



UDC 669.292 : 622.346.4

金属資源シリーズ —バナジウム—

須藤 欽 吾\*

Metallic Resources Series —Vanadium—

Kingo SUDO

1. 緒 言<sup>1)~5)</sup>

Vは元素発見以来昭和 55 年で 150 年を迎え, CLERK によつて与えられた地殻における頻度, すなわち存在量は 0.016% で, Cu, Zn, Pb などより多い. にもかかわらず "Rare Metals", あるいは "Less Common Metals" といった, 希少価値を有する金属に数えられている特異な金属である. Vは種々の岩石に広く分布し, 他の諸金属のように濃縮して鉱床を造る傾向のない金属で, その回収も主として他の金属の副産物 (by-product), あるいは連結産物 (co-product) の形で行われる. V自体のみを目的とした鉱山としては, Peruvian Andes 中の硫化鉱を含む Mina Ragra 鉱床が有名で, 第二次大戦前には世界需要の約半分を供給したといわれるが, 今は廃山となつている.

他方Vの用途は, 前世紀中頃商業的にインキ, 皮革, ガラス, 陶器の着色剤として使用されたのが始まりで, 次いで触媒として少量使用されたぐらいであつた. 鉄鋼への添加に関する研究は, 前世紀末になつてフランス, イギリスで行われたが, 1903 年に至りアメリカの Crucible Steel Co. の J. A. MATHEWS が従来のW-Cr高速度鋼にVを添加して, いわゆる 18-4-1 型高速度鋼の起源となつた特許をとつた. 1909年イギリスの Jones & Colver Co. が Sheffield 大学の ARNOLDO 教授の研究成果に基づく "Novo Superior" 鋼を市販し, 1924 年には W. H. KEEN が 18-4-3 型高 V 高速度鋼を製造, 販売し, Ludlum Steel Co. の "High-Vau" なる高速度鋼が出たのはその翌々年であつた. この頃より高速度鋼に対するVの効果に関する組織的研究が, ドイツ, ノルウェー, アメリカで行われた. アメリカは豊富な資源国としてVを大いに活用し, 第二次大戦前には 45 種のV鋼中 2%以上のVを含むもの 19 種にも及んだ. 逆に資源に乏しいドイツは, 低W高速度鋼, 高 Mo 高速度鋼に対するV添加の効果を熱心に研究し, 遂に Mo 節約に成功

した.

第二次大戦後の 1960 年頃から, 鋼のフェライト粒の微細化用にVが使われ始め, HSLA 鋼の登場, さらに航空機用 Ti 合金へのV添加が行われるようになり, 需要は急速に伸びてきた. 他方この需要に呼応するかのようになり, アメリカにおけるV抽出法を南アフリカの Bushveld の含 Ti 磁鉄鉱に適用して, 製鋼の連結産物としてVを生産する研究に成果をおさめた Anglo American Corp. of South Africa は, Highveld Steel & Vanadium Corp. を創設し, Vの生産を始めて今日に至つている.

2. 世界における資源の賦存状況<sup>1)2)6)~8)</sup>

Vを含む鉱床を 4 大別して, その中の含V鉱物の種類とその含有率を表 1 に示す<sup>6)</sup>. 前記Vを対象として採鉱されたペルーのパトロン石 (patronite) はアスファルト

表 1 含V鉱床とその構成鉱物

	V%
1. 砂岩型鉱床 (Sandstone)	
Montroseite (V, Fe)O(OH)	45
Fervanite $Fe_4(VO_4)_4 \cdot 5H_2O$	24
Hewettite $CaV_6O_{16} \cdot 9H_2O$	39
Roscoelite $K(V, Al, Mg)_3(Al, Si_3)O_{10} \cdot OH$	12
Carnotite $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$	11
Tyuyamunite $Ca(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 5-8H_2O$	11
2. 卑金属鉱床 (Base Metal Deposits)	
Vanadinite $Pb_5(VO_4)_3Cl$	11
Descloizite-Mottramite Series	
$PbZn(VO_4)(OH)/PbCu(VO_4)(OH)$	12
3. アスファルト鉱床 (Asphalt Deposits)	
Patronite $VS_4$	28
4. 磁鉄鉱鉱床 (Magnetic Iron Deposits)	
Coulsonite $(Fe, V)_3O_4$	46
Magnetite (titaniferous) $(Fe, Ti, V)_3O_4$	2

昭和 56 年 3 月 27 日受付 (Received Mar. 27, 1981). (依頼解説)

\* 太陽鉱工(株) 工博 (The Taiyo Mining and Industrial Co., Ltd., 72 Kyomachi Chuo-ku Kobe 651-01)

