

船舶電化の進展と電力最適制御システムの 構築に向けて

2023年12月4日

株式会社MTI 船舶物流技術グループ 船舶システムチーム
山口 真

船舶電化の進展

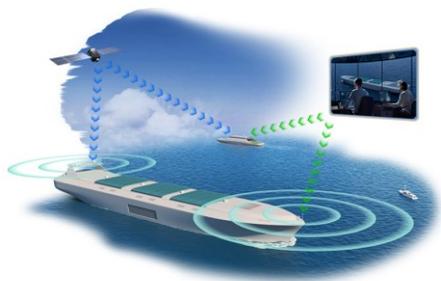
省エネ・安全向上・省力化の観点から船舶においても電化の進展が見込まれる

省エネ

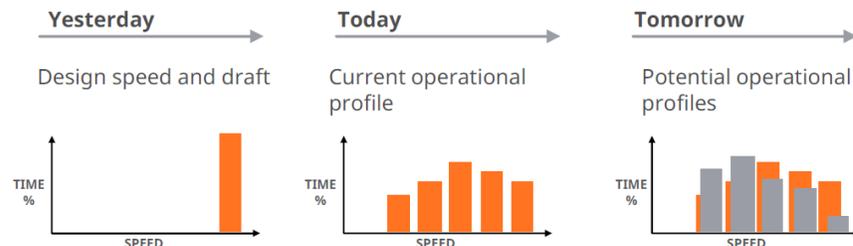
接続機器・システム多様化及び電力有効利用

運航自由度の向上

革新的省エネデバイス導入



引用：日本財団HP 無人運航船プロジェクト「MEGURI2040」
<https://www.nippon-foundation.or.jp/who/about/history/60years/1-topics-1-1>



引用：「Ship Electrical Systems」(Wartsila社)



Flapping Foil型推進器 (NYKスーパーエコシップ2050より)

