



新世紀構造材料研究プロジェクト

佐藤 彰
Akira Satou

科学技術庁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

Research Project on Structural Materials for 21st Century

1 はじめに

1987年8月に科学技術会議(内閣総理大臣の諮問機関)諮問第14号答申「物質・材料系科学技術に関する研究開発基本計画について」¹⁾が出され、それに基づいて約10年間、物質・材料系科学技術に関する研究開発が行われてきた。革新的な機能を有する物質・材料の創製、原理・現象に立ち返った理論的研究の体系的推進、研究開発のブレークスルーをもたらすような高度な共通・基盤的技術の開発が答申の基本的考え方である。この答申は、新素材の研究開発には順風であるが、大学及び国研における鉄鋼材料や溶接に関する研究には、いささか逆風と受け止めた向きもあったようである。

1995年11月に「科学技術基本法」²⁾が制定された。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を背景としている。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おり、「科学技術創造立国」を目指すことが示された。

1996年8月に本法を受けて「科学技術基本計画」³⁾が閣議決定された。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た。

1997年6月に前記諮問第14号答申のフォローアップ報告書⁴⁾が出された。「構造の制御」についての多くの技術発展が多く派生的研究を生みつつあると評価されることから、答申の策定意義は高いとされた。他方、総合的かつ基礎的な研究・開発が弱いという状況はまだ改善されておらず、遅れの克服がなお必要であることが改めて指摘された。

今後の研究開発の方針として、物質・材料系科学技術の深化そのものへの貢献と、社会的・経済的ニーズに対応した研究開発の両者を推進するための具体的事項を提言している。

1997年3月に「科学技術基本計画」に呼応して、金材技術は「第5次長期計画」⁵⁾を策定した。そこでは、研究所のミッションとして①「材料科学の基礎的・先導的研究」を一層強力に推進する、②国立研究所がなすべき責務を抽出し「社会的・経済的ニーズに対して積極的に対応」していく、③「国際的研究開発拠点として、材料研究の中心的地位を確立すべく基盤構築」を図る、を定めた。また、本稿で紹介する「新世紀構造材料(超鉄鋼材料)、STX-21: Structural Materials Xs for the 21st Century or Ultra Structural Steels)」研究プロジェクトを目標達成型基礎研究と位置づけた。すなわち、社会的・経済的ニーズが高く、既存技術の改善の積み重ねだけでは解決できず、ブレークスルーが求められる材料開発研究課題において、明確な目標を設定し、産学官の密接な連携を図り、長期的な展望の下で人的結集と資金的集中投入を行い目標達成を目指すプロジェクトである。

2 新世紀構造材料研究プロジェクトの社会的背景と研究開発目標

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⁶⁾。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。また、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。

今後とも鉄鋼材料は主要な構造材料として使用されるだろうが、今までになかった事態に直面することが予測されている。図1は人口、鉄鋼生産量、スクラップ発生量、社

会インフラの全投資に対する更新経費比率、人口に占める高齢者率の動向を予測したものであり、これによるといづれの指標でも2015年頃に大きな変化が到来する。また、その頃は高度成長期に建設した主要インフラ (Infrastructure) が築後50年を経過し、更新期を迎える時期にも当たる。インフラのメンテナンスコスト負担も急激に増大する。

近未来において、膨大な人口を有する開発途上国における国民1人当たりの鉄鋼材料消費量が先進国と同水準となると、鉄鋼の世界生産量は極めて膨大になり、資源・エネルギー問題や地球環境問題が一気に深刻化する。

これらを考慮すると、21世紀を支える鉄鋼材料は、以下の4要求を満たすべきである。①より一層の高強度と高安全性。②より一層の長寿命化。③革新的な製造技術の開発。④環境負担度の低減である。これらの要求を満たすべき新鉄系構造材料を「超鉄鋼材料」と名付けた。そして、「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」を超鉄鋼材料の目標に掲げることとした。

