およびさらなる高強度化に向けた設計指針を構築する。一方、企業側においては、TCP 相で粒界強化した超耐熱鋼の、ボイラ用耐熱鋼適用に向けた課題抽出と対策の検討、および、実製造プロセスに適用可能な材料の選定を日鉄製鉄(株) (NSC) が行った。また、タービン側においては、三菱日立パワーシステムズ(株) (MHPS, 現三菱パワー) が、車室等の部品製造プロセス技術としてガスアトマイズ法により超耐熱鋼の粉末を作製し、HIP 材として有望な合金の開発およびそのガスタービン等高温部品の試作を行った。以下にその成果と今後の展開を記す：

成果：

東工大では、粒界析出強化と組織の安定性の観点から新たなモデル鋼を提案し、その鋼が Ni 基合金 IN263 相当のクリープ破断強度、すなわち、10⁵ h/100 MPa のクリープ耐用温度が 740℃ 以上となることを見出した。また、超耐熱鋼は IN718 の代替材料の可能性を有することを見出した。

NSC では、実機製造プロセス上不可避元素を含有させると、クリープ強度が低下することを確認した。さらに、不可避元素を含んだ上で、優れた溶接性とクリープ強度を両立するためには、粒界および粒内の析出物を適性に制御する必要があることを指摘した。

MHPS では、ガスタービン等高温部品に適用有望な HIP 材成分を決定した。開発成分で模擬 HIP 部品（ガスタービンディスク、蒸気タービンバルブ）を試作し、物性及び機械的特性は Ni 基合金よりも優れた特性を有することを見出した。

今後の展開：

粒界析出強化を利用した組織設計は、長時間クリープ破断強度の向上に有効であり、粒界析出相の安定性を考慮すれば更なる高強度が図れる。また、粒内 GCP 相の析出制御により IN718 に匹敵する超耐熱鋼の設計を試みる。また、この組織設計原理を Ni 基合金に展開する。

また、超耐熱鋼は製管可能可能であり、得られた知見を価値のあるものであり、今後新規材料を開発する際に要素として活かしていく。一方、タービン部材として開発した HIP 材については、実機適用の検討を行うとともに、他分野への展開を図る。

○Report summary (English)

Principal investigator: Tokyo Institute of Technology, Professor Masao Takeyama
 R & D title: Elemental Technology for Design and Manufacturing of Innovative
 1073 K Class Super Austenitic Heat-resistant Steels

1. Purpose of R & D

Fundamental principles of design technology as well as elemental technology for practical applications of the novel class of austenitic heat resistant steels strengthened by two intermetallic compounds of TCP (Fe_2Nb Laves) and GCP (Ni_3Nb) phases, that is what we call “*super-steels*”, applicable to the boiler and turbine components of power plants under the steam temperature of 800°C, higher than that of current A-USC project (700°C), have been examined, in order to make contributions to both the reduction of CO₂ gas and stable electric power supply in the future. This is a tremendous challenge that has ever been done.

2. Outline of R & D

This is a university/industry collaborative program. Tokyo Tech has taken responsibilities of the microstructure design principle, creep behavior and strengthening mechanisms, together with steam oxidation behavior, of the super-steels, and propose the model alloys. Industry sides, in contract, elemental technologies on fabrication/forming processing of the super-steel components have been examined using the proposed steels by Tokyo Tech, from viewpoints of practical applications in the future. For boiler components, such as tubes and pipes, Nippon Steel Co. (NSC) has identified the issues on the effects of impurity elements inevitably introduced during large-scale melting process on creep behavior and weldabilities of the super-steels, and examined the countermeasure. For turbine components, Mitsubishi-Hitachi Power Systems Co. (MHPS, currently Mitsubishi Power) has examined the applicability of powder/HIP processing to the super-steels and evaluated the performance of the trial components produced by the process. Followings are the significant achievements obtained:

Achievements:

- The modified super-steels show the 10⁵ h creep rupture strength at 800°C under 100 MPa almost equivalent to a Ni-based alloy IN263, with good steam oxidation resistance, and the temperature capability becomes more than 740°C, incredibly stronger than those of any conventional steels. The excellent strength is due to the grain boundary precipitation strengthening (GBPS)
- The inclusion of inevitable elements in practical manufacturing process, the creep strength of the proposed steel decreased. To achieve both excellent weldability and creep strength, microstructure/morphology control of the grain-boundary TCP and grain-interior GCP precipitates is required to make them more stable.
- The super-steels produced by Powder/HIP process are confirmed to be more suitable for high temperature parts such as gas turbine than Ni based alloys, and the appropriate compositions were determined. The trial components (gas turbine disk and steam turbine valve) by the process were successfully produced and exhibit excellent mechanical and physical properties.

Future developments:

- Novel super-steels are further possible to increase the temperature capability of the creep strength through microstructure control. In addition, the steels are found to be of potential to replace IN 718, most commonly used Ni-based alloys. Thus, we are currently extending the knowledge obtained in this study to the development of novel Ni-based alloys.
- The practically manufactured model super-steels can be fabricated to tubes, and the weldability and creep strength are currently undershot the target. However, the results and findings obtained during the project were of great value for development of new materials.
- The powder/HIP process for super-steels opens further possibilities to develop the practical products and other applications, and this is currently in progress.