

氏 名	高 野 正 義
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 3 月 18 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 39 年 3 月 東北大学大学院工学研究科機械工学 専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	大型鍛鋼品の焼もどし脆化防止に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 前川 一郎 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 及川 洪

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 言

大形鍛鋼品は厳しい条件で各種の用途に使用されているが、375～575℃の温度に保持されたり、この温度域を徐冷されると靱性が低下する焼もどし脆化の現象が起こる。特に、操業条件がこの温度域となる装置に鍛鋼品が使用される場合には焼もどし脆化温度域に長時間保持されることとなるため、靱性が低下し大きな問題となる。そこで、焼もどし脆化が問題となる代表的な大形鍛鋼品である圧力容器用 2.25Cr-1Mo、3.5Cr-1Mo、3.5Ni-Cr-Mo 鋼および低圧タービンロータ用高純度 3.5Ni-Cr-Mo-V 鋼の製造時および使用中の焼もどし脆化におよぼす種々の因子の影響を定量的に明らかにし、これらの鍛鋼品の焼もどし脆化対策を検討した。また、これらの鍛鋼品が焼もどし脆化温度域で長時間使用される場合の脆化量を簡易試験であるステップクーリング (SC) 脆化試験あるいは化学成分から推定する方法を導いた。さらに、それからの研究結果に基づいて焼もどし脆化の少ない大形鍛鋼品を開発した。

第 2 章 大形鍛鋼品の焼もどし脆化におよぼす製造条件の影響

焼もどし脆化に対しては各種の要因が影響するが、化学成分の影響が最も大きく、脆化量を化学成分の関数として表した脆化係数が幾つか提案されているが十分な精度のものは無い。そこで、2.25Cr-1Mo、3Cr-1Mo および 3.5Ni-Cr-Mo-V 鍛鋼品の焼もどし脆化におよぼす化学成分、焼入冷却速度および Al 添加による細粒化の影響を SC 脆化試験により調査し、脆化防止対策としては化学成分の調整によるのが最も効果的であることを明らかにした。2.25Cr-1 Mo および 3Cr-1Mo

鋼の焼もどし脆化量は脆化係数 $K_2 = (2\text{Si} + \text{Mn} + \text{Cu} + \text{Ni}) \cdot \bar{X}$ 、ただし、 $\bar{X} = (10\text{P} + 5\text{Sb} + 4\text{Sn} + \text{As}) \times 10^2$ 、と良い相関関係があり、Cu, Niの少ない場合には脆化係数 $K_1 = (2\text{Si} + \text{Mn}) \cdot \bar{X}$ も同等の相関を示した。また、3.5Ni-Cr-Mo-V鋼の場合には脆化係数 $K = (\text{Si} + \text{Mn}) \cdot \bar{X}$ と良い相関関係を示した。この結果、不純物元素およびSi, Mn, Cu, Ni量を低減することにより、焼もどし脆化感受性の低い鍛鋼品を得られることが明らかになった。

第3章 圧力容器用大形鍛鋼品の焼もどし脆化におよぼす溶接後熱処理条件の影響

大形圧力容器は一度に熱処理ができないため、母材部は場所によって異なる回数の溶接熱処理(PWHT)を受けることになる。焼もどし脆化量は焼もどしやPWHT条件により影響を受けるが、これらの焼もどし脆化におよぼす影響に関して十分な研究がなされているとは言えない。そこで、Si量を変えた2.25Cr-1Mo鋼の焼もどし脆化におよぼすPWHT条件の影響をSC脆化試験により調査し、脆化量は焼もどしパラメータ[TP]のある値で最大値を示すことおよびその[TP]値も最大脆化量もSi量に影響されることを明らかにした。Si量が多いほど最大脆化量は大きく、また、最大値を示す[TP]も大きくなるため、大形鍛鋼品の[TP]の範囲である20.2~20.7ではSi量が少ないほど脆化量は小さくなる。Si量により焼もどし脆化感受性と[TP]の関係に差が見られる原因はSi量がPWHT時に析出する炭化物の種類に影響を与え、これが不純物元素の粒界偏析量を変化させるためと考えられる。

