



UDC 669.293

金属資源シリーズ—ニオブ—

植木正憲*・門

智*²

Metallic Resources Series—Niobium—

Masanori UEKI and Satoshi KADO

1. 緒 言

ニオブは 1801 年イギリスの科学者 Charles HATCHETT によつて発見され、その発見された土地にちなんでコロンビウム (Cb) と名付けられた。しかしながら、このコロンビウムはタンタル (Ta) と常に随伴しその性質も非常に類似していることから、両者を真に分別することは困難を極めた。約 40 年後にドイツの化学者 Heinrich ROSE はこの分離同定に成功し、タンタルがギリシャ神話の王の名 *Tantalus* から名付けられたことを知つて、その片方を王の娘の名 *Niobe* からニオブウム (略してニオブ) (Nb) と名付けた。1949 年にニオブの方が国際的公式名称と決定され、世界中のほとんどの国々において用いられている。しかしアメリカでは、特に工学的分野においてはいまだにコロンビウムの方が一般的で、上述の 2 通りの呼称は今日までも続いているといえ、ニオブは 2 つの名前を持つ唯一の元素として知られている。

このような名前の由来を持つニオブであるが、1930 年代のはじめに工具鋼への添加あるいはオーステナイトステンレス鋼における鋼中炭素の安定化を目的とした添加が行われるまで、その工業的利用はほとんどなされなかつた。その後、耐熱鋼その他の合金鋼に主として析出強化元素として添加されてきたが、ニオブの鉄鋼添加元素としての工業的利用は、1960 年代はじめの低合金高張力鋼の開発、つまり軟鋼へのニオブの微量添加が強度と靱性を同時に改善する結晶粒微細化を促進することが明らかにされることによつて大きく躍進した。そして、こうした材料開発あるいは合金設計における技術の向上に加えて、1950 年代におけるブラジルとカナダでの新しい莫大な鉱物資源の発見、ならびにそれらの適切な抽出製錬プロセスの開発による大量のニオブ供給体制の確立で価

格が低下し安定した供給が可能になつたことで、工業材料としてのニオブの重要性は増大してきたのである。

現在、ニオブはフェロニオブ (Ferro-Nb) あるいは五酸化ニオブ (Nb_2O_5) として種々の鋼、超耐熱合金、金属ニオブ、ニオブ基合金、ニオブ炭化物などの製造に用いられており、1979 年における世界総消費量は Nb 純分あたり 11 000 t であつた。最大の消費は前述の低合金高張力鋼においてであり、これらの鋼は種々の高層建造物、橋梁、パイプラインなどの建設、あるいは船体構造、自動車および鉄道施設などの交通運輸産業に用いられ、各部材の耐久性向上に大いに寄与している。ニオブ基合金、金属ニオブ、超耐熱合金、ステンレス鋼などは高温での耐食性と高比強度を要求される機械装置あるいは航空機の製造などに用いられている。さらにニオブ基合金、金属ニオブは種々の電子部品、電気抵抗合金などに用いられるが、将来最大のニオブ消費が予想される超電導材料としても重用されている。

工業材料としてのニオブの発展経緯ならびに現在における使用状況を概述してきたが、本稿の以下の部分においては、世界におけるニオブ資源の賦存状況、生産及び消費の概況、価格の推移、さらには採鉱、鉱石処理、製錬プロセスなどを簡単に記述するとともに、上述のような広範なニオブ応用分野のそれぞれについてごく簡単に触れ、現今のニオブに関する研究開発の動向、今後の問題点を論じ、工業材料としてのニオブの現状ならびに将来の予測について記述する。

2. 資源、消費および価格状況

2.1 資源

ニオブは地球上に比較的多く存在する元素であり、平均して地殻中に 0.005% 含有されている。この量は鉛よりも多く銅よりもすこし少ない程度である。ニオブの最

昭和 56 年 2 月 25 日受付 (Received Feb. 25, 1981) (依頼解説)

* CBMM インターナショナルリミターダオリエント事務所 工博 (Orient Office, CBMM Internacional Ltda., 1-5-2 Akasaka Minato-ku 107)

*² CBMM インターナショナルリミターダオリエント事務所 理博 (Orient Office, CBMM Internacional Ltda.)

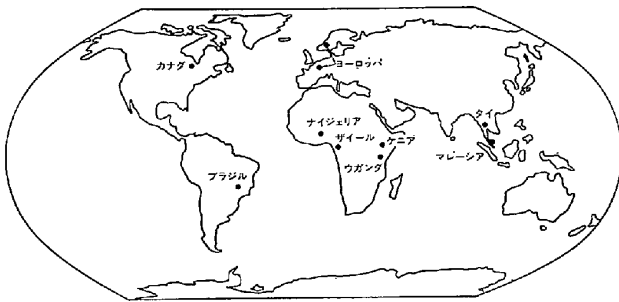


図 1 世界の主要ニオブ資源賦存状況

表 1 世界各国のニオブ資源埋蔵量

国名	鉱石埋蔵量 (10 ³ t)	Nb ₂ O ₅ 含有量 (%)	Nb ₂ O ₅ あたり保有量 (10 ³ t)	分布の割合 (%)
ブラジル	526,000	2.65	13,947	71.2
ザイール	162,000	1.17	1,900	9.7
カナダ	399,000	0.40	1,600	8.2
アメリカ	120,000	0.09	110	0.5
ヨーロッパ	2,000	0.35	220	1.1
ケニア	106,000	0.70	740	3.8
ナイジェリア	140,000	0.31	434	2.4
ウガンダ	200,000	0.30	600	3.1
総計	1,715,000	1.14	19,551	100.0

(注) 錫製錬スラグは含まない

も重要な鉱石は、コロンバイト/タンタライト ((FeMn)O(NbTa)₂O₆) 及びパイロクロア (NaCaNb₂O₆F) であり、1960年以前はコロンバイトが主要な供給源であったが、その後前述したようにブラジル、カナダにおける品位の高いパイロクロア鉱床の発見および適切な抽出製錬プロセスの開発によつて、現在では世界需要の85%がパイロクロアによつて供給されている。

ニオブの主要資源の分布状況を図1の世界地図上に、さらに表1に国別のニオブ鉱石の埋蔵量、品位、Nb₂O₅あたりの保有量、分布の割合などを示している。世界のニオブ埋蔵量は Nb₂O₅ あたりで総計 1955 万 t (Nb 純分あたりで 1360 万 t) と推定されているが、東欧とソ連以外の国々に世界資源の約 93% が埋蔵されており、その中でブラジルが圧倒的に多く 70% 以上を、アフリカの諸国が 9%、そしてカナダが 8% をそれぞれ所有している。ソ連のニオブ含有鉱石として確認されている資源はニオブ含有量あたり約 320 万 t と推定されているが、それらのほとんどは現在の世界価格では経済的回収が不可能な品位のものである。このような低品位のニオブ資源の総埋蔵量は約 387 万 t 推定され、表1に示される高品位鉱石の世界埋蔵量によると現在の1年あたりの消費量約 1 万 t の割合で今後 1300 年の消費が可能であり、現在これらの低品位な鉱山を開発する試みは行われていない。つまり、現在のニオブ価格で切り捨てられるニオブ鉱山の Nb₂O₅ 含有量は 0.3% 以下ということになり、もし何らかの技術の進歩、さらには価格の変動などによつてこの“切り捨て”の水準が 0.09

% (アメリカ水準) まで下げられたとすると、ニオブ資源はまさに無尽蔵ということができよう。

2.2 生産および消費

産業の対象となるニオブ製品は、パイロクロア精鉱、コロンバイト/タンタライト精鉱、フェロニオブ、五酸化ニオブ、ニオブ炭化物、ニッケル-ニオブ、クロム-ニオブなどであり、これらのうち精鉱は中間原料製造メーカーによつて使用され、中間製品であるフェロニオブ及び五酸化ニオブその他は、合金鋼、超耐熱合金、金属ニオブ、ニオブ基合金、ニオブ炭化物のような多くの最終製品の製造に用いられている。世界各国におけるニオブの生産状況をまとめた表2をみると、表1では見られなかったアジアの諸国、つまりマレーシア、タイの両国が含まれているが、この両国におけるニオブの生産は錫製錬におけるスラグ分からの回収によつて行われている。

