

## CHAdemo に準拠した電池推進船の電力システム構成

東京海洋大学 ©佐藤征哉 木船弘康 大出 剛

### 1. はじめに

電池推進船に搭載されるリチウムイオン電池のエネルギー密度は、軽油のような液体燃料と比較すると 1/20 程度であるから、電池推進船の航続距離や航続時間を内燃機関と同等にするのは困難である。そのため電池推進船は短距離運航に用いることが考えられる。また、内燃機関を持たないことから燃料油や、排ガス特有の臭いが無く、振動、騒音のレベルも極端に低いことから旅客輸送に適している。これらのことから、電池推進船は定期観光客船への適用が期待されている。定期観光船は 1 日の間に複数回運航する性能を持つことが求められると、大容量の電池を搭載しなければならない。しかしそれは建造費の増加というコスト面と重量及び船内設置スペースの確保という船体計画の面で課題が多くなる。一方で搭載電池容量にある程度の余裕を持たせることは旅客輸送という航海の安全面では不可欠な要素である。これに対する 1 つの解として停泊中に継ぎ足し充電を行う方法が考えられる。短時間で電池充電状態(SOC:State Of Charge)を回復することができれば複数の課題をバランス良く改善することができる。短時間での SOC 回復には充電電力を大きくする必要があるが、現行の CHAdemo 規格に準拠した充電器はその性能に制限がある。そこで本研究は充電器の性能を最大限に引き出すというアプローチにより課題に応える。その手段として、後に詳述する電池システム構成の最適化に関する検討を行った。評価検討のためのツールとして SOC の時間推移が把握できるシミュレーションを作成した。シミュレーションの運用にあたり、本論文では東京海洋大学所有の電池推進船「らいちょう N」を短距離定期観光船として見立てた。これにより CHAdemo 規格に準拠した電池推進船の電池システムを検討した。

### 2. 電池推進船らいちょう N について

#### 2.1 らいちょう N の仕様

らいちょう N の主要目を表 1、電気系統の概略を図 1 に示す。らいちょう N は二軸船であり、電動機、インバータに加えて、電池も左舷側と右舷側は独立した系統となっている。したがって、充電の際は左舷と右舷それぞれ別々に充電する。左舷側のセル数は 1440 個(直列数 144、並列数 10)、右舷側セル数は 1728 個(直列数 144、並列数 12)という構成になっている。なお、船内ユーティリティー電力を右舷側電池から供給するため、左舷側と比較して右舷側のセル数が多く、電池容量も大きい。一方で直列数は同じであるため、満充電時の電池システム電圧は左右舷共に等しい。

表 1 らいちょう N の主要目

全長	14m	モーター定格	45kW×2
船幅	3.5m	定員	乗組員2名 旅客10名
総トン数	9.1GT	右舷電池容量 左舷電池容量	240Ah 200Ah

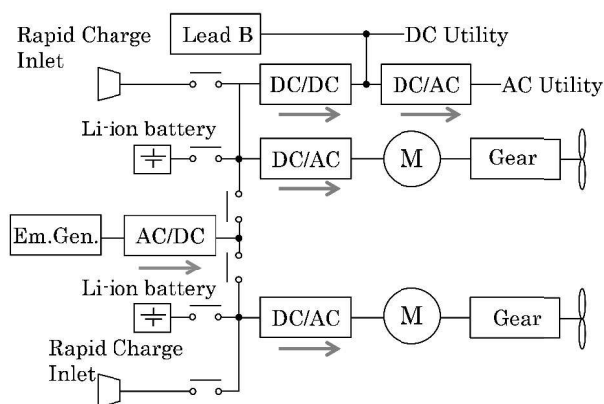


図 1 らいちょう N の電気系統図

## 2.2 CHAdeMO について

らいちょう N の充電方法は電気自動車用の急速充電規格である CHAdeMO 方式<sup>1)</sup>を採用している。CHAdeMO プロトコル準拠の充電器メーカーは、世界で 40 社を超えており、充電設備としての価格は低下してきている。このため、らいちょう N のようにシステム全体を CHAdeMO プロトコルに準拠することは充電インフラ整備の低コスト化、高信頼性を得る上で利点がある。現在の CHAdeMO 方式では最高充電電圧 450[V]、最大充電電流 125[A]、最大充電電力 50[kW]と制限が設けられており、この範囲で充電制御がなされる(図 2 参照)。図から明らかのように充電器の性能を最大限に引き出す(充電電力を最大にする)ためには出来るだけ、高電圧、大電流の領域で充電するのが望ましい。

