

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

蓄電池システム (Vol.3)

ーリチウム空気電池のコスト評価と技術開発課題ー

平成28年3月

Secondary Battery System (vol.3):

Cost Evaluation and Technological Challenges of a Lithium-air Battery

Strategy for Technology Development

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2015-PP-02

概要

低炭素社会戦略センター (LCS) ではこれまで、従来の Co、Mn、Ni 系正極活物質と黒鉛負極活物質、あるいは新規 Li_2O 正極活物質とシリコン系負極活物質を組み合わせたリチウムイオン電池を設計し、2030 年に高容量化活物質を用いた蓄電池の製造コストは 5 円 / Wh_{ST} まで削減可能であることを示した。一方、低炭素社会の実現に向けて、様々な低炭素システムの社会への導入・普及を推進するためには、高出力、高容量、低コストな蓄電技術を確立することが必要となる。本稿は、リチウムイオン電池より更なる高いエネルギー密度が期待されているリチウム空気電池について検討した。具体的には、リチウム・グラフェン負極と実験結果で報告されている容量密度 2000mAh/g の多孔質グラフェン正極を用いて、10kWh の定置型電池システムの設計と性能及びコスト評価を行った。評価結果により、リチウム空気電池のシステムエネルギー密度は 180 Wh_{ST} /kg であり、製造コストは 28 円 / Wh_{ST} となった。

Summary

Center for Low Carbon Society Strategy (LCS) has been designing several lithium ion batteries, which are the combinations of conventional cathode active materials, i.e. lithium cobalt oxide, lithium manganese oxide, lithium nickel oxide with graphite as anode active material, and innovative cathode active material of Li_2O with silicon-based anode active materials. The results showed that production cost of the designed battery is possibly reduced to 5 JPY/ Wh_{ST} in year 2030 by utilizing high-capacity active materials. On the other hand, introduction and propagation of high power, high specific energy, and low-cost batteries is necessary to realize a low carbon society. In this proposal, we examined a lithium-air battery which is expected to have higher density energy than a lithium ion battery. Specifically, we designed a 10kWh lithium-air battery system for stationary storage, which is composed by lithium-graphene anode and porous graphene cathode with 2000mAh/g capacity. Performance and cost of this battery system are analyzed. This analysis reveals the specific energy of the lithium-air battery system is 180 Wh_{ST} /kg, and the production cost is 28 JPY/ Wh_{ST} .

目次

概要

1. 緒言	1
2. リチウム空気電池の原理および設計	1
2.1 原理と研究開発の動向	1
2.2 空気電池の仕様と設計	1
3. 定置用リチウム空気電池システムのコスト	6
4. 考察と技術開発に関する課題	8
4.1 定置用リチウムイオン電池との比較	8
4.2 技術開発に関する課題	8
5. 政策立案のための提案	9
参考文献	9

1. 緒言

近年、温暖化に伴う異常気象や水害などのリスクが懸念されている中で、日本のみならず世界各国は様々な気候変動対策に取り組んでいる。昨年（2015年）末にパリで開かれていた第21回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）において、先進国である日本は、排出する温暖化ガスを2030年までに2013年比で26%削減するという目標と、その目標を達成するための取り組みを示した[1]。こういった低炭素社会づくりには、エネルギー高依存技術から低炭素化技術へ転換していく必要がある。例えば、供給技術である太陽光発電や風力発電のような再生可能エネルギーの導入拡大に加えて、需要側において電気自動車（EV）やプラグインハイブリッド自動車（PHEV）、定置用蓄電装置などの低炭素技術の普及は有効な対策だと考えられる。低炭素社会の実現に向けて、上述したような様々な低炭素システムの社会への導入・普及を推進するためには、高出力、高容量、低コストな蓄電技術を確立することが必要である。

