

水没時の高電圧安全について

自動車安全研究領域

※伊藤 紳一郎

長谷川 智紀

1. まえがき

圧縮水素を燃料とした燃料電池自動車は、燃料電池スタックで水素と空気中の酸素とを化学反応させ、発電した電気で電動機を駆動して走行するものである。

それら燃料電池自動車の内部には高電圧、大電流が流れる回路（現状では最大で500V程度）が存在する。このため、正常時のみならず水没時等の想定される異常時においても高電圧安全を確保する必要がある。

そこで、常温、常圧の状態で車室内に海水が侵入することを想定して、水槽内に水道水及び各種濃度の食塩水を満たし、その中に燃料電池自動車の高電圧部を模擬した電極を沈めて電流を測定することにより、水没時に高電圧が周辺に与える影響及びその影響を防止するための方策について検討を実施したので、その結果を報告する。

2. 水没時における高電圧安全確保の方策

通常時においては、①活電部を絶縁体で被覆する、バリヤ、エンクロージャで保護するなど、人体を活電部に直接接触させない（直接接触からの保護）、②人体が接触する可能性のある導体のバリヤ、エンクロージャを車体に等電位化する（間接接触からの保護）、③高電圧回路と車体との間に十分な絶縁抵抗を確保する（絶縁抵抗の確保）ことの3項目で高電圧安全を確保することとなっており¹⁾²⁾、仮にこのうち1項目が失陥しても乗員に影響を与えないような対策となっている。

水没時においては、「②間接接触からの保護」の車体への等電位化はそのまま担保されるものの「③絶縁抵抗の確保」は完全に失陥することとなる。従って、水没時における高電圧安全の確保とは、絶縁抵抗が完全失陥した状態で「①直接接触からの保護」のバリヤ、エンクロージャが十分な効果を有するかどうかにか係ってくる。

3. 人体の電気的特性に関する文献調査

電流が人体に与える影響について様々な調査・研究成果をとりまとめた文献³⁾が存在する。この文献を参考にして、人体に流れる電流が10mA以下である場合に燃料電池自動車における高電圧安全が確保されることとした。図1に示すように、人体に流れる電流10mAとは、「通常は有害な生理的影響はない」とされる領域のほぼ中央の値であり、危険な状態に至るまでにはかなりの余裕が存在する。

また、同文献によると、交流50または60Hzにおける人体のインピーダンス特性は、図2に示すとおりとされており、測定の都合も考えて、人体の直流抵抗を1100Ωと仮定することとした。

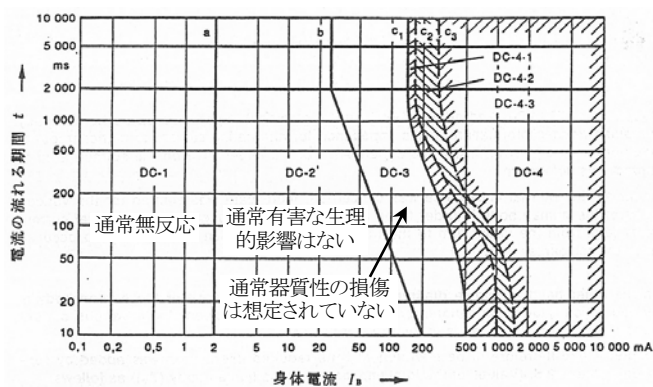


図1 人体に流れる電流の影響(IEC/TS 60479-1より引用)

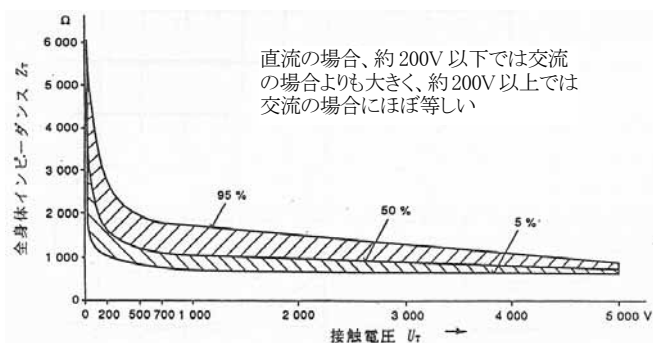


図4 — 交流50/60 Hzの5 000 Vまでの接触電圧の場合の手から手の又は手から足の電路に対する生きている人に有効な全身インピーダンスの統計値

図2 人体のインピーダンス(IEC/TS 60479-1より引用)

4. 水中電流測定試験

4. 1. 測定方法

測定装置は、水槽、模擬隔壁、模擬バッテリー端子板、模擬バッテリー端子、電流測定用プローブ、水中基準電極、直流電圧・電流計、直流電源装置、位置設定装置からなる。

水槽は、内寸が縦横各1m、高さ0.5mの亚克力製である。

模擬隔壁の寸法は、縦横各0.4m(内寸)、高さ0.5m(外寸)で、材質はステンレス及び亚克力とし、ステンレス製、亚克力製とも穴なし及び3、10、30、50mmφの穴あきのものを製作した。なお、穴なしの模擬隔壁を使用する場合は、模擬隔壁内には水を満たさない状態で測定した。

縦横各0.4m、厚さ10mmの亚克力製の模擬バッテリー端子板に25mm間隔で格子状に開けた穴に、模擬バッテリー端子を取り付けて、模擬隔壁の底面に設置する。模擬バッテリー端子には、直流電源装置から直流電圧を印加する。なお、短絡防止のため、模擬バッテリー端子板と模擬隔壁の間に厚さ10mmの亚克力板を1枚入れることとした。

電流測定用プローブとして、直径10mmの黄銅製の金属球に半田メッキをして、電線を接続したものを使用した。

水中基準電極として、400mm×200mmの銅板を水槽の内壁に立て掛けたものを使用した。

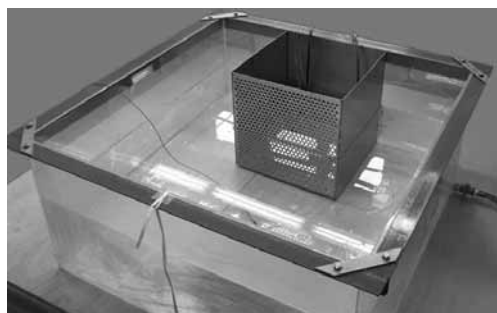


図3 測定装置

(上：水槽、下左：模擬隔壁、模擬バッテリー端子板、模擬バッテリー端子、下右：電流測定用プローブ)

また、電流測定用プローブを水槽内の任意の位置に自動的に設定するための位置設定装置の駆動軸は直交3軸で、位置設定分解能は各軸とも1mm、位置決め精度は各軸とも±2mm以下である。

図3に測定装置の外観を示す。

水槽には水道水及び濃度1、2、3%の食塩水を入れ、水深は300mmとした。

模擬バッテリー端子の端子間隔は200mmとし、模擬隔壁からの距離(以下、「隔壁・電極間距離」という)は50、200mmの2条件とした。

模擬バッテリー端子間に印加する電圧は、0、6、12、18、24、36、48、60Vの8条件、電流計に直列に挿入する抵抗器の抵抗値は、0、100、1100、11100Ωの4条件とした。

まず、予備実験として、模擬隔壁の外側の領域で水槽の底面から50mmの位置において、水中基準電極を基準電位とした電位分布を測定したところ、水中における最大電位点及び最小電位点の位置は、他に变化させた条件にかかわらずほぼ同じ位置であることがわかったので、電流を測定するときの条件として、表1に示すように設定することとした。

4. 2. 測定結果及び考察

4. 2. 1. 穴なし模擬隔壁の場合

1例として、穴なしステンレス製模擬隔壁、隔壁・電極間距離50mm、直列抵抗1100Ω、3%食塩水としたときの測定結果を図4に示す。

この図を見ると、電流測定条件①の場合の電流は、印加電圧に関係なくほぼ0であり、電流測定条件②の場合の電流は、印加電圧に関係なくほぼ-0.2mAであることがわかる。

この電流は、異種金属間に発生する分極電圧により発生する電流である。

表1 電流測定条件

模擬隔壁と電源負極との接続	電流測定条件	ステンレス製模擬隔壁	亚克力製模擬隔壁
なし	最大電位点・最小電位点間に流れる電流	①	⑤
	最大電位点・模擬隔壁間に流れる電流	②	—
あり	最大電位点・最小電位点間に流れる電流	③	—
	最大電位点・模擬隔壁間に流れる電流	④	—

他の条件でも同様に印加電圧の影響を受けず、10mAに達することはないので、穴なし模擬隔壁の場合には感電しないことがわかる。

4. 2. 2. 水質の違いによる影響

1例として、10φ穴あきステンレス製模擬隔壁、隔壁・電極間距離50mm、直列抵抗1100Ωとしたときの電流測定条件①の場合の測定結果を図5に示す。

この図を見ると、食塩水の場合は水道水の場合に比較して大きな電流が流れることがわかる。また、食塩水の濃度を変化させても、流れる電流にそれほど大きな違いはないことがわかる。