新しい素材の開発とその実用化には最短でも20年程度が必要であり、2015年を実用化目途とすれば、今において研究着手のタイミングはない。

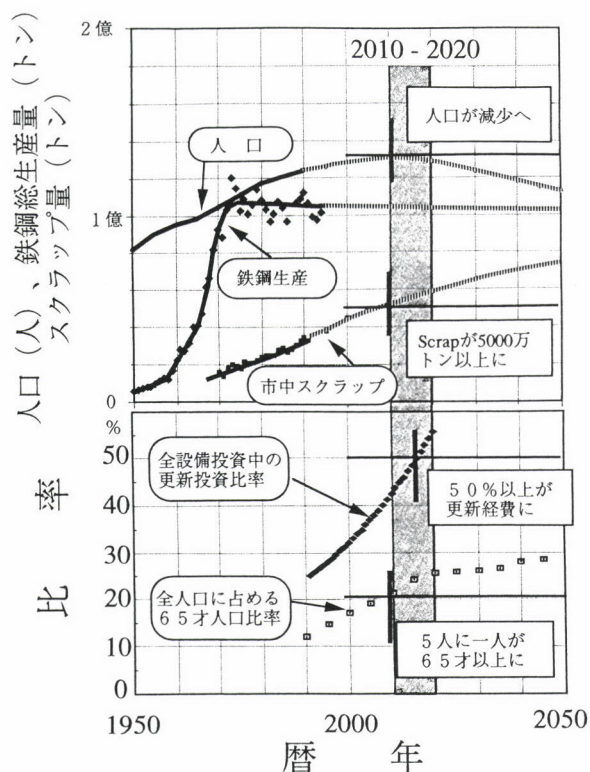


図1 人口、鉄鋼総生産量、スクラップ量、更新投資比率、高齢者比率の予測⁷⁾

3 プロジェクト遂行のための基本的枠組み

鉄鋼材料において日本に蓄積されている技術シーズと研究ポテンシャルを総結集できれば、上記の目標が達成でき、ジェネリックテクノロジー (Generic Technology) としてその成果を発信できる。総結集のためには集中研究サイトが必要である。民間、大学さらに他の国公立研究機関等と協力して、必要な英知の結集を図り、集中研究サイトとして、計画の立案・推進の主体となることは、金材技研の社会的責務であると認識した。そのために、1997年4月から金材技研内に研究組織として「フロンティア構造材料研究センター」を発足させ、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新たに創設された「構造材料特別研究員」制度等による民間研究者等が約20名、さらに客員研究官35名が集結できる場をまず作った。

技術シーズの深化と創製される素材の高性能化を重層的、連続的に履行せしめる、新しい仕組み、スパイラルダイナミズム (図2) を研究推進体制に導入することにした。基礎研究の第1段階としては、目標達成に向けた技術基盤を10~20kgの素材レベルで確立する。そのために、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を研究する「構造体化ステーション」、素材及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」の三つの研究組織を専門家集団として設置した。さらに、スパイラルダイナミズムを有効に回転させるため、具体的研究課題の総合的推進のための研究プロジェクトチームとして、課題遂行に必要な研究者

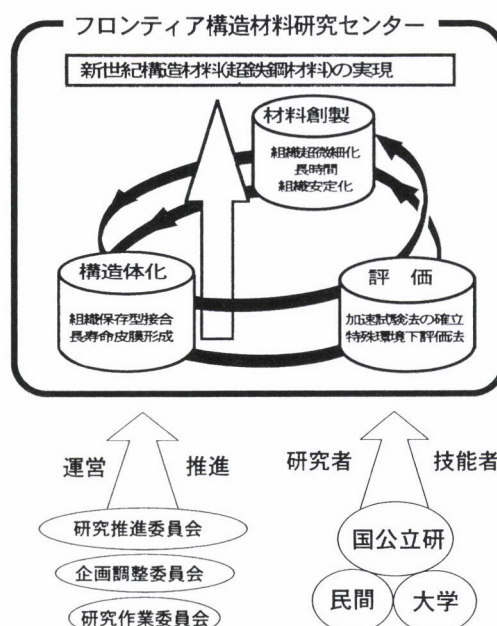


図2 スパイラルダイナミズムと開かれた研究推進体制⁸⁾

を各ステーションから組織し、研究開発情報が容易に交換できるように工夫した(図3)。また、構造材料の研究開発においては、社会的・経済的ニーズや実用化フェーズを常に把握することが必要不可欠であるため、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とした。

