

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号
特開2022-157141
(P2022-157141A)

(43)公開日 令和4年10月14日(2022.10.14)

(51)Int.Cl.		F I				テーマコード(参考)
G 0 6 F	30/20	(2020.01)	G 0 6 F	30/20		5 B 1 4 6
H 0 1 M	10/48	(2006.01)	H 0 1 M	10/48	3 0 1	5 H 0 2 9
H 0 1 M	10/0562	(2010.01)	H 0 1 M	10/0562		5 H 0 3 0
H 0 1 M	10/052	(2010.01)	H 0 1 M	10/052		5 H 0 5 0
H 0 1 M	4/40	(2006.01)	H 0 1 M	4/40		

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 26 頁) 最終頁に続く

(21)出願番号	特願2021-61201(P2021-61201)	(71)出願人	507151526
(22)出願日	令和3年3月31日(2021.3.31)		株式会社G Sユアサ
			京都府京都市南区吉祥院西ノ庄猪之馬場町 1 番地
		(74)代理人	100114557
			弁理士 河野 英仁
		(74)代理人	100078868
			弁理士 河野 登夫
		(72)発明者	岡部 洋輔
			京都府京都市南区吉祥院西ノ庄猪之馬場町 1 番地 株式会社G Sユアサ内
		(72)発明者	村上 元信
			京都府京都市南区吉祥院西ノ庄猪之馬場町 1 番地 株式会社G Sユアサ内

最終頁に続く

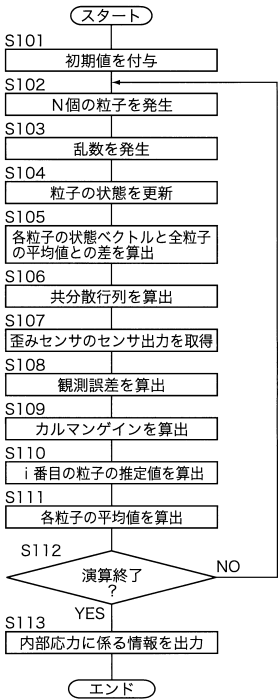
(54)【発明の名称】推定装置及び推定方法

(57)【要約】

【課題】推定装置及び推定方法の提供。

【解決手段】蓄電素子に発生する歪みに係るデータを取得する取得部と、蓄電素子の内部の力学的状態を表すシミュレーションモデルを用いて、取得部が取得したデータに基づき、蓄電素子の内部応力を推定する推定部とを備える。

【選択図】図 5



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

蓄電素子に発生する歪みに係るデータを取得する取得部と、
前記蓄電素子の内部の力学的状態を表すシミュレーションモデルを用いて、前記取得部が
取得したデータに基づき、前記蓄電素子の内部応力を推定する推定部と
を備える推定装置。

【請求項 2】

前記シミュレーションモデルは、前記蓄電素子の固有歪みと、前記蓄電素子に対する拘束
力とをパラメータに含み、前記歪みに係るデータの入力に応じて、前記蓄電素子の内部応
力に係るデータを出力するよう構成される

10

請求項 1 に記載の推定装置。

【請求項 3】

前記固有歪みは、活物質粒子の孤立化、析出物の成長、及び熱膨張の少なくとも 1 つに起
因して生じる前記蓄電素子の歪みである

請求項 2 に記載の推定装置。

【請求項 4】

前記推定部は、非線形フィルタを用いた状態推定器を備える

請求項 1 から請求項 3 の何れか 1 つに記載の推定装置。

【請求項 5】

前記推定部は、前記蓄電素子の内部抵抗を前記内部応力の関数として推定する

20

請求項 1 から請求項 4 の何れか 1 つに記載の推定装置。

【請求項 6】

前記蓄電素子は、電解質が固体である全固体電池である

請求項 1 から請求項 5 の何れか 1 つに記載の推定装置。

【請求項 7】

前記蓄電素子は、負極に金属リチウムを用いた電池である

請求項 1 から請求項 6 の何れか 1 つに記載の推定装置。

【請求項 8】

蓄電素子に発生する歪みに係るデータを取得し、

前記蓄電素子の内部の力学的状態を表すシミュレーションモデルを用いて、取得したデー
タに基づき、前記蓄電素子の内部応力を推定する

30

処理をコンピュータによって実行する推定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、推定装置及び推定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、リチウムイオン電池などの蓄電素子は、ノート型パーソナルコンピュータ、スマー
トフォンなどの携帯端末の電源、再生可能エネルギー蓄電システム、I o T デバイス電源な
ど、幅広い分野において使用されている。

40

【0003】

リチウムイオン電池の開発は高容量、高エネルギー密度化を目指して進められており、新規
の電極材料の探索が進められている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】 特開 2016-207318 号公報

【特許文献 2】 特開 2019-091615 号公報

【発明の概要】

50

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

多くの場合、高容量、高エネルギー密度を達成できる電極材料は、充放電や劣化にともない、体積膨張をすることが知られている（例えば、特許文献1、2を参照）。通常、電極は何らかの筐体内に置かれ、力学的な拘束を受けている。そのため、体積膨張によって電池の内部応力が発生する。

【0006】

内部応力は、電池の内部抵抗や、反応生成物の析出などの電池の特性に影響を及ぼすことが知られている。しかし、内部応力と電池の特性を関連付けて電池の性能評価や状態監視をおこなう方法については、提案されていない。

10

【0007】

本発明は、斯かる事情に鑑みてなされたものであり、電池内部の挙動の1つとして電池内部に発生する内部応力を推定する推定装置及び推定方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

推定装置は、蓄電素子に発生する歪みに係るデータを取得する取得部と、前記蓄電素子の内部の力学的状態を表すシミュレーションモデルを用いて、前記取得部が取得したデータに基づき、前記蓄電素子の内部応力を推定する推定部とを備える。

【0009】

推定方法は、蓄電素子に発生する歪みに係るデータを取得し、前記蓄電素子の内部の力学的状態を表すシミュレーションモデルを用いて、前記取得部が取得したデータに基づき、前記蓄電素子の内部応力を推定する処理をコンピュータによって実行する。

20

【発明の効果】

【0010】

上記構成によれば、電池内部の挙動の1つとして電池内部に発生する内部応力を推定できる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】実施の形態1に係る推定システムの全体構成を示す模式図である。

【図2】蓄電素子の構成を説明する説明図である。

30

【図3】固体電解質層の内部構成を説明する説明図である。

【図4】推定装置の内部構成を示すブロック図である。

【図5】実施の形態1における内部応力の推定手順を説明するフローチャートである。

【図6】蓄電素子の内部応力とオーム抵抗との関係を示すグラフである。

【図7】等価回路モデルの一例を示す回路図である。

【発明を実施するための形態】

【0012】

推定装置は、蓄電素子に発生する歪みに係るデータを取得する取得部と、前記蓄電素子の内部の力学的状態を表すシミュレーションモデルを用いて、前記取得部が取得したデータに基づき、前記蓄電素子の内部応力を推定する推定部とを備える。

40

歪みに係るデータは、歪みセンサによる計測データであってもよい。

この構成によれば、蓄電素子に発生する歪みのデータから、直接的に観測し得ない蓄電素子の内部応力をシミュレーションによって推定できる。

【0013】

推定装置において、前記シミュレーションモデルは、前記蓄電素子の固有歪みと、前記蓄電素子に対する拘束力とをパラメータに含み、前記歪みに係るデータの入力に応じて、前記蓄電素子の内部応力に係るデータを出力するよう構成されてもよい。この構成によれば、例えば、蓄電素子に対する拘束力、蓄電素子の固有歪み、及び蓄電素子の内部応力に基づき、力のつり合いを考慮することによって、蓄電素子の内部応力を推定できる。

【0014】

50

推定装置において、前記固有歪みは、活物質粒子の孤立化、析出物の成長、及び熱膨張の少なくとも1つに起因して生じる前記蓄電素子の歪みであってもよい。この構成によれば、活物質粒子の孤立化、析出物の成長、及び熱膨張の少なくとも1つに起因した蓄電素子の固有歪みを考慮して、蓄電素子の内部応力を推定できる。

【0015】

推定装置において、前記推定部は、非線形フィルタを用いた状態推定器を備えてもよい。この構成によれば、アンサンブルカルマンフィルタ、粒子フィルタ、拡張カルマンフィルタ、無香料カルマンフィルタなどの非線形フィルタを用いるので、固有歪みと内部応力との間に線形性を仮定しない場合であっても、蓄電素子の内部応力を良好に推定できる。

【0016】

推定装置において、前記推定部は、前記蓄電素子の内部抵抗を前記内部応力の関数として推定してもよい。この構成によれば、内部応力の値を基に蓄電素子の内部抵抗を推定でき、内部応力を反映した蓄電素子の電気化学現象を推定できる。

【0017】

推定装置において、前記蓄電素子は、電解質が固体である全固体電池であってもよい。この構成によれば、全固体電池の性能に決定的な影響を及ぼす内部応力の値を推定できる。

【0018】

推定装置において、記蓄電素子は、負極に金属リチウムを用いた電池であってもよい。この構成によれば、析出物が生成されやすい電池について、析出物の成長に起因した内部応力を推定できる。

ここで、正極材料や電解質の種類は問わない。蓄電素子は、負極に金属リチウムを用いた全固体電池であってもよいし、代替的に、正極に硫黄を用いたリチウム硫黄電池（LiS電池）であってもよい。全固体電池や、負極に金属リチウムを用いた電池でなくとも、充放電や劣化にともない電極の体積膨張が生じる蓄電素子において、同様の論理が成立する。

【0019】

推定方法は、蓄電素子に発生する歪みに係るデータを取得し、前記蓄電素子の内部の力学的状態を表すシミュレーションモデルを用いて、前記取得部が取得したデータに基づき、前記蓄電素子の内部応力を推定する処理をコンピュータによって実行する。

この構成によれば、蓄電素子に発生する歪みのデータから、直接的に観測し得ない蓄電素子の内部応力を推定できる。

【0020】

以下、本発明をその実施の形態を示す図面に基づいて具体的に説明する。

（実施の形態1）

図1は実施の形態1に係る推定システムの全体構成を示す模式図である。実施の形態1に係る推定システムは、推定装置1及び蓄電素子2を備える。推定装置1は、例えば、BMU（Battery Management Unit）などの装置であり、後述する手法にて蓄電素子2の内部応力を推定し、推定した内部応力に係る情報を出力する。図1の例では、便宜的に推定装置1と蓄電素子2とを別体として記載したが、推定装置1と蓄電素子2とが一体となった構成であってもよい。更に、推定装置1は、蓄電素子2を含むバッテリーシステムと通信可能に接続されるコンピュータ、サーバ装置などの情報処理装置であってもよい。推定装置1は蓄電素子2に近接している必要はなく、別の建屋のサーバ室に設置されてもよいし、国内あるいは国外の遠隔地に設置されてもよい。さらには、蓄電素子2が大気圏や宇宙空間にあって推定装置1が地球上に存在してもよいし、蓄電素子2及び推定装置1の両方が大気圏や宇宙空間にあってよい。

【0021】

実施の形態における蓄電素子2は、例えば全固体電池である。放電時には、蓄電素子2は負荷7に接続される。蓄電素子2は、接続された負荷7に対して直流電力を供給する。充電時には、蓄電素子2は充電装置（不図示）に接続される。蓄電素子2は、接続された充電装置から供給される電力によって蓄電する。なお、蓄電素子2は全固体電池に限定され

ず、電極の膨張がおこる電池であればよい。

【0022】

推定システムは、蓄電素子2の状態を計測する各種センサを備える。推定システムが備えるセンサの一例は、歪みセンサS1である。歪みセンサS1は、蓄電素子2に発生する歪みを時系列的に計測し、計測結果を示すデータを推定装置1へ出力する。

【0023】

推定システムは、蓄電素子2の温度を計測する温度センサS2を備えてもよい。温度センサS2は、蓄電素子2の温度を時系列的に計測し、計測結果を示すデータを推定装置1へ出力する。更に、推定システムは、蓄電素子2の環境温度を推定する温度センサS3を備えてもよい。温度センサS3は、蓄電素子2が設置されている周囲環境の温度を計測し、計測結果を示すデータを推定装置1へ出力する。

10

【0024】

推定システムは、蓄電素子2に流れる電流を計測する電流計S4を備えてもよい。電流計S4は、蓄電素子2に流れる電流を時系列的に計測し、計測結果を示すデータを推定装置1へ出力する。推定装置システムは、更に、蓄電素子2の電圧を計測する電圧計S5を備えてもよい。電圧計S5は、蓄電素子2の電圧を時系列的に計測し、計測結果を示すデータを推定装置1へ出力する。

【0025】

推定装置1は、各種センサによって計測された計測データを取得し、取得した計測データに基づき、蓄電素子2の内部応力を推定する。

20

【0026】

以下、蓄電素子2の構成について説明する。

図2は蓄電素子2の構成を説明する説明図である。蓄電素子2は、例えば、正極集電体層21、正極活物質層22、固体電解質層23、負極活物質層24、及び負極集電体層25からなる積層体を含む全固体電池である。

【0027】

正極集電体層21は、金属箔、金属メッシュ等により構成される。正極集電体層21を構成する金属は、アルミニウム、ニッケル、チタン、ステンレス鋼等の良好な導電性を有する金属である。正極集電体層21の表面には、接触抵抗を調整するためのコート層が形成されていてもよい。コート層の一例は炭素コートである。正極集電体層21の厚みは特に限定されるものではなく、例えば0.1 μm 以上1 mm以下である。

30

【0028】

正極活物質層22は、少なくとも正極活物質を含む層である。正極活物質層22は、正極活物質の他に、固体電解質、導電助剤、及びバインダなどを含んでもよい。正極活物質層22は、例えば0.1 μm 以上1 mm以下の厚みを有する。

【0029】

正極活物質には、全固体電池に使用できる適宜の正極活物質が用いられる。例えば、コバルト酸リチウム、ニッケル酸リチウム、マンガン酸リチウム、スピネル系リチウム化合物等の各種のリチウム含有複合酸化物が、正極活物質として用いられる。正極活物質は、例えば、平均粒径(D50)が0.5 μm 以上20 μm 以下の粒子である。正極活物質を構成する粒子は、一次粒子であってもよく、二次粒子であってもよい。正極活物質は、粒子に限らず、薄膜状であってもよい。正極活物質層22に含まれる固体電解質には、イオン伝導度が比較的高く、耐熱性に優れた無機固体電解質が用いられる。このような無機固体電解質として、ランタンジルコン酸リチウム等の酸化物固体電解質や $\text{Li}_2\text{S}-\text{P}_2\text{S}_5$ 等の硫化物固体電解質を使用できる。導電助剤には、アセチレンブラックやケッチェンブラック等の炭素材料やニッケル、アルミニウム、ステンレス鋼等の金属材料が用いられる。バインダには、ブタジエンゴム(BR)、アクリレートブタジエンゴム(ABR)、ポリフッ化ビニリデン(PVdF)等の材料が用いられる。

40

【0030】

固体電解質層23は、少なくとも固体電解質を含む層である。固体電解質層23は、固体

50

電解質の他に、バインダなどを含んでもよい。固体電解質層 2 3 は、例えば $0.1 \mu\text{m}$ 以上 1mm 以下の厚みを有する。固体電解質層 2 3 に含まれる固体電解質には、上述した酸化物固体電解質や硫化物固体電解質などの無機固体電解質が用いられる。バインダには、正極活物質層 2 2 に用いられるバインダと同様のものが用いられる。

【0031】

負極活物質層 2 4 は、少なくとも負極活物質を含む層である。負極活物質層 2 4 は、負極活物質の他に、固体電解質、導電助剤、及びバインダなどを含んでもよい。負極活物質層 2 4 は、例えば $0.1 \mu\text{m}$ 以上 1mm 以下の厚みを有する。

【0032】

負極活物質には、全固体電池に使用できる適宜の負極活物質が用いられる。例えば、金属活物質及びカーボン活物質が負極活物質として用いられる。金属活物質としては、Li、In、Al、Si、Sn等を挙げることができる。金属活物質は、金属単体に限らず、金属複合酸化物であってもよい。カーボン活物質としては、例えば、メソカーボンマイクロビーズ(MCMB)、高配向性グラファイト(HOPG)、ハードカーボン、ソフトカーボン等を挙げることができる。負極活物質は、例えば、平均粒径(D50)が $0.5 \mu\text{m}$ 以上 $20 \mu\text{m}$ 以下の粒子である。負極活物質を構成する粒子は、一次粒子であってもよく、二次粒子であってもよい。負極活物質は、粒子に限らず、薄膜状であってもよい。負極活物質層 2 4 に用いられる固体電解質、導電助剤、及びバインダには、正極活物質層 2 2 に用いられる固体電解質、導電助剤、及びバインダと同様のものが適宜用いられる。

【0033】

負極集電体層 2 5 は、金属箔、金属メッシュ等により構成される。負極集電体層 2 5 を構成する金属は、銅、ニッケル、チタン、ステンレス鋼等の良好な導電性を有する金属である。負極集電体層 2 5 の表面には、接触抵抗を調整するためのコート層が形成されていてもよい。コート層の一例は炭素コートである。負極集電体層 2 5 の厚みは特に限定されるものではなく、例えば $0.1 \mu\text{m}$ 以上 1mm 以下である。

【0034】

蓄電素子 2 は、拘束部材 3 によって拘束される。拘束部材 3 は、例えば、蓄電素子 2 を収容するケース 3 1 と、ケース 3 1 内に圧縮された状態にて配置される弾性部材 3 2 とを備える。ケース 3 1 は、例えば直方体状の容器であり、底面部 3 1 1 と側面部 3 1 2 とにより構成されるケース本体 3 1 0 と、ケース本体 3 1 0 の開口を閉塞する蓋体 3 1 3 とを備える。ケース本体 3 1 0 (底面部 3 1 1 及び側面部 3 1 2) 並びに蓋体 3 1 3 は、例えば、ステンレス鋼、アルミニウム、アルミニウム合金など溶接可能な金属によって形成される。代替的に、ケース本体 3 1 0 (底面部 3 1 1 及び側面部 3 1 2) 並びに蓋体 3 1 3 は、樹脂によって形成されてもよい。ケース本体 3 1 0 は、蓄電素子 2 が収容された後、蓋体 3 1 3 によって密閉される。

【0035】

弾性部材 3 2 は、蓄電素子 2 の最下層(図 2 の例では正極集電体層 2 1)と底面部 3 1 1 との間、及び、蓄電素子 2 の最上層(図 2 の例では負極集電体層 2 5)と蓋体 3 1 3 との間に、圧縮された状態にて配置される。弾性部材 3 2 は例えばゴム状のシートである。弾性部材 3 2 は、その弾性力によって、蓄電素子 2 に積層方向(図の上下方向)の拘束力を付与する。

【0036】

図 2 の例では、ケース 3 1 の内部に弾性部材 3 2 を配置することによって、蓄電素子 2 に対して拘束力を付与する構成とした。代替的に、ケース 3 1 内に高压の流体を充填することによって蓄電素子 2 に拘束力を付与してもよい。この場合、流体としては、電池材料に対して不要な反応を生じさせないものが好ましい。例えば、窒素等の不活性ガスや乾燥空気等が用いられる。代替的に、蓄電素子 2 を積層方向の両側から板部材によって挟み込み、蓄電素子 2 に拘束力が付与された状態にて板部材同士を連結することによって、蓄電素子 2 に拘束力を付与する構成としてもよい。

【0037】

10

20

30

40

50

蓄電素子 2 の歪みを計測する歪みセンサ S 1 は、蓄電素子 2 の内部応力に応じて生じる歪みを計測し得る場所に取り付けられる。図 2 の例では、蓄電素子 2 の内部応力に応じた歪みはケース 3 1 の側面部 3 1 2 に現れるので、歪みを計測する歪みセンサ S 1 は、この側面部 3 1 2 の適宜箇所に取り付けられることが好ましい。代替的に、歪みセンサ S 1 は、ケース 3 1 の底面部 3 1 1 又は蓋体 3 1 3 に取り付けられてもよい。更に、歪みセンサ S 1 は、蓄電素子 2 に取り付けられてもよい。

【0038】

図 3 は固体電解質層 2 3 の内部構成を説明する説明図である。図 3 の例では、活物質粒子をハッチングを付した球として示し、固体電解質をハッチングを付していない球として示している。簡略化のために、図 3 では、導電助剤及びバインダを省略している。従来の電解液系リチウムイオン電池では、活物質粒子の周囲が電解液によって満たされており、活物質の全表面が電解液と接触した状態にある。これに対し、固体電解質を用いた全固体電池では、図中の黒丸によって示しているように、固体電解質と活物質粒子とが微小な接触面積（点）で接触した状態にある。固体電解質と活物質粒子との接触面積は、蓄電素子を拘束する拘束力や内部応力によって変化する。

【0039】

全固体電池では、拘束力や内部応力に応じて固体電解質及び活物質粒子の接触面積が変化し、これに伴って電池特性は大きく変化する。全固体電池の電池特性（充放電特性など）を正確に推定するためには、内部応力の推定が不可欠である。負極に金属リチウムを用いた電池では、内部応力によって析出物の生成速度が変化するもので、内部応力の推定が不可欠である。

【0040】

以下、推定装置 1 の構成について説明する。

図 4 は推定装置 1 の内部構成を示すブロック図である。推定装置 1 は、例えば、演算部（推定部）1 1、記憶部 1 2、入力部 1 3、及び出力部 1 4 を備える。

【0041】

演算部 1 1 は、CPU (Central Processing Unit)、ROM (Read Only Memory)、RAM (Random Access Memory) などを備える演算回路である。演算部 1 1 が備える CPU は、ROM や記憶部 1 2 に格納された各種コンピュータプログラムを実行し、上述したハードウェア各部の動作を制御することによって、装置全体を、蓄電素子 2 の内部応力を推定するための状態推定器（オブザーバともいう）として機能させる。具体的には、演算部 1 1 は、蓄電素子 2 の内部の力学的状態をシミュレートするシミュレーションモデル MD 1 を用いて、入力部 1 3 を通じて入力される歪みの計測データに基づき、蓄電素子 2 の内部応力を推定するための演算を実行する。代替的に、演算部 1 1 は、ユーザの手により作成される歪みの仮想的なデータを用いて、蓄電素子 2 の内部応力を推定するための演算を実行してよい。演算部 1 1 は、推定装置 1 又は外部のコンピュータにより生成される歪みの仮想的なデータを用いて、蓄電素子 2 の内部応力を推定するための演算を実行してもよい。

【0042】

代替的に、演算部 1 1 は、複数の CPU、マルチコア CPU、GPU (Graphics Processing Unit)、マイコン、揮発性または不揮発性のメモリ等を備える任意の処理回路または演算回路であってもよい。また、演算部 1 1 は、計測開始指示を与えてから計測終了指示を与えるまでの経過時間を計測するタイマ、数をカウントするカウンタ、日時情報を出力するクロック等の機能を備えてもよい。

【0043】

記憶部 1 2 は、フラッシュメモリ、ハードディスクなどの記憶装置を備える。記憶部 1 2 には、各種のコンピュータプログラム及びデータが記憶される。記憶部 1 2 に記憶されるコンピュータプログラムは、シミュレーションモデル MD 1 を用いて、蓄電素子 2 の内部応力を推定する処理をコンピュータに実行させるための推定プログラム PG 1 を含む。シミュレーションモデル MD 1 は、推定プログラム PG 1 の中において記述されてもよい。

記憶部12に記憶されるデータには、シミュレーションモデルMD1において用いられるパラメータ、推定プログラムPG1において用いられるパラメータ、演算部11によって生成されるデータなどが含まれる。

【0044】

推定プログラムPG1は、MATLAB（登録商標）、Amesim（登録商標）、Tin Builder（登録商標）、MATLAB&Simulink（登録商標）、Simplorer（登録商標）、ANSYS（登録商標）、Abaqus（登録商標）、Modelica（登録商標）、VHDL-AMS（登録商標）、C言語、C++、Java（登録商標）などの市販の数値解析ソフトウェア又はプログラミング言語によって記述されてもよい。数値解析ソフトウェアは、1D-CAEと称される回路シミュレータであってもよく、3D形状で行う有限要素法や有限体積法などのシミュレータであってもよい。代替的に、これらに基づいた縮退モデル（ROM：Reduced-Order Model）を用いてもよい。

10

【0045】

推定プログラムPG1を含むコンピュータプログラムは、当該コンピュータプログラムを読み取り可能に記録した非一時的な記録媒体Mにより提供される。記録媒体Mは、CD-ROM、USBメモリ、SD（Secure Digital）カードなどの可搬型メモリである。演算部11は、図に示していない読取装置を用いて、記録媒体Mから所望のコンピュータプログラムを読み取り、読み取ったコンピュータプログラムを記憶部12に記憶させる。代替的に、上記コンピュータプログラムは通信により提供されてもよい。

20

【0046】

入力部13は、各種センサを接続するためのインタフェースを備える。入力部13には、蓄電素子2に発生する歪みを計測する歪みセンサS1が接続される。演算部11は、入力部13を通じて、歪みセンサS1によって計測される歪みの計測データを取得する。

【0047】

入力部13には、蓄電素子2の温度を計測する温度センサS2、蓄電素子2の環境温度を計測する温度センサS3などが接続されてもよい。温度センサS2は、蓄電素子2又は蓄電素子2を収容するケース31の適宜箇所に設けられ、蓄電素子2の温度を計測するセンサである。温度センサS3は、蓄電素子2の周囲に設けられ、蓄電素子2の周囲の温度（環境温度）を計測するセンサである。温度センサS2、S3には、熱電対、サーミスタなどの既存のセンサが用いられる。演算部11は、気象サーバなどの外部サーバから環境温度のデータを取得してもよい。

30

【0048】

入力部13には、蓄電素子2に流れる電流を計測する電流計S4、蓄電素子2の電圧を計測する電圧計S5が接続されてもよい。

【0049】

出力部14は、外部装置を接続する接続インタフェースを備える。出力部14に接続される外部装置は、液晶ディスプレイなどを備える表示装置140である。この場合、演算部11は、推定した蓄電素子2の内部応力に係る情報を出力部14から出力することによって、当該情報を表示装置140に表示させる。代替的に、推定装置1は、表示装置140を備えるものであってもよい。

40

【0050】

更に、出力部14は、外部装置と通信するための通信インタフェースを備えてもよい。出力部14に通信可能に接続される外部装置は、蓄電素子2の状態を監視する監視サーバである。代替的に、出力部14に通信可能に接続される外部装置は、蓄電素子2から供給される電力により動作する携帯端末や電気自動車などの制御装置であってもよい。

【0051】

以下、推定装置1が実行する演算処理の内容について説明する。

推定装置1は、蓄電素子2の内部の力学的状態を表すシミュレーションモデルを用いて、入力部13を通じて入力される歪みセンサS1の計測データに基づき、蓄電素子2の内部

50

応力を推定する。

【0052】

蓄電素子2の内部の力学的状態を表すシミュレーションモデルは、力のつり合い式によって表され、例えば、以下の数1が用いられる。

【0053】

【数1】

$$F_{ext} = SE\{\varepsilon - (\varepsilon_{iso,e} + \varepsilon_{pre,e})\}$$

10

【0054】

ここで、 F_{ext} は拘束部材3によって蓄電素子2に付与される拘束力である。Sは蓄電素子2の拘束力に垂直な断面積である。Eは蓄電素子2の弾性率である。 ε は蓄電素子2の弾性歪みである。 $\varepsilon_{iso,e}$ は活物質粒子の孤立化による蓄電素子2の固有歪みであり、 $\varepsilon_{pre,e}$ は析出物の成長による蓄電素子2の固有歪みである。

【0055】

実施の形態1では、蓄電素子2に歪みが発生する要因として、(1)活物質粒子の孤立化、(2)析出物の成長を考慮する。

【0056】

20

(1)孤立化による固有歪み

孤立化とは、充放電の際に活物質粒子に電荷担体(例えばリチウム原子)が挿入離脱することによって、膨張収縮を繰り返し、応力によって活物質粒子が割れる現象を表す。孤立化は、微粉化(Pulverization)とも亀裂進展とも呼ばれる。活物質粒子が割れることによって隙間が生じ、見かけの体積が増すため、蓄電素子2の内部に固有歪みが発生する。

【0057】

孤立化による固有歪みの進行速度は、例えば、数2のように記述される。

【0058】

【数2】

30

$$\varepsilon_{iso,e}^{k+1} = \varepsilon_{iso,e}^k + k_{iso,0} + k_{iso,1}|I|^{\alpha_{iso,1}} + v_{iso,e}$$

【0059】

ここで、 $\varepsilon_{iso,e}$ は孤立化による固有歪みを表す。下付き添え字の「iso」は孤立化(isolation)を表し、下付き添え字の「e」は固有歪みであることを表す。上付き添え字の「k」及び「k+1」は時間ステップを表す。 $k_{iso,0}$ 、 $k_{iso,1}$ は速度係数であり、それぞれ時間と共に孤立化による固有歪みが増加する度合い、通電によって孤立化が進行して固有歪みが増加する度合いを表す。孤立化は、経時変化のみによって進行することは殆どないため、 $k_{iso,0}=0$ 、0としても問題はないことが多い。Iは蓄電素子2に流れる電流である。 $\alpha_{iso,1}$ は電流の比例べき乗定数である。 $v_{iso,e}$ は孤立化進行の外乱項を表す。

40

【0060】

(2)析出物の成長による固有歪み

例えば、蓄電素子2の負極にリチウム金属が用いられている場合、長期間にわたる充放電の繰り返しによって、負極表面には析出物が析出することがある。この析出物の成長によって、蓄電素子2の内部に固有歪みが発生する。

【0061】

50

析出物の成長による固有歪みの進行速度は、例えば、数3のように記述される。

【0062】

【数3】

$$\varepsilon_{pre,e}^{k+1} = \varepsilon_{pre,e}^k + k_{pre,0}(\sigma_{in}^k) + k_{pre,1}(\sigma_{in}^k)|I|^{\alpha_{pre,1}} + v_{pre,e}$$

【0063】

10

ここで、 $\varepsilon_{pre,e}$ は析出物の成長による固有歪みを表す。下付き添え字の「pre」は析出物(Precipitation)を表し、下付き添え字の「e」は固有歪みであることを表す。上付き添え字の「k」及び「k+1」は時間ステップを表す。 $k_{pre,0}$ 、 $k_{pre,1}$ は速度係数であり、それぞれ時間と共に析出物が成長して固有歪みが増加する度合い、通電によって析出物が成長して固有歪みが増加する度合いを表す。 σ_{in} は蓄電素子2の内部応力である。速度係数 $k_{pre,0}$ 、 $k_{pre,1}$ は共に内部応力 σ_{in} の関数であることを表す。また、 σ_{in} は蓄電素子内部の場所の関数であってもよい。 I は蓄電素子2に流れる電流である。 $\alpha_{pre,1}$ は電流の比例べき乗定数である。 $v_{pre,e}$ は析出物の成長による固有歪みの外乱項を表す。

【0064】

20

析出物は疎なりチウム金属や不動体被膜(SEI被膜)などであってもよい。どのような析出物が蓄電素子2の内部に析出する場合であっても、析出物の成長に伴う固有歪みの進行速度は、数3と同様の数式によって表される。

【0065】

蓄電素子2に付与される拘束力 F_{ext} は、拘束部材3を構成する側面部312の引張力と一致するので、以下の数4によって表される。

【0066】

【数4】

$$F_{ext} = S_{ref}E_{ref}\varepsilon_{ref}$$

30

【0067】

ここで、 E_{ref} は側面部312のヤング率、 ε_{ref} は歪みセンサS1によって計測される側面部312の歪み、 S_{ref} は側面部312の断面積である。

【0068】

蓄電素子2の内部応力 σ_{in} と弾性歪み ε との間には、 $\sigma_{in} = \varepsilon E$ の関係があるので、数1及び数4の関係式を用いると、内部応力 σ_{in} は、次のように表される。

【0069】

40

【数5】

$$\sigma_{in}^k = \frac{S_{ref}E_{ref}\varepsilon_{ref}^k}{S} + E(\varepsilon_{iso,e}^k + \varepsilon_{pre,e}^k) + v_{in}$$

【0070】

数5において、上付きの添え字kは時間ステップを表す。 v_{in} は内部応力の外乱項である。数5では、歪みの要因として、孤立化による固有歪みと、析出物の成長による固有歪み

50

とを考慮しているが、他の要因が存在する場合であっても、固有歪みの和の項に追加することによって、同様の手続きが適用できる。

【0071】

2つの固有歪み、歪みセンサS1の計測値、及び内部応力の方程式を、状態方程式として表した場合、以下の数6が得られる。

【0072】

【数6】

$$\varepsilon_{iso,e}^{k+1} = \varepsilon_{iso,e}^k + k_{iso,0} + k_{iso,1}|I|^{\alpha_{iso,1}} + v_{iso,e} \quad 10$$

$$\varepsilon_{pre,e}^{k+1} = \varepsilon_{pre,e}^k + k_{pre,0}(\sigma_{in}^k) + k_{pre,1}(\sigma_{in}^k)|I|^{\alpha_{pre,1}} + v_{pre,e}$$

$$\varepsilon_{ref}^{k+1} = \varepsilon_{ref}^k + v_{ref}$$

$$\sigma_{in}^k = \frac{S_{ref}E_{ref}\varepsilon_{ref}^k}{S} + E(\varepsilon_{iso,e}^k + \varepsilon_{pre,e}^k) + v_{in}$$

20

【0073】

数6は、孤立化による固有歪みの進行速度を表す式(数2)、析出物の成長による固有歪みの進行速度を表す式(数3)、内部応力に係る方程式(数5)に加え、側面部312の歪みの方程式を含む。数6において ε_{ref} は観測量である。また、電流Iについても電流計S4によって計測された値が用いられてもよい。数6では、固有歪みを状態量として用いたが、固有歪みにヤング率を乗じて得られる応力を状態量に用いてもよい。

【0074】

数6の状態方程式は、数7のようにベクトルを用いた表現に書き換えられる。

【0075】

【数7】

30

$$\mathbf{x}^{k+1} = f(\mathbf{x}^k) + \mathbf{v}^k \quad \mathbf{x}^k = \begin{pmatrix} \varepsilon_{iso,e}^k \\ \varepsilon_{pre,e}^k \\ \varepsilon_{ref}^k \\ \sigma_{in}^k \end{pmatrix} \quad \mathbf{v}^k = \begin{pmatrix} v_{iso,e}^k \\ v_{pre,e}^k \\ v_{ref}^k \\ v_{in}^k \end{pmatrix}$$

40

【0076】

ここで、 \mathbf{x}^k は状態量を要素に持つベクトル(状態ベクトル)、 \mathbf{v}^k は外乱量を要素に持つベクトル(外乱ベクトル)である。 f は数6に示す状態方程式の非線形変換を表す。外乱項は一部又は全部の要素を0にして計算してもよい。

【0077】

実施の形態では、蓄電素子2の歪みを歪みセンサS1によって計測するので、 ε_{ref} が観測量である。観測方程式は次式によって表される。

【0078】

50

【数 8】

$$y^k = C_T x^k$$

【0079】

ここで、 y^k は観測値、 C^T は観測ベクトルである。観測方程式についても外乱ベクトルを加えてもよい。観測量として第3成分の ε_{ref} を取り出す場合、観測ベクトル C^T は数9に

10

【0080】

【数9】

$$C_T = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0)$$

【0081】

実施の形態1に係る推定装置1は、非線形フィルタを利用して、数7の状態方程式及び数8の観測方程式によって表されるシミュレーションモデルの時間更新を逐次計算し、内部応力 σ_{in} の時間推移を導出する。

20

【0082】

以下、非線形フィルタの一例として、アンサンブルカルマンフィルタを用いて、時間更新を逐次計算する手法について説明する。

【0083】

図5は実施の形態1における内部応力の推定手順を説明するフローチャートである。推定装置1の演算部11は、 $k=1$ の初期値を与える（ステップS101）。演算部11は、歪みセンサS1を用いて予め計測した歪みの計測値を $\varepsilon_{\text{ref}}^k$ の初期値として与え、孤立化による固有歪み $\varepsilon_{\text{iso},e}^k$ 、析出物の成長による固有歪み $\varepsilon_{\text{pre},e}^k$ 、内部応力 σ_{in}^k の初期値として予め設定した仮の値を与えればよい。

30

【0084】

次いで、演算部11は、各状態変数について、N個の粒子を発生させる（ステップS102）。ここで、Nは、 $10^2 \sim 10^6$ 程度の数である。

【0085】

次いで、演算部11は、 $i=1, 2, \dots, N$ について、 v_k に相当する乱数を発生させる（ステップS103）。 v_k は正規分布に従うものとし、分散は既知とする。

【0086】

演算部11は、全てのN個の粒子について、数10に基づく演算を実行し、粒子の状態を次の時間ステップにおける粒子の状態に更新する（ステップS104）。

40

【0087】

【数10】

$$x_k^{(i)} = f(x_{k-1}^{(i)}) + v_k^{(i)}$$

【0088】

演算部11は、 $i=1, 2, \dots, N$ の各粒子の状態ベクトルと、全粒子の状態ベクトルの

50

平均値との差 $\bar{x}_k^{(i)}$ を算出する（ステップ S 1 0 5）。 $\bar{x}_k^{(i)}$ は、数 1 1 によって表される。

【0 0 8 9】

【数 1 1】

$$\bar{x}_k^{(i)} = x_k^{(i)} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_k^{(i)}$$

10

【0 0 9 0】

演算部 1 1 は、全ての粒子に係る状態量予測値の共分散行列 P_k を算出する（ステップ S 1 0 6）。共分散行列 P_k は、数 1 2 によって表される。

【0 0 9 1】

【数 1 2】

$$P_k = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \bar{x}_k^{(i)} \cdot \bar{x}_k^{(i)T}$$

20

【0 0 9 2】

演算部 1 1 は、入力部 1 3 を通じて歪みセンサ S 1 のセンサ出力を取得する（ステップ S 1 0 7）。取得した歪みセンサ S 1 のセンサ出力は、時間ステップ k における各粒子の観測値 y_k^i を与える。

【0 0 9 3】

演算部 1 1 は、 i 番目の粒子の時間ステップ k における観測誤差 r_k^i を算出する（ステップ S 1 0 8）。ここで、 w_k は観測外乱である。観測誤差 r_k^i は、数 1 3 によって表される。

30

【0 0 9 4】

【数 1 3】

$$r_k^i = y_k^i - C^T x_k^{(i)} + w_k$$

40

【0 0 9 5】

演算部 1 1 は、時間ステップ k におけるカルマンゲイン K_k を算出する（ステップ S 1 0 9）。カルマンゲイン K_k は、数 1 4 によって表される。

【0 0 9 6】

【数 1 4】

$$K_k = P_k C (C^T P_k C + Q_k)^{-1}$$

50

【0097】

演算部11は、i番目の粒子の推定値 $\hat{x}_k^{(i)}$ を算出する（ステップS110）。推定値 $\hat{x}_k^{(i)}$ は、数15によって表される。すなわち、演算部11は、数10の最初の予測値を、数13の観測誤差 r_k^i と数14のカルマンゲイン K_k とを用いて修正する。

【0098】

【数15】

$$\hat{x}_k^{(i)} = x_k^{(i)} + K_k r_k^{(i)}$$

10

【0099】

演算部11は、各粒子の平均値 \hat{x}_k を算出する（ステップS111）。各粒子の平均値 \hat{x}_k は、アンサンブルカルマンフィルタによって得られる状態ベクトル推定値を表し、次式によって算出される。

【0100】

【数16】

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{x}_k^{(i)}$$

20

【0101】

数16によって得られる推定値（各粒子の平均値 \hat{x}_k ）には、内部応力 σ_{in} の推定値が含まれる。

【0102】

次いで、演算部11は、演算を終了するか否かを判断する（ステップS112）。例えば、ユーザから終了指示が与えられた場合、演算部11は、演算を終了すると判断する。演算を終了しないと判断した場合（S112：NO）、演算部11は、処理をステップS102へ戻し、次の時間ステップにおける演算を実行する。

30

【0103】

演算部を終了すると判断した場合（S112：YES）、演算部11は、推定した内部応力 σ_{in} に係る情報を出力部14から出力し（ステップS113）、本フローチャートによる処理を終了する。演算部11が出力する内部応力 σ_{in} に係る情報は、内部応力の値そのものであってもよく、内部応力を基に導出される物理量（例えば、蓄電素子2の内部抵抗）であってもよい。更に、演算部11が出力する内部応力 σ_{in} に係る情報は、内部応力 σ_{in} の時間推移を示すグラフであってもよく、応力分布を示す2次元又は3次元のグラフやコンターマップであってもよい。

40

【0104】

以上のように、推定装置1は、アンサンブルカルマンフィルタを利用して蓄電素子2の内部応力 σ_{in} を推定する。アンサンブルカルマンフィルタは、非線形性や非ガウス性を有する状態空間モデルを対象としたフィルタ手法であり、より一般的な状態空間モデルを対象とすることができる。アンサンブルカルマンフィルタは、アルゴリズムが比較的単純であり、推定装置1に容易に実装できる。

【0105】

図5のフローチャートでは、一例として、アンサンブルカルマンフィルタによる演算手法について説明した。代替的に、推定装置1は、粒子フィルタ、拡張カルマンフィルタ、無

50

香料カルマンフィルタなどの非線形フィルタを用いて、蓄電素子 2 の内部応力 σ_{in} を推定してもよい。

【0106】

実施の形態では、数 5 を導出する際、固有歪みと内部応力との間の線形性を考慮したが、両者の関係は非線形であってもよい。固有歪みと内部応力との間の関係が非線形であっても、非線形フィルタを用いた演算を実行することによって、蓄電素子 2 の内部応力 σ_{in} を推定できる。

【0107】

(実施の形態 2)

実施の形態 2 では、温度に起因した固有歪みを更に考慮して内部応力を推定する手法について説明する。

推定装置 1 及び蓄電素子 2 の構成は実施の形態 1 と同様であるため、その説明を省略する。

【0108】

実施の形態 1 では、蓄電素子 2 に歪みが発生する要因として、(1) 活物質粒子の孤立化、(2) 析出物の成長、(3) 熱膨張を考慮する。活物質粒子の孤立化による固有歪み、及び、析出物の成長による固有歪みは、実施の形態 1 と同様であるため、説明を省略する。

【0109】

(3) 熱膨張による固有歪み

熱膨張は、温度が上昇することによって蓄電素子 2 の体積が増大する現象である。熱膨張は蓄電素子 2 の劣化と無関係であり、ある瞬間の温度のみによって定まる。実施の形態では、熱膨張が温度に比例することを仮定し、基準温度との差異に応じた固有歪みが発生するとしてモデルを記述する。

【0110】

温度による固有歪みは、例えば、数 17 のように記述される。

【0111】

【数 17】

$$\varepsilon_{th,0}^k = \alpha_{th}^k (T^k - T_{ref}) + v_{th,e}$$

【0112】

ここで、 $\varepsilon_{th,e}$ は熱膨張による固有歪みを表す。 α_{th} は線熱膨張係数である。T はある時刻における温度、 T_{ref} は基準温度である。 $v_{th,e}$ は熱膨張の外乱項である。上付き添え字の k は時間ステップを表す。下付きの添え字の t h は温度 (thermal) を表す。温度 T には温度センサ S 2 の計測データ、基準温度 T_{ref} には温度センサ S 3 の計測データが用いられる。

【0113】

温度を含む状態方程式は、以下の数 18 のように記述される。

【0114】

10

20

30

40

50

【数 1 8】

$$\varepsilon_{iso,e}^{k+1} = \varepsilon_{iso,e}^k + k_{iso,0}(T^k) + k_{iso,1}(T^k)|I|^{\alpha_{iso,1}} + v_{iso,e}$$

$$\varepsilon_{pre,e}^{k+1} = \varepsilon_{pre,e}^k + k_{pre,0}(T^k, \sigma_{in}^k) + k_{pre,1}(T^k, \sigma_{in}^k)|I|^{\alpha_{pre,1}} + v_{pre,e}$$

$$\varepsilon_{th,e}^k = \alpha_{th}^k(T^k - T_{ref}) + v_{th,e}$$

$$\varepsilon_{ref}^{k+1} = \varepsilon_{ref}^k + v_{ref}$$

$$\sigma_{in}^k = \frac{S_{ref}E_{ref}\varepsilon_{ref}^k}{S} + E(\varepsilon_{iso,e}^k + \varepsilon_{th,e}^k + \varepsilon_{pre,e}^k) + v_{in}$$

10

【0 1 1 5】

実施の形態 2 では、孤立化による固有歪みの進行速度を表す速度係数 $k_{iso,0}$, $k_{iso,1}$ を温度 T の関数としている。関数形としては、温度 T の単調増加関数が用いられる。単調増加関数として、例えば、高温になる程、孤立化の進行速度が速くなるような特徴を表すアレニウス型の関数が用いられる。実施の形態 2 では、析出物の成長による固有歪みの進行速度を表す速度係数 $k_{pre,0}$, $k_{pre,1}$ を温度 T 及び内部応力 σ_{in} の関数としている。関数形は、温度 T の単調減少関数が用いられる。単調減少関数として、例えば、低温になる程、析出物の成長の進行が速くなるような特徴を表す関数が用いられる。数 1 8 の第 5 式には、熱膨張による固有歪み $\varepsilon_{th,e}^k$ に関する項が追加される。

20

【0 1 1 6】

数 1 8 の状態方程式は、数 1 9 のようにベクトルを用いた表現に書き換えられる。

【0 1 1 7】

【数 1 9】

30

$$\mathbf{x}^{k+1} = f(\mathbf{x}^k) + \mathbf{v}^k \quad \mathbf{x}^k = \begin{pmatrix} \varepsilon_{iso,e}^k \\ \varepsilon_{pre,e}^k \\ \varepsilon_{th,e}^k \\ \varepsilon_{ref}^k \\ \sigma_{in}^k \end{pmatrix} \quad \mathbf{v}^k = \begin{pmatrix} v_{iso,e}^k \\ v_{pre,e}^k \\ v_{th,e}^k \\ v_{ref}^k \\ \sigma_{in}^k \end{pmatrix}$$

