超鉄鋼*

長井 寿^{*1}

Ultra-Steels

Kotobu NAGAI^{*2}

^{*2} National Institute for Materials Science, Steel Research Center,
1-2-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki, 304-0047 Japan

Key Words: Iron and Steel, Material Design, Welded Joint, Tensile Properties, Fracture Toughness, Corrosion, Creep

1. 超鉄鋼の背景

1.1 鉄は重要素材 日本における年産約2億tの素材総生産量の中でも鉄はその約半分(重量換算)を占めている(図1)⁽¹⁾。多くの将来予測の中でも、これらの生産比率の大きな変化は当面ないとされている。

しかし、生産量は人口減や技術の進歩に伴い徐々に減少していくと考えられている。一方、スクラップの発生量(Domestic scrap)は漸増し、近い将来に内需(Domestic needs)を上回る量の発生すら予測される(図2)⁽¹⁾。これは、日本が資源循環型社会を作り上げることが単に謳い文句ではなく、社会の切実な要請となる可能性があることを示している。

1.2 地震、海洋、モンスーン 自然条件には地域性がある。特に土木、建築用などのインフラ材料には地域性条件を加味した性質が求められる。日本は地震多発国でありしかも数十年周期で大規模地震に見舞われる地方が多い。居住可能な国土面積は狭く、しかも沿岸地帯に偏在し、島嶼も多いため、単に高温多湿ではなく塩分による腐食も深刻である。モンスーン気候がさらにこれを加速する。

これらの自然条件はグローバルには常識的なものではない。欧米にとってみれば、むしろ特殊な条件である。ということは、欧米と全く同じ基準、規格は日本の状況には必ずしも適合しない。むしろ、日本の自然諸条件は東アジア地域との共通性が高いもので、地域性を加味した共通スタンダードの検討が待たれてい

る。

1.3 中国市場 中国の鉄鋼生産は2002年に1.8億tを超え、今や歴史上最大の鉄鋼生産国になった。すでに日本と米国の合計に匹敵し、早晩それをも凌駕する。今後、年産量は少なくとも3億t以上になると予測されており、世界レベルの資源・エネルギー、地球環境問題への影響は深刻化する。

Fig. 1 Domestic annual product of materials

Fig. 2 Simple prediction on change of domestic needs for steel and that of domestic scrap

* 原稿受付 2004年2月24日.

^{*1} 正員、物質・材料研究機構(☎305-0047 つくば市千現1-2-1).

E-mail: NAGAI.Kotobu@nims.go.jp

日本鉄鋼業は東アジア市場を最大の交易対象としておりそこでの変化の影響を大きく受けざるを得ない。短期的に見れば、鉄スクラップおよび鉄鋼製品輸出の拡大という一定の好局面を持つが、中長期的な見通しは不透明である。日本のものづくりの生き残りを考えれば、東アジア諸国との間での製造棲み分けは不可避であろう。すなわち、世界調達可能な鉄鋼製品は基本的には中国などで、諸製品の心臓部や最高級部を日本でという方向性が期待される。しかし、世界調達可能品の高品質化はどんどん進むと思われるので、追いつけられつつ常にリードを保ち続ける新しい技術開発競争時代に入っていく。

東アジアが世界の鉄鋼センターとなり、そこで使われるべき鉄鋼製品はその自然条件に適合しつつ高性能化されていく。また、原料も鉄鉱石から鉄スクラップまで多様な展開を前提として、大規模に展開していくだろう。その中で、日本がスクラップ供給、技術発信、研究センターとしてリーダー的役割を果たすべき、協調と競争の新未来がすでに始まっている。

2. 生み出された超鉄鋼

鉄鋼産業が世界的にリードしている製品分野は多いが、明るさを占う場合には、学側の思い切った参画が不可避になる。20年先に解決が求められる技術課題を先取りした戦略的基礎研究を学が担わなくてはならない。

