

# 欧州における電池推進船の動向調査

2018年3月

一般社団法人 日本船用工業会  
一般財団法人 日本船舶技術研究協会



## はじめに

船舶に関しては、昨今、国際海事機関（IMO）等で策定された大気汚染や地球温暖化の防止に係る環境規制に対応するため、これまで主に使用されてきたディーゼルエンジンから動力システムの転換が徐々に進みつつある。主なものとしては、LNG等の新燃料を使用するエンジンや電池を動力源とするシステム（電池推進システム）が挙げられる。電池を動力源とする電池推進船については、欧州を中心に燃料電池を使用する船舶の技術開発が進められてきたが、最近では、同地域において、リチウムイオン電池等を使用したシステムが開発され、また、電池推進システムを単独使用した船舶や、ディーゼルエンジン又はLNGデュアルフュエルエンジンを組み合わせたハイブリッドシステムを導入した船舶等が現れ、実運航している例も報告されている。

電池推進システムは、ハイブリッドシステムを除き、従来のディーゼルエンジン等の内燃機関とは全く異なるシステムとなるため、電気自動車の企業参入の事例と同様に、欧州では、電池メーカー等これまで船舶との関わりが薄かった企業が電池推進船の開発・製造に参画していることは注目に値する。

世界的に電気自動車の開発・導入が進み、実用化の障害となっている電池の省スペース化、大容量化、低価格化、充電時間の短縮化、充電ステーションの整備促進等の課題が解決されれば、船舶においても電池推進船の開発・導入が一気に進むことも考えられる。

我が国船用工業事業者等が電池推進船及び関連技術の開発・導入を図るためには、先行する欧州における電池推進船の動向を把握することが不可欠であることから、欧州における電池推進船の開発・導入に係る各種情報を整理・分析する調査を実施した。

ジャパン・シップ・センター  
船用機械部



## 目次

1	要旨	1
2	はじめに	2
3	技術	3
3.1	バッテリー技術	3
3.1.1	バッテリー技術パラメーター	4
3.1.2	セルの設計と化学特性	5
3.1.3	船用バッテリーシステムの構成	7
3.1.4	バッテリー技術開発の進歩	9
3.2	燃料電池技術	10
3.2.1	利用可能な燃料電池技術	12
3.2.2	船用利用に有望な燃料電池技術	18
3.3	電気及びハイブリッド推進技術	22
3.3.1	はじめに	22
3.3.1.1	従来の機械駆動推進方式	23
3.3.1.2	ディーゼル電気推進方式	24
3.3.1.3	エネルギーの分散型貯蔵	24
3.3.1.4	直流配電ハイブリッド	25
3.3.1.5	完全電気推進方式	26
4	市場の現状	27
4.1	バッテリー推進船及びバッテリー・ハイブリッド船	27
4.1.1	バッテリー推進船の主な船種	30
4.1.1.1	完全電気推進 vs ハイブリッド	31
4.1.2	市場成長予測	32
4.1.3	市場成長予測：まとめ	33
4.1.4	完全電気推進船：まとめ	34
4.2	燃料電池船	36
4.3	研究開発プロジェクトの概要	38
4.3.1	E-FERRY	38
4.3.2	BB Green：グリーンな高速フェリー	38
4.3.3	Yara Birkeland	39
4.3.4	ReVolt：ゼロ排出無人航行船プロジェクト	39
4.3.5	Teekay：ハイブリッド・シャトルタンカー・プロジェクト	39
4.3.6	HYBRIDShips：水素フェリー	40
4.3.7	SHORT SEA PIONEER：船舶とロジスティックス	41
4.3.8	PLAN B ENERGY STORAGE (PBES)：CellSwap バッテリー技術	41
4.3.9	HH Ferries：電気推進フェリー	42
4.3.10	GREEN COASTAL SHIPPING プログラムの第3フェーズ	43
4.3.11	BECKER MARINE：COBRA バッテリーシステム	43

4.4	バッテリー・ハイブリッド船の使用燃料	43
5	基金及び補助金制度	46
5.1	EU	46
5.2	ノルウェー	47
6	燃料の利用可能性	49
7	製造事業者	50
8	2020年以降の動向	54

	参考資料	56
	添付資料 APPENDIX I：バッテリー技術の基本	57
	添付資料 APPENDIX II：有望な船用燃料電池技術	61
	添付資料 APPENDIX III：EUの補助金制度	64

## 図

図 1	バッテリーの構成：セルからモジュール、パックから大型システムへ	4
図 2	リチウムイオン電池の内部要素と動作	6
図 3	一般的な船用バッテリーシステム	7
図 4	全固体電池技術の仕組み	9
図 5	水素燃料電池の基本構造	11
図 6	アルカリ電解質形燃料電池システムのフローチャート	12
図 7	AFCの構造	13
図 8	PEMFCのフローチャート	13
図 9	PEMFCの構成	14
図 10	DMFCフローチャート	14
図 11	DMFCの構成	15
図 12	PAFCのフローチャート	15
図 13	PAFCの構成	16
図 14	MCFCのフローチャート	16
図 15	MCFCの構成	17
図 16	SOFCのフローチャート	17
図 17	SOFCの構造	18
図 18	直接機械駆動推進とディーゼル電気推進	22
図 19	電気要素のシンボル	23
図 20	バッテリー・ハイブリッド電気システムを搭載した機械駆動推進	24
図 21	ディーゼル・電気ハイブリッド推進	24
図 22	分散型バッテリーを持つハイブリッド・バッテリー推進	25
図 23	電気／機械駆動ハイブリッドの電力システム、プラグイン・バッテリー・ハイブリッド、及び直流配電システム	26
図 24	完全電気推進船（オール電化船）のバッテリー推進システム	26
図 25	バッテリー推進船及びバッテリー・ハイブリッド船の国別就航状況	27

図 26 : バッテリーを使用する商船数	28
図 27 : バッテリーを使用する商船数の状況 (就航中、係留中、建造中、不明)	28
図 28 : バッテリー推進船の新造とレトロフィットの割合 (隻数)	29
図 29 : バッテリーの主目的 (船舶数の割合)	29
図 30 : 船種別バッテリー出力合計 (上位 10 船種)	31
図 31 : バッテリー技術の種類別船舶数	32
図 32 : バッテリー推進船及びバッテリー・ハイブリッド船の使用燃料比率 (隻数)	44

表

表 1 : 燃料電池技術の一覧	21
表 2 : 完全電気推進船一覧	35
表 3 : 船用燃料電池プロジェクト一覧	37
表 4 : 船用バッテリーメーカー一覧	51
表 5 : 燃料電池メーカー一覧	53
表 6 : 燃料電池評価のパラメーターと重要度	62
表 7 : 燃料電池技術の評価	63



## 1 要旨

船用バッテリーシステム及び様々な代替燃料は、技術進歩と厳格化する環境規制により利用が促進されている。Maritime Battery Forum の登録船統計によると、現在、バッテリーを動力として使用する船舶は、発注済みの船舶を含めた場合、200 隻を超える。その約 40%はノルウェーの船舶である。バッテリーセルの化学特性と組成の開発は進んでおり、新たな材料の組合せも一般的となっている。過去数年間の出力と価格の動向もバッテリーの普及大きく貢献している。バッテリー技術の次の段階は、全固体電池（solid state battery）である。全固体電池技術の研究開発は進んでおり、自動車メーカーが主体となって市場化を目指している。将来的には、多くの船種の船用バッテリーとしても全固体電池が主流になると予想される。現在、船用バッテリーを搭載している主な船種は、旅客船、オフショア船、作業船、及び出力需要が変動する他の船種である。遠洋航行船舶は、その出力需要の大きさから、バッテリーの利用は部分的なものから開始されると予想される。現時点では、大部分のバッテリー推進船は沿岸航行船である。

燃料電池（フュエルセル）の船用利用は未だ初期段階ではあるが、大いに注目されている技術である。多くの異なる技術が利用可能であり、いくつかの船用プロジェクトが進行中である。燃料電池技術は実用化されているが、船用利用に関しては、更なる技術開発と承認プロセスが必要となっている。

代替燃料の普及に関しては、港湾と燃料供給業者、又は船主（燃料ユーザー）のどちらが先に動くかという「鶏と卵」のジレンマ状態にある。船主にとっては、寄港先の港湾におけるインフラが整備されていない状態で新技術を導入することは大きなリスクである。逆に、港湾事業者と燃料供給業者にとっては、インフラを整備しても船主がそれを使用しない場合のリスクは大きい。代替燃料の導入を先導する事業者と船主の相互協力が必要となる。これまでの実績から、船主はインフラが未整備の場合には新技術の導入には消極的である。

環境規制の厳格化と技術進歩に伴う今後の動向としては、船舶のエネルギー生産を調整し、最適化するバッテリーは、将来的には大部分の船舶に標準搭載されると予想される。現時点では、ゼロ排出を実現可能な技術は、バッテリー以外では燃料電池のみである。燃料電池には、エネルギー量は燃料タンクのサイズで変化させることが出来るという利点がある。バッテリーのエネルギー量は内蔵エネルギーの量のみである。

石油由来の燃料は、2050 年時点でも船舶が使用するエネルギーの大きな部分を占めると予想される。DNV GL の予測では、2050 年には約半数（47%）の船用エネルギーが石油精製燃料、32%がガスで、炭素排出量（カーボン・フットプリント）を大幅に削減する電力やバイオ燃料等の代替燃料の利用は 21%に止まる。全エネルギーの 37%を使用する近距離海運では、電力のシェア（9%）が高まると予想される。

## 2 はじめに

船用バッテリーシステム及び様々な代替燃料は、技術的な進歩に加え、厳格化する環境規制により開発が促進されている。新技術の普及過程では、常に安全性、規制と承認制度の欠如等の挑戦が伴う。現時点では、バッテリー、燃料電池（フュエルセル）、水素に関する明確な国際規則が存在しない。国際海事機関（IMO）は現在、燃料電池に関する規則を策定中であるが、バッテリーに関する規則はない。水素の貯蔵方法ももう一つの課題である。DNV GLは、船級協会としてバッテリーと燃料電池使用に関するルールを定めている。

本報告書では、民間のバッテリー推進船及びバッテリー・ハイブリッド推進船に関する調査を実施した。民間の商船を対象とし、レジャーボートと艦艇は含まない。

本報告書は、主に現在利用可能なバッテリー技術とその開発動向を概説した。さらに、燃料電池にも言及した。主な調査事項は以下のとおり。

- 現在、船舶に利用されているバッテリー技術と今後の開発動向
- 船舶に利用されている水素及びメタノールをエネルギー源とした燃料電池技術
- 電気、ハイブリッド、プラグイン・ハイブリッド等のハイブリッド船の構成
- 関連エネルギー及び燃料のバンカリング：陸上電力、メタノール、水素、LNG
- バッテリー推進船及びハイブリッド船に関する EU 等の補助金制度
- 船用バッテリー及び燃料電池の供給業者
- 2020年～2050年の船用燃料の動向

### 3 技術

本章では、バッテリー及び燃料電池に関する考察を行う。また、主なハイブリッド構成にも言及する。

#### 3.1 バッテリー技術

バッテリーは、電気貯蔵が可能な応答性に優れた電気化学システムである。未使用又は余剰エネルギーを貯蔵し、オペレーターは運航中の船舶の需要に合わせてエネルギーを活用することが出来る。近年の技術進歩によりバッテリーシステムの性能は向上し、同時に価格は低下傾向にあるため、新市場においては競争力のあるシステムとなっている。

現在、船舶で利用されているバッテリーの主流は、リチウムイオン電池である。鉛蓄電池やニッケルカドミウム電池等の水溶液系電解質を使用した従来型電池と比較して、リチウムイオン電池は、エネルギー密度が高く、ユニット当たり 2~8 倍のエネルギー貯蔵が可能である。エネルギー密度の高さと可燃性の電解質の組合せは、安全性の確保が難しいため、リチウムベースのバッテリーシステムは、高い設計力、電子制御システム、安全運航のための機械設計が必要となる。

使用される原材料以外でリチウムイオン電池のコアとなるのは、セルである。船用バッテリーは、数万個のセルで構成される。全てのリチウムイオン電池はセルの集合体である。船舶、陸上施設、自動車等に使用される大型バッテリーシステムでは、特定数のセルが標準モジュールに組み込まれている。図 1 に示すとおり、このモジュールは他のモジュールと組み合わせられ、通常 1,000V 以上の標準システム電圧を発揮する。モジュールの集合体は「パック」又は「ラック」(rack) と呼ばれ、各用途の電力需要に従って特定電圧を供給する。陸上施設向けに設置されたバッテリーの最大出力は約 120MWh、船舶 (Scandlines) に搭載されたバッテリーの最大出力は 2.7MWh、電気自動車 (Tesla S 85) の最大出力は 0.085MWh である。

船用利用に際しては、各船舶の電力需要に応じてモジュールが設計され、メーカーが製造したセルが組み込まれる。セルメーカーの多くはモジュールの組立ても行うが、船用環境に適したモジュールの製造は特殊技術である。また、いくつかの企業はグループ内でセル及びモジュールの製造を行っており、カスタム化した製品の製造が可能であるが、大規模なセルメーカーのように最新のセル技術の利点 (低価格化) を反映することは難しい。

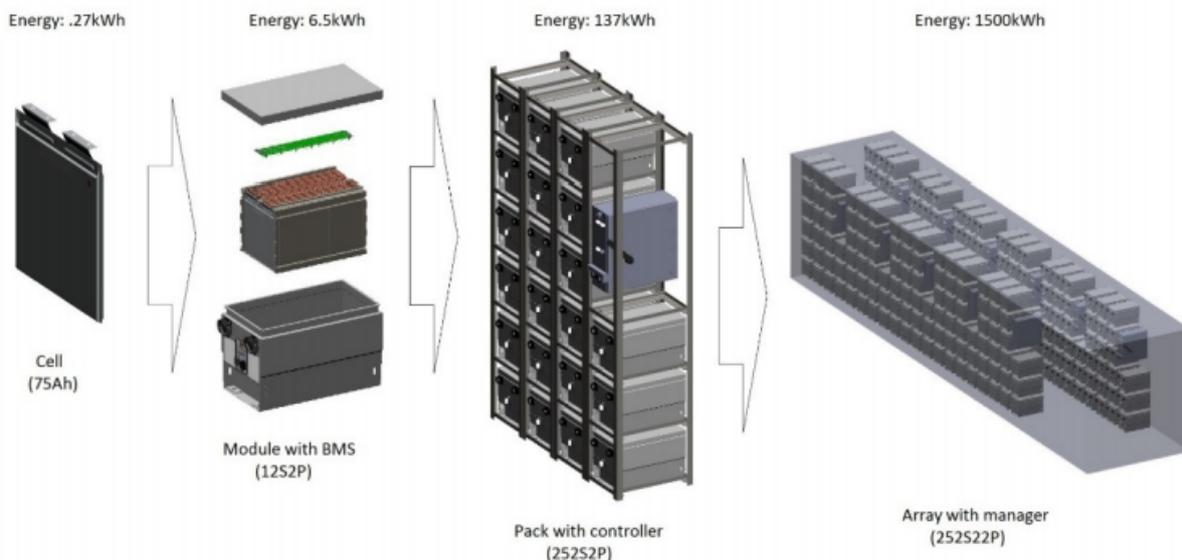


図 1：バッテリーの構成：セルからモジュール、パックから大型システムへ

バッテリーシステムは、通常バッテリーメーカーが設置、接続を行い、その他の設置作業は造船所が担当する。作業には、各規則とメーカー仕様に従ったガス検知器、換気システム、空調システム、防火・消火システム、外壁、ケーブル配線の設置が含まれる。

