



アラカルト

ヨーロッパにおける耐熱鋼・耐熱合金の開発状況

Development Status of Heat Resistant Steels and Alloys in Europe

増山不二光

Fujimitsu Masuyama

九州工業大学 大学院工学研究科
機能システム創成工学専攻 教授

1 はじめに

表題の「内容」で執筆依頼を受けたとき、深く考えずにこの「内容」をそのまま題目にして承諾した。期限が過ぎて依頼内容を見てみると、「原稿の種類：アラカルト」となっていた。日頃まじめに「ふえらむ」を読んでいないので、「アラカルト」とは何だろうと思い、既刊をめくってみると滞在記や随筆風のもの（技術記事も勿論ある）が多い。題目からして、「解説」を書くものと思っていたので、「アラカルト」原稿への頭（モード）の切替えにとまどった。「解説」風の題目になっているが、ヨーロッパにおける耐熱鋼・耐熱合金の開発に接して経験したこと、感じたことを書かせていただきたい。

2 Competitiveな開発

耐熱鋼・耐熱合金の用途は、火力発電プラント、原子力・高温ガス炉・新型炉、石油・化学プラント、航空機エンジン、核融合炉、燃料電池、自動車など多いが、ここでは火力発電プラント用材料に絡む話をしたい。ヨーロッパでは、1920年代初めから耐食用途のステンレス鋼や12%Cr鋼が開発され、その後改良されながらも世界標準材として今でも使われている。火力発電プラント用材料の開発についてみると、活発だったのは1950年代であり、蒸気温度を650℃に上昇させるために開発された15Cr-15Ni系の高強度オーステナイト鋼が有名である。当時は英国、ドイツ、フランス、スウェーデンの鉄鋼・鋼管メーカーが競って開発した材料が4種類あり、全てが実用されたわけではないが、一部は実際に蒸気配管や高温過熱器などに使用された。この中には炭化物強化だけでなく金属間化合物強化を利用した材料もあり、現在の700℃級プラント用オーステナイト鋼の開発に示唆を与え興味深い。9-12%Crフェライト系鋼の研究も1970年代初

めにかけて活発に行われた。7%Cr系鋼も研究されたが、実用にはならなかった。

フェライト系鋼について言えば9%Cr鋼として δ -フェライトと焼戻しマルテンサイトの2相鋼である9Cr-2Mo-0.3V-0.4Nbがフランスで、また、12Cr-1Mo-0.5W-0.25Vがドイツで開発された。両者（12Cr鋼はWを含まない鋼種）ともヨーロッパで実用され、特に後者は、日本と米国を除く各国で大量に使用された。日本のメーカーも製造し輸出した時期がある。しかし、ヨーロッパでは1970年代になって新たな開発をしなくなり、ドイツとスウェーデンのメーカーは、特にその12%Cr鋼の売り込みに力を入れることになった。これはプラントの蒸気条件が、550℃以下に抑えられ、新たな材料開発を必要としなくなったこともその理由である。研究開発が継続しなくなったために、前者の9%Cr鋼は、現在世界中で大量に使用されている先進耐熱鋼のはしりの米国開発9%Cr鋼（VとNbがそれぞれ0.25%、0.05%に適正化され、Nが0.05%添加された）に遅れをとることになった（もっとも米国の9%Cr鋼ももともとFBR用として開発されていたものであり、火力用として開発されていたわけではない）。後者の12%Cr鋼もW含有鋼を規格材として持ちながら、1980年以降に日本が主導権を取ったW含有鋼の研究に取り掛かったのは1990年半ばになってからである。フランスのメーカーは米国開発9%Cr鋼の生産を始めると自社PR誌でその開発の源は前者の9%Cr鋼であると言ひ、また、なぜか当時ドイツのメーカーは後者の12%Cr鋼のWを含まない鋼種の販売に固執して、Wの強化はないと言っていた。また、同社の12%Cr鋼開発者が現役であるころまでは、それよりもはるかに強度が高く、世界中に広まりつつあった米国開発9%Cr鋼の研究と製造にも取り掛からなかった。

