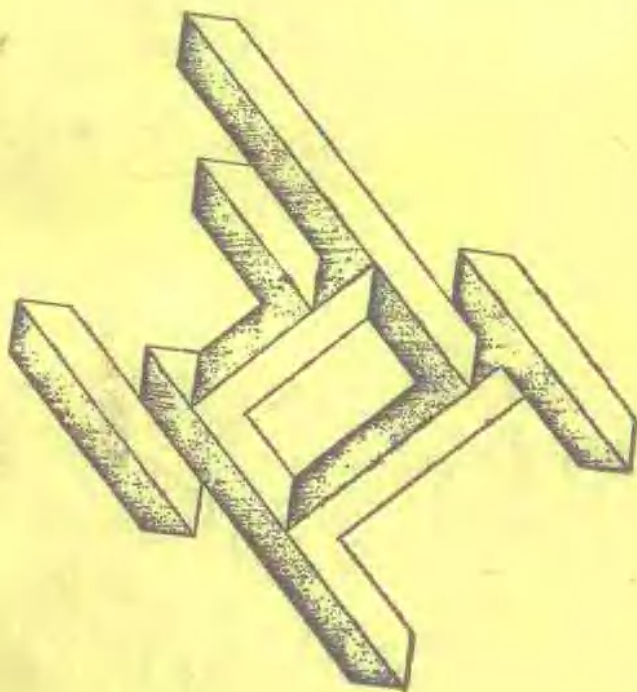


金属系新素材

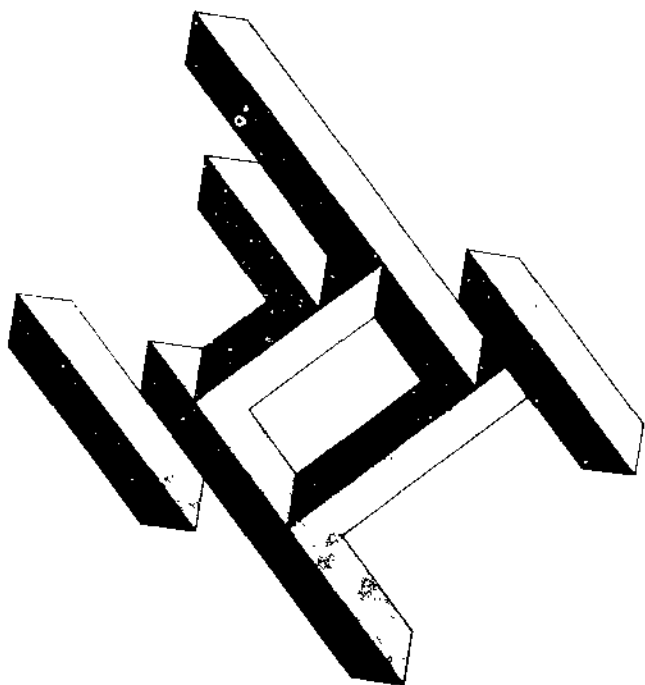
科学技术庁金属材料技術研究所編



71.5
4.19

金属系新素材

科学技術庁金属材料技術研究所編



金属系新素材

NDC 530

昭和61年7月1日 初版1刷発行 (定価は、カバーに
表示してあります)

© 編 者 科学技術庁金属材料技術研究所
発 行 者 藤 吉 敏 生
発 行 所 日 刊 工 業 新 聞 社
東京都千代田区九段北一丁目8番10号
(郵便番号 102)
電話東京(263) 2311 (大代表)
振替口座東京 9-186076
製 作 懶日刊工業出版プロダクション
印 刷 後 楽 印 刷 株 式 会 社
製 本 中 央 精 版 印 刷 株 式 会 社

落丁・乱丁本はお取替えいたします

ISBN4-526-02050-8

序

3K554 / 18

科学技術庁金属材料技術研究所は、金属材料の性能向上を図ることを目的としてちょうど30年前、昭和31年7月1日に設立された。当時は日本経済の高度成長が始まろうとするまさにその前夜であり、材料に対する要望が、量の面でも質の面でもきびしくなることが予見される時代であった。またそのような予見があったから、金属材料技術研究所が設立されたわけでもある。

われわれの研究所は創立以来、金属材料に対するきびしい要望に応えるため、(1) 材料の性能向上と新材料の開発、(2) 材料の製造、加工技術の開発、(3) 材料信頼性の確立、などの面で日夜努力を続け、金属材料に関する基礎的科学技術のレベルアップに大きく貢献してきたと信じている。