この傾向は、他の条件の場合でも同様に見られることから、これ以降の検討においては、海水の食塩濃度にも近い3%食塩水における測定結果を使用することとする。

4. 2. 3. 直列抵抗の違いによる影響

1例として、10φ穴あきステンレス製模擬隔壁、隔壁・電極間距離200mm、3%食塩水としたときの電流測定条件①の場合の測定結果を図6に示す。

この図を見ると、直列抵抗が小さくなると電流は増加し、直列抵抗が大きくなると電流が減少する傾向が見られる。

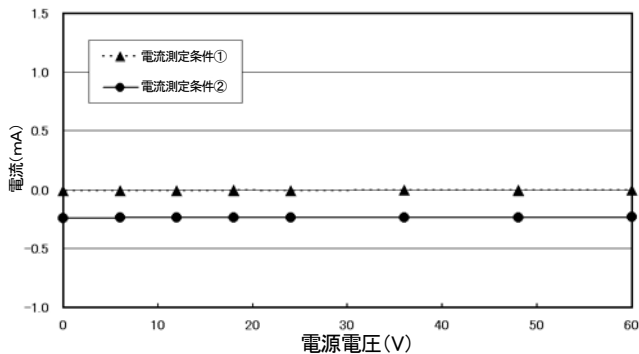


図4 穴なし模擬隔壁 (10φ穴なしステンレス製模擬隔壁、隔壁・電極間距離 50mm、直列抵抗 1100Ω、3%食塩水)

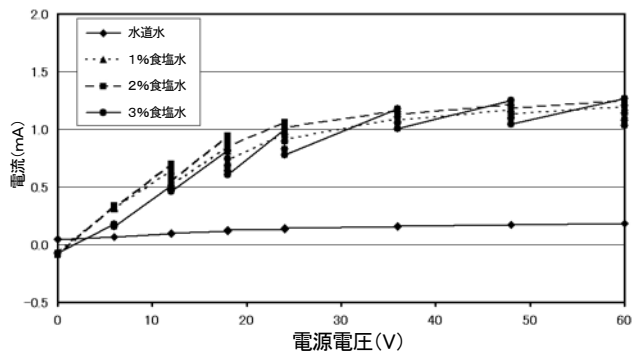


図5 水質による影響(10φ穴あきステンレス製模擬隔壁、隔壁・電極間距離50mm、直列抵抗1100Ω、電流測定条件①)

この傾向は、他の条件の場合においても同様に見られる。

4. 2. 4. 電流測定方法の違いによる影響

1例として、10φ穴あきステンレス製模擬隔壁、隔壁・電極間距離50mm、直列抵抗1100Ω、3%食塩水の場合の測定結果を図7に示す。

この図から、高電圧回路の負極を模擬隔壁に接続した場合に、最大電位点から最小電位点に流れる電流は、他の条件に比較して小さくなっているものの、最大電位点から模擬隔壁に対して流れる電流は、電源電圧60Vの場合に約2mAとなることがわかる。このことから推定すると、300V程度の電源電圧の場合に電流が10mAに達することが想定される。

従って、水没時の高電圧安全を考慮すると、高電圧回路は、正極、負極とも模擬隔壁に接続してはいけないことがわかる。

一方、高電圧回路の負極を模擬隔壁に接続しない場合では、最大でも、最大電位点から最小電位点に流れる電流が電源電圧60Vで約1.2mA程度であり、電源電圧に比例して電流が増加すると仮定して電源電圧500V程度で10mAに達することになるが、図7の電流の増加傾向から考えて500V程度では10mAには達しないといえる。

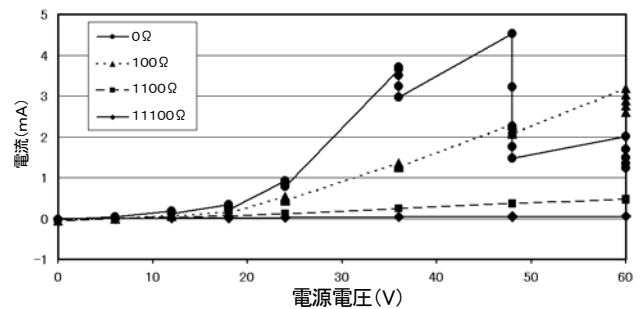


図6 直列抵抗による影響(10φ穴あきステンレス製模擬隔壁、隔壁・電極間距離200mm、3%食塩水、電流測定条件①)

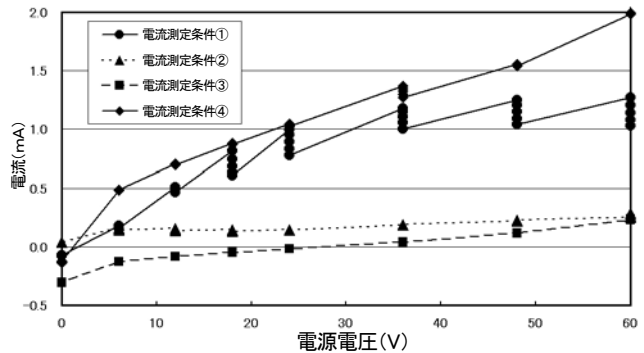


図7 電流測定方法による影響(10φ穴あきステンレス製模擬隔壁、隔壁・電極間距離 50mm、直列抵抗 1100Ω、3%食塩水)

4. 2. 5. 模擬隔壁の違いによる影響

1例として、隔壁・電極間距離50mm、直列抵抗1100Ω、3%食塩水、電流測定条件①の場合の測定結果を図8に、隔壁・電極間距離200mm、直列抵抗1100Ω、3%食塩水、電流測定条件①の場合の測定結果を図9に示す。

これらの図を見ると、ステンレス製の模擬隔壁の場合、模擬隔壁の穴の大きさに関係なくほぼ同様の傾向を示し、電源電圧60Vで最大約1.2mA程度となっており、電源電圧500V程度でも10mAには達しないことがわかる。

一方、アクリル製の模擬隔壁の場合には、模擬隔壁のない場合に比べて電流が減少しており、その効果は認められるものの、隔壁・電極間距離50mmの場合には、電源電圧60Vで約6mAとなっており、電源電圧100V程度で10mAに達するものと考えられる。

しかしながら、隔壁・電極間距離200mmの場合には、電源電圧60Vで約1.2mAとなっており、電源電圧500V程度までは10mAに達しないものと考えられる。

これらのことから、穴あきの絶縁体のエンクロージャを使用する場合には、エンクロージャ内の高電圧部と人体との間に十分な距離を確保すればよいということがわかる。

5. 結論

水没時においても燃料電池自動車の乗員に対する高電圧安全を確保するための要件は、次のとおりであることがわかった。

- ・活電部が密閉されており、水が侵入しないこと。
- ・水が侵入する可能性のある場合、活電部が導体のバリヤ・エンクロージャで覆われていること。

この場合、活電部のいかなる極性の端子も導体のバリヤ・エンクロージャに電氣的に接続してはいけない。なお、通常時の間接接触に対する高電圧安全の確保の観点から、バリヤ・エンクロージャは車体に等電位化されていることが必要である。

・活電部を絶縁体のバリヤ・エンクロージャで保護する場合には、活電部が人体の存在する空間から十分に離れていること。

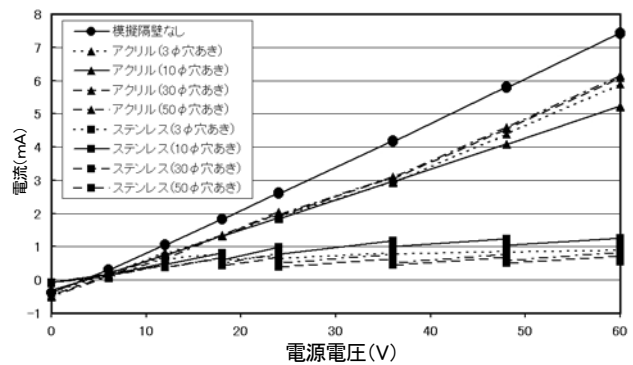


図8 模擬隔壁による影響(隔壁・電極間距離 50mm、直列抵抗 1100Ω、3%食塩水、電流測定条件①)

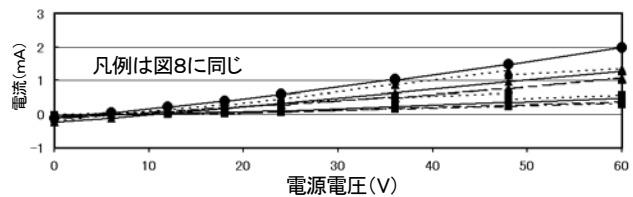


図9 模擬隔壁による影響(隔壁・電極間距離 200mm、直列抵抗 1100Ω、3%食塩水、電流測定条件①)

6. あとがき

水中電流測定試験を実施し、燃料電池自動車が万一水没した場合においても、乗員の高電圧安全が確保されるための要件を求めた。

これらの要件は、現状の燃料電池自動車の高電圧回路の配置状況等を考慮すれば、通常時における高電圧安全の確保のための対策を実施することにより担保されることがわかった。

なお、今後、高電圧回路の電圧が更に高くなったり、燃料電池自動車の形状、寸法、材質等が今回想定した範囲を超えた場合には、更なる検討が必要になるものとする。

参考文献

- (1) 国土交通省告示: 燃料電池自動車の高電圧からの乗車人員の保護に関する技術基準(平成17年3月)
- (2) ECE Regulation No.100: Uniform Provisions Concerning the Approval of Battery Electric Vehicles with Regard to Specific Requirements for the Construction, Functional Safety and Hydrogen Emission.
- (3) IEC/TS 60479-1 Ed. 3.0:1994 (b): Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects