

環境に資する熱処理技術：熱処理プロセスの環境対応

熱処理技術の面白さ

物質・材料研究機構 長井寿

はじめに

本会は、「『材料と表面の改質』をめざして 材料を活かして使う熱処理技術 地球環境にやさしい熱処理技術 限りある資源を大切に活用する熱処理技術 赤めて冷やす立場の人から使う立場の人までのことを考えた熱処理技術」(http://www.jsht.or.jp/index_b.htm)を標榜している。

熱処理技術は極めて大事だ。大学の鉄鋼材料講座に学んだ者として、事あるごとに「鉄の性質は熱処理によっていかようにも制御できる」とその面白さを熱く語り合った記憶は強い。その勢いのままと言えば鬻ぎを買うだろうが、2013年5月に「アジアから鉄を変える 新しい鉄の基礎理論」(http://shokokuyugyou.com/chosha_page/chosha_page_index.html)という啓蒙書(長井、守谷共著、東洋書店)の第三部に、「応用編—鉄の物理と熱処理技術」を設け、「熱処理の基礎から応用へ/熱処理に科学的な視点をどう活かすか」を説き起こすことに挑戦した。その正直な事後感想は、「極めて難しい」という敗北宣言に近いものだ。

何が難しいのか? 突き詰めていくとカオスの世界にぶち当たる。平衡論と速度論の狭間で立ち往生してしまう。そこで、本稿では相当割り切った話を展開することにした。

エネルギー原単位を減らすこと—その1

エコマテリアル研究の一環として環境負荷指標を考えたことがある。エネルギー原単位あたりのパフォーマンスのような指標を検討してみた。例題としては、鋼塊を定められたパススケジュールで加工熱処理した様々なケースの、鋼材のパフォーマンス(例えば、強度×延性)を得る際のエネルギー原単位を試算する。具体的でかつ信頼に足る現場データを見定めた試算である。それで理解できたことは、加熱炉を24時間、365日稼働し、ある程度以上の日産量を稼ぐことができれば最高効率になるということだった。換言すれば、連続プロセスがよいことになる。そうすると次は自然に、加熱工程数を減らす、すなわち工程省略が効果的手段となる。結論は、「加熱工程をできる限り省略した連続プロセス」ということになる。加工、加熱、冷却を丹念に繰り返してこそ良質で安心なものができると先達の声に後ろ髪を引かれる結論だ。

この精神がその後の超鉄鋼研究に引き継がれた。なるべく低温でなるべく微細粒の微視組織を作ることが、変形仕事を多少増やしてもエネルギー原单位的には優位になる。この主張に一部の設備屋さん達から「非常識」と言われたが、彼らもご自身で超微細粒組織を作ろうとした時に、同じ原理で設備開発されることになったのは皮肉と言わざるを得ない。

さて、焼入れ—焼戻し(QTとする)ほど自分の若い血を興奮させたものはない。ところがこの超微細粒組織のパフォーマンスはある製品では炭素含有量を選べばQTを凌駕する。つまり、今まで三段の加工・熱処理工程が必要だったのに、一段の加工・熱処理工程で済む(QT処理を省ける)。やはり「加熱工程をできる限り省略した連続プロセス」が追求すべき目標となる。

エネルギー原単位を減らすこと—その2

基調講演 1

対象物全体を改質する必要がない場合がある。浸炭などの処理は学生時代にも既にあったが、恥ずかしながら表面だけを改質すればよいというプロセスイメージには若い時分は繋がらなかった。「バルク処理こそ正統な熱処理」という固定概念に囚われていたように反省する。誠に遅ればせながら、レーザーで表面を舐める話を聴いてようやく得心した。そうすると高周波などは表皮効果を前提にすれば、まさに表面だけを対象にした手段、局部しか対象にできない手段と積極的に言うべきだろう。

したがって加熱の手段としては、①サンプルそのものを発熱させる通電加熱、さらにその局部化が可能なマイクロ波加熱、超音波加熱、高周波加熱など、②レーザー加熱などの高エネルギービーム加熱（バーナ加熱も含まれるかも）など多種多様なものが登場してくる。

近年、特にドイツが国を挙げて取り組んでいる「第4次産業革命、Industry4.0」を材料側から表現すれば、「マルチマテリアル×付加的製造技術×材料情報統合技術」の掛け算となるはずだ。単純にイメージしていただければよいが、3D付加成形したものを熱処理する、もしくは熱処理しながら3D付加成形する時にどのような加熱手段をとるか。おそらく「加熱炉」からの脱却を求めるのではないかと。技術展開はニアネットシェープなどでの経験の先にあるのではないかと。Industry4.0がエネルギー原単位当たりのパフォーマンスを画期的に改善するものでないとしたらお笑い草だから、お手並みに期待したい。

