

モリブデン鉱業界の現状： 特にポーフィリー型鉱床の特性について

石原 舜 三¹⁾

1. まえがき

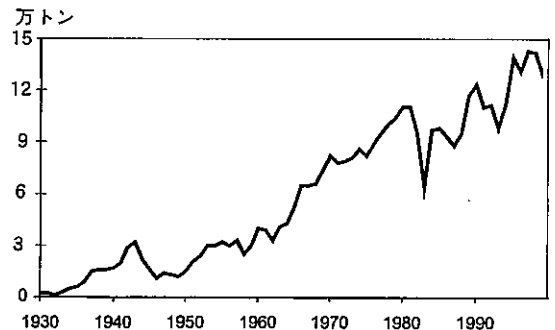
モリブデンは主として鉄に添加されてその性質を強める形で社会に役立っているが、比較的地味な性格を持つレアメタルの一つと言える。筆者はモリブデンをテーマに本誌に2回解説したことがあるが(石原, 1962, 1965), クライマックス鉱山の閉山と共にクライマックス型とも呼ばれるアメリカ中央部のポーフィリー型Mo鉱床からの供給量が減少し、それに代わってポーフィリー型銅鉱床の副産物や中国のポーフィリー型あるいはスカルン型鉱床の比重が高まるなど、供給側に最近変化が生じている。

中国で巨大なポーフィリー型Mo鉱床があるらしいことは筆者が中国を最初に訪問した1979年にわかっており(石原, 1980), 1981年からスタートした国際研究協力事業(ITIT)(地質調査所月報特集号, v.37, no.5, 1986)では福建-浙江省から巨大モリブデン鉱床があるらしい秦嶺山地を通り西安に至る横断面調査を提案したが、主たるカウンターパートが南京地質産産研究所であったために秦嶺山地を研究対象とすることが出来ず、中国某地区として書かれた報告書から推定し、標本を見て現地を想像するしかなかった。石原(1982)のモリブデンに関する記述はそのようにしてなされた。最大の金堆城鉱山が国際会議の巡検に開放されたのは1994年7月、国際鉱床学連合(IAGOD)が北京で開催された時である。

ここでは昨年の中国訪問を踏まえて、最近のモリブデン鉱業状況、近年生産量を増やしている中国の鉱床、更にはアメリカのモリブデン鉱業を支えたクライマックス型鉱床の特性とヘンダーソン鉱床の発見にまつわる話題などを紹介してみたい。



写真1 大雁塔で象徴される古都、西安。秦嶺山脈の北縁にある。



第1図 世界のモリブデン生産量の経年変化 (Roskill Inf. Ser., 2001版).

1) 産総研 特別顧問

キーワード: モリブデン, 生産量, ポーフィリー型, スカルン型, 金堆城, 南泥湖, コロラド鉱化帯, クライマックス, ヘンダーソン, 中国, 秦嶺造山帯

第1表 最近の国別モリブデン生産量(千トン)の変化(Roskill Inf. Ser., 2001版).

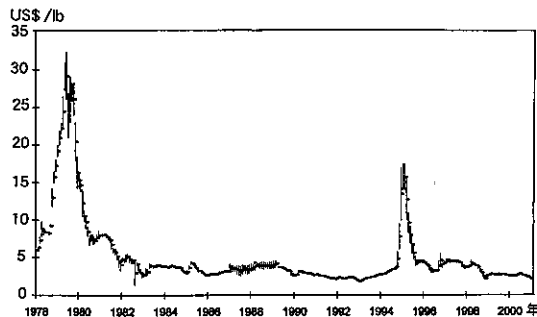
	カナダ	チリ	中国	旧ソ連	メキシコ	ペルー	アメリカ	その他	合計
1987年	14.8	16.9	12.0	11.5	4.4	3.4	34.1	2.4	99.5
1988	13.5	15.5	14.4	11.5	4.5	2.4	43.1	2.5	107.4
1989	13.5	16.6	15.7	11.5	4.2	3.2	63.1	2.5	130.3
1990	12.0	13.6	15.7	17.0	2.0	2.5	61.6	2.5	126.9
1991	11.3	14.4	13.2	16.0	1.7	3.0	53.4	2.3	115.4
1992	9.4	14.5	19.2	13.2	1.5	3.2	49.7	2.9	114.0
1993	9.7	14.9	18.3	12.1	1.7	2.3	36.8	2.8	99.2
1994	10.3	15.9	21.4	5.1	2.6	2.8	46.8	2.7	107.6
1995	9.1	17.9	33.0	5.0	3.9	3.4	60.9	2.4	135.6
1996	8.8	17.4	29.6	4.4	4.2	3.7	54.9	2.8	125.8
1997	7.6	21.3	33.3	4.4	4.8	3.8	60.9	2.6	139.0
1998	8.0	25.3	30.0	5.3	5.9	4.3	53.3	2.6	134.7
1999	5.9	27.3	27.9	5.5	6.0	4.4	43.0	2.4	122.4
2000*	6.0	27.0	28.0	5.6	6.0	4.5	32.1	2.4	111.6

註：北朝鮮・ルーマニア・トルコ・ユーゴスラビアは生産するも量不明、旧ソ連はアルメニア・カザクスタン・キルギスタン・ロシア・ウズベキスタン、その他は主にモンゴルとイラン、2000年は推定値。

2. モリブデン鉱業の現状

モリブデンは1720年に発見され、1893年にはタングステン工具鋼の代用物として、翌1894年にはモリブデン装甲板が造られた。第一次世界大戦ではタングステン高速度鋼の代わりに盛んに使用された。モリブデンはタングステンと共に兵器に使用される為第二次世界大戦でも消費が拡大したが、現在では機械産業などを中心にした幅広い分野で使用されており、需要は年々拡大し、1930年代の1万トン台/年から1990年代には10万トン台に達している(第1図)。最近10年間の生産量は9.92万トン(1993年)–13.9万トン(1997年)であり、1997年が最高であった。モリブデンの価格は時折急騰する。最近12年間の変動を第2図に示す。

西側世界の用途別使用量は1999年の12.4万トンのうち、ステンレスと熱処理鋼が33.7%、その他鋼



第2図 最近のモリブデン酸化物(molybdenic oxide)価格に見る年別変化。月末のニューヨーク価格(Roskill Inf. Ser., 2001版)。

材11.8%、合金鋼29.4%、超合金4.4%、モリブデン金属5.7%、触媒8.1%、化学薬品ほかが6.9%であり、圧倒的に鉄鋼に添加されている。我が国では主として精鉱(MoS_2)を輸入し、上記用途に加工・利用し、一部は輸出している。

消費量が最大であった1997年の我が国の輸入量はモリブデン精鉱31,190トン、フェロモリブデン3,167トン、モリブデン酸塩1,300トン、酸化物1,299トン、塩化物1,299トン、その他957トン、合計39,212トンであった。なお製品のうち1割弱の326トンが輸出されている。

3. モリブデンの供給源

モリブデンは輝水鉛鉱(MoS_2)として産出し、輝水鉛鉱は開発初期の頃地表に露出するペグマタイト、鉱脈、スカルン型などから採掘されたが、1879年に発見されたポーフィリー型鉱床であるコロラド州のクライマックス鉱床(4.5億トン、 MoS_2 0.37%)によって、モリブデン鉱業の中心は巨大なこのタイプの鉱床へと移行し、ニューメキシコ州のクエスタ鉱床の開発、コロラド州のヘンダーソン鉱床(表紙、口絵1~4参照)、エモンス山鉱床の発見へと発展した(石原, 1965)。

輝水鉛鉱はポーフィリー銅鉱床の副産物としても産出し、その含有量は低いものの、銅鉱石処理量が大いいため回収産物も増加している。特に近年の銅鉱床がかつての二次富化鉱体からその下部の初生鉱体に移行すると共に輝水鉛鉱の含有量が



写真2 西安は長安とも呼ばれ、長年首都であったため、街造りは整然と行われている。

必然的に高まるため、ポーフィリー型銅鉱床の供給源としての役割が増大している。

最近13年間の世界のモリブデン生産量を第1表に示す。近年のアメリカ・カナダ・旧ソ連邦の衰退、そして中国・チリの隆盛が明瞭である。

アメリカの生産量は落ちたりとは言え、依然として世界の3分の1のシェアを占めている。残存鉱量には540万トンMoが含まれ、これは世界の鉱量の

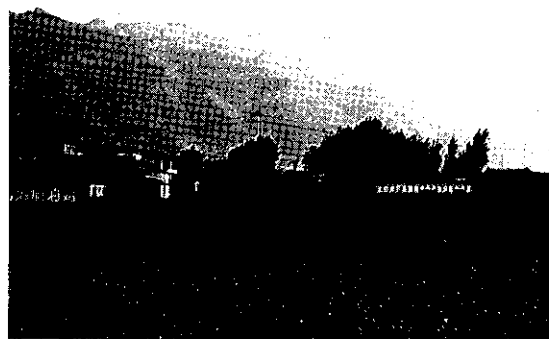


写真3 金椎城鉱山に至るには西安から右手に秦嶺山脈を眺めながら、東方に約100km車で走る(現在では2車線の高速道路が完成)。

45%に相当する。現在の鉱山別生産量ではクライマックス型のヘンダーソン鉱山が最大で、1999年には年間生産量45,400トンの25%を占め、同様なMo単味の鉱床からの産物としてトンプソン・クリーク(アイダホ、14%)、クエスタ(4%)があり、全体として43%である。一方、ポーフィリー銅鉱床からの副産物はMo品位が高いアリゾナ州のシエリタ(22%)が最も大きく、次いでビンガム(13.8%)コンチネンタル(モンタナ、10%)、バグダード(8%)などを中心に残りの57%を占める。