引用：日本郵船HP ESG経営 NYKスーパーエコシップ
<https://www.nyk.com/esg/pdf/SES2050.pdf>

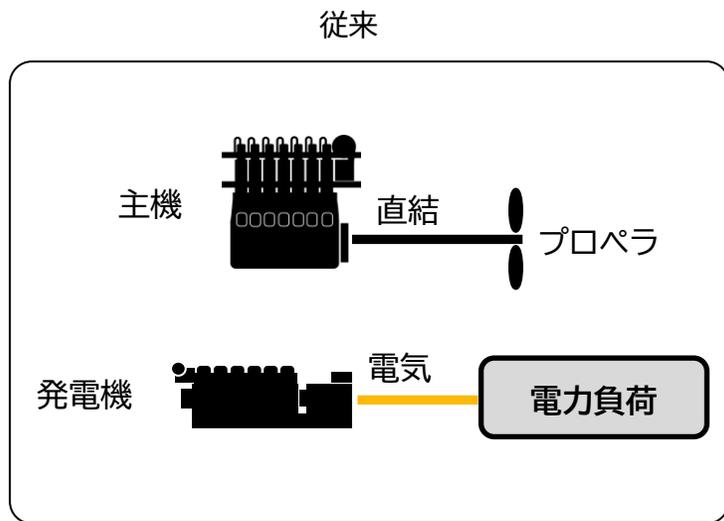
安全向上・省力化

自動運航・制御自由度向上

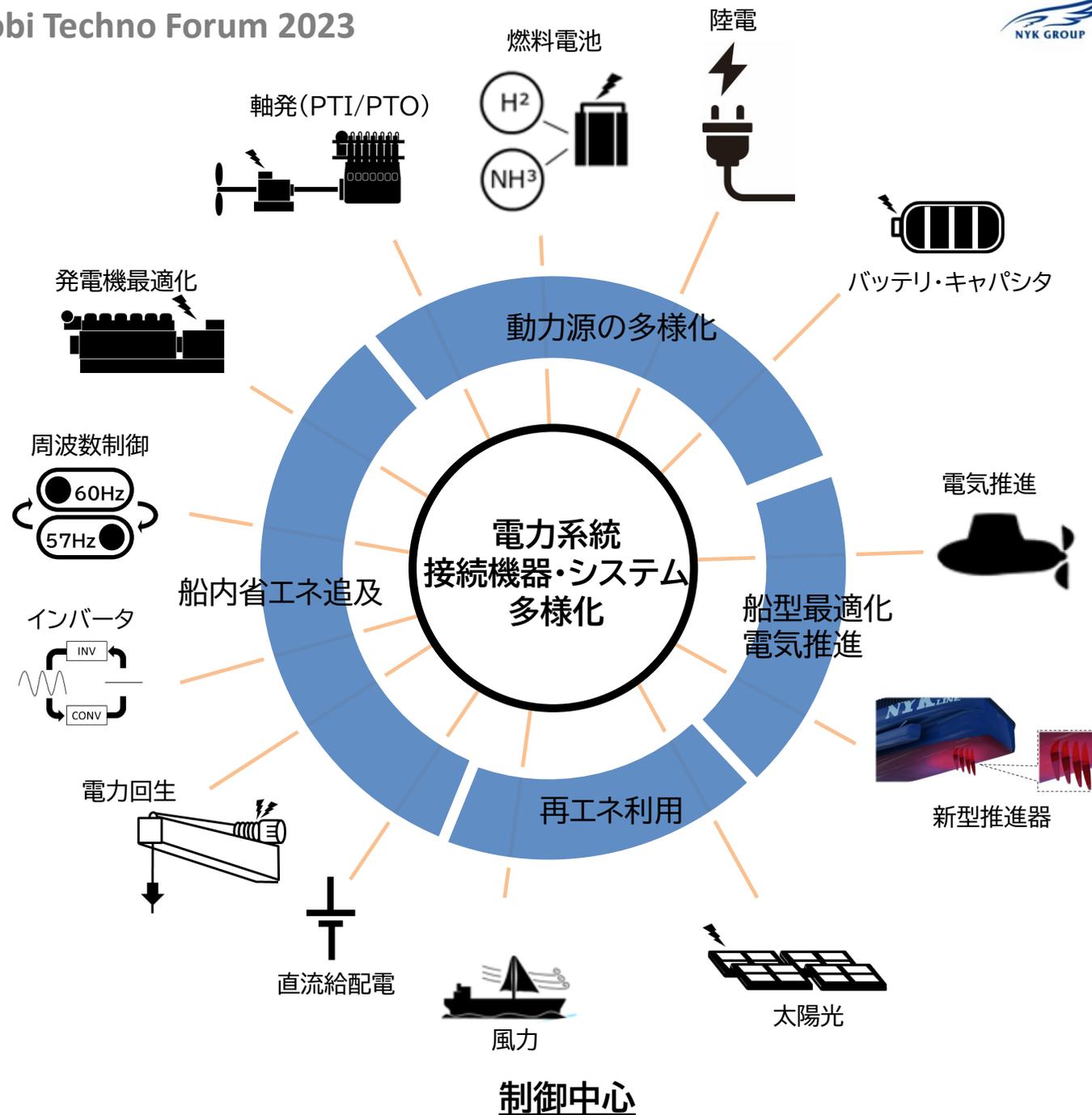
中小型船舶(内航)省人化・省エネ対応

船舶電化の進展

電力系統の計画・運用・保護が複雑化する



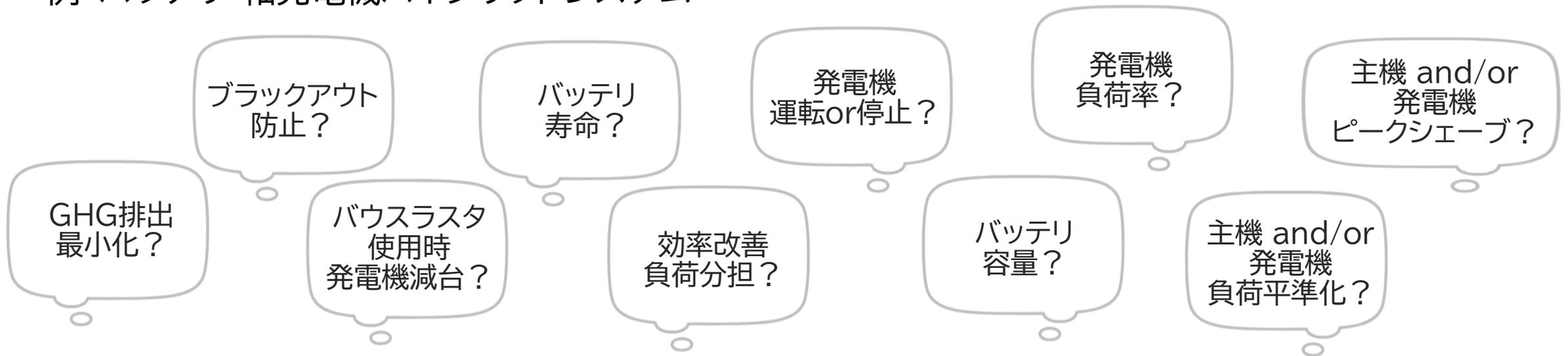
プラント中心



制御中心

システム設計・運用の多様化

例: バッテリー-軸発電機ハイブリッドシステム

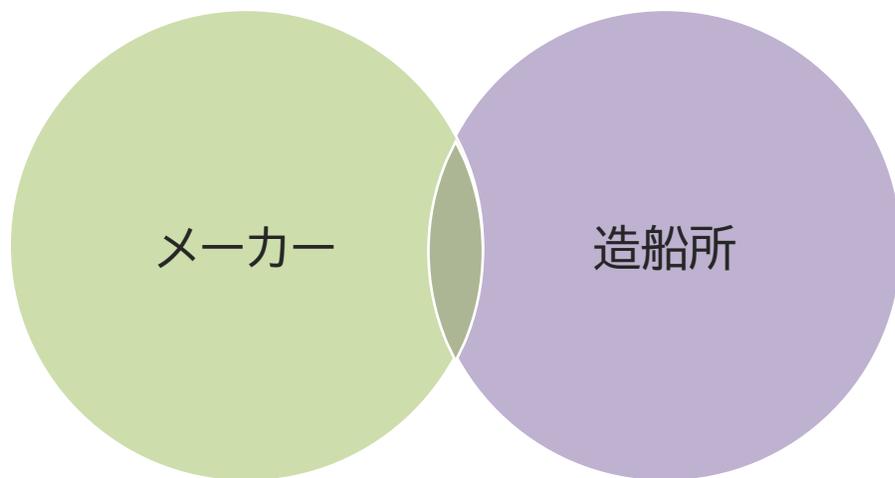


複雑化した電力システムをどのように計画・運用・保護するか？

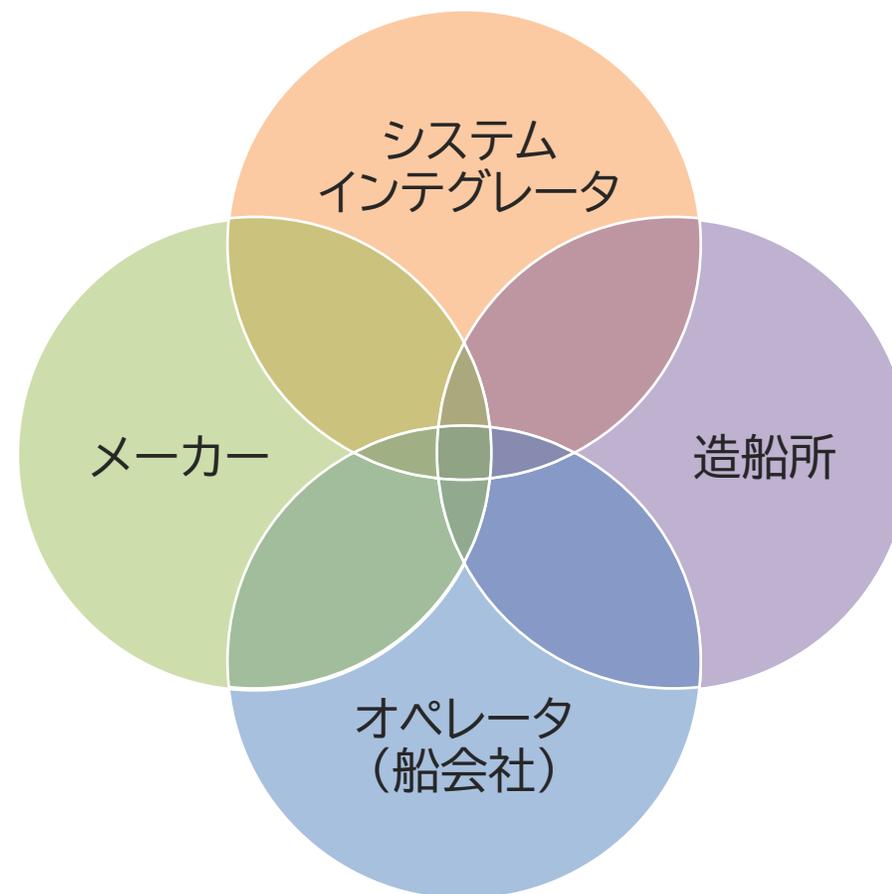


システムインテグレーション力・シミュレーション技術力向上が重要

システム設計・運用の多様化



従来



現在

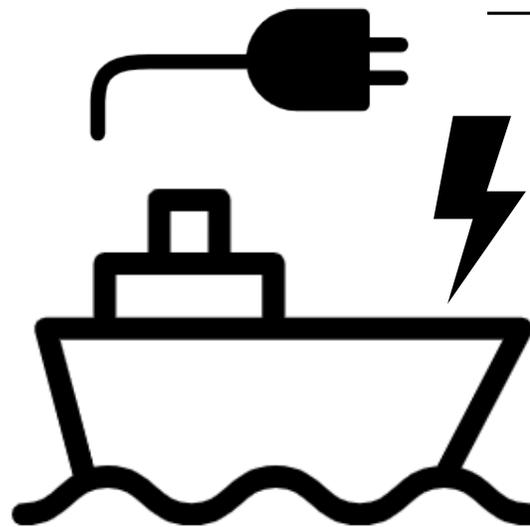
制御のコンセプトを一緒に作りこみ、検証していくことが重要

船舶電化進展へ向けたMTIでの取り組み

海外メーカー・船級協会・システムインテグレータとの
コラボレーションによるシミュレーションモデル構築



日本版システムインテグレーションを目指した
EMS(Energy Management System)開発

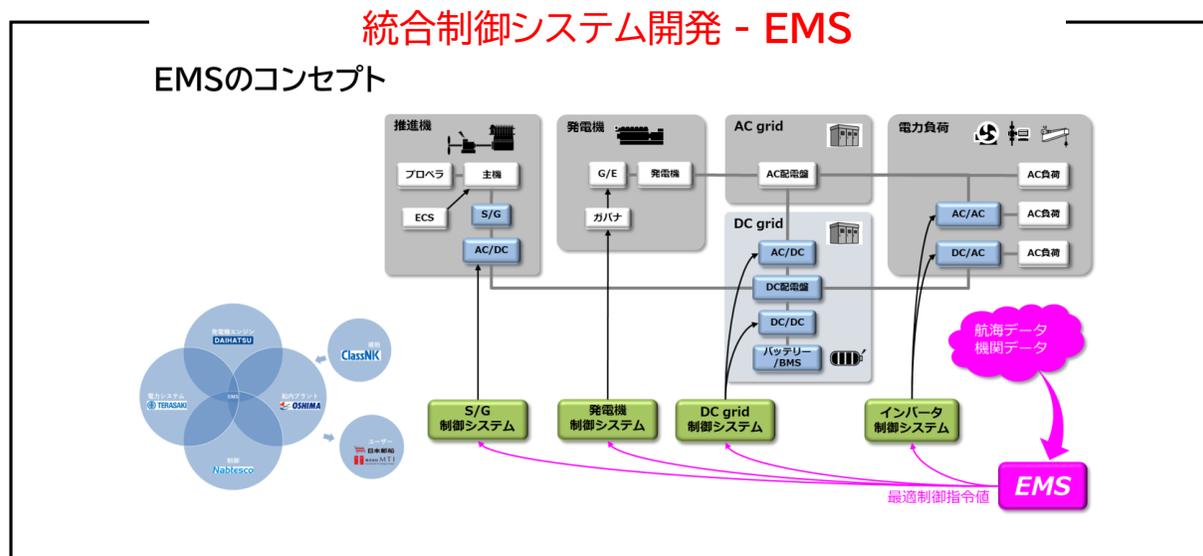


海事デジタルエンジニアリング講座(東大・MODE)に
おけるシミュレーション基盤構築への取り組み



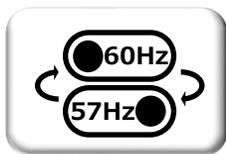
日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

*1 Energy Management System



ソフトウェア(制御)開発①

HzNavi



G/E周波数切替

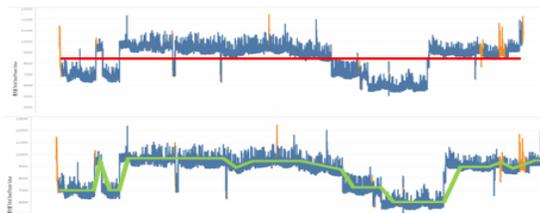
特許 第6238600号



既開発品の制御高度化・実装

ソフトウェア(制御)開発②

ディーゼル機関負荷変動低減



発電機負荷変動低減による余剰燃料噴射防止

ソフトウェア(制御)開発③

間欠負荷専用DC Link

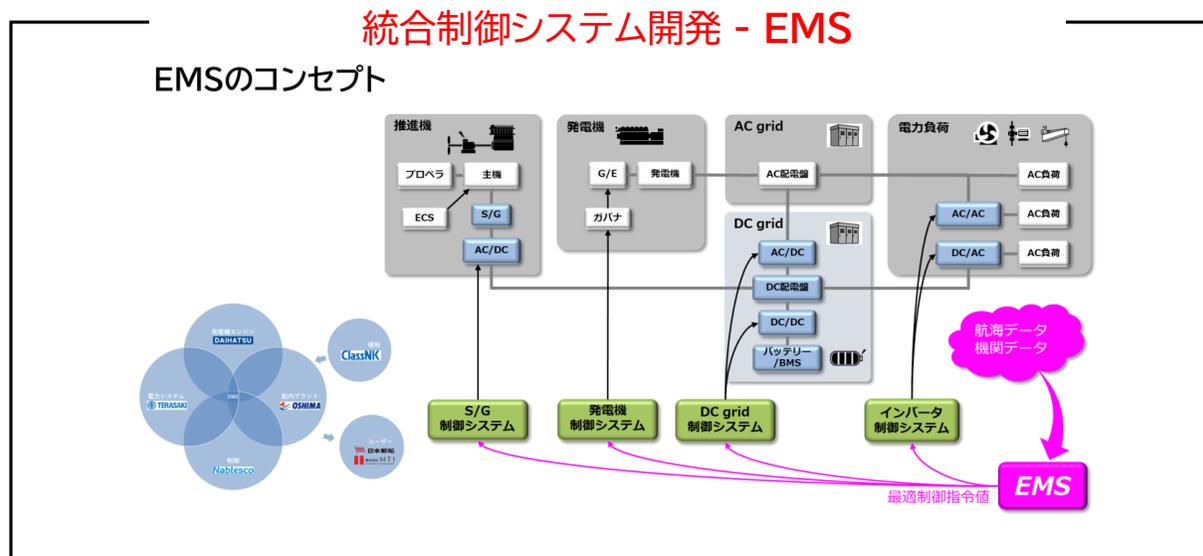
特許出願検討のため、TBA

DC Linkを利用した最適電力系統設計



日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

*1 Energy Management System



ソフトウェア(制御)開発① HzNavi

特許 第6238600号

G/E周波数切替

既開発品の制御高度化・実装

ソフトウェア(制御)開発② ディーゼル機関負荷変動低減

発電機負荷変動低減による余剰燃料噴射防止

ソフトウェア(制御)開発③ 間欠負荷専用DC Link

特許出願検討のため、TBA

DC Linkを利用した最適電力系統設計

船舶電化進展へ向けたMTIでの取り組み

ソフトウェア(制御)開発① - HzNavi(発電機可変周波数制御)

期待効果(理論値)

発電機の回転数を低くすると、AC系統周波数に連動して動作する電動機の回転数が低下する。

➡ **疑似インバータ効果** | 揚程は回転数の比の2乗で低下し、出力は3乗で低下する

50kWの電動モーター



実証試験(評価中)

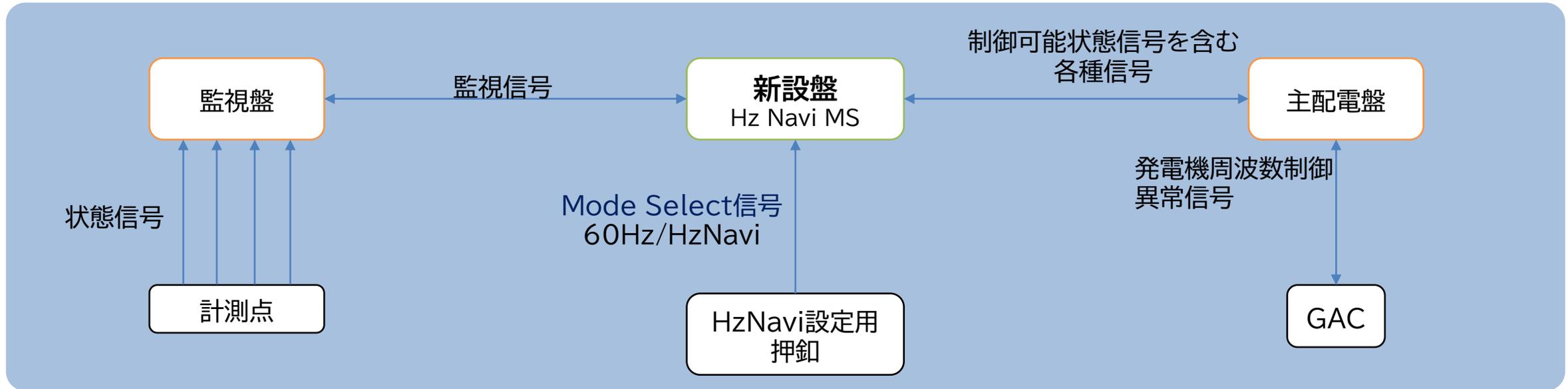
就航船で評価中



船舶電化進展へ向けたMTIでの取り組み

ソフトウェア(制御)開発① - HzNavi(発電機可変周波数制御)

