

150 kW超級CHAdemo液冷充電ケーブルコネクタ

コーポレート企画室 水野 健彦¹・斉田 博之²・大谷 聡志³
森川 翔子⁴・佐藤 望⁵
メタルケーブル・機器開発部 石田 克義⁶

Over 150 kW Class CHAdemo Liquid-Cooled Charging Cable and Connector

T. Mizuno, H. Saita, S. Otani, S. Morikawa, N. Sato, and K. Ishida

近年、EVに搭載されるバッテリーの大容量化にともない、バッテリーへの充電時間の短縮が強く望まれており、直流急速充電器の高出力化のニーズが高まっている。そのため、直流急速充電器の高出力化に対応した充電ケーブルコネクタが求められ、その実現には冷媒の循環によって強制冷却する液冷技術の適用が必須となっている。そこで、当社は、CHAdemo 2.0 に適合した 150 kW超級の直流急速充電器向け液冷充電ケーブルコネクタを開発した。本論文では、開発した液冷充電ケーブルコネクタにおいて、適用した液冷技術と冷却性能の評価結果を中心に述べ、目標とする冷却性能を実現したことを報告する。

In recent years, there is a strong demand for shortening the battery charging time in EV because the capacity of batteries installed in EV is increasing, and there is a growing need to introduce DC high power EV chargers to the market. Then, it is required to realize a charging cable and connector for DC high power EV chargers. The optimal solution is to apply a liquid cooling technology to them for forced cooling by circulating a coolant. Therefore, we have developed a liquid-cooled charging cable and connector for over 150 kW class DC high power EV chargers conforming to the CHAdemo specification ver. 2.0. This paper mainly describes the applied liquid cooling technology and the evaluation results of cooling performance for the liquid-cooled charging cable and connector, which meet the target cooling performance.

1. ま え が き

近年、EVに搭載されるバッテリーの大容量化にともない、バッテリーの充電時間の短縮が強く望まれており、直流急速充電器の高出力化ニーズが高まっている。当社では、これまでにCHAdemo 1.1 に適合した 50 kW級の直流急速充電器向けの充電ケーブルコネクタを開発、製品化して主に日本国内および欧州市場向けに販売している¹⁾。そこで、当社はCHAdemo 2.0 に適合した 150 kW超級の直流急速充電器向けの液冷充電ケーブルコネクタ（定格充電電流400 A）を開発した。本論文では、150 kW超級の液冷充電ケーブルコネクタの開発成果のうち、その冷却性能を中心に報告する。

150 kW超級の充電ケーブルコネクタの実現には、充電電流の増大にともなって充電ケーブルの電源線導体や充電コネクタの電源端子の大サイズ化が必要となるが、その大サイズ化を抑制して充電の操作性を損なわないようにすることが求められる。そのためには、それらの電源線導体や電源端子を冷媒の循環によって強制冷却する液冷技術の実現が必須となる。このような液冷技術は、欧州や北米の市場で普及しているCCS仕様の直流急速充電器に対していち早く適用されて市場導入が進められている。一方で、CHAdemo仕様の直流急速充電器に関しては、液冷技術を用いない通常の非強制冷却方式による 100 kW超級の充電ケーブルコネクタ^{2), 3)}を搭載した直流急速充電器（定格充電電流 200 A）は市場に導入されているものの、液冷技術を適用した 150 kW超級の液冷充電ケーブルコネクタを搭載した直流急速充電器は、現時点では実用化されていないのが実状である。

液冷技術を適用した液冷充電ケーブルコネクタの技術課題としては、直流急速充電システムを見据えた液冷技術の確立や、その信頼性、安全性、耐久性といった品質面の実

1 次世代急速充電配線システムプロジェクト室 主席研究員 (博士(工学))
2 次世代急速充電配線システムプロジェクト室 主席研究員
3 次世代急速充電配線システムプロジェクト室
4 次世代急速充電配線システムプロジェクト室
5 次世代急速充電配線システムプロジェクト室
6 材料評価グループ グループ長

略語・専門用語	正式表記	説明
EV	Electric Vehicle	電気自動車。動力源となる電気モータと、その電源となるバッテリーが搭載され、そのバッテリーに電気を充電し、電気モータ駆動によって走行する自動車
CHAdEMO	CHAdEMO	EVの急速充電方式の一つで、商標名である。直流(DC)を用いた急速充電方式であり、コネクタの規格や充電方法、通信方法をCHAdEMO協議会で統一している。CHAdEMO (チャデモ)の名称には、「CHARge de MOve = 動く、進むためのチャージ」、「de = 電気」、「(車の充電中)にお茶でも」の3つの意味が含まれている。日本発祥の急速充電方式であり、全世界で採用されている
CCS	Combined Charging System	EVの急速充電方式の一つで、普通充電と急速充電の双方に対して1つの充電コネクタで対応できる充電方式であり、主に北米市場で普及しているCCS Type 1と欧州市場で普及しているCCS Type 2とがある
液冷	Liquid Cooling	発熱して高温となる部位等を、液体の冷媒を循環させて冷却することであり、冷媒の温度上昇に対しては熱交換器等を用いて冷却する。本論文の場合には、通電によって発熱する充電コネクタや充電ケーブルを液体の冷媒を用いて冷却することを指す

表 1 150 kW超級CHAdEMO液冷充電ケーブルコネクタの主な仕様

Table 1. Specifications of over 150 kW class CHAdEMO liquid-cooled charging cable and connector.