1980年後半以降、筆者はドイツのメーカーとWの効果について盛んに議論した。彼らはWの効果はないのだと強く主

張していたが、1990年代半ば以降、W鋼が広まるとすぐにその製造メーカに変わった。現在では、フランスのメーカと合併し日本で開発されたW含有9%Cr鋼を世界中に製造販売している。生産実績は2万トン以上になるという。当時、W有無の2種のドイツ規格材をクリープ試験し、0.5%のW添加によってクリープ破断曲線が約10 MPaくらい平行に上昇することを確認したが、そのときはすでにW鋼の製造を始めており、彼らはもうWの効果について議論する気はなかった。

ヨーロッパの材料メーカでの開発は、1970年代半ばまでは独自に、また競争的に行われていたが、それ以降は開発の様相も変わった。最近の開発状況については後述するが、大学でも独創的な研究が行われた。スイス連邦工科大学の高Bあるいは高Nフェライト系鋼の研究は興味深いもので、高压溶解で約0.2%のNを含有させた12%Cr鋼は大幅にクリープ強化されるとともに著しい耐酸化性を示すことが報告された。そこで、これは大変な開発につながるのではないかと思い、1万時間以上の酸化試験を行ったところ1万時間を越えて酸化皮膜が破壊し、所期の耐酸化性は得られず、それ以上の研究は断念した。肝心のヨーロッパでも研究のままで終わって今に至っている。もう一つの興味深い大学の研究としてケンブリッジ大学のニューラルネットワークによって合金設計した9-12%Cr鋼の提案があった。その材料は、最強の既存鋼の2、3倍の強度を持つという報告であった。筆者はこれにも興味を引かれ、実際に提案の材料を溶かし、クリープ試験を行ってみた。その結果、実際の強度は既存鋼の上限でしかなかった。試験片は予想よりも短時間で破断するので、長時間の強度を確認するために、次々に低応力の試験を追加せざるを得なくなり、多数のデータを取得する羽目になった。この予測と実測の食い違いは興味あるところなので、合金設計した研究者と一緒に論文にして発表する予定である。

③ Collaborativeな開発

1970年以降EC（ヨーロッパ委員会）が科学技術の研究開発でも本格的に機能し始めたためか、ヨーロッパ内同士でのcompetitiveな開発は次第になくなっていったように思う。実用になるまでは一緒に材料開発をする、Pre-competitionという考えがあることを知った。筆者が付き合っていた発電用ボイラやタービンの材料研究者は、特に1980年以降、競争会社（例えば、当時のKWU、MAN、ABBなど）の研究者がみんな仲良く集まって議論し、論文を共著していた。これは、1981年にスタートしたCOST501や1983年にスタートしたCOST505共同研究のためである。COSTはCooperation in Science and Technologyの略であるが、材料研究として

はCOST50（ガスタービン）から始まり、1978年からオリンピックの中間の4年ごとに研究成果報告のための国際会議が開かれている（写真参照、写真は独ユーリッヒ研究センターの御好意による）。最近では世界中の耐熱鋼・耐熱合金の研究者が集まる会議なので、日本からの参加者も多い。従って、このアラカルト記事の目的である開発状況は、4年毎の分厚い（最近では約1800ページを3分冊にした）論文集に日米欧の3極（昨年は中国を加えた）のレビュー講演論文があるので、ヨーロッパの分をみればそれで済むことになる。