制御イメージ & 機器構成



監視盤

- 計測点の監視及び新設盤と該当信号の入出力

新設盤 | Hz Navi Monitoring System

- 監視盤から入力された信号及び新設盤面に装備された押釦により、Hz Navi制御の可否を判断する
- 主配電盤に制御可能状態信号を含む各種信号を通信で入出力する

※新設盤の機能を他機器に取り込むことは可能

主配電盤

- 新設盤から入力された制御可能状態信号及び発電機コンディションを基にHz Navi制御を行う
- ACB異常遮断等の異常が発生した際に、定格周波数制御へ切り替える制御を行う
- 制御は主配電盤内のGACで行われる

船舶電化進展へ向けたMTIでの取り組み

ソフトウェア(制御)開発① - HzNavi(発電機可変周波数制御)

課題と解決策

課題	解決策
発電機同期投入時における横流防止	発電機運転台数によるインターロック
失火時機関ねじり振動対策	失火による排気温度偏差増大時の警報を追加
NOx排出量増加への対応	対象機関陸上運転での実測による規則対応確認 ⇒簡易での認証取得に向け対応検討中
各種負荷(電動機)正常動作・機能満足・長期影響	各電動機メーカー、主機メーカー等への機械的仕様確認
発電機非定格での長期運転対応(力率悪化・励磁電流増加・鉄損増加・温度上昇等への対応)	電動機メーカーとの確認 ⇒今後は電圧・周波数の制御ロジック変更を検討
プラント・電力系統異常状態への対応	制御切替条件設定、警報点リスト作成、制御自動切替機能の付加

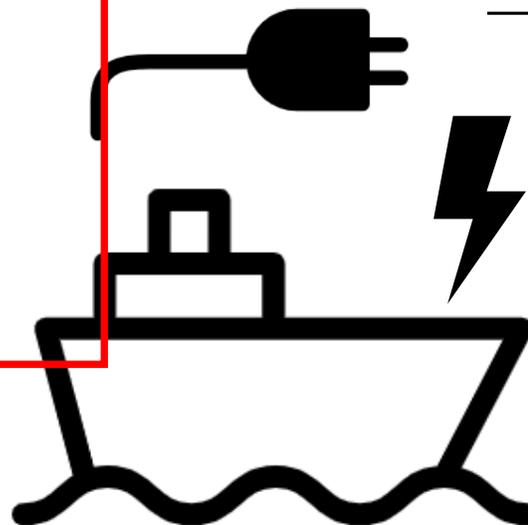
➡ EMSの要素技術としてのHzNavi制御・安全機能の更なる高度化を目指す

船舶電化進展へ向けたMTIでの取り組み

海外メーカー・船級協会・システムインテグレータとの
コラボレーションによるシミュレーションモデル構築



日本版システムインテグレーションを目指した
EMS(Energy Management System)開発



海事デジタルエンジニアリング講座(東大・MODE)に
おけるシミュレーション基盤構築への取り組み

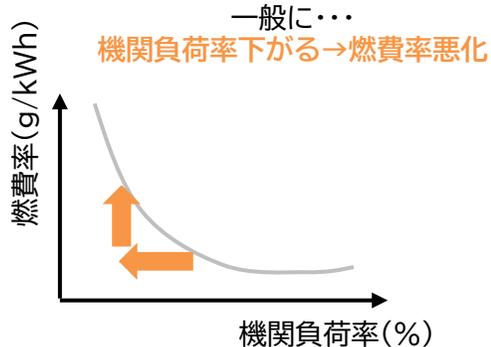
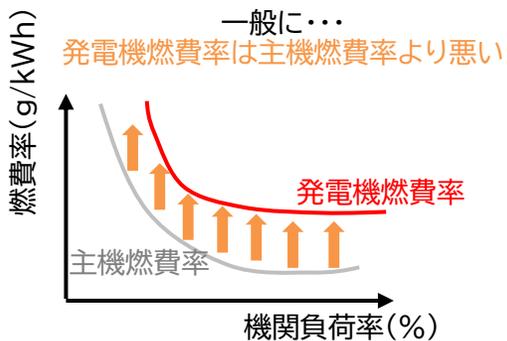
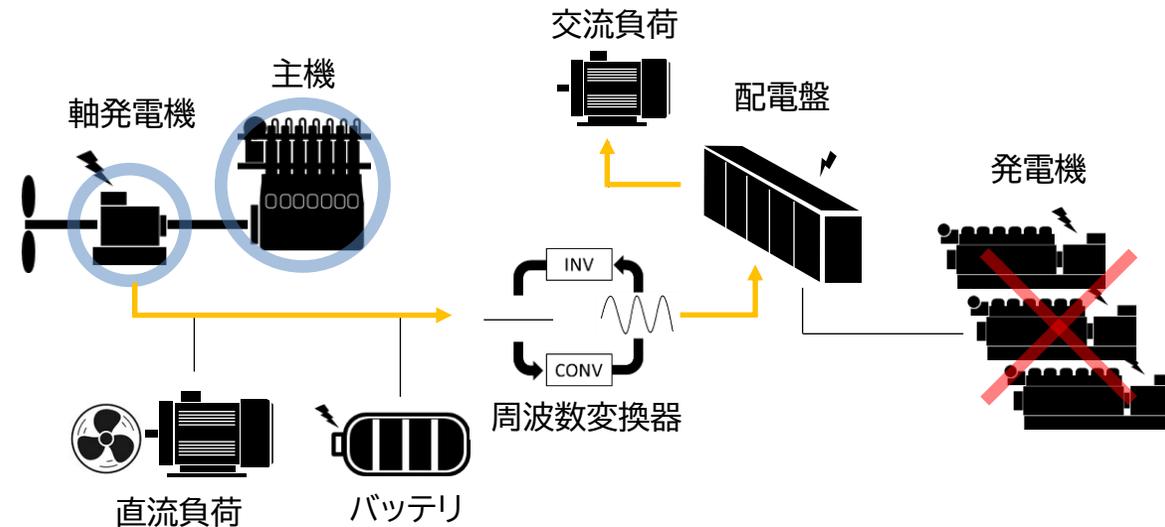


システム設計・運用の多様化

例: バッテリー-軸発電機ハイブリッドシステム

①軸発電機(=主機)からの電力供給による燃費率改善

- ・狙いは、燃費率の高い主機による発電機(軸発電機)運転による、電力供給における燃費効率改善
- ・電力需要を軸発電機単体でカバーできない領域あり
- ・並列運転ディーゼル発電機低負荷運転による燃費率悪化



電力 : 1,127kW
 主機 : 29.8MT/day
 発電機 : 3.6MT/day
トータル : 33.4MT/day

電力 : 1,166kW
 主機 : 27.7MT/day
 発電機 : 5.2MT/day
トータル : 32.9MT/day

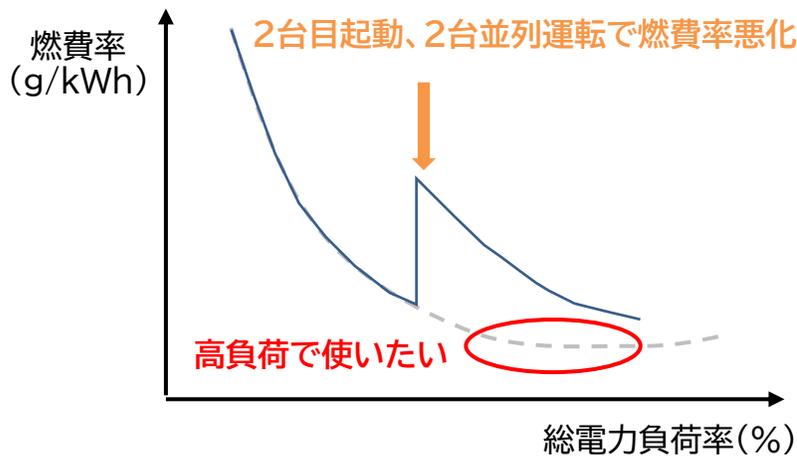
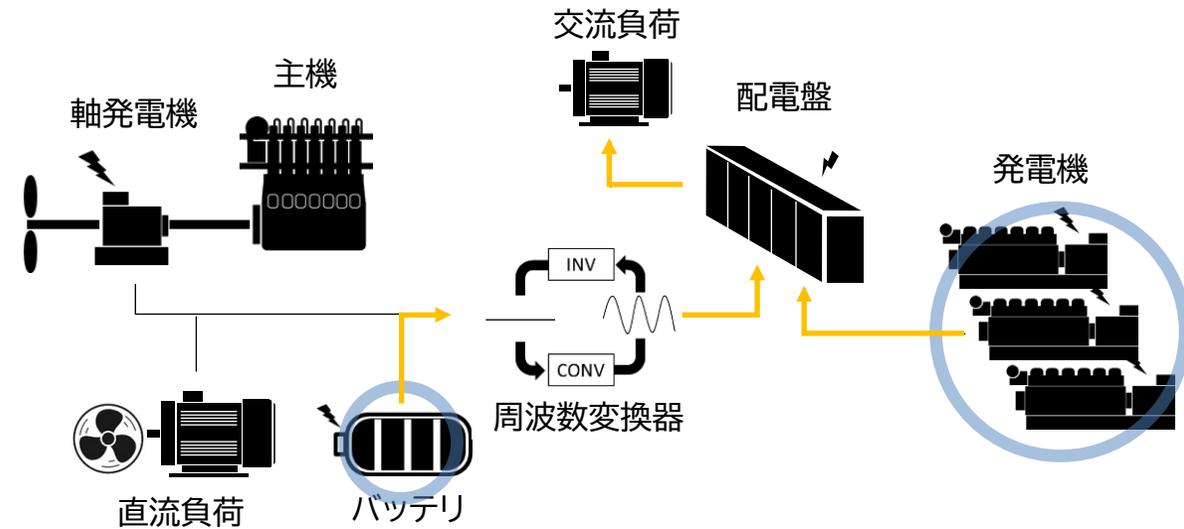


システム設計・運用の多様化

例: バッテリー-軸発電機ハイブリッドシステム

②ブラックアウト防止(発電機高負荷運転による燃費改善)