ニオブの世界消費量の推移は表3に示したように連続的に増加している。中でも、ニオブ精鉱、フェロニオブ、錫スラグ、そしてその他のいわゆるニオブ含有原材料の世界生産の約 1/4 を消費しているアメリカにおいては、石油およびガス、交通運輸、宇宙航空、原子力などの各産業分野における消費の増加で特に著しいものがあつた。1976年のアメリカにおけるこれらの各産業別の消費量の統計分析結果を表4に示している。アメリカに

表 2 各国のニオブ生産量と生産能力

国名	生産能力			
	1976年生産量 t, Nb (%)	1976年 t, Nb (%)	1977年 t, Nb (%)	1980年 t, Nb (%)
ブラジル	7,321 (75)	9,072 (63.3)	11,794 (68.5)	16,320 (71.9)
ザイール	22 (0.2)	(118) (0.8)	(118) (0.7)	(118) (0.5)
カナダ	1,175 (12)	3,488 (24.3)	3,629 (21.0)	4,536 (20)
ヨーロッパ	(36) (0.4)	14 (0.1)	14 (0.1)	14 —
ナイジェリア	(290) (3)	454 (3.2)	454 (2.6)	454 (2)
その他のアフリカ諸国	(26) (0.3)	45 (0.3)	45 (0.3)	45 (0.3)
ソ連	(680) (7)	(880) (6.1)	(880) (5.1)	(900) (4)
マレーシア	24 (0.2)	45 (0.3)	68 (0.4)	91 (0.4)
タイ	161 (1.6)	181 (1.3)	181 (1)	181 (0.8)
オーストラリア	32 (0.3)	45 (0.3)	45 (0.3)	45 (0.3)
その他の南米諸国	—	—	—	—
総計	9,767	14,343	17,184	22,705

表 3 世界の Nb₂O₅ 消費量の推移

年度	消費量(t)	年度	消費量(t)
1965	4,080	1973	11,070
1966	4,760	1974	13,830
1967	4,990	1975	11,750
1968	6,120	1976	12,970
1969	7,350	1977	12,250
1970	8,440	1978	13,610
1971	8,990	1979	16,708
1972	10,570		

表 4 1973 年と 1976 年におけるアメリカでの産業分野別ニオブ消費量

産業分野	1973年		1976年	
	消費量 t,Nb	割合(%)	消費量 t,Nb	割合(%)
建設	1,102	40	1,089	40
機械 (金属加工機械)	164	6	136	5
(特殊産業機械)	387	14	272	10
石油・ガス	493	18	545	20
交通運輸	548	20	545	20
その他	54	2	136	5
総計	2,748	100	2,723	100

表 5 アメリカにおける用途別ニオブ消費量の推移 (ニオブ純分あたり t)

用途	1975	1976	1977	1978	1979
炭素鋼	364 (24)	402 (26)	514 (26)	629 (24)	657 (23)
低合金高張力鋼	470 (31)	452 (29)	556 (28)	737 (29)	747 (27)
ステンレス 及び耐熱鋼	205 (13)	208 (14)	258 (13)	365 (14)	354 (13)
高合金鋼	188 (12)	239 (16)	265 (13)	298 (12)	235 (8)
(鉄鋼計)	1,227 (80)	1,301 (85)	1,593 (80)	2,029 (79)	1,994 (71)
超耐熱合金	202 (13)	191 (12)	361 (18)	520 (20)	807 (29)
その他の合金	37 (2)	23 (1)	30 (1.5)	27 (1)	14 (1)
その他	40 (2)	23 (1)	9 (0.5)	7	—
金属ニオブ	—	131	68	—	—
合計	1,519	1,538	1,993	2,583	2,815

(注) ()内は構成比(%)

表 6 各国のニオブ消費量推移 (ニオブ純分あたり t)

国名	1974	1975	1976	1977
EC共同体 (Ferro-Nb) (イギリスを除く)	3,150	2,780	2,790	2,890
アメリカ (Ferro-Nb)	2,098	1,519	1,250	1,900
日本 (Ferro-Nb)	1,170	1,390	1,500	1,416
ブラジル (Ferro-Nb)	395	570	580	680
イギリス (Ferro-Nb)	610	560	510	540
カナダ (Ferro-Nb)	231	216	—	—
アメリカ (Nb)	100	59	—	—
合計	7,754	7,094	6,630	7,356

における最近 20 年間のニオブ消費量の伸びのほとんどは合金鋼, HSLA(低合金高張力) 鋼およびステンレス鋼などの鉄鋼材料への使用において見られ, ニオブはこれらの鋼の材質改善に貢献している。最終製品によるニオブ使用分野の構成は国によつて大きく異なつており, この相異は各国の技術水準, 産業および市場構造の特殊性などによるものであるが, 唯一の資料としてアメリカにおける用途 (最終製品) 別のニオブ消費量の推移を表 5²⁾ に示す。この表から, 全ニオブの約 80% が鉄鋼材料への添加元素として, 残り約 20% のほとんどが超耐熱合金などの非鉄材料の製造に用いられており, 鉄鋼材料部

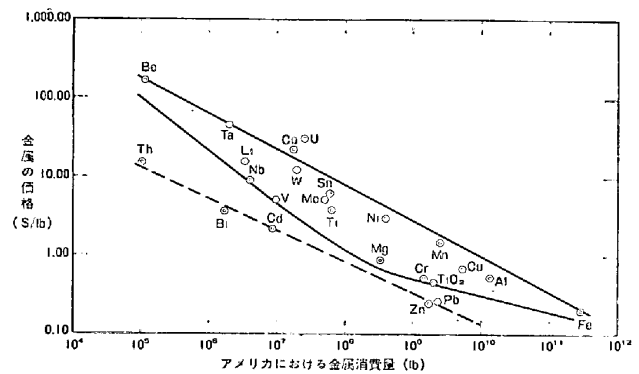


図 2 両対数で表わした金属の価格と消費量の関係

門の内訳をさらに行うと, 微量添加鋼 (0.1% 以下の添加量) つまり炭素鋼および低合金高張力鋼がニオブ消費の主要部分を占めていることがわかる。表 6 に国別のニオブ消費量の推移を示している。

2.3 価格の推移

材料の工業的利用は, ある一定価格におけるその材料の有用性に基づいている。図 2 は, 1978 年のアメリカにおける種々の金属のポンドあたり平均価格と, それらの金属の消費量との関係を両対数でプロットしたものである。材料は, それぞれ異なる種々の応用分野を持ち, 使用量においても大きな差異があるが, 図で見られるように, 消費量と価格の間にはほぼ一定な直線帯状領域が形成される。つまり大ざつぱに言つて, 金属消費量と価格とは逆比例関係があると言ふことができよう³⁾⁴⁾。ウランおよびコバルトは近年の価格高騰により上側の線から逸脱しており, 下側の鎖線上に位置するトリウム, ビスマス, カドミウムなどは工業的応用範囲の狭さによつてこの位置に存在している。さてニオブの場合を見ると, その挙動には興味深いものがある。というのは技術的, 経済的格からいえばニオブは下側の鎖線上に近い位置にあると思われるが, その幅広い応用分野, さらには後述するように用途によるニオブ純分あたりの価格の大きな相異などによつて, 下側の線上よりも高い価格の位置に

表 7 アメリカにおけるニオブ価格の推移

年	年間平均価格, \$/lb	年	年間平均価格, \$/lb
1954	4.86 (8.36)	1965	1.34 (1.87)
1955	1.93 (3.28)	1966	1.43 (1.94)
1956	1.79 (2.94)	1967	1.42 (1.85)
1957	1.68 (2.66)	1968	1.42 (1.79)
1958	1.54 (2.38)	1969	1.42 (1.71)
1959	1.54 (2.34)	1970	1.65 (1.88)
1960	1.73 (2.59)	1971	1.65 (1.80)
1961	1.43 (2.11)	1972	1.96 (2.07)
1962	1.36 (1.98)	1973	2.03 (2.03)
1963	1.36 (1.96)	1974	2.23 (2.02)
1964	1.36 (1.93)	1975	2.23 (2.02)