4 具体的研究開発課題

研究開発課題は、計画立案段階から企業・大学からの広い分野の専門家の協力を得て、絞り込んだ。結果的には、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、高強度化と長寿命化の2研究テーマとした。しかも、短期的かつ工業化のための研究開発課題は民間等に期待し、長期的、挑戦的研究開発課題に取り組むべきとした。最終的には、800MPa級フェライト・パーライト鋼、1500MPa超級高強度鋼、超々臨界圧発電プラント用フェライト系耐熱鋼、海浜海洋環境耐食鋼に関する研究を取り上げることとした。以下にそれぞれの内容を簡単に紹介する。

4.1 800MPa級フェライト・パーライト鋼への挑戦

建築、土木などの溶接用構造用鋼においては、引張強さ500MPaまではフェライト・パーライト鋼が使われ、それ以上ではベーナイトや焼もどしマルテンサイトを利用して高強度化していく体系がほぼ整備されている。

ところが現状では、500MPa級以上の高張力鋼の溶接継ぎ手疲労強度は、60から100MPaに止まり、母材強度の1割程度という低強度から脱却できていない。また、継ぎ手には疲労強度だけではなく靱性確保も不可欠であり、素材と

溶接プロセスの組み合わせ技術による問題解決のアプローチが望まれている。

大量使用材ではリサイクル性も考慮しなくてはならない。高強度化に利用されている合金元素には、再精製で除去困難なものが多い。資源的にも合金元素は貴重であり、これらの事情から合金化には慎重にならざるをえない。この観点では、組成的には低C-Si-Mn組成が有望である。また、この組成のフェライト鋼であれば溶接容易性も確保しやすい。そこで400MPa級フェライト・パーライト鋼相当の組成鋼をベースに800MPaに高強度化すること、同時に継ぎ手特性を改善する溶接プロセスを併せて開発することを挑戦課題とした(図4)。

着目した素材創製のキーテクノロジーは2つである。1つは、近年の結晶粒微細化技術の大幅な進展であり、もう1つは、オキサイドメタラジーに代表される第2相の積極的利用である。前者の示した端緒的成果は粒径がサブミクロン領域となってもホールペッチ経験則が成立することである。それに基づけば10 μ mから1 μ mへ微細化するとフェライト母相組織でも強度レベルを400MPaから800MPaへ2倍化できることになる。

しかし、単一組織では微細化による強度上昇は期待できても、良好な延性は見込めない。そこで、強度・延性バランスをとるために、フェライト・パーライト微細複相組織の可能性を追求することにした。また、微細化においては、結晶粒方位を制御した微細化を企図している。さらに、非調質鋼を念頭に置いているため、冷却過程での微細化を検討している。先行的な成果として、現在のところ、平均2 μ mの方位ランダム粒を微小サンプルで実現できている⁹⁾。

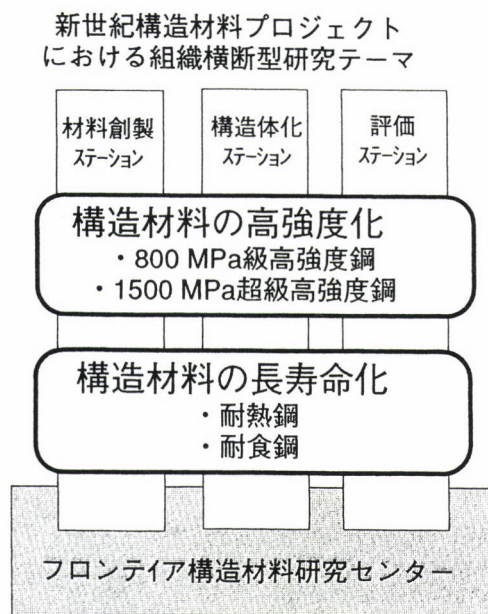


図3 研究組織(縦糸)と研究テーマ(横糸)