### 3.1.1 バッテリー技術パラメーター

現在、船舶に利用されている電池は、リチウムイオン電池のみである。リチウムイオン電池には、対象とする用途による違いの他、製造の品質、電子化学構造、エンジニアリング等に多くのバリエーションがある。幅広いリチウムイオン電池のバリエーションがあるため、それぞれの用途に適した電池を選択することが重要である。電池を選択する際の主な要件は以下のとおり。

- エネルギー密度：特定面積又は重量あたりに貯蔵された電気の量 (kWh)。電気自動車の走行距離で比較することが出来る。
- 出力密度：出力可能な電気の量 (kW)。自動車の加速と同様に考えられる。バッテリーが大型化すると出力も増加するため、ユニットエネルギー (kWh) 当たりの出力 (kW) は「C レート」と呼ばれる重要な要件である。
- コスト：リチウムイオン電池の低価格化は、普及への重要な要素となっている。
- 寿命：電池寿命は、種類と使用方法によって異なる。劣化の過程は複雑である。全ての電池は同じ原因により劣化するが、様々な要因への反応レベルは電池の種類によって異なる。電池には、使用によるサイクル寿命と経年変化によるカレンダー寿命がある。過度の使用によりバッテリーの劣化は早くなる。

### 3.1.2 セルの設計と化学特性

前述のように、リチウムイオン電池は、製造の品質、電子化学構造、エンジニアリング等の要因によって大きな差異がある。

製造の品質は、欠陥のないセルの製造とセル間の一貫性を確保するための製造工程の厳密な管理に主として影響される。リチウムイオン電池の大部分は「クリーンルーム」で製造される。船舶に搭載される電池システムは数千個又は数万個のセルで構成されており、セルの一貫性のある動作により最大の効果が得られる。バッテリー管理システム (battery management system : BMS) 機能の中のバランス機能が、全バッテリーを制御し、他のバッテリーと同様に作動させる。

製造の品質以外でも、セルはその設計とエンジニアリングにより大きく異なる。リチウムイオン電池の主な構成要素を図 2 に示す。セルは、充電及び放電時にリチウムイオンが両極間を移動する正極と負極から構成されている。正極及び負極の材料と設計がバッテリーの特性を決定する。リチウムイオン電池の大部分は負極材として炭素又は黒鉛を使用しているため、バッテリーの特性とは正極材の化学構成を指す。正極材としては使用される物質は、マンガン酸リチウム (LMO)、リン酸鉄 ( $\text{FePO}_4$ , LFP)、ニッケルコバルトマンガン (NCM)、コバルト酸リチウム (LCO)、その他の組合せである。船用及びその他の市場で最も広く使用されている 2 つの正極材は、NCM と LFP<sup>1</sup>である。LFP は最初に製造されたリチウムイオン電池で、幅広い温度で作動することが特長である。また、LFP は、金属酸化物の積層ではないため、熱暴走時の発熱量が比較的少なく、安全性が高い。一方、NCM は、船用市場で最も多く利用されている電池である。定置発電市場でも多く利用され、自動車システムでは大多数を占める。NCM は、コスト、寿命、エネルギー及び出力の面でバランスの取れたシステムであることがその利点である。NCM の構成要素、即ちニッケル、コバルト、マンガンは、それぞれ異なる特性と機能を持つため、そのバランスの調整によりエネルギーや出力が向上する。このため、各用途への適合が可能である。

---

<sup>1</sup> DNV GL, 2016. DNV GL Handbook for Maritime and Offshore Battery Systems (DNV GL, 2016)

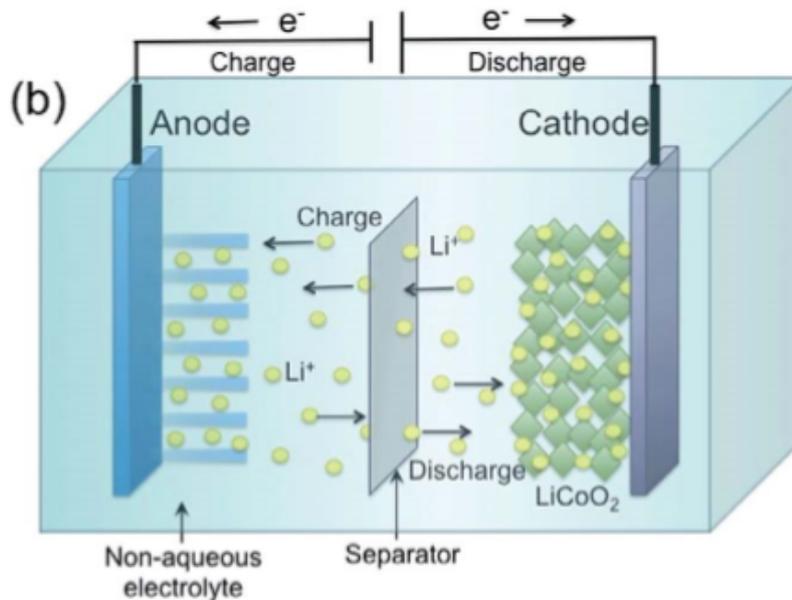


図 2 : リチウムイオン電池の内部要素と動作

出所 : Roy and Srivastava, 2015 Journal of Materials Chemistry

最も一般的な船用リチウムイオン電池の正極材とその特性は、以下のとおりである。

#### コバルト酸リチウム : $\text{LiCoO}_2$ (LCO)

LCO の最大の利点は、比較的高いエネルギー密度である。しかしながら、一般的に出力は低く、寿命は短い。また、インピーダンスの経年増加も問題である。さらに、温度上昇により酸素が発熱し、自己加熱による発火と熱暴走を引き起こす危険性がある。LCO 型電池は、数百回のサイクルと 3 年間の寿命と初期容量の 80% で十分な一般向け電子機器の充電可能なバッテリーとして広く利用されている。

#### マンガン酸リチウム : $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ (LMO)

LMO は、その結晶構造から出力容量が高く、ユニークな正極特性を持つ。また、熱安定性と安全性が高いことも利点である。しかしながら、コバルト系化合物と比較してエネルギー容量が大幅に低く、特に高温ではサイクル寿命が短い。材料の変更により LMO 化合物のサイクル寿命を延長させることは可能である。

#### ニッケルマンガンコバルト酸化物 : $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Co}_y\text{O}_2$ (NCM or NMC)

ニッケルマンガンコバルト酸化物 (NCM) は、最も新しい正極材の一つである。現在、大型用途に関しては市場をリードしており、一般家電においても LCO に取って代わりつつある。その利点は、それぞれの構成要素の利点、即ちニッケルの高エネルギー密度、コバルトの高エネルギー密度、マンガンの結晶構造の安定性である。出力密度、エネルギー密度、コスト、安全性に関する特性を変化させることにより、それぞれの用途又は用途群

の要求に応じてカスタマイズすることが可能である。さらに、正極において LCO 又は LMO 等他の正極材と機械的に混合し、また、別の特性をカスタマイズすることも可能である。

### リン酸鉄リチウム : $\text{LiFePO}_4$ (LFP)

LMO と同様に、LFP は、金属酸化物の層ではなく、オリビン型リン酸という他の多くの正極材と異なる構造を持つ。最大の利点は、正極に酸素源を持たないため、熱暴走時の危険性が低いことである。また、温度変動に対する耐性も高い。 $\text{LiFePO}_4$  のエネルギー密度は比較的 low、電子化学反応（電圧）も低いため、駆動力は低い。 $\text{LiFePO}_4$  系バッテリーの出力容量は本質的に低いが、 $\text{LiFePO}_4$  に少量の他の材料、電導性被覆材、ナノ構造を持つ活性物質を混合することにより、高出力化が可能である。

### 3.1.3 船用バッテリーシステムの構成

図 3 は、一般的なバッテリーシステムのブロックダイアグラムである。図 3 に示すように、一般的なバッテリーシステムの主要素はセル、バッテリーモジュールに必要なハードウェア、熱管理に必要な部品、電磁接触器とヒューズ等の安全機能、バスバー（回路基板）、高圧ケーブル、電子部品、電圧・温度センサー、低圧ケーブルとコネクタである。

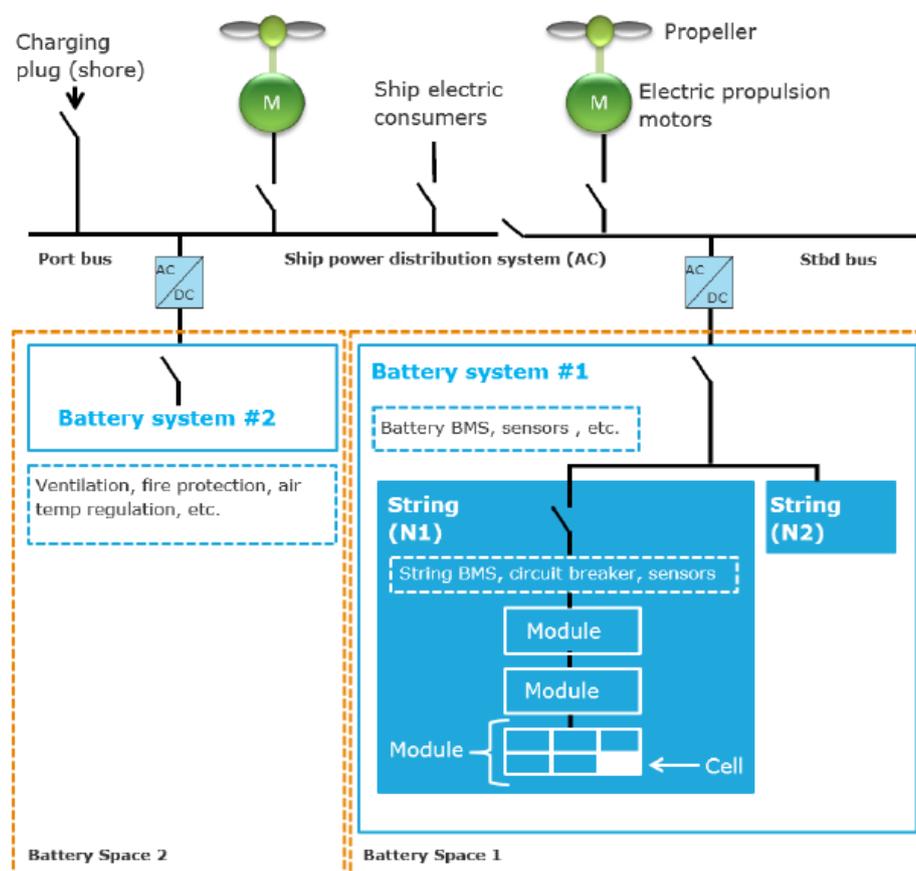


図 3 : 一般的な船用バッテリーシステム

出所 : (DNV GL, 2016) DNV GL Handbook for Maritime and Offshore Battery Systems

セル：最小の電子化学ユニット

モジュール：ある程度の電子制御及び／又はモニタリング機能を持つセルの集合体

ストリング：システムレベルと同じ電圧を持つ最小ユニット（例：接続されたセル又はモジュール）

バッテリーシステム：特定の目的に要求される全システムを持つ1個以上のバッテリーストリング

バッテリースペース：バッテリーシステムを決められた環境条件（温度、湿度等）で決められた場所に固定するためのウォール、フロア、シーリング、及び全機能と部品の物理的設置スペース

バッテリー管理システム（BMS）：バッテリーシステムの制御、監視、保護機能の総称。主バッテリー制御ソフトウェアと保護機能は、バッテリーの機能と安全性の保持にエネルギー貯蔵技術と同等の重要性を持つ。

換気システム：誤作動時や故障時には、リチウムイオン電池は燃焼し、ガスを発生する。発生するガスは、バッテリーの電解質の構成、充電状況、温度、セルの内部圧、セルの年齢によって異なるが、腐食性、毒性、発火性があり、爆発の危険もある。このような特性はバッテリースペースの設計時に考慮され、換気システムが含まれる。

防火システム：バッテリーシステムには発火のリスクがあるため、バッテリー設計には火災拡散防止及び／又は消火システムを組み込むことが必要である。

熱管理システム：作動状況により、バッテリーシステムは大量の熱を発生させる。また、高温運転時は動作が不安定化し、安全性へのリスクと劣化に繋がるリスクがある。

動力システムと制御システムの統合：バッテリーシステムは動力システムに正しく統合しなければならない。スイッチギアと保護機器の調整も必要である。動力管理システム等の異なる動力機関を制御する複数のシステムの調整も考慮すべきである。

インバーター：バッテリーシステムは直流を用いて電子化学的に運転するため、船舶の交流配電システムとのインターフェイスにはインバーター又はコンバーターが必要である。

安全性、熱管理、バッテリー管理システム、規制に関する情報の詳細は、添付資料 Appendix I を参照。

### 3.1.4 バッテリー技術開発の進歩

近年の技術開発の進歩により、複数の化学特性を組み合わせたバッテリーが増加している。例としては、NCM と LMO、NCM と LFP 等の組合せがある。これによりバッテリーの種類が増加し、化学特性の知識だけでその作動能力を判断することが難しくなっている。バッテリーの真の能力と弱点を理解するには、試験が最良又は唯一の手段である。

また、最近では、従来炭素か黒鉛が用いられていたリチウムイオン電池の負極材の構成の微調整も行われている。寿命は短い、エネルギーを増加させ、コストが低いシリコン材の利用は大幅に増加し、バッテリーとして広く市場化されている。もう一つの負極材は LTO と呼ばれるチタン酸である。その利点は、高出力、非常に長い寿命、温度変化への高耐性である。これらの特性によりチタン酸は船用利用に適しているが、チタン酸はセルのエネルギー密度を大きく低下させるという欠点がある。このため、同じエネルギー量を得るためには多くのバッテリーが必要となり、システムコストが大きく上昇する。

船用利用は、他の用途よりも高出力が必要であるが、現在、バッテリーの技術開発の多くは、エネルギー密度の向上と低価格化が焦点となる自動車及び家電向けである。

全固体電池（ガラス電池）は、最も期待されている新技術の一つである。

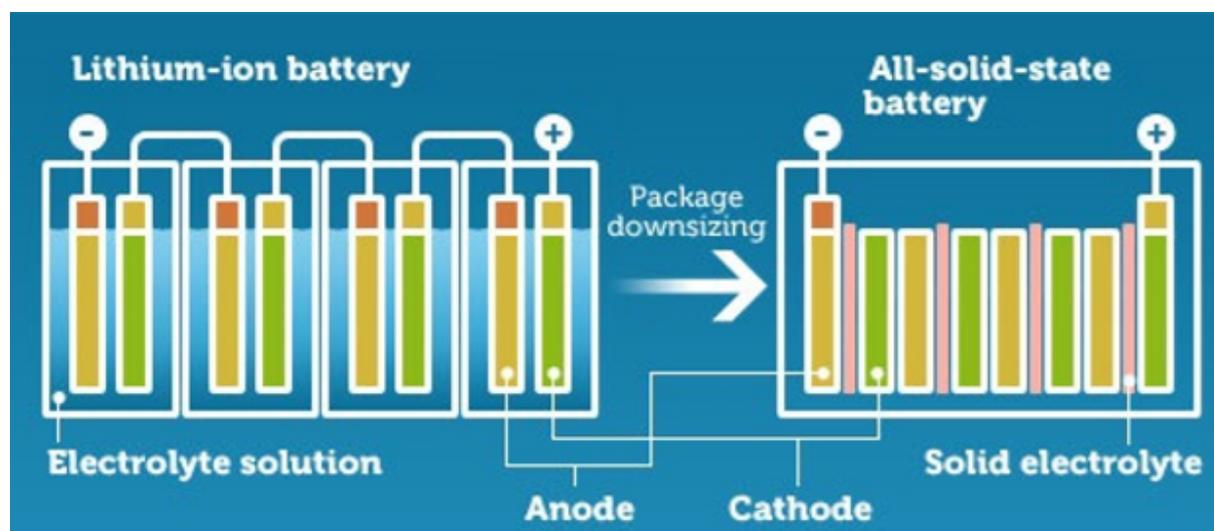


図 4：全固体電池技術の仕組み

全固体電池は、現在、リチウムイオン電池の大部分が使用している液状電解質の代わりに固体状電解質を用いる。正極と負極は現在と同じ NCM や炭素又は黒鉛を用いるが、電解質を変えることにより、電極の理想的な材料と配合も変わってくる。John Goodenough<sup>2</sup>氏は、リチウムイオン電池には 3 つの基本的な問題があるとしている。第一は充電速度が

<sup>2</sup> John Goodenough 氏は、リチウムイオン電池発明の父として知られている。  
<https://about.bnef.com/blog/goodenough-making-progress-solidstate-batteries-qa/>

遅いこと、第二は過充電により酸素が発生すること、第三は電解質が発火しやすいことである。エネルギー量は電圧×電流である。SEI (Solid Electrolyte Interphase) 膜と呼ばれる電極界面の被膜を導入することでエネルギー密度は向上するが、サイクル寿命は限界がある。現在の焦点は、いつどのように全固体電池が開発され、実用化されるかである。

バッテリーの開発は自動車メーカーが主導しており、大部分の大企業はバッテリーへの投資を行っている。例としては、BMW は Solid Power 社と提携<sup>3</sup>、ルノー・日産・三菱アライアンスは今後 5 年間の「次世代モビリティ」プロジェクトに 10 億ドルを投資している<sup>4</sup>。また、Fisker 社は、新バッテリー技術の特許を申請中で、早ければ 2024 年には電気自動車の走行距離を 500 マイル超とするバッテリー技術と 1 分間で充電を完了する機能が実現する<sup>5</sup>。

全固体電池はいつ市場化されるのか。Goodenough 氏によると、技術は既に存在し、あとは工業化を待つのみで、3~4 年以内の実用化を予想している。他の専門家は 7 年間で現実的な予想であるとしている。また、トヨタとダイソンは、2020 年までには最終製品化が可能であると述べている。今後の展開に関しては、次の 2 点が焦点となる。第一は技術の進歩、第二は近年劇的な低価格化が進んでいるリチウムイオン電池と市場で競合できるかである。

全固体電池の課題は何か。伝導性の低さが全固体電池技術の普及の障害の一つとなっている。Yu 氏その他の研究<sup>6</sup>によると、 $\text{Li}_2\text{S}-\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Br}$  型全固体電池を例にとると、実験では、リチウムイオンの電解質-電極インターフェイス間の相互移動が全固体電池のリチウムイオン移動の大きな障害となっている。準備状況とバッテリーサイクリングの両方が相互移動に影響する。従って、エネルギー密度の高い全固体電池の実現には、容量の変動と酸化還元的不安定化が原因となるサイクリング時のインピーダンスの増加を抑制するインターフェイス設計が必要となる。

### 3.2 燃料電池技術

燃料電池 (フュエルセル) 技術は、バッテリー以外のもう一つの有望なゼロ排出又は低排出技術である。ゼロというのは相対的な表現で、排出量はエネルギー生成の方法に影響される。現行の環境規制へのコンプライアンスと海運の持続性のある発展のためには、燃料電池による発電は、燃料の種類と製造方法にもよるが、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、粒子状物質 (PM) を排除し、ディーゼルエンジンからの排出と比較した場合、 $\text{CO}_2$  の排出を大幅に削減する技術である。天然ガスのような低炭素燃料で駆動した場合、燃料電池は排出と騒音の低減

<sup>3</sup><https://www.prnewswire.com/news-releases/solid-power-battery-to-power-xev-platform-for-quality-safety-performance-enhancements300572268.html>

<sup>4</sup><https://www.greentechmedia.com/articles/read/nissan-renault-leadership-electric-mobility-ces#gs.yg7ZPmM>

<sup>5</sup><http://www.thedrive.com/tech/16037/fisker-claims-new-solid-state-battery-patents-could-lead-to-500-mile-ev-range-1-minute-charge-times>

<sup>6</sup> Accessing the bottleneck in all-solid state batteries, lithium-ion transport over the solid-electrolyte electrode interface (Chuang Yu, 2017)

という地域的な利点がある。将来的には、再生可能資源から製造される水素燃料が、炭素の排出がゼロの船舶を実現する可能性がある。バッテリーと異なり、燃料電池は使用燃料の貯蔵と関連燃料システムを必要とする。現在、船用燃料電池は開発段階にある。

燃料電池のパワーパックは、燃料及びガス処理システム、燃料の化学エネルギーを電子化学反応により電力に変換する燃料電池のスタックにより構成される。このプロセスはバッテリーの使用と比較できる。バッテリーと燃料電池は、両方とも正極又は負極と電解質膜のインターフェイスによって起こる電子化学反応を持つが、バッテリーがエネルギー源を内部貯蔵することに対し、燃料電池は外部からの燃料供給により駆動される。多くの種類の燃料電池があり、その違いは膜の材質による特性である。水素燃料電池の基本的な構造を図5に示す。水素原子が燃料電池の負極に入り、化学反応により電子が離脱する。水素原子は電離（イオン化）し、正電荷を運ぶ。負電荷の電子は導線を通して電流を供給する。

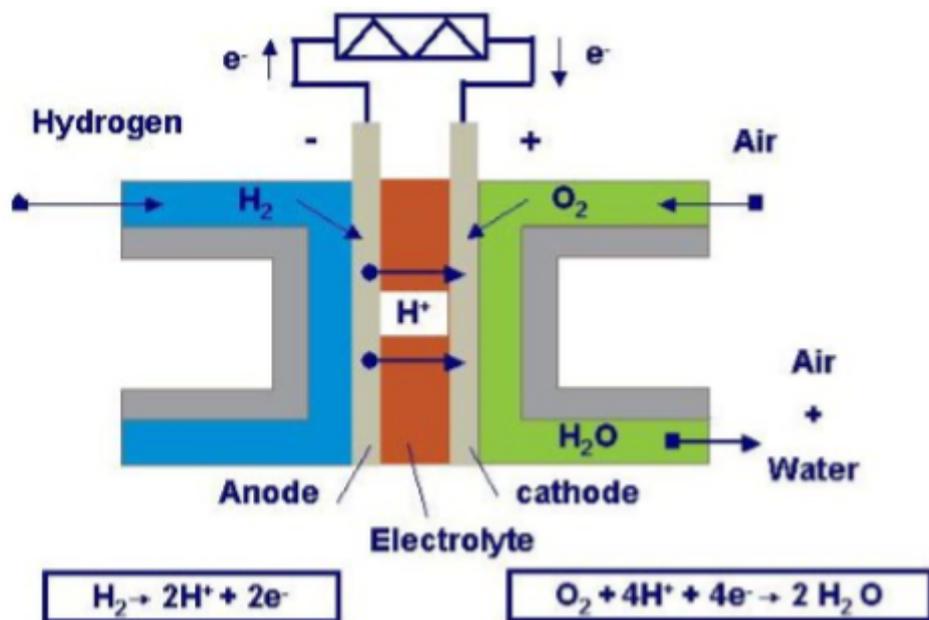


図5：水素燃料電池の基本構造

燃料価格の上昇と変動及び排出削減に向けた世界的及び地域的な動向は、幅広い分野における燃料電池の開発を促進している。市場調査<sup>7</sup>によると、燃料電池は将来的な技術ではなく、既に携帯電子機器、家庭向け発電、無停電電力供給等の多様な用途向けに市場化されている。

どの燃料電池技術が最も有望かを予測することは難しいが、用途毎に予想することは出来る。小型及び中型の用途には、プロトン交換膜（PEM）や高温 PEM 等の低温・中温技術が適している。産業用又は大型船舶等排熱回収ソリューションが搭載可能な大型の用途

<sup>7</sup> FuelCellToday, 2018. Fuel Cell Today. Available at: <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/afc> (FuelCellToday, 2018)

には、融解炭酸塩形又は固体酸化物形の燃料電池が適している。<sup>8</sup>

本章では、船用利用に有望な燃料電池技術を紹介し、3.3.2 では、燃料電池推進船の開発状況を概説する。

### 3.2.1 利用可能な燃料電池技術

#### アルカリ電解質形燃料電池（Alkaline Fuel Cell : AFC）

アルカリ電解質形燃料電池（AFC）は、最初に実用化された燃料電池の一つで、NASA のスペースシャトルや世界初の燃料電池推進の旅客船「Hydra」に搭載された。Hydra の燃料電池は出力 5kW の AFC である。AFC の出力は 1~5kW が主流であるが、最近では 200kW の定置型 AFC も報告されている。AFC は通常ニッケル負極、白金正極、アルカリ電解質から構成される。電解質はアルカリ溶液（水酸化カリウム：KOH 等）で、マトリックス内で活性化又は不活性化する。燃料は、水素（H<sub>2</sub>）、酸素（O<sub>2</sub>）、電解質を通過して正極から負極へ移動する水酸化物イオン（OH<sup>-</sup>）である。

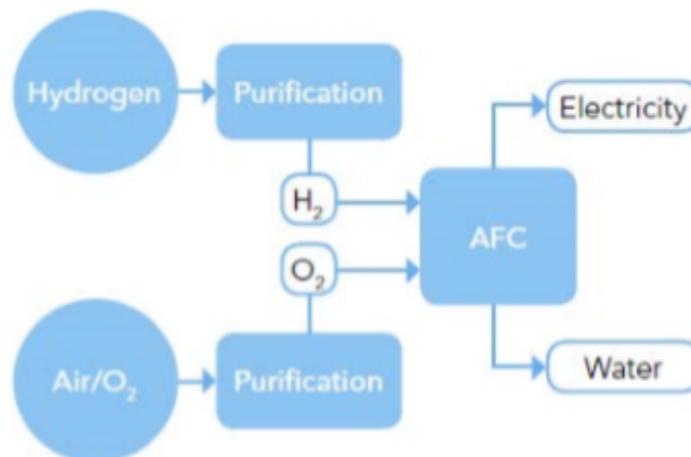


図 6 : アルカリ電解質形燃料電池システムのフローチャート

<sup>8</sup> DNV GL, 2017. EMSA Study on the use of Fuel Cells in Shipping, Lisbon: European Maritime Safety Agency. (DNV GL, 2017)

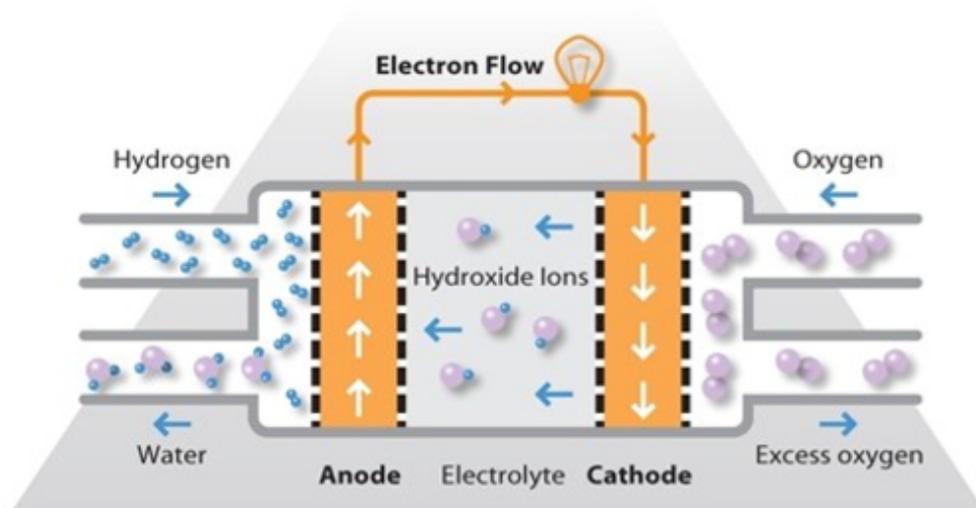


図 7 : AFC の構造

プロトン交換膜形燃料電池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell : PEMFC)

プロトン交換膜形燃料電池 (PEMFC) は、数種類の自動車、ドイツのアルスター湖の旅客船 (96kW)、ドイツ 212A 型潜水艦 (30~50kW のモジュール) 等の多くの用途で使用されている。その他、出力 12~60kW の PEMFC が船舶に搭載されている。

PEMFC は、白金系の電極を用い、電解質は電気絶縁体であるが水素イオン ( $H^+$ ) を通過させる含湿式高分子膜である。作動温度は  $50\sim 100^{\circ}C$  である。高分子膜は湿度を維持する必要があるため、 $100^{\circ}C$  以上の運転は不可能である。

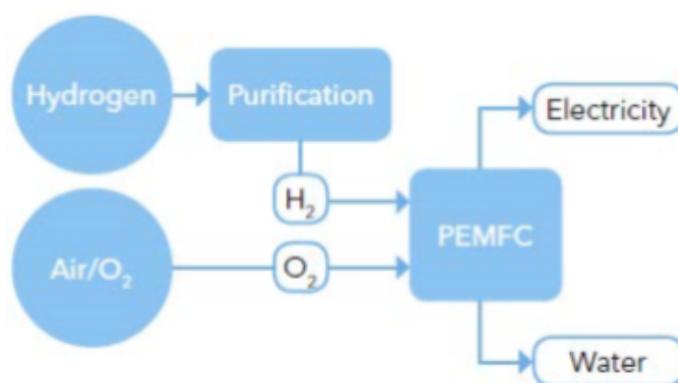


図 8 : PEMFC のフローチャート

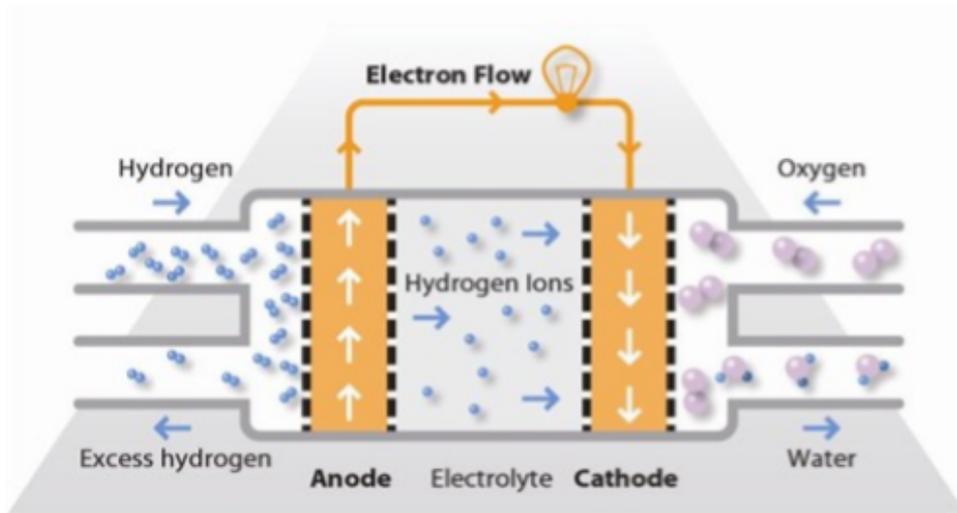


図 9 : PEMFC の構成

### 高温 PEM

高温 PEMFC (HT-PEMFC) と PEMFC の主な違いは、その動作温度である。HT-PEMFC は、電解質に水溶液の代わりに鉍酸を用いることにより、200°C までの動作が可能である。化学反応と燃料は PEMFC と同じである。金属水素化物を水素の燃料源とする出力 12kW の HT-PEMFC が、ノルウェーの旅客フェリー「MF Vågen」に搭載された。

### 直接メタノール燃料電池 (Direct methanol fuel cell : DMFC)

直接メタノール燃料電池 (DMFC) は、水素への改質を行わずにメタノールを直接使用する。PEMFC と同様に、DMFC は高分子膜を持つ。電極は白金ルテニウム触媒を持ち、メタノール (CH<sub>3</sub>OH) 中の水素を直接利用して発電を行う。

DMFC は長時間にわたる少量の電力供給に適しており、通常の出力は最大 5kW である。

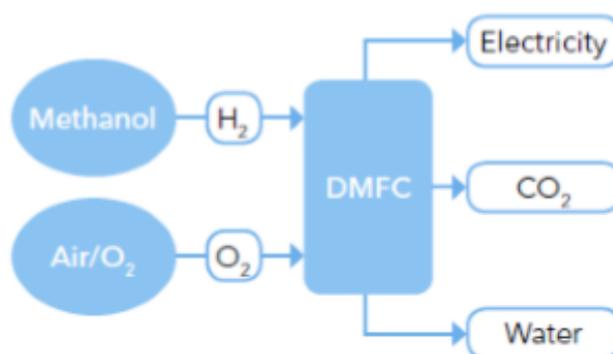


図 10 : DMFC フローチャート

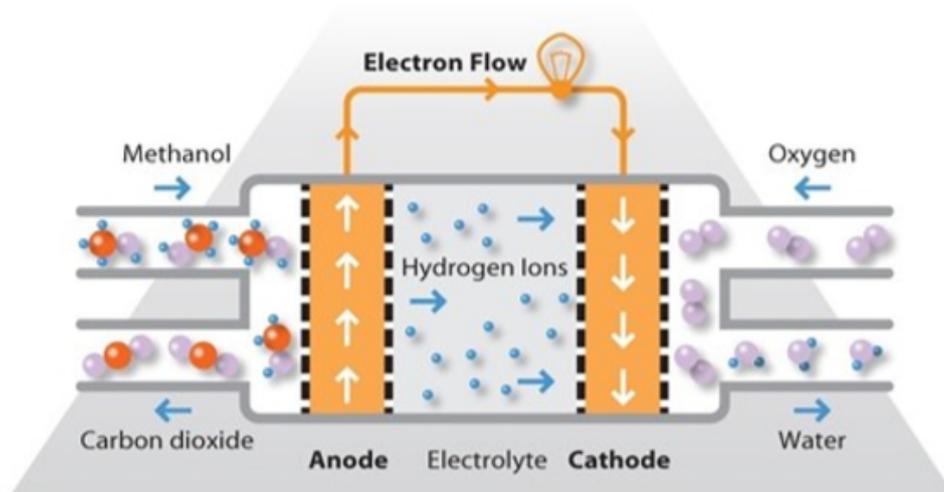


図 11 : DMFC の構成

### リン酸形燃料電池 (Phosphoric acid fuel cell : PAFC)

リン酸形燃料電池 (PAFC) は、最高 200°C までの高温で動作する初の燃料電池であった。高温化により燃料電池から排出される質の高い余剰熱は利用が可能で、この燃料電池の効率を約 40% (発電効率) から最大 80%にまで向上させる。

PAFC は、炭化ケイ素構造のリン酸の電解質と炭素上に白金を拡散させた電極から成る。PAFC は、燃料として水素を用いる。高温のため、LNG やメタノールを含む炭化水素燃料等の純水素以外の燃料源も使用可能である。

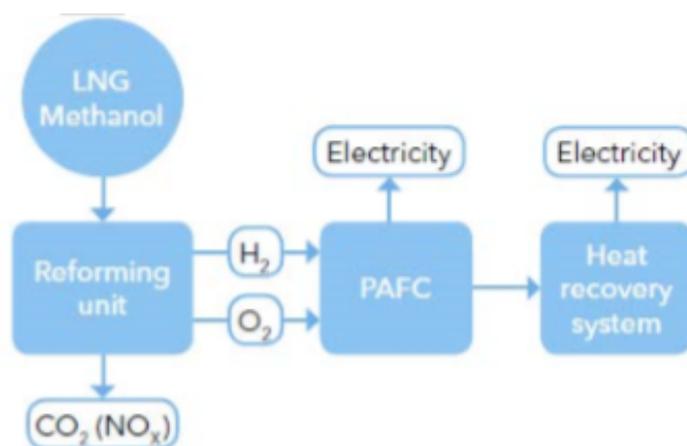


図 12 : PAFC のフローチャート

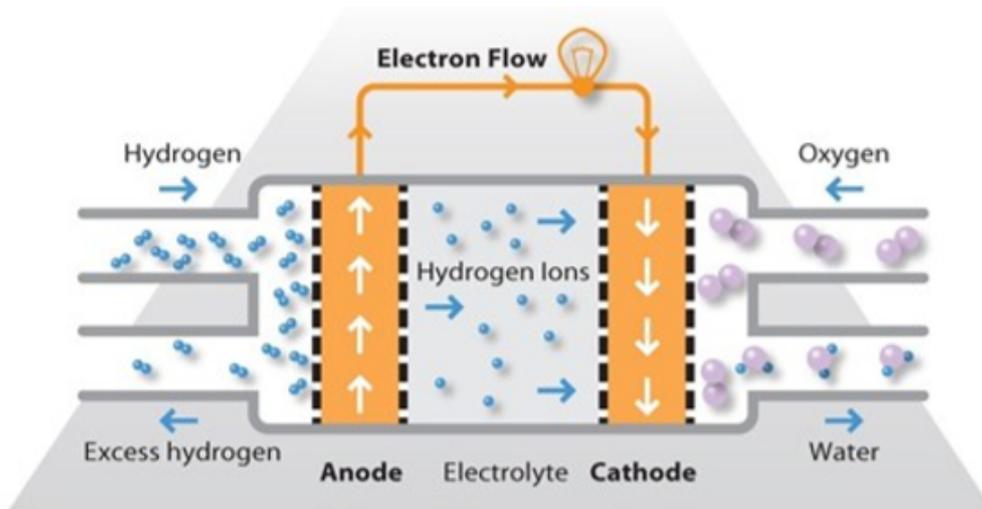


図 13 : PAFC の構成

### 熔融炭酸塩形燃料電池 (Molten carbonate fuel cell : MCFC)

熔融炭酸塩形燃料電池 (MCFC) は、600～700℃ で動作する高温燃料電池である。電解質は熔融炭酸塩で、貴金属系の触媒を必要としない。通常、負極はニッケル合金、正極はリチウムが構造に含まれた酸化ニッケルである。

その高温特性により、MCFC は使用燃料に柔軟性があり、LNG、石炭の燃焼ガス、水素が使用できる。

MCFC は、熱回収システムの利用に適している。燃焼ガスはアフターバーナー又はガスタービンで利用可能で、蒸気タービンからは更に多くのエネルギーを回収することが出来る。発電効率は約 50%であるが、MCFC の総合効率は 85%にも上る。

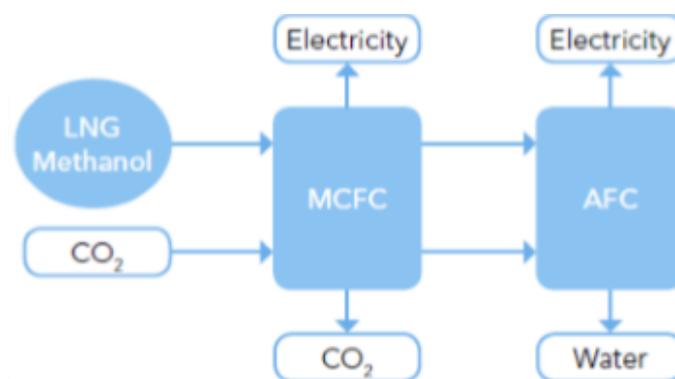


図 14 : MCFC のフローチャート

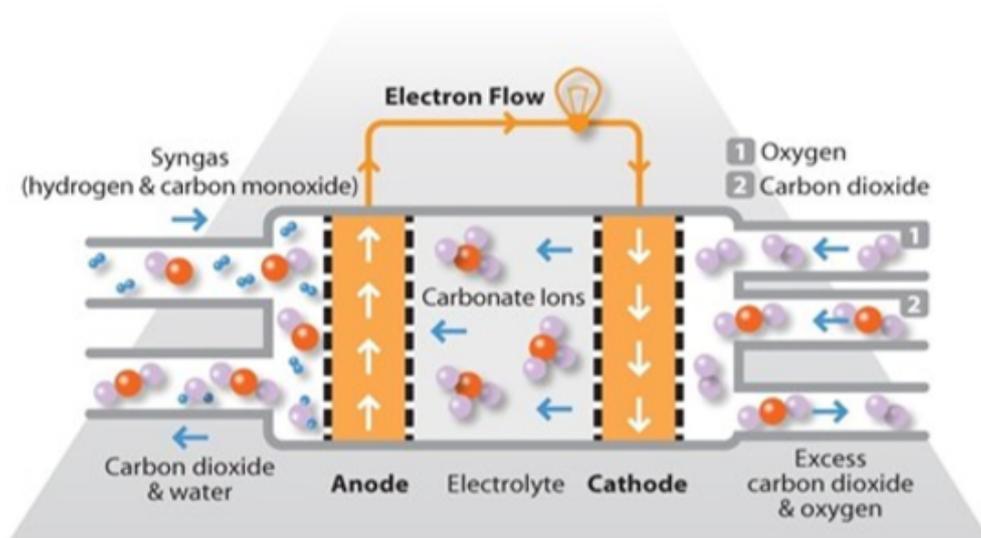


図 15 : MCFC の構造

### 固体酸化物形燃料電池 (Solid oxide fuel cell : SOFC)

固体酸化物形燃料電池 (SOFC) は、動作温度 500~1000°C の高温燃料電池である。電解質は、イットリウム安定化ジルコニア等の多孔質セラミック材料が一般的である。MCFC と同様に SOFC は負極にニッケル合金を用いるが、正極は通常、多孔性を必要とするが、電解質との互換性があるランタニウムマンガンナイトである。

SOFC は、一般的に最大出力 10MW の大型陸上発電に利用されている。いくつかのプロジェクトでは SOFC の船用利用も検討されている。

SOFC は、MCFC と同様に使用燃料の柔軟性が高く、水素、LNG、メタノール、ディーゼル油等の炭化水素燃料が利用可能である。燃料電池内で合成ガス (一酸化炭素 (CO) と水素の混合ガス) への改質が発生する。MCFC と違い、SOFC は正極への CO<sub>2</sub> を必要としない。SOFC からは CO<sub>2</sub> が排出されるが、水素燃料の使用により排除可能である。

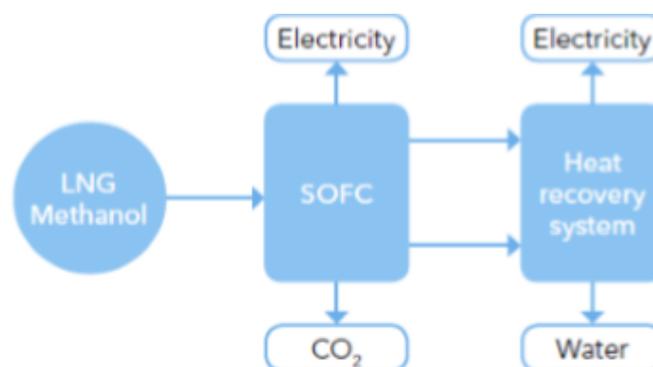


図 16 : SOFC のフローチャート

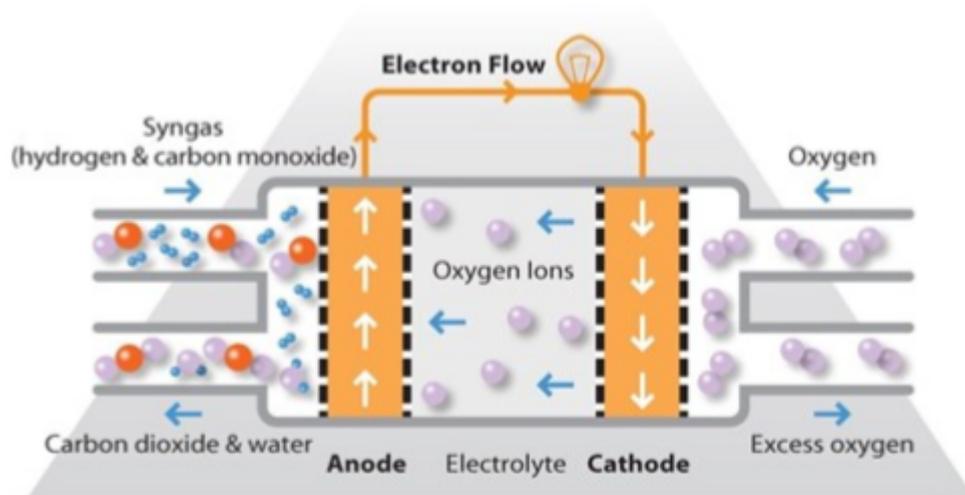


図 17 : SOFC の構造

### 3.2.2 船用利用に有望な燃料電池技術

2017年、DNV GLは、コスト、寿命、サイクリング耐久性、技術成熟度、安全性、効率等のパラメーターをベースに、船舶に利用可能な燃料電池技術の評価を行った（概要は表1を参照）。

また、各技術は、加重値と専門家の意見を用いてランク付けされた。評価の詳細は添付資料 Appendix II を参照。

このランキングで最も評価の高かった燃料電池技術は、プロトン交換膜燃料電池（PEMFC）、高温 PEMFC、固体酸化物形燃料電池（SOFC）である。以下に評価の要点を述べる。

#### プロトン交換膜燃料電池（PEMFC）

プロトン交換膜燃料電池（PEMFC）は、成熟した技術で、船用その他の高出力用途に利用されている。その成熟度により、船用利用に有望な燃料電池技術の一つとなっている。また、利用が広まっているため、コストも比較的低い。

動作温度は低く、燃料として純度の高い水素を必要とする。安全面では、船内の水素貯蔵が焦点となる。燃料として水素を使用するため、排出は水と低質な排熱のみである。低温によりサイクリング運転の耐久性が高い。

効率は中程度で、低温で 50～60%、熱回収は不可能である。モジュールの出力は現在最大 120kW である。物理的なサイズは小さく、船用利用への利点となる。PEMFC の大きな欠点は、水素中の硫黄や CO 等の不純物への耐性の低さ、複雑な水管理システム（ガス

と液体の両方)、中程度の寿命である。PEMFCは、ランキングで最も高いスコアを獲得した技術である。

### 高温 PEMFC (HT-PEMFC)

HT-PEMFCは、従来の低温 PEM よりも成熟度の低い技術であるが、低温 PEM の問題点のいくつかを改善した技術である。高温化により、不純物への敏感性が低減し、水はガスフェーズのみに発生するため水管理もシンプルになる。効率は従来の PEMFC と同等、又は寄生損失 (parasitic losses) が少ないため若干低い。高温運転により発生した余剰熱を、船内暖房に利用することも可能である。高温 PEM 技術は、「Pa-X-ell」プロジェクトで研究され、出力 30kW のスタック 3 基が クルーズフェリー「MS Mariella」に搭載された。また、ノルウェーの「MF Vågen」プロジェクトでは、小型通勤フェリーである同船に出力 12kW の HT-PEM が搭載された。

作動温度の高温化により、改質器の後の浄化リアクターの必要がなくなる。このようなリアクターは、高価でスペースを取り、システム効率を低下させる。燃料中の不純物への耐性により、LNG、メタノール、エタノール、ディーゼル油等多くのエネルギー源から水素を製造する、シンプルで軽量、比較的安価な改質器を用いることが出来る。HT-PEM セルは、最大 3% (30,000ppm) の CO、最大 20ppm の硫黄への耐性がある。一方、低温 PEM の耐性は、CO が 30ppm 以下、硫黄が 1ppm 以下である。作動温度は最大 200°C で、サイクリング耐久性が大きく低下しない温度である。

### 固体酸化物形燃料電池 (SOFC)

SOFC は、高効率で中型の燃料電池である。作動温度が高温であるため、燃料効率は熱回収を用いて約 85%に達し、今後の開発で更なる向上が予想される。船用利用としては、「SchIBZ」プロジェクトで対象となった船舶「MS Forester」への搭載等がある。今後の開発に伴い、価格の低下も予想されている。

SOFC は、使用燃料の柔軟性を持ち、また、炭化水素から水素への改質はセル内部で行われる。問題点は、高温による安全性への懸念と、炭素燃料使用時の CO<sub>2</sub> 及び NO<sub>x</sub> の排出である。

SOFC の開発で期待されている技術は、SchibZ プロジェクトで開発中の SOFC、熱回収、バッテリーを組み合わせたハイブリッドシステムである。これによりシステムの運転の柔軟性が高まる。また、SOFC のサイクリングは減少するため、サイクリングに起因する問題が低減する。

## システム効率

システム効率は、技術の選択において重要な要素である。一般的に、燃料電池の動力システムのシステム効率の差異は、コアとなる燃料電池の形式によるものである。他の構成要素は理論的には同一（又はプロジェクト特有）となるからである。燃料電池の形式の違いによるシステム効率の違いは、セル内で発生する電子化学反応の効率と装置のバランス維持に要求される寄生損失（parasitic losses）により決定される。総合効率の数値は、各燃料電池形式の代表的な数値で比較可能であると考えられている。

さらに、効率は利用可能な排熱にも影響される。本報告書で紹介する燃料電池形式は、低温 PEMFC の 100°C の「排熱」から、MCFC の 650°C の排熱まで大きな差がある。

船用燃料電池プロジェクトでは、燃料電池の統合と運転を成功裏に実証することが焦点となっており、燃料効率等全ての要素を含む設置の最適化の優先度は低くなっている。排熱回収システムの統合に関しても同様である。「FellowSHIP」プロジェクトでは、初回の運転完了後、特別に設計されたコジェネレーション装置を追加した。しかしながら、数々の外部要因により、いくつかの設計パラメーターが変更され、排熱の大部分がコジェネレーション装置にバイパスされたため、最適化の効果が若干低減した。システムの総合効率は 71%以上と報告されている。予想される効率を表 1 に示す。

表 1：燃料電池技術の一覧

技術	相対的コスト	モジュール出力レベル (kW)	寿命	サイクリング 耐久性	燃料	技術成熟度	サイズ	燃料中不純物への耐性	排出	安全性へのリスク	効率
アルカリ電解質形燃料電池 (AFC)	低	～500kW	中	高	高純度水素	高 船舶 1 隻を含む適用数例	小	高	なし	水素	50～60% (電気)
リン酸形燃料電池 (PAFC)	中	100～400kW	最長	中	LNG メタノール ディーゼル油 水素	高 適用数例	大	中	炭素燃料使用時に CO <sub>2</sub> と少量の NOx	高温 (～200°C) 改質ユニット中の水素と CO	40% (電気) 80% (熱回収使用時)
熔融炭酸塩形燃料電池 (MCFC)	高	～500kW	長	低	LNG メタノール ディーゼル油 水素	高 船舶数隻を含む適用多数	大	低	炭素燃料使用時に CO <sub>2</sub> と少量の NOx	高温 ( 600 ～ 700°C) 内部改質によるセル中の水素と CO	50% (電気) 85% (熱回収使用時)
固体酸化物形燃料電池 (SOFC)	高	20～60kW	中	低	LNG メタノール ディーゼル油 水素	中 船舶数隻を含む適用数例	中	低	炭素燃料使用時に CO <sub>2</sub> と少量の NOx	高温 ( 600 ～ 700°C) 内部改質によるセル中の水素と CO	60% (電気) 85% (熱回収使用時)
プロトン交換膜燃料電池 (PEMFC)	低	～120kW	中	高	水素	高 船舶数隻を含む適用多数	小	中	なし	水素	50～60% (電気)
高温 PEM 燃料電池 (HT-PEMFC)	中	～30kW	不明	高	LNG メタノール ディーゼル油 水素	低 船舶数隻を含む適用数例	小	低	炭素燃料使用時に CO <sub>2</sub> と少量の NOx	高温 (～200°C) 改質ユニット中の水素と CO	50～60% (電気)
直接メタノール燃料電池 (DMFC)	中	～5kW	中	高	メタノール	開発中	小	低	CO <sub>2</sub>	メタノール	20% (電気)

### 3.3 電気及びハイブリッド推進技術

#### 3.3.1 はじめに

従来の推進技術は、直接機械駆動推進 (direct mechanical) とディーゼル電気推進 (diesel electric) の二方式に大別される<sup>9</sup>。バッテリーは、新造船でもレトロフィットの場合でも、既にディーゼル電気推進を採用している船舶への搭載が好まれる。従来の機械駆動推進が最もエネルギー効率の高いソリューションである大型タンカー等に関しては、ハイブリッド化のメリットは少ない。それでも、機械駆動推進の船舶のハイブリッド化は可能で、多くの利点も考えられる。

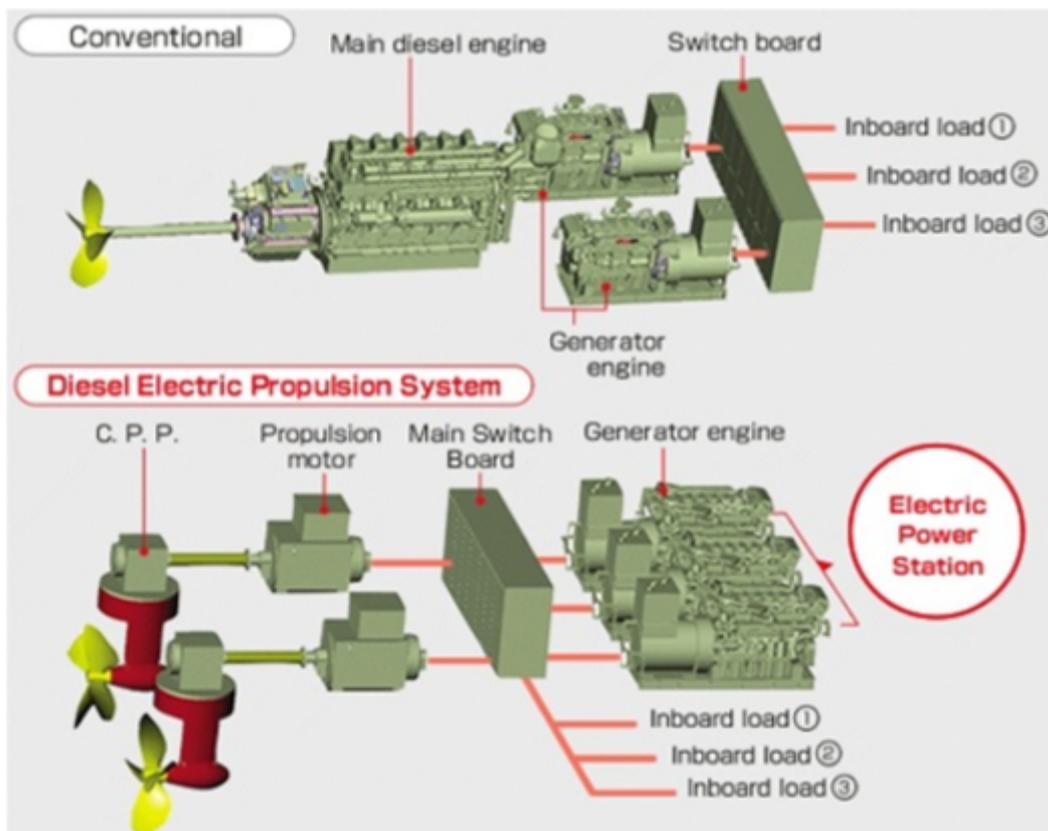


図 18 : 直接機械駆動推進とディーゼル電気推進

バッテリーの利点を活かすには、船用バッテリーシステムは電力システムに統合されなければならない。従来の船舶の電力システムは居住区と補助システム用であった。推進力は主機と呼ばれる内燃機関から得ていた。電力は、補機と呼ばれる内燃機関が駆動する発電機で構成される発電システムが電気を供給していた。

推進力として電力を用いる船舶は一般化している。オフショアサプライ船等出力需要が変化する船舶、又はクルーズ船等スペースの柔軟性が求められる船舶には、電気推進が広く採用されている。バッテリーシステムを電力システムに統合する方法にはいくつかある。

<sup>9</sup> 「ディーゼル」電気推進という用語は誤解を招きやすい。この場合の「ディーゼル」とは、電気を製造するあらゆる燃料と燃焼方式を指す。例えば、ディーゼル電気推進システム内の水素で駆動される燃料電池も「ディーゼル」と分類される一方、燃料を貯蔵するバッテリーは「ディーゼル」ではない。よって、「ハイブリッド」ではなく「バッテリー・ハイブリッド」と呼ぶべきである。

図 19 には、船用バッテリーの統合方法の説明に使用されるシンボルを示す。

加えて、統合方法には、完全電化、ハイブリッド、プラグイン・ハイブリッドが一般的である。ハイブリッドとプラグイン・ハイブリッドの違いは、陸上電力の使用が可能か否かである。

さらに、次の図は、バッテリー及び「エンジン」又は発電セットのみを含めている。この「エンジン」は、ディーゼルエンジン、燃料電池、LNG 二元燃料等が含まれる。

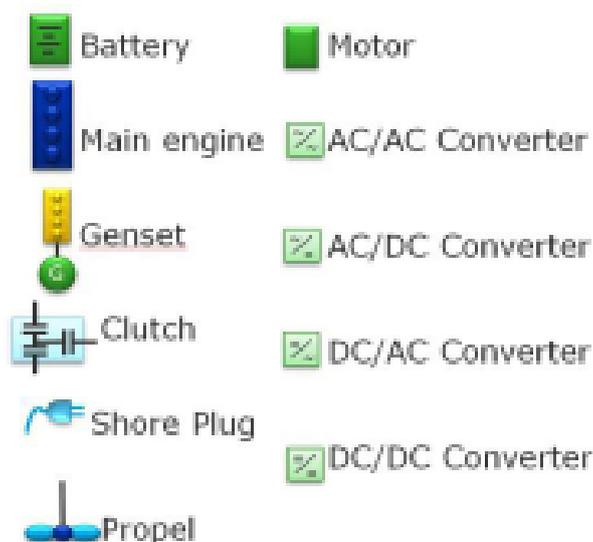


図 19 : 電気要素のシンボル

本報告書では、「発電セット」(Genset)とは「エンジン」と発電機のセットを意味する。コンバーターには、バッテリー管理システム又はバッテリーシステムに影響を与えるノイズを最低限に抑えるためにトランスフォーマーを加えることも可能である。

### 3.3.1.1 従来の機械駆動推進方式

図 20 は、従来の機械駆動の推進システムを持つ船舶の電気システムにバッテリーを統合した場合を示す。

この場合、バッテリーは居住区の電力需要の安定化と大きな負荷変動への対応に効果的である。負荷変動が軽減されるため、補機の数減らすことが出来る。DNV GL の船級規則では、バッテリーの容量が 50kWh 以上の場合、このようなシステム形態には「Battery (Safety)」というノーテーション(船級符号付記)の取得が必要となる。

負荷が電力を再生する場合(クレーン等)、バッテリーはこのエネルギーを貯蔵することが可能である。このような用途には、充電/放電の往復効率はバッテリーとコンバーターの効率による。また、この形態では、発電セットを運転せずに電力を供給するスタンバイシステムとしてバッテリー使用することも可能である。

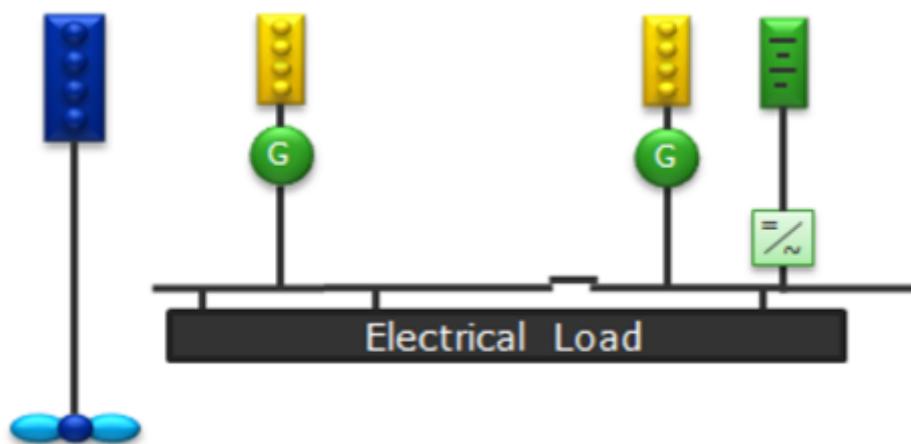


図 20 : バッテリー・ハイブリッド電気システムを搭載した機械駆動推進

### 3.3.1.2 ディーゼル電気推進方式

バッテリーは、図 21 に示すように、電気推進システムに統合することが出来る。この場合、バッテリーは大型推進電動機に電力を供給する。船舶は、バッテリーのみの推進、発電セットのみの推進、又はバッテリーと発電機の両方を用いた推進が可能である。通常運転時の推進力又は余剰電力としてバッテリーを使用する場合には、「Battery (Power)」ノーテーションの取得が必要となる。

このようなシステムでは、発電機の円滑な負荷変動が可能となる。また、ハイブリッド・バッテリーシステムの導入により、船内の騒音と振動が軽減される。さらに、バッテリーシステムが十分なエネルギーと電力を持つ場合、入港時のゼロ排出航行が可能となる。

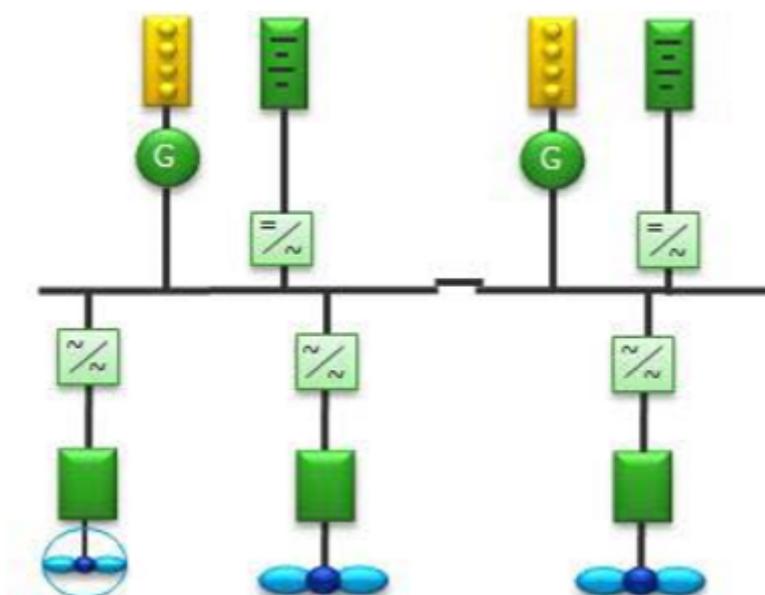


図 21 : ディーゼル・電気ハイブリッド推進

### 3.3.1.3 エネルギーの分散型貯蔵

電気推進の問題点は効率である。コンバーターが速度、トルク、推進モーターの電力を

制御するため、約 2%の損失がある。図 22 に示すように、バッテリーが推進コンバーターに分散された場合、この損失は低減される。

分散型バッテリーのもう一つの利点は、各推進ユニットが共通のエネルギー源から独立していることである。安定した推進スラスト力を必要とする船舶（冗長性のある自動船位保持（DP）機能を持つ船舶 DP2 及び DP3）には、最適なソリューションである。DP 機能へのバッテリー容量と出力要求に関する DNV GL 船級は、「ダイナミック・ポジショニング」ノーテーションに含まれている。一方、通常運転時の推進力又は余剰電力としてバッテリーを使用する場合には、「Battery (Power)」ノーテーションの取得が必要となる。また、船舶がバッテリーを接続せずに運転可能な場合には、「Battery (Safety)」ノーテーションが必要である。

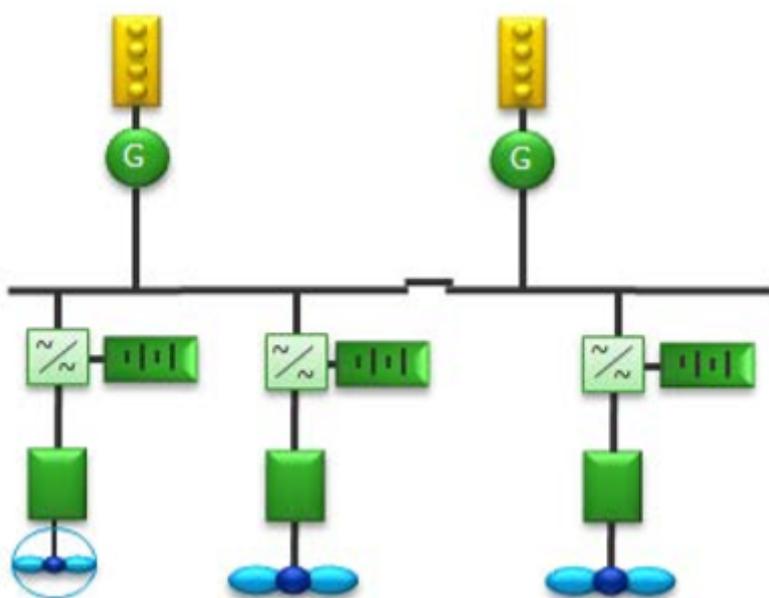


図 22 : 分散型バッテリーを持つハイブリッド・バッテリー推進

### 3.3.1.4 直流配電ハイブリッド

図 23 は、電気／機械駆動・ハイブリッドの電力システム、プラグイン・バッテリー・ハイブリッド、及び直流配電システムである。直流配電システムを使用し、主発電機を燃料の最適レベルの負荷に応じて調整することが出来る。これにより燃料消費量が減少し、従って、環境負荷も低減する。電気／機械駆動・ハイブリッド・ソリューションでは、主機から電力を製造、又は発電機セットとバッテリーから推進力を得ることが出来る。主機とバッテリーを並行して運転した場合、ブースト・モード（追加的推進力）も可能である。通常運転時の推進力又は余剰電力としてバッテリーを使用する場合には、「Battery (Power)」ノーテーションの取得が必要となる。また、船舶がバッテリーを接続せずに運転可能な場合には、「Battery (Safety)」ノーテーションが必要である。

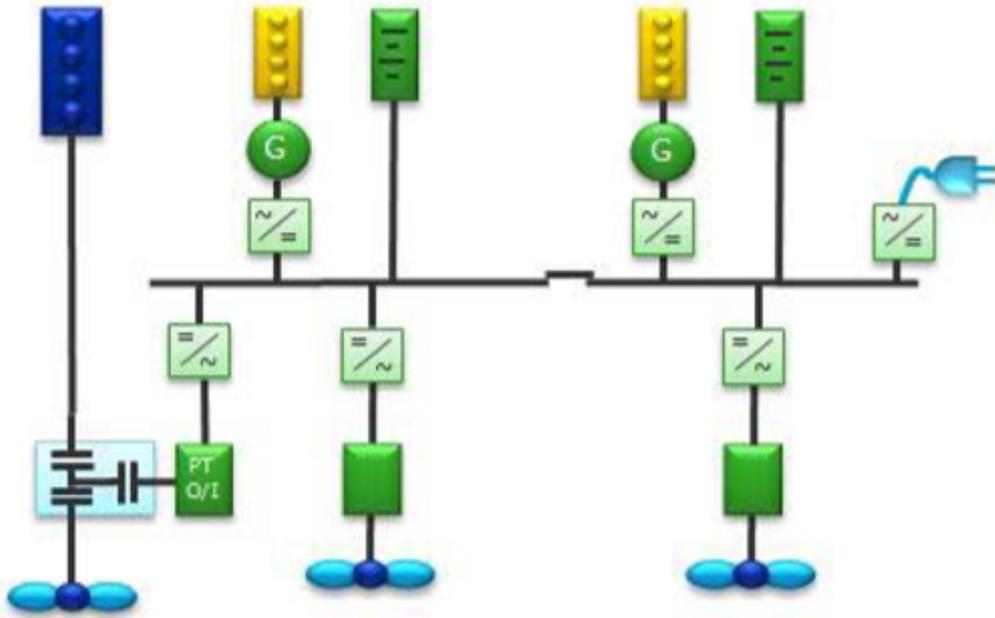


図 23：電気／機械駆動・ハイブリッドの電力システム、プラグイン・バッテリー・ハイブリッド、及び直流配電システム

### 3.3.1.5 完全電気推進方式

図 24 は、完全バッテリー推進船の電力供給システムである。このオプションでは、バッテリーは、船内又は陸上に設置された AC/DC コンバーターを通じて充電される。外部電力供給源からのオンデマンド充電が必要となる。完全バッテリー推進システムは、限られた航路の往復が多いフィヨルドフェリー等に適したシステムである。この場合、運航中に港での充電が可能なインフラが必要となる。船級規則では、1 基のシステムが故障した場合を考慮し、2 基の独立したバッテリーシステムの搭載を要求している。この形態には、「battery (power)」ノーテーションが適用される。

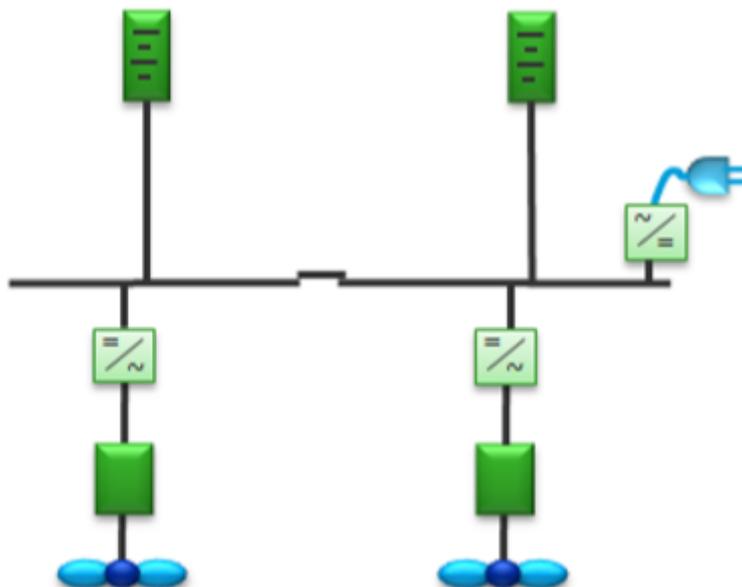


図 24：完全電気推進船（オール電化船）のバッテリー推進システム

## 4 市場の現状

本章では、バッテリー推進船及びバッテリー・ハイブリッド船の市場について述べる。

### 4.1 バッテリー推進船及びバッテリー・ハイブリッド船

船用バッテリーの市場の成長は加速している。以前にも少数の小規模な開発プロジェクトが行われたことがあるが、市場の成長は 2012 年に就航した世界初の完全電気推進カーフェリー「Ampere」の登場とともに本格化した<sup>10</sup>。同時に、DNV GL は船用バッテリーに関する船級規則の整備を開始し、当該規則はノルウェー海事局に採用された。過去数年間のバッテリー推進船の開発は、特に内航フェリー船隊の近代化を政策とするノルウェーが主導している。図 25 に示すとおり、ノルウェーは、船用バッテリー市場で大きなシェアを持つ。他の国々も追従しているが、国家インセンティブを持つノルウェーにおける普及は当然早い。フランスは、鉛蓄電池を使用した初期のバッテリー推進の小型旅客船数隻を有している。そのため、図 25 はリチウムイオン電池推進船の数ではない。

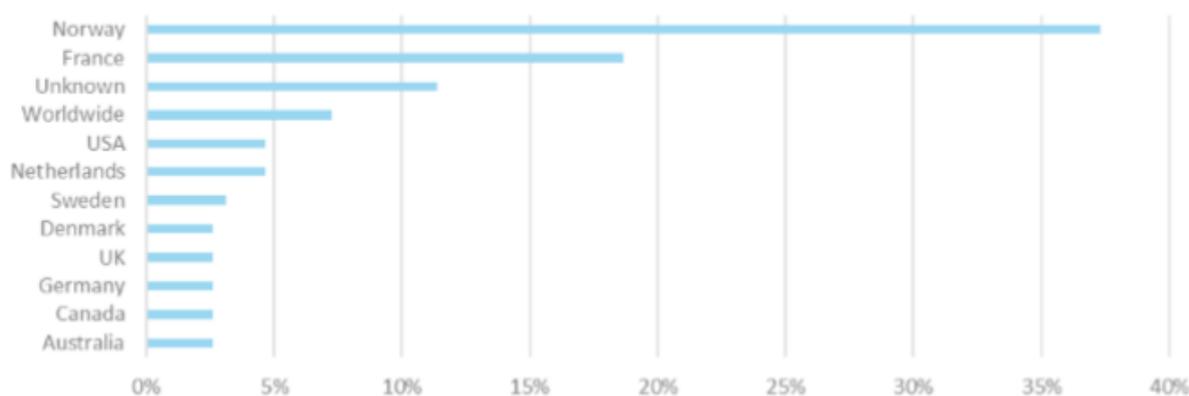


図 25 : バッテリー推進船及びバッテリー・ハイブリッド船の国別就航状況

2013 年～2017 年期には、バッテリー推進船市場（隻数）は年間 30%<sup>11</sup>成長した。搭載されたバッテリーのサイズ毎の数字の入手は難しいが、Maritime Battery Forum によると、最近のプロジェクトでは、既に就航中のバッテリー推進船と比較して大型のバッテリーが搭載される傾向があるため、プロジェクト数の増加と合わせてバッテリー容量の成長率は更に増加すると考えられる。<sup>12</sup>

<sup>10</sup> 本報告書は民間商船を対象としている。レジャーボート市場では、バッテリーを使用している多数の船がある。Visedo だけでも、既に 4,000 基以上のバッテリー技術を用いた船内電気エンジンの販売実績がある。(Desmond, 2017)

<sup>11</sup> 年間平均成長率

<sup>12</sup> Maritime Battery Forum, 2018. Maritime Battery Forum Ship Register. (Maritime Battery Forum, 2018) Maritime Battery Forum の登録船統計は、プロジェクト毎の情報ではなく合計数のみを発表しているが、2018 年中には集計方法を変更することが検討されている。

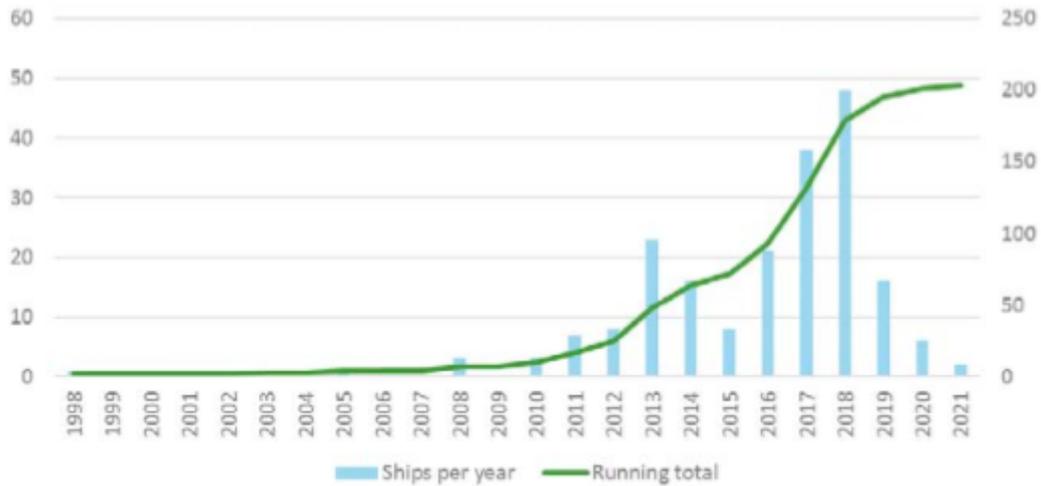


図 26 : バッテリーを使用する商船数

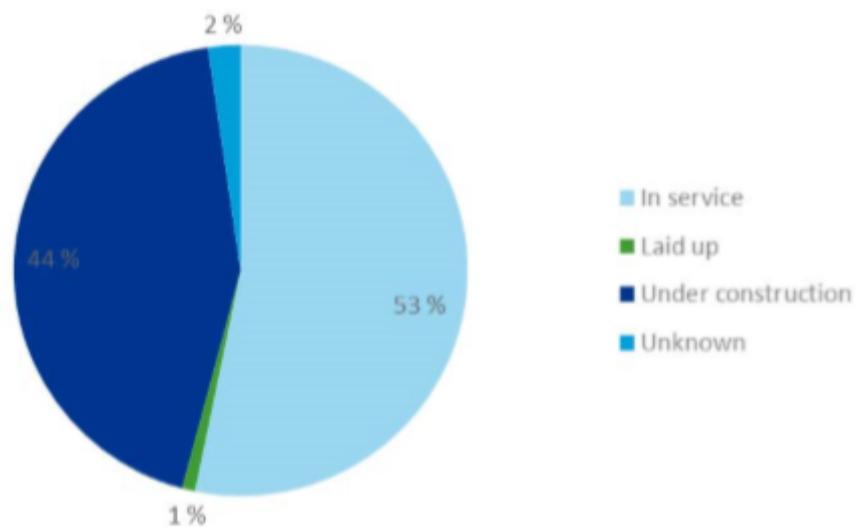


図 27 : バッテリーを使用する商船数の状況（就航中、係留中、建造中、不明）

バッテリーを使用する船舶の成長率は非常に大きく、現在の新造船の受注残の 40%以上がバッテリー推進船である。現在の新造船市場の状況を考えると、特に興味深い現象である。大部分の船種において新造船の受注が低迷している中、技術としてのエネルギー貯蔵は成長を続けている。

新造バッテリー推進船の建造とバッテリーの既存船へのレトロフィットの比率は、70%対 30%である。新造船では、バッテリーを船内電力網に統合することが容易であるという追加的利点がある。既存システムのアップグレードよりも、最初からシステム設計を行う方が容易であることは明白である。

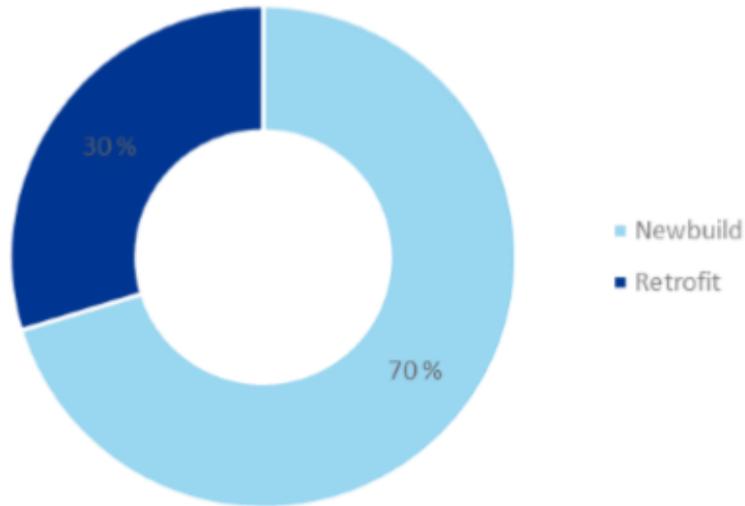


図 28 : バッテリー推進船の新造とレトロフィットの割合（隻数）

船舶に搭載されたバッテリーはいくつかの機能として使用される。推進が最も一般的で最初に考えられる機能ではあるが、バッテリーは他の船内システムを支援するために用いられることを忘れるべきではない。荷役作業、居住区電力等多数の例がある。下図の数字には、船舶が推進以外の機能としてバッテリーを使用している情報が含まれていない。その他（Other）のカテゴリーは、推進ではなく荷役作業のみにバッテリーを使用している船舶である。

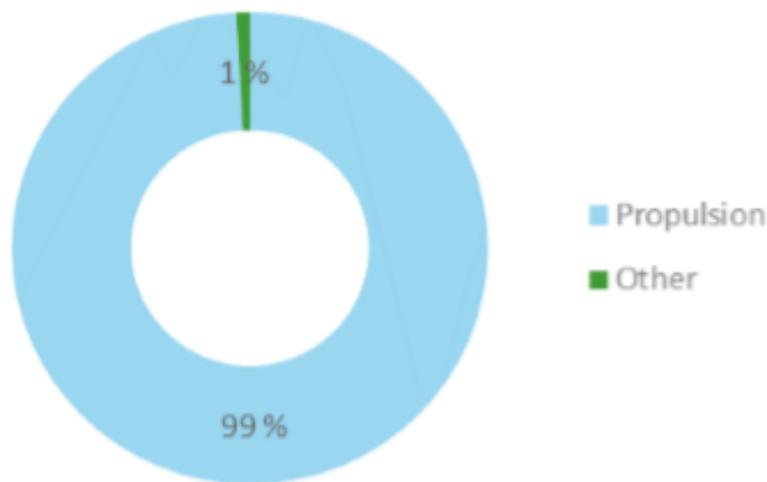


図 29 : バッテリーの主目的（船舶数の割合）

#### 4.1.1 バッテリー推進船の主な船種

船用バッテリーの利用に関しては、その利点が大いいくつかの船種がある。現在、利用が最も多い船種はフェリーと旅客船、次にオフショア船と様々な作業船である。

基本的に、バッテリーは、船舶又は船種が次のいずれかの条件を満たす場合に利点があり、大幅な効率改善が期待できる。

- 予想された運航（定期フェリー等）
- 冗長性の要求（オフショア船、プロダクトタンカー、高い安全性を必要とする船舶等）
- 負荷変動（この要求はエンジン数を増加させるが、バッテリー1基で負荷変動を処理することが出来る。）

定期フェリーは、予想された航路を運航するため、バッテリーのサイズの決定が比較的容易である。1回の航海は通常短時間であり、停泊時に充電が可能であるため、大型バッテリーは必要ない。

ディーゼル電気推進システムを持つあらゆる船種は、ハイブリッド方式採用の候補である。

オフショア船のエネルギー需要は予想が困難であるが、厳格な冗長性要求を持つ。従来、オフショア船はこの要求を満たすために、複数基のエンジンを低効率で運転し、予備動力としていた。現在ではバッテリーが予備動力を供給し、エンジンの効率的な利用を可能にしている。

上記と同様の条件が、作業船、洋上風力発電作業船、漁船、養殖作業船等にも当てはまる。

他の船種でも同様の転換が起こっており、将来的にはハイブリッドが有望であることが分かる。現在、多様な作業船での利用が伸びており、遠洋航行船での利用も増加している。例えば、クレーンを搭載したばら積み運搬船は、荷役作業にバッテリーを使用することが出来る。

本報告書では取り上げていないが、レジャー市場も成長している。しかしながら、レジャー市場の小型船舶は出力（MWh）としてのボリュームは少ないため、バッテリー市場は商船が大部分を占めている。

艦艇も幅広い用途でバッテリーを利用しており、全世界で技術要求に基づくバッテリーへの関心が高まっている。しかしながら、実際の受注規模や将来的な動向を見極めることは困難である。

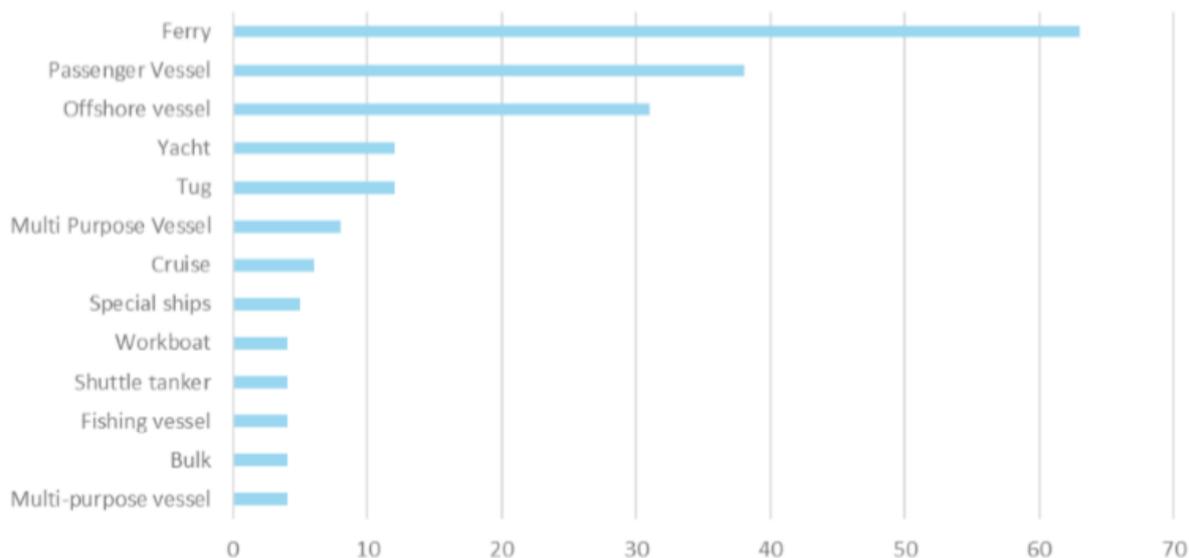


図 30：船種別バッテリー出力合計（上位 10 船種）

出所：Maritime Battery Forum, 2018

フェリーが大多数を占め、旅客船、オフショア船が続いている。

#### 4.1.1.1 完全電気推進 vs ハイブリッド

現在のバッテリー推進船の大部分は、燃料と内燃機関とバッテリーを組み合わせたハイブリッド船である。完全電気推進船は、少なくとも現時点では主流ではない。船用バッテリーのコストは高く、ディーゼルエンジンと同等のエネルギー密度を持っていない。エネルギー需要があるレベルを超えると、バッテリーの利用が不可能である。しかしながら、適切な用途の選択と設計の最適化により、バッテリーは十分な利点を提供する。

ハイブリッドの種類は非常に多く、ここでその詳細を述べることは出来ない。ハイブリッドは、緊急時又はピーク時に使用する比較的小型のバッテリーから、通常運転モードで使用されるフェリー又は ROPAX 船向けの数 MWh 級のシステムまであり、その技術要件によって決定される。主な技術要件は、フェリーのようにバッテリーが大規模な充電／放電サイクルを繰り返すか、又は短時間の急激な出力を発揮するハイブリッド運転かである。この条件の下で、出力需要とサイクル回数により、最適なバッテリーの種類が決定される。

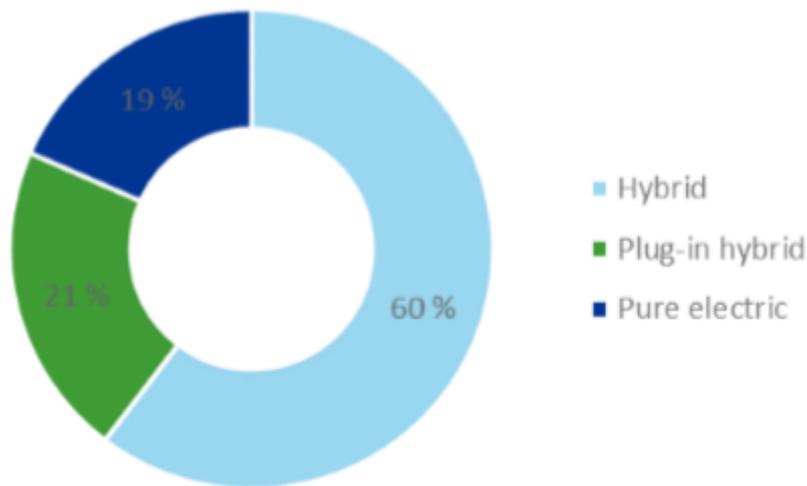


図 31 : バッテリー技術の種類別船舶数

#### 4.1.2 市場成長予測

将来的には、バッテリーは、船舶のエネルギーシステムの一部として標準装備されることが予想される。他の船種よりも成長が著しい船種は、フェリーや小型貨物船等の沿岸航行船である。今日の新造フェリーには、バッテリー搭載を検討することが一般的である。船主、規制当局、消費者からの排出削減とエネルギー効率向上への要望は、最初はゆっくりであるが、徐々に加速しながら沿岸船の進化を促していくであろう。

フェリーに続き、作業船及びオフショア船市場でも変化が起こっている。これらの船種は、負荷変動の大きさと冗長性への要求が特徴である。

遠洋航行船に関しては、エネルギー需要の大きさからバッテリーも大型化するため、バッテリーのエネルギー貯蔵方法が問題となる。ディーゼルエンジンが直接プロペラを駆動する推進方式は、最も効率が高く、バッテリーの補助は必要がない。一方、これらの船種でも航行以外のオペレーションが多くあり、この分野ではバッテリーの利用が進むと考えられる。バッテリーへの関心は高まっているが、未だにバッテリーは推進用のみという間違った認識も多い。遠洋航行船の全電力需要を賄うには、巨大なバッテリーが必要となる。このようなバッテリーは、大きさと重量の面では貨物積載量への障害とならない限り可能ではあるが、そのコストが問題となる。完全電気推進船の大陸間航海は将来的には可能となるかもしれないが、現時点で利点のあるバッテリー利用法は以下のとおりである。新造船市場の回復に伴い、特定の機能へのバッテリー需要は高まると予想される。