注. ()内は, 1973年におけるドル価値で換算した相対価格 (\$/lb)

表 8 各種フェロアロイ価格の推移

	英国でのフェロアロイの生産者価格 (£/t)				
	1973年1月	1976年1月	1979年1月	1979年6月	1980年1月
タングステン	2,350	11,500	9,500	10,250	9,300
モリブデン	1,950	4,000	8,500	19,000	10,000
クロム	100	325	385	385	410
バナジウム	3,450	6,050	6,600	7,250	7,800
ニオブ	2,500	5,800	5,500	5,500	5,700
コバルト	1,400	6,600	27,000	25,000	25,000

注. 1979年において自由市場価格は変動が激しく、たとえばモリブデンは高い時に£24,000/tに達し、コバルトは£44,000/tにも達した。

表 9 1979 年末のニオブ関連製品の価格 (アメリカ)

ニオブ関連製品	価格	含有ポンドあたり
パイロクロア精鉱	\$ 2.55	Nb ₂ O ₅
コロンバイト精鉱	\$ 10~12	Nb ₂ O ₅
フェロニオブ		
標準品位	\$ 5.42~5.73	Nb
高品位	\$ 30.15~35.75	Nb
ニッケル・ニオブ	\$ 33.25~39.35	Ni-Nb
高純度酸化ニオブ	\$ 16.75	Nb ₂ O ₅
金属ニオブ		
鋳塊	\$ 53~65	Nb
粉末	\$ 55.50~63.50	Nb

存在するのである。

表 7²⁾ はアメリカにおける 1954 年から 1974 年までのニオブ価格の推移を示しているが、表に見られるように、ニオブの価格は非常に安定している。次にニオブの最大需要であるフェロニオブの最近の価格推移をタングステン、モリブデン、クロム、バナジウム、コバルトなどの各フェロアロイのそれらと比較したのが表 8⁵⁾ であり、この表によると、ニオブはバナジウムよりも安く、しかも非常に安定した価格で供給されていることがわかる。1979 年末における種々のニオブ製品の価格を表 9⁶⁾ にまとめており、これらはニオブあるいはニオブ酸化物含有量あたりの価格であるので、ニオブの純分あたりの価格はその製品の付加価値を高めることによつて 20 ないし 30 倍にも高騰することがわかる。

3. ニオブ関連製品の製造工程

ニオブの最も重要な鉱石であるパイロクロアの採鉱は、ブラジルにおいてはほとんどが露天掘りであるが、その他の国々では地下掘削法も採用されている。写真 1 はブラジルにおける露天掘り鉱山の景観を、写真 2 は採鉱の様子を示している。採掘された鉱石は、図 3 に示すような種々の選鉱プロセスを経て、約 65%Nb₂O₅ を含む精鉱となる。このパイロクロア精鉱はフッ化水素酸-メチルイソブチルケトン (MIBK) 溶液中で処理するこ

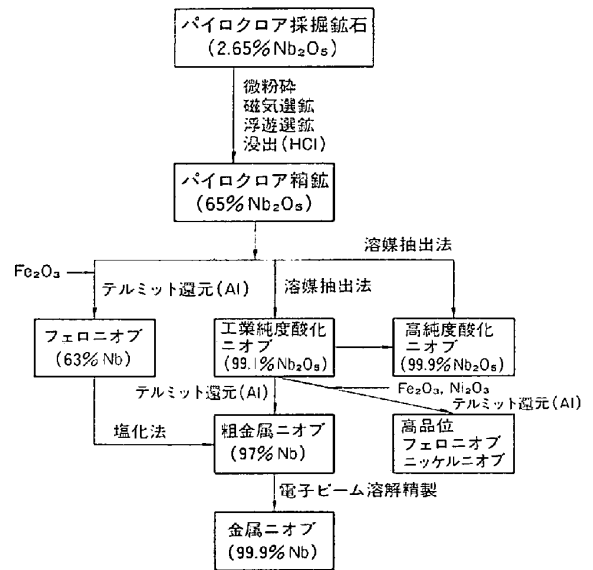


図 3 パイロクロア鉱石を用いた場合のニオブ選鉱製錬、精製プロセス

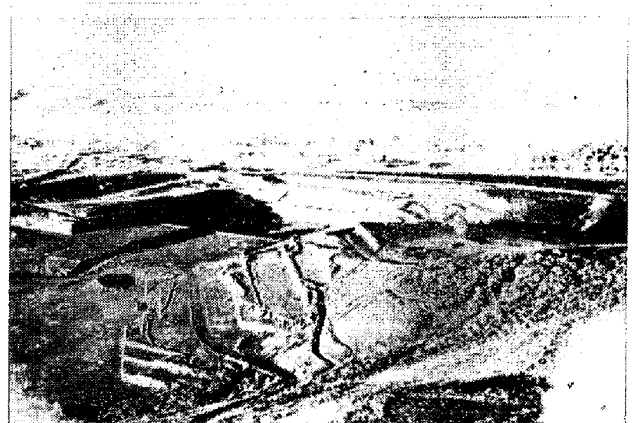


写真 1 ブラジルにおけるニオブ鉱山の景観 (CBMM 社)

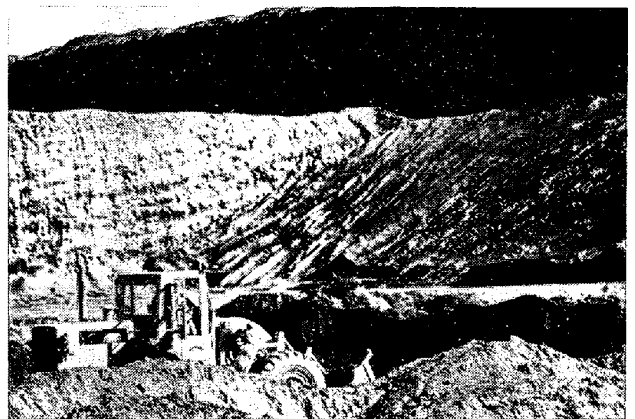


写真 2 ニオブ鉱石 (パイロクロア) の採掘 (CBMM 社)

とによつて高純度の五酸化ニオブへと精製することが可能であるが、パイロクロアの最大の用途は前述したよう



写真 3 テルミット法によるフェロニオブ製錬 (CBMM 社)

に製鋼原料としてのフェロニオブであるので、精鉱から直接アルミニウムによるテルミット還元法によつてフェロニオブの製造が行われる。これはパイロクロア精鉱と高品位ヘマタイト (Fe_2O_3) にアルミニウム微粉末、さらに石灰などの造滓剤を混合して、バッチ操業で行われている⁷⁾。このような操業によつて写真3に示すようなフェロニオブ塊が得られる。しかし、さらに高い純度の合金用フェロニオブあるいは金属ニオブの製造の場合は、テルミット原料としてさらに化学的に処理されたより高い純度の酸化物をを用いることが必要である。

コロンバイトの採鉱もほぼ同様な方法で行われているが、パイロクロアのような簡単な採鉱は小規模鉱山に限られているらしく、大部分の場合は大型の採掘装置を必要とするようである。種々の選鉱プロセスを経たコロンバイト-タンタライト精鉱は、水酸化ナトリウムや炭酸ナトリウムあるいはフッ化水素酸、フッ化水素酸-硫酸（あるいはカルボキシル系の酸）の組み合わせなどによつて処理され、その後フッ化水素酸を水酸化カリウムあるいは炭酸カリウムとともに加えると、カリウムニオブ酸フッ化物 ($\text{K}_2\text{NbOF}_5\cdot\text{H}_2\text{O}$) およびカリウムタンタルフッ化物 (K_2TaF_7) の混合物が生成する。この溶液を冷却するとタンタル化合物の方は結晶化し、液体状態で残留するニオブ化合物との分離が可能である。低品位鉱石の場合は、炭素を用いて製錬され生成する化合物に塩化処理が施される。この際のタンタルとニオブの混合物は分留によつて分けられ、それぞれ種々の方法によつて金属へと還元される。

高純度酸化ニオブは、コロンバイト/タンタライト精鉱あるいはパイロクロア精鉱のフッ化水素酸中での疎解、それに引き続いた溶媒抽出および純化によつて化学的に精製される。アメリカ鉱山局によつて開発された溶媒抽出法はフッ化水素酸-硫酸-メチルイソブチルケトン (MIBK) を用い高純度の酸化ニオブの精製が可能である。

