

F 蓄電池の安全性試験、突入電流を模擬した新しい内部短絡試験 (CISC試験) の紹介

2050年のカーボンニュートラル実現に向け、車両電動化および再生可能エネルギー導入の拡大が進展している。近年、電気自動車 (EV) の市場成長は一時的に減速傾向を示しているものの、輸送部門の脱炭素化を担う中核技術としての重要性は不変である。加えて、電動化は自動運転やソフトウェア・デファインド・ビークル (SDV) との親和性が高く、蓄電池にはエネルギー供給源として従来以上に高い信頼性および安全性が求められている。

さらに、蓄電池の用途は車載分野に加え、再生可能エネルギーの出力変動吸収や電力系統安定化を担う定置型蓄電システムへと拡大している。とりわけ、データセンターの増設に伴う電力需要の増大を背景として、大容量かつ高信頼性を有する蓄電池の重要性は一層高まっている。

このような背景のもと、蓄電池にはより高度な安全性確保が求められる。現在主流である液系リチウムイオン電池 (以下、液 LIB) は発煙・発火リスクを内在しており、とりわけ内部短絡は外部制御が困難な危険要因である。さらに並列接続環境における電流入りなどの二次的要因が重畳すると、危険性は一層増大する。

しかしながら、従来の内部短絡評価は単セル試験に基づく可否判定に留まっており、組電池における周辺電池からの電流入りや、低温、高温など実使用環境を考慮した評価手法は十分に確立されていない。したがって、実運用条件を反映した内部短絡評価技術の確立が必要となる。

当社は、層間短絡状態を維持した電池に対して外部から電流を印加し、電池性能、温度依存性、および電池破損挙動を定量的に評価可能な新手法を提案してきた^{1), 2)}。本手法は CISC 試験 (Constant-current Inrush during Internal Short Circuit) と称し、特許技術に基づくものである³⁾。



技術本部
EV・電池ソリューションセンター
安全性評価試験室

はらだ ひでき
原田 英樹



技術本部
EV・電池ソリューションセンター
安全性評価試験室

たかた としなり
高田 俊成



技術本部
EV・電池ソリューションセンター
安全性評価試験室

しもがき りょうた
下垣 亮太

F-1 電池の内部短絡試験

1.1 内部短絡について

図1に内部短絡および外部短絡の概念図を示す。外部短絡とは、電池外部で正極と負極が繋がり過大な電流が流れる現象であり、一般的にはコンタクト制御に加え、ヒューズやパイロヒューズなどの保護機構によって過電流を遮断することが可能である。これに対し、内部短絡は電池内部において発生するため、外部保護回路による遮断が困難であり、熱暴走を経て発火に至る危険性を有する。

内部短絡の主な発生要因として、以下が挙げられる。

- ・製造工程における異物混入
- ・衝突や落下による機械的損傷
- ・金属リチウムの樹枝状析出によるセパレータ破損

これらのリスクを適切に評価するためには、内部短絡状態を再現する信頼性の高い試験手法が不可欠である。

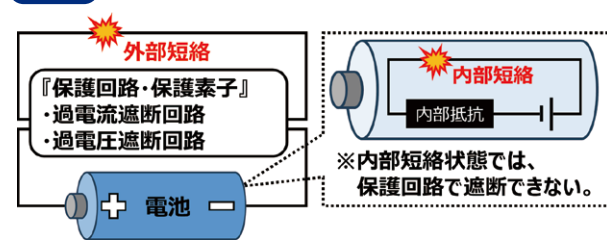
1.2 代表的な内部短絡試験手法

現在広く用いられている内部短絡試験法を表1に示す。代表

的な手法として、Directly detected Internal Short Circuit 試験 (以下 DISC 試験)、Blunt Nail 試験、Forced internal short circuit 試験 (以下 FISC 試験) が挙げられる^{4)~11)}。DISC 試験では金属釘を制御し、直接電池内部へ釘を挿入させ、一層間もしくは複層間の短絡を発生させる。Blunt Nail 試験では半球状先端を有する釘を用いて外部から圧壊し、局所的な短絡を発生させる。FISC 試験では電池内部へ Ni 片を挿入し、加圧によって短絡状態を形成する。

しかしながら、これらの試験はいずれも単セル評価を前提としており、試験結果は主としてハザードレベル (0: 変化なし、1: 保

図1 内部短絡と外部短絡の違い



護機構作動、2: 損傷破損、3: 電解液漏出、4: 電解液蒸発 (発煙)、5: 破裂、6: 発火、7: 爆発) に基づく可否判定に留まっている¹²⁾。したがって、実際のシステム環境で発生する電流集中現象を定量的に評価することは困難である。

1.3 CISC試験の特徴

実際の車載電池システムや定置型蓄電システムでは、直列接続に加えて多数のセルが並列接続されている。このため、あるセルで内部短絡が発生した場合、並列接続されたセルから短絡セ

ルへ大電流が流入する現象が生じる。

とくに積層間の一部が部分的に短絡している箇所では、短絡部に電流が集中して局所的なジュール熱が発生する。さらに外部から電流が流入すると発熱量が増加し、熱暴走へ進展する。このような状況は、EVにおける内部短絡発生状態での急加速や急速充電に相当する。

本研究では、短絡部へ流入する突入電流を再現する機構を備え、ジュール熱を定量化し、電池破損との相関を評価することを目的として CISC 試験を開発した。

表1 内部短絡試験における代表的な手法

手法	特徴	メリット	デメリット	イメージ	規格
DISC試験	一層短絡状態の評価可能	・電池の形状を損なわず、評価が可能。 ・短絡時の積層数を指定できる。	・釘穴が空く。 (電解液、熱の放出) ・釘刺し時に外層を巻き込む。		IEC 62660-3 Edition 2.0 Annex C
FISC試験	異物を電池の中に挿入し短絡評価可能	・製造時のコンタミを模擬できる。	・電池を解体して異物を入れなければならない。 ・異物を (Ni 片) 入れるのが困難。 ・短絡時の積層数が不明。 ・電池が製品状態と異なる。 ・電池に局所的な外力が加わる。		IEC 62660-3 JIS C8714 JIS C87315-2
Blunt Nail試験	局所的な外力による短絡評価可能	・電池の形状を損なわず、評価可能。	・短絡時の積層数が不明。 ・電池に局所的な外力が加わる。		UL1642

F-2 CISC試験の開発

2.1 CISC試験の構成

CISC 試験は、DISC 試験の構成を基盤とし、短絡セルに対して並列セルあるいは直流電源を接続して突入電流を印加する試験手法である。短絡から電流印加までのイメージを図2に示す。

本試験では、釘の移動距離、電圧低下量および荷重条件に基づく停止制御機構を導入することで、層間短絡状態を高精度に再現可能とした。主な試験精度は以下のとおりである。

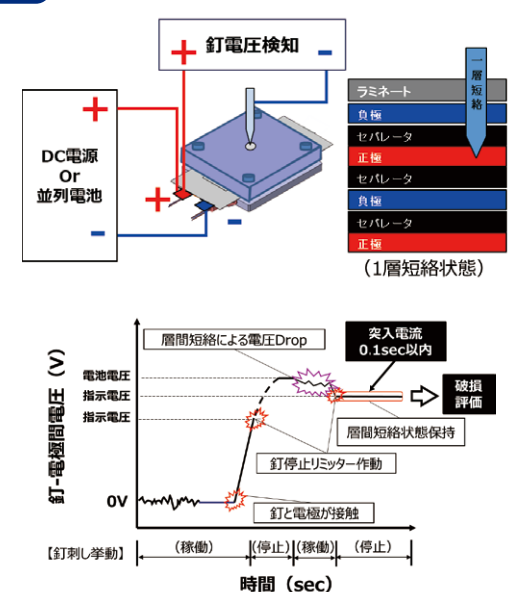
- ・変位制御精度: 10 μ m
- ・電圧制御精度: 50mV
- ・荷重制御精度: 10N

また、回路インダクタンスの低減、および回路抵抗を最適化することにより 0.1 秒以内の高速な電流印加を実現した。

2.2 CISC試験の評価手法

内部短絡発生時には、短絡電流および突入電流に起因するジュール熱が短絡抵抗部に発生し、この発熱量が電池破損に大きく影響すると考えられる。

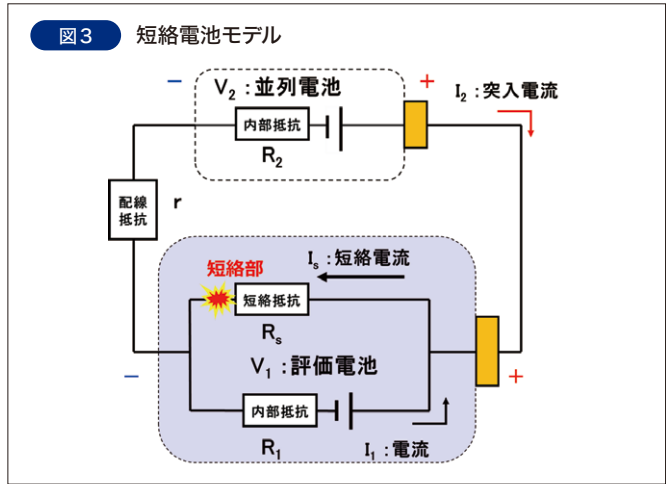
図2 短絡から電流印加までのイメージ



そこで、短絡抵抗部へ投入されるエネルギー量を定量的に表現する指標として、下記のモデルに基づきEc値を定義した。図3に短絡電池モデルを示す。短絡電池における短絡電流 Isは、自己放電による電流 I1と並列電池からの突入電流 I2の和となり、短絡部の抵抗はRsはIsから次式で表される。

$$I_s = I_1 + I_2 = \{ (V_1 - V_2) + (r + R_1 + R_2) I_2 \} / R_1$$
$$R_s = (V_1 - R_1 I_1) / I_s$$

Is：短絡電流 (A)、I1：自己放電による電流 (A)、
I2：並列電池からの突入電流 (A)、V1：評価電池の電圧 (V)、
V2：並列電池の電圧 (V)、r：配線抵抗 (Ω)、
R1：評価電池の内部抵抗 (Ω)、
R2：並列電池の内部抵抗 (Ω)、Rs：短絡部の抵抗 (Ω)



F-3 試験実施例

3.1 CISC試験

CISC試験は試作した5Ahのラミネート型電池を用いて表2に示す条件で実施した。内部短絡は、満充電セルに対してSS400製、直径3mm、先端角30°の釘を挿入することで模擬した。単層短絡を再現するため、50mV以上の電圧低下を検知した時点で釘を停止させた。

突入電流は、短絡検知後に直流電源より0～200Aの範囲で印加した。また、低温条件における評価には-100℃まで±2℃の制御が可能な当社独自の低温試験装置を用いた。

Ec値と破損時間の関係として整理したEc-t線図を図4に示す。図中においては、各突入電流で発煙・発火(破損)が生じ

表2 CISC試験条件

温度	低温(0℃)、室温
評価用電池	正極：NCM811、負極：グラファイト 容量：5.0Ah、形状：ラミネートセル
拘束／開始容量	無し／SOC 100%
釘仕様	材質：SS400、φ3.0mm、先端角度 30°
釘刺し位置／速度	試験体中央／0.01mm/sec
印可電流	0A～200A
釘停止条件	一層短絡／電圧低下0.15V

ここで、短絡部の抵抗Rsは短絡状態によって時間的に変動するため定めることが難しい。よって、評価には電流の実効値Irms(root mean square)を用いた。これにより、短絡抵抗に投入されるエネルギーは、電流実効値の2乗と電流作用時間の積として定式化される。このエネルギー量をEc値として次式で定義した。

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I(t)^2 dt}$$
$$I_{rms}^2 T = \int_0^T I(t)^2 dt$$
$$\frac{I_{rms}^2 R_s T}{R_s} = \frac{W_s T}{R_s} = \frac{J}{R_s} = E_c$$

Irms：電流実効値 (A)、Is：短絡電流 (A)、
T：電流発生総時間 (s)、t：電流印加時間 (s)、
Rs：短絡部の抵抗 (Ω)、Ws：短絡電流の電力、
J：短絡時の熱量、Ec：短絡抵抗に加わるエネルギー (J/Ω)

すなわち、Ec値は短絡部における発熱エネルギーを示す指標であり、電池破損の定量評価に適用可能である。

たプロットを外挿線で結び、各試験条件における破損領域と未破損領域を区分した。

その結果、試験温度によらずEc値の増加に伴い電池破損までの時間は短縮する傾向が確認された。これは突入電流増加によりジュール発熱が増大し、熱暴走限界へ早期に到達したためと考えられる。

さらに、0℃環境では室温条件と比較してEc-t線図の傾きが小さくなることが確認された。この現象は、低温条件における内部抵抗増加に伴う発熱促進効果と、外部環境温度への放熱効果との競合により生じたものと推察される。

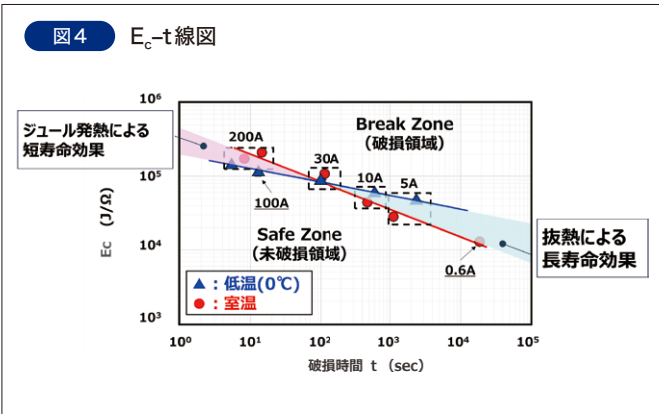
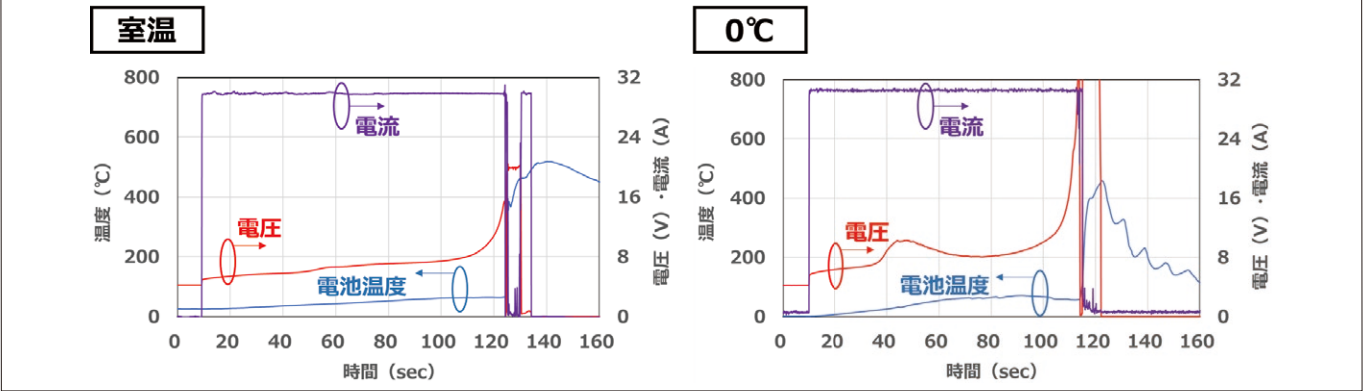


図5 突入電流30Aの温度・電圧・電流



また、評価セルでは約30A付近を境界として温度依存性に顕著な差異が確認された。図5に各温度の突入電流30Aにおける温度・電圧・電流を示す。

破損時間とEc値がほぼ同等となる30A条件結果について詳細に解析した。室温では電流印加後、電圧、および温度が単調に増加する挙動を示した。いっぽう、0℃条件では電圧が一時的に上昇した後に低下し、電池温度は、微小な変動を伴いながら上昇する傾向が見られた。これらの挙動は、低温環境下においてジュール発熱により電解液が上昇し、内部抵抗が低下することで電圧が一時低下し、その後は印加電流により温度上昇が進行するいっぽうで、冷えた外気による放熱に均衡する状態を反映したものと考えられる。すなわち、同じEc値や破損時間であっても、破損に至る過程は環境温度により異なることが明らかとなった。

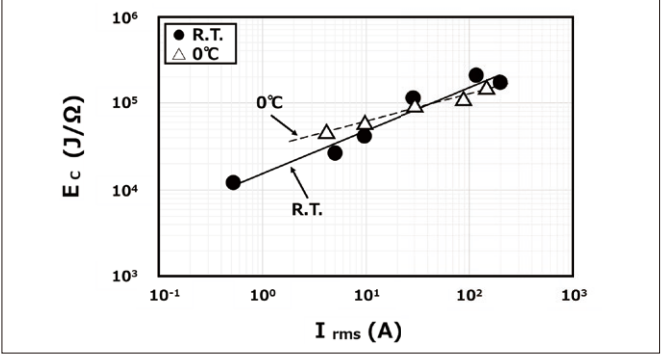
以上の結果は、電池の安全設計において、室温条件のみならず低温など実使用環境温度を考慮した温度領域にて、未破損領域の評価が不可欠であることを示している。

3.2 Ec値の活用

Ec値は電池設計および安全性評価にも活用できる。図6に実効電流値IrmsとEc値の関係を示す。

電池破損に至るエネルギーは、同一の電流条件であっても試験温度で異なり、高電流領域では、室温と比較して低温環境はよ

図6 Ec-Irms線図



り低いEc値で破損に至ることが認められた。したがって、電池の安全性を適切に評価するためには、実際の使用環境を反映した温度で試験を実施することが重要である。

また、Ec値と実効電流値との関係を利用することで、電池破損を引き起こす臨界電流を推定することが可能となる。

つまり、推定された電流を基に、充放電中の破損や、高負荷運転時など、電池がどのような使用状況下で破損に至ったのかを推定することが可能となる。このように故障要因を電流から解析することで、破損メカニズムの解明や効果的な対策立案を行うことができ、電池開発の効率化に貢献するものと考えられる。

本研究では、内部短絡発生時における外部からの突入電流を考慮した新しい内部短絡評価手法であるCISC試験を提案した。本手法により、従来の内部短絡試験では評価が困難であった並列接続環境における電流流入現象の再現を可能とした。さらに短絡部に投入されるエネルギー量をEc値として定式化することで、電池の破損挙動の定量的評価も可能にした。

また、Ec値は電池破損メカニズムの解析や故障原因推定に有効であり、安全性向上を目的とした設計指針の構築に資する有用な指標であることを確認した。

今後は、本手法を次世代電池の安全性評価および熱マネジメント評価へ展開し、より高安全な蓄電池開発に貢献していく。

参考文献

- *1) 原田ほか：第65回電池討論会講演要旨集，2MH18(2024)。
- *2) 原田ほか：第66回電池討論会講演要旨集，2MH02(2025)。
- *3) 特許 第7812428号
- *4) T. Yokoshima et al. : J. Electrochem. Soc., 166(6), A1243(2019)。
- *5) K. Maeda et al. : ESCJ. ECS Meeting Abstracts, DOI: 10.1149/MA2018-02/7/493。
- *6) T. Yamanaka et al. : J. Power Sources, 4, 132(2019)。

- *7) IEC 62660-3, Edition 2.0, Annex C。
- *8) IEC 62660-3。
- *9) JIS C 8714:2017、携帯電子機器用リチウムイオン二次電池の安全性試験。
- *10) JIS C 8715-2:2019、産業用リチウム二次電池－第2部：安全性要求事項。
- *11) UL1642。
- *12) SAE J2464。