#### ① 船舶の動力システムのハイブリッド化（ディーゼル油、LNG、LPG、その他の燃料）

- 排出ゼロの港湾内航行及び作業
- 応答性の向上とそれに伴う機能性、定時性、安全性の向上
- 停電の防止と緊急時電力供給の効率化
- 燃料及びメンテナンスコストの低減（既に最適化されたソリューションの利用時）
- クレーン、ポンプ、その他の排熱からの熱回収
- 再生可能エネルギーの利用
- クラッシュストップ・ソリューションの改善
- 冷却機能の最適化
- ガスと煤煙の排出低減によるイメージの向上
- 騒音と振動の低減による快適性の向上
- バッテリーのハイブリッド化は、ガスベースのあらゆる動力システムの効率を大幅に改善する環境性とコスト効率の高いソリューションである。

#### ② 電気又はハイブリッド型はしけ、救命艇

- 不快な排ガスと騒音がない
- 燃料及びメンテナンスコストの低減
- ブランド力の向上

#### 4.1.3 市場成長予測：まとめ

ノルウェーの電気推進フェリーの建造ブームは、他の沿岸航行船の船種でも続くと予想される。長期的には、ハイブリッド化によりバッテリーは全船舶の主要な構成要素となり、それに伴い市場は成長すると予想される。排出規制海域（ECA）の設定は、港湾エリアの低排出、ゼロ排出化を促し、バッテリーの導入を加速する。

近い将来に最も成長が期待される船種は、フェリー及び旅客船（大型 ROPAX 船を含む）、オフショア船、作業船、養殖場作業船、その他の沿岸航行船である。多くの港湾は、低排出又はゼロ排出ソリューションを求めており、その数は増加する。港湾クレーンの電氣化、ハイブリッド化も促進される。沿岸航行船以外では、プロダクトタンカー、一般ばら積み運搬船、シャトルタンカー等の船種市場におけるバッテリー導入への関心が高まっている。このトレンドは徐々に広がり、遠洋航行船へのバッテリー技術導入も進むと予想される。

#### 4.1.4 完全電気推進船：まとめ

現在、数隻の完全電気推進船（all electric ship）が就航している（表 2 参照）。大部分のオール電化船は、フランスの様々な都市で運航されている旧式の運河船であることに留意する必要がある。オランダでも同様の状況が見られる<sup>13</sup>。これらの小型船は登録されていないため、情報を見つけることは非常に難しい。

フランスの電気推進船には、旧式の技術（鉛蓄電池）が採用されているため、リチウムイオン電池を搭載する近代的な電気船との比較は意味がない。

大部分の旧式電気推進船は、比較的小型で内陸水路を航行している。新しい電気推進船は、比較的大型で内陸水路以外も航行する。表 2 で年毎のバッテリー設置を見ると、バッテリーは 2013 年を境に大型化していることが分かる。これは、大型リチウムイオン電池の開発によるものである。

---

<sup>13</sup> アムステルダム市は、ゼロ排出を促進しており、運河航行船はゼロ排出技術の導入が義務化されている。

表 2：完全電気推進船一覽

Vessel name	Vessel type category	Owner	Battery technology installed year	Class	Country of operation	System Integrator	Battery provider	Retrofit/newbuild	Battery storage capacity [MWh]
Le passeur	Passenger Vessel	TEMAR	1998	Not classed	France	Alternatives Energies	Unknown	Newbuild	0.02
Le passeur 2	Passenger Vessel	TEMAR	2003	Not classed	France	Alternatives Energies	Unknown	Newbuild	0.02
Bus de Mer I	Passenger Vessel	TEMAR	2008	Not classed	France	Alternatives Energies	Unknown	Newbuild	0.13
Bus de Mer II	Passenger Vessel	TEMAR	2008	Not classed	France	Alternatives Energies	Unknown	Newbuild	0.13
Ferryboat Marseille	Passenger Vessel	Ville de Marseille	2010	Not classed	France	Alternatives Energies	Unknown	Newbuild	0.11
Hyperdrobus Flagnac	Passenger Vessel	Communauté de Communes de la Vallée du Lot	2011	Not classed	France	Unknown	Unknown	Newbuild	
ODC Marine Nyami 54	Passenger Vessel	Sealease	2011	Not classed	France	Unknown	Unknown	Newbuild	
Hyperdrobus 2 ponts Lyon	Passenger Vessel	Lyon City Boat	2012	Not classed	France	Unknown	Unknown	Retrofit	
Le Nouch	Passenger Vessel	SEM Les Sables Développement	2012	Not classed	France	Alternatives Energies	Unknown	Newbuild	0.06
Hisarøy	Ferry	Wergeland AS	2013	Unknown	Norway	HAFS Elektro & Rør AS	Electrovaya	Newbuild	0.10
Charles-Hennessy	Passenger Vessel	Cognac Hennes	2013	Not classed	France	Alternatives Energies	Unknown	Retrofit	0.03
Navette du Millénaire III	Passenger Vessel	ICADE	2013	Not classed	France	Alternatives Energies	Unknown	Newbuild	0.16
Navette du Millénaire IV - Flandre	Passenger Vessel	ICADE	2013	Not classed	France	Alternatives Energies	Saft	Newbuild	0.14
Le Nouch 2	Passenger Vessel	SEM Les Sables Développement	2013	Not classed	France	Alternatives Energies	Unknown	Newbuild	0.06
Hyperdrobus Canal de Jonage	Passenger Vessel	Syndicat Mixte Intercommunal du Canal de Jona	2013	Not classed	France	Unknown	Unknown	Newbuild	
Movitz	Ferry	Green City Ferries	2014	Unknown	Sweden	Echandia Marine	Unknown	Retrofit	0.18
Ampere	Ferry	Norled	2014	DNV GL	Norway	Siemens	Corvus	Newbuild	1.86
Sjövägen	Passenger Vessel	Ballerina	2014	Not classed	Sweden	Callenberg	Saft	Newbuild	0.50
“Jan van Riebeeck”	Passenger Vessel	Canal Company	2014	Unknown	Netherlands	Unknown	EST-Floatch	Retrofit	0.07
Navette du Millénaire I	Passenger Vessel	ICADE	2014	Not classed	France	Alternatives Energies	Valence Technology	Newbuild	0.13
Navette du Millénaire II	Passenger Vessel	ICADE	2014	Not classed	France	Alternatives Energies	Valence Technology	Newbuild	0.13
Helionaute	Passenger Vessel	Helionaute	2015	Not classed	France	Unknown	Unknown	Newbuild	0.20
BB Green	Ferry	Green City Ferries	2016	Not classed	Sweden	Unknown	Leclanché	Newbuild	0.20
Chantier Naval Franco Suisse Bateau L'Etoile ADITYA	Passenger Vessel	Bateau L'Etoile	2016	Not classed	France	Unknown	Unknown	Newbuild	
TBN	Bulk	Kerala State Water Transport Department	2016	Indian Register of Shipping	India	Alternatives Energies	Unknown	Newbuild	0.05
TBN	Bulk	Unknown	2017	Unknown	China	Unknown	Unknown	Newbuild	2.40
Eidsfjord	Ferry	Fjord 1	2017	DNV GL	Norway	Siemens	PBES	Newbuild	1.04
Gloppelfjord	Ferry	Fjord 1	2017	DNV GL	Norway	Siemens	PBES	Newbuild	1.04
AURORA AF HELSINGBORG	Ferry	Scandlines	2017	Lloyd's Register	Sweden	ABB	PBES	Retrofit	4.16
Tycho Brahe	Ferry	Scandlines	2017	Lloyd's Register	Sweden	ABB	PBES	Retrofit	4.16
Ellen	Ferry	Ærøfærgene v/Ærø Kommune	2017	DNV GL	Denmark	Siemens	Unknown	Newbuild	3.80
GMV Zero (Astrid Helene)	Workboat	GMV	2017	Unknown	Unknown	Unknown	Corvus	Newbuild	0.34
FJELLSTRAND 1698	Ferry	Fjord 1	2018	DNV GL	Norway	Norwegian Electric Systems	Corvus	Newbuild	2.94
TBN	Ferry	Fjord 1	2018	DNV GL	Norway	Norwegian Electric Systems	Corvus	Newbuild	1.59
TBN	Ferry	Fjord 1	2018	DNV GL	Norway	Norwegian Electric Systems	Corvus	Newbuild	1.14
TBN	Ferry	Fjord 1	2018	DNV GL	Norway	Norwegian Electric Systems	Corvus	Newbuild	1.14
Future of the Fjords	Passenger Vessel	The Fjords	2018	DNV GL	Norway	Westcon	ZEM	Newbuild	0.79
Boreal TBN	Ferry	Boreal	2019	Unknown	Norway	Westcon	Unknown	Newbuild	
Vard TBN	Ferry	Boreal	2019	Unknown	Norway	Unknown	Grenland	Newbuild	
Yara Birkeland	Container vessel	Yara	2020	DNV GL	Norway	Kongsberg	Unknown	Newbuild	

## 4.2 燃料電池推進船

現時点では、燃料電池推進船のプロジェクトの数は限られている。燃料電池の船用導入は、未だごく初期の段階にあるが、技術開発の進歩につれて導入は増加していくと予想される。

DNV GL が 2017 年に EMSA（欧州海事安全庁）向けに行った調査では、船用市場における燃料電池プロジェクト件数は 23 件であった。大部分のプロジェクトは研究開発段階で、燃料電池利用の可能性の評価、規制の制定、フィジビリティ研究、コンセプト設計、様々な試験等が行われている。表 3 にこれらのプロジェクトの概要を示す。

表 3 を作成後、数件の新プロジェクトが開始されている。本報告書ではそのいくつかに言及する。最も実現が近く開発の進んだプロジェクトの一つは、ノルウェー公道管理局が支援するノルウェー西岸の水素フェリーの開発プロジェクトである。同フェリーは民間企業が入札を行う開発契約である。開発される水素フェリーは、2021 年に就航の予定である。

HYBRIDShips プロジェクトは、造船所 Fiskerstrand が主導しており<sup>14</sup>、プロジェクトの目的は、既存フェリーを、バッテリーを搭載した水素燃料駆動のフェリーに改造し、2020 年中に就航させることである。

上記に加え、燃料電池プロジェクトは以下のとおり。

- Zero-V（米国）
- Hornblower hydrogen（米国）
- Viking Cruises は、液体水素燃料駆動の世界初のフルスケールのクルーズ船の開発プロジェクトを実施している。<sup>15</sup>
- ノルウェー西岸ソグネフィヨルドの Flora と Måløy 間を運航する水素燃料駆動の高速旅客船の開発プロジェクト<sup>16</sup>。「Green Coastal Programme」が支援するプロジェクトの一つで、開発される高速船は 2021 年に就航予定である。
- ノルウェー北部トロンハイムとクリスチャンスン間に水素駆動高速旅客船を導入するプロジェクトが開始された<sup>18</sup>。ノルウェーの Sør Trøndelag 自治体は、2022 年までに同航路にゼロ排出船を就航させる計画である。
- MARANDA（フィンランド）
- HySeas（フランス）

<sup>14</sup><https://www.sdir.no/en/news/news-from-the-nma/breaking-new-ground-in-hydrogen-ferry-project/>

<sup>15</sup><https://www.sdir.no/en/news/news-from-the-nma/norway-may-get-the-worlds-first-hydrogen-powered-cruise-ship/>

<sup>16</sup> <https://www.dnvgl.no/maritime/gront-kystfartsprogram/pilotprosjekter.html>

<sup>17</sup><https://prosjekt.fylkesmannen.no/Documents/Klimaomstilling/Dokument/2017%20torsdag/5%20-%20STR%C3%98M%20GREN.pdf>

<sup>18</sup><https://www.sintef.no/contentassets/7a7bf0e26fd44cbfb973dd47736b056a/20180102-forsyning---kainanlegg---sikkerhet---hydrogenhurtigbat-trondelag-v1.1.pdf>

表 3 : 船用燃料電池プロジェクト一覧

Project	Concept	Main partners	Year	Fuel Cell	Capacity	Fuel
FellowSHIP	320kW MCFC system for auxiliary power of Offshore Supply Vessel	Eidesvik Offshore, Wärtsilä, DNV	2003-2011	MCFC	320 kW	LNG
Viking Lady METHAPU Undine	20 kW SOFC tested for the evaluation of 250 kW SOFC solution for marine APU.	Wallenius Maritime, Wärtsilä, DNV	2006-2010	SOFC	20 kW	Methanol
E4Ships - Pa-X-ell MS MARI- ELLA	60 kW modularized HT-PEM fuel cell system developed and tested for the decentralized auxiliary power supply onboard passenger vessel MS MARIELLA.	Meyer Werft, DNVGL, Lürssen Werft, etc	Phase 1: 2009-2017 Phase 2: 2017-2022	HTPEM	60 kW (each stack is 30 kW)	Methanol
E4Ships - SchIBZ MS Forester	100 kW containerized SOFC system developed and tested for the auxiliary power supply of commercial ships. Scalable up to 500 kW units.	Thyssen Krupp Marine Systems, DNVGL, Leibniz University Hannover, OWI, Reederei Rörd Braren, Sunfire	Phase 1: 2009-2017 Phase 2: 2017-2022	SOFC	100 kW	Diesel
E4Ships - Toplanterne	Support of IGF Code development to include a FC chapter and set the regulatory baseline for the use of maritime FC systems	DNV GL, Meyer Werft, Thyssen Krupp Marine Systems, Lürssen Werft, Flensburger Schiffbaugesellschaft, VSM	Phase 1: 2009-2017 Phase 2: 2017-2022	-	-	-
RiverCell	250 kW modularized HT-PEM fuel cell system developed and to be tested as a part of a hybrid power supply for river cruise vessels	Meyer Werft, DNVGL, Neptun Werft, Viking Cruises	Phase 1: 2015-2017 Phase 2: 2017-2022	HTPEM	250 kW	Methanol
RiverCell - Elektra	Feasibility study for a fuel cell as part of a hybrid power supply for a towboat	TU Berlin, BEHALA, DNVGL, etc	2015-2016	HTPEM	-	Hydrogen
ZemShip - Alsterwasser	100 kW PEMFC system developed and tested onboard of a small passenger ship in the area of Alster in Hamburg, Germany	Proton Motors, GL, Alster Touristik GmbH, Linde Group etc.	2006-2013	PEM	96 kW	Hydrogen
FCSHIP	Assess the potential for maritime use of FC and develops a Roadmap for future R&D on FC application on ships	DNV, GL, LR, RINA, EU GROWTH program	2002-2004	MCFC SOFC PEM	-	Various
New-H-Ship	Research project on the use of hydrogen in marine applications	INE (Icelandic New Energy), GL, DNV, etc	2004-2006	-	-	-
Nemo H2	Small passenger ship in the canals of Amsterdam	Rederij Lovers etc	2012- present	PEM	60 kW	Hydrogen
Hornblower Hybrid	Hybrid ferry with diesel generator, batteries, PV, wind and fuel cell	Hornblower	2012- present	PEM	32 kW	Hydrogen
Hