

# 金材技研

科学技術庁  
金属材料技術研究所

# 1992 No.5

# ニュース

核融合炉低温照射下クリープ／耐熱合金設計  
法／傾斜機能材料熱的安定性

## 核融合実験炉の低温照射下クリープを予測 —— 原子炉材料の照射誘起変形の計算 ——

究極のエネルギー源として期待される核融合炉の炉心部では、強力な中性子照射によって格子点からの原子の激しいはじき出し現象が起これ、これによって材料中に導入された点欠陥が動き回って集合・離散・吸収・消滅のダイナミックな現象が起きる。そのため材料物性に種々の変化が生じ、また、炉の設計上特に重要なものとして材料の変形や寸法変化が生じる。しかし、実際にこのような材料の挙動を中性子照射下で詳細に調べ、設計に必要なデータを完全に収集・整備することは技術的・経済的に極めて困難である。

このような背景の下に、当研究所では照射下クリープや照射誘起応力緩和など、「照射下」で誘起される変形をシミュレーションによって予測する研究を進めている。応力下の材料中では照射によって導入された点欠陥を転位の運動、転位ループの核生成、成長など複数の照射誘起変形機構が競合して取り込む。このダイナミックな過程を追跡するため、点欠陥の拡散の活性化エネルギー、材料の弾性係数、転位密度など総数20個ほどの因子を用いて点欠陥密度に関する反応速度論的な連立方程式を導出し、それを時々刻々解いて塑性ひずみの生成過程を求める手法を世界に先駆けて開発した。

核融合エネルギー開発における現在最大の話題は国際熱核融合実験炉 (ITER) の工学設計である

が、ITERでは冷却水の温度が60°Cと低く照射量も少ないため、これまで照射下クリープは無視できるものと思われていた。しかし本研究の結果、図に示すように、ITERで予想される最大はじき出し量10回数／原子以下の領域で変形量がかなり大きいこと、および、低い照射量の範囲内では遷移的な現象によって高い温度よりもむしろ変形量が大きくなることが予測された。このような著しい低温照射下クリープがはじき出し量2～3回数／原子の領域で起きていることが米国のオークリッジ国立研究所において最近実験的に確かめられ、ITERにおける照射誘起変形の重要性が指摘されるとともに本予測法の有用性が実証された。今後の改良によりさらに多くの状況における照射誘起変形を予測できるものと期待される。

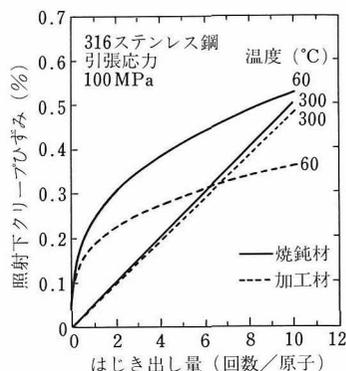


図 核融合実験炉条件での低温照射下クリープ予測

# 統計熱力学モデルによる耐熱合金の設計

## —— クラスタ変分法の応用 ——

ニッケル基耐熱合金は $\gamma$ 相 (fcc構造) の中に微細な $\gamma'$ 相 (L1<sub>2</sub>規則構造) を析出させ、高温における強度やクリープ特性の向上を図っている。このため合金設計には、多種類の合金元素の添加によって、 $\gamma'$ と $\gamma$ の組成、量比や格子ミスフィットがどのように変化するかを定量的に解析し、予測することが必要である。

ニッケル超合金に関しては相平衡関係のデータはすでになりに多く蓄積されており、これらのデータを基に、純経験式により特性の最適条件を計算機によって探索する合金設計の手法が開発されてきた。この方法は堅実ではあるが、十分に信頼性のある予測を行うためには数多くの合金元素の、広い組成範囲にわたる膨大なデータを必要とする。そこで、確固とした統計熱力学の手法に基づき、実験量が少なくすむような、設計法の開発が望まれるが、それに適したものとしてクラスタ変分法がある。

クラスタ変分法は規則相や化合物の相平衡の解析に極めて有効であることが知られている。この方法は四面体や八面体といった原子クラスタを考え(図1)、クラスタの各頂点を構成原子が占めるクラスタ配置の確率(配置エントロピー)をよく計算できる。そして、現象論的な原子間ポテンシャルを用いることにより、相中の原子配置(合金元素の置換サイト)、規則度、2相中の合金元素の濃度比、状態図中の平衡相境界などを統一

的に計算でき、計算に必要なポテンシャルパラメータの数も少ないのが特徴である。

図2はこの方法を用いて計算したニッケル-アルミニウム-コバルト(Ni-Al-Co)三元合金の $\gamma'/\gamma$ 平衡相境界を示す。平衡相境界はギブス三角形のNi-Co辺に平行な方向にのびており、これはコバルトがおもにNiサイトに置換することを示している。計算では約80%がNiサイト、残り約20%がAlサイトに置換されると予測されるが、これは実際に電界イオン顕微鏡や分析電顕によって得られた実験結果ともよく一致している。

