

リチウムの花崗岩岩石学とペグマタイト資源論

石原舜三¹⁾

1. まえがき

リチウムは原子番号3, 水素, ヘリウムに次ぎ, 最も軽い金属元素である。ベリリウム(4), ボロン(5)よりも軽い。地球上部の存在量として, 上部地殻24 ppm, 下部地殻13ppm (Rudnick and Gao, 2003), 海洋地殻 (NMORB, 4.3ppm, Sun and McDonough, 1989), 始原マントルに1.6ppm (McDonough and Sun, 1995) が与えられている。すなわち, リチウムは上部マントルよりも地殻上部へ向けて濃集する傾向があり, また火成岩類では後述するように深所起源あるいは初生物質マグマで少ない傾向がある。その原因はリチウムが軽く, 高い揮発度と水に対する溶解度を持つことにあると考えられる。したがって, 原子番号が大きいレアメタルなどと違い, その供給源は地殻浅所に十分にある筈であるが, リチウムイオン二次電池 (LIB) がモバイル機器以外でも, ハイブリッド車, 電

気自動車への搭載が始まり, 需要の急増・今後の増加予測, 更にはアタカマ湖を中心とする大手3社 (SQM, Chemetall, FMC Lithium) の寡占供給構造などから, その資源問題が注目を集めている (工業レアメタル編集部, 2009)。

最近の生産量を見ると塩湖を持つチリが最大で, 2008年の場合に世界の44%を占め, 次いで西オーストラリア州にグリーンブッシュペグマタイトを持つオーストラリアが22%である (第1表)。両資源とも炭酸リチウムとしてまず晶出させて用いられるが, ガラス・セラミック材料ではペグマタイト産のリチウム珪酸塩鉱物が直接に用いられる。Reserve baseに現れているように, 将来的にはウユニ湖などを持つボリビアが最大生産国となる可能性が高い。

地質学的に見ると, リチウムは(1)花崗岩類に伴われるペグマタイト, および(2)南アメリカ大陸北西部地域その他で特有の塩湖の塩水と堆積物などに含まれ

第1表 リチウムの国別生産量と残存鉱量 (USGS, 2010)。

国名	鉱山生産量		残存鉱量	
	2008	2009	Reserves	Reserve base
オーストラリア	6,280	4,400	580,000	220,000
カナダ	690	480	180,000	360,000
アメリカ合衆国	公表せず	公表せず	38,000	410,000
ブラジル	160	110	190,000	910,000
ポルトガル	700	490	n.a.	n.a.
ジンバブエ	500	350	23,000	27,000
チリ	10,600	7,400	7,500,000	3,000,000
ボリビア	—	—	—	5,400,000
アルゼンチン	3,170	2,200	800,000	n.a.
中国	3,290	2,300	540,000	1,100,000
合計 (概数)	25,400	18,000	9,900,000	11,000,000

n.a.: 解析せず。Reserve base 鉱量のみUSGS (2009) による。

1) 産総研 特別顧問

キーワード: 花崗岩, リチウム, ペグマタイト, ゴーニング, グリーンブッシュ, リチア輝石



第1図
日本の花崗岩生成区とリチウム珪酸塩鉱物・鉱床の産地。幌満と登米は標準試料産地。

ている鉱石が代表的な供給源である。前者の利点は品位が高い点にあるが、主要なペグマタイト鉱床は採掘されて久しいので、将来的には後者が重要となる。第8図で後述するように、前者は世界に散在し、後者はチリ北部・ボリビア・アルゼンチン北西部・中国西部など、湖を持つ超乾燥地域に限られるが、アメリカ合衆国南西部その他の乾燥地帯にも可能性がある。鉱床規模としては前者が10-100万トンで最大クラス、後者は湖の規模として捉えれば、数100万トンを超えるが、ペグマタイトに比較すると品位が極めて低い。

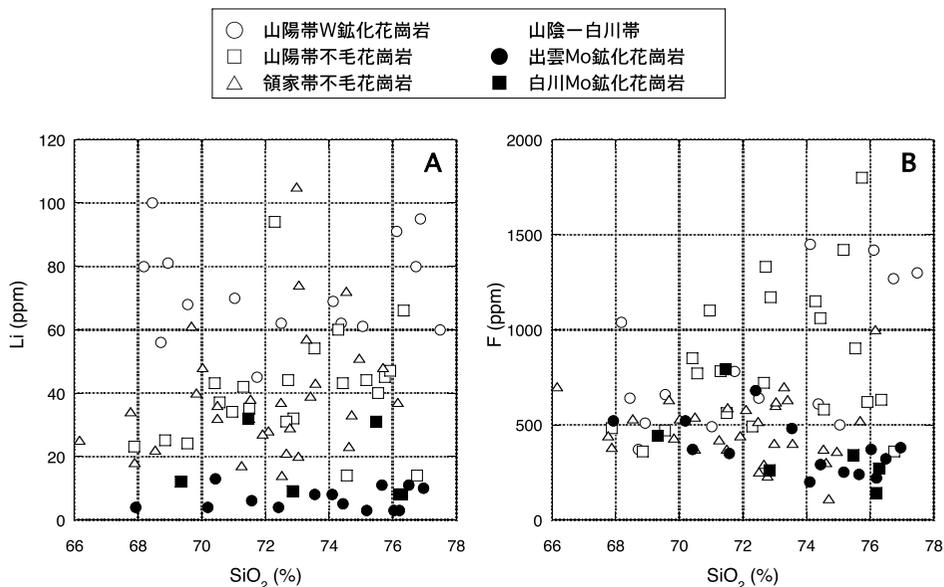
ペグマタイトは地殻の深所で固結・生成しそれが露出するに至っているから、古い地質時代のものが多く、逆に塩湖・塩水は後期新生代の湖水が乾燥気候下の蒸発で生じた表成産物であるからせいぜい中新世以降である。より古い地質時代の塩湖堆積物は岩塩としては採掘されているが、リチウムなど他成分は続成作用でどうなったのであろうか。この点も興味深い。ここでは筆者が専門とする花崗岩岩石学から見

たりチウムの挙動、および古い地質時代のリチウム含有ペグマタイトのリチウム資源について概観する。

2. 日本の標準試料のリチウム含有量

化学分析用として地質調査所が用意した標準試料は数多くの岩石から作成されているから、その総括論文を見ると、リチウムの地殻上層部における挙動を知ることができる。産業技術総合研究所ホームページや Imai *et al.* (1995, 1996)によると、リチウムは火成岩類では幌満(第1図)の橄欖岩(JP1=1.79ppm)が最も低く、次いで阿武隈帯の移岳の斑れい岩(JGb1=4.95ppm)であり、上部マントル起源などの深所で生成した岩石は低い値を持つ。この点は火山岩類でも同様であり、深所起源の玄武岩は北松浦JB1=11.2ppm、伊豆大島JB2=7.8ppm、富士山JB3=7.2ppmであり、やはり低いグループに属する。

安山岩類は玄武岩類よりやや高く、第四紀火山前



第2図 西南日本内帯花崗岩類のリチウム-シリカ、フッ素-シリカ図 (Ishihara and Terashima, 2010).

線沿いの伊豆半島真鶴産のJA1a = 10.6ppm., 浅間山のJA3 = 14.5ppm, 中新世の香川県のサヌカイトはやや高く, JA2 = 27.3ppmである. 流紋岩類は更に高く, 第四紀火山前線沿いの和田峠でJR1 = 61.4ppm, JR2 = 79.2ppmであって, シリカが増えると共にその含有量が増加する. この事実, 結晶化学的な類似性からしばしば指摘されるLiによるMg置換は天然の火成岩類では非常に限られていることを示している. 一方, 足摺岬のアルカリ花崗岩類に貫入する流紋岩岩脈は特異なパーアルカリ質であり, リチウム含有量は更に高く(JR3 = 118~124ppm), その成因も特異である (Ishihara *et al.*, 1990). 以上の火山岩類は基本的には磁鉄鉱系に属するが, サヌカイトは粘板岩類の捕獲岩片により部分的に還元され, 足摺岬のパーアルカリ流紋岩も磁鉄鉱を含まないチタン鉄鉱系に属する.

一方, 花崗岩類は山陽帯に属する沢入の黒雲母花崗岩が著しく高い (JG1 = 86.6ppm; JG1a = 79.5ppm). 同じく苗木花崗岩は (JG-2 = 42.2ppm) と沢入花崗岩の1/2である. しかし, リチウムは造岩鉱物中では雲母類に含まれるから, 苗木花崗岩の黒雲母が少ない (1.5-2.6容量%) ことを考えると, 苗木花崗岩も本邦でリチウムに最も富む花崗岩質マゲマから生成した岩石と見なす. 一方, 両花崗岩類とは起源

物質が異なり, 若い初生的物質から発生したと考えられる山陰地方中部, 三刀屋の花崗閃緑岩は低い値 (JG3 = 20.9ppm) を示す.

表成物質では北上山地, 登米層群の泥質岩が最も高く (JSL1 = 50.7ppm, JSL2 = 52.6ppm), 南太平洋のペンリン盆地 (Penrhyn Basin) の現世の遠洋性堆積物も高い (JMS2 = 43ppm). 足尾帯のチャート (JCh1 = 6.48ppm) やドロマイト (JDol = 0.4ppm)などは低い. また, 琵琶湖の堆積物は51.5ppm, 東京湾の泥は67.0ppmである.

標準試料ではないが, ジュラ紀の北部北上帯, 白亜紀の岩泉帯の粘板岩は平均値で34ppm (n = 10) および52ppm (n = 10) とそれぞれ高く, 砂岩類については北部北上帯で平均22ppm (n = 10), 白亜紀の岩泉帯で13ppm (n = 5) とやや低い.

火山岩類については北部北上帯の苦鉄質岩で37ppm, 珪長質岩で68ppm, 岩泉帯の苦鉄質岩で36ppmと高い値が得られている (寺島・石原, 1974).

