

E-Book

## E-mobility : 電気自動車と燃料電池車の リークテスト



BEV/PHEV/FCV の産業規模での生産におけるテスト作業 :  
駆動用バッテリー、電気モーター、燃料電池の製造のために

# 目次

序 .....	4
はじめに .....	5
<b>1 未来を担う電気モビリティ</b> .....	<b>7</b>
<b>2 BEV/PHEV の核心をなす駆動用バッテリー</b> .....	<b>8</b>
2.1 バッテリーセルからバッテリーモジュールへ、そしてバッテリーパックから 駆動用バッテリーへ .....	8
2.2 火災のリスクと熱暴走 .....	9
2.3 バッテリーセルの納入時テスト .....	11
2.4 バッテリーモジュールとバッテリーパックの耐リーク性 .....	11
2.5 バッテリー寿命の確保 .....	12
<b>3 バッテリーセルのテスト方法</b> .....	<b>12</b>
3.1 各種セルタイプの不具合モデル .....	13
3.2 セルタイプによるリークレートの要件 .....	14
3.2.1 堅固なケースのセル（角型セル、ボタン型セル、丸型セル）に求められる リークレート .....	14
3.2.2 パウチセルに求められるリークレート .....	15
3.3 セルハウジングの事前テスト .....	16
3.4 充填済みバッテリーセルのリークテスト .....	18
3.4.1 電解液溶液を用いた直接のリーク検知 .....	19
3.4.2 圧力方法やヘリウムボンピングよりも優れた直接検知 .....	20
<b>4 バッテリーパックハウジングの要件</b> .....	<b>21</b>
技術スポット 1：IP67 - リークレート限度値を決定するハウジングの材質 .....	22
4.1 真空チャンバーまたはアキュムレーションチャンバーでのハウジングの 事前テスト .....	26
4.2 自動ロボットスニファーリーク検知 .....	27
技術スポット 2：ロボットスニファーリークテストで多量のガス流量が 重要となる理由 .....	30
4.3 フォーミングガスを用いた手動スニファーリーク検知 .....	32

<b>5</b>	<b>冷却コンポーネントの耐リーク性</b> .....	<b>32</b>
5.1	グリコール/水または冷媒による冷却 .....	32
5.2	冷却回路コンポーネントの漏れ防止要件 .....	33
5.3	バッテリー取り付け時のスニファーリーク検知 .....	34
<b>6</b>	<b>燃料電池電気自動車（FCEV）とそのコンポーネント</b> .....	<b>35</b>
6.1	燃料電池用のバイポーラプレート .....	36
6.2	バイポーラプレート向け冷媒ループ .....	38
6.3	バイポーラプレートの水素リークのテスト .....	39
6.4	ライン末端での燃料電池スタック全体のテスト .....	39
<b>7</b>	<b>水素タンクおよびライン</b> .....	<b>40</b>
7.1	規格および浸透限度値 .....	40
7.2	浸透速度に基づくリークレート .....	42
7.3	水素タンク用アキュムレーションテスト .....	42
7.4	水素タンク用真空試験 .....	43
7.5	付属部品をすべて取り付けした完成済みタンクに対するスニファーリーク検知 .....	43
<b>8</b>	<b>電気および電子コンポーネント</b> .....	<b>45</b>
8.1	センサーおよびコントロールモジュール .....	46
8.2	電気駆動モーター .....	46
8.3	モーターハウジングの真空試験またはアキュムレーションテスト .....	47
8.4	水冷ジャケットのリークテスト .....	48
<b>9</b>	<b>INFICON について</b> .....	<b>49</b>
<b>10</b>	<b>自動車コンポーネントのリークテストについての追加情報源</b> .....	<b>50</b>
10.1	特定のリークテスト作業に関する資料シリーズ .....	50
10.2	インフィコンウェビナーのご案内 .....	51
	<b>法律上の表示</b> .....	<b>52</b>
	<b>連絡先</b> .....	<b>52</b>

## 序

代替駆動システムとその個別コンポーネントのリークテスト要件は、製品自体と同様に複雑です。主要コンポーネントとしては、バッテリー（電解液を充填）、媒体（水／グリコールまたは水素）回路、電気部品（高電圧／電流）などがあります。これらは、製造時の品質保証に対して（したがってリークテストに対しても）非常に厳しい要件を突きつけます。

Robert Bosch Manufacturing Solutions GmbH は、長年にわたり高精度リークテスト技術に関わってきました。そこで得られた重要な知見の一つは、適切なテスト方法を選択するにあたって最初の方向性を決めるのは、熱力学の物理的原理やシミュレーションなどの理論的考察だということです。しかし究極的には、それだけでは十分ではありません。例えば、液体がリークし始める穴のサイズの問題に答えるだけでも、けっして些細なことではありません。これに関しては、穴の形状と材質、さらに温度、圧力、粘度などの熱力学的な境界条件が、重要な役割を果たします。

テストする実際のリーク限度値だけではなく、製品品質の規格あるいはその他の考慮事項によって指定されているかどうかにかかわらず、適切なテスト方法も選択する必要があります。リークテスト費用についても、必ず評価する必要があります。最初のステップとしては、圧力降下や流量リークテストなどの圧縮空気をベースとした、簡単で安価な方法がよく用いられます。

しかし、本書で明らかとなるのは、- これは私自身の経験からも確認されることですが -、テストするリーク限度値の関係上、微量ガス分析が必要とされる傾向にあるということです。本書で紹介する新しいテスト技術の中には、経済的なソリューションもあります。これは、とりわけサイクルタイムと工程能力に関する要件のある産業規模での生産に適しています。

この E-Book では、リークテストにおける実際の一般的な課題に加え、多様なテスト技術や、重要な体験例についても取り上げます。また、代替駆動システム分野に関する優れた洞察にも触れています。

Dr.-Ing. Dipl.-Phys. アレクサンダー・シュトラットマン

シュトゥットガルトにて、2021年3月、Robert Bosch Manufacturing Solutions GmbH

## はじめに

### リークテスト : 駆動用バッテリーと 燃料電池の製造に不可欠

E-mobility は、毎年その重要性を増しています。バッテリー駆動の電気自動車とプラグインハイブリッド電気自動車の台数が増えるにつれて、必要となる駆動用バッテリーの数も増えます。こうした中、自動車メーカーとサプライヤーにとって、一定の品質を確保することが重要な課題となります。燃料電池電気自動車（FCEV）でも、駆動する電気モーターに動力を供給するバッテリーが必要です（ただし、バッテリー容量は大幅に小さくなります）。いずれにせよ、FCEV の水素タンクと燃料電池には入念なリークテストが不可欠です。駆動用バッテリーの製造においては、関連する全コンポーネントの一貫したリークテストが重要になります。ゼロエミッションの代替駆動の時代も、消費者は自動車火災を望んではないからです。また、必要なパワーと航続距離を維持するために、わずか数年で高価なバッテリーを新たに購入する



ハイブリッド車におけるリチウムイオンバッテリー

ことも難しいと考えられます。駆動用バッテリーの全製造工程においては、いかなる場合にも、バッテリーセル内の電解液のリークや、水（たとえ湿気であっても）との接触が生じないことが重要です。水がセルの電解液と反応し、フッ化水素酸が生成される危険があるからです。さらに、ショート危険があるので、水が外部からバッテリーモジュールまたはバッテリーパック内に浸入することがあってはなりません。また、バッテリーの過熱は厳禁ですので、駆動用バッテリーの冷却回路にも漏れ防止対策を講じ、冷媒の損失を防ぐ必要があります。

駆動用バッテリーは潜在的な危険が伴うと同時に、BEV（バッテリー式電気自動車）/PHEV（プラグインハイブリッド電気自動車）の成功にとって決定的に重要な消耗部品でもあります。いずれにせよ、FCEV 向け水素技術の分野では、安全性と耐リーク性が不可欠です。長期的に顧客の要望に応えようとする代替駆動システムのメーカーにとって、生産工程における安定したリークテスト方法は欠かすことができません。重要なのは品質保証です。



トヨタの燃料電池車

本書は、BEV、PHEV、FCEVの産業規模での生産におけるどの工程でどのような要件が存在し、各用途に対してどのリークテスト方法が適しているのかについて、概要を詳しくまとめたものです。

考察の結果明らかになったことは、代替駆動コンポーネントの本質的な気密性を確保できるのは、最新のトレーサガス法だけだということです。

## 1 未来を担う電気モビリティ

2019年、BEVおよびPHEVの世界販売台数は、それまでの新記録だった2018年と比較して40%増となる210万台超に達し、記録が塗り替えられました。これは、パリに本拠を置くOECDの組織、国際エネルギー機関(IEA)の「世界のEVの展望2020」で挙げられている数字です。ゼロエミッションモビリティへの動きは、とりわけ政治レベルで要望・奨励されており、気候に関する公的目標、あるいは明確な割り当て制度によって推進されています。他方、例えば中国では、2019年に購入者向け助成金がほぼ半額になりましたが、高額な助成金がなくても電気自動車が支持されています。世界中の全BEV/PHEVの約47%を中国が占めており、続いて欧州、米国の順となっています。2019年には世界の乗用車市場が全体的に弱含みとなりましたが、電気自動車は明らかな増大傾向を示しましたが、例えば中国では、2019年のBEV/PHEV車は乗用車の全登録台数の4.9%に達し、欧州でもこの市場シェアは3.5%となりました。2020年も、似たような数字となりそうです。新型コロナウイルスにより、世界の乗用車市場は減速しつつありますが、BEV/PHEVの販売台数は、増加とはいかないまでも、少なくとも現状維持となっています。

米国の自動車メーカー各社も、電気自動車市場の成長を後押ししています。BEVとPHEVの生産能力への投資に加え、リチウムイオンバッテリーの社内製造もますます大きな役割を果たしています。例えば、General Motors社と韓国のLG Chem社の

合併会社であるUltium Cells社は、現在オハイオ州ローズタウン(米国)にリチウムイオンバッテリー製造工場を建設中です。また、同じく米国のテネシー州スプリングヒルの工場は、電気自動車の生産設備を備えたGeneral Motors社の3番目の工場です。Ford社の新CEO、ジム・ファーリーも、同社の電気自動車生産台数の急成長を踏まえ、柔軟性を高められるよう、独自のバッテリーセル製造設備の建設を検討していることを公表しています。BEVの先駆者であるTesla社は、しばらく前からバッテリーセルの自社製造を開始していますが、それでもネバダ州スパークス近郊(米国)にある同社の巨大ギガファクトリー1は、現在やっと計画される最終的な製造能力の30%に届いたばかりです。

新技術への道を開きつつあるもう一つのトレンドは、バッテリー容量あたりの価格が下落し続けていることです。1キロワット時の保存容量の費用は、2010年には1,100米ドルでしたが、現在ではわずか156米ドルとなっています。それと同時に、BEV車とPHEV車に取り付けられるバッテリーの合計容量も増えています。電気小型商用車の全クラスを平均すると、2018年には37kWhでしたが、現在では44kWhとなっています。ほとんどの市場で、現在、純粋なバッテリー電気駆動の乗用車の保存容量は50~70kWhの範囲内となっており、それに応じて航続距離も拡大しています。

純粋なバッテリー電気駆動と並んで、燃料電池も再び脚光を浴びています。FCEV車の主要なエネルギー保存システムは、水素タンクです。燃料電池では、運ばれる水素は大気中の酸素と反応し、

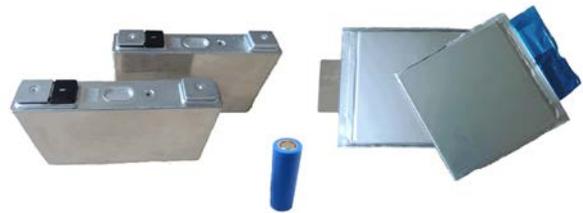
水となります。このときに得られる電気は、比較的小型の駆動用バッテリーに蓄えられ、電気モーターに送られて車両を駆動します。バッテリー電気 BEV と比べると、FCEV はエネルギーコストが高いものの、航続距離が長く、燃料補給もはるかに短時間で済むといった利点があります。こうして、大型乗用車や商用車にとって、燃料電池技術は魅力的な CO<sub>2</sub> フリーの代替駆動システムとなっています。

現在、とりわけホンダ、Hyundai、トヨタなどのアジアのメーカーは、この技術の未来を信じ、FCEV 乗用車を生産しています。例えば、発表済みのトヨタ MIRAI の新世代モデルは、2021 年以降、年間 3 万台が生産される予定ですが、これは現在の生産能力の 10 倍にあたります。サプライヤーの Robert Bosch 社も、ホンブルク/ザール（ドイツ）の拠点で燃料電池部品を製造しており、とりわけ大型車や商用車を駆動するための新しい「Bosch Stack」を 2022 年に市場に送ることを計画しています。同社では、2030 年には世界中の全電気自動車の 20% が燃料電池から駆動力を得ることになると予測しています。

## 2 BEV/PHEV の核心をなす 駆動用バッテリー

### 2.1 バッテリーセルから バッテリーモジュールへ、 そしてバッテリーパックから 駆動用バッテリーへ

従来の普通自動車の場合、車両の「心臓部」とされていたのは内燃エンジンでした。しかし BEV/PHEV では、電気モーターよりも駆動用バッテリーがこの機能を担うこととなります。ここ数年、バッテリーの価格が着実に下落してきたにもかかわらず、現在、駆動用バッテリーは車両全体の付加価値の 25 ~ 30% を占めており、この傾向は今後も続くものと思われます。駆動用バッテリーにおいて最小の製造ユニットとなるのは、電解液で



各種形状のバッテリーセル（左から右へ）：  
角型セル、丸型セル（円筒型セル）、ソフトパウチセル

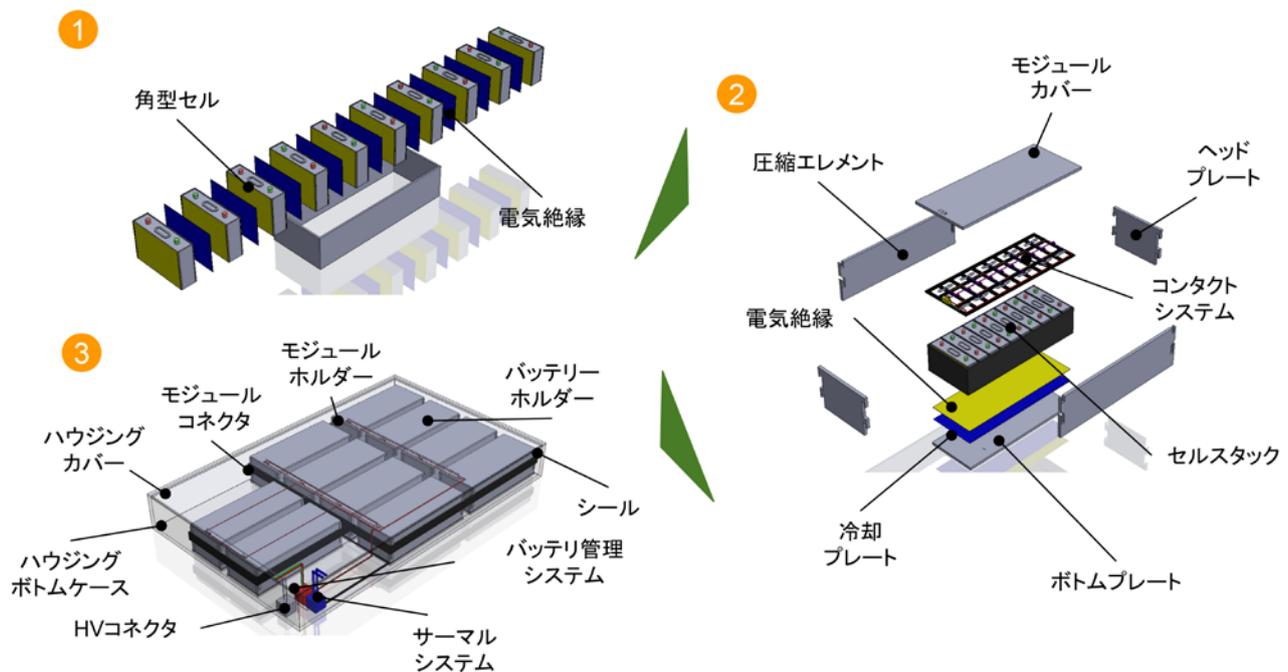
満たされたバッテリーセルであり、ここにエネルギーが蓄えられます。バッテリーセルの構造は、現在、3 種類あります。日常生活でよく目にするのは、円筒型の丸型セル（典型的には 18650 や 26650）です。丸型セルも角型セルも、安定したハウジングを備えています。パウチセルはパウチ

に似た柔軟なハウジングとなっています。

製造チェーンの最下流では、個別のセルを組み合わせることでバッテリーモジュールとなり、次にバッテリーモジュールを組み合わせることでバッテリーパックとなります。そして製造工程の最後で、複数のバッテリーパックが1つのハウジング内に収められます。生産のどの段階でも、バッテリーセル内の電解液が絶対に外部に漏れたり、水や湿気に触れたりしないようにすることが重要になります。こうした気密性に関する要件を満たすには、トレーサガスをを用いた最新の検査方法が必要です。

## 2.2 火災のリスクと熱暴走

バッテリーの電解液は燃えやすいので、バッテリーセルに対しては信頼性の高いリークテストを行う必要があります。電解液が漏れると車両火災が発生する危険があり、車両が全損する可能性さえあるからです。また湿気が浸透すると、ショートするリスクがあるだけではなく、バッテリーの寿命も短くなります。このほか、バッテリーセルが海外で生産されるという現状にも問題があります。アジアから長い距離を運ばれてくる間に、バッテリーセルが損傷することも珍しくないからです。



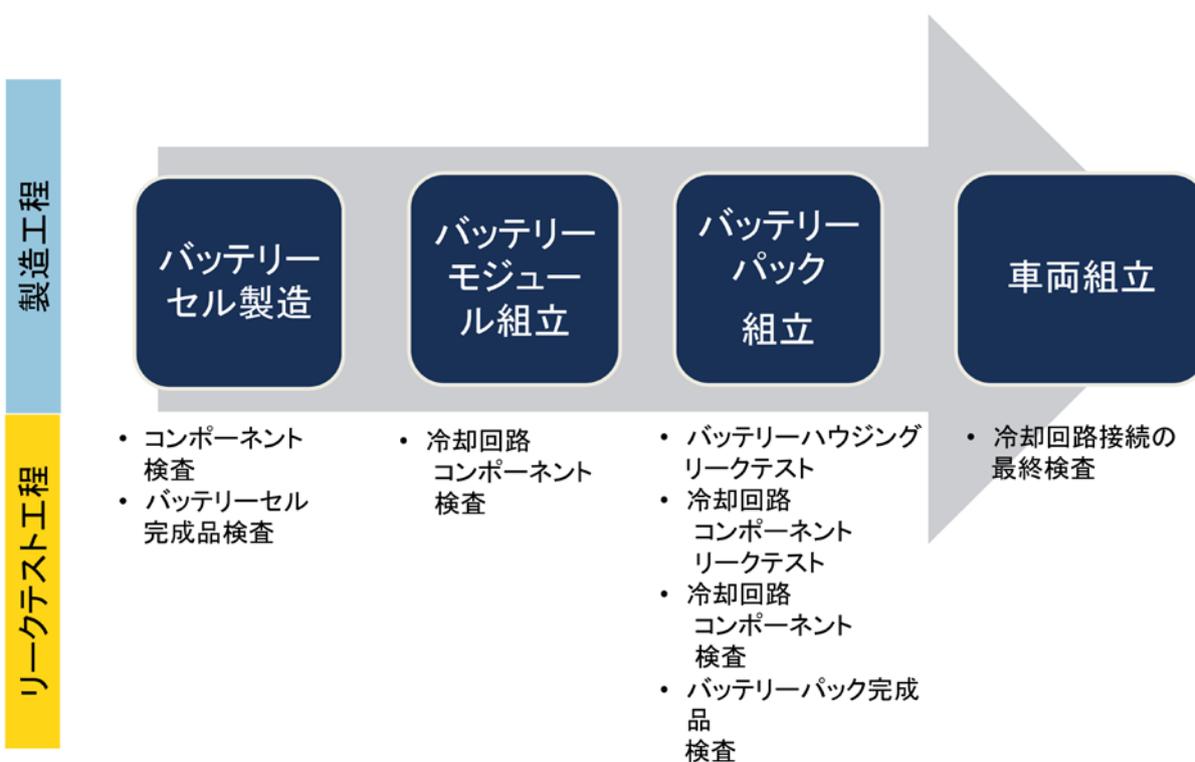
バッテリー生産におけるバリューチェーン（出典：アーヘン工科大学、PEM）

こうした損傷は、輸送中であっても致命的な事態を招く可能性があります。火災の危険があるため、リチウムイオンバッテリーとセルを旅客機の荷物として運ぶことは、既に禁止されています。荷物が燃えたために航空機が墜落したという経験から、様々な航空監督当局は、これらのバッテリーを飛行機で運ぶことについて禁止の方針を固めています。同時に、FedExのような輸送業者は、バッテリーセルが入った航空貨物コンテナの火災に的を

絞って、特別な泡を用いて消火システムを採用しています。船舶コンテナを完全に破壊してしまうような事故も、より発生頻度の高い事案として知られています。例えば、内部電極の局所的なショートによって1つのバッテリーセルの「熱暴走」が誘発されると、電解液の燃焼によって船舶コンテナ全体が1,100 °Cまで加熱され、コンテナが爆発する可能性があります。



リチウムイオンバッテリーに関連する深刻なリスクの一つが可燃性です



価値付加連鎖の各段階におけるリークテスト

## 2.3 バッテリーセルの納入時テスト

アーヘン工科大学（ドイツ）の電力変換技術研究所（ISEA）などに所属する多くの専門家や科学者は、ドイツのメーカーやサプライヤーが組み立て作業を行う前に不良セルを見つけられるよう、効果的な受け入れテストを構築することが非常に重要であると考えていますが、以上のような背景を踏まえると、それも驚くにあたりません。

## 2.4 バッテリーモジュールと バッテリーパックの耐リーク性

新たな価値を付加する後工程においても、多種多様なリークテストが必要となります。まずバッテリーセルを組み合わせることでバッテリーモジュールにし、次にこれをまとめてバッテリーパックにします。OEMの中には、既にこうした生産ステップを自社で実施しているところや、1次サプライヤーからバッテリーパック全体を購入しているところがあります。

一般的に、バッテリーモジュールとバッテリーパックには、どちらも複数の冷却チャンネルが組み込まれており、ここを水/グリコールの混合物または車両 AC システムの冷媒が流れます。通常、車両のバッテリーを制御するパワーエレクトロニクスも、

このどちらかの方法で冷却されます。こうしたシステムでは、耐リーク性が非常に重要になります。一つの理由は、バッテリーの冷却を長期的に確保する必要があること、もう一つの理由は、冷却媒体のリークはショートを招く恐れがあることです。



セルに耐リーク性が必要な理由：  
角型セル（左）とソフトパウチセル（右）

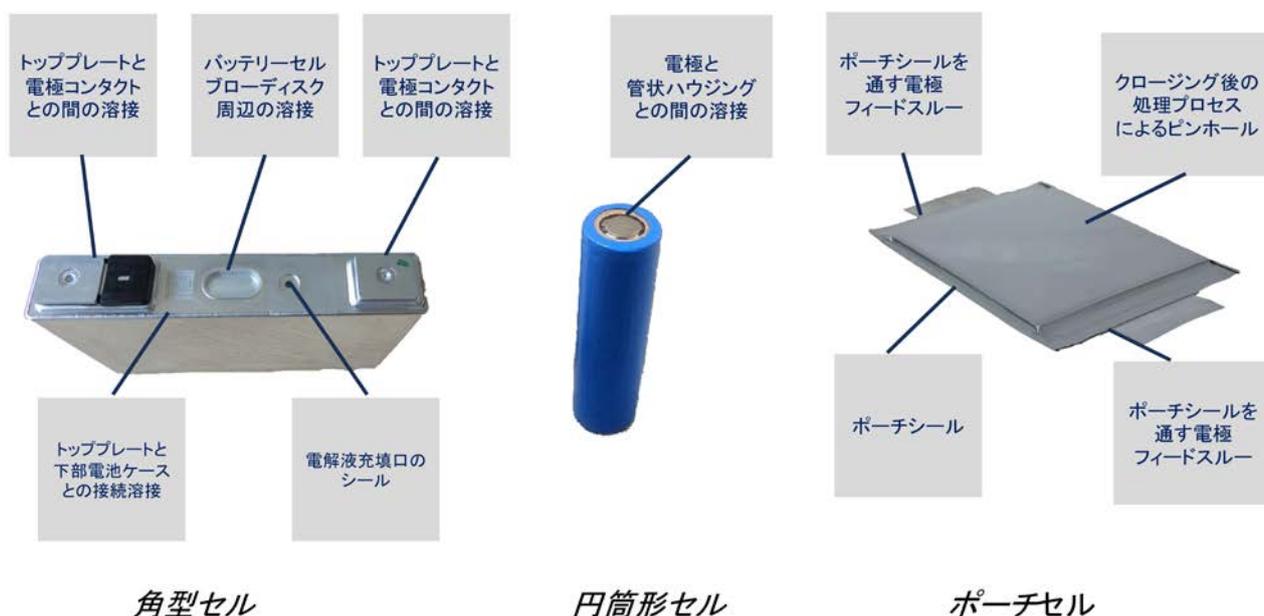
## 2.5 バッテリー寿命の確保

潜在的なショートや火災の問題よりもさらに重大なのは、BEV/PHEVの日常の使用における駆動用バッテリーの寿命短縮の問題です。バッテリーの能力低下が製品の欠陥によるものだとしたら、バッテリーの交換にお金を払う人はいるでしょうか。バッテリーをフル充電している車両が100kmの距離しか走れなかった場合、通勤者はどうしたらよいのでしょうか。バッテリーの寿命低下についてリスクを負担するのは、顧客なのでしょうか、ディーラーなのでしょうか、それとも自動車メーカーまたはサプライヤーなのでしょうか。いずれにせよ、高価な駆動用バッテリーの寿命が低下したら、すぐさま顧客の不満を招くこととなります。駆動用バッテリーの持続可能性目標については、現在、1万充電サイクル後に本来の保存容量の約80%を維持できるレベルと試算されています。

したがって、電気自動車を普及させていくうえでは、品質保証の面で新しい課題に取り組まざるを得ません。生産のどの段階でも、バッテリーセルの電解液が漏れたり、水や湿気に触れたりしないようにすることが重要になります。つまり、バッテリーの気密性を確保する必要があります。このレベルの気密性を自動車メーカーとサプライヤーが確保することは、トレーサガスをを用いた最新の高感度の検査方法によってのみ可能になります。

## 3 バッテリーセルの テスト方法

電解液が水と反応すると、フッ化水素酸が生成されてバッテリーセルが破壊されます。そのため、セルが寿命（多くのメーカーでは10年を想定）に達した時点における電解液内の水の濃度をできるだけ低くする必要があります。また全寿命を通じて、電解液の損失も最小限に抑えなければなりません。これは、電解液には有害な重金属が溶け込んでいるために必要となるものです。許容可能なリークレートの正確なレベルは、複数の要因（バッテリーセル内の圧力状態、要求されるセルの寿命、セルの容量など）によって左右されます。例えばソフトパウチセルの内部は、電解液が陽極と陰極によくしみ込むよう、またセルの機械的安定が確保されるよう、セルの形成後は5,000～50,000 Pa（絶対圧力）の負圧に保たれるのが主流となっています。堅固なハウジングに収められる角型セル、ボタン型セル、丸型セルの場合は、



各セルタイプごとの問題の発生しやすい箇所

通常は大気圧下で充填され、圧力差はありません。そのため、許容可能なリークレートは高くなります。一般にリークレートテストで使用される限度値は、 $10^{-7}$  Pa・m<sup>3</sup>/s 程度です。リークレート許容値が小さいことから、バッテリーセル製造時のリークテストでは、トレーサガスを用いた方法が最良の方法となります。

### 3.1 各種セルタイプの不具合モデル

3種類の構造（角型、丸型、パウチ）のセルは、それぞれ短所が異なります。例えば角型セルの場合、大気圧またはわずかな負圧（-2,000 Pa）でシールされます。初期化すると気体反応が生成されることが多いので、初期化後はセル内でわずかな超過圧力が生成されることがあります。ランダムなリークがあると、空気や湿気がセルに入り込み、電解液の放電を招く可能性があります。角型セルの場合、不具合パターンから、潜在的なリーク箇所がいくつか特定されます。例えば、カバープレートと2つの電極接点（およびここに溶接されたラプチャーディスク）との間の溶接シームや、カバープレートとハウジング下部との溶接シーム、あるいは電解液充填用の開口部のシールなどです。

丸型セルの場合、リークしやすい部分は、円筒型ハウジングと円筒端部に取り付けられた電極との間の圧着接続部です。柔らかい袋のようなパウチセルの場合、袋のガスケットからのリーク、2つの電極フィードスルー（この文脈では通常「電流コレクター」と呼ばれる）からのリーク、および針状の穴からのリーク（閉鎖後の処理プロセスなどによる）が生じる危険があります。

### 3.2 セルタイプによる リークレートの要件

それでは、各種バッテリーセル構造は、リークテスト時にテストする必要があるリークレート限度値に対して、どのような要件を課すのでしょうか。角型セルと丸型セルの場合、大気圧条件下で電解液を充填しても、セル内には少量の空気が残ります。このため、一定量の湿度の空気がセルに入り込むと、広い範囲で電解液と接触し、水が溶液に溶ける可能性があります。しかし、周囲の空気との相互作用は拡散によってのみ、つまり非常にゆっくりと、ほとんど存在しない圧力差によって起こります。

これに対してパウチセルの場合は、リークが起これると内側の負圧によって空気が内部に入り込みますが、水と接触する電解液の面積は狭いままで、微小なリークであればリークチャンネルのみに限定されます。

#### 3.2.1 堅固なケースのセル（角型セル、 ボタン型セル、丸型セル）に 求められるリークレート

10年経過し、電解液に溶け込んだ望ましくない水の濃度が可能な限り低い場合は、許容リークレート（許容最大限の水分含量とセル形状による）は  $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  の範囲内となります。真空内でテストする場合は、約 1 bar の圧力差を人工的に作り出すことで、同じサイズの穴でのリークレートを増大させます。したがって、通常、真空法では  $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  の範囲内でリークレートをテストします。



堅固なセル（角型または丸型）の2つの不具合モデル

### 3.2.2 パウチセルに求められるリークレート

パウチセルの場合、2種類の不具合モデルを区別して説明します。「グロスリーク」と呼ばれる大きな漏れがある場合、セルに入り込む空気は、セル内で必要となる負圧に悪影響を及ぼします。パウチセルの漏れ防止要件の一つは、10年経過しても負圧が存在すること、つまり内部圧力が100,000 Pa未満であることです。この結果、リークレート限度値には非常に厳しい要件が課せられ、わずか $10^{-10}$  Pa·m<sup>3</sup>/s以下とされることもあります。パウチセルの2つ

目の不具合モデルからは、それほど厳格ではない要件が導かれます。針状のリークが生じた場合、空気と電解液との接触面は比較的狭いため、電解液中の好ましくない水濃度はゆっくりと上昇します。寿命の10年が経過した後に水濃度が80 ppm未満であるためには、針状のキャピラリーリークの直径は1 μm未満でなければなりません。この場合、リークレート限度値は $10^{-9}$  Pa·m<sup>3</sup>/sの範囲内となります。

#### 詳細な SAE 論文

INFICON の研究部長ダニエル・ヴェツィヒは、「提案される廃棄限界規格で品質を保証するためのリチウムイオンバッテリーのリークテスト方法」という SAE 論文を公表しています。この論文は、リチウムイオンセルの各タイプごとのリークシナリオを検討し、INFICON での経験に基づき、それらをテストする場合はどのリークレート限度値が有益なのかを論じたものです：

[www.sae.org/publications/technical-papers/content/2020-01-0448/](http://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2020-01-0448/)



ソフトパウチセルの3つの不具合モデル

しかし、このパウチセルの2つの理論上のリークレート限度値は、実際には用いられません。なぜなら、直径が数  $\mu\text{m}$ （内部圧力と素材の組み合わせにより異なる）の限度を超えると、キャピラリーが電解液で「ブロック」されるからです。これは、キャピラリーが完全に電解液で満たされると、表面張力とぬれ挙動により、キャピラリーの端からリークが発生しないということを意味します。実際、この直径限度値よりも小さなリーク箇所からは、電解液が漏れることはなく、空気や湿気が入り込むこともありません。リークチャンネル端部は、水分のある空気と電解液との接触面積が非常に狭いため（直径数  $\mu\text{m}$  の円形部）、ごく少量の

水が拡散によって入り込んだとしても、非常に少量なので無視することができます。

### 3.3 セルハウジングの事前テスト

多くのバッテリーセルメーカーでは、既にセルのハウジングに対してリークテストを実施しています。角型セルと丸型セルの堅固なハウジングの場合は、真空引きをしてから100%ヘリウムを充填し、シールします。続いて、セルを真空試験チャンパー内に置き、チャンパーの真空引きをしてから、一定時間におけるバッテリーセルからのヘリウムのリーク量を測定します。リークレートを特定

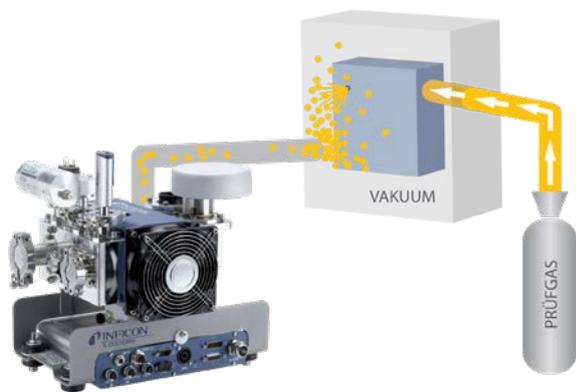
不具合ケース	最大許容穴 サイズ	対応する ヘリウム リークレート
湿気の吸収 < 80 ppm	(1 $\mu$ m)	約 $10^{-9}$ Pa/s
10年間で大きな圧力増加なし	(<< 1 $\mu$ m)	< $10^{-10}$ Pa/s
リークチャンネルのブロック → 大気中水分による浸透なし、 電解液のリークなし	(2~5 $\mu$ m)	約 $10^{-7}$ Pa/s

テストするリークレート限度値の逸脱

したら、セルからヘリウムを回収します。このハウジングテストでは、リークレート限度値は通常 $10^{-7}$  Pa $\cdot$ m<sup>3</sup>/sとされます。ヘリウムの必要量を減らすために、ドライエアまたは窒素をトレーサガスに混合し、ヘリウム濃度を下げることができます。



充填していない角型セルの事前テスト



真空チャンバー内でのヘリウムテストの図

リークチャンネル直径 (穴の大きさ)	真空試験での ヘリウムリークレート
10 $\mu$ m	$310^{-5}$ Pa <sup>3</sup> m/s
5 $\mu$ m	$210^{-6}$ Pa/s
2 $\mu$ m	$510^{-8}$ Pa/s

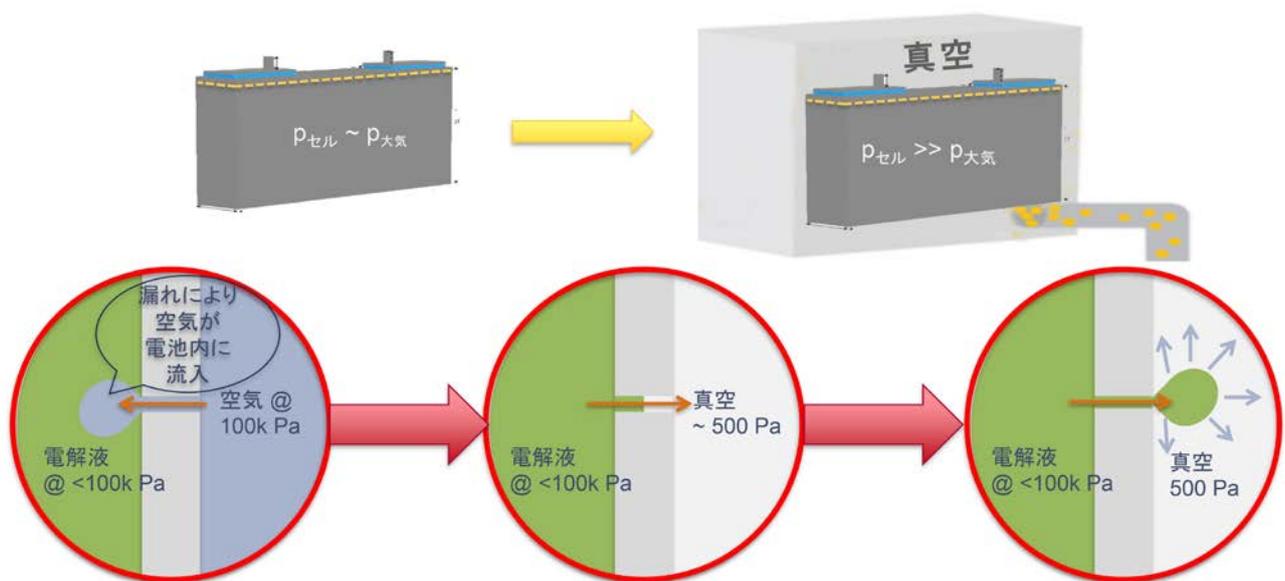
角型セルと丸型セルを真空内でテストしたときのリークチャンネル直径とヘリウムリークレートとの関係（セル肉厚は2 mmと仮定）

### 3.4 充填済みバッテリーセルの リークテスト

たとえ硬いケース付きのセルに対して事前テストを実施済みである場合でも、充填ノズルなどからリークする可能性は常にあります。ソフトパウチセルの場合は、いずれにせよ事前テストはほとんど不可能です。そこで、充填済みバッテリーセルの耐リーク性が必要となります。しかし、このテストは簡単な作業ではありません。これまで利用可能な方法は、感度が不十分だったり、信頼性に欠けるものでした。例えば圧力試験は、最良の場合でも検知可能な最小限のリークレートは  $10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  であり、その100分の1のリークレート  $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  が要求されるため、感度が不十分すぎます。さらに圧力

試験では、ごくわずかな温度変動があっただけでも結果が狂うリスクがつきまとい、とりわけ試験部品の容積が大きい場合はこれが顕著になります。また、いわゆるヘリウムボンピングは十分な感度がありますが、ボンピングによる試験が成功するかどうかは、バッテリーセルの場所とリーク箇所の正確な位置から決定的な影響を受けます。

INFICON では、特別に開発した検知方法により初めて対処方法を見つけました。この方法は完全に新しいもので、充填済みセル内の電解液溶液をトレーサガスとして使用します。



真空内でのガス状電解液のリークの直接検知

### 3.4.1 電解液溶液を用いた直接のリーク検知

セルの最終充填後であっても3種類すべてのセルの耐リーク性を確実にテストできるよう、INFICON はリチウムイオンバッテリーセルのあらゆるリークを直接検知する方法を開発しました。この新しい方法では、リークする電解液溶液がトレサガスの役割を果たします。こうして、INFICON ELT3000 テスターを用いると、ヘリウムと同等の  $1 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  のリークレート（数ミクロンのリーク直径に相当）にいたるまで、リチウムイオンセルのリークを特定することができます。硬いケースのタイプのバッテリーセルの場合、堅固な真空チャンバーが適しています。壊れやすいパウチセル向けには、INFICON はテスト中にぴったりとパウチセルにフィットするフレキシブルフィルム真空チャンバーを開発し、特許を



デリケートなパウチセルの損傷を防ぐ  
フレキシブルフィルム真空チャンバー

取得しました。キャリア層として、フォイルが真空時の損傷からセルを保護します。

真空が生成されると、潜在的なリーク箇所から電解液溶液がチャンバー内に漏れ出します。ここでの空気圧力はわずか数 100 Pa（絶対圧力）なので、真空チャンバー内ではすぐに溶液が蒸発し、ELT3000 の質量分析計によってガスとして検知することができます。ELT3000 は、一般的なすべての電解液溶液（DMC、DEC、EMC、PP など）を直接検知します。この装置は、開発部門における手作業の場合にも、自動車生産ラインにおける複数のセルの同時テストにも適したものとなるように設計されています。純粋な測定時間は約 10 秒で、ポンプダウン時間は使用するチャンバーとポンプのサイズによって異なります。



真空試験の前の手動でのロード

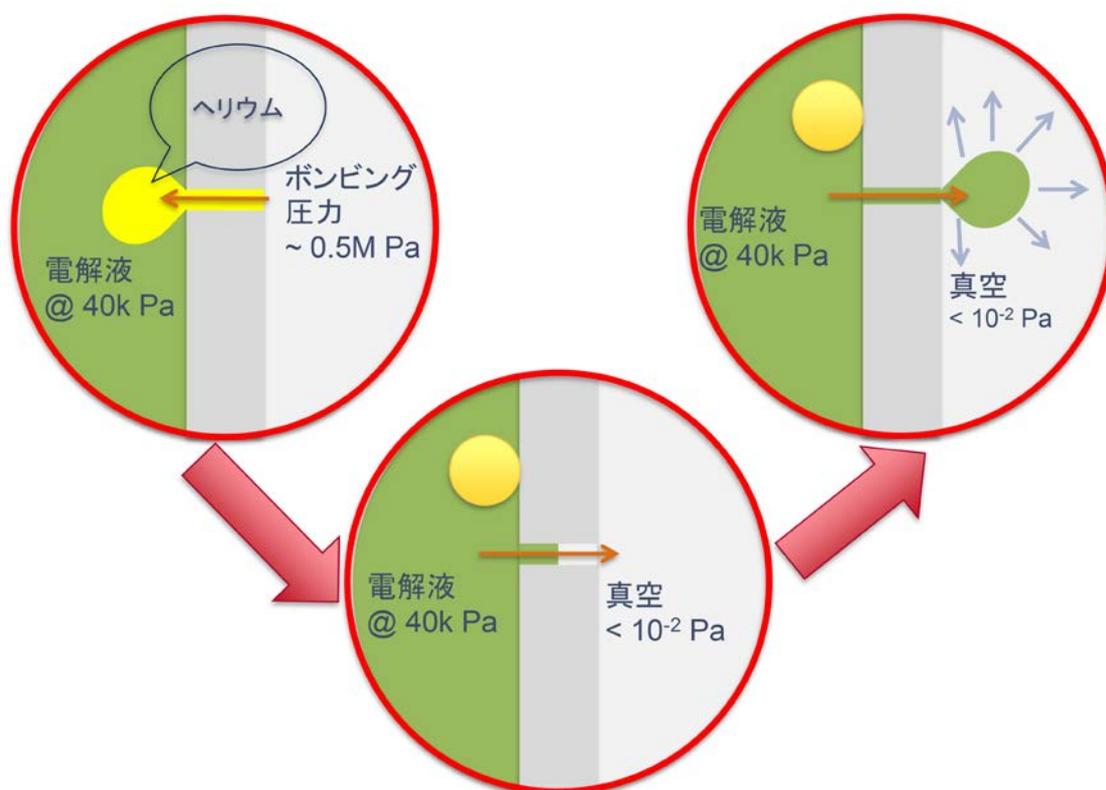
### 3.4.2 圧力方法やヘリウムボンピングよりも 優れた直接検知

質量分析計の技術を用いた INFICON の新しいバッテリーセルテスターは、従来の圧力測定方法よりも 1,000 倍小さなリークを検知することができます。これは、目標とされる 10 年のセル寿命にとって重要になります。

またこの特殊なバッテリーセル試験適用シナリオでは、ELT3000 はヘリウムボンピングなどの方法よりも、はるかに信頼性が高くなります。ボンピングの場合は、まずバッテリーセルを真空チャンバーに置き、ついで正圧のもとでヘリウム雰囲気

にさらします。これは、トレーサガスであるヘリウムがリーク箇所からセル内に入り込めるようにするためです。その後ヘリウムは、最終段階で再びリーク箇所から漏れるときに検知されます。

しかし、ボンピング方法が成功するには、正確なリーク箇所とバッテリーセルの位置が決定的となります。例えばリーク箇所がセルの下側にある場合は、最終真空試験ではトレーサガスを確実に検知することはできません。なぜなら、ヘリウムは軽いのでバッテリーセル内で上昇し、底部のリーク箇所からは漏れてこないこともあるからです。新しい直接的なテスト方法ではこうした問題は



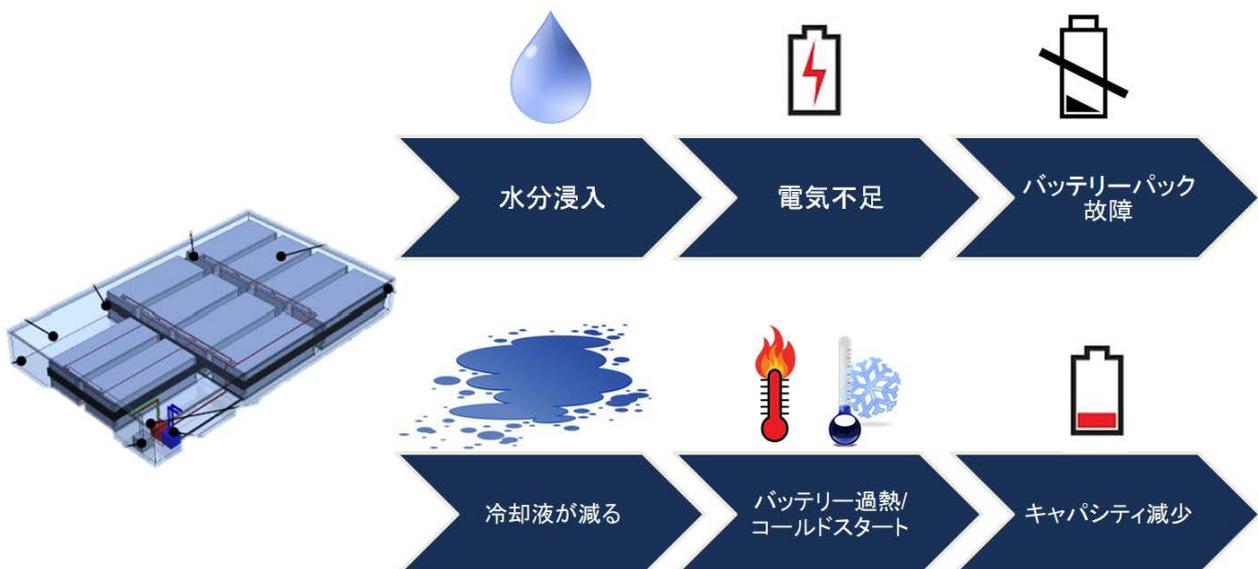
バッテリーセルのリークテストにはヘリウムボンピングが不適切である理由

生じず、角型セル、丸型セル、パウチセルを問わず、精度と信頼性を両立させながら、充填済みリチウムイオンバッテリーセルをテストすることができます。

## 4 バッテリーパック ハウジングの要件

バッテリーパックハウジングは、内部のモジュールとセルを水から保護する必要があるため、特殊な漏れ防止要件が求められます。車両のどこに配置されるのかに応じて、このハウジングはIP67や

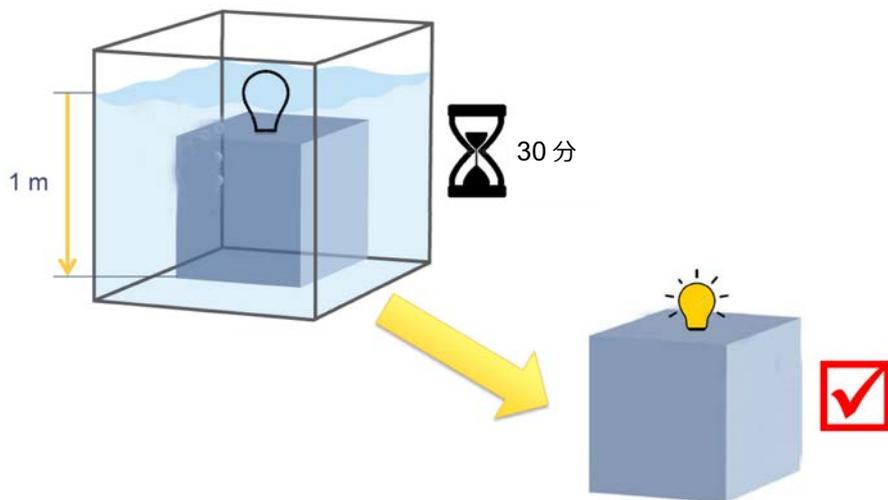
IP69Kなどの保護等級の要件を満たす必要があります。ハウジングが高圧クリーナーからの噴射にさらされる可能性がある場合は、IP69Kが必要です。ただし、車両の駆動用バッテリーの下にベースプレートを追加して取り付けるなら、バッテリーパックのハウジングは保護等級IP67の要件を満たせば十分となります。また、テスト実施時の特定のリークレート限度値は、ハウジングの材質にも左右されます。アルミニウムでは非常に厳格な要件が求められますが、スチールとプラスチックならそれほどではありません。



バッテリーパックの2つの不具合メカニズム

## 技術スポット 1 : IP67 - リークレート限度値を決定するハウジングの材質

リチウムイオンバッテリー、電源コントロールユニット、電気モーター、電子モジュールのどのハウジングでも、通電部品用ハウジングは、多くの場合保護等級 IP67 に基づいて設計されます。IP67 に準拠したテストでは、深さ 1 m での 30 分間の浸漬後、部品が完全に機能を維持している必要があります。これは、場合によっては、いかなる種類の水分も部品に浸入してはならないことを意味します。IP67 の要件をさらに詳しく検討すると、2 つのことが明らかになります。第一に、求められるリークレート限度値は、一般に最新のトレーサガス法を使用する場合のみテスト可能だということです。第二に、材質によって水滴の分離しやすさが異なる（したがってリークチャンネルからハウジングへの入り込みやすさも異なる）ので、ハウジングの材質自体が漏れ防止要件に大きな影響を及ぼすということです。



IP67 の定義

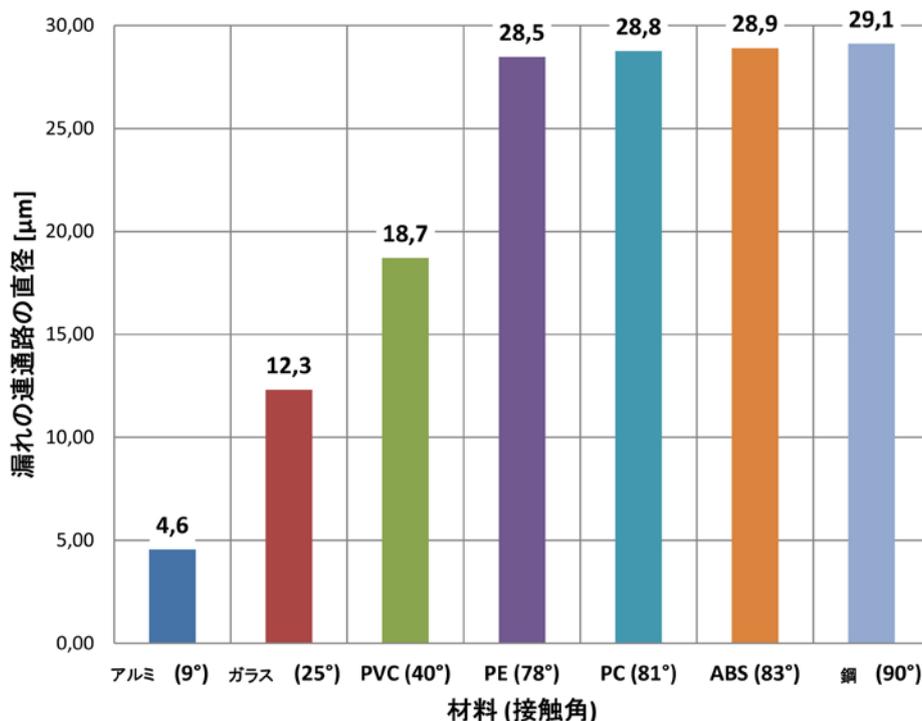
## リークレート限度値を決定するハウジング材質

所定の長さや直径のガラスキャピラリーを用いたテストにより、IP67 で求められる差圧 10,000 Pa において、いつ水滴がリークチャンネルに浸透するのかが示されます。ガラスのリークチャンネルが長さ 10 mm、直径 20  $\mu\text{m}$  だとすると、このサイズのリークは、ヘリウムのリークレート限度値  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.01 sccm) に相当します。この圧力条件の実験でこうしたガラスキャピラリーを使用すると、すぐに最初的水滴が現れますが、30 分以上経過しないと水滴は分離しません。理論上は 0.1 bar の水圧は、ガラスキャピラリー直径が 12  $\mu\text{m}$  で長さ 10 mm のリークチャンネルの表面に水を付着させる力と平衡状態にあります。しかし実験では、直径 15  $\mu\text{m}$  であっても、30 分以内にさらなる水滴が形成されることはありませんでした。

一般に、水はガラス表面によく付着するので、水滴はガラスからは比較的分離しにくいものです。さらにスチールや ABS などの他の材質では、水滴はガラスよりもやや付着しやすくなります。この場合、リークチャンネル直径がもう少し大きくなないと、リークによって差圧 10,000 Pa で水が



@110,000 --> 100,000 Paの水に対し、漏れの連通路による異なる材料の直径への制限



IP67 (10,000 Pa の超過圧力) でテストした場合の  
各種材料の水の浸入限界直径

ハウジングに浸入することはありません。スチールまたはABS製ハウジングにIP67の要件を満たす水密性が求められる場合には、約  $1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.06 sccm) のリークレート限度値でテストすることが推奨されます。アルミニウム製ハウジングの場合は、漏れ防止要件はさらに厳しくなります。この場合、リーク直径が非常に小さくないと、水滴はアルミニウムには付着しません。したがって、アルミニウム製ハウジングは、30分間のIP67のシナリオでの完全な水密性のためには、100倍も低いリークレート限度値、すなわち  $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.01 ~ 0.05 sccm) の範囲内でテストする必要があります。

### 数滴の水か、または皆無か

保護等級IP67では、所定の浸漬プロセス後も、機能が変化せずに完全であることが求められます。ただし、圧力差10,000 Paでの30分間の浸漬中、まったく水がコンポーネントに浸入しないことは、明確には求められていません。コンポーネントの機能には影響を及ぼさないことから、数滴の水の浸入は許容することをメーカーが決めた場合は、それに応じて、テストのためにそれほど低くないリークレートを選ぶことができます。例えば、コンポーネントのハウジングがABSまたはスチール製で、ポリマー製ガスケットを備えている場合は、リークレート限度値  $5 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (約0.3 sccm) のテストをすれば、孤立した水滴だけが浸入可能になります。しかし、完全な水密性のためには、 $1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (約0.06 sccm) でのテストが必要になります。



ガラスキャピラリー	220 x 33	150 x 43	75 x 27	40 x 22	15 x 30	[ $\mu\text{m} \times \text{mm}$ ]
空気漏れ量	56	9	1	0.1	0.001	[sccm]
空気漏れ量	$1.01 \times 10^{-1}$	$1.69 \times 10^{-2}$	$1.69 \times 10^{-3}$	$1.69 \times 10^{-4}$	$6.91 \times 10^{-6}$	[ $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ]
ヘリウム漏れ量	$9.51 \times 10^{-2}$	$1.58 \times 10^{-2}$	$1.58 \times 10^{-3}$	$1.58 \times 10^{-4}$	$6.42 \times 10^{-6}$	[ $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ]
滴下の間隔	~ 1	~ 1.5 – 2	~ 60	~ 120 – 180	---	[秒]
30分後の滴下数	~ 1800	~ 1200 – 900	~ 30	~ 15 – 10	---	

ガスのリークレートと水のリークレートの関係

## 圧力降下試験にまさるトレーサガス

実際には、約  $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.06 sccm) というリークレートは、理想的な条件下での従来の圧力降下試験の検知可能限界に相当します。そこで、生産時のリークテストでは、多くのメーカーがリークレート限度値を  $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  まで (1 sccm まで) としており、多量のリークをテストする場合は圧力降下試験を採用していますが、これは信頼性に劣る傾向があります。なぜなら、とりわけコンポーネント容積が大きい場合は、圧力変化の測定は、テストプロセス中のわずかな温度変動によっても大きな影響を受けるからです。これは、圧力降下試験では完全には補正できず、誤った肯定的または否定的な結果に直結してしまいます。したがって、 $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  以下 (0.06 sccm 以下) の範囲内のあらゆるリークレート限度値では、もっと信頼性の高い、トレーサガスベースの方法が適切です。この方法なら温度の影響を受けることはありません。特定のテスト方法の選択は、部品で許容可能な圧力差にも依存します。保護等級 IP67 に適合するように設計された部品の多くは、10,000 ないし 11,000 Pa という小さな圧力差にしか耐えることができません。それ以上の圧力差があると、コンポーネントまたはガスケットが損傷してしまいます。

## 4.1 真空チャンバーまたは アキュムレーションチャンバーでの ハウジングの事前テスト

それに対して、組み立て前の鋳造アルミニウム製ハウジングなら、大きな圧力差にも耐えることができます。したがって、こうしたアルミニウム製ハウジングの耐リーク性の事前テストの場合は、真空チャンバーでのヘリウムによるリークテストが適した方法となります。真空法の大きな利点は、高感度であることに加え、高速なことです。LDS3000のようなモジュール式のリークテスターを使えば、生産ラインでのサイクルタイムを非常に短くすることができます。真空法では、まず試験部品から空気を排出してから、トレーサガスのヘリウムを 100,000 Pa 以上の圧力で充填します。次に、真空チャンバー内の試験部品の周囲で真空を生成します。こうすることで、ヘリウムの漏れをすぐに検知することができます。または、最高 600,000 Pa の圧力を使用することもできますが、そうするとヘリウム濃度が 15% に低下します。いずれにせよ、真空法では圧力差が非常に大きくなるので、リークレート限度値を約 10 倍に高めてテストを実施する必要があります。ですから、アルミニウム製ハウジングの完全な水密性に関して真空チャンバー内でテストする場合は、リークレート限度値は  $10^{-6}$  Pa · m<sup>3</sup>/s (0.01 ~ 0.05 sccm) ではなく、 $10^{-5}$  Pa · m<sup>3</sup>/s (0.1 ~ 0.5 sccm) の範囲内で実施します。しかし、水の付着に関する

物質の特性と、対応するテスト時のリークレート限度値との基本的関係は、真空試験でも実質的に変わりません。スチールとプラスチックは最も要件が緩く、アルミニウムは非常に要件が厳しくなります。

テスト手順も、材質によって異なります。比較的容易に変形するプラスチックでできたハウジングの場合は、テストの最初で完全に空気を排出することはできません。ハウジング内の空気を完全に排出すると、はじめて内部が最大許容負圧に達します。次に、適度に空気を排出したハウジングにトレーサガスを充填し、最大許容正圧にします。トレーサガスのリークを測定するときは、空気を完全に排出したハウジングの場合よりもトレーサガス濃度が低くなることに注意する必要があります。コンポーネント内に存在する残留空気とヘリウムが混ざるからです。これに伴いリーク実測値が低くなるので、必ず必要な補正係数を適用する必要があります。

生産ラインでコンポーネントの耐リーク性をテストする最も迅速で正確な方法は、真空チャンバー内でヘリウムを用いてテストすることです。組み立て済みと組み立て前の両方のハウジングに対する完全なリークテストのもう一つの方法は、アキュムレーションテストです。ただし、サイクルタイムは少し長くなります。この場合、試験部品の内部からトレーサガスが漏れているかどうかを特定するためには、シンプルなアキュムレーションチャンバーを使用します。ファンを使って、漏れるトレーサガスを

チャンバー内に行き渡らせて蓄積させ、これを固定式センサーで検知します。こうしたテストシステムには、INFICON の LDS3000 AQ を使用します。トレーサガスとして使われるのは、ヘリウムか、またはコスト効率に優れたフォーミングガス（水素 5%、窒素 95% の不燃性混合物）です。検出下限値は  $10^{-6}$  Pa·m<sup>3</sup>/s (約 0.03 sccm) と低く、それに対応してチャンバーの死容積も小さいにもかかわらず、LDS3000 AQ を用いたアキュムレーションテストの試験費用は単純な空気試験と同じくらい安価です。したがって、アキュムレーションテストはプラスチックまたはスチール製ハウジングに適しています。アルミニウム製ハウジングの場合はもっと要件が厳しく、リークレート限度値  $10^{-6}$  Pa·m<sup>3</sup>/s (0.03 sccm) でテストする必要があるため、やはり真空試験が必要となります。



LDS3000 AQ リークディテクターを用いた  
アキュムレーションリークテスト

## 4.2 自動ロボットスニファーク 検知

例えば、メーカーが組み立て済みバッテリーパックのガスケットの完全性をテストしたい場合は、真空試験は選択肢とはなりません。なぜなら、差圧が大きすぎてガスケットが損傷し、取り付けられたコンデンサーが負圧によって破壊される恐れがあるからです。代替方法として、完成済みバッテリーパックや組み立て済みハウジングをテストするには、トレーサガスベースのスニファーク検知が推奨されます。そのためには、ロボットアームに取り付けたスニファークディテクターの測定チップを、ハウジング底部とカバーの間の全接続ポイントに沿って移動させるか、または試験者が手動で、ハウジングの問題の起こりやすい箇所へと測定チップを移動させます。大きく分けて、静的リークテストと動的リークテストがあります。静的リークテストは、スニファークチップを数秒間所定のポイントに置き、次の所定のポイントに移動させる方法です。動的リークテストは、溶接シームや取り付けたガスケットなどの表面に沿って、ロボットアームまたは試験者がスニファークチップを連続的に動かしながら移動させる方法です。

静的でも動的でも、とりわけロボットアームを用いた自動試験の場合、スニファーリーク検知ではスニファーチップと試験部品表面の間の安全距離を可能な限り小さなものにすることが望ましいといえます。なぜなら、スニファーチップは絶対にコンポーネントに触れてはなりません、しかし漏れているトレーサガスを確実に検知する必要があるからです。ここで制限要因となるのは、コンポーネントの許容誤差と、潜在的なリーク箇所へのアクセス可能性です。さらに、漏れているトレーサガスが風で吹き飛ばされないよう、ロボット試験システムを設置する場所は必ず覆いで囲う必要があります。ロボットステーションにはプレキシガラス製の安全エンクロージャーも設置し、生産エリアにおける空気の動きから保護するのが理想的です。



モジュール式の *LDS3000 plus XL* スニファーアダプターを用いたロボットスニファーリーク検知の図

スニファーチップの安全距離を可能最小限にすることに加え、動的ロボットスニファーリーク検知では、送り速度も非常に重要になります。したがって、高い信頼性とともなロボットリークテストを実施するには、多量のガス流量でスニファーリークディテクターがテスト対象の空気を吸い込むことが必須となります。従来型のスニファーリークディテクターのガス流量は、通常わずか 60 sccm なので、動的ロボットスニファーリーク検知はまったく不可能でした。

INFICON が提供する Protec® P3000XL と XL3000flex という 2つのリークディテクターは、3000 sccm という非常に多いガス流量が特徴です。この 2つは、高速ロボットリークテストのために専用開発されました。Protec P3000XL はヘリウムを使用し、約  $10^{-5}$  Pa · m<sup>3</sup>/s まで (0.01 sccm まで) の中程度のリークレート限度値の動的ロボット試験に適しています。静的ロボットスニファーの場合、試験部品までの距離を可能最小限にすると、実際にはこの装置は  $10^{-6}$  Pa · m<sup>3</sup>/s までのリークを検知します。しかし、XL3000flex はさらに感度が優れており、 $1 \cdot 10^{-5}$  Pa · m<sup>3</sup>/s (0.06 sccm) 未満の範囲内のリークレート限度値での動的ロボットスニファーに推奨されます。XL3000flex では、トレーサガスとしてヘリウムも、コスト効率に優れたフォーミングガスも使用できます。XL3000flex には BUS インターフェースも備わっているので、多種多様な生産環境に容易に組み込むことができます。

動的ロボットスニファーリーク検知は、完全に組み立て済みのバッテリーパックのリークテストに用います。まず、コンポーネント内の空気を一定程度まで排出してから、トレーサガスで 10,000 Pa だけ超過圧力を生成します。次に、ロボットアームによってバッテリーパックのガスケットに沿って自動的にトレーサガスセンサーをガイドし、トレーサガスのリークを検知します。このシナリオでは、リークチャンネルを構成するのは、ハウジング素材（通常はアルミニウム）とガスケットのポリマーです。これを踏まえ、ガスケットをテストするときのリークレート限度値も、この素材に典型的なリークレート間の平均とする必要があります。こうして、純粋なアルミニウム素材であれば  $10^6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.001 ~ 0.005 sccm) の範囲内のテストが必要な

ところですが、このテストシナリオでは  $10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.01 ~ 0.05 sccm) の範囲内のリークレート限度値で十分となります。



ロボットスニファーリーク検知の 2 つの制限要因

	排出圧力	事後充填 トレーサガス濃度	リークレート 補正係数 <sup>2</sup>
110,000 Pa (10,000 Pa)	排出なし	9%	0.09
	90,000 Pa 時	18%	0.18
120,000 Pa (20,000 Pa)	排出なし	17%	0.17
	80,000 Pa 時	33%	0.33
130,000 Pa (30,000 Pa)	排出なし	23%	0.23
	70,000 Pa 時	46%	0.46
140,000 Pa (40,000 Pa)	排出なし	29%	0.29
	60,000 Pa 時	57%	0.57
150,000 Pa (50,000 Pa)	排出なし	33%	0.33
	50,000 Pa 時	67%	0.67

1) 最大差圧

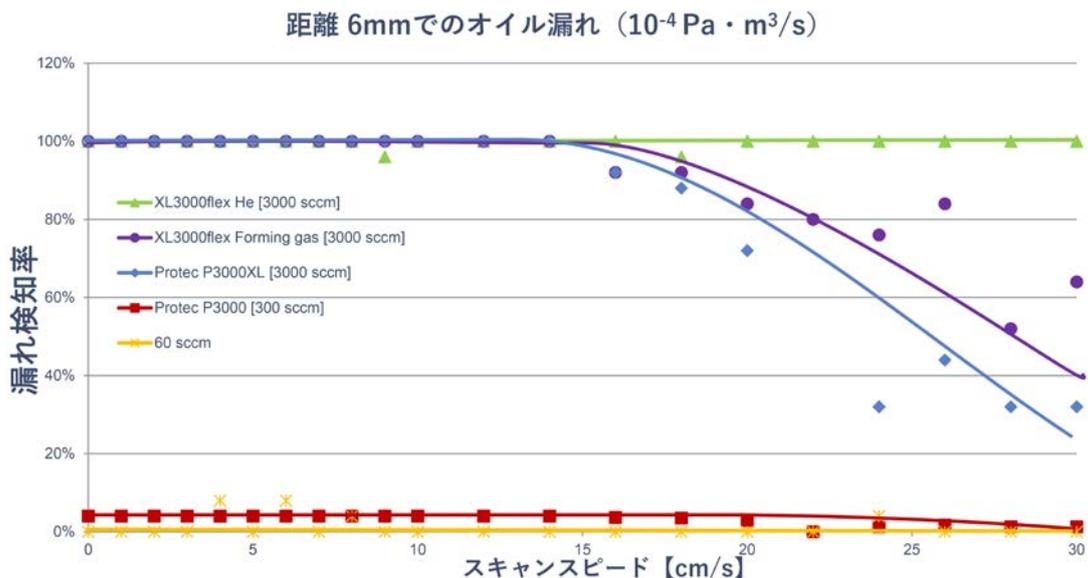
2) 表示されるリークレートに対する実際のリークレート

リークレートの測定に影響を与えるトレーサガス濃度

## 技術スポット 2 : ロボットスニファーリークテストで多量のガス流量が重要となる理由

動的スニファーリーク検知では、同時に2つのことを行う必要があります。1つは、試験部品にリーク箇所がないか、なるべく広範囲にわたって検査することです。もう1つは、これを可能な限り早い速度で実施することです。残念ながら、この2つの目標は両立するのが容易ではありません。なぜなら、リークレートを下げると、リーク箇所で漏れるトレーサガスが行き渡るのが遅くなるからです。

従来型の多くのスニファーリークディテクターでは、粒子流量わずか60～300 sccmの範囲内でガスがスニファーチップに吸い込まれます。それでも、スニファーチップを手で慎重に取り扱う場合や、テストポイントが数箇所しかない場合、あるいはスニファーチップをゆっくりと表面の近くで動かすだけの場合であれば、十分なこともあります。しかし、動的ロボットスニファーリーク検知では、はるかに要件が厳しくなります。



リークレート  $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  でのオイルリークの動的ロボットスニファーリーク検知

一連のテストは、例えばリークレート  $1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.06 sccm) でテストした場合に、プローブの走査速度（前進速度）がどのような影響を及ぼすかを示しています（試験部品からの安全距離 6 mm でのテストリーク  $1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  の例を使用、30 ページの図を参照）。結果は驚くべきものでした。こうしたシナリオでは、流量わずか 60 sccm で吸い込む従来型の市販のスニフアーリークディテクターは、まったく役に立たなかったからです。こうした装置を使って  $1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.06 sccm) のリークを見つけられる確率はゼロです。粒子流量 300 sccm の装置でも、この用途には適しません。

動的ロボットスニフアーリークテストの要件に応えられるのは、流量 3000 sccm 向けに特別設計された Protec P3000XL や XL3000flex などの装置だけです。ロボットアームを使って、こうした装置の測定チップを試験体の表面で約 14 cm/s 未満の速度でガイドする場合、リークレート限度値  $1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.06 sccm) までのリークがいつでも 100% 正確に検知されます。テスト速度が 14 cm/s を超えると、Protec P3000XL の検知確率はゆっくりと低下しますが、XL3000flex であれば速度 30 cm/s でも完全に確実にリークを検知することができます（ただし、トレーサガスとしてヘリウムを使用する必要があります）。

リークレート限度値をさらに低くして、 $1 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.006 sccm) でこのテストを実施すると、多量のガス流量が不可欠であることが確かめられます。ここでも、リークをいつでも 100% 検知できるのは、ガス流量 3000 sccm の装置だけです。ただし、このためには測定チップの前進速度を、Protec P3000XL の場合は 8 cm/s 以下まで、XL3000flex の場合は 10 cm/s 以下まで低下させる必要があります。

### 4.3 フォーミングガスを用いた 手動スニファーリーク検知

自動ではなく手動でスニファーリーク検知を実施する必要がある場合（例えばハウジングのパイロット生産中の場合）は、INFICON の Sensistor Sentrac などの装置も適しています。Sensistor Sentrac® は、比較的安価なフォーミングガスをトレーサガスとして使用しながら、 $10^{-5}$  Pa・m<sup>3</sup>/s（0.01 ~ 0.05 sccm）の範囲内という、ポリマー製ガasket付きアルミニウム製ハウジングの厳しい漏れ防止要件を満たすことができます。パイロット生産では手動で試験者がスニファーリーク検知を実施する場合でも、ライン生産では通常は Protec P3000XL や XL3000flex などの装置を用いた自動化が推奨されます。ハウジングの再加工が必要になった場合は、再び Sensistor Sentrac を用いた手動手順で結果を検査することができます。



Sensistor Sentrac - フォーミングガス用  
手動スニファーリークディテクター

## 5 冷却コンポーネントの 耐リーク性

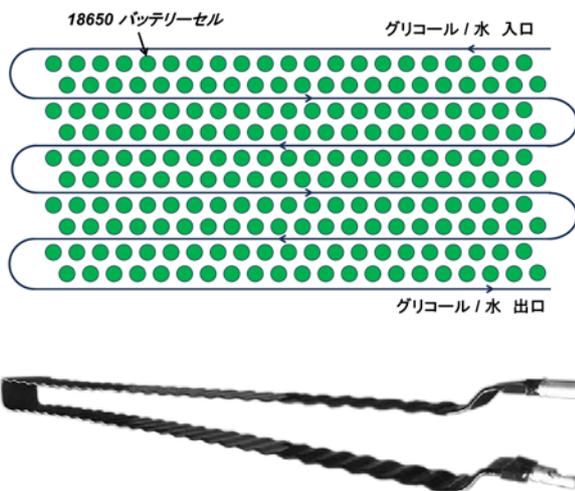
高い信頼性ととも冷却することは、駆動用バッテリーの動作安全性にも寿命にも影響を及ぼします。走行モード中と充電中は、バッテリー温度が上昇します。したがって、駆動用バッテリーのバッテリーセルと電子コントロールユニット（ECU）を確実に冷却することが重要になります。一般に、冷却には2種類のシステムが用いられます。パッシブな空気冷却と、アクティブな液体冷却です。液体冷却は、さらに液体媒体によって区別する必要があり、これには水/グリコール混合物や、R1234yfなどの冷媒があります。アクティブ冷却においてクーラントが通過する冷却チャンネルは、一般的にアルミニウムまたは銅でできています。冷却コンポーネントのリークテストの目的は、バッテリーの効果的な冷却を確保することだけではありません。水や冷媒がリークすると、バッテリーのセルやモジュール内でショートが発生する可能性があるからです。

### 5.1 グリコール/水または冷媒による 冷却

BEV車（Tesla Model S など）では、18650 タイプの丸型セルがバッテリーモジュールに組み合わされます。こうしたモジュールが16個で1つのバッテリーパックとなります。バッテリーモジュールを

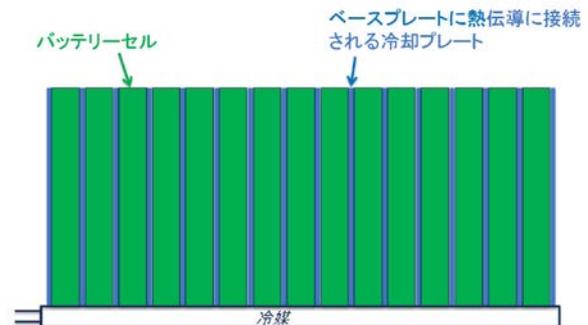
通じて水／グリコール混合物を運ぶ冷却コイルは、S字路によって丸型セルの多様な層を通過します。Model S のバッテリーの場合、こうしたモジュールが 16 個組み合わせられて 1 つのバッテリーパックとなります。こうしたバッテリー構造は、現在、中国でも非常に一般的です。

角型セルを採用したモジュール構造の例としては、BMW i3 があります。この場合、セルは多数の冷却プレートの中で層状に重ねられ、冷却プレート



丸型セルの冷却の図と冷却コイルの例

を接続したベースプレートには冷媒パイプが行き渡っています。バッテリーモジュールは車両の AC システムからのバイパスによって冷却され、こうして最終的には冷媒によって冷却されます。



角型セルの冷却の図

## 5.2 冷却回路コンポーネントの 漏れ防止要件

漏れ防止要件は、冷却媒体によって異なります。広く用いられている水／グリコール混合物の場合、リークレート限度値は  $10^{-4}$  Pa・m<sup>3</sup>/s (0.1 ~ 0.5 sccm) です。冷媒 (R1234yf など) の場合は、燃えやすいことから、リークレートは約  $10^{-6}$  Pa・m<sup>3</sup>/s (0.001 ~ 0.005 sccm) でテストする必要があります。リークレート限度値が  $10^{-4}$  Pa・m<sup>3</sup>/s (0.1 ~ 0.5 sccm) だと、単純な圧力降下試験によってコンポーネントの耐水性を特定したいと思われるかもしれませんが、しかし、残念ながら圧力降下試験はこの用途には適していません。冷却回路コンポーネント (冷却プレートや熱交換器など) は、その性質上、非常に温度変動の影響を受けやすく、温度が変化するにつれて、テストコンポーネント内の測定される空気圧力も変化するからです。温度が 0.1°C 変動しただけで、圧力降下試験の結果が 100 倍変化してしまう可能性があります。

反対に、単純なアキュムレーションチャンバーで冷却回路コンポーネントをテストする方が理にかなっていることが少なくありません。このプロセスでは、リークするトレーサガスが試験チャンバー内にたまるため、チャンバー内ではわずか数秒後に検知が可能になります。ヘリウムの代わりに、特に安価なフォーミングガス（窒素 95%、水素 5% の不燃性混合物）を使用することもできます。このテストに対応できるのは、新しいリークテスト装置である INFICON LDS3000 AQ です。この装置は、従来の複雑なヘリウム真空試験とまったく同じレベルの高い信頼性を備えた、単純なアキュムレーション方法によって流体のリークを検知します。この装置の検出下限値は  $10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  の範囲内で、しかも試験費用は単純な空気試験と同じくらい安価です。ただし、ヘリウムを用いた真空試験はアキュムレーションテストよりもサイクル時間が短いので、この点は大きなアドバンテージとなります。

### 5.3 バッテリー取り付け時の スニファーリーク検知

バッテリーセルを製造し、電解液を充填し、バッテリーモジュールに組み合わせ、さらにこれをバッテリーパックにまとめたら、今度はバッテリーパックを電気自動車に取り付ける必要があります。つまり、自動車メーカーも、冷却回路を含むリークテストの課題に直面することになります。駆動用バッテリーの取り付け後、OEM は、冷媒回路や水/グリコール回路への接続部に対してリークテストを実施する

必要があります。

冷媒を用いた冷却の正確なリークレート限度値は、仕様によって異なります。各冷媒に関する 1 年あたりの許容リークレート（通常は g/a または oz/yr 単位）は 2 ~ 5 g で、これはヘリウムのリークレートに換算すると  $10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.001 ~ 0.005 sccm) の範囲内に相当します。しかし、スニファーリーク検知の際に、各冷媒自体をトレーサガスとして使用できる（つまり冷媒のリークを直接検知できる）リークディテクターも存在します。こうしたマルチガスリークディテクターの一つが、INFICON Ecotec E3000 です。ユーザーは、該当するすべての冷媒のライブラリーから、状況に応じて必要な冷媒を選択することができます。スニファーリーク検知は、充填バルブを閉じたあとでも、充填バルブのリークをテストできる唯一の方法です。水/グリコール冷却回路のリークは、リークレート限度値を  $10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.1 ~ 0.5 sccm) としてテストする必要があります。これは、フォーミングガス（および Sensistor Sentrac）を用いたスニファーリーク検知、またはヘリウム（および

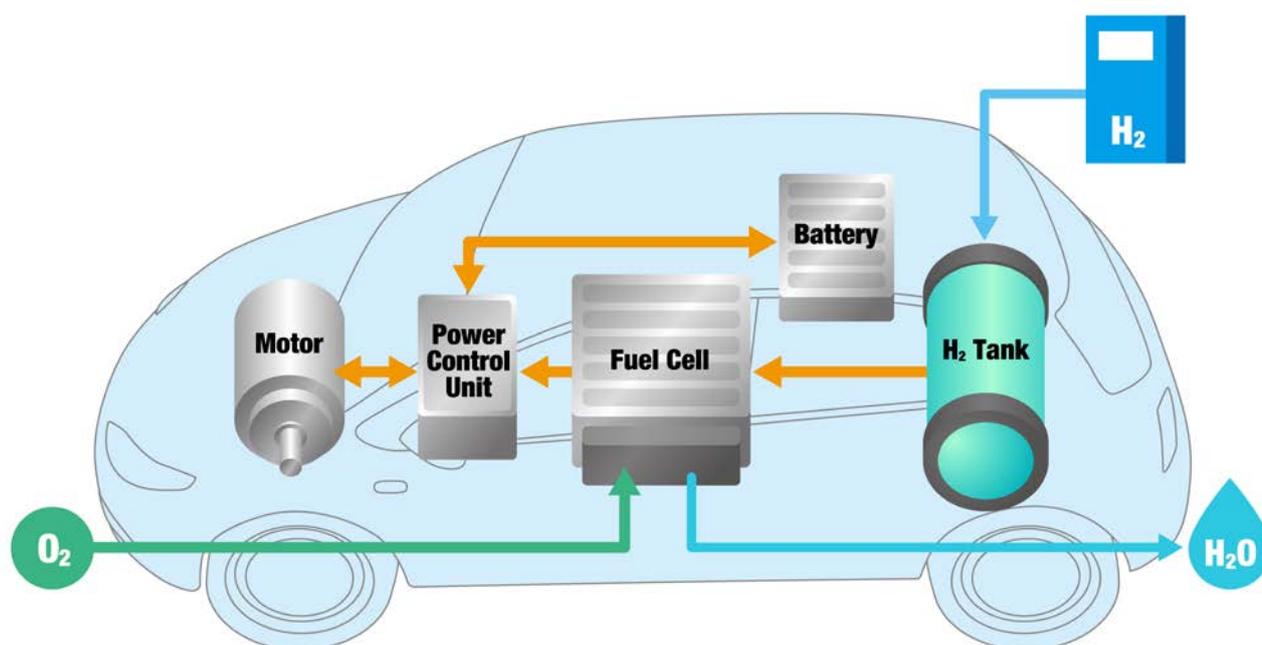


グリコールおよび冷媒検知用  
マルチガスリークディテクター、Ecotec E3000

Protec P3000XL や INFICON XL3000flex などの装置)を用いたスニファーリーク検知によって実施します。ヘリウムを用いた方法では、トレーサガス濃度は5%で十分です。Protec P3000XL と INFICON XL3000flex はガス流量が非常に多く、3000 sccm です。これは、自動スニファーリーク検知では必須条件となります(技術スポット2: ロボットスニファーリークテストで多量のガス流量が重要となる理由を参照)。生産条件下では、XL3000flex は P3000XL よりもさらに信頼性に優れています。この装置は苛酷な生産環境に適しており、処理速度が速く、トレーサガスの多いバックグラウンドでもリークを検知します。

## 6 燃料電池電気自動車 (FCEV) とそのコンポーネント

燃料電池電気自動車 (FCEV) の多くのコンポーネントは、バッテリー電気EV車と同じ漏れ防止要件が求められます。結局、どちらも同じ電気モーターで駆動されるからです。こうした電気モーターに電力を供給するリチウムイオンバッテリーは、機能的には同じでも、燃料電池車の方がはるかに小さく、保存容量も小さくなっています。FCEVでは、バッファバッテリーとしてだけ用いられるためです。その役割は、一時的に電気エネルギーを蓄えることで、燃料電池がいつでも最適な作動ポイントで作動できるようにすることです。駆動用バッテリー向けの各種テスト作業は、基本的



燃料電池車 (FCEV) のレイアウト

には、3. バッテリーセル向けテスト方法と4. バッテリーパックハウジングの要件の章に記載したものと同じです。電気モーター特有の漏れ防止要件については、8.1 電気および電子コンポーネントの章で取り上げます。

FCEVがBEVとは根本的に異なるのは、独自の電気エネルギーを生成する点です。FCEVではタンクで水素を運び、ここからガルバニ電池（燃料電池）で電気を生成します。この水素と大気中酸素との制御された反応からは、唯一の排出ガスとして、環境的にまったく無害な水蒸気しか生成されません。ですから、燃料電池車における電気部品とバッテリーのテスト要件はBEVやPHEVと同じですが、これに加えてFCEVでは、燃料電池コンポーネント向けに多くの漏れ防止要件が課せられます。FCEV車の水素タンク、水素ライン、水素循環に対してもリークテストが必要になりますが、これについては第7章 水素タンクおよびラインで取り上げます。

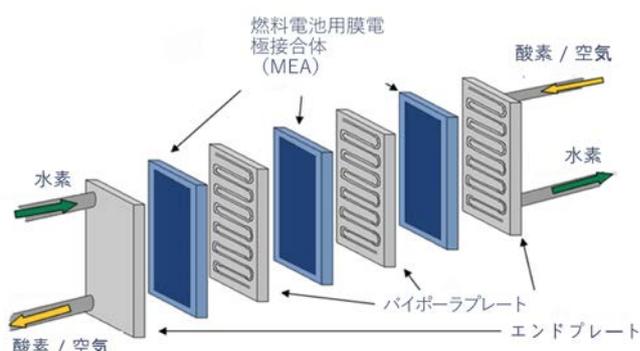


組み立て済み燃料電池スタック

## 6.1 燃料電池用のバイポーラプレート

燃料電池車の核心をなすのは燃料電池スタックです。燃料電池スタックは、2枚のエンドプレート間に挟まれた複数のバイポーラプレートで構成されます。各バイポーラプレートは、膜電極接合体（MEA）によって隔てられています。導電性のあるバイポーラプレートは、あるセルの陽極と他のセルの陰極とをつなぐ役割を果たします。各バイポーラプレートには、内部冷却ループと、プロセスガス水素および大気中酸素のための2つのキャビティがあります。このプロセスガスフローのキャビティから、プロセスガス水素と大気中酸素は、広い面積を越え、いわゆる流れ場を經由して、膜電極ユニットの膜に導かれます。対応する高温冷却回路の役割は、燃料電池システム全体にとって最適な処理温度を維持することです。

異なる不具合シナリオからは、異なるリークレート要件が得られます。冷却チャンネルの外側または内側への水素のリークは、典型的には  $10^{-5} \sim 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  の範囲内のリークレートで検査します。



燃料電池スタックのレイアウト



バイポーラプレート - 3種類の媒体のための  
3つのチャンネル

ただし、水素は幅広い濃度（空気中の水素濃度 4 ~ 73%）で引火しやすいという理由だけからいっても、原則として水素のリークレートはできるだけ低くする必要があります。したがって、リークレート限度値は 1 桁小さい  $10^{-8}$  Pa·m<sup>3</sup>/s でテストするのが妥当だと思われます。

燃料電池不具合の主要な 4 つの形態 :

- a. (可燃性である) 水素のリークまたは損失。
- b. 水素のリークに続く、その結果としての制御不可能な酸素との反応（陽極・陰極間のいわゆるクロスオーバーリークによる、またはガスケットから外側へのリークによる）。
- c. クーラントの損失。それに伴う効率の損失と燃料電池スタックの損傷。
- d. 冷却回路への水素のリーク。これは腐食作用があると同時に、冷却効率を悪化させ、場合によってはクーラント内の気泡によってポンプを損傷させます。

H <sub>2</sub>	水素漏れ	空気漏れ	冷却剤漏れ
	<b>水素流路から外へ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>燃料電池への供給不足</li> <li>可燃ガス濃度上昇</li> </ul>		<b>冷却管から外へ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>燃料電池の超過熱</li> <li>電氣的短絡</li> </ul>
	<b>水素流路から空気流路へ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>制御不能の水素と酸素の反応</li> <li>欠陥の悪化</li> </ul>		<b>冷却管から空気流路へ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>ガス流路の詰まり</li> <li>燃料電池への供給不足</li> </ul>
	<b>水素流路から冷却管へ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>冷却剤のガスバブル</li> <li>ポンプの腐食</li> <li>ポンプ破損</li> <li>燃料電池の超過熱</li> </ul>		<b>冷却管から水素流路へ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>ガス流路の詰まり</li> <li>燃料電池への供給不足</li> </ul>

燃料電池に関する不具合のメカニズム



各種燃料の可燃限界

## 6.2 バイポーラプレート向け 冷媒ループ

バイポーラプレートを通る高温冷却回路の冷媒は、ショート防止のため、導電率が小さくなければなりません。そこで通常、この場合の冷却液としては、脱イオン水と凍結防止用の添加剤が用いられます。この液体が冷却チャンネルからリークするのを防ぐために、リークテストのリークレート限度値は  $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  ( $0.1 \sim 0.01 \text{ sccm}$ ) の範囲内とすることが推奨されます。この程度のリークであれば、水自体によってふさがれるので、

液体の耐リーク性では、この桁にするのが普通です。バイポーラプレートのライン生産では、ヘリウムを用いた真空試験も選択肢となります。サイクルタイムが短くなり、処理量が多くなるからです。真空試験では、まず冷却チャンネルから空気を排出してから、ヘリウムを充填し、再びシールします。テストするバイポーラプレートを真空チャンバー内に置き、チャンバーを真空引きしたら、ヘリウムリークディテクター (INFICON LDS3000 など) を使って、冷却チャンネルからヘリウムが真空チャンバー内にリークするかどうかを検知します。もちろん、使用したヘリウムはテストプロセス終了後に毎回、回収することができます。

バイポーラプレートを通る高温冷却回路に加え、FCEV 車には 1 つ以上の低温冷却回路も備わっており、電気部品 (ドライブ、コンバータ、パワーエレクトロニクスなど) を  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  未満の温度範囲に維持しています。この回路では従来の水/グリコール

漏れ検査順番	1	2	3	4	5	6
防止する故障モード	外への水素漏れ	クロスリーク ・ 水素が空気流路へ ・ 空気が水素流路へ	冷却管への水素漏れ	外への空気漏れ	冷却管への空気漏れ	外への冷却剤の漏れ
典型的な漏れ量	<ul style="list-style-type: none"> <li>「できる限り小さく」</li> <li>典型的な漏れ量 <math>10^{-4} \dots 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}</math></li> <li>いくつかの文献では <math>10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}</math> まで求められる</li> </ul>					$10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

バイポーラプレートのテストシナリオ



燃料電池スタックの生産時のテストステップ

混合物が使われており、やはり液体の耐リーク性をテストする必要があります。

### 6.3 バイポーラプレートの水素リークのテスト

バイポーラプレートの水素のリークをテストするときは、真空法も用いられます。このためには、バイポーラプレートの水素キャビティをシールし、空気を排出し、ヘリウムを充填します。ついで、真空引きした真空チャンバー内で、リークディテクター（LDS3000 など）を用いて、 $10^{-7}$  または  $10^{-8}$  Pa・m<sup>3</sup>/s のリークレート限度値でヘリウムのリークを検知します。ヘリウムが検知されなければ、水素キャビティから冷却チャンネルの内外へのリークがないことが確実となります。リークが検知されたら、さらに原因調査をすることができます。この場合、真空チャンバー内での初期テスト後も、依然としてバイポーラプレートの水素キャビティにはヘリウムが充填され、シールされ

ていることが有利に働きます。しかし、バイポーラプレートの冷却チャンネルだけは、真空ポンプにつながれた状態です。これにより、LDS3000 を使って、ヘリウムが真空の冷却チャンネルに入っているかどうかを検知することができます。入っていないければ、最初に特定されたリークは、外側に向かっていることとなります。

### 6.4 ライン末端での燃料電池スタック全体のテスト

バイポーラプレートを燃料電池スタック全体に組み込んでから、ライン末端で水素リークのテストを実施します（ただし、それ以前の間段階でもテストは有益です）。組み立て済みバイポーラプレートに対するリークテストにおける典型的なリークレート限度値は、 $10^{-4}$  ~  $10^{-6}$  Pa・m<sup>3</sup>/s (0.1 ~ 0.005 sccm) の範囲内です。ただし個別のケースでは、リークレート限度値を  $10^{-8}$  Pa・m<sup>3</sup>/s まで低くすることも議論されてきました。こうした

組み立て済み燃料電池スタックに対するテストでは、やはりヘリウムをトレーサガスとして使用します。水素を用いてテストすると、意図せず燃料電池が作動して電気を生成する危険があるという理由だけからも、そうする必要があります。また安全上の理由からも、水素をトレーサガスとして使用するべきではありません。水素回路で多量のリークがあると、すぐに空気中の水素濃度が4%を超え、引火性混合物となる恐れがあるからです。燃料電池の（水素、空気、冷媒を運ぶ）媒体配分プレートや、その各種バルブ、ポンプなどのコンポーネント、水素循環システムに対しても、追加のリークテストが必要です。バイポーラプレートの膜電極ユニットでは、水素と大気中酸素が互いに完全に反応することはないので、水セパレーター通過後のガスは燃料電池内で再循環され、再使用されます。また水素を運ぶコンポーネントは、 $10^{-7}$  または  $10^{-8}$  Pa・m<sup>3</sup>/s といった可能な限り低いリークレートでテストするのが理想的です。



燃料電池スタックのスニファータテスト

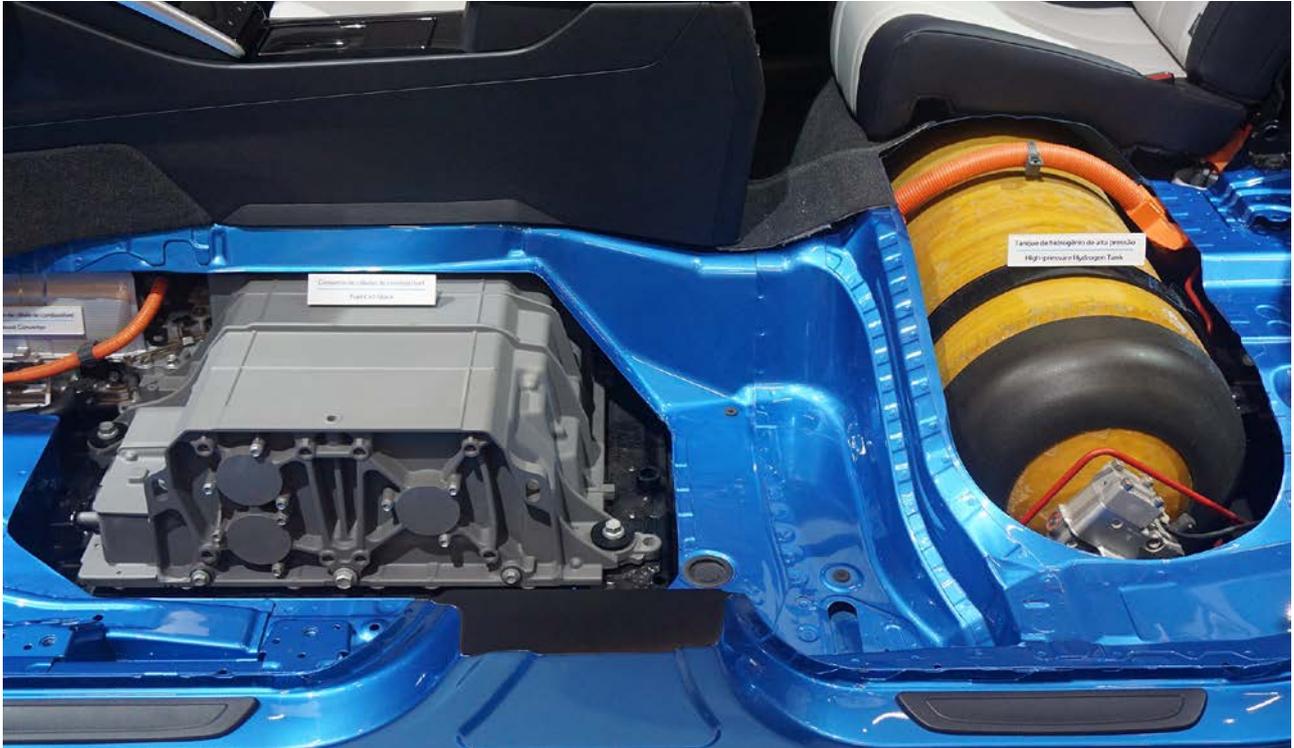
## 7 水素タンクおよびライン

### 7.1 規格および浸透限度値

燃料電池車に搭載される水素タンクは、通常、タイプ4と呼ばれる複合材料製タンクです。こうした加圧されたタンクを使用するのは、車両で大量の水素ガスを運べるようにするためです。タイプ4のタンクは、典型的にはカーボンファイバー構造によって強い強度が備わり、内側はポリマー層となっています。乗用車向けのタイプ4の加圧水素タンクは、典型的には最高70M Paの作動圧力に耐えられるように設計されており、バス向けのはるかに大型の水素タンクは、最高35M Paの作動圧力にのみ耐えられるように設計されています。量産仕様の燃料電池乗用車（トヨタ MIRAI など）には2つのタンクが備わり、それぞれ容量は約60ℓです。それに対し、水素バスで使用するタンクの容量は1,300～1,700ℓです。

燃料電池車の水素タンクの耐リーク性とリークレート要件は、こうしたタンクの最大浸透速度を定めた多くの国際規格から導かれます。国際規格には、ISO15869 B.16、EU406-2010 4.2.12.3.、ECE R134 5.3.3 などがあります。

ISO 15869 B.16 では、連続作動の場合、圧力35M Pa時（バスにおいて典型的）の水素ガスの浸透速度は、タンク容量1リッターあたり毎時2.8 cm<sup>3</sup>未滿と定められています。圧力70,000 kPa時（乗用車タンクの場合）の浸透速度は、タンク容量



トヨタ MIRAI に搭載されている水素タンク

1リッターあたり毎時  $2.8 \text{ cm}^3$  が許容されています。EU406-2010 4.2.12.3 規格では、連続作動時の浸透速度はタンク容量 1リッターあたり毎時  $6 \text{ Ncm}^3$  未満と定められています。

また、ECE R134 5.3.3. (c) 規格では、測定された浸透速度が  $0.005 \text{ mg/s}$  ( $3.6 \text{ Nml/min} = 3.6 \text{ sccm}$  に相当) を超えた場合、ローカルリークテストを実施し、どの個別のリーク箇所でも合計値が  $0.005 \text{ mg/s}$  ( $3.6 \text{ Nml/min} = 3.6 \text{ sccm}$ ) を超えないようにする必要があると定められています。

## 7.2 浸透速度に基づくリークレート

水素タンクの浸透速度は、リークテストにおけるリークレートと同じにする必要があります。容量 30 ℓ、圧力 70M Pa の乗用車の水素タンクの場合、ISO 15869 B.16 の浸透限度値にしたがって換算すると、ヘリウムのリークレート限度値は  $2.3 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (1.4 sccm) となります。同じサイズのタンクでも、圧力が 35,000 kPa の場合は、リークレート限度値はもっと低く、 $1.6 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (1 sccm) となります。EU406-2010 4.2.12.3. 規格では、30 ℓ の乗用車タンクの場合、リークレート限度値は  $5 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (3 sccm) と定められています。ECE R134 5.3.3. (c) によると、結局、最大許容リークレート限度値は  $6 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (3.6 sccm) となります。

しかし現実には、水素タンクは規格にしたがって（つまり  $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (1 ~ 3 sccm) の範囲内）のみテストされるわけではなく、多くの場合  $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.1 ~ 0.5 sccm) の範囲内のリークレートについてもテストされます。なぜなら、水素タンクに用いられる素材の実際の浸透性は、規格で要求される浸透性よりも 1 桁小さいことが多いからです。

## 7.3 水素タンク用アキュムレーションテスト

必要な付属部品とバルブを水素タンクに取り付けると、はじめてタンク本体はタンクモジュールと呼ばれるものになります。タンク本体を事前テストする場合は、ヘリウムを用いた真空リークテストも、フォーミングガスを用いたアキュムレーションテストも適しています。現時点では、生産個数がそれほど多くはない場合も多く、もっと複雑な真空試験の方がサイクルタイムを短縮できて重宝されることから、現在ますますアキュムレーションテストが大きな役割を果たすようになっていきます。このことは、とりわけバスの大型水素タンクに当てはまります。こうしたタンクは、典型的には容量が最大 1,700 ℓ であり、チャンバー容量 4,000 ℓ 以下のアキュムレーションチャンバーでテストします。トレーサガス費用を低くするために、このようなテストアイテムには比較的安価なフォーミングガスを充填しますが、圧力は 70M Pa とします。こうした 2 倍の圧力は、破裂試験にも適しています（ただし、事前に水を用いて実施します）。しかし、アキュムレーションテストでも高いトレーサガス圧力が必要です。そうしないと、比較的大きなアキュムレーションチャンバーでは、大幅に低いリークレートは検知できないからです。テスト圧力が高いため、アキュムレーションチャンバーには緊急用アウトレットが設けられており、超過圧力があると開くようになっています。

## 7.4 水素タンク用真空試験

処理量の大きなバス向け水素タンクを検査する場合や、乗用車向け小型タンクの耐リーク性を検査する場合は、一般にヘリウムを用いた真空試験も用いることができます。しかしバスの大型水素タンクの場合、アキュムレーションテストを上回る根本的な速度優位性を実現するためには、大容量の真空チャンバーを高速で真空引きできるポンプセットにも相応の投資をする必要があります。真空チャンバー自体は、単純なアキュムレーションチャンバーよりもはるかに耐リーク性に優れていなければならないので、この場合は緊急用アウトレットを設置することはできません。その代わりに、真空チャンバーに安全ケージを備えることで、タンクが破裂した場合でも損傷を防げるようにする必要があります。しかし、真空法は一般に高感度なので、トレーサガスのヘリウム濃度を大幅に低くするか、またはその代わりにテストアイテムに作動圧力よりも低い圧力で充填することができます。どちらの場合もヘリウム使用量が減り、同時に、検査する必要のあるリークレート限度値も低くなります。例えば、トレーサガスのヘリウム濃度を1%に低下させると、それに応じてリークレート限度値の要件は2桁増え、 $5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (3 sccm)ではなく、 $5 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (0.03 sccm)で水素タンクを検査する必要があります。

## 7.5 付属部品をすべて取り付けた完成済みタンクに対するスニファーリーク検知

付属部品（充填バルブ、アウトレットバルブ、圧力センサー）をすべて取り付けタンク本体を組み立て終えたときも、やはりリークテストが必要です。

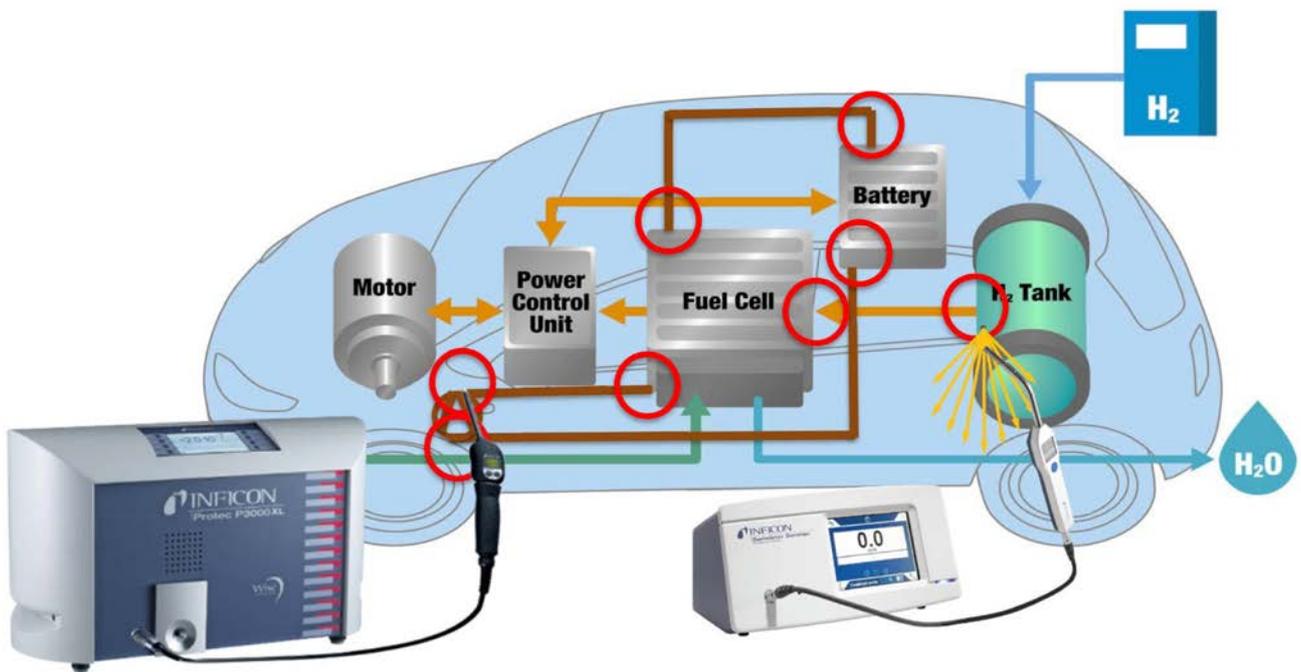
しかし、通常、ここでもいわゆるスニファーリーク検知が用いられます。試験部品（完成済みタンク）にトレーサガス（ヘリウムまたはフォーミングガス）を充填し、シールします。ついで、スニフーチップをタンク表面に沿って（全体にわたり、または問題の起こりやすい箇所で重点的に）動かします。

大きく分けて、手動スニファーリーク検知と自動ロボットスニファーがあります。自動の場合、試験者の代わりに、プログラミングされたロボットアームがスニフーチップを試験体の表面でガイドします。とくにスニフーチップを連続的に動かす動的スニファーリーク検知の場合、ガス流量が決定的な役割を果たします（[技術スポット2](#)：



水素タンクの付属部品のスニファーリーク検知

ロボットスニファークテストで多量のガス流量が重要となる理由を参照)。高速ロボットリークテスト向けに専用開発された INFICON のリークディテクター (Protec P3000XL や XL3000flex など) は、3000 sccm という非常に多いガス流量が特徴です。こうしたライン末端での完成済み水素タンクのテストは、ヘリウムまたはフォーミングガスを用いて実施することができ、典型的なリークレート限度値は  $5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  (3 sccm) の範囲内です。

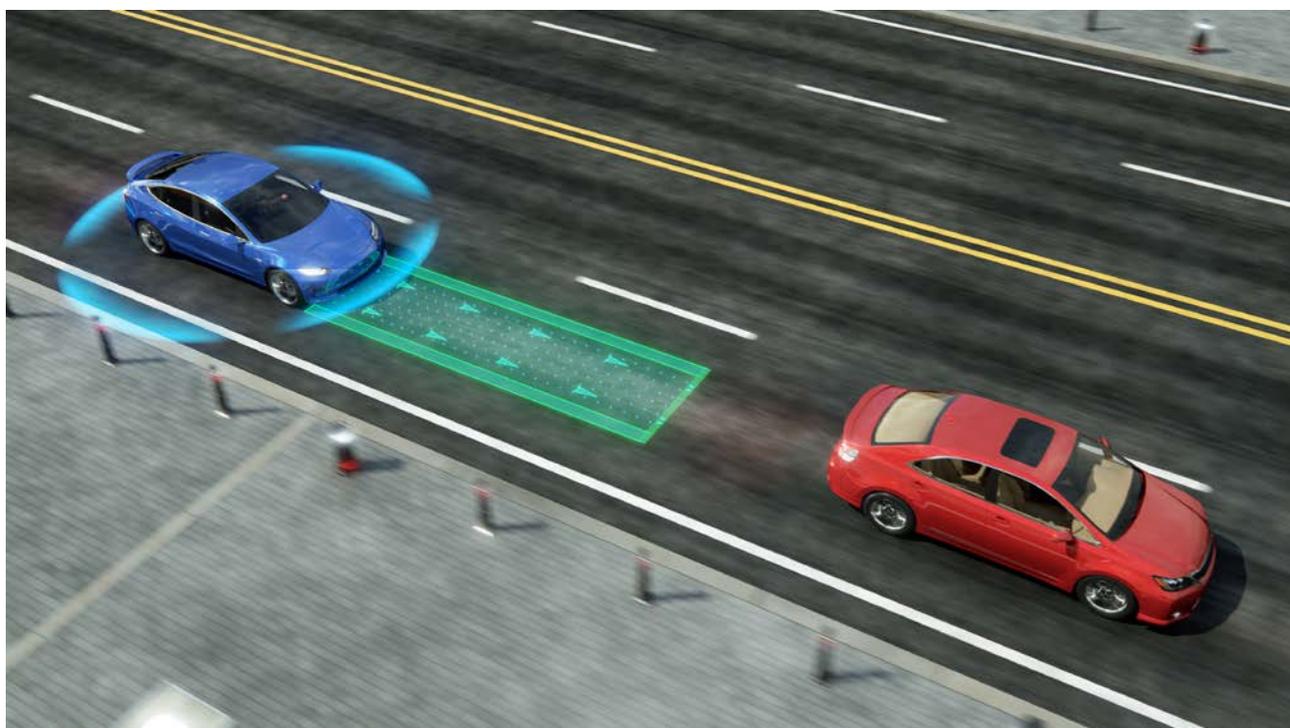


車両へのコンポーネント取り付け中のリークテスト

## 8 電気および電子コンポーネント

性質上、車両のあらゆる電気および電子コンポーネントにとって主要な障害となるのは水です。したがって、こうしたコンポーネントはハウジングの水密性が重要な要件となり、通常は保護等級IP67への準拠が問題となります。ハウジング素材と、それに応じたテスト実施時のリークレート限度値の要件との密接な関係については、[技術スポット1：IP67 - リークレート限度値を決定するエンクロージャーの材質](#)を参照してください。車両の

電源コントロールユニットや電子モジュールにとって重要となるハウジング水密性の一般要件に加え、電気モーターの場合は冷却回路の漏れ防止要件も存在します。また、先進運転支援システム（ADAS）の場合は、各種センサーの長期的な機能信頼性を確保するために、とりわけ気密性が重要になります。



自律運転または半自律運転では、機能信頼性の高い環境センサーが必要となります。

## 8.1 センサーおよび コントロールモジュール

従来、センサー類をテストする場合は、低感度で温度に大幅に依存する圧力降下試験が多く用いられてきました。圧力降下試験中に温度が上昇すると、潜在的なリークが隠蔽されてしまい、温度が低下するとリークを誤認したり、誤って警報が発せられることがあります。しかし自律車両では、ADAS システムの信頼性や、レーダー（電波による探知と測距）およびライダー（光による検知と測距）センサーの耐リーク性に関する要件が高くなります。ADAS の場合、100 万個で 3～4 個の欠陥を許容する「シックスシグマ」のアプローチでは問題外です。ADAS コンポーネントのメーカーは、信頼性を 1000 倍高めた、無欠陥戦略を追求しています。したがって、レーダーまたはライダー技術を用いたセンサーは、湿気が入り込めないよう、水密性だけでなく気密性も備えていなければなりません。つまり、他のリークテスト方法が必要となります。そこでメーカー各社では、レーダーセンサーとライダーセンサーをテストするにあたって、 $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  の範囲内のリークレートでヘリウム真空試験を実施しています。ケーブル類をハウジングに通すガラス製フィードスルーに対しても、ヘリウム真空試験を採用しています。

コントロールモジュールは、外気温度が（季節などによって）変化するときの圧力を補正しますが、これにはよく防水性の Gore-Tex® 膜が用いられます。この場合、品質保証のために、トレーサ

ガスをベースとしたアキュムレーション方法が採用されます。まずコントロールモジュールにヘリウムを充填し、最高 10,000 Pa までの超過圧力で加圧します。これは、膜を通じてトレーサガスをコントロールモジュール内に入り込ませるためです。次に少し負圧をかけて、リーク箇所があればヘリウムがアキュムレーションチャンバー内に漏れ出せるようにし、漏れたヘリウムはチャンバー内に蓄積します。こうしてリークを検知することができます。

## 8.2 電気駆動モーター



EV 向け電気駆動モーター

代替駆動システムを採用した車両は、結局、いずれも電気モーターを使用します。こうした駆動モーターは、水が外側から入り込まないこと、および水を充填した冷却ジャケットでモーターの内外いずれの方向にもリークがないことを点検して確認することが重要になります。通常の車両使用時でも、雨などの環境の影響や、洗車時の高圧

クリーナーの噴射などにより、電気モーターは水にさらされます。したがって、ハウジングは保護等級 IP67 ~ IP69 の浸入要件に適合する必要があります。この結果、プラスチックまたはスチール製ハウジングの場合はリークレート限度値  $10^{-4}$  Pa · m<sup>3</sup>/s (0.1 ~ 0.5 sccm) の範囲内で、またもっと要件の厳しいアルミニウム製ハウジングの場合は  $10^{-6}$  Pa · m<sup>3</sup>/s (0.001 ~ 0.005 sccm) (10,000 Pa 差圧時) でテストする必要があります。

さらに、電気モーターが最大限の効率で作動できるように、モーターを安定的な理想温度に維持するために、ますますアクティブな水冷システムが使用されるようになってきました。通常、クーラントは水/グリコール混合物です。水がエンジンの電気部品に入り込んでショートを起こさないようにするには、水冷ジャケットの耐リーク性が重要になります。同時に、クーラントが回路からリークして失われてもなりません。電気駆動モーターの冷却水回路の典型的な漏れ防止要件は、 $10^{-4}$  Pa · m<sup>3</sup>/s (0.1 ~ 0.5 sccm) の範囲内です。

### 8.3 モーターハウジングの真空試験 またはアキュムレーションテスト

冷却水回路のコンポーネントは急速に熱を移転するように設計されているので、空気または圧力降下試験などのリークテスト方法では、温度変動への感度が良すぎて、おおむね過敏すぎる結果となります。そのためこうしたテストには、トレーサガスベースの方法が採用されます。

電気モーターハウジングの水密性をテストする場合、スチールやプラスチックなどの素材には、ヘリウムを用いた真空試験だけではなく、ヘリウムに加えて、トレーサガスとして水素 5% と窒素 95% の不燃性混合物（いわゆるフォーミングガス）を使用するアキュムレーション方法も適しています。フォーミングガスはヘリウムよりも安価で、またアキュムレーションチャンバーは真空チャンバーよりもシンプルで安価です。アキュムレーションテストでは、ハウジング内の空気を排出してから、約 500,000 Pa (ハウジングの最大許容圧力) でトレーサガスを充填し、密閉します。トレーサガスを充填したハウジングをアキュムレーションチャンバー内に置き、リーク箇所から漏れるトレーサガスがあればここに蓄積するので、INFICON LDS3000 AQ などのテスト装置を使って検知することができます。チャンバー内のトレーサガス濃度の徐々の増加速度を、リークレートとして測定します。ただし、アルミニウム製ハウジングの場合は、 $10^{-6}$  Pa · m<sup>3</sup>/s (0.001 ~ 0.005 sccm) の範囲内 (差圧 100,000 Pa 時) のリークレートをテストする必要があり、真空法に

よる試験が推奨されます。アキュムレーションテストよりも複雑にはなりませんが、感度が高く、サイクルタイムが短縮されるという利点があります。

## 8.4 水冷ジャケットのリークテスト

電気モーターハウジングの水冷ジャケットをテストする場合も、同じ手順が用いられます。唯一の違いは、冷却ジャケットのキャビティだけに約 200,000 ~ 300,000 Pa (または最大許容圧力) でトレーサガスを充填することです。リークレート要件は材質によって異なります。スチールおよびプラスチック製ハウジングでは、ヘリウムまたはフォーミングガスを用いたアキュムレーション方法を使用することができ、この場合のリークレート限度値は  $10^{-4}$  Pa · m<sup>3</sup>/s (0.1 ~ 0.5 sccm) です。要件がより厳しいアルミニウム製ハウジングの場合は、ヘリウムを用いて真空チャンバーでテストし、リークレート限度値は  $10^{-6}$  Pa · m<sup>3</sup>/s (0.001 ~ 0.005 sccm) の範囲内 (差圧 100,000 Pa 時) とします。

## 9 INFICON について

INFICON は、リークテスト用の装置および機器の開発、生産、販売を行う世界屈指の企業です。INFICON のリークテスト機器は、要求の厳しい生産および品質管理の分野で利用されています。INFICON リークディテクターは多種多様なリークテストに対応します。INFICON の主要なお客様は、RAC 産業、自動車産業、半導体産業のそれぞれに属するメーカーおよびサービス企業と、リークテストシステムメーカーです。リークテストとリーク検知に関して長年の経験を有する INFICON は、特許取得済み Contura S400 によって食品産業にも対応可能になりました。



リーク検知技術に関する INFICON の経験は、50 年以上に及びます。INFICON は、ケルン（ドイツ）、バルザース（リヒテンシュタイン）、リンシェーピング（スウェーデン）、シラキウス（米国）、上海（中国）に生産拠点を置き、すべての主要産業国に営業所を設け、セールspartner のネットワークを拡大することで、世界中で販売活動を展開しています。約 1,100 人の従業員を擁する INFICON AG は、2020 営業年度には世界全体で約 3 億 9,800 万米ドルの売上高を達成しました。INFICON の株式（IFCN）はスイス証券取引所に上場されています。

## 10 自動車コンポーネントのリークテストについての 追加情報源

### 10.1 特定のリークテスト作業に関する資料シリーズ

INFICON では、生産中に効率的に特定の自動車コンポーネントのリークテストを実施する方法について説明した、多数の資料を提供しております。これらをご覧になれば、どのリークレートが有益なのか、どの方法が適切なのか、どのようにテストを実施するのかがわかります。この資料シリーズの PDF は、すべて INFICON のウェブサイトから無料でダウンロードいただけます。

以下よりお選びください :

#### バッテリーセル



<https://bit.ly/2NiqkaO>

#### バッテリーパック



<https://bit.ly/3xihltj>

#### 電気駆動モーター



<https://bit.ly/30WA7tX>

#### 燃料電池用の バイポーラプレート



<https://bit.ly/3a8iwBt>

#### 水素タンク



<https://bit.ly/3oZpclq>

## 10.2 インフィコンウェビナーのご案内



インフィコンウェビナーの目的は、御社の従業員の適性を高めることです。ウェビナーを通じて、計測器に関する知見を深めるお手伝いをしたいと思っております。当社の網羅的なウェビナープログラムは、特定の計測器に偏らないよう、考え抜いて立案されています。計測器の基礎をご説明し、一般的な測定方法の概要を示し、各種産業での多種多様な用途についてご紹介いたします。

多様なウェビナープログラムの一環として、以下のような特定のイベントも開催しております：

- » リークディテクターの基礎
- » 水素リークディテクターの活用
- » 自動車業界でのリークディテクター最新活用事例

インフィコンウェビナーでは、お客様の用途に最適な計測方法を採用するのに必要なノウハウや、ご使用になる計測器を最大限活用できるようにメーカーとしての助言が得られます。

各種計測器のエキスパートである当社のスペシャリストが講師を務めます！

## 法律上の表示

発行者 INFICON GmbH (ケルン、[www.inficon.com](http://www.inficon.com))  
 編集およびレイアウト Möller Horcher Kommunikation GmbH  
 (オフエンバッハおよびフライベルク、[www.moeller-horcher.de](http://www.moeller-horcher.de))  
 © INFICON 2021

## 図版の著作者表示

カバー写真	Shutterstock © buffaloboy	P. 17,19,20	INFICON
P. 5	Shutterstock © apiguide	P. 21	INFICON/WorldArtsMe © gulfy/
P. 6	Wikimedia Commons		Can Stock Photo © pix2go/Can
	© Tokumeigakarinoaoshima		Stock Photo © teshimine/Can
P. 8	INFICON/		Stock Photo © Makhnach
	RWTH Aachen, PEM	P. 22,23,25	INFICON
P. 9	INFICON	P. 27	INFICON /Shutterstock ©
P. 10	Shutterstock		SasinTipchai
	© Kondrachov Vladimir	P. 28,29,31	INFICON
P. 11	INFICON	P. 32,33,34	INFICON
P. 12	INFICON/Can Stock Photo	P. 35	Shutterstock © metamorworks
	© panambapro/	P. 36	Shutterstock
	Clipart Library 1376954		© Sergii Chernov/INFICON
P. 14	INFICON	P. 37	Shutterstock
P. 15	INFICON/WorldArtsMe		© Polina Krasnikova/INFICON
	© gulfy Clipart Library 1376954/	P. 38	INFICON/INFICON
	Can Stock/Photo © Makhnach/	P. 39,40	INFICON
	Can Stock Photo © pix2go/Can	P. 41	<a href="https://commons.wikimedia.org/">Wikicommons</a>
	Stock Photo © konstantinks/	P. 43	INFICON
	WorldArtsMe © gulfy	P. 44	Shutterstock
P. 16	INFICON/Can Stock Photo		© metamorworks/INFICON
	© konstantinks/Clipart Library	P. 45	Shutterstock © temp-64GTX
	1376954/Can Stock Photo	P. 46	Shutterstock © loraks
	© Makhnach/Can Stock Photo	P. 49,50	INFICON
	© pix2go/Can Stock Photo		
	© konstantinks		

## 連絡先

### インフィコン株式会社

〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1  
 かながわサイエンスパーク R&D D棟 7F  
 電話：044-822-1111  
 Eメール：reach.japan@inficon.com

### 欧州&アフリカ担当

INFICON Co., Ltd.  
 Kanagawa Science Park R&D-D 7F  
 3-2-1, Sakado, Takatsu-ku  
 Kawasaki-shi, Kanagawa-ken 213-0012  
 Japan  
 電話：+81.44.822.1111  
 Eメール：reach.japan@inficon.com  
 インターネット：www.inficonautomotive.com