第2位のチリの生産量は全てコデルコからのもので、1998年の統計に基づく、最大のチュキカマタ



写真4 華山で右折し、秦嶺山脈を越える。



写真5 花崗岩の峡谷の1車線道を走る。トラック、三輪車、トラクターなどが行き交う(1994年7月)。

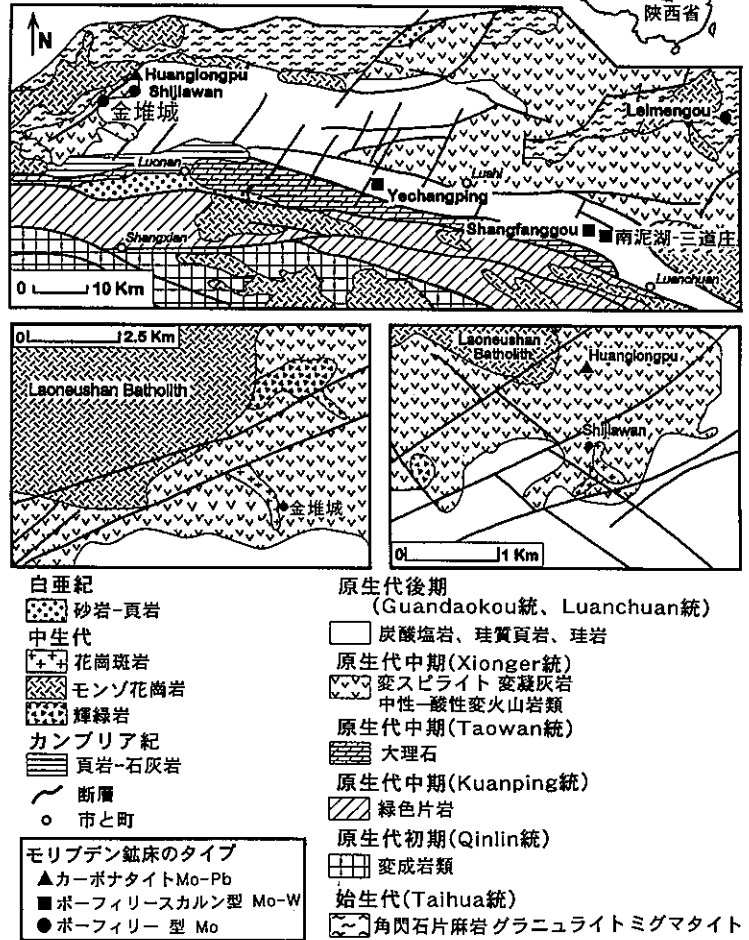
鉱山が全体21,608トンの62.5%を生産し、残りはエルテニエンテ15.7%、アンディーナ10.6%、エルサルバドル6.9%、その他4.3%であった。チュキカタ鉱山は1998年時点でなお110万トンMoの鉱量を保有する。

中国はチリとほぼ同様な年間生産量を保持しているが、残存鉱量は351万トンMoとその将来性は大きい。年間生産量の10%以上を占める大鉱床は3つあり、2000年生産量27,000トンのうち、第1位は陝西省の金堆城(Jinduicheng, 9,690トン、中国全体の35.9%)、第2位は河南省の洛陽の樂川(Luanchuan, 3,600トン、同13.3%)、第3位は遼寧省の葫芦島(Huludao, 3,375トン、同12.5%)、その他10,335トン(38.3%)である。金堆城はポーフィリー型、樂川はその東方にあり南泥湖、三道庄などを含むスカルンとポーフィリー型、共に秦嶺褶曲帯にある。葫芦島は遼寧省の楊家杖子スカルン型(石原, 1980)の近傍に近年発見されたポーフィリー型鉱床である。

4. 秦嶺造山帯の鉱床

中国で重要なモリブデン鉱床は華北にあって、タングステンやスズ鉱床が華南に多いことと対照的である(石

東秦嶺造山帯の主要モリブデン鉱床



第3図 東秦嶺造山帯の地質概略図とモリブデン鉱床(Stein et al., 1997)。

原, 1982)。北部のなかで秦嶺造山帯に貫入する燕山期花崗岩に伴うものが高品位、大規模である。

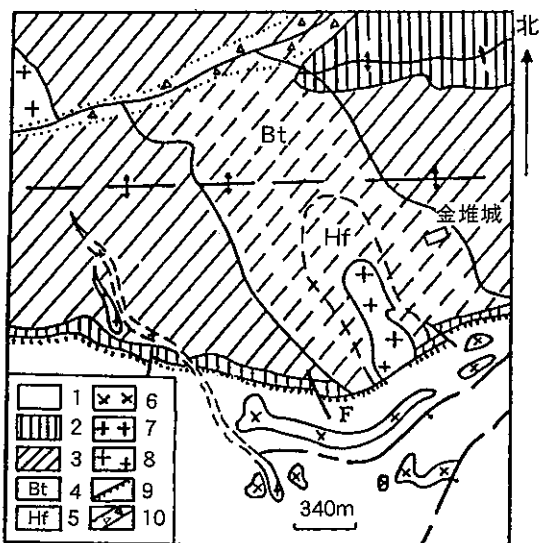
秦嶺造山帯は東から西へ大別山脈-桐柏山脈(Tonghai), 大巴山脈(Dabashan), 秦嶺山脈と続く、東西1,650km、南北に95~255kmの規模を持ち、華北プレートと華南プレートとの間で30億年前の先カンブリア紀から新生代まで活動を続けている造山帯である。発見鉱床数は400に達し、主要な鉱化作用は(1) 原生代中期~古生代初期、これは張力割目の発達に伴う苦鉄質-超苦鉄質マグマ活動と海底火山活動に伴うもの、および(2) 中生代の大陸間沈み込みとその後の中性-酸性マグマ活動に伴うものに大別できる(Wang and Ishihara,



写真6 金堆城の鉱山事務所。

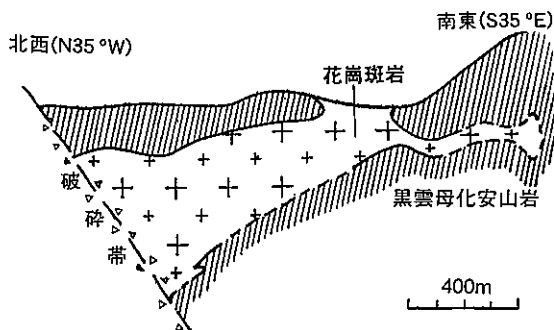


写真7 老牛山花崗岩体(遠方)と金堆城露天坑.



第4図 金堆城鉱床の地質概略図(陳ほか, 1993; IAGOD IX Org. Com.,1994).1 原生代高山河組珪質砂岩; 2 原生代熊耳群粘板岩; 3 原生代熊耳群安山岩類; 4 黒雲母化; 5 ホルンフェルス化; 6 輝緑岩; 7 老牛山モンゾ花崗岩; 8 金堆城花崗斑岩; 9 不整合面; 10 破碎帯.

2001). モリブデン鉱床は高いK/Na比を持つ磁鉄鉱系花崗岩と関連して生成し(石原, 1982), 金堆城とその東方155kmにある南泥湖-三道庄の鉱化域で代表される(第3図).



第5図 金堆城鉱床南東-北西地質断面略図(陳ほか, 1993; IAGOD IX Org. Com.,1994).

(1) 金堆城鉱床

金堆城鉱床は西安の東南東, 約130kmにあつて(写真1~6), 老牛山(Laoneushan)モンゾ花崗岩バソリスの南東端に派生する花崗斑岩と密接に分布し, 露天掘りで採掘されている(写真7). 花崗斑岩は0.4×1.8kmの規模で原生代中期の火山岩類に貫入し, 周辺にホルンフェルス化, 黒雲母化をもたらしている(第4図). ボーリングによると横たわった形態をしているが(第5図), 恐らく形成後の傾倒による結果と考えられる. そのSiO₂は71~75%であつて非常に高く, クライマックスやヘンダーソン鉱床と同様に, 分化が進んだ花崗岩質マグマの貫入体である.