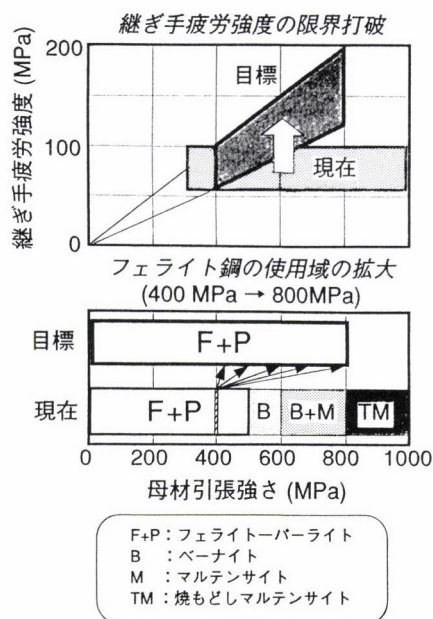


図4 溶接・リサイクル容易な800MPa鋼の研究開発目標

介在物、析出物などの微細第2相にも新たな役割を期待する。オキサイドメタラジーでは介在物などを經由してフェライト相が核生成することを利用しているが、ここではその効果の大きい第2相を探索する。さらに期待される効果は、加工ひずみの有効蓄積核、方位ランダム化に寄与する再結晶・変態核、粒界のピンニング核などとしての機能である。さらに、水素トラップ場所としても効果が期待される。溶接加熱時の熱的安定性という観点もこれらの複合効果として含まれる。問題なのは第2相をいかに有効に微細分散させるかである。粉末冶金、凝固プロセスなどの基礎的な研究での意欲的な取り組みを推進する必要があると考えている。

溶接プロセスでは、微細組織の破壊を最小限にとどめ、高効率で、信頼性に優れた技術の開発が必要である。すなわち、小入熱、高速、無欠陥プロセスを開発しなくてはならない。健全な溶接施行仕上がりはもちろん、熱履歴(急速加熱、冷却)に伴う組織変化、内部応力変化などの追跡・解析技術の開発、欠陥の有効な検出法の開発も同時に進める。

また、溶接継ぎ手特性の検討も重要である。特に残留応力制御の観点からは、低変態点溶接材を使用すれば、既存の高張力鋼においても継ぎ手疲労強度を大幅に改善できることをセンター内での研究で既に明らかにしている。

4.2 1500MPa超超高強度鋼への挑戦

高力ボルトを用いた新しい建築接合構造の実現、自動車部品の軽量化、超長大橋の建設などのため、1500MPaを越える高強度鋼の開発が求められている。開発の鍵は、1500

MPaを越える強度を実現する方法自体ではなく、強度の増加とともに著しく低下する遅れ破壊特性を向上させる技術や、強度の増加に見合う疲労特性の向上を図る技術などを確立することにある。工業材料として最強であるピアノ線のチャンピオンデータとしては、直径40 μ mの過共析鋼線で5.7GPaの高強度が達成されている¹⁰⁾。しかし、鋼中の微量水素によって遅れ破壊が引き起こされるため、高強度鋼の使用強度は制限されることが知られている。図5は、鋼中の拡散性水素を昇温分析する最近の成果¹¹⁾を基に、ボルトに使用される低合金鋼の遅れ破壊特性を模式的に示したものである。ボルトの締め付けを念頭に引張強度の0.9倍程度の応力を負荷した条件では、実環境からの侵入水素量約0.1ppmと、それ以下では遅れ破壊が生じないとされる限界拡散水素量とが一致する引張強度は、低合金鋼で現状ほぼ1000MPaである。過去に1300MPa級ボルトが規格されたが、現在ではその規格は廃止され、1000MPa級ボルトが多く用いられている。

また、ばね鋼などの高強度鋼の疲労においても(図6)、引張強度が1200MPa、繰返し数が 10^7 回を越えると、介在物等を起点とした内部破壊のため、疲労限の消滅、疲労強度の低下が明らかになりつつある¹²⁾。