表 2 経済的鉬床の主要型

1. 磁鉄鉬床-硬岩鉬体  
中の含 Ti 磁鉄鉬が主だが砂鉬床中にも
2. Minette 型鉄鉬床
3. 砂岩中の U-V 鉬床
4. 含 V シェールおよび粘土
5. 含 V 燐酸岩
6. タールサンドおよびアスファルト鉬床
7. 石油鉬床
8. 含 V 卑金属鉬床
9. 金, Te あるいは V の含 V 脈型鉬床
10. Mafic および Ultramafic 岩系ポークサイト鉬床

鉬床に存在する。これらの含む全世界の V 資源量は  $62 \times 10^6$  t といわれる。これらのうちで、V 採取対象となつて  
いる経済的鉬床を選んで、その主要型を示したものが表  
2 である<sup>6)</sup>。

またこれら V 資源の世界における分布を示したものが  
図 1 である<sup>7)</sup>。これより南アフリカ、北欧、アメリカに  
多く賦存していることが知られる。なおこの図には、今  
後 V 抽出原料となり得る潜在資源も示してあるが、ベネ  
ズエラの Caribbean oils がクローズアップされている。

さらに具体的に、現在稼行中、あるいは稼行計画  
中の世界の諸資源について、その存在する国と場所、V  
を含む鉬石の型およびその含量、確定量、ならびに現状を略  
記したものが表 3 である。この表より知られるように、  
V 資源としては磁鉄鉬系が断然多い。ことに南アフリカ  
の Bushveld Complex が最大資源であることが知られ  
る。またアメリカでは U 生産の副産物として産出される  
V が少なくないことより、原子力開発と、さらに P 生産  
とも関連することが知られる。他方南西アフリカの Pb-  
Zn 複合鉬は、かつて欧州への主要 V 供給源だつた面影  
を偲ばせている。

### 3. 製 錬<sup>9)~15)</sup>

世界の含 V 鉬床中の V 含有率は、普通平均 2% 以下で

ある。したがつて V 採取は、一般常識とは異なつて、他  
の金属の副産物、あるいは連結産物として行われる場合  
が多いことは既述のとおりである。鉬床によつては、V  
を含む鉬種が判然と認められるものもあるが、現在生産  
されている V の多くは、特にその鉬物が認められないよ  
うな鉬石から回収されている。

したがつて、前記経済鉬床が常に普遍的工業原料とし  
て採用されるとは限らないという特異性がある。たとえ  
ば、現在世界 V 生産量の約 40% を産出している、南ア  
フリカの Highveld Steel & Vanadium Corp. の Bush-  
veld に産する磁鉄鉬と同種のものがアメリカにも賦存  
するが、V 抽出の対象とはされていない。

上記 Highveld 社の Witbank 工場では、含 Ti 磁鉄  
鉬をまずロータリー・キルンで予備還元した後、潜弧ア  
ーク炉で溶解して溶鉄中に V を留める。次にこれをシェ  
ーキング・レードルで酸化処理を行つて、V をスラグに  
移して高 V スラグ ( $V_2O_5$  25%) とし、これを粉碎して、  
欧米の Ferro-V メーカーに供給している<sup>9)</sup>。また一部  
鉬石よりソーダ焙焼-浸出法によつて  $V_2O_5$  フレークと  
して輸出しており、本邦にも輸入されて重要な Ferro-  
V 製造原料となつている。同社は製鉄所としては mini-  
mill の部類に属するが、量的には世界一を誇る V を連  
結産物として生産して世界各国に供給している特異な存  
在である。かかるソーダ焙焼-浸出法は、北欧の Rau-  
taruukki などでも採用され、V 抽出の主流派と考えられ  
る<sup>13)</sup>。

V の現在の最大消費は、鉄鋼添加用 Ferro-V である  
が、このメーカーは、原料鉬石より製品まで一貫生産す  
る一般常識に反して、 $V_2O_5$  より出発するものが多い。  
ために世界市場では、 $V_2O_5$  粉末を溶融してフレークの  
形にしたものが商品として取り扱われている。

次に世界の  $V_2O_5$  生産量を支配する諸国の生産シェ  
アの百分率を世界地図上に記入したものが図 2 である。  
この図から、南アフリカ、ソ連、アメリカの世界 V 生産  
に占めるシェアがいかに大きいか知られる。