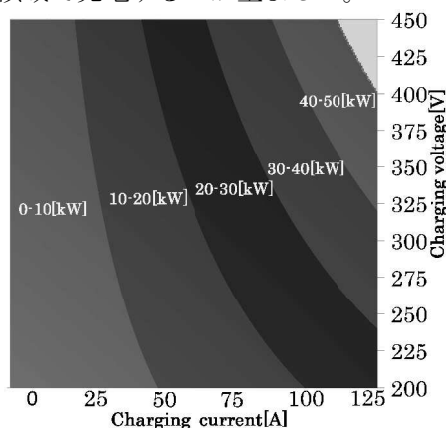


図 2 CHAdeMO 充電規格における電流と電圧の関係

## 2.4 船速と合計推進出力の関係

一般に船速と要求推進出力の間には三乗の関係がある。らいちょう N にも図 3 に示すように同様の傾

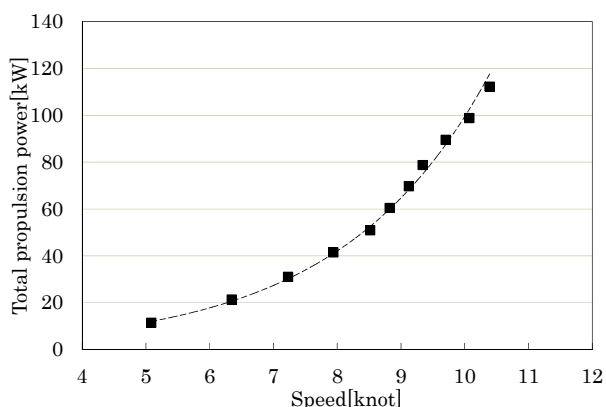


図 3 らいちょう N の船速と合計推進出力の関係

向があり、本研究ではこの関係をシミュレーションに組み込んだ。

## 3. シミュレーション構築時の留意事項

航行中、停泊中の SOC 推移を把握するためのシミュレーションを構築した。シミュレーションの構築にあたり留意されるべき事項を以下に述べる。

### 3.1 充放電電圧特性、終止電圧

一般に電池はその電気化学的特性により内部インピーダンスを持つため充放電レートにより電圧値が変動する。本研究のシミュレーションではこの特性を反映できるようにしている。くわえて、内部インピーダンスを考慮した定電流、あるいは定電圧充電の制御モードの切り替えもシミュレーションに組み込んでいる。

充電器の出力回路のスイッチング動作により、充電電流は脈動する。この脈動によって、充電電圧も脈動する。CHAdeMO の充電電圧の上限は 450[V]であるから、これを考慮してディレーティングする必要がある。このため、本研究では充電電圧の上限を 440[V]と設定した。また、リチウムイオン電池は劣化、破損を防ぐ為に個々のメーカーによって、放電終止電圧が推奨されている。本研究でも推奨される放電終止電圧を下回らないよう留意する仕組みを導入した。

### 3.2 電池残量と SOC

本来電池充電状態を表す SOC は定格電流容量 [Ah] に対する残存電流容量 [Ah] を百分率で表した数値として定義されている。しかし、電池推進船のエネルギー管理や建造計画を検討する上では、電池残量は内燃機関船における燃料残量のように推進用エネルギーの残量として把握できる方が望ましい。そこで本論文では、電池定格電流容量 [Ah] と公称電圧 [V] の積を定格電力容量 [kWh] と定義し、この定格電力容量 [kWh] を基準とした電力容量 [kWh] による電池残量を SOC と再定義し、計算に利用した。

### 3.3 船内電力

船内では船内ユーティリティ用直流 12V 電源の鉛蓄電池が、停泊中、航行中共に常時稼働している。

この鉛蓄電池を充電する際は、右舷側リチウムイオン電池から DC-DC 変換器を通して充電している。本シミュレーションはリチウムイオン電池(主推進用)だけでなく、鉛蓄電池(ユーティリティ用)の SOC も同時に考慮できるようにしている。本論文では、DC-DC 変換器定格容量を 2.5[kW]、船内電力を 2[kW]一定と設定し計算した。