「鋼塊の中心から冷やせないか？」

鋼を金属組織がオーステナイト組織になるまで加熱した後、急冷してマルテンサイト組織を得る熱処理を「焼入れ」と呼ぶが、若い時分、とある鍛造工場を訪問させていただいた時に、会社リーダーから投げつけられた質問だ。学会では度々私の発表セッションの座長を務めていただいた大先輩でもあった。

冷却も加熱も温度差のある地点間の伝熱であり、伝熱の原理からいえば「中から冷やす方法があります」という解答があるはずもない。要するに、焼きを大きな鋼塊の内部まで入れるのは容易ではない、「焼入性」という魔物との闘いの難しさを教えていただいたと思った。この「難問」は長年私を悩まし続けた。それが徐々に冷やすのではなく同じ温度に保つ、「等温変態の利用」という考え方に私を導いていく。したがってこの禅問答には大変感謝している。

さて、長年、冷却という用語を使ってきたがこの頃段々と居心地が悪くなってきた。冷却は曖昧な言葉だ。加熱に対応して**抜熱**と言うべきだ。対象は**温度**ではなく**熱**だ。熱を加えて温度を上げる、熱を取って温度を下げる。

熱に関しては、熱容量と伝熱をまず考えればよい。どれほどの熱量を扱うのか、どれほどの時間がかかるのかの指標となる。

図1は、わかりやすさのために純鉄について比熱（単位質量当たりの熱容量）と熱伝導率の温度変化をグラフにしたものだ。基礎知識として大事なことは、①高温状態から抜熱すれば有効に冷えてくれる、②高温ほどサンプル内では熱が伝わりにくいことだ。

「抜熱」という見方

サンプル表面から抜熱するので、サンプル表面温度を常に低い温度に保つことができれば、それだけ速く抜熱できることになる。したがって、サンプルを取り巻く冷媒とサンプルの境界の熱伝達が鍵となる。ここに熱移動の現実的な壁があることを見なくてはならない。

基調講演 1

冷媒である水に浸けて境界（表面）温度を 100℃に保ちたいがそうは問屋が卸さない。ここから核沸騰（蒸発泡が点状に発生）、膜沸騰（蒸発泡が膜を形成）の理解がでてきて、攪拌するか、高圧水を当てるとかの工夫が様々な現場技術で進んでいる。

真空炉内でそれ相当の大きさのサンプル全体に焼きを入れることを考えていて、待てよ！真空中での加圧噴霧はどうか？と発想した NIMS の若手エンジニアがいる。試されずみの基礎原理に基づき、蒸発潜熱を最大限利用しようというわけだ。真空中で不活性ガスと一緒に加圧噴霧水としてサンプルに当てて、径 15mm x 長さ 100mm を 800℃から 100℃まででみると約 10 秒で冷やせることを確かめた。水桶に入れた場合は 100 秒以上かかってしまう。シャルピー試験片を採取できる程度の寸法のサンプルに、表面酸化を抑えて焼きを入れることができる。これでまた新しい基礎研究が可能になると期待をかけている（黒田ら：特許出願 2014-223971）。