3. 花崗岩系列におけるリチウムとその成因

3.1 西南日本内帯の花崗岩類

西南日本内帯の主要な花崗岩体のうち, 新鮮な花崗閃緑岩と花崗岩類のリチウム含有量を第2図に示

す、低い値は磁鉄鋳系花崗岩類で得られ、島根県東部、出雲地方の花崗岩類のうち、モリブデン石英脈の母岩である細粒花崗岩類、すなわち石原 (1971) の区分による川井混成岩類、鋳化優白花崗岩、下久野アプライト、山佐優白花崗岩などが最も低く、13ppm以下である。バソリス状の花崗閃緑岩・黒雲母花崗岩は22~36ppmで少し高く、全平均値は13.7ppm (n=21) である。

これら花崗岩はSr同位体初生値が低く、下部地殻の苦鉄物質起源を持つと思われるが (Ishihara and Chappell, 2008), リチウム含有量は最も低いものに属する。また同様な初生的マグマである丹沢花崗岩 (Saito *et al.*, 2007) は更に低く、平均6.8ppm (n=6) の値を持つ。同じく磁鉄鋳系である岐阜県白川地域の花崗岩類はSr同位体初生値がやや高く(0.7100±), 古い火成岩源基盤の影響が考えられるが、リチウム含有量は8~32ppm, 平均16.8ppm (n=6), 同じく低い値を示す。

これに対してチタン鉄鋳系花崗岩類は一般にリチウムに富む。領家帯の花崗岩類は23~105ppmであり、特に高いものはSタイプに属する白雲母黒雲母花崗岩である武節花崗岩で見られる。中部地方と岡山-香川県下の領家帯花崗岩類の平均値は、35.3ppm (n=21) である。一方、同じくチタン鉄鋳系に属する山陽帯の一般の花崗岩類は14~94ppm, その平均値は40.5ppm (n=22) である。スズ含有タングステン鋳床を伴う花崗岩類は高く(45~100ppm, 平均76.1ppm, n=15), 特に京都府の大谷鋳山岩株 (68~100ppm), 岐阜県の苗木花崗岩 (60~91ppm) などがリチウムに富む。これらリチウムは主として黒雲母と白雲母に含まれている (石原, 未公表資料)。

一方、同様に揮発度が高いフッ素はチタン鉄鋳系に多く含まれるが、領家帯花崗岩類で最も低い。リチウムと異なり山陽帯の不毛花崗岩類は、領家帯の花崗岩類よりも高いフッ素含有量を持つ (第2図)。この事実は、恐らく山陽帯花崗岩類が領家帯のものよりも浅所で形成されたこと、およびフッ素の方がリチウムより揮発しやすいことを示すものと考えられる。

領家帯と山陽帯の花崗岩類はチタン鉄鋳系であり、岩石硫黄同位体比 (Sasaki and Ishihara, 1979), 酸素同位体比などから、地殻、恐らく付加体堆積岩類の有機カーボンによる還元化を受けたものと思われる。酸素同位体比による考察では、砂岩・粘板岩・一部

チャートなど堆積岩類の混入比率は最大で約60パーセントと推定されている (Ishihara and Matsuhisa, 2002)。したがってリチウムも壁岩類から取り込まれた可能性が大きい。

3.2 マレー半島の花崗岩類

山陽帯と同様な鋳化作用を示すが、砂スズ鋳床の採掘によってスズ生産量が遥かに大きいマレー半島のタイ南部には、ペルム紀-三畳紀および白亜紀の大きくは2期の年代を持つチタン鉄鋳系花崗岩類が広く分布する。ここでのリチウム・フッ素含有量は、日本のものより大きい値を示す (第4図参照)。

リチウム含有量は、具体的には鋳化を伴わない不毛チタン鉄鋳系花崗岩類が平均50ppm (n=8), タングステン鋳化花崗岩 (Ko Samui) が28ppm (n=2) と低く、スズ鋳化花崗岩類はソクラ岩体 (152ppm, n=2), プケット岩体 (111ppm, n=2), ヨッドナム岩体 (79ppm, n=2) と高い値を示す (Ishihara *et al.*, 1980)。

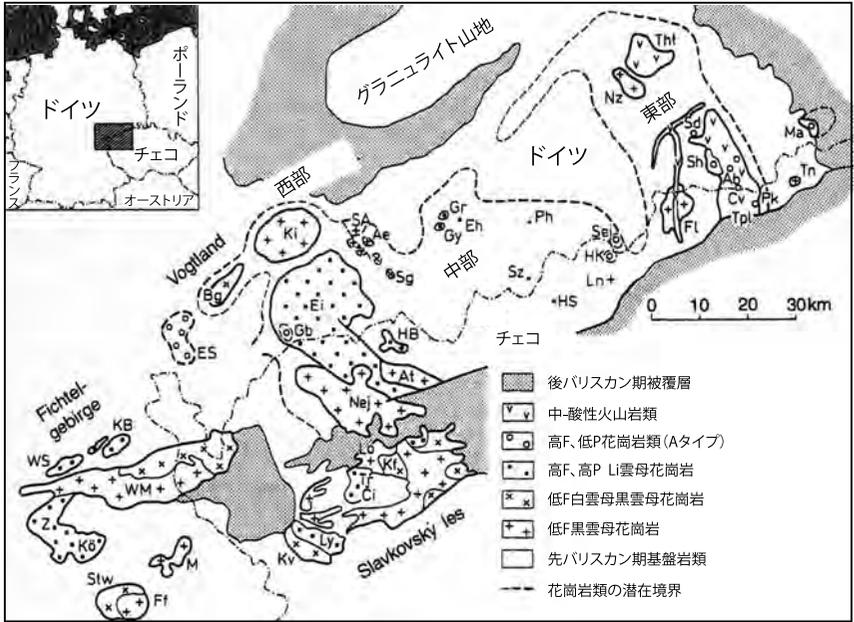
これら岩体は主に、マレーシアではMain Range Batholithと呼ばれる最大規模の花崗岩バソリスの北方延長部を形成するが、そのSr同位体初生値は全体として下記のように著しく高い値を示す (Cobbing *et al.*, 1992)。

Rayong :	0.7263 ± 0.0006 (221 ± 11Ma)
Hub Kapong :	0.7237 ± 0.0006 (216 ± 4Ma),
Satun :	0.7146 ± 0.0007 (211 ± 5Ma)
Songkhla :	0.7262 ± 0.0021 (207 ± 6Ma)

このように高い値は、ルビジウムに富む岩石、あるいはルビジウムが少ない場合には非常に古い岩石から花崗岩質マグマが発生することが必要である。バソリス周辺の被貫入岩類は古生代の堆積岩類であるから特に古いとは言えず、したがって先カンブリア紀のように古い地質時代の花崗岩質片麻岩類のようなものがタイ南部-マレーシア地域には潜在し、花崗岩類マグマの発生に影響を与えている可能性が大きい。

3.3 エルツゲビルゲの花崗岩類

ヨーロッパのドイツ・チェコ国境には、古生代後期のパリスカン期の花崗岩活動があつて (第3図)、大規模なスズ・タングステン鋳床を伴い、リチウム・フッ素に富む高温変質岩であるグライゼン (チンワルド雲母-トパズ-石英) 変質の命名の地である Zinnwald



第3図 エルトツゲビルゲの花崗岩地質図 (Breiter et al., 1999).

(“錫ヶ森”)スズ鉱床, 巨大な黄色トバズ塊を潜在花崗岩体の頂部に持つアルテンベルグ スズ鉱床などを伴っている (石原, 1975). キューリー夫人のラジウムの発見で著名なピッチブレンド鉱脈はこの地の低温鉱化帯に産出したものであった.

この地域の花崗岩類は全てチタン鉄鉱系で, 広義の花崗岩組成を持つ. コリジョン花崗岩とする提案がある (Seltmann and Faragher, 1994). 量的にはモンゾ花崗岩が多く, 閃長花崗岩は少ない. これら花崗岩類は最初, 次のように古期, 中間期, そして新期と3分された. いずれもシリカに富み, それぞれのリチウム・フッ素含有量はマレー半島・日本と比較して次のように著しく大きい.

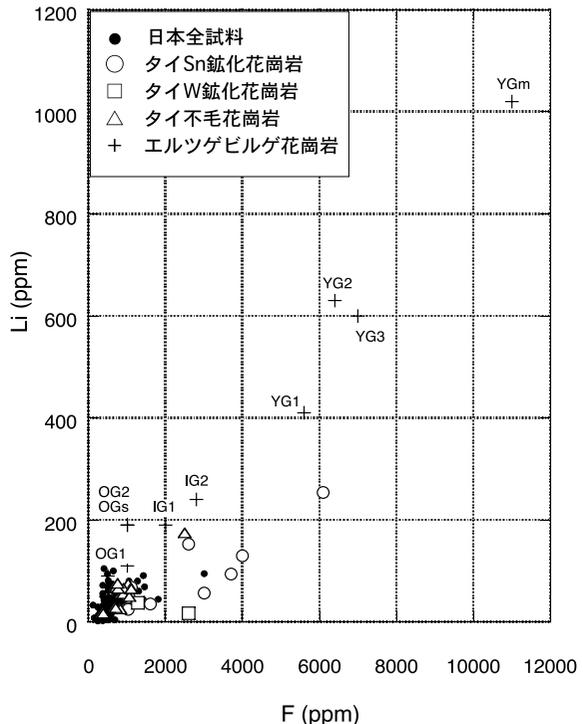
古期花崗岩類 (4岩相): SiO_2 71.4~75.6%, Li 90~190ppm, F 500~1,000ppm

中間期花崗岩類 (2岩相): SiO_2 73.4~74.0%, Li 190~240ppm, F 2,000~2,800ppm

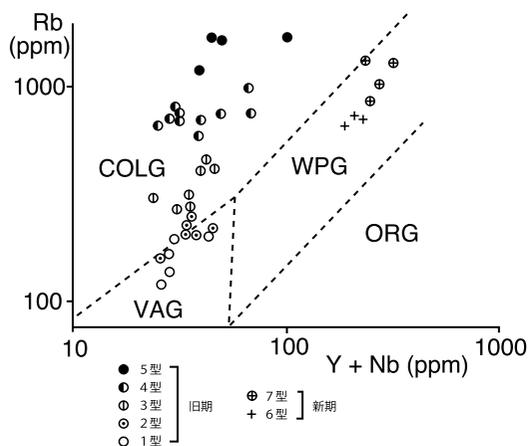
新期花崗岩類 (4岩相): SiO_2 73.4~74.8%, Li 410~1,020ppm, F 5,600~11,000ppm

また, リチウム-フッ素図 (第4図) 上で, エルトツゲビルゲ花崗岩類は概略 $F/\text{Li}=10$ の分布を示すが, タイ南部の花崗岩類はリチウムに乏しく, フッ素に富む領域にプロットされる.

これら花崗岩類は, その後, 旧期として5型, 新期として2型に分けられた (Breiter et al., 1991).



第4図 西南日本・タイ南部・エルトツゲビルゲ花崗岩類のリチウム-フッ素図. Ishihara and Terashima (2010) に Bauman et al. (1974) より追記. OGは旧期, IGは中間期, YGは新期花崗岩類, YGmは新期両雲母花崗岩.



