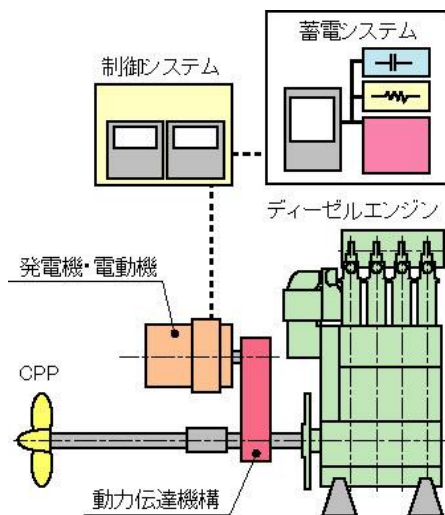


2016年6月24日 平成28年度(第16回)海上技術安全研究所研究発表会

マリンハイブリッドシステムの開発に関する研究



【講演内容】

1. はじめに
2. マリンハイブリッドシステム
3. リチウムイオン電池の安全性評価
4. リチウムイオン電池の小型実験船への搭載
5. ガスエンジン発電機を用いたハイブリッドシステム
6. まとめ

海上技術安全研究所 環境・動力系 平田 宏一

1. はじめに

重点研究「マリンハイブリッドシステムの開発に関する研究」(2011～2015年度)

船舶の省エネ化や高度化の観点から、二次電池や電気モータを利用した船舶のハイブリッド化や排熱回収システムの導入が注目されている。ハイブリッド化された船舶システムは、電気エネルギーを有効利用することによる燃費改善や環境負荷低減などの効果がある。本研究では、各種船舶をハイブリッド化することによる有効性を評価するとともに、船用ハイブリッドシステムの構築に必要となるリチウムイオン電池の要素試験やシステム評価を進めてきた。

リチウムイオン電池に関連した研究課題

①リチウムイオン電池の安全性

- ➡ ✓ 電池セルの安全性評価試験
- ✓ 船用電池システムの規格化

②リチウムイオン電池の小型実験船への搭載

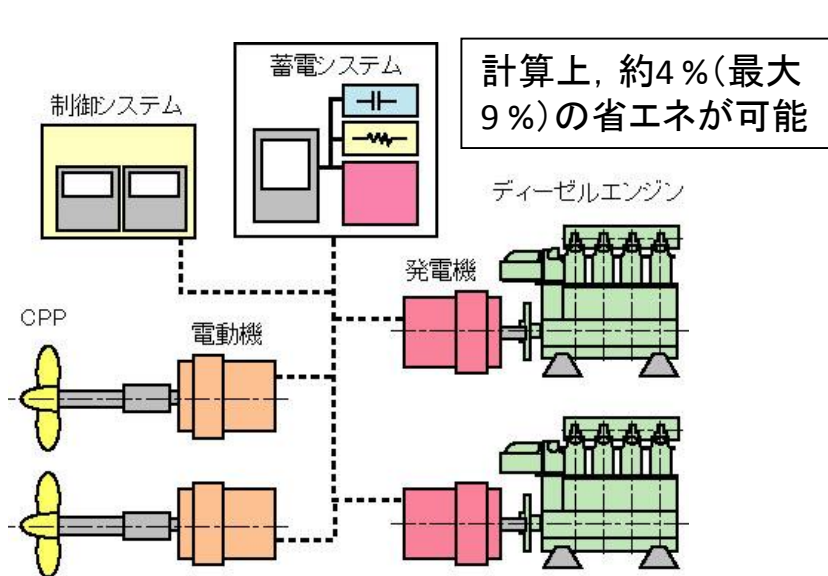
- ➡ ✓ 各種充放電試験とシステムの動作確認試験
- ✓ 主機アシストによるハイブリッドシステム試験

③船用ガスエンジン発電機とのハイブリッドシステムの構築

- ➡ ✓ 補機との組み合わせによる燃費改善と環境負荷の低減
- ✓ 主機ハイブリッドによる負荷変動の平滑化

2. マリンハイブリッドシステム

●本研究では、様々なシステム形態を検討し、その省エネ効果や船舶への適用性を評価してきた。

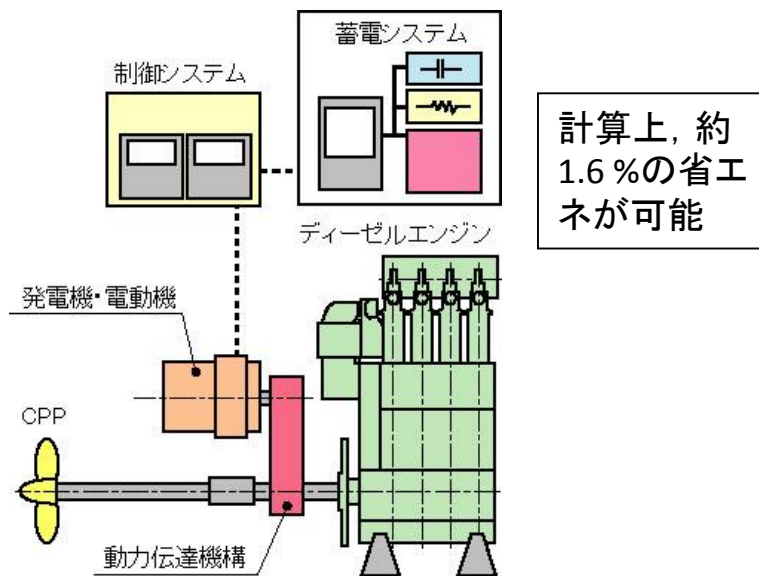


(a) シリーズハイブリッド式

○電動機とCPPによって、波浪に合わせた理想的な最適制御(回転数と翼角)が可能である。

△発電機を駆動するため、高効率な2ストロークエンジンを使いにくい。

△システム構成が複雑になり、高コストとなる。



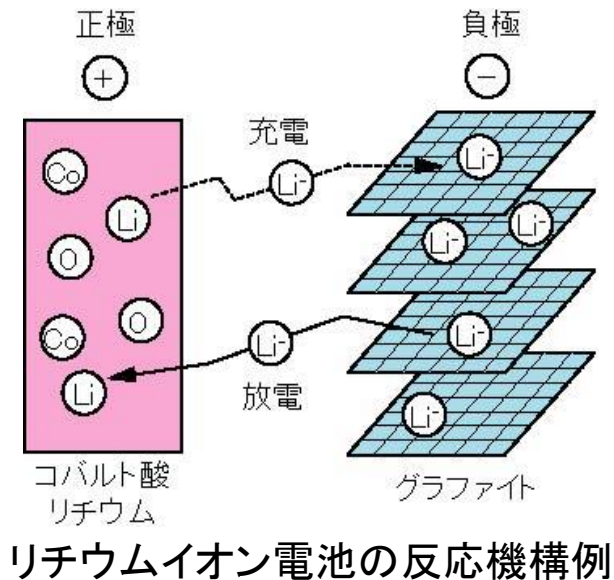
(b) パラレルハイブリッド式

○高効率な2ストロークエンジンを使うことができる。

○システム構成が簡単で、安価である。

△エンジンの回転数変動に制限を受けるため、理想的な最適制御が難しい。

3. リチウムイオン電池の安全性評価



発熱・過電圧により、電解液等の内部材料が可燃性ガスに変化する。



正極材の熱暴走などにより、電池内部温度が発生ガスの発火温度を超えると、発火・爆発する。

リチウムイオン電池の発火発生例

発熱・過電圧の発生要因

発熱	<ul style="list-style-type: none"> ・内部短絡, 外部短絡などにより発生する過電流や電池劣化により発生する内部抵抗増大によるジュール熱の上昇 ・熱暴走(電池内部の発熱をきっかけに, 内部材料が連鎖的に発熱反応を起こし, 急激に内部温度が上昇する現象であり, 過充電などにより内部材料が不安定になった場合に起こりやすい。)
過電圧	<ul style="list-style-type: none"> ・過充電

●リチウムイオン電池の種類

正極材料	LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiNiO_2 , LiFePO_4 , $\text{LiCo}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ 等
負極材料	LiC_6 , $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 等
形状	ラミネート型, 円筒型, 角型 等

その他, 電解液(電解質), セパレータの種類や定格容量の違いにより, リチウムイオン電池には多くの種類・形式がある。



リチウムイオン電池は様々な種類が存在し,

- 構成材料によって, 性能や特性が大きく異なる。
- 正極材料によって, 過熱時の発生ガス(酸素)や熱暴走の発生温度が異なる。
- セル形状の違いや安全弁の有無によって安全性が異なる。



多種類のリチウムイオン電池の安全性評価試験や船舶搭載のための適切な電池セルの選定が必要となる。

●各種電池セルの安全性試験

●2012年に発行された産業用リチウム二次電池のJIS規格(JIS C 8715-2)では、単電池及び電池システムの試験方法等について詳細に記されている。

単電池および電池システムの試験概要 (JIS C 8715-2より一部抜粋)

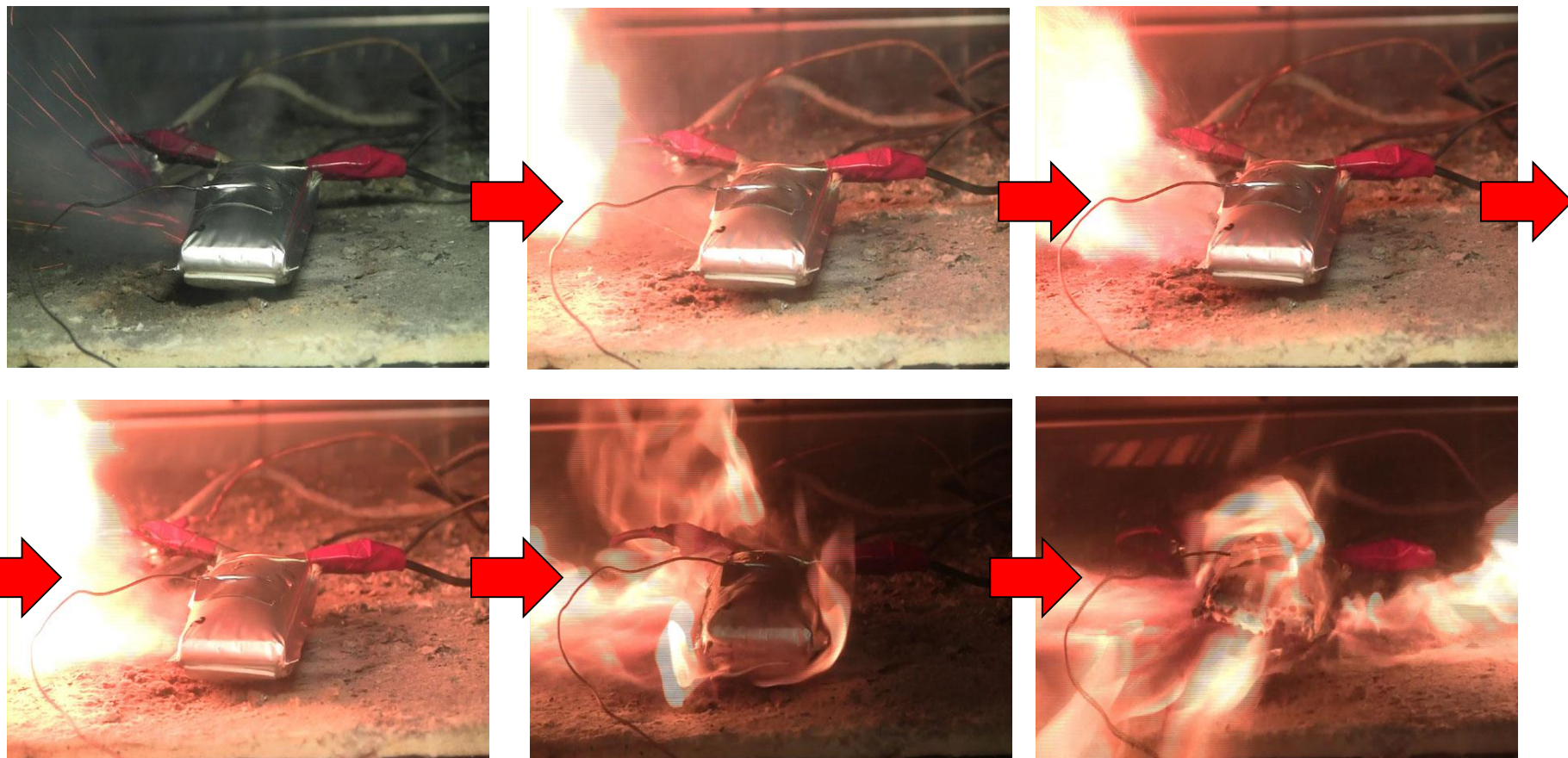
試験名	条件概要	評価基準
外部短絡試験	正極端子と負極端子を $30 \pm 10\text{m}\Omega$ の外部抵抗で短絡させる。	発火または破裂がないこと
衝突試験	直径15.8mmの丸棒により衝撃を加える。	表面温度が 170°C を超えないこと。 また、発火・破裂がないこと
落下試験	試験対象の質量に応じた高さから落下させる。	発火または破裂がないこと
加熱試験	$85^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ の温度まで上昇させ、3時間保持する。	発火または破裂がないこと
過充電試験	上限充電電圧の120%まで、定電流で充電する。(独立の2重保護機能を持たない場合)	発火または破裂がないこと
強制放電試験	1ItA (1C) で90分間強制放電させる。	発火または破裂がないこと
耐熱暴走試験	耐内部短絡試験または耐類焼試験(1つのセルを加熱等で熱暴走させる)を実施する。	左記試験の要求に適合すること



これらの試験を満足すると考えられる複数の電池セルに対して、JISを上回る厳しい条件で加熱試験および過充電試験を行った。

●リチウムイオン電池の発火事例

●下図の例では、充電最高電圧4.2 Vに対して、5.0 Vの過充電試験で発火した(SOC: 約200%)。



過充電試験によって発火した電池セルの一例

●各種セルの安全性試験のまとめ

- (1) 入手できた国内外製18種類の電池セルを使用し, JIS C 8715-2 の製品安全性試験を上回る加熱試験, 過充電試験および試験後の針刺し(内部短絡)を行った。
- (2) ほぼすべての電池セルは, JIS C 8715-2 の製品安全性試験を十分に満足すると考えられる(過充電120%, 加熱85°C)。
- (3) 一連の試験において, 発火に至った電池セルは5種類であり, いずれもリン酸鉄系リチウムイオン電池ではなかった。ただし, リン酸鉄系リチウムイオン電池からも可燃性ガスが発生し, 条件を整えば発火することが確認されている。
- (4) 一連の加熱試験において, 130°Cの温度に耐えられなかったのは, 1種類である。
- (5) それぞれの電池セルによって, 温度変化, 電圧変化, セルの変形や破損・発火に至る挙動が大きく異なることが確認された。



本研究開発は, 海上技術安全研究所, 渦潮電機株式会社, 一般財団法人日本海事協会との共同研究体制により実施すると共に, 同協会の「業界要望による共同研究スキーム」による支援を受けて実施しました。

※本共同研究の詳細は(一財)日本海事協会研究開発推進部の研究成果一覧(<http://report.classnkrx.com/researchresult.nsf>)からご覧いただけます。

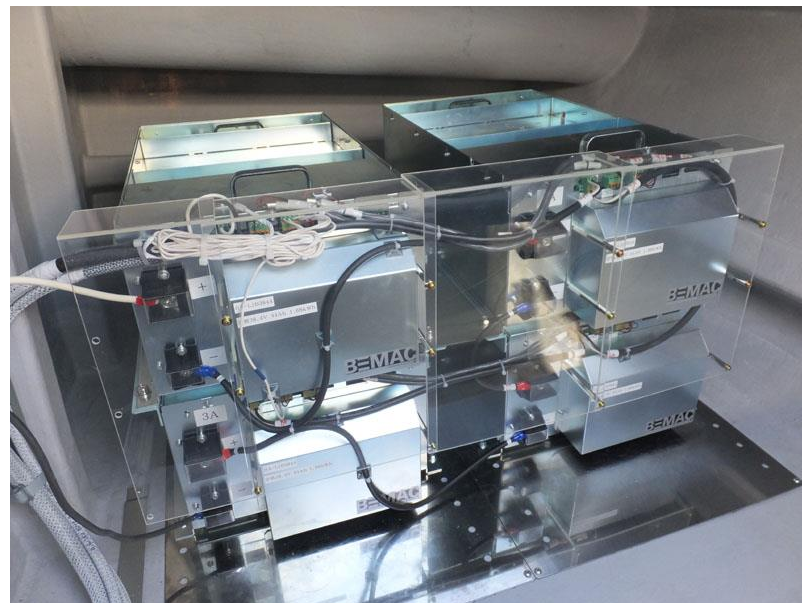
4. リチウムイオン電池の小型実験船への搭載

●2015年4月、リチウムイオン電池システムを小型船舶に搭載し、2016年3月までに各種充放電試験や長期船内使用における性能劣化特性の評価などを実施した。



シームレス実験船「神峰」

- ・全長:16.5m, 幅:4.6m
- ・最大搭載人員:33名
- ・総トン数:約17トン
- ・主機定格出力:450kW
- ・ディーゼル推進(電池システムは主に船内電力等の補助電源に使用)

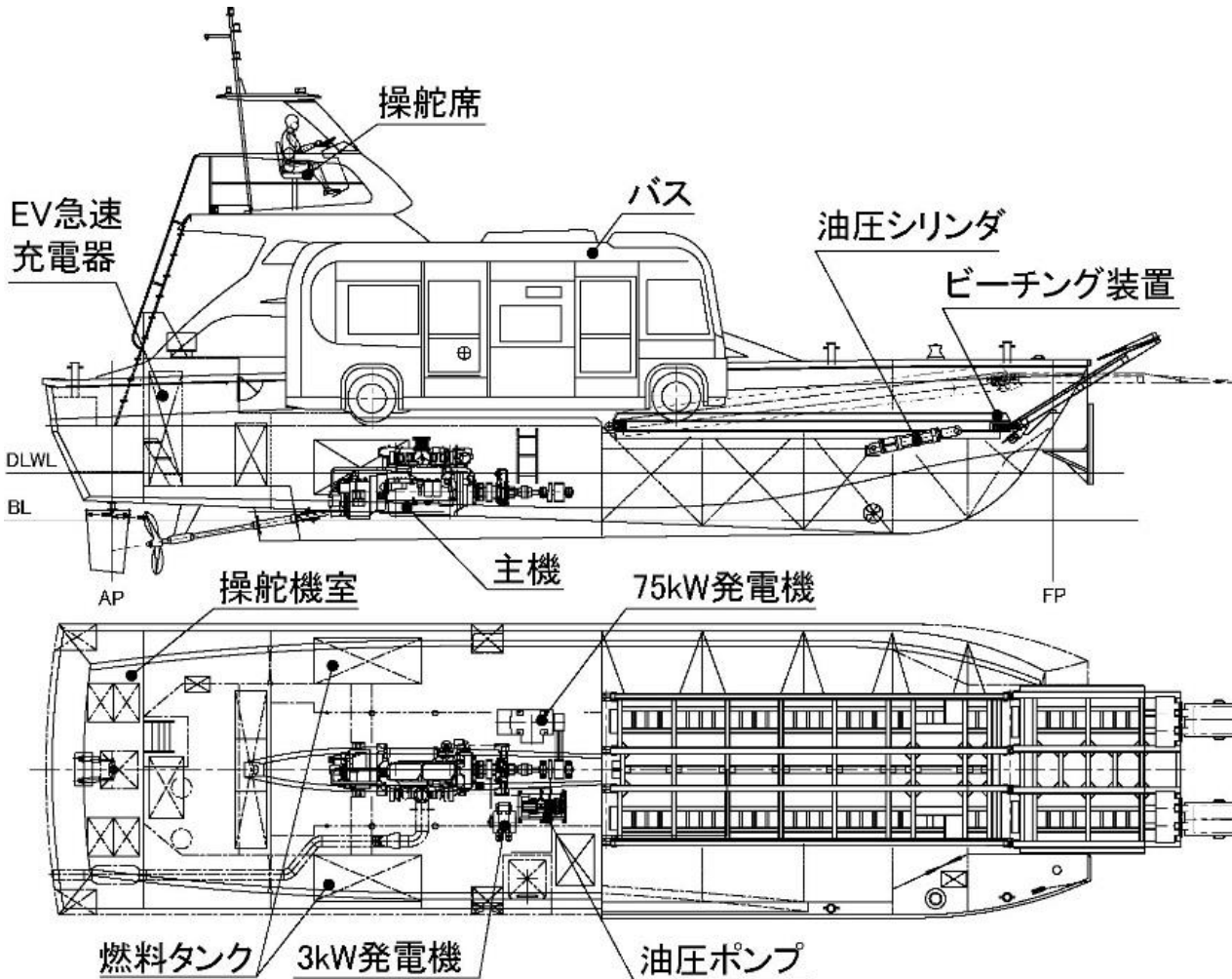


搭載した13.4kWh電池システム
(1.68kWh × 4直列2並列, 渦潮電機製)

※本シームレス実験船は、海上技術安全研究所が国土交通省による交通運輸技術開発推進制度「離島の交通支援のためのシームレス小型船システムの開発」として社会実験を行ったプロジェクトで開発しました。

※本船のEV充放電システムおよびリチウムイオン電池システムは、ヤママー(株)、渦潮電機(株)と共同で開発しました。

●シームレス実験船の特徴とシステム構成



シームレス実験船の構造

開発コンセプト・特徴

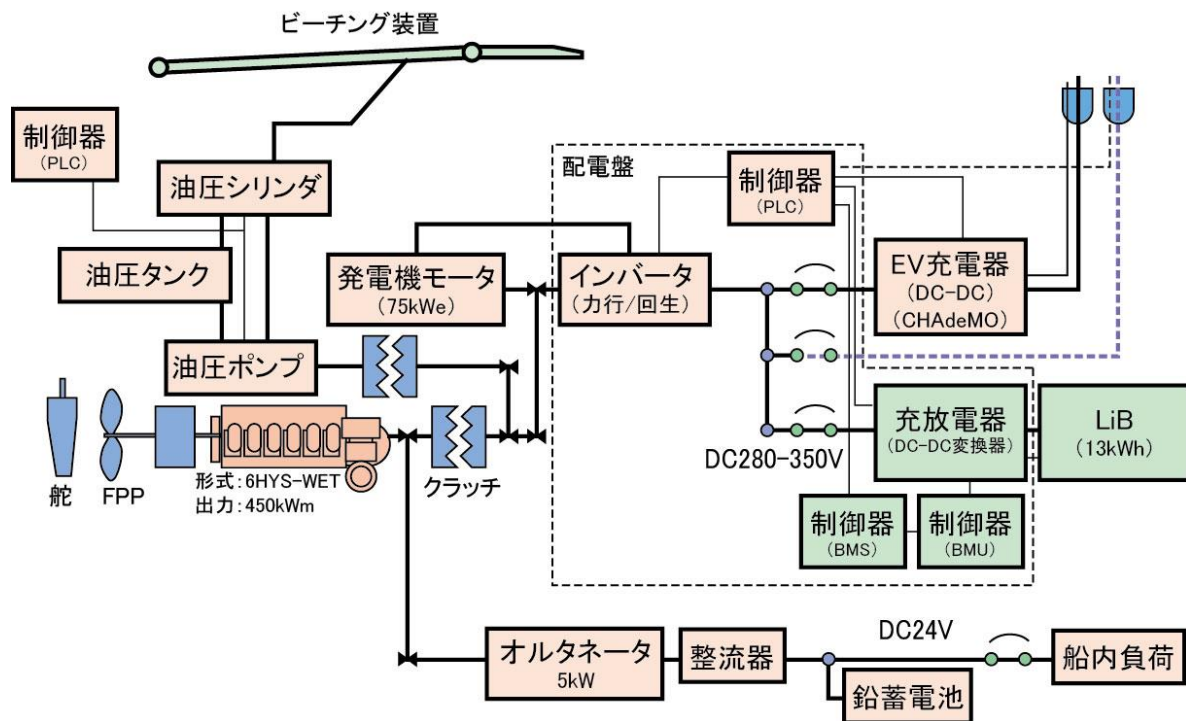
- (i) 総トン数20トン未満の小型船舶である。
- (ii) 船体がFRP製である。
- (iii) 乗下船装置を有し、旅客室を兼ねた小型バスを搭載できる。
- (iv) 電気自動車(EV)の搭載を想定して、急速充電器等の機器を搭載している。



- (v) シームレス小型船システムの実用化に向けて、船員の負担を低減するための省力化技術の構築を行う。
- (vi) 実運航時の負荷変動を伴う状況下で安定したEV・LiB充放電を実現するための技術開発と安全性の検証を行う。

●シームレス実験船の特徴とシステム構成

●船内には、電気自動車(EV)の搭載を想定した急速充電器やハイブリッドシステムの試験に使用するリチウムイオン電池等の電気機器を搭載している。



シームレス実験船の動力システム

EV・LiB充放電の運転モード

- (1) EV充電モード
- (2) EV充電アシストモード
- (3) EV・LiBダブル充電モード
- (4) LiB充電モード
- (5) エンジンアシストモード
- (6) 単独EV充電モード
- (7) ビーチングモード



リチウムイオン電池を搭載し、船内電力機器の供給や推進時のエンジンアシストなど、様々な実証試験を実施する。

●シームレス実験船の臨時航行試験

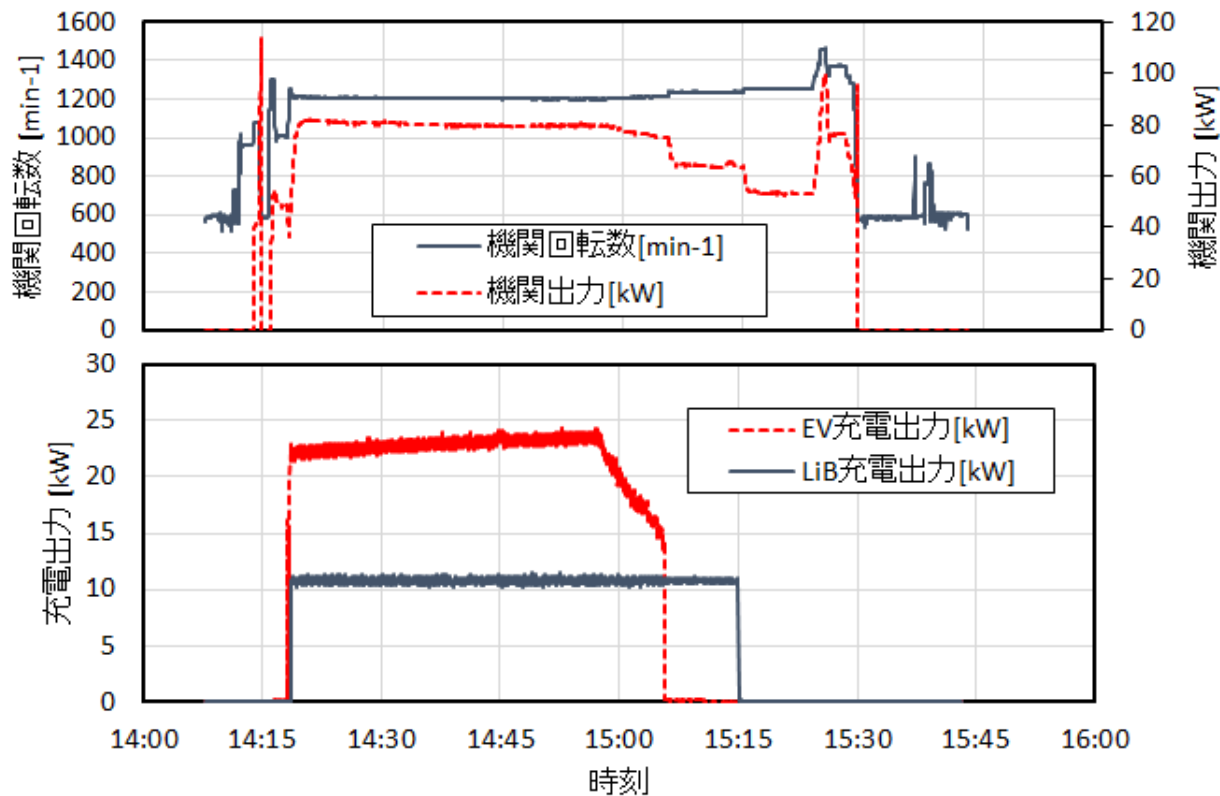
●EV充電制御システムおよびリチウムイオン電池を含む船内電気機器の制御アルゴリズムを開発し、動作確認試験やシステム安全性検証試験を実施した。



電気自動車の乗船



電気自動車の充電



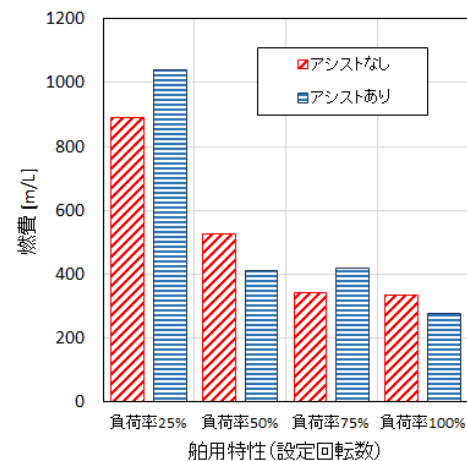
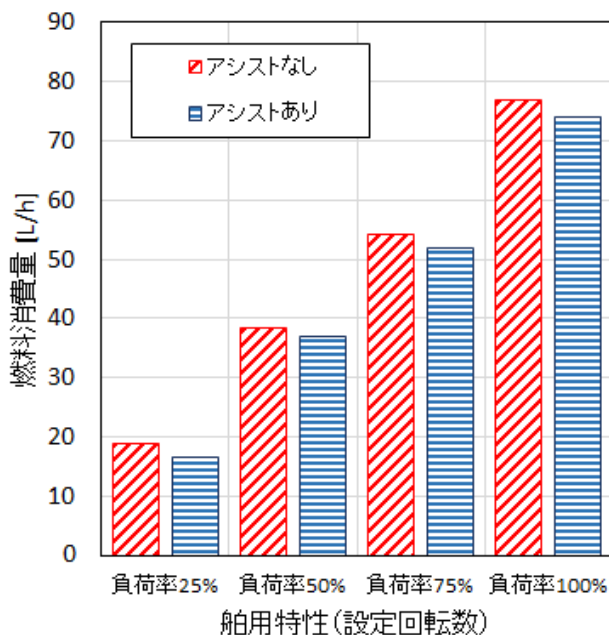
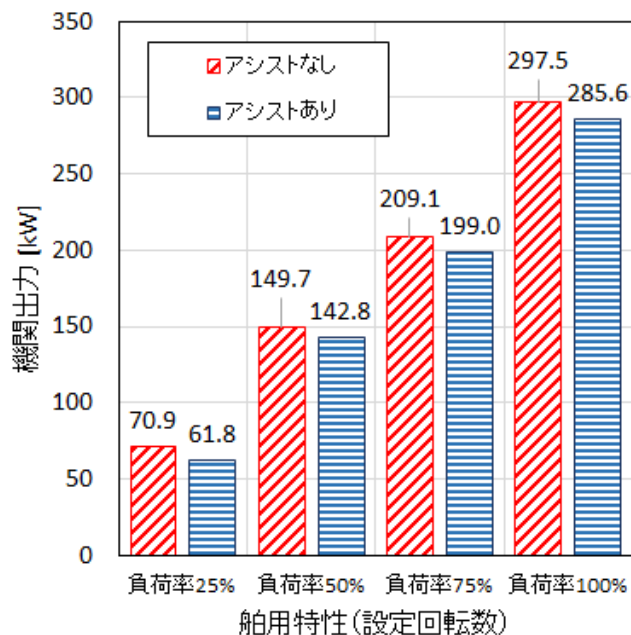
EV・LiBダブル充電モードの試験結果例

● 試験結果の一例（エンジンアシストモード）

● いずれの負荷条件においても、エンジンアシストによって約10 kWの主機出力低減とそれに伴う燃料消費削減効果が確認できた*。

● 潮流や風の影響を大きく受けるため、航行の省エネ化についての評価は難しい。

※機関出力および燃料消費特性は排ガス温度から概算した推定値である。



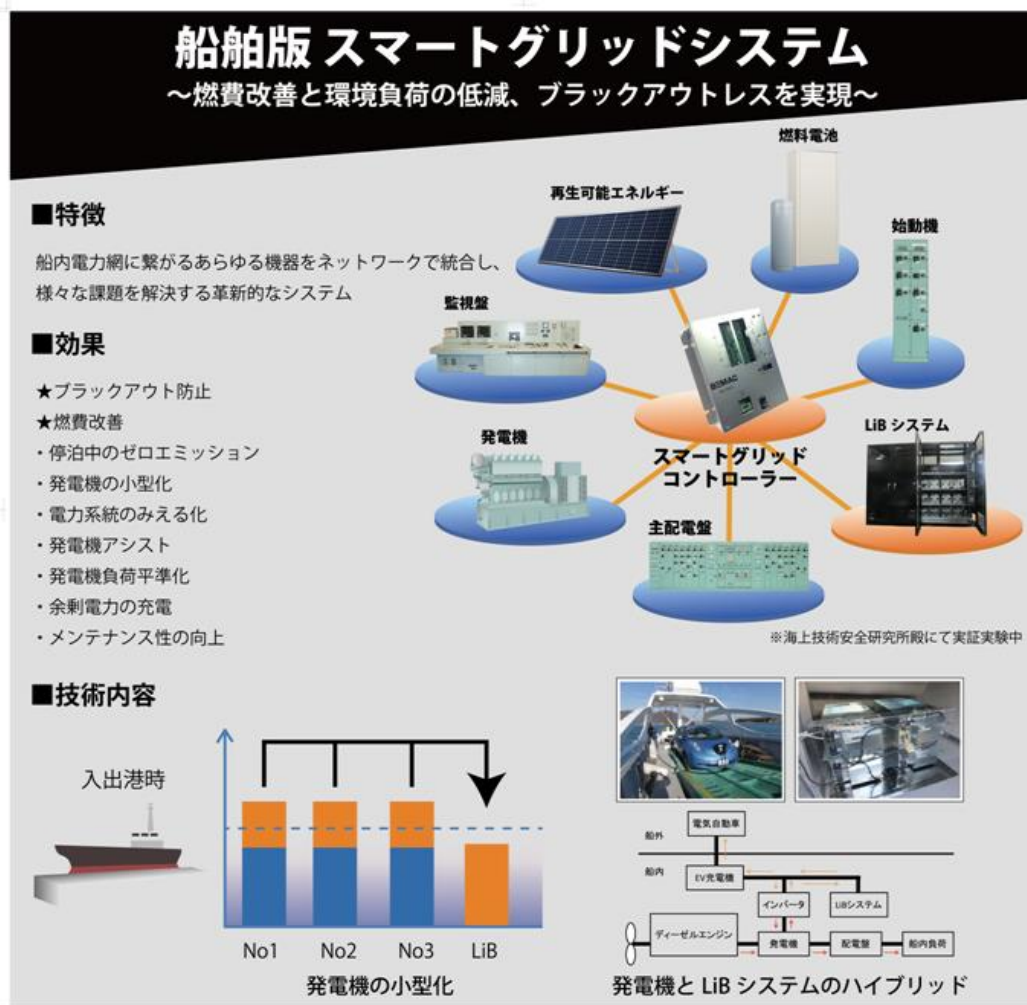
➡ 運航中、EV充電・LiB充放電の7つの運転モードについて試験を行い、いずれのモードも問題なく動作できることを確認した。

