

リチウム電池の需要と回収

2022年9月19日

山田知純

リチウム電池の需要と回収

目次

1. リチウム電池,正極・負極材と電池容量
 1. 1 商用正極の種類
 1. 2 各種正極の特徴
 1. 3 正極の放電特性と定格容量
 1. 4 理論容量と定格容量
 1. 5 リチウム電池負極材
 1. 6 リチウム電池 kWh当り必要材料
 1. 7 リチウム電池の寿命
2. リチウム電池の需要
 2. 1 車載用リチウム電池の需要
 2. 2 定置用リチウム電池の需要
 2. 3 リチウム電池の必要定格容量まとめ
3. ニッケル、リチウム、コバルト資源の需要と供給
 3. 1 リチウム電池用の需要
 3. 2 リチウム電池以外を含む全体の需要と埋蔵量
4. リチウム電池のリサイクル
 4. 1 リサイクルの現状
 4. 2 リサイクル工場
 4. 3 リサイクルプロセス
5. まとめ

1. リチウム電池の正極・負極材と電池容量

1.1 一般的な商用リチウムイオンバッテリーの正極材

- | | | |
|-----------------------------------|---|-----------|
| 1. リチウム・ニッケル・マンガン酸化コバルト (NMC正極) | $\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ | |
| リチウム・ニッケル・マンガン酸化コバルト (NMC622正極) | $\text{Ni}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ | テスラ以外のOEM |
| リチウム・ニッケル・マンガン酸化コバルト (NMC811正極) | $\text{Ni}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ | 最新のNMC |
| 2. リチウム・ニッケル・コバルト・アルミニウム (NCA 正極) | | テスラ採用 |
| 3. リチウム酸化コバルト (LCO 正極)、家電製品限定 | | |
| 4. リチウムリン酸鉄 (LFP 正極) | | |
| 5. スピネル型リチウムマンガン酸化物 (LMO 正極) | | |
| 6. 硫酸リチウム (Li-S、硫酸 正極) | | |
| 7. リチウム金属 (負極)、全固体 | | |
| 8. チタン酸リチウム (LTO 負極) | | |

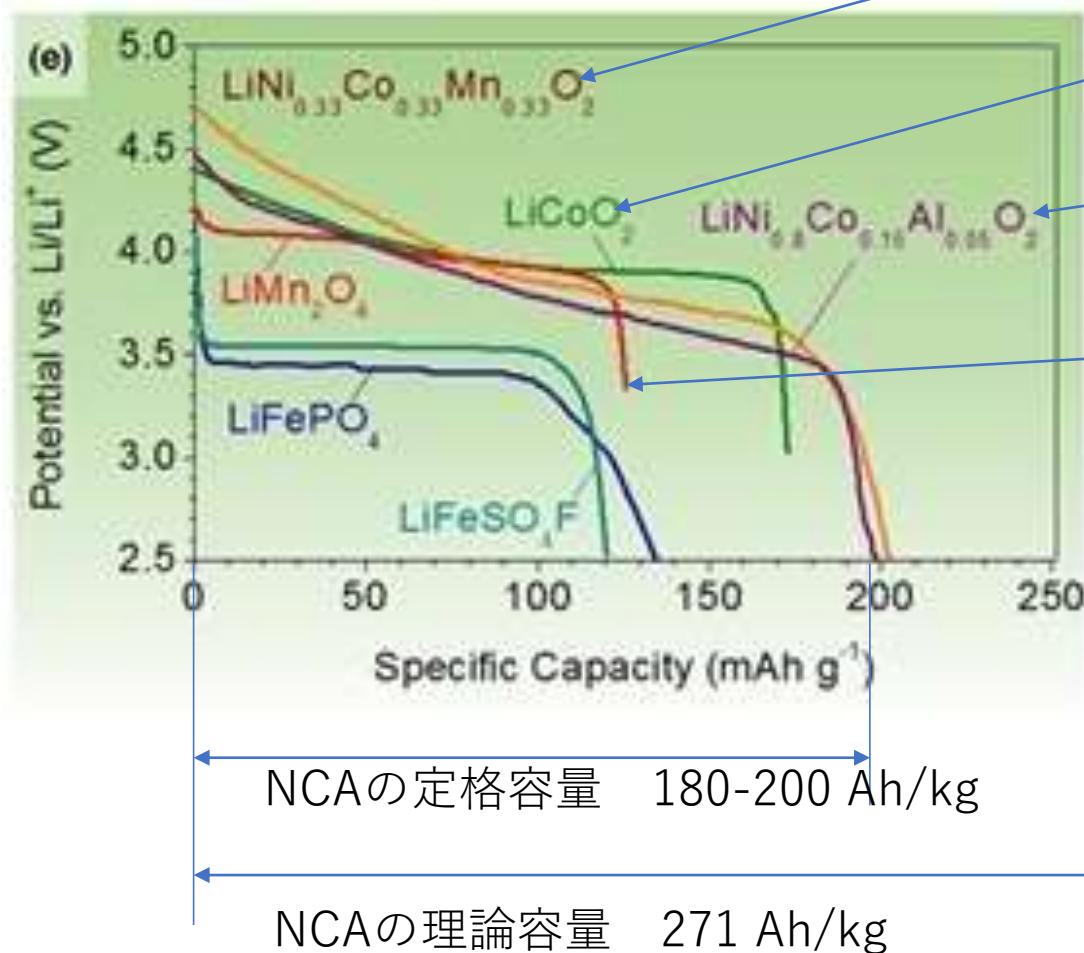
2020年2月21日
ニッケル協会東京事務所

Ni,Mn,Coのモル質量は殆ど同じ (54.9~58.7)なので、質量比はほぼモル比と同じと考えて良い。
NMCは高ニッケル化が進んでいる。

1.2 各種正極の特徴

電極 (製品番号)	電位	比容量 (mAh/g)	長所	短所
正極材料				
LiCoO ₂ (442704) LCO	3.9	140	良好な性能	Coの価格不安定性と資源制約、低容量
LiNi _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05} O ₂ (760994 , 765171) NCA-テスラ	3.8	180~200	大容量および高電圧、優れたレート特性	安全性、NiとCoの価格不安定性および資源制約
LiNi _{1/3} Mn _{1/3} Co _{1/3} O ₂ (761001 , 765163) NMC	3.8	160~170	高電圧、中程度の安全性	NiとCoの価格不安定性および資源制約
各種LiMn ₂ O ₄ (725129 , 765201, 916439)	4.1	100~120	低コストで資源量が豊富 (Mn)、高電圧、中程度の安全性、優れたレート特性	限られたサイクル寿命、低容量
LiFePO ₄ (759546)	3.45	170	優れた安全性、サイクル性、レート特性、低コストで資源量が豊富 (Fe)、低毒性	低電圧および低容量 (substituted variants)、低エネルギー密度

1.3 正極の放電特性と定格容量



NMC この高ニッケルバージョンをステラ以外で採用
前ページ表で 160-170 mAh/g

LCA 前ページ表では 140 mAh/g

NCA テスラ採用 前ページ表では 180-200 mA/g

前ページ表では 100-120 mAh/g

資料

EV-tech.jp 「リチウムイオン電池の材料技術」

courtesy: Battery University

Dr. Judy Jeevarajan Research

Director, Battery Safety, Underwriters
Laboratories Inc.

May 25, 2020 WRI India Delhi

リチウム電池の定格容量と定格電圧

- 1) 定格容量 5時間にわたり供給できる電気容量の0.2倍の電流で放電し、放電が終了するまでの容量
- 2) 定格電圧 5時間放電率で定格容量測定時の平均放電電圧値

1.4 理論容量と定格容量

1. リチウム電池の理論容量

ファラデー定数の値は $F = 96,485.33289 \text{ C/mol}$

理論容量 $96485.33289/3,600=26.8 \text{ Ah/mol}$

正極剤 1 molあたり 自由電荷数を n 、正極剤のモル質量を $m \text{ kg/mol}$ とすれば

理論容量 $26.8 n/m \text{ [Ah/kg-正極剤]}$

NCA: Li 1(6.941) Ni 0.8(58.6934) Co 0.15(58.932) Al 0.05(26.981) $m=0.09903 \text{ kg/mol}$

理論容量 $26.8 \times 1 / 0.09903 = 271 \text{ Ah/kg}$

2. リチウム電池の利用効率

Liイオンを吐き出すとき、遷移金属(Co, Ni, Mnなど) の価数が増加する。したがってNCAでは理論容量の95%しか使えない。

それ以前にも、Liが抜けることで結晶構造が壊れると言うことがある。例えばコバルト酸リチウムではLiが半分抜けると相転移を起こして、電池の特性が悪くなる。このような事情で、利用率は低くなる。

LCO	コバルト酸リチウム	利用率	44 %
LiNiO2		利用率	62 %
NMC		利用率	75 %

この定格電流と上記利用率の関係はよく分からないが、利用率 = 定格容量 / 理論容量 と考えて論を進める。

1.5 リチウム電池負極材

1.5.1 負極材

負極材は様々な種類があり、研究が重ねられているが、現在実用されているものはグラファイト(黒鉛)のみと言って良い。

グラファイトは正6面体の炭素共有結合からなる相が面と垂直方向にファンデアワールス力で結びついて並んでおり、この隙間にLiが入り込む。炭素6個に一個のリチウムが入り込むので、その構造は



$12 \times 6 / 1000 = 0.072\text{kg}$ あたり 26.8 Ah であるので、その容量は

$$26.8 / 0.072 = 372\text{ Ah/kg-C}$$

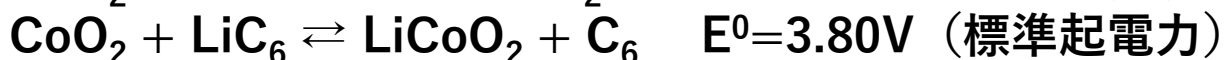
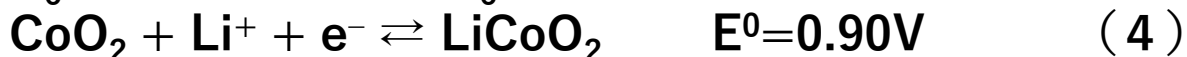
実容量はこの45～50%のようである。(資料：EVのLCA,2008/1,KEO Discussion Paper No.112)

リチウム電池の理論起電力

電池の「**起電力**」とは、平衡状態にある正極と負極の電位差（電圧）リチウムイオン二次電池が放電する場合、



Aがグラファイト、Zがコバルト酸リチウム（ LiCoO_2 ）である場合、標準電極電位は



正極剤により、標準起電力は異なってくるが、実用されている正極では、3.7～3.9 Vである。

1.6 リチウム電池 kWh当りの必要材料量

この数字はテスラの
180~200mAh/gとい
う値と良く一致する。

起電力は 3.7 Vと仮定する。

正極剤	LCO	コバルト酸リチウム	利用率	44 %	$274 \times 0.44 \times 3.7 =$	446 Wh/kg,	120 Ah/kg
	NMC		利用率	75 %	$289 \times 0.75 \times 3.7 =$	801 Wh/kg,	216 Ah/kg
負極材	グラファイト		利用率	45%	$372 \times 0.45 \times 3.7 =$	619 Wh/kg,	167 Ah/kg

よって	LCO正極剤リチウム電池では	正極剤	2.24 kg/kWh	負極材	1.62 kg/kWh	計	3.86 kg/kWh
	NMC正極剤リチウム電池では	正極剤	1.25 kg/kWh	負極材	1.62 kg/kWh	計	2.87 kg/kWh

Li電池の材料 (資料：電気自動車ERICAのLCA,2008/1,KEO Discussion Paper No.112)

単電池	正極剤 (組成から見るとLiNiO2のようである)	2.55 kg/kWh	106 Ah/kg, 392 Wh/kg
	負極材	1.63 kg/kWh	166 Ah/kg, 613 Wh/kg
	セパレータ	0.29 kg/kWh	
	電解槽	0.44 kg/kWh	
	電解液	0.50 kg/kWh	
	他	0.39 kg/kWh	ここまでの小計 5.80 kg/kWh
モジュール用部品		0.87 kg/kWh	
システム用部品		0.82 kg/kWh	
合計 (容量 45 kWh 総重量 377 kg)		7.49 kg/kWh	

テスラ(モデルS75)	(容量 75 kWh 総重量 500 kg)	6.67 kg/kWh
MAZDA?	(容量 35.5 kWh 総重量 315 kg)	8.87 kg/kWh

