

(124) 焼戻に伴う組織および機械的性質の変化について

(原子炉用 ASTM A-302 B 鋼の研究-I)

八幡製鉄所, 技術研究所

工博○長島 晋一・森 直道
土生 隆一・千々岩 力雄

Studies on Tempering Characteristic of A-302 B.

(Studies on a reactor vessel steel, ASTM A-302 B-I)

Dr. Shin'ichi NAGASHIMA, Naomichi MORI
Ryūichi HABU and Rikio CHIJIIWA

1. 緒 言

わが国の最近数年における電力需要の増加およびエネルギー資源の現状を考えると、原子力発電の実用化に期待されることは大きく、東海村の原電1号炉について発電用原子炉が建設される気運にある。このような情勢にかんがみて、原子炉用鋼材の国産化あるいは新鋼種開発の推進が重要視されている。

原子炉発電における压力容器用鋼としての問題点は、最近の発電用電子炉が発電コスト引下げのため大型化する傾向にあり、100mm をこえる極厚板が使用されるので、熱処理あるいは溶接その他の加工に伴う技術的問題が生ずること、および中性子照射による脆化に関する資料の不足していることなどである。

当社においては一般压力容器用としての ASTM A-302 B 塊の製造に関してかなりの実績を持っており、早くからこの鋼種の原子炉用鋼材として使用するための確信試験を計画、推進してきた。同様の研究は、本協会においてもその重要性が認められ、学振その他の研究団体との共同研究が立案され、広い視野に立つて系統的に原子炉用鋼の国産化のための研究が行なわれている。これにくらべると、本研究はなお十分とはいえないが、一応の結論を得たので、以下本鋼の熱処理条件の検討、厚手鋼板の性能、溶接材料、中性子照射試験結果に分けて報告する。

本報告においては、予備的に比較的薄い A-302 B 鋼につき焼入および焼準後の焼戻に伴う機械的性質および微細組織の変化を比較検討した。

2. 試料および実験方法

供試材は 20t エルー式電弧炉で溶解し、20mm 厚に延延したものを用いた。化学成分は Table 1 に示した。この鋼の焼入材 (930°C×1hr→水焼入) および焼準材 (900°C×1hr→空冷) につき焼戻に伴う変化も主に機械試験と組織検査によって調べた。機械試験は硬さ (ピッカース), 引張 (JIS 4号) および衝撃試験 (4

号 V ノッチシャルピー) を行ない、組織検査は光学顕微鏡観察と電子顕微鏡による薄膜試料の直接観察とを行なった。なお試験片はいずれも板厚中心より採取した。

さらに焼戻に伴う炭素原子の挙動は内部摩擦の変化から調べ、焼戻中に析出した炭化物については電解抽出残渣の化学分析、粒末 X線回折および磁気天秤によって調べた。

3. 実験結果および検討

3.1 機械的性質

機械試験の結果をまとめて Fig. 1 に示した。

硬さについては、素材の焼入材および焼準材はそれぞれ $H_V=419$ および 224 であった。焼戻に伴う硬さの変化は、焼入焼戻材 (QT 材) の場合焼戻温度とともに急激に減少し 650°C, 8hr では 200 程度になるが、析出硬化も若干認められ硬さの減少を幾分押えているようである。一方、焼準焼戻材 (NT 材) については焼戻による硬さの減少はわずかであり $H_V=180$ を割ることはなかつた。700°C と焼戻では、QT 材 NT 材ともに

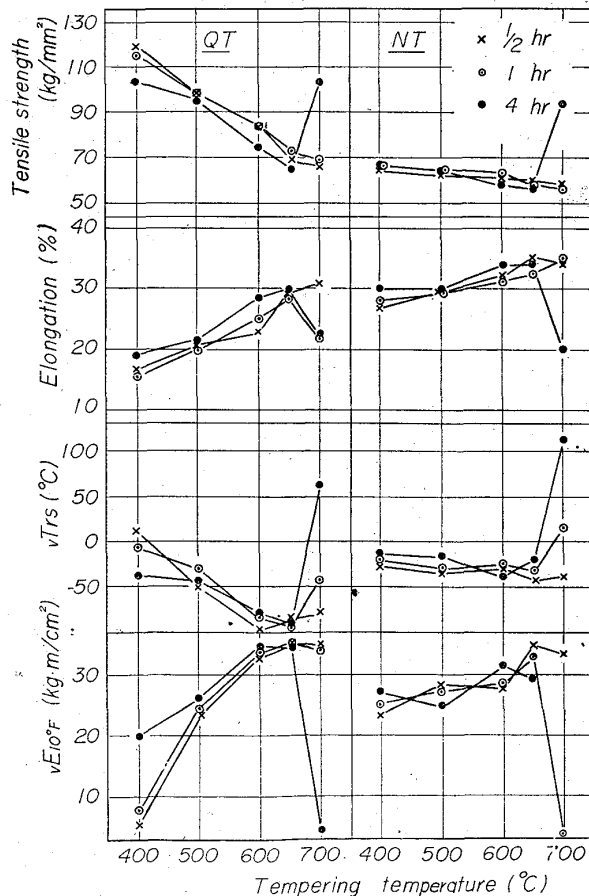


Fig. 1. Changes in mechanical properties with tempering temperature.