5. ガスエンジン発電機を用いたハイブリッドシステム

●当所が所有する400 kWガスエンジン発電機と渦潮電機(株)が開発した60 kWhリチウムイオン電池システムを組み合わせ、船舶の負荷変動やブラックアウト防止に対応するためのハイブリッドシステム(船舶版スマートグリッドシステム)を構築する。

●エンジン発電機とリチウムイオン電池を利用した実用的なハイブリッドシステムを開発することを主目的として、詳細な試験を実施することで、本システムの有効性や省エネ効果、船舶への適用性について考察する。

本研究は、渦潮電機(株)との共同研究「船用ガスエンジン発電機を用いた船内電力有効活用に関する研究」で実施しています。



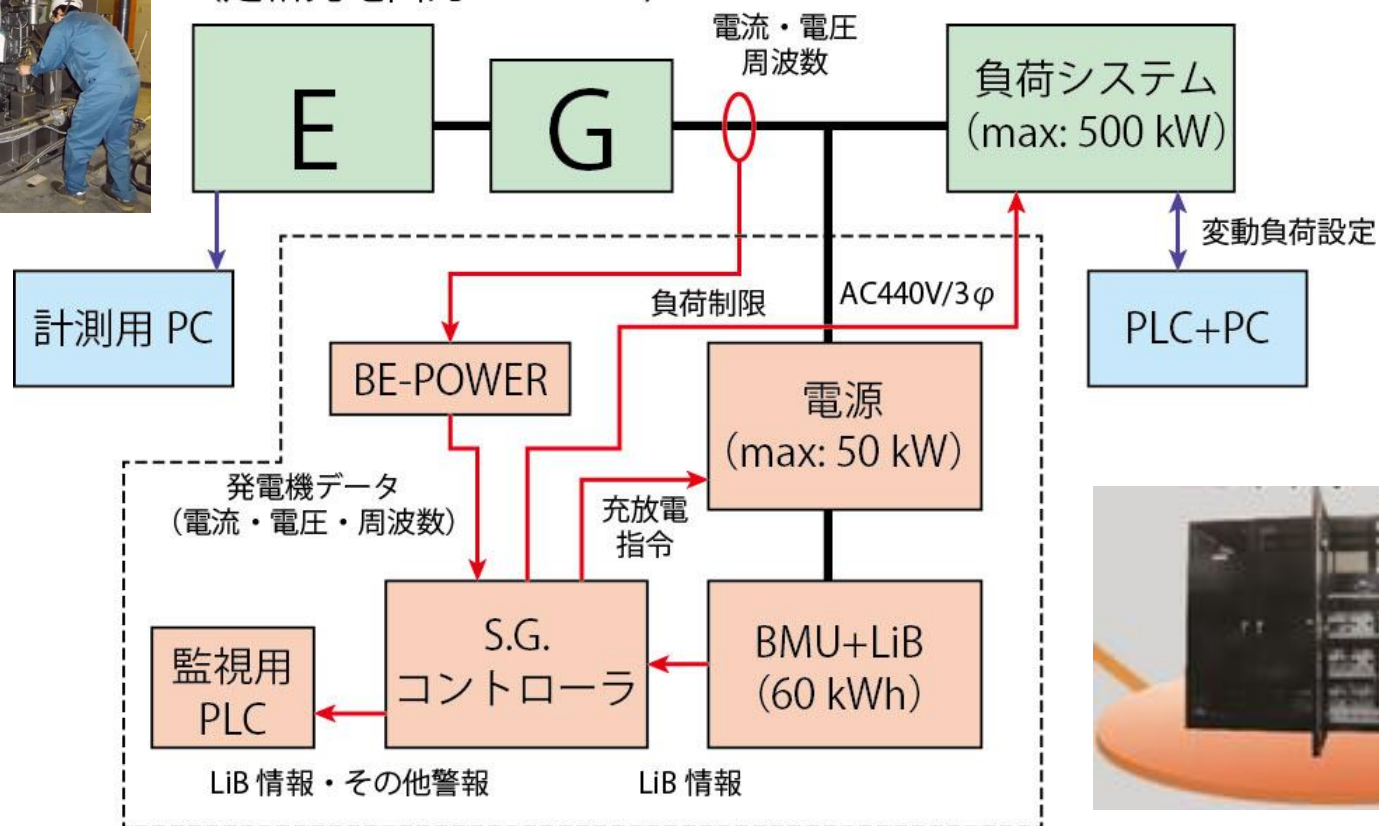
システム概要(提供:渦潮電機株式会社)

●システム構成

●2015年11月より、海上技術安全研究所において実機試験を進めている。



ガスエンジン+発電機
(定格発電出力：400 kW)

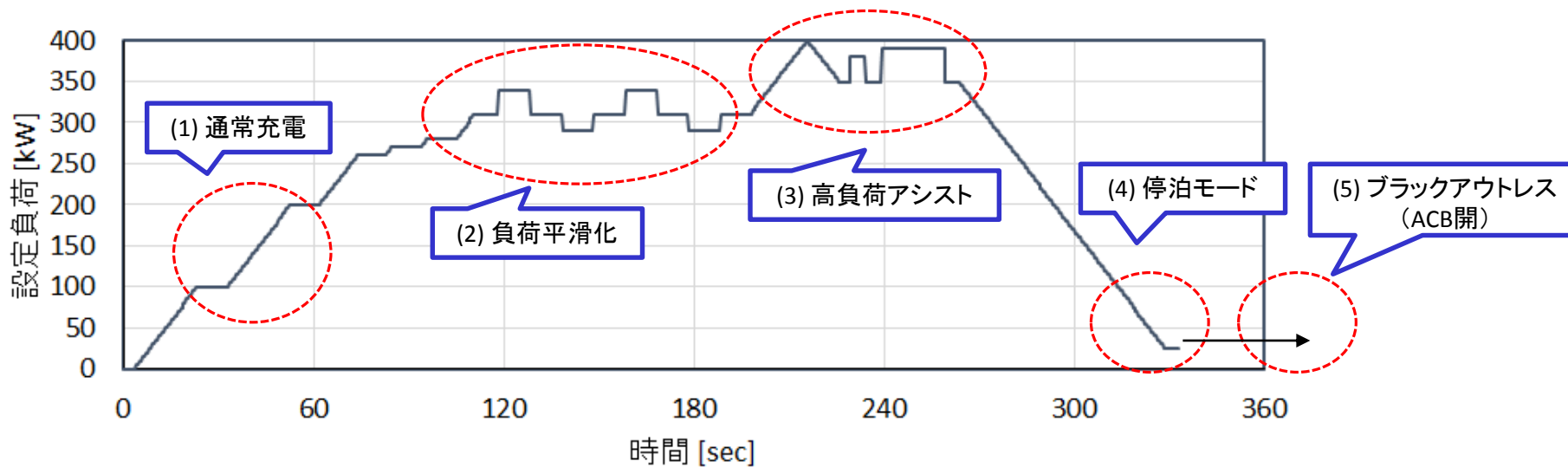


陸上実験用システムの構成

●補機スマートグリッドの運転モード

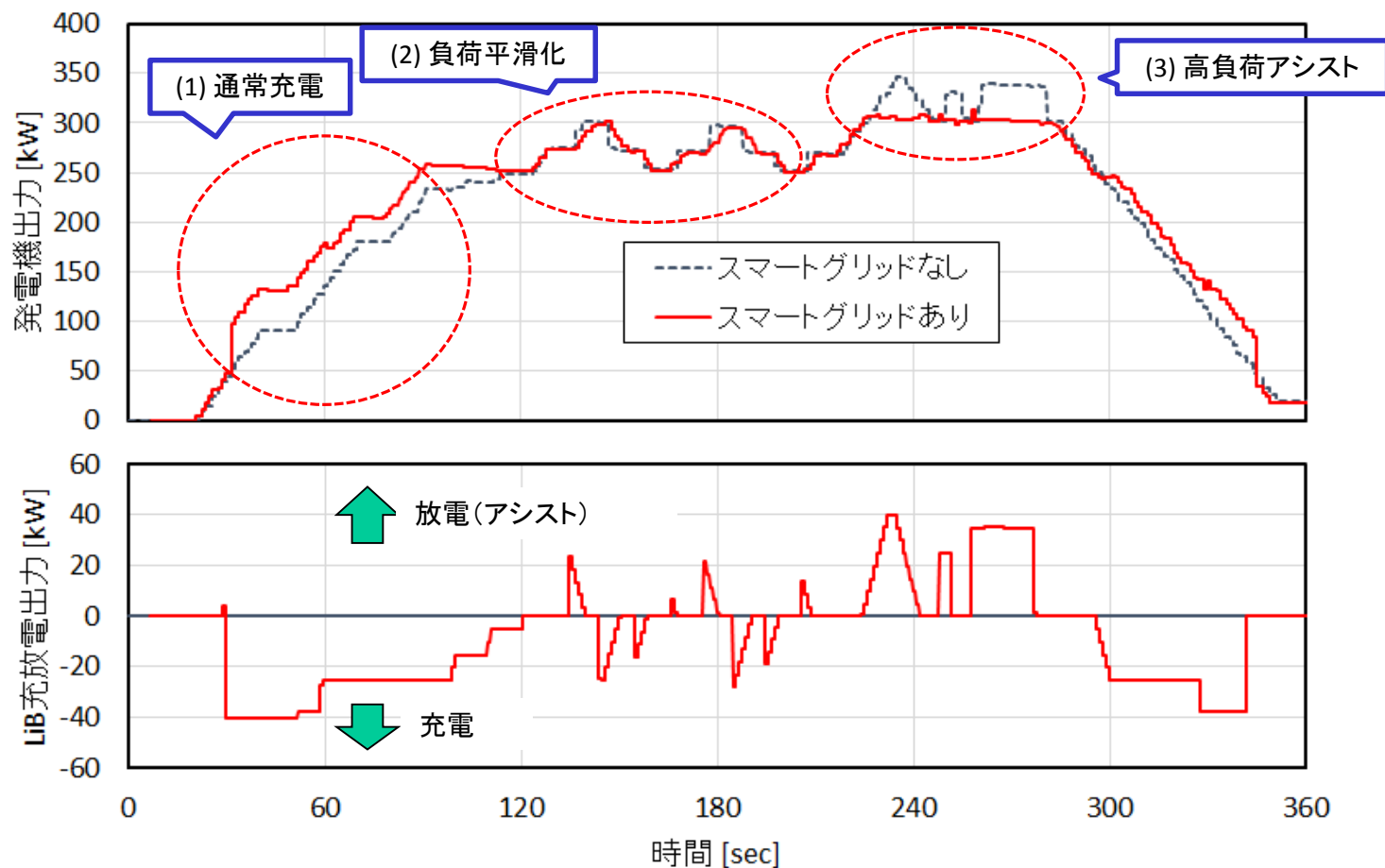
●大型貨物船の運航を想定した以下のモードにおいて、リチウムイオン電池 (LiB) の充放電を行う。

No.	モード	概要
1	通常充電	低負荷運転時, LiBに充電するモード
2	負荷平滑化	発電機の急激な負荷変動を滑らかにするモード
3	高負荷アシスト	高負荷運転時, LiBを放電 (LiBから発電アシスト) するモード
4	停泊モード	停泊時にLiBだけで船内電力を賄うためのモード
5	ブラックアウトレス	ブラックアウト時にLiBの単独運転を行うモード



設定負荷 (補機デモンストレーション)

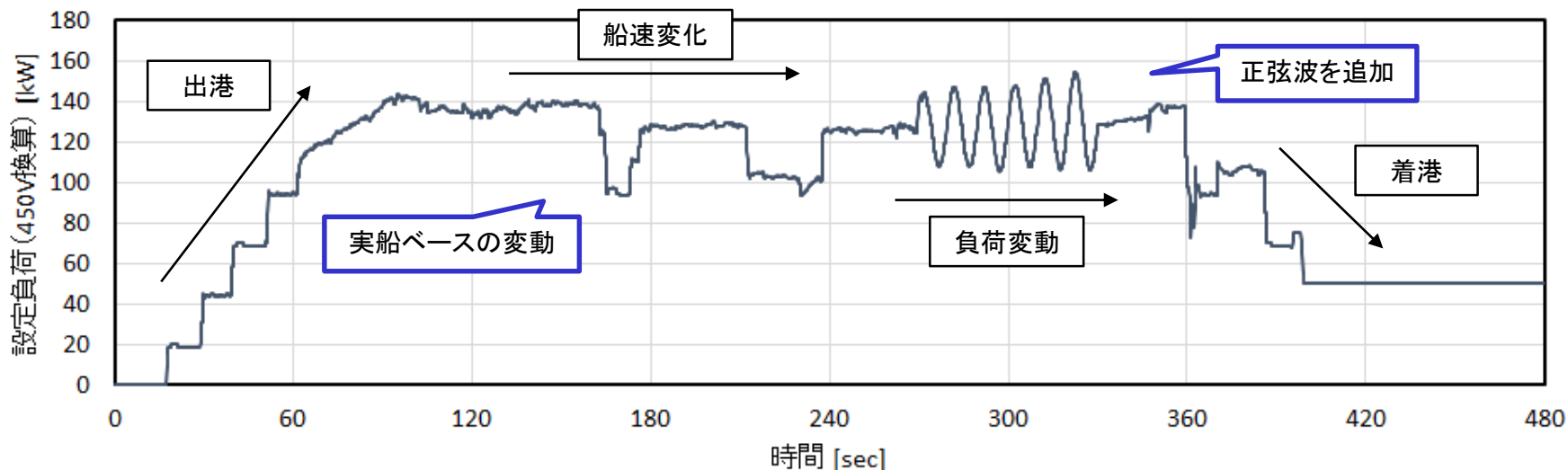
● 補機スマートグリッドの試験結果例



➡ ポンプやコンプレッサのON/OFFを想定した負荷変動を平滑化できるなど、すべてのモードが適切に機能することを確認した。

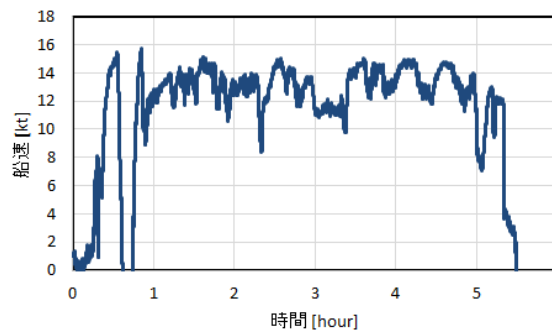
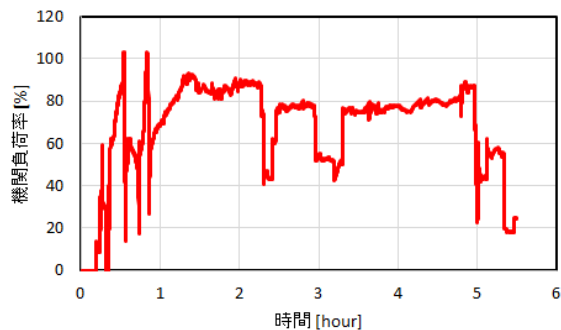
●主機ハイブリッドモード

●主機ハイブリッドモードでは、現在の出力測定値(発電出力)を見ながら、負荷変動を平滑化する。



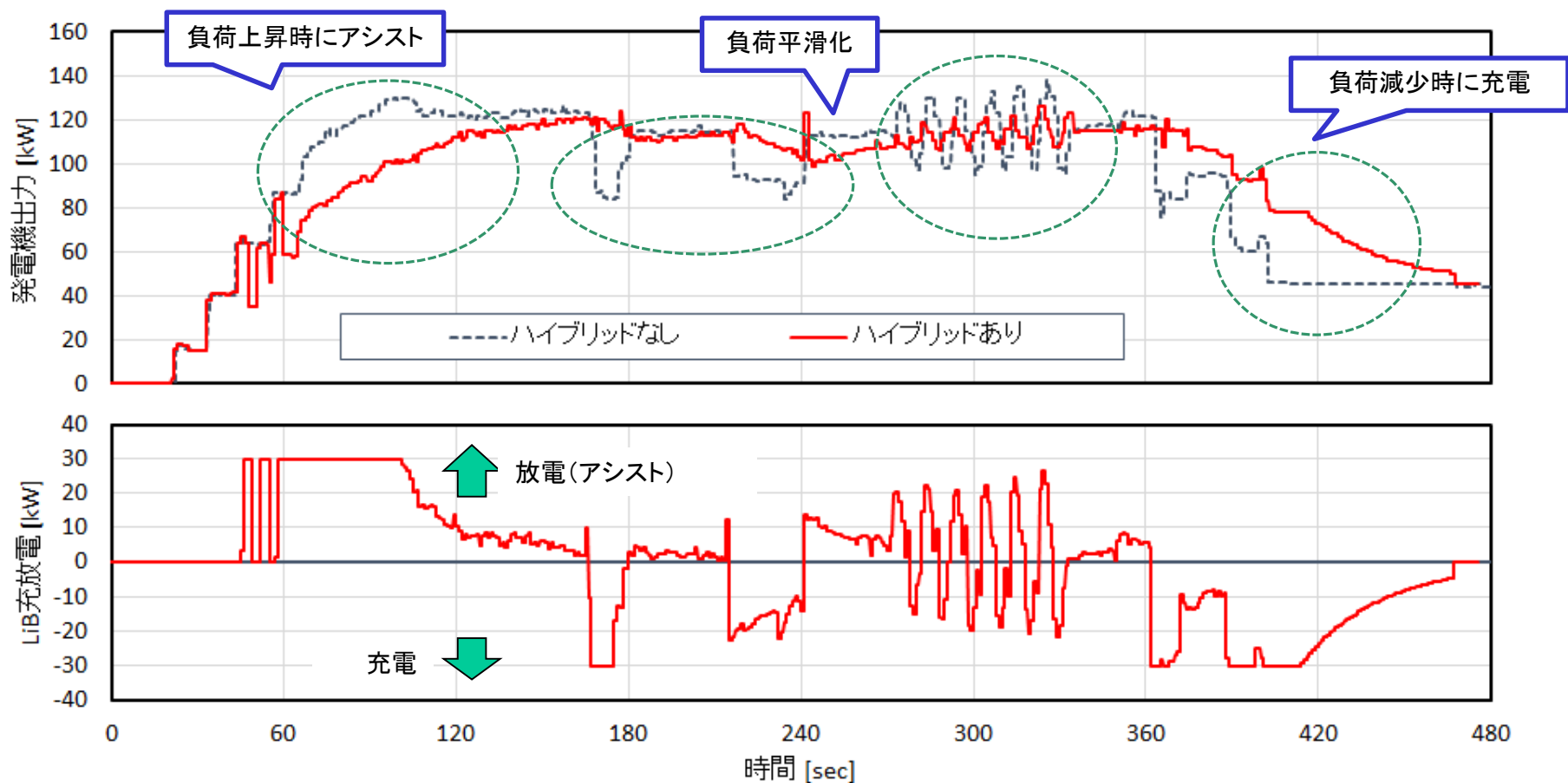
設定負荷(主機ハイブリッドモードのデモンストレーション)

【参考】



※内航貨物船の海上試験時のデータ(左図)をベースにして、デモンストレーション用の入力信号(負荷変動)を作成している。

●主機ハイブリッドモードの試験結果例



➡ 実船データに基づく任意の負荷変動を与えた場合であっても、リチウムイオン電池の充放電が適切に行われることを確認した。

6. まとめ

- (1) 本研究では、マリンハイブリッドシステムを構築するときに重要課題となるリチウムイオン電池の安全性について、現行規格以上の試験も含め、様々な観点から試験や検証を実施し、船舶に求められる高い安全性を確保できるシステムを開発することができた。
- (2) リチウムイオン電池システムを小型船舶に搭載し、各種試験を行い、運航中のEV・LiB充放電が適切かつ安全に運転できることを確認した。さらに、長期船内使用におけるリチウムイオン電池の性能劣化特性についても多くの知見が得られた。
- (3) 400kWガスエンジン発電機と60kWhリチウムイオン電池を組み合わせた陸上実験用ハイブリッドシステムを構築し、負荷変動の平滑化などに有効であることを確認した。