1.7 リチウム電池の寿命

1.7.1 各種リチウム電池のサイクル数

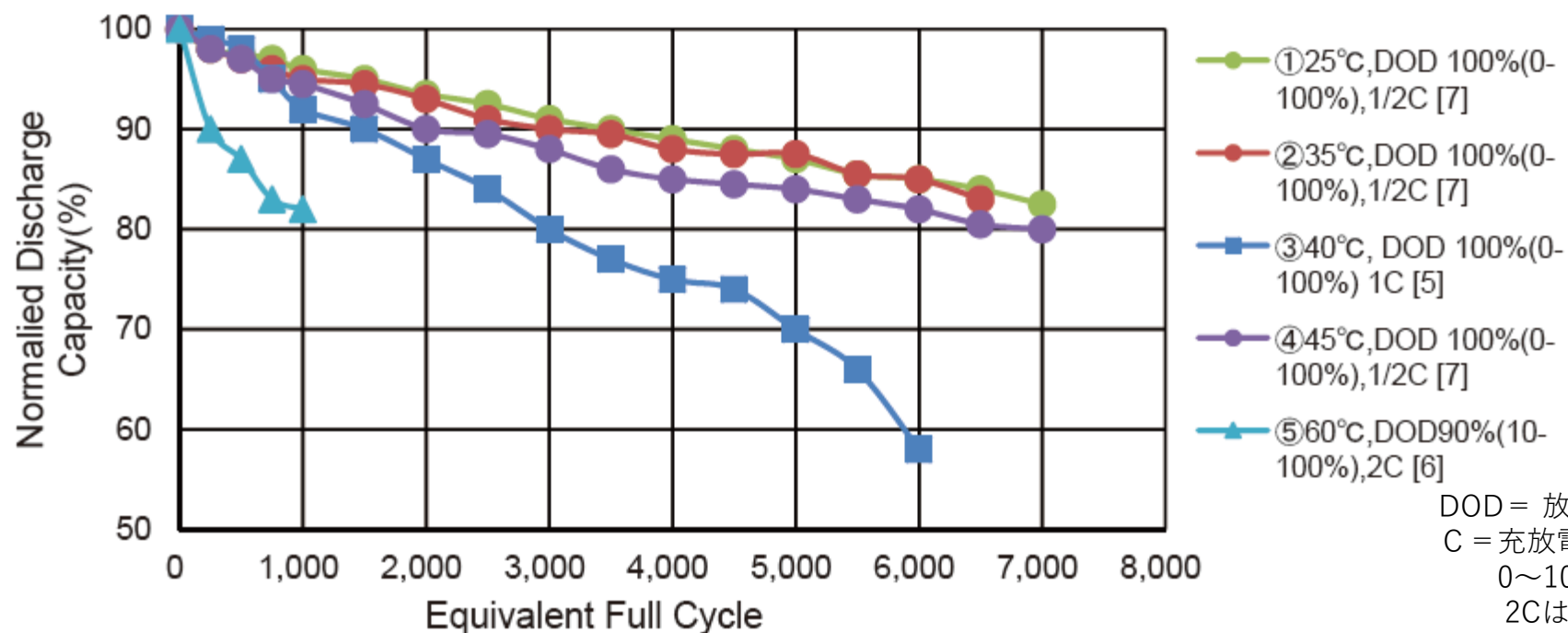
下に行くほど、安全性が高い。
サイクル数は、容量が定格容量の60%まで落ちるサイクル数

分類	特徴	寿命の目安 (サイクル)
コバルト系	世界で初めて商品化されたリチウムイオン電池。熱暴走の危険もあり現在はあまり使われない。	3,000回
ニッケル系	高容量ではあるものの、安全面に課題がある。	3,000回
マンガン系	低価格かつ安全性も高く、自動車などに使用される。	3,000回
三元系	自動車向けにコバルト系電池を改良したもの。高容量かつ高エネルギー密度。	4,200回
チタン酸系	長寿命と安全性の高さを実現した電池だがエネルギー密度が低い。	18,000回
リチウムポリマー系	形状の自由度が高く、軽い。スマホ・タブレットなどに使用。	500回
リン酸鉄系	電池内部で発熱しても結晶構造が崩壊しにくく、安全性が高いうえに高寿命。	9,000～12,000回

1.7.2 リチウム電池の劣化－温度の影響

J S T 低炭素社会戦略センター、
リチウム電池の劣化挙動調査2020/4

リチウム電池の寿命（充放電サイクル数）は使用温度、放電深度、充放電速度に大きく影響される。
下記は温度の影響を見たものである。

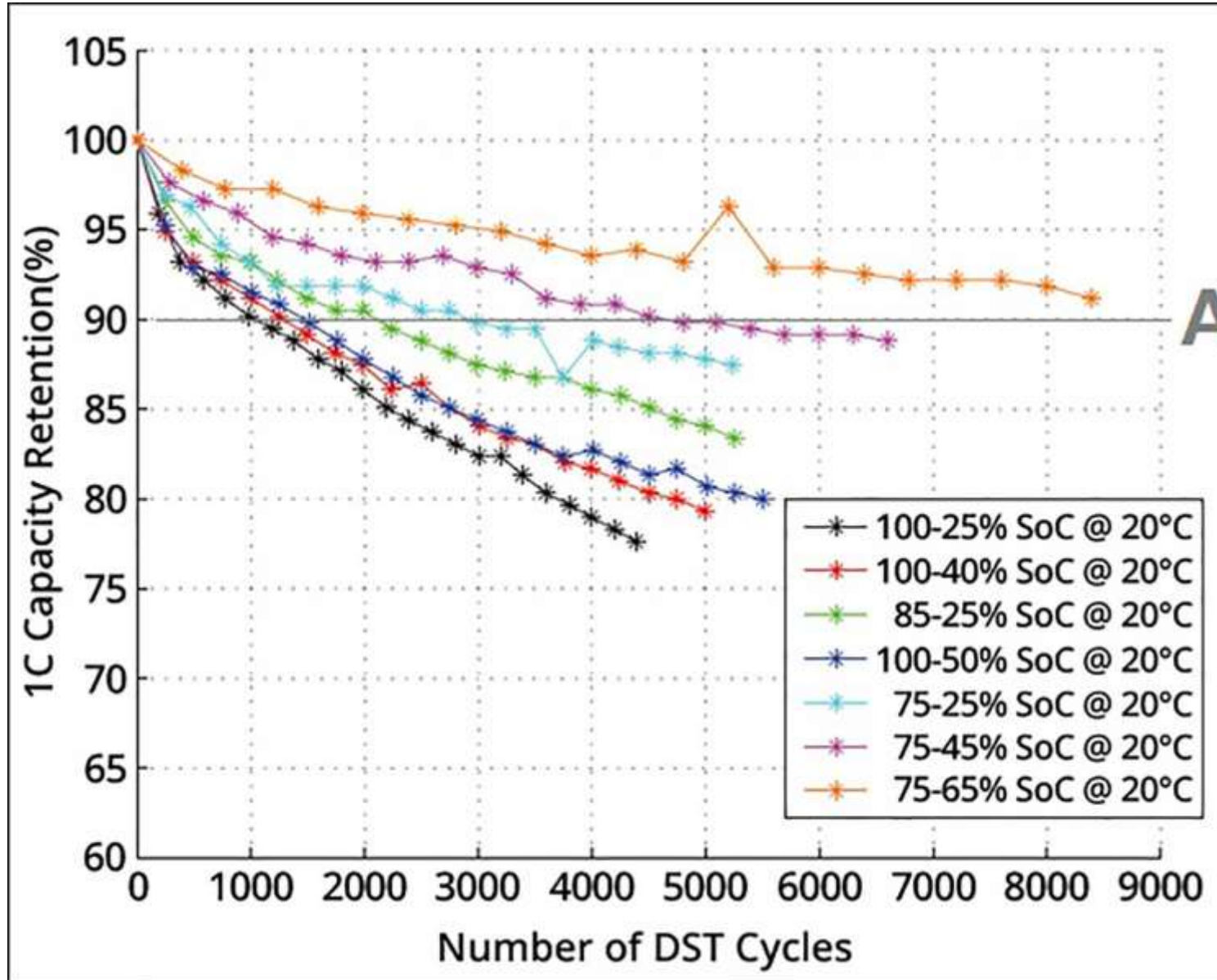


DOD = 放電深度 SOC25%～SOC50%ならばDOD=50%
C = 充放電速度
0～100%までの充電時間が一時間のとき 1C
2Cは30分でフル充電。
equivalent Full Cycle = DOD × サイクル数

図 10 サイクル劣化_温度の影響_正極：LFP，負極：黒鉛
文献[5]Fig.5、[6]Fig.8(a)、[7]図 3 を基に再作図

註 1) LFP(リチウムリン酸鉄)は容量は小さいが、最も安定性が高い。性能の高い3元系の寿命はこれの1/2～1/3である。
註 2) 40°Cのデータが他に比べて劣化が大きいのは、正極が同じLFPでも性能が異なるためではないか、としている。

1.7.2 充電深度と寿命の関係



DSTサイクルは実際のサイクル数。

10%劣化までとすると
SOC75-25%で3000サイクル
100%換算で1500回
SOC75-45%で5000サイクル
100%換算で1500回
SOC75-65%で9000サイクル
100%換算で900回

資料

EVsmartBlog, 2020/5/25
バッテリーの劣化から考える電気自動車選び

番号	社名	モデル	種類	EV走行 JC08 km	EV走行 EPA km	バッテリー kWh	急速充電	価格
03	BMW	i3 (94Ah)	BEV	390	182	33	○	5,090,000
21	日産	新型リーフ (40kWh)	BEV	400	241	40	○	3,150,360
26	テスラ	モデルS 75	BEV	(未公表)	398.4	75	○	9,000,000
31	フォルクス ワーゲン	e-ゴルフ	BEV	301	201	35.8	○	4,990,000

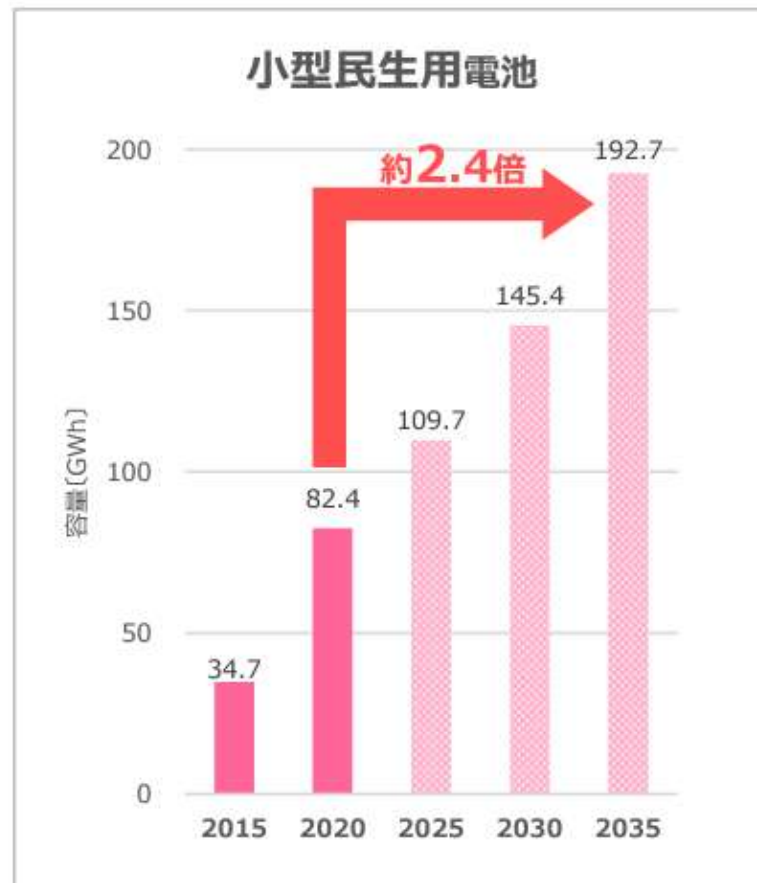
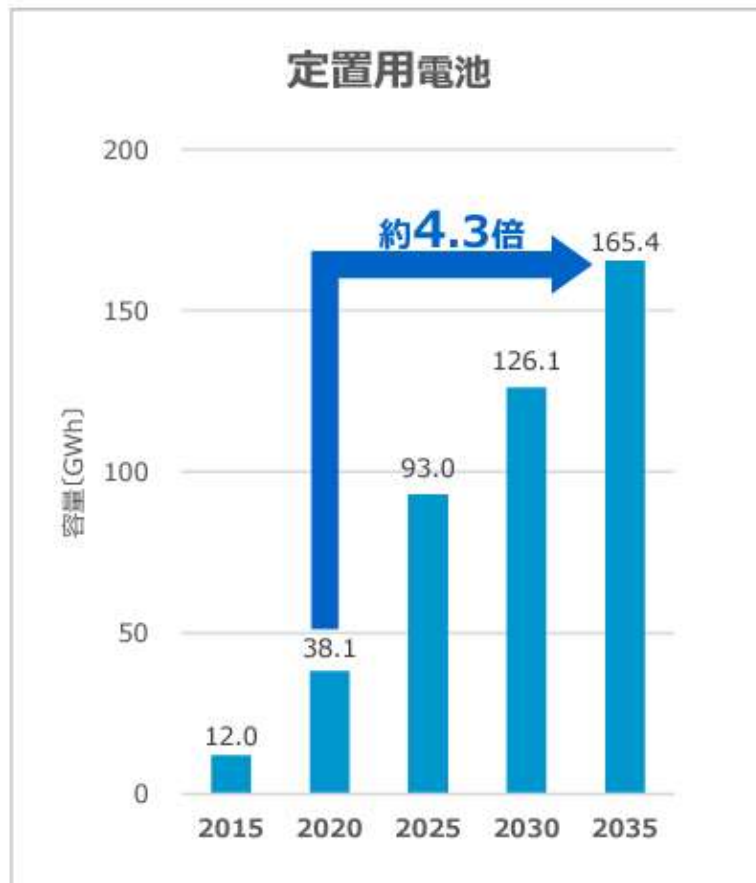
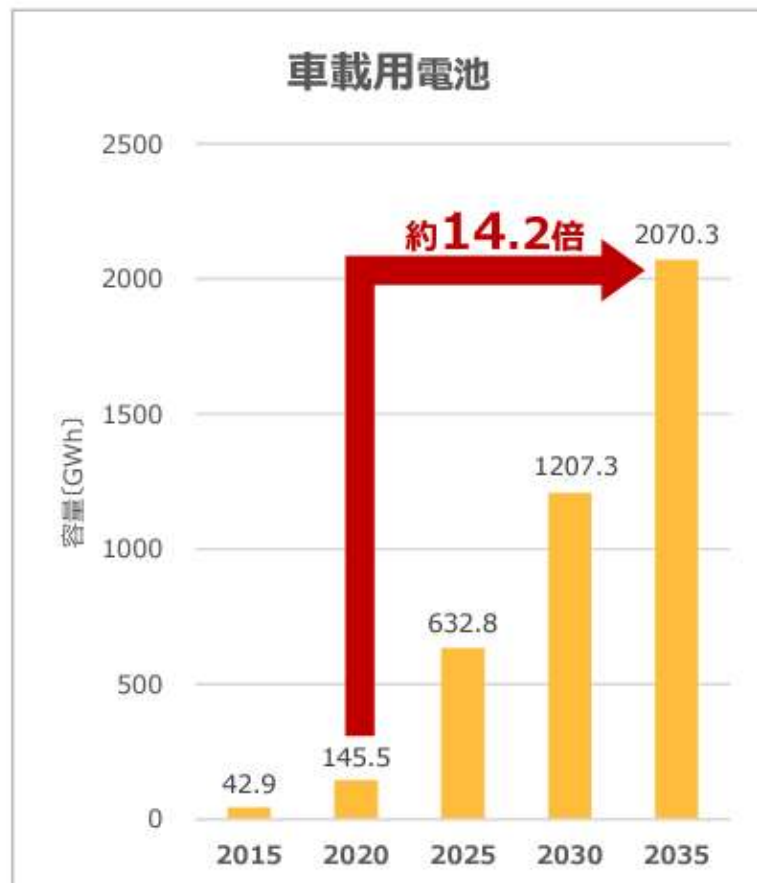
	JC08	EPA	サイクル/16万km	10%容量低下
	km/kWh	km/kWh	25-75%SoC@20°C	サイクル数3,000@20°C
I3(94Ah)	11.8	5.5	1,760	27万km
新型リーフ	10.0	6.0	1,330	36万km
モデルS75		5.3	800	60万km
e-ゴルフ	8.4	5.6	1,600	30万km