パイロクロアを原料とした場合の高純度金属ニオブの

製造は、図3に示しているように、テルミット反応によつて得られる粗金属ニオブの電子ビーム溶解による精製によつて行われる。この際の溶解過程で、アルミニウムのような揮発性不純物あるいはガス成分を簡単に除去することが可能である。また添加元素の蒸発が望ましくないような場合は、アーク溶解法によつて合金の製造が行われる。

4. ニオブ応用分野

原料から最終製品に至るまでのニオブ関連産業の構造を図4で系統的にまとめている。ニオブの有効原料は、前述したように図の左端に四角で囲った3つであり、これより右側の丸印で囲ったどの関連製品に至る矢印においても産業が成立するわけである。しかしながら、鉱石産出国における近年の傾向として製品の高付加価値化が叫ばれており、鉱山を有する国々において鉱石の選鉱のみではなくフェロニオブあるいは工業純度の酸化ニオブなどが生産されるようになり、さらに従来は資源保有国以外の国で生産されていた金属ニオブも近くブラジルにおいて生産される見込みである。このような背景の下で種々のニオブ処理産業を鉱石産出国以外の国で成立させるためには、特殊技術を活かすことはもちろんであるが、酸化ニオブの高純度化あるいは種々のニオブ化合物の化学的製造ならびにそれらの用途開発などの分野に志向することが順当と考えられる。本章においては、種々のニオブ応用分野のうち主なものをとりあげ、それぞれの最終製品におけるニオブの役割について、さらには最近の新しい応用について簡単に記述する。

4.1 鉄鋼添加元素としての用途

4.1.1 低合金高張力鋼

表5に示したようにアメリカにおけるニオブ消費の約80%が鉄鋼添加元素として使用されているが、超耐熱合金を用いる航空機産業の規模が小さい我が国においてはこの比率はさらに高く、約90%以上のニオブが鉄鋼添加元素として用いられていると推定できる。前述したように鉄鋼材料部門の内訳をさらに行うと、0.1%以下の微量添加鋼 (Microalloyed Steel) つまり低合金高張力鋼への使用が総ニオブ消費の大部分を占めていることがわかる。

炭素鋼への Nb の微量添加に関する研究開発が盛んになつたのは前述したように 1960 年以降であり、0.1%あるいはそれ以下の添加で、強度および靱性の改善にきわめて有効であることが示されてきた。微量添加による性質改善機構に関しては本誌にも多数の解説、論文ならびに資料などが掲載されており詳細な説明は不要であるが、これらの合金において Nb は、炭化物形成による析出強化効果を発揮するとともにオーステナイトの再結晶遅延効果を示し低い仕上げ温度まで制御圧延した鋼に強度と靱性を付与するのに有効な結晶粒微細化を促進する

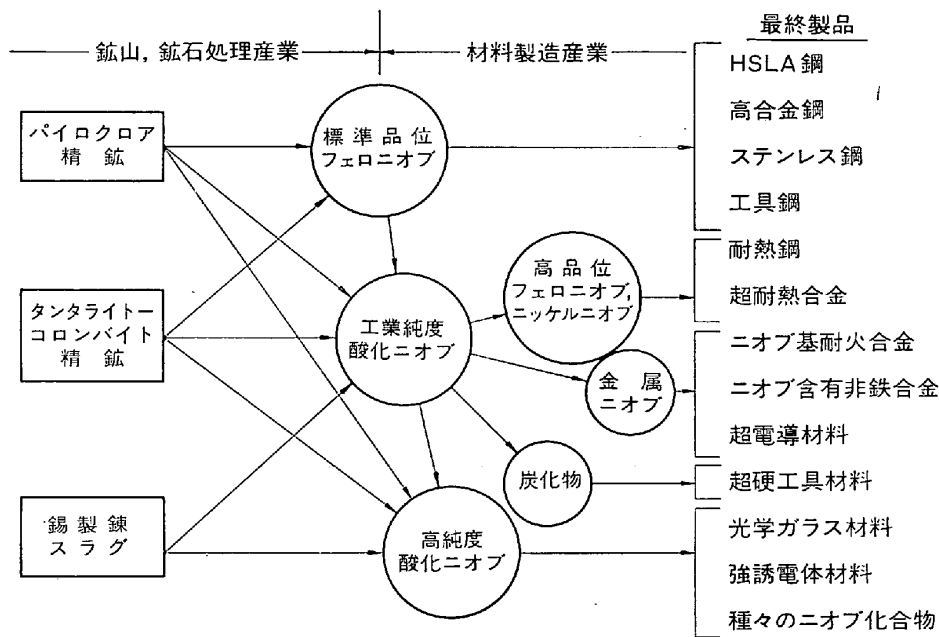


図 4 原料から最終製品に至るまでのニオブ関連産業の構造

表 10 最近の X-70 級パイプライン鋼の組成の比較

鋼種	肉厚 (mm)	C	Mn	Si	Al	S	Mo	Ni	Cu	Cr	Nb	V	Ti	N	B
Nb-V	18	0.09	1.50	0.15	0.023	0.005	*	0.16	0.10	0.12	0.04	0.08	0.015	0.005	—
Mn-Mo-Nb	22	0.05	1.70	0.20	0.018	0.005	0.26	—	—	—	0.06	—	0.018	0.004	—
Mn-Nb-V	22	0.08	1.90	0.27	0.036	0.003	0.24	0.20	0.24	—	0.05	0.06	—	0.007	—
Nb-Ni	18	0.07	1.60	0.20	0.035	0.007	—	0.55	—	—	0.11	—	0.019	0.004	—
Nb-V-Cr	15	0.09	1.52	0.22	0.025	0.007	—	—	—	0.35	0.04	0.08	—	0.008	—
Nb-Mo-Cr	15	0.08	1.50	0.20	0.015	0.006	0.18	—	—	0.30	0.05	—	—	0.010	—
Mo-Nb-Cu	15	0.06	1.45	0.20	0.015	0.006	0.25	—	0.30	—	0.025	—	—	0.009	—
Ti-Ni	15	0.08	1.58	0.30	0.018	0.003	—	0.26	—	—	—	—	0.070	0.004	—
Ti-Cu-Ni	20	0.09	1.61	0.30	—	0.005	—	0.12	0.21	—	—	—	0.063	—	—
Low C-Nb	20	0.02	1.78	0.13	0.031	0.002	—	—	—	—	0.10	—	0.015	0.004	—
Low C-Nb-B	20	0.02	1.89	0.13	0.030	0.002	—	—	—	—	0.05	—	0.016	0.002	0.001
Low C-Nb-Mo-B	22	0.02	2.01	0.16	0.030	0.003	0.30	—	—	—	0.05	—	0.018	0.002	0.001
C-Mn-Nb (Q & T)	20	0.09	1.37	0.27	0.032	0.005	0.16	1.00	—	—	0.02	—	0.020	0.005	—
C-Mn-Nb (制御水冷)	20	0.08	1.55	0.60	0.050	0.002	—	—	—	—	0.06	—	—	0.010	—

* 肉厚18以上20mm迄に対しては0.25%含有

効果を有する。このような微量添加鋼は、建築物や橋梁などの構造材として需要が拡大しているが、何といたっても最大の用途は大口徑鋼管（ラインパイプ）である。過去 15~20 年間におけるラインパイプ用高張力鋼の開発の経緯は、炭素量の低減による溶接性ならびに靱性改善を指向しており、最新の開発としていわゆるアンキュラーフェライト鋼さらには極低炭素ベイナイト (ULCB) 鋼などがあげられる。表 10 で最近の X-70 級ラインパイプ鋼の組成を比較している⁸⁾。

パイプライン用途以外の含 Nb 低合金高張力鋼の我が

国における最近の開発として特に注目されるものに、圧力容器用高強度鋼と自動車用冷延高張力鋼板がある。前者は従来の JIS 規格鋼が常温強度のみを保証したものであるのに対して常・中温（クリープ温度よりも低い温度範囲）における強度を保証した新しい材料であり、この開発は、鉄鋼各社、圧力容器関連工業界が一体となつて各種委員会を組織して推進したもので、すでに数社がこの高強度鋼の商品化を完了している。この圧力容器用高強度鋼の特徴は、降伏点基準の設計に適用でき、常・中温域（常温から 400°C 程度）に効果を発揮する 50~60

