

電池の適材適所

—電池は再エネの変動性を補償しうるのか？—

京都大学名誉教授
NPO法人シンビオ社会研究会顧問
八尾 健

E-mail: t_yao@hera.eonet.ne.jp

自己紹介

経歴

- ・京都大学大学院エネルギー科学研究科教授・工学部教授
- ・京都大学評議員
- ・京都大学大学院エネルギー科学研究科長
- ・京都大学経営管理委員会委員
- ・文部科学省グローバルCOEプログラム「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」
拠点リーダー
- ・国立香川高等専門学校校長
- ・富山県立大学客員教授
- ・NPO法人シンビオ社会研究会顧問

研究

- ・結晶構造解析
- ・材料電気化学
 - リチウム電池、ニッケル水素電池、鉛蓄電池、燃料電池
- ・エネルギー研究全般
- ・生体材料
 - 人工骨、ドラッグデリバリー、遺伝子導入

電池の適材適所

—電池は再エネの変動性を補償しうるのか？—

1. 学校で教えない電池の原理
2. 電池の反応は過酷
3. 電池の歴史
4. 電池の適材適所
5. まとめ

エネルギーデバイスとしての電池への期待

・自動車

電気自動車(EV)

ハイブリッド電気自動車(HEV)

燃料電池自動車(FCV)

・電力貯蔵

太陽光発電蓄電システム

風力発電蓄電システム

電力平準化

スマートグリッド

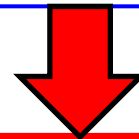
電池の誤解

× 鉛蓄電池→ニッケル水素電池→リチウム電池と発展 ⇒後から出てきた電池の方が高性能？

× 新電池開発の期待 ⇒期待通りの電池が開発できる？

× 人気のある電池と人気のない電池 ⇒電池はアイドル？

× 電池の真実がよく理解されていない⇒電池はブラックボックス？



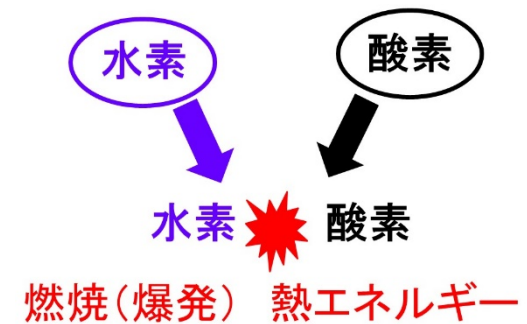
・電池はそれぞれに長所と短所を持つ

・電池は適材適所

・原理に立ち返り、電池を知る

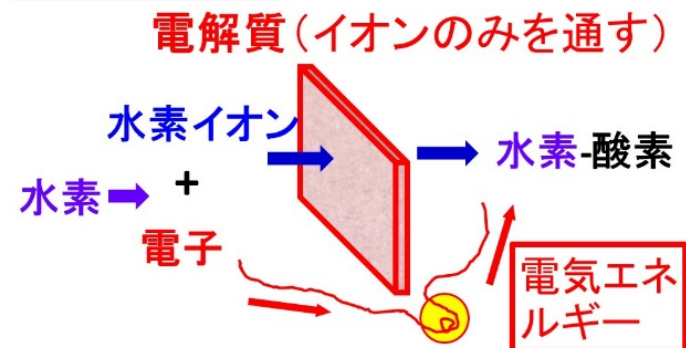
燃料電池で水素と酸素から発電する

水素と酸素を混合するだけなら、激しく
燃焼して熱エネルギーだけが出てくる



- ①水素と酸素の間に電解質*を置く
- ②水素は水素イオンと電子に分かれる
- ③水素は電解質を通して酸素に達する。
- ④電子は外部の導電体(電線)を通して酸素に達する。
- ⑤電子は上記③の過程で電気的工作をする。
=電池として働く。

電池の原理



電解質の存在が電池の本質

電解質の存在が、電池の本質

* 電解質 イオンのみを通す物質。原子は通さない。電子も通さない

基調講演

化学力発電 ～学校では教えない電池の原理～

香川高等専門学校 校長（京都大学名誉教授） 八尾 健氏

1. はじめに

講演を受ける時に「電池は何か？なかなか分かりにくいので、分かり易い説明はないですか？」と依頼があり、今日の話をしてもらいます。化学力発電と言うと皆さん聞き慣れていないと思います。電気系の教科書「発電工学」に電池の解説を書いた時に、私の恩師竹原善一郎先生（京都大学名誉教授）に、どんな題名が良いか尋ねたら、発電だと水力発電、火力発電、原子力発電とかあるので、それに対応して「化学力発電」とすればよいのではないかとアドバイスをいただきました。それで「化学力発電」の章を設けて、電池の話を書きました。電池は化学反応で電気を起こすので、よく実体を表している言葉だと思います。



電池といえば、皆さんご存知のように色々な電池があ

るので、水素は水素イオンと電子に分かれる。電子に別のルートを作ってやると、水素イオンがこの電解質を通っていき、電子は別の道を通っていくので、この時に電子に仕事をしてもらい、電燈を点灯してもらおうと、これが電気エネルギーです。水素と酸素から電気エネルギーが導き出せるわけです。



©八尾裕子

結局、この電解質の存在が電池の本質であると考えていくと、非常に電池を総合的に理解して頂けると思います。これを4コマ漫画にして説明してみましょ。この絵は、私の息子の奥さんの八尾裕子さんに描いてもらいました。