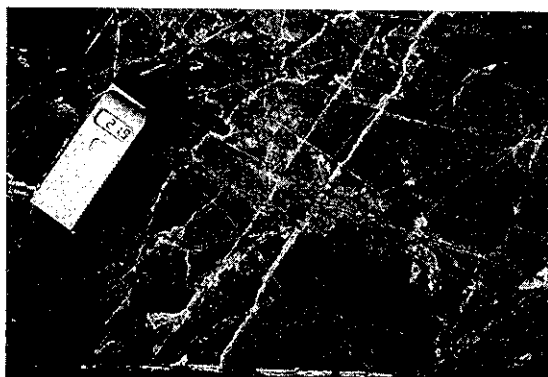


写真8 角閃岩中の石英網状脈。未変質で帯磁率は高い ($21.9 \times 10^3 \text{SI}$)。帯磁率計の長さは19.5cm。



写真10 角閃岩と花崗斑岩との不規則境界。角閃岩(黒)がブロック状。

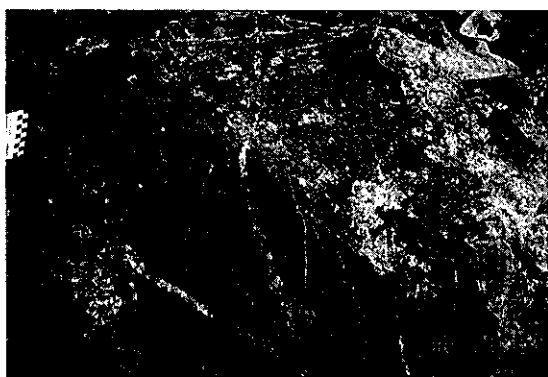


写真9 鉱化角閃岩。中央下部から左へ輝水鉛鋳がべったり付いている。



写真11 褐色のホルンフェルス中の網状細脈。

鉱化は貫入岩(25%)と被貫入岩(75%)の双方に見られ、斑岩中心では珪化とカリ長石化、周辺に向けてフィリック、プロピライト化変質となる。ストックワークは石英±カリ長石±黄鉄鋳±螢石の鋳物組合せを基本とし(口絵10~12)、少量の磁鉄鋳、黄銅鋳、閃亜鉛鋳、方鉛鋳、錫石、輝蒼鉛鋳、絹雲母、黒雲母、ベリル、燐灰石、トパズ、方解石を含む。

石英中の包有物の塩濃度は一般に高いが、27.5-42.5%NaClと0.6-1.7%NaClのバイモータル分布を示す。包有物流体は化学的にはCl、K、 SO_4^{2-} に富み、F、Na、 HCO_3^- に乏しい。その $\delta^{34}\text{S}$ は+1.3~+4.3‰、 $\delta^{18}\text{O}$ は+8.6~+11.8‰、 δD は-57.2~-120.7‰、鋳液の大部分はマグマ起源、最末期で地表水の混入が考えられている(徐ほか、1998)。

輝水鉛鋳のRe含有量は高く、278-289ppmであり、そのRe-Os年代は正確に求められており、

$221.5 \pm 0.3 \text{Ma}$ 、三疊紀である(Stein *et al.*, 1997)輝水鉛鋳の $\delta^{34}\text{S}$ は+3.7~+5.5‰、南泥湖-三道庄鋳床よりやや重く(周ほか、1993)日本の磁鉄鋳系花崗岩の値に近い、硫酸塩鋳物は産出しない。燐灰石を用いた花崗斑岩とモンゾ花崗岩パソリスの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値は0.7087-0.7095であり、大陸地殻起源を暗示する。方鉛鋳やカリ長石のPb同位体比も下部地殻起源を指示している。

(2) 南泥湖-三道庄鋳床

これらの鋳床付近には原生代大理石、ドロマイト質大理石、変砂岩、結晶片岩類が広く分布し、これらに中生代の斑状花崗岩が貫入し、それに伴ってMo-Wスカルン型とMoストックワーク型の鋳床が産出する。前者は三道庄鋳床に見られ、下位から南泥湖層に属する珪岩、変成砂岩、結晶片岩とその上位にはほぼ水平な構造を持つShangchuan



写真12 花崗岩中の網状細脈(1).

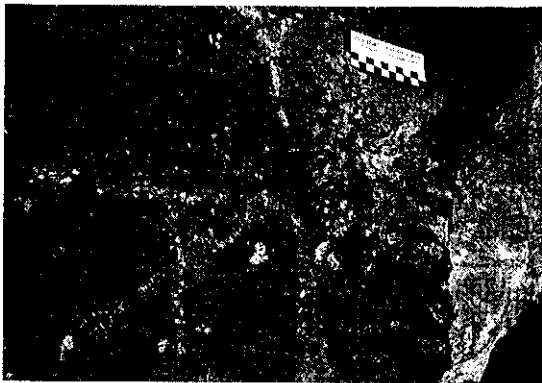


写真13 花崗岩中の網状細脈(2).

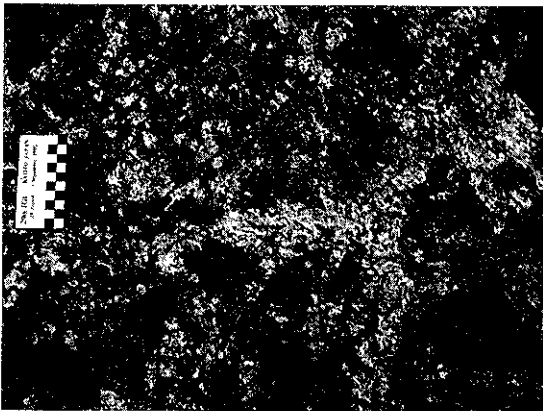


写真14 花崗岩中の網状細脈(3).

層の大理石が分布し、中生代花崗岩が貫入している(第6図)。スカルン鉱体は花崗岩から約400m離れて、原生代諸岩石の層理面に平行に胚胎し、長さ2.1km、幅1.8km、厚さ80-150mである。南泥湖鉱床はホルンフェルスと花崗岩中に見られるストックワーク鉱体で、延長2.4km、幅1.0-1.2km、平均の厚さ144mである。ここではタングステンは極

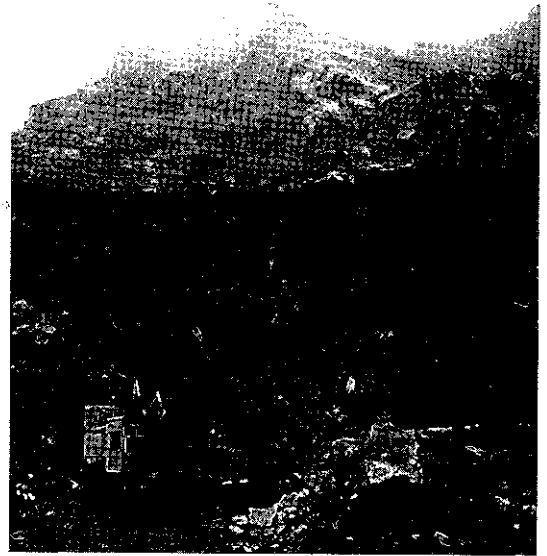
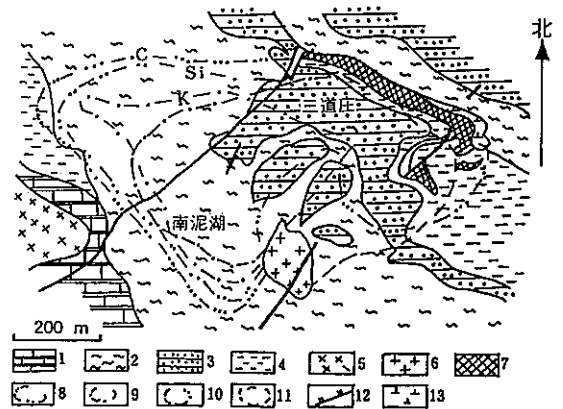


写真15 三道庄露天坑の採掘風景.

く微量である。両鉱床は露天掘りと坑内掘りで採掘されている(口絵13-16)。

スカルン鉱化作用は4時期に分けられる(Ren *et al.*, 1995)。

第1期は塊状のスカルン化で、構成鉱物はい多いものからグロシュラー柘榴石、単斜輝石、珪灰石、ヴェスピアナイト、スカポライトからなり、少量の輝水鉛鉱と灰重石を伴う。



第6図 南泥湖-三道庄鉱床の地質概略図(陳ほか, 1993). 1. 原生代石灰岩類, 2. 原生代結晶片岩, 3. 原生代砂質片岩, 4. 原生代粘板岩, 5. メタ斑れい岩, 6. 斑状花崗岩, 7. スカルン鉱体, 8. カリ変質帯(K), 9. 珪化帯(Si), 10. 沸石-炭酸塩化帯(C), 11. アクチノ閃石-緑泥石-緑簾石化帯, 12. 断裂, 13. アルカリ閃長斑岩.



写真16 同：原岩の違いと断層による緑色スカルン(左)と柘榴石スカルン(右)の形成。

第2期はストックワーク状のスカルン化で、スカルン鉱物が不規則な細脈状に塊状スカルンに貫入または交代する。その規模は大鉱体では3.5m間隔、小鉱体では5cm程度である。アンドラダイト柘榴石と透輝石が最も多量に、少量の輝水鉛鉱、含Mo灰重石、ヴェスビアナイトなどが含まれる。

第3期は後期のアンドラダイトスカルン期と言えるもので、前2時期のスカルン鉱体が、薄いテーブル状の粗粒塊状アンドラダイトスカルンおよび薄い石英脈に切られる。このスカルン鉱体は5cm-20mの厚さを持ち、明らかに裂か系の規制を受けている。少量成分は石英、透輝石、方解石、緑泥石、緑廉石、粗粒の灰重石、輝水鉛鉱である。

第4期は角閃石-緑廉石-緑泥石スカルンで、これは石英脈の縁やスカルン鉱体中にパッチ状に見られる。角閃石は輝石の外形を持つアクチノ閃石であり、これが後退変質作用で生じたことは明白である。

ストックワーク鉱床は南泥湖に広く、三道庄のごく一部に産出するが、その鉱化作用は3時期に分けられる。第1期は花崗岩体の頂部に分布する石英-カリ長石-輝水鉛鉱脈で、少量の雲母類、アルバイト、磁鉄鉱、緑廉石、螢石を含む。脈際はフリック変質を受ける。

第2期は石英-硫化物脈で、これはホルンフェルス中に産出し、巨大モリブデン鉱体を形成する。鉱脈は石英、輝水鉛鉱、緑泥石、黄鉄鉱、閃亜鉛鉱、少量の黄銅鉱、方鉛鉱、絹雲母、螢石、方解石を含む。脈際は粘土化変質を受ける。第3期はゼオライト-方解石-石英脈で、これは最末期の

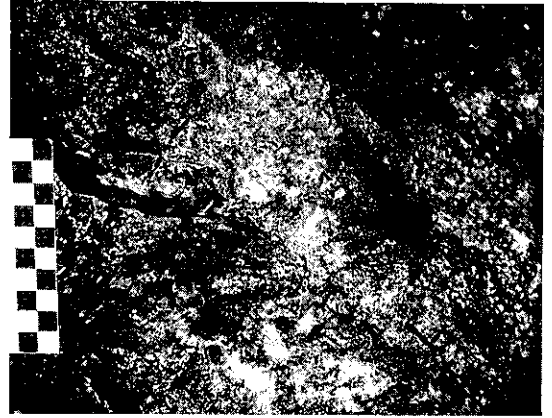


写真17 珪化が著しいスカルン鉱石。

毛脈である。

南泥湖ストックは斑状花崗岩で地表の露出は0.12km²であるが、200mの深さでは1.2km²に拡大する。接触変成帯は23km²に及ぶから、これが潜在岩体の一部であることは明白である。最頂部ではアプライトキャップが現れ、その下部の中粒花崗岩との間には葉縁状 (crenulate) 石英層状岩が分布し、この岩体は累帯マグマ溜まり (zoned magma chamber) であった可能性が高い。

灰重石中のMo含有量はスカルンで0-7.3重量%であり、細脈中の灰重石には含まれない。一般にMo含有量は結晶中心で高く周縁部で低い。この事実はスカルン化の早期ほど酸素フュガシティ、pH、Caの活動度が高かったことを示す。スカルンと酸化鉱物・硫化物の組合せ (ad-mt-qz-cc, ad-qz-di-cc, ad-qz-mt-di, mt-py-po) から主スカルン鉱化期の酸素フュガシティはMH (磁鉄鉱/赤鉄鉱) バッファとNNO (ニッケル/ニッケル酸化物) バッファとの中間、硫黄フュガシティは400℃で10⁻⁸-10⁻⁹であったものと思われる (Ren *et al.*, 1995)。

5. コロラド鉱化帯のモリブデン鉱床

以上のように秦嶺山地で巨大な2鉱床は分化が進んだ花崗岩質マグマの浅成貫入岩に伴われる鉱染・網状、すなわちストックワーク型の鉱床である。このタイプの鉱床は最初アメリカのロッキー山脈 (口絵1) 中のクライマックス鉱床で発見されたためにクライマックス型とも呼ばれた。クライマックス鉱床はその輝水鉛鉱が1879年にレッドヴィルに近い



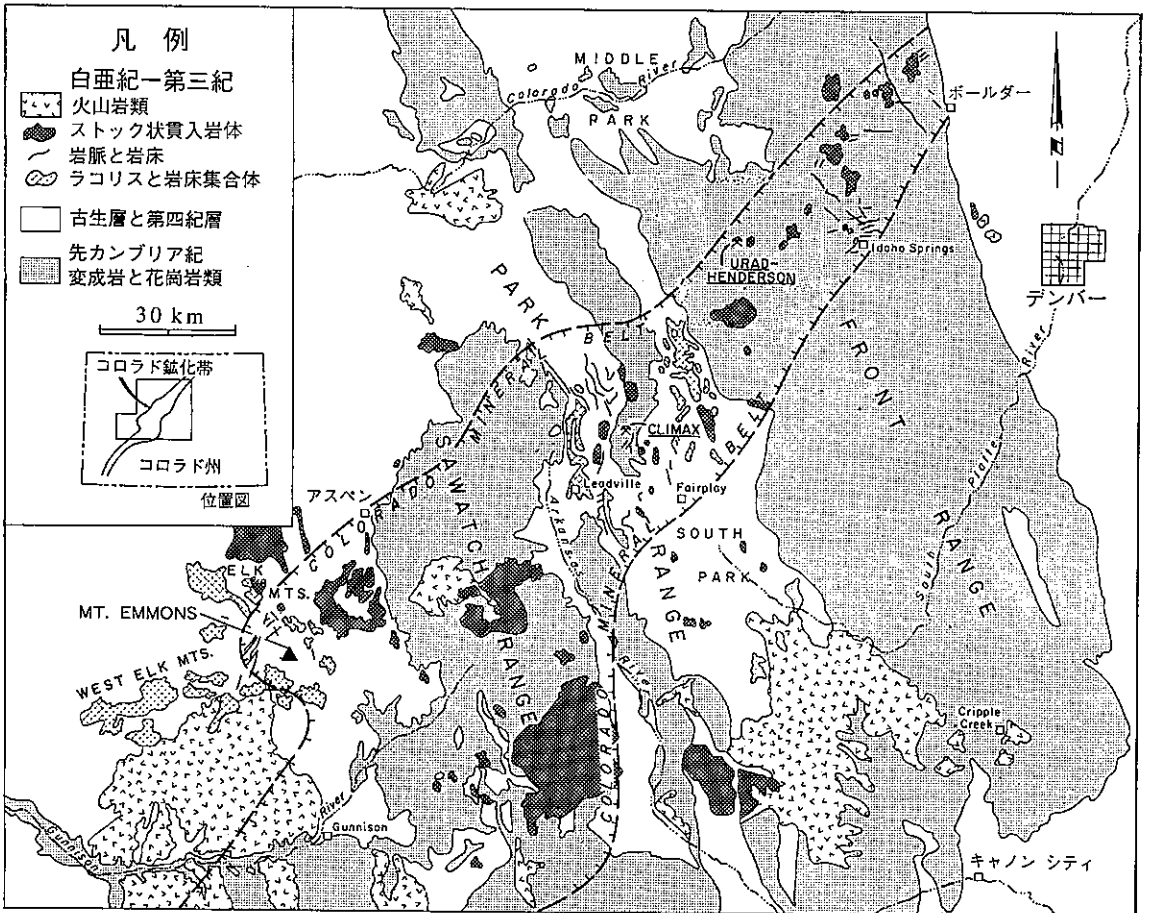
写真18 真冬のコロラド鉱化帯の4,000m級山稜(1961年12月).

写真19 主山稜直下のアラパホ盆地のスキー場(1961年12月).

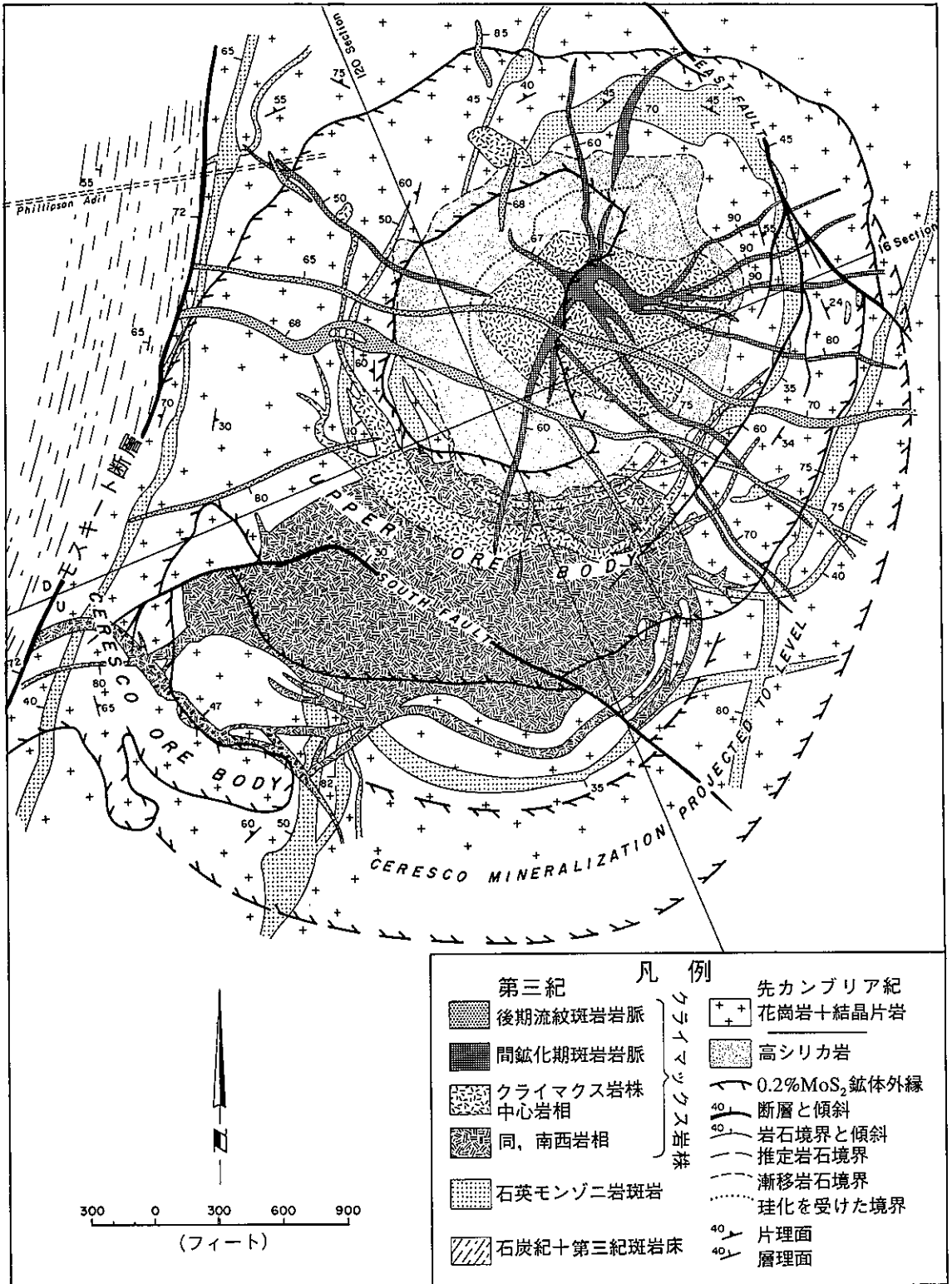
パートレット山腹で銀色の正体不明鉱物として発見され、その16年後の1895年にコロラド鉱山大学の教授によって輝水鉛鉱と同定された。その後、同様な鉱床がその北東方のレッド山直下に(ユラッ