表 11 中常温圧力容器用高強度鋼の化学組成

鋼 種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Nb	V
PMS-25	≤0.20	0.15/0.60	0.80/1.60	≤0.035	≤0.035	≤0.35	≤0.35	≤0.05	≤0.10
PMS-30	≤0.19	0.15/0.60	0.80/1.60	≤0.035	≤0.035	≤0.35	0.10/0.40	≤0.05	≤0.10
PMS-35	≤0.19	0.15/0.60	0.80/1.70	≤0.035	≤0.035	≤0.35	0.15/0.50	≤0.05	≤0.10

kgf/mm² 級の高張力鋼という点である。また同種の低合金鋼に比べて、高価な Mo の使用量を減じて価格低下をはかり、同時に圧力容器に必要な溶接性、靱性、強度を保証した経済的な低合金鋼といえ、アンモニアプラントなどへの適用が行われている。表 11 はこれらの鋼の組成を示している⁹⁾。

冷延高張力鋼板では自動車用鋼板として固溶強化鋼、P 添加鋼、二相組織鋼など種々のタイプの鋼が開発され、その使用量が増大しつつある。しかし自動車部品の中できわめて優れた深絞り性を要求されるフェンダーやガソリンタンクなどにはこれらの従来の高張力鋼の適用は不可能であった。ところが、塑性歪み比 (r 値) が高く優れた深絞り性を有する冷延高張力鋼板が最近開発された。これは炭素に対して当量程度の Nb を含む極低炭素アルミキルド鋼を P などで強化したものであり、超深絞り用高張力鋼¹⁰⁾と呼ばれている。その組成は、0.005% C - 0.01% Si - 0.15% Mn - 0.010% P - 0.03% Al - 0.04% Nb を基本組成として、P, Si, Mn などをそれぞれ単独あるいは複合添加したものである。

4.1.2 ステンレス及び耐熱鋼

ステンレス鋼における Nb 添加の当初の目的は粒界腐食などの耐食性の改善のための余剰炭素の安定化にあり、これの実用鋼としてオーステナイト系 347 タイプのステンレス鋼が生まれた。しかし近年の製鋼技術の進歩により、C, N, P, S などを数 10 ppm オーダーまで低減することが可能となり、耐食性用途への Nb 安定化 347 タイプの使用は激減したが、この 347 鋼は 550°~770°C の範囲でのクリープ中に非常に細かい NbC 粒子が析出することによって良好なクリープ特性を発揮し高温材料としての用途が見い出され、我が国などにおいては火力発電施設の耐熱部材として用いられている。このように Nb 含有オーステナイトステンレス鋼はいまだに健在であり、有害な共晶炭化物を排除するために Nb と C の量を微妙に減ずるような方向で改良が行われている¹¹⁾。耐食用途においても Nb を添加した 304 および 347 系で高窒素オーステナイト鋼が開発されており、これらは耐食オーステナイトステンレス鋼におけるニオブの復活に結びつく可能性を示唆している。

オーステナイト系での今後の研究が注目される応用分野の 1 つとして、超電導技術の進歩にともなう低温構造材としての用途がある。このための材料は極低温 (-196

°C) での靱性を要求されしかも安定なオーステナイト相 (非磁性) を保持することが必要であり、通常のオーステナイト鋼のように加工誘起変態を起こすものは使用不可能とされている。このような用途に対して最近開発された 0.05% Nb を含む低炭素 25%Mn-5%Cr-1%Ni 鋼は¹²⁾、この目的にかなうものであつてしかも 304 鋼より廉価であるために注目されている。

一方フェライト系ステンレス鋼における Nb 添加の状況を見ると、特に新しいタイプの SUS 434 や 444 における炭素の安定化は Nb によつて行われるケースが多くなりつつあるが、伝統的な SUS 430 (17%Cr) においては、いまだに Ti が多く用いられている。この 430 鋼において解決が待たれていた大きな問題はリジニングであるが、最近開発された 17%Cr-0.4%Nb-0.4%Cu 鋼¹³⁾ は、この問題の解決に接近したものとして注目されている。この鋼におけるリジニング改善の機構は、低温熱延時に蓄積された歪みと適正な焼なまし条件により再結晶が促進されリジニングの原因とされている粗大フェライト粒が微細化したためと考えられ、また成形性の改善は、低温熱延時に析出したニオブ炭窒化物が冷延、熱延時の集合組織の制御に有効に作用したためと考えられている。この鋼は表面性状の良好な超深絞り用フェライト系ステンレス鋼として、加工の厳しい厨房用機器や自動車部品への適用が期待されている。

フェライト系ステンレス鋼の安定化元素として Nb と競合するものに前述した Ti や Zr などがある。これらの効果を比較すると、まず Ti, Zr はこれらの炭化物に起因する表面きずが問題となるのに対して、Nb を用いた場合は成形後のリジニングが問題であつたが、上述のように解決の方向に進んでいる。次にこれらの元素の表面酸化皮膜への影響として光輝焼なましの際に発生するいわゆるテンパーカラーであるが、Ti では条件によつてこれを生ずる場合があるが、Nb は 0.62% まで含有しても表面皮膜の色調に何ら影響を及ぼさないとされている¹⁴⁾。溶接性、特に溶接部の延性に関しては Ti 安定化鋼の方が Nb より若干良好であるが、Nb 添加鋼でも溶接時の入熱を低く抑えることに留意すれば健全な溶接部を得ることは十分に可能である¹⁵⁾。

JIS 規格にある Nb を含む耐熱鋼はオーステナイト系 SUH 661 とマルテンサイト系 SUH 600 の 2 つであるが、次のような分野で Nb を含む耐熱鋼の使用あるいは

は開発が行われている¹⁶⁾。まずボイラ管用新鋼種としては、我が国で開発されている F9 や 18-8Ti-Nb, 西独における AN15, AN31, そしてアメリカでの 17-4Cu-Mo, イギリスでの Esstete 1250 などがある。これらの鋼において Nb は析出強化効果とあわせて Cr 炭化物の析出状態を変化させクリープ破断強さを改善する効果を発揮している。次に蒸気タービン用材料として 12Cr-Mo-Nb-V 系, H46, TAF などの含 Nb 合金がいずれも 10~13%Cr をベースとして開発されている。さらに石油化学工業用耐熱鋼管（主として遠心铸造材）として IN519, BST などの含 Nb 合金があり、高速増殖炉の蒸気発生器用伝熱管材料として 2¹/₄Cr-1Mo-Nb 鋼などが開発されている。

4.1.3 工具鋼

前述した低合金鋼における Nb の有効利用の例から、低合金工具鋼においても Nb の微量添加により高価な添加元素の代用とし、かつ結晶粒径の制御に用いようという認識が高まりつつある。このような低合金工具鋼の多くはニオブの大量安定供給体制が整う以前に、つまり Nb が低の元素と全く價格的競争力がなかつた 40 年以上前に開発、規格化されたものである。そして現在ニオブは表 8 に示したように比較的安価で、強さ、耐摩耗性及び高温強さを改善する炭化物形成元素であることに加えて、鋼の焼入性にかなりの効果をもつことが明らかにされつつある。このような工具鋼における Nb の最も可能性のある進出分野は高速度工具鋼である。Nb は前述したように 1920~30 年代に最初に工具鋼に導入され、いわゆる M8 タイプの高速度鋼が生まれた。しかしこの鋼は、特性上では M2(SKH-9) 鋼と同等であると考えられていたにもかかわらず、價格上あるいは性質上に特に著しい利点がなかつたため全く実用に供されなかつ

