

# 西オーストラリア州：電池金属生産の世界的拠点

by  
TJ Beardsmore

## 電池社会経済を推進

一般に、世界人口の個人的な豊かさや生活水準の改善は、エネルギー、可動性そして消費財へのますます大きくなる需要を創造するが、同時に自然環境における人為的汚染への意識、およびそれを著しく軽減したいという熱意も増加する。社会はその結果、住居や店舗、産業地へ、またそれらをつなぐ世界的輸送網そして急成長する一連の携帯用電子機器へ電力を供給するため、再生可能エネルギーの一層の活用へ向かう。

再生可能エネルギーは通常、断続的もしくは一過性的のものであり、そのエネルギーの流通を貯蔵し調整するため、必然的に充電式電池の使用が必要となる。電池は異なる物質（単一元素もしくは多元素化合物）からできた2つの電極（陽陰）から成り、陽イオン導電性流体もしくはゲル電解質でつながれるが、電極間の直接電子流に影響を受けず、全てケーシング内に収まる (Fig.1a)。電池構成物質および構造は、原料物質や製造コスト、混合成分の安定性、電気化学反応（再充電可能性）と使用温度範囲の制約内で、端子電圧、質量、エネルギー密度（単位質量、単位体積当たりの貯蔵エネルギー量）、耐久性、費用と安全性のような特定用途向け特性を最大限に利用する。可能な電池構造は極めて豊富で、絶えず拡大しており、周期表（特にアルミニウム、アンチモン、ヒ素、バリウム、カドミウム、炭素、カルシウム、コバルト、鉄、ランタン、鉛、リチウム、マンガン、ニッケル、リン、セレン、ナトリウム、硫黄、錫、チタン、バナジウム、亜鉛）のかなりのものを使用する。

いわゆるリチウムイオン電池の使用が普及してきたのは、その大きさに実用的制約がないこと、比較的軽量で、通常他の電池型を上回る電圧やエネルギー密度、再充電率を備え、製造コストが低下しているためだ。リチウムは、放電および再充電の際、効率良く電極から放出、吸収されるため、電化輸送陽イオンとして利用される。しかしながら、リチウムイオン電池の大部分は、その他多くの物質で構成される。

最高のエネルギー密度を持つこれらの電池は - 大規模系統電力貯蔵や、ガソリン電気ハイブリッド車および電気自動車の動力に適している - 大量のニッケル、コバルト、マンガン、アルミニウム、グラファイトを必要とする (Table 1 ; Fig. 1b)。

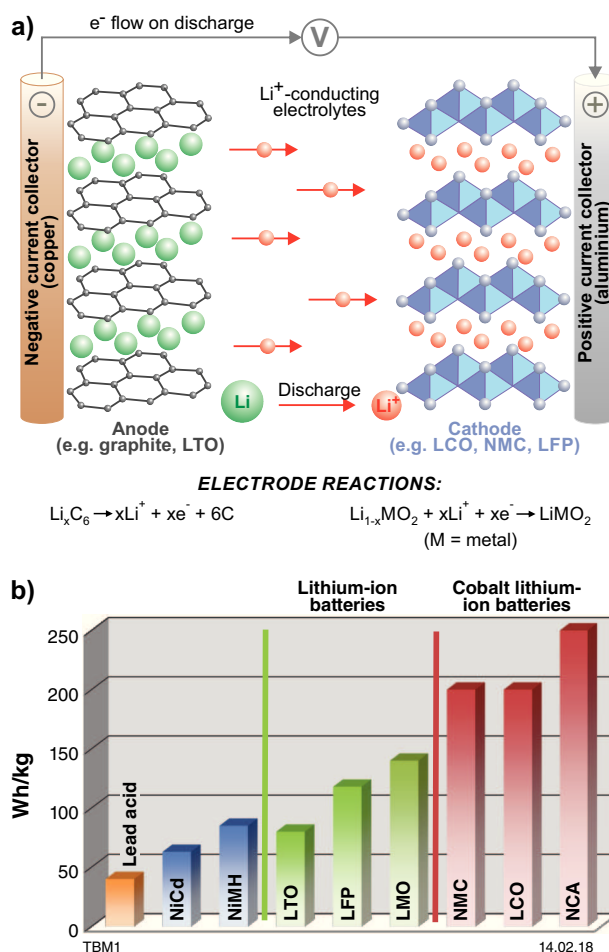


Figure 1. リチウムイオン電池の主特性は、a)回路構造および電極反応 (Wiaux and Chanson後に修正、2013)； b)一般的な電池型と一致する比エネルギー