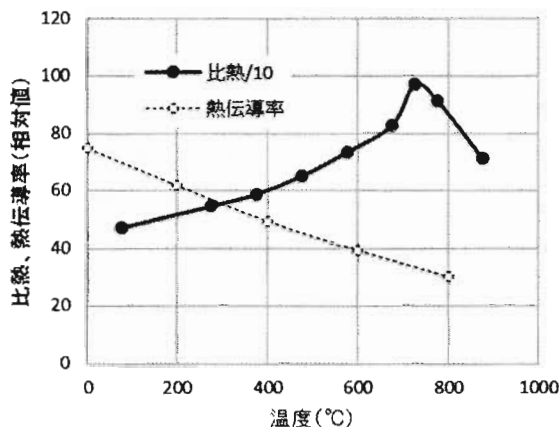


図1 純鉄を例にした比熱と熱伝導率の温度変化（金属学会「金属データブック」に基づく）

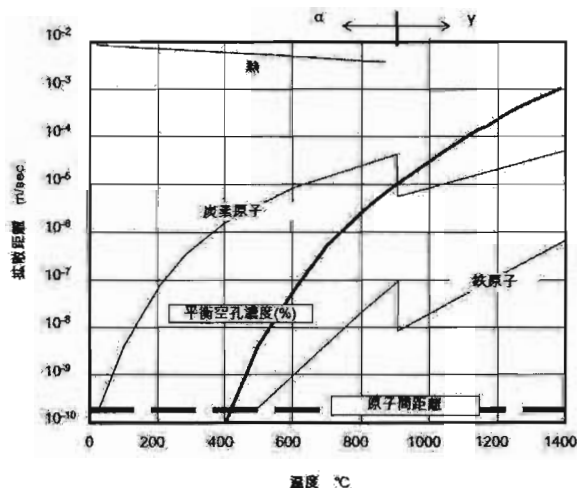


図2 純鉄における「拡散距離」の温度変化（種々のデータブックに基づく）

再び、熱処理は拡散！

金属組織の変化はすなわち構成する原子（まず、鉄と炭素）の移動が、熱の移動と絡めて理解されなくてはならない。図2は、先述の著作で初めて公表したものだ。それぞれの温度で、純鉄の中を熱、鉄原子、炭素原子が1秒間にどの程度の距離（m 単位）を拡散するのかを知りたくなり、基礎データに基づき計算してみたものだ。かなりアバウトな計算であることを断っておく。

基調講演 1

まず、熱は秒速数ミリで極めて容易に拡散する。高温ほど遅くなるが大した変化ではない。鉄原子は、原子空孔と置き換わりながら移動するので鉄原子の拡散に不可欠。実際の濃度は平衡空孔濃度（%表記。数字は左目盛りで）よりも数桁多いらしい。いずれにせよ原子空孔と鉄原子移動はよく対応している。そういうことで、鉄原子はようやく 500°C を越えた辺りから目に見えて拡散しだす。炭素原子は鉄原子格子の中をすり抜けて移動するので、鉄原子より 3 桁程度早く拡散し、室温くらいから易々と拡散していることが分る。

この図を眺めて気づいた大事なことがいくつかもある。そのひとつを紹介する。

そうか！必要な格子間距離を動かせば足りるのか！

焼入れままマルテンサイトは「A: 高転位密度で固溶炭素を過飽和に多く含む」と理解されている。それに対して、ある温度（例えば 500°C）で 1 秒だけ加熱すると、炭素原子は十分移動するが、鉄原子は動けないので「B: 高転位密度でセメントイトが析出」という状態を実現できる可能性がある。その温度以上で、900 秒（15 分）加熱すると鉄原子も動いてしまうので「C: 転位密度は低下し、セメントイトは成長」という状態になる。

今までは、A と C の状態しか知らなかったが B の状態が作れるとなると、それは新しい可能性である。ということは今までの熱処理には壮大な無駄があるかもしれない。エネルギー原単位あたりのパフォーマンス追求の可能性がまだまだ汲みつくされていないと言えないか？

冷やそうとするから難しい！

連続冷却変態はややこしい。サンプルのどの場所も同じ温度低下履歴にさせるなんて原理的に無理だ。「定温熟成」させればよくないか。「熟成」が済めばあとはどうしてもよい。すなわち連続冷却ではなく等温変態にしよう。鉄は奇麗な金属である。オーステナイト域での炭素固溶限はフェライト域での炭素固溶限よりべらぼうに大きい。これを炭化物に析出させて利用する技術可能性は、広大な未開拓分野ではないか？では、どのような具体的アイデアがあるかは、当日お話ししよう。

「熱処理技術協会」ではなく「熱処理技術者協会」としたらいかが？

世界の人口は増えるが 21 世紀中には日本の人口はほぼ半減するらしい。否応なくヒトの価値を高めていくしかないと思う。技術が高まっても技術者が高まらなければ安らかには暮らせない。科学の子＝鉄腕アトムは科学では作れない。技術が必要だが技術者がいなければ作れない。

技術者もしくはエンジニアこそ科学を正しく理解しなくてはいけない。しかし、科学がなんでも教えてくれるわけではない。とにかく問題解決しなくてはならない。問題解決ができなければ市場に新しい価値、サービスを提供できない。社会貢献ができない。分からなくても問題解決ができる。しかし闇雲でなく、科学の、基礎の底付けがあると力強い。だから科学に期待する。

そこで提案だが、冒頭の文をいじって、「材料を活かして使う熱処理技術者 地球環境にやさしい熱処理技術者 限りある資源を大切に活用する熱処理技術者 赤めて冷やす立場の人から使う立場の人までのことを考えた熱処理技術者」とした方が何倍も迫力が出ないか。

技術を自慢しても**それが使えなければ意味がない**。それが使える技術者を自慢すべきだ。「技術者協会」の方が、**展望と責任感を兼ね備えた頼れる人材が集い、また成長し合っている団体**というイメージを受ける。ヒトこそ日本が誇りにすべき資源だと思う。