①イオンちゃんは電子君を連れてお出かけです。電子君は元気な犬です。いつもイオンちゃんの周りを忙しくまわっています。

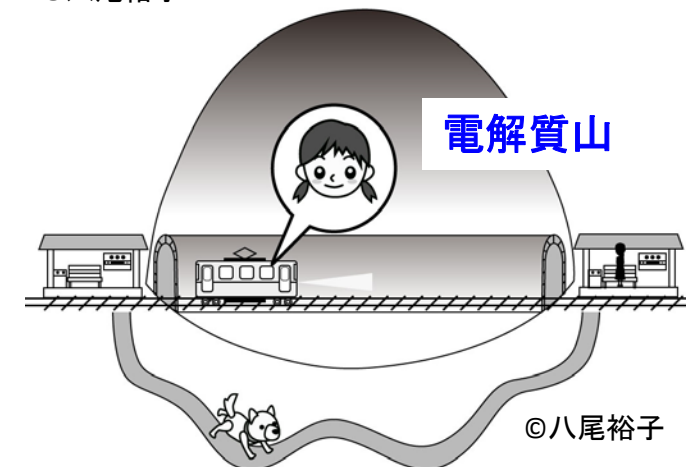
① イオンちゃんは電子君を連れてお出かけです。電子君は元気な犬です。いつもイオンちゃんの周りを忙しくまわっています。イオンちゃんと電子君で、1つの原子を構成します。



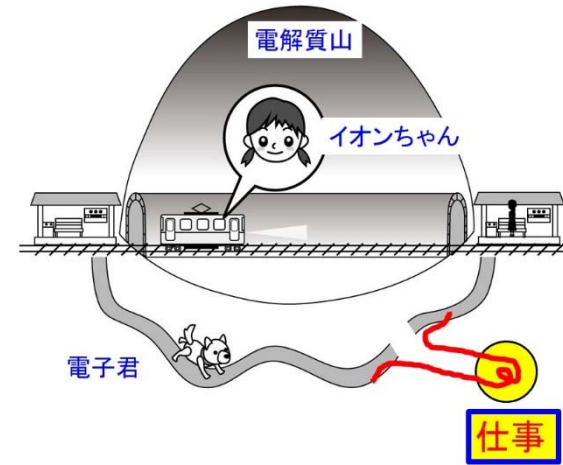
② 途中に大きな山がありました。電解質山です。ふもとに駅があります。電車に乗ると、トンネルを通過して向こうに行くことができます。しかし、犬は電車に乗ることができません。仕方がないので、イオンちゃんだけが電車に乗ることにしました。電子君は回り道を通ります。



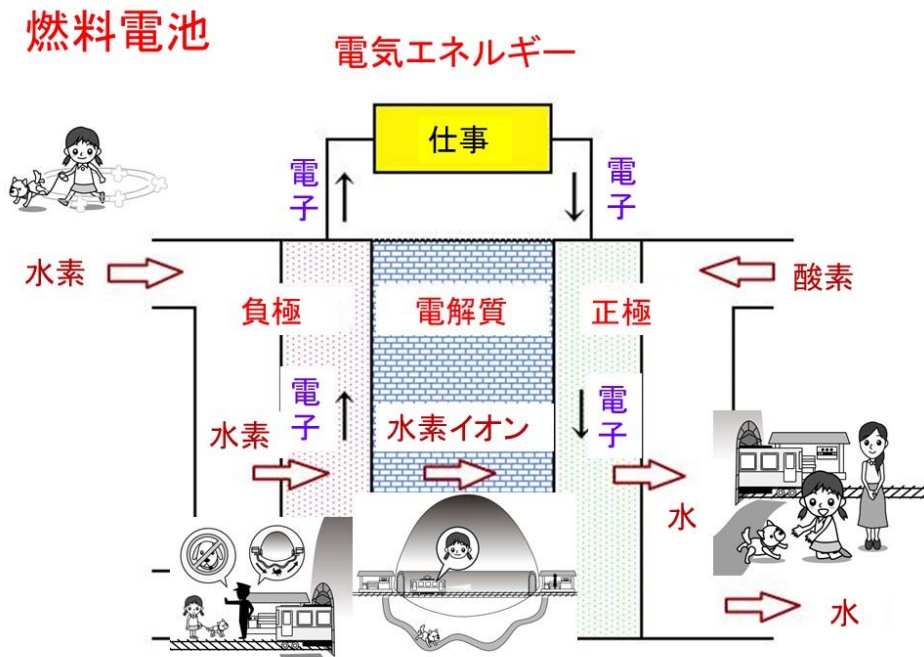
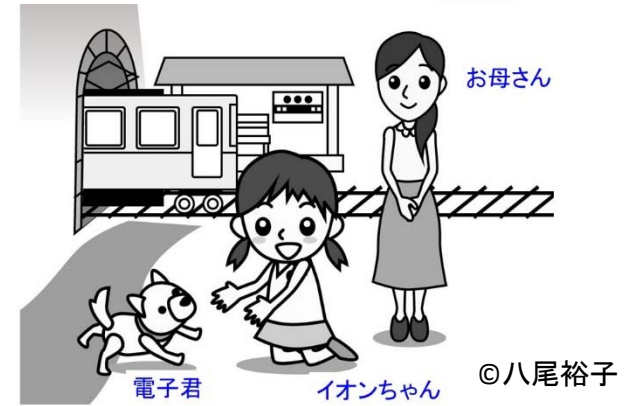
③ イオンちゃんは、電車に乗ってトンネルを抜けていきます。電子君は、回り道を勢いよく走っていきます。