略語：NiCd, ニッケルカドミウム；NiMH, ニッケル金属水素化物；その他の略語はTable 1を参照； Battery University後に修正 (2017、fig.15)

**Table 1.** 陰極構成と主用途をリスト化した一般的なリチウムイオン電池型 (Battery University, 2017)。大容量型は現在、携帯機器、電気自動車、系統電力貯蔵に使用されている (太字で表示)。

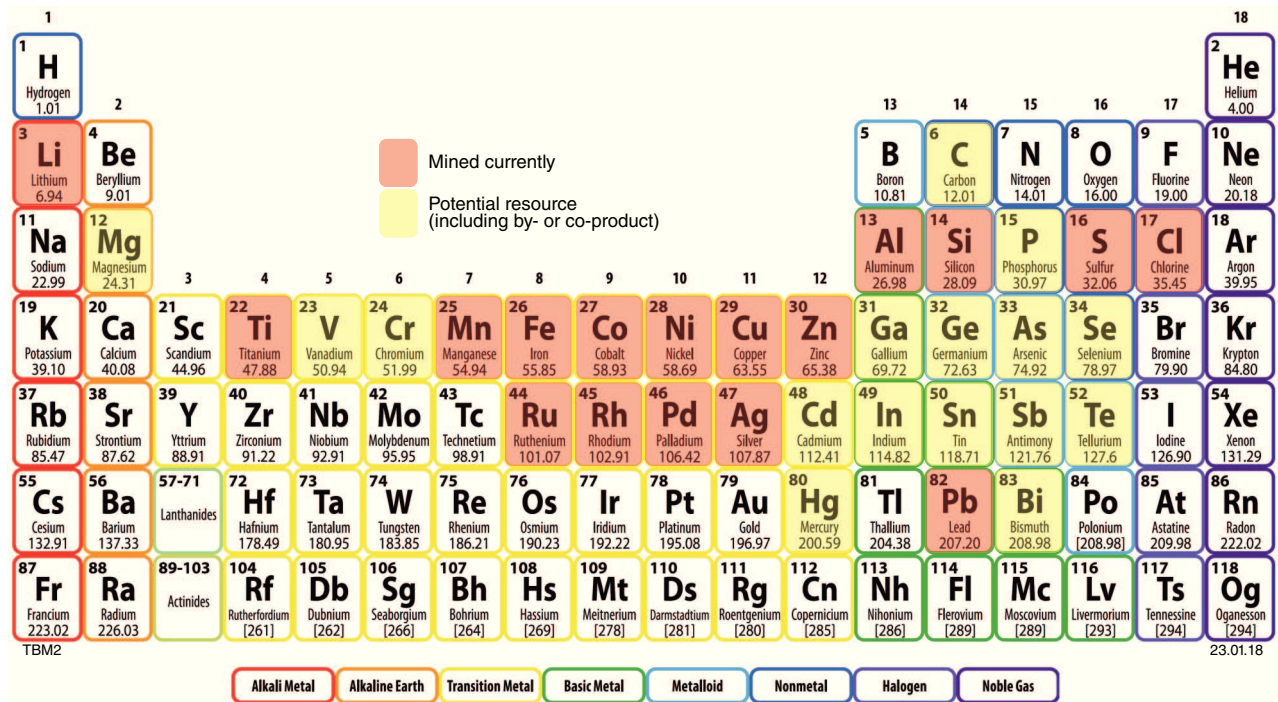
Chemical name (abbreviation)	Cathode material	Anode material	Nominal voltage per cell (V)	Specific energy (Wh/kg)	Applications
<b>Lithium cobalt oxide (LCO)</b>	<b>LiCoO<sub>2</sub></b>	<b>graphite</b>	<b>3.60</b>	<b>150–200</b>	<b>Mobile phones, tablets, laptops, cameras</b>
Lithium manganese oxide (LMO)	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	graphite	3.70, 3.80	100–150	Power tools, electric vehicles, medical devices, hobbyist
Lithium iron phosphate (LFP)	LiFePO <sub>4</sub>	graphite	3.20, 3.30	90–120	Power tools, electric vehicles, medical devices, hobbyist
<b>Lithium nickel manganese cobalt oxide (NMC)</b>	<b>LiNiMnCoO<sub>2</sub></b>	<b>graphite</b>	<b>3.60, 3.70</b>	<b>150–220</b>	<b>Power tools, electric vehicles, medical devices, hobbyist</b>
<b>Lithium nickel cobalt aluminium oxide (NCA)</b>	<b>LiNiCoAlO<sub>2</sub></b>	<b>graphite</b>	<b>3.60</b>	<b>200–260</b>	<b>Electric vehicles, grid storage, medical devices</b>
Lithium titanate (LTO)	LMO or NMC cathode	Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	2.40	50–80	Electric vehicles, grid storage, solar street lighting

