

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	新たなFe-Cr-Ni-Nbオーステナイト系耐熱鋼の高温におけるFe ₂ Nb(TCP)及びNi ₃ Nb(GCP)相の析出と形態に及ぼす添加遷移金属元素の役割
Title(English)	Role of Additional Transition Element in the Precipitation and Morphology of Fe ₂ Nb(TCP) and Ni ₃ Nb(GCP) Phases in Novel Fe-Cr-Ni-Nb Austenitic Heat-resistant Steels at Elevated Temperatures
著者(和文)	LIHongmei
Author(English)	Hongmei Li
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10439号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:竹山 雅夫,小林 覚,史 蹟,上田 光敏,林 重成
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10439号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第		号	学位申請者氏名	李 鴻美	
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	竹山雅夫	教授	審査員	上田 光敏	准教授
	審査員	小林 寛	講師		林 重成	准教授
		史 蹟	教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、「Role of Additional Transition Element in the Precipitation and Morphology of Fe₂Nb (TCP) and Ni₃Nb (GCP) Phases in Novel Fe-Cr-Ni-Nb Austenitic Heat-resistant Steels at Elevated Temperatures」と題し、8章から構成されている。

第1章「General Introduction」では、低炭素化社会の実現とエネルギーの安定供給を両立させるには高効率次世代火力発電の要素技術開発が喫緊の課題であり、蒸気温度 1073 K に耐えうる材料研究が進行していること、中でも Ni 基合金に匹敵するクリープ強度を示すオーステナイト系耐熱鋼 Fe-20Cr-35Ni-2.5Nb (at.%) が注目され、その優れた強度が Fe₂Nb-ε Laves 相 (TCP 相) による粒界析出強化に起因することを述べている。しかし、さらなる高強度化には、粒界に析出する TCP 相と粒内に析出する Ni₃Nb-δ 相 (GCP 相) を独立に制御して粒界被覆率 ρ を向上させる組織設計指導原理の構築が重要であること、また、これまでの先行研究から独立制御には第4族および第6族の遷移金属元素 M の添加が有望であることを指摘し、本研究の意義、目的および構成について述べている。

第2章「Effect of transition element (M: Ti, Mo, W) addition on the supersaturation for the precipitation of the TCP and GCP phases at 1073 K」では、Fe-20Cr-35Ni-2.5Nb 鋼 (基本鋼) に M 元素を最大 3 at.% 添加した鋼を準備し、各鋼の 1073 K/3600 h 時効後の組織を用いて TCP 相の ρ と粒界析出のための過飽和度を相平衡の観点から評価・解析した。その結果、Ti は TCP 相には固溶せず粒内 GCP 相の体積率を増大させ、 ρ の増加には効果がないこと、一方、Mo と W は 2 at.% の添加により ρ を基本鋼の 60 % から 90 % まで増加させる効果を有すること、また、W は GCP 相には全く固溶しないことを明らかにしている。これらの知見および各相の組成から粒界 TCP 相の析出に対する過飽和度を算出し、W は TCP 相の粒界析出のための過飽和度が少ないにもかかわらず ρ を増加させる効果が大きく、 ρ の増加に最も有効な元素であると結論づけている。

第3章「Effect of Ti addition on the precipitation kinetics of the TCP and GCP phases in Fe-20Cr-35Ni-2.5Nb at elevated temperatures」では、第2章で求めた過飽和度に基づいて、TCP 相及び GCP 相の析出に及ぼす Ti の効果を調べ、TTP 図を構築している。基本鋼では時効に伴いまず TCP 相が粒界に核生成し、その後粒内に析出する。その後、粒内に準安定な GCP 相 (Ni₃Nb-γ" 相) が析出し、それが安定な GCP 相 (δ 相) へと変態する。これに Ti を添加すると、まず粒界に γ" 相が核生成し、粒界 TCP 相の核生成は遅滞する。また、Ti の添加量が増加すると粒界および粒内への γ" 相の析出が著しく促進され、その γ" 相が不連続析出反応によって安定な δ 相へと変態することを見いだしている。これらの結果から、Ti 添加により ρ が増大しないのは、GCP 相の析出により TCP 相の粒界析出のための過飽和度が減少することに起因すると述べている。

第4章「Discontinuous precipitation of the GCP Ni₃Nb-δ phase in Fe-20Cr-35Ni-2.5Nb-2Ti at 1073 K」では、第3章において認められた GCP 相の不連続析出に着目し、その組織形成について調べている。その結果、粒界移動を伴う不連続析出反応により生成した GCP 相はそのセル内にて微細なラメラ組織を呈すること、さらに時効すると不連続粗大化反応により粗大なラメラ組織へと変化し、そのラメラ界面を核生成サイトとして TCP 相が形成されることを見いだしている。また、これらの一連の反応が生じる場合に ρ は著しく減少することを明らかにしている。

第5章「Effect of Mo addition on the precipitation kinetics of the TCP and GCP phases in Fe-20Cr-35Ni-2.5Nb at elevated temperatures」では、第2章で求めた過飽和度に基づいて、TCP相及びGCP相の析出に及ぼすMoの効果調べ、TTP図を構築している。基本鋼にMoを添加すると、粒界TCP相の核生成時間は約一桁短縮され、 ρ は短時間側から増大する。しかし、Moを3 at.%添加すると相領域は3相域から母相(fcc)とTCP相の2相域に変化し、 ρ は増加しない。これは、GCP相の析出に対する見かけの過飽和度が増加し、熱力学的に非平衡なGCP相(δ 相)の粒内析出が生じ、これが粒内TCP相の核生成サイトとして働くことに起因すると述べている。

第6章「Effect of W addition on the precipitation kinetics of the TCP and GCP phases in Fe-20Cr-35Ni-2.5Nb at elevated temperatures」では、第2章で求めた過飽和度に基づいて、TCP相及びGCP相の析出に及ぼすWの効果調べ、TTP図を構築している。基本鋼にWを添加すると、粒界TCP相の核生成はMo添加の場合よりも促進され、 ρ はさらに短時間側から増大する。また、Moと同様、Wを2 at.%添加すると相領域は3相域から2相域に変化することを見いだしている。Wの添加による ρ の増大は、過飽和度の増大による核生成初期段階における粒界TCP相の核生成の駆動力の増加に起因するとしている。

第7章「Microstructure control of the TCP and GCP phases in the novel austenitic heat-resistant steels by M addition at 1073 K」では、前章までの平衡論と速度論の結果に基づき、TCP相とGCP相の独立制御はWとTiの複合添加により可能であることを述べ、各元素の単位 at.%あたりの ρ および粒内GCP相の体積率の変化を定量評価して優れたクリープ特性を示すための組織設計指導原理を提示し、その原理に基づいてモデル鋼を提案している。

第8章「General Conclusions」では、本研究で得られた知見を総括している。

以上を要するに、本論文は、2種類の金属間化合物相を強化相とするオーステナイト系耐熱鋼において、M元素の添加により両相の粒界及び粒内の析出に対する過飽和度を平衡論及び速度論の観点から定量的に評価し、組織設計の指導原理を構築するとともに、その原理に基づいて新たなモデル鋼を提案したものであり、工学上並びに工業上貢献するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文として十分な価値のあるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。