リサイクル容易、環境負荷低減、メンテナンスコスト低減などを前提とした高性能化が勝敗を決するようになる。長期的課題でかつ民間における非競争分野からの選定を前提とし、「強度2倍、寿命2倍」という掛け声のもとに、産学官連携による課題の絞り込みがなされ、平成9年度より超鉄鋼プロジェクトが旧金属材料技術研究所でスタートし、それが物質・材料研究機構(NIMS, National Institute for Materials Science)に受け継がれている。

Fig. 3 UFG (Ultrafine-grained) steel plate with 12 mm in thickness and 70 mm in width and its stress-strain curve

強度2倍として絞り込まれたのは、(1)継手疲労強度をブレイクスルーしたフェライト系高強度溶接構造用鋼、(2)遅れ破壊、疲労破壊強度をブレイクスルーした高強度鋼であり、寿命2倍と絞り込まれたのは、(3)650°Cで使用可能なフェライト系耐熱鋼、(4)海浜海洋環境で錆びない鉄鋼である。

現在、これらの達成シーズを発展させていくためにさまざまな取組みを展開している。以下に代表的な動きを紹介する。

3. 耐震、耐食、軽量ブリッジモデル事業

フェライト系高強度溶接構造用鋼の研究では、合金成分を変えず、結晶粒径微細化で800 MPa級高強度(強度2倍化)を達成した。結晶粒径微細化は高強度化とともに、脆性遷移温度を極めて効果的に低下させる効用を持っている。したがって、耐震性の向上が期待される。

微細粒化メカニズムよりも、試料全体が微細粒で詰まっているバルク材製造プロセスの開発のほうが冶金学的なネックとなる。NIMSでは“多方向加工”と名づけた独自のアプローチでこの課題を克服しつつある。現在、20 mm径程度の超微細粒棒鋼は比較的容易に民間設備をもって製造できる。超微細粒厚板を作る際にも同じアイデアを適用し、図3に示すような12 mm厚のバルク材を実験室に作った⁽²⁾。現在、さらに>25 mm厚の大形板材実験試料の製造に挑戦している。

プロジェクトの中長期的な想定用途は、土木・建築用である。現在、土木研究所との連携プロジェクトとして「耐震、耐食、軽量ブリッジモデル事業」を展開

Fig. 4 Application of ultra steel technologies for innovative designing of steel bridges

することが、総合科学技術会議から提言されている(図4)。この提言に沿って、NIMSは鋼構造協会の協力を得て、超鉄鋼利用における利点と課題の抽出・整理を進めている。NIMSでは、ブレイクスルーすべきポイントを以下のように整理している。

(1) 海浜環境で従来のニッケル系耐候性鋼相当の耐食性を有し、素材強度レベルが1000 MPa程度、DBTTが230 K以下の大形サンプルの提供。現在0.8 Si-0.8 Al系低炭素鋼を結晶粒径超微細化によって、目標達成を図っている⁽³⁾。低コストの大形サンプル製造法開発が求められる。

(2) 熱変形によって導入されるひずみ分布の極小化、微細に制御された素材組織の加熱による破壊の極小化を目標とした。高効率溶接法と新しいタイプの溶接線材の提供。最難関はFusionLine 靱性の確保にある。母材組成、溶接線材、溶接雰囲気(図5)⁽⁴⁾などの多面的な要因の影響を検討している。

(3) 1800 MPa以上の破壊強度を持つボルト鋼の提案。可能ならば2000 MPaを超えるように要請さ

れている(図6)⁽⁵⁾。ナノ析出物制御等によって、高強度と耐遅れ破壊特性を同時に確保できる組織制御を追求している。ボルト成形性の確保が最難関となる。

(4) 構造鋼性を確保できるデザインとその破壊試験(地震等想定的高速単荷重および車両通行等想定の高サイクル繰返し荷重)による健全性の確認。

(5) 母材、継手(溶接、ボルト)の暴露試験による健全性保証データの整備、損傷その場計測評価技術の開発、およびこれらの標準化。特にこの課題は、東アジア諸国と共同で進めるべきものである。