西オーストラリア州の電池金属の貢献

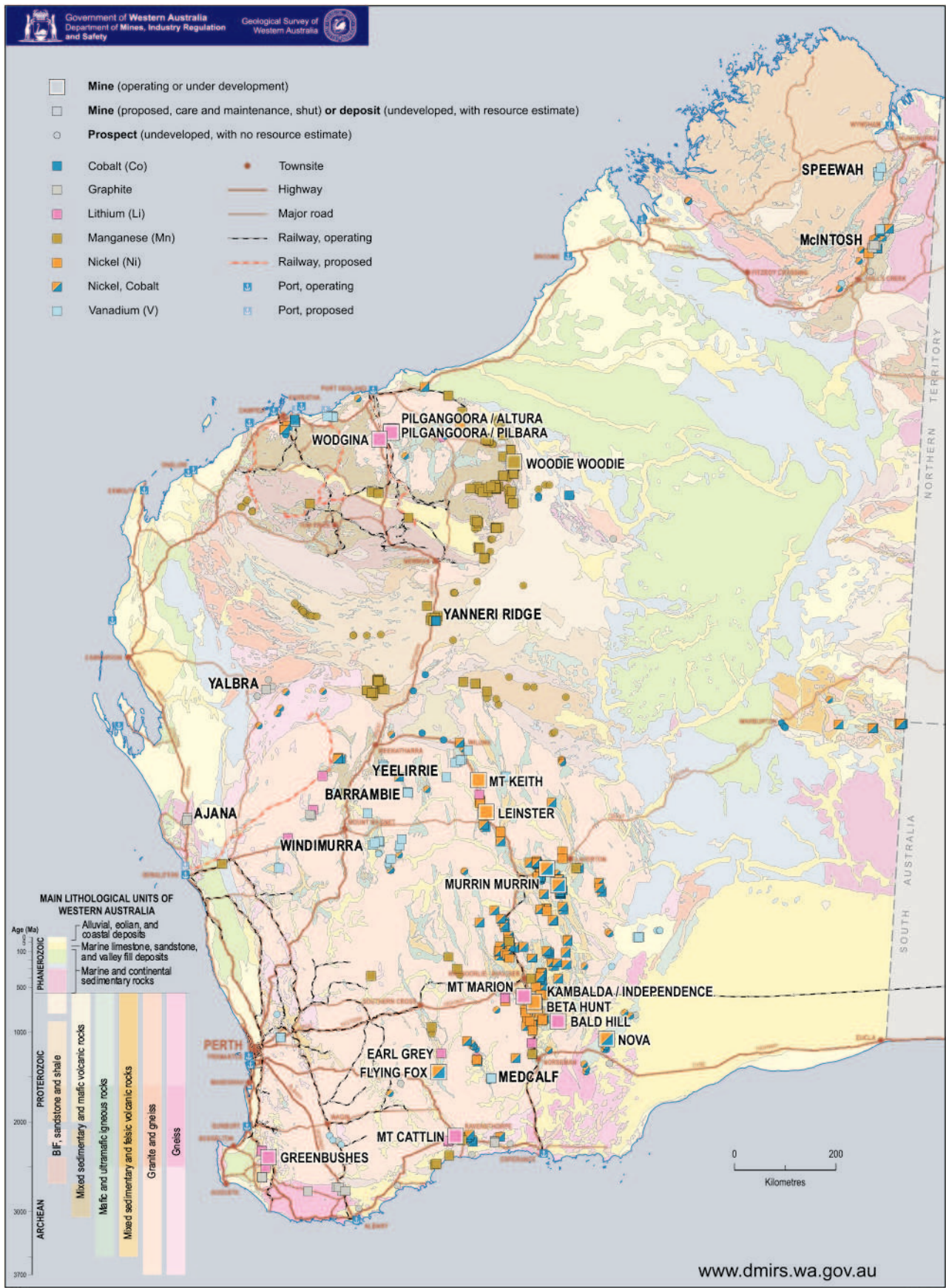
西豪州は、現在あるいは将来的に電池製造業が必要とする鉱物のほとんどではないにしても多くを供給することができるだろう (Figs 2, 3)。近年のリチウムイオン電池技術開発への商業的注目を踏まえ、同州の実際のあるいは、将来的な貢献を、すでに電池に使用されている6種の代表的な金属についてこの論文で解説する - リチウム、グラファイト (厳密には金属ではない)、ニッケル、コバルト、マンガン、バナジウム (Table 2)。

