

低炭素社会実現のための高温耐熱材料の開発

安田 弘行*

研究ノート

Development of High Temperature Structural Materials
for Realizing Low Carbon Society

Key Words : dislocations, high temperature structural materials,
low carbon society, strength

1. はじめに

東日本大震災を契機として、我が国の火力発電への依存度は急速に高まっている。具体的には、2012年度の火力発電による電力は全体の88.3%である(図1)¹⁾。しかし、火力発電では、CO₂の排出量が多く、環境への悪影響が懸念される。例えば、石炭火力発電について、その発電効率を向上するとともに、CO₂排出量を削減するためには、蒸気温度と圧力を高く設定する必要があるため、そのために、高温環境に耐える耐熱材料の開発が不可欠である²⁾。また、コストの面でも、1%の発電効率向上で、1.5億円程度の燃料費削減が期待できる。稼働年数が40年

を超える火力発電プラントの比率も高いことから、より高効率な発電施設に更新することが重要である。このような背景から、欧米、アジアを問わずして、火力発電用の高温耐熱材料の開発が近年急速に進んでいる。例えば、超々臨界圧(Advanced Ultra-Super Critical: A-USC)石炭火力発電では、蒸気温度700°C、圧力35 MPaでの操業が検討されている。フェライト系耐熱鋼は、低熱膨張率、高熱伝導率であるため、これまで蒸気タービン用材料として広く用いられてきたが、その限界温度は650°C程度とされているため、A-USC発電では、Ni基超合金による代替が検討されている。しかし、Ni基超合金は高価であることから、高温強度に優れるフェライト系耐熱鋼の開発が強く望まれる。そんな中、著者らは転位論に立脚した研究開発により、フェライト系耐熱鋼の高温強度を著しく向上することに成功したので、その研究成果の一部を本稿で紹介したい。

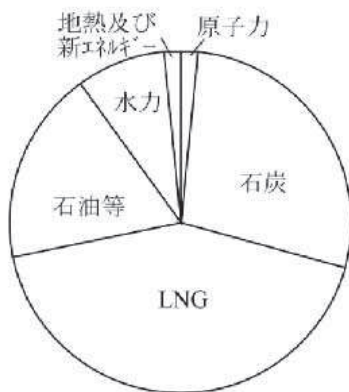


図1 2012年度の電源別発電電力量構成比¹⁾

2. 高温耐熱材料開発への転位論的アプローチ

結晶性材料の力学特性は、「転位」と呼ばれる格子欠陥の振る舞いに強く依存する。転位周辺の原子配列を図2に示す。転位は原子配列の「しわ」のようなものであり、その周辺では、結晶特有の原子の規則的な配列が乱れている。ほとんどの結晶は完全ではなく、転位を初めとする無数の格子欠陥が存在しているとお考え頂いてよい。例えば、鉄、アルミニウムといった金属材料では、結晶中を転位が運動することにより、形状が変化する。したがって、転位が運動しやすければ、容易に成形することが可能となり、一方、その運動を抑制すれば、材料を高強度化することができる。なお、転位の概念を1929年に世界で初めて提案したのは、大阪大学名誉教授の故・山口珪次先生であることは意外と知られてい



* Hiroyuki YASUDA

1969年10月生
大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻(1996年)
現在、国立大学法人 大阪大学 大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻教授 博士(工学) 材料強度学
TEL: 06-6879-7497
FAX: 06-6879-7497
E-mail: hyasuda@mat.eng.osaka-u.ac.jp