このようにクラスタ変分法では、単に平衡相境界や分配係数といった巨視的な熱力学量だけでなく、合金元素の置換挙動や格子ミスフィットのように、合金特性を左右するミクロな構造にまで立ち入って解析し、設計に取り入れることができる点に特徴がある。当研究所は革新的材料設計法の開発のための特別研究や新技術事業団の日英共同研究(原子配置設計制御計画)を通じて、ニッケル超合金、チタン合金の合金設計にクラスタ変分法を適用し、設計法の改良という観点から、耐熱合金の性能向上に取り組んでいる。

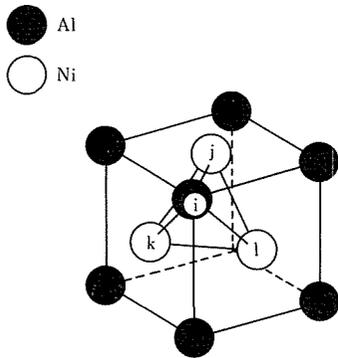


図1  $\gamma'$ 相の四面体原子クラスタ

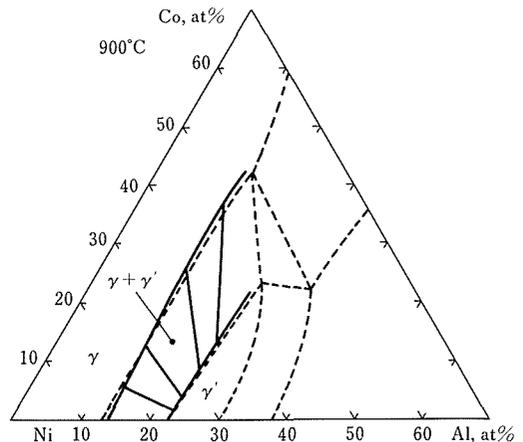


図2 クラスタ変分法により計算されたNi-Al-Co 3元合金の $\gamma'/\gamma$ 平衡相境界

# 金属／セラミックス傾斜機能材料の熱処理現象

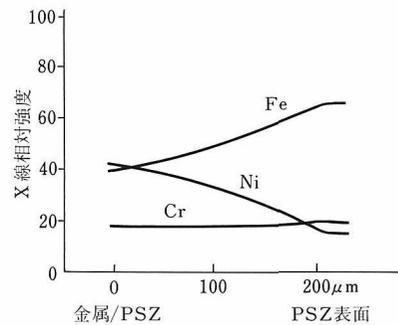
## —— クラゲ状金属組織の発生 ——

超耐熱複合材料として従来、金属材料表面にセラミックスを溶射または接着した材料が用いられてきた。しかし、実際に高温で使用した場合、金属とセラミックスとの界面で熱膨張係数の差による熱応力が発生してセラミックスの剥離を起こし、超耐熱材料としての性能に問題を生じた。そこで考案されたのが傾斜機能材料である。傾斜機能材料とは、セラミックスから金属へと組成を連続的あるいは階段状に変化させることにより、熱応力を緩和させるとともに所定の遮熱性を付与し得る材料のことである。このような不均質材料は、熱力学的観点からすると非平衡状態にある。そのため傾斜機能材料が高温に長時間さらされる場合には、異相間の化学ポテンシャルの勾配によって原子の拡散が起こり、元の傾斜組成を失うことが予想される。それゆえ、実用化に際してはそのような場合も想定して熱的安定性や組織の時間的変化を充分把握しておく必要がある。

当研究所では、プラズマ溶射法、物理蒸着法、薄膜積層法などで作製した傾斜機能材料の熱的安定性について検討している。一例として、ステンレス鋼SUS310S基板上にニッケル－クロム－アルミニウム－イットリウム合金(Ni-16wt%Cr-6Al-0.8Y)と部分安定化ジルコニア(Partially Stabilized Zirconia: PSZ,  $ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$ )をプラズマ溶射した傾斜機能材料があるが、この材料(写真(a))は、真空中で高温(1200°C)に加熱した場合に興味深い組織変化を示すことがわかった。すなわち、PSZ部では焼結

の進行にともなう体積減少によりき裂が発生し、そのき裂の中に金属が侵入するが(b)、加熱時間が長くなるとともに侵入した金属はPSZ部の表面にまで達し(c)、さらにはPSZ部の表面に金属が盛り上がりクラゲ状組織を生じた(d)。侵入した金属部の化学組成をX線マイクロアナライザーで調べたところ、主成分は基板のSUS310Sから拡散してきた鉄であり、クラゲの上部に向かって鉄濃度が高くなっていった(図)。一方、Ni-Cr-Al-Y合金の代わりにNi-20wt%Cr合金を用いた場合には金属組織の成長は起こらない。これらのことから、Ni-Cr-Al-Y合金中に大量に含まれるアルミニウムの存在が成長を促進しているものと思われるが、その機構はまだ明らかになっていない。