第5図 エルトゼビルゲ花崗岩類のRb-Y+Nb識別図。
ORG：海嶺型，WPG：プレート内部型。

旧期花崗岩類

- 1型=Loket型：最早期，粗粒-中粒暗色黒雲母花崗閃緑岩。
- 2型=Mountain granite：粗粒-中粒黒雲母モンゾ花崗岩。
- 3型=Transitional granite：細粒斑状白雲母-黒雲母モンゾ花崗岩。
- 4型=Krusne Hory granite：粗粒黒雲母閃長花崗岩。トパズを含む。
- 5型=Li granite：細粒-中粒アルバートトパズ-チンワルド雲母-アルカリ長石花崗岩岩株。

新期花崗岩類

- 6型=Preiselberk granite (0.25km²)：細粒-中粒斑状黒雲母花崗岩。トパズを含む。
- 7型=Cinove granite：Krupka 鉱床下位の潜在岩体。中粒(トパズ-螢石)-アルバート-チンワルド雲母花崗岩岩株。

これら花崗岩類のうち最初の1~5型花崗岩類はRb-Y+Nb図上で火山島弧花崗岩類(VAG)から衝突型花崗岩(COLG)に向けて点在する(第5図)。すなわちこれら花崗岩類はRb含有量で大きく変動する。Rbはチタン鉄鉱系の“錫花崗岩”の固結末期から熱水変質期にかけて著しく濃集する特性を持つ。したがってこれら花崗岩類は本来地殻起源であり、衝突型の領域にプロットされるべきものである。しかし旧期花崗岩類のストロンチウム初生値は0.7068付近で、それほど高くはなく、火山島弧型の要素も持つ

ている。一方、新期花崗岩類はY+Nbに富む異なる領域を占める(第5図)。これらは異常に低いストロンチウム初生値(0.689-0.702)を示し、これは“自変質”作用によるもの(Gerstenberger, 1989)と説明されているが、今後の更なる研究が必要である。

エルトゼビルゲ花崗岩類は現在では岩相別に、次の4つに大別されている(Breiter *et al.*, 1999)。すなわち、地域南西部に広く分布する(1)低フッ素黒雲母花崗岩：これは南西部のFichtel山地、Slavkovsky les地域に広く分布する。同じ地域の(2)低フッ素白雲母-黒雲母花崗岩：これは(1)花崗岩の周縁部を縁取る形で南西部に多く見られる(第3図)。中央部に広く露出する(3)高フッ素・高リン・リチウム雲母花崗岩：これは高いアルミナ飽和指数を持ち、一般にはSタイプと見なしうるものである。西部や東部に独立に貫入する(4)高フッ素低リン花崗岩：これはAタイプ花崗岩の性格を持つものである(Breiter *et al.*, 1999)。

4. 日本のリチウムペグマタイト

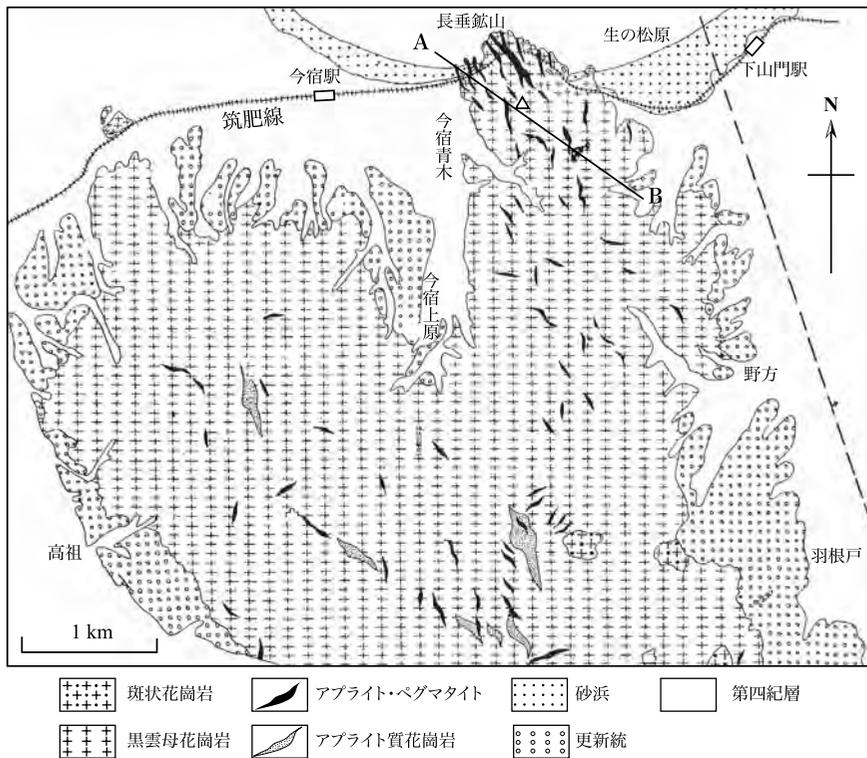
日本のリチウム資源は、太平洋戦争勃発に伴う輸入の停止、航空機材としての必要性から、まず福岡県長垂鉱山のペグマタイト岩脈、次いでチンワルド雲母・鉄リチア雲母を伴う岐阜県蛭川村袖ヶ沢の晶洞性ペグマタイト、三重県水沢のチンワルド雲母を含む晶洞性ペグマタイトが開発されたと言われる(柴田, 1951)。また、岡山県高梁の南東方、延原でもリチア雲母を産した(櫻井ほか, 1977)。ほかに、蛭川村の遠ヶ根鉱山のタングステン石英気成脈ではプロトリチオナイト、茨城県高取タングステン鉱脈の変質帯では1%Liに達する白雲母が知られている(青木, 私信)。これらの産地は金属鉱床に基づく分類ではタングステン生成区に属し、関係花崗岩類の分類上はチタン鉄鉱系に属する。

1970年代に入って茨城県北部に妙見山リチウムペグマタイトが発見された(今井ほか, 1973)。これはリチア雲母に著しく富む特徴を有する。この鉱床は阿武隈帯の西縁にあり、近くに柘榴石含有白雲母黒雲母花崗岩が描かれているので、関係火成岩はSタイプチタン鉄鉱系に属するものと考えられる。北上山地では五葉山岩体の南東端の崎浜で(第1図)、非常に小規模な晶洞性ペグマタイトに3色電気石と共にリチア雲母が産出した。母岩の五葉山岩体は基本的には磁

第2表 主要なリチウム珪酸塩鉱物とリチウム含有量 (Gaines *et al.*, 1997).

鉱物名	化学式	理論的含有量 (%)	
		Li	Li ₂ O
リチア輝石 Spodumene	LiAlSi ₂ O ₆	3.73	8.03
ペタライト Petalite	LiAlSi ₄ O ₁₀	2.27	4.88
ユークリプタイト Eucryptite	LiAlSiO ₄	5.51	11.86
アンブリゴナイト Amblygonite	2Li(F, OH)Al ₂ O ₃ /P ₂ O ₅	4.8	10.2
リチア雲母 Lepidolite	K(Li, Al) ₃ (AlSi) ₃ O ₁₀ (F, OH) ₂	< 3.6	< 7.7
リチア電気石 Elbaite	Na(Li _{0.5} Al _{0.5}) ₃ Al ₆ (BO ₃)Si ₆ O ₁₈ (OH) ₃ (F)	n.c.	n.c.
チンワルド雲母 Zinnwaldite	KLiFe ²⁺ +Al[F, OH] ₂ [AlSi ₃ O ₁₀]	n.c.	n.c.

n.c.: 計算せず.



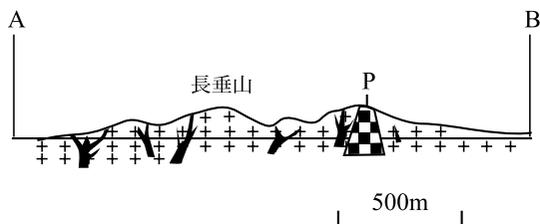
第6図 長垂鉾山付近の地質図 (滝本, 1937). A-Bは第7図の断面線.

鉄鉍系閃雲花崗閃緑岩であるが、崎浜付近には磁鉄鉍を含まない細粒黒雲母花崗岩が局部的に分布しており、ここでもチタン鉄鉍系花崗岩にリチア雲母は伴われる。

長石・珪石鉍床としては本邦最大の島根県真砂岩体中の城山ペグマタイト (Kihara *et al.*, 2005) および第2位の新潟県の金丸ペグマタイト (Nanbu *et al.*, 1997; Ishihara *et al.*, 1998) は共にチタン鉄鉍系黒雲母花崗

岩類に胚胎する。これらにはリチウム鉍物は産出しなない。また希土類元素、ウラン・トリウムなどの重鉍物の産出で著名な阿武隈変成帯西縁、石川地方のペグマタイトからもリチウム鉍物の報告がない。

火成起源のリチウム鉍物として資源的に最も重要なものを第2表に示すが、リチア輝石 (spodumene) がそのリチウム含有量も高く、国際的に最も広く採掘されており、次いでリチア雲母 (lepidolite) である。スズ



第7図 長垂鉱山付近の北西-南東方向の地質断面図 (滝本, 1937). 凡例は第6図と同じ. Pは橄欖岩の捕獲岩体.

鉱床の高温変質帯ではグライゼン変質の定義の主役を務めるチンワルド雲母 (zinnwaldite) は学術的には重要であるが、資源的には未利用である。

4.1 長垂鉱山のペグマタイト岩脈

この鉱山は福岡の直ぐ西方、海岸に面し交通至便の地にある(第6図)。明治25年(1890)の頃、リチア雲母に富む緻密質の大塊を多く産し、「ムラサキ」と称して工芸品に加工されたと言われる(木下編, 1961)。付近には三郡変成岩類に貫入して後期白亜紀の花崗閃緑岩(糸島型)や黒雲母花崗岩(早良型)が広く分布する(滝本, 1937)。これらを母岩として、南北系～北北西-南南東方向に多数の脈状～レンズ状にペグマタイトが走るが(第6, 7図)、リチウム鉱物を多量に含んだものは肥筑線の長垂トンネル西口に近い1条だけと言われている。これは紅紫色の塊状岩であり、昭和15年(1940)より開発され、品位2%の粗鉱を200トン出鉱して終掘した。この鉱石はリチア雲母・石英・カリ長石・アルバイト・アンブリゴナイト・スピネルからなる。

4.2 妙見山リチウムペグマタイト

この鉱床は茨城県久慈郡里美村、常陸太田市の北方27km、妙見山(標高653m)の南数100m地点の山中にある。今井ほか(1973)によると、花崗岩中に北北東-南南西走向方向にペグマタイトの転石として認められるが、櫻井ほか(1977)は斑れい岩が母岩である可能性を示唆している。

1970年代から鉱物収集家の研究対象となり、鉱物学的な記載が行われた(櫻井ほか, 1977)。これによるとこのペグマタイトは転石の分布から、少なくとも幅30m、延長100mの規模を持つ。ペグマタイト中心部は

主として粗粒の石英とアルバイトからなり、微斜長石も含まれる。リチウム鉱物はリチア雲母が最も多く、次いでリチア電気石(エルバイト)、モンブラサイトである。周縁部は白雲母を含む粗粒の文象花崗岩である。したがって関係火成岩は付近に描かれている両雲母花崗岩であり、それが潜在するものと筆者は考えている。

5. 世界のリチウムペグマタイト鉱床

世界で稼行されているペグマタイト鉱床は多くの場合にリチウム資源あるいは別の金属鉱物資源を目標としている。この点で非金属資源である長石・珪石などに移行して久しい日本の場合とは鉱業状況が異なっている。