このように多くの挑戦課題を抱えており、ひとりNIMSのみで遂行できるものでなく、本来的に国家的な展開を持って多くの研究者が連携して進めるべきものである。同様の観点で韓国、中国なども意欲的な研究開発を進めており、先着を競う展開になろうとしている。NIMSは土木研究所、鋼構造協会などと協力しながら、国内外との連携体制を整備していきたいと考えている。

Fig. 5 Improvement of weld-metal toughness by controlling atmosphere gas

Fig. 6 Steel development for 2000 MPa-bolt

9Cr-3W-3Co-VNb-0.05N-xC steel after tempering

Fig. 7 Microstructure is stabilized at elevated temperatures by nano-size nitrides at GB

Fig. 8 Production link for new products by ultra steels

4. 高効率火力発電プラントに向けた 共同研究

火力発電リプレース用耐熱超鉄鋼構造は、発電効率：5%アップ、二酸化炭素削減：総排出量 3%削減によって、安心安全な 21 世紀社会構築に貢献する高効率な 650°C 超々臨界圧火力発電プラント実現を想定している。

第 1 期で発掘したシーズを基に、材料高性能化、大形化、溶接構造化するための材料基盤技術確立に挑戦する。具体的には、(1)母材合金の絞り込み、(2)溶金部のボロン確保、 δ フェライトの生成防止ができる共金系溶材設計、(3)溶接性、加工性が確保された厚板を製造し、溶接継手を含むクリープ、高温引張り、疲労など設計必要データの評価、(4)パイプ製造と内圧負荷状態での実模擬環境中評価を行う。NIMS は、根幹となる技術開発を民間との共同研究によって確実に進めつつ、同時に広範な設計、施工の研究者、技術者、学協会等と連携する。

650°C はフェライト系耐熱鋼には苛酷な環境である。まずは高温度で高強度が長時間にわたって維持されるようにしてはならない。NIMS では、図 7 に示す

Fig. 9 Application of UFG technologies to micro-screws

Fig. 10 Exploring the application of UFG sheet to automobile parts

ように化学成分のわずかな調整によって、オーステナイト粒界析出物を高温安定度の高いナノオーダの窒化物に変えて、かつてない高強度を実現した⁽⁶⁾。今後も長時間クリープデータ取得と平行した長時間クリープ強度発現のメカニズムについての基礎研究を進める。

また上述の環境では水蒸気酸化も激しくなる。NIMS では Si を 0.5 wt.% 以上添加した母材を酸素分圧下で予備酸化することにより、650°C でも安定なクロム酸化皮膜を形成させることができることを実証している⁽⁷⁾。

5. 民間との共同による新製品開発研究

上記二課題は中長期的な体制で推進しなければならないものである。それに対して、なるべく早い「途中段階」での応用やニーズに合った応用展開についての積極的な対応への要請も強い。超鉄鋼プロジェクトは「集中のために共同研究排除」を基本原則としてきたが、独立行政法人化と軌を一にして、「超鉄鋼シーズを生かすための共同研究解禁」を決めた(2002 年)。以後ほぼ二年間が経過したが、民間企業のよき理解を得て、次のいくつかの例のように極めて順調に進んでいる。

5・1 超微細粒鋼のマイクロねじへの応用 1 000 MPa 級の高強度マイクロねじの製造工程は、素線を球状化処理による軟化後、ねじ成形し、最後に焼入れ焼戻しを経る。これに対して UFG 技術を適用すれば、素線加工過程で UFG 化し、ただちにねじ成形するだけで同等の性能を得ることができる。三段の熱処理をすべて省略することになれば、環境負荷低減に大きく寄与することができる。