クラゲ状組織の成長は傾斜機能材料の剥離防止の観点からすると好都合であるが、材料本来の遮熱性を失うことになり、耐熱コーティングとしては必ずしも好ましくない。そのため、加熱にと



もなうPSZ部のき裂発生を防止する方法についても検討を行っている。

図 写真(d)中のクラゲ状金属組織部の主な成分元素

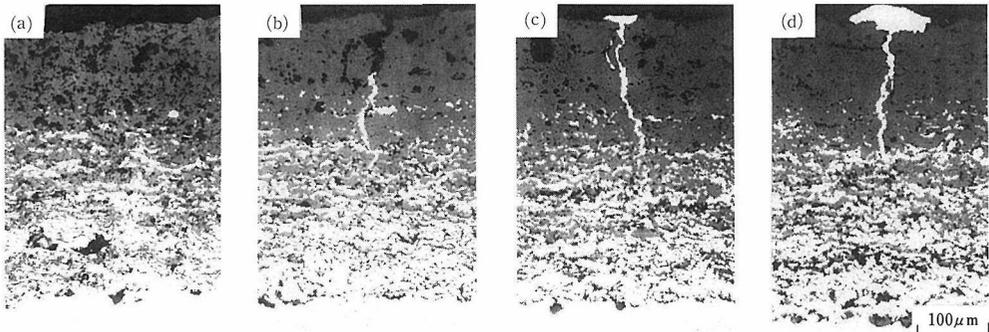


写真 Ni-Cr-Al-Y/PSZ系傾斜機能材料を1200°Cに加熱した時の断面組織変化 (a)0時間、(b)16時間、(c)64時間、(d)144時間

## ◆短 信◆

### ●人事異動

平成4年3月31日  
定年退職 山崎道夫（材料設計研究部長）  
定年退職 島 榮（筑波支所管理課長）  
平成4年4月1日  
配置換 材料設計研究部長 辻本得蔵（第3研

究グループ総合研究官）  
昇 任 第3研究グループ総合研究官 中村森彦（第3研究グループ第1サブグループリーダー）  
昇 任 筑波支所管理課長 筒本利行（筑波支所管理課長補佐）

### ●外国人研究員の受入れ

氏 名 Balette Pape  
所 属 フランス共和国 ボルドー大学  
テーマ MMCの機械的性質に及ぼす組織の影響に関する研究  
期 間 平成4年1月9日～平成5年7月8日  
氏 名 趙 翰 雙  
所 属 中華人民共和国 上海交通大学  
テーマ 軽水炉の環境劣化に関する研究  
期 間 平成4年2月24日～平成4年4月12日  
氏 名 Dirk Vanderschueren  
所 属 ベルギー共和国 ルーベン大学  
テーマ TiAl化合物の高温変形に関する研究  
期 間 平成4年3月1日～平成5年2月28日  
氏 名 Holger Norenberg  
所 属 ドイツ連邦共和国 ロシュトック大学  
テーマ MBEによる半導体量子井戸箱の作製に関する研究  
期 間 平成4年3月3日～平成5年3月2日

氏 名 許 龍 学  
所 属 大韓民国 標準科学研究院新素材評価センター  
テーマ 金属材料のクリープき裂成長特性評価  
期 間 平成4年4月3日～平成4年7月3日  
氏 名 Sri Murdiati  
所 属 インドネシア 科学院金属研究開発センター  
テーマ 金属被覆研究  
期 間 平成4年4月10日～平成4年6月10日  
氏 名 Pradoomg Suanpoot  
所 属 タイ チェンマイ大学  
テーマ 大気腐食に関する有機被覆技術  
期 間 平成4年4月20日～平成4年7月3日  
氏 名 Tasrif  
所 属 インドネシア 科学技術研究所  
テーマ 大気腐食に関する有機被覆技術  
期 間 平成4年4月20日～平成4年9月4日

## 一般公開——本所と支所で680人ほどが参観 SCIENCE NOW '92も大好評

当研究所では、科学技術週間行事の一環として、目黒本所（4月21日）と筑波支所（4月18日）を一般公開し、科学技術庁主催のSCIENCE NOW '92（4月14日～17日、東京・晴海）に出展した。

一般公開では、本所270名、支所約410名の来訪があり、研究成果の説明や質問に対する応答が、第一線研究者により熱心に行われた。

SCIENCE NOW '92では、当研究所が目指す今後の方向と幅広い研究の内容を紹介するパネルや展示物が、大勢の参観者の興味を集めた。



SCIENCE NOW '92を視察する石塚科学技術事務次官

発行所 科学技術庁金属材料技術研究所  
（本 所） 〒153 東京都目黒区中目黒2-3-12  
TEL(03)3719-2271, FAX(03)3792-3337  
（筑波支所） 〒305 茨城県つくば市千現1-2-1  
TEL(0298)51-6311, FAX(0298)51-4556

通巻 第401号 平成4年5月発行  
編集兼発行人 松岡 浩  
印刷所 株式会社 三興印刷  
東京都新宿区西早稲田2-1-18