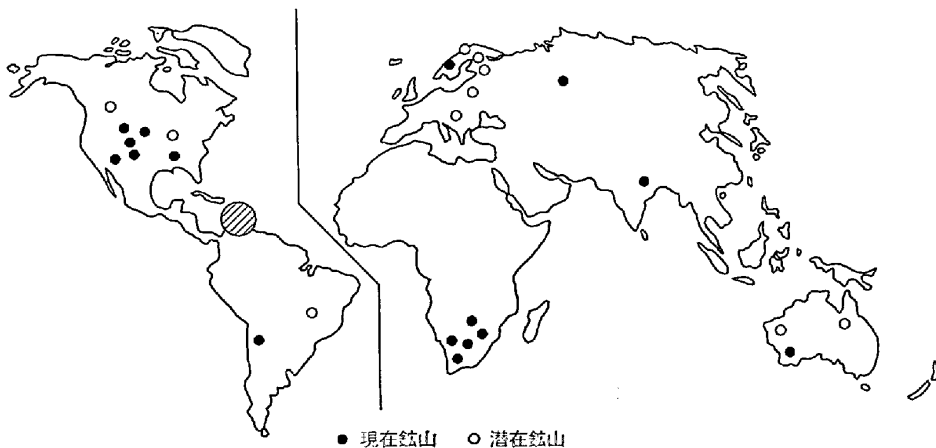


図 1 バナジウム資源の世界分布

表 3 世界のバナジウム資源

国と場所	鉱石型	V含量(%)	確定量 (10 <sup>6</sup> lbV)	状態
アメリカ Arkansas Colorado, New Mexico Utah, Arizona South Dakota, Wyoming Idaho New York	含 V 粘 土 (含 U 鉍)	0.4—0.7 0.06—0.5	60 90	V稼行中 (U, V生産稼行あるいは 計画中)
	含 V 燐 酸 岩 含 Ti 磁 鉄 鉍	0.08—0.46 0.15—0.3	254 500	P, V稼行中 Ti 生産, V未回収
チリ El Romeral	含 Ti 磁 鉄 鉍	0.4	896	Fe, V 稼行
ペルー Pasco	含 V アスファルタイト	0.25—0.85		旧V主源
ベネズエラ	原 油	230ppm	200	V稼行中
カナダ Quebec (Allard Lake) Alberta	含 Ti 磁 鉄 鉍 タ ー ル 砂 原 油	0.15—0.2 150ppm 230ppm	1 000 7 000 7 000	Ti, Fe 稼行中 V未回収 V生産中
ソ 連 Urals (Mt. Kachkanar, Kusinskoe, Pervouralsk) Karlo-Kula Pudozhgarskoe)	含 Ti 磁 鉄 鉍 〃	1.9 0.3—0.6	14 000 2 600	Fe, V 稼行 未利用
フィンランド Otanmaki	含 Ti 磁 鉄 鉍	0.6	250	Fe, Ti, V 稼行中
スウェーデン Ruotivare, Kramsta Ulvon, Taberg	含 Ti 磁 鉄 鉍	0.1—0.6	836	未利用
ノルウェー Hattevarre, Selvag Rodsand, Storgangen	含 Ti 磁 鉄 鉍	0.3—0.5	240	未利用
オーストラリア Coates	磁 鉄 鉍	0.47	690	Fe, V 稼行開始
南アフリカ Bushveld Complex	含 Ti 磁 鉄 鉍	0.8—1.0	34 000	Fe, V 稼行
南西アフリカ Otavi 地方	含 V 卑 金 属 鉍 床	0.5		単金属, V回収
モザンビーク Tete	含 Ti 磁 鉄 鉍	0.3	1 600	単金属, V回収
中 国	含 V 磁 鉄 鉍	0.3		
インド Bibar, Kanakata Mabaya, Pradesh	含 V 磁 鉄 鉍 ボ ー キ サ イ ト	0.4—0.7 0.005—0.1	400 可 成	Fe, V 稼行あるいは計画 Al 稼行, 赤泥(含V)回収
ポーランド Krzeminonka	含 Ti 磁 鉄 鉍			V生産開始

V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> より Ferro-V を製造する常道は、前記 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> フレークの Al 粒による還元反応を利用する、いわゆるアルミノテルミット法、あるいは電気炉還元によるエレ

クトロテルミット法であるが、前者が広く採用されている。この場合生産コストの大部分は V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> のコストが占めている。