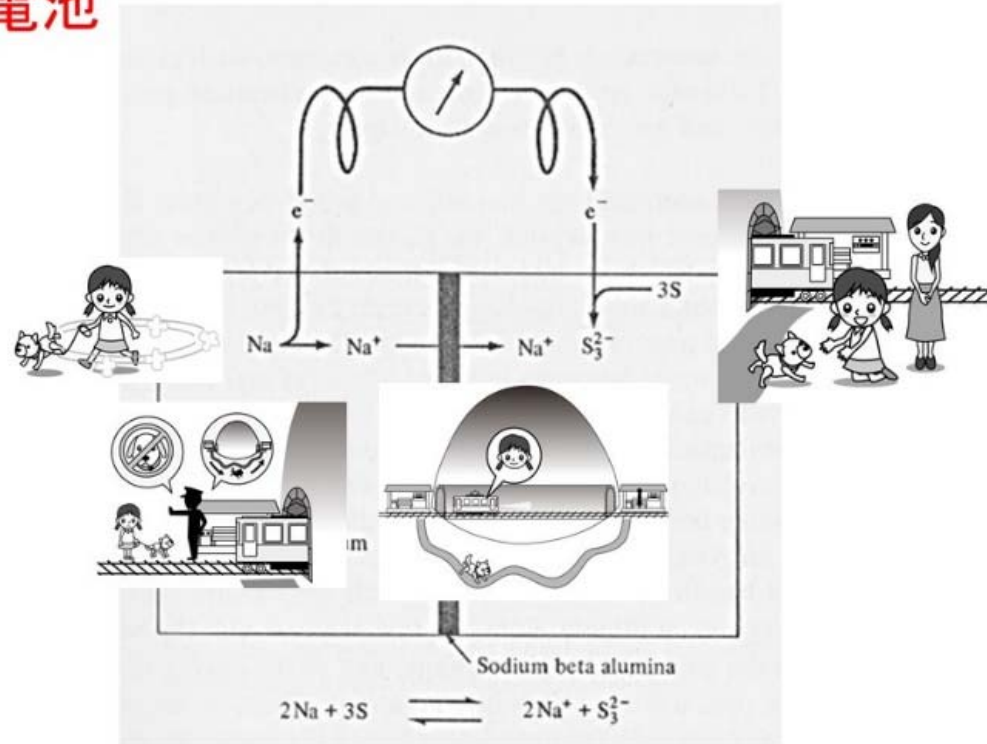
④ 電子君には、途中でちょっとお仕事をしてもらいます。電気的な仕事です。



⑤ トンネルを出たところの駅で、お母さんが待っていました。イオンちゃんは駅でお母さんに会いました。電子君も合流します。



NaS電池



J.E.Huheey, E.A.Keiter, R.L.Keiter
Inorganic Chemistry: Principles of Structure and Reactivity, Fourth Edition, 1993

