

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

蓄電池システム (Vol.10)

—一定置用蓄電池の供給可能量と鉛蓄電池のコスト評価—

令和5年2月

Secondary Battery System (Vol. 10) :

Investigation of Supply Capacity of Stationary Storage Batteries and Cost Evaluation of Lead-Acid Batteries

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-FY2022-PP-04

概要

2030年、2050年にかけて再エネ発電が大量に導入されると同時に、その電力安定化のため蓄電池も大量に導入される。また、自動車のEV化でEV用の蓄電池も大量に導入される。本提案では、科学技術振興機構低炭素社会戦略センター（以下、LCS）の定量化プラットフォームとコストエンジニアリング手法を用い、将来の定置用蓄電池の供給可能量調査と鉛蓄電池のコスト評価を行った。EV用に最適な高エネルギー密度の $\text{LiNi}_{0.85}\text{Co}_{0.12}\text{Al}_{0.03}\text{O}_2$ （NCA）を正極活物質に用いるリチウムイオン電池（LIB）は、2030年頃までに原材料となるCo、Ni資源が枯渇に近づくため、Co、Niフリーの $\text{Li}_{1.2}\text{Ti}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_2$ 、 $\text{Li}_2\text{Mn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2}\text{O}_2\text{F}$ 正極の、新たな高エネルギー密度のLIBへの変更が求められる。一方、再エネ定置用には低システムコスト13円/WhでLIBの1/4の低CO₂排出量8g/Whの鉛蓄電池の導入がLCSで示唆された。鉛蓄電池の原材料となる鉛は、世界の鉛製造再生化率を現状の60%から90%にすることで、2050年の日本の電力需要量の3500TWhに対応する全蓄電池量12TWhの75%の8TWhを鉛蓄電池で供給可能であり、全世界で必要な117TWhを鉛蓄電池で供給可能であることが分かった。

本提案は、再エネ定置用蓄電池に、持続的資源循環可能で低コスト、低CO₂排出の鉛蓄電池の導入活用を進めるとともに、鉛蓄電池に代わるコスト競争力のある蓄電池システム、例えば中国、韓国メーカーに後れを取っている、低コストのリン酸鉄系正極リチウムイオン電池の研究開発が必要であるとするものである。蓄電池産業の育成と市場創出のための国の早急なる支援が望まれる。また、ここで得られた鉛蓄電池の性能、仕様を電源構成モデルに適用し、水素や揚水発電よりコストパフォーマンスの点で優位であることが示されたことを付記する。

Summary

By 2030 and 2050, a large amount of renewable energy power generation will be introduced, and at the same time, a large amount of storage batteries will also be introduced to stabilize this power. In addition, with the shift to electric vehicles (EVs), a large amount of storage batteries for EVs will be introduced. In this study, we analyzed the future supply capacity of stationary storage batteries and evaluated the cost of lead-acid batteries using the quantification platform and cost engineering method of LCS (the Center for Low Carbon Society Strategy, Japan Science and Technology Agency).

Lithium-ion batteries (LIB) that use $\text{LiNi}_{0.85}\text{Co}_{0.12}\text{Al}_{0.03}\text{O}_2$ (NCA) as a positive-electrode active material (which has a high energy density and is optimal for EVs) will run out of raw material Co and Ni resources by around 2030. It is therefore necessary to switch to new Co and Ni-free LIBs with high energy density (453 Wh/kg) that use $\text{Li}_{1.2}\text{Ti}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_2$ or $\text{Li}_2\text{Mn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2}\text{O}_2\text{F}$ as positive-electrode active materials. On the other hand, for stationary renewable energy, the introduction of a lead-acid battery with a low system cost of 13 yen/Wh and low CO₂ emissions of 8 g/Wh, which are 1/4 of those of LIBs, has been suggested by LCS. Lead is the raw material for lead-acid batteries, and it was found that by increasing the global lead production recycling rate from the current 60% to 90%, lead-acid batteries can supply 8 TWh, 75% of the 12 TWh total storage battery capacity corresponding to Japan's electricity demand of 3,500 Wh in 2050, and that the 117 TWh required for the whole world can be supplied by lead-acid batteries.

This proposal promotes the introduction and utilization of low-cost, low-CO₂-emission lead-acid storage batteries that enable sustainable resource recycling as stationary storage batteries for renewable energy. There is also a need for alternative cost-competitive storage battery systems – for example, the research and development of low-cost iron phosphate-based positive-electrode active material lithium-ion batteries that are lagging behind Chinese and Korean manufacturers. Immediate support from the government is desired for the development of the storage battery industry and market creation. Information demonstrating the application of the performance

and specifications of lead-acid batteries obtained in this study to power generation mix models and their predominance in terms of cost-performance when compared to hydrogen and pumped storage power generation will also be added.

目次

概要

1. 背景と目的	1
2. 2030年、2050年の蓄電池需要予測	1
2.1 各種蓄電池	2
2.2 蓄電池材料	2
2.3 資源量と供給可能量	7
2.4 鉛蓄電池の製造コストとCO ₂ 排出量	10
2.5 リサイクル・リユース技術	14
3. まとめ	18
4. 政策立案のための提案	19
参考文献	20

1. 背景と目的

2050年までに温室効果ガス（GHG）排出をゼロにする政府方針 [1] が令和2年に打ち出されて以来、太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギーの導入が加速している。また、IT社会の進展により、2050年の必要電力量は現状の3倍以上にも達するとも考えられ、益々再生可能エネルギーの需要は高まっている [2-4]。しかし、これら再生可能エネルギーは天候に左右されるため、エネルギーの安定供給には定置型蓄電システムもあわせて導入することが必要不可欠である。また一方、自動車分野でもCO₂排出量を削減すべく電気自動車（EV）やプラグインハイブリッド自動車（PHEV）に使われる蓄電池の需要も高まっている。

今日まで蓄電池は、高エネルギー密度化、低コスト化が進められ、鉛蓄電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池（LIB）、ナトリウム硫黄電池やレドックスフロー電池などの各種蓄電池が実用化されている。現状、LIBは単位体積又は単位質量当たりのエネルギー密度が他の電池に比べて最も高く、サイクル寿命も比較的長いことから、携帯用、EV用途のみならず、定置型蓄電システムでの適用も進められている。しかしながら、LIBの正極材料には、高価、希少資源のCoやNi金属が使用され、また高密度積層構造でドライ製造プロセスを用いられているため、直材コスト、製造コスト、リサイクルコスト面で課題を残している。一方、自動車の起動用やフォークリフト電源、通信基地局のバックアップ電源として使用されてきた鉛蓄電池は、充放電効率やエネルギー密度ではLIBに劣るが、コスト、長期信頼性、安全性の点で優れる。本提案書では、今後2030年、2050年のゼロカーボン社会に向け、必要となる莫大なるEV用途、定置用途の蓄電容量を推算し、まずは必要資源材料側面からの各種電池の供給可能性の検討を行うとともに、リユース、リサイクルの資源循環を考慮した2050年のLIBと鉛蓄電池のコスト、CO₂排出量をコストエンジニアリング [5] から算出する。またそれらの結果を踏まえ、豊かなゼロカーボン社会に向かう、社会実装に最適な蓄電技術のあるべき姿を政策提案する。

2. 2030年、2050年の蓄電池需要予測

日本のみならず各国のCO₂排出規制の観点から自動車のEV化が促進されると考えられ¹⁾、2030年には世界で12,700 GWh、2050年には60,000 GWhの蓄電池（容量）が必要と予測している [4]²⁾。また、太陽光発電、風力発電等の再生エネルギーの導入が世界中で加速され、その電力調整用として蓄電池の需要が高まってきている [6]。

LCSは国内の電力需要の予測として、2030年に1,200 TWh/年、2050年には3,080 TWh/年に達すると推計している [2]。単純化したモデルで考えると、例えば1年間で3,080 TWhの電力量が全て再生エネで供給され、その内の余剰電気を例えば再生エネ全体量の1/3とすると、1,027 TWh/年になる。この電気を日々の蓄電容量に換算すると2.8 TWhとなる。これは電池で言うと満充電の容量であって、実際には充電深度（充放電の利用率）は70%で考えると、4 TWhの容量の蓄電池が必要になる。更に余裕度や安全係数を2倍とすると日本全体で8 TWh分相当の蓄電池が必要になる。より詳細な算出モデルの結果はLCSの別紙提案書 [6] と続報に記載するが、2050年で日本の需要電力量が最大の3,500 TWhの時、水素、新揚水も含めた定置用蓄エネの必要総量として12 TWh、また、現状の世界の定置用蓄電池必要量を日本の14.7倍 [7] とした場合には176 TWhの蓄電池容量が必要になると想定した。

¹⁾ EV台数予測にトヨタ自動車「バッテリーEV戦略に関する説明会」2021年12月14日発表、<https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/36428939.html>、経済産業省HP、EV/PHVプラットフォーム、EV・PHV普及への取組、<https://www.meti.go.jp/policy/automobile/evphv/spread/index.html>、を参照

²⁾ EV用、PHEV用蓄電容量にNEDO HP、「先進・革新蓄電池材料評価技術開発（第2期）」基本計画を参照

2.1 各種蓄電池

表1に現在実用化、流通している現行各種蓄電池の比較表を示す。蓄電池は通常正極、負極の二枚の電極と電解質とで構成され、その構成材料により端子電圧、容量、充放電回数など性能が異なる。また、蓄電池は社会ニーズから用途開発されてきた経緯があり、移動体用、携帯用として鉛蓄電池、ニッケル水素蓄電池、リチウムイオン電池と高エネルギー密度化が進められ実用化されてきた。一方、定置用の大容量蓄電用途として、ナトリウム硫黄電池、レドックスフロー電池が実用化開発されている [8-13]。

表1 現行各種蓄電池の比較表 [14]

電池の種類	鉛	Ni-H ニッケル水素	LIB リチウムイオン	NaS ナトリウム硫黄	RF レドックス フロー
エネルギー密度 (Wh/kg (L))	40 (82)	100 (390)	250 (720)	130	10
システムコスト (万円 /kWh)	1.5 ~ 3	10	4 ~ 9	4.3	9
セルコスト (円 /Wh)	5 ~ 15		16 ~ 25		
サイクル (回)	4,500 回	2,000 回	4,000 回	4,500 回	制限なし
充放電効率	87%	90%	95%	90%	100%

2.2 蓄電池材料

現在、実用的蓄電池で希少資源が使用され、今後生産量が増大するであろう鉛蓄電池、リチウムイオン電池およびレドックスフロー電池について、電池構成材料の評価を行った。今回行った評価用電池の各々の構成材料について次に示す。

2.2.1 リチウムイオン電池

図1に18650 (円筒型) リチウムイオン電池の構造を示す。正極板は集電体と正極活物質からなり、同様に負極板は集電体と負極活物質からなる。本検討ではリチウムイオン電池の中でもEV用の最も高エネルギー密度であるNCA系リチウムイオン電池を評価した。正極活物質に $\text{LiNi}_{0.85}\text{Co}_{0.12}\text{Al}_{0.03}\text{O}_2$ 、負極活物質に C_6 カーボン、電解質にはプロピレンカーボネイトとリチウム塩 LiPF_4 で構成した [13]。

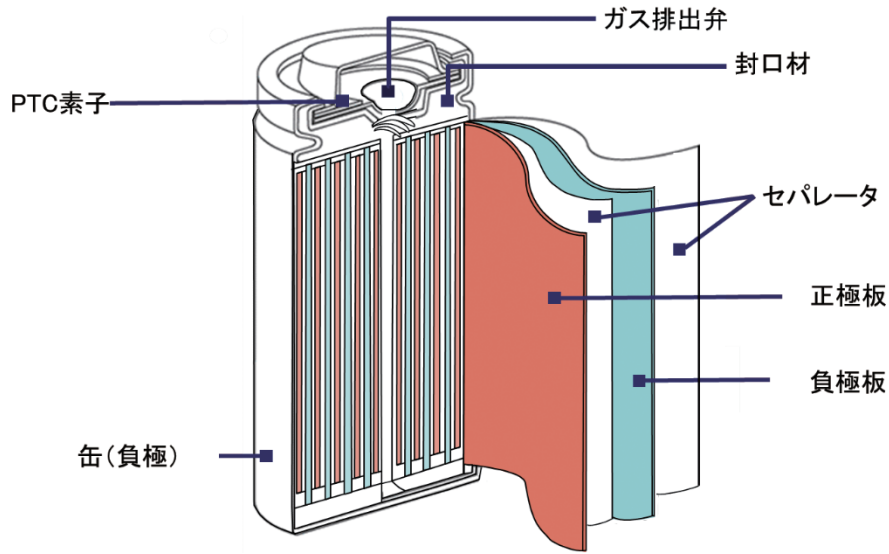


図1 18650 (円筒型) リチウムイオン電池の構造

表 2-1 リチウムイオン電池の性能、仕様

項目	
形式	18650 型
直径 18 mm	18 mm
長さ 65 mm	65 mm
電圧	3.6 V
容量	11.2 Wh (3.1 Ah)
重量	44 g
エネルギー密度 (重量)	253 Wh/kg

表 2-2 リチウムイオン電池の構成材料と重量

構成材料	部材	重量 [g]	割合 [%]
正極	ニッケルコバルトアルミニウム酸リチウム ($\text{LiNi}_{0.85}\text{Co}_{0.12}\text{Al}_{0.03}\text{O}_2$)	16.06	36.4
	カーボンブラック	0.32	0.7
	ポリフッ化ビニリデン、Nメチルピロリドン	1.10	2.5
	アルミ箔 (15 μm 比重 2.7)	1.17	2.7
負極	黒鉛	10.73	24.3
	スチレンブタジエン共重合体	0.37	0.8
	銅箔 (10 μm 比重 8.5)	2.57	5.8
セパレータ	ポリエチレン膜	1.16	2.6
電解液	プロピレンカーボネイト + LiBF_4 (約 1 M)	3.70	8.4
筒	鉄 (ニッケルメッキ)	4.74	10.7
その他	センターピン トップキャップ	2.21	5.0
合計		44.13	100

表 2-1 には NCA 系リチウムイオン電池の性能、仕様を、表 2-2 には構成材料とその重量について検討した結果を示す。NCA 系リチウムイオン電池の正極材料には希少資源の Ni と Co が使用され、その重量比はセル全体の 36.0%であることが計算された。

表 3 NCA (LiNi_{0.85}Co_{0.12}Al_{0.03}O₂) 系リチウムイオン電池の正極の元素含有量と EV、PHEV の 1 台당りに必要な材料元素重量

	Li	Ni	Co	Al	O	合計
原子量 (mol/g)	6.9	58.7	58.9	27.0	16.0	
正極組成比	1	0.85	0.12	0.03	2	
正極 1 mol 当たり重量 (g)	6.9	49.9	7.1	0.81	32.0	96.7
正極中の wt%	7.1	51.6	7.3	0.8	33.2	100.0
セル当たりの重量 (g/個)	1.14	8.29	1.17	0.13	5.3	16.06
EV 一台当たりの蓄電池搭載量 : 40 kWh						
EV 当たりのセル数 (個)	40 kWh/11.2 Wh = 3,571.4 個					
EV 当たりの重量 (g/40 kWh)	4,071.4	29,607	4,178			
セル製造時の未回収量 (比率) 1/ 収率 × 歩留 : 90% × 99 = 1/0.891 = 1.122						
一台当たりの必要重量 (g/台)	4,568	33,219	4,689			
重量 g/kWh	114	830	117			
EV (40 kWh) 必要重量 (kg)	4.6	33.3	4.7			
PHEV (20 kWh) 必要重量 (kg)	2.3	16.7	2.4			

表 3 には、電池製造における収率は 90%、歩留は 99%である条件を用いて、Wh 当たりの各々の元素含有重量を算出した結果を示す。また、EV 一台당りに必要な電池容量として 40 kWh、PHEV 一台당りは 20 kWh として Li、Ni、Co の各々一台당りに必要な材料元素の重量を算出した。Li は 114 g/kWh、Ni は 830 g/kWh、Co は 117 g/kWh の原料が使用されることが分かった。

2.2.2 鉛蓄電池

図 2 に角型 (182x127x202) 鉛蓄電池の構造を示す。希硫酸の電解液に正極として板状酸化鉛 (PbO₂)、負極として板状鉛金属 (Pb) で構成される。