金属材料のこの30年間の歴史をかえりみると、非常に大きな技術的進歩があったことがわかる。たとえば、現在のステンレス鋼は30年前のステンレス鋼とはまったく違っている。30年前には純鉄といわれるものでも、不純物として数十ppmの硫黄を含んでいたが、現在のステンレス鋼では市販のものでもその濃度は10数ppmまで下げられている。また新しい製鋼法により炭素含有量を十分下げることができるようになった。これらの有害不純物の除去、成分の微調整技術の向上により、強さや耐食性は格段に向上した。このような例はステンレス鋼以外にも、高張力鋼（橋、船、海洋構造物、石油掘削など）、表面処理鋼板（自動車、家電製品、缶詰など）、電磁鋼板（トランス、モータなど）などに見られる。これらの材料性能の向上、生産技術の開発により、われわれは30年前には考えられなかったような生活——豊かなエネルギー、快適な住環境、快適な交通機関など——を持つことができるようになっていく。

一方、最近の新技術、すなわちエレクトロニクス、情報、宇宙工学などの分野で、新材料の開発がその技術分野の開発の引き金となり、またその技術分野の発展の支えとなっていることがしばしば見受けられる。このようなことから、近年、金属材料に対して既存の機能の向上以上に新しい機能の開発が強く

求められるようになってきた。これらは非晶質合金であり、形状記憶合金であり、超微粒子等々である。

金属材料技術研究所は、ステンレス鋼のように耐食性という、機能としては新しくないがその性能が格段に向上した新素材、および超電導材料のように新しい機能を持った新素材のいずれについても強力に研究を進めてきた。今回、30周年を期してこれら新素材の現状および将来を展望することにより、新素材開発の一助となることを念願して、ここに金属系新素材に関する解説書を世に送ることとした。

素材が材料として世の中で使われていくためには、その製造・加工技術の開発、材料信頼性の確立も非常に大きな課題であり、これらは機能開発とあわせて新素材開発の三本柱である。しかし本書は機能性を中心に編集することにしたので、とくにそれと関連がないかぎり、これらの技術的發展はとりあげないこととした。

本書はわれわれの研究所の成果のみでなく、金属系新素材に関する一般の解説書としている。執筆にはその分野の専門の研究者が当たり、記述はやさしいが内容のレベルは落さないということを念頭において執筆してもらった。本書により、金属系新素材の研究開発の現状と、その希望と困難を含めた将来展望を認識し、ご興味をもっていただければ望外の幸せである。読者諸賢のご批判をお待ちする。

最後に、本書の各節の執筆者、種々の資料をご提供いただいた所外の方々、また出版に当たりご協力いただいた日刊工業新聞社の方々に厚くお礼申し上げます。

昭和61年7月

科学技術庁金属材料技術研究所 所長 中川 龍一

「金属系新素材」出版小委員会

委員長	新居 和嘉	委員	戸叶 一正
委員	青木 晴善	"	平野 敏幸
"	石川 圭介	"	松本 武彦
"	海江田義也	"	八木 晃一
"	加藤 公輝	"	吉原 一紘
"	越川 隆光	事務局	林 武次郎
"	斎藤 鉄哉	"	豊原富佐子
"	佐藤 彰		

「金属系新素材」執筆分担

- | | |
|-----------------|--|
| 序 (中川龍一) | 3・4 (山崎道夫) |
| 1. (金尾正雄) | 3・5 (海江田義也) |
| 2・1 (吉松史朗・砂金宏明) | 3・6 (福富勝夫) |
| 2・2 (藤井忠行) | 3・7 (石川圭介・平賀啓二郎) |
| 2・3 (星本健一) | 4・1 (太刀川恭治) |
| 2・4 (小川恵一) | 4・2 (天野宗幸) |
| 2・5 (宇田雅廣・小沢英一) | 4・3 (西田勲夫) |
| 2・6 (佐藤充典・松本武彦) | 4・4 (白石春樹) |
| 2・7 (上原 満) | 4・5 (藤井哲雄) |
| 2・8 (前田 弘) | 5・1 (山崎道夫・吉川明静) |
| 2・9 (中谷 功) | 5・2 (新居和嘉・小口 醇・宇田雅廣
・松本武彦・吉原一紘・井上 廉
・星本健一) |
| 2・10 (小口信行) | 5・3 (武内朋之・吉松史朗・長谷川良
佑) |
| 2・11 (梶原節夫) | 5・4 (岡田雅年・古林英一) |
| 2・12 (吉原一紘) | 5・5 (古林英一・中村治方) |
| 3・1 (河部義邦) | |
| 3・2 (中村森彦) | |
| 3・3 (渡辺 治) | |

