

超鉄鋼の開発について —その現状と将来展望

独立行政法人物質・材料研究機構
環境・エネルギー研究領域コーディネーター
長井 寿

つくば研究学園都市にある独立行政法人物質・材料研究機構(NIMS)は、2006年3月、2002年度から行っていた「超鉄鋼プロジェクト・第2期」を終了した。「強度2倍、寿命2倍」かつ「リサイクルが可能な省合金元素」の鉄鋼材料の開発を目標としたプロジェクトである。第1期(1997～2001年)で800MPa鋼、1800MPa鋼、耐食鋼、耐熱鋼など素材の開発実験を進めた。それらの成果に基づき第2期では、土木建築、電力、自動車など需要業界と意見交換しながら実験を重ね、民間実機での試作品も一部完成させた。

1 超鉄鋼の狙いとその背景

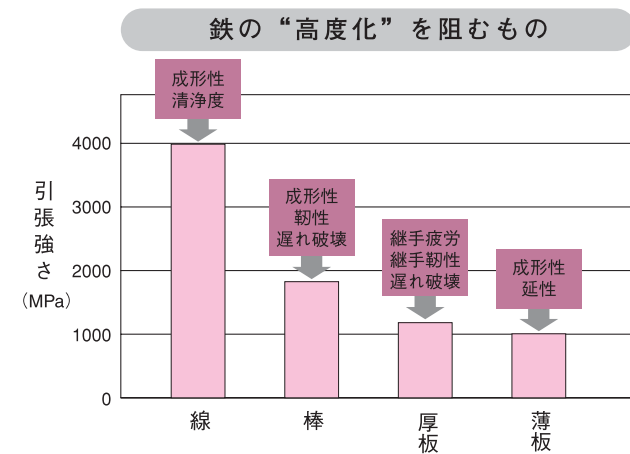
鉄は既に多様な用途に使われている基盤材料であり、しかもその性能を改善する研究開発の積み重ねで、常に最新鋭の材料が提供されてきた。その結果、鉄はわが国の安全・安心な社会基盤を提供し、また産業技術の国際競争力の源泉と評価される素材となっている。

だが、社会状況の変化、特に近年における地球環境問題の深刻化、国際競争環境の激化などを前にして、現状に甘んじることへの不安感が高まっていた。そこに、阪神・淡路大震災などの重大災害が発生し、材料技術に大きなブレークスルーを求める引き金となった。さらに長年の構造的不況からの脱却への期待感もこの動機を後押ししたとも言える。

冷静に見れば、実は、鉄鋼技術も既に大きな壁に前途を立塞がれていた。図1に説明するように、いくら強い素材を作っても、成形ができない、脆くなる、溶接すると弱くなるなどの、いわゆる「相反性質」もしくは「トレードオフ問題」への打ち手はほぼ尽きていた。これらの課題は、今後も克服できないのではという諦めすら聞こえていた。また、たとえ素晴らしいアイデアがあっても、コスト高になるようでは工業技術化しないので、有効な打ち手の展開が一層狭められていた。

一方、資源問題の緩慢な深刻化に伴い、「高価な合金元素を使わなくても良好な性質を得たい」という動機と「増大するスクラップへの対応力を付けよう」とする動機の独立した大きな二つの流れが、ひとつの潮流に合流しようとしていた。すなわち、スクラップをも活用でき、合金元素を節約でき、リサイクルが容易で、高性能な素材を作ろうとするニーズである。さらに、製品寿命を画的に延

図1 鉄素材の実用強度の上限とそれを阻む要求要因



ばすこともメンテナンス軽減などの社会コストを大幅に低減するだけでなく、資源の節約に極めて有効に役立つことも指摘されていた。

これらの思いが集約され、「使われている強さ、使われている寿命を根本から改善する」ための鉄に関する総合的な基礎研究こそまずは必要であり、それを中立的である国立研究所を舞台に集中して進めるべきという結論に至った。新しい素材の発明から実用化には最低でも20年かかるものである。それをなるべく加速するためにも、しっかりとした基礎・基盤を築くのが不可欠という思いもあった。理論的には鉄の強度改善マージンはまだ10倍以上あり、寿命にいたっては無限かもしれない。そこで、具体的な数値目標として、2倍×2倍というブレークスルー目標を掲げることとなった。

このようにして第1期で開発された新しい鉄素材=超鉄鋼の代表例には次のようなものがある。

- 1) リサイクル容易成分のみの化学組成であり、靱性と溶接性に優れた800MPa級の超微細粒フェライト鋼。土木・建築の溶接構造用として設計され、490MPa級鋼のフェライト粒の超微細粒化で降伏強さ2倍以上を実現している。強く、粘りがあり、溶接特性も良いのがポイント。
- 2) 遅れ破壊、疲労破壊強度の使用上限を1100MPaから1800MPaまで高めた機械構造用鋼。パネやボルト用として設計され、マルテンサイト組織と析出合金炭化物の微細分散化によって、大幅な使用強度限界の上昇を実現している。強く、破壊しにくく

いのがポイント。

- 3) 高強度と高温変形抵抗(クリープ特性)に優れた650℃で使用可能なフェライト系耐熱鋼。石炭火力発電などの高温高圧運転によって、二酸化炭素排出量削減と燃料消費削減を達成するために設計され、添加元素の微調整で高温安定なナノサイズの析出物を得ることによって、高温特性を実現している。より高温で使え、従来のものより長持ちするのがポイント。
- 4) 海水中でも全く錆びない耐食性、高強度、高延性などを同時実現したステンレス鋼。海浜や苛酷な腐食環境用として設計され、高濃度の窒素を含有させることによって、耐食性や高強度を実現している。錆びず長寿命のステンレスがポイント。
- 5) リサイクル容易な海浜耐候性鋼。現在、橋梁構造部材として使われているニッケルや銅の添加の海浜耐候性鋼を代替するものとして設計され、アルミニウム、シリコンの複合添加で所定の海浜耐候性を得ている。リサイクルできることがポイント。

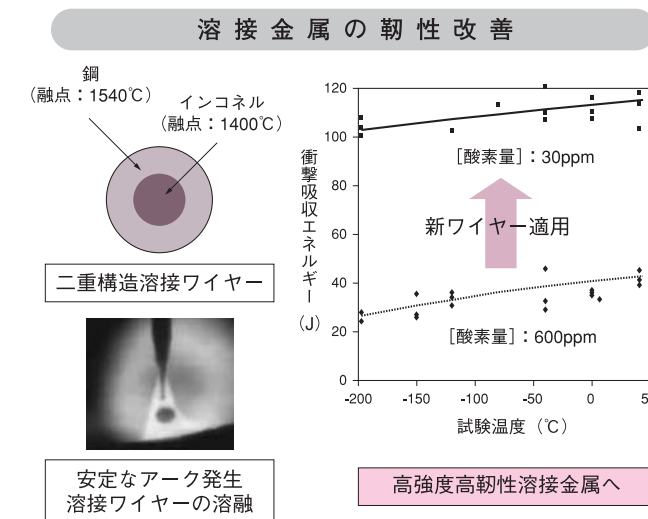
2 実用化を展望した第2期の取り組み

素材というのは、作っただけでは使えない。第2期は、素材の新たな可能性を引き出すためにどうしたらよいかを考え、エンドユーザーともう一度課題を再点検した。『エンドユーザーの声をよく聞いて実験を重ねる』というのが、基本的なスタイルである。プロジェクトとして、土木・建築、電力、自動車の3需要分野ごとに進めてきた。

土木・建築分野：主に橋梁を想定し、『軽量・耐震・長寿命の鋼構造』を研究課題に据えた。土木建築用材料として第1期の成果を活用するためにはどのような取り組みが必要か、ユーザー側の日本鋼構造協会などと話し合い、①高強度耐候性鋼への活用(弾性設計・損傷制御設計) ②溶接構造の改善(継手疲労強度向上設計) ③ボルト接合への活用という3つの提案を受けた。

鋼橋(スティールブリッジ)には海浜耐候性鋼は不可欠だし、鋼橋の需要は伸びている。いま、ニッケルを3%入れた海浜耐候性鋼はあるが、将来を見据えリサイクルする際に問題のない組成(ニッケルレス)への強い要求がある。1期に開発した0.8Al-0.8Siとい

図2 溶接鋼構造の高強度化イノベーションに繋がる新しい溶接ワイヤー



りリサイクル容易組成をベースとすることとした。この組成は連続鋳造が適用できる限界で、ニッケル鋼相当の耐候性を得られる。大型素材を作る上でのネックは、連続鋳造ができるかどうかである。アルミニウムをこれだけ入れて大きな溶塊を造ることは難しいが、既に約50キロ鋼片は試験的にできあがっており、次はトンクラスへの挑戦となる。

実は、この組成には脆くなりやすいという欠点がある。そこで、1期成果である超微細粒化技術によって、母材靱性を十分に確保し、さらに母材強度を800MPaまでにほぼ倍加した。

この素材の溶接靱性は、溶接熱影響部のボンド(接着部分)近辺が一番悪くなる。ボンド靱性を上げるためには炭素量を下げるのが常識である。出発した0.15%では性能があまり良くなく、0.1%に落としたが改善しなかった。そこで炭素量を上げてみたら、0.17%にした途端に靱性が上がった。後日、状態図等の検討から、炭素増量が理に適ったことであることが分かった。高アルミニウム、高シリコンという「非常識」な組成を扱ったことが、常識が適用しない事例の遭遇を招いたのは間違いない。

次に問題となったのが、溶接金属の靱性である。溶接ワイヤーというのは通常、ソリッドワイヤー(単一組成で同じ材料を線状にしたもの)が使われる。しかし、今回開発したのは、図2にあるように、既に溶接材料として使われているインコネルを軸に、高強度溶接鋼で周りを包んだ全く新しいコンセプトの二重構造である。従来は、溶接の際、無酸素状態ではアークが安定しないため、酸素を入れて溶接し、酸素増量の結果、靱性が落ちていた。今回のワイヤーを使うと無酸素状態での安定溶接が可能となり、高強度(HV400以上)で高靱性(吸収エネルギー100Jで脆性遷移無し)の溶接金属を実現している。

ボルト接合のために、1800MPaクラスのボルト成形に成功した(図3)。現場溶接施工が建設コストを押し上げている面があり、それが高強度ボルト要求につながっている。今後もし2000MPaクラスの高強度ボルトができると、接合方法が全く変わり、デザインの余裕度・おもしろさが増すということで、デザイン側からのさらなる高強度化要望は強い。

電力・エネルギー分野：この分野では石炭火力発電モデルを取り上げた。石炭火力発電はアジアで益々重要性が増すと考えている。

図3 鋼構造接合のイノベーションに繋がる超強力ボルトの試作

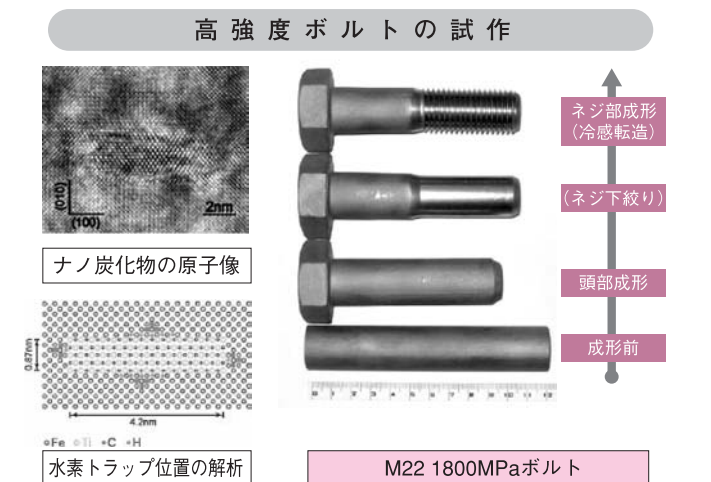
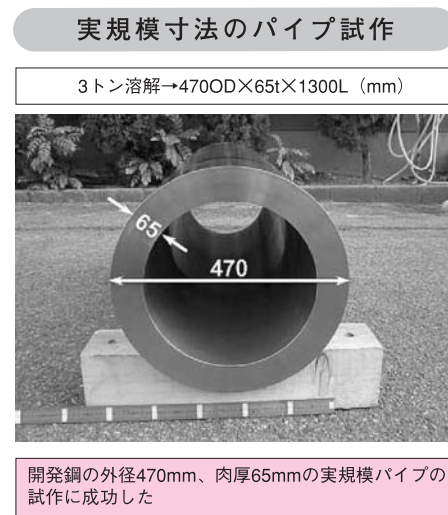


図4 発電効率イノベーションに繋がる高温用耐熱鋼パイプの試作



プラントメーカーや電力会社から受けた課題は、①長時間側で材料の強さが突然低下してしまう問題の解消 ②高温の水蒸気にさらされても水蒸気酸化のおそれがない材料の開発 ③溶接強度の低下を防ぐ方法などである。これらの課題に応え、より高温で使用可能な材料を開発することとした。

1期で開発された素材について、現在、目標となる「650℃で10万時間経過した強さ100MPa」の評価を行っている最中で、これまで得られたデータからはこの目標が達成できる見通しが立っている。

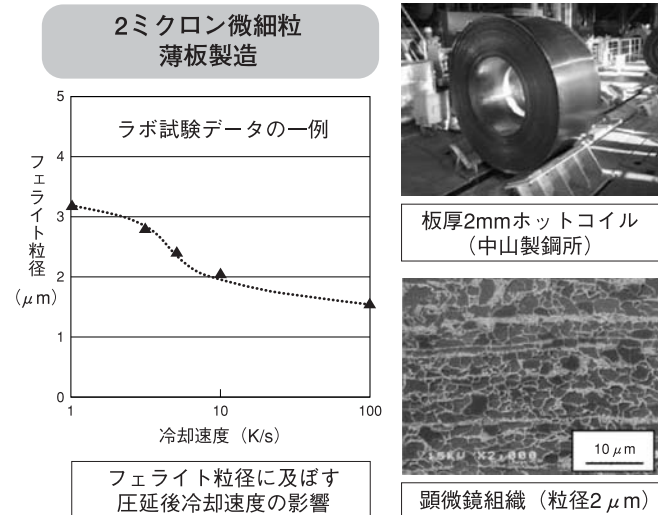
水蒸気酸化対策では、母材にシリコンをわずか0.3%添加することで十分効果を出せることを確認し、従来12%必要と言われていたクロム添加量を9%でも対応可能にした。これで水蒸気対酸化性を飛躍的に向上させることができた。

また、溶接についてはボロンの添加で溶接強度を母材並みに引き上げることができた。通常、溶接部分のクリープ特性は母材より劣る。クリープ特性は結晶粒が細くなるほど落ちる。通常、溶接部分の金属組織は細かくなってしまいが、ボロンを入れるとこの結晶粒径の変化を抑制し、溶接材のクリープ強度を母材と同じ性能にすることができた。「結晶粒径を変えないためにボロンを入れる方法」の発見は意外だった。

このように、650℃での使用において、長時間でも強度が落ちず、水蒸気酸化にも耐え、かつ溶接材のクリープ強度も落ちないという目標をカバーできた。さらにパイプ鍛圧メーカーの協力を得て、3トン溶塊を真空溶解、鍛造し、実径寸法のパイプ試作にも成功した(図4)。

自動車分野：この分野については「リサイクル」と「高延性」を念頭に民間企業との連携プロジェクトを進めた。具体的には、図5のような約2ミクロンの薄板を製造し自動車部材への利用技術などに寄与できた。中山製鋼が造ったコイルを川崎重工はハイドロフォーミング(液圧成形)ができるか試験し、さらに本田技研は溶接構造体の圧潰試験をした。ハイドロフォーミングでは最高約500MPaレベルまでで、最大拡張率40%というのが常識だった。このプロジェクトで検討したのは600MPaと700MPa超級である。これをハイドロフォーミングした結果、それぞれ最大拡張率が35%以上、30%以上という結果を得ており、この強度レベルでもハイドロ

図5 軽量安全自動車に繋がる高強度薄鋼板の製造



フォームが可能だという基礎データを確認したことになる。

これらの成果の一部を一般向けにまとめて単行本も出版している(「超鉄鋼 強度2倍×寿命2倍の実力と可能性」、日刊工業新聞社、2006年11月)。

3 これからの活動

「超鉄鋼プロジェクト第3期」はない。2期までで、実用化のための基礎・素材作りという目標を達成できた。プロジェクトとしては終了したが、もちろん研究が終わるわけではない。いままでの成果に重ねて、これからさらに数年かけてデータを蓄積していくべき課題もある。特に、開発した素材の安定性や信頼性確保が今後の重要な課題で、各分野でデータの蓄積を進める。その際にユーザー側と一緒にデータ蓄積していくことが非常に大切なポイントで、その過程で問題が生じればさらなる改善の研究をする、ということがしばらく続くと考えている。特に開発研究された溶接構造化技術については、多様な適用用途が想定されており、広範な適用可能性を探索するための新しい国家プロジェクトが企画されている。また、腐食・破壊データについては、アジア地域で国際連携の共通基盤を作ろうという機運が盛り上がっている。

鉄鋼に関する類似の国家プロジェクトが韓国、中国でも進められてきた。韓国では既に微細粒鋼で高層建築を計画的に建設している。中国では同様の動きがいつそう活発であり、強度レベルは低いですが、既に一定規模での生産体制に入っている。

プロジェクトを進めてきて、微細粒鋼もさらなるメリットを、というのが実感として残る。また、エンドユーザー側からさまざまな期待が微細粒鋼に寄せられている。民間レベルでのさまざまな挑戦にNIMSは積極的に関与していくことになる。

いずれにせよ、産業界のエンドユーザーと幅広く対話することで新しい共通課題を見出し、どういう材料が将来求められるのかを考える。そして今回のように、材料側から提案していくというスタイルは有益である。一方、素材産業が抱えている根本的な問題もおろそかにしてはいけない。材料の基礎研究所としてNIMSはさらに新しい課題の発見に尽力していく。