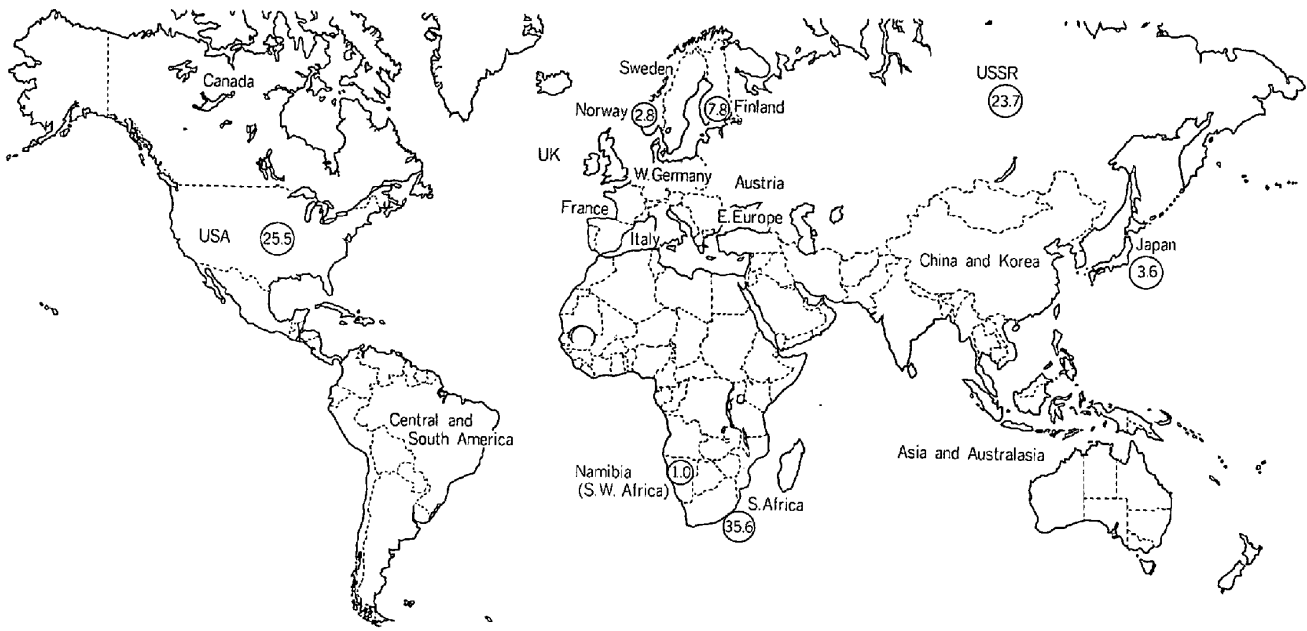


図2 世界各国のバナジウム生産シェア百分率 (1978)

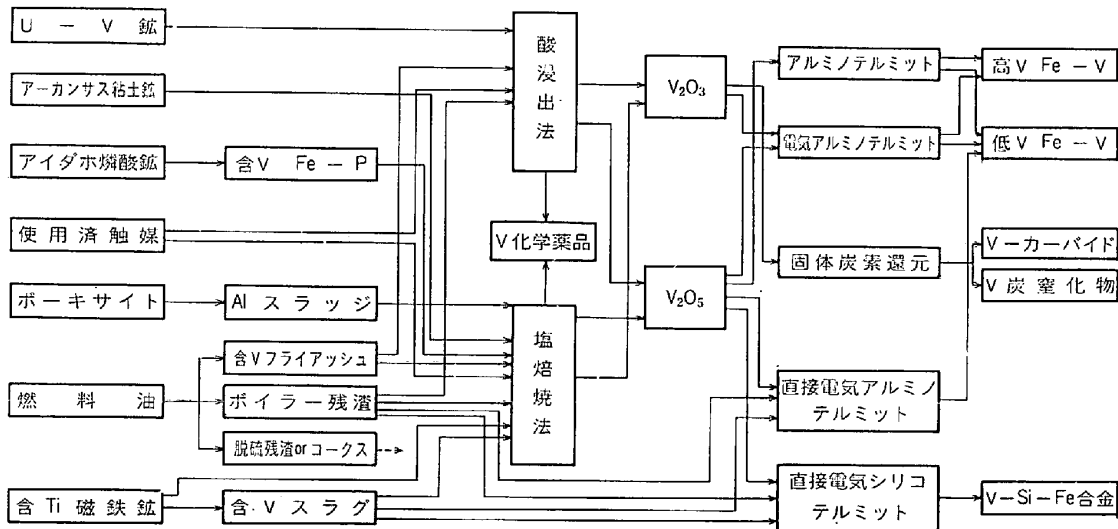


図3 資源別バナジウム合金製造系統概要図

世界各所で採用されている製錬法は、原料によって大きく支配される。これは資源別に、用途の最も多い鉄合金を製造する工程を概括して図示した図3からうかがわれる<sup>11)</sup>。

なお、鉄鋼添加用としては Ferro-V 以外に、これより安価なものが、前記方法以外の簡便法で製造されて販売されている<sup>9)</sup>。たとえばアメリカの Foote Mineral Corp. の “Ferrovan”, これと同種のノルウェーの Elkem 社の “Bremenger Ferro-V”, アメリカの Union Carbide 社の “Carvan”, “Nitrovan” などである。