第4章 圧力容器用大形鍛鋼品の溶接後熱処理後の除冷による焼もどし脆化

350℃以下で使用される圧力容器において高強度・高靱性が得られる3.5Ni-Cr-Mo鍛鋼品が使用され始めている。しかし、Ni, Crを多量に含有する3.5Ni-Cr-Mo鋼の焼もどし脆化感受性はかなり高いため、PWHT後の徐冷でも脆化が起こるものと考えられるが、本鋼の焼もどし脆化に関する研究はほとんど無い。そこで、3.5Ni-Cr-Mo鍛鋼品の母材および溶接熱影響部のPWHT後の徐冷による焼もどし脆化量におよぼすPWHT後の冷却速度および化学成分の影響を調査し、脆化量は $K_1 = (2\text{Si} + \text{Mn}) \cdot \bar{X}$ と良い相関関係があることおよびPWHT後の冷却速度が40℃/hの場合にも要求靱性値を満足させるための K_1 の値を明らかにした。

第5章 圧力容器用2.25Cr-1Moおよび3Cr-1Mo鍛鋼品の長時間恒温焼もどし脆化量の推定

使用温度において装置の寿命までの恒温脆化処理を行うのは非常に長時間かかるため、SC脆化試験あるいは化学成分から恒温脆化量を推定できるようにしておく必要がある。そのため、Si, Mn, Cu, Niおよび不純物元素量を変化させた2.25Cr-1Moおよび3Cr-1Mo鍛鋼品について、425, 450, 450℃で、それぞれ、54000, 20000, 5000hまでの恒温脆化試験を実施し、任意の温度、保持時間における長時間使用中の焼もどし脆化量をSC脆化量と等価 $P_{\text{量}} P_{\text{。}} (= \bar{X} \times 10^{-3})$ あるいは K_2 と \bar{X} から精度良く推定できる関係式を導いた。

その関係式によると、飽和脆化量の90%に達するまでに要する時間は425℃で $(3.8 \sim 6.5) \times 10^5$ 、

450°Cで $(6.4\sim 9.7)\times 10^4$, 475°Cで $(1.0\sim 1.2)\times 10^4$ hと低温ほど脆化速度は遅く、飽和脆化量はそれぞれの温度でSC脆化量の2.4, 2.0, 1.5倍と低温ほど大きくなる。装置の寿命を20年と仮定すると、最も脆化の大きい425°Cの場合でもその間の脆化量は $2.1\times \Delta 40TT_{sc}$ であり、SC脆化試験による判定基準は $40TT_p+2.5\Delta 40TT_{sc}\leq 10$ または38°Cが適切と考えられる。また、装置の使用温度、寿命および使用中の要求靱性値が明らかになれば、それに対応して鍛鋼品に要求される $K_2\bar{X}$ の上限を決めることができる。

第6章 低圧タービンロータ用高純度3.5Ni-Cr-Mo-V鍛鋼品の恒温焼もどし脆化

焼もどし脆化感受性の高い3.5Ni-Cr-Mo-V鋼を400~450°Cの焼もどし脆化域で使用できるように改善された高純度低圧タービンロータ材がElectric Power Research Institute (EPRI)で開発された。このロータ材は $Si\leq 0.05\%$, $Mn\leq 0.05\%$, $\bar{X}\leq 8.5$ に化学成分を制限したものであるが、まだ化学成分の検討が不十分と考えられる。そこで、Mnが約0.30%以下の範囲において、3.5Ni-Cr-Mo-V鋼の焼戻脆化におよぼす不純物元素、Si, Mnおよび合金元素量の影響を375~450°C×10000~20000hの恒温脆化試験により調査し、脆化量は \bar{X} , Si, Mn量の低減および焼入冷却速度の低下により減少することを明らかにした。脆化量に対しては \bar{X} およびMnの影響が大きく、 \bar{X} が2.1以下ではSi, Mn量にかかわらず脆化は起こらないが、 \bar{X} が4.1以上ではSi, Mn量に応じた脆化を示す。しかし、 \bar{X} が10.8の場合、0.02%Si, 0.04%Mnでも脆化が起こり、焼もどし脆化防止のためにはMnよりも不純物元素の低減がより重要である。また、高純度低圧タービンロータ材($\bar{X}: 5.6\sim 6.5$, $Si\leq 0.05\%$, $Mn\leq 0.08\%$)の焼もどし脆化感受性に対してC, Ni, Cr, Vの添加量を若干変化させてもその影響はほとんど認められなかった。以上の結果、EPRIの化学成分規格ではMn量の低減を重視しているが、それよりも不純物元素量の制限の方がより重要であることがわかった。長時間使用中の焼もどし脆化量SC脆化量と \bar{X} から精度良く推定できる関係式を導いた。その関係式によると、飽和脆化量の90%に達するまでに要する時間は375°Cで $(1.2\sim 2.6)\times 10^7$, 400°Cで $(2.2\sim 4.1)\times 10^6$, 450°Cで $(0.93\sim 1.4)\times 10^5$ hと低温では非常に長時間となる。また、20年保持後の脆化量を計算すると375, 450, 400°Cの順に大きくなる。

\bar{X} が4.1~7.0の範囲において、K, \bar{X} および焼入冷却速度から恒温脆化量を精度良く推定する関係式を導いた。 $K\leq 0.78$ ($\bar{X}6.0$, $Si\leq 0.05\%$, $Mn\leq 0.08\%$)とすれば、375~450°Cで20年使用後の直径1800mmの低圧タービンロータの脆化量は表面部で24°C、中心部で16°Cと推定され問題のない靱性が得られる。

第7章 焼もどし脆化の少ない大形鍛鋼品の開発

大形鍛鋼品を製造するための基礎的調査を行った結果と第2章~第6章において示した焼もどし脆化対策に基づいて、圧力容器用2.25Cr-1Moおよび3Cr-1Moリング鍛鋼品、圧力容器用3.5Ni-Cr-Moリングおよびディスク鍛鋼品、低圧タービンロータ用高純度3.5Ni-Cr-Mo-V鍛鋼品を実際に製造すると共に性能調査を行い、研究結果が正しいことを実証した。圧力容器用2.25Cr-1Mo, 3Cr-1Moおよび3.5Ni-Cr-Mo鍛鋼品は低Si, 低不純物元素のAl添加細粒鋼の採用により、優れた靱性

と耐焼もどし脆性を示した。また、高純度低圧タービンロータ材は極低 Si, Mn および極低不純物元素を含有する 3.5Ni-Cr-Mo-V 鋼であるが、直径 1595mm の大形鍛鋼品にもかかわらず中心部まで優れた機械的性質を示すと共に 450°C × 10000h の恒温脆化処理でもほとんど脆化は認められなかった。

第 8 章 結 論

本論文では鋼種および焼もどし脆化環境によって限界量は異なるが主として Si, Mn および不純物元素量を制限することにより、各種大形鍛鋼品の製造時および長時間使用中の焼もどし脆化を防止できることおよびその限界量を定量的に明らかにした。また、SC 脆化量あるいは化学成分から任意の使用温度、保持時間における長時間における長時間恒温焼もどし脆化量の推定が可能となった。本研究により大形鍛鋼品の品質は著しく改善され、焼もどし脆化温度域で操業される装置の安全性向上に大きく役立つものと期待される。

審 査 結 果 の 要 旨

圧力容器やタービン・ロータ等の大形鍛鋼品は375～575℃の温度域で長時間使用されている間に焼もどし脆化により靱性が低下する恐れが高い。本論文は、その防止対策を確立するために関連する諸因子に対して詳細な研究を行ったもので、全編8章よりなる。

第1章は緒言である。

第2章では、鍛鋼品として使用される代表的3種の鋼材について、焼もどし脆化に及ぼす化学成分の影響を脆化係数によって詳細に比較検討し、Si, Mn, Cu, Ni及び不純物元素量を低減することにより脆化感受性を低下させ得ることを明らかにしている。

第3章では、大形材の溶接後熱処理条件が脆化量に及ぼす影響を簡易な試験方法により推定し、Siの量が重要な影響因子であることを明らかにし、その機構を解明している。

第4章では、溶接後熱処理の後の徐冷による脆化の危険性が特に高い3.5Ni-Cr-Mo鋼の焼もどし脆化に対する化学成分の影響は、SiとMnおよび不純物元素量をパラメータとして示し得ることを見出し、所定の靱性値を得るためのパラメータ値を与えている。これは実用上有用な成果である。

第5章では、長期間使用による焼もどし脆化に対する短時間簡易試験法を確立するため、試験温度及びその保持時間を変えた恒温脆化試験を行い、任意の温度、保持時間に対する脆化量を推定するためのパラメータと推定式を与えている。その結果、簡易試験法による判定基準も明確にしている。これは脆化判定に要する時間を大幅に短縮する上で有用な成果といえる。

第6章では、脆化領域での使用を可能にするために改善された3.5Ni-Cr-Mo-Vの恒温脆化試験を行い、従来の成分規格で重視しているMnよりも不純物量を制限する方が重要であることを指摘している。また、簡易試験によって長時間使用時の脆化量を精度よく推定出来る式を与えている。

第7章では、前章までの成果に基づき、各鋼種の実用製品を製造して性能試験を行い、優れた靱性と耐焼もどし脆化が得られることを実証している。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、大形鍛鋼品の焼もどし脆化改善のために成分及び熱処理条件の影響を詳細に解明して最適条件を明示したもので、焼もどし脆化温度域で使用される大形機械の安全性を確保する上で重要な成果を得ており、機械工学並びに材料強度学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。