Table 1. Chemical composition of test specimen. (%)

	C	Si	Mn	D	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Co	sol. Al	insol. Al	total Al
Ladle	0.18	0.21	1.28	0.009	0.006	0.09	0.04	0.55	0.03	—	—	—	—
Check	0.19	0.21	1.23	0.010	0.006	0.072	0.041	0.56	0.027	0.009	0.032	0.007	0.039

焼戻時間が 1hr までは減少し, 2hr 以上になると逆に急激な増加を示した。

引張試験の結果, 抗張力は QT 材の場合焼戻により相当減少するが, NT 材はさほど変化しなかつた。降伏点は QT 材は 600°C 1hr, NT 材は 500°C 30min で現われ始めた。伸び, 絞りについては抗張力と逆の傾向を示した。対応するすべての焼戻条件において抗張力, 降伏点は QT 材が NT 材より大きく, 伸びは逆に小さい。しかし絞りは 600, 650°C では QT 材の方が優れた値を示した。

衝撃試験の結果, 破面遷移温度 (vT_{RS}) は QT 材は焼戻によりかなり低温側に移行するが, NT 材の変化は小さいので, 400°C を除く焼戻条件で QT 材は NT 材より vT_{RS} は低くなつた, 10°F での吸収エネルギー ($vE_{10°F}$) については, 600° および 650°C 焼戻で QT 材の方が優れた値を示した。なお QT 材, NT 材ともに原子炉圧力容器用鋼として要求される 30ft-lb (5.3 kg·m/cm²) より大巾に優れた値を示しているのは, 薄い板を試料としたために焼入または焼準時の冷却速度が大きいこと, 圧下率が大きいため成分の均一化と組織の微細化によるためであろう。

Fig. 2 に抗張力と硬さおよび伸びとの関係を QT, NT 材をまとめて示した。抗張力と硬さとは直線関係が, 抗張力と伸びとは良い相関関係がある。このように焼戻前の処理および焼戻温度が相違し組織が異なるにもかかわらずきれいな関係を示すことは興味深い。

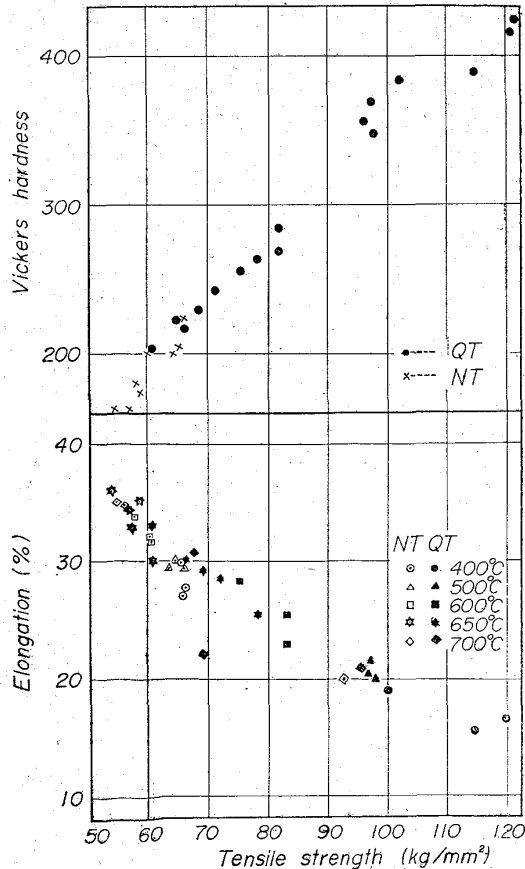


Fig. 2. Relation between tensile strength and hardness, elongation.

