



アラカルト

日本における耐火鋼開発の黎明

Dawn of Fire Resistant Steel Development in Japan

作本好文

Yoshifumi Sakumoto

新日本製鐵（株） 建材開発技術部
審議役

1 耐火鋼の発案と開発の経緯

耐火鋼（Fire Resistant Steel）は、新日本製鐵（以下新日鐵）が他社に先駆けて1988年に開発した建築用鋼材である。その後、高炉各社の参入もあり、現在に至るまで累計100万トンを超えるヒット商品になった。本稿では、耐火鋼開発の経緯を発案者である筆者から紹介する。詳細は文献¹⁾を参照されたい。

建築技術者にとって、「錆びない鋼」と同様「火災に耐える鋼」は長年の夢であった。

鋼材は火災による加熱で強度が低下することから、断熱材（耐火被覆材）で保護することが建築基準法で厳しく義務付けられている。耐火被覆材には、一般に吹き付けロックウール（写真1）が用いられるが、これでは鋼材を意匠的に活用出来ない。

地震の少ない欧州・北米では耐火研究が盛んで、例えばコルテン鋼®を柱に使った旧USスチール本社ビル（写真2）で

は、コルテン鋼の外観を見せるために、耐火被覆の代わりに柱内に水を循環させた、水冷鋼管柱（Water Cooling Tubular Column）を採用している。このような耐火被覆代替工法のひとつに、鋼管コンクリート柱（Concrete Filled Tube、以下CFT）がある。写真3に、欧州の二重鋼管CFTを示す。

CFTは、外側の鋼管が加熱されて強度を失っても、内部のコンクリートで荷重に耐えることが出来る。筆者は、1985年当時、新日鐵の建設部門でこのCFTの開発に取り組んでいた。現在では高層ビルの柱に数多く採用されているCFTは、当時は最先端技術であり、PCI（微粉炭吹き込み）やCDQ（コークス乾留）などのトップヘビーな製鉄設備の柱に採用され、設備の剛性アップを図っていた。筆者は、CFTに付加価値を与えようと欧州の耐火研究に注目していた。1986年11～12月、45日間の欧州9カ国調査を実施し、フランス鋼



写真1 吹き付けロックウール



写真2 旧USスチール本社ビル

構造協会より、当時のクルゾロワール社による、Cr-Mo鋼による耐火鋼研究の報告書²⁾を入手した(研究のみで実用化していない)。この報告書が筆者に、「コンクリートに頼らず、合金鋼で無耐火被覆が出来ないか」との思いを募らせた。

折しも建設省では、総合技術開発プロジェクト(以下、総プロ)「建築物の総合防火設計法」の開発(1982～1987)³⁾が進められており、高温でも強度が保持出来れば無耐火被覆を可能とする設計法が実用化されつつあった。新鋼材の出口がここにあった。

筆者は早速、本社の厚板技術に電話しCr-Mo鋼の価格を聞くと、トン数十万円と言われた。ここで諦めず、以前在籍したA製鉄所の製鋼部の同僚に問い合わせたところ、合金だけならそんなにしないと聞いた。意を強くし開発は厚板からと、製鉄所回りを始めた。最初は特殊鋼の得意なB製鉄所、次は勤務地に近いC製鉄所と回ったが、高温強度の目標値も曖昧で熱意だけでは相手にされなかった。最後に訪れたのが、建設用厚板が厚板生産の半分以上を占めていたD製鉄所であった。

D製鉄所には、パイプライン向けのControlled Rolling(CR)や、NbやV、Tiなどの微量でも強度韌性に効く元素を有効に使ってのHigh Strength Micro Alloy Steel(HSMA)の技術があった。後から聞いた話だが、対応した厚板管理室長は、「若い人の話で実現性はわからないが、熱意を評価し取りあえず技研(製鉄所の技術研究部)で、パイプラインの在庫を使って高温引張試験をやってみようか」とのことだったようだ。その熱意が耐火鋼の開発をスタートさせたのである。



写真3 鋼管コンクリート柱 (CFT)

2 鋼材開発

ところがここでタイミング良く、耐火鋼を使ってみようと言う社内物件が出て来た。第2新日鉄ビル(写真4)である。当時の建築事業部(現、新日鉄エンジニアリング)が1988年着工で設計を進めていた。設計担当は筆者と同じ建築技術者で、旧知の間柄であった。彼は、この物件にまだ開発中の耐火鋼を使う方向で、現場所長の説得に入った。しかし、まだ鋼材のスペックすら決まっていなかった。