リチウムは、主にペグマタイトと蒸発残留岩の海水レーキにより生じる (Dill, 2010)。

西豪州には、海水鋳床は知られていないが、リチウム・ペグマタイトには大変恵まれており (Fig. 3)、世界最大の単一鋳床もある (グリーンブッシュ鋳山)。州内ではグリーンブッシュ (Talison Lithium社)、マリオン (Reed Industrial Minerals社)、キャトリン (Galaxy Resources社)、ウォッジーナ (Mineral Resources社) という4つのリチウム鋳山が生産稼働中で、2013年以降世界最大のリチウム生産地となり (チリ、アルゼンチン、中国が続く)、2016年の世界供給量の41% (14.3kt) を産出した (Jaskula, 2017)。高まる需要と予測される消費により、価格が押し上げられ、同州ではリチウム探査、開発が急上昇し、生産量が大幅に増加し (2017年末時点で11.6Mt; Fig. 4a; Table 2)、2016年には世界第4位となった (アルゼンチン、チリ、中国に次ぐ; Jaskula, 2017)。



**Figure 2.** 現在もしくは将来的に西豪州で採掘される、通常電池に使用されるものを強調した元素周期表 (ランタニドおよびアクチニドは含まない)。



TBM3

01.02.18

Figure 3. 代表的な「電池金属」6種：コバルト、グラファイト、リチウム、マンガン、ニッケルおよびバナジウムの西豪州に存在する重要な鉱脈および産出地

Table 2. 代表的な「電池金属」6種の西豪州の産出量および世界シェア

Commodity	Resources (kt) <sup>(a)</sup>	% of global resources <sup>(b)</sup>	Global resource ranking <sup>(b)</sup>	Production 2016 (kt) <sup>(b)</sup>	% of global production <sup>(b)</sup>	Global production ranking <sup>(b)</sup>
Lithium (Li <sub>2</sub> O)	11 572.1	11.4	4	14.3 <sup>(c)</sup>	41	1
Graphite (TGC) <sup>(d)</sup>	1 931.0	negligible	–	0	0	–
Nickel (Ni)	34 945.8	26.9	1	206 <sup>(e)</sup>	9.1	4
Cobalt (Co)	1 319.5	14.3	2	5.1	4.2	5
Manganese (Mn)	88 687.1	6.4 <sup>(f)</sup>	4	0 <sup>(g)</sup>	0	–
Vanadium (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	23 867.8	9.5 <sup>(h)</sup>	4	0	0	–

NOTES: (a) Total contained metal or oxide resources as at 31 December 2017. Source: DMIRS MINEDEX database <www.dmp.wa.gov.au/minedex>  
 (b) Estimates are based on resource and production figures from the USGS Mineral Commodity Summaries for 2016, unless otherwise indicated: Lithium – Jaskula (2017); Nickel – Schnebele (2017); Cobalt – Shedd (2017); Manganese – Corathers (2017); Vanadium – Polyak (2017)  
 (c) Western Australia accounted for all Australian lithium production in 2016 (Britt et al., 2016)  
 (d) TGC – Total graphitic carbon  
 (e) Nickel production and global percentage estimates are for Australia, but in 2016 Western Australia accounted for all of these  
 (f) Estimate is for 2015, determined using Western Australia resources from DMIRS MINEDEX database <www.dmp.wa.gov.au/minedex>, total Australia resources from Britt et al. (2016) and global estimates from Corathers (2016)  
 (g) Western Australia's only operating Mn mine at Woodie Woodie went into care and maintenance in January 2016, and recommenced mining in late 2017  
 (h) Australian V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> resources are predominantly in Western Australia, but the estimate by Polyak (2017) is likely to be significantly understated