目 次

1. 金属材料は進歩する

1.1 金属材料の進歩	1
1.2 鉄鋼製造技術の進歩	2
1.2.1 生産性と経済性の向上を目指して	2
1.2.2 高品位を目指して	3
1.3 鉄鋼材料の進歩	5
1.3.1 高張力鋼	5
1.3.2 ステンレス鋼	8
1.3.3 表面処理鋼板	9
1.3.4 電磁鋼板	10
1.4 信頼性の向上を目指して	12
1.5 今後の展望	14

2. 新しい機能をもとめて

2.1 レアメタルおよびその化合物	17
2.1.1 レアメタルとは	17
2.1.2 金属間化合物とは	20
2.1.3 先端材料分野とレアメタルおよびその化合物との関わり	21
2.2 単結晶材料	28
2.2.1 単結晶製作方法	29
2.2.2 高融点金属単結晶材料の製作	31
2.2.3 金属単結晶材料の応用と今後の展望	34
2.3 非晶質合金	35
2.3.1 非晶質の形成と安定性	35
2.3.2 非晶質の製造法	38
2.3.3 機械的性質	41
2.3.4 磁性	42
2.3.5 耐食性	43

2-3-6	超電導	44
2-4	積層薄膜	46
2-4-1	人工物質としての積層薄膜	46
2-4-2	積層薄膜の原子構造	48
2-4-3	積層薄膜——その物理と期待される物性	49
2-4-4	積層薄膜作製技術	53
2-5	超微粒子	56
2-5-1	超微粒子の性質	56
2-5-2	反応性プラズマガスによる超微粒子の製造	59
2-5-3	超微粒子の機能と応用	64
2-6	電子金属材料	66
2-6-1	集積回路用金属材料	67
2-6-2	リードフレーム——集積回路の手足	70
2-6-3	はんだ材料	73
2-6-4	接触材料	75
2-6-5	導電塗料	78
2-7	磁性材料	80
2-7-1	希土類金属の磁性	80
2-7-2	希土類・鉄族金属間化合物	83
2-7-3	希土類コバルト磁石の磁化機構	87
2-8	磁気冷凍材料	91
2-8-1	磁気冷凍	91
2-8-2	極低温における磁気冷凍作業物質	92
2-8-3	低温領域における磁気冷凍作業物質	95
2-8-4	今後の展望	98
2-9	磁性流体	98
2-9-1	磁性流体とは	98
2-9-2	酸化物磁性流体と金属磁性流体	100
2-9-3	磁性流体の合成法	101
2-9-4	磁性流体の応用	103
2-9-5	磁性流体に見る新素材の新しい開発指向——ハイブリッド材料	105
2-10	発光素子用材料	105

2・10・1	注入発光	106
2・10・2	可視光発光ダイオード	108
2・10・3	半導体レーザダイオード	109
2・11	形状記憶合金	114
2・11・1	形状記憶効果の機構	115
2・11・2	形状記憶合金の微視的特性	117
2・11・3	鎖における形状記憶効果	123
2・12	極高真空容器用材料	125
2・12・1	超高真空	125
2・12・2	極高真空を実現するには	126
2・12・3	極高真空容器用材料	128
3.	強さを追求する	
3・1	高比強度材料	135
3・1・1	高比強度材料とは	135
3・1・2	超強力鋼	139
3・1・3	チタン合金	141
3・1・4	アルミニウム合金	144
3・2	構造材料用金属間化合物	146
3・2・1	弾性係数	147
3・2・2	強度と延性	148
3・2・3	加工と延性改善	151
3・2・4	構造材料としての金属間化合物	152
3・3	繊維強化複合材料	154
3・3・1	FRMへの期待	154
3・3・2	FRMの作り方	156
3・3・3	FRMの特性	157
3・4	超耐熱合金	160
3・4・1	超耐熱合金とは	160
3・4・2	超耐熱合金に必要な性質	161
3・4・3	Ni 基超耐熱合金	162
3・4・4	普通鑄造合金	165