4. 用途および消費<sup>6)8)10)20)~22)</sup>

Vの主な用途は、合金元素としてで、鋼の強化用に使

われるのが大部分で、一部耐熱、強化用に Ti 基合金に使われる。消費の方は前述のように 1960 年より以後の 10 年間に大幅な増加があった。しかし 1970 年以降は比較的安定した消費を示し、アメリカにおける最終用途別消費の推移を 10 年間にわたって示したものが図4である。これらの材料は、高層建築、橋梁、石油や天然ガスのパイプラインのような建設材、あるいは航空機、船舶、鉄道、自動車などの輸送産業材として大半が消費されている。

さらに世界西側諸国における V 消費の推移を 1970—79 年にわたって図示したものが図5である。この図より日本の消費は横ばい傾向を示したが、ヨーロッパのそれは 73~74 年以外は、アメリカと同じ波を打ってきたこ

とが知られる。

次に、世界各国で消費されるV量のそれぞれのシェア—百分率を世界地図上に記入したものが図6である。これを前記世界生産シェア—百分率図と対比すると興味深い。なおこれを細分化して、世界主要国のV製品の輸出入量を、貿易上の数値表より拾い挙げて表示したものが表4で、Vをめぐる世界各国の動きの一端がうかがわれる。

また観点を变えて、V消費と最も関係の深い鉄鋼生産との関連をみるため、世界主要鉄鋼生産国におけるV消費と粗鋼生産の関係を表示したものが表5である。これよりV消費国の特徴がうかがわれるとともに、本邦も今後少し消費が伸びてもよさそうに思われる。

5. 結 言 (1)2)6)16)~19)

鉄鋼業界のような消費者側に立てば、前述の資源のほかに、価格変動と生産能力を含めた安定供給が注目すべき問題点となる。

まず  $V_2O_5$  価格については、かつて大きい変動を示したこともあったが、1970年頃より、南アフリカ、ソ連、

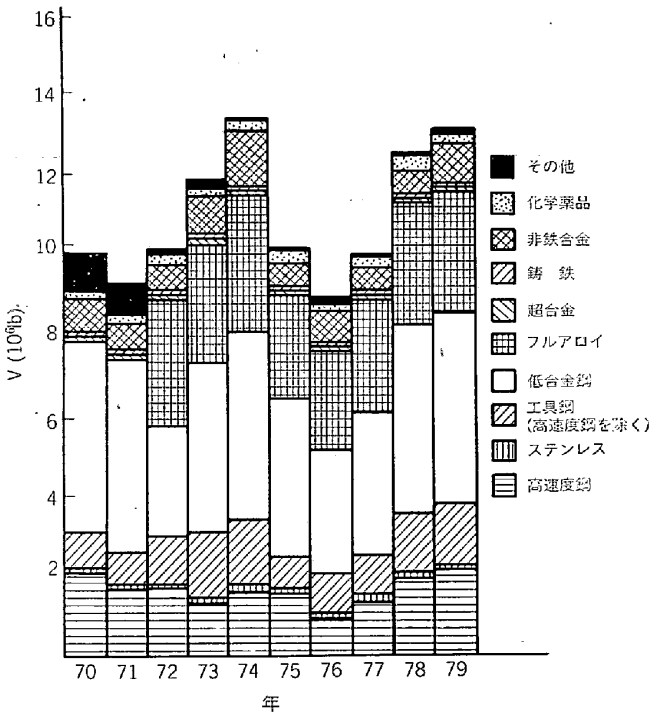


図4 1970-79年のアメリカにおける最終用途別バナジウム消費

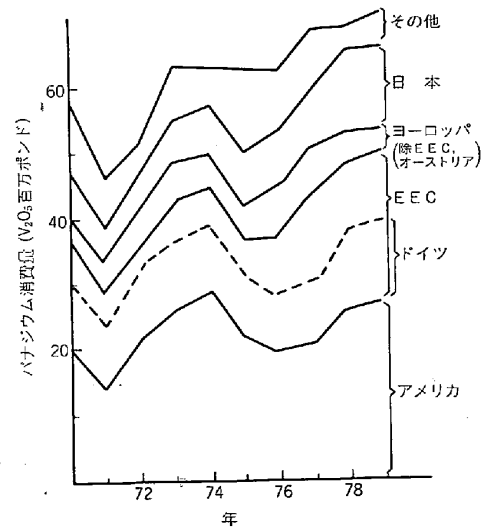


図5 世界主要国におけるバナジウム消費の推移 (1970-1979年、ただし共産圏を除く)