LCSではこれまで、従来のCo、Mn、Ni系正極活物質と黒鉛負極活物質、あるいは新規Li₂O正極活物質とシリコン系負極活物質を組み合わせたリチウムイオン電池を設計し、2030年に高容量化活物質を用いた蓄電池のコストは5円/Wh_{ST}まで削減可能であることを示した[2]。一方、電気自動車用の電池として、2030年に700Wh/kg以上のエネルギー密度のある蓄電池が求められるが[3]、その目標を達成する上で既存型リチウムイオン電池は、設計限界に達している。本稿では、次世代二次電池の中で理論エネルギー密度が最高となるリチウム空気電池の性能及びコストについて検討する。

2. リチウム空気電池の原理および設計

2.1 原理と研究開発の動向

リチウム空気電池は1990年代に初めて報告され、ガソリンに匹敵する5,200Wh/kgという高い理論エネルギー密度を持つため[4]、「革新型二次電池」として期待されている。リチウム空気電池とは、多孔質炭素を正極、金属リチウムを負極、有機電解液を電解液とした構造であり、これらと正極側の酸素源で構成される。放電する際に、負極活物質のリチウムイオンと正極活物質の多孔質炭素を透過する酸素が反応して過酸化リチウム（Li₂O₂）を生成することで電力を得ている。充電は逆反応である。

空気電池についての研究開発は活発化しており、日本において特に他国に比べて多く行われている。例えば、2002年～2011年の間の特許出願の内、日本の出願数は39.2%で首位となっている[5]。また、日本のファンディングエージェンシーから研究支援を受け、空気電池に関する様々な基礎研究が行われているが、デバイス構成はまだ決定的なものではなく、実用化には到っていない状況である[6]。こういった状況を踏まえたうえで空気電池の性能、将来のコスト、および具体的な要素技術開発との関係を定量化し、評価する必要がある。

2.2 空気電池の仕様と設計

今回の試算は、10kWhの定置型蓄電システムを想定して設計する。リチウム空気電池はラミネート型電池構造として、電極材をパウチ材に包材し、さらにそのセルを保護する収納箱に入れる構造を想定した。電極材として、リチウム・グラフェン負極と実験結果で報告されている容量密度2000mAh/gの多孔質グラフェン正極[7]を用いて、10kWhの定置型電池システムの設計と性能およびコスト評価を行った。

(1) ラミネートセルの設計

空気電池の中に使われている電極シート 1 枚 (両面塗布) の構造を図 1 のように設計した。電極シートは、正・負極活物質、正・負極集電材、セパレータと電解液から構成される。図 1 に示したように、リチウム空気電池は放電する際に、リチウムイオンと酸素が反応し、正極で固体 Li_2O_2 を生成する。正極には、 Li_2O_2 を収容するための空間と、または反応速度を上げるための大きな表面積が必要である。この条件を満たすものとして、微細な空孔が多数存在する多孔質グラフェンを採用し、正極集電材である Cu 箔の上に酸化ルテニウム (RuO_2) ナノ粒子触媒を多孔質グラフェン層の微細な空孔間に入りこんだ構造の正極活物質とした [7]。また、正極は空気を取り入れる構造が必要であり、ここでは 2 面正極電極の間にキャピラリー状のスペーサーを入れる設計とした。空気電池の負極活物質は一般的に金属リチウムが使われているが、放電の際にリチウムイオンが集電体基板から電気的遊離し、電気導通が切れ、放電が出来なくなるため、ここではリチウム・グラフェンを負極として設計した。正極のグラフェンと同じく微細な空孔が存在するため、微粒子のリチウム金属をその空間に入れることが可能である。セパレータとしては、負極に使用されるリチウムの金属酸化を防ぎ、空気と水を遮断し、リチウムイオンのみ伝導するセラミックセパレータシートを採用した。

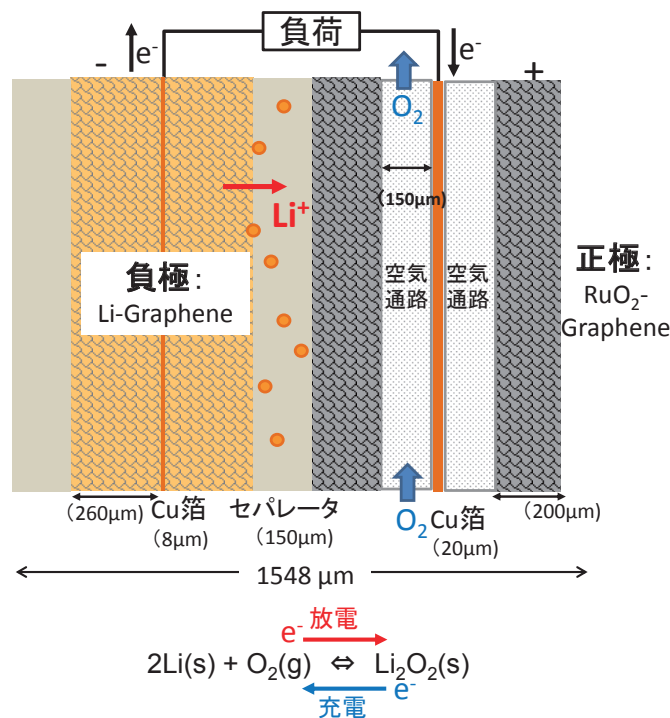


図 1 電極シート (2 面塗布) の構造と動作原理
(ここで、空気通路以外は電解液で満たされている)

電極シート 1 枚あたりの仕様

- ・サイズ : 250mm × 250mm × 1,548μm
- ・蓄電容量 : 147 Wh_{ST}/枚

正極活物質 1 枚当たりの重量は 19.88g、正極活物質の容量密度は 2000mAh/g、また電圧 3.7V である [7] ことから、蓄電容量は 147Wh_{ST}/枚 (Wh_{ST}: 蓄電池 1 回の充放電容量 (単位: Wh), ST: Storage) を示す) と計算した。電極シート 1 枚あたりの構成材料の内訳は表 1 に示した。

表 1 電極シート 1 枚あたりの構成材料

	材料	厚さ [μm]	体積 [cm ³]	重量 [g]
正極活物質 (2 面)	RuO ₂ -Graphene	400	25.00	19.88
正極集電材	Cu	20	1.25	11.15
正極空気供給	空気通路 (スペーサー)	300	18.75	0.00
セパレータ (2 枚)	セラミックス	300	18.75	57.19
負極活物質 (2 面)	Li-Graphene	520	32.51	26.64
負極集電材	Cu	8	0.50	4.46
電解液	プロピレンカーボネート		14.38	17.25
電極 1 枚 (2 面塗布)		1,548	111	137

本報告では、上記の電極シートを 14 枚重ねたラミネートセル、サイズ 280mm × 280mm × 25mm から構成されるラミネート型電池を設計した。上記のラミネートセルは表 2 のような仕様となる。ラミネートセル 1 個は 3.4kg であり、構成材料の重量内訳及び重量割合を表 3 及び図 2 に示す。図 2 からわかるように、収納容器の重量は全体重量の 4 割を占める。

表 2 ラミネートセル 1 個あたりの性能

ラミネートサイズ	280mm × 280mm × 25mm
電圧 [V]	3.7
蓄電容量 [Wh _{ST} /cell]	2,060
重量 [kg/cell]	3.4
体積 [L/cell]	1.96
重量エネルギー密度 [Wh _{ST} /kg]	605
体積エネルギー密度 [Wh _{ST} /L]	1,050

表 3 ラミネートセルの構成材料の重量内訳

	材料	[g/cell]
正極	グラフェン	167
	RuO ₂	111
	銅箔	156
セパレータ	セラミックス	801
負極	Li 金属	145
	グラフェン	228
	銅箔	62
電解液	プロピレンカーボネート	242
端子	Ni メッキ鋼材 (電池内部端子)	23
ラミネート型電池容器 (パウチ)		13
ラミネート型セル用外部端子		16
	小計	1,963
ラミネート収納箱	鋼材	1,441
	合計	3,405