本研究では、これら高強度鋼に特有な破壊に強い新金属組織創製を目指す。既に遅れ破壊に対しては、下部ベイナイト組織が優れていることが知られている。これに相当する組織を加工熱処理を工夫して創製し、粒界に炭化物が存在しないマルテンサイト組織を実現する。

疲労破壊に関しては、極低C-高Nマルテンサイト組織

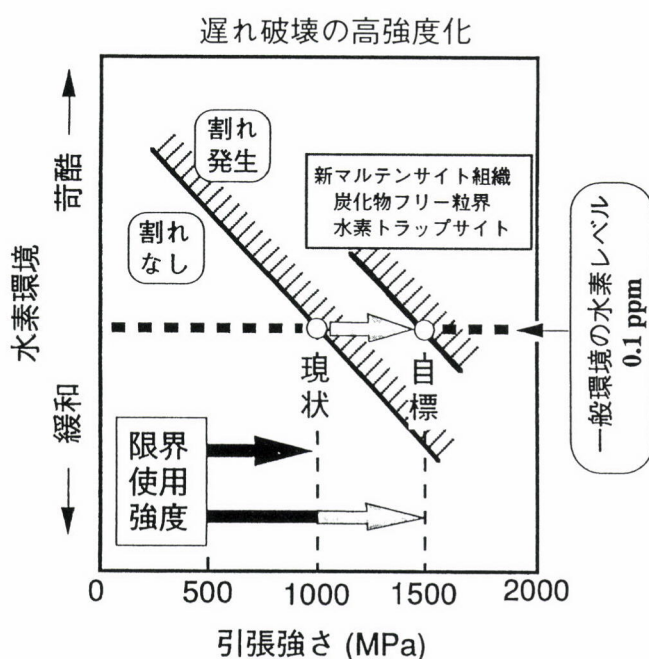


図5 遅れ破壊特性に優れた高強度鋼の研究開発目標

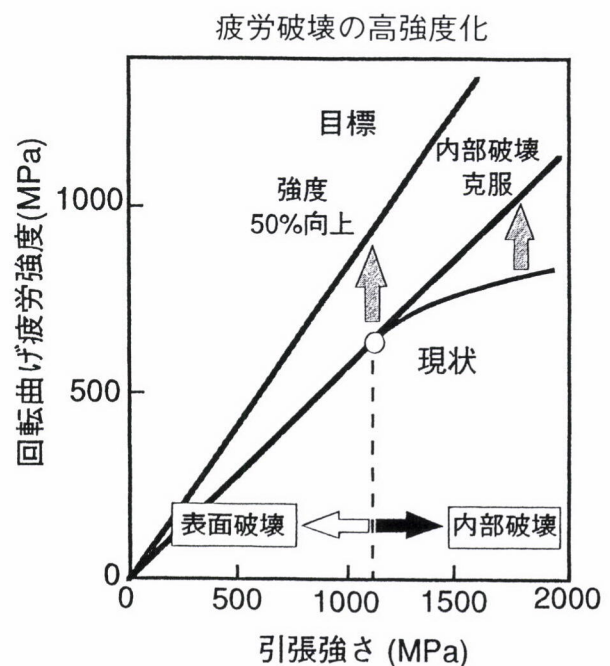


図6 疲労強度特性に優れた高強度鋼の研究開発目標

を検討する。金材技研における一連の疲労研究の成果として、例えば、極低炭素のステンレス鋼SUS316に窒素を添加していくと、窒素量が0.25mass%以上で、疲労き裂進展特性は突然向上し、有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} で約1.5倍、定常領域のき裂進展速度 da/dN で約1/5倍になることがわかっていく。この成果を汎用性の高い低合金鋼に適用したいと考えている。

AP-FIMを用いた原子レベルの微細組織の解析、STMやAFMの走査プローブ顕微鏡を用いたナノレベルの変形・破壊解析を基に、遅れ破壊や疲労破壊の本質を明らかにすることも重要な課題として取り組む。AP-FIMについては、既にピアノ線のFIM原子像を取得し、かつフェライト中のC原子分布を分析している。この手法をピアノ線の高強度メカニズムの解明及び鋼中の水素や窒素の存在状態の解析に適用し、遅れ破壊と疲労破壊の高強度化指針を確立する研究へと展開させる。走査プローブ顕微鏡を用いた破面解析も行っており、粒界上のnmレベルの析出物の形態と分布を明らかにする研究を精力的に進めている。

さらに、1500MPa超級の高強度鋼の長期信頼性を保証するため、遅れ破壊と疲労破壊の評価法の標準化やデータベースの構築をも検討する。これらの研究と併行して、高強度鋼の有効利用を図るため、微細組織を保存できる低温拡散接合技術並びに酸化繊維と粒子の複合による高剛性化技術にも取り組んでいる。

4.3 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

650℃、350気圧の超々臨界圧火力発電プラントの実現に向け、ボイラ系の主蒸気管や管寄せなどの大径厚肉鋼管として長時間使用可能な高Crフェライト系耐熱鋼の開発を目指した基礎研究を行う。1980年代から日米欧で石炭火力発電プラントの超々臨界圧化が進められてきたが、現在は600～620℃級プラントの実用化が検討されている。本研究では、さらにその次の高温プラントを目指す(図7)。650℃級プラントが実現すれば、発電効率は従来プラント(538℃、246気圧)の39.8%から43.0%まで向上し¹³⁾、エネルギー・資源の大幅節約や環境負荷低減・温暖化抑制に寄与できる。

主蒸気管や管寄せに要求される特性は、長時間クリープ破断強度、溶接性、靱性、耐酸化性、疲労特性、高温加工性など多岐にわたる。ボイラ用高Crフェライト系耐熱鋼の開発経緯をみると、600℃、10万hのクリープ破断強度が、1950年代の35MPa級(9Cr-1Mo鋼)から100MPa級(9Cr-1MoVNb鋼)を経て、最近では140MPa級(9～12Cr-MoWVNb(Cu)鋼)に上昇している。これらはいずれも微細な焼戻マルテンサイト組織をベースにしている。140MPa級の耐熱鋼は我が国で開発されたもので、我が国は欧米を相当

リードしているし、今後もフロントランナーとしての役割が期待されている。しかし、これらの140MPa級耐熱鋼も600℃までは十分な強度を有するが650℃では設計上十分な強度は得られない¹⁴⁾。焼戻マルテンサイト組織は高温長時間になるほど回復が顕著となり強度が低下するため¹⁵⁾、高温化や長寿命化にとって組織の長時間安定化は必須であり、これが基本戦略となる。

一方、鋼管使用の許容限界温度は耐酸化性でも決められ、上記フェライト鋼では620～630℃が限界と言われている。650℃級耐熱鋼開発にはさらなる耐酸化性向上が不可欠である。クリープ破断強度と耐酸化性はトレードオフの関係にあり、フェライト系耐熱鋼の限界のひとつである。さらに、素材のクリープ破断強度などの性能が溶接部でも確実に発現できるよう継手組織の最適化を行い、構造体の長寿命化に結びつけることも必要である。このためにプラント設計者とも連携し開発課題を明確にしながら研究を進めていきたい。

本研究では第1期5年間を小型インゴットを用いて基礎研究を行い、長時間組織安定化などの指導原理の確立を目指す。この成果を基に、材料大型化やプラント構造化を計る第2期応用研究へ発展させる。当面、(1)材料設計・創製、(2)溶接継手の高温強度と組織最適化、(3)耐酸化性、(4)クリープ強度特性、(5)疲労特性のサブテーマを設定して進める。