項目	150 kW超級	50 kW級 (現行)	
準拠規格	CHAdEMO ver. 2.0	CHAdEMO ver. 1.1	
定格出力	DC 400 A / DC 500 V	DC 125 A / DC 500 V	
充電コネクタ	電源端子の冷却方式	強制冷却 (液冷)	非強制冷却
	温度センサ (数量)	2	-
	重量	1.3 kg	1.1 kg
充電ケーブル	電源線導体の冷却方式	強制冷却 (液冷)	非強制冷却
	温度センサ (数量)	4	-
	電源線 (導体断面積×本数)	17 mm ² × 4	30 mm ² × 2
	信号線 (導体断面積×本数)	0.75 mm ² × 14	0.75 mm ² × 9
	冷却管(本数)	4	-
	絶縁材	EPゴム	EPゴム
	シース材	クロロプレングム	クロロプレングム
	シース外径	38 mm	27 mm
	重量	1.9 kg	1.1 kg
	準拠規格	JCS4522	JCS4522

現などがある。具体的には、液冷充電ケーブルや液冷充電コネクタの設計・製造面や、非強制冷却仕様のEV充電インレットと液冷充電コネクタとの嵌合部の冷却設計、冷媒を循環冷却する冷却装置の設計、温度管理した充電制御を実現するための温度センシングなどがある。本論文では、主にCHAdEMO仕様の 150 kW超級直流急速充電器向けに開発した液冷充電ケーブルコネクタの液冷技術と実現した冷却性能の評価結果を中心に報告する。

2. 150 kW超級CHAdEMO液冷充電ケーブルコネクタの開発

150 kW超級のCHAdEMO直流急速充電器向けに開発した液冷充電ケーブルコネクタの主な仕様を表 1 に、外観写真を図 1 にそれぞれ示す。現行の 50 kW級の充電ケーブルコネクタとの主な違いは、50 kW級では充電コネクタの電源端子（以下、コネクタ端子と記す）と充電ケーブルの電源線導体（以下、充電ケーブル導体と記す）を強制冷却しない方式であるのに対して、150 kW超級ではコネクタ端子と充電ケーブル導体に対して冷媒を循環させることで強制冷却する液冷方式を採用している点にある。この液冷方式を採用することにより、最大定格充電電流を 125 A（50 kW級）から400 A（150 kW超級）までの高出力化に対応させても、充電ケーブル導体の断面積を 50 kW級と同等レベルの 34 mm²（17 mm² × 2）とすることができる。同様に、液冷方式の採用によって、充電ケーブルと充電コネクタの重量やサイズを、それらの操作性を損なわないレベルで実現できている。

150 kW超級の液冷充電ケーブルコネクタの構成面での主な特徴は、充電ケーブルの電源線の本数を 4 本として、

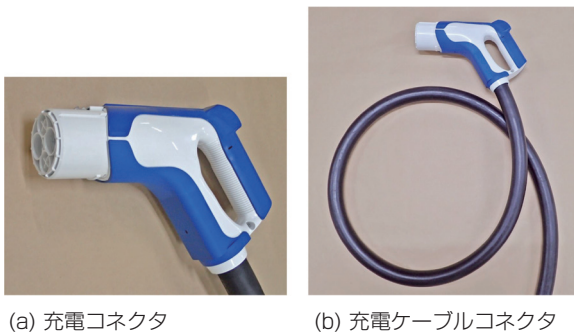


図 1 150 kW超級CHAdEMO液冷充電ケーブルコネクタの外観写真

Fig. 1. Overview of over 150 kW class CHAdEMO liquid-cooled charging cable and connector.

2本1組で直流充電の正極と負極に割り当てる構成や、各電源線に冷媒の流路となる冷却管を内包する構成となっている点あげられる。さらに、充電器側での温度監視による充電制御のために、液冷充電ケーブルコネクタには温度センサが内蔵されている。温度センサは、充電コネクタ内部の正極と負極のコネクタ端子近傍に各1点ずつ、充電器に収納される充電ケーブル端末部の4本の電源線に各1点ずつ取り付けられている。なお、温度センサの取り付けは、充電ケーブル導体とコネクタ端子に高電圧が印加されるため、電気的な絶縁を考慮してある。

冷媒には、電気絶縁性のある冷媒（液体）を使用する。また、冷媒の循環と冷却には冷却装置を使用する。電気絶縁性冷媒を使用する理由は、充電時に高電圧が充電ケーブル導体とコネクタ端子に印加されることによる。具体的には、正極と負極のコネクタ端子同士や高電圧部と冷却装置と間の電気絶縁性を十分に確保することや、万が一、冷媒が漏れ出した場合にも液冷充電ケーブルコネクタ内での電気的なショートや操作者の感電を防止するためである。使用する冷媒や冷却装置の選択に関しては、後述する所望の冷却特性が得られる条件を満足することや、冷却装置および液冷充電ケーブルコネクタの冷媒流路に使用する部材と冷媒との間の化学的な特性などを考慮する必要がある。