3-4-5	一方向凝固合金	166
3-4-6	単結晶合金	168
3-4-7	粒子分散強化合金	169
3-5	粒子分散複合材料	170
3-5-1	粒子分散複合材料の製造法	171
3-5-2	粒子分散複合材料の性質	174
3-6	セラミック被覆材料	177
3-6-1	セラミックスの気相蒸着	178
3-6-2	気相蒸着の最近の動向	181
3-6-3	プラズマ溶射	183
3-6-4	セラミック被覆材料の問題点とその対策	184
3-7	極低温用構造材料	185
3-7-1	極低温技術と新しい構造材料へのニーズ	185
3-7-2	極低温における材料特性	188
3-7-3	高強度・高じん性材料	188
3-7-4	新しい材料の適用性	191
4.	新エネルギー技術を支える	
4-1	超電導材料	195
4-1-1	超電導とは	195
4-1-2	超電導材料の種類と特性	196
4-1-3	実用超電導線材	197
4-1-4	開発中の超電導材料	201
4-1-5	超電導の応用の現状	203
4-2	水素貯蔵合金	208
4-2-1	実用的な水素貯蔵合金とは	208
4-2-2	水素貯蔵合金	210
4-2-3	水素貯蔵合金の将来	212
4-3	エネルギー変換デバイス	214
4-3-1	直接発電デバイスとタイプ	215
4-3-2	太陽電池	218
4-3-3	熱電材料	220

4・4	核融合炉炉心構造材料	224
4・4・1	材料に及ぼす中性子照射効果	225
4・4・2	今後の材料開発の方向	226
4・5	電極材料	231
4・5・1	電気化学反応と電極材料	231
4・5・2	電極の種類と機能	232
4・5・3	金属電極	234
4・5・4	酸化物電極	236
5.	未来を拓く	
5・1	材料を設計する	239
5・1・1	材料設計の一般論	239
5・1・2	合金設計の実例とその問題点	241
5・1・3	材料設計の今後	245
5・2	極限環境を利用する	247
5・2・1	極限環境とは	247
5・2・2	極限環境の利用	251
5・3	材料を超高純度化する	256
5・3・1	極能灯材料	257
5・3・2	構造材料	262
5・4	材料の複合化を図る	265
5・4・1	材料の複合化の狙い	265
5・4・2	複合材料	266
5・4・3	物質のハイブリッド化	267
5・4・4	表面複合化材料	271
5・4・5	金属産業とマイクロ化	272
5・4・6	基礎研究の必要性	272
5・5	新加工プロセスを利用する	273
5・5・1	凝固技術——材料組織の制御	273
5・5・2	結晶制御を目指す新加工法	275
5・5・3	超高温熱源による表面改質と新材料の創製	278

1. 金属材料は進歩する

1.1 金属材料の進歩

金属材料はすべての工業にとって最も基本的な構成材料であり、科学技術の高度化には金属材料の進歩が前提条件である。以下、鉄鋼材料に例を取って過去約30年間における金属材料の進歩の状況をながめてみよう。

鉄鋼材料はこの30年間の社会・経済の大きく、かつ急激な流れの変化に強い影響を受けながらもよく対応し、責任を果たしてきた。

戦後の荒廃の時代も終わった昭和30年代から、40年代にかけての高度成長期では、巨大タンカー、長大橋、高層ビル、大規模発電プラントなどに代表される機器、構造物の大形化に対応するため、高強度、高じん性の構造用鋼が目覚ましい発展を遂げた。また、労働力の不足から省力化が可能な自動溶接や大入力溶接が可能な鋼材や、メンテナンス・フリーの耐食材料が開発された。さらに、公害、安全対策が重要な課題となり、自動車排ガス対策用の耐熱・耐食材料やクリーンエネルギーであるLNGのための低温用鋼などの開発が進捗した。

昭和48年に勃発し、世界経済に大きな影響を与えた石油危機は、鉄鋼材料に対しても新たな展開を求めた。すなわち、エネルギー源の開発、生産に使用される材料に対しては、従来よりさらに過酷な使用環境に耐えることが、よりいっそうのコスト低減とともに求められた。たとえば、つぎのような材料である。深流、極寒地における油田や高腐食性ガス田開発に必要な高強度耐食、石油井管、耐塩びい性、硫化水素耐食に強い高強度炭素鋼、ステンレス鋼、腐食や高湿環境に強く照射損傷に耐える各種原子炉材料、熱機関の高効率化に必要な超耐熱材料、等々……。