40

【0 1 1 8】

観測方程式は、実施の形態 1 において説明した数 8 と同様であるが、実施の形態 2 では、蓄電素子 2 の歪み及び温度を観測量として取り出すので、観測ベクトル \mathbf{C}^T は数 2 0 のように表される。

【0 1 1 9】

50

【数 2 0】

$$C_T = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0)$$

【0 1 2 0】

実施の形態 2 に係る推定装置 1 は、非線形フィルタを利用して、数 1 9 の状態方程式及び数 8 の観測方程式によって表されるシミュレーションモデル（時系列モデル）の時間更新を逐次計算し、温度を考慮した内部応力 σ_{in} の時間推移を導出する。演算手法は実施の形態 1 と同様であり、推定装置 1 は、図 5 に示すフローチャートの手順にて演算を実行することによって、蓄電素子 2 の内部応力 σ_{in} を推定する。

10

【0 1 2 1】

実施の形態 1 及び 2 に係る推定装置 1 は、推定プログラム P G 1 を実行することによって、蓄電素子 2 の内部応力を推定する構成とした。代替的に、推定装置 1 は、蓄電素子 2 の劣化を推定する推定プログラムを併用し、蓄電素子 2 の使用に伴って電気化学特定が劣化していく様子と、蓄電素子 2 が膨張していく様子とを同時的にシミュレートしてもよい。蓄電素子 2 の劣化を推定する推定プログラムとして、例えば、特願 2 0 2 0 - 4 8 3 6 9 号に記載の手法を使用できる。

20

【0 1 2 2】

実施の形態 2 では、熱膨張に起因した蓄電素子 2 の固有歪みを考慮した。代替的に、活物質粒子の挿入脱離に伴う膨張収縮に起因した固有歪みを考慮してもよい。このような膨張収縮は、蓄電素子 2 の劣化とは関係なく、通常の充放電時に正極及び負極に活物質粒子が挿入脱離することによって生じる。活物質粒子の挿入脱離による固有歪みは可逆的なものであり、例えば S O C (State of Charge) の関数として表される。

【0 1 2 3】

実施の形態 2 では、熱応力を介した温度の影響を考慮するモデルについて述べた。代替的に、熱膨張による固有歪みを考慮せず、孤立化や析出物成長の速度係数の温度依存性のみを考慮してもよい。その場合、数 1 8 及び数 1 9 の第 3 式を除外すればよい。

30

【0 1 2 4】

(実施の形態 3)

実施の形態 3 では、蓄電素子 2 の電気化学現象を推定する際、推定装置 1 によって推定される内部応力 σ_{in} の値を用いる構成について説明する。

推定装置 1 及び蓄電素子 2 の構成は実施の形態 1 と同様であるため、その説明を省略する。

【0 1 2 5】

蓄電素子 2 の電気化学現象は、Newman モデルや Randle モデルなどの物理モデルによって記述される。観測方程式は、例えば、数 2 1 のように記述される。

【0 1 2 6】

【数 2 1】

40

$$V = OCP_p(c_{p,1}) - OCP_n(c_{n,1}) - R_{ohm}(\sigma_{in})I - \eta_{act,p}(c_{p,1}, I, T) - \eta_{act,p}(c_{p,1}, I, T)$$

【0 1 2 7】

ここで、V は蓄電素子 2 の端子電圧であり、電圧計 S 5 により観測される観測値である。 $OCP_p(c_{p,1})$ は正極の平衡電位であり、正極活物質粒子の界面での吸蔵リチウムイオ

50

ン濃度 $c_{p,l}$ の関数である。 $OC P_n (c_{n,l})$ は負極の平衡電位であり、負極活物質粒子の界面での吸蔵リチウムイオン濃度 $c_{n,l}$ の関数である。 $R_{ohm} (\sigma_{in})$ は蓄電素子 2 のオーム抵抗 (内部抵抗) を表す。 $R_{ohm} (\sigma_{in})$ は、オーム抵抗が内部応力 σ_{in} の関数であることを表す。内部応力 σ_{in} の値として推定装置 1 により推定される値が用いられる。 $R_{ohm} (\sigma_{in})$ は温度 T の関数であってもよい。 I は蓄電素子 2 に流れる電流である。すなわち、 $R_{ohm} (\sigma_{in}) I$ の項は、オーム抵抗による電圧降下を表す。 $\eta_{act,p} (c_{p,l}, I)$ は正極活物質粒子の界面での活性化過電圧であり、正極活物質粒子の界面での吸蔵リチウムイオン濃度 $c_{p,l}$ 、電流 I 、及び温度 T の非線形関数である。 $\eta_{act,n} (c_{n,l}, I)$ は負極活物質粒子の界面での活性化過電圧であり、負極活物質粒子の界面での吸蔵リチウムイオン濃度 $c_{n,l}$ 、電流 I 、及び温度 T の非線形関数である。すなわち、観測値の電圧 V は、正極活物質粒子の界面での吸蔵リチウムイオン濃度 $c_{p,l}$ 、負極活物質粒子の界面での吸蔵リチウムイオン濃度 $c_{n,l}$ 、電流 I 、温度 T の複雑な非線形関数となる。

10

【0128】

図 6 は蓄電素子 2 の内部応力 σ_{in} とオーム抵抗 R_{ohm} との関係を示すグラフである。グラフの横軸は蓄電素子 2 の内部応力 σ_{in} を表し、縦軸は蓄電素子 2 のオーム抵抗 R_{ohm} を表す。図 6 のグラフに示すように、圧縮応力が高くなる程、オーム抵抗は低くなるという実験事実を考慮して、 R_{ohm} の関数形は、 $\partial R_{ohm} / \partial \sigma_{in} \geq 0$ となるように定められる。推定装置 1 の記憶部 12 には、内部応力 σ_{in} をオーム抵抗 R_{ohm} に変換する関数が記憶されてもよく、内部応力 σ_{in} をオーム抵抗 R_{ohm} に変換する変換テーブルが記憶されてもよい。

20

【0129】

推定装置 1 は、上述した手法を用いて推定した内部応力 σ_{in} の値を、予め定めた関数 (又はテーブル) に従ってオーム抵抗 R_{ohm} の値に変換する。推定装置 1 は、変換後に得られるオーム抵抗 R_{ohm} の値を用い、数 21 に基づき状態推定を実行することによって、正極及び負極の平衡電位や活性化過電圧を含む物理量を推定する。推定手法には、例えば、特願 2020-160971 号に記載の手法が用いられる。

【0130】

全固体電池では、拘束力や内部応力に応じて固体電解質及び活物質粒子の接触面積が変化し、これに伴って電池特性は大きく変化する。実施の形態 3 では、内部応力 σ_{in} の推定結果を用いて電気化学現象を推定するので、内部応力に応じて電池特性が大きく変わり得る全固体電池の電気化学現象を精度良く推定できる。

30

【0131】

負極に金属リチウムを用いた電池では、内部応力に応じて、オーム抵抗などの内部抵抗や、析出物の成長速度が変化することが知られている。

【0132】

(実施の形態 4)

実施の形態 4 では、蓄電素子 2 の等価回路モデルを用いて電気化学現象を推定する構成について説明する。

推定装置 1 及び蓄電素子 2 の構成は実施の形態 1 と同様であるため、その説明を省略する。

40

【0133】

図 7 は等価回路モデルの一例を示す回路図である。蓄電素子 2 の等価回路モデルは、例えば図 7 に示すような抵抗器、容量成分、電圧源の組み合わせによって表現されることが多い。

【0134】

図 7 中の R_0 はオーム抵抗成分、 R_1 は正極の反応抵抗成分、 C_1 は正極の容量成分、 R_2 は負極の反応抵抗成分、 C_2 は負極の容量成分、 E_{eq} は開回路電圧 (OCV : Open Circuit Voltage) である。ただし、図 7 は例示であって、直列、並列の組み合わせや電気回路素子の個数や種類に制限はない。

【0135】

50

蓄電素子 2 の充放電特性は、温度や SOC の影響を受けることが知られている。開回路電圧 (OCV) は SOC の関数であるとし、 $R_0 \sim R_2$ 、 $C_1 \sim C_2$ は温度の関数であるとする。このとき、観測方程式は数 2 2 によって表される。

【0136】

【数 2 2】

$$y_U^k = V = OCV(SOC) + C_T x_U^k + R_0(\sigma_{in}) u^k$$

10

【0137】

ここで、 y_U は観測値であり、実施の形態 4 では蓄電素子 2 の端子電圧 V を表す。上付きの添え字 k は時間ステップを表す。OCV (SOC) は開回路電圧であり、SOC の非線形関数として表される。 C_T は観測ベクトル、 x_U は状態ベクトルを表す。 $R_0(\sigma_{in})$ はオーム抵抗であり、内部応力 σ_{in} の関数として表される。 R_0 の関数形は、 $\partial R_0 / \partial \sigma_{in} \geq 0$ となるように定められる。推定装置 1 の記憶部 1 2 には、内部応力 σ_{in} をオーム抵抗 R_0 に変換する関数が記憶されてもよく、内部応力 σ_{in} をオーム抵抗 R_0 に変換する変換テーブルが記憶されてもよい。 u は蓄電素子 2 に流れる電流である。

【0138】

推定装置 1 は、上述した手法を用いて推定した内部応力 σ_{in} の値を、予め定めた関数（又はテーブル）に従ってオーム抵抗 R_0 の値に変換する。推定装置 1 は、変換後に得られるオーム抵抗 R_0 の値を用い、数 2 2 に基づき状態推定を実行することによって、開回路電圧 OCV を含む物理量を推定する。推定手法には、例えば、特願 2020-160971 号に記載の手法が用いられる。

20

【0139】

全固体電池では、拘束力や内部応力に応じて固体電解質及び活物質粒子の接触面積が変化し、これに伴って電池特性は大きく変化する。実施の形態 4 では、内部応力 σ_{in} の推定結果を用いて電気化学現象を推定するので、内部応力に応じて電池特性が大きく変わり得る全固体電池の電気化学現象を精度良く推定できる。

30

【0140】

今回開示された実施形態は、全ての点において例示であって、制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は、上述した意味ではなく、特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味及び範囲内での全ての変更が含まれることが意図される。

【0141】

例えば、蓄電素子 2 は、複数のセルを直列に接続したモジュール、複数のモジュールを直列に接続したバンク、複数のバンクを並列に接続したドメイン等であってもよい。

【符号の説明】

【0142】

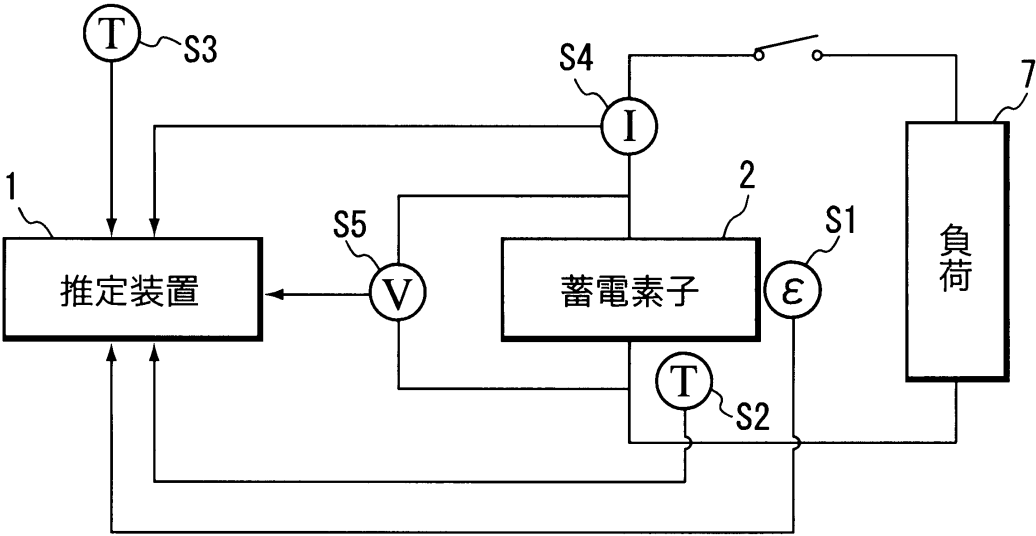
40

- 1 推定装置
- 2 蓄電素子
- 3 拘束部材
 - 1 1 演算部
 - 1 2 記憶部
 - 1 3 入力部
 - 1 4 出力部
 - 2 1 正極集電体層
 - 2 2 正極活物質層
 - 2 3 固体電解質層

50

- 2 4 負極活物質層
- 2 5 負極集電体層
- 3 1 ケース
- 3 2 弾性部材
- 3 1 0 ケース本体
- 3 1 1 底面部
- 3 1 2 側面部
- 3 1 3 蓋体
- MD 1 シミュレーションモデル
- PG 1 推定プログラム
- S 1 歪みセンサ
- S 2, S 3 温度センサ
- S 4 電流計
- S 5 電圧計

【図 1】



10

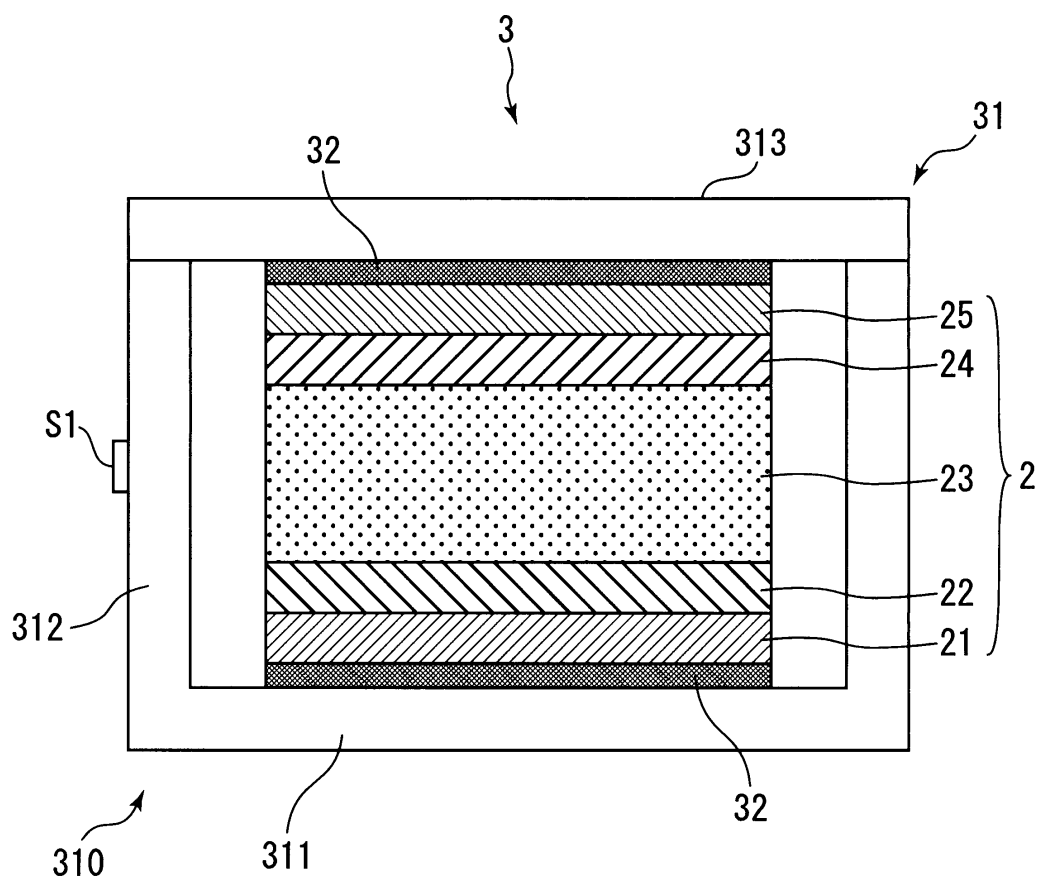
20

30

40

50

【図 2】



10

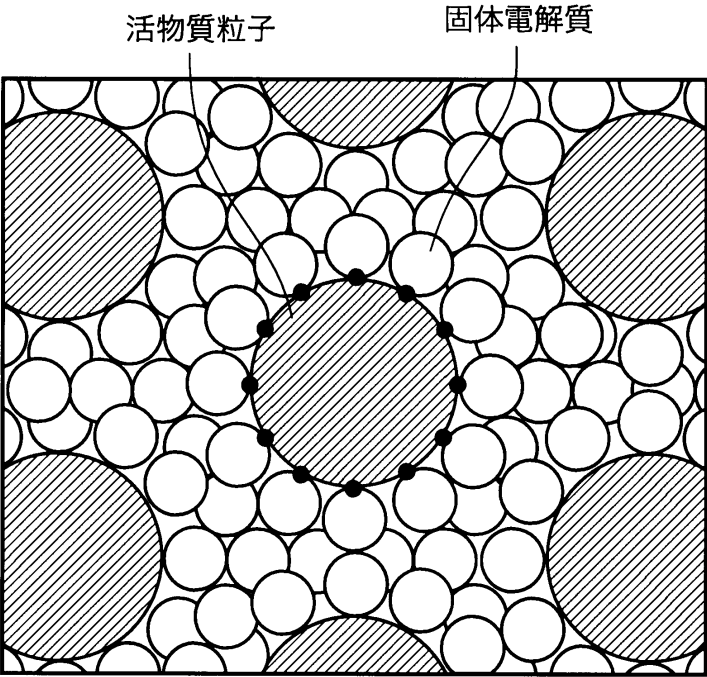
20

30

40

50

【図 3】



10

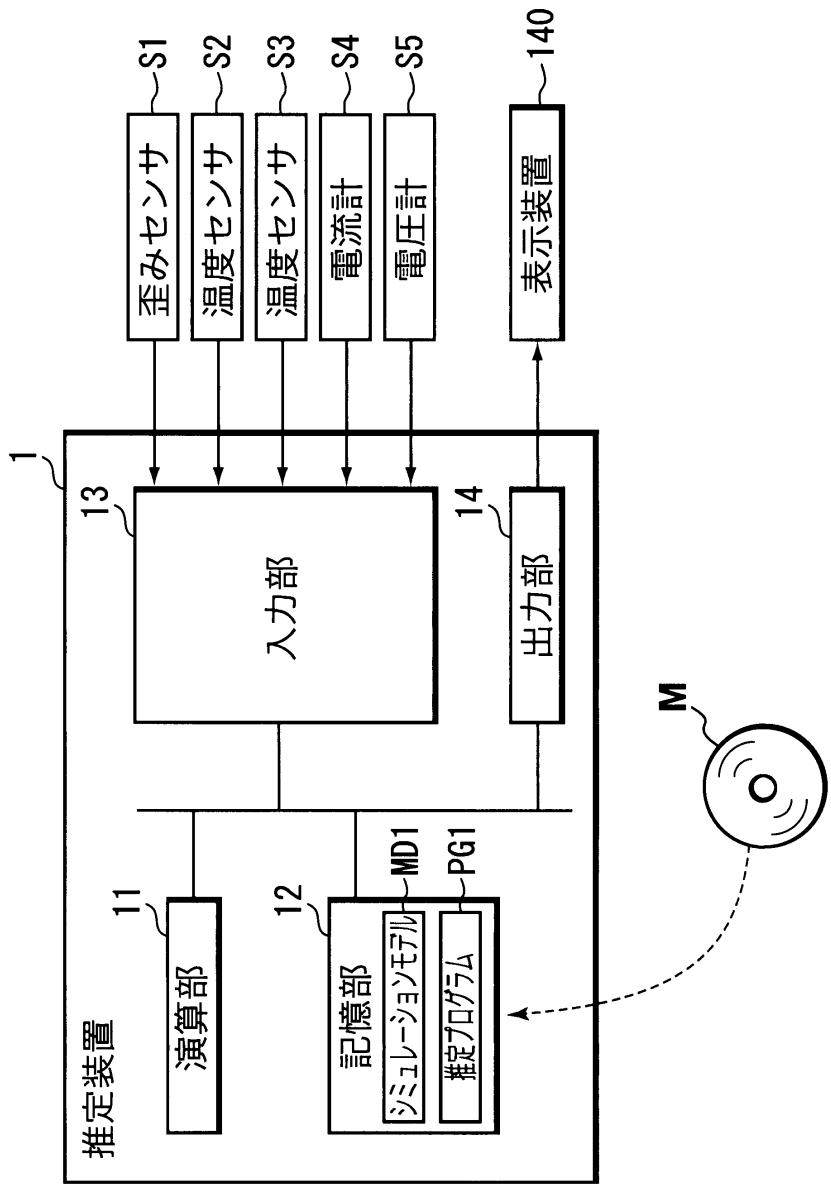
20

30

40

50

【図 4】



10

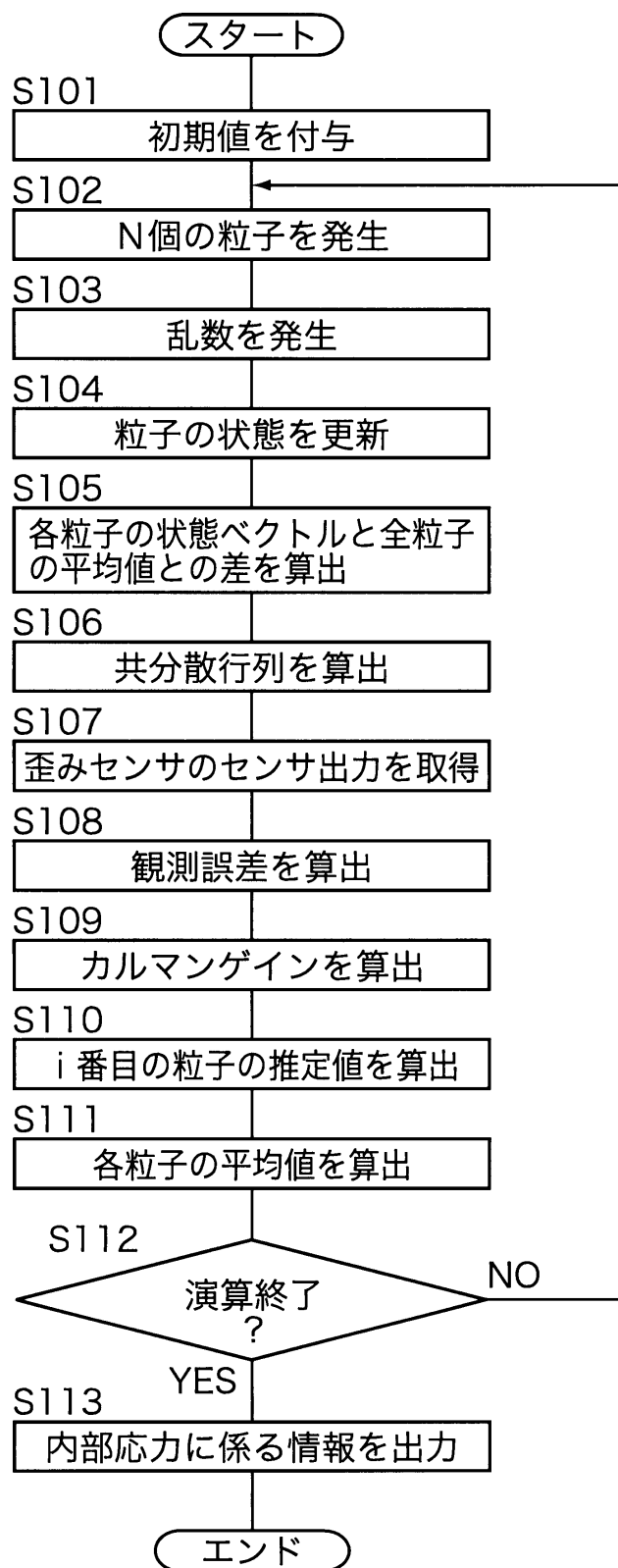
20

30

40

50

【図5】



10

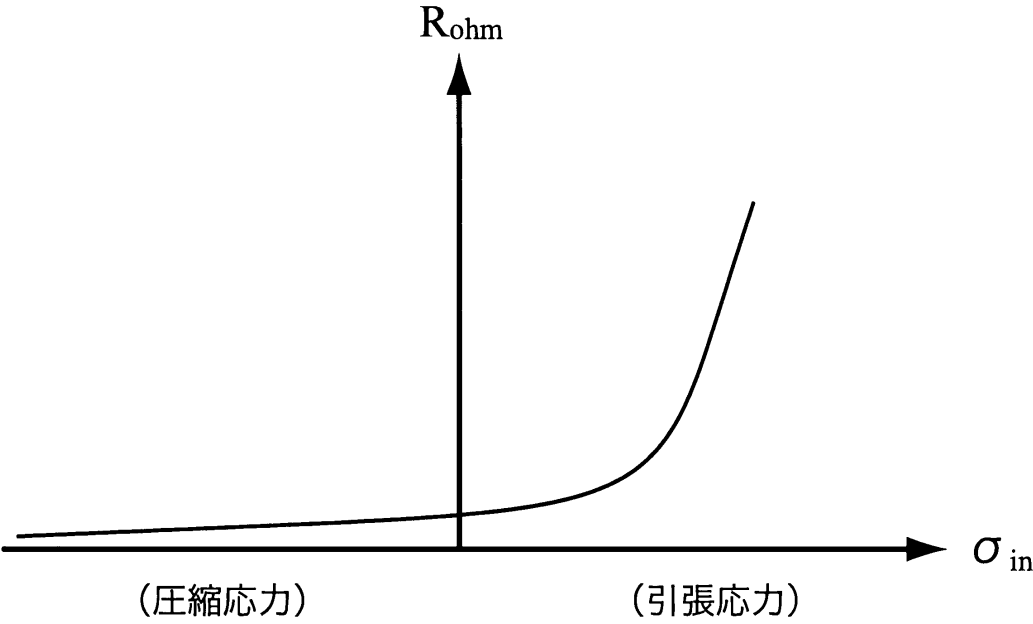
20

30

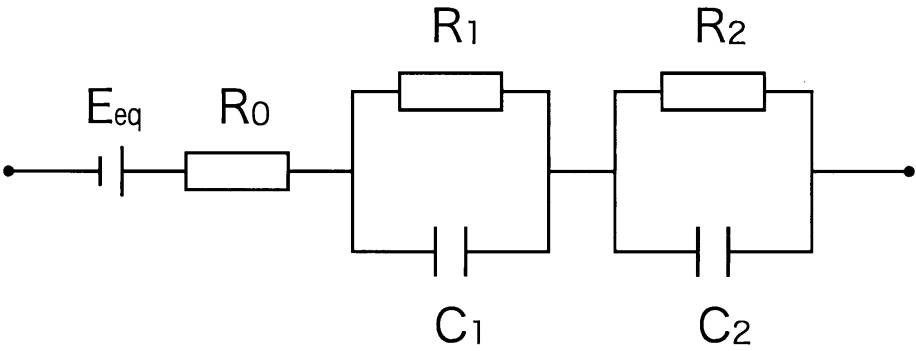
40

50

【図 6】



【図 7】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(51)Int.Cl.			F I			テーマコード(参考)
<i>H O 1 M</i>	<i>4/134</i>	<i>(2010.01)</i>	<i>H O 1 M</i>	<i>4/134</i>		
<i>G O 6 F</i>	<i>30/10</i>	<i>(2020.01)</i>	<i>G O 6 F</i>	<i>30/10</i>	<i>2 0 0</i>	
<i>G O 6 F</i>	<i>111/10</i>	<i>(2020.01)</i>	<i>G O 6 F</i>	<i>111:10</i>		

(72)発明者 山内 翔太
京都府京都市南区吉祥院西ノ庄猪之馬場町 1 番地 株式会社G S ユアサ内
(72)発明者 山手 茂樹
京都府京都市南区吉祥院西ノ庄猪之馬場町 1 番地 株式会社G S ユアサ内

F ターム(参考) 5B146 AA21 DJ02
5H029 AJ01 AK01 AK03 AL06 AL07 AL11 AL12 AM12
5H030 FF31
5H050 AA01 BA16 CA01 CA08 CA09 CB07 CB08 CB11 CB12