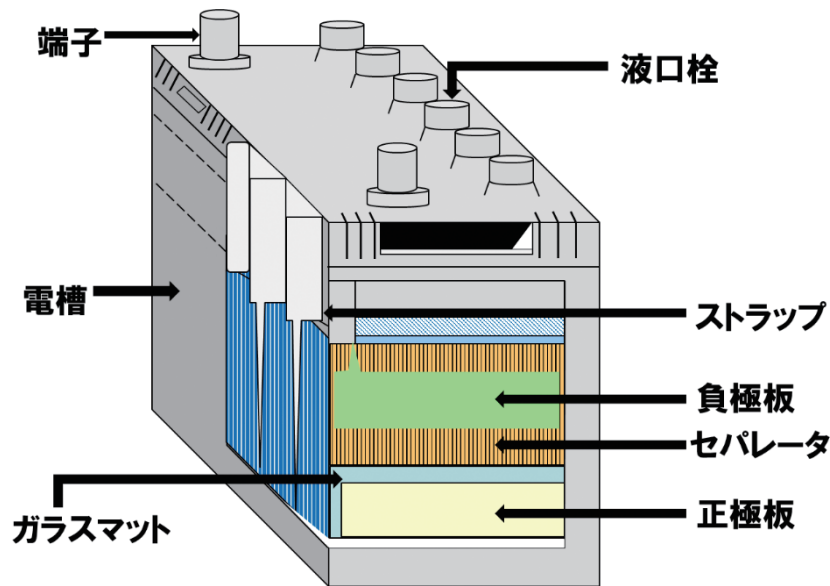


図2 角型鉛蓄電池の構造

表 4-1 角型鉛蓄電池の性能、仕様

	部材	重量 [kg]	割合 [%]
正極	二酸化鉛 (PbO ₂)	2.85	30.0%
	鉛 - カルシウム系合金格子体 0.05% Ca	0.285	3%
	添加材 (リグニン)	0.095	1%
負極	海綿状鉛 (Pb)	2.66	28%
	鉛 - カルシウム系合金格子体 0.05% Ca	0.285	3%
	添加材 (リグニン)	0.095	1%
セパレータ	ガラス繊維不織布	0.285	3%
電解液	希硫酸 (H ₂ SO ₄) 37.5%	1.9	20%
制御弁	合成ゴム	0.0095	0.1%
電槽	ABS 樹脂	0.665	7.0%
ふた	ABS 樹脂	0.0475	0.5%
端子	鉛合金	0.285	3%
フィルタ	セラミック	0.038	0.4%
合計 (kg)		9.5	100%

表 4-2 角型鉛蓄電池の構成材料、重量と重量割合

項目	
形式	角型
幅	182 mm
奥行	127 mm
高さ	202 mm
電圧	12 V
容量	384 Wh (32 Ah)
重量	9.5 kg
エネルギー密度 (重量)	40 Wh/kg

表 4-1 には今回検討した角型鉛蓄電池の性能、仕様を、表 4-2 には構成材料とその重量について検討した結果を示す。角型鉛蓄電池の 60 重量%が鉛化合物で構成されており、電池一台当たり 48.5%が Pb 金属材料で構成されている。kWh 当たりの鉛金属重量は 12 kg/kWh となる。

2.2.3 レドックスフロー電池

図 3 にレドックスフロー電池のシステム概念図を示す。正負極の対峙するカーボン電極と酸化還元をリバーシブルに行える 2 種のイオン電解液とイオン交換膜で構成される。充電、放電時、液体中のイオンは各々の電極上で酸化または還元し、酸化または還元されるイオンは電解質が貯められているタンクからポンプにより充填され、イオンの量により充電量、または放電量が決められる。電池と言うよりは蓄電システム、設備に近い。電解液の溶媒は硫酸が用いられ、酸化還元を担うイオンとしてバナジウムイオン (2 価、3 価) と同イオン (4 価、5 価) が用いられる。レドックスフロー電池では、バナジウムイオンを作る活物質のバナジウム金属が希少元素であり、コスト高の要因となっている。

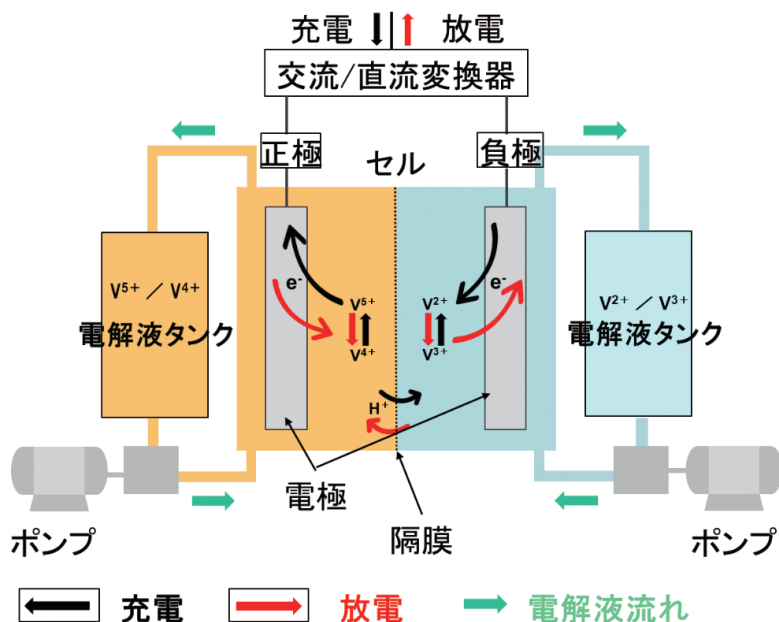


図 3 レドックスフロー電池のシステム概念図

表 5-1 レドックスフロー電池の性能および仕様

項目	性能・仕様
形式	電解液ポンプ循環型
タンクコンテナ幅	9.8 m
タンクコンテナ奥行	9.1 m
タンクコンテナ 2 段高さ	12 m
定格出力	1 MW
容量	5 MWh
電解液重量	543 トン
エネルギー密度 (重量)	10 Wh/kg

表 5-2 定格出力 1 MW、定格容量 5 MWh のレドックスフロー電池システムの重量と重量割合

	部材	重量 [ton]	割合 [%]
セルスタック	カーボン電極	30	2.3
電解液	硫酸水溶液 (24.7 wt%)	481.6	36.2
	活物質 : パナジウム (11.3 wt%)	61.4	4.6
補機	タンク、ポンプ、熱交換機、配管、セルスタック用筐体	58	4.3
制御	電池制御装置、直交変換装置	—	—
建屋	コンテナ	699	52.6
合計 (kg)		1,330	100

表 5-1 には今回検討したバナジウム電解質型レドックスフロー電池の性能、仕様を、表 5-2 には構成材料とその重量について検討した結果を示す。5 MWh レドックスフロー電池の電解液重量が 543 トンであり、その電解質中のバナジウム活物質濃度は 11.3 wt% 故、kWh 当たりのバナジウム金属重量は 12.3 kg/kWh となる。

2.3 資源量と供給可能量

本検討では、それぞれの蓄電池の材料資源の観点からどれくらいの量の供給が可能かを計算した。まずは、主要レアメタルの世界の埋蔵量と生産量を調査し、各々の蓄電池の供給可能容量を計算した。

2.3.1 主要レアメタルの世界埋蔵量と年間生産量

表 6 には主要レアメタルの世界埋蔵量と年間生産量を示す。リチウム、コバルト、ニッケル、鉛、バナジウムのそれぞれの世界埋蔵量は、1,400 万トン、710 万トン、7,836 万トン、9,000 万トン、2,000 万トン、また、それぞれの年間生産量は 4.3 万トン、11 万トン、210 万トン、487 万トン、8 万トンとなる。また、単純に現状の年間生産量で埋蔵資源を採掘すると、表 6 に示す通り Li と V を除き Co、Ni、Pb は数十年以内に資源が枯渇する。

表 6 主要レアメタルの世界埋蔵量、年間生産量と残存採掘年³⁾

	Li	Co	Ni	Pb	V
世界埋蔵量 (万トン)	1,400	710	7,836	9,000	2,000
年間生産量 (万トン/年)	4.3	11	210	487	8
残存採掘年 (年)	325.6	64.6	37.3	18.5	250

2.3.2 供給可能量

世界で EV 用に必要な蓄電量を EV 導入量から導出し、またその全量が NCA 系リチウムイオ

³⁾ 出典 : JOGMEC 2017、USGS (Mineral Commodity Summaries 2018)、経済産業省 HP、EV 普及のカギをにぎるレアメタル、2018-04-20、https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ev_metal.html 等により科学技術振興機構低炭素社会戦略センターが作成

ン電池で供給される想定で、Li、Ni、Co 資源の残存採掘年数を計算した。EV1 台には 40 kWh のリチウムイオン電池を、PHEV1 台には 20 kWh の電池を積載する。そのうえで、再エネ定置用蓄電池として EV 用で量産低コスト化された EV 用と同等リチウムイオン電池が導入可能かどうかを各資源の採掘残存年から検討を行った。但し、2030 年、2050 年の EV 世界導入台数には 2030 年時点で 3,000、5,000、7,000 万台/年、2050 年時点で全ての自動車が EV 化で年間 10,000 万台社会に導入されるケースを計算した。結果を表 7 に示す。日本の再エネ定置用の必要容量は LCS で拡張産業連関表から導出された容量 3.5 TWh (2030 年) を中心値に下振れ 3 TWh、上振れ 4 TWh、2050 年に 12 TWh の容量が必要とした [6]。なお、EV の蓄電池導入量は現状から 2030 年、2030 年から 2050 年の間は毎年、平均加重 (等差加重計算) の容量が新規導入される想定で計算した。一方、再エネ定置用の導入量は蓄電池寿命を 10 年とし、2030 年、2050 年に到達する蓄電量を 10 年で除した蓄電量を毎年累積して想定 of 導入量に達成するように計算し、10 年で新規蓄電池に更新する条件にした。

