

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.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－

令和 3 年 3 月

Secondary Battery System (Vol. 9):

Cost Evaluation of a Lithium-ion Battery Using Next-Generation Electrode Active Material

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-FY2020-PP-08

概要

リチウムイオン電池 (LIB) は、電気自動車等の移動体用電源や太陽光発電・風力発電等の再生可能エネルギーを安定に供給するための定置型蓄電システムにも利用されており、持続可能な低炭素社会の実現に関わる重要な技術要素の1つである。さらなる普及のために、例えば、EV用蓄電池については、2030年までにエネルギー密度を 500 Wh/kg 以上、電池パックコストを 1 万円 /kWh とすることが目標とされている [NEDO Battery RM2013 (2013 年 8 月) 参照]。本提案書では、近年の技術水準を考慮したリチウムイオン電池の製造コストを試算するとともに、リチウムイオン電池の高エネルギー密度化と低コスト化の将来推移を予測すべく、次世代電極活物質を適用したラミネート型リチウムイオン電池を設計して製造コストを試算した。その結果、現状モデル (2020 年) の製造コストは 11.9 ~ 23.2 円 /Wh、将来モデルでは最も低い値で 5.1 円 /Wh まで低減する可能性があることを示した。しかしながら、EV 用など 2030 年までに目標とするエネルギー密度と製造コストを達成するためには約 10 年から 20 年の研究開発加速が必要であり、産官学が一体となった集中的な資源投資が必要であることを提案する。

Summary

Lithium-ion batteries (LIBs) constitute an important technological component of a sustainable low-carbon society. They are used both for power sources for electric vehicles (EVs) and other mobile devices and in stationary power storage systems, which ensure a stable supply of renewable energy from solar, wind, and other sources. Promoting a wider use of LIBs requires increasing the energy density of EV batteries, for example, to 500 Wh/kg or higher and reducing their battery pack cost to 10,000 JPY/kWh by 2030 (see NEDO “Battery RM2013” (August 2013)). For this proposal paper, we calculated the manufacturing costs of LIBs while factoring in the recent technological levels. We also designed a laminated LIB with the application of a next-generation electrode-active material and calculated its manufacturing cost in an effort to predict the trajectories of LIBs becoming higher in energy density and lower in cost. As a result, we estimated the manufacturing cost of the current models (2020) at 11.9-23.2 JPY/Wh and that of future models at 5.1 JPY/Wh at the lowest. Nevertheless, achieving the 2030 targets for the energy density and manufacturing cost of EV batteries requires accelerating relevant research and development for the next 10 to 20 years. We thus propose intensive resource input by industry, government, and academia working as one.

目次

概要

1. 緒言	1
2. LIB の製造コスト試算	1
2.1 評価用電池の仕様設計	1
2.2 評価用電池の製造プロセス設計	4
2.3 製造コスト試算結果	5
3. まとめ	12
3.1 製造コスト試算結果	12
3.2 将来展望	13
4. 政策立案のための提案	14
4.1 目標達成の課題	14
4.2 政策立案のための提案	15
参考文献.....	15

1. 緒言

持続可能な低炭素社会の実現に向けて、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの普及が進められている。しかし、これらの再生可能エネルギーの発電量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併せて導入することが必要である。また、自動車分野ではCO₂排出量を削減すべく蓄電池を搭載した電気自動車 (EV) やプラグインハイブリッド自動車 (PHEV) の開発・普及が進められている。このように、蓄電池は低炭素社会を構成する重要な技術要素の1つである。

実用蓄電池として、リチウムイオン電池 (LIB)、ニッケル水素電池、鉛蓄電池、レドックスフロー電池、ナトリウム硫黄電池などが挙げられる。LIBは他の実用蓄電池に比べて単位体積または単位質量当たりのエネルギー密度が高く、小型・軽量化することが可能である。また、自己放電が少なく、サイクル寿命も比較的長いことから、様々な用途に適用されている。上述した定置型蓄電システムやEV用途での適用も進められており、さらなる普及に向けて高容量、高出力、かつ、低コストとなる電力貯蔵技術を確立することが求められている。例えば、EV用蓄電池については、2030年までにエネルギー密度を500 Wh/kg以上、電池パックコストを1万円/kWhとすることが目標とされている[1]。一方、市販されている18650型円筒形リチウムイオン電池のエネルギー密度は125～250 Wh/kg-battery程度、製造コスト13～18円/Wh (LCS2013年試算値、[2])であり、目標達成のためには飛躍的な技術革新が必要である。本提案書では、近年の技術水準を考慮したリチウムイオン電池の製造コストを試算するとともに、リチウムイオン電池の高エネルギー密度化と低コスト化の将来推移を予測すべく、次世代電極活物質を適用したラミネート型リチウムイオン電池を設計して製造コストを試算する。

2. LIBの製造コスト試算

2.1 評価用電池の仕様設計

LIBは主に、正極、負極、正極－負極間を仕切るセパレータおよび、各電極とセパレータの空隙を満たす液系電解質で構成される。正極・負極の活物質にリチウムイオンを挿入又は脱離することができるホスト構造を有する材料を用い、これらの電極間でリチウムイオンをやり取りすることで充放電が行われる蓄電池である。

図1に評価用ラミネート型電池の構成概念図を示す。評価用電池は、単セル（正極集電体（アルミニウム箔、18 μm）／正極合剤層／セパレータ（ポリエチレン、8 μm）／負極合剤層／負極集電体（銅箔、16 μm）の順に重ねた構成）を複数個積み重ねた積層セルをパウチ材の外装で封じた構造とした。また、各々の単セルに端子を付して、積層セル内において電気的には並列に接続されることを想定した。

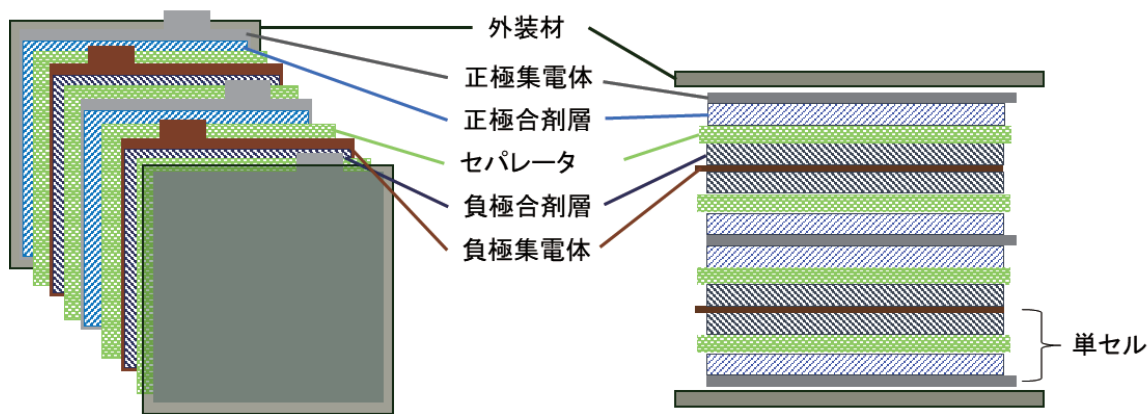


図1 評価用電池の構成概念図（左：分解斜視図、右：断面図）

(1) 電池寸法

表1に評価用電池の外形と正極集電体の寸法を示す。市販のLIBを参考にして設定した。

表1 評価用電池の外形と正極集電体の寸法

電池寸法	
外形寸法 [mm×mm×厚み mm]	261×216×約8
正極集電体寸法 [mm×mm]	240×200

(2) 電極合剤層の構成

i) 電極活物質

表2に評価用電池の電極活物質の構成と電池電圧を示す。基準1～4は市販のLIBに用いられている電極活物質（従来品）を用い、検討1～9は正極・負極活物質の片方または両方とも従来品以外の材料を用いて構成した。具体的には、正極活物質は従来品として $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ (NCA)、 $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$ (NMC)、 LiFePO_4 (LFP)、 LiMn_2O_4 (LMO)、次世代正極活物質として高容量を示すリチウム過剰系材料 $\text{Li}_{1.2}\text{Ti}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_2$ 、 $\text{Li}_2\text{Mn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2}\text{O}_2\text{F}$ および硫黄、また、高電位材料 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ を対象とした。負極活物質は従来品として黒鉛 (C_6)、 $\text{Li}_4/3\text{Ti}_5/3\text{O}_4$ (LTO)、次世代負極活物質として高容量材料Siおよび金属Liを対象とした。正極・負極活物質の容量値は文献等を参考にして設定した¹⁾。容量利用率は理論容量に対する表2の容量値の比率である。

¹⁾ 市販LIBに用いられている電極活物質については文献やヒアリングの情報、 $\text{Li}_{1.2}\text{Ti}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_2$ は文献[5]、 $\text{Li}_2\text{Mn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2}\text{O}_2\text{F}$ は文献[6]、 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ は文献[7]、 $\text{Li}_4/3\text{Ti}_5/3\text{O}_4$ については文献[8]を参考にして設定した。また、検討4～8については文献[9]、検討9については文献[10]を参考にして設定した。

表 2 評価用電池の電極活物質の構成と電池電圧

	正極			負極			電池電圧 [V]
	活物質	容量値 [mAh/g]	容量 利用率	活物質	容量値 [mAh/g]	容量 利用率	
基準 1	$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$	196	0.72	C_6	353	0.95	3.6
基準 2	$\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$	169	0.61	C_6	353	0.95	3.6
基準 3	LiFePO_4	165	0.97	C_6	353	0.95	3.3
基準 4	LiMn_2O_4	110	0.74	$\text{Li}_{4/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4$	165	0.94	2.24
検討 1	$\text{Li}_{1.2}\text{Ti}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_2$	300	0.76	C_6	353	0.95	3.3
検討 2	$\text{Li}_2\text{Mn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2}\text{O}_2\text{F}$	320	0.70	C_6	353	0.95	3.3
検討 3	$\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$	135	0.92	C_6	353	0.85	4.55
検討 4(a)/4(b)	$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$	196	0.72	Si	1,007/ 4,197	0.24/ 1	3.3
検討 5(a)/5(b)	$\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$	169	0.61	Si	1,007/ 4,197	0.24/ 1	3.3
検討 6(a)/6(b)	$\text{Li}_{1.2}\text{Ti}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_2$	300	0.76	Si	1,007/ 4,197	0.24/ 1	3.0
検討 7(a)/7(b)	$\text{Li}_2\text{Mn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2}\text{O}_2\text{F}$	320	0.70	Si	1,007/ 4,197	0.24/ 1	3.0
検討 8(a)/8(b)	$\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$	135	0.92	Si	1,007/ 4,197	0.24/ 1	4.25
検討 9	S	1,508	0.9	金属 Li	2,895	0.75	2.15

ii) 電極合剤の構成

電極合剤は、電極活物質とバインダーと必要に応じて導電助剤で構成される。ここで、正極合剤の構成重量比について、正極活物質に硫黄以外を用いる場合は電極活物質：導電助剤：バインダー＝94：2：4とした²⁾。硫黄を用いる場合は文献[11]を参考にして電極活物質：導電助剤：バインダー＝73：22：5とした。負極合剤の構成重量比については、 C_6 の場合は電極活物質：バインダー＝97：3、 $\text{Li}_{4/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4$ の場合は電極活物質：導電助剤：バインダー＝94：2：4、Siの場合は電極活物質：導電助剤：バインダー＝84：11：5とした³⁾。Li金属の場合はLi金属箔を用い、導電助剤やバインダーは含まないものとした。また、電極合剤層の厚みについては、負極合剤層の厚みを100 μm と仮定し、正極合剤層の厚みを成り行きとした。電極合剤の空隙率は電解液量と相関するものとし、電解液量が市販LIBの電解液量(3.7～5.0 g/cell)と同等となるように空隙率を設定した。具体的には、硫黄以外の正極合剤は0.28、硫黄正極合剤は0.32、 C_6 負極合剤は0.33、 $\text{Li}_{4/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4$ 負極合剤は0.28、Si負極合剤は0.63、Li金属負極では0と設定した。Si負極については、

²⁾ 市販LIBでの正極側の構成比を参考にして設定した。リチウム過剰系材料については文献[5], [6]では電極活物質の比率がやや低い(電極活物質：導電助剤：バインダー＝80：15：5)、ここでは従来品と同じ比率で構成するものとした。

³⁾ C_6 については文献やヒアリングの情報を参考、 $\text{Li}_{4/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4$ は従来の正極合剤と同じ比率とし、Siは文献[12]のSiO負極を参考にして設定した。