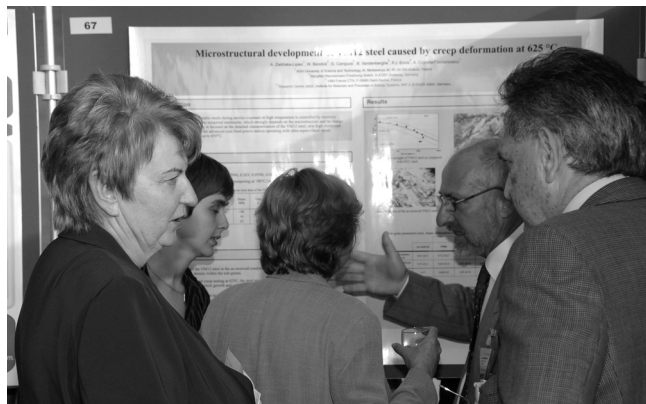
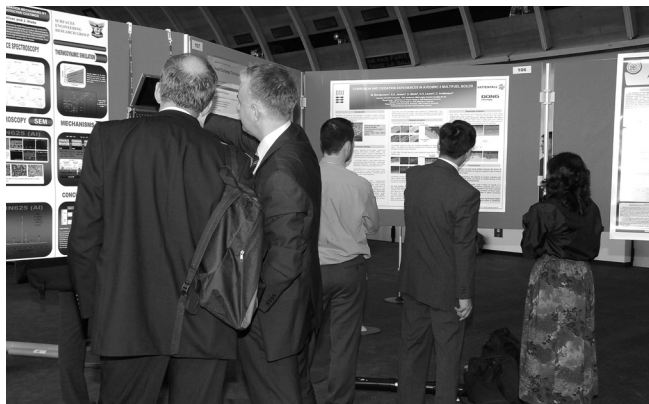
COSTは材料メーカ、機器メーカ、電力および大学・研究機関の共同研究であり、連携は極めて強い。大学の研究者も実際の機器のことをよく知っており、企業の研究者も基礎や学理をよく知っている。開発のモチベーションが最も高められたのはCOST501やCOST505からと思う。同じ1980年代初めに米国電力研究所（EPRI、Electric Power Research Institute）の超々臨界圧発電の開発プロジェクトがスタートし、日本でも電源開発（株）のプロジェクトがスタートしたからである。特にEPRIプロジェクトは3極の研究者が共同で取り組んだので協力関係はヨーロッパだけにとどまらず、前述の米国開発9%Cr鋼の浸透と日本で開発されたさまざまな耐熱鋼の欧米への紹介が始まった。

ヨーロッパはCOST505（1997年）で9-12%Cr系フェライト鋼の600℃用を、そしてCOST522（1998-2003年）で620℃用を、COST536（2004-2008年）で650℃用を開発しようとしている。そこでは日本の開発材料群に対してcompetitiveな開発が行われている。ボイラ用には米国、日本の開発材をそのまま製造販売する一方で、competitiveな9-12%Cr系と2.25%Cr系のフェライト鋼、そして22.5%Cr-25%Ni系のオーステナイト鋼を、また、タービン用には独自のWを含まない10%Cr鋼を開発している。これらは、1990年代後半以降の動きである。12%Cr系は9%Cr系に比べクリープ強度を高めるのが難しいが、ヨーロッパでは耐高温酸化・腐食の面から12%Cr鋼に愛着があって開発が続けられている。さらに、22%Crフェライト鋼をNb系金属間化合物で強化して現在最強のW含有9%Crと同じくらいに強くする開発も最近行われている。

1998年のヨーロッパの700℃級発電プラントの開発プロジェクト（THERMIE AD700）の開始には本当に驚いた。700℃プラントは当然Ni基超合金を使うが、700℃に至る過程の機器にはフェライト鋼やオーステナイト鋼も使われ、さらなる耐久性を求めている。Ni基超合金は既存の合金を改良することで耐熱性の向上と大型部材の製造を可能にしようとしている。タービンロータにはAlloy617の、主蒸気配管にはAlloy263やAlloy617の、過熱器にはAlloy263やAlloy740のそれぞれ改良材が開発され、実用レベルでの特

性評価が行われている。700℃実現への熱意は強く他にも多くのプロジェクトが実施されており、ヨーロッパでの材料

メーカー、機器メーカー、電力および大学・研究機関の研究者の連携は見事であると思う。



COST Conferenceは4年毎にベルギーのリエージュで開催される。一般論文はすべてポスターで発表され、期間中熱心な議論が続く。写真は2006年9月の第8回の会議。以下同。



口頭発表はすべて招待講演で、最終日に日米欧の発電プラントと材料の展望講演がある。筆者は1998年から3回続けて日本の展望講演をしているが、700℃プラントで欧米に先を越され、挽回の必要を感じている。



会議の合間には大きな船が行き交うムーズ川 (La Meuse) を見下ろすロビーで話が弾む。日本参加者の活躍は目覚しく、ポスターの最優秀論文賞受賞も多い。写真は前回に引続き受賞された防衛大近藤教授らを囲む会議バンケットの席。

参考文献

The 8th Liège Conference 'Advanced Materials for Power Engineering 2006' ホームページ,
Juelich Research Center Website : <http://www.fz-juelich.de/iwv/iwv2/liege/>

(2007年7月2日受付)