鋼材は火災時に、降伏点の常温規格値の2/3に相当する荷重を保持することが要求され、その温度が耐熱温度となる。そこで技研の高温引張試験結果から、建築用鋼材に求められる常温強度特性と経済性を考慮し、耐熱温度は高い方が望ましいが600℃に設定した。このようにして、研究炉で目途を付けても、実際に300トン転炉で出鋼してみないと生産技術上の課題が残る。また、建設省の認可を取得するには、柱・梁の実大の耐火試験が必須で、早速試験用の厚板が必要となった。一方、第2新日鉄ビルの着工は迫ってくる。

ある日、厚板管理と技研のメンバーに筆者が加わり、出鋼成分系を協議した。

筆者は、火災の継続時間が最長で3時間であることからCrの添加は不用であると提案した。厚板管理・技研は、微量Nb添加により耐火性を安定・改善させる効果を狙い、最終的にMo-Nb系を基本とする成分系が決まった。写真5は、後にAP-FIM(アトムグローブ電界イオン顕微鏡)で析出物を調べた結果であり、MoがNb窒化物の周囲に偏析してNb炭窒化物の成長を抑制していることが判明した⁴⁾。出鋼・圧延は大成功で、一発で50キロ(490MPa)耐火鋼の目標をクリアした。



写真4 第2新日鉄ビル

3 建設省認可取得への道のり

今度は筆者が頑張る番であった。最初の出鋼で目標特性をクリア出来、早急に認可を取得することとなったが、このような全く新しい開発では、いきなり認可申請ではなく事前の研究会が必要となる。そこで、学識経験者・建設省建築研究所・ゼネコン等の方々の参加を仰ぎ、社内に研究会を設置し、7月から翌1989年の1月まで審議を行った。この研究会には鋼材開発部署も参加したことは言うまでもない。この期間が最も大変で、鋼材の性能は厚板の技術者から提示されるが、溶接材料および高力ボルトの開発とその接合部試験、柱・梁の実大耐火試験、骨組みの熱変形解析など、建築に必要な試験・解析の全てがこの半年に集中した⁵⁾。半年でこれら全てを行うなど、今では考えられないスケジュールである。

従来の耐火試験は加熱試験で鋼材の温度のみを測定していたが、耐火鋼は高温強度が売り物であるため、荷重をかけて加熱する。このような試験は昭和30年代に実施されたことがあるが、昭和60年代の当時では誰も経験が無かった。試験が出来るのは日本に2か所だけで、新日鐵は、半年から1年の間、この2つの試験所の炉を借り切った。

印象深かったのは、建材試験センターでの試験であった(写真6、同、梁用炉)。センターの所員が非常にナーバスになっていて、最初の試験は朝から始めるというので詰めていたが、いつまでたっても始まらず、とうとう夜になってしまった。センターは翌日にしたいと言い出したが、研究会の真最中でデータ遅れは許されない。何が何でも今日中の試験を譲らず帰ろうとしなかったら、夜の10時に漸く始まり真夜中に終わった。彼らもさすがにプロだった。

建設省認可にも思い出がある。認可には事前に日本建築センターの技術審査が必要だが、事前にきちんと社内研究会を行っていたので、比較的スムーズに終了した。問題は建設省で、全く新しい鋼材なのでなかなか認可が下りない。手続き的には建築センターの審査が終わっており、何の問題もない筈なので、建築センターの課長と筆者の二人で建設省に押し

かけた。担当の課長補佐から何時間も待たされてとうとう夜になり、建設省の地下の食堂で夕飯を食べ待ち続けた。ようやく夜の10時頃だったか会ってくれ、その後認可された。

4 第2新日鉄ビルと厚板工場の苦労

第2新日鉄ビルへの採用もそうすんなりと決まった訳ではない。

前述のように、トップスピードで走ったのはこのビルがあったからであるが、ところが、設計が採用しようとしても現場の所長がなかなかOKを出さない。本社の会議室で、厚板技術部と筆者で現場所長と睨み合いをしたことがあった。結局、筆者らの熱意が現場所長の決断を引き出し、第2新日鉄ビルそして耐火鋼を実現させることになった。現場所長の決断、建設省の認可を経て、D製鉄所厚板工場に耐火鋼の注文が入り本格生産が始まった。だが最初は苦労した。