本検討により、EV 用蓄電池として NCA 系リチウムイオン電池の原材料である Co や Ni の供給量は 2030 年時点で採掘残存年が十数年以下になり、既に限界に達することが分かってきた。また同時に 2030 年までに定置用蓄電池に NCA 系リチウムイオン電池を用いることは極めて厳しい状況が予測された。したがって、定置用蓄電池として、NCA 系リチウムイオン電池以外の電池の確保が必要不可欠と考えられた。

表 7 EV 用、再エネ用に必要な蓄電量の現状 (2021 年時) 実績と 2030 年、2050 年の推計

		現状	2030			2050	現状生産内訳
世界 EV 用に必要な蓄電容量							
HEV (20 kWh) 万台		147.2/1、500	-	-	-		\
(PH) EV (40 kWh) 万台		3.9/40	3,000	5,000	7,000	10,000	
EV 用 LIB (GWh/年)		316	1,200	2,000	2,800	4,000	
世界 EV 用に LIB が使用された場合の残存量と残存年							
資源埋蔵量	Li : 残存量 (万 t)	1,400	1,309	1,266	1,222	667	生産 4.3 万 t/年
	採掘残存年 (年)	325.6	94.2	55.8	38.9	15.0	内 LiB3.5 万 t/年
	Co : 残存量 (万 t)	710	564	524	477	-200	生産 11 万 t/年
	採掘残存年 (年)	64.5	30	18.4	13.4	-	内 LiB3.7 万 t/年
	Ni : 残存量 (万 t)	7,836	5,237	4,905	4,575	-3,447	生産 210 万 t/年
	採掘残存 (年)	37.3	17.7	13.5	10.7	-	内 LiB13 万 t/年
日本の再エネ必要累積容量							
再エネ必要累積容量 (GWh)		日本	3,000	3,500	4,000	12,000	\
~ 100 kWh (Li) GWh		75%	2,250	2,625	3,000	9,000	
100 kWh ~ (Pb) GWh		10%	300	350	400	1,200	
100 MWh ~ (NAS・RF) GWh		15%	450	525	600	1,800	

表 8 にコストパフォーマンスを優先にして、全世界での再エネ用蓄電池に鉛蓄電池を 75%、リチウム電池を 10%、NAS・RF を 15% 導入したケースを検討し、各資源の採掘残存年を計算した。世界の再エネ用必要容量は、参考文献 [7] 富士経済報告書の 2020 年時点の日本と世界の定置用蓄

電量比率から計算し、日本の蓄電容量の14.7倍とした。なお、鉛蓄電池の鉛の再生化は中国で60%以下、他の米国、欧州、日本ではほぼ90%と考えられ2020年時点の世界平均で60%である。鉛資源の残存年は2019年以降再生化率60%、90%のケースを検討した⁴⁾。また、原資の少ないバナジウム(V)は、原資が枯渇しない蓄電量を考え、世界蓄電需要の5%とし、レドックスフローの寿命は原理的に半永久的に使用できるため、耐用年数を50年とした。

表8 再エネ用蓄電池に全世界で鉛蓄電池を75%導入した場合の各資源の採掘残存年

		2030年			2050年	
世界の再エネ累積導入容量						
再エネ累積導入容量 (GWh)		20,100	23,450	26,800	176,400	
Li (GWh)	10%	2,010	2,345	2,680	17,640	
Pb (GWh)	75%	15,075	17,588	20,100	132,300	
NAS (GWh)	10%	2,010	2,345	2,680	17,640	
RF (GWh)	5%	1,005	1,173	1,608	8,820	
再エネ用各蓄電池導入時の希少資源残存量と残存年						
資源埋蔵量／残存年	Co : EV用使用後残存量 (万t)	564	540	496	445	
	採掘残存年 (年)	64.5	26.2	16.7	12.3	
	Ni : EV用使用後残存量 (万t)	5,237	5,070	4,710	4,353	
	採掘残存年 (年)	37.3	16.2	12.3	9.65	
	Pb : 現状残存量 (万t)	9,000 (現状)	8,448	8,436	8,424	8,308
	採掘残存年 (年)	再生化率60%	15.3	15.1	14.6	12.0
		再生化率90%	64.2	62.8	61.5	51.0
	V : 残存量 (万t)	2,000 (現状)	995	827	392	
採掘残存年 (年)	250 (現状)	35.4	26.3	9.7		

算出結果から、世界の再エネ蓄電に必要な蓄電容量を2030年20.1TWh、23.4TWh、26.8TWhの3つのケースと2050年53.6TWhを想定し、そのうちの10%をリチウムイオン電池(LIB)、75%を鉛蓄電池(Pb)に、5%をバナジウム型レドックスフロー(RF)とした場合、鉛の再生化率を90%にすることで、定置用の蓄電ミックスが提案できる。鉛の再生化率を90%にできれば、全世界の100%の蓄電池を鉛蓄電池で供給することも可能となる。また、蓄電研究課題としてリチウムイオン電池の中でも、Ni、Co材料を含まない材料、もしくは資源的に将来の蓄電量に耐えうる材料を使用しての新たな正極材料例えばリン酸鉄系材料を用いたリチウムイオン電池の実用化開発か、定置用蓄電に適した鉛蓄電池に代わるNaSやRFの新たな低コスト蓄電システムの研究開発が早急かつ短期集中的に必要である。

本検討で分かってきたことは、CO₂やカーボンの循環社会だけでなく、希少資源の循環社会、システムの構築もまた重要な社会課題であり、資源消費から循環型社会への変革が求められる。次の章で、リユース、リサイクル技術を勘案した鉛蓄電池の製造コストならびにCO₂排出量についてコストエンジニアリング手法を元に検討した。

⁴⁾ 出典：1) 経済産業省「鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計」、「非鉄金属等需給動態統計」2) 財務省貿易統計 3) 日本鉱業協会「鉛需給実績表」からJOGMECが計算したもの[15]を参照

2.4 鉛蓄電池の製造コストと CO₂ 排出量

図4に評価用の格子集電型平板電極電池の構成概念図を示す。評価用電池は、正極集電体/正極合剤層/セパレータ/負極合剤層/負極集電体の単セルを順に複数個対峙させ、電解槽に封じた構造とした。また、各々の単セルは並列に接続するように集電する構造とした[16]。

(正極)

ボールミル法による鉛酸化物、補強材の合成樹脂繊維、硫酸および水を混合することによって正極ペーストを調製し、このペーストを Pb-Ca 系合金から成る格子状の正極集電体に充填、熟成して、幅 250 mm、高さ 400 mm、厚さ 1.6 mm の未化成の正極板を設計した。

(負極)

同様にボールミル法による鉛酸化物、グラファイト、硫酸バリウム、リグニン、合成樹脂繊維、水、硫酸を混練した負極ペーストを想定した。このペーストを Pb-Ca 系合金から成る負極格子に充填、熟成して、幅 250 mm、高さ 400 mm、厚さ 1.3 mm の未化成の負極板を設計した。グラファイト、硫酸バリウム、リグニン及び合成樹脂繊維の混合量は、各々、2%、0.6%、0.2%及び0.1%の重量比率を考えた。

(セパレータ)

厚さ 0.2 mm のガラス繊維不織布を用い、負極と正極が直接接触しないように対峙する構成にした。

(電池構成)

正極板 6 枚と負極板 7 枚とを各々並列にスタッキングし、負極板が外側になるように正負極板が交互に対峙するように、また負極と正極の間にセパレータを挿入している構成とした。

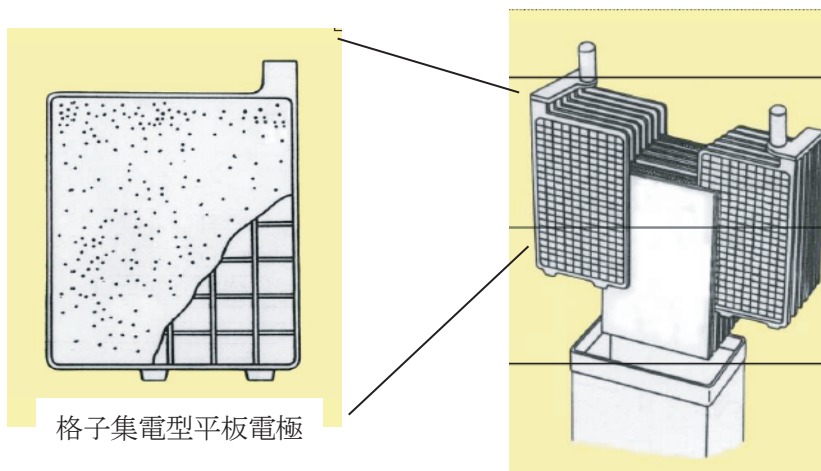


図4 評価用の格子集電型平板電極電池の構成概念図⁵⁾

2.4.1 評価用電池の製造プロセスとコスト⁶⁾

本稿の格子集電型平板電極電池の製造プロセスは、これまでに LCS で検討してきた従来電池の製造プロセスを基にして設計構成した。評価用電池の製造プロセスフローを図5に示す。製造コスト試算シートは別途作成し、以下に示す製造コストについては本製造プロセスフローに基づき計算した。