一方、エネルギーを消費する分野で使用される材料に対しては省資源、省エ

エネルギーの観点からの性能向上が強く求められた。自動車の軽量化のための高張力鋼薄板やばね鋼、防錆による耐久性の向上が期待される表面処理鋼板、発電、送電時の電力損失を減少させる超低鉄損型電磁鋼板などの材料である。

その結果、製造プロセスの省工程、省エネルギーによるコスト低減に成功しながら、品質の高級化に成功したことはわが国の鉄鋼生産の総量がここ10年間低迷を続けているにもかかわらず、高張力鋼や表面処理鋼板などの高級鋼の生産高が著しく増加したことからも裏付けられる。

このように鉄鋼材料、より一般的にいえば金属材料が社会・経済の期待によく応え、量的にも質的にも顕著な発展を果したのは、材料の製造、加工、材質にかかわる基礎理論、製造技術、材料設計手法、解析・分析手法、材料の評価、利用技術などが革新的にしかも総合的に発展を遂げ、支えたからである。

1.2 鉄鋼製造技術の進歩

1.2.1 生産性と経済性の向上を目指して

高炉に接続する製鋼炉として、鋼浴上から酸素を鋼浴面に吹きつけて急速な精錬反応を生じさせる純酸素上吹転炉法がわが国ではじめて採用されたのは昭和32年であった。その有する高度の生産性と経済性が、当時の急速な経済成長にもとづく需要の拡大によく応え得るとともに、原料および生産される品種の柔軟性から、たちまちのうちにそれまで主力であった平炉法に置きかわり、製鋼炉の主力となった。昭和45年には粗鋼生産高約9300万トン中約80%が転炉法で生産された。製品の品質面での改善も急速に進み、現在では溶銑予備処理法などの発達にも助けられて電気炉法に対抗できるようになった。生産性とコスト面で有利なので、転炉法による特殊鋼、高級鋼の生産量が増加している。ちなみに電気炉法も電力費の高騰による不利を合理化によって克服し、原料である鉄屑の供給の好転により、経済性のゆえに普通鋼の分野で生産量が増えている。

歴史的にいえば、トーマス底吹転炉法の欠点を改善した純酸素上吹転炉法が

最近まで全盛を誇ってきたが、最近、低炭素領域で鋼浴の攪拌力が強く、吹錬全般にわたって酸素効率が良好な底吹転炉法が再び注目され、わが国にも導入された。そして、このことに刺激され、上吹転炉の炉底から少量のガスなどを吹き込むことによって、浴の攪拌を助け、炉内反応効率を高め、底吹転炉に匹敵する操作性と冶金特性が得られることがわかり、普及した。これを複合吹錬炉と呼んでいる。

転炉製鋼法に続く製造技術の進歩は、連続鑄造法の発展である。製鋼および造塊技術の進歩によって工業化が可能になったこの技術は、わが国では昭和30年に導入された。従来の造塊、分塊という工程に比し、溶鋼から直接ビレットやスラブを連続的に鑄造し、分塊工程を省略する方法は設備費が安い、歩留りが高い、表面きず、介在物、偏析など欠陥が少なく、品質がすぐれているなどの長所がある。したがって、その後の発展は純酸素上吹転炉の場合ほどではないにせよ急速であり、とくに歩留り向上のメリットが高いステンレス鋼から普及した。最近では品質向上の技術が高度化し、また、リムド鋼についてもリムド代替鋼が出現するなどして、ほとんどすべての鋼種が製造可能となった。

鋼片内部の均質性や表面性状などは、現在では造塊法によるものよりすぐれているといえる。このため石油危機以来、省エネルギーの観点から急速に採用するところが多くなり、昭和58年には連鑄比が86%にも達した。

こうして高炉、製鋼炉、連鑄、さらには広幅ホットストリップミルなどの強力な圧延設備の工程が整備され、鉄鋼材料の生産性向上、コスト低減の要求に対応してきた。

1-2-2 高品位を目指して

(1) 高纯净鋼の精錬技術

鋼中の不純物、たとえば H, O, N, P, S などは鋼の諸性質に著しく有害である。絶えざる高品質化への要求に対して、鋼の清浄化を目的にさまざまな努力がなされた(表1-1参照)。その萌芽は30年代に現われている。製鋼炉の精錬プロセスの改善のみでは対応は困難であった。転炉製鋼上吹転炉は理論的に脱硫黄(脱硫)能に限界がある。対策として、高炉の炉内空気を転炉に装入す