開発では作る板の寸法が限定されるが、オーダー生産となると全板厚に渡って様々なサイズが入って来るので、当初は相当苦労することになった。特に板厚が薄くなると、プロセス条件に対する材質の感受性が高まり、慣れるまでは薄手で相当材質不具合を出した。普通のCR材と違い、ベイナイトが出現する系の特徴であるが、圧延温度を下げると強度が下がり、上げると上がるというように逆に反応し、随分戸惑うことになった。

写真7に圧延終了温度による鋼板ミクロ組織の変化を示す⁴⁾。ミクロ組織は、圧延終了温度800～950℃でフェライト・パーライト組織である。これより低温側では加工フェライトを含むフェライト・パーライト組織、高温側では粗大なフェライトとベイナイトの混合組織である。このように、圧延終了温度によってミクロ組織は大きく変化し、これに伴って鋼板の機械的性質も変化する。したがって適正な圧延温度

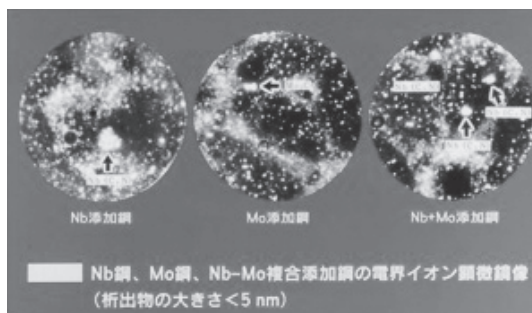


写真5 Nb鋼Mo鋼Nb-MO複合添加鋼の電界イオン顕微鏡像

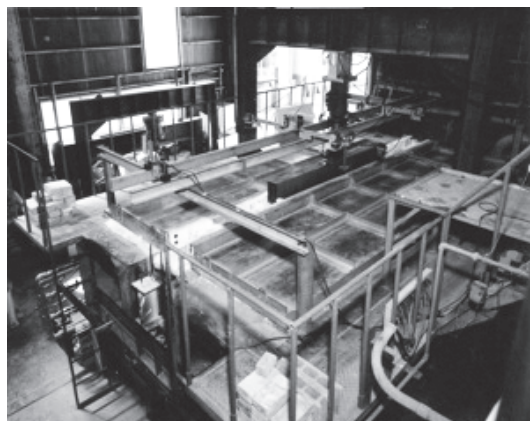


写真6 建材試験センターの梁用炉

は、目標とする引張特性・靱性などの諸特性を総合的に考慮して決めなければならないわけである。

5 形鋼・溶接材料・高力ボルトの開発

建物は厚板だけでは出来ない。建物全体に耐火性を持たせるには、形鋼、接合部材である溶接材料・高力ボルトにも耐火性が必要となる。厚板、形鋼と溶接材料(日鐵溶接工業、現：日住溶接工業)、高力ボルト(日鐵ボルテン、現：NSボルテン)でプロジェクトチームを組んで開発を進めた⁶⁾。H形鋼はD製鉄所の大形工場、シニアH(大型H形鋼)から作った。溶接材料の開発は、厚板の新製品では常に開発を行う鉄鋼研究所接合研究センターでスムーズに進んだ。ボルトに関しては、厚板の技術者とこの種の共同開発の経験がなく大変であったが、何とか間に合わせることが出来た。

6 苦労した初期の建物⁷⁾

耐火鋼の物件が幾つか完成していく中で、特に苦労し話題が多かったのは、P&G日本本社テクニカルセンター(以下P&Gビル、写真8)である。

構造設計段階から使用鋼材の厚さは100mmと決まっており、そこに耐火鋼というものを使ってみたいという有難い話であった。従って耐火鋼の採用を前提に、仕様通りの鋼材が出来るのかどうかと言うやり取りだった。

強度だけであれば、高温強度を含めて100mmの鋼材を圧延のままで作るとは出来た。しかし、厚板としては破壊靱

性の観点からシャルピー衝撃試験値を満足する必要があった。厚さ100mmを圧延のままで作ると強度は出るが靱性が余りにもお粗末で問題だということになり、結局、圧延後に制御冷却を組み合わせ、靱性も出すようにしようということになった。