SoC : state of charge
資料
EVsmartBlog, 2020/5/25

上記は20°Cのデータであるが、電池の寿命は温度、急速充電条件で大きく変わる。温度が高いと電池寿命は大幅に短くなる。したがって電池の冷却、温度管理は非常に重要である。テスラの保障は10万kmである。EVは電池とモーターだけであるから簡単に製造できる、という話もあったが、ことはそれほど簡単ではなく、多くのノウハウが必要なようである。電池の研究ではテスラが群を抜いている、という評がある。

2. リチウム電池の需要

蓄電池世界市場の推移（容量ベース、世界）

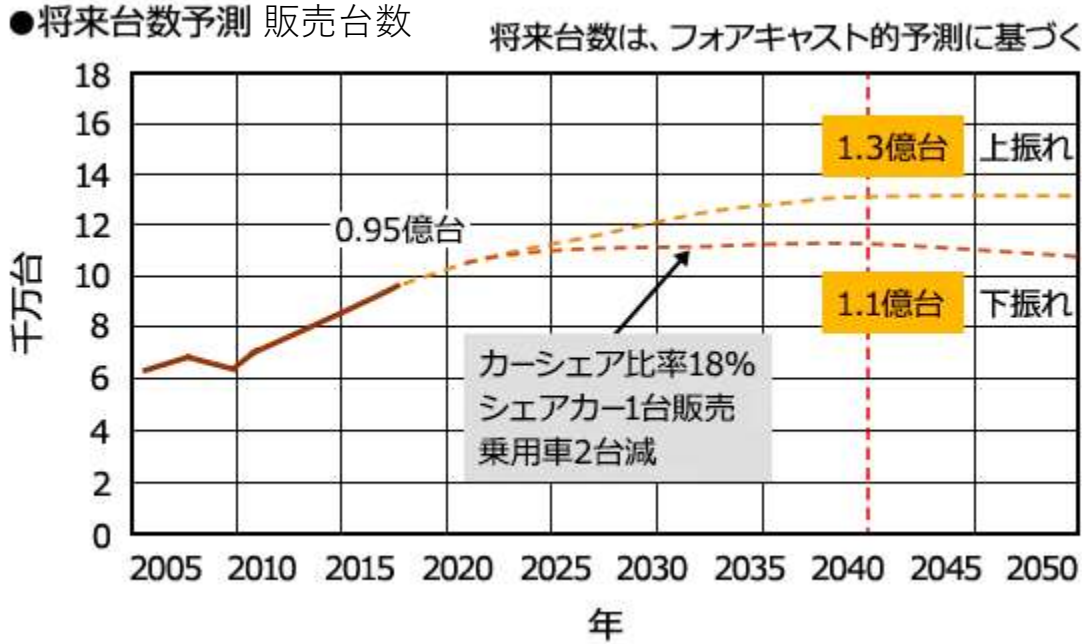


※いずれもLIB以外の電池を含む

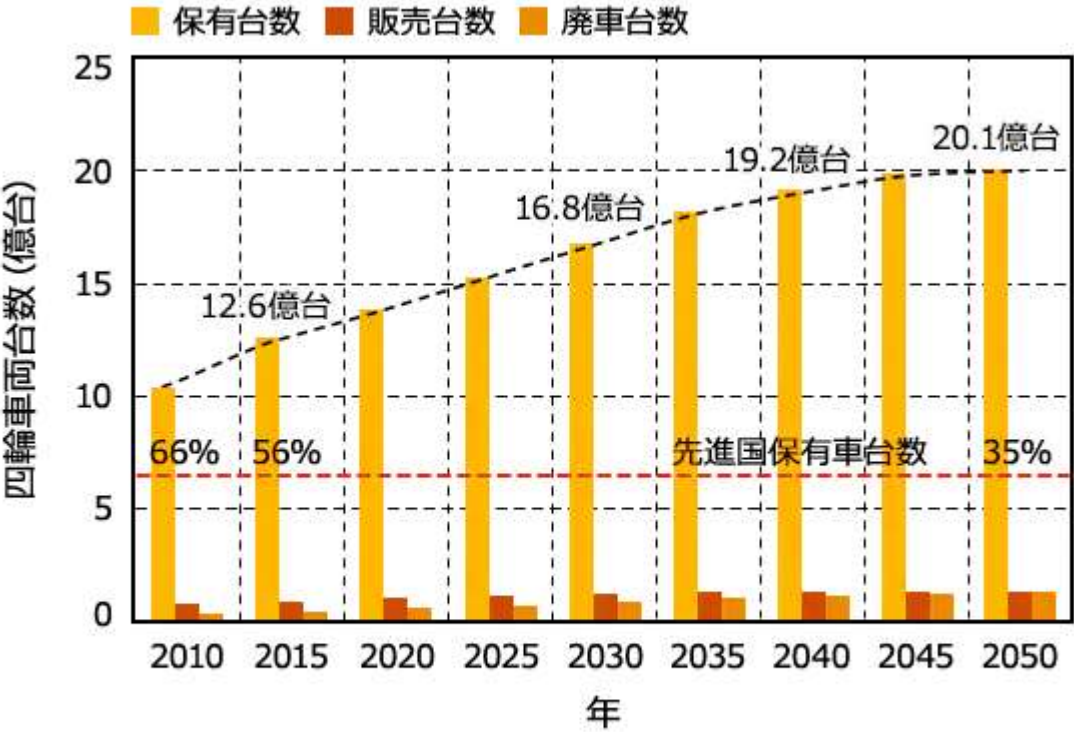
(出典)
・車載用 : 富士経済「エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望2021 -電動自動車・車載電池分野編-」、「エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望2016 -次世代環境自動車分野編-」
・定置用 : 富士経済「エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望2021 -ESS・定置用蓄電池分野編-」、「エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望2016 -動力・電力貯蔵・家電分野編-」
・小型民生用 : 富士経済「2020電池関連市場実態総調査<上巻・電池セル市場編>」 ※一部、2018-2024(予測)の年平均成長率から経産省試算

2.1 車載用リチウム電池需要予測

2.1.1 自動車の需要



図表4：2050年までの世界保有台数の予測

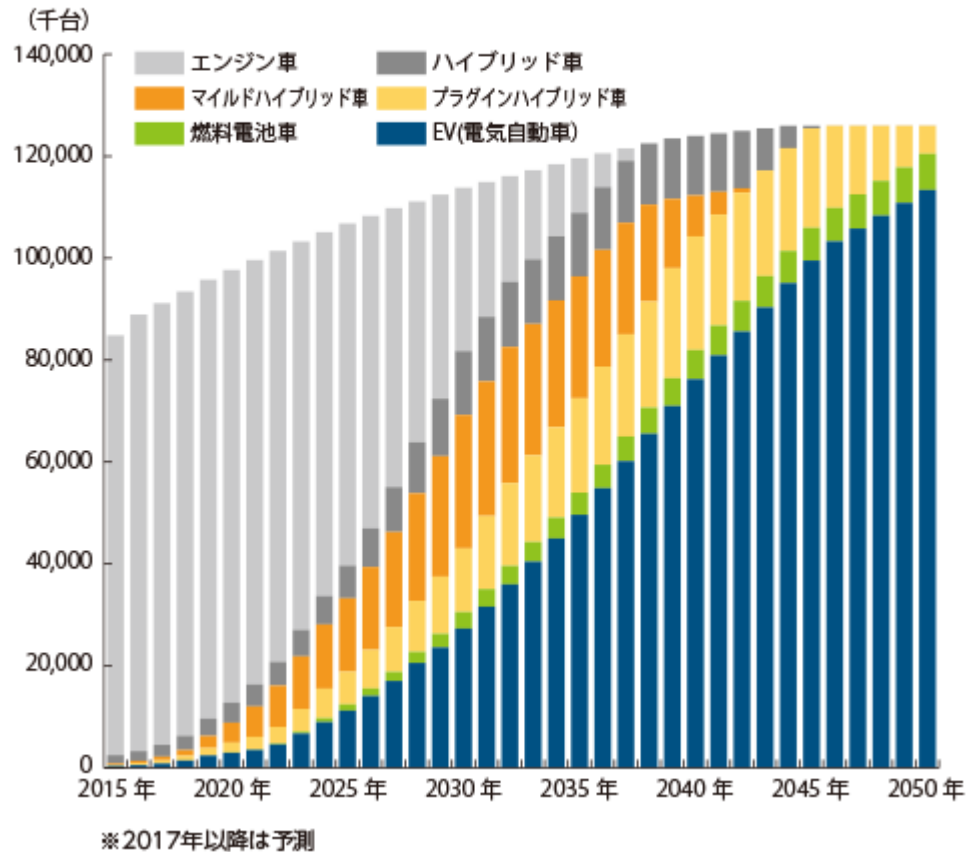


※平均車齢15年で計算。2030年までにはそれ以前の燃費の悪い車が新車に置き換わるため、CO₂排出量に影響する台数は計算上減るとみなし実際の予測台数を補正した。

リチウム電池のリユース・リサイクル、リコー報告書 平均車齢 12～15年

2.1.2 EV（リチウム電池車）の需要

世界の自動車販売台数の見通し



ICE エンジン車
HV ハイブリッド
PHV(or PHEV) プラグインハイブリッド
ZEV(or EV or BEV) 電気自動車

世界で新車CO2▲90%には、2030年:25%、2050年:100%の次世代車普及が必要

「50年新車CO2▲90%」を達成するのに必要な新車販売台数の推移
(日米欧中印)



2.1.3 車載用電池需要

2050年販売の車は全てE V

販売台数は1億1千万台～1億3千万台、一台の定格は100 kWh とすると

新車用E V用電池の需要は、 $(110\sim130) \times 10^6 \text{台} \times 100 \times 10^3 \text{Wh/台} = 11 \text{ TWh} \sim 13 \text{ TWh} \Rightarrow 12 \text{ TWh}$

2035年のEV販売台数は5千万台、一台100 KWh として 5 TWh

50 KWh として 2.5 TWh …… これが経産資料に近い。

容量が90%に落ちるまでにフル容量の1500回分使用できるとすると、100 kWh の電池は生涯で 150 MWh が使えることになる。安全を見て、5km/kWhの走行距離があるとする

電池交換までに $150 \text{ MWh} \times 5 \text{km/kWh} = 750,000 \text{ km}$ の航続距離がある。

年間 50,000 km載ったとしても15年はもつ勘定である。

BEVの販売台数(PHEVはBEVの0.5台分として換算)

2019 6百万台 0.6 TWh

2030 2千万台 2 TWh

2040 8千万台 8 TWh

2.1.4 自動車による電力消費量

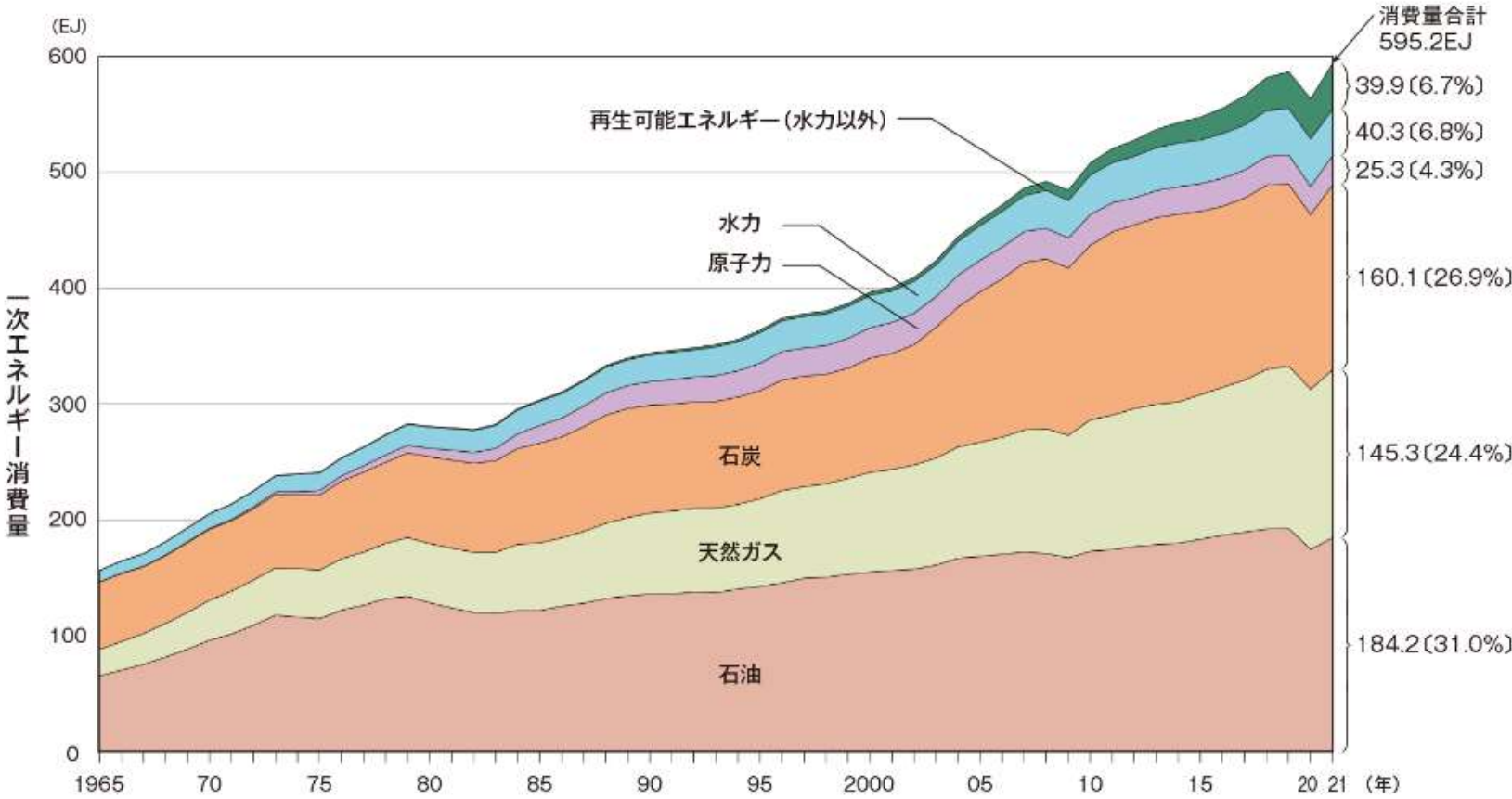
20億台の自動車が、年平均20,000 km 走ったとすれば

$20 \times 10^8 \text{台} \times 20,000 \text{km/台y} / (5 \text{ km/kWh}) = 8,000 \text{ TWh/y}$

2.2 定置用リチウム電池需要

2.2.1 世界のエネルギー需要

世界の一次エネルギー消費量の推移



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある
〔 〕内は全体に占める割合
1EJ(=10¹⁸J)は原油約2,580万klの熱量に相当(EJ:エクサジュール)

第3表 世界の最終エネルギー消費量の推移

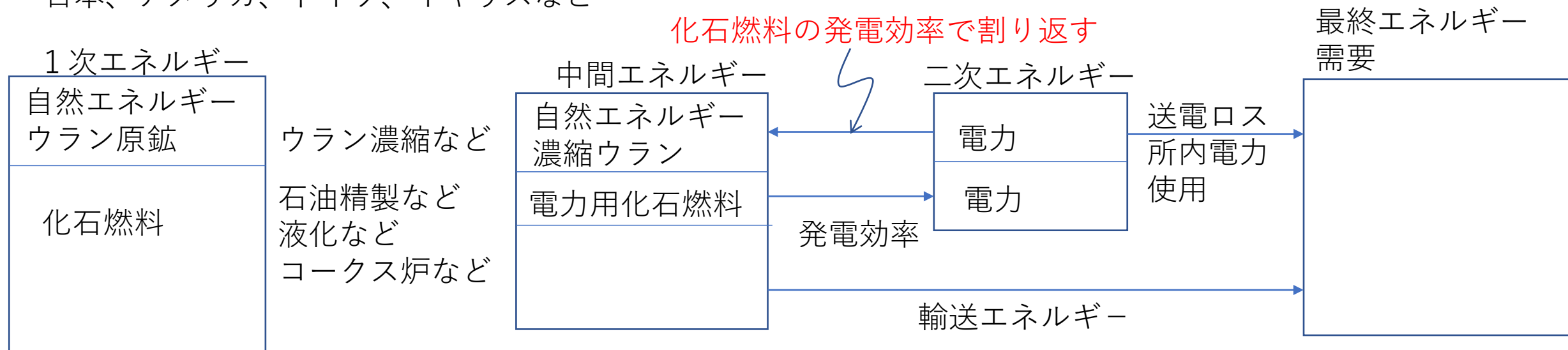
(単位:PJ、%)

年	産業用		交通用		民生・農業用		非エネルギー用		合計
	消費量	構成比	消費量	構成比	消費量	構成比	消費量	構成比	消費量
2015	117,440	29.8	112,837	28.6	128,554	32.6	35,053	8.9	393,884
2016	116,581	29.3	115,137	28.9	130,744	32.8	35,709	9.0	398,171
2017	117,619	29.0	118,083	29.1	133,392	32.8	37,032	9.1	406,126
2018	119,594	28.9	120,375	29.0	136,860	33.0	37,697	9.1	414,526
2019	120,979	28.9	120,972	28.9	137,319	32.9	38,703	9.3	417,973

IEA Data and statistics

2.2.2 一次エネルギーと最終エネルギー需要（資料J-Net）

日本、アメリカ、ドイツ、イギリスなど



フランス、ノルウェーなど、火力発電が殆どない国では、一次エネルギー＝最終エネルギー需要としている。

IEA方式

1991年以降、IEA加盟国全体のエネルギー構成から独自の判断に基づいて統一的に一次エネルギー換算を行い、結果を公表。一例として、水力の変換効率は100%、地熱の変換効率は10%、原子力の変換効率は33%として発生電力量から一次エネルギー量を求めている。

世界の地域別発電電力量の見通し(シナリオ別)

1TWh=10億kWh

	2019年		2030年(TWh)		2030年(%)		2040年(TWh)		2040年(%)	
	TWh	%	公表	持続	公表	持続	公表	持続	公表	持続
北米	5388	20	5639	5233	17	17	6057	5765	15	15
中南米	1333	5	1669	1577	5	5	2174	2039	5	5
欧州	4028	15	4289	4502	13	14	4783	5635	12	15
アフリカ	853	3	1196	1301	4	4	1773	1930	4	5
中東	1162	4	1481	1388	5	4	1989	2018	5	5
ユーラシア	1410	5	1561	1451	5	5	1759	1500	4	4
アジア太平洋	12767	47	16983	16014	52	51	21560	19886	54	51
中国	7518	28	9952	9317	30	30	12023	10951	30	28
インド	1583	6	2461	2365	7	8	3887	3601	10	9
世界合計	26942	100	32818	31465	100	100	40094	38774	100	100

<WE02020の地域分類>

北米:カナダ、メキシコ、米国

中南米:アルゼンチン、ブラジルなど

欧州:EU諸国、スイス、トルコ、ウクライナ、ベラルーシ、英国など

アフリカ:北アフリカ諸国、サブ・サハラ諸国 中東:イラン、ヨルダン、サウジアラビア、UAEなど

ユーラシア:ロシア、カスピ海周辺諸国(アルメニア、カザフスタン、ウズベキスタン)

アジア太平洋:中国、インド、パキスタン、日本、韓国、東南アジア諸国、オーストラリアなど

公表=公表政策シナリオ

持続=持続可能開発シナリオ

2019年

世界における一次エネルギー、590 EJ

世界における電力需要

$26,942 \times 10^{12} \text{ Wh} = 97 \text{ EJ}$

発電効率を0.4 (註)

とすると電力用一次エネルギーは、242 EJ

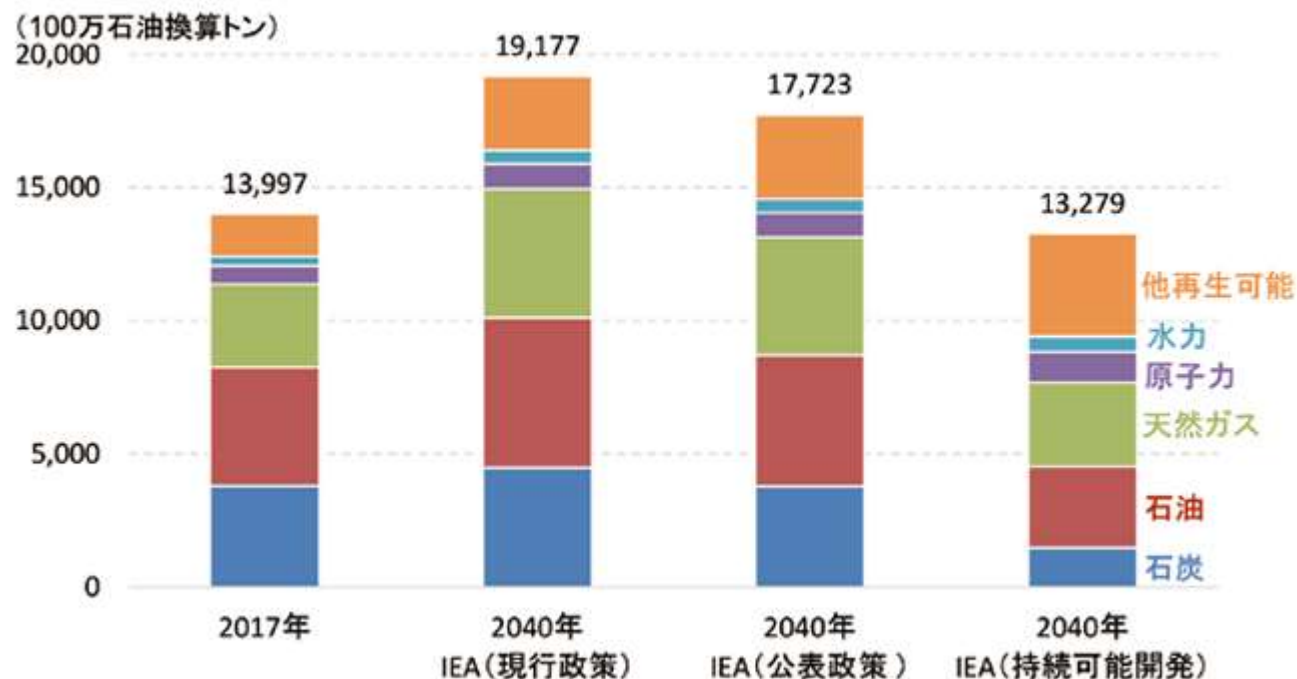
世界の1次エネルギーに占める

電力用1次エネルギーの比率は、41%

註:世界統計で発電効率をどの程度に見積もっているかは不明。



【第221-1-5】世界のエネルギー需要展望(エネルギー源別、一次エネルギー)