- ・狙いは、バッテリー併用による発電機運転台数減及び効率改善(例:80%負荷運転→発電機2台目稼働)
- ・軸発電機トリップ→バッテリーによる負荷負担(健全状態との判断)
→バッテリーSOC低下→バッテリー枯渇→ブラックアウト発生
- ・バッテリーSOCマネジメント要検討(バッテリー寿命・バッテリー適用目的によるSOC設定、例; ブラックアウト防止、バウスラスタ補助 等)

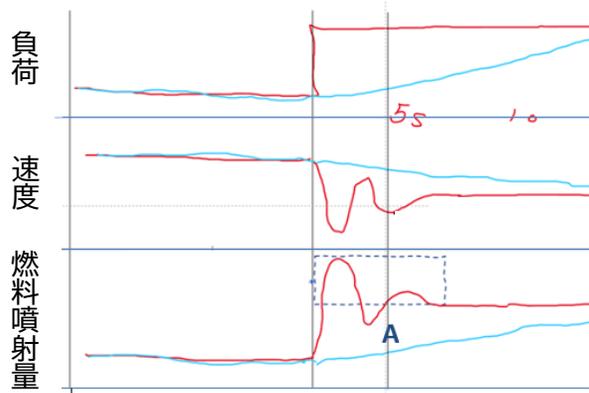
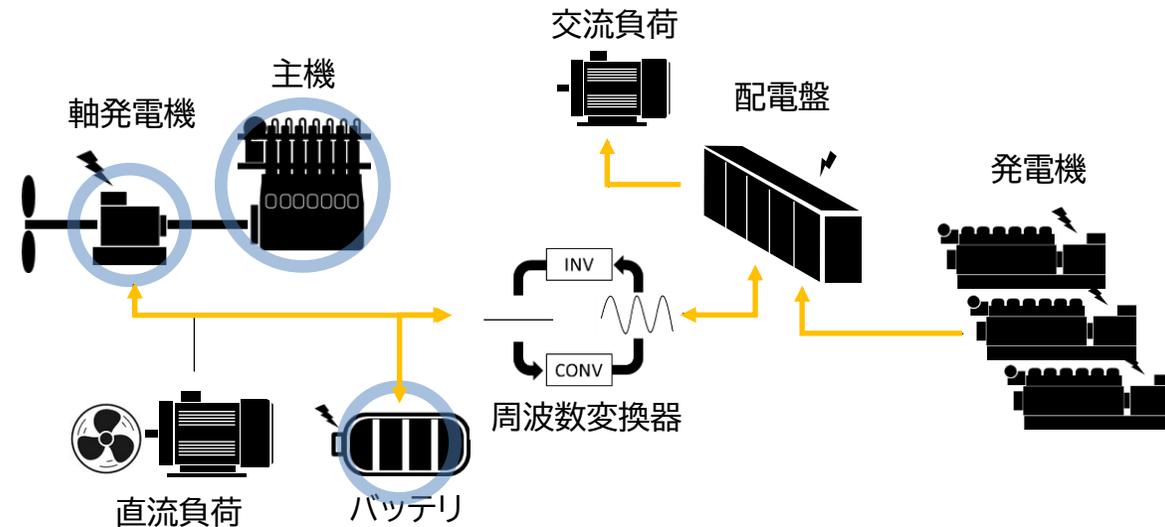


システム設計・運用の多様化

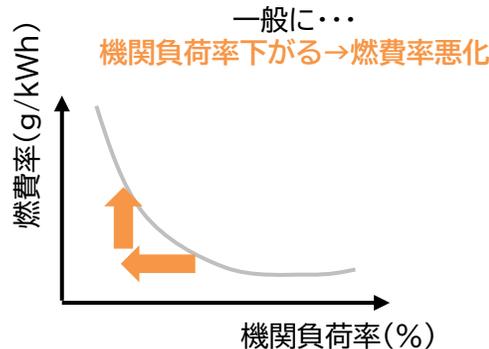
例: バッテリー-軸発電機ハイブリッドシステム

③主機負荷変動低減による燃費改善

- ・狙いは、1) 効率(燃費率)良好な高負荷率での主機運転
及び 2) 負荷変動低減による余剰燃料噴射量減
- ・いずれもうまくできていない
- ・バッテリー寿命を考慮したライフサイクルでの費用対効果要検討



負荷変動低減による余剰燃料噴射量減のイメージ

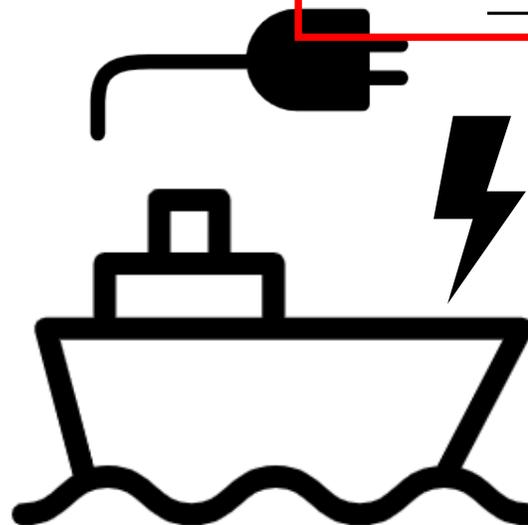


船舶電化進展へ向けたMTIでの取り組み

海外メーカー・船級協会・システムインテグレータとの
コラボレーションによるシミュレーションモデル構築



日本版システムインテグレーションを目指した
EMS(Energy Management System)開発

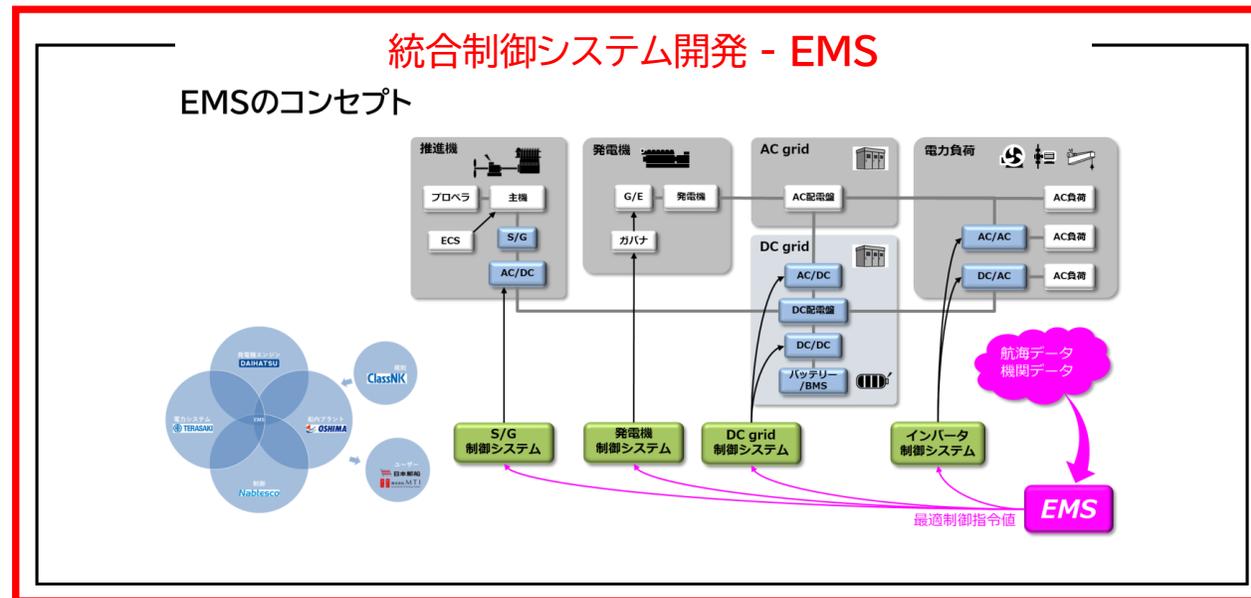


海事デジタルエンジニアリング講座(東大・MODE)に
おけるシミュレーション基盤構築への取り組み



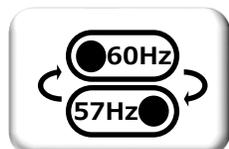
日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

*1 Energy Management System



ソフトウェア(制御)開発①

HzNavi



G/E周波数切替

特許 第6238600号

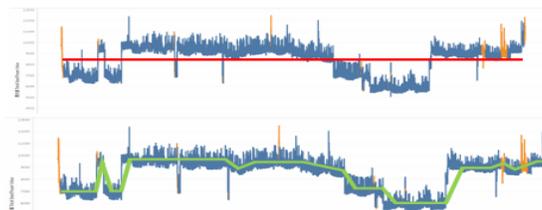
日本郵船



既開発品の制御高度化・実装

ソフトウェア(制御)開発②

ディーゼル機関負荷変動低減



発電機負荷変動低減による余剰燃料噴射防止

ソフトウェア(制御)開発③

間欠負荷専用DC Link

特許出願検討のため、TBA

DC Linkを利用した最適電力系統設計



日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

*1 Energy Management System

統合制御システム開発 - EMS

EMS(Energy Management System)

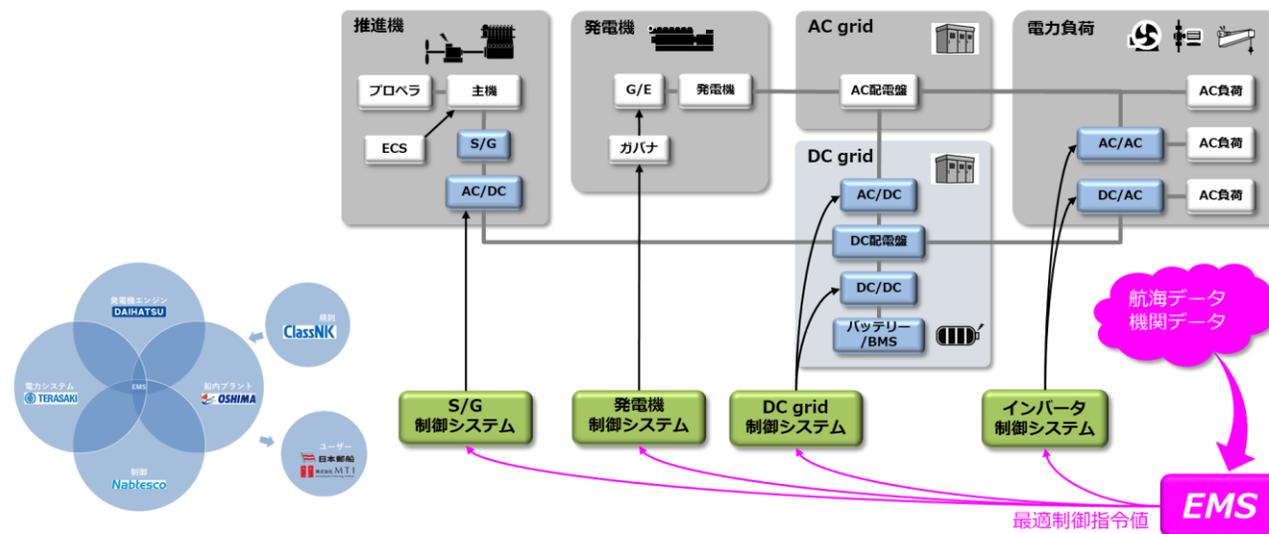
PoC1 | 安全に制御する機能と全体最適値を考える機能の分離

- 安全航行のために、EMSシステムおよび制御対象が担う役割の整理
- 検討結果の仕様でプロトタイプEMSを設計、実証確認

PoC2 | モデルベースによる電力システム全体最適化戦略開発

- モデルベース開発により、船内電力システム(発電機、バッテリー、軸発電機を搭載した電力システム)の最適化
- 本船実データを使用し、最適化システムの燃節効果を確認