Cerny (1993)によれば、ペグマタイトは形成深度と温度によって、深所型(4-9kb, 700-800℃)、白雲母型(5-8kb, 580-650℃)、希元素白雲母型(2-4kb, 500-650℃)、晶洞型(1-2kb)に分類される。希元素白雲母型は更に、LCT型(Li, Cs, Taに富む)およびNYF型(Nb, Y, Fに富む)に分けられており、リチウム鉱物はLCT型白雲母ペグマタイトで多産する(石原, 2003)。また鉱業的には含まれる主要な金属鉱物の品位が次の場合に経済性を持ち、それに基づく発見鉱量が算定されている。

リチウム資源：品位0.6～3.0% Li_2O 、発見量：

Li_2O 純分, 3,486,160トン,

ベリリウム資源：品位0.04～0.2% BeO 、発見量：

BeO 純分, 10,690トン,

タンタル資源：品位0.04～0.22% Ta_2O_5 、発見量：

Ta_2O_5 純分, 6,510トン,

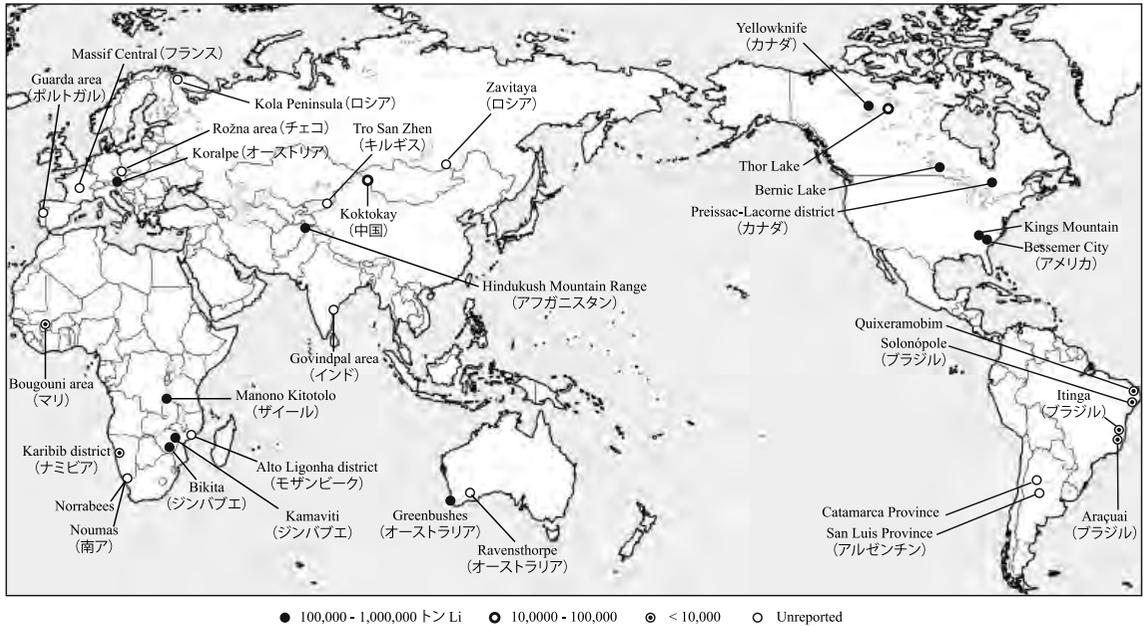
スズ資源：品位0.114～0.134% Sn 、発見量： Sn 純

分, 21,500トン,

このようにペグマタイトの鉱物資源としてはリチウム資源が卓越し、火成源のリチウム資源としてはペグマタイトが最も重要であることを示している。

巨大な経済性を持つリチウムペグマタイト鉱床は世界各地に点在する(第8図)。そのうち最大は、ジンバブエのKamavitiであるが、第3表のように品位が低く、品位および鉱量から見て、オーストラリアのGreenbushesが群を抜いている。

世界全体としては Li_2O 純分として400万トン弱である。



第8図 世界の主要なリチウムペグマタイト鉱床の分布. Anstett *et al.* (1990) に追記.

第3表 世界の主要なリチウムペグマタイト鉱床の鉱量 (Cerny, 1993).

鉱床 (国)	鉱量	品位	リチウム純分
Greenbushes (オーストラリア)	3,350 万トン	2.55% Li ₂ O	854,250 トン
Ravensthorpe* (同上)	1,230 万トン	1.00% Li ₂ O	123,179 トン
Bikita (ジンバブエ)	1,080 万トン	3.0% Li ₂ O	324,000 トン
Kamaviti (同上)	10,000 万トン	0.603% Li ₂ O	603,000 トン
Monono-Kitololo (ザイール)	3,500 万トン	1.3% Li ₂ O	455,000 トン
Yellow Knife (カナダ)	1,390 万トン	1.19% Li ₂ O	165,410 トン
Preissac-Lacome (同上)	1,900 万トン	1.25% Li ₂ O	237,500 トン
Tin-Spodumene (北カロライナ州)			
A社:	2,600 万トン	1.5% Li ₂ O	390,000 トン
B社:	3,050 万トン	1.5% Li ₂ O	457,500 トン
合計	28,100 万トン		3,609,839 トン

* 五味 (2009) による。確定・推定・予想鉱量の全てを含む値。

5.1 グリーンブッシュ ペグマタイト

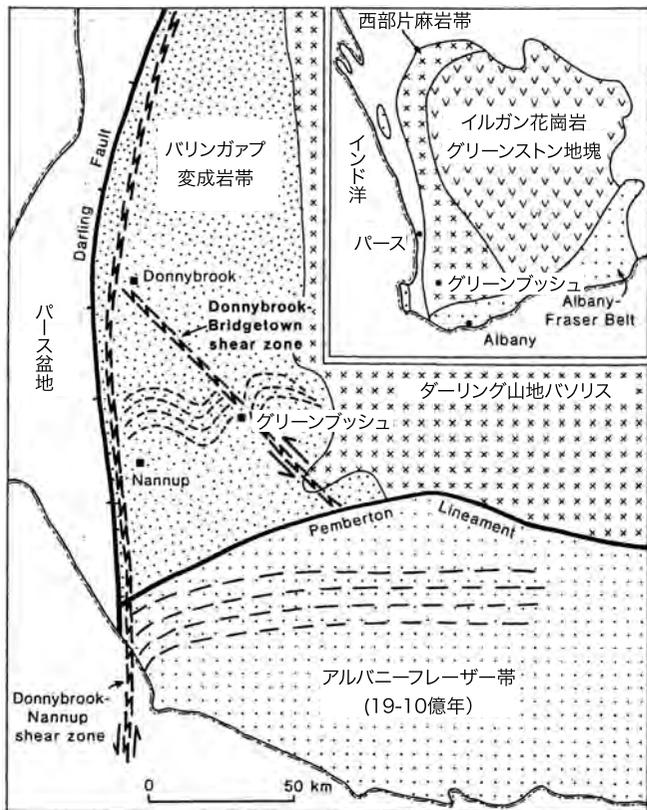
グリーンブッシュは西オーストラリア州の南西端部、パースの南252キロに位置する。1888年に錫石が発見されて鉱業が始まり、錫・タンタルのほか、近年では、リチウム・カオリンなども回収している。1991年のオーナー(Sons of Gwalia)の発表では、残存鉱量は次のようであり (Partington *et al.*, 1995), 含まれる金属資源量としてはリチウムが最も大きい。

錫粗鉱: 5.4×10^6 トン, 0.24% Sn (含有量 = 11,280 トン)

タンタル粗鉱: 4.7×10^6 トン, 0.06% Ta (含有量 = 2,820 トン)

ニオブ粗鉱: 10.8×10^6 トン, 0.42% Nb (含有量 = 45,360 トン)

リチウム粗鉱: 7.1×10^6 トン, 4.06% Li₂O (含有量 = 288,260 トン)



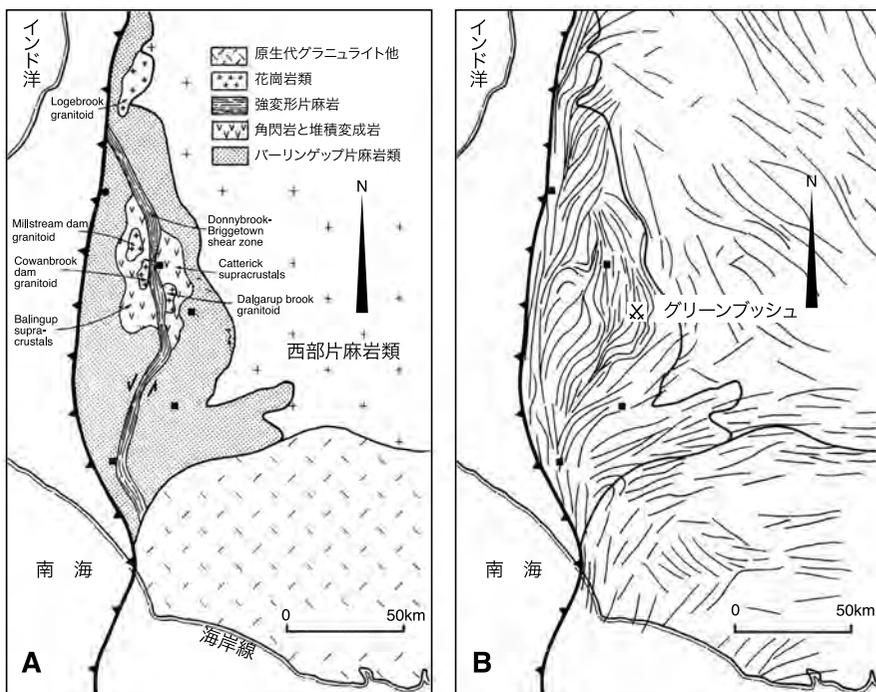
第9図 西オーストラリア州南西端の地質概略図 (Bettenay *et al.*, 1988).

カオリン粗鉱： 2.3×10^6 トン、(含有量＝690,000トン)

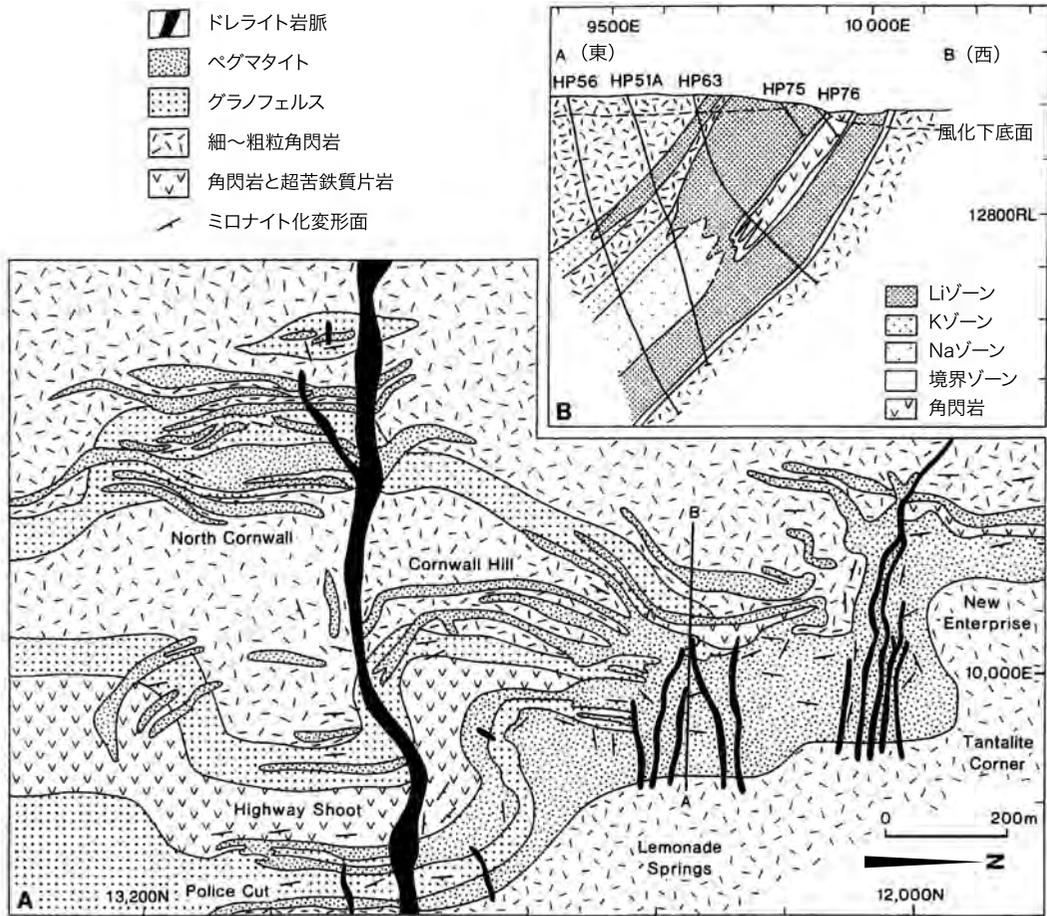
採掘は主に中規模のオープンピットにより、また一部が坑内採掘で行われ、巨大ダンプ車を用いて近代的な方法で採掘されていた。筆者が訪問した2005年10月の説明では年間生産量が300万トン、品位250ppm Ta₂O₅、600ppm Liであり、タンタルに重点を移した採掘をしていた。その後、Son of Gwalia社の破産申告によって所有権移動があって、新所有者は採掘を中止し、貯鉱販売に切り替えているとされている。

(1) 広域的な形成場

鉱床付近の岩石は西オーストラリアの始生代グリーンストーン-花崗岩地塊の南西周辺部に相当し(第9図)、Western Gneiss Terrainと呼ばれる片麻岩地帯に属する。これはトナル岩質の灰色片麻岩類に少量の苦鉄質岩、堆積岩類を挟む片麻岩類複合体である。その最西部にはパーリングアップ(Balingup)古期片麻岩類が分布し(第10図A)、それは恐らく最下底層と思われる始生



第10図 グリーンブッシュ ペグマタイト鉱床周辺域の広域地質図(A)とリニアメント図(B) (Partington, 1990).



第11図 グリーンブッシュ ペグマタイト鋳床の平面図と断面図 (Partington et al., 1995).

代グリーンストーン起源様の細粒角閃岩と関連縞状鉄鋳層、粗粒角閃岩、珪長質な塊状～片状バラ片麻岩から構成される。バラ片麻岩は西オーストラリア州地質調査所ではグラノフェルス (granofels) と呼ばれている。これらの岩石は主要な構造線やリニアメントと平行に発達する片麻状構造を持つが、特にパーリングアップ片麻岩類で著しい(第10図B)。

これらの変成岩類は、石英-黒雲母-長石-斑岩岩脈、ドレライト岩床、ドレライト岩脈、そして花崗岩ストックの貫入を受ける。ついで鋳化ペグマタイトが貫入し、鋳化後に不毛なペグマタイトとドレライト岩脈が貫入する。この鋳化後ドレライト岩脈は東西系で明瞭に鋳体を切り(第11図)、ペグマタイト細脈に切られる。この細脈ペグマタイトはドレライト貫入時に、その熱で既存のペグマタイトが再溶融して発生した可能性があ

る (Bettenay et al., 1988)。

鋳床付近には花崗岩類が小規模なストック状に貫入する。それらは鋳化以前の古期と、鋳化期の新期に二分されるが、両者は共にミグマタイトの片理面と平行なダニーブルック-ブリッジタウン (Donnybrook-Bridgetown) 破碎帯方向に伸長して貫入する。グリーンブッシュ ペグマタイトの形成時期は、そのうちの新期黒雲母花崗岩と密接である。この岩体から分離されたジルコンの放射性年代は、 $2,612 \pm 5 \text{ Ma}$ を示す。したがって鋳化年代はこれと同時期の原生代古期と考えられる。

グリーンブッシュ付近の褶曲・変形運動には、ダニーブルック-ブリッジタウン破碎活動に絡む4時期が認められている。最古期は右横ずれのD₁期であり、これは始生代と思われる(第12図)。D₂期は基本的に

変形時期	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅		
	右横ずれ	左横ずれ	再活動	再活動	正断層		
熱水変質	一般岩石の炭酸塩化	ペグマタイト関連のグライゼン化			沸石-炭酸塩変質		
変成作用	M ₁	M ₂	破砕帯中と花崗岩接触部のみ	M ₂			
上部角閃岩相	片麻岩中のみ	破砕帯周縁部のみ		古ダーリング断層近くの変成岩のみ			
下部角閃岩相					D ₂ 変形に重複する後退変成		
火成活動	片麻岩形成	新期花崗岩貫入	グリーンブッシュ ペグマタイト貫入	ドレライトの貫入	新期ペグマタイト貫入		
年代(億年)	31.0	26.1 - 25.8	25.3	24.3	11.0	7.0	0.6

第12図 グリーンブッシュ ペグマタイト鉱床の火成活動史 (Partington, 1990).

は左横ずれ運動で、鉱化前から発生し鉱化期間中にも活動した。D₃期は鉱化後であるが、鉱体を切る東西系のドレライト岩脈よりも前である。D₄期の活動はドレライト岩脈後であり、その一部は古生代に入る。

変成作用は一般に上部角閃岩相であり、ブリッジタウン片麻岩中のみ認められるM₁期を最古とし、ダニールブッカーブリッジタウン破砕帯中の花崗岩との接触部に見られるM₂期、古ダーリング断層近くの変成岩で見られるM₃期などが識別される(第12図)。

(2) ペグマタイトの形と構成鉱物

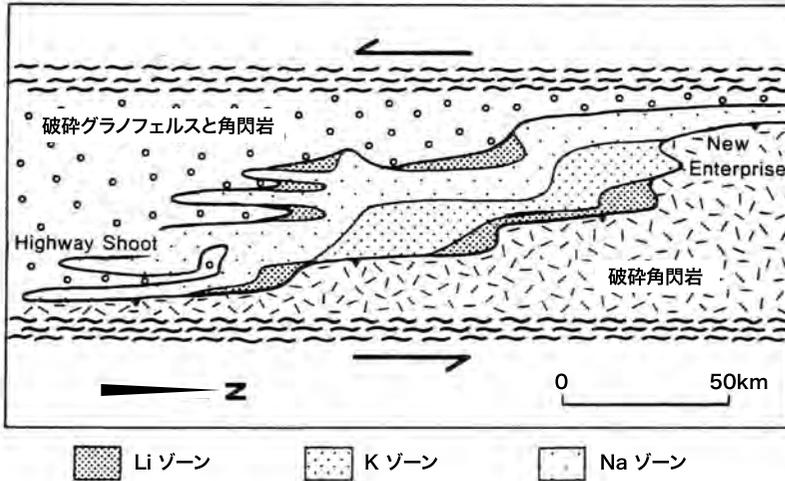
グリーンブッシュ ペグマタイト鉱床は不規則形状で南北に貫入する多数のペグマタイト岩脈・岩床からなる(第12図)。個々の延長は数百mから数kmに達し、幅は数十～数百mである。傾斜は東へ約60度である。エショロン状にペグマタイト ポッドが並ぶ“富鉱部”は角閃岩とグラノフェルス間のD₂期変形が集中したところに当たる。ペグマタイトはその後のD₃期-D₄期の変形を受けているが、変形を免れた初生の鉱物結晶や包有物を保つものもあって、変形応力に不均一性が認められる。

ペグマタイトには一般に構成鉱物にゾーニングが見られるが、ここでも巨視的には三次元なゾーニングを示す。南部の主鉱体ではリチウム ゾーンが下盤側、

上盤側の周縁相に現れる。これが日本の阿武隈ペグマタイトなどの周縁重鉱物相に相当する。上盤側リチウム ゾーンの厚さは北方へ減少する傾向がある。主にカリ長石からなるカリウム ゾーンは鉱体中心の上盤側にのみ現れ、その厚さは北方へ減少する。主にアルバイトからなるナトリウムゾーンは鉱体中心の下盤側に産出する傾向がある(第13図)。一般的に知られているペグマタイトの中核を構成する石英塊は当鉱床では存在しない。有色鉱物では電気石が目立つ。

北部鉱床は単純構成鉱物からなるペグマタイト岩脈やポッドを伴う。ここでは一般にアルバイト>カリ長石であり、リチウムが減少し、錫・タンタル、そしてK/Rb, Sr/Rb, K/Li, Nb/Taが増加する。ペグマタイトの周縁部はアプライト質で粒状組織を示す。各ゾーンの構成鉱物は次の通りである (Partington *et al.*, 1995)。

- (a) 接触変成帯 > 860°C: アルバイト, 石英, 電気石, 黒雲母, 柘榴石, 錫石, Ta 鉱物, ジルコン, スカポライト
- (b) ナトリウムゾーン > 860°C: アルバイト, 電気石, 石英, リシア輝石, 錫石, Ta 鉱物, 白雲母, ジルコン, マイクロクリン
- (c) カリウムゾーン > 700°C: マイクロクリン, ペルト長石, 石英, リシア輝石, 電気石



第13図

グリーンブッシュ ペグマタイト鉱床に見られるゾーニング (Partington et al., 1995).

(d) リチウムゾーン > 690°C: リシア輝石, 石英, 燐灰石, 電気石, ベルト長石, Ta 鉱物

Sn-Ta 鉱化作用はナトリウムゾーンに錫石・タンタライトとして見られる. 少量の鉱石鉱物としてパイロクロア族のTa 鉱物であるマイクロライト ($(\text{Na}, \text{Ca})_2\text{Ta}_2\text{O}_6$ (O, OH, F), タピオライト (tapiolite, FeTa_2O_6), ウオッジナイト $\{(\text{Ta}, \text{Nb}, \text{Sn}, \text{Mn}, \text{Fe})_{15.78}\text{O}_{32}\}$, holtite (Al, Sb, Ta)₇(B, Si)₄O₁₈, アンチモンを含むタンタライトである stibiotantalite などがある.

カリウムゾーンは径 80 cm 以上に達するベルト長石の巨晶が目立つが, 鉱石鉱物含有量は微量であるに過ぎない.

リチウムゾーンはLi 資源として最重要であり, 5% Li₂O に達する品位を持つ. それは鉄に乏しい種類のリシア輝石を主とし, アパタイト・石英から構成される. リシア輝石にはナトリウム含有量に基づく2種類がある (Tsambourakis and Frost, 1990). リチウム白雲母は随所に見られるが, リチウム ペグマタイトで一般的なリシア雲母 (lepidolite), 葉長石 (petalite), アンブリゴナイト (amblygonite), ユークリプトナイト (eucryptite) などは産出しない. このゾーンは石英-リシア輝石の文象組織で特徴付けられ, ペグマタイト岩体の周縁相であることを示している.

(3) 化学的な特性

各鉱体の化学的性質は, 多い順に SiO₂ 66.6-70.1% (Total を 100 として 71.0-78.8%), Al₂O₃ 14.3-15.7% であり, アルカリは幅広く変化するが, 一般に Na₂O > K₂O である. アルミナ飽和指数 (ASI, すなわち A/CNK, モル比) は高く (1.12-1.29), S タイプ花崗岩の領域である 1.1 より大きい. これらの鉱体の性質は, 付近の黒雲母花崗岩の値, SiO₂ 73.8%, Al₂O₃ 13.9%, K₂O > Na₂O などに比べて, かなり異なっ

第4表 グリーンブッシュ ペグマタイト鉱石と新期花崗岩の化学分析値 (Partington et al., 1995).

元素	花崗岩	発見鉱体	主鉱体	北部鉱体	Li ゾーン
SiO ₂	73.75	69.14	70.14	66.64	73.74
TiO ₂	0.11	0.06	0.06	0.07	0.19
Al ₂ O ₃	13.91	14.67	14.28	15.66	13.94
Fe ₂ O ₃	2.00	1.31	1.14	1.74	0.85
MgO	0.40	0.23	0.22	0.27	0.16
CaO	1.73	0.97	0.79	1.40	0.45
Na ₂ O	3.72	2.82	4.14	6.53	2.57
K ₂ O	3.92	2.07	2.64	0.66	1.50
P ₂ O ₅	0.03	0.61	0.47	0.96	0.20
Total	99.57	91.88	93.88	93.93	93.60
Li (ppm)	12	2325	2873	955	12734
Rb	134	4159	5358	1160	2656
Sr	251	65	69	55	34
A/CNK	1.03	1.23	1.29	1.12	2.09
Na ₂ O/K ₂ O	0.95	1.36	1.57	9.89	1.71
Rb/Sr	0.53	64.00	77.70	21.00	33.00

第5表 レイベンズソープペグマタイト鉱山における鉱量(五味, 2009).

	鉱石量(トン)	Li ₂ O (%)	Ta ₂ O ₅ (ppm)	リチア輝石 (%)
確定鉱量	1,090,066	1.07	177	15.67
推定鉱量	6,417,133	1.02	125	15.00
予想鉱量	4,797,911	0.96	140	14.12
合計	12,305,110	1.00	135	14.72

いる(第4表). 主要鉱体と比較して北部鉱体はLi, Cs, Rbに乏しく, Sn, Ta, Nb, As, U, Thなどの重金属元素に富んでいる.

鉱石ゾーン別では, ナトリウムゾーンがNa₂O 6.1%と高く, Na₂O/K₂O=6.9である. カリウムゾーンは逆にK₂O 5.75%が多く, Na₂O/K₂O=0.4である. カリウムゾーンではカリ長石のK⁺を置換するRb (1.2%), Cs (1,119ppm)などが多く含まれ, Sn (12ppm)などの重金属元素に乏しい. リチウムゾーンはLi 1.3%を含んでいる. リチウムゾーンのアルミナ飽和指数は最も高く(ASI=2.1), これには雲母鉱物類の貢献が考えられる.

これらに対して鉱床近傍の花崗岩類は若干パーアルミナスであるに過ぎない(ASI=1.03). ルビジウムに乏しく(134ppm Rb), Rb/Srは低く(0.5), 結晶分化が進んだマグマから晶出したものではなさそうである. この点は日本の苗木地方の黒雲母花崗岩から分化したペグマタイト-アプライト岩脈と比較すると明瞭に異なる. グリーンブッシュ鉱体の化学分析値は母岩の片麻岩や近傍の花崗岩類とは明らかに違った性質を示しており, 独自のマグマ起源を持つものと考えられる.

(4) 時代と成因

SHRIMP法によるジルコンのU/Pb年代は, グリーンブッシュ鉱床について2,527±2Maが得られている. 一方, 近くのLogue Brook花崗岩体からのジルコンは2,612±5Maを示し, 約85Maの年代差がある. また, ペグマタイトの総容積量は1.2km³と見積もられ, これを結晶分化作用で作るためには80km³以上の親マグマが近傍か地下深部に必要である. このような岩体は現在のところ発見されていない(Partington *et al.*, 1995).

これらを総合するとグリーンブッシュペグマタイトは, 始生代末期から古生代に至る間欠的な左横ずれ破砕活動の中で, 広域変成作用が上部角閃岩相まで

上昇した時期に, 大陸地殻の珪長質部分が溶融して低融点マグマが生成し, 破砕帯沿いの上方へ移動し, 比較的深所で固結したものと考えられる. その形成には先カンブリア時代ならではの地質時間を必要としており, 環太平洋地域の若い造山帯にはこのように長時間かけた鉱床の生成は恐らく期待できない.

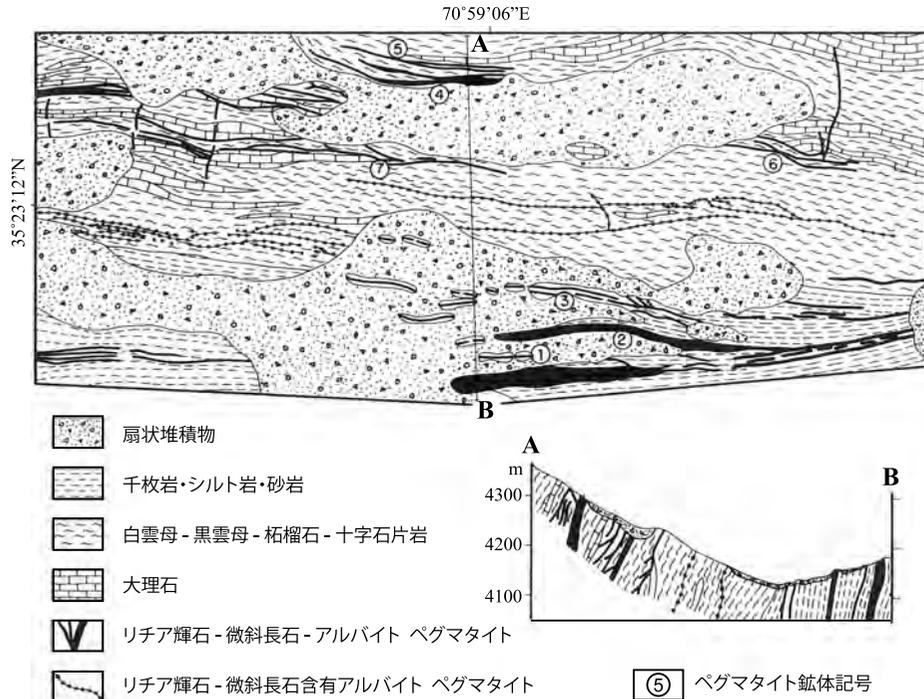
5.2 レイベンズソープペグマタイト

この鉱床は西オーストラリア州の中央最南端部, ピルバラ花崗岩類(石原, 2007)の最南端に位置する. 五味(2009)による詳しい紹介があり, それによると1900年頃, 金の探鉱過程でリチア輝石の巨大結晶が発見されたが, 銅・ビスマス・ニッケル・コバルトを含む金属鉱物資源探査が重点的に行われ, リチウムペグマタイトとしての評価は1952年に初めて実施された.

鉱床は先カンブリア紀の変成岩地帯に位置し, 緑色片岩~角閃岩相の変成度を持つ緑色岩類中の石英閃緑岩と玄武岩の境界部に岩床状に胚胎する. 東西1.7km, 南北1.0km, 厚さ1.8~12mの規模を持つ. 鉱体の周辺部から中心へ向かって, 次のゾーニングが見られる.

- (1) 細粒斜長石-石英±白雲母帯(玄武岩との接触部では鉄電気石を伴う)
- (2) 中粒石英-斜長石-微斜長石±白雲母帯
- (3) 微斜長石-石英帯
- (4) アルバイト-石英-リチア輝石帯
- (5) 石英帯

鉱体北部ではアルバイト-石英-リチア雲母(チンワルド雲母)帯が認められ, リチア電気石を伴う. 少量鉱物としてはアパタイト・マンガン柘榴石・モンブラ石・マンガンコルンブ石・錫石・螢石・トリフィライト・緑柱石・閃亜鉛鉱などが含まれる(五味, 2009). 2007年のボーリング結果に基づき, 第5表の鉱量が算出されている.



第14図 ヒンゾークシ山脈, Jamanakペグマタイトの地質図と地質断面図 (ESCAP, 1995).

5.3 ヒンゾークシ山脈のペグマタイト

アフガニスタン東部, パキスタン国境に近いヒンゾークシ山脈は現在ではゲリラ活動により危険がいつぱいであるが, 実はリチウムを含むペグマタイト岩脈もいつぱいある。それは幾条もの岩脈として産出し, グリーンブッシュの場合とよく似ている。旧ソ連援助時代に地質調査がなされ, 走向延長に脈幅を掛け, 深さを100mと見積もる概略の推定鉱量であるが, 次のように大規模な値が報告されているので, 注目に値する (ESCAP, 1995)。

- (1) Pasghushta : $1,050 \times 10^3$ tons Li_2O , 1.96-2.14% Li_2O , ほかに Sn, Ta, Nb
- (2) Jamanak : 294×10^3 tons Li_2O , 1.53% Li_2O , ほかに Rb, Cs
- (3) Drumgal : 259×10^3 tons Li_2O , 1.38-1.58% Li_2O , ほかに Ta
- (4) Tasamgal : 187×10^3 tons Li_2O , 1.50% Li_2O

最大のPasghushta鉱床は下部三畳紀の粘板岩類中に, リチア輝石-微斜長石-アルバイト ペグマタイト岩脈が幅30-250m, 走向延長10kmの地域に分布する。このペグマタイト岩脈は幅20-30m, 走向延長600-