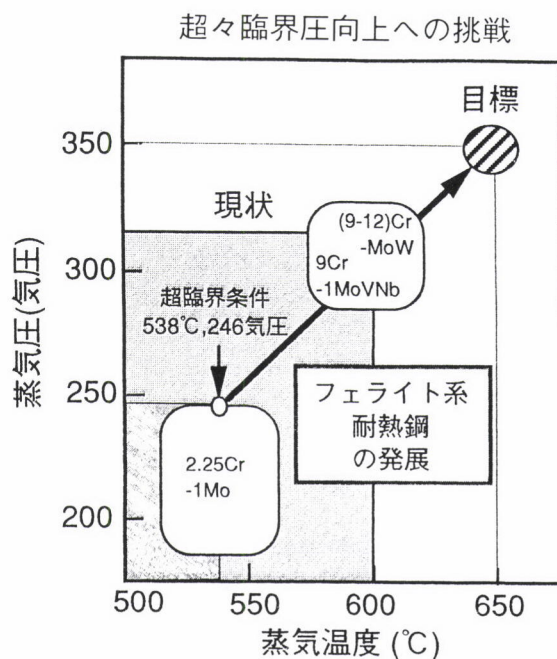


図7 超々臨界圧発電プラント用フェライト系耐熱鋼の研究開発目標

4.4 海浜海洋耐食鋼への挑戦

日本の多くのインフラ構造物は海浜域に集中し、さらに海洋へと向かっているが、海浜海洋域は鉄鋼に対して極めて過酷な腐食環境である。例えば、田園環境に置かれた耐候性鋼は数年たつと保護性のある安定さびを形成し、無塗装でも構造物として十分に実用しうるが、海浜環境ではさびが安定化しないことが多い。耐食鋼の代名詞であるステンレス鋼も海水中では孔食、応力腐食割れ、すき間腐食といったあらゆる局所的な損傷に悩まされる。海浜地域でも無塗装使用可能な汎用低合金鋼、耐海水性に優れたステンレス鋼および耐海水被覆の研究開発が求められるところである。

1) 海浜汎用鋼

大気に曝される構造物は塗装などの表面処理による防食が主流で、定期的な再塗装作業が不可欠である。このため、無塗装使用、メンテナンスフリーの材料が望まれている。耐候性鋼は橋梁等の構造物で無塗装で使用され、健全性を実証してきた。健全な安定さびは、内層部に銅を含む非晶質酸化鉄が生成して物質拡散の障壁になり、耐食性が得られるものと考えられてきた¹⁶⁾。しかし、30年間実環境使用されてきた耐候性鋼の安定さびの調査結果から、Crを含むゲータイト(α -FeOOH)が安定さびを構成する解析結果¹⁷⁾が報告され、耐候性鋼のさびに関する議論が再び活発化している。

図8に無塗装普通鋼の大気腐食に及ぼす大気中海塩濃度

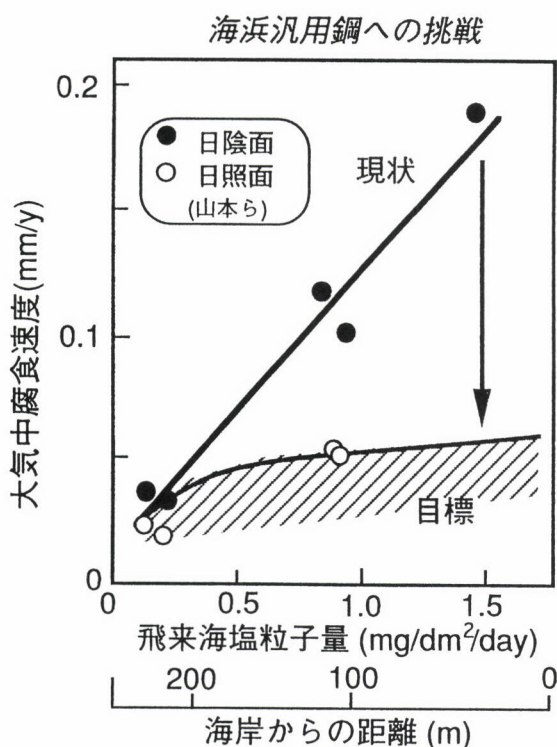


図8 耐食性に優れた海浜汎用鋼の研究開発目標

の影響を示す。海塩粒子が鋼へ付着すると、それに含まれるNaClやMgCl₂等の潮解性物質のため、陰になった部分の金属表面は常に濡れの状態にあり、腐食損傷が集中する。山本らは、海浜環境では特に雨が当たらない日陰部分での腐食量が高いと報告している¹⁸⁾。