#### 4. シミュレーションによる電池システム構成の最適化

シミュレーションする際の共通の航海条件<sup>(2)</sup>は、航行距離 7.7[mile]、平均船速 6.5[knot]、停泊時の充電時間 21[min]、離着岸および充電準備作業時間 3[min]、1 回目の航行開始時における SOC を 100[%] として与えた。1 日に 5 回航海することを想定しており、停泊中に右舷、左舷の順に継ぎ足し充電を行う。

シミュレーション結果の一例を図 4 に示す。図 4 は、らいちょう N と同じ電池システム構成の場合での計算結果であり、定格電力容量は 145.2[kWh] である。5 回の航海と 4 回の停泊(継ぎ足し充電)を行った場合、5 回目の航海終了時における SOC は左右舷で平均 24.4[%] となった(17.33[kWh])。なお、シミュレーション実施にあたり必要なパラメータの一例を表 2 示す。

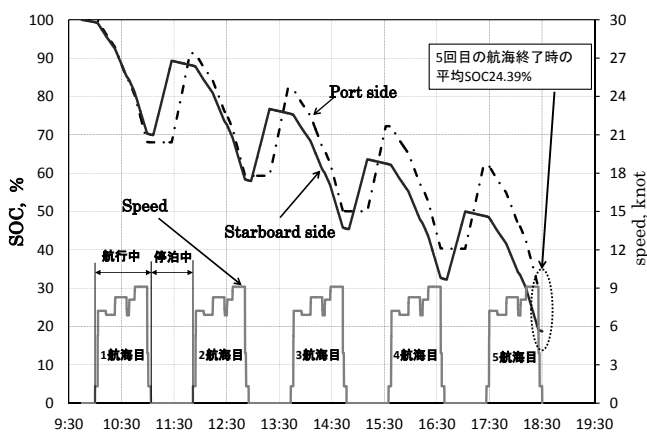


図 4 らいちょう N の電池システム構成でのシミュレーション結果

表 2 シミュレーション実施の際に必要なパラメータの主要目

	パラメータ	単位
リチウムイオン電池	右舷セル直列数	
	左舷セル直列数	
	右舷セル並列数	
	左舷セル並列数	
	セル公称電圧	V
	セルあたり電池容量	Ah
	継ぎ足し充電時間	min
鉛蓄電池容量		Ah
離着岸及び充電準備作業時間		min
船内電力		kW
航行速力		knot
航行距離		mile

#### 4.1 シミュレーション時の電池システム構成

充電器の性能を最大限に発揮させる為に、らいちょう N のセル直列数とセル並列数を変更しシミュレーションした。表 3 に各々の電池システム構成を示す。セル直列数が増加することで、電池システム電圧の変動範囲が高くなる。各条件のセル総数はできるだけ現行のらいちょう N と同等(3168 個)となるよう直並列数を調整した。その結果、セル総数に若干の差異が生じたものの、電力容量の差異は±0.3[%] 以内であり、シミュレーション結果を左右するほどの影響はない。

表 3 シミュレーション時の電池システム構成条件

主推進用電池セル			電圧の変動範囲[V]
直列数	並列数	総数	
122	24	3172	255-317
127	25	3175	266-330
132	24	3168	275-343
138	23	3174	291-359
144	22	3168	317-375
151	21	3171	324-393
158	20	3160	338-411
167	19	3173	363-435
176	18	3168	376-440

#### 4.2 シミュレーション結果

表 3 の条件でシミュレーションした結果が図 5 である。図 5 は、シミュレーションで 5 回航海させた直後の SOC を比較したものである。セル直列数の増加によって電圧の変動範囲が上昇し、充電電力が増加した結果、セル直列数 167 個の時に 5 回目の航

航海終了時の SOC が最も大きくなった。しかし、セル直列数が 176 個の時、5 回目の航海終了時の SOC が減少した。この理由として、ディレーティングした充電電圧の影響が考えられる。本来セル直列数 176 個の時、電池定格電圧は 458[V]である。しかし、ディレーティングした電圧 440[V]を充電電圧の上限としている為、18[V]分の電池容量が使用されずに残った。このため、セル直列数 176 個の 5 回目の航海終了時の SOC が減少した。したがって、らいちょう N を基準として電池システム構成の最適化を検討した場合は、セル直列数が 167 個の時に 5 回目の航海終了時の SOC は最も大きくなり、最適な電池システム構成になると考えられる。