⁵⁾ 出典：メーカー公開資料を元に科学技術開発機構低炭素社戦略センターが作成

⁶⁾ メーカー公開資料を元に科学技術振興機構低炭素社会戦略センターが設計

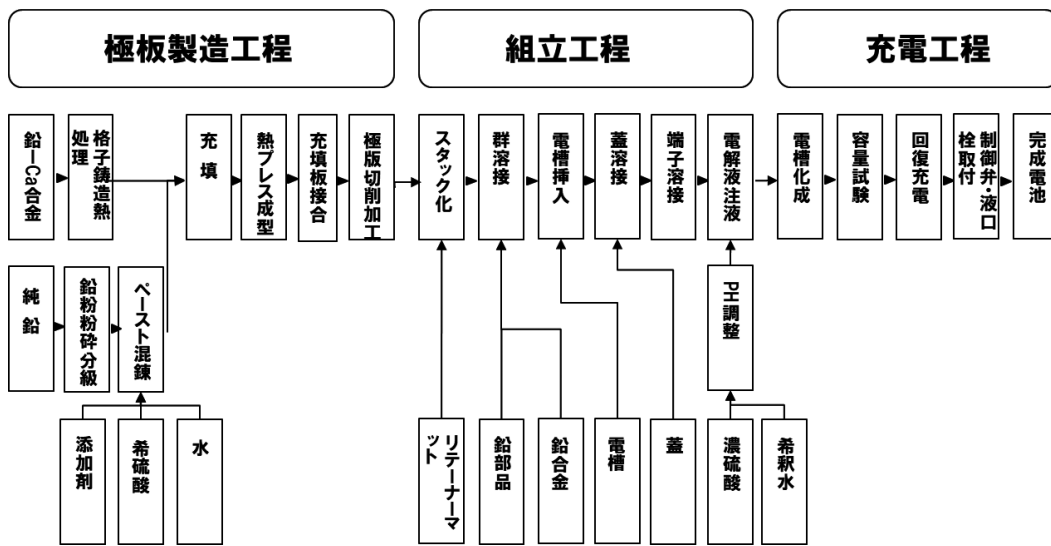


図5 評価用電池の製造プロセスフロー

LCSで行っているコストエンジニアリングは、基本の生産条件、規模を設定し、原料のイタヤコナから最終製品に至るまで、製造プロセスに従ってコストの積み上げで計算する。最終的に、原料コストや電気代等用役費の物量により変動する変動費と設備投資や人件費等の資産の配分による固定費とに分けてコスト分析する。コストエンジニアリングに必要なインプット条件を下記に示す。

(生産条件)

評価用電池の生産規模は、年産 100 GWh の製造プラントを想定した。定置用蓄電池として、長寿命タイプ DOD⁷⁾70%、サイクル回数 4,500 回、寿命 15 年、1,000 Ah×2V (2 kWh) の製造コスト評価用蓄電池を検討した。仕様を表 9 に示す。本検討の評価用電池の工程別収率は、正極活物質を基準とし、正極活物質製造工程 (99%)、正極混合・スラリー化工程 (99%)、正極合剤塗工工程 (97%)、正極側プレス工程 (99%)、正極側スリット工程 (99%)、組立工程 (99%)、検査・充電・出荷工程 (97%) と考え、累計収率 89%とした。また、年間製造稼働時間については、各工程とも 8,000 時間とした。

各工程の設備仕様⁸⁾は、“蓄電池システム (Vol.9) 一次世代電極活物質を用いたリチウムイオン電池の製造コスト試算” [13] で示す設備仕様と同じとした。

(原材料)

表 10 に製造コスト試算に用いる原材料の単価を示す。本検討での材料単価は、材料の品質、マス購入を勘案して、市販ベース価格、時金相場を元に設定した。

(用役・人件費)

各種用役単価と人件費を表 11 に示す。設備の電力消費量はモーター系機器について定格電力量×0.8 とした。なお、各設備の用役は LCS 提案書 [13] と同じ出処のデータを用いた。

(設備・建屋)

本稿の格子集電型評価用電池の設備費は機器・設備費の他に、配管・機器据付費・電気・計測工事費、基礎・杭工事費、建屋費を含む。各費用算出方法は、LCS 提案書 [13] に示す機器費と同

⁷⁾ DOD : Depth Of Discharge、放電深度を表す

⁸⁾ 設備仕様、工程別収率等は LCS 内部資料「蓄電池の製造コスト及び環境負荷量計算及びコスト低減技術の検討」を参考に設定

法とし、設備コストは耐用年数8年、年経費率0.2とした。

表9 製造コスト評価用蓄電池の性能、仕様⁶⁾

項目	
形式	角型
幅	172 mm
奥行	303 mm
高さ	508 mm
電圧	2 V
容量	2 kWh (1,000 Ah)
重量	73 kg
エネルギー密度 (重量)	27.4 Wh/kg
サイクル特性 (DOD ⁷⁾ : 70)	4,500 回

表10 製造コスト試算に用いる原材料の単価⁶⁾

	部材	重量 [kg]	割合 [%]	原料円 /kg	セル円 /kg	円 /Wh
正極	二酸化鉛 (PbO ₂)	21.9	30.0	220	66	2.409
	鉛 - カルシウム系合金格子体	2.19	3.0	200	6	0.219
	添加材	0.73	1.0	180	1.8	0.066
負極	海綿状鉛 (Pb)	20.44	28.0	200	56	2.044
	鉛 - カルシウム系合金格子体	2.19	3.0	200	6	0.219
	添加材	0.73	1.0	180	1.8	0.066
セパレータ	ガラス繊維不織布	2.19	3.0	280	8.4	0.307
電解液	希硫酸 (H ₂ SO ₄)	14.6	20.0	2.4	0.48	0.018
制御弁	合成ゴム	0.07	0.1	120	0.12	0.004
電槽	ABS 樹脂	5.11	7.0	210	14.7	0.537
ふた	ABS 樹脂	0.365	0.5	210	1.05	0.038
端子	鉛合金	2.19	3.0	200	6	0.219
フィルタ	セラミック	0.22	0.4	100	0.4	0.015
合計		73	100.0		168.75	6.159

2.4.2 製造コスト試算結果

表12に本検討の評価セルの製造コストと分析結果を示す。原料費がコストの86%であり、材料コスト依存性が高いことが分かった。中でも、正負電極の原料費の鉛地金がコスト全体の半分以上であった。

表 11 各種用役単価と人件費 [13]

項目	内訳	単価
用役	電力	12 円 /kWh
	工業用水	30 円 /m ³
	蒸気	10.8 /kWh
	天然ガス	60 円 /Nm ³
人件	4 直 3 交替	500 万円 / 人

表 12 評価セルの製造コストと分析

工 程	工程内容	変動費		固定費		合計	
		原料費	用役費	設備費	人件費		
		[¥/Wh _{ST}]	[¥/Wh _{ST}]	[¥/Wh _{ST}]	[¥/Wh _{ST}]	[¥/Wh _{ST}]	
日本国内生産							
100	正極製造	2.41	0.04	0.201	0.004	2.655	37.1%
200	負極製造	2.04	0.04	0.201	0.004	2.285	31.9%
300	正極混合・スラリー化	0.07	0.01	0.011	0.002	0.093	1.3%
400	負極混合・スラリー化	0.06	0.01	0.011	0.002	0.083	1.2%
500	正極塗工・プレス・スリット	0.22	0.01	0.065	0.01	0.305	4.3%
600	負極塗工・プレス・スリット	0.22	0.01	0.065	0.01	0.305	4.3%
700	セパレータスリット	0.31	0.01	0.003	0.004	0.327	4.6%
800	組立	0.82	0.02	0.025	0.016	0.881	12.3%
900	検査・充電・出荷	0.00	0.02	0.06	0.017	0.097	1.4%
1,000	回収	0.01	0.01	0.036	0.002	0.058	0.8%
1,100	NMP 回収・精製	0.00	0.01	0.009	0	0.019	0.3%
	オフサイト		0.02	0.034	0	0.054	0.7%
合計	[¥/Wh _{ST}]	6.16	0.21	0.72	0.07	7.16	100%
		86%	3%	10%	1%	100%	