電解質ってどんなもの

圧倒的に

水

酸性
塩基性

身の回りにふんだんにあるので、その特異な性質に気づかない

有機電解質、固体電解質、固体高分子電解質

反応するものであれば、何でも電池になる



燃料電池



リチウム空気電池



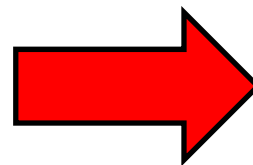
NaS電池



空気電池

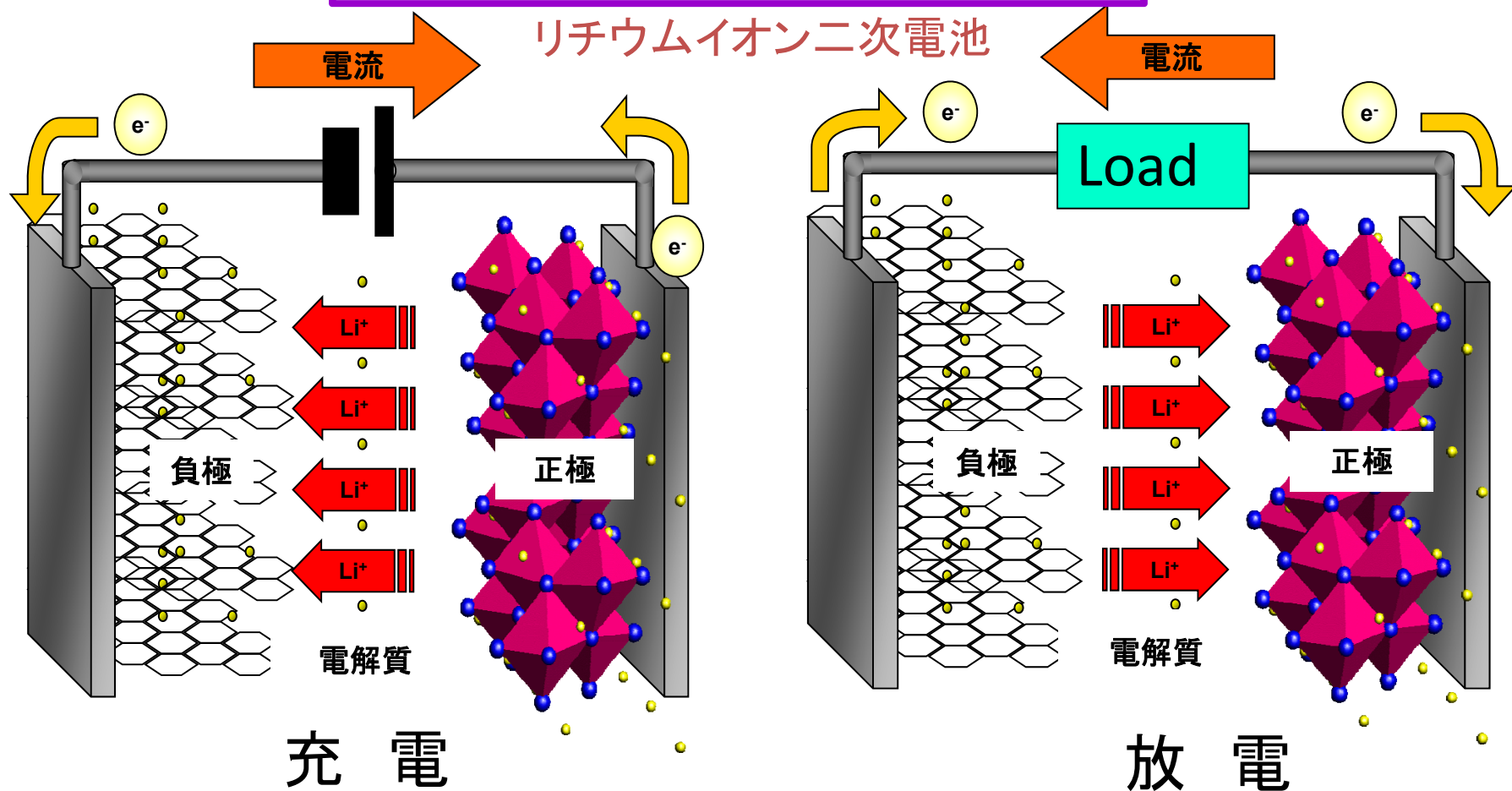


何でも電池になる
(物質を組み合わせると何でも発電する)



電池は実学
「実用」することが重要

電池反応は過酷



リチウムは、正極での化学結合を切断、
電解質を通り、負極で化学結合を形成

リチウムは、負極での化学結合を切断、
電解質を通り、正極で化学結合を形成

充電、放電は、化学結合の切断と形成の繰り返し、非常に過酷な反応

電池とは？

1. 何でも電池になる
2. 電池は理論的に完成
3. 電池は実学（実用性が重要）
4. 電池の化学反応は過酷
5. 電池の開発は材料の開発

実用性の条件

高い起電力、安定した出力

小さい内部抵抗

小型、軽量

安価

良好な保存性

安全性

二次電池では プラス

充電放電の繰り返し回数

この条件を満たすものはごく少数に限られる

100%満たすものは、現実には存在しない

電池の歴史

紀元前後 ホーヤットラップァ電池(バグダッド電池)

1800

1800 ボルタ電池(Volta)
1833 ファラデーの法則(Faraday)
1836 ダニエル電池(Daniel)
1837 燃料電池(Grove)

1859 鉛蓄電池(Planté)

1866 ル克蘭シェ乾電池(Leclancé)

1888 マンガン乾電池(Gassner)(1885 屋井先蔵)

1900

1899 ニッケルカドミウム電池(Jungner)

1950

1947 密閉型ニッケルカドミウム電池(Lange,Neumann)

1949 アルカリ乾電池生産(米国Ray-O-Vac社、1964日立マクセル)

1963 密閉型ニッケルカドミウム電池量産

1967 ナトリウム-硫黄電池の基本原理を発表(米フォード自動車)

1972 リチウム一次電池量産(松下(フッ化黒鉛型)、
1976三洋(二酸化マンガン型))

1974 レドックスフロー電池の基本原理を発表(NASA)

1990 ニッケル水素電池量産(松下、三洋)

1991 リチウムイオン二次電池実用化(ソニー)

2000

1999 リチウムポリマー電池

2002 ナトリウム-硫黄電池の販売を開始(東京電力・日本ガイシ)

2003 ナトリウム-硫黄電池の量産化

19世紀の電池

- 燃料電池
- マンガン乾電池
- アルカリ電池
- 鉛蓄電池
- ニッケルカドミウム電池
- ニッケル水素電池

実用性の条件

高い起電力、安定した出力

小さい内部抵抗

小型、軽量

安価

良好な保存性

安全性

二次電池では プラス

充電放電の繰り返し回数

この条件を満たすものはごく少数に限られる
100%満たすものは、現実には存在しない

我々が使っている電池は、19世紀の産物

これまで多くの電池が開発されたが、「実用」の壁を超える
ことができなかった。

電池の歴史

紀元前後 ホーヤットラップア電池(バグダッド電池)

1800

- 1800 ボルタ電池(Volta)
- 1833 ファラデーの法則(Faraday)
- 1836 ダニエル電池(Daniel)
- 1837 燃料電池(Grove)

1900

- 1859 鉛蓄電池(Planté)
- 1866 ル克蘭シェ乾電池(Leclancé)
- 1888 マンガン乾電池(Gassner)(1885 屋井先蔵)
- 1899 ニッケルカドミウム電池(Jungner)

1950

- 1947 密閉型ニッケルカドミウム電池(Lange,Neumann)
- 1949 アルカリ乾電池生産(米国Ray-O-Vac社、1964日立マクセル)
- 1963 密閉型ニッケルカドミウム電池量産
- 1967 ナトリウム-硫黄電池の基本原理を発表(米フォード自動車)
- 1972 リチウム一次電池量産(松下(フッ化黒鉛型)、
1976三洋(二酸化マンガン型))
- 1974 レドックスフロー電池の基本原理を発表(NASA)
- 1990 ニッケル水素電池量産(松下、三洋)
- 1991 リチウムイオン二次電池実用化(ソニー)

2000

- 1999 リチウムポリマー電池
- 2002 ナトリウム-硫黄電池の販売を開始(東京電力・日本ガイシ)
- 2003 ナトリウム-硫黄電池の量産化

19世紀の電池

- 燃料電池
- 乾電池
- アルカリ電池
- 鉛蓄電池
- ニッケル水素電池

20世紀の電池

- リチウム電池
- ナトリウム硫黄電池（まだ実用とは言えない）
- レドックスフロー電池（まだ実用とは言えない）

電池の種類は、何故こんなにも少数なのか？

- 「実用」の高いハードル
- 何でも電池になるが、「実用」になるのはごく少数

歴史に学べば、電池の開発は、すでにほとんどやりつくされているとも言える。新しい実用電池の開発に成功する確率は、高くはない。むしろ非常に低い。逆説的ではあるが、確率が低いので、リチウム二次電池がノーベル賞に値した。