CHAdeMO 2.0 では、充電ケーブルコネクタにおける充電電流による温度上昇に対して制約が設けられている。このCHAdeMO 2.0 の制約を考慮した 150 kW 超級の液冷充電ケーブルコネクタでの温度上昇に関する目標冷却性能を表 2 に示す。本論文では、開発した 150 kW 超級の液冷充電ケーブルコネクタが、最大定格までの充電電流に対して表 2 の目標冷却性能を有していることを評価した結果を中心に述べる。特に、使用する冷媒の特性や冷却装置の冷却能力の違いが冷却特性に与える影響に注目し、冷却特性に大きく影響する因子と、目標性能の実現に必要な因子の条件を明確にする。その結果として、開発した液冷充電ケーブルコネクタが、多様な冷媒や冷却装置に適用できる性能を有していることを示す。

表 2 150 kW 超級CHAdeMO液冷充電ケーブルコネクタの温度上昇に関する目標冷却性能

Table 2. Target cooling performance regarding temperature rise of over 150 kW class CHAdeMO liquid-cooled charging cable and connector.

部位・項目		目標冷却性能	備考	
充電コネクタ	人が保持する部位	60℃以下	周囲温度 40℃	
	人が触れる部位	85℃以下		
	電源端子	温度上昇量 ΔT		50 K以下
		到達温度		90℃以下
充電ケーブル	人が保持する部位	60℃以下		
	人が触れる部位	85℃以下		
	電源線導体	到達温度		90℃以下

ここで、実際の直流急速充電器では液冷充電ケーブルコネクタに直流電圧と直流電流の双方が印加されるが、以下に示す冷却特性評価では、便宜上、充電ケーブル導体とコネクタ端子に直流電流のみを印加して評価した。液冷充電ケーブルコネクタの耐電圧特性は、直流電圧のみを印加した耐電圧試験を実施して要求特性を満足することを確認している。

3. 冷却特性

3.1 評価方法および条件

開発した150 kW超級の液冷充電ケーブルコネクタに対する冷却特性評価回路の概略図を図 2 に示す。液冷充電ケーブルコネクタの充電器側ケーブル端末では、正極と負極のコネクタ端子にそれぞれ接続される充電ケーブル導体2本を1組にまとめて、直流電流源の正極と負極の出力端子にそれぞれ接続した。また、4本の電源線に内包される各冷却管は、各極2本の冷却管において、冷媒の流れる向きが逆向きとなるように冷却装置側と接続した。このような冷却管の接続により、各極の2本の電源線の冷却管が、充電コネクタ内部でそれぞれの極のコネクタ端子の冷却部に接続されているため、各極のコネクタ端子と電源線

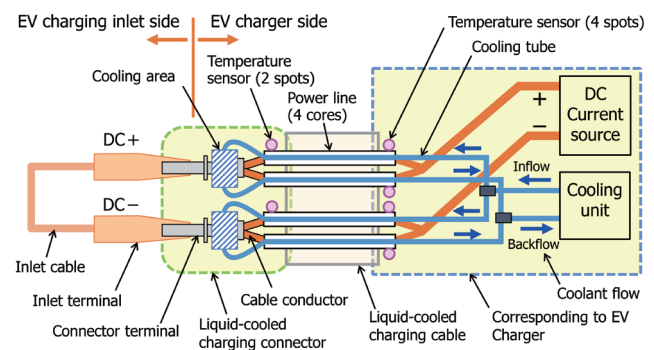


図 2 液冷充電ケーブルコネクタに対する冷却特性評価回路の概略図

Fig. 2. Schematic diagram of cooling evaluation system for liquid-cooled charging cable and connector.

に対して冷媒を循環できる冷媒流路を構築することができる。

一方、充電コネクタは、充電電流回路を構成するために、EVの車両側充電インレットを模擬した試験評価用の充電インレットと嵌合させた。試験評価用の充電インレットは、正極のインレット端子と負極のインレット端子との間を充電インレットケーブルで短絡されているため、充電コネクタとの嵌合によって直流電流源に対して電流回路が構成される。液冷充電ケーブルコネクタにおける有効な充電ケーブル導体長を約6 m、試験評価用の充電インレットに使用した充電インレットケーブルの導体サイズを95 mm²、長さを約3 mとした。

冷却特性評価に使用した冷媒に関しては、電気絶縁性冷媒（液体）を使用し、冷媒の流動性が冷却特性に与える影響を評価するために、動粘度の異なる4種類の冷媒A-1～A-4を使用した。25℃付近での冷媒A-1～A-4の動粘度は、順に6 mm²/s、20 mm²/s、100 mm²/s、350 mm²/sである。冷媒の動粘度は冷媒温度に依存し、例えば、25℃付近を基準に考えると、冷媒温度の上昇に対しては動粘度が緩やかに低下していき、冷媒温度の低下に対しては急激に動粘度が上昇していく傾向がある。したがって、冷媒の流動性は、冷媒A-1～A-4の動粘度の違いだけでなく、冷媒温度にも依存する。また、冷却特性を考える上で重要となる物性値として、冷媒の密度や比熱、熱伝導率などがあるが、それらの物性値は冷媒A-1～A-4で異なる。

