超鉄鋼材料研究プロジェクト について

佐 藤 彰*

1. 超鉄鋼材料とは

1995年11月に制定された「科学技術基本法」⁽¹⁾において、キャッチアップからフロントランナーへ、産業の空洞化、社会活力の低下、環境問題、食料問題、エネルギー問題、新伝染病、基礎研究水準低下、研究環境低迷、若者の理工科系離れ等の問題が背景となり、「科学技術創造立国」を目指すことが示されて、世界の科学技術の進歩と人類社会の持続的発展への寄与、および真に豊かな生活の実現が謳われている。そして、1996年8月に閣議決定された「科学技術基本計画」⁽²⁾においては、社会的・経済的ニーズに対応した研究開発と基礎・基盤科学振興のバランスのとれた推進を基本方向とし、新産業創出、地球規模の諸問題の解決、安心して暮らせる潤いのある社会の構築に資する科学技術の実現の重要性が指摘されている。

高度工業社会の我が国は、21世紀の初頭から大きな転換期を迎える(図1)⁽³⁾。人口は2010年頃をピークに減少へ向かい、2009年以降、5人に1人が65歳以上となり高齢者比率が高まる。高度成長期に建設した主要インフラ(Infrastructure)は築後50年で更新期を迎えるなど、「ひと」も「もの」も老朽化する。また、社会インフラの全投資に対する更新経費比率の増大(2016年以降、全設備投資中の更新投資比率が50%を超える)、鉄鋼スクラップ発生量の増大(2010年以降、市中スクラップが5000万トンを超える)が不可避で、大きく蓄積したインフラのメンテナンスコストも負担になる。さらに、高人口の周辺開発途上国の経済発展に伴い、資源・エネルギー問題や地球環境問題が加速度的に深刻化する(図2)。

このように、資源、地球環境などの限られた原資の中でいかに生き延びていけるかが厳しく問われることになる。超鉄鋼材料はこれらの諸問題の解決に寄与するものでなければならない。

2. 超鉄鋼材料の性能

上記の社会構造変化に対応し持続可能な21世紀を築く超鉄鋼材料には、次の4目標の同時達成が要求される。すなわち、(1)より一層の高強度化と高安全性確保、(2)より一層の長寿命化、(3)革新的な製造技術の開発(低コスト、省資源、省エネルギープロセスの開発)、(4)環境負担度の低減(スクラップリサイクル、炭酸ガス排出量の削減など)である。

鉄鋼材料は、金属、プラスチック、セメント、木材等の素材消費の40%を占め、構造材料として極めて重要である⁽⁴⁾。また、鉄鋼材料は、ビル、橋梁、自動車など国民生活の豊かさと安全を支える基盤材料である。さらに、多量に生産・使用されるため、性能の改善による社会的・経済的効果が総体として大きくなる。したがって、上記の目標を先頭切って達成すべきものとして、大量に生産・使用されている鉄鋼材料が挙げられる。成熟したとは言え、既存の鉄鋼材料では太刀打ちできず、既存技術の大きなブレークスルーが求められる。新しい材料の実用化には年月も必要である。原理面に立ち返った基礎研究を旺盛に推進し、2015年頃までに、4要求を満たす鉄系新構造材料、すなわち、「超鉄鋼材料」を実用化するためには、直ちに研究に着手する必要がある。

* 金属材料技術研究所フロンティア構造材料研究センター長(〒305-0047 つくば市千現1-2-1)
Research Project on Ultra Steels; Akira Sato(National Research Institute for Metals, Tsukuba)
Keywords: steel, recycling, welding, joining, delayed fracture, fatigue, creep, marine corrosion, simulation
1998年4月16日受理