2.4.3 CO₂ 排出係数

CO₂ 排出係数は、前章に記したコストエンジニアリング手法に基づき、イタ、コナの原料合成から、製品製造プロセスに付随する用益から発生する CO₂ 排出量も加味して算出する。LCS では、原材料起源の CO₂ 負荷量算定に、一般社団法人産業環境管理協会 (JEMAI : Japan Environmental Management Association For Industry) が提供する LCA 支援ソフトウェア MiLCA (Multiple Interface Life Cycle Assessment) のインベントリデータベースを参考に、主に IDEA v2 を用いる。IDEA v2 は一般社団法人 産業環境管理協会および国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループが提供するデータベース (2017 年版) である。それ以外のデータは LCS 内部資料「蓄電池の製造コスト及び環境負荷量計算及びコスト低減技術の検討」(2013 年作成) に基づいて算出する。

本検討では、IDEAv2.3 のデータベースで鉛蓄電池 1 個の CO₂ 排出係数⁹⁾は 5.87 kg-CO₂eq/ 個、製品コード 279111000 を用いた。また、別表から鉛蓄電池の仕様は表 4-1 の車両用バッテリー、自動車用蓄電池 (182×127 mm×202 mm、容量 384 Wh、角型様式) であり、容量当りに換算すると 15.3 g/Wh となる。

2.5 リサイクル・リユース技術

モノを素材レベルに分解して再び素材として再構築して使用する技術や、元素レベルにまで分別、分級して再合成に使うリサイクル技術、モノを部品レベルで取り換えるだけで再使用することやモノの使用後異なった用途に使用するリユース技術は今後のサーキュラーエコノミーの観点で重要視される。蓄電池には貴重資源が多く使われているため、また、鉛、カドミウムの毒性物質が使われているため、古くから回収リサイクル技術は研究されてきた。

リサイクルで問題となるのが、経済性、採算性である。再生分離回収した物質、資源が自然界からの採掘、精製、合成のコストと比較して同等以下、または再生のコスト上昇分を品質や特性、製造工程でのアドバンテージで相殺か、またはエコロジーのプレミアム価値観を主張できるかである。

一方、リユースはサーキュラーエコノミーの観点で、有用な手段となり得る。リサイクル技術もリユース技術もコストエンジニアリング手法で再生コストを算出することで、定量的分析が可能になる。

2.5.1 LIB リサイクル・リユース技術

自動車の EV 化により大量に発生するリチウムイオン電池の再資源化技術は近年急速に進展している。LIB を粉砕して得られる正負極材料が混合した塊や粉 (ブラックマス) から各元素を取り出す方法として「乾式精錬」と「湿式精錬」がある [17]。従来は高温加熱し金属の精錬を行う手法であったが、低コスト、低温でできるだけ構造を壊さずに分解して元の部材を活かす、酸、アルカリ、溶媒などの水溶液中で金属を取り出す湿式精錬に変わってきている。

しかしながら、湿式精錬においても、一つの元素を抽出するだけでも何段かの溶解、沈殿、抽出を繰り返す必要があり、工程が増えることにより鉱石から精錬するよりもコストが高くなることは容易に想到される。また、再生される元素も Ni や Co の 2 資源だけでは得られる価値化が低く採算が取れないことが容易に想到される。環境省の戦略的研究開発領域プロジェクトの平成 27 年～29 年、研究課題番号 3K152013 での報告書 [18] によれば、リチウムイオン電池の高度リサイクルは水素吸蔵合金向けニッケル・コバルト合金に活用できる程度であり、再生コストに難を残すとされている [19]。LIB のリサイクル技術はまだまだ確立されておらず、リサイクル事業も仕組みも今後の課題となっている [20]。

2.5.2 鉛蓄電池のリサイクル・リユース技術

鉛蓄電池の正負極には、鉛と酸化鉛が主に使用され、素材コストの 80% を占める (表 10)。2000 年代のこれらの金属鉛の元資源は、リサイクル鉛の占める割合が 54% であり、鉱石からの金属鉛は ISP 法亜鉛精錬プロセスで生産される鉛が 25%、純粹に鉛精錬から採取される電気鉛は 21% の割合になっている [21]。

現在では、リサイクル鉛が世界平均で 60% であり、日本、米国、欧州ではほぼ 90% がリサイクル鉛の原料となっている。リサイクル鉛のリサイクル元は主に鉛蓄電池になり、不純物も少ないため、製造コストは鉱石源からの精錬と同等もしくは同等以下と推測される [22]。近年では、無精錬リサイクリング等の蓄電池スクラップ鉛からの連続プロセス設備が考案され、ワンオペで

⁹⁾ IDEAv2.3 の最新データ情報を JEMAI の専門家から直接入手

鉛の再資源化が考えられている [23]。

日本国内の鉛蓄電池は環境省からの「使用済鉛蓄電池の適正処理について」法令化、告示、通達が発せられている [24]。また一般社団法人電池工業会では蓄電池メーカー各社 [25] の広域認定にもとづく処理システムを構築、運用していて、鉛蓄電池の回収率はほぼ 100%である¹⁰⁾。

次に鉛蓄電池リユース技術について検討した。鉛蓄電池の構造はシンプルで基本的に正極（酸化鉛）/セパレータ/負極（鉛金属）と希硫酸、電解槽で構成され、組み立てにも特別な設備は付帯しない。劣化の主原因は正極材料の硫化物化であり、硫化物が酸化物層の活性サイトを不活化する。硫化物を洗浄、除去すれば電池性能を復帰させることができる。硫化物の洗浄、除去は、物理処理的には高温水素ガスによる還元、再酸化でもでき得るし、化学反応を利用して水溶液中の酸処理による洗浄と、酸化還元剤と界面活性剤処理によっても比較的容易に鉛の再生が可能となる [26]。特に、極板だけ酸化還元剤と界面活性剤により洗浄、再生できれば蓄電池としてリユース可能になる。既に、アクト株式会社、株式会社エスアイエナジー、株式会社リプラス等で鉛蓄電池のリユース事業を進めている¹¹⁾。

2.5.3 2050年のリチウムイオン電池と鉛蓄電池

表 13 に現状のリチウムイオン電池と鉛蓄電池の性能とコストの比較について示す。リチウムイオン電池の性能とコストの出处は、科学技術振興機構低炭素社会戦略センター提案書、“蓄電池システム (Vol.9) 一次世代電極活物質を用いたリチウムイオン電池の製造コスト試算”である [13]。鉛蓄電池の製造コストは LIB の 60%であった。原材料費がどちらの蓄電池も支配的であるが、固定費は LIB が鉛の 3 倍となりコスト高の原因にもなっている。また、Pb の CO₂ 排出量は、LIB の 4 分の 1 以下と算出された。

表 13 現状のリチウムイオン電池と鉛蓄電池の性能とコストの比較 [13]

電極構成	電極活物質（正極 / 負極）		LIB	鉛蓄電池	
			NCA/C ₆	PbO ₂ /Pb	
電池性能	電池電圧	[V/ 個]	3.6	12.0	
	容 量	[Wh/ 個]	272	384	
	重 量	[g/ 個]	981	9,500	
	重量エネルギー密度	[Wh/kg]	277	40	
	体積エネルギー密度	[Wh/L]	626	82	
製造コスト	変動費	原材料費	[円 /Wh]	9.1	6.2
		用役費	[円 /Wh]	0.4	0.2
	固定費	設備費	[円 /Wh]	2.0	0.7
		人件費	[円 /Wh]	0.4	0.1
	合計	[円 /Wh]	11.9	7.2	
CO ₂ 負荷量		[g/Wh]	67.9	15.3	

¹⁰⁾ 出典：電池工業会 HP：https://www.baj.or.jp/battery/lead-acid/index.html

¹¹⁾ 出典：アクト（株）http://www.act-cp.com/battery.html、エスアイエナジー（株）：https://www.si-energy.co.jp/2021/04/20/news-press/1、（株）リプラス http://www.replus-battery.jp/index3.html

2.5.1 章で記したように、リチウムイオン電池のリサイクル・リユース技術は近年急速に進展しているものの、コスト的に採算が合わず、現行 NCA/C₆ 系のリチウムイオン電池の低コスト化は量産効果に期待するものである。また、リチウムイオン電池の特徴は、EV 用など軽くて高容量であり、高エネルギー密度化することで Wh 当たりのコストを下げることができる。LCS では次世代リチウムイオン電池を評価し、2040 年から 2050 年頃には、正極に LiTiMnO₂ 活物質、負極に Si を用いた、高エネルギー密度かつ低コストなリチウムイオン電池の実用化を予想している [13]。表 14 にリチウムイオン電池の将来モデルの性能とコスト、および CO₂ 負荷量を示す。コストエンジニアリングから算出した製造コストは 8 円、CO₂ 負荷量は 33 gCO₂/Wh のものを予測している。

表 14 リチウムイオン電池の将来モデルの性能とコスト、および CO₂ 負荷量 [13]