使用した冷却装置に関しては、試験評価用に用意した冷却装置を使用した。使用した冷却装置の基本構成は、冷媒循環用のポンプ、冷媒冷却用のファン付きラジエータ（強制空冷タイプの熱交換器）、および冷媒貯蔵用のタンクである。また、使用した冷却装置は、出力する冷媒の圧力を調節することで冷媒流量を調節できる仕様である。ファン付きラジエータの冷却能力は周囲温度や冷媒流量に依存することから、出力する冷媒流量を調節することで冷却装置の冷却能力を模擬的に変化させることができる。開発した液冷充電ケーブルコネクタにおける冷媒の最大使用圧力は0.5 MPaであるため、冷却特性評価では、通電開始前における液冷充電ケーブルコネクタの冷媒入口部の冷媒圧力を0.1～0.5 MPaの範囲で調節した。

開発した液冷充電ケーブルコネクタの冷却特性評価は、上記の条件に対して、表1に示した最大定格充電電流（400 A）を上限として、一定の充電電流を連続通電した際に各部の温度が飽和するまで行った。液冷充電ケーブルコネクタの主要な各部の温度測定は、表1や図2に示すような内蔵温度センサ（合計6点）の他に、図2の冷却評価回路系におけるコネクタ端子温度、充電ケーブル導体温度、インレット端子温度、充電インレットケーブルの導

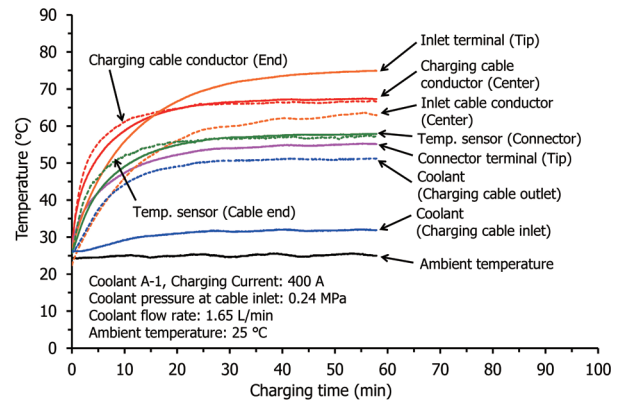


図3 典型的な充電時間に対する液冷充電ケーブルコネクタ各部の温度変化

Fig. 3. Typical temperature rise characteristics of each part of the liquid-cooled charging cable and connector with charging time.

体温度、充電ケーブル端末部の冷媒出入口部の冷媒温度、などを直接測定するための温度センサを取り付けて行った。また、冷媒の流路には、冷媒流量や冷媒圧力を計測するための流量計や圧力計を設置した。冷媒流量は、液冷充電ケーブルコネクタの正極側と負極側の冷媒流量を合わせた総流量で計測した。さらに、充電ケーブル導体部、コネクタ端子部、インレット端子部などの各部の通電による発熱量を算出するために、各部の通電による電圧降下（電位差）を測定し、通電電流と電位差の積で発熱量を算出した。以下では、特に断りのない限り、冷媒圧力、冷媒入口温度および冷媒出口温度はそれぞれ充電ケーブル端末部における冷媒入口部の冷媒圧力と冷媒温度、および冷媒出口部の冷媒温度を示す。

また、冷媒の動粘度の温度依存性から、周囲温度によって冷媒の流動性が変化し、液冷充電ケーブルコネクタの冷却特性に大きく影響することが予想される。そこで、周囲温度25℃付近を基本として、-10℃～+40℃の範囲の周囲温度に対しても、恒温槽を使用した冷却特性評価を行った。

3. 2 冷却特性の評価結果

3. 2. 1 基本的な冷却特性

図3に、最大定格充電電流（400 A）に対する典型的な液冷充電ケーブルコネクタ各部の温度変化を示す。最初に、図2の冷却特性評価回路において、冷媒流路での冷媒の流れに対する充電ケーブル導体長手方向の温度分布に関して説明する。充電電流で生じた充電ケーブル導体部での発熱量の一部が冷媒側に流入して充電ケーブル導体が冷却されるため、冷媒の流れる方向に沿って冷媒温度が上昇していき、その結果として充電ケーブル導体温度も上昇していくこととなる。充電ケーブル導体温度は、充電ケーブルの長手方向に対して中央部（以下、充電ケーブル導体中央部

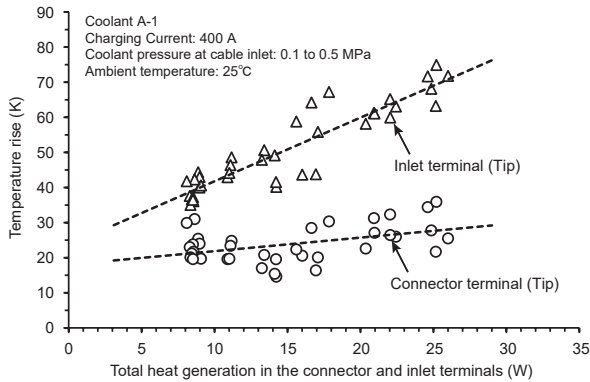


図4 コネクタ端子とインレット端子の総発熱量と各端子先端部の温度上昇量の関係

Fig. 4. Relationship between the total heat generation in the connector and inlet terminals and the temperature rise at the tip of each terminal.