図1 人口、鉄鋼総生産量、スクラップ量、更新投資比率、高齢者比率の予測。

3. 超鉄鋼材料研究プロジェクトの遂行の仕組み

そこで金属材料技術研究所は、1997年4月より、「新世紀構造材料 STX-21: Structural Materials Xs for the 21st Century(もしくは超鉄鋼材料 Ultra Steels)」研究プロジェクトを開始した。このプロジェクトの性格は目標達成型基礎研究と呼ぶべきである。すなわち、既存技術の改善では対応できず、原理面に立ち返ったブレークスルーが必要である社会的・経済的ニーズが高い研究開発課題において、明確な目標を設定して取り組む研究である。超鉄鋼材料プロジェクトでは、鉄鋼材料の「実用強度の2倍化、構造体寿命の2倍化、トータルコストの低減、環境負担度の低減」の同時達成を最終目標としている。

このプロジェクトには、産学官に蓄積されている我が国の高度な技術シーズと研究ポテンシャルの総結集が必要である。そのための結集軸として、国立研究所である金材技研に「フロンティア構造材料研究センター」を発足させた。そこに、任期付き任用職員を含めた研究職員(80名)、本プロジェクト遂行のために創設された「構造材料特別研究員」制度等による民間研究者等(約20名)、さらに主として大学より招聘する客員研究官(約35名)が集結している。それには、任期付き任用、非常勤制度などの諸制度を活用し、人材の融通性、流動性を留意している。

研究推進にも集中性と流動性を結合する工夫を図った。素

図2 国民1人当たりの鋼材消費量の推移。

材を最終製品まで高め、高性能化していくためには、専門分野間の重層的、連続的な連携が不可欠である。専門集団として、素材の組織の作り込みを研究する「材料創製ステーション」、作り込まれた組織を壊さない接合プロセスなどを研究する「構造体化ステーション」、素材およびその構造体の諸特性評価を研究する「評価ステーション」の3つの専門研究組織を設置した。そして、研究課題の総合的推進を確実にし、かつ専門分野間の研究情報交換が容易に行われるようにするために、各課題遂行に必要な研究者を3ステーションからピックアップして研究推進チーム(タスクフォース)を形成し、タスクフォースリーダーの指導性によって専門横断的連携(スパイラルダイナミズム)が日常的に行えるようにした。

構造材料の研究開発においては、社会的・経済的ニーズの把握、エンドユーザーとの連携、実用化フェーズの把握が絶対的に不可欠である。そこで、産学官各分野からの外部委員を含めた諸委員会を設置し、開かれた研究運営体制にしている。

本プロジェクトが発足してすぐに、事前評価として外部委員による評価をして戴いた⁽⁵⁾。国家的かつ時的重要性が高く、国研のテーマとして適切であるとの評価と共に、数項目の必要な努力も指摘され、これに対する対応策を検討し、改善に努めている。

4. 超鉄鋼材料の研究開発課題

研究開発課題は、計画立案段階から民間、大学からの広い分野の専門家の協力を得て、インパクトの大きさと目標達成の可能性を総合的に判断し、以下の構造材料の高強度化に関する研究、および構造材料の長寿命化に関する研究の2研究テーマに絞った。各テーマは、それぞれ2研究課題を有し、合計4研究課題を研究している。

図3 結晶粒微細化による強度2倍化の概念図.

(1) 構造材料の高強度化に関する研究

(i) リサイクル容易な 800 MPa 級溶接用構造用鋼への挑戦

建築、土木などの建設分野では鉄骨や鉄筋などの鉄鋼がたくさん使われている。我が国は世界有数の鉄鋼生産国であるが、通商産業省の統計(1996年)によると総粗鋼生産量1億トン弱の中で内需は約7000万トンに上る。その内、建設分野の内需については明確な数値は無いが、かなり確かな推定で3000万トン弱となる。内需の4割強も占める。

一方、建設分野からのスクラップ発生は現在、市中スクラップの約3割を占めている。今後、高度成長期の建設物の更新が盛んになるとその発生量、比率とも高まってくることが予想される。