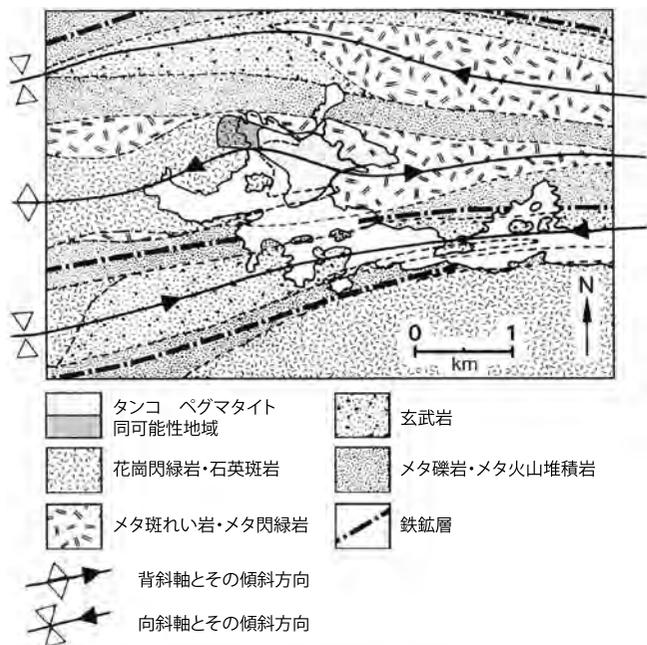
800m, 深度100mとして, 既述の約100万トンの推定鉱量が得られる。微量鉱物として錫石・コロンブ石・タンタル石が含まれる。

規模が第2位のJamanak鉱床も下部三畳紀の大理石層が介在する結晶片岩類や千枚岩・シルト岩・砂岩層中に貫入するリチア輝石含有ペグマタイトである (第14図)。稼行可能な7脈が知られている。構成鉱物別の容量比は次のように見積もられている。

最大の第1脈は走向延長1000m, 幅10-20m, 全体の60-65%を占めるリチア輝石-微斜長石-アルバイト ペグマタイト岩脈である。次いで, リチア輝石-微斜長石-石英 ペグマタイトが15-20%, リチア輝石-アルバイト ペグマタイトが15-20%, アルバイト ペグマタイトが5-10%を占める。

5.4 カナダ, 特にBernic Lakeのペグマタイト鉱床

カナダの先カンブリア系には多数のペグマタイト鉱床が知られている。そのうち著名なものは, (1)北西準州のYellow-Knife-Beaulieu地域, (2)マニトバ州ではBernic Lakeほか多数の地域, (3)ケベック州のPreissac-Lacorne地域である (第8図)。なおこの図の



第15図 カナダ、バーニック湖付近の地質図 (Selway et al., 2000).

Thor Lakeはリチウムよりもベリル、レアアースに富むものである(石原・渡辺, 2007). 以上のペグマタイト鉱床に見られる共通点として, Rowe (1954)は以下の諸点を指摘している.

- (a) 鉱床は中～高変成の変成岩類か深成岩を母岩とする,
- (b) 鉱床は空間的・成因的に, 20-40%の微斜長石と20-40%のアルバイトかオリゴクレスを持つ花崗岩と関係する,
- (c) 鉱床は花崗岩体周縁部かその外側に胚胎する,
- (d) 広域的なゾーニングがある場合には, リチウムに富むペグマタイトは花崗岩体中心より最も離れて産出する,
- (e) リチア輝石に富む鉱床では, リチア輝石の長軸が側壁に直立する傾向があり, その晶出時期は早期である,
- (f) 交代性のリチア輝石は発見されていない,
- (g) Cleavelanditeは一般に壁岩の構成鉱物である,
- (h) アンブリゴナイト(またはモンブラサイト)はこれまで中間帯でのみ発見されている.

マニトバ州のバーニック湖の北岸には変成岩類中

に巨大なテーブル状にペグマタイトが潜在する(第15図). 鉱体は東西方向に1,990m, 南北方向に1,060m, 厚さは最大100m強である (Selway et al., 2000 ; Stilling et al., 2006). この鉱体は明瞭なゾーニングを示し, それが10から90に至る9岩相に分けられ, 詳しいモード解析が行われた(第6表).

最下部の境界相 (Border zone, 10)は, 壁岩とペグマタイトの間に見られるサッコロイダル石英・アルバイト集合体で, その容量比は僅か0.1%である. 次の壁際相 (Wall zone, 20)は43.9%の容積比を持ち, 巨大な微斜長石パーサイト結晶 (<3m)を石英, 中粒のアルバイト, 緑色の粗粒白雲母 (<10cm)が充たす. 次(30)はアプライト質アルバイト岩相で, これは容積比3.4%, サッコロイダルアルバイトと石英にTa-Nb鉱化を伴う.

次の下部中間相(40)は26.1%の容積比を持ち, 下記の2岩相から構成される.

- (1) 微斜長石-パーサイトとリチア輝石, ペタライトを交代した石英仮結晶の大結晶 (<2m)が中粒の石英・アルバイト・雲母類に埋められるもの.

- (2) 石英ポッド(0.5-2.0m)とアンブリゴナイト-モンテブラサイト, 更に密雑に混じったリチア輝石+石英の集合体.

以上は13.2%の容積比を持つ上部中間相(50)に漸移する. これは巨大結晶で特徴付けられる. 例えばアンブリゴナイトは2m, 微斜長石-パーサイトは10m, ペタライトは13mに達する. 中央中間相(60)は7.1%の容積比を持ち, 主に微斜長石-パーサイトと石英(5-40cm), 細粒の緑色白雲母からなり, 大量のTa-Nb酸化物・緑柱石・ハフニウムに富むジルコンを伴う. 石英相(70)は容積比4.9%, その約95%は石英である. Pollucite相(80)は容積比0.5%, 次のリチア雲母相(90)も容積比0.8%, 共に小規模であり, かつ単一鉱物化する.

5.5 北カロライナ州のペグマタイト

アメリカ合衆国のリチウムペグマタイトは北カロライナ州に大きいものが発見されている. それはアパラチア造山帯に属し, 古生代の堆積-変成岩類に産出し, 近傍のCherryville花崗岩が関係火成岩と思われる

第6表 タンコ ペグマタイトの鉱物容量比 (Stilling *et al.*, 2006).

ゾーン番号	(10)	(20)	(30)	(40)	(50)	(60)	(70)	(80)	(90)	全体
容積比 (%)	0.10	43.94	3.38	26.07	13.19	7.14	4.89	0.48	0.81	100.00
Quartz	28.7	36.0	24.0	34.0	11.0	15.0	94.5	11.0	10.0	32.87
Albite	66.0	40.7	70.0	25.0	7.0	20.0	0.1	5.0	8.0	29.34
K-feldspar		15.0		24.0	25.0	50.0	2.0	2.0	10.0	19.95
Muscovite	1.0	3.0	3.0	1.0	0.1	12.0		1.5		2.56
Lithian Muscovite		3.0		2.0	0.1				70.0	2.43
Lepidolite			0.1	0.5	0.1	0.1		3.0		0.169
Petalite				10.0	46.0		1.0	1.2		8.75
Spodumene				0.3	5.0	0.1	2.0	0.5		0.847
Eucryptite					2.0					0.264
Apatite	2.0	0.1	0.4	0.2	0.1	0.2		0.5	0.1	0.143
Lithiophilite	0.1	0.1	0.2	0.5	1.0	0.5			0.2	0.351
Amblygonite		0.5	0.1	1.5	1.0		0.4	0.1	1.0	0.776
Beryl	0.2	0.5	1.0	0.1	0.1	1.0			1.0	0.373
Pollucite				0.5	1.0			75.0		0.62
Tourmaline	2.0	1.0	0.5	0.1	0.1	0.1				0.506
Cassiterite		0.005	0.01	0.01	0.005	0.01			0.01	0.006
Rutile			0.01		0.01	0.01				0.002
Ferrotapiolite			0.01			0.002				0.001
Columbite Group		0.01	0.01	0.01	0.002	0.005			0.01	0.004
Wodginite Group			0.03		0.002	0.04		0.001	0.03	0.006
Microlite Group			0.01	0.015	0.002	0.01			0.02	0.005
Simpsonite						0.001				0.0001
Uraninite					0.005	0.005			0.005	0.0011
Zircon			0.02		0.01	0.02			0.02	0.0036
Biotite	0.1									<0.001
合 計	100.00	99.93	99.48	99.76	99.71	99.18	100.00	99.84	100.41	100.00

ている。ペグマタイトのRb-Sr全岩年代は 340 ± 5 Maである。ペグマタイトはFoote鉱山、FMC-Lithco Hallman-Bean 鉱山など、4鉱山によって稼行された (Kesler, 1961)。

鉱床は広域的には泥質片岩・珪質片岩・石灰質珪酸塩岩・不純大理石地域の片状角閃岩／細粒雲母片岩互層と貫入する石英モンゾニ岩を母岩として、ほぼ南北方向に1.5km、幅400-500mの範囲に、褶曲したレンズ状～層状リチア輝石ペグマタイトが胚胎するものである (Kesler, 1961)。ペグマタイトは、最初均質な微斜長石・石英・リチア輝石脈として形成され、その後、周辺母岩と共に変形・変成し、熱水期の変質・鉱化作用にさらされた。リチア輝石・マンガン含有アパタイト・緑柱石・微斜長石・錫石などが溶解し、鉱体表面がガサガサ化した後に入ってきたリチウム鉱

液は母岩と反応し、リチウムに富む角閃石・電気石などを形成したと考えられている。

Foote鉱山の最盛期の場合、ペグマタイトの平均的鉱物組成(重量比)は次のようであり、高品位であった (Kesler, 1961)。リチア輝石20%、微斜長石14%、アルバイト27%、石英32%、白雲母6%、微量鉱物1%、合計100%。重鉱物には錫石のほか、タンタル石・コロンブ石などが産出する (Wenger *et al.*, 1991)。

6. 総括と今後の展望

火成過程におけるリチウムは深所起源の苦鉄質マグマで乏しく、浅所起源の珪長質マグマで多く含まれる傾向を示す。花崗岩類では初生的な磁鉄鉱系花崗岩類で乏しく、チタン鉄鉱系の珪長質花崗岩類で

富んでいる。その条件のもとで、フッ素・ポロンなどの揮発性元素に富むマグマに濃集する傾向がある。我が国では、“山陽帯”の浅所固結チタン鉄鉱系花崗岩類、すなわち沢入・苗木・大谷鉄鉱岩体などがその例である。ペグマタイトや高温熱水鉄床に見られる濃集も福岡県の長垂、茨城県の妙見山鉄床、苗木・岡山県南部地域など山陽帯のチタン鉄鉱系地帯で見られ、そのマグマはリチウムに富み、かつそのリチウムは流体に溶存して最末期に向けて濃集したことを示している。

日本のペグマタイトは苗木花崗岩中の晶洞性ペグマタイトで代表されるように、母岩の残液、すなわち分化マグマから晶出したものである。日本で最大級のペグマタイトである島根県西部の城山鉄床、新潟県の金丸鉄床でも同様であり、それぞれ母岩花崗岩の残マグマから晶出した(Kihara *et al.*, 2005; Nanbu *et al.*, 1997)。これに対して世界的に大規模なリチウム鉄床は被貫入岩である変成岩類や堆積岩類に胚胎し、延長数km、幅100m規模に達する。グリーンブッシュ鉄床では、ペグマタイトのバルク組成は近傍の花崗岩組成と一致せず、ペグマタイトマグマは広域的な構造運動に伴う地殻中の温度上昇によって低融点鉱物が溶融した、固有の“含流体”ペグマタイト質マグマが発生・上昇・貫入し、鉄床を形成したものである。その形成には広域的な構造運動で生じた大規模な地殻弱線部が必要であり、かつペグマタイト質マグマの注入が年代決定できるほど長い地質時間を通じて行われた結果、大規模鉄床に発展したものと考えられる。

リチウム資源の供給源として、将来的には塩湖堆積物・塩水などに移行するものと思われるが、現実的には(i)品位が高い、(ii)その処理方法などは確立している、などの点で、ペグマタイトにも優位性がある。またリチウムが珪酸塩鉱物として産出するので、ガラス・セラミック材料では直接に用いることができる。カナダの未開発地域では森林伐採隊がまず入山し、道をつけた後で地質探査隊が入るそうであるが、カナダ・北欧・ロシアなどの森林に覆われた古い変成岩地帯では露頭調査で、またペグマタイトの物性は特異であるから浅所の潜頭鉄床としても発見の可能性もあるかもしれない。

謝辞：リチウムに関する基礎的諸問題で討論を賜った岡山大学田中亮吏博士、また原稿を読まれ適切なコメントを賜った産業技術総合研究所の青木正博博士にお礼申し上げる。

文 献

- Anstett, T. F., Karuss, U.H., Ober, J. A. and Schmidt, H. W. (1990) : International strategic minerals inventory summary report - Lithium. U.S. Geol. Surv. Circular 930-I, 28p.
- Baumann, L., Stempok, M., Tischendorf, G. and Zoubek, V. (1974) : Metallogeny of tin and tungsten in the Krusne Hory - Erzgebirge. Guidebook for MAWAM field excursion. Geol. Surv. Czechoslovakia, 66p.
- Bettenay, L. F., Partington, G. A., Groves, C. F. I. and Paterson, C. (1988) : Nature and emplacement of the giant rare-metal pegmatite at Greenbushes, Western Australia. Proc. 7th IAGOD Sym., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 401-408.
- Breiter, K., Sokolova, M. and Sokol, A. (1991) : Geochemical specialization of the tin-bearing granitoid massifs of NW Bohemia. Mineral. Deposita, v.26, 298-306.
- Breiter, K., Forster, H-J. and Seltmann, R. (1999) : Variscan silicic magmatism and related tin-tungsten mineralization in the Erzgebirge-slavkovsky les metallogenic province. Mineral. Deposita, v.34, 505-521.
- Cerny, P. (1993) : Ore deposit models, II. Geosci. Canada. Reprint Series, 6, 29-47.
- Cobbing, E. J., Pitfield, P. E. J., Darbyshire, D. P. F. and Wallick, D. I. (1992) : The granites of the South-East Asian tin belt. British Geol. Surv., Overseas Mem. 10, 369p.
- ESCAP (1995) : Atlas of mineral resources of the ESCAP region. Vol. 11, Geology and mineral resources of Afghanistan. United Nations, 85p.
- Gaines, R.V., Skinner, H.C.W., Foord, E.E., Mason, B. and Rosenzweig, A. (1997) : System of mineralogy, 8th ed., John Wiley & Sons, 1819p.
- Gerstenberger, H. (1989) : Autometasomatic Rb enrichments in highly evolved granites causing lowered Rb-Sr isochron intercepts. Earth Planet. Sci. Lett., v.93, 65-75.
- 五味 篤(2009) : 西豪州レイベンズソープ産リチア輝石について。地学研究, v.58, 167-174.
- 今井秀喜・川井興三・宮沢俊弥(1973) : 日本地方鉄床誌 関東地方。朝倉書店, 518p.
- Imai, N., Terashima, S., Itoh, S. and Ando, A. (1995) : 1994 compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ geochemical reference samples, "Igneous rock series". Geostandards Newsletter, v.19, 135-213.
- Imai, N., Terashima, S., Itoh, S. and Ando, A. (1996) : 1996 compilation of analytical data on nine GSJ geochemical reference samples, "sedimentary rock series". Geostandards Newsletter, v.20, 165-216.
- 石原舜三(1971) : 日本の主要モリブデン鉄床および関連花崗岩質岩類。地質調査所報告, no.239, 176p.
- 石原舜三(1975) : エルツゲビルゲの旅。地質ニュース, no.249, 18-35.
- 石原舜三(2003) : ペグマタイト鉄床。鹿園直建・中野孝教・林 謙一

- 郎編, 資源環境地質学: 地球史と環境汚染を読む. 資源地質学会創立50周年記念号, 17-22.
- 石原舜三(2007): 新しい始生代花崗岩類の分類法. -西オーストラリア州, イルガン地塊を訪ねて-. 地質ニュース, no.630, 42-55.
- Ishihara, S. and Matsuhisa, Y. (2002): Oxygen isotopic constraints on the geneses of the Cretaceous-Paleogene granitoids in the Inner Zone of Southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, v.53, 421-438.
- 石原舜三・渡辺 寧(2007): 熱水性レアアース鉱床: カナダ, トアレイクの例. 資源地質, v.57, 65-70.
- Ishihara, S. and Chappell, B. W. (2008): Chemical compositions of the Paleogene granitoids of eastern Shimane Prefecture, Sanin District, Southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, v.59, 225-254.
- Ishihara, S. and Terashima, S. (2010): Lithium in the magnetite-series and ilenite-series granitoids in Japan. *ZGW* (in press).
- Ishihara, S., Hamano, K. and Ikegami, A. (1998): Isotopic evaluation on the genesis of the Kanamaru pegmatite deposit., Niigata Prefecture, Japan. *Resource Geol.*, v.48, 1-16.
- Ishihara, S., Sawata, H., Shibata, K., Terashima, S., Arrykul, S. and Sato, K. (1980): Granites and Sn-W deposits of Peninsular Thailand. *Mining Geology Special Issue*, no.8, 223-241.
- Ishihara, S., Tanaka, T., Terashima, S., Togashi, S., Murao, S. and Kamioka, H. (1990): Peralkaline rhyolite dikes at the Cape Ashizuri: A new type of REE and rare metal mineral resources. *Mining Geol.*, v.40, 107-115.
- Kesler, T. L. (1961): Exploration of the Kings Mountain pegmatites. *Mining Engineering*, Sept., 1063-1068.
- Kihara, S., Hoshino, K., Watanabe, M., Nishido, H. and Ishihara, S. (2005): K-Ar ages of granitic magmatism and related pegmatite formation at the Umanotani-Shiroyama mine, Shimane Prefecture, SW Japan and their bearings on cooling history. *Resource Geology*, v.55, 123-129.
- 木下亀城編集(1961): 日本地方鉱床誌 九州地方. 朝倉書店, 695p.
- 工業レアメタル編集部(2009): リチウム. 工業レアメタル, No.125, 42-45.
- McDonough, W. F. and Sun, S-s. (1995): The composition of the Earth. *Chemical Geol.*, v.120, 223-253.
- Nanbu, A., Hamano, K., Tanaka, R. and Ishihara, S. (1997): Chemical and mineralogical characteristics of the Kanamaru pegmatite deposit, Niigata Prefecture, Japan. *Resource Geol.*, v.47, 1-10.
- Partington, G. A. (1990): Environment and structural controls on the intrusion of the giant rare metal Greenbushes pegmatite, Western Australia. *Econ. Geol.*, v.85, 437-456.
- Partington, G. A., McBaughton, N. J. and Williams, I. S. (1995): A review of the geology, mineralization and geochronology of the Greenbushes pegmatite, Western Australia. *Econ. Geol.*, v.90, 616-635.
- Rowe, R. B. (1954): Pegmatitic lithium deposits in Canada. *Econ. Geol.*, v.49, p.501-515.
- Rudnick, R. L. and Gao, S. (2003): Composition of the continental crust. *In Treatise on Geochemistry*, (R. L. Rudnick, H. D. Holland and K. K. Turekian eds.). Volume 3. (659p). ISBN 0-08-043751-6. Elsevier, p.1-64.
- Saito, S., Arima, M., Nakajima, T., Misawa, K. and Kimura, J. I. (2007): Formation of distinct granitic magma batches by partial melting of hybrid lower crust in the Izu arc collision zone, central Japan. *Jour. Petrol.*, v.48, 1761-1791.
- 櫻井欽一・豊 遥秋・青木正博・鈴木保光(1977): 茨城県妙見山のリチウムペグマタイト中の鉱物について. 岩鉱, v.72, 13-27.
- Sasaki, A. and Ishihara, S. (1979): Sulfur isotopic composition of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Japan. *Contrib. Miner. Petrol.* v.68, 107-115.
- Seltmann, R. and Faragher, A. E. (1994): Collisional orogens and their related metallogeny - A preface. *In Metallogeny of Collisional Orogens*. *Czech Geol. Surv.*, Prague, 7-19.
- Selway, J. B., Cerny, P. and Hawthorne, F. C. (2000): The Tanco pegmatite at Benic Lake, Manitoba, XIV. Internal tourmaline, Canadian Mineral., v.38, 877-891.
- 柴田秀賢(1951): リシウム及びセシウム鉱. 日本鉱産誌 BII 主として化学工業原料及び肥料原料となる鉱石. 地質調査所, 329p.
- Stilling, A., Cerny, P. and Vanstone, P.J. (2006): The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoe. XVI. Zonal and bulk compositions and their petrogenetic significance. *Canadian Mineral.*, v.44, 599-623.
- Sun, S-s. and McDonough, W. F. (1989): Chemical and isotopic systematics of ocean basalts and implications for mantle composition and processes. *In A.D. Saunders and M.J. Norry eds.: Magmatism in the ocean basins*. *Geol. Soc. London*, 313-345.
- 滝本 清(1937): 福岡市外長垂・金武付近の地質. 九州帝国大学工学集報, v.12, 182-197.
- 寺島 滋・石原舜三(1974): 東北日本を中心とする2・3の地域の堆積岩・火山岩・変成岩類の銅・亜鉛・鉛・リチウム・ナトリウム・カリウム・塩素・フッ素について. 地質調月報, v.25, 547-558.
- Tsambourakis, G. and Frost, M.T. (1990): Spodumene from the lithium pegmatite at Greenbushes, Western Australia. *Australian Mineral.* v.5, 19-23.
- USGS (2009): Mineral commodity summaries 2009. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2009/mcs2009.pdf>
- USGS (2010): Mineral commodity summaries 2010. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2010/mcs2010.pdf>
- Wenger, M., Armbruster, T. and Geiger, C.A. (1991): Cation distribution in partially ordered columbite from the Kings Mountain pegmatite, North Carolina. *Amer. Mineral.*, v.76, 1897-1904.

ISHIHARA Shunso (2010): Lithium in granite petrology and lithium resource in pegmatites.

<受付: 2010年4月2日>