電池の適材適所

各種蓄電池の性能比較表 ※

	リチウムイオン電池	ニッケル水素電池	鉛蓄電池	レドックスフロー電池	NAS電池
理論エネルギー密度 (Wh/kg)	360	275	167	103	780
実効エネルギー密度 (Wh/kg)	130	26.4	13.6	6.1	31.3
利用率 ※1 (実効値/理論値)	36%	10%	8%	6%	4%
セル回路電圧(V)	3.7	1.2	2.1	1.1	2.1
作動温度	常温	常温	常温	常温	高温保持 (280-350°C)
運用に必要な補機	なし	なし	なし	電解液循環ポンプ	ヒータ
セル電圧均等化機能の必要性	必須(BMS)	なし (リフレッシュ充電で対応可能)	なし (リフレッシュ充電で対応可能)	不要	なし (リフレッシュ充電で対応可能)
サイクル寿命	2000 (DOD80%) ※2	サイクル寿命不明	300 (DOD80%)	サイクル数に依存せず (セパレータに依存5年)	4000 (DOD80%)
運用に伴う損失	なし	リフレッシュ充放電	リフレッシュ充放電	電解液循環ポンプロス	ヒータロス
ハイレート特性 ※3	◎	○	○	○	△
電池コスト (kW単価)	20~30万円/kW	10万円/kW	3~5万円/kW	39万円/kW	20万円/kW
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・補機不要 ・メンテフリー ・高エネルギー密度 	<ul style="list-style-type: none"> ・補機不要 ・メンテフリー (密閉型) ・高エネルギー密度 	安全性、コスト、実績等の点から現状では最も実用化に供されている	電解液容量により大容量化が可能	<ul style="list-style-type: none"> ・高エネルギー密度 ・コンパクト ・密閉型

※内野栄吉、図解入門よくわかる最新電気設備の基本と仕組み、2019年3月20日 第1版第5刷、p.61

	リチウムイオン電池
理論エネルギー密度 (Wh/kg)	360
実効エネルギー密度 (Wh/kg)	130
利用率 ※1 (実効値/理論値)	36%
セル回路電圧(V)	3.7
作動温度	常温
安全性	発火の危険
セル電圧均等化機能の必要性	必須(BMS)
サイクル寿命	2000 (DOD80%) ※2
運用に伴う損失	なし
ハイレート特性 ※3	◎
電池コスト	20~30万円/kWh × 2

比較

>

>

=

<

≈

>

>

<

<

	鉛蓄電池
理論エネルギー密度 (Wh/kg)	167
実効エネルギー密度 (Wh/kg)	13.6
利用率 ※1 (実効値/理論値)	8%
セル回路電圧(V)	2.1
作動温度	常温
安全性	安全
セル電圧均等化機能の必要性	なし (リフレッシュ充電で対応可能)
サイクル寿命	300 (DOD80%)
運用に伴う損失	リフレッシュ充放電
ハイレート特性 ※3	○
電池コスト	3~5万円/kWh

リサイクル

リサイクル方法確立せず
販売価格の1~1.2倍

ほぼ100%リサイクル
販売価格に上乗せ 約10%

鉛蓄電池の新技術

Taichi Iwai, Daishi Kitajima, Shigeomi Takai, Takeshi Yabutsuka, Takeshi Yao:
"α-PbO₂ formation on the cathode of Lead Acid Battery due to the Local Cell Reaction", Journal of Electrochemical Society, Vol.163, pp.3087-3090 (2016)

Taichi Iwai , Masakazu Murakami , Shigeomi Takai , Takeshi Yabutsuka ,
Takeshi Yao: "Chemical transformation of PbO₂ due to local cell reaction on
the cathode of lead acid battery", Journal of Alloys and Compounds, Vol.780,
No.5 pp. 85-89 (2019)

八尾 健、岡野 寛、高井 茂臣、岩井 太一 「高機能鉛蓄電池の開発」、
電気評論、 2019年11月 pp.27-31

八尾 健、岡野 寛、岩井 太一、高井 茂臣、薮塚 武史、細川 敏弘、三崎 伸、
栗原 健太:「鉛蓄電池用正極及びそれを用いた鉛蓄電池」,
PCT/JP2018/005947

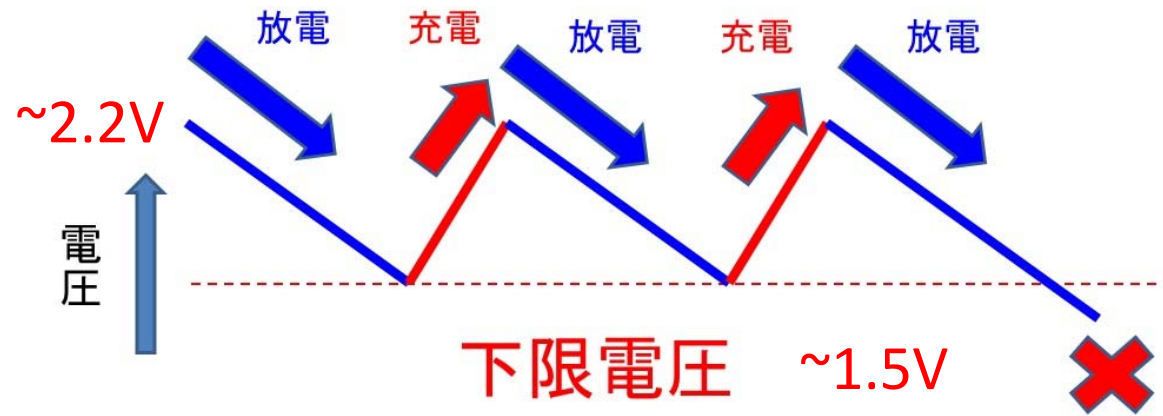
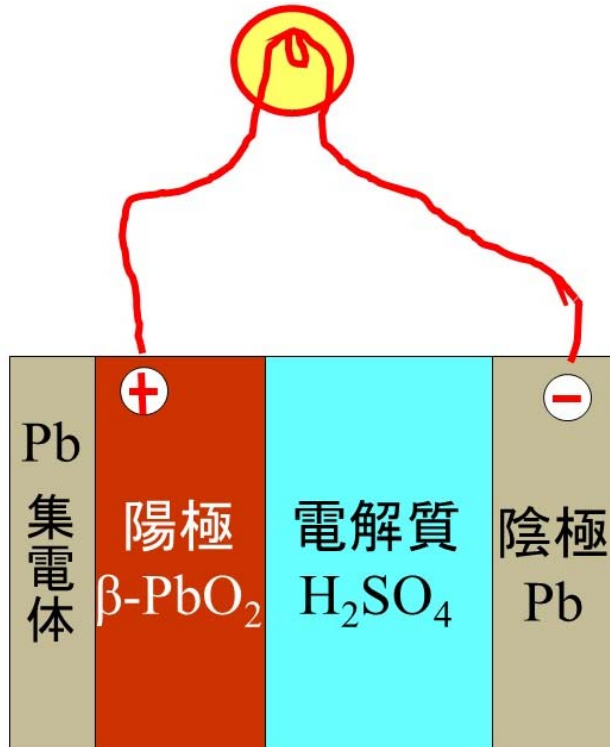
鉛蓄電池



- ・安定した品質と経済性を持ち、日本での二次電池生産額の3割近くを占める
- ・自動車のバッテリーとしての用途
- ・電力貯蔵用のための研究が活発

鉛蓄電池最大の弱点

鉛蓄電池の構造

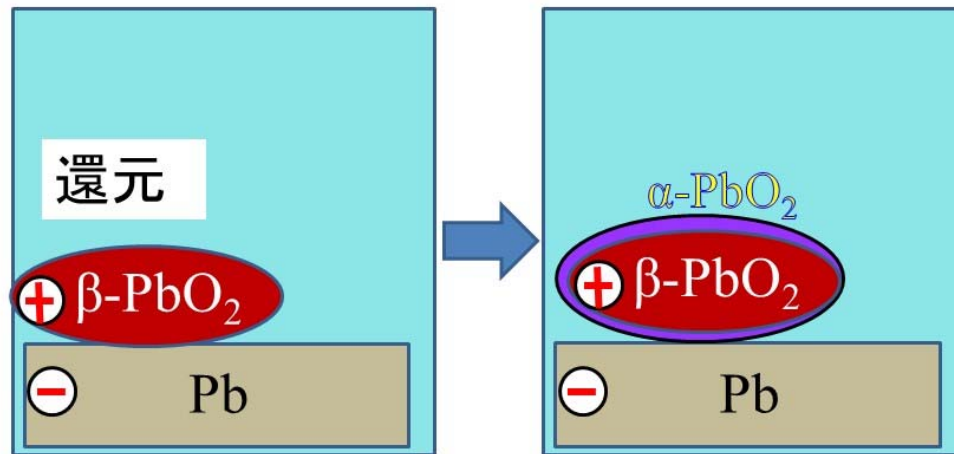


鉛蓄電池は、大きく放電する(使いすぎる)と、充電ができなくなる(使えなくなる)。そのため、少し使っては充電、少し使っては充電、という使い方になる。間違っても、使いすぎてはいけない。車でも、走行中常に充電している。

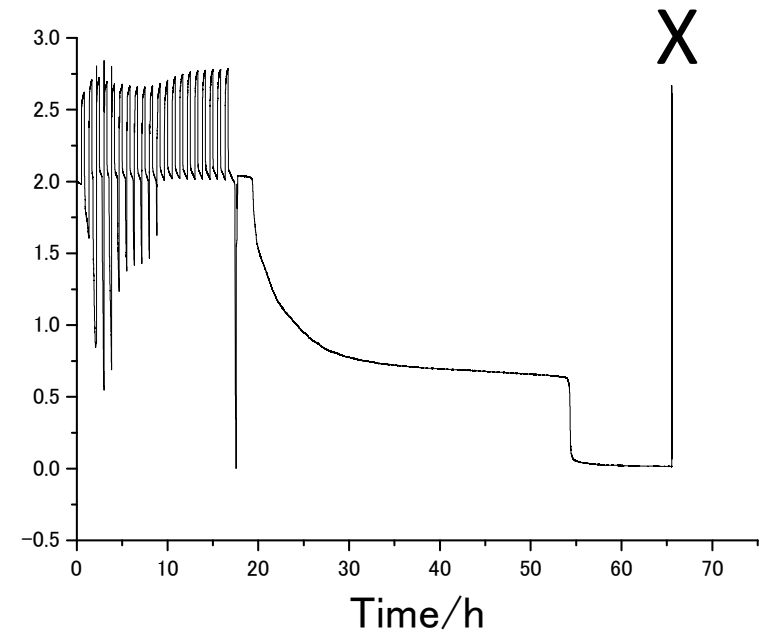
**充電不可
使用不可**

鉛正極集電体

陽極における局部電池反応(鉛)