21世紀での更新時期に、リサイクルしやすく、強度が高く、寿命の長い素材を提供できれば、省資源、省エネルギーの積算効果は勿論のこと、それによる二酸化炭素発生量削減効果も大きく見込める。

建設分野で使われる鋼のほとんどは普通鋼と呼ばれる Si, Mn をわずかに含む Fe と C の合金であり、鉄骨はほとんどが溶接構造であることは日頃良く目にしているところである。

現在の普通鋼は、溶接が容易で、リサイクルもしやすい化学成分となっている。しかし、その最高引張強さは 500 MPa 程度である。それ以上の引張強さにするために、合金元素を添加したペーナイト鋼や焼もどしマルテンサイト鋼があるが、溶接も難しくなり、溶接継ぎ手疲労強度が上がらないなどの問題がある。また、貴重でかつリサイクルを阻害する合金元素を含むため、大量生産材として開発していくことは躊躇される。

そこで、本研究ではリサイクルしやすい現在の 400 MPa 級組成鋼を元に、結晶粒の超微細化を実現し、合金元素の添加なしに2倍の強度(800 MPa)を実現し(図3)、溶接しやす

粒界炭化物フリーの新マルテンサイト組織の概念図

図4 遅れ破壊に強い高強度鋼の組織.

いフェライト-パーライト組織鋼に生まれ変わらせることに挑戦する。その上に、微細化組織を壊さない溶接プロセス技術を開発すれば、資源を節約した上で、より安全でより高層の建築が可能になることなどが期待される。

(ii) 破壊に強い 1500 MPa 超超高強度鋼への挑戦

高強度鋼は多くの分野で、重要なところに使われている。高層ビルでは柱や梁が 1000 MPa の高力ボルトで接合されている。明石大橋のメインケーブルは 2000 MPa のワイヤーで作られている。自動車のタイヤは 4000 MPa のスチールコードで強度を保っている。鋼の理想強度は 10000 から 20000 MPa の間にあり、高強度鋼の開発の目標となる。スチールコードは実際に使用されている材料内で最も強く、理想強度の 20% あるいは 40% にも達している。しかし、高強度鋼にも弱点がある。高強度鋼を安全に使用し、さらに高強度を達成するためには、弱点を克服する必要がある。

一つの大きな弱点は遅れ破壊である。今の鋼は直径数十 μm の結晶粒で構成されている。結晶粒と結晶粒の境界に外部から侵入した水素が集まり、その結晶粒界にある炭化物が起点となって遅れ破壊が生じる。そこで、図4に示すように、水素で粒界を割れやすくしている粒界炭化物の生成を抑制したり、粒界よりも水素を強く引きつける粒子を分散させることにより、遅れ破壊を防ぐ。

もう一つの大きな弱点は疲労破壊である。疲労破壊は小さな力の 10^6 回あるいは 10^7 回もの繰返しによって起きる。特に、1200 MPa 以上の高強度鋼の疲労破壊においては、鋼中に存在する介在物のような異物などを起点とした内部破壊

図5 超鉄鋼材料の長寿命化に関する研究の目標.

図6 組織の結晶方位のカラーマッピング.

が顕著となり、強度が大きくなっても疲労強度が上昇しなくなる。そこで、介在物等を小さくしたり、軟らかくすることにより、疲労強度を上げる。

このように、遅れ破壊や疲労破壊に強く、安心して使用できる 1500 MPa 以上の高強度鋼に挑戦している。21世紀には、超高層ビルや明石大橋より長い超長大橋の建設、軽量で CO₂ 排出量が少ない自動車の生産が実現され、ここで開発された高強度鋼が大きな貢献をすることを期待している。

(2) 構造材料の長寿命化に関する研究

(i) 超々臨界圧発電プラント用フェライト系耐熱鋼への挑戦

現在、石炭や石油などの化石燃料を使う火力発電は日本の全電力量の約60%を供給しているが、最近クローズアップ

されている二酸化炭素による地球温暖化に対処するため、高温高压化によって発電効率を向上させ、二酸化炭素の排出量を減らす技術開発が活発に進められている。その一つに、石炭火力発電では、タービンを回す蒸気の温度を 923 K に、圧力を 35.5 MPa に高めた超々臨界圧発電と呼ばれるプラントを21世紀に作る計画がある(図5)。このプラントが出来ると、発電効率が従来のプラント(811 K, 24.9 MPa)の39.8%から43.0%に向上するので、石炭の燃焼が節約され、二酸化炭素の排出量も大幅に減らすことができる。

タービンやボイラなどのように高温で使われる鉄鋼材料を耐熱鋼と呼んでいるが、中でもフェライト系耐熱鋼と呼ばれる材料が安く、高温強度もあり、大量に使われている。高強度フェライト系耐熱鋼の開発は、日本やヨーロッパを中心に進められているが、これまでの材料だと 893 K が使用限界温度である。

本研究では、上述した 923 K, 35.5 MPa の超々臨界圧発電プラントを作る上で必要となる、新しいフェライト系耐熱鋼の研究開発を行っている。火力発電プラントは数10年間使用されるため、長期間にわたって十分な高温強度を有するだけでなく、高温の水蒸気による酸化にも耐える材料が必要である。この他、溶接性や疲労も重要である。これまでの限界温度の 893 K を超えるには挑戦的な取り組みが必要であるが、耐酸化性の合金設計と高温で長時間安定な組織設計の統合という従来にない全く新しい概念でのブレークスルーに挑戦している。

(ii) 汎用海浜用鋼への挑戦

日本では、人口密集部は沿岸平野部に集中してきて、構造物の多くも沿岸・海浜域に集中している。この傾向はさらに加速され、構造物の建設は沿岸から洋上へと向かっている。残念ながら海洋は構造材料の基本構成材料である鉄鋼に対し

(a)

(b)

図7 (a) スチールコードのアトムプローブ像, (b) ワイヤの微小硬さ試験結果.

図8 組織安定性の比較を示すクリーブ破断試験後の透過電顕組織, (a) 従来型 9Cr-1 W 鋼, 873 K, 6.3 Ms, (b) 新 9Cr-3 W 鋼, 873 K, 36 Ms.

純鉄の大気腐食(32.4 ks 後)部分(矢印)の形状(左)及び電位分布像(右)

図9 純鉄の大気腐食進行を示すケルビンフォース顕微鏡像.

て極めて過酷な環境である。例えば、耐食性の代名詞であるステンレス鋼も海水中でその耐食性は十分とは言えず、孔あきやひび割れなどの局部的な腐食や損傷に悩まされる。このようなステンレスの局部腐食は鋼中に存在する非金属介在物やC, S, P, Oなどの結晶粒界への偏析がひきがねとなって発生することが分かっている。耐海水ステンレスの創製の第一歩はこれらの不純物を極限まで低減化することである。このため金材技研で高い技術を有するコールドクルーシブル浮揚溶解と呼ばれる超清浄溶解法を用いてその開発を進めている。ステンレス鋼の耐海水腐食性の改善を図る他の方法はCr, Ni, Mo等の添加量を増加することであるが、これに代わって鋼中の窒素を0.6%程度以上含ませることにより耐海水ステンレス鋼の開発を目指している。

大気中にある構造物の主要構成材料はステンレスのように10%以上もCrやNiを含むような高合金鋼ではなく、合金元素総量が1%以下の低合金鋼である。これは大気中でさびやすいため、塗装やめっきを施された状態で使用される。さびやすさ傾向も清浄な大気中よりも海浜地帯の方が大きい。塗装による防食では、定期的な再塗装作業が不可欠であり、このコストが大きい。また、この種の労働力が得にくくなっているため、塗装でなくとも使用できるメンテナンスフリーな材料が望まれてきた。このような目的から橋梁等の構造物では耐候性鋼と呼ばれる鋼が開発され、無塗装で使用されている。耐候性鋼はCu, P, Cr, Ni等を総量で通常1%以下含み、数年も大気中に置かれた鋼は表面に保護性のある安定さびが生成する。安定さびができると腐食は極端に抑制され、無塗装でも構造物として数十年にわたって十分に実用しうる状態となる。従来の耐候性鋼は海浜環境でその効果を発揮することはできなかったが、現在無塗装で使用可能な低合金鋼の開発をすすめている(図5)。

5. 超鉄鋼材料研究のこれまでの成果

それぞれのタスクフォースについて、この1年間に得られた主な成果を記すと以下のようである。

(1) 微小サンプルで平均粒径2 μm の微細なフェライト-パーライト組織の作製に成功した(図6)。図中の個々のフェライト粒の色は方位を表し、フェライト粒がランダムに近い方位を有することを明らかにしている。本組織はFe-0.17%C-0.3%Si-1.5%Mnの組成を有する普通鋼に、オーステナイト低温域で大きな歪みを加え、10 K/sで冷却することにより実現された。本組織のさらなる特徴は、粒界が方位差角15度以上の大角粒界から成り立っていることである。粒界が大角でなければ、微細化の効果は期待できない。微小サンプルであるため、強度試験は困難であるが、引張強度約

700 MPaに相当するビッカース硬さ(Hv)203が得られている。

(2) スチールコードのフィールドイオン顕微鏡写真を図7(a)に示す。白点が鉄原子である。実用材料中で最強であるスチールコードの開発を原子レベルで行っている。図7(b)はワイヤーの微小硬さ試験結果を示す。ワイヤーの中の幅数百nmのフェライトとセメンタイトの微細組織のそれぞれの変形特性を知ることがワイヤーの高強度化のキーポイントである。

(3) 長期間に渡り強度を低下しないフェライト系耐熱鋼を創製するには、微細なマルテンサイト組織が高温でも安定に保持される必要がある。図8はフェライト系耐熱鋼の組織が高温で長時間使用後に変化する様子を電子顕微鏡を用いて、従来型鋼と新しい9%Cr-3%W鋼について比較したものである。従来鋼では、高温でラス組織が容易に壊れてしまい、強度が低下することを示す。一方、新しい鋼では、長時間使用後も初期の微細なラス組織が安定に保持され、高温強度は長期間維持されることを示す。現在さらに高強度の材料を開発するために、材料中の拡散を抑制する合金設計や、炭化物等の析出物を微細に分散させる組織設計に取り組んでいる。

(4) 1滴の海水(直径200 μm)から発生した純鉄の大気腐食の進行を原子間力顕微鏡の1種のケルビンフォース顕微鏡で連続観察した結果を図9に示す。温度297.2 K、湿度36%の環境であり、左が表面形状像、右が電位分布像である。腐食が進行している部分には電位変化が見られ、腐食の先端部がアノード、そのすぐ後ろがカソードとなり、小さな電池を形成して進行していることが分かる。さびの高さは中央部を除くと、250 nmから400 nm程度である。

6. 超鉄鋼材料研究の今後の展開

材料は使われてこそ、その使命を果たすことができる。エンドユーザーなどとの密接な連携なしには合理的な研究開発は不可能である。本プロジェクトの目標はひとつひとつ挑戦的であるが、超鉄鋼材料の実現により、安心して暮らせる潤いのある社会の構築に寄与し、21世紀以降の持続的発展に貢献するため、先頭に立って基礎的研究開発を推進する決意である。諸氏の一層のご理解とご支援を期待したい。

文 献

- (1) 科学技術庁：科学技術基本法について、1995年11月。
- (2) 閣議決定：科学技術基本計画、1996年7月。
- (3) 石井利和：ふえらむ、2(1997)、863。
- (4) 林 明夫：ふえらむ、2(1997)、245, 320, 401, 497, 580。
- (5) 新世紀構造材料(超鉄鋼材料)研究事前評価委員会(1997. 7. 1.)。