EMSのコンセプト



日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

*1 Energy Management System

統合制御システム開発 - EMS

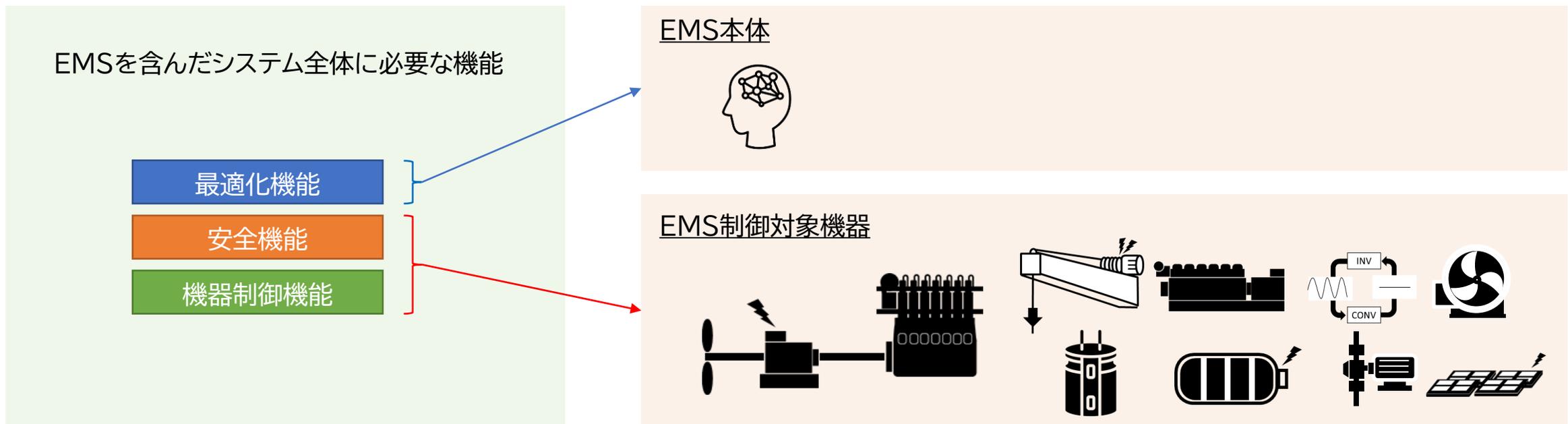
PoC1 | 安全に制御する機能と全体最適値を考える機能の分離

EMS 定義

- ①EMSは「全体最適化」を行うための機器であること
 - ー 指令信号は制御対象の実力の範囲内(仕様範囲内)でされる
- ②EMSの機能が停止しても(あるいはEMSが無くても)、制御対象の機器は動作可能であること
 - ー 制御対象は単独で安全機能を有する必要あり!

システム構成

以下の通り機能分離する



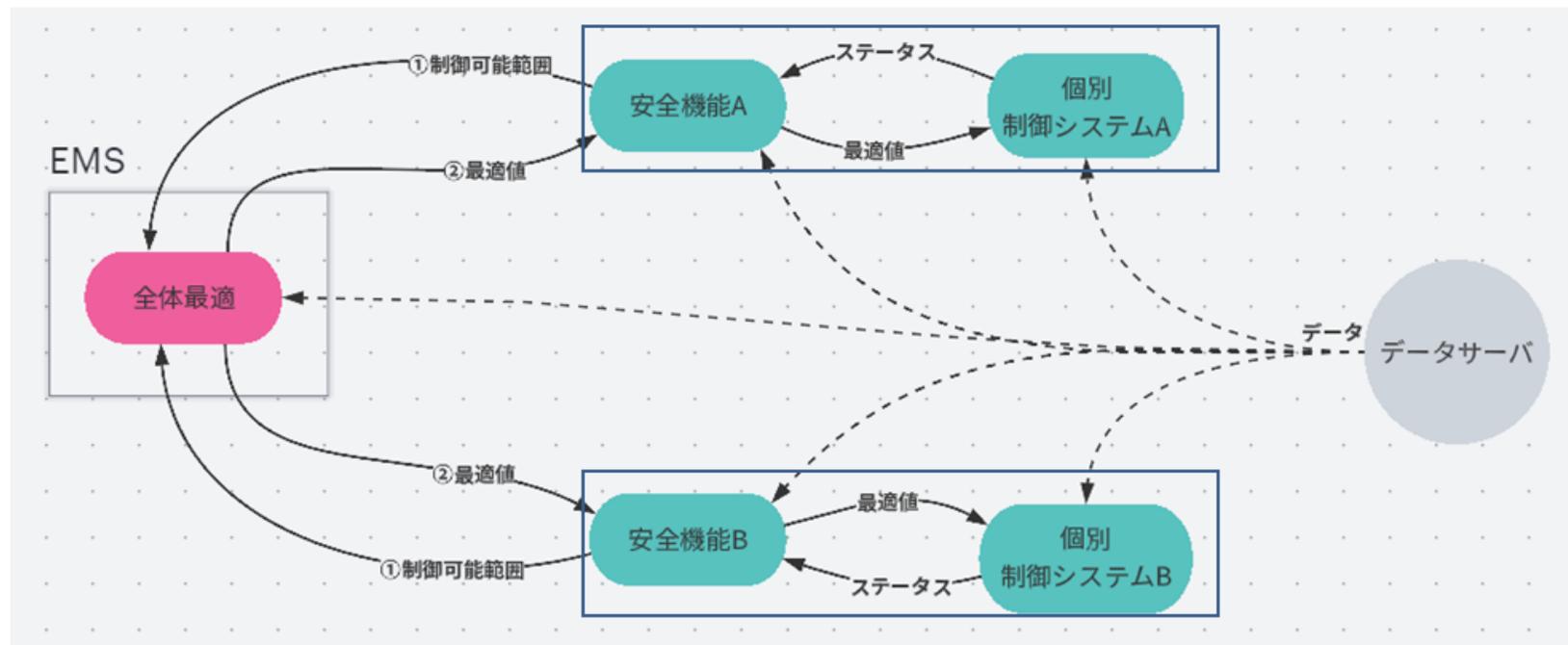
日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

*1 Energy Management System

統合制御システム開発 - EMS

PoC1 | 安全に制御する機能と全体最適値を考える機能の分離

制御イメージ



EMSシステムを用いて発展的な制御(全体最適の上で有効となる制御)を行う場合は、
制御対象側で「制御実行可否」「必要な安全機能」の事前検討の上搭載が必要

日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

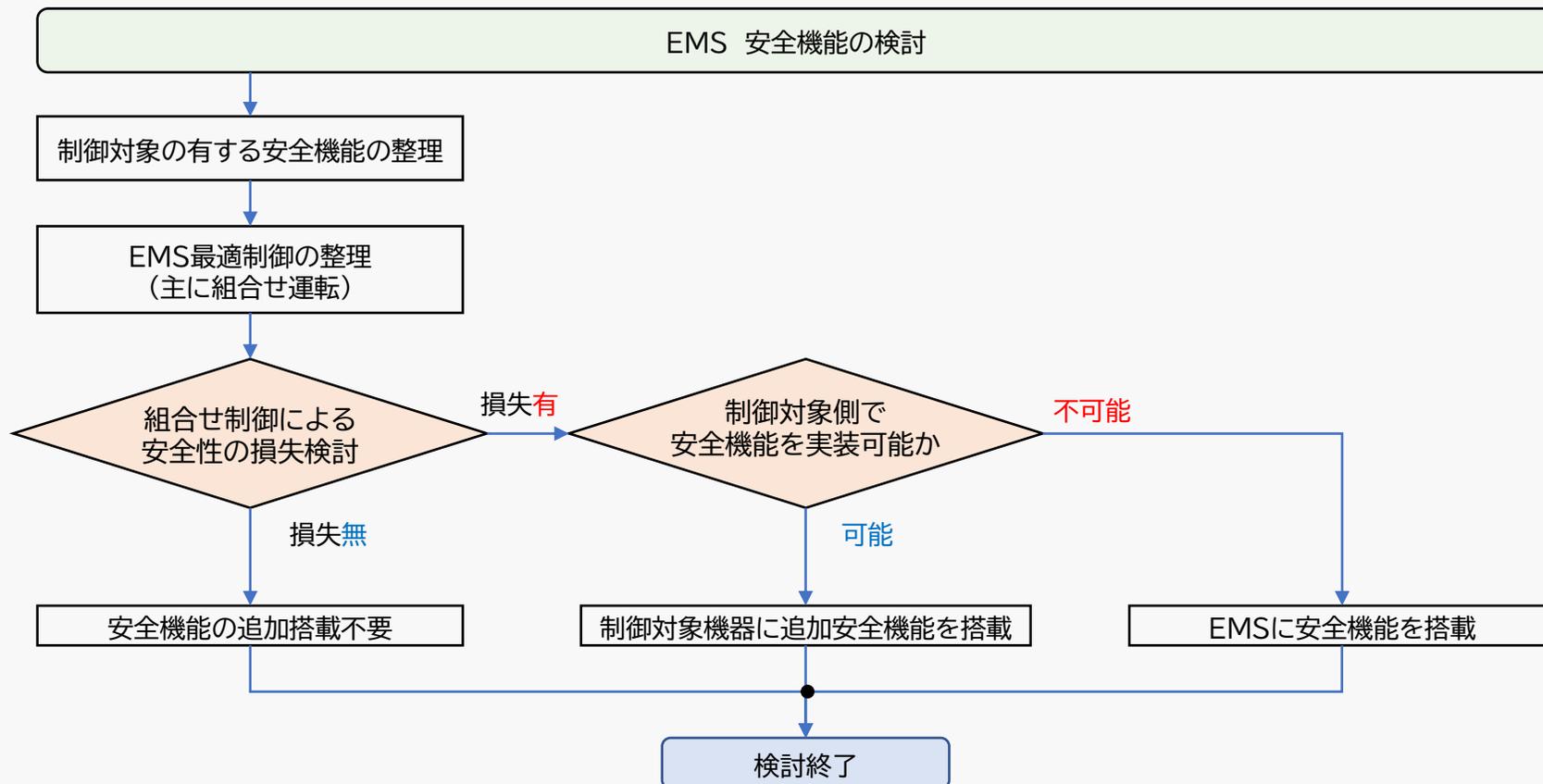
*1 Energy Management System

統合制御システム開発 - EMS

PoC1 | 安全に制御する機能と全体最適値を考える機能の分離

安全機能の検討

最適制御による安全性の損失がないか検討は**必要**



日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

*1 Energy Management System

統合制御システム開発 - EMS

PoC2 | モデルベースによる電力システム全体最適化戦略開発

対象船選定

大島造船所殿建造 HACHINOHE MARU (D/G 800kW 3台)

選定理由

- ・機能安全実証試験実施を見越して、実証試験船であるシリーズ船から実船データも豊富にある本船を選定



M/E Information

M/E OUTPUT (kW) MCR	7430
M/E RPM (rpm) MCR	92
MAIN ENGINE Licenser	UEC
MAIN ENGINE Licensee	J-ENG(MHI)
MAIN ENGINE Model	6UEC50LSH-Eco-C2
MAIN ENGINE Cont.Method	ELECT

日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

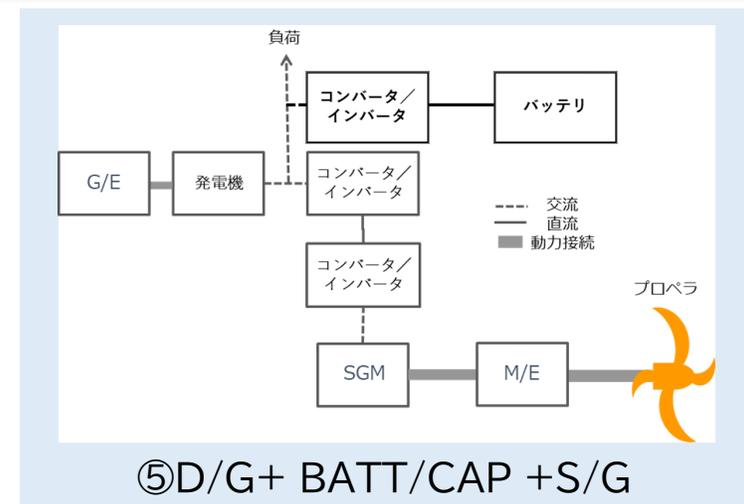
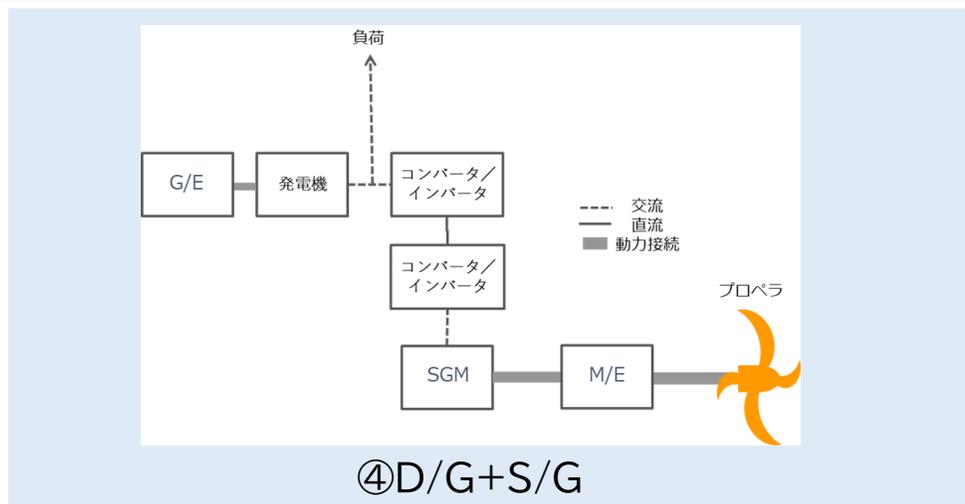
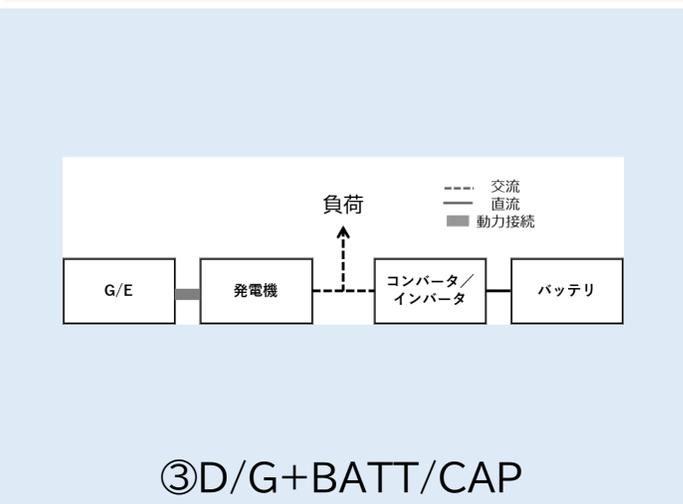
*1 Energy Management System

統合制御システム開発 - EMS

PoC2 | モデルベースによる電力システム全体最適化戦略開発

検証システム(モデル) 最適化制御+最適なH/W仕様を検討した。

No.	バリエーション	説明
①	HACHINOHE MARU オリジナル構成システム	ベースとなるモデル
②	発電機自動制御搭載システム	D/Gを燃費最良負荷で利用することを旨としたモデル
③	発電機自動制御 + バッテリー搭載システム	D/Gを燃費最良負荷で利用することを旨としたモデル
④	発電機自動制御 + 軸発電機搭載システム	M/Eを燃費最良負荷で利用することを旨としたシステム
⑤	発電機自動制御 + バッテリー + 軸発電機搭載システム	D/G, M/Eを燃費最良負荷で利用することを旨としたシステム