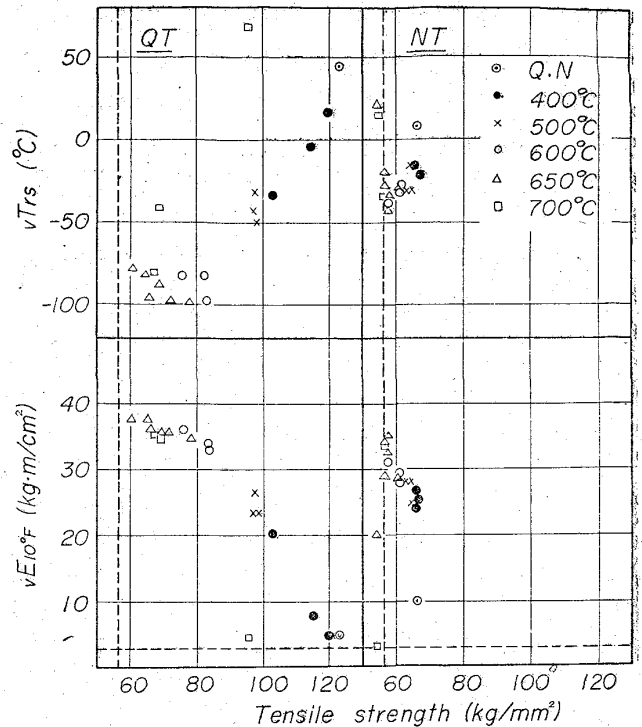


Fig. 3. Relation between tensile strength and impact properties.

Fig. 3 には抗張力と vT_{RS} および $vE_{10°F}$ の関係を示した。 $vE_{10°F}$ については前述のように QT, NT 材ともに規格値を大巾に上まわつている。抗張力については QT 材は多少の余裕があるが, NT 材の方はかろうじて規格値を満している。

以上の結果をまとめると, 抗張力は規格値を満足し, かつ vT_{RS} および $vE_{10°F}$ が最良の値を示す焼戻条件は, QT 材および NT 材ともに 650°C, 1hr 程度であることがわかつた。

3.2 組 織

光学顕微鏡観察によると, 焼入材はマルテンサイトとベーナイトの共存組織であり, 焼準材はフェライトとトルースタイト共析組織が共存していた。これらを焼戻すと QT 材ではマルテンサイトおよびベーナイトの分解が起こるが, 焼戻温度が高くなると析出物の増加が認められるほか, 温度の違いによる本質的な組織変化はなかつた。NT 材では焼戻による組織変化はほとんど認められなかつた。ただし 700°C で 4hr 以上焼戻すと QT 材, NT 材ともに炭化物は見られなくなり, フェライトとオーステナイト (水冷によりマルテンサイトになつて) の混合組織となつた。

次に電子顕微鏡により電解研磨した実物薄片試料を直接観察した結果を述べる。焼入材の典型的マルテンサイト組織中には高い密度の転位が観察され, 場所によつては冷却途中で焼戻されて生じた Widmanstätten 状の微細な析出物がみられる。これを 400°C で焼戻すと結晶粒内の析出が Widmanstätten 状に進行するが, 500°C 以上では主にマルテンサイト晶の粒界に沿つて析出が進行し, 同時に転位密度が減少して回復が始まる。650°C 焼戻しでは安定な転位網を形成しサブ粒界を造り

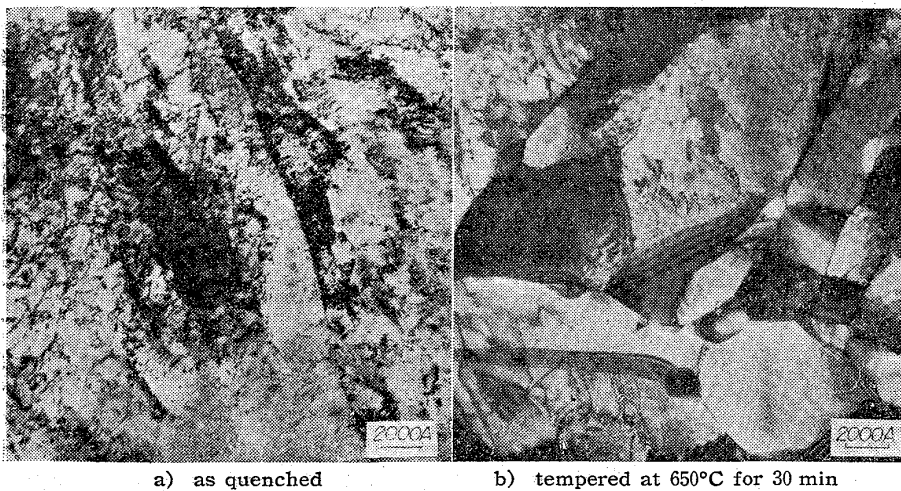


Photo. 1. Electron microphotographs of quenched plate.