大手線材メーカーから納入される線材を UFG 化する技術を NIMS が指導し、大阪精工(株)に委託して開発した。その技術で製造される UFG ワイヤ(粒径 1 ミクロン以下；1 ロット、径 1.3 φ、2~3 km 長)をねじ成形する技術開発は、同様に降矢技研(株)に委託し

Fig. 11 Application of high nitrogen steel to Ni-free products

開発した。

5・2 微細粒薄板鋼の自動車部品への応用検討

中山製鋼所(株)が独自に近年導入した新形の圧延設備は、微細粒(粒径が5ミクロン以下、1ミクロン以上の領域をここでは微細粒ということにする)を比較的薄肉で製造するのに適した仕様を有している。6スタンドの仕上げ圧延機において、各スタンド間で急冷(水冷)できること、後段の三スタンドでは板厚方向に大きなせん断変形を付与できることなどが、それに当たる。

すでに3ミクロン程度の微細粒薄板を製造する技術開発を終えているが、これを最終的には自動車部品に適用する可能性を探索する基礎研究として、(株)中山製鋼所(2ミクロン薄板製造)、川崎重工業(株)(高強度UFGへのハイドロフォーミング適用)、本田技研工業(株)(高強度UFG中空部品の衝突安全性評価)との四者間で、科学技術振興調整費を受けながら共同研究をプロジェクト化した(図10)。中山製鋼所(株)では、別途自動車部品等への適用実績を上げつつあり、今後の展開に大きな期待が集まっている。

5・3 Niフリー高窒素鋼の諸製品への応用 開発した高窒素含有ステンレス鋼は、海水中での腐食のない構造用ステンレスを狙ったものであるが、Niフリー化が可能で、また高強度とともに高延性が得られるなど、必ずしも事前に予期しなかった特徴的な性質を示すことがわかった。これは、例えば、人体内環境でもいっさいの腐食がなく、Niアレルギーの心配もなく、かつ高強度で安全といういくつかのメリットが重畳する。

安定的な素材提供体制に不安は残るが、需要が安定的に拡大すれば投資的にも大きな問題はないと試算さ

れている。現在、ほかにはない素材特徴を活かした応用の検討がかなり広範に行われている。

6. 超鉄鋼研究の国際的波及

超鉄鋼研究の開始に触発されて、まず1998年には韓国でPOSCO社が中核の“High Performance Structural Steels for 21st Century”プロジェクト、そして1999年には中国で鋼鉄研究総院が中心の“New Generation Steels”プロジェクトが相次いで立上った。EUでも2000年以降、1年単位でfeasibility studyが継続され、いよいよ本格プロジェクトの立上げ様相を呈している。

このような中で、東アジアを舞台とした基礎研究成果の国際交流が定着している。同時に成果の実用化を競い合う状況になってきており、一瞬の油断や緩みによって未来を失いかねない。このような中でナショナルメリットを先導するためにNIMSに国際的なリーダーシップの発揮が求められている。

文 献

- (1) 井上忠信・長井寿, 材料, 52-9 (1997), 1107-1115.
- (2) 大森章夫・鳥塚史郎・長井寿, 鉄と鋼, 89-7 (2003), 765-772.
- (3) Nishimura, T., *Proc. 7th Workshop on the Ultra-Steel*, (2002), 416-417.
- (4) Nakamura, T., Hiraoka, K., Takahashi, M. and Sasaki, T., *Q. J. Jpn. Weld. Soc.*, 20-3 (2002), 237-245.
- (5) Kimura, Y., Hara, T. and Tsuzaki, K., *Proc. 6th Workshop on the Ultra-Steel*, (2001), 88-89.
- (6) Taneike, M., Abe, T. and Sawada, K., *Nature*, 424 (2003), 294-296.
- (7) Kutsumi, H., Itagaki, T. and Abe, F., *Proc. 7th Liege Conference on Materials for Advanced Power Eng. 2002*, (2002), 1629-1638, Liege, Belgium.