(注)エネルギーは風力、太陽光、地熱、バイオマス等の再生可能エネルギーである。

出典：IEA「World Energy Outlook 2019」

総合エネルギー庁の換算係数

原油 $38.26 \text{ MJ/L} = 45 \times 10^6 \text{ J/kg}$

ガソリン $33.36 \text{ MJ/L} = 45 \times 10^6 \text{ J/kg}$

$13,279 \times 100 \text{ 万石油換算トン} = 598 \text{ EJ}$

2021年の一次エネルギー消費量=595 EJ

世界の電力需要を2040年度で

$38,774 \text{ TWh/y}$ (持続シナリオ)とすると 137 EJ

これを一次エネルギーに換算する。

$137/0.4=342 \text{ EJ}$

電力割合 = $342/598=57\%$

2050年以降は一次エネルギー総需要は変わらないとし、このうち10%は非エネルギー用途
20%は電力で代替できないエネルギー消費とすると

電力用一次エネルギーは

$13,279 \text{ 百万石油換算トン} \times 0.7$

$= 598 \times 0.7$

$= 419 \text{ EJ}$

ここから発生する電力は

$419 \times 0.4=168 \text{ EJ}$

$=46,500 \text{ TWh}$

2.3 リチウム電池必要定格容量（まとめ）

原資料より、PV:2.5kwh-蓄電/kw-発電(定格発電容量)、WT:2kwh-蓄電/kw-発電(定格発電容量)

仮に総発電量の50%をWT,30%をPV,水力,潮力地熱などの自然エネルギーを20%、耐用年数を10年とする。

風力発電の発電量は定格の30%

太陽光発電の発電量は定格の13%

水力などの発電量は底角の80%

とする。

リチウム電池の蓄電量は定格の50%とする。

全発電量が 5.310 TWh とすれば

風力発電	$5.310 \times 0.5 = 2.655$	バッテリー必要定格容量 = $2.655 / 0.3 \times (2 / 0.5) = 35.4$ TWh
------	----------------------------	---

太陽光発電	$5.310 \times 0.3 = 1.593$	バッテリー必要定格容量 = $1.593 / 0.13 \times (2.5 / 0.5) = 61.3$ TWh
-------	----------------------------	--

合計		96.4 TWh
----	--	----------

電池の需要量

		2019	2030	2040	2050 Sustainable *
全電力量(日本原子力協会)	TWh/y	26,942	32,818	38,774	46,500
発電量(全電力／(365×24))	TW	3.08	3.75	4.43	5.31
発電量のうち、太陽光と風力の比率	%	10	20	50	70
定置用バッテリー容量（定格、存在量）	TWh	6.9*	17.7	49.7	96.4
定置用バッテリー容量（定格、年間需要）	TWh/y	0.69	1.77	4.97	9.64
車載用バッテリー容量（定格、年間需要）	TWh/y	0.20	2.50	8.00	12.00
合計	TWh/y	0.89	4.27	12.97	19.64

* 太陽光発電、風力発電の比率が小さいときは、緩衝用バッテリーの必要量はもっと少なくて済むだろう

経産省資料（１）

定置用バッテリー容量（定格）	TWh/y	0.04	0.13	0.22	
車載用バッテリー容量（定格）	TWh/y	0.10	1.21	3.55	
合計	TWh/y	0.14	1.33	3.77	

経産省資料（２）

定置用バッテリー容量（定格）	TWh/y	0.03	0.37		3.40
車載用バッテリー容量（定格）	TWh/y	0.20	3.29		7.55
合計	TWh/y	0.23	3.66		10.95

車載用・定置用蓄電池の需要推移



(出典) IRENA Global Renewables Outlook 2020 (Planned Energy Scenario) EV 1台 = 50kwhとして換算

3. リチウム、ニッケル、コバルト資源の需要と供給

3.1 リチウム電池用鉱物資源必要量

リチウム電池の需要

D [Wh]

車載用リチウム電池は、乗用車の耐用年数（使用年数）を15年としても、その15年の間の劣化はおそらく10%程度にとどまると思われる。

定置用リチウム電池は劣化度10%からのものでも使用可能であり、且つ、その量も高々車載用の8割程度であることを考えれば、車載用用済みの電池で充分間に合うものと思われる。

（LiB搭載のHEVは、ライフサイクルの中で電池を交換する必要がほぼ無くーリコー報告書）

又民生用リチウム電池の量も車載用に比べれば圧倒的に少ない。

よってリチウム電池の需要としては、車載用電池をとれば充分である。

リチウム電池の需要としては経産省資料があるが、今のところ、根拠が不明なので、ここでは本レポートの値を取る。

リチウム正極 1 kg当り定格容量 $C [\text{Wh/kg}] = 801 \text{ Wh/kg for DOD}=100\%$

正極としては最新のNMCを仮定する。 $\text{LNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$

正極1kg当りNi量 $M_{\text{Ni}} [\text{kg/kg}] = 0.8 \times 58.6934 / 97.28 = 46.955 / 97.28 = 0.483$

正極1kg当りLi量 $M_{\text{Li}} [\text{kg/kg}] = 1 \times 6.941 / 97.28 = 0.0713$

正極1kg当りCo量 $M_{\text{Co}} [\text{kg/kg}] = 0.1 \times 58.932 / 97.28 = 5.8932 / 97.28 = 0.0606$

Mnは資源量としては充分あるので、ここでは考慮しない。

リチウム電池用ニッケル金属必要量 $D/C \times M_{\text{Ni}}$

リチウム電池用鉱物資源必要量

		2019	2030	2040	2050 Sustainable (YAMADA推定)
リチウム電池	TWh/y	0.20	2.50	8.00	12.00
ニッケル	万トン/y	12.0	150.9	483.0	724.5
リチウム	万トン/y	1.8	22.3	71.3	107.0
コバルト	万トン/y	1.5	18.9	60.6	90.9

上記推定のベース

乗用車数の販売台数予測 (スライド19)

乗用車販売台数の内 EV の比率(スライド19)

一台の定格 100 kWh

正極はNMC $\text{LNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$

このうち、最も疑わしい過程は正極を $\text{LNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ としたことである。リチウムリン酸鉄は価格が安く中国ではかなり売られている。コバルトは埋蔵量が少ない上に政情不安定なDRC(コンゴ)に偏っており、また児童労働が深刻な問題になっている。コバルトをさらに減らす研究が続いている。

表1. 正極材ごとのバッテリーコスト比較 (US\$, 40kWhのバッテリーとした場合)

NCA	LMO	LFP	NMC111	NMC523	NMC622	NMC811
5,400	2,680	2,560	8,200	6,440	6,000	4,760

(出典：Roskill社講演資料を基に筆者－天然ガス金属資源機構－作成)

2018年10月までの時点で中国でのLIBの正極材別の割合はNMC 61%、LFP 37%、LMO 1%、その他1%だった。LFPは高性能ではないが、安価なためによく使われる。

3.2 リチウム電池以外の需要

3.2.1 ニッケルの需要

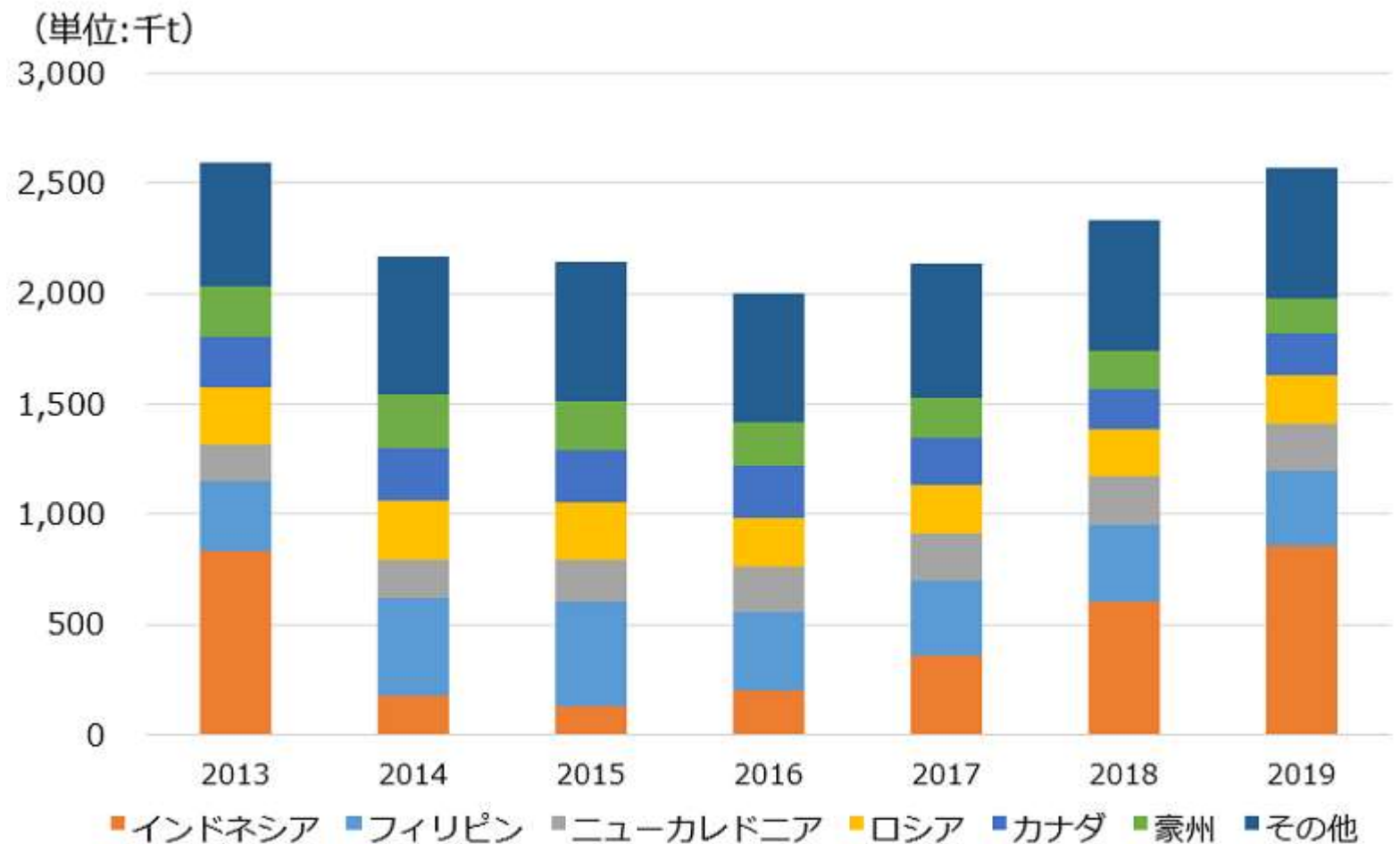


図4. ニッケル鉱石生産量国別推移

(出典: INSG)

ニッケル



【出典】埋蔵・生産: USGS2020

製錬: IEA、輸入: 貿易統計

経済産業省2021/11/18

蓄電池産業の現状と課題

3.2.2 ニッケル埋蔵量

最近の米国地質調査所の報告

世界のニッケル埋蔵量は約8,900万トン（埋蔵量とは経済的採掘が可能な量）

標準的な鉱床における資源は3億トン近く（資源量とは経済性を重視しない、存在が知られている量）

マンガン・ノジュール（深海底）には、推定、**2.9**億トン以上のニッケル

ニッケルの需要は2019年で約260万トン。

65%はステン用、20%は他の合金鉄、9%がメッキ、6%がリチウム電池などとなっている。

2019年ではリチウム電池用は12万トンで全ニッケル需要の5%弱に過ぎないが、2050年では 720 万トンとなり、最大の用途になる。

他の用途向け需要がそれほど変わらないとしても、全需要は 1 千万トンを越える。

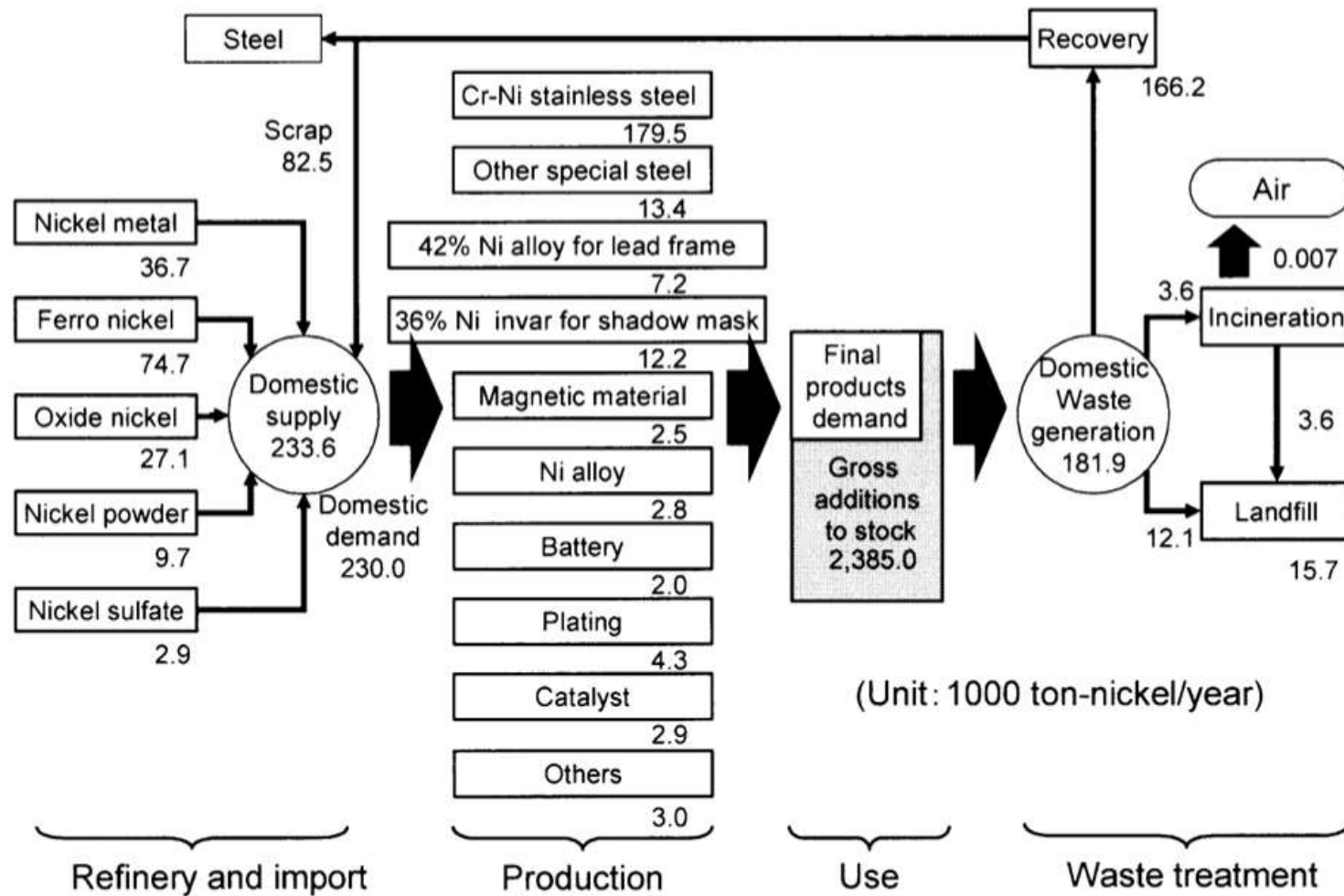
日本ではステンレス、合金鉄用はほぼ100%リサイクルされている。世界的にも同等と思われ、2050時点ではステンレス、合金用のニッケル鉱需要はむしろ減るかも知れない。

リチウム電池用が回収されないとすれば、ニッケル埋蔵量は

2019レベルでは740年分

sustainable level(2050)では12年分

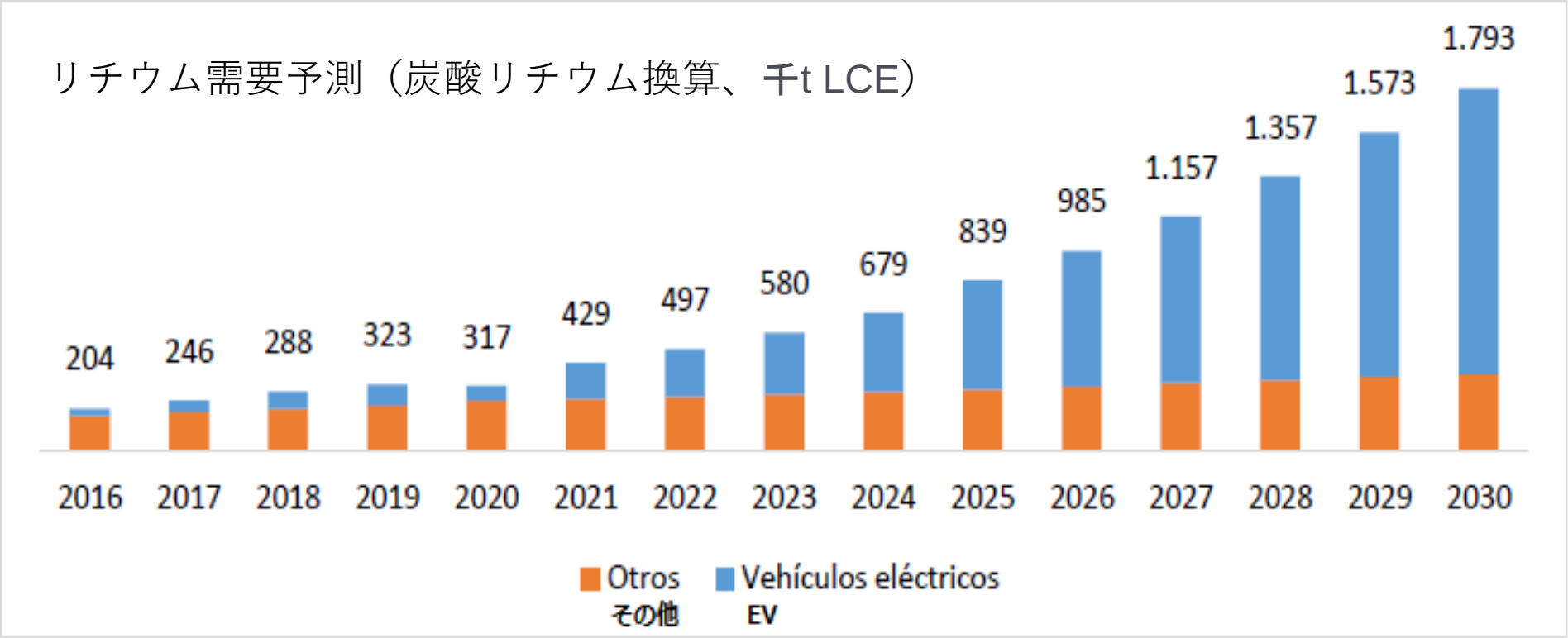
3.2.3 日本におけるニッケル物質フロー 鉄と鋼Vol92(2006)No.10,pp49-56



日本の場合、結論的に言えば、2002時点で Niはほぼ完全にリサイクルされていたと言える。

Fig. 5. Substance flow of nickel in fiscal year 2002.

3.2.4 リチウムの需要予測



出典：HSBC、Roskill、その他の市場のデータを基にCOCHILCOが作成

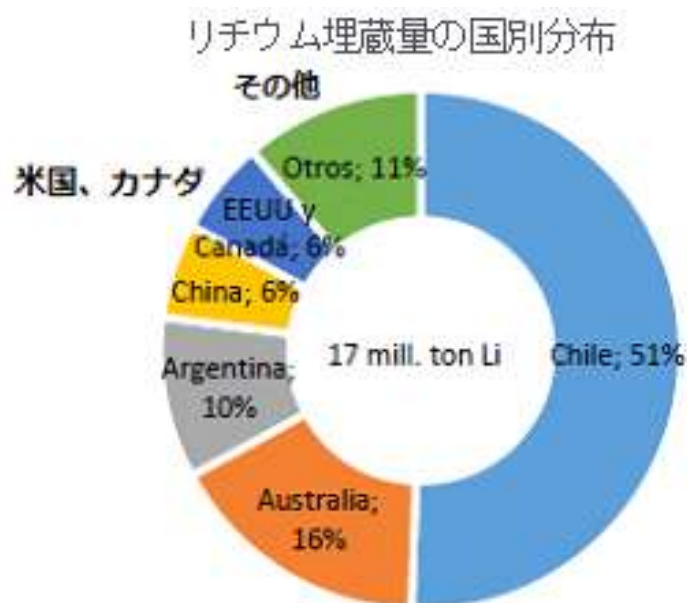
		2016	2019	2020	2030	2040	2050
車載用リチウム電池(COCHILCO)	千トン/y	5	14	11	271		
その他(COCHILCO)		33	46	49	66		
計(COCHILCO)		38	61	60	337		
車載用リチウム電池（本レポート）				18	222	712	1,068
リチウムの全需要（経産省）				20	160	280	

従来の用途
ガラス、陶磁器、
潤滑油、医薬品な
どへの添加剤

3.2.5 リチウム埋蔵量

リチウム資源は灌水系と鉱石系がある。現在は灌水系が主体である。
その埋蔵量は推定者によって大きく異なる。

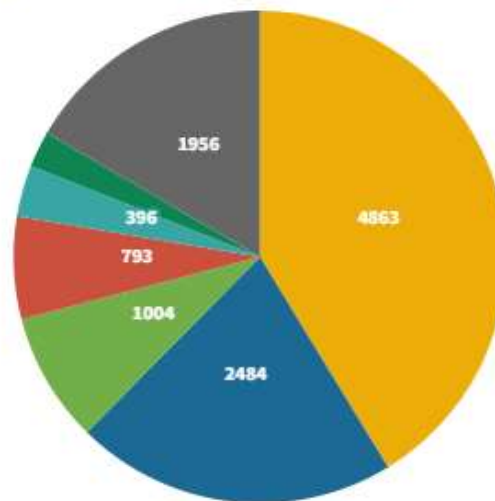
少ないものは、USGS— Mineral Commodity Summaries,2008で 9,900 千トンー金属リチウム換算で
多いものはR.KeithEvans—2010 で 34,720千トンー金属リチウム換算である。



出典:USGS(2019 年)

埋蔵量はチリとオーストラリアで65%
リチウム資源国別埋蔵量<合計1億1100万トン> (単位: 万トン)

チリ オーストラリア アルゼンチン 中国 アメリカ カナダ ほか



Source: アメリカ地質調査所 Mineral Commodity Summaries, January 2021・炭酸リチウム換算

1 億 1 千百万トン炭酸リチウム
= 2000万トン金属リチウム

チリ銅委員会(COCHILCO)2020年8月
「2030年にかけてのリチウムの需要と供給」



【出典】埋蔵・生産: USGS2020
製錬: IEA、輸入: 貿易統計
経済産業省2021/11/18
蓄電池産業の現状と課題

3.2.5 コバルトの需要予測

		2020	2025～30	2040	2050
リチウム電池（註）	千トン/y	80	210～220		
リチウム電池以外（註）	千トン/y	50～60	50～60		
計	千トン/y	130～140	260～280		
経産省	千トン/y	20	110	140	
リチウム電池(本レポート)		18	222	712	908

註：リチウムイオン電池の生産に不可欠なコバルト資源,吉竹豊2022年02月01日
2021年5月、調査機関はイギリス・ロスキル）をみると、コバルトの2020年の世界需要が13.5万トンで前年比0.6％減とほぼ横ばい。このうちLIB用途が7.7万トンほどで同5％増え、需要全体に占めるシェアは57％に達し、2019年（54％）から3ポイント上昇した。

一方、LIB以外の用途は、航空エンジンに用いられるニッケル基のスーパーアロイや、超硬工具に用いられる超硬合金（炭化タングステンなど）のバインダー材などがそれぞれ12％減少したことから、5.8万トンで前年比7％減った。



【出典】埋蔵・生産：USGS2020
製錬：IEA、輸入：貿易統計
経済産業省2021/11/18
蓄電池産業の現状と課題

3.2.6 リチウム、ニッケル、コバルト資源の需要と供給ーまとめー

ニッケル：2050 年では 合金用250万トン、リチウム電池用720万トンが見込まれる。
合金用はリサイクルが経済的にメリットが大きく、鉱石依存度は減るかも知れない。
電池用は、リサイクルがないとすると、埋蔵量は2050ベースで需要の12 年分である。

リチウム：2050年では需要は100万トンを越える。その他の用途は多くともこの10% 以下である。
埋蔵量は 2050ベースで需要の17年分である。

コバルト：2050年では需要は90万トンを越える。埋蔵量はこの需要の8年分である。
ただし、コバルト依存度を減らす研究は行われており、この依存度はもっと減るかも知れない。