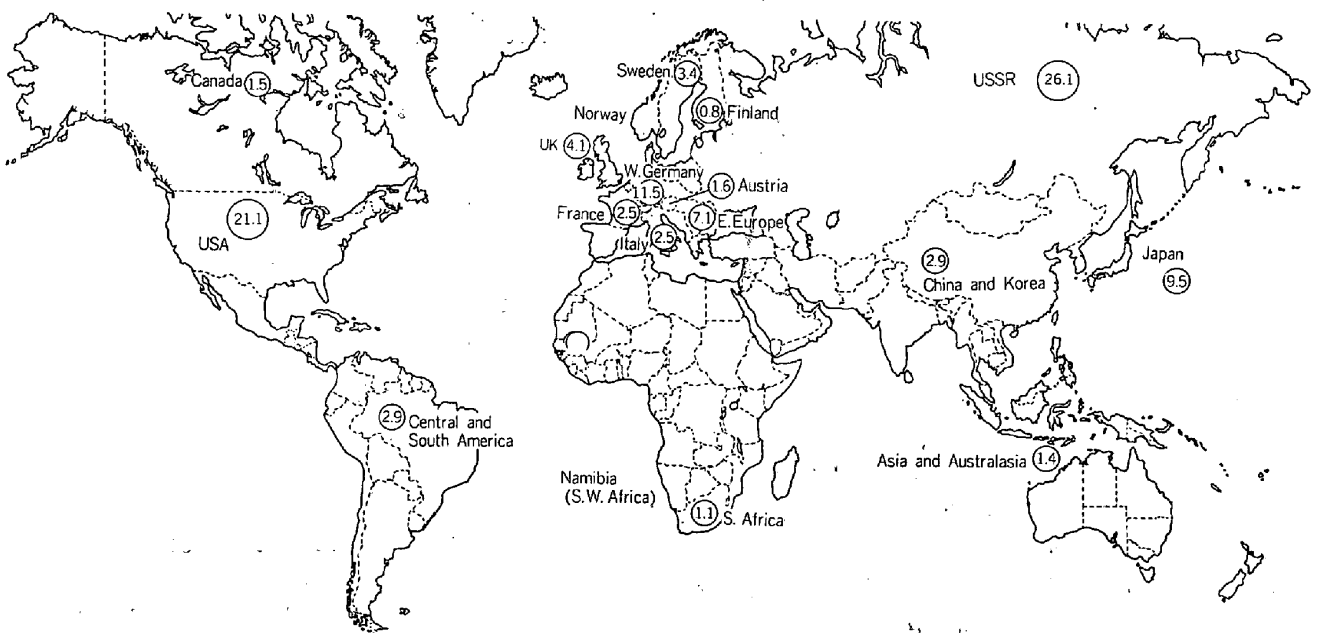


図6 世界主要国のバナジウム消費シェア—百分率 (1978)

表 4 世界主要国のバナジウム原材料貿易 (1977)

(単位: 1 000 lbs)

国 名	輸 入					輸 出				
	スラグ	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe-V	その他	計	スラグ	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe-V	その他	計
Australia	—	—	19	—	19	—	—	—	—	—
Austria	3 570	512	318	—	4 400	—	1 694	2 888	—	4 582
Bel/Lux	4 433	1 339	251	45	6 068	87	355	3 222	4	3 668
Canada	—	239	345	—	584	—	—	2 425	—	2 425
China	—	124	526	—	650	—	—	—	—	—
Czechoslovakia	—	—	523	—	523	20	—	—	—	20
Denmark	—	—	10	—	10	—	72	—	—	72
Finland	—	—	104	—	104	113	5 958	—	—	6 071
France	—	1 704	973	4	2 681	1	162	399	—	562
Italy	15	1 250	801	—	2 066	—	—	748	—	748
Japan	—	4 434	1 335	—	5 769	—	—	21	—	21
Netherlands	4 517	117	67	—	4 701	33	37	1 969	—	2 039
Norway	—	—	—	—	—	504	—	1 701	—	2 205
Poland	—	—	205	—	205	—	—	—	—	—
South Africa	—	31	48	—	79	21 767	6 150	—	1 571	29 488
South America	—	1 669	249	—	1 918	8	—	—	—	8
Spain	—	9	634	—	643	—	—	—	—	—
Sweden	—	1 485	1 600	—	3 085	—	—	1 308	—	1 308
Switzerland	1 940	4	241	—	2 185	—	1	47	—	48
United Kingdom	315	1 480	1 386	—	3 181	43	302	237	14	596
U.S.A.	4 541	6 065	8 842	—	19 448	22	707	19 832	1 614	22 175
U.S.S.R	—	686	—	—	686	—	—	—	—	—
West Germany	7 246	2 654	4 636	1 256	15 792	344	1 396	4 134	32	5 906
Yugoslavia	—	17	236	—	253	—	—	—	—	—
総 計	26 577	23 814	23 349	1 305	75 050	22 942	16 834	38 931	3 235	81 942