充電時に体積が約3倍増大する[13]。このため、充電時に膨張する体積分を予め負極材の空隙量に加えた設計とした。

2.2 評価用電池の製造プロセス設計

本提案書のラミネート型評価用電池の製造プロセスは、これまでにLCSで設計した従来LIBの製造プロセスを基にして構成した。評価用電池の製造プロセスフローを図2示す。金属Li負極を用いる電池は負極側について図中のスリット工程より前の工程は不要とした。

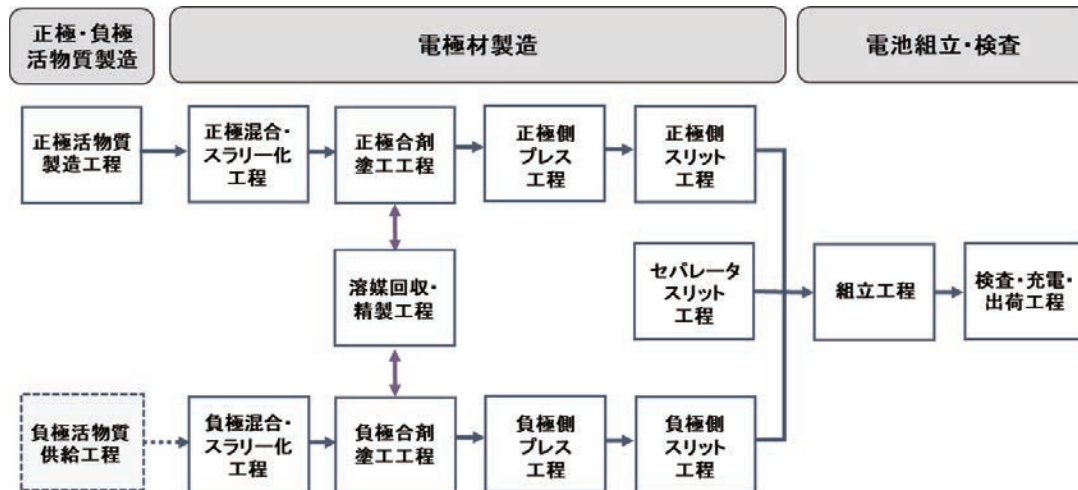


図2 評価用電池の製造プロセスフロー

評価用電池の生産規模は、年産10GWhの製造プラントを想定した。評価用電池製造の工程別収率、累積収率、年間稼働時間をまとめて表3に示す。累積収率について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%）までの範囲で累計収率89%とした。また、年間製造稼働時間については8,000時間（塗工工程のみ6,600時間）とした。

表3 評価用電池製造の工程別収率、累積収率、年間稼働時間（正極活物質基準累積収率 89%）

工程	工程別収率	累積収率	年間稼働時間[h]
200 正極活物質製造工程	0.99	0.89	8,000
300 正極混合・スラリー化工程	0.99	0.90	8,000
400 正極合剤塗工工程	0.97	0.91	6,600
500 正極側プレス工程	0.99	0.94	8,000
600 正極側スリット工程	0.99	0.95	8,000
700 組立工程	0.99	0.96	8,000
800 検査・充電・出荷工程	0.97	0.97	8,000
1200 負極活物質供給工程	—		
1300 負極混合・スラリー化工程	0.99		8,000
1400 負極合剤塗工工程	0.97		6,600
1500 負極側プレス工程	0.99		8,000
1600 負極側スリット工程	0.99		8,000
2600 セパレータスリット工程	0.99		8,000
3400 溶剤回収・精製工程	0.92		8,000

2.3 製造コスト試算結果

製造コストは、製造工程毎に変動費と固定費から求めた。変動費は、投入する原材料費と、製造に要する電力・燃料・工業用水等の用役費からなる。固定費は、製造プロセスを構成する製造機器に基づく設備費⁴⁾と、工程毎の操業に必要な運転人員から算出した人件費からなる。評価用電池の製造コストについて、従来 LIB（基準1～4）と次世代電極活物質を用いた電池（検討1～9）に分けて以下に記載する。

(1) 従来 LIB

評価用電池（基準1～4）の製造コスト試算結果を表4に示す。基準1モデル（NCA/C₆）の製造コストは11.9円/Wh、基準2モデル（NMC/C₆）は12.5円/Wh、基準3モデル（LFP/C₆）は14.7円/Wh、基準4モデル（LMO/LTO）は23.2円/Whであった。基準1～4モデルにおいて、原材料費が全体の72～77%、次いで設備費が全体の16～20%を占めた。

⁴⁾ 年経費率0.2（耐用年数8年、補修費、租税公課含む）

表4 評価用電池（基準1～4）の製造コスト試算結果

				基準1	基準2	基準3	基準4
電極構成	電極活物質(正極／負極)			NCA/C ₆	NMC/C ₆	LFP/C ₆	LMO/LTO
電池性能	電池電圧	[V/個]		3.6	3.6	3.3	2.24
	容量	[Wh/個]		272	257	216	107
	重量	[g/個]		981	999	939	1,100
	重量エネルギー密度	[Wh/kg]		277	257	230	97
	体積エネルギー密度	[Wh/L]		626	590	483	244
製造コスト	変動費	原材料費	[円/Wh]	9.1	9.5	11.4	16.8
		用役費	[円/Wh]	0.4	0.4	0.5	0.8
	固定費	設備費	[円/Wh]	2.0	2.1	2.4	4.7
		人件費	[円/Wh]	0.4	0.4	0.5	1.0
	合計		[円/Wh]	11.9	12.5	14.7	23.2

(2) 次世代電極活物質を用いた電池

i) 次世代正極活物質を用いた場合

評価用電池（基準1、検討1～3）の製造コスト試算結果を表5に示す。検討1モデル（ $\text{Li}_{1.2}\text{Ti}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_2/\text{C}_6$ ）の製造コストは10.5円/Wh、検討2モデル（ $\text{Li}_2\text{Mn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2}\text{O}_2\text{F}/\text{C}_6$ ）は10.3円/Wh、検討3モデル（ $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4/\text{C}_6$ ）は9.5円/Whであった。検討1～3モデルにおいて、基準1と同様、原材料費が全体の72～74%、次いで設備費が全体の18～20%を占めた。

