UDC 669.15'24'26'28'292-194 : 621.785.616.011 : 620.178.746.22 : 539.55 : 669.3

論　文

Ni-Cr-Mo-V 強靱鋼の焼入性，強度及び靱性に及ぼす Cu の影響*

正岡　功**・高瀬　磐雄**・佐々木良一***

Effect of Cu Content on the Hardenability, Strength and Toughness of Ni-Cr-Mo-V Steels

Isao MASAOKA, *Iwao* TAKASE, and *Ryōichi* SASAKI

Synopsis:

The effect of Cu content on the hardenability, strength and toughness of Ni-Cr-Mo-V steels has been investigated. The results obtained are summerized as follows:

(1) The hardenability of Ni-Cr-Mo-V steels remarkably increases with increasing Cu content. The Ms temperature and bainite transformation temperature become lower, and the each critical cooling rate to form bainite or ferrite decreases with increasing Cu content. The bainitic structure is obtained even at a cooling rate of 15 °C/h in quenching.

(2) The tensile strength of the quenched and tempered steel changes little with increasing Cu contents but the notch toughness remarkably increases. The notch toughness of 2.8% Ni-Cr-Mo-V steels containing Cu exhibits the larger value than that of 3.7% Ni-Cr-Mo-V steels containing Cu, at a slow cooling rate in quenching and after tempering. This is thought to be caused by high susceptibility to temper embrittlement in the higher Ni-containing steels. The temper embrittlement can be reduced by Cu addition.

(3) The improvement of hardenability and the reduction of temper embrittlement are possible by addition of Cu to 2.8% Ni-Cr-Mo-V steels. The steels containing Cu are able to have higher notch toughness than that of 3.7% Ni-Cr-Mo-V steels for large steel forgings.

1. 緒　　言

火力発電プラントの大容量化に伴い，タービンおよび発電機用ロータ軸は大型化し，設計応力の上昇や脆性破壊に対する安全性を考慮すると，今後高強度高靱性の材料がますます要求される傾向にある．

現在 3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼は低圧タービンロータ軸材として広く用いられており，また発電機ロータ軸用としても検討されている．さらに化学プラントにおける高圧機器にも類似の鋼種が用いられようとしている．このようにこの鋼種は高強度高靱性材料として用途は広い．しかし焼入れ焼もどし後応力除去焼なまし(SR と呼ぶ)を行つたり，大型になつて焼もどし後の冷却速度が遅くなると靱性が低下し，衝撃遷移温度が上昇する場合がある[1]．これは Ni-Cr-Mo-V 鋼が焼もどし脆性に対する感受性の高いことによると考えられる．このため最近では焼もどし後の冷却速度を早くしたり，焼もどし脆性に敏感な不純物元素をできるだけ少なくする配慮がされている．しかし現実には不純物を少なくすることは原料として純度のよいものを採用せねばならず経済的でない．また高価な Ni が 3.5% 以上も含まれており，Ni をできるだけ少なくした高靱性材の開発が望まれている．

このような現状から，本研究は Ni を節約した新しい高強度高靱性材料を見出す目的で，Ni-Cr-Mo-V 鋼に Cu 添加を試み，その焼入性，組織，強度および靱性に及ぼす Cu の影響を明らかにしたものである．

一般に鋼に Cu を添加すると大気中または海水中の耐食性が向上し，析出硬化のため降伏点も上昇する．このため，耐候性高張力鋼および耐海水鋼に添加され使用されてきた[2)~4)]．しかしながら，Cu は切欠靱性に対しては影響が少ないか (Cu<0.6%)，むしろ多量の添加(Cu>0.6%)は悪影響を及ぼすとされており[2)5)]，切欠靱性を

* 昭和51年4月本会講演大会にて発表　昭和53年10月2日受付 (Received Oct. 2, 1978)
** (株)日立製作所　日立研究所 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., 3-1-1 Saiwai-cho Hitachi 317)
*** (株)日立製作所　日立研究所　工博 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.)

Table 1. Chemical composition of the steels investigated.

No	Chemical composition (wt %)									
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
1	0.26	0.27	0.30	0.010	0.008	0.12	3.61	2.05	0.46	0.14
2	0.26	0.27	0.35	0.012	0.008	0.26	3.66	1.93	0.45	0.12
3	0.27	0.27	0.35	0.014	0.008	0.65	3.68	1.89	0.43	0.12
4	0.26	0.27	0.30	0.009	0.006	1.10	3.70	1.93	0.41	0.12
5	0.25	0.27	0.31	0.014	0.008	0.66	2.78	2.02	0.42	0.14
6	0.26	0.29	0.34	0.012	0.007	1.09	2.81	1.96	0.41	0.12

増すために添加された例はほとんどない．Ni-Cr-Mo-V 鋼への Cu 添加の影響を調べた報告もみられず，ロータ軸材の規格においても不純物としているに過ぎない．ASTM 規格[6]ではロータ軸材として Cu 含有量の規定はない．

しかしながら，最近，低温用 Ni 鋼に及ぼす Cu の影響が調べられ[7)8)]，Cu の添加によつて切欠靱性を確保でき，また Ni 量を節約できることが報告されている．このため，Ni-Cr-Mo-V 鋼への Cu 添加に対しても切欠靱性を向上させる期待が持たれる．以上の情勢から経済的な新鋼種を見出す可能性が大きく，Ni-Cr-Mo-V 鋼に及ぼす Cu の影響を詳細に検討することとした．

2. 供　試　材

Table 1 は供試材の化学成分を示す．3.5Ni-1.7Cr-0.4Mo-0.1V 鋼を基本として，Cu をそれぞれ 0.12, 0.26, 0.65, 1.10% に変えたもの，および Ni を 2.8% に低めて Cu を 0.66 および 1.09% と添加したもの計 6 鋼種を溶製した．この中で基本成分の Ni 量は規格上限の 3.7% をねらつた．このため以下では 3.7%Ni 系と呼ぶ．