表 1-1 鋼の清浄化の動向¹⁾

動 機	事 例	低減不純物
1. 要求特性値の過酷化	高張力ラインパイプ用鋼 耐ラメラテア鋼 Cr-Mo 鋼, 低温用鋼	C, S, N S P, S
2. 鉄鋼製造プロセス, 技術の変革と進歩	連続焼鈍プロセス 加工熱処理技術	C, N C, S
3. 製造性の改善	連続鋳造での表面きず抑制 省エネルギープロセスでの铸片の無手入れ化 UST 欠陥の絶無	S, N, O S, N, O H, S, O

る以前に、脱硫剤添加や溶銑攪拌による脱硫を行なわせる溶銑予備処理技術が生まれた。

一方、白点や水素ぜい性などの水素による欠陥に悩んでいた特殊鋼を対象に、出鋼後真空容器内で脱ガスを行ない、脱水素と脱酸素（脱酸）を行なう真空脱ガス法が始まり成功を取めた。

最近の品質の高級化の要求はきわめて強く、高度の機能を有する炉外精錬法が急速に開発された。すなわち、溶銑予備処理では脱硫のみならず、脱リンも分担するようになった。製鋼炉の後工程では単なる真空脱ガスのみならず、CaO などの粉体やガスを溶鋼に吹き込むインジェクション冶金、真空脱ガスから出発して量産鋼用として発展している RH や OH 法、アーク加熱が付与され、高級鋼に適用されている ASEA-SKF 法、VAD (Vacuum Arc Degassing) 法などが生まれた。すなわち、製鋼炉と連铸の中間にあって、脱酸、脱窒、脱水素などの脱ガス、スラグ精錬（脱硫、脱リン）、脱炭のための微素ガス吹錬、成分制御、温度制御、攪拌などの機能を持つ取鋼精錬技術の発展である。これには品質の高変化に 대응するほか、工程の合理化としての意義がある。

ステンレス鋼の精錬においては Cr を含む鋼浴の脱炭、脱窒のため、真空脱炭法である VOD (Vacuum Oxygen Decarburization) 法や RH-OB 法、Ar ガスで薄めに酸素カスを羽口から吹き込む AOD (Argon Oxygen Decarburization) 法が育った。

これらの炉外精錬法の開発によって、C : ≤ 50 ppm, P : ≤ 20 ppm, S : ≤ 10

ppm, O: ≤ 10 ppm, が達成されている。この値は JIS に規定されている従前の不純物量に比し桁違いに少量であり、量産型の技術でありながら、真空誘導溶解法、真空アーク溶解法、エレクトロスラグ再溶解法、プラズマアーク溶解法、電子ビーム溶解法などの特殊溶解法による高纯净鋼のレベルにせまる値である。

(2) 制御圧延・冷却技術の進歩

この技術は従来単に成形の手段にすぎなかった熱間圧延工程に材質の形成という新しい役割を持ち込んだ。欧米において 40 キロ級（引張強さ 40 kgf/mm² 以上）の造船用厚鋼板のじん性向上の手段として始まった初期のこの技術は、圧延工程の途中でいったん圧延を中断し、鋼片の温度が所定の温度にまで低下したのち再開し、低温で圧延を終了させるという現場的な技術であった。

この技術がわが国において注目され、微量 Nb を含むラインパイプ材を対象に活発な開発研究が展開された。そして、金属学的検討によって微量元素の役割を含めて制御圧延中の鋼材の変化が詳細に解析され、圧延のままの（非調質）高張力鋼である高強度・高じん性ラインパイプ材の製造技術として確立した。

現在では Nb などの有無にかかわらず、鋼片の加熱条件の制御、高温の再結晶オーステナイト (γ) 域、またはそれより低温の未再結晶 γ 域、そして場合によってはより低温の γ とフェライト (α) の 2 相総合域における圧延、直接焼入れを含む圧延後の加速冷却までの全工程を総合的に制御した技術として、多彩な発展を遂げた。省エネルギー、省工率、省コストを達成しながら、従来調質鋼の領域であった分野を含め、高品位の高張力鋼を得ることが可能となった。制御圧延・冷却によって組織が微細化し、強度とじん性がともに向上するものである。表 1.2 に主要な制御圧延・冷却技術の概念を示した。

1.3 鉄鋼材料の進歩

1.3.1 高張力鋼

第二次大戦を契機に溶接技術が大幅に進歩し、従来のリベット構造などにか