と記す) と充電ケーブル端末部で直接測定しているが、図3を含めて以下で示す充電ケーブル導体各部の温度は、4本の充電ケーブル導体のうちの最大値を示すこととする。また、正極側と負極側とで各部の温度を測定しているが、ほぼ同じ温度を示すことが確認されているため、図3を含めて以下で示す温度は、正極側の温度を示す。

図3より、コネクタ端子温度(先端部)や充電ケーブル導体温度(中央部と端末部)は、充電開始から10分程度までは急激に温度上昇していくが、20分以降ではおよそ温度が飽和していることがわかる。一方で、インレット端子温度(先端部)と充電インレットケーブル導体温度(中央部)においても、充電時間とともに温度上昇していくが、液冷充電ケーブルコネクタ側と比較して温度上昇の時間変化が緩やかな傾向があり、図3の測定結果では温度がおよそ飽和するまでに30分から40分程度かかっている。充電ケーブル導体の中央部と端末部の飽和温度はほぼ同じで約65℃、コネクタ端子温度(先端部)の飽和温度は約55℃となっている。以下において、各部の温度は、特に断りのない限り、飽和温度を示し、冷媒以外の液冷充電ケーブルコネクタ各部の温度上昇量は温度飽和時の飽和温度と周囲温度との温度差を示し、冷媒の温度上昇量は充電ケーブルの冷媒出口部と冷媒入口部の冷媒温度差を示す。図3の例で示すと、周囲温度は25℃であるため、充電ケーブル導体(中央部と端末部)とコネクタ端子(先端部)の温度上昇量はそれぞれ約40Kと約30Kとなる。また、以下では、周囲温度を変化させた場合の液冷充電ケーブルコネクタの冷却特性を考えていくため、基本的には充電ケーブル導体、コネクタ端子および冷媒の温度上昇量で評価していく。

図3では、液冷充電ケーブルコネクタに内蔵した温度センサの時間応答性を知ることができる。充電ケーブル導

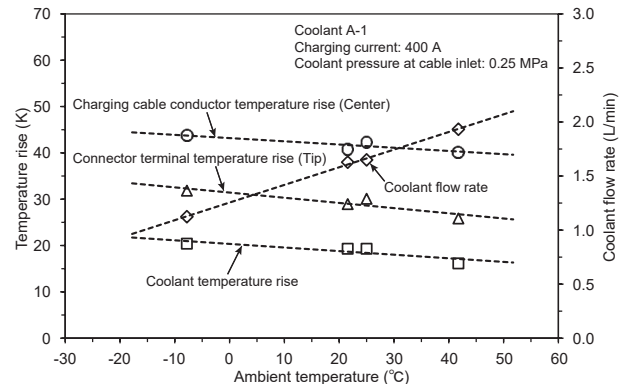


図5 液冷充電ケーブルコネクタ各部の温度上昇量と冷媒流量の周囲温度依存性

Fig. 5. Ambient temperature dependence of the temperature rise of each part of liquid-cooled charging cable and connector and the coolant flow rate.

体とコネクタ端子の温度の時間変化に対して、充電コネクタ部と充電ケーブル端末部に内蔵した温度センサの温度測定値が追従して変化していることがわかる。充電コネクタ内蔵の温度センサと充電ケーブル端末部の内蔵温度センサはほぼ同じ温度を示し、充電ケーブル導体(中央部と端末部)およびコネクタ端子との温度差は、温度飽和時でそれぞれ約10℃と約3℃である。詳細は後述するが、このような温度センサの時間応答性と温度差の特性を利用して充電ケーブル導体温度とコネクタ端子温度を推定することが可能となる。

次に、最大定格充電電流(400A)に対するコネクタ端子とインレット端子の総発熱量と各端子先端部の温度上昇量の関係を図4示す。ここで、構造の異なるインレット端子の使用や、コネクタ端子とインレット端子の接触部の条件を変化させることで、接触部を含むコネクタ端子とインレット端子の総発熱量を変化させた。また、コネクタ端子先端部とインレット端子先端部の温度は、それらの端子の接触部近傍の温度をそれぞれ示す。図4より、コネクタ端子とインレット端子の総発熱量の増加に対して、ばらつきは大きいですが、コネクタ端子先端部の温度上昇量は微増するもののおよそ20Kで一定と見なせる結果であることがわかる。一方で、インレット端子先端部の温度上昇量は、コネクタ端子とインレット端子の総発熱量の増加に対して線形的に増加するとともに、インレット端子先端部とコネクタ端子先端部との間には15K以上という大きな温度差が生じることがわかる。これらの結果から、コネクタ端子先端部の温度上昇量は、インレット端子側との嵌合状態の影響を受けにくく、詳細は後述するが、内蔵温度センサによって推定することが可能である。一方で、インレット端子先端部の温度上昇量は嵌合状態によって大きく影響を受

けるため、内蔵温度センサでは推定することが困難であることがわかる。したがって、インレット端子側の温度を推定するためには、インレット端子側にも温度センサを内蔵させる必要があると言える。