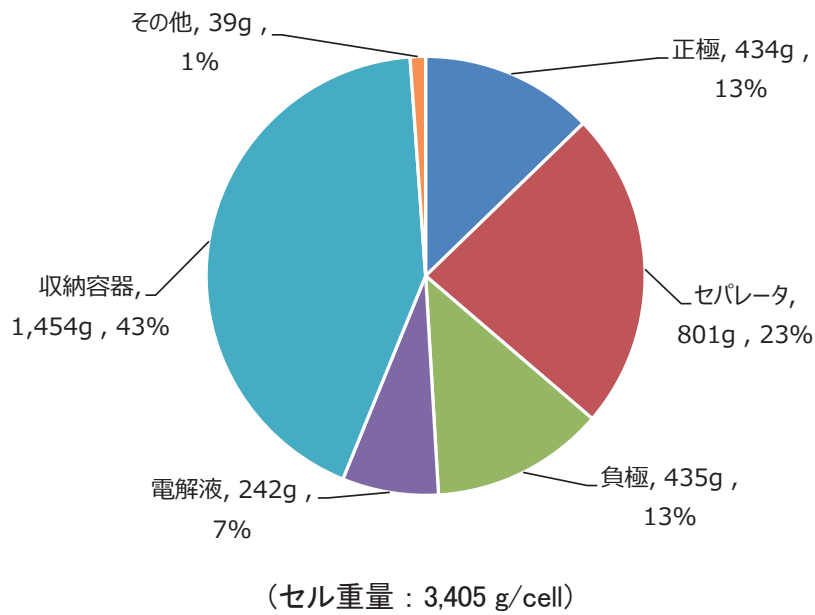


図 2 ラミネートセルの構成材料の重量割合

(2) 10kWh 蓄電池システム

今回の試算では、10kWh 蓄電池システムを設計する。表 2 に示すようにラミネートセル 1 個あたりの性能は $2,060\text{Wh}_{\text{ST}}/\text{cell}$ であることから、10kWh のシステムには 5 個のラミネートセルが必要である。

リチウム空気電池には、酸素源として空気を用いる大気開放型と、純酸素を用いる加圧密閉型の 2 種類がある [8] が、ここでは大気開放型として設計した。大気開放型の電池ケースは、正極が十分に大気と接触可能な構造を有する電池ケースである。空気電池を稼働させるために、以下に述べる空気供給装置を設置した。

空気供給装置

- 大気開放型電池の場合は圧縮機による空気の供給が必要となる。
- 空気中の水分と金属リチウムが反応すると水素が発生して危険であり、また、空気中の二酸化炭素が Li_2O_2 と反応するため、水蒸気と二酸化炭素を除去する圧カスイング吸着 (PSA) システムを設置する。
- 空気供給装置を使用する場合は、電池稼働時に電解液が徐々に蒸発するので、電解液の供給・回収装置が必要となる。

3. 定置用リチウム空気電池システムのコスト

リチウム空気電池の製造プロセスについては、電気自動車、定置用蓄電池などの普及が予想されるため、年産 10GWh_{ST} の製造プラント (10kWh 蓄電池システム、100 万台) を想定した。また、将来の収率は 90% と設定した。ラミネートセルの構成材料及び、セル 1 個あたりの原材料費を表 4 に示した。正極材料で使われる RuO₂ 触媒の原材料費が高いため、正極原材料費は約 13 円 /Wh_{ST} となりセル全体の原材料費約 18 円/Wh_{ST} の 7 割を占めた。コスト低減のためには安価で高性能な触媒が必要である。

表 4 ラミネートセルのセル構成材料別の原材料費内訳

	材料	[g/cell]	製造工程による収率換算 [g/cell]	材料単価 [円/kg]	セルあたり単価 [円/cell]	原材料費 [円/Wh _{ST}]
正極	グラフェン	167	187	10,000*	1,867	0.91
	RuO ₂	111	124	200,000	24,888	12.08
	アルミ箔	156	171	2,500	427	0.21
セパレータ	セラミックス	801	842	5,000	4,211	2.04
負極	Li 金属	145	164	5,000	821	0.40
	グラフェン	228	257	10,000	2,569	1.25
	銅箔	62	68	2,500	171	0.08
電解液	プロピレンカーボネート	242	252	4,000	1,006	0.49
端子	Ni メッキ鋼材 (電池内部端子)	23	24	400	10	0.01
ラミネート型電池容器 (パウチ)		13	13	1,000	13	0.01
ラミネート型セル用外部端子		16	16	5,000	81	0.04
小計		1,963	2,119		36,064	17.51
ラミネート収納箱	鋼材	1,441	1,501	50	75	0.04
合計		3,405			36,139	17.54

*現在のグラフェンの価格は百万円/kg であるが、ここでは量産化を想定した価格とした (カーボンナノチューブを参考に推定した)。

10kWh 定置型リチウム空気電池システムの重量および製造コストの内訳を表 5 に示す。セルの製造コストは 19.7 円 /Wh_{ST}、システム収納箱、水冷装置は 3.7 円 /Wh_{ST}、空気供給装置は 4.3 円 /Wh_{ST} である。また、収納容器、水冷装置と空気供給装置の重量割合はシステム全体の 7 割であった。収納容器や周辺装置の重量削減はコスト低減と共にエネルギー密度の向上に寄与する。また、表 4 に示した正極の原材料費はシステム製造コスト 28 円 /Wh_{ST} の 5 割程度となる。

表 5 10kWh 定置型リチウム空気電池システムの重量と製造コスト内訳

		重量 [kg/system]	単価 [千円 /system]	製造コスト [円 /Wh _{ST}]
セル	原材料費	17	181	18.1
	固定費		16	1.6
	小計	17	197	19.7
システム収納箱、 水冷装置	原材料費、固定費	12	37	3.7
空気供給装置	フィルター	1	0.7	0.1
	PSA	9	20	2.0
	圧縮機*	7	15	1.5
	溶剤添加	4	3	0.3
	溶剤回収	5	4	0.4
	小計	26	43	4.3
	合計	55	277	28

*10kWh システムの必要空気流量 : 0.027 m³/min、70W の圧縮機が必要である。

4. 考察と技術開発に関する課題

4.1 定置用リチウムイオン電池との比較

表 6 に現状 Ni 系の LiB 定置用蓄電池と本報告のリチウム空気電池の比較を示す。空気電池のセルエネルギー密度が現状 Ni 系 LiB より約 2.6 倍高いが、空気電池の電池稼働には圧縮機などの空気供給装置が必要であるため、システムエネルギー密度は現状 Ni 系 LiB より 1.8 倍高い 180 Wh_{ST}/kg となる。一方、空気電池のシステムコストは現状 LiB より約 1.6 倍高い結果となった。

表 6 10kWh リチウム空気電池とリチウム電池システムの比較

	円筒型	ラミネート型
	現状 Ni 系 LiB	リチウム空気電池
用途	定置用	定置用
容量 [kWh]	10	10
セル重量 [kg]	43	17
システム重量 [kg]	100	55
セルエネルギー密度 [Wh _{ST} /kg]	230	605
システムエネルギー密度 [Wh _{ST} /kg]	100	180
セルコスト [円 /Wh _{ST}]	13	20
システムコスト [円 /Wh _{ST}]	17	28

4.2 技術開発に関する課題

将来、空気電池を普及させるためには、さらなる高エネルギー密度と低コストを実現できる正極、負極材料などの基礎研究と共に、電極構造設計や電池システム製造技術の開発が必要である。具体的には、以下の課題がある。

- 電極材料、電解質材料の基礎研究：正極反応の安定性、リチウム金属デンドライト成長、電解液の安定性などの課題解決
- 電極構造設計：サイクル性の向上
- 大気中の水分と二酸化炭素を除去するなどのシステム化技術

5. 政策立案のための提案

本稿では、リチウム空気電池を設計し電池の性能やコストを試算した。今後のリチウム空気電池の普及のためには、以下に示すような研究開発が必要であると考えられる。

- (1) エネルギー密度の向上：リチウム空気電池の理論エネルギー密度はガソリンに匹敵するエネルギー密度 $5,200\text{Wh/kg}$ であるが、現状のセルエネルギー密度はまだ $605\text{Wh}_{\text{ST}}/\text{kg}$ に留まっている。充放電反応において安定性が低いことが原因である。正極、負極材料の研究開発によりセルエネルギー密度を $700\text{Wh}_{\text{ST}}/\text{kg}$ 以上に増大させることが必要である。
- (2) 製造コストの削減：本報告のリチウム空気電池の製造コストは $28\text{円}/\text{Wh}_{\text{ST}}$ であり、リチウムイオン電池より 1.6 倍程度高価である。特に正極の原材料費がシステム製造コスト全体の約 5 割を占めた。正極材料で使われる触媒の原材料費が高いことが原因である。コスト低減のためには、低価格で高性能な触媒の開発が必要である。
- (3) 電池システム製造技術の開発：リチウム空気電池を実用化するためには、基礎研究だけでなく、電池を稼働するための周辺機器の実装が不可欠である。例えば、空気の吸入と放出をどのように行うのか、構造をどのように設計するのか、周囲機器の重量をどのように削減するのか等についての研究開発が必要である。

参考文献

- [1] 『気候変動交渉と日本の取り組み』 外務省資料 . <http://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000087932.pdf>. 平成 28 年 1 月.
- [2] 『低炭素社会実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書：蓄電池システム (Vol.2) - 高容量化活物質を用いた蓄電池のコスト試算と将来展望-』 独立行政法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター. 平成 27 年 3 月.
- [3] 『NEDO 二次電池技術開発ロードマップ 2013 (Battery RM2013)』 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO). 平成 25 年 8 月.
- [4] K. M. Abraham and Z. Jiang. "A Polymer Electrolyte - Based Rechargeable Lithium/Oxygen Battery". *Journal of Electrochemical Society*, 143(1), 1996, p.1-5.
- [5] 『平成 25 年度 特許出願技術動向調査一次世代二次電池-』 特許庁. 平成 26 年 2 月.
- [6] 『科学技術未来戦略ワークショップ「次々世代二次電池・蓄電デバイス技術」報告書』 独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター. 平成 23 年 1 月.
- [7] Xianwei Guo, Pan Liu, Jihui Han, Yoshikazu Ito, Akihiko Hirata, Takashi Fujita, and Mingwei Chen. "3D Nanoporous Nitrogen-Doped Graphene with Encapsulated RuO_2 Nanoparticles for Li-O_2 Batteries". *Advanced Materials*, 27(40), 2015, p. 6137-6143.
- [8] Kevin G. Gallagher, Steven Goebel, Thomas Greszler, Mark Mathias, Wolfgang Oelerich, Damla Eroglu, and Venkat Strinivasan. "Quantifying the promise of lithium-air batteries for electric vehicles". *Energy & Environmental Science*, 7, 2014, p.1555-1563.

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

蓄電池システム (Vol.3)
ーリチウム空気電池のコスト評価と技術開発課題ー

平成 28 年 3 月

Secondary Battery System (vol.3):
Cost Evaluation and Technological Challenges of a Lithium-air Battery
Strategy for Technology Development,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2016.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 研究員 陳 怡静 (I-Ching CHEN)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4 階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2016 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