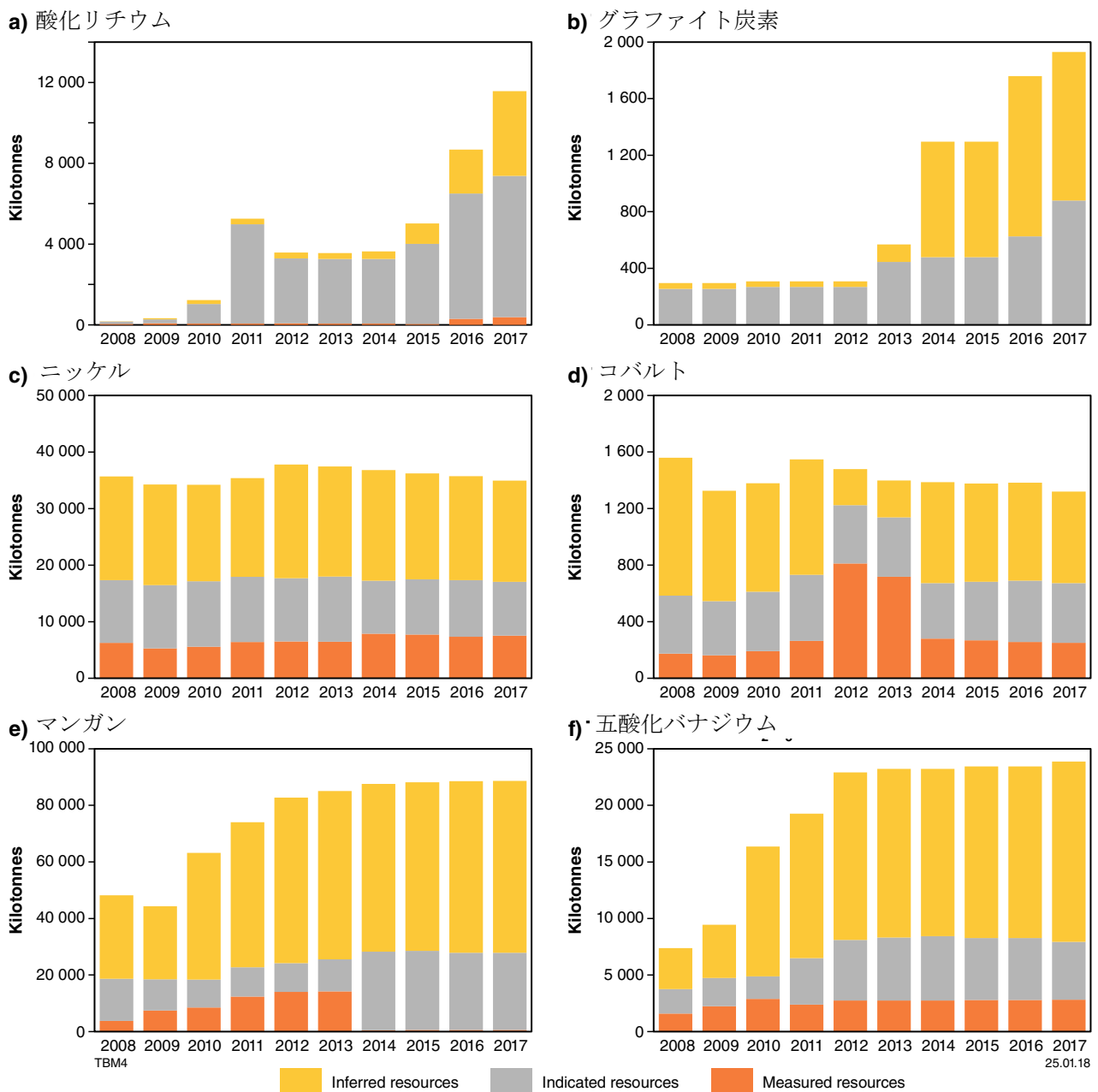


Figure 4. 西豪州の年別累計 a) リチウム、b) グラファイト炭素、c) ニッケル、d) コバルト、e) マンガン、f) バナジウム (出典: www.dmp.wa.gov.au/minedex)

Talison Lithium社は、間もなくグリーンブッシュ鉱山でのリシア輝石生産量を倍増させる（～800 ktpa）予定で、ピルバングーラ（Pilbara Minerals社； Altura Mining社）、ボード・ヒル（Tawana Resources社／ Alliance Mineral Assets社）、アール・グレイ（Kidman Resources社／ Sociedad Química y Minera de Chile社）などその他プロジェクトも急速に採鉱に向けて前進している。