表5 評価用電池（基準1、検討1～3）の製造コスト試算結果

			基準 1	検討 1	検討 2	検討 3	
電極構成	電極活物質(正極／負極)		NCA/C ₆	Li _{1.2} Ti _{0.4} Mn _{0.4} O ₂ /C ₆	Li ₂ Mn _{1/2} Ti _{1/2} O ₂ F/C ₆	LiNi _{0.5} Mn _{1.5} O ₄ /C ₆	
電池性能	電池電圧	[V/個]	3.6	3.3	3.3	4.55	
	容量	[Wh/個]	272	276	269	288	
	重量	[g/個]	981	913	875	1,001	
	重量エネルギー密度	[Wh/kg]	277	302	308	288	
	体積エネルギー密度	[Wh/L]	626	634	620	663	
製造コスト	変動費	原材料費	[円/Wh]	9.1	7.8	7.5	6.8
		用役費	[円/Wh]	0.4	0.4	0.4	0.4
	固定費	設備費	[円/Wh]	2.0	1.9	2.0	1.9
		人件費	[円/Wh]	0.4	0.4	0.4	0.4
	合計		[円/Wh]	11.9	10.5	10.3	9.5

評価用電池（基準1、検討1～3）の原材料費の内訳を図3に示す。検討1～3モデルにおいて、正極合剤・負極合剤に係る原材料費は全体の41～46%、次いで電解液は全体の24～26%、セパレータは全体の15～19%を占め、基準1と同様の傾向であった。

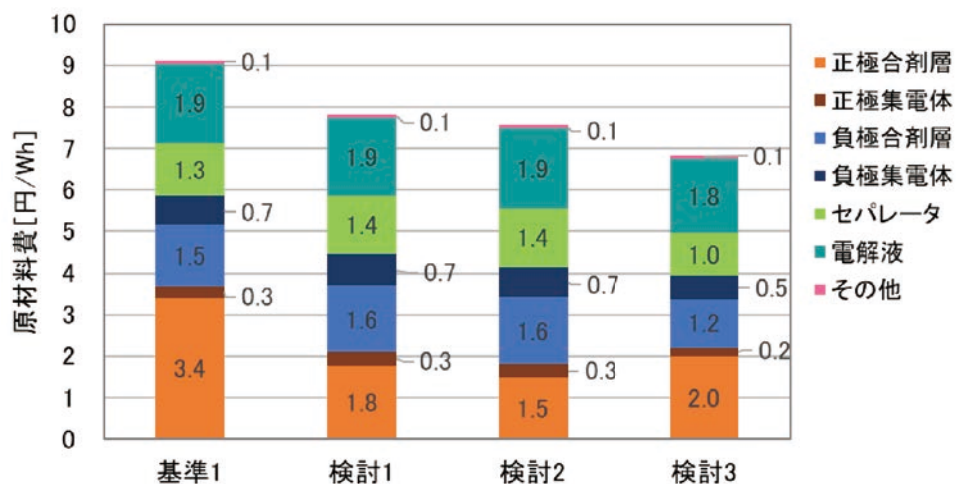


図3 評価用電池（基準1、検討1～3）の原材料費の内訳

評価用電池（基準1～4、検討1～3）の製造コストと重量エネルギー密度の関係を図4に示す。黒鉛負極を用いた電池において次世代正極活物質を用いることで、製造コスト9.5～10.5円/Whまで低減、また、重量エネルギー密度288～308Wh/kgまで向上させる可能性があることが分かった。

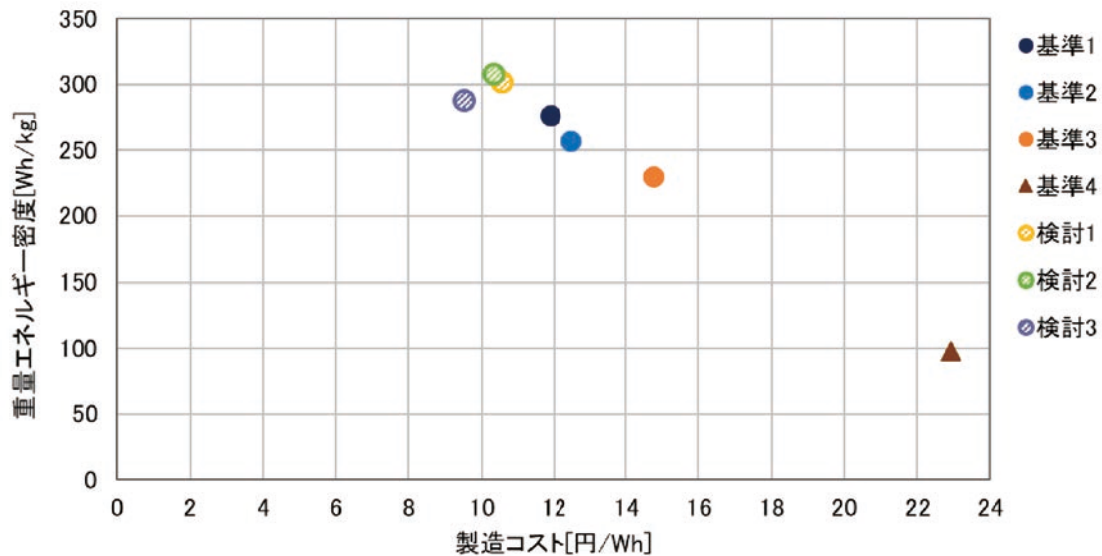


図4 評価用電池（基準1～4、検討1～3）の製造コストと重量エネルギー密度の関係

ii) Si 負極を用いた場合

評価用電池（検討4～8）の製造コスト試算結果を表6に示す。Si 負極の容量が1,007mAh/g（利用率0.24）の検討4(a)～検討8(a)モデルの製造コストは9.0～12.1円/Wh、Si 負極の容量が4,197mAh/g（利用率1）の検討4(b)～検討8(b)モデルの製造コストは5.2～7.9円/Whであった。この結果から、Si 負極の容量を理論容量まで利用できるようなになれば基準1の製造コストの35～47%低減する可能性があることが分かった。なお、製造コスト内訳の比率は、基準1と同様、原材料費が全体の67～78%、次いで設備費が全体の16～23%を占めた。

評価用電池（基準1、検討4～8）の原材料費の内訳を図5に示す。Si 負極の容量が1,007mAh/g（利用率0.24）の検討4(a)～検討8(a)モデルにおいて、正極合剤・負極合剤に係る原材料費が全体の36～52%、次いで電解液が全体の28～36%、セパレータが全体の11～15%を占めた。一方、Si 負極の容量が4,197mAh/g（利用率1）の検討4(b)～検討8(b)モデルにおいて、正極合剤・負極合剤に係る原材料費が全体の54～71%、次いで電解液が全体の21～32%、セパレータが全体の4～8%を占めた。今回の電池設計では上述したように負極合剤の厚みを一定にし、正極合剤の厚みを成り行きとしたため、負極容量の増大に伴い正極合剤の必要量が増加し、原材料中の比率を押し上げた。

表 6 評価用電池（検討 4 ～ 8）の製造コスト試算結果

			検討 4(a)	検討 4(b)	検討 5(a)	検討 5(b)	検討 6(a)	検討 6(b)	
電極構成	電極活物質の材料(正極／負極)		NCA/Si	NCA/Si	NMC/Si	NMC/Si	Li _{1.2} Ti _{0.4} Mn _{0.4} O ₂ /Si	Li _{1.2} Ti _{0.4} Mn _{0.4} O ₂ /Si	
	電極活物質の容量(正極／負極)		196/1,007	196/4,197	169/1,007	169/4,197	300/1,007	300/4,197	
	電極合剤層の厚み(正極／負極)[μm]		102/100	426/100	120/100	499/100	76/100	316/100	
電池性能	電池電圧	[V/個]	3.3	3.3	3.3	3.3	3.0	3.0	
	容量	[Wh/個]	308	544	289	467	314	601	
	重量	[g/個]	982	1,189	1,009	1,160	884	1,029	
	重量エネルギー密度	[Wh/kg]	314	458	287	402	355	584	
	体積エネルギー密度	[Wh/L]	698	1,211	649	1,069	716	1,373	
製造コスト	変動費	原材料費	[円/Wh]	8.9	5.5	9.4	6.0	7.5	3.8
		用役費	[円/Wh]	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3
	固定費	設備費	[円/Wh]	1.8	1.3	1.9	1.4	1.8	1.2
		人件費	[円/Wh]	0.3	0.2	0.4	0.2	0.3	0.2
	合計		[円/Wh]	11.6	7.3	12.1	7.9	10.0	5.4

			検討 7(a)	検討 7(b)	検討 8(a)	検討 8(b)	
電極構成	電極活物質の材料(正極／負極)		Li ₂ Mn _{1/2} Ti _{1/2} O ₂ F/Si	Li ₂ Mn _{1/2} Ti _{1/2} O ₂ F/Si	LiNi _{0.5} Mn _{1.5} O ₄ /Si	LiNi _{0.5} Mn _{1.5} O ₄ /Si	
	電極活物質の容量(正極／負極)		321/1,007	321/4,197	135/1,007	135/4,197	
	電極合剤層の厚み(正極／負極)〔μ m〕		81/100	339/100	157/100	654/100	
電池性能	電池電圧	〔V/個〕	3.0	3.0	4.25	4.25	
	容量	〔Wh/個〕	305	566	325	501	
	重量	〔g/個〕	841	934	1,019	1,183	
	重量エネルギー密度	〔Wh/kg〕	363	605	318	423	
	体積エネルギー密度	〔Wh/L〕	697	1,304	727	1,106	
製造コスト	変動費	原材料費	〔円/Wh〕	7.3	3.5	6.5	3.9
		用役費	〔円/Wh〕	0.4	0.3	0.4	0.3
	固定費	設備費	〔円/Wh〕	1.8	1.2	1.7	1.3
		人件費	〔円/Wh〕	0.4	0.2	0.3	0.2
	合計		〔円/Wh〕	9.8	5.2	9.0	5.7

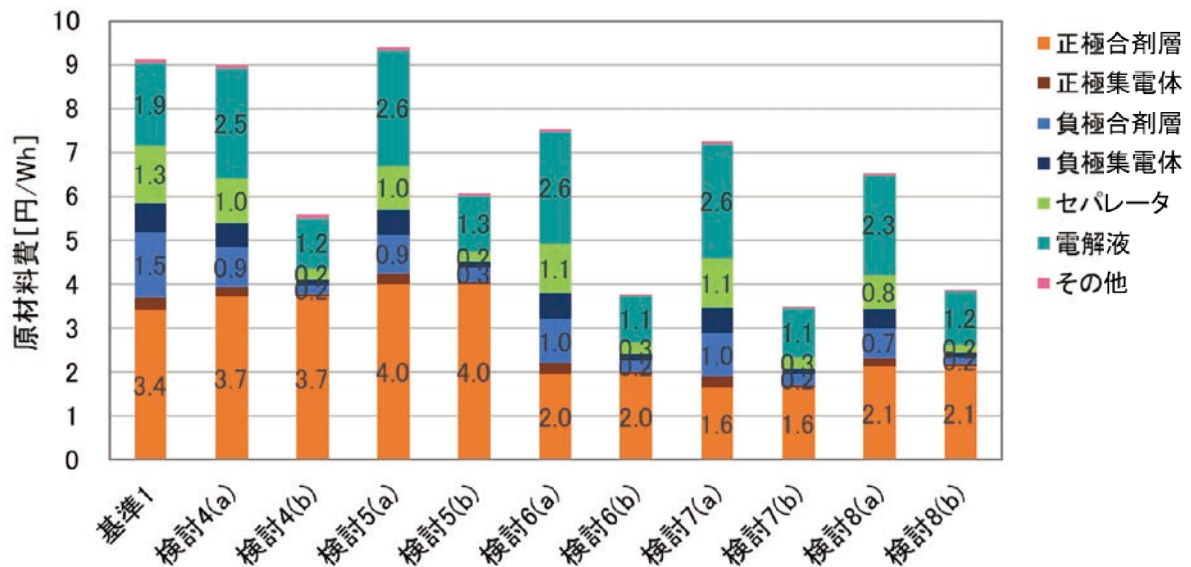


図5 評価用電池（基準1、検討4～8）の原材料費の内訳

評価用電池（基準1、検討4～8）の製造コストと重量エネルギー密度の関係を図6に示す。従来正極活物質とSi負極を用いることで（検討4a、4b、5a、5b）、製造コスト7.3～12.1円/Whまで低減、重量エネルギー密度287～458Wh/kgまで向上、また、次世代正極活物質とSi負極を用いることで（検討6a、6b、7a、7b、8a、8b）、製造コスト5.2～10.0円/Whまで低減、重量エネルギー密度314～605Wh/kgまで向上させる可能性があることが分かった。

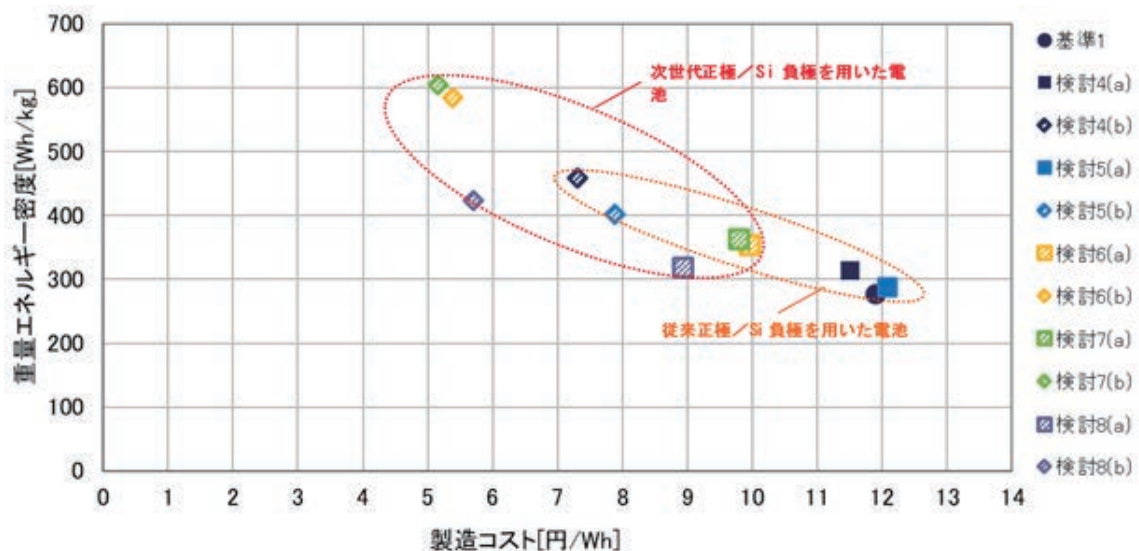


図6 評価用電池（基準1、検討4～8）の製造コストと重量エネルギー密度の関係

iii) Li-S

評価用電池（基準1、検討9）の製造コスト試算結果を表7に示す。検討9モデルの製造コストは5.1円/Whであった。製造コスト内訳の比率は、基準1と同様、原材料費が全体の73%、次いで設備費が全体の19%を占めた。

表7 評価用電池（基準1、検討9）の製造コスト試算結果

			基準1	検討9
電極構成	電極活物質の材料(正極／負極)		NCA/C ₆	S/金属Li
	電極活物質の容量(正極／負極)		196/353	1,508/2,895
電池性能	電池電圧	[V/個]	3.6	2.2
	容量	[Wh/個]	272	471
	重量	[g/個]	981	460
	重量エネルギー密度	[Wh/kg]	277	1,025
	体積エネルギー密度	[Wh/L]	626	1,064
製造コスト	変動費	原材料費	[円/Wh]	9.1
		用役費	[円/Wh]	0.4
	固定費	設備費	[円/Wh]	2.0
		人件費	[円/Wh]	0.4
	合計		[円/Wh]	11.9
				5.1

評価用電池（基準1、検討9）の原材料費の内訳を図7に示す。検討9モデルにおいて、正極合剤・負極合剤に係る原材料費が全体の46%、次いでセパレータが全体の29%、電解液が全体の14%を占めた。

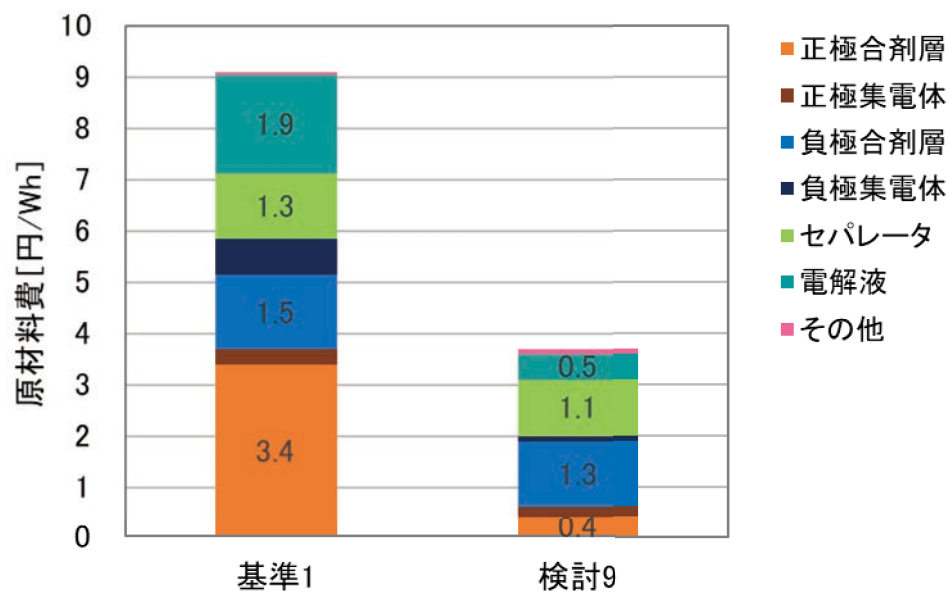


図7 評価用電池（基準1、検討9）の原材料費の内訳

3. まとめ

3.1 製造コスト試算結果

上述した評価用電池について、現状技術水準の評価用電池群をグループ1 (G1)、次世代電極活物質を片方又は両極に用いた電池群をグループ2～7 (G2～7) に分けて示す。G3～6について、G3とG5はSi負極の容量利用率が0.24、G4とG6はSi負極の容量利用率が1である。また、図8-1に評価用電池（基準1～4、検討1～9）の製造コストと重量エネルギー密度の関係に各グループを併せて示す。

- ・ G1 (現状)：従来正極活物質 / 従来黒鉛負極の評価用電池（基準1～4）
- ・ G2 (将来1)：次世代正極活物質 / 従来黒鉛負極の評価用電池（検討1～3）
- ・ G3 (将来2L)：従来正極活物質 / Si負極の評価用電池（検討4a、5a）
- ・ G4 (将来2H)：従来正極活物質 / Si負極の評価用電池（検討4b、5b）
- ・ G5 (将来3L)：次世代正極活物質 / Si負極の評価用電池（検討6a、7a、8a）
- ・ G6 (将来3H)：次世代正極活物質 / Si負極の評価用電池（検討6b、7b、8b）
- ・ G7 (将来4)：S正極活物質 / 金属Li負極の評価用電池（検討9）

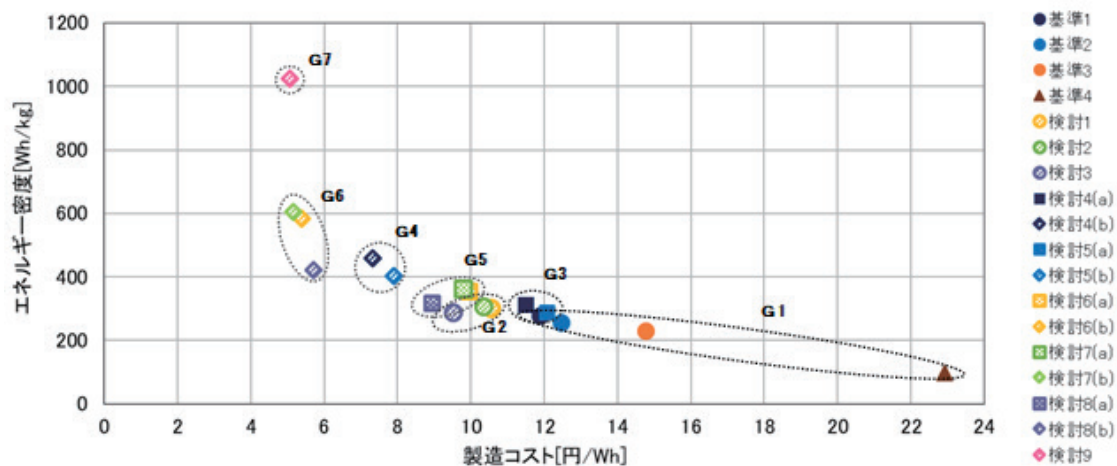


図 8-1 評価用電池（基準1～4、検討1～9）の製造コストと重量エネルギー密度の関係（グループ分け）

各グループの製造コストと重量エネルギー密度についてまとめると、

- G1 (現状) は製造コスト 11.9～23.2 円 /Wh、重量エネルギー密度 97～277 Wh/kg、
G2 (将来1) は製造コスト 9.5～10.5 円 /Wh、重量エネルギー密度 288～308 Wh/kg、
G3 (将来2L) は製造コスト 11.6～12.1 円 /Wh、重量エネルギー密度 287～314 Wh/kg、
G4 (将来2H) は製造コスト 7.3～7.9 円 /Wh、重量エネルギー密度 402～458 Wh/kg、
G5 (将来3L) は製造コスト 8.9～10.0 円 /Wh、重量エネルギー密度 318～363 Wh/kg、
G6 (将来3H) は製造コスト 5.2～5.7 円 /Wh、重量エネルギー密度 423～605 Wh/kg、
G7 (将来4) は製造コスト 5.1 円 /Wh、重量エネルギー密度 1,025 Wh/kg となった。

製造コストについて基準1の評価用電池と比較すると、G2は11～20%、G3は－2～3%、G4は34～39%、G5は16～25%、G6は52～56%、G7は57%低減した。また、重量エネルギー密度について基準1の評価用電池と比較すると、G2は4～11%、G3は4～13%、G4は45～65%、G5は15～31%、G6は53～118%、G7は270%増加した。

3.2 将来展望

製造コストを低減し、かつ、重量エネルギー密度を向上させるには、次世代正極活物質に置き換えること (R1)、Si 負極に置き換えること (R2)、次世代正極活物質と Si 負極に置き換えること (R3)、又は、S 正極活物質と金属 Li 負極に置き換えること (R4) が必要と考える。図 8-2 に評価用電池 (基準 1～4、検討 1～9) の製造コストと重量エネルギー密度の関係に研究の方向性のイメージを併せて示す。R1～4 の効果領域について、上述した評価用電池で示すと、R1 は G2 の範囲、R2 は G3 と G5 を含む範囲、R3 は G4 と G6 を含む範囲、R4 は基準 1 と G7 を結ぶ範囲となる。R3 と R4 は従来 LIB の両方の電極を変更するため、R1 や R2 より実用化において時間がかかると推測される。表 8 に電池年産量 10 GWh/y での現状と将来モデル 1～4 の電池構成案を示す。短期的目標 (2030～2040 年) を R1 と R2 の範囲、中期的目標 (2050 年) を R3 と R4 の範囲として将来モデルを設定した。各将来モデルを達成するには各電極特有の課題を解決することが必要である⁵⁾。

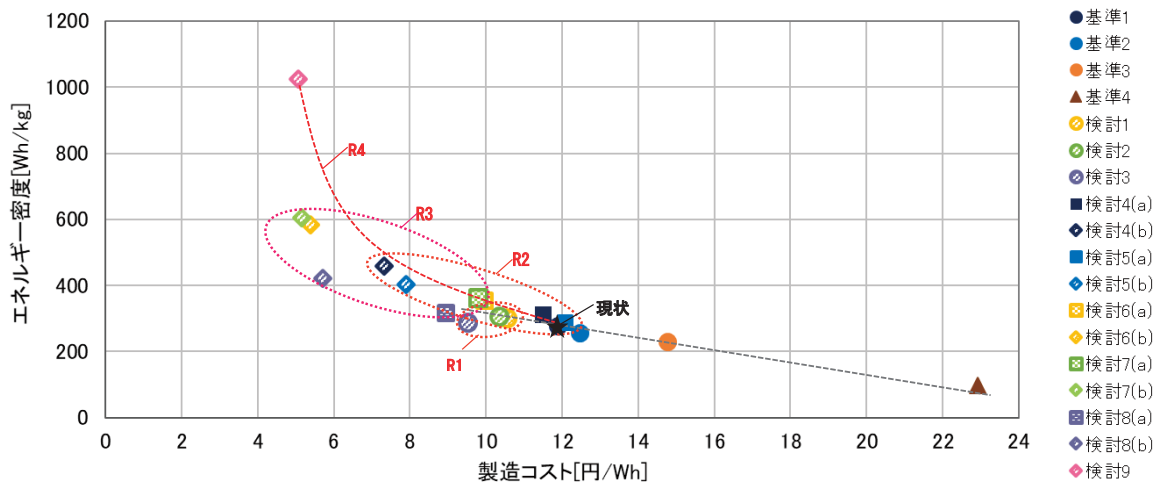


図 8-2 評価用電池 (基準 1～4、検討 1～9) の製造コストと重量エネルギー密度の関係 (研究の方向性)

⁵⁾ 文献 [5, 6] 参照。

表8 現状と将来モデルの電池構成案（電池年産量 10 GWh/y）

			短期的目標(2030～2040 年)		中期的目標(2050 年)		
			現状 (2020 年版)	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過剰系正極 (Li _{1.2} Ti _{0.4} Mn _{0.4} O ₂ 、 Li ₂ Mn _{1/2} Ti _{1/2} O ₂ F)	NCA	Li過剰系正極 (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	196	300～320	196	300～320	1,508
		負極	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	355～605	1,025
	体積エネルギー密度	[Wh/L]	626	620～634	698～1,211	697～1,373	1,064
製造コスト		[円/Wh]	11.9	10.3～10.5	7.3～11.6	5.2～10.0	5.1
CO ₂ 負荷量 ⁶⁾		[g-CO ₂ /Wh]	67.8	44.6～46.0	52.6～62.9	26.6～39.0	36.5

4. 政策立案のための提案

4.1 目標達成の課題

本提案書は、近年の技術水準を考慮したリチウムイオン電池の製造コストを、2013 年以来再試算するとともに、エネルギー密度とコストの将来推移を予測した。2013 年以来リチウムイオン電池の技術開発は着実に技術革新がなされ、現状エネルギー密度は 277 Wh/kg、製造コスト 11.9 円/Wh であり、2030 年には 300 Wh/kg、10.3 円/Wh、2050 年 500 Wh/kg 以上、10 円/Wh 以下のエネルギー密度と製造コストを実現する。高エネルギー密度化と低コスト化はこの 7 年間でほぼ予測通りに推移してきたものと評価できる。しかしながらその反面、革新的技術進化や画期的発明はなく、従来の技術の延長線上にあることが示唆される。

一方 EV 用蓄電池については、2030 年までにエネルギー密度を 500 Wh/kg 以上、電池パックコストを 1 万円/kWh 以下にすることが NEDO 開発目標である。また 2020 年 12 月 3 日の政府による「ガソリン車の新車販売を 2030 年代半ばに禁止する方向」の発表により、より EV 用蓄電池の早期事業化が必達となってきた。

このような社会変革の中で、蓄電池の需要は益々大きくなってきており、エネルギー密度 500 Wh/kg、コスト 8 円/Wh のセルの早期開発が必要になってきている。少なくとも 2025 年には技術開発を完了し、量産プロセスを 2028 年には確立する必要がある。目標のエネルギー密度とコストと、さらに実用化時期を考慮すれば、本提案書の定量評価結果の表 8 に示す将来モデル 3 もしくは 4 のセル技術が 10 ～ 20 年前倒しの 2030 年に必要不可欠となる。開発加速が今後の最大の課題である。

⁶⁾ 原材料、用役、設備等の使用量と CO₂ 排出係数から算出。原材料の CO₂ 排出係数は主に「LCI データベース IDEA v2」（国立研究開発法人産業技術総合研究所）に基づく。CO₂ 負荷量に関する設備等の償却年数は製造コストと異なり、設備は 30 年、建屋は 50 年として算出した。今回の試算において、原材料の CO₂ 負荷量が全体の 5 ～ 7 割占める。現状は基準 1、将来モデル 1 は検討 1 ～ 2、将来モデル 2 は検討 4a/b、将来モデル 3 は検討 6a/b ～ 7a/b、将来モデル 4 は検討 9 の CO₂ 負荷量に基づく。

4.2 政策立案のための提案

2020年12月3日の政府発信の「2050年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロとする目標」に対して、「実現のためには従来型のガソリン車から自動車の電動化が不可欠」という新たな目標に向かって産官学が一体となって動き出すことになる。自動車の電動化には高性能低コスト蓄電池技術の開発が鍵となるのは言うまでもない。

本提案書では、高性能低コスト蓄電池技術の具体的施策として、次世代正極活物質とSi負極に置き換えること(R3)、又は、S正極活物質と金属Li負極に置き換えること(R4)を提案し、技術的に可能であることを定量分析してきた。また、その実現時期として、現行の開発投資による技術開発および実装化では2040年以降の達成であることを予測している。今後新たな目標実現のためには、産官学一体となった人物金の緊急の集中した資源投資が必要不可欠である。

参考文献

- [1] NEDO 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」基本計画”, <https://www.nedo.go.jp/content/100788077.pdf>, (アクセス日 2020年8月24日).
- [2] 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—要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロードマップ”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2014年3月.
- [3] “リチウムイオン電池の製造プロセス&コスト総合技術 2016～原材料, 設計・製造, 工程機器とコスト構成～”, シーエムシー・リサーチ, p.229, 319, 329, 2016.
- [4] 堀江英明編, “リチウムイオン電池 [基礎と応用]”, 培風館, p.5, 20, 72, 109, 142-143, 169-177, 2010.
- [5] Naoaki Yabuuchi et al, “Origin of stabilization and destabilization in solid-state redox reaction of oxide ions for lithium-ion batteries”, *Nature Communications*, vol.7, no.13814, 2016.
- [6] Jinhyuk Lee et al., “Reversible Mn^{2+}/Mn^{4+} double redox in lithium-excess cathode materials”, *Nature*, vol.556, p.185-190, 2018.
- [7] “リチウムイオン電池活物質の開発と電極材料技術”, *サイエンス&テクノロジー*, p.42-52, 2014.
- [8] 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.
- [9] 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.6) —リチウムイオン電池のエネルギー密度向上の可能性と研究課題—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2019年2月.
- [10] 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.5) —Li-S電池のコスト計算と研究開発課題—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2018年1月.
- [11] 特開 2013-232423 号公報, “リチウム硫黄セルを充電する方法”.
- [12] 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.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—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2015年3月.
- [13] Zachary Favors et al., “Scalable Synthesis of Nano-Silicon from Beach Sand for Long Cycle Life Li-ion Batteries”, *Scientific Reports*, 4, no.5623, p.1-7, 2014.

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.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—
令和3年3月

Secondary Battery System (Vol. 9):
Cost Evaluation of a Lithium-ion Battery Using Next-Generation Electrode Active Material

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2021.3

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 米澤 美帆子 (YONEZAWA Mihoko)
特任研究員 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4階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2021 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。