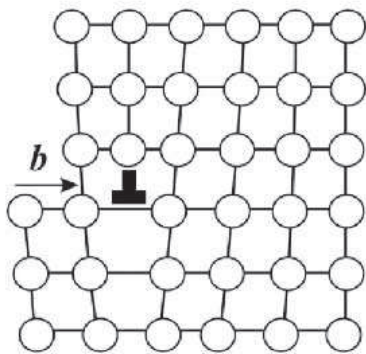


図2 転位周辺の原子配列

ない。ここに記して、その功績を讃えたい。その後、転位論は急速に発展し、現在の構造材料の研究開発に活かされている。著者のモットーは、「転位一本一本の運動を制御して、マクロな力学特性を飛躍的に改善する」である。以下にご紹介するのは、転位論の常識を覆す新規材料強化機構とそれを利用した高温耐熱材料の開発についてである。

転位を特徴づける因子として、「バーガースベクトル」(b)がある。図2に示す矢印が b であり、原子移動のワンステップである。 b の大きさと方向は物質固有であり、例えば、fcc金属であれば $1/2\langle 110 \rangle$ 、bcc金属ならば $1/2\langle 111 \rangle$ となる。特に単純な結晶構造では、結晶の最小並進距離となる。逆に、fcc金属やbcc金属の中を $b = \langle 001 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ といった転位が運動することは一般にあり得ない。近年、著者ら³⁾は、bcc母相中にB2型構造を有する金属間化合物をナノレベルで分散すると、その強度を飛躍的に向上できることを見出した。この強化は、bcc母相とB2型化合物の b の違いに由来する(図3)。NiAlやCoAlといったB2型化合物では、 $\langle 001 \rangle$ 転位が運動することが知られている⁴⁾。これらB2型構造の析出物が、bcc母相に微細分散すると、bcc母相の転位は析出物を通過(せん断)するしかなくなる。bcc母相中の $1/2\langle 111 \rangle$ 転位がB2型析出物に侵入すると、その運動は極めて困難となる。例えば、B2型NiAl中を $1/2\langle 111 \rangle$ 転位が運動することは不可能ではないが(2本対で運動する必要がある)、その運動抵抗は $\langle 001 \rangle$ 転位のそれと比べ6倍程度である⁴⁾。したがって、bcc母相中の $1/2\langle 111 \rangle$ 転位がB2型析出物を通過することで、著しい強度増加が生じる。図4は、bcc母

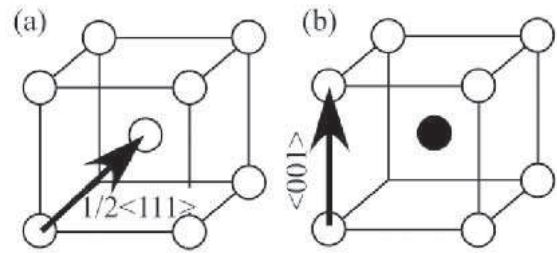


図3 bcc母相(a)とB2-NiAl(b)の b

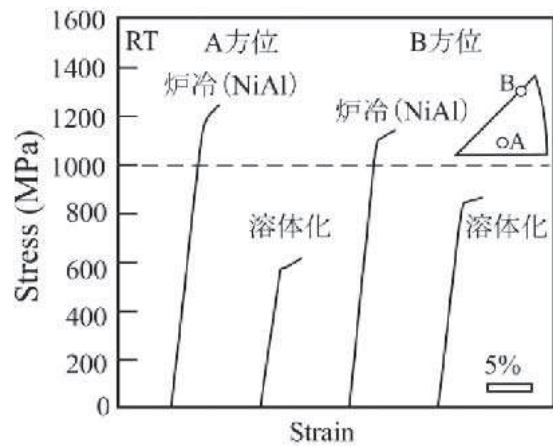


図4 Fe-23Al-6Ni単結晶の室温での応力-歪曲線

相にNiAlが析出したFe-23Al-6Ni(at%)合金単結晶の室温における応力-歪曲線である³⁾。 $1/2\langle 111 \rangle$ 転位が運動するA方位では、炉冷することでNiAlを微細析出させた試料の降伏応力が1 GPaを超え、その値は、溶体化処理でNiAlを消滅させた試料のそれと比べ、2倍程度となっている。一方、図4のB方位では、NiAlに有利な $\langle 001 \rangle$ 転位が運動する。 $\langle 001 \rangle$ 転位はB2型析出物にとっては有利であるが、bcc母相では本来運動できない転位であるため、このことも強化につながる。実際、B方位でも、NiAlによる析出強化に由来して、降伏応力が1 GPaを超える。以上のように、bcc母相とB2型化合物の b が異なることで、著しい強化を達成できる。著者らはこの現象を「slip frustration hardening (SFH)」と呼んでいる。磁性の分野でよく知られている「spin frustration」にならって命名した。図5に、NiAlが析出したFe-23Al-6Ni単結晶ならびにCoAlが析出したFe-15Al-15Co単結晶の降伏応力の温度依存性を示す³⁾。いずれの合金でもSFHが発現し、改良9Cr1Mo鋼、316ステンレスといった従来鋼よりも遙かに高い高温強度が得られる。さらに、興味深い

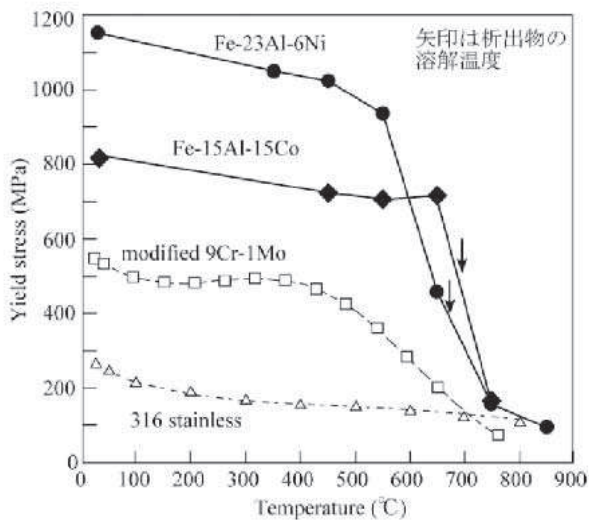


図5 降伏応力の温度依存性

ことに、このSFHはB2型析出物がbcc母相に溶解する直下の温度まで有効であり、このため、強度を高温まで維持できる。bcc母相あるいはB2型析出物いずれかにとって極端に活動しにくい転位が運動していることになるので、高温でも高強度が維持できると考えている。なお、このSFHは、B2型析出物のサイズ、分布、形態、密度を制御することで初めて有効となり、例えば、析出物が粗大化してしまえば発現しない。したがって、SFHを最大限活用するためには、析出挙動の制御が不可欠である。

3. おわりに

金属材料の析出強化に関する研究は古くから行われ、もはや完成の域に達していると著者も思い込んでいた。しかし、SFHはこれまでの析出強化理論の盲点とも呼ぶべき現象である。当然のことながら、転位組織を詳細に解析しなければ、SFHは発見し得ない。「転位一本一本の運動挙動を制御して、マクロな力学特性を飛躍的に改善する」という著者の研究スタイルに合った現象であり、現在も精力的に研究を行っている。具体的には、本稿ではB2型析出物による強化について述べたが、現在、他の構造を有する析出物の場合について調査を行っている。まずはSFHを体系化した後に、それを利用した新規高温耐熱材料の開発につなげたい。

参考文献

- 1) 電気事業連合会、http://www.fepc.or.jp/about_us/pr/sonota/_icsFiles/afieldfile/2013/05/17/kouseihi_2012.pdf
- 2) 中村眞二、河島弘毅、竹井康裕、斎藤伸彦、田中良典、西本慎、三菱重工技報、48 (2011) 8.
- 3) T. Edahiro, K. Kouzai and H. Y. Yasuda, *Acta Mater.*, 61 (2013) 1716.
- 4) D. B. Miracle, *Acta Metall. Mater.*, 41 (1993) 649.