註) リン酸鉄リチウム（L F P）が正極として使われるようになれば、ニッケル、コバルトは不要になるが、
こうなれば、容量が低下することから、さらにリチウム消費量はさらに増大する可能性がある。
いずれにしても、リチウム電池の回収は将来必須と思われる。

4. リチウム電池のリサイクル

4.1 リチウム電池リサイクルの現状

4.1.1 リチウム電池回収の主目的は、Ni, Co が主目的。Li は再資源化のリストに入っていなかった。
その理由は

- a. 回収が技術的に難しい。
- b. 資源量が多く、枯渇の心配がない。
(野澤哲生、日経エレクトロニクス 2022.2.24)

4.1.2 現状ではLiBからのリサイクルでは、Co・Niが主要なターゲットとなっている。

a. Li回収が技術的に困難

乾式製錬ではLiBを直接投入できるという利点はあるが、消費エネルギーが大きい上に、リチウムはスラグへ移行し回収は困難となる。

湿式製錬では全元素の回収が可能になると利点はあるが、処理工程が複雑になり、薬剤消費も大きくなることが考えられ、採算性が悪くなることが予想される。

b. 廃LiBの回収システムなど社会基盤の整備が課題

c. Umicore社、JX金属社はLiBからの全金属回収技術を開発中

- 独立行政法人、請求天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部生産技術科 大久保聡
- リチウム生産技術概略(2019.3.29)

4.2 リチウム電池回収工場

Roskill(2019年)のデータによると、2018年の時点でLIBのリサイクルセンターは計52か所存在し、そのうち24か所は中国にあった。欧州や米国において、大部分のリサイクルセンターは個別事業となっているが、アジアでは比較的統合されており、特に中国ではバッテリーメーカーとEVメーカーが連携している。

再生リチウムの使用量は、2018年の10千t LCE(1.8千トン-金属Li)未満から2028年にかけて100千t LCE(18千トン-Li)以上にまで増加すると予想される。つまり、再生リチウムが2018年の総需要の3%だったのが10年後には7%以上になることを意味している。

COCHILCO 2020年8月

各国企業のリサイクル・リユース事業

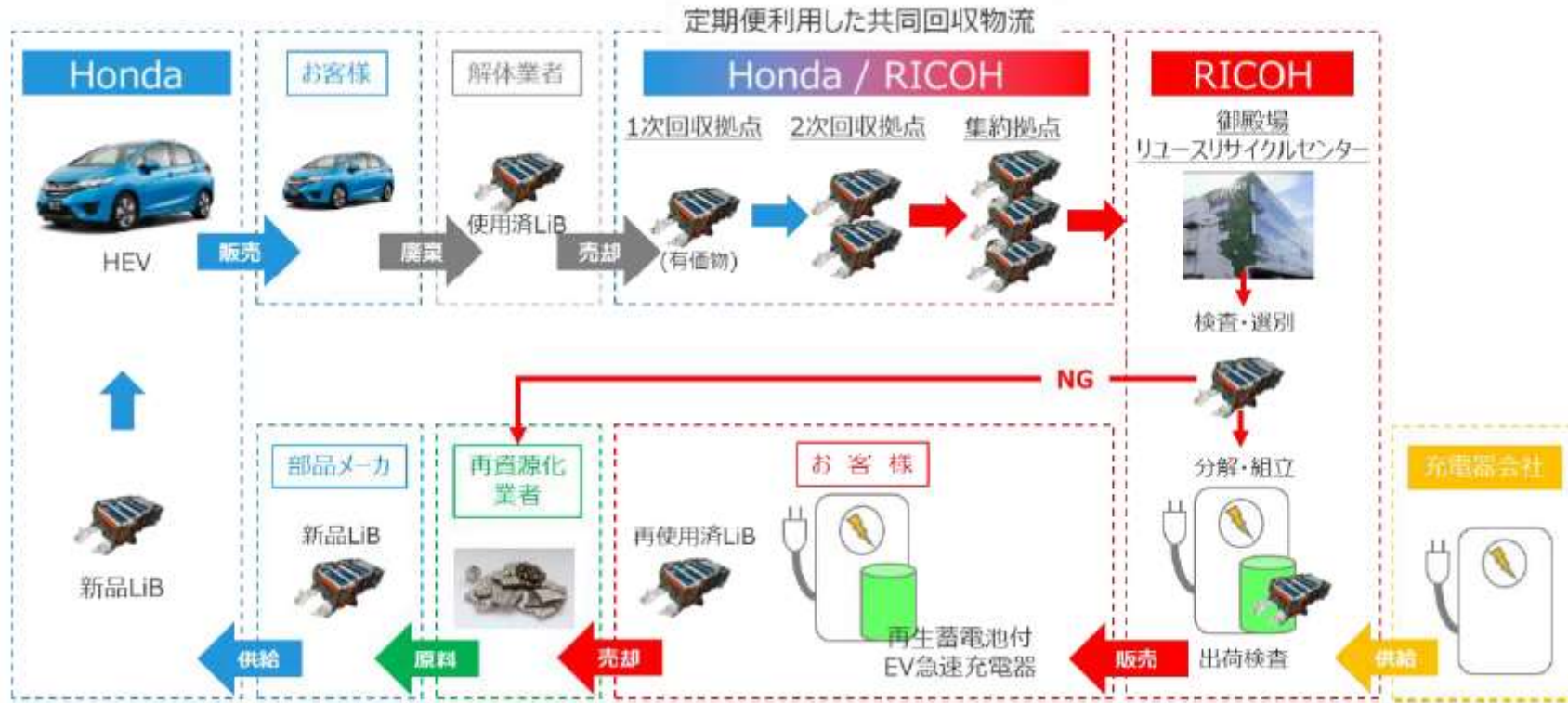
- Umicore（ベルギー）は、使用済電池のリサイクルを通じて、含有する金属を正極材に加工して最終的に新しい電池材料にするなど、独自技術をもとにクローズドループによるリサイクルモデルを確立、推進。
- BRUNP（中国）は、独自技術により、電池製造、消費、リサイクルの循環を有機的に統合、高い総収率を実現。2027年完成を目途に、最大投資額約320億元（約5,700億円）の大規模な工場建設を計画。

 Umicore (ユミコア)	 BRUNP Recycling (邦普循環)
【企業概要】 素材の加工・リサイクル事業を行う。クリーンモビリティ・リサイクル事業は全体の売上高比の75%、研究開発費は6%を占める。 【特徴】 ○クローズドループのリサイクルモデルにより、リチウムイオン、リチウムポリマー、ニッケル水素電池のリサイクルサービスを提供。 ○高温冶金法と湿式冶金法と呼ばれる化学プロセスを組み合わせ、コバルトやニッケル、銅の抽出と合わせ、スラグからリチウムとレアメタル（希土金属）を回収。 ○有機化合物の完全分解、有害なダイオキシンや揮発性有機化合物（VOC）が生成されないガス洗浄システムを保有。 ○バッテリー部品（電解質、プラスチック、金属）の内部に存在するエネルギーを使用することで、エネルギー消費とCO2排出量を最小限化。 ○ホーボーケンの超高温炉での処理容量：7,000 トン/年 ※おおよその内訳は、携帯電話バッテリー：250,000,000、E-bikeバッテリー：2,000,000、EVバッテリー：35,000程度。	【企業概要】 CATLの傘下企業。主要事業は、デジタル製品用電池および動力電池の回収処理・カスケードリユース、自動車回収・解体、重要部品の再製造、ハイエンド電池材料および自動車重要材料の生産、商業界循環サービスソリューションの提供など。 【特徴】 ○最新の電池リサイクル工業団地は、総面積130,000㎡、年間6,000トンの廃バッテリーを処分でき、4,500トンのニッケルマンガンコバルト水酸化物、ニッケルコバルトマンガン酸リチウム、コバルト酸リチウムを生成。塩化コバルト、硫酸ニッケル、硫酸コバルト、酸化コバルトの総収率は98.58%以上。 ○電池からリン酸鉄リチウムなどの原料を回収し再利用できるようにするリサイクル工場を国内で新設すると公表。総投資額は最大320億元（約5,700億円）。2022年に着工し27年の完成を目途。（広東邦普循環科技） ○電池材料の供給保証、自社の使用済み車載電池の（製造から廃棄までの）ライフサイクル管理目標を進める。 ※BRUNPに、GEM、HuayouCobalt New Material、Highpower Technology、Guanghua Sci-Techを加えた5社が中国のLIBリサイクル大手とされる。

11

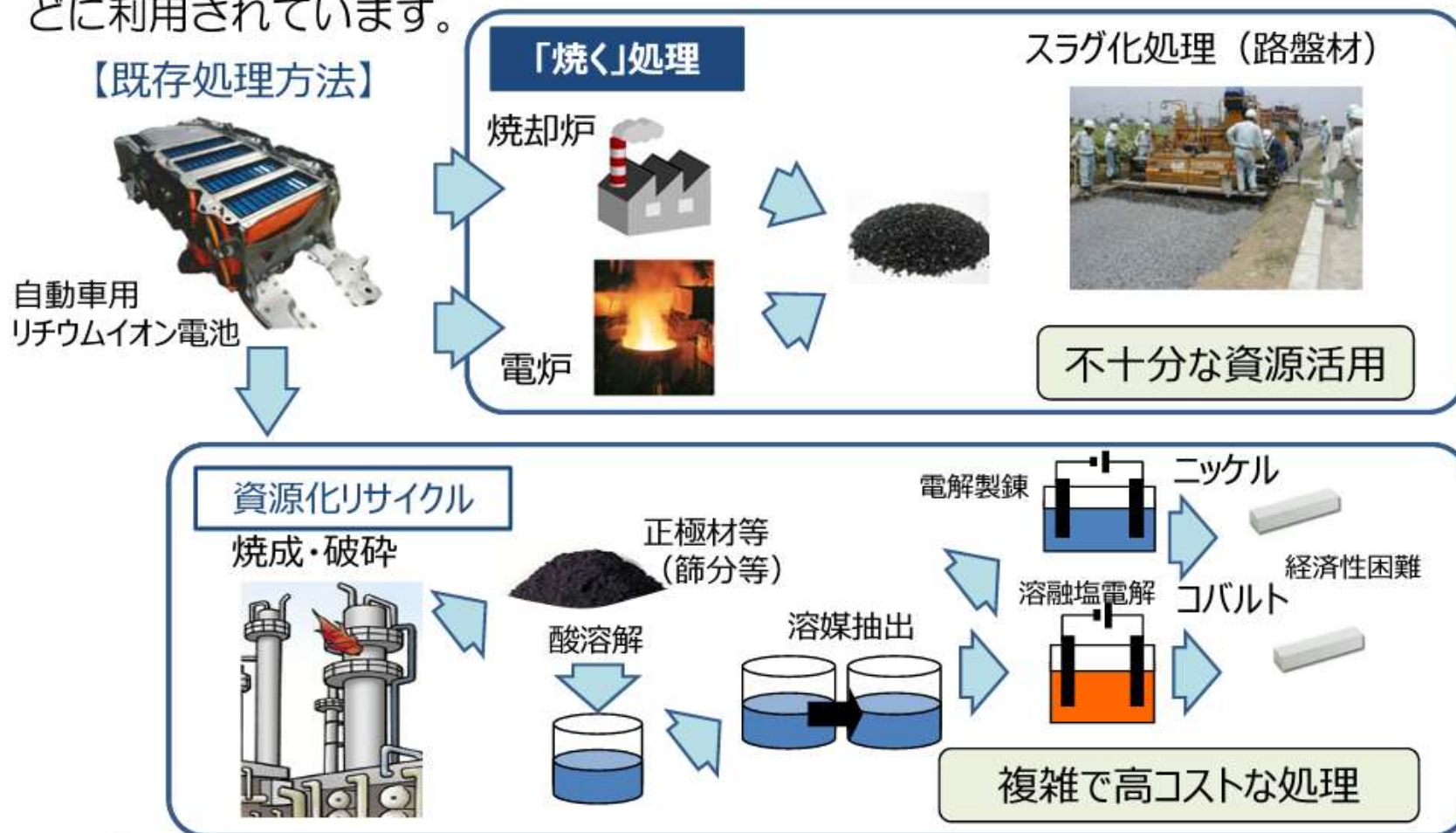
4.3 リサイクルプロセス

4.3.1 リサイクルの全体図



ハイブリッド車用リチウムイオン電池の
リマニュファクチャリング検証事業
2020/2/28 株式会社リコー

リチウムイオン電池は、電解液に有機溶媒と腐食性物質が発生する電解質を含むので焼却処理されています。電池に含まれる資源を活用するためには煩雑で高価な分離精製処理が必要ですが、経済的に困難なため焼却、スラグ化され路盤材などに利用されています。

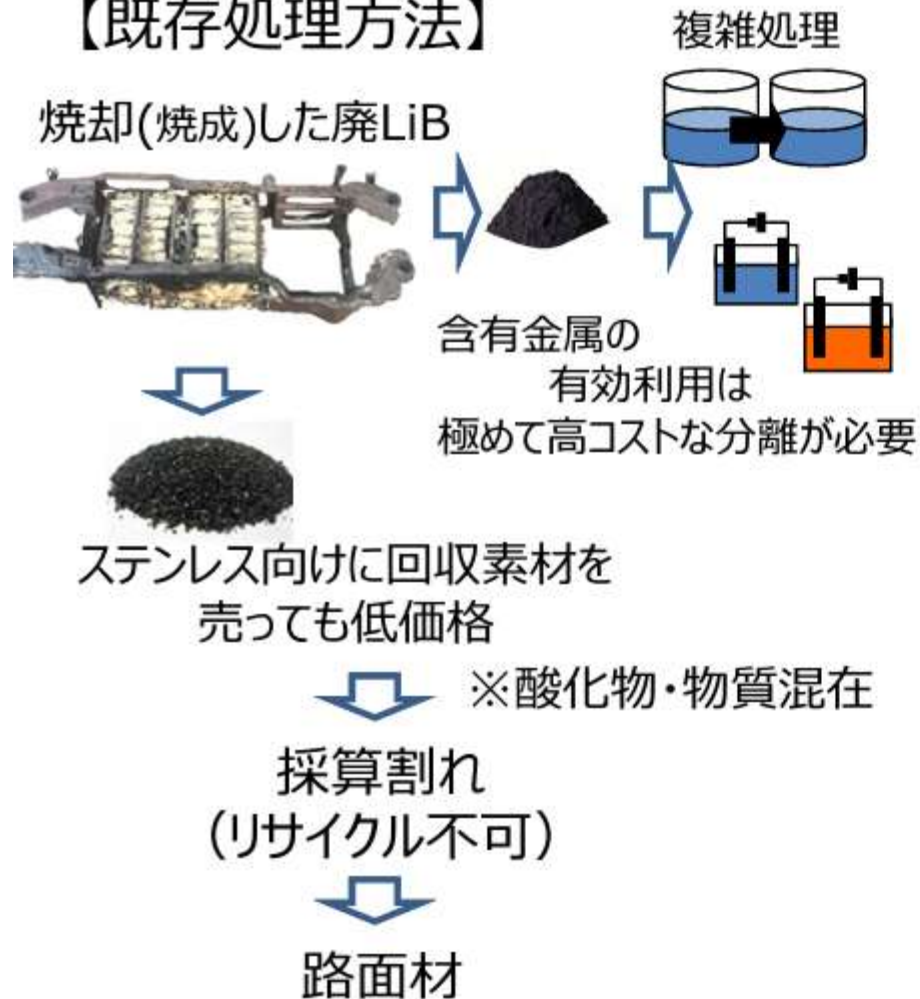


ポイント

- ・利用できる製品への資源化費用が高く、路盤材等になっている

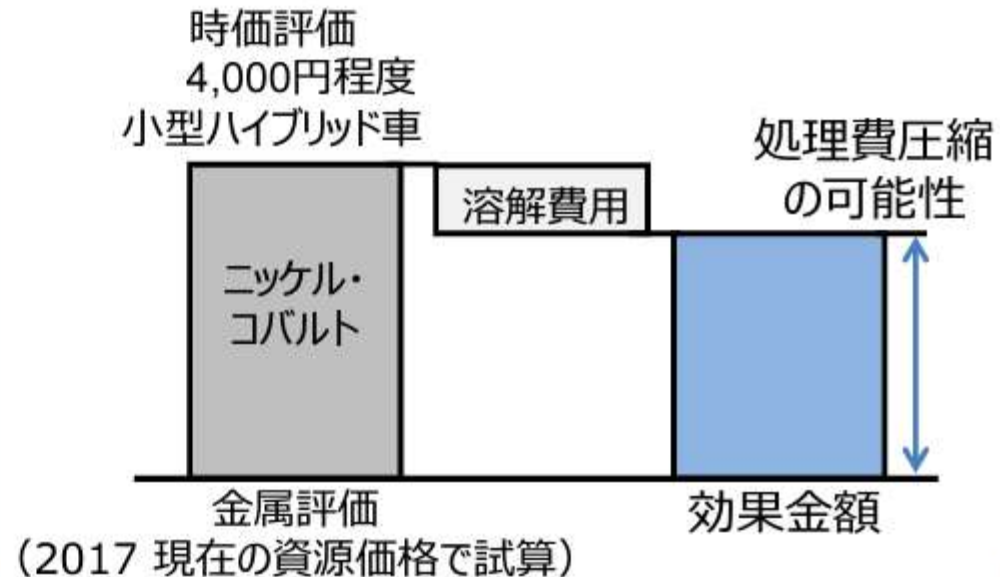
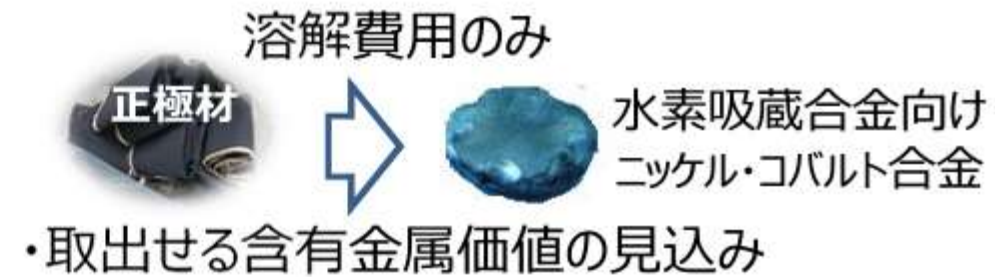
本研究では、正極材を焼却することなく回収します。また分離精製せずに再熔解のみで活用できる水素吸蔵合金に再資源化し、費用の低減と資源の活用を可能とします。

【既存処理方法】

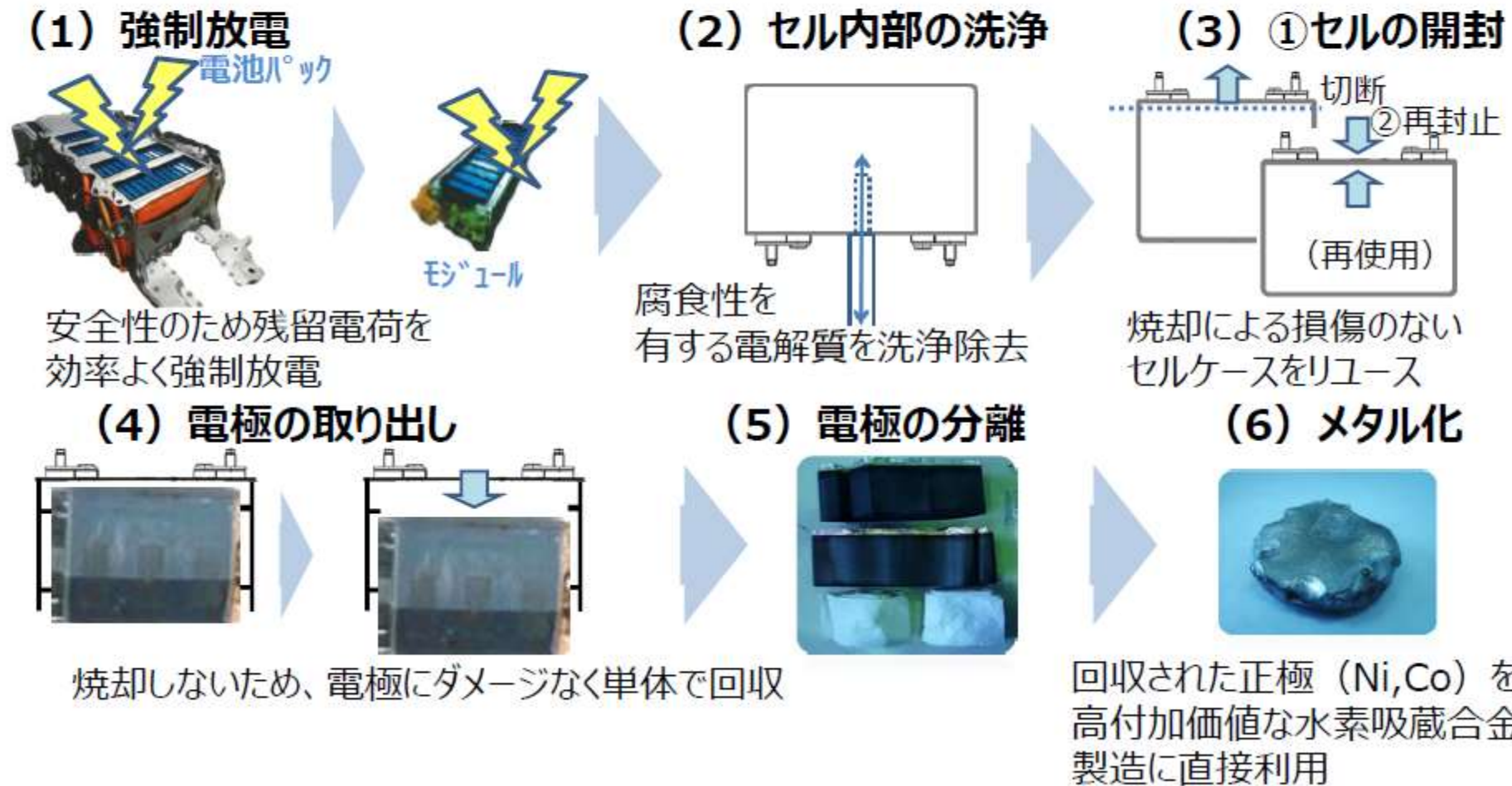


【本テーマ：解決策】

Ni, Coを分離せずに、再資源化が可能

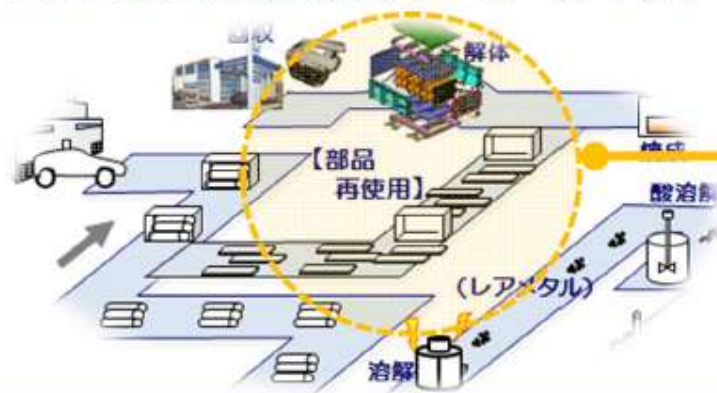


リチウムイオン電池の正極を水素吸蔵合金に再資源化するには不純物の混入を避ける必要があり、電極を精度よく分解し単体で回収します。このプロセスには残留電荷を強制放電したり、電解質を除去する工程も必要となります。

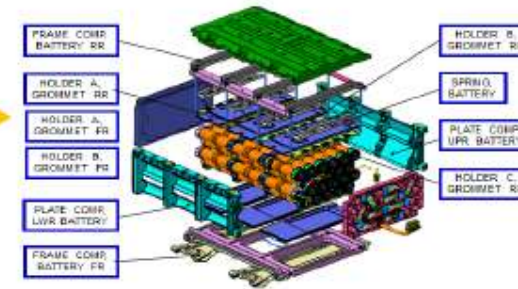


電池のその他構成部品のリユースは補修用ニッケル水素電池で既に実践しています。
リチウムイオン電池でも同様に出来る可能性があると考えられます。

ニッケル水素電池のレアアース・リサイクル



構成部品17部品の内、10部品を再使用



リチウムイオン電池



(解体)
➡



リチウムイオン電池の構成部品

(複雑な機構故に、多い部品構成)

5. まとめ

リチウム電池の原料となるリチウム、コバルト、ニッケルは、いずれも資源的に充分とはいいがたく、将来的にはリチウム電池の回収は必須である。

リチウム電池の需要は、車載用、定置用、民生用と大きく三つがあるが、民生用の需要は全体に比べれば少なく、定置用も多くない上に、車載用のリユースで充分賄うことができる。

ニッケルは現在、ステンレス用の需要が大きいが、将来的にはリチウム電池の需要の方が大きくなる。

リチウム電池の回収は既に小規模ながら行われており、又かなりの規模で建設中の工場もある。しかし、公表されている限りでは、現在の回収技術は十分ではなく、コスト的に問題がある。

回収技術の開発が必要である。本田技研も開発を進めているが、回収製品はニッケルコバルト合金になっており、このままではリチウム電池にリサイクルはできない。これをリチウム原料として使えるようにするコストがどのくらいかかるかは不明である。

本田では、鉱物資源の回収だけでなく、パッケージ部品の回収も検討しているが、これは非常に重要だと思われる。

現在の回収コストがどのくらいかかるか、現在の商品価格と比べてどの程度の採算性が見込めるかについては、今回検討できなかった。