たという歴史的経緯を持つている。それが現今に至つて、高速度鋼中の主要合金元素、Mo, W, Co, V などの價格高騰ならびに供給不安定性さらに表 12 に示すように NbC が他の工具鋼炭化物に相当する硬さを有していることから、もう 1 つの強炭化物形成元素“ニオブ”を高速度鋼に再度導入しようとする動きが高まっている¹⁷⁾。このような意図のもとに行われた M2 タイプの高速度鋼の V を Nb に置換する実験室的研究⁵⁾¹⁸⁾では、V の Nb への一部置換 (Nb/V=1/1) においてかなりの性質改善が見られ、また價格低減の可能性があると報告されている。同様の試みは我が国でも行われているが¹⁹⁾、ブラジルにおいては M2 タイプの鋼に 1~5% Nb を添加した高速度鋼がすでに製造され、ドリル、鋸刃などに実用されている。

4.2 非鉄材料としての用途

4.2.1 超耐熱合金

鉄鋼材料への添加がニオブの最も大きな消費分野であるが、表 5 に示したように大量のニオブが非鉄合金にも使用されている。これらの中では超耐熱合金、いわゆるスーパーアロイに用いられるものが量的に最も多く、そのうち約半分がジェットエンジン部品に用いられている。この用途は、伝統的に用いられる分野と原子力発電プラントにおけるスーパーアロイの使用が増えるとともに顕著に増加することが予測され、工業純度ニオブ炭化物の需要が拡大する傾向を示している。前述のジェットエンジン部品への使用の一例としてボーイング 747 の JT9D-7 エンジンに使用されているニオブ含有スーパーアロイをあげると、Ni 基で Inconel 713C, 718, X 750, Co 基で WI 52 などがあり、いずれもタービン材料として用いられている²⁰⁾。スーパーアロイにおけるニオブ添加は、固溶強化や炭化物および Ni₃Nb などの金属間化合物相の析出による分散強化効果あるいは粒界強化効果を発揮してクリープ強度の改善に寄与している。またこのような強化相に用いられる金属間化合物のうち fcc 規則格子構造を有するものは、高温で強度が高くなるいわゆる正の温度依存性を示し²¹⁾、高温材料に対する要求に対処すべく、その単体として的高温強度の検討も行われている。Ni₃Al の場合、Nb を添加すると機械的性質の改善に有効であることが報告されている²²⁾。さらにこのような化合物を組み合わせた一方向凝固共晶複合材料が開発され、中でも Ni₃Al-Ni₃Nb 系共晶が注目されている。現在最も実用化に近い合金としてニオブを含む γ/γ' - α および COTAC 74 と呼ばれる共晶があり²³⁾²⁴⁾精密鑄造を主とする加工技術でタービン翼の形状へと加工が可能である。

4.2.2 耐火合金およびその他の非鉄合金

ニオブはいわゆる高融点金属のひとつであり、純粋な状態では延性に富み -196°C の低温においても加工が可能である。さらに高融点金属の中では比重が小さく

表 12 工具鋼に用いられる種々の炭化物の硬さ

	炭化物	硬さ (Hv)
純粋炭化物	TaC	1800
	NbC	2400
	TiC	2500
	VC	2800
	W ₂ C	3000
	WC	2400
	Cr ₃ C ₂	1300
	Cr ₂₃ C ₆	1300
工具鋼に現われる炭化物	M ₆ C	1100~1650
	MC	1800~2200
	基地	680~920

(鉄より大きくニッケルより小さい程度)モリブデンよりも耐酸化性があるなどの多くの特長を有している。ニオブの大きな欠点は高温における酸素との大きな親和性である。つまりニオブ中における酸素の拡散は急速であり、この拡散層の硬化がニオブの脆化を促す。しかし前述したように、Nb は非常に加工性がよく、Nb と常温または高温で全率固溶体をつくる Mo, Ta, V, W, Hf, Zr, Ti などの元素をかなりの量合金化しても加工可能で、固溶強化作用により高温で強力な材料となるが、同時に Ti などがある程度入れると耐酸化性も向上する。これらの合金は表 13²⁵⁾ に示すようなものであるが、その他に WC-3015 合金²⁶⁾ (39%Nb, 14.5%W, 2%Ta, 1.5%Zr, 0.2%C, 残 Nb) は 1200°C で 100h のクリープ破断強さ 14.1 kgf/mm² を持ち、しかも好ましい耐酸化性を有することから注目されている。しかし一般には、前述したニオブ基合金は高温酸化抵抗が低く、そのような環境で使用する場合はアルミナ溶射被覆あるいはけい化物被覆などを施さねばならない。

ニオブの低い熱中性子吸収断面積 (1.1 パーン) を利用して、Nb-1%Zr 合金は原子炉構造材として用いられており、ここでは、優れた高温機械的性質、Na 及び Li などの液体金属に対する抵抗性、良好な加工性などが大いに活用されている。その他 Nb を含む U あるいは Zr 合金などが原子炉燃料あるいは材料として開発されつつあり、原子力工業における今後のニオブの需要増を占う1つの指標といえるだろう。一方宇宙開発に目を向けると、月着陸船のロケットノズルは Nb-10%Hf 合金であり、スペースシャトル衛星の軌道移動系ノズルには FS 85 合金が使用される計画である。これらの合金はいずれもけい化物被覆され 1300°C までの耐酸化性を有し、再使用も可能である。

その他の非鉄合金への応用としては、航空機機体用のいわゆる強力チタン合金 (Ti-6%Al-2%Nb-1%Ta-0.8

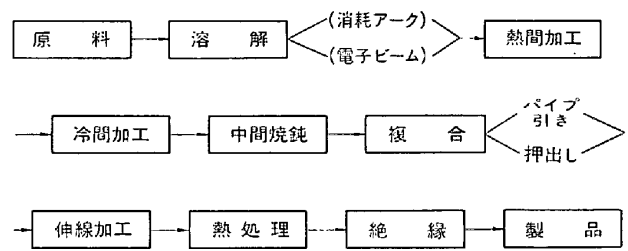


図 5 合金系超電導線の製造工程

%Mo)²⁷⁾において高温強度ならびにクリープ抵抗の改善に用いられており、さらにはアルミニウム合金における Nb による結晶粒微細化効果なども検討され²⁸⁾、0.1%程度の添加で良好な結果が得られている。

4.2.3 超電導材料

電気抵抗が零の超電導線材を用いると、電力消費なしに大電流を流したり強い磁界を発生することが可能であり、一度超電導コイルに電流を流したのち超電導スイッチを閉じると外部スイッチを用いて電源を切り離してもエネルギーを消費することなしにコイルに電流が流れつづけ、いわゆる永久電流の状態が磁界が発生する。このような超電導現象の発見は 1911 年と比較的古いが、その実用開発は新しく 1960 年代から始まった。昨今のエネルギー問題の深刻化につれてこの超電導応用技術の重要性がますます増大している。

超電導性は 1000 以上²⁹⁾、もの金属、合金、化合物で確認されているが、この中で実際に超電導材料として実用に供されるものはわずかである。超電導材料は上述の 3つに大別されるわけであるが、現在最も多く用いられているものは Nb-Ti 合金系材料であり、全体の 80%以上と推定されている。その組成は 50~70 at%Ti 含有の合金が多く、製造法は図 5²⁹⁾ に示しているように、まずアーク溶解または電子ビーム溶解で溶製した Nb-Ti 塊に 1100°C 以上の高温で鍛造あるいは圧延などの一

表 13 代表的ニオブ基耐火合金の組成

合金名	←(%) (ppm)→										
	W	Mo	Ta	V	Hf	Zr	Ti	Nb	C	O	N
Nb-1Zr	—	—	—	—	—	1	—	Bal.	0.005	100	50
FS-85	10	—	28	—	—	1	—	Bal.	0.004	60	50
Nb-753	—	—	—	5	—	1.25	—	Bal.	0.005	100	75
C-129Y	10	—	—	—	10	—	(0.2Y)	Bal.	0.015	225	150
B-66	—	5	—	5	—	1	—	Bal.	0.006	120	60
D-36	—	—	—	—	—	5	10	Bal.	0.006	100	40
F-48	15	5	—	—	—	1	—	Bal.	0.05/0.1	300	100
AS-30	20	—	—	—	—	1	—	Bal.	0.1	100	100
SU-31	17	—	—	—	3.5	—	—	Bal.	0.1	—	—
RN-6	5	5	—	—	—	1.2	—	Bal.	0.026	280	—