(VANITEC 資料)

表 5 自由世界諸国における粗鋼生産とバナジウム消費の関係 (1974)

国 名	粗 鋼 (百万 t)	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (百万ポンド)	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (百万ポンド) /粗鋼(千万 t)
スウェーデン	5.99	3.20	5.342
オーストリア	4.70	2.10	4.468
アメリカ	132.02	28.76	2.178
ドイツ	53.23	9.75	1.832
カナダ	13.59	2.00	1.472
ブラジル	7.57	1.00	1.321
イギリス	22.50	2.54	1.129
フランス	27.00	2.50	0.926
イタリア	23.89	2.00	0.837
日本*	117.14	8.01	0.683
南アフリカ	5.84	0.25	0.428

\*

(年)	1976	1977	1978
(比)	0.94	0.95	0.95

アメリカの Arkansas の生産が、予定能力に達するや、それまでの傾向を逆転する程となり、それ以降は図 7 に示すような動きをしている。最近いくぶん上昇みにあるとはいえ、他の同種金属 Mo, Nb に比べれば安定しているといえよう。この傾向の今後の変動を予測する資料として、世界における V 消費量と生産能力量との関係を、従来の発表値および種々の新プロジェクト発表値より外挿して図示したものが図 8 である。この図より、今

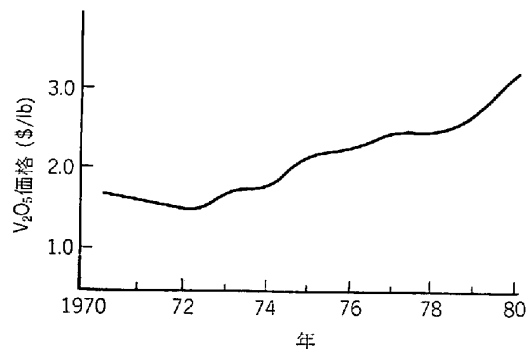


図 7 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> の価格推移 (Highveld)

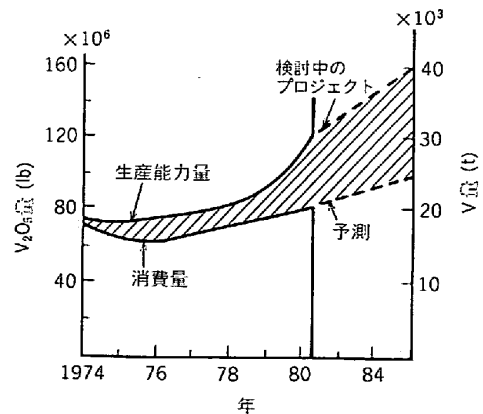


図 8 バナジウム消費量、生産能力量推移

表 6 中南米原油, 中東原油のVおよび Ni 含有量

Western Venezuelan Crudes	Gravity (API)	V (ppm)	Ni (ppm)
Bachaquero Heavy	13.2	390	45
Bachaquero Light	35.4	49	5.5
Boscan	10.6	1400	100
Lagunnillas Heavy	17.6	300	38
Mara	29.5	320	18
Toparito	17.2	450	40
Tia Juana Light	31.9	100	11
Tia Juana Heavy	18.2	300	25
Eastern Venezuelan Crudes			
Cachipo	34.3	14	3.2
Jusepin	31.9	26	5.5
Pedernales	21.7	230	87
Pilon	9.7	510	98
Tigre	26.5	160	28
San Joaquin	45.9	0.6	0.2
Middle East Crudes			
Agha Jari (Iranian)	33.9	36	
Ain Dar (Arabian)	33.9	51	10
Bai Hassan (Iraqi)	33.3	19	
Gach Saran (Iranian)	31.0	114	
Kwait	32.3	30	6
Qatar	42.2	3	0.4
Safania (Arabian)	27.1	80	
Wafra (Neutral Zone)	24.1	52	7
Zubair (Iraqi)	36.4	20	4