図 5 には、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ の周囲温度範囲に対して、冷媒 A-1 を使用した場合における最大定格充電電流 400 A での液冷充電ケーブルコネクタ各部の温度上昇量と冷媒流量の関係を示す。図 5 より、周囲温度の上昇に対して、冷媒流量は顕著に増加していくが、コネクタ端子、充電ケーブル導体および冷媒の温度上昇量はわずかに低下していく傾向を示し、それらの温度上昇量の低下幅はおよそ 5 K 以内であることがわかる。このような冷却特性を示す要因には、冷媒の動粘度の温度依存性で決まる周囲温度と冷媒流量の関係が大きく関与していると考えられる。後述するように、冷媒流量が増加すると、通電によってコネクタ端子部と充電ケーブル導体部で生じた発熱量が冷媒側へ流入する割合が増加して冷却が効果的に行われるようになる。周囲温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 付近を基準と考え、周囲温度の低下に対しては冷媒の動粘度が急激に増加していくことで冷媒流量が減少していくため、冷却効果が低下して充電ケーブル導体やコネクタ端子、冷媒の温度上昇量が増加していくと考えられる。その際に冷媒温度の上昇にともなって動粘度が減少することで冷媒流量が増加することも同時に起こるため、結果的にはそれらのバランスにより充電ケーブル導体やコネクタ端子、冷媒の温度上昇量の増加幅は抑制されることが考えられる。一方で、周囲温度の上昇に対しては冷媒の動粘度が緩やかに低下していくことで冷媒流量が増加していくため、冷却効果が上昇して充電ケーブル導体やコネクタ端子、冷媒の温度上昇量が低下していくと考えられる。このことから、周囲温度が $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ といった高温でも十分な冷却特性が得られる。具体的には、周囲温度が $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ といった高温環境下でもコネクタ端子と充電ケーブル導体の温度上昇量はそれぞれ約 26 K と約 40 K であり、表 2 に示すそれぞれの温度上昇量（50 K 以下）や到達温度（ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下）の目標冷却性能を満足している。一方で、周囲温度が $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 付近の低温環境下では、コネクタ端子と充電ケーブル導体の温度上昇量がそれぞれ約 32 K と約 44 K とやや大きくなるものの、同様に目標冷却性能を満足する結果となった。

3. 2. 2 冷却特性を決定する重要な因子

図 6 には、通電発熱導体から冷媒への熱流入率と冷媒流量の関係を示す。ここで、通電発熱導体とは、通電発熱源となるケーブル導体とコネクタ端子の総称であり、通電発熱導体での単位時間あたりの発熱量を q_1 [W]、冷媒が受け取る単位時間あたりの熱量を q_2 [W] とすると、通電発熱導体から冷媒への熱流入率 γ は以下で定義される。

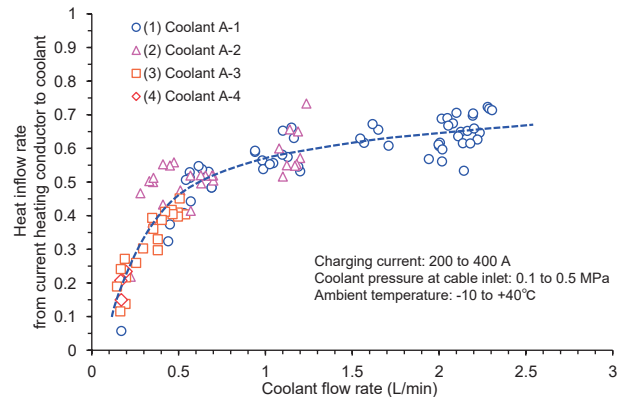


図 6 通電発熱導体から冷媒への熱流入率と冷媒流量の関係
Fig. 6. Relationship between the heat inflow rate from current heating conductor to coolant and the coolant flow rate.

$$\gamma = q_2 / q_1 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、冷媒が受け取る単位時間あたりの熱量 q_2 [W] は、冷媒の密度 ρ [kg/m^3]、冷媒の比熱 c [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]、冷媒流量 U' [m^3/s]、冷媒の温度上昇量 ΔT_{cl} [K] とすると以下の式で計算される。

$$q_2 = \rho \cdot c \cdot U' \cdot \Delta T_{cl} \dots \dots \dots (2)$$

図 6 は、使用した各冷媒 A-1 ~ A-4、試験した充電電流（200 A ~ 400 A）および周囲温度（ $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）といったすべての冷却特性評価結果に対して、通電発熱導体から冷媒への熱流入率（以下、冷媒への熱流入率と記す）と冷媒流量の関係を示したものであるが、大略的には一つの関係で表されることは注目し値する。すなわち、冷媒への熱流入率と冷媒流量の関係は、冷媒種や充電電流、周囲温度などには依存しない傾向があると言える。ここで、冷媒種の影響は、冷媒の動粘度とその温度依存性の違いによる冷媒流量の範囲として現れてくることに留意する必要がある。すなわち、冷媒の最大使用圧力（0.5 MPa）を上限とした冷媒圧力範囲において、動粘度の低い冷媒では冷媒流量を大きくできるのに対して、動粘度の高い冷媒では冷媒流量が小さくなる。また、冷媒流量が 0.5 L/min 程度を境として、冷媒への熱流入率は冷媒流量の増加に対して 0.5 ~ 0.7 の範囲で緩やかに増加するが、冷媒流量の低下に対しては急激に低下する特性を示す。通電発熱導体での発熱量は、基本的に通電発熱導体の外側に伝熱、放散される熱量と冷媒側へ流入する熱量とに 2 分されて伝熱されると考えることができるため、冷媒への熱流入率は通電発熱導体の温度上昇量と到達温度を直接決定づける重要な因子と考えることができる。

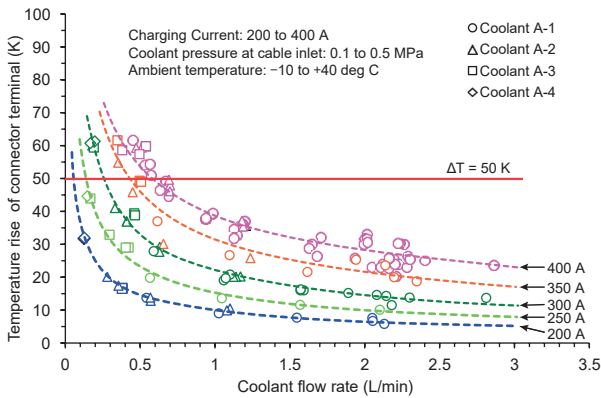


図7 コネクタ端子部の温度上昇量と冷媒流量の関係

Fig. 7. Relationship between the temperature rise of connector terminal and the coolant flow rate.