			短期的目標 (2030 ~ 2040 年)			中期的目標 (2050 年)	
			現状	将来モデル 1	将来モデル 2	将来モデル 3	将来モデル 4
電極構成	電極活物質 の材料	正極	NCA	Li _{1.2} Ti _{0.4} Mn _{0.4} O ₂ Li ₂ Mn _{1/2} Ti _{1/2} O ₂ F	NCA	Li _{1.2} Ti _{0.4} Mn _{0.4} O ₂ Li ₂ Mn _{1/2} Ti _{1/2} O ₂ F	S
		負極	C ₆	C ₆	Si	Si	金属 Li
	電極活物質 の容量	正極 [Wh/個]	196	300 ~ 320	196	300 ~ 320	1,508
		負極 [Wh/個]	353	353	1,007 ~ 4,197	1,007 ~ 4,197	2,895
電池性能	重量エネルギー密度 [Wh/kg]	277	302 ~ 308	314 ~ 458	305 ~ 601	1,025	
	体積エネルギー密度 [Wh/L]	626	620 ~ 634	698 ~ 1,211	841 ~ 1,029	1,064	
製造コスト		[円 /Wh]	11.9	10.3 ~ 10.6	7.3 ~ 11.5	5.2 ~ 10.0	5.1
CO ₂ 負荷量		[gCO ₂ /Wh]	67.9	45.3 ~ 46.7	53.0 ~ 63.2	27.1 ~ 39.6	36.6

一方、鉛蓄電池の性能は、活物質の有効利用や形状変更¹²⁾、製造プロセスの改良、長寿命化取り組みなどで、少しずつ改良改善が加えられてはいるものの、最近の研究開発状況から判断して急峻に向上することは期待されない。しかし、2.5.2 章の鉛蓄電池のリサイクル・リユース技術で記したように、リユース技術が近年急速に進展し、事業として成立し得るまでになってきている。本検討では、鉛蓄電池の寿命として、DOD : 70 で 4,500 回のサイクル充放電可能なことから、10 年として算出を行っている。LIB も DOD : 70 で 4,000 回のサイクルまで充放電可能となってきたため、ともに 10 年の寿命と考えた。しかしながら、リユース技術により同一電池を消耗部品だけの取替で再生できれば、1 個の蓄電池が倍の寿命を持つことになる。電池 1 個で 20 年間使えば、製造コストは 10 年目の交換部品を追加して、1/2 にすれば、10 年間分のコストとして算出できると考え、LIB とコスト比較した。

¹²⁾ “再生エネ活用の本命「バイポーラ型蓄電池」リチウムイオン電池比でトータルコスト 1/2 実用化へ”、古河電気工業株式会社・古河電池株式会社ニュースリリース、https://www.furukawa.co.jp/release/2020/ene_20200609.html (アクセス日 2022 年 12 月 13 日)

表 15 鉛蓄電池リユース時の交換部品、部材

	部材	重量 [kg]	割合 [%]	原料円 /kg	セル円 /kg	円 /Wh
正極	二酸化鉛 (PbO ₂)	21.9	30.00%	220	66	2.409
	鉛 - カルシウム系合金格子体	2.19	3%	200	6	0.219
	添加材	0.73	1%	180	1.8	0.066
負極	海綿状鉛 (Pb)	20.44	28%	200	56	2.044
	鉛 - カルシウム系合金格子体	2.19	3%	200	6	0.219
	添加材	0.73	1%	180	1.8	0.066
セパレータ	ガラス繊維不織布	2.19	3%	280	8.4	0.307
電解液	希硫酸 (H ₂ SO ₄)	14.6	20%	2.4	0.48	0.018
制御弁	合成ゴム	0.07	0.10%	120	0.12	0.004
電槽	ABS 樹脂	5.11	7.00%	210	14.7	0.537
ふた	ABS 樹脂	0.365	0.50%	210	1.05	0.038
端子	鉛合金	2.19	3%	200	6	0.219
フィルタ	セラミック	0.22	0.40%	100	0.4	0.015
合計		73	100.00%		168.75	6.159

表 15 には鉛蓄電池リユース時の交換部品、部材を示す。表 15 のハッチのない部品、部材のセパレータ、電解液、制御弁、フィルタの交換だけでリユースが可能と考えた。再生蓄電池のコストは、正極酸化鉛表面の硫化鉛の酸、界面活性剤の超音波洗浄の工程の固定変動費込み最大 0.04 円 /Wh を交換原材料費 0.34 円 /Wh に積算しても 0.38 円 /Wh となる。再生蓄電池と新品との製造再生コストは合算して 7.48 円 /Wh となり、10 年単位のコストは、3.74 円 /Wh と算出された。

2.5.4 システムコスト

蓄電池をユーザーに提供する場合、蓄電池の充放電システム、筐体等、付帯設備を付けたパッケージが必要になる。本検討では、設置工事、運搬、フットプリント借地代を除いたシステムコストを算出した。本検討での部品単価は、材料の品質、マス購入を勘案して、市販ベース価格、地金相場を元に設定した。なお、参考製品は、LIB 容量 6 kWh、最大受電 2 kW、鉛容量 472 kWh、最大受電 250 kW とした。

表 16 リチウムイオン電池と鉛蓄電池のシステムコスト

	仕様	単価	部材別コスト		Wh 当りのコスト		備考
				円 /system	円 /Wh	[%]	
リチウムイオン電池 ¹³⁾							
電池セル	6 kWh	12	円 /Wh	72,480	12	43	NCA
セル収納箱	26.5 kg	140 ¹⁴⁾	円 /kg	3,714	0.6	2	鉄材
蓄電池システム収納箱	67 kg	140 ¹⁴⁾	円 /kg	9,380	1.6	5	鉄材
パワーコンディショナ	2 kW	40	円 /W	80,000	13	38	
保護・制御回路	6 kW	3.3	円 /W	20,000	3.3	10	
ヒートシンク	3 kg	500 ¹⁴⁾	円 /kg	1,500	0.2	1	アルミ
日除け板	6 kg	140 ¹⁴⁾	円 /kg	840	0.1	0	鉄材
架台	17 kg	140 ¹⁴⁾	円 /kg	2,380	0.4	1	鉄材
合計				190,294	31.2	100	
鉛蓄電池 ¹⁵⁾							
電池セル	472 kWh	7.1	円 /Wh	3,351,200	7.1	30	角型
蓄電池システムコンテナ (エアコン付)	40 ft	1.7	円 /Wh	800,000	1.7	7	鉄材
パワーコンディショナ	250 kW	20	円 /W	5,000,000	10.6	44	
保護・制御回路	200 kW	4.72	円 /W	944,000	2.0	8	
日除け板	337 kg	140 ¹⁴⁾	円 /kg	47,200	0.1	0.4	鉄材
架台	8,800 kg	140 ¹⁴⁾	円 /kg	1,227,000	2.6	11	鉄材
合計				161,650	24.1	100	

表 16 にリチウムイオン電池と鉛蓄電池のシステムコストを示す。リチウムイオン電池のシステムコストは 31.2 円 /Wh、鉛蓄電池のシステムコストは 24.1 円 /Wh となった。

3. まとめ

表 17 に現在と将来の鉛蓄電池とリチウムイオン電池の性能、コスト比較を示す。鉛蓄電池の性能向上は今後大きくは進展しないもののリサイクル、リユース技術の向上が見込まれ、電池サイクル寿命が 2 倍になることが予測される。その時のセルコストは 3.7 円 /Wh であり、システム

¹³⁾ 各社メーカーカタログを参照し LCS 内部資料「蓄電池の製造コスト及び環境負荷量計算及びコスト低減技術の検討」を参考に設定

¹⁴⁾ 鉄材：鉄材価格は熱延鋼板（材質 SS400）の 2 倍（出典）鉄鋼新聞 販価情報（2011 年平均値）、<http://www.japanmetaldaily.com/statistics/categlist/details/index.html>、アルミニウム価格は PV で設定しているアルミ枠と同じ単価を用いた

¹⁵⁾ メーカーカタログを参照し LCS 内部資料を参考に設定、https://we.kinkosonline.jp/apps/home/fbbattery-1/guest?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=aiaad_01&gclid=EAIaIQobChMhOepi6L9-wIVChdGCh1beAVIEAAYASACEgINPvD_BwE,

コストは13円/Whとなった。一方、リチウムイオン電池は正極活物質に $\text{Li}_{1.2}\text{Ti}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_2$ または、 $\text{Li}_2\text{Mn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2}\text{O}_2\text{F}$ 、負極活物質に Si が用いられそのエネルギー密度は277 Wh/kg から453 Wh/kg に向上し、セルコストは8円/Whにシステムコストは20円/Whになった。また、現状も将来も製造プロセスが大きく変わらない下では、鉛蓄電池のCO₂排出量は、LIBの1/4であった。

表 17 将来の鉛蓄電池とリチウムイオン電池の性能、コスト比較

蓄電池タイプ	鉛蓄電池		LIB 電池	
	現在	将来	現在	将来
充放電回数 @ DOD70	4,500		4,000	
充放電効率 (%)	87		95	
エネルギー密度 (Wh/kg、(Wh/l))	28 (76)		277 (626)	453 (935)
セルコスト (円 Wh)	7.1	3.7	12	8
システムコスト (円 /Wh)	24	13	31	20
CO ₂ 排出量 (g/Wh)	15	8	68	33