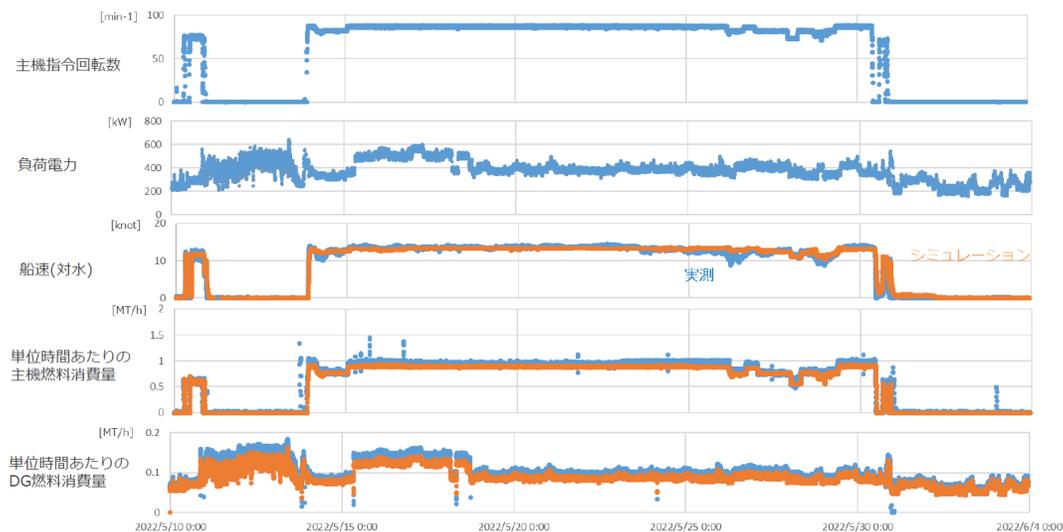


日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

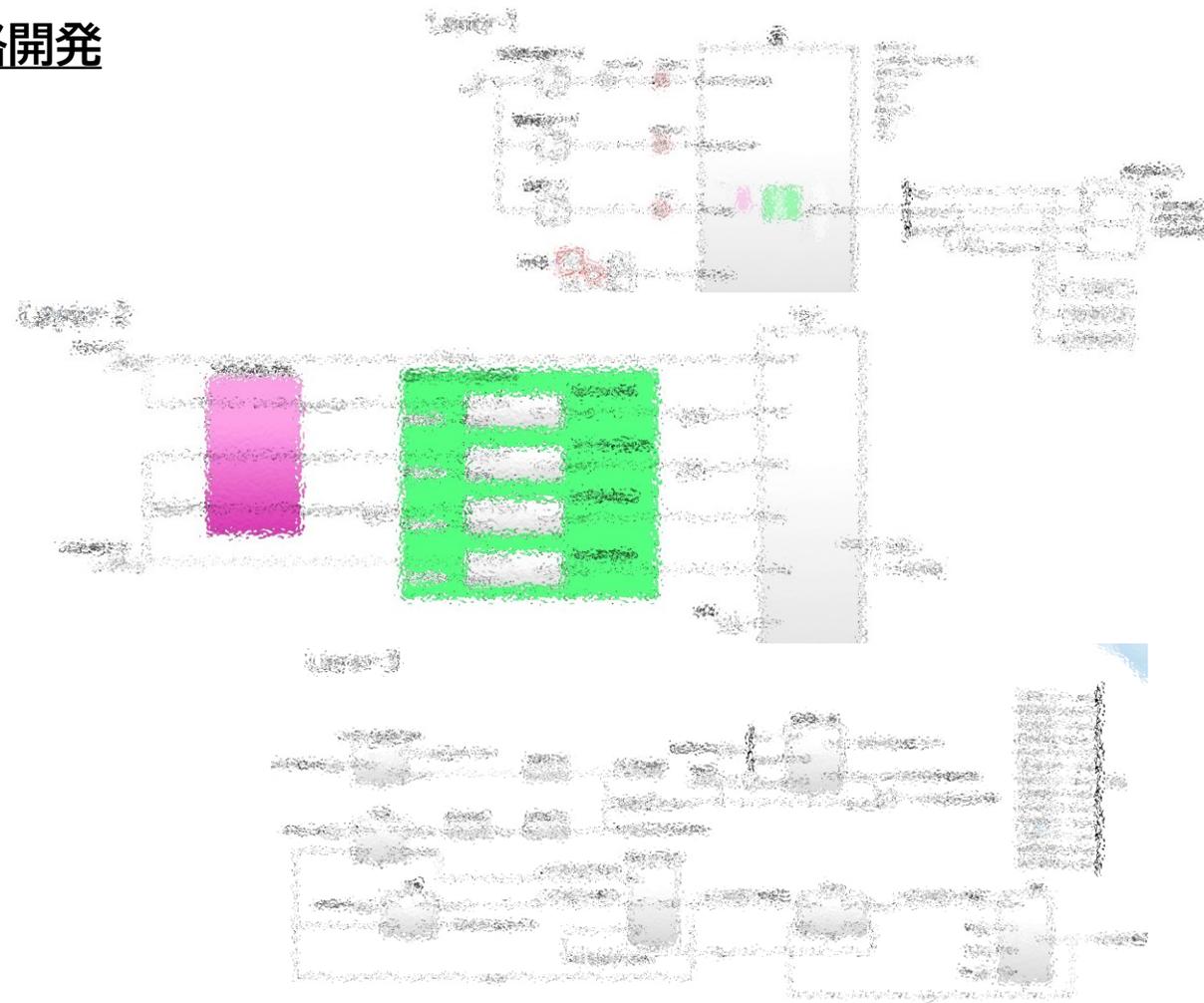
*1 Energy Management System

統合制御システム開発 - EMS

PoC2 | モデルベースによる電力システム全体最適化戦略開発



個別機器モデル化及び同定



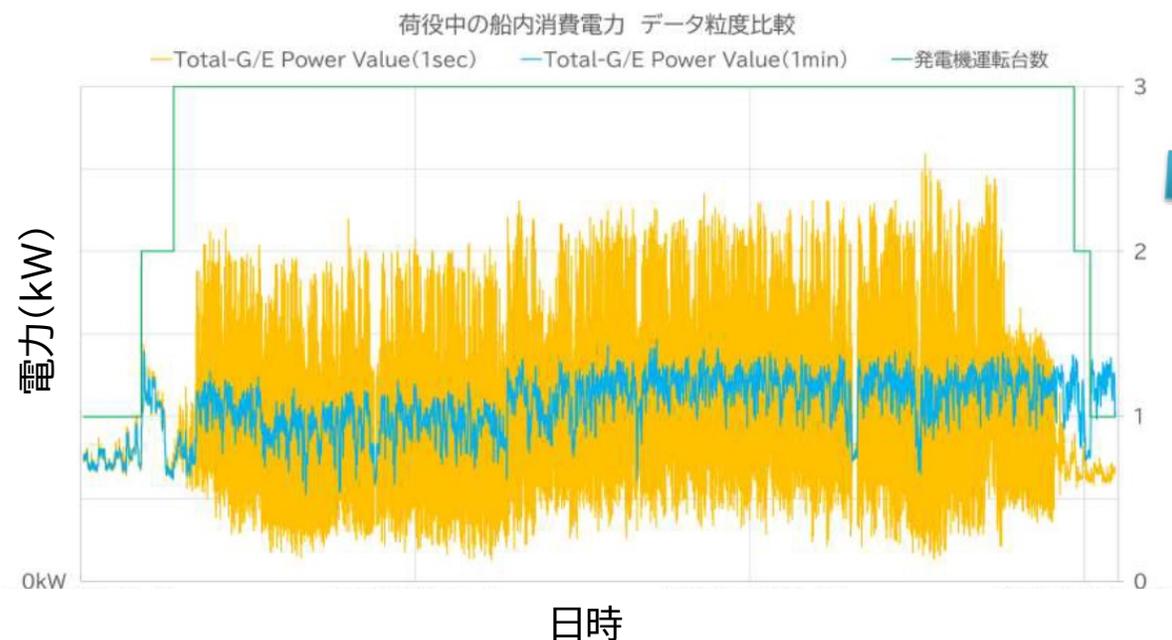
全体シミュレーションモデル作成

日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

*1 Energy Management System

統合制御システム開発 - EMS

PoC2 | モデルベースによる電力システム全体最適化戦略開発



データ粒度影響分析

項目	水準 (基準に対する倍率)			備考		
	1	2	3			
船内電力	消費電力レベル	1	1.1	0.9	電力実測データ×倍率	
発電機	発電エンジン出力	1 (800kW)	1.1 (880kW)	0.9 (720kW)		
	発電機効率	1 (95%)	1.032 (98%)	0.968 (92%)		
	DG利用下限電力	1 (30%)	1.1 (33%)	0.9 (27%)	下回る場合はバッテリー利用	
バッテリー	バッテリー容量	①	1 (800kWh)	1.5 (1200kWh)	0.5 (400kWh)	①②2つのパターンを計算
		②	0.00125 (1kWh)	0.125 (100kWh)	0.25 (200kWh)	
	充放電効率 (INV/CONV効率)	1 (95%)	1.032 (98%)	0.968 (92%)		
	内部抵抗 (充放電ロス要因)	1 (2.78mΩ)	1.73 (4.81mΩ)	3.46 (9.62mΩ)		
	充電開始SOC	1 (20%)	0.5 (10%)			
放電開始SOC	1 (80%)	1.125 (90%)				

項目	燃料消費量への影響	
船内電力	消費電力レベル	↑↑↑
発電機	発電エンジン出力	↑↑
	発電機効率	↓↓
	DG利用下限電力	↘
バッテリー	バッテリー容量	↘
	充放電効率	↘
	内部抵抗	↗

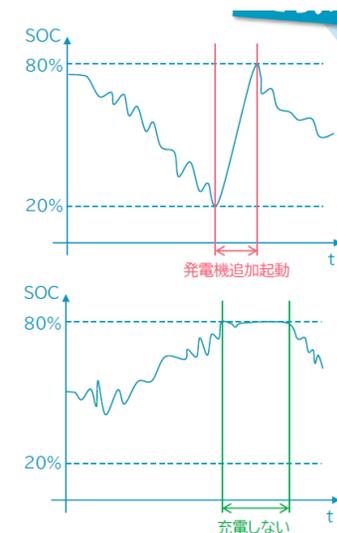
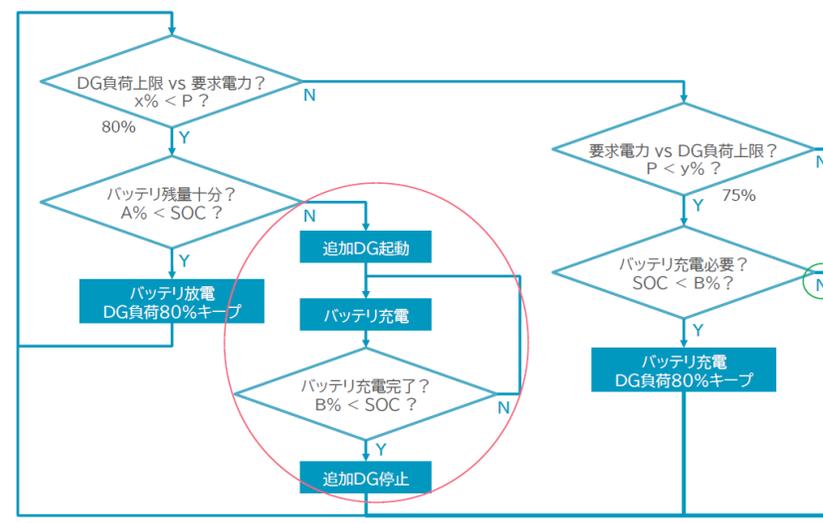
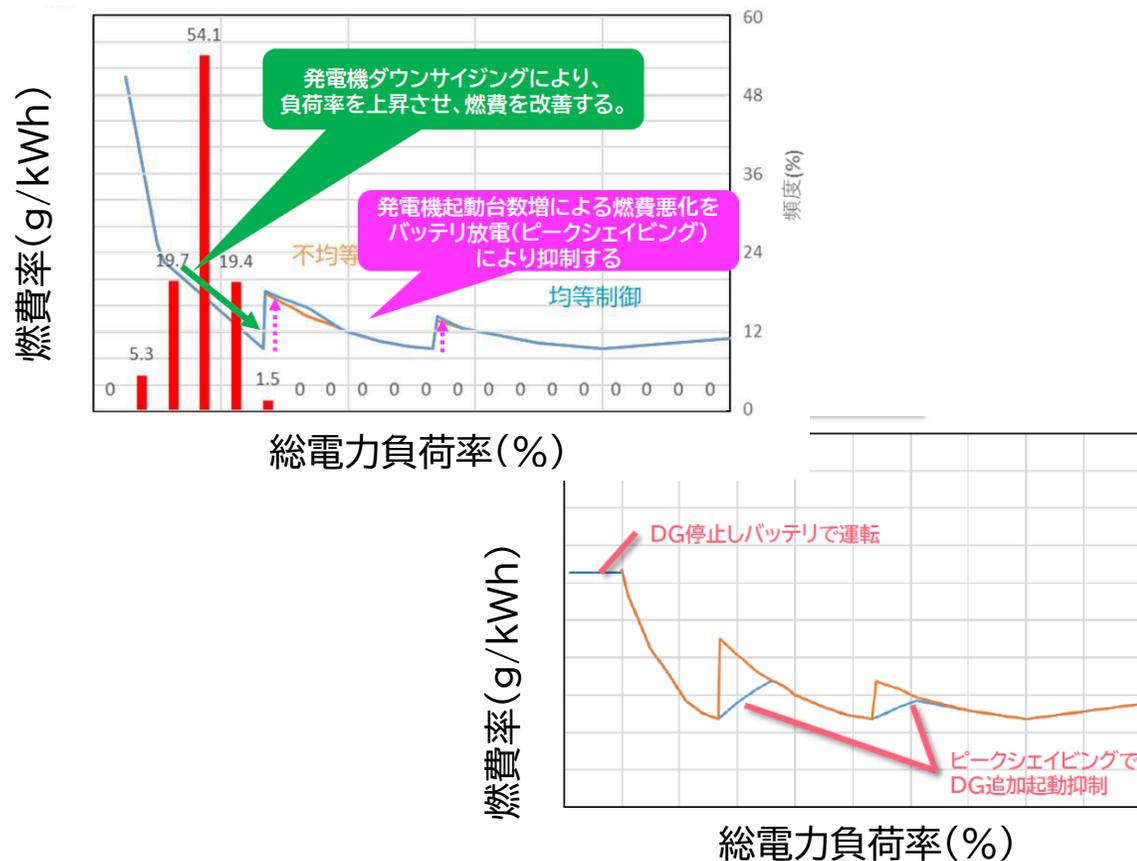
直交表によるバッテリーシステムパラメータスタディ

日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

*1 Energy Management System

統合制御システム開発 - EMS

PoC2 | モデルベースによる電力システム全体最適化戦略開発



バッテリー活用方法検討及びパラメータスタディ

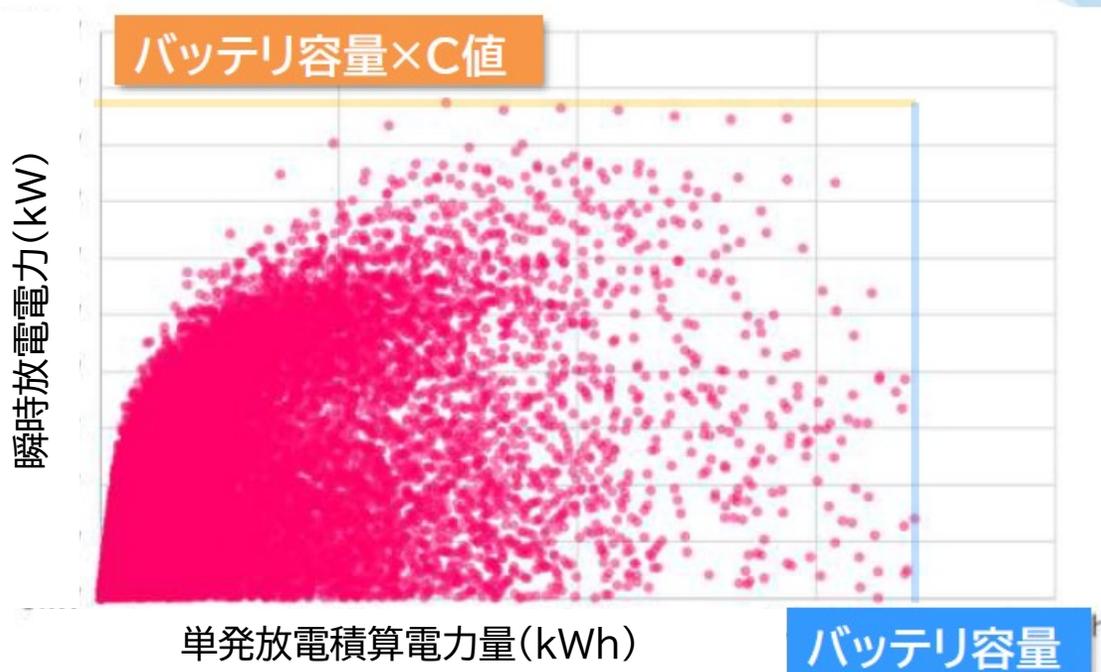
制御フローチャート策定

日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

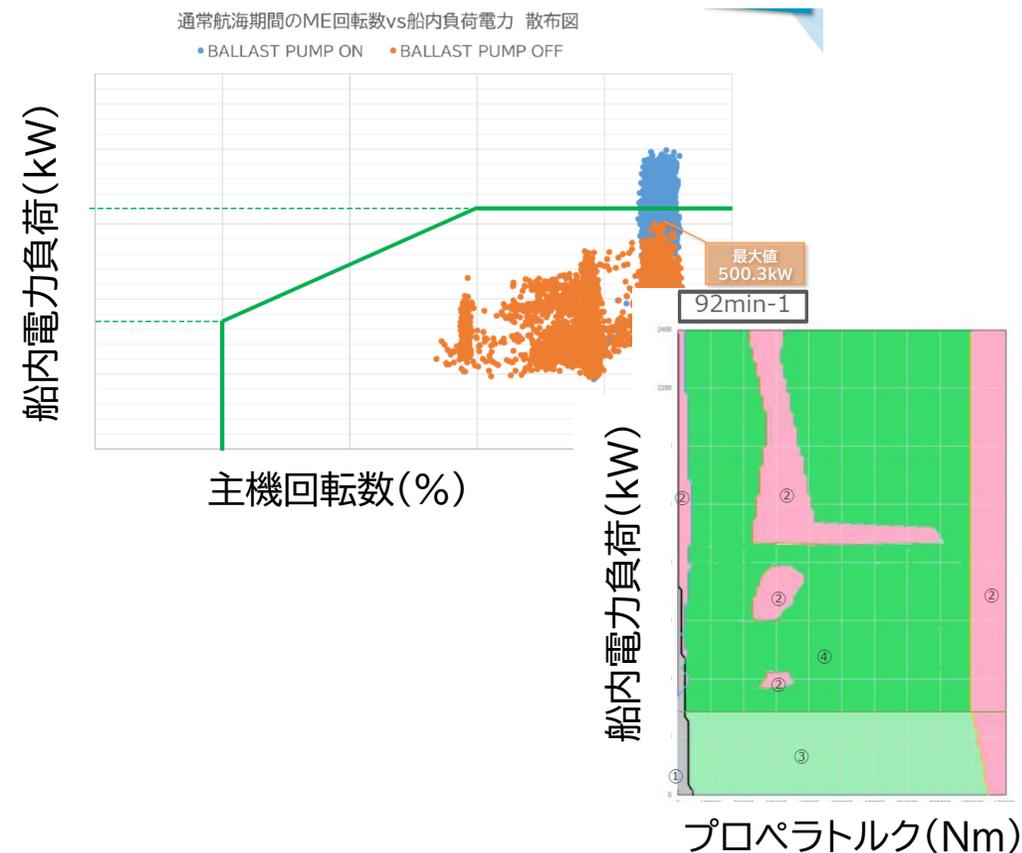
*1 Energy Management System

統合制御システム開発 - EMS

PoC2 | モデルベースによる電力システム全体最適化戦略開発



バッテリー仕様決定



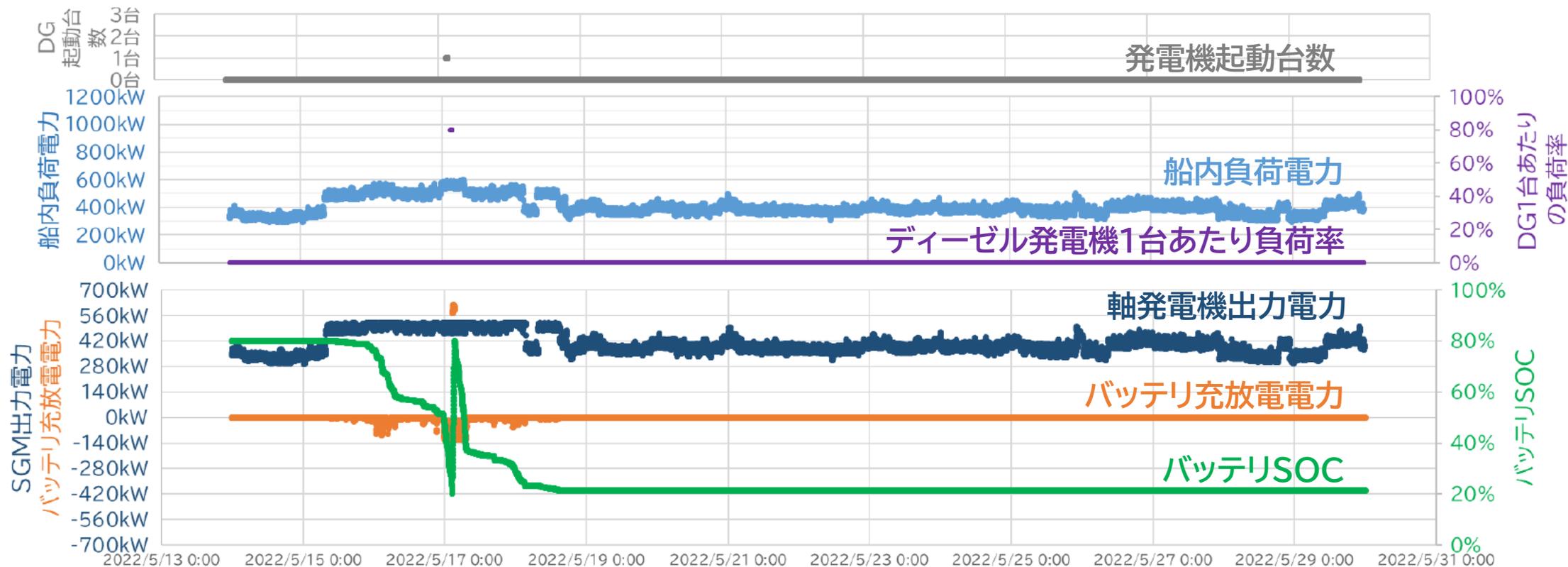
軸発電機仕様及び制御ロジック策定

日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

*1 Energy Management System

統合制御システム開発 - EMS

PoC2 | モデルベースによる電力システム全体最適化戦略開発



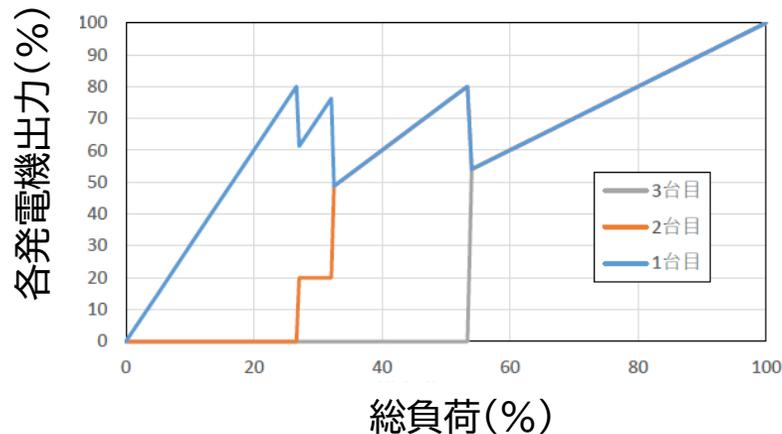
シミュレーションの一例(通常プラント+バッテリー+軸発電機)

日本版システムインテグレーションを目指したEMS(*1)開発

*1 Energy Management System

統合制御システム開発 - EMS

PoC2 | モデルベースによる電力システム全体最適化戦略開発



シミュレーションベースでの効果推定

バッテリー	1.26 %
軸発電機	3.55 %
バッテリー+軸発電機	4.02 %

発電機不均等負荷分担制御の設定

システム構成別最大燃節効果及び費用対効果検証

まとめ

本発表での要旨

- ・船舶における電化は省エネ・安全向上・省力化の観点などから、今後更に進展していくことが予想される
- ・電力系統に接続される機器は多様化し、制御も複雑になる
- ・更には制御は運用者が意図したものとなるもの、運用上においても柔軟に変更できることなどが重要であり、設計者・運用者共同で作りに上げていくことが重要
- ・そのような状況を踏まえて、MTIではシミュレーション等を活用した船舶電化に関する取り組みを加速させている
- ・オープンコラボレーションにより国内外さまざまなメーカーとの共同で基礎的なシミュレーション基盤構築及び有効性(EMS開発妥当性)の検証に取り組んでいる
- ・PoCを通して、統合制御するというEMSの効果・価値が検証できた

まとめ

今後の取り組み

- ・効果の見てきたEMSについて、機能要求、機能安全、性能要求、試験要求などの開発における要件を整理していく
- ・国内海事産業の強みと特性を生かして、単独のメーカー機器にとどまらず、複数社にまたがる機器・システムにおいても、オープンコラボレーションによって、欧州メーカー・システムインテグレータなどが実施している制御コンセプトより更に踏み込んだ最適制御システム構築をめざす。
- ・更には、シミュレーションベースの検証のみならず、新造船・就航船のいずれにおいても実船搭載を目指して、引き続き国内外メーカーとの連携を進める
- ・MTIとしては運用者目線からの最適化システム構築に向けたオペレーションノウハウの言語化、制御面への落とし込み、制御の運用自由度向上に関する取り組みを進める

高度なEMS開発を一緒にオープンコラボレーションしていきましょう。仲間募集中！

ご清聴どうもありがとうございました。