すべて高周波溶解炉で 45 kg 溶解した．原料には炭素鋼鍛鋼を使用し，白銑，Fe-Si, Fe-Mn, 電解 Ni, Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-V を添加して成分調節した．鋼塊は 1 200°C から 900°C の間で 100×30×1 mm に鍛伸され，試験に供された．この際の鍛造比は実機ロータ軸にあわせ 3～4 とした．なお本供試材のおもな微量不純物は As：140～170ppm, Sb：28～34 ppm の範囲である．

3. 実　験　方　法

3·1 実験内容

まず，それぞれの鋼の焼入性を比較するために焼入冷却速度 2°C/min 以上で連続冷却変態図 (CCT) を求め，さらに遅い冷却速度 (5°C/h まで) における組織および硬さ変化を検討した．つぎに，胴径約 1 m以上のロータ軸中心孔の加熱冷却速度に相当する焼入冷却速度 2°C/min，焼もどし 550°C または 600°C で 60 h 保持後 25°C/h で冷却した組織および機械的性質を調べた．また Ni-Cr-Mo-V 鋼は焼もどし脆性に対する感受性が高い材料であり[9)]，焼もどし後の冷却速度を変えてこの影響を検討した．

供試材はすべて鍛造方向に採取し，ほぼ試験片の大きさ（約 15×15×200 mm）に切断した後，所定の熱処理を行い，機械加工をして試験に供した．熱処理はまず 900°C，2 h 保持後炉冷して均一化焼なましを行つた後，焼入焼もどしを行つた．供試材の変態点 Ac_3 はほぼ 790～793°C であつたので，焼入温度はこれより約 50°C 高目の 840°C 一定とした．

3·2 試験片寸法および試験方法

3·2·1　連続冷却変態図（CCT 曲線）

CCT 曲線は熱膨張差による変態点測定によつて求めた．すなわち，5°C/min 以上の冷却速度では高周波加熱式全自動変態点記録測定装置により，5°C/min 未満では金研式自動記録型熱膨張測定装置を使用した．前者の試験片は 3.5 mmϕ×8 mm の円柱状のものに 1.8 mm ϕ，深さ 4 mm の孔をあけたもので，この孔に熱電対を挿入し温度制御を行つた．また後者の試験片は 5 mm ϕ ×80 mm で，これに 3 mm ϕ ×30 mm の孔をあけて熱電対を挿入した．

3·2·2　機械試験

引張試験片は JIS 4 号型の直径 8 mm ϕ，平行部 35 mm，標点距離 28 mm の丸棒試験片で，試験は容量 10 t の万能試験機によつた．0.2% 耐力に至るまで毎分 0.2% 以下の負荷速度で負荷した．降伏強さは標点間距

離の伸びを差動トランスで検出し，荷重-歪曲線を描かせ，降伏点が明瞭にでるものは下部降伏点をとり，明瞭に現われないものは0.2% 耐力をとつた．

衝撃試験片は JIS 4 号型 2 mmV ノッチシャルピー試験片でノッチはすべて板厚方向に入れた．30 kg・m シャルピー衝撃試験機により各温度で試験を行い，衝撃値および脆性破面率を求めた．それぞれの遷移曲線を描いて，これらの曲線から FATT(50% 脆性破面遷移温度，vTrs とも呼ぶ) を求めた．硬さはビッカース硬さ計を用い，荷重 10～30 kg で測定した．

3・2・3 組織観察

3～5%Nital で腐食し，鍛造方向に直角な面を観察した．

4. 実験結果および考察

4・1 焼入性に及ぼす Cu の影響

No. 1～6 の各供試材について連続冷却変態特性を調べ，焼入性に及ぼす Cu の影響を検討した．Fig. 1 はベイナイト変態とフェライト析出の臨界冷却速度に及ぼす Cu および Ni の影響，Fig. 2 は Ms 点および 2°C/ min の冷却速度におけるベイナイト変態温度に及ぼす Cu および Ni の影響をまとめたものである．この結果，3.7 %Ni 系のほうが 2.8%Ni 系の鋼に比べより焼入性がよいが，これらに Cu を添加するといずれもより一層焼入性がよくなることがわかる．すなわち，No. 1 の鋼に対して Cu を添加するにしたがい，ベイナイト変態が起こる臨界冷却速度は遅くなり，またフェライト析出の臨界

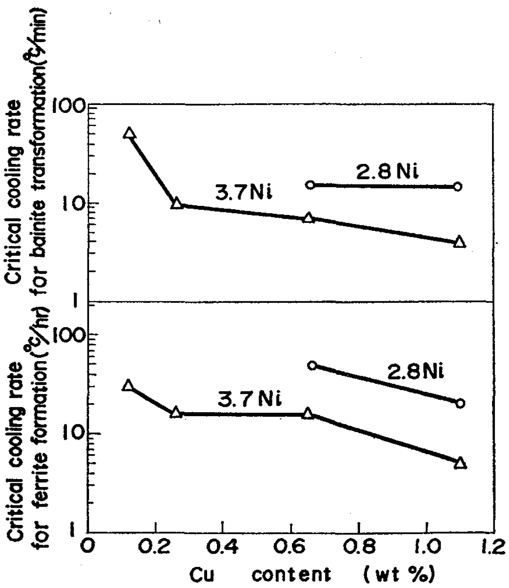

Fig. 1. Effects of Cu and Ni contents on the critical cooling rate for bainite transformation and ferrite formation.

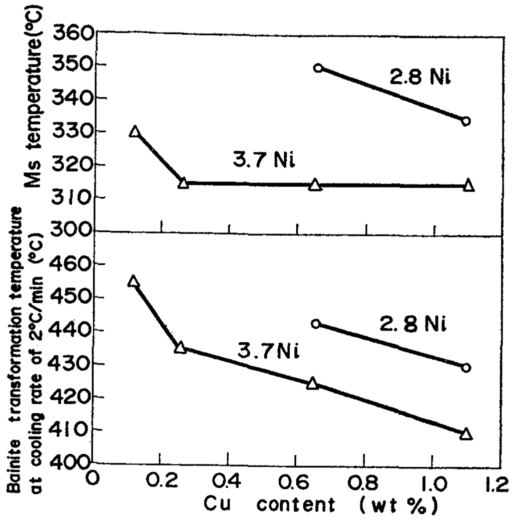

Fig. 2. Effects of Cu and Ni contents on the Ms temperature and bainite transformation temperature in quenching with cooling rate of 2°C/ min.

冷却速度も著しく遅くなる．Ms 点も低下する．3.7% Ni 系で Cu を 1 %添加すると 5°C/ min 以上の冷却速度でマルテンサイトとなり，フェライトを析出するためには 5°C/h よりさらに遅い冷却速度にしなければならない．これらの速度は Cu を添加しない鋼に比べて約 10 倍も遅い．Ni の少ない 2.8%Ni 系では，この臨界冷却速度はいくぶん大きくなるが，同様に Cu 添加で遅くなり，2.8%Ni 系でも Cu を添加することにより Cu を添加しない 3.7%Ni 系より焼入性がよくなることがわかる．大型のロータ軸における中心孔の焼入冷却速度はほぼ 2°C/ min となるので，Fig. 2 にはこの焼入冷却速度におけるベイナイト変態温度を示したが，これは No. 1 鋼が 455°C であるのに対し，Cu 添加により急激に低下し，Cu : 1.1% 添加した No. 4 鋼では約 410 °C となる．また 2.8%Ni 系でも Cu 添加したものは 430～440°C まで低下する．

このように Cu を添加するとベイナイトおよびフェライトが生成する臨界冷却速度は遅くなり，著しく大きな鋼塊でも均一なベイナイト組織が得られる可能性の大きいことを示している．大型ロータ軸の中心孔において，3.7%Ni-Cr-Mo-V 鋼は十分ベイナイト組織となるが，Cu を添加すると 2.8%Ni-Cr-Mo-V 鋼でも十分ベイナイト組織が得られることがわかる．このように Cu を添加すると焼入性を増すので，その分だけ高価な Ni を減少させることが可能である．

4・2 組織に及ぼす焼入冷却速度の影響

Photo. 1 および 2 は組織に及ぼす焼入冷却速度の影響を示す．連続冷却変態曲線を得られなかつた冷却速度の

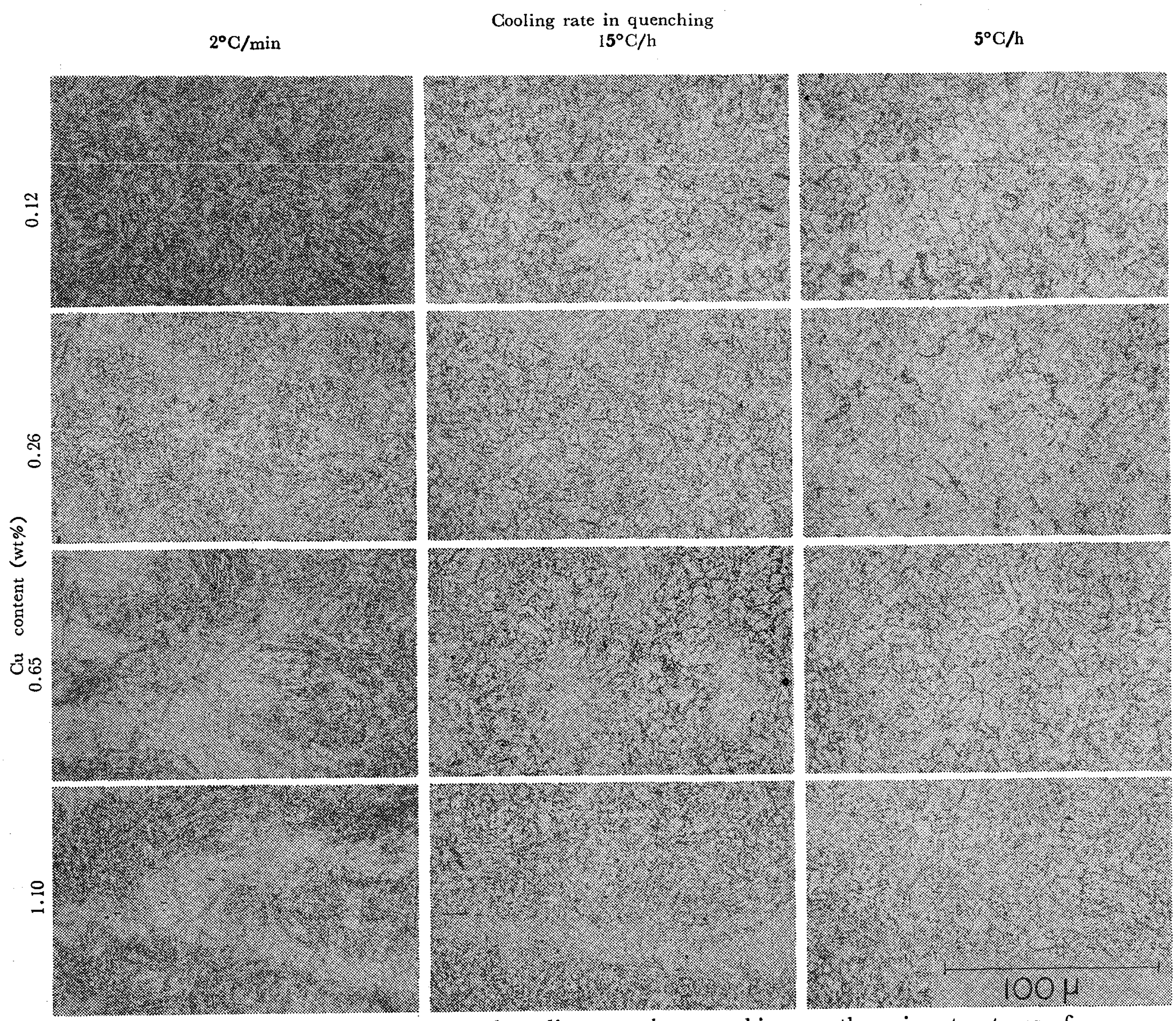

Photo. 1. Effects of Cu content and cooling rate in quenching on the microstructures of as-quenched 3.7% Ni-Cr-Mo-V steels (Austenitizing : 840°C, 2h)

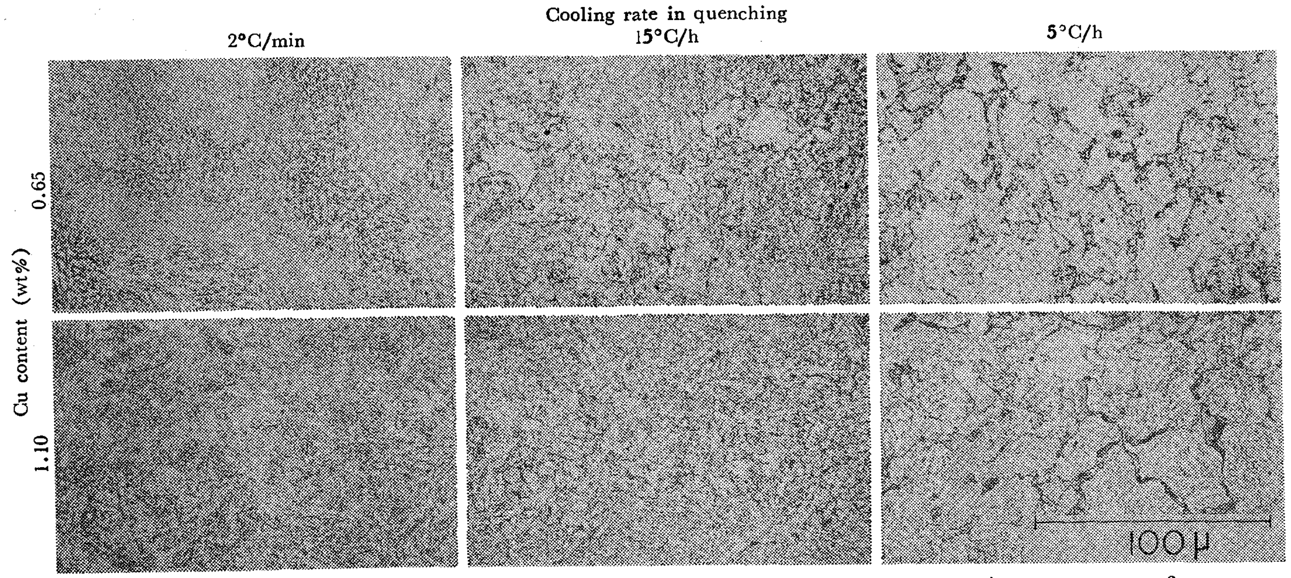

Photo. 2. Effects of Cu content and cooling rate in quenching on the microstructures of as-quenched 2.8% Ni-Cr-Mo-V steels (austenitizing : 840°C, 2h).

遅い範囲について示す．いずれの鋼種も冷却速度の速い範囲から遅くなるにつれて，マルテンサイト組織からベイナイト組織，さらに一部フェライトあるいはパーライトの混合したベイナイト組織へと変わる．この傾向は Cu 含有量の増加とともに焼入冷却速度の遅い範囲にずれる．すなわち 3.7%Ni 系で，2°C/min の焼入冷却速度では Cu : 0.12 および 0.26% のものはベイナイト組織であるが，Cu : 0.65 および 1.1% ではマルテンサイトが生成している．また 15°C/h の焼入冷却速度で Cu : 0.12% のものにフェライトがみられるが，それ以上の Cu を添加したものは均一なベイナイト組織となり，さらに 5°C/h の著しく遅い冷却速度でも Cu : 1.1% のものはフェライトがほとんど生成されない．2.8%Ni 系では 3.7%Ni 系よりマルテンサイトが生成されにくく，フェライトおよびパーライトが生成されやすくなつているが，Cu : 0.65% 添加したものより Cu : 1.1% 添加したものが，フェライトが生成されにくい．3.7%Ni 系と 2.8%Ni 系を比較すると 3.7%Ni 系で Cu : 0.12% のものと 2.8%Ni 系で Cu : 0.65% のものがほぼ同程度の組織を示す．

4·3 硬さに及ぼす焼入冷却速度の影響

Fig. 3 は硬さに及ぼす焼入冷却速度の影響を示す．その結果，焼入れのままの硬さは焼入冷却速度の速いほうが高く，遅くなるにつれて低下する．特にベイナイトの

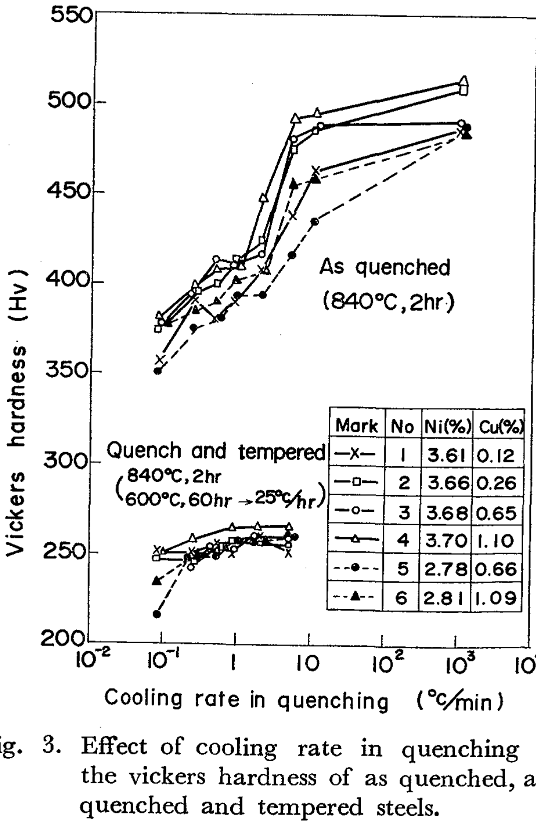

Fig. 3. Effect of cooling rate in quenching on the vickers hardness of as quenched, and quenched and tempered steels.

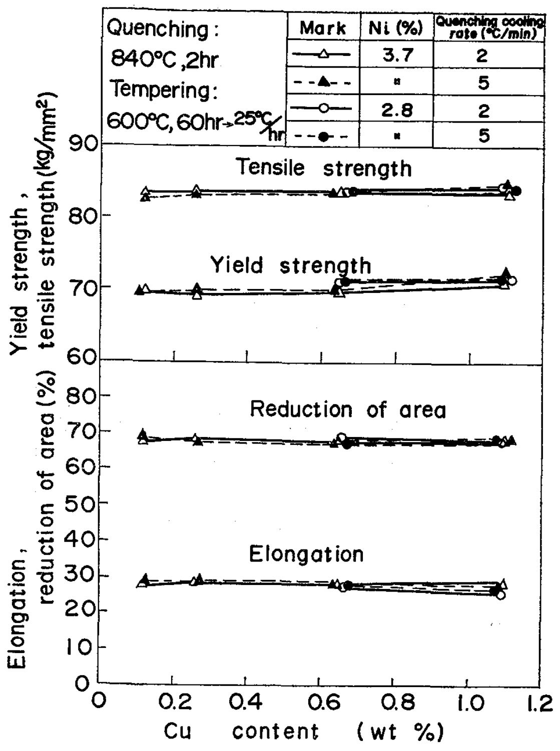

Fig. 4. Effect of Cu content on the tensile properties.

生成しはじめる約 5〜20°C/min より遅くなると急激に低下する．鋼種による影響をみると，Ni および Cu 含有量の多いほうが，焼入性がよいため，高い値を示す．一方焼入れ後 600°C，60 h 焼もどししたものは 2.8%Ni 系でフェライトとパーライトの析出したものを除いて鋼種および焼入冷却速度による影響はほとんどなくなつている．

4·4 引張特性に及ぼす Cu の影響

Fig. 4 は引張特性に及ぼす Cu の影響を示す．焼入焼もどし条件は大型タービンおよび発電機ロータ軸中心孔にほぼ相当する 2°C/min あるいは 5°C/min の焼入冷却速度と焼もどし条件で示した．その結果，600°C，60 h の焼もどしにおいて，引張強さ約 82〜85 kg/mm²，降伏強さ約 70 kg/mm² を示し，これら強度ならびに伸びおよび絞りも Cu 添加による影響はみられない．この結果はさきに示した硬さの結果と一致する．これは 2°C/min あるいは 5°C/min の焼入冷却速度の範囲においては，いずれの鋼種においてもベイナイトあるいはマルテンサイト＋ベイナイトが焼もどされた均一なソルバイト状組織を示しているためである．この点は Ni 量の低い 2.8%Ni 系においても変わらず，Cu 添加によつて十分な焼入性を示し，焼もどしベイナイトの得られる範囲では十分な強度を示すと考えられる．

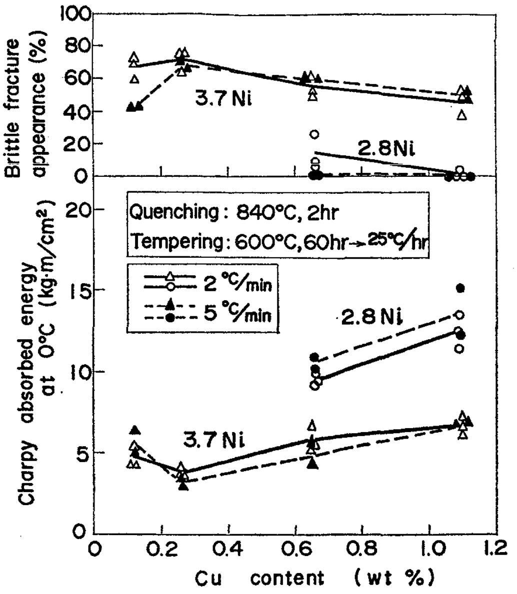

Fig. 5. Effect of Cu content on the absorbed energy and brittle fracture appearance in charpy impact test.

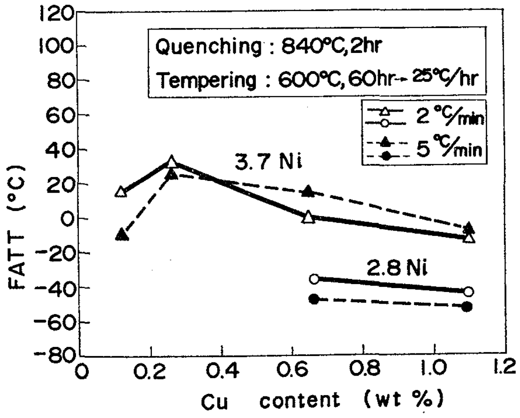

Fig. 6. Effect of Cu content on the 50% fracture appearance transition temperature (FATT) in charpy impact test.

4·5 衝撃特性に及ぼす Cu の影響

Fig. 5 は 0°C のシャルピー衝撃値および脆性破面率に及ぼす Cu 添加および Ni 量の影響を示す. また Fig. 6 は FATT に及ぼすこれらの影響を示す. この結果, いずれも 2°C/min と 5°C/min の焼入冷却速度における傾向にはあまり差がないが, Cu 添加および Ni 量の影響は特異な傾向を示す. すなわち 3.7%Ni 系で Cu : 0.26% までの添加はむしろ衝撃値を低下させ, FATT を上昇させるが, さらに多くの Cu を添加すると衝撃値は増加し, FATT は低下する. このように同じ焼もどしベイナイト組織でも多量の Cu を添加したものは切欠靱性を高める効果がある. また同様に Cu を添加した 2.8%Ni 系においても, 切欠靱性は Cu の増加とともに増すが, 同量の Cu を含む 3.7%Ni 系に比較

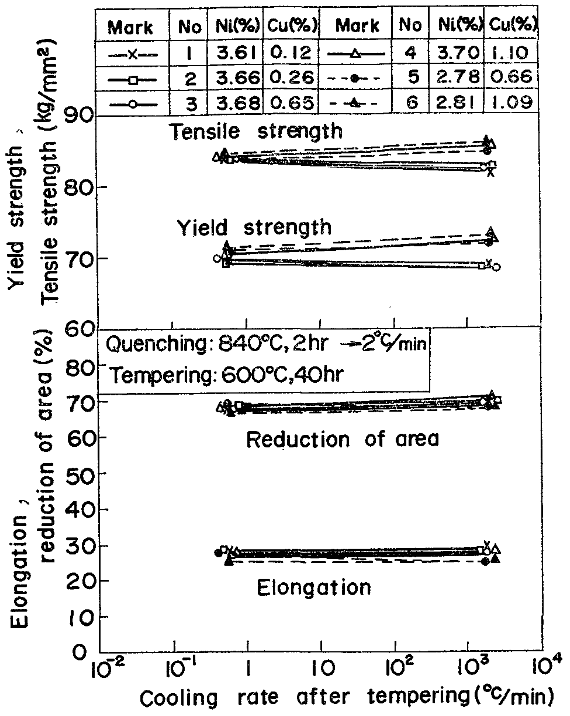

Fig. 7. Effect of cooling rate after tempering on the tensile properties.

して著しく高く, Ni の増加がかえつて靱性の低下を招く結果になつている. これは今まででは考えられなかつた事実であり, 焼入焼もどし時の冷却速度が非常に遅くなつた場合に起こる特異な現象と考えられる. これより大型鍛鋼で熱処理時の冷却速度が遅くなる場合には Ni を減少し代りに Cu を添加することが切欠靱性向上に非常に有効なことが明らかである.

4·6 含 Cu-Ni-Cr-Mo-V 鋼の焼もどし脆性に関する考察

Ni および Cr が添加された低合金鋼は焼もどし脆性に敏感な鋼種で, 今までにも Ni-Cr-Mo 系[9]およびNi-Cr-Mo-V 系[1)9)10)]の鋼について焼もどし脆性が確認されている. 焼もどし脆性に対する感受性の高い鋼種で大型鍛鋼を製造すると, 熱処理における冷却速度, 特に焼もどし後の冷却速度が遅くなるために焼もどし脆化が起こり靱性が低下する. 焼もどし脆化の傾向を確かめるためには従来から Step cooling 処理等によることが多いが, ここでは大型鍛鋼を焼もどし熱処理するときに現われる焼もどし脆性を対象とするために, 焼もどし後の冷却速度を変えた Continuous cooling 法によつて脆化傾向を調べた.

Fig. 7 は焼入冷却速度 2°C/min における引張特性に及ぼす焼もどし後の冷却速度の影響を示す. 冷却速度を 2 000°C/min から 5°C/h まで変えて実験したが, 引張特性は Fig. 4 で示した結果 (冷却速度 25°C/h の場

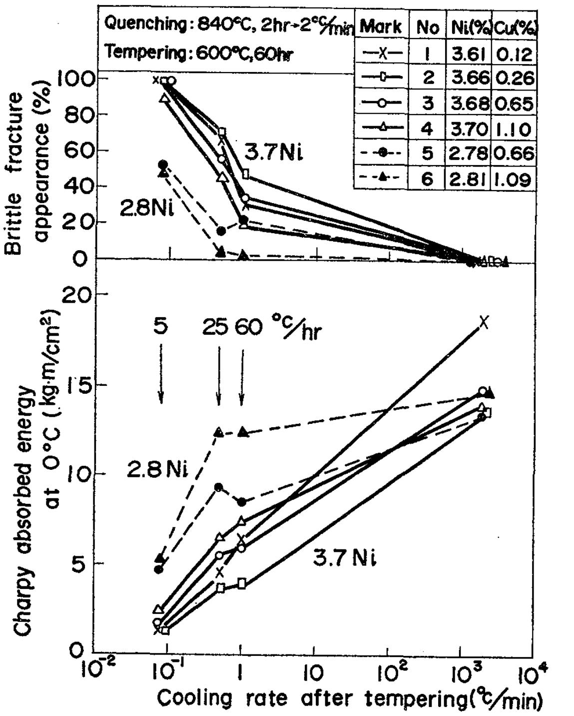

Fig. 8. Effect of cooling rate after tempering on the Charpy impact properties.

合）とほとんど同じであり，焼もどし後の冷却速度には影響されないと考える．

Fig. 8 は同様な条件での 0°C における衝撃特性に及ぼす焼もどし後の冷却速度の影響を示す．この結果，衝撃値および脆性破面率は焼もどし後の冷却速度に著しく影響され，衝撃値は冷却速度が遅くなると急激に低下する．しかしこの傾向は鋼種によつて異なり，3.7%Ni 系が 2.8%Ni 系に比べて著しく，また Cu 添加の少ない鋼種ほど顕著である．すなわち，冷却速度の速い 2 000°C/min では，すべての鋼種が 10 kg·m/cm² 以上の衝撃値を示し，脆性破面は生じないが，冷却速度の著しく遅い 0.08°C/min(5°C/h) では，3.7%Ni 系で Cu 添加の少ない鋼種が衝撃値が 1.5 kg·m/cm² にまで低下し，100% 近い脆性破面率を示す．これに対し，2.8%Ni 系で Cu 含有量の高い鋼種は 0.4°C/min (25°C/h) まで 10 kg·m/cm² 以上の衝撃値を示し，脆性破面もほとんどみられず，すぐれた切欠靱性を示す．

Photo. 3 は Fig. 8 で示した衝撃試験における破面写真である．焼もどし冷却速度の速い場合には通常みられる剪断型の延性破面を示しているが，冷却速度の遅くなるにつれ Shear lip が少なくなり，かつ粒状破面を呈す

Heat treatment	840°C, 2h→2°C/min, 600°C, 60h			
Cooling rate after tempering	2 000°C / min	60°C / h	25°C / h	5°C / h
Steel No. 1				
2				
3				
4				
5				
6				

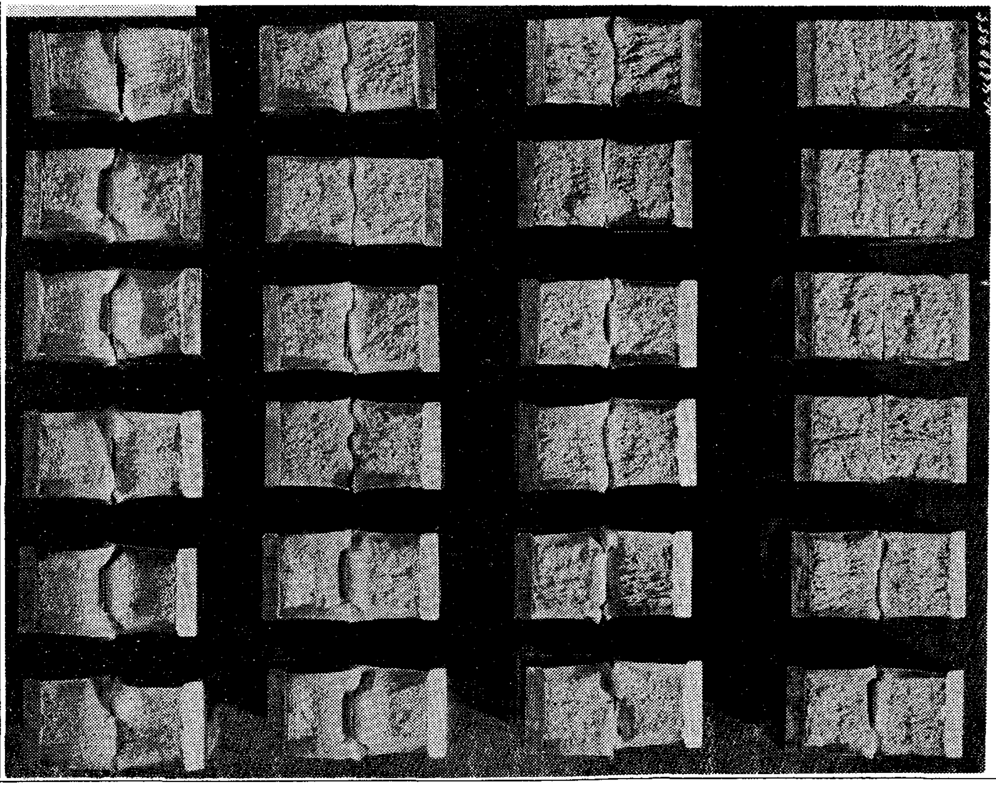

Photo. 3. Fracture appearances after Charpy impact test.

ることがわかる．焼もどし後の冷却速度によつて影響の少ない 2.8%Ni 系の No. 5 および No. 6 はこの変化が顕著でなく，粒状破面がみられる冷却速度は著しく遅くなる．

以上のように本実験に供した Ni-Cr-Mo-V 鋼は焼もどし冷却速度が遅い場合に著しい脆化を示すが，これは Ni-Cr-Mo-V 鋼が焼もどし脆性に対する感受性が高いためである．焼もどし脆性は鋼中に含まれる P, As, Sb, Sn などの微量元素に影響されることが報告[1)9)10)]されており，本供試材に含まれている程度の量で脆化を示すことは明らかである． BOYLE ら[1)]によれば，3.5Ni-Cr-Mo-V 鋼のロータ軸材の靱性は P : 0.011%, As : 90 ppm, Sb : 10ppm, Sn : 40ppm で焼もどし後水冷した場合と炉冷した場合の遷移温度差が 85°F に及ぶが，P : 0.007%, As : 44ppm, Sb : 8ppm, Sn : 58ppm に減少させると 10°F になることを報告している．本供試材の微量不純物は P : 0.010～0.014%, As : 140～170 ppm, Sb : 28～34ppm と多く，このため Fig. 8 に示したように Cu を添加しない 3.7%Ni-Cr-Mo-V 鋼で著しい焼もどし脆性を示したものと考えられる．したがつて，これらの微量不純物を減少させればより高い切欠靱性を得ることが可能であるが，工業的にこのような微量不純物を著しく低下させることは現在の製鋼技術では限度がある．このことを考えると，Fig. 8 とで明らかなように，Ni を減少して Cu を添加することは同一の微量不純物元素量を含む場合でもより焼もどし脆性を少なくすることが可能なため実用的価値が高いといえる．

焼もどし脆性に及ぼす Ni の影響については一般的に Ni の高いものが著しいといわれているが[11)]，定量的には明らかでない．しかし本実験で明らかにしたように，焼もどし脆性は Ni : 3.7%Ni 系で著しく，Ni を低めて 2.8% 系にすると軽減されることは明らかである．この事実はある程度不純物を許容した鋼を適用する場合に重要で，大型のロータ軸のような中心孔で冷却速度が遅くなる鍛鋼を考えた場合，2.8%Ni 系のほうがより高い靱性を示すことを意味している．

また Cu 添加が焼もどし脆性を少なくし，焼もどし後の冷却速度が遅くなる範囲で高い靱性が得られる傾向を示すことは注目される．この機構については今のところ不明であるが，Cu 添加した Ni-Cr-Mo-V 鋼は粒界脆化を起こし難いことは事実であり，Cu 添加によつて微量不純物などの粒界への偏析が遅くなるのではないかと推察される．いずれにしても Cu 添加による焼もどし脆性の軽減についての報告はいままでに見られず，今後さらに検討したいと考える．

4・7 Cu を添加した低 Ni 高靱性ロータ軸材の可能性

以上検討したように，Cu を添加した 2.8%Ni-Cr-Mo-V 鋼は Ni を約 1% も減少させたにもかかわらず焼入性をそこなわず，十分な強度を得，しかも焼もどし脆性が少なく，著しく高い切欠靱性を示した．このように大型鍛鋼を想定し，焼入焼もどし時の冷却速度が著しく遅くなる場合には Ni を減少させて Cu を添加したほうがかえつて高い靱性を持たせることができる．この理由は，

(1) Cu 添加によつて Ni を減少させても非常に遅い冷却速度まで微細なマルテンサイトおよびベイナイト組織が得られること．

(2) Ni が高くなると焼もどし脆性に対する感受性が高くなり，大型鍛鋼等焼もどし後の冷却速度が遅くなる場合，脆化は Ni 量の少ないほうが小さいこと．

(3) Cu 添加によつて焼もどし脆性に対する感受性が低下し，高い切欠靱性が得られること．

が考えられる．この結果，中心孔の焼入冷却速度が約 2 °C/min，焼もどし後の冷却速度が約 50°C/h となる大型ロータ軸材はもちろんのこと，これ以上に遅い焼入冷却速度(50°C/h)になると予想される大型鍛鋼材は Ni を 2.8% 程度におさえ，Cu を添加した鋼種が高靱性材料として有望と考えられる．なお Cu は従来から低合金鋼に添加されると熱間加工性が悪くなるといわれている．しかし Cu を添加した耐熱鋼はボイラ鋼管として問題なく加工されている[12)]．本報告では Cu 添加鋼の強度，靱性を主に検討したため大型鋼塊としての健全性，熱間加工性については十分でないが，その後本鋼種を約胴径 800 mmφ の発電機ロータ軸として製造したが，熱間加工性において何ら問題なく，健全なロータ軸が得られている[13)]．これは添加した Cu の量に対して 2 倍以上の Ni が含有されているためと考えられ，本鋼種は加工性において特に問題点はないと考える．

5. 結　　言

Ni-Cr-Mo-V 鋼の焼入性，強度および靱性に及ぼす Cu の影響を調べ，従来より低 Ni ですぐれた靱性を持つ新鋼種を得ることができた．以下この結果をまとめて示す．

(1) Ni-Cr-Mo-V 鋼に Cu を添加すると著しく焼入性を増す．Ms点およびベイナイト変態温度は低下し，ベイナイトおよびフェライトが生成される臨界冷却速度は著しく遅くなる．15°C/h 程度の非常に遅い冷却速度でもベイナイト組織が得られる．

(2) 焼入焼もどし材の強度は Cu 添加してもあまり

変わらない．しかし切欠靱性は著しく上昇する．0.5～1.0%Cu 添加のものの切欠靱性は 2.8%Ni 系のほうが 3.7%Ni 系よりも高い値を示し，特に焼入焼もどし冷却速度が遅い場合にその差が顕著である．

(3) 3.7%Ni 系の切欠靱性は焼もどし後の冷却速度によつて著しく左右され，冷却速度の遅い場合に著しい低下を示す．これは焼もどし脆性によると考えられ，Ni 量の少ない 2.8%Ni 系では影響が少ない．またこの影響は Cu 添加するにつれて少なくなる．

(4) Cu を添加し，Ni を 2.8% 程度におさえることによつて，焼入性を向上し，焼もどし脆性の低下をはかることができるため，3.7%Ni-Cr-Mo-V 鋼よりも低 Ni ですぐれた切欠靱性を有する大型鍛鋼を得ることが可能である．2.8%Ni 系で Cu 約 1% 添加した鋼種は不純物が一般の工業的レベルでも，焼入冷却速度 2°C/min，焼もどし 600°C，60 h で 25°C/h で冷却した大型鍛鋼を想定した熱処理条件で，引張強さ84 kg/mm^2，vEo：約 12 kg·m/cm^2，FATT：−40～−50°C のすぐれた値を得ることができる．

最後に本研究を行うにあたり御指導賜つた当社日立工場電力設計部庄山部長，本社総合技術部島田副技師長(当時勝田工場副技師長)日立研究所小川部長，飯塚主幹の諸氏に深甚なる謝意を表します．

文　献

1) *C. J.* Boyle, *R. M.* Curran, *D. F.* DeForest, and *D. L.* Newhouse: Further Progress in the Development of Large Steam Turbine and Generator Rotors: Paper presented at ASTM 68 th Annual Meeting (1965, 6)
2) 稲垣道夫：高張力鋼および低温用鋼の溶接：溶接技術講座 4 巻，鉄鋼の溶接，(1963)，p. 89[日刊工業新聞社]
3) 羽鳥幸男：金属材料，9(1969) 1，p. 18
4) 秋田武夫：日本金属学会会報，3(1964)，p. 187
5) 日本金属学会強度委員会編：金属材料の強度と破壊，(1964)，p. 220[丸善]
6) ASTM Standards, A469-71, A470-65, A470-74
7) 佐々木良一：鉄と鋼，52(1966)，p. 1650
8) 長嶋晋一，大岡耕之，関野昌蔵，三村　宏，藤島敏行，矢野清之助，桜井　浩：鉄と鋼，58(1972)，p. 128
9) Temper Embrittlement in Steel, ASTM STP 407(1968)
10) *E. T.* Wessel and *R.R.* Hovan: Effect of Long Time Exposures at 400 to 1 000°F on the strength and Toughness of a Ni-Cr-Mo-V High Strength Weldable Steel, Symposium on Heat Treated Steels for Elevated Temperature Service, ASTM, (1966), p. 86
11) 例えば三村　宏：鉄と鋼，57(1971)，p. 2273
12) 佐々木良一，幡谷文男：火力発電，18(1967)，3．第 126 号，p. 314
13) 正岡　功：未発表