次加工を施す。一次加工後は常温で容易に棒状に加工できるようになり、線引き加工では Nb-Ti 棒を銅パイプにはめ込んで複合体として線引きする。この際銅はダイスへの焼付防止材として働くとともに、最終的な線材になった場合に超電導状態の安定化にも役立つ。

超電導材料の特性としては、臨界温度 (T_c)、臨界磁界 (H_c) および臨界電流密度 (J_c) の3つの性質が重要であり、優秀な超電導材料であるためには T_c 、 H_c のほか J_c も大きいこと、あるいは交流損失が小さいことなどが必要である。一般に T_c と H_c は材料のミクロな構造因子から決定され、一方 J_c は材料のマクロな合金組織に強く関係している。1970年代に入つて登場した化合物系の超電導材料はこのような方向で開発されたものであり、この中で最も多く生産されているものが Nb_3Sn である。この材料は 8~14 T までの磁界に対して適用されている。このような化合物系材料は T_c や H_c が高いが、一般に機械的性質が劣り、線材への加工には拡散法、蒸着法、スパッター法などの独特の技術を要する。

次に、超電導現象の技術的応用分野は、(1)強磁界の発生 (2)大電流の輸送 (3)素子 に大別される。第1の分野はこれまで最も強い関心が払われており、電気回転機械、エネルギー貯蔵、MHD 発電、核融合炉、磁気浮上列車、船舶電磁推進、磁気分離、物性あるいは高エネルギー物理研究用マグネットなどへの利用がはかられている。第2の分野においても昭和55年、 Nb_3Sn テープを用いた 10 m の超電導送電実験装置³⁰⁾が工業技術院電子総合技術研究所において完成され、実用化試験への大きな前進がなされた。第3の分野は超電導現象を大型コンピュータに利用しようとするものであり、いわゆるジョセフソン接合素子の開発である。電電公社においては昭和58年度の実用化を目標に本格的に開発を進めており、通産省においても、昭和56年度から8ヵ年計画で「科学技術用高速計算システム(スーパーコンピュータ)」の開発に取り組む方針を明らかにしている。

4.3 酸化物としての応用分野

原料としてのニオブ酸化物は、前述したように超耐熱合金あるいは金属ニオブなどの製造に用いられる中間材料(Ni-Nb などあるいは粗金属ニオブ)の製造に用いられるが、この酸化ニオブをさらに精製して高純度化することによつて酸化物自体としてそのまま最終製品の製造に用いられる分野もあり、これらの主なものに光学ガラスおよび光電子工学用強誘電体材料への利用がある。酸化ニオブの高純度化には前述した溶媒抽出法の繰り返しによる方法が一般に用いられ、99.9%あるいは99.99%純度の Nb_2O_5 を得ることが可能である。以下に、これらの高純度酸化ニオブの用途を上述した2つの分野について簡単に記述する。

4.3.1 強誘電体結晶材料

99.99%の高純度五酸化ニオブ(Nb_2O_5)を炭酸リチウム($LiCO_3$)と反応させることによつて、ニオブ酸リチウム($LiNbO_3$)結晶が生成する。この結晶を引き上げ法によつて単結晶としたものが最終製品であり、これは光通信システムに用いられる光変調結晶である。光変調というのは高速で光の強さや位相を変調させることを意味し材料に外部電場を加えてその屈折率を変化させるいわゆる電気光学効果及び非線形光学効果を応用したものである。この効果を示す材料は一般に強誘電体であるが、その中でニオブ酸リチウム($LiNbO_3$)などのいわゆるイルメナイト($FeTiO_3$)型の単結晶は特に変調効率が高く優秀なものとされている。このニオブ酸リチウムのその他の強誘電体応用素子としての用途は非常に多岐にわたっているが³¹⁾、現在最も多く生産されているものは、カラーテレビの中間周波フィルターに用いられる表面弾性波(SAW)フィルターの基板としての用途であつて、国内において年間10t程度の酸化ニオブが消費されている。

4.3.2 光学ガラス

光学ガラスはレンズまたはプリズムとして光学系における像の伝達に用いられるが、収差の少ないレンズ系の設計には高屈折でしかも低分散であるガラスが要求される。これに応じて戦後登場したのが酸化ランタン(La_2O_3)を多量に含むいわゆるランタン系ガラスで、最近のカメラのレンズにはこの種のガラスが多く用いられているが、このようなランタン系ガラスには特に高い屈折率を付与する目的で Ta, Nb, Th などの酸化物の添加が行われている。これらの添加物として当初、Taの酸化物が非常に多く用いられたが、価格の高騰や供給の不安定から近年ニオブへの移行が急速に進んでおり、現在、五酸化ニオブ(Nb_2O_5)を含むランタン系ガラスは20種類にも及んでいる。そのようなガラス組成の一例をあげると、 La_2O_3 : 12.9%, BaO : 46.3%, TiO_2 : 7.4%, B_2O_3 : 19.4%, SiO_2 : 6.0%, Nb_2O_5 : 8.0% となり、光学レンズ用の Nb_2O_5 は 99.9%の純度を必要としており Fe, Mn, Cr などの有色イオンを発生する元素を 10 ppm 以下に抑えることが不可欠である。世界の光学レンズ製造をほとんど独占している我が国における光学用 Nb_2O_5 の消費量は年間 50 t 以上にも及んでいる。

5. 研究開発の動向

著者らは昭和55年より当協会鉄鋼技術情報センターを通じてニオブに関する世界の文献の定期的検索を行っているが、ニオブに関する論文発表は毎月平均150~160件を数えている。これらの発表を詳細に分析すると、国別ではやはりアメリカとソ連が多く、それぞれ平均して25~30%を占めており、第3位の我が国は毎月20%程度を占める量である。欧州諸国、カナダなどがこ

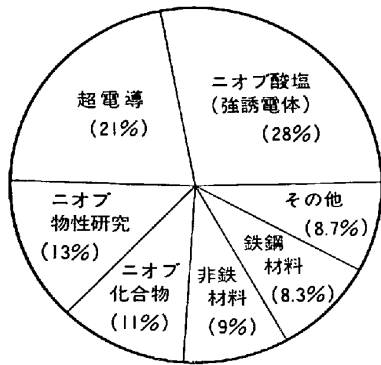


図 6 最近のニオブに関する研究論文の内訳

れに続いているが、最近では中国の躍進にめざましいものがある。これらの順位は、先に表 6 に示した国別ニオブ消費量、さらにはニオブが鉄鋼から電子工業に至るまでの産業のほとんどすべての分野に関与していることから、現在の各国の技術水準あるいは研究開発態勢などをそのまま反映するものである。

さて、1979~1980 年における研究開発の状況を前述したような各応用分野ごとの論文発表数で比較すると、図 6 に示すような構成になる。1970 年代前半のアメリカ鉱山局の調査²⁾によると、ニオブに関する研究は、鉄鋼材料に関するもの、ニオブ合金の高温度での酸化及び腐食抵抗、そして超電導に関するものに集中していたが、最近のそれは図に見られるように、鉄鋼材料に関するものの割合は減少の傾向にあり、光電子工学 (Optoelectronics) の急速な進歩を反映し強誘電体材料として用いられるニオブ酸塩 (前述した LiNbO_3 など) に関するものが全体の約 1/3 を占めている。続いて多いものは

表 14 メーカーによる超電導線材の需要予測

(単位億円)

応用分野	1985~1990	1991~1995	1996~2000	2001~2005
MHD 発電	—	72 (6基)	120 (10基)	180 (15基)
電気機械	0.73 (4台)	3.0 (18台)	6.6 (34台)	14.1 (65台)
超高速列車	216	—	—	—
高エネルギー物理	46	—	—	—
送電	—	—	296 (AC80km)	498 (AC120km) (DC100km)
エネルギー貯蔵	—	117 (3基)	234 (6基)	390 (10基)
核融合	—	44 (1基)	100 (1基)	244 (1基)
合計	263	236	757	1,426