今回、定置用蓄電池の供給可能量とコストエンジニアリング手法による鉛蓄電池のコスト評価を行った結果、NCA 正極のような Co や Ni を含む高性能リチウムイオン電池は EV 用途で 2030 年までではほぼ資源限界をむかえ、再エネ蓄エネ用には蓄電全体の 10% 程度までが限界であった。2050 年将来の日本の定置用蓄電池が 12 TWh、世界で 53.6 TWh を必要とした場合、鉛の世界でのリサイクル率を現状の 60% から 90% に向上させることにより、鉛蓄電池として資源的に循環供給できることができ、鉛蓄電池のリユース循環が構築されれば、蓄電池コストも下がり、経済が循環することが分かった。また別途、電源構成モデルからも水素や揚水発電よりコストパフォーマンスの点で優位であることが示されている [6]。また、本検討により下記のことが分かった。

- 1) 現状のリチウムイオン電池の正極材料活物質の $\text{LiNi}_{0.85}\text{Co}_{0.12}\text{Al}_{0.03}\text{O}_2$ を EV 用バッテリーに用いた場合、2030 年頃には Ni および Co 材料の供給が困難になる可能性がある。
- 2) EV 用の高エネルギー密度のリチウムイオン電池は Ni、Co 含有量の少ない正極活物質材料の開発、例えば $\text{Li}_{1.2}\text{Ti}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_2$ や、 $\text{Li}_{1.2}\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_2$ の変更が望まれる。
- 3) 再生エネ電力貯蔵用など定置用蓄電池としては、鉛、NaS、RF 電池の供給量を 8～9 割導入することにより、受給バランスを維持することが可能である。
- 4) 将来 2050 年の鉛蓄電池はリサイクル、リユース技術を用いてシステムコスト 13 円 /Wh にでき、将来の高エネルギー密度型のリチウムイオン電池のシステムコスト 20 円 /Wh に比べて競争力があり、CO₂ 排出量も約 1/4 であることが分かった。
- 5) バナジウムイオン電解質を用いるレドックスフロー電池は、全世界の定置式電力貯蔵用の 5% (1,173 GWh) に導入した場合、採掘可能残存年が 26 年以下になり資源限界に近づく。新たに資源豊富で安価な電解質の開発が必要である。

4. 政策立案のための提案

本検討の結果より下記の内容の政策提案を行う。

- 1) 今後急速に再エネ電力貯蔵用の蓄電池が必要となるなか、持続的に資源循環可能で低コスト、低 CO₂ 排出の鉛蓄電池の導入活用を進めるとともに、鉛蓄電池に変わるコスト競争力のあ

る蓄電池システム、例えば NaS 電池やレドックスフローの更なる高性能化、低コスト化の研究開発が必要である。また、技術的には中国、韓国メーカーに後れを取っている低コストリン酸鉄系正極リチウムイオン電池の更なる高性能化、低コスト化技術の研究開発が必要で、蓄電池産業の育成と市場創出のための国の早急な支援を求める。

- 2) Co や Ni 等の希少資源のみならず、鉛蓄電池で使用される鉛金属のような卑なる金属材料の国内確保も非常に重要な課題であると言える。循環型社会、循環型経済を進める上でも廃材、産廃、使用後の物質を資源として確保、貯蔵することが大切であり、限られた資源を用いてのゼロカーボン社会の達成がこれからの課題になる。リユース、リサイクル技術の研究開発、仕組みづくり、法整備もあわせて進める必要がある。
- 3) エネルギー戦略上も、太陽光発電、風力発電等の再エネ発電技術の研究開発とともに、蓄電池技術は将来のエネルギーを支える重要な技術分野である。日本の産業を支えていくためにも、現状の事業投資だけでなく、人材育成もまた必要であると考えらる。

参考文献

- [1] 環境省 HP, 「地球温暖化対策計画 (令和3年10月22日閣議決定)」, 地球温暖化対策推進法と地球温暖化対策計画, (アクセス日 2022年12月9日).
- [2] 山田興一, “ZC に向かう 2030、2050 年の明るい社会”, 2022 年度 LCS ウェビナー「2050 年, ゼロエミッションの社会像～シナリオとプラン～」, 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター, <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/webinar20220624-1.pdf>, 2022 年, (アクセス日 2022年12月9日).
- [3] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.4) —データセンター消費電力低減のための技術の可能性検討—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2022 年 2 月.
- [4] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “ゼロカーボン社会実現に向けた 2030 年、2050 年の産業構造”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2022 年 4 月.
- [5] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, 技術開発編, “「低炭素技術設計・評価プラットフォーム」による分析手法の提案”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2019 年 2 月.
- [6] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “ゼロカーボン電源システムの安定化と技術・経済性評価 (Vol.3) —2030 年政府案実現の見通し評価と 2050 年ゼロカーボン電源化への課題—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2022 年 3 月.
- [7] 株式会社富士経済, “エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2021—ESS・定置用蓄電池分野編—”, (2021 年 7 月).
- [8] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, 技術開発編, “蓄電池システム (Vol.4) —レドックスフロー電池システムの構成解析とコスト評価—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2017 年 3 月.
- [9] 電気化学会 電池技術委員会編, “電池ハンドブック”, オーム社, p.410-413, 2010.
- [10] 一般社団法人電池工業会 HP, 電池の種類, <https://www.baj.or.jp/battery/kind/type.htmlJinhyuk>, (アクセス日 2022 年 12 月 9 日).
- [11] 日本ガイシ株式会社 HP, NaS 電池, <https://www.ngk.co.jp/product/nas.html>, (アクセス日 2022 年 12 月 9 日).
- [12] 住友電工 HP, レドックスフロー電池, <https://sumitomoelectric.com/jp/products/redox>, (アクセス日 2022 年 12 月 9 日).
- [13] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “蓄電池システム (Vol.9) 一次世代電極活物質を用いたリチウムイオン電池の製造コスト試算—”, 科学技術振興機構低炭素社会

- 戦略センター, 2021年3月.
- [14] 谷口昇, “各種蓄電池の供給可能量”, 2021年度LCSウェビナー「2030年、温室効果ガス46%減社会の姿」, 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター, <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/webinar20210611-2.pdf>, 2021年, (アクセス日 2022年12月9日).
- [15] 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 HP, 鉱物資源マテリアルフロー 2020 2. 鉛 (Pb), https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2021/06/material_flow2020_Pb.pdf, (アクセス日 2022年12月9日).
- [16] 国際公開番号 WO2017/047054A1, “鉛蓄電池”, 2016年.
- [17] 木通秀樹, “EV 車載電池で進む CE 市場化の取り組み”, エネルギー・資源, Vol.43, No.4, (2022).
- [18] 環境省 HP, https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/special/houkoku/data_h28/pdf/3K152013.pdf, (アクセス日 2022年12月9日), 研究課題番号 3K152013「リチウムイオン電池の高度リサイクル」.
- [19] 経済産業省 HP, <https://www8.cao.go.jp/cstp/material/7kai/siryoo2-4.pdf>, (アクセス日 2022年12月9日).
- [20] 日経 XTECH, “LIB リサイクルは湿式が主流に 再生正極は新品より高性能”, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01948/00005/>, (アクセス日 2022年12月9日).
- [21] 増田剛志, 大蔵隆彦, 中村崇, “鉛創電池のリサイクルシステムに関する考察”, 資源と素材, Vol.120, p60-67, 2004.
- [22] 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 HP, 鉱物資源マテリアルフロー 2019, https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2020/05/material_flow2019.pdf, (アクセス日 2022年12月9日).
- [23] 特許出願公表番号特表 2016-500459 (P2016-500459A).
- [24] 環境省 HP, “使用済鉛蓄電池の適正処理について”, <https://www.env.go.jp/hourei/11/000251.html>, (アクセス日 2022年12月9日).
- [25] 長安龍夫, 吉岡俊樹, “鉛蓄電池の環境対応技術の開発経緯と今後の展開”, GS Yuasa Technical Report, 2007年6月 第4巻 第1号.
- [26] 特許出願公開番号特開平 10-162868, 特許番号 P3987597, “使用済鉛蓄電池用正極活物質の再利用処理方法”.

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

蓄電池システム (Vol.10)
—一定置用蓄電池の供給可能量と鉛蓄電池のコスト評価—

令和5年2月

Secondary Battery System (Vol. 10) :
Investigation of Supply Capacity of Stationary Storage Batteries and
Cost Evaluation of Lead-Acid Batteries

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2023.2

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 副センター長 谷口 昇 (TANIGUCHI Noboru)
- 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 8階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2023 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。