以上のことから CHAdeMO 規格に準拠するシステムを持つ場合、電池システム電圧が CHAdeMO 規格の充電電圧の上限を越えない範囲でセル直列数を増加させれば、充電電力が大きくなる。これにより、停泊中に実施する短時間の継ぎ足し充電であっても SOC 回復量が大きくなった。その結果、電池残量に余裕を持たせることが可能となり、5 回目の航海終了時の SOC が大きくなることが分かった。

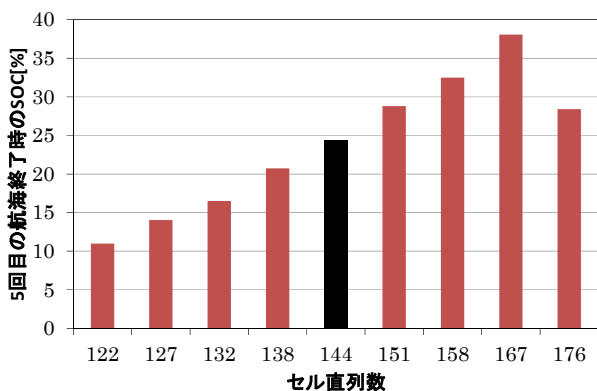


図5 各々のセル直列数に応じた5回目の航海終了時のSOC

### 4.3 セルの削減

先に述べたとおり、ある航海条件(航路、船速、充電時間、離着岸作業時間等)を与えた場合、らいちょう N(セル直列数 144 個)の電池残量は約 1/4(24.4[%]、17.33[kWh])程度であった。仮に 5 回目の航海終了時に同等程度の残量があれば良いと考えれば、電池システム構成の変更により必要なセル総数を削減す

ることも可能になる。そこで、5 回目の航海終了時の電池残量が 17.33[kWh]前後となる条件を満たすようにセル直列数、並列数、及び総数を変更した。その検討結果を図 6 に示す。図 6 はセル直列数、セル総数、5 回目の航海終了時の電池残量[kWh]の関係である。セル直列数を 144 個よりも増加やすと、必要なセル総数は少なくなる。一方で、セル直列数が 144 個より減少すると、必要なセル総数は増加した。らいちょう N を基準として削減を検討した場合は、セル直列数 167 個の時に最もセルを削減(396 個)できる。すなわち、最適な電池システム構成であればセルを大きく削減することが可能であり、電池システムのコスト削減が期待できる。

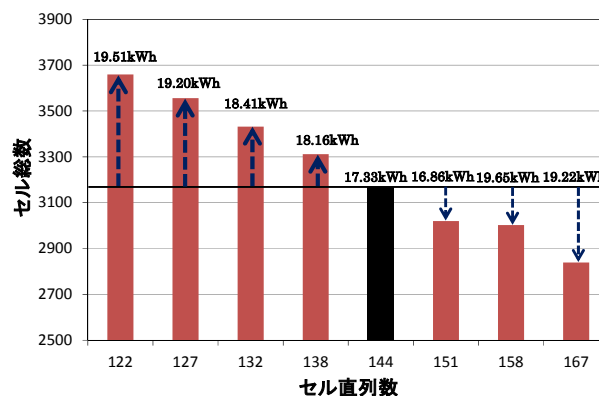


図6 セルの直列数、総数、および5回目の航海終了時の電池残量

## 5. おわりに

セル直列数を充電電圧の上限を越えない範囲で増加させることで、充電器の性能を最大限に発揮することが可能であると分かった。しかし、セル直列数が増加し母線電圧が上昇すると、インバータ内の半導体デバイスの耐圧上限という新たな課題が生じる。くわえて、インバータ効率の問題など未検討の課題が残っている。今後はこれらの課題を含めた総合的な観点から検討し評価を行う。

### 参考文献

- (1) JIS D61851-23、「電気自動車充電システム第 23 部：直流充電ステーション」
- (2) 竹内透、山岸雅、木船弘康 「電池推進船らいちょう N を用いた運航プランとシステム構成について」、第 84 回マリンエンジニア学会学術講演会講演論文集 pp.143-146(2014)