やはり超電導に関する研究であつて、強誘電体材料とあわせると最近のニオブに関する研究論文の約半分を占めている。鉄鋼、非鉄材料を含めた金属材料の研究に関するものがこれに続き、あとはニオブの物性に関する研究、さらにはニオブ化合物に関する基礎的研究である。最近の動向で注目されるものとして、化合物の項に含まれるが、水素貯蔵材料として有望視されている金属水素化合物に関する研究あるいは原子炉燃料として用いられる U-Nb 合金、さらには原子炉構造材としての Nb 合金、燃料被覆材としての Zr-Nb 合金の研究などがあげられる。超電導の分野は将来のニオブの最大用途として期待されているが、我が国の研究開発計画に基づいた調査によれば、表 14³²⁾ に示すような投資ならびに図 7 に示すような消費が見込まれている³³⁾。この他、実用化に至るまでの研究開発に用いられるだけでも大量のニオブが消費されるものと予測できる。

6. 今後の問題点と将来の予測

ニオブの消費は今後も高度な産業を有する国々で伸びつづけ、今後 20 年間の全世界における総消費量は約 55 万 t と推定されているが、この量は現在稼動しているニオブ鉱山の総埋蔵量約 1100 万 t によつて十分に満たすことができる。将来にわたつても供給はブラジル及びカナダからのパイロクロアニオブによつてまかなわれ、特にブラジルは永い将来にわたつてニオブの主要供給国であることが予測できる。このような事実を反映して、世界中のニオブ関連産業界は比較的新しい資源であるパイロクロアの処理に適合するため製造技術の変換を行いつつあり、今のところ主要産出国によるカルテルの動きが全く見られないことから、ニオブは永い将来にわたつて安定した価格で供給されつづけるであろう。また、世界の 65% のニオブを一社で供給しているブラジル CBMM 社は、新しいニオブ関連製品の開発によつて惹起されるいかなる需要増加に対してもいつでも対応できる生産拡充態勢を整えている。

ニオブの将来の需給関係に影響を及ぼすであろう因子としては、最終製品の製造技術の進歩、ニオブの抽出精

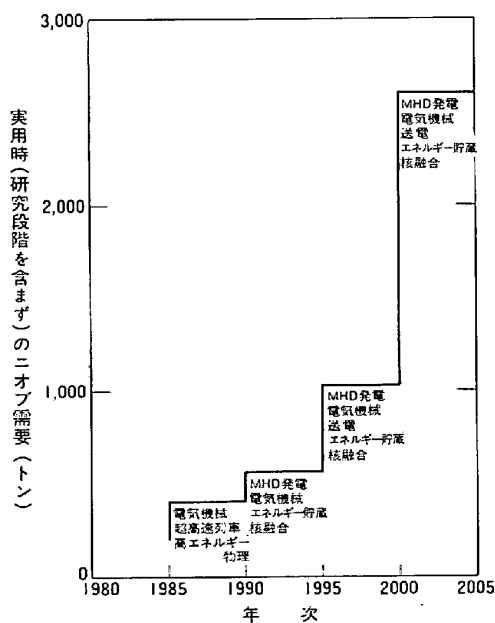


図 7 超電導技術応用各分野における実用時のニオブ需要予測

製、精錬技術の進歩、さらには地球科学の進歩による新鉱山の発見などが考えられる。これらによつて起こる変化は、たとえば前述したように、製鋼技術の進歩によつて鋼の炭素安定化剤などのようなニオブの用途は減少しつつあるであろうし、逆にニオブを含有した、あるいはニオブ基の高強度超耐熱合金などの開発が航空宇宙及び原子力産業用途におけるニオブの需要増大を導くであろう。さらにもますます深刻化するエネルギー問題は超電導技術の進歩に拍車をかけることとなり、おそらく2000年には、ニオブの最大用途は超電導材料となるだろう。また新しい抽出製錬プロセスの開発あるいは消費量の増大による価格の低下は、ニオブを、たとえば耐食材料におけるTiなどの競合材料に対してより競争力の高いものとするであろうし、ニオブ酸化物の付加価値を高める化学的製造方法の改良によつて、いわゆるファインケミカルとしてのニオブの用途の増大に結びつくであろうと予測できる。

7. 結 び

以上ニオブに関する資源、消費、技術開発の状況を著者らの知る範囲において概述してきたが、何度も記述したように、ニオブ資源はきわめて豊富であり、今後ニオブに関する研究開発はますます活発となるであろう。このような情勢に鑑み、イギリス金属学会においては、世界中のニオブに関する優秀な研究論文を表彰するため、前述したニオブの最初の発見者にちなんで、Charles Hatchett賞が1979年以来設けられている。研究者諸氏の今後の御健闘により、ニオブが人類にとつてますます有用な材料とならんことを期待している。

文 献

- 1) D. G. PINATTI: Proc. 1st Japan-Brasil Joint Symp. on Sci. & Tech., Tokyo, (1979), p. 170
- 2) J. A. SUTTON and H. E. STIPP: Mineral Facts and Problems (Columbium), U. S. Dept. Interior, (1975), p. 281
- 3) 伊藤 尚: 一般冶金学, 共立全書 133, (1965), p. 2 [共立出版]
- 4) Engineering & Mining Journal, 3 (1979)
- 5) F. HEISTERKAMP and S. R. KEOWN: Private Communication
- 6) Engineering & Mining Journal, 4 (1980)
- 7) H. STUART, O. S. PARAISSO, and R. FUCCIO: Iron & Steelmaker, 7 (1980), p. 11
- 8) J. M. GRAY: Paper presented at AIME 22nd Mech. Working & Steel Processing Conf., Toronto, Ontario, (1980)
- 9) 鶴戸口英善, 早川悌二: 圧力技術, 18 (1980), p. 28
- 10) 佐藤 進, 入江敏夫, 橋本 修: 鉄と鋼, 66 (1980), S1123
- 11) S. ABE and T. OGAWA: Metal Progress, 116 (1979), 9, p. 61
- 12) H. YOSHIMURA, T. SHIMIZU, H. YADA, and K. KITAJIMA: Trans. ISIJ, 20 (1980), p. 187
- 13) 諸石大司, 樽谷芳男, 小林未子夫, 砂山幸夫: 鉄と鋼, 66 (1980), S1166
- 14) 轟 理市, 田中靖二, 大野二郎, 浅見昭三郎, 曾村倫久: 鉄と鋼, 66 (1980), S1164
- 15) 金刺久義, 大崎慶治: 鉄と鋼, 63 (1977), S884
- 16) 田中良平: 学振耐熱金属材料委員会研究報告, 18 (1977), p. 225
- 17) H. E. CHANDLER and D. F. BAXTER: Metal Prog. 117 (1980), p. 30
- 18) S. R. KEOWN, E. KUDIENKA, and F. HEISTERKAMP: Metals Technology, 7 (1980), p. 50
- 19) 中村秀樹: 鉄と鋼, 66 (1980), S1139
- 20) 田中良平編著: 極限に挑む金属材料, (1979), p. 92 [工業調査会]
- 21) T. SUZUKI, Y. OYA, and D. M. Wee: Acta Met. 28 (1980), p. 301
- 22) 青木 清, 和泉 修: 日経メカニカル, 7-21 (1980), p. 52
- 23) 雑賀喜規: 熱処理, 19 (1979), p. 287
- 24) N. S. STOLOFF and D. J. DUQUETTE: Fatigue Mechanisms, ASTM-STP, 675 (1979), p. 788 [ASTM]
- 25) I. MACHLIN, R. T. BEGLEY, and E. D. WEISENT: Refractory Metal Alloys, (1968), p. 398 [Plenum]
- 26) A. A. TAVASSOLI: Met. Trans. 2 (1971), p. 1985
- 27) J. D. WHITTENBERGER and T. J. MOORE: Met. Trans. 10A (1979), p. 1597
- 28) T. W. CLYNE, A. M. NAZAR, M. PRATES, and G. J. DAVIES: Metals Technology, 5 (1978), p. 302
- 29) 超電導機器常置専門委員会: 最近の超電導材料とその冷却技術, 電気学会技術報告 (II部), No. 93, (1980), p. 3
- 30) 電総研ニュース, No. 367 (1980)
- 31) 宮澤信太郎: 電子通信学会誌, 63 (1980), p. 354
- 32) 古戸義雄: 昭和49年度未踏革新技術調査報告書, 超電導応用技術分野, (1975), p. 208 [日本産業技術振興会]
- 33) 古戸義雄: 私信