ドーヘンダーソン)、その南西方にエモンス山鉱床が発見されて(第7図)、この型の鉱床はコロラド鉱化帯を特徴づけるものとなった。

これらの鉱床はコロラド鉱化帯に属するが、これ



第7図 コロラド鉱化帯の地質概略図(Wallace et al., 1978にエモンス山を追加).



第8図 クライマックス鉱山、フィリップソン坑準における地質平面図 (Wallace et al., 1968).

は西からの衝上で隆起した基盤に火成活動が生じ、それに伴ってモリブデン・タングステン、ベースメタル、金・銀などの殆どあらゆる金属が見られるもので、鉱物資源の宝庫である。基盤は先カンブリア紀の変成岩類と花崗岩類からなり、その後南北系の沈降部に中-古生層が堆積し、白亜紀後期(ララマイド)-第三紀には北東-南西方向の弱線に沿って火山岩類が噴出し、岩株状花崗岩類の貫入が生じた(第7図)。この方向は先カンブリア紀の花崗岩-変成岩類の片理面などの基盤構造を反映するものである。花崗岩類は漸新世初期の花崗閃緑岩、石英モンゾニ岩、モンゾニ岩からなる中性岩類と中新世の花崗岩質な珪長質岩類に大別でき、後者が巨大モリブデン鉱床を伴う。

(1) クライマックス鉱床

この鉱床付近の白亜紀後期-第三紀火成活動は、厳密には閃緑斑岩岩脈に始まり、石英モンゾニ斑岩、クライマックス岩株の斑状岩類、チョーク山流紋斑岩の活動へと続いた。鉱化作用はクライマックス岩株の更に4時期に分けられる貫入活動に関連し(第8図)、南西部のセレスコ鉱体、中心部の主鉱体とに分けられ、それらが複数回の貫入活動で生じたものである。セレスコ鉱体は第一期に形成され、クライマックス岩株の南西岩相の貫入に付随する熱水活動で生じた。第二期はクライマックス岩株の中心岩相と関連岩脈の貫入であり、これが上部鉱体をもたらした。第三期はクライマックス岩株のアブライト質斑岩相と間鉱化斑岩岩脈の貫入であり、これに関連して下部鉱体が生成した。第四期はクライマックス岩株の斑状花崗岩相と後期流紋斑岩貫入に伴う黄鉄鉱期であり、モリブデンに関しては不毛期である。鉱体は平面的には円形ないしリング状を示す。クライマックス岩株はシルバー・ブルーム花崗岩のドラッグ褶曲の背斜軸に貫入した花崗岩質マグマにより生成したから、傾いたシガー状の形態を示す(第9図)。

第9図は鉱体のほぼ東西の断面であるが、早期鉱体が高所、後期のものが低所に分布する。各鉱体はいずれも逆カップ状ないしベレー帽の形を示し、モリブデン鉱体とタングステン鉱体とに分けられる。そしてモリブデンが常に内側のストック側に、タングステンが貫入体より離れて存在する。

網状細脈は幅十数mm以下で、あらゆる方向に切り合って産出し、主に石英からなり、輝水鉛鉱とカリ長石を脈際に伴う。鉱脈中心に輝水鉛鉱、螢石が産することもある。母岩の変質は絹雲母化が一般的である。少量鉱物としてマンガン重石、錫石、モナズ石、トパズ、黄鉄鉱、黄銅鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱なども産する。

クライマックス鉱床の特徴はモリブデン鉱床であるにも関わらず、一般には共存しない錫石、モナズ石を含むことである。例えば1966年の精鉱生産量は輝水鉛鉱(MoS_2)が25,522トンに対して、マンガン重石が WO_3 量で736.2トン、錫石(SnO_2)として44.8トン、モナズ石26.7トンであり、これらは浮遊選鉱とテーブル選鉱で回収出来るほど含まれている。

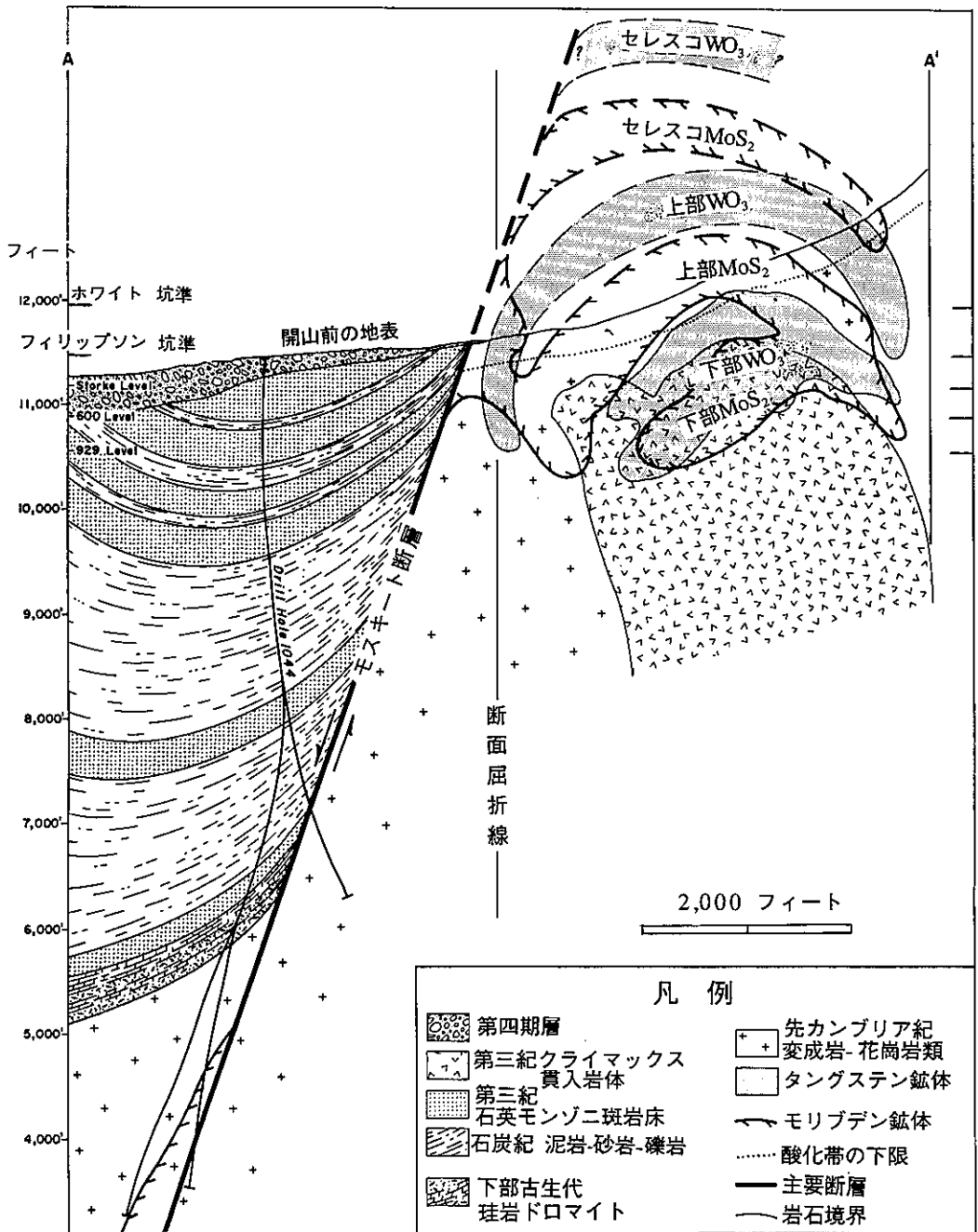
ところで“クライマックス”の名前は、この鉱床の発見地が高所にあるため麓から物資を運ぶ貨物列車の蒸気機関車が最高潮に達するところから名付けられた駅名に由来する(石原, 1965)。一方、次に述べるユラッドにも面白い話があり、この名は“Uranium Research and Development”の略称、すなわち地表の黄色い二次鉱物、水鉛華を同様な色を持ちコロラド高原に多いウランの二次鉱物であるカーノタイトに見誤ってウラン鉱を開発しようとしたことに由来する(Wallace *et al.*, 1978)。ヘンダーソンは発見当時の副社長の名前である。ニューメキシコ州のクエスタ鉱床の露頭があった場所はサルファー・ゴルチと呼ばれていたが、これは露頭を覆う水鉛華が自然硫黄と見間違えられたためである(石原, 1965)。これはその後、USGSのPeter M. Lipmanが、そこからサンホアン山地にかけてのカルデラ入りの広域地質図の作成した時に、モリブデン峡谷と変更しており残念である。これらのエピソードはモリブデンが、新しい“20世紀”の元素であり、発見当時のプロスペクターに如何に馴染みがなかったかを示しており、興味深い。