後とも安定V価格は続くし、需給関係も不安ないように思われる。ただし、政情は別としてである。

またV資源自体は、前記のように、濃縮された鉱石はごくまれであるにもかかわらず、地殻構成元素としては多い部類である。すなわち地球上に広く分布されている。したがって、現在経済的稼行の対象とならない鉱石でも、効率の高い抽出法が開発されれば、生産に寄与する可能性はある。かかる意味での潜在資源として最も注目すべきは、石油に含まれるVであろう。世界の産油国のうちで、中南米、中東に産出する原油に含まれるVおよび Ni 量の代表的な数値を表6に示す。

現在V含量が最も高いと称されている Venezuela 原油中には平均 200 ppm のVが含まれ、この年間生産量 1.5 億 t が世界に広く使用されている。この原油中に含まれるV量は実に 3 万 t に達する。もつともこのような原油中のVの一部は、これを使用して生ずるボイラー・スケール、フライアッシュ、あるいは脱硫精油に利用する触媒の使用済みのものより、現在すでに回収されている<sup>7)</sup>。これら発生の原点に戻つて、原油より直接V抽出が可能となると資源的には大きい存在となることは必定である。この点についてすでに Venezuela 政府自体認識していることは、1973 年に石油よりのV回収に関するシンポジウムを主催した事実よりうかがえよう。もつともこの時点では、適当な回収方法が見つかったのではないが、これから開発研究が進められることは予測に難くない。

このほか鉄鋼製錬において発生するスラグ中の比較的

Vの多いもの、さらに本邦でも東北地方に産出する砂鉄などがV原料として浮上してくることも考えられる。

一方現在V消費の大部分を占めている鉄鋼以外に、V本来の機能を生かした方面の用途、たとえば中性子に関する性質を利用する原子力方面などへの消費も伸びて行くことも期待できよう。かかる用途開拓については、世界のV関係 20 社が結集して作った VANITEC (Vanadium International Technical Committee) の活躍に大きな期待が持たれる。

本解説を記述するにあたり、残念ながらソ連、中国に関する資料が十分入手できなかった。したがって上記論述、ことに今後の見通しについては変わる可能性があるうことをおそれつつ擱筆する。

文 献

- 1) R. F. GRIFFITH: Mineral Facts and Problems (1970), p. 417 [U. S. Bureau of Mines]
- 2) H. A. TAYLOR and G. N. BRODERICK: Mineral Facts and Problems-Bicentennial Edition (1975), p. 1201 [U. S. Bureau of Mines]
- 3) W. OERTEL and A. GRÜTZNER, 高見沢栄寿訳補: 高速度鋼 (1931), p. 231 [共立社]
- 4) F. B. PICKERING: Micro Alloying 75, Session 1. Proceeding (1976), p. 3 [U.C.C.]
- 5) J. F. M. LUYT: Mineral Resources of the Republic of South Africa ed. by C. B. GOETZEE, (1976), p. 241 [Dept. Mines, R. S. A]
- 6) U. S. National Material Advisory Board: Vanadium Supply and Demand Outlook, (1978), [U.S. Dept. Commerce]
- 7) R. HERVERTSON and A. M. SAGE: Metal Bulletins' First International Ferro-Alloys Conference (1977), p. 102 [Metal Bulletin]
- 8) VANITEC: A Review of Vanadium Supply and Consumption 1970-80, (1980)
- 9) 須藤欽吾: 昭和 54 年度全国地下資源関係学会合同秋季大会, 分科研究会資料 [A] 最近の非鉄製錬技術 A. 9 (1979), p. 33
- 10) R. K. EVANS: Reprinted from Metals and Materials (1978) Apr. VANITEC Publication No. VO 38
- 11) 須藤欽吾: 日本金属学会報, 20(1981), p. 201
- 12) Highveld Steel Press: Processing (1980) June, p. 2
- 13) "Rautaruukki": World Mining (1978) 3, p. 44
- 14) L. H. BANNING, W. E. ANABLE, and R. T. C. RASMUSSEN: Trans. AIME, 197 (1953) p. 423
- 15) E. H. CRABTREE and V. E. PADILLA: J. Less-Common Metals, 3 (1961), p. 437
- 16) 科学技術庁編: '75 産業資源 (1975), p. 380 [産業技術会議]
- 17) 須藤欽吾: クリーンジャパン, 22(1980) 5, p. 2
- 18) International Symposium on Vanadium and Other Metals in Petroleum, Aug. 19-21,

1973 (1975) ed. by G. KAPO [Universidal del Zulia]

19) 須藤欽吾: 東北大選研彙報, 6(1950), p. 227

20) E/MJ, 毎年の3月号

21) 三井物産合金鉄グループ: 工業レアメタル,

No. 72 (1980), p. 86

22) G. DUDERSTADT and L. ZIEHL: Metal Bulletins' Second International Ferro-Alloys Conference (1979), p. 77 [Metal Bulletin]