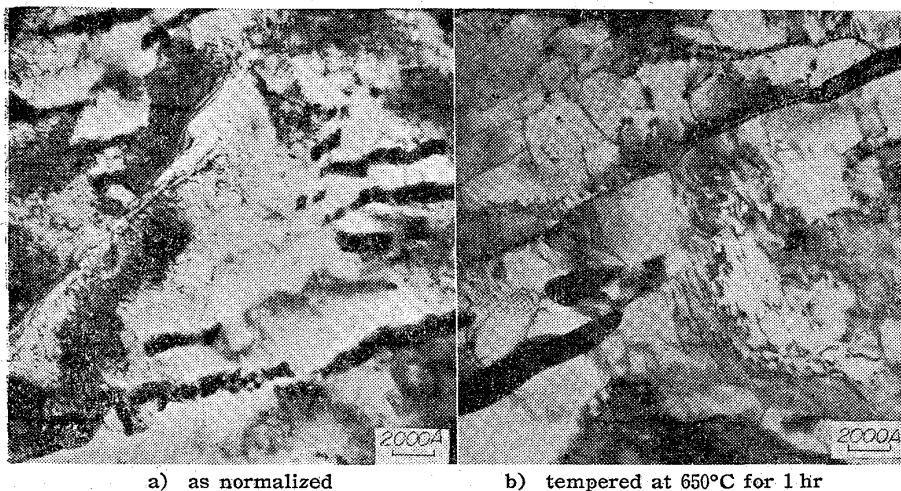


Photo. 2. Electron microphotographs of normalized plate.

始め、析出物は数および量ともに増加し形状も丸味を帯びてくる。700°Cではサブグレインの成長が目立ち再結晶が始まる。ここで焼戻時間が4hr位になると A_1 変態によりオーステナイトが生じ、水冷によつて再びマルテンサイトになる。なお焼入材と650°C、30min焼戻した代表的組織をPhoto. 1に示した。

焼準材ではフレック状の析出物がパーライトのように平行に並んでいる。転位密度は焼入材にくらべるとはるかに低い。これを焼戻すと組織にほとんど変化は起こらないが、析出物は焼準材のより大きく丸味を帯びたもの、さらには棒状に成長したものが認められる。転位は再配列して安定な転位網を作る。なお焼準材と650°C 1hr焼戻材の代表的組織をPhoto. 2に示した。

3.3 組織と機械的性質との関連

QT材については焼戻しによつて機械的性質はかなり軟化するが、光学顕微鏡観察ではこの現象を説明するほどの変化は認められない。電子顕微鏡による直接観察の結果から、400°C焼戻しによる軟化は、主にマルテンサイトに強制固溶された炭素原子の析出により格子歪が緩和されるためであり、500°Cでは析出に伴う格子歪の緩和と転位密度の減少によるものと考えられる。600、

650°Cにおける軟化は主に回復によるサブグレインの形成によるもので、特にここで衝撃性質が良くなるのは、サブグレイン形成による粒の微細化と適当に間隔をあけて分布した適当な大きさの析出物となり、塑性変形が起こりやすくなつたためと考えられる。なおいずれの温度においても析出硬化により軟化を若干押えていることは当然考えられる。700°Cでの機械的性質の異常な挙動は、短時間の場合は再結晶による粒の粗大化のためであり、長時間の場合は粒の粗大化に加えて一部にオーステナイトが出現し、これが冷却時にマルテンサイトになり硬化するためと考えられる。

NT材については、光学および電子顕微鏡観察の結果、組織はあまり変化しないことが確かめられたが、これは機械的性質が焼戻条件によつてさほど変わらないことに対応している。ただ幾分軟化するのは転位の再配列により安定な転位網が形成されるのが主な原因であろう。一般にQT材に比較して衝撃性質がかなり劣っているのは棒状の析出物に沿つてクラックの発生、成長が起こりやすく破壊に至りやすいためであろう。700°Cで焼戻時間が長くなるとQT材の場合と同様の現象が考えられる。

3.4 炭素原子および炭化物の挙動

内部摩擦の測定による炭素原子の挙動と電解抽出残渣の化学分析、X線回折および磁気分析による炭化物の挙動を調べたが、結果については紙面の都合上省略する。

4. 結 言

原子炉用A-302B鋼の機械的性質と組織との関係を明らかにするために、20mm厚の焼入材および焼準材の焼戻特性を機械試験、組織検査およびその他の物理冶金的試験により調べた。

焼入材および焼準材ともに650°C 1hrの焼戻条件で最も良い衝撃性質が得られた。またこの条件では、衝撃性質および伸びを除く引張性質は焼入焼戻材の方が焼準焼戻材よりかなり優れていることがわかった。

これらの結果は微細組織、特に析出物の分布および形状の相違から説明できる。