(2) ユラッド-ヘンダーソン鉱床の発見

ユラッド-ヘンダーソン鉱床は、ロッキー山脈国立公園を国道40号線で越えるバースウッド峠のすぐ東側にあり(写真20)、レッド山(3,693m、表紙参照)の直下にある。山頂の赤い色は硫化物が酸化鉄鉱物化したためであり、鉱徴の証拠として19世

紀初頭から人々の注目を集め、多数のプロスペクターが調査し、輝水鉛鋳が露出することは早くから知られていた。ユラッド鋳床は第一次世界大戦時の1916-1919年に71,300トン(0.975% MoS₂)、第二次世界大戦時の1944-1946年に75,353トン(0.579% MoS₂)の粗鋳石の生産実績を持つ。

ユラッド鋳床はレッド山のピークを構成する漸新世のレッド山流紋岩質複合体に胚胎する。この複合体は何回もの貫入活動で形成された成層火山の火山底と思われるが、その活動期はユラッド鋳化期を以前と以後に大別できる。前期は(1)ジャンク角礫と過斑晶石英斑岩からなり、石英-絹雲母-黄鉄



第9図 クライマックス鋳山の東西断面図(断面屈折線より西側はN80° W, 東側はN70° Eの断面)(Wallace et al., 1968).

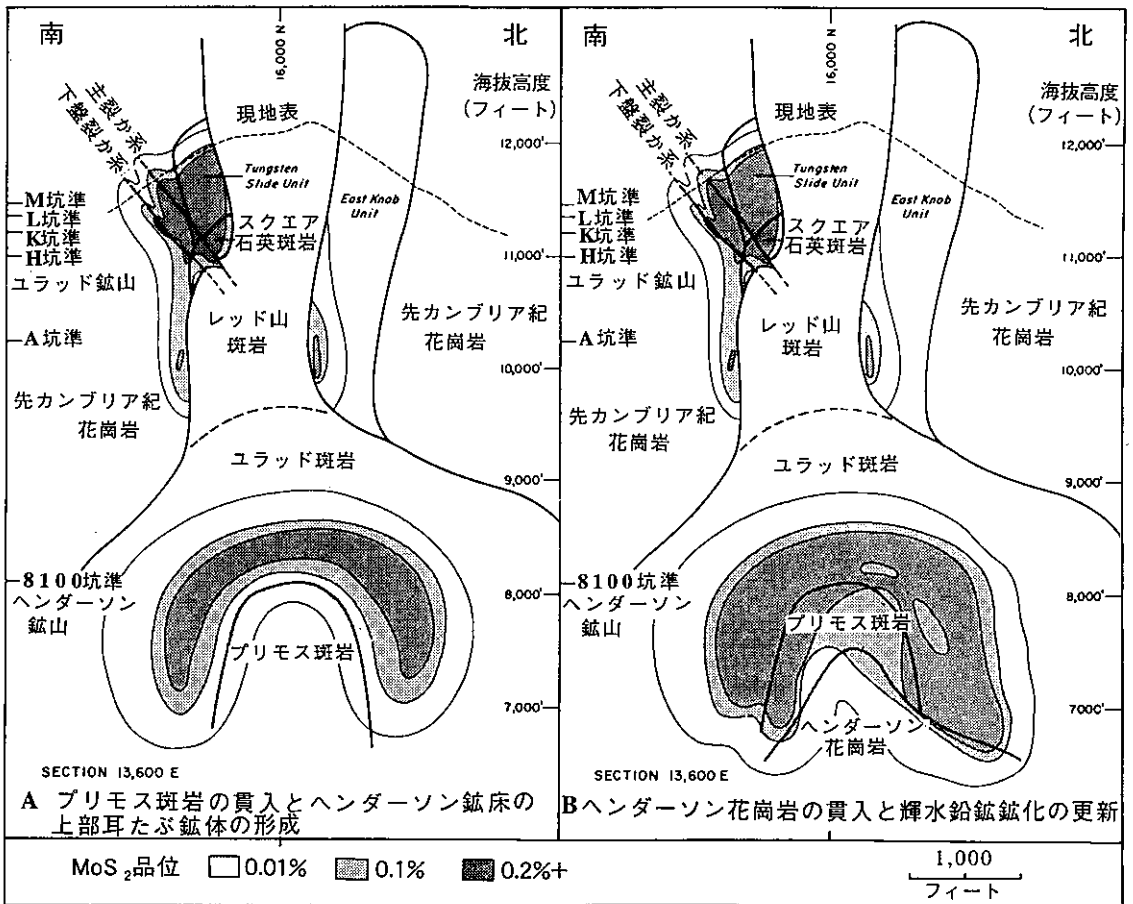


写真20 ヘンダーソン鉱山入口(1999年10月28日).

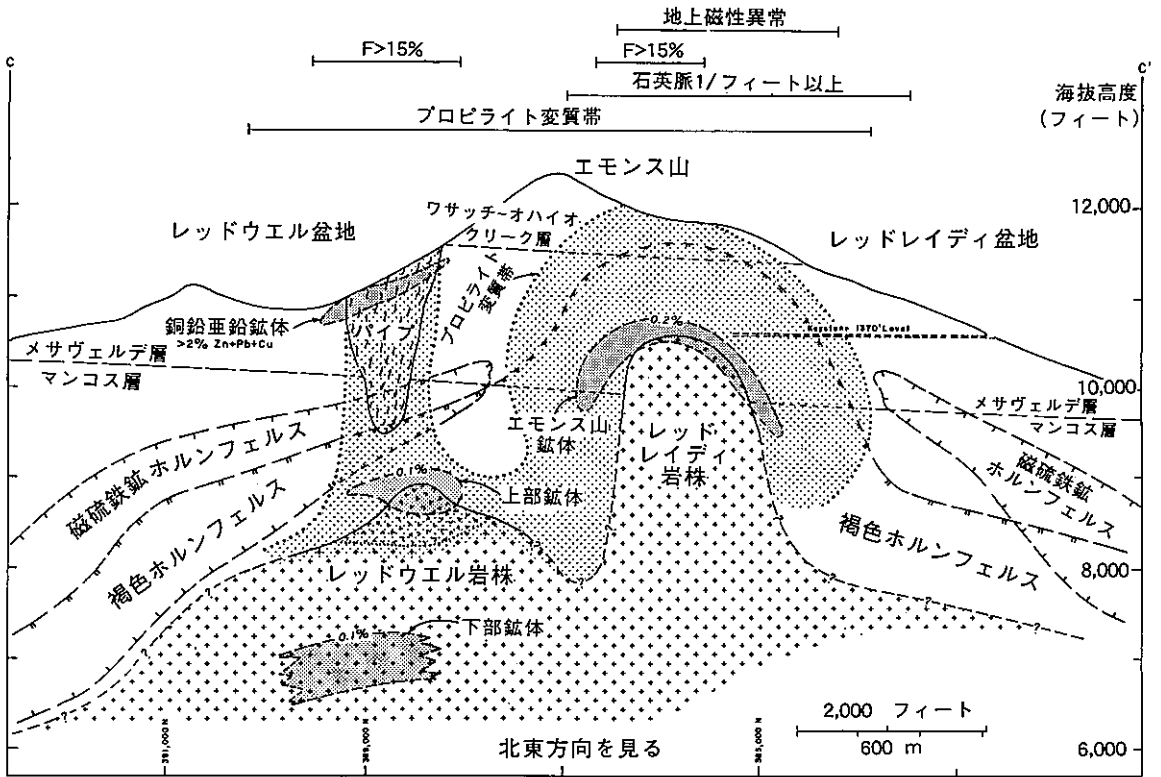
鉱化変質を受けるタングステン スライド ユニット,
 (2) 著しい黄鉄鉱化を受けた過斑晶岩と微角礫岩
 からなる東ノブ ユニット(これが酸化してRed
 Mountainと呼ばれる), (3) 直径5mm前後の高温
 型石英の斑晶を持つスクエア石英斑岩からなる(第

10図). この石英斑岩は厚さ0.2-1.5mmの灰色石
 英と白色のアルカリ長石に富むラミナを一部で伴
 い(写真21), これは鉱山では“リボン岩”(Shan-
 non et al., 1982), 一般には櫛状石英層と呼ばれ
 て(Kirkham and Sinclair, 1988), 鉱化作用を伴
 う浅成貫入岩にしばしば付随する. 輝水鉛鉱は裂
 化規制を受けてこれら3岩相全てに見られ, 運鉱
 岩は石英斑岩と考えられる.

クライマックス鉱床の地質家はその開発と共に
 多くの探査ノウハウを蓄積した. ミシガン州立大卒
 の英才であるS. R. Wallaceを筆頭とするクライマ
 ックス鉱山の地質家は, ユラッド鉱床がクライマ
 ックス鉱床の火山性部分を示すものと考え, 下部に
 より深成型の鉱床があるものと予想した. そして探
 鉱権をアメリカモリブデン社から取得し, 長年秘密
 裏に温存していた岩石地化探を主とする探査手法
 を用いて, 潜在鉱体を深度810mで捕捉した. 1964



第10図 ユラッド-ヘンダーソン鉱床の南北断面図 (Wallace et al., 1978).



第11図 エモンス山鉱床の北西-南東断面図(Thomas & Galey, 1982)。

年のことであり、最初に発表が行われたデンバーの鉱床学会 (SEG) 会合では、巨大潜頭鉱床の発見の突然の発表で会場が騒然となったそうである。

ヘンダーソン鉱床の地質は南南東に48km離れたクライマックス鉱床とよく似ている。すなわち先カンブリア紀の変成岩・花崗岩地域に北東-南西方向のコロラド鉱化帯の鉱床をもたらした第三紀花崗岩類が貫入するが、共に先カンブリア系の再活動断層帯であるモスキート断層 (クライマックス) とバースウッド断層 (ユラッド-ヘンダーソン) の規制を受ける。鉱化は共に珪長質花崗岩複合貫入体と関連し、クライマックスでは3鉱体、ヘンダーソンでは2鉱体からなる。鉱化は繰り返し貫入した (Seedorff, 1988) 斑岩類の頂部で著しく最高1.3% Moに達し (Carten *et al.*, 1988), 下位の花崗岩にも若干及ぶ。鉱石鉱物も量比は若干違うものよく似ており、輝水鉛鉱、マンガン重石、磁鉄鉱、赤鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱、黄銅鉱からなる。変質鉱物は共に石英、カリ長石、絹雲母、螢石、トバズ、少量の菱マンガン鉱、黒雲母、緑泥石、緑簾石である。品

位もほぼ同じで、0.2% MoS₂カットオフで、0.4% MoS₂である。鉱量は両者ともほぼ同規模である。

(3) エモンス山鉱床

この鉱床はクライマックスの南西方約90km、コロラド鉱化帯のほぼ中心にあり、クライマックス鉱山を保有するアマックス社の地質家によって同じく発見されたものである。1968年、彼らはこの地域の銀鉛亜鉛鉱床の再評価から深部にモリブデン鉱床の潜在を予測し、1970-1972年に延べ1万メートル以上のボーリング探鉱を実施し、浅所の鉛亜鉛角礫パイプ鉱体と、深部の二つの低品位モリブデン鉱体を発見した。1976年までの継続探鉱で地表下467m以深にエモンス山鉱床 (1.55億トン、0.44% MoS₂) を確認した (Thomas & Galey, 1982)。

鉱床付近の岩石は白亜紀の炭質頁岩・砂岩であり、これに18-16MaのK-Ar年代を持つ第三紀の花崗岩類が貫入する。堆積岩類は熱変成を受け、褐色ホルンフェルスや黄鉄鉱-磁硫鉄鉱含有ホルン

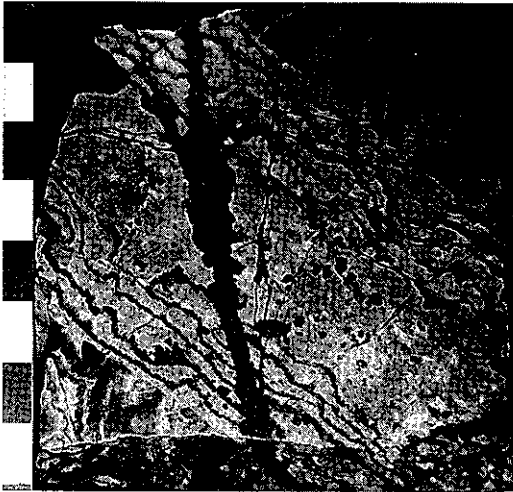


写真21 ヘンダーソン鉱床のリボン岩. ここでは2条の石英-長石岩が直交し, これらを更に石英細脈が切る.

フェルスに変わっている(第11図), 花崗岩体は2つのプラグまたはキューボラを持ち, その周辺の堆積岩類は著しいフィリック変質(絹雲母-石英)化を受ける. そこでは磁硫鉄鉱は消滅する. 一部にはカリウム質変質(カリ長石-黒雲母)も認められ, 外方へはプロピライト変質に変わる.

鉱石鉱物は, 最外縁のプロピライト化帯の細脈はまばらで脈幅がやや広く, 石英, 黄鉄鉱, 磁硫鉄鉱, 緑簾石, 緑泥石, 方解石, 銅鉛亜鉛硫化物を含む. これに漸移またはより早期の関係でフィリック変質帯の細脈が見られるが, その構成鉱物は一般には石英, 黄鉄鉱, 絹雲母, 螢石であり, キューボラ中心に向かって黄鉄鉱が減少し, 輝水鉛鉱, 螢石, 正長石, マンガン重石が増加し鉱体を形成する.

(4) クエスタ鉱床

クエスタ鉱床は総鉱量が8,000万トンクラスであり, アメリカ第4位の鉱床である. しかしその稼行の歴史は古く, 第一次世界大戦(1916-1917)に遡り, 輝水鉛鉱-石英脈鉱床が, 坑内採掘された(Ishihara, 1967). 1925-1945年間は MoS_2 精鉱で年230トン程度, 最大は1930年の477トンであった. 1966年以降の再開発ではバルク マイニングに切り替えて露天掘りで採掘された.

鉱床はニューメキシコ州の北部, ロッキー山脈の

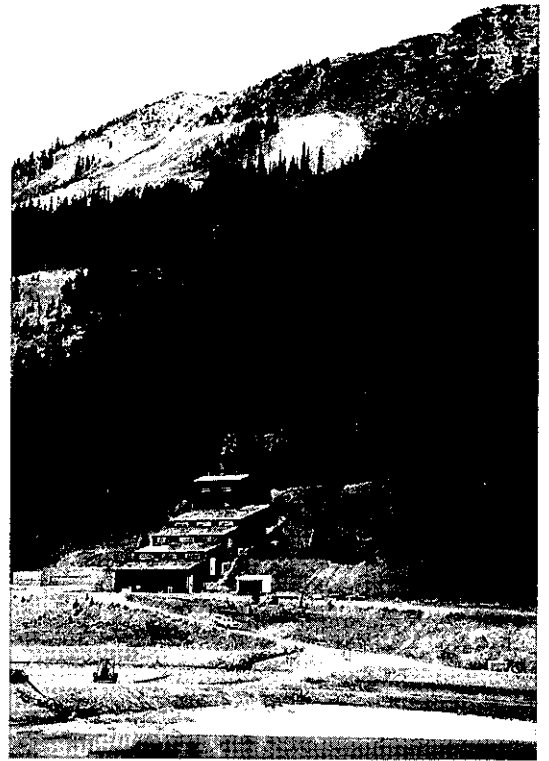


写真22 ユラッド鉱山の旧選鉱場.

南方延長部の山岳地帯, サングレド・クレスト山脈にあり, 基盤の先カンブリア紀変成岩・花崗岩類の弱線沿いに噴出した中新世火山岩類地帯にある. 火山岩類は垂アルカリ岩的で, これに高カリウムアプライト, アルカリ深成岩などが岩株状に貫入する. アプライトのSr初生値は0.7069, 輝水鉛鉱の $\delta^{34}\text{S}$ は+1%前後である(Laughlin et al., 1969).

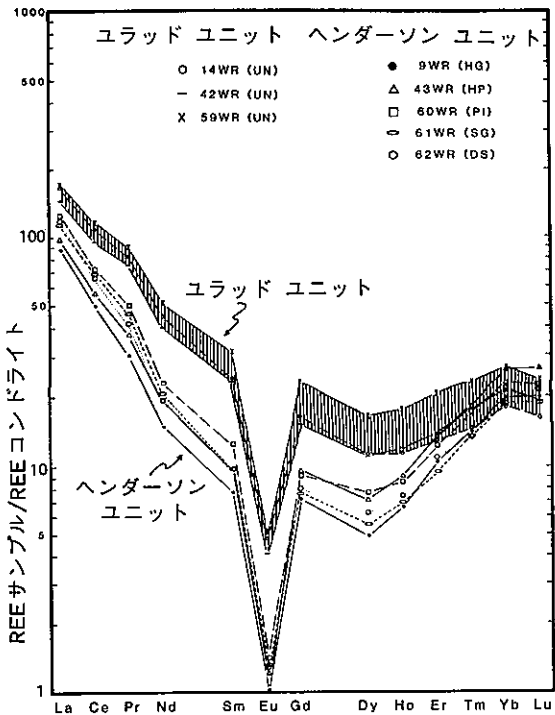
鉱床はそのうちの一つ, クエスタ鉱山岩株の西縁沿いに発達したサルファー・ゴルチと名付けられた峡谷に露出し, 火山岩類とアプライトの境界沿いに西へ傾斜する. 鉱化は網状・鉱染型であるが, 前3鉱床より割れ目規制が顕著である(口絵2~4). 鉱脈部分はアプライト岩株の周縁部に発達する緩傾斜の冷却に伴う張力割れ目(marginal fissure), 岩体周辺部の局地的な断層などに沿って生じている. また深部では爆裂性角礫岩も存在する. 主要な変質および鉱脈鉱物は石英, カリ長石, 含弗素金雲母, 輝水鉛鉱である. 石英包有物中の塩濃度は高く, 31-57重量%NaClであり, 均質化温度は360-400℃に集中する(Cline and Bodner, 1994).

6. クライマックス型鉱床の起源

クライマックス型モリブデン鉱床は既述のように珪長質岩が卓越する大陸内のマグマ活動帯に出現する。鉱床の生成に直接関与する貫入岩はシリカやカリウム、更にはF、Cl、Pなどの揮発性成分に富む性質を持っている。このようなマグマはどのような生まれを持つのであろうか。コロラド鉱化帯を例に考察してみたい。

コロラド鉱化帯の深成岩類は花崗閃緑岩、モンゾニ岩などの中性岩類と花崗質岩類に2大別できる。Sr初生値は、前者で0.7070±、後者が0.710±であって、マントル起源物質の初生値(<0.704)を高める工夫が必要で、その可能性として、マントル起源マグマによる大陸地殻物質の同化作用、あるいはそれぞれの値を持った下部地殻起源の2説が考えられる。

希土類元素(REE)パターンは、中性岩類でLa



第12図 ユラッド-ヘンダーソン貫入岩類の希土類元素パターン(Stein, 1988)。UN:ユラッドの通常の斑岩類、ヘンダーソンの代表的貫入岩類:HGヘンダーソン花崗岩、HPヘンダーソン斑岩、PIプリオス インテリア、SGセリエイト花崗岩、DSデイリー岩株。

103-261(平均152)、Yb 2-15(平均9)、Eu異常は認められず右下がりの直線的パターンを示す(第12図)。一方鉱化関連の花崗岩類は中央で急激に落ち込むU字形を示し(La/Yb=6)、Euが1の負の異常を持ち、La 87-170(平均127)、Yb 8-26(平均19)である。第12図にはユラッド-ヘンダーソン鉱床の例を示すが、クライマックス、エモンス山の結果もこれによく似ている。

このパターンから軽希土(LREE)を取り込みやすい褐簾石や、重希土(HREE)を取り込むジルコンなどの深部での分別晶出は否定される。中希土を取り込みやすい斜長石(チタン石、燐灰石)、多角閃石もマグマ分化過程で取り除かれた可能性が大きい。全希土類元素が早期のユラッド斑岩類で高く、ヘンダーソン斑岩類で低いことは、この分別晶出が深部のマグマ溜まりで連続的に生じていたことを示す。そしてEuの著しい負異常は、深部で斜長石が分別晶出したことを意味する。

酸素同位体比は全岩値で中性岩が $\delta^{18}O=+7\sim+9\%$ 、珪長質岩が $\delta^{18}O=+8\sim+9\%$ であり、後者がやや重い。マントル値を+6%と考えると、ここでもこの値を大きくする下部地殻物質の役割が重要である。鉱石鉱物の硫黄同位体比は、輝水鉛鉱が $\delta^{34}S=+1\sim+5.5\%$ 、黄鉄鉱が $\delta^{34}S=+2\sim+7\%$ である。マントル起源硫黄を $\delta^{34}S=0\sim+1\%$ とした場合、マグマから別れて鉱床に至る分化作用では3%の増加しか得られないから、発生物質に重い硫黄同位体比を想定する必要がある。

これら同位体比とREEの特徴および地質学的考察から、Stein(1988)はコロラド鉱化帯の深成活動を次のようにまとめた。鉱化帯に広く分布する早期の中性岩類はララマイド期の沈み込みに関係して生じたカルケアルカリ岩バソリスの一部で、このバソリスは下部地殻の中間-苦鉄質グラニュライトの部分溶融で生じた。熱源は上部マントル又は海洋地殻起源の苦鉄質マグマの上昇と底付けであろう。この時期には、起源物質の組成、部分溶融の程度、貫入岩の規模が金属成分の濃集に適當ではなく、僅かなモリブデンとベースメタルをもたらしたに過ぎない。沈み込みの終了と共に、リオグランデリフトに関連して張力割れ目発達の時代が2,500-3,000万年前に生まれ、モリブデンに富む花崗岩質マグマが発生した。この貫入岩にはマントルや上部

地殻物質関与の証拠はなく、下部地殻の部分溶融で生じたものである。

クライマックス型の鉱化作用を伴う貫入岩類は非常に珪長質であるから起源物質としては下部地殻の中性岩類が考えられる。 $\delta^{18}\text{O}$ がマントル起源マグマより3%程度高いので火成岩に若干の堆積岩が混在するものが想定される。発生したマグマは著しいEu異常で示されるように、斜長石の分別晶出で花崗岩組成に変貌した。源物質はもともとOH (H_2O), F, S, P, Clなどの揮発性成分に富んでいた可能性があり、それがマグマ分化作用で濃度を高めると共にMoを濃集し、この“含水”花崗岩マグマの固結によりその上位に鉱床を形成したものと考えられる。

文 献

- Carten, R.B., Walker, B.M., Geraghty, E.P. and Gunow, A.J. (1988) : Comparison of field-based studies of the Henderson porphyry molybdenum deposit, Colorado, with experimental and theoretical models of porphyry system. *Canadian Inst. Mining Metall., Spec. Vol. 39*, 351-366.
- Cline, J.S. and Bodnar, R.J. (1994) : Direct evolution of brine from a crystallizing silicic melt at the Questa, New Mexico, molybdenum deposit. *Econ. Geol.*, 89, 1780-1802.
- 陳 敏川ほか(1993) : 中国鉱床成鉱模式. 地質出版社, 北京, 367 p.
- IAGOD IX Organizing Committee (1994) : Field trip guide B-05, Porphyry molybdenum ore deposits and gold deposits in Shaanxi Province, China.
- 石原舜三(1962) : モリブデン. 地質ニュース, no.89, 6-11.
- 石原舜三(1965) : モリブデン鉱床の問題点と鉱業の話題—鉱山地質家のあり方に寄せる—. 地質ニュース, no.130, 1-11.
- Ishihara, S. (1967) : Molybdenum mineralization at Questa mine, New Mexico, U.S.A. *Geol. Surv. Japan, Rept.* 218, 64p.
- 石原舜三(1980) : 熱烈歓迎中国の旅. 地質ニュース, no.307, 36-45.
- 石原舜三(1982) : 中国の鉱物資源(2) ポーフリー型Cu, Mo鉱床. 地質ニュース, no.335, 18-32.
- Kirkham, R. V. and Sinclair, W. D. (1988) : Cimb quartz layers in felsic intrusions and their relationship to porphyry deposits. *Canadian Inst. Mining Metall., Spec. Vol. 39*, 50-71.
- Laughlin, A.W., Rehrig, W.S. and Mauger, R.L. (1969) : K-Ar chronology and sulfur and strontium isotope ratios at the Questa mine, New Mexico. *Econ. Geol.* 64, 903-909.
- Ren, Q., Xu, Z., Yang, R. and Qiu, J. (1995) : The ore-forming conditions and processes of super-large molybdenum-tungsten deposits at Nannihu-Sandaozhuang in eastern Qinling Mountains, central China. *Resource Geol. Special. Issue, no. 18*, 179-186.
- Roskill Information Services Ltd. (2001) : *The Economics of Molybdenum*, 7th edition, 226 p.
- Seedorff, E. (1988) : Cyclic development of hydrothermal mineral assemblages related to multiple intrusions at the Henderson porphyry molybdenum deposit, Colorado. *Canadian Inst. Mining Metall., Spec. Vol. 39*, 367-401.
- Shannon, J.R., Walker, B.M., Carten, R.B. and Geraghty, E.P. (1982) : Unidirectional solidification textures and their significance in determining relative ages of intrusions at the Henderson Mine, Colorado. *Geology*, v. 10, 293-297.
- Stein, J. H. (1988) : Genetic traits of Climax-type granites and molybdenum mineralization, Colorado Mineral Belt, Canada. *Inst. Mining Metall., Spec. Vol. 39*, 394-401.
- Stein, H., H. J., Markey, R. J., Morgan, J. W., Du, A. and Sun, Y. (1997) : Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China. *Econ. Geol.*, v. 92, 827-835.
- Thomas, J.A. and Galey, J.T. Jr. (1982) : Exploration and geology of the Mt. Emmons molybdenite deposits, Gunnison County, Colorado. *Econ. Geol.*, v. 77, 1085-1104.
- Wallace, S. R., Muncaster, N.K., Jonson, D.C., MacKenzie, W.B., Bookstrom, A. and Surface, V.E. (1968) : Multiple intrusion and mineralization at Climax, Colorado. *Ore Deposits in the United States: 1933/1967, Vol. 1, AIME*, 605-640.
- Wallace, S. R., MacKenzie, W.B., Blair, R. R. G. and Muncaster, N.K. (1978) : Geology of the Urad and Henderson molybdenite deposits, Clear Creek County, Colorado, with a section on a comparison of these deposits with those at Climax, Colorado. *Econ. Geol.*, 73, 325-368.
- Wang, P.-A. and Ishihara, S. (2001) : Metallogeny, minerogenic series and gold mineralization of the Qinling Orogen, China. *Intern. Geol. Review*, v. 43, 523-538.
- 徐 兆文・楊 榮勇・陸 現彩・任 啓江(1998) : 金堆城斑岩モリブデン鉱床地質地球化学特性及び成因. 地質探鉱論叢, v.13, 1-9.
- 周 作俠ほか(1993) : 華北地台南縁の金(モリブデン)鉱床の成因. 地震出版社, 269 p.

ISHIHARA Shunso (2002) : Present status of molybdenum mining of the world, with special reference to porphyry-type deposits.

< 受付 : 2001年12月17日 >