図7は、各充電電流に対して、使用した冷媒A-1～A-4におけるコネクタ端子の温度上昇量と冷媒流量の関係を示したものであり、図6の評価データに対して視点を変えてプロットしたものである。コネクタ端子の温度上昇量と冷媒流量との関係は、充電電流ごとに、すなわち通電発熱導体での発熱量ごとに決まり、やはり冷媒種や周囲温度には依存しない関係となっている。このような傾向は、充電ケーブル導体の温度上昇量と冷媒流量の関係も同様である。ただし、上述したように、冷媒種の影響は、冷媒の動粘度とその温度依存性の違いによる冷媒流量の範囲として現れてくることに留意する必要がある。図7より、冷媒流量が0.5 L/min程度を境として、コネクタ端子の温度上昇量は冷媒流量の増加に対して緩やかに低下するが、冷媒流量の低下に対しては急激に増加する特性を示すことができる。

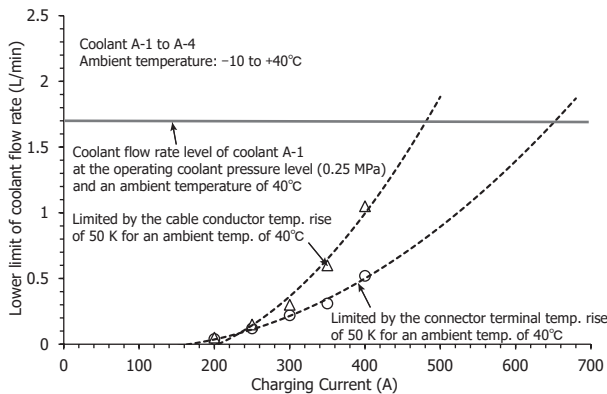


図8 周囲温度 40℃でのコネクタ端子と充電ケーブル導体の温度上昇量の上限 (50 K) で決まる下限冷媒流量と充電電流の関係

Fig. 8. Relationship between the lower limit of coolant flow rate limited by the temperature rise upper limit (50 K) of the connector terminal and the cable conductor for an ambient temperature of 40℃ and the charging current.

表2に示した周囲温度 40℃での目標冷却性能を考えると、コネクタ端子と充電ケーブル導体の温度上昇量が上限である 50 K以下を満足するための冷媒の下限流量が存在することがわかる。この下限冷媒流量は、例えば、図7において、各充電電流に対してコネクタ端子の温度上昇量が上限 (50 K) となる冷媒流量として求めることができる。

そこで、図8に、コネクタ端子と充電ケーブル導体の温度上昇量の上限 (50 K) からそれぞれから求めた下限冷媒流量と充電電流の関係を示す。それぞれから求めた下限冷媒流量は、いずれも充電電流の増加に対して増加する傾向にあるが、液冷充電ケーブルコネクタ全体としての下限冷媒流量は、充電ケーブル導体の温度上昇量で決まることがわかる。例えば、液冷充電ケーブルコネクタにおける冷媒の最大使用圧力が 0.5 MPaであることを考慮して、充電器で運用する冷媒圧力を 0.25 MPaとした場合について考えると、充電しない状態での周囲温度 40℃における冷媒A-1を使用した場合の冷媒流量は 1.7 L/min程度であるため、図8の特性から、最大定格充電電流 (400 A) での下限冷媒流量に対して余裕があることがわかる。実際には、充電時に冷媒の温度上昇によって冷媒の動粘度が低下するため、充電時の冷媒流量は 1.7 L/minよりも大きくなる。したがって、液冷充電ケーブルコネクタの冷却特性としては、最大定格充電電流での下限冷媒流量に対してさらに余裕があると考えられる。これらのことから、目標冷却性能を得るための重要な因子は、冷媒流量であり、この冷媒流量が冷媒への熱流入率を決定し、結果としてコネクタ端子および充電ケーブル導体の温度上昇量と到達温

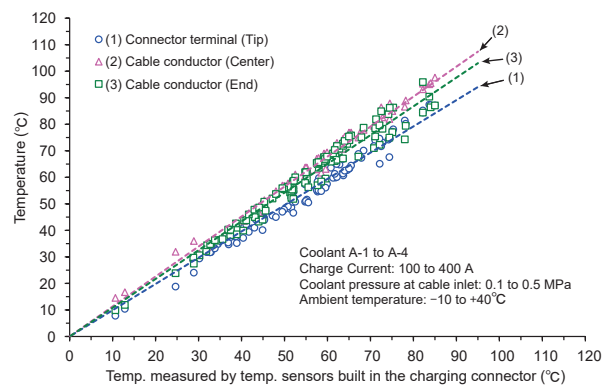


図9 液冷充電ケーブルコネクタ各部の温度と充電コネクタ内蔵温度センサで計測される温度との関係

Fig. 9. Relationship between the temperature at each part of the liquid-cooled charging cable and connector and the temperature measured by the temperature sensors built in the charging connector.

度を決定していると考えられる。使用する冷媒種および冷却装置に関しては、液冷充電ケーブルコネクタにおける冷媒の最大使用圧力を考慮して決めた冷媒の運用圧力範囲に対して、使用する周囲温度範囲で下限冷媒流量以上の冷媒流量を確保できるように選定すればよい。また、実際の充電器では、冷媒の流量を計測することは難しいと考えられるため、使用する冷媒において、例えば、通電しない状態での周囲温度に対する冷媒圧力と冷媒流量の関係を取得しておくことで、冷媒圧力の計測と管理によって冷媒流量を管理することができる。

本論文では、冷却特性の評価結果から、マクロ的に俯瞰した形で、冷却特性は冷媒流量という因子で決定され、充電電流に対する液冷充電ケーブルコネクタ各部の温度上昇量と冷媒流量との関係は、少なくとも今回評価した条件の範囲では冷媒種や冷却装置、周囲温度に依存しないという結論を導き出した。しかし、実際のミクロ的なメカニズムを考えると、流体力学的、伝熱工学的な観点からは非常に複雑な物理現象が液冷充電ケーブルコネクタ内で起きていると考えられる。液冷充電ケーブルコネクタの冷却特性を決めるのは、主に冷媒流路における冷媒流路壁面と冷媒との間の伝熱である。その伝熱特性は、冷媒や関係する構成部材の物性値にも依存するが、大きく影響を受けるのは冷媒流路での冷媒の流速分布であり、特に冷媒流路壁面近傍の冷媒の流速が冷媒側への伝熱を決定づけていると考えられる。本論文での冷却特性評価に使用した冷媒種における物性値の範囲では、動粘度が異なることで流速分布に違いは生じるものの、冷媒流路の壁面近傍での冷媒の流速は、マクロ的な冷媒流量でおよそ決まっていると考えられる。

3. 2. 3 内蔵温度センサによる温度推定

以上から、開発した液冷充電ケーブルコネクタの冷却特性は、表 2 に示した目標冷却性能を十分に満足するものであることがわかった。そこで最後に、液冷充電ケーブルコネクタのコネクタ端子と充電ケーブル導体の温度が、内蔵した温度センサによって推定することができるかを考えてみる。

図 9 に、これまでに示した全ての冷却特性評価データに対して、温度飽和時におけるコネクタ端子および充電ケーブル導体の温度と充電コネクタに内蔵した温度センサの測定値の関係を示す。図 9 より、コネクタ端子（先端部）の温度および充電ケーブル導体（中央部、端末部）の温度と温度センサの測定値との間には、良好な比例関係があり、この比例関係を利用して温度センサの測定値からコネクタ端子温度、充電ケーブル導体温度を推定することができる。このことは、充電ケーブル端末部に内蔵した温度センサについても同様なことが言える。また、図 3 に関して説明

した通り、内蔵した温度センサの時間応答性に関しても良好であり、充電時の過渡的な温度の推定も可能である。

以上より、開発した液冷充電ケーブルコネクタでは、内蔵した温度センサを用いることで、充電器側でコネクタ端子と充電ケーブル導体の温度をリアルタイムで推定し、その推定温度に基づいた充電制御を実現することができると言える。

4. む す び

本論文では、開発した 150 kW超級の液冷充電ケーブルコネクタに対して、様々な条件での冷却特性を評価することで、目標とする冷却性能を十分に実現できていることを確認した結果を中心に述べた。特に、冷却特性に影響する因子としては、使用する冷媒種の物性や冷却装置の冷却能力、充電電流、周囲温度など種々の因子があるものの、目標冷却性能を得るのに重要な因子は冷媒流量であり、この冷媒流量が通電発熱導体から冷媒への熱流入率を決定し、したがって冷却特性を決定づけていることを明確にした。

また、この冷媒流量は、冷媒種が決まれば冷媒圧力で管理することができるため、目標冷却性能を得るのに必要な下限冷媒流量を下回らないように冷媒圧力を設定、管理することで充電器側の運用管理が可能であることを示した。

また、開発した液冷充電ケーブルコネクタに内蔵した温度センサによって、コネクタ端子と充電ケーブル導体の温度をリアルタイムに推定することが可能であり、充電器側にてそれらの推定温度に基づいた充電制御を実現することができることを示した。

以上から、開発した液冷充電ケーブルコネクタは、多様な冷媒種や冷却装置に適用できる性能を有していることが確認できたため、今後は開発した 150 kW超級の液冷充電ケーブルコネクタを実際の充電器に組込んだ形で実証試験を行っていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 堀：「使いやすい ユニバーサルデザインを目指した電気自動車急速充電器用リードケーブル付コネクタ」, フジクラ技報, 第 123 号, pp.100-103, 2012.
- 2) 吉田ほか：「高操作性CHAdEMO仕様EV直流充放電コネクタ付ケーブル」, SEIテクニカルレビュー, 第 190 号, pp.21-26, 2017.
- 3) 中西ほか：「CHAdEMO 100 kW超級大出力EV直流充電コネクタ付ケーブル」, SEIテクニカルレビュー, 第 194 号, pp.46-51, 2019.