議論が白熱したのは、溶接法についてであった。100mmのボックス柱の製作では、SES(消耗ノズル式エレクトロスラブ)溶接が一般に用いられる。スキンプレートが100mmでは、ダイアフラムも厚く、SES溶接の2電極で溶接すると入熱が110～120万ジュールになる。一方設計のスペックに、溶接部でシャルピー試験値、0℃、2.8kgf・m以上が明記してあった。100万ジュールを超えるような溶接入熱で0℃、2.8kgf・mは不可能である。耐火鋼だからではなく、普通の建築用鋼でもクリア出来ない。耐火鋼では少しは良くなるがクリア出来るレベルではないということを説明すると、担当課長も納得して、ボックス柱のダイアフラム、梁、力がかかる方向については、2電極のSES溶接はやめたと聞いている。写真9に実施した実大の柱-梁接合部の溶接試験を示す。

千葉そごう駐車場(現：オーロラシティパーキング)の場合はゼネコンの現場の所長が耐火鋼に着目したことがきっかけで、1989年には新日鐵との勉強会がスタートした。評定委員会で耐火鋼化が認められれば、耐火被覆をゼロに出来る可能性があり、ゼロになれば建設コストの低減や、建物のデザイン性の向上の点で、魅力的だということから、比較的スムーズにプロジェクトが進んだといえる。

実績が増えていった中で、筆者の印象に最も強く残ってい

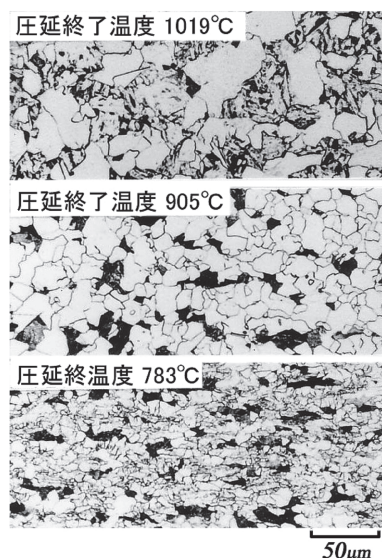


写真7 鋼板のミクロ組織に及ぼす圧延終了温度の影響



写真8 P&Gビル

るのは、飯倉ケイワンビルの外部鉄骨をめぐっての建設省とのやり取りである。第2新日鉄ビルから2年ほど後のことだが、飯倉にケイワンビルという、世界的に著名なイギリス人建築家リチャード・ロジャース氏設計のビルが計画された(写真10)。雑誌で「宝石箱」と絶賛されたビルである。

このビルは、P&Gビルと同様、柱・梁を外に出した外部鉄骨である。室内からの火災では鉄骨温度は600℃以下なのだが、「周辺市街地の火災からの熱を受けるので無耐火被覆は出来ない」と、建設省から言われた。周辺は準防火地域で法的には木造建物の密集も有り得ると言う訳である。実際の飯倉交差点に木造建物などはない。施主の不動産会社が怒っ

て、建設省に圧力をかけようと言い出すのを必死で止めた。

建設省とは、市街地火災の計算予測方法を作ることを話し合っていたが、不動産会社がリチャード・ロジャース氏に直訴して、ロンドンの大使館経由で外務省に伝わり、筆者が外務省から呼び出しを受ける羽目になった。折しも、日英間は貿易問題でもめていた。

その後計算予測方法が出来上がり、その結果無耐火被覆が認められたが、これだけ苦労したのにバブルが崩壊して建設は中止…鉄骨はスクラップになってしまった。

7 FR鋼として広く世間に

耐火鋼のシステムには2つの要素がある。一つは鋼材そのものに係る技術、もう一つは、前述の耐火試験や熱変形解析で構築した、耐火鋼を用いる建物の耐火設計法[®]である。

後者については、鉄鋼各社からの要請もあり、新日鐵から技術供与することになった。一方、1990年12月には、耐火鋼(FR鋼)と、新耐火構造プロセスの開発・実用化に対して、毎日新聞社から「毎日工業技術賞」が、また、1992年5月には、日本建築学会より「業績賞」が贈られた。

8 おわりに

建築という一般性の強い成熟した分野において、短期間にこれだけの実績をあげた点で、耐火鋼は異例である。その理由はどこにあったのであろうか。平凡だが、やはり「天の時・地の利・人の和」と言えるのではないだろうか。

「天の時」は、建設省の総プロが新耐火設計法として、「常温強度の2/3が保持出来れば良い」と決めたことである。これがなければどうにもならなかった。

「地の利」は、この総プロに新日鐵の建築技術者が参画しておりしかもそれを活かすセンスを持っていたこと、およびD製鉄所というHSMA鋼の開発に実績があり、かつ耐火鋼には素人の製鉄所に話が持ち込まれたことであった。

「人の和」は、筆者、厚板関係者を始めとする鋼材技術者、および建築事業部で第2新日鉄ビルに携わった方々を中心とした「人の輪」であろう。特に、少々障害はものともしない、技術者達の想いと推進力がなければ、これほどまで短期間に陽の目を見ることはなかったであろう。耐火鋼が欲しいという要望は昭和30年代からあった。

筆者が耐火鋼を思い立った時、Cr-Mo鋼がトン数十万円と聞きここで諦めていたら何も始まらなかった。「本当だろうか?」と思ったところから耐火鋼は始まった。昨今、商品開発には、マーケティング(ユーザーの意見を聞く)が大事と言われているが、ユーザーの意見を翻訳し社内で起案する



写真9 P&Gビル、柱-梁接合部溶接試験

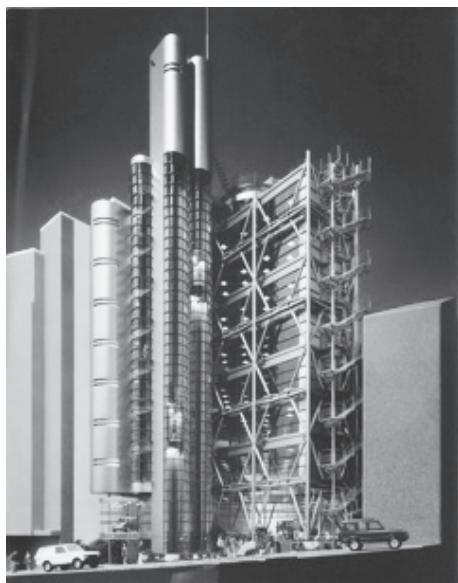


写真10 飯倉ケイワンビル

者、「オーナーズエンジニア」の役割も重要であると思う。

以上、耐火鋼の発案・開発の経緯を述べた。その実現には多くの方々が参画されている。本来お名前をあげるべきであるが、既に退職された方も多く、ここでは割愛させていただいた。文献¹⁾にお名前が出ており、参照いただきたい。

参考文献

- 1) わが国における厚板技術史, 日本鉄鋼協会, (2001.2), 185-189.
- 2) Recherche et mise au point d'acier moyennement allies à résistance au feu renforcée, Etude theoriques caracteristiques opitimals. Creusot-Loire, Usine du Creusot Raport Technique, 2 (1976.9), 1-24.
- 3) 建築物の総合防火設計法, 建設省, VOL1～VOL4 (1988.12)
- 4) 千々岩力雄, 為広博, 吉田譲, 船戸和夫, 植森龍冶, 堀井行彦: 建築用耐火鋼板の開発と実用化, 新日鉄技報, (1993.3) 348, 55-62.
- 5) 作本好文, 大橋守, 計良光一郎, 斎藤光: 建築構造用耐火鋼材の高温強度特性, 日本建築物学会構造系論文報告集, (1991.9) 427, 107-115.
- 6) 作本好文, 計良光一郎, 古村福次郎, 阿部武雄: 耐火鋼用高力ボルトの高温強度特性に関する実験的研究, 日本建築物学会構造系論文報告集, (1992.2) 432, 119-128.
- 7) 作本好文: FR鋼による無被覆鉄骨造の設計, 建築技術, (1992.4), 165-183.
- 8) 作本好文, 望月晴雄, 萩原賢治, 計良光一郎, 田原健洋: FR鋼(建築構造用耐火鋼材)の概要とFR鋼を使用した建築物の耐火設計手法および適用例, 新日鉄技報, (1992.9) 344, 31-39.

(2011年9月12日受付)