海浜環境で無塗装使用可能な耐候性鋼を開発するため、添加元素としてのCu, P, NiやCrの効果の一つずつ明らかにしていく必要がある。これらの元素のさび中の分布、さびの時間による変化、さびのCl⁻等のイオン透過性への効果を調べる。このような目的から海浜性環境を主眼とした長期暴露試験を実施する。最近、注目されだしたさび安定化剤もイオン透過性との関連で解析・開発を進める。すなわち、海塩濃度が高くなっても安定さびができるような鋼あるいはそのための前処理法を開発することが目標である。

2) 耐海水性ステンレス鋼

Cr, Ni, Moなど資源に限りのある合金元素を増加させることなく、ステンレス鋼の耐海水腐食性を改善することに挑戦する。すなわち、窒素加圧雰囲気溶解により、Nを0.6%程度以上含むオーステナイトステンレス鋼の創製を試みる。Nにより不動態被膜が改善され、耐食性は著しく改善されると期待される。さらに、ステンレス鋼の腐食起点となる介在物生成を抑える目的から、C, S, P, Oを極限まで低減化することを試みる。このため金材研が有する超清浄溶解技術(コールドクルーシブル：高周波誘導の電磁力により、溶解金属を浮揚させ、ろつぽを用いないで加熱溶解する)を利用する。

5 おわりに

上記のように本プロジェクトの研究開発目標はひとつひとつ極めて挑戦的であるが、超鉄鋼材料の実現のためには、どうしても達成しなければならない。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、基礎技術研究開発を先頭に立って推進する決意を固めている。多くの方々のご協力とご支援を重ねてお願いする。

参考文献

- 1) 科学技術会議：諮問第14号「物質・材料系科学技術に関する研究 開発基本計画について」に対する答申、1987年8月
- 2) 科学技術庁：科学技術基本法について、1995年11月
- 3) 科学技術会議・政策委員会・研究開発基本計画等フォローアップ委員会(物質・材料系科学技術)：諮問第14号「物質・材料系科学技術に関する研究開発基本計画

- について」に対する答申のフォローアップ報告書, 1997年6月
- 4) 閣議決定: 科学技術基本計画, 1996年7月
- 5) 科学技術庁金属材料技術研究所: 金属材料技術研究所第5次長期計画, 1997年3月
- 6) 林 明夫: ふえらむ, 2 (1997), 245, 320, 401, 497, 580.
- 7) 石井利和: ふえらむ, 2 (1997), 863.
- 8) 石井利和: ふえらむ, 2 (1997), 725.
- 9) 鳥塚史郎, 梅澤 修, 津崎兼彰, 長井 寿: 材料とプロセス, 10 (1997), 1380.
- 10) 落合征雄, 西田世紀, 大羽 浩, 川名章文: 鉄と鋼, 79 (1993), 1101.
- 11) 「遅れ破壊解明の新展開」, (社)日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会 高強度鋼の遅れ破壊研究会, (1997).
- 12) 金材技研材料強度データシート資料9「高硬度鋼の疲労特性」, 金属材料技術研究所, (1995).
- 13) 鴻上享一, 伊坂 弘: 鉄と鋼, 76 (1990), 1043.
- 14) 増山不二光, 石原岩見, 横山知充, 藤田正昭: 火力原子力発電, 46 (1995), 498.
- 15) 田中千秋, 八木晃一: 鉄と鋼, 80 (1994), 255.
- 16) 岡田秀弥, 細井祐三, 湯川憲一, 内藤浩光: 鉄と鋼, 55 (1969), 355.
- 17) 山下正人, 幸 英昭, 長野博夫, 三沢俊平: 材料と環境, 43 (1994), 26.
- 18) 山本正弘, 田辺康児, 宇佐見明, 紀平 寛, 都築岳史, 増田一広: 腐食防食, D107 (1995), 393.
- (1997年10月3日受付)