定常状態設定後、0Vまで深く放電、その後回路開放、その後サイクルを再開

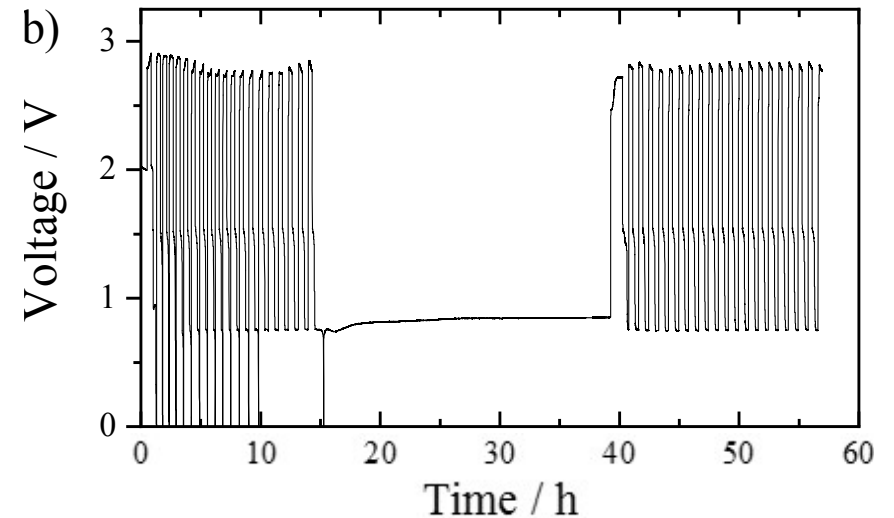
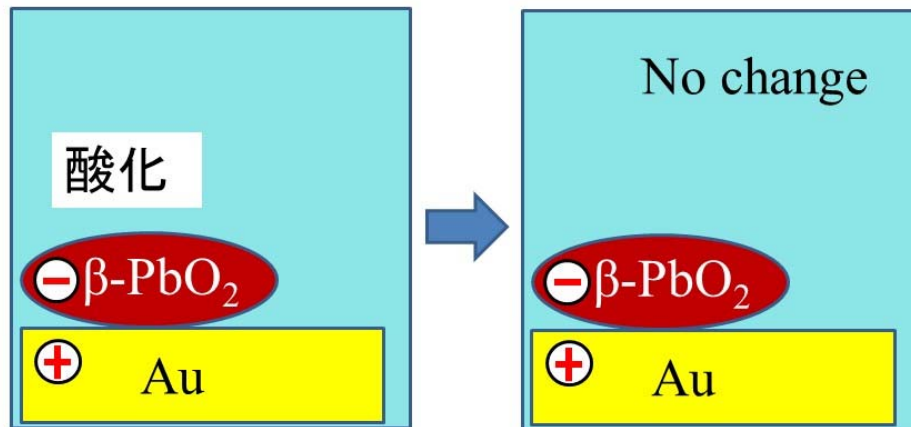


サイクル再開出来ず

金正極集電体

定常状態設定後、0Vまで深く放電、その後回路開放、その後サイクルを再開

陽極における局部電池反応(金)



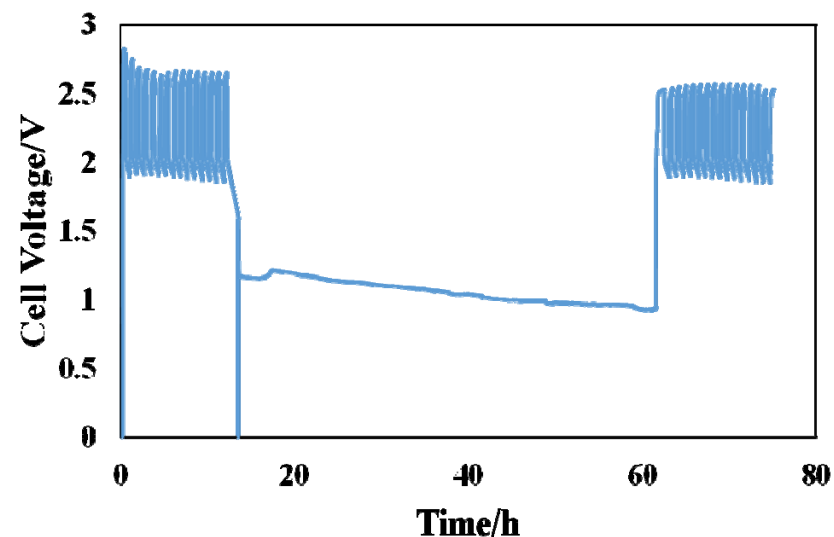
サイクル再開

金は高価。実用化するためにコストを下げることができないか

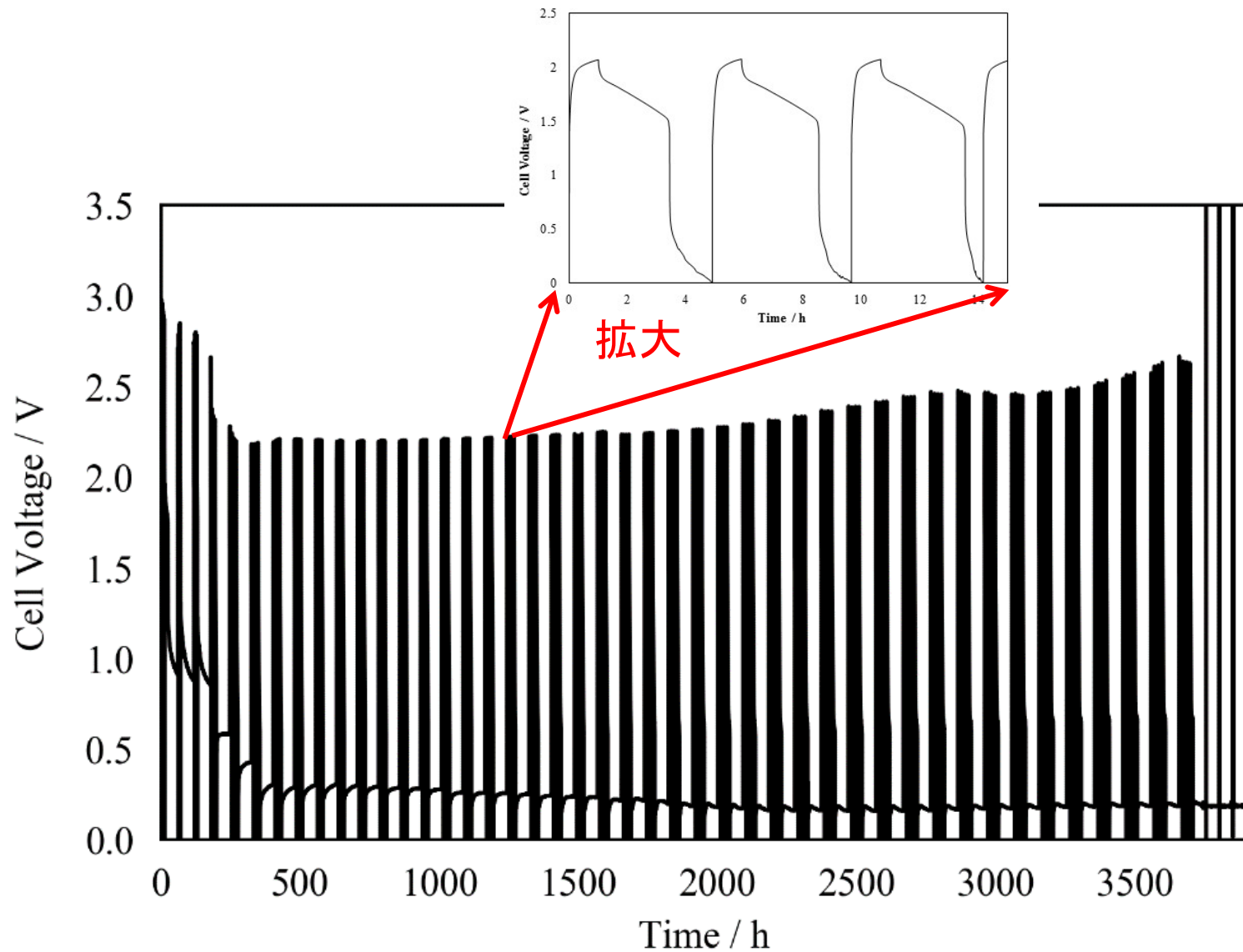
グラファイト正極集電体



定常状態設定後、0Vまで深く放電、その後回路開放、その後サイクルを再開



サイクル再開



耐久試験: [(2 Vまで充電→0 Vまで放電) × 4サイクル → 0 Vまでの放電 → 開回路48時間放置] の繰り返し

新型鉛蓄電池とは、

構造は、

従来の鉛蓄電池とほとんど変わらない

鉛蓄電池の長所を維持

- ほぼ同じ製造工程
- ほぼ同じ製造コスト、安価
- ほぼ同じリサイクル工程、高いリサイクル性
- 発火の危険はなく、安全性が高い

性能は、

鉛蓄電池の短所を革新的に克服

- 過放電で劣化しない、0Vまで使い切ることができる、高電気容量
- 2Vと0Vの間で何度でも充放電が可能、使用管理が容易、用途拡大
- 長期間放置しても、充放電を再開する、再使用が容易
(4か月放置後でも、再充電・再使用が可能なことを確認している)
- サイクル寿命が大幅に増大、使用期間が大幅に増加、買い替え不必要、使い続けることができる、長寿命化、使用コストの大幅な低下
再使用が容易

用途は、

- 自動車用バッテリー
- オフグリッド太陽光発電システムの充電
- スマートグリッドの蓄電池
- EVの駆動用バッテリーの可能性もある

	リチウムイオン電池
理論エネルギー密度 (Wh/kg)	360
実効エネルギー密度 (Wh/kg)	130
利用率 ※1 (実効値/理論値)	36%
セル回路電圧(V)	3.7
作動温度	常温
安全性	発火の危険
セル電圧均等化機能の必要性	必須(BMS)
サイクル寿命	2000 (DOD80%) ※2
運用に伴う損失	なし
ハイレート特性 ※3	◎
電池コスト	20~30万円/kWh × 2

比較

>

× ≈

=

<

× <

× <

× =

<

<

	新 鉛蓄電池
	167
	13.6 × 4
	8% × 4
	2.1
	常温
	安全
	なし (リチウムイオン充電に対応可能)
	<u>300 × 20</u> <u>(DOD80%)</u>
	なし リチウムイオン充放電
	○
	3~5万円/kWh

リサイクル

リサイクル方法確立せず
販売価格の1~1.2倍

ほぼ100%リサイクル
販売価格に上乗せ 約10%

電池の適材適所

—電池は再エネの変動性を補償しうるのか？—

1. 学校で教えない電池の原理

2. 電池の反応は過酷

3. 電池の歴史

4. 電池の適材適所

5. まとめ

- 電池は適材適所、理論を知って正しく理解
- 人気で判断せず、客観的に、視野を広く比較検討
- 地に足がついた研究開発が重要、夢ではなく現実を語ろう

A scenic landscape featuring a winding blue river through a lush green field, with a dense forest in the background. The river flows from the bottom left towards the center, surrounded by vibrant green vegetation. The background is a thick, dark green forest covering a hillside.

ご清聴ありがとうございました