グラファイトは、多くの電池型の重要な構成要素であるが（特に陽極）、原料は高純度かつ適切な粒径でなければならない。西豪州の100以上のグラファイト産地は、散在的な熱水鉱脈とペグマタイト鉱脈が知られているが（例：アジャナ鉱山-Anson Resources社；カタニング周辺）、圧倒的に始生代から中生代のグラファイト片岩もしくはグラファイト片麻岩である（変成炭素堆積岩）。2Mtまでのグラファイト（Fig. 4b；Table 2）は、西豪州の「稼働中の」プロジェクト13件のうちの4件に含まれ、全てグラファイト片岩もしくは片麻岩内にあるが、同州はまだグラファイト生産地ではない。最も進行中のプロジェクト2件は、キンバリー東マッキントッシュ（Hexagon Resources社）およびガスコインのヤルバラ（Buxton Resources社／Montezuma Mining社）。州産グラファイトは、産出量としてはごく少量だが、球状グラファイトや新たに作り出されたグラフェンの産出に適した高純度で粗い（大きなフレーク状）グラファイトを産出できる可能性がある。

ニッケルは、主に超苦鉄質（コマチアイト質）の火山性苦鉄質貫入岩の硫化物内および、元来硫化物が含まれる母岩で生じた浅成富化ラテライトの硫化物内にある（Dill, 2010）。西豪州は、これら全ての鉱物鉱脈に大変恵まれており、世界最大のニッケル埋蔵量を誇る（全体の27%もしくは87鉱脈において35Mtを産出；Fig. 4c；Table2）。また同州は、国内唯一のニッケル産出地で、価格が低迷するなか（2014年のUS\$20,000/tより大幅下落し現在約US\$13,000/t；2018年1月17日時点 [www.kitcometals.com/charts/nickel\\_historical\\_large.html](http://www.kitcometals.com/charts/nickel_historical_large.html)）、わずか8鉱山から供給している。2016年の産出量は206ktで、世界シェア9.1%で同州は世界第4位となった（カナダ、フィリピン、ロシアに続く）。その他25鉱山は保全中だが、価格が十分に上昇すれば、その多くは再稼働できる。

コバルトは、多くの電池設計において重要な物質であり、供給制限に対する脆弱性の認識により価格が上昇した - 2016年には47%、2017年には57%上昇（2017年3月時点で約US\$51,000/t）。主に、苦鉄質もしくは超苦鉄質マグマ性ニッケル銅鉱脈、銅堆積物鉱脈である層準規制鉱床の銅関連の微量元素として生じる（Dill, 2010）。コンゴ民主共和国に次ぐ、世界第2位の西豪州コバルト埋蔵量は、37の苦鉄質および超苦鉄質マグマ性鉱脈のニッケル銅硫化物およびニッケル・ラテライト鉱石に計1.32Mt存在する（Fig. 4d；Table2）。同州で生産されたコバルトは全て、ニッケル硫化物およびラテライト鉱石の副産物で（5,140t/2016年；[www.dmp.wa.gov.au/minedex](http://www.dmp.wa.gov.au/minedex)）、世界生産量の4.1%に相当する（中国、カナダ、コンゴに次ぐ世界第4位）。コバルトの等級は、浅成富化処理しない限り、独自に経済に影響しない。さらに、見込みのある鉱脈はいまだ予備的な実現可能性があるという段階にもかかわらず、同州の独立した資源を定義しようと関心が向けられている。

マンガンは、元来マグマ性熱水（火山性発散、浅熱水、スカルン）、構造的に制御された熱水、もしくは海洋体積発散、碎屑性鉱床（黒色頁岩、炭酸塩、深海団塊を含む）にある可能性がある。これら全てはまた（一般に経済的に必要な）、浅成富化作用を示す可能性もある（Dill, 2010）。西豪州の知名度の高いマンガン鉱床は従来、海成頁岩、炭酸塩、鉄鉱層の浅成富化発散性もしくは碎屑性体積鉱床と考えられているが、ジョーンズ（2011）は、ウッディ・ウッディ・キャンプの浅成富化炭酸塩鉱床は、代わりに構造的に制御された熱水の源泉である可能性を示唆した。同州のマンガン鉱床は、ピルバラ-カプリコーン地域に広がり、その量は88Mtを超過（Fig. 4e）、39鉱床のうち、わずか14箇所に大量に埋蔵する。これは、世界シェアの6.4%に相当し、ブラジル、南アフリカ、ウクライナに次ぐ、世界第4位である（Table2）。同州は、50年以上のマンガン生産実績があり、ほぼ例外なく製鉄業で冶金に使用されるが（主用途）、現在稼働中の鉱山は、マンガン経済が改善したことで再稼働したばかりのウッディ・ウッディ（Consolidated Minerals社）だけである。世界的なマンガン需要は、系統電力貯蔵、電気自動車や医療機器に使用される大容量リチウムイオン電池型に使用する高純度電解二酸化マンガンをへる高まる需要によるところもあり、過去10年間で倍増した（20Mt/2017年）。西豪州拠点の企業のなかには、そのため自社プロジェクトを明確に電解二酸化マンガンの供給源として評価しているところもある（例：ヤネリ・リッジ；Montezuma Mining社）。

バナジウムは現在西豪州で、24Mt（五酸化バナジウム）を埋蔵し、世界第4位（中国、ロシア、南アフリカに次ぐ）、世界シェア9.5%（Fig. 4f；Table2）。主に、正マグマ苦鉄質-超苦鉄質貫入（例：ウィンディムラ、スピーワー、バランビー）のバナジウム鉄チタン磁鉄鉱に生じる。キンバリー東スピーワー鉱床（King River Copper社）は国内最大のチタン磁鉄鉱床で、州の確認された埋蔵量の半分以上を含むが、2000年以降の五酸化バナジウムの州総生産量は、わずか14,100tで、唯一開発済みのバナジウム鉱床は - ウィンディムラ（Atlantic社） - 保全中である。同州バナジウムは、輝岩（メドカルフ、Audalia Resources社）上のラテライト表土内にあるとして知られ、砂岩およびカルクリートウラン（エーリーリー、Cameco Australia社）とも関連している。その他、重鉱物砂鉱や熱水卑金属鉱脈鉱床を含む可能性のあるバナジウム資源は、同州でいづれもいまだ見つかっていない。

その他多くの金属 - アルミニウム、アンチモン、ヒ素、バリウム、カドミウム、カルシウム、銅、鉄、鉛、リン、レア・アース、セレン、ナトリウム、硫黄、錫、チタン、亜鉛 - もまた特定の電池設計に用いられる。西豪州には、これら金属の多くの資源があり、特定の鉱床からすでに大量の供給を行っている（例：Al, Cu, Fe, Na, Pb, REE, S, Ti, Zn）。なかには、経済的な理由から開発されていない鉱床や（例：重構造苦鉄質貫入岩のチタン磁鉄鉱チタン；カオリン粘土の高純度アルミニウム）、少量の電池金属（例：体積リン酸塩のリン；ペグマタイトの錫）、

すでに輸出されたものやその他の鉱石の有害な副産物となるものもある（例：銅鉱石や石炭のセレン；亜鉛鉱石のカドミウム）。

## 電池金属の西豪州内での処理？

現在西豪州から輸出されている「電池金属」はすべて、原鉱濃縮物で、海外のプラントで第三者により二次加工や価値の付加が行われる。しかしながら、現在および将来的に多くの電池金属生産企業は、株主利益を最大化するため、生産物の社内もしくは共同投資による処理へ向け動いている。

Tianqi Lithium Australia社 (Talison Lithium社およびグリーンブッシュ鉱山の51%を所有) は、グリーンブッシュ鉱山のロシア輝石処理のため、パース南クイナナに水酸化リチウム処理施設 (LHPP) を建設中 (2016年11月5日発表)。このLHPPは世界最大で、最高品質の水酸化リチウムを生産すると言われている。2017年11月、グリーンブッシュのパートナー企業Albermarle社は、カメルトンに自社の水酸化リチウム処理プラント建設を提案。BHPは2017年8月、クイナナに電解ニッケルを年間10万トン生産する世界最大の硫酸ニッケル処理施設建設を発表し、Northern Minerals社は、ブラウンス・レンジ鉱山で混合レア・アース炭酸塩生産のため、間もなく湿式製錬パイロット・プラント (鉱区内) を発注する予定だ。

Lepidico社、Lithium Australia社、NeoMetals社のようなリチウム開発企業は、様々な「硬岩」ケイ酸塩鉱物のリチウムから炭酸、水酸化およびチタン酸リチウムを生産する新型の自社湿式製錬処理法を開発中。これにより、多くのペグマタイト・リチウム鉱床を経済的に継続可能な状態にできる (L-max、SiLeach、LiOH酸浸出処理)。その他企業は、ラテライト鉱床からコバルトやニッケルを抽出 (例：大気圧HCl浸出 - Ardea Resources社)、チタン磁鉄鉱からバナジウム、チタン、鉄を抽出 (例：NEOMET法 - NeoMetals社)、そしてカオリンから高純度アルミナを抽出 (Altech Chemicals社) する、別のより費用効率の高い湿式製錬、電気化学処理の開発および商業化を試みている。Montezuma Mining社は、ブッチャーバード (ヤネリ・リッジ) マンガン鉱床から電解二酸化マンガンを生産するための処理開発をCSIROに委託した。適切な経済力を受け、新規処理施設のいくつかは州をまたいで、もしくはオフショアの可能性があるものの西豪州に建設される可能性がある。

## 西豪州 - 未来の電池生産の世界的拠点

電池研究開発は、周期表の元素の相当部分を占める世界的な需要に直接影響する巨大かつ絶えず拡大する多様な化学や構造を生み出してきた活力に満ちた分野である。また、これまで競争力が弱かった設計を、優位性のある電池型へ挑戦させることで、既存の電池性能を改善し続ける (例：Black、2017 続いてWeiその他、2017)。

世界的な環境への懸念と、国益優先は - EUのMETGROW+戦略のように <http://metgrowplus.eu/> - そうでなければ低級鉱化、冶金廃棄物 (スラグ、ヘドロ等) や不要な製造品 ('e-waste') の「重要な」要素となりうる貴重鉱物をより利益が出るように抽出する技術開発により、原料資源経済にも影響する。

西豪州は資源投資先としての高い評価と (Jackson and Green、2017)、包括的な資源品目により、技術、経済開発にかかわらず、将来的に電池製造業への原料サプライヤーとしての地位が保証されている。適切な市場条件、政府の政策とインフラ開発により、西豪州は電池原料の州内での最終処理および製造分野のさらなる拡大により莫大な追加の経済的利益を得ることができるだろう。

## 参考文献

- Battery University 2017, BU-205: Types of lithium battery; <[http://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_lithium_ion)>, accessed 18 January 2018.
- Black, H 2017, Battery breakthrough - in zinc: Premium Mining News, 21 August 2017; <[www.miningnews.net/insight/feature-stories/battery-breakthrough-in-zinc](http://www.miningnews.net/insight/feature-stories/battery-breakthrough-in-zinc)>, accessed 18 January 2018.
- Britt, A, Summerfield, D, Senior, A, Roberts, D, Kay, P, Hitchman, A, Champion, D, Huston, D, Simpson, R, Smith, M, Sexton, M and Schofield, A 2016, Australia's Identified Mineral Resources 2016: Geoscience Australia, Canberra, 16p., doi:10.11636/1327-1466.2016.
- Corathers, LA 2016, Manganese in USGS Mineral Commodity Summaries, January 2016, p. 106-107, doi:10.3133/70194932.
- Corathers, LA 2017, Manganese in USGS Mineral Commodity Summaries, January 2017, p. 106-107, doi:10.3133/70194932.
- Dill, HG 2010, The 'chessboard' classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium: Earth Science Reviews, v. 100, p. 1-420.
- Jackson, T and Green, KP 2017, Fraser Institute Annual Survey of Mining Companies 2016: Fraser Institute, 70p., <[www.fraserinstitute.org](http://www.fraserinstitute.org)>.
- Jaskula, BWJ 2017, Lithium in USGS Mineral Commodity Summaries, p. 100-101, doi:10.3133/70194932.
- Jones, S 2011, Proterozoic deformation in the east Pilbara Craton and tectonic setting of fault-hosted manganese at the Woodie Woodie mine: Australian Journal of Earth Sciences, v. 58, p. 639-673.
- Polyak, DE 2017, Vanadium in USGS Mineral Commodity Summaries, January 2017, p. 182-183, doi:10.3133/70194932.
- Schnebele, EK 2017, Nickel in USGS Mineral Commodity Summaries, January 2017, p. 114-115, doi:10.3133/70194932.
- Shedd, KB 2017, Cobalt in USGS Mineral Commodity Summaries, January 2017, p. 52-53, doi:10.3133/70194932.
- Wei, L, Karahan, HE, Zhai, S, Liu, H, Chen, X, Zhou, Z, Lei, Y, Liu, Z and Chen, Y 2017, Amorphous bimetallic oxide-graphene hybrids as bifunctional oxygen electrocatalysts for rechargeable Zn-air batteries: Advanced Materials, v. 29, no. 38, 10p., doi:10.1002/adma.201701410.
- Wiaux, JP and Chanson, C 2013, The lithium-ion battery service life parameters: Presentation to the UN Informal Working Group on Electric Vehicles and the Environment, Session 6, Geneva, 3 June 2013, <[www2.unece.org/wiki/download/attachments/8126481/EVE-06-05-Rev1e.pdf](http://www2.unece.org/wiki/download/attachments/8126481/EVE-06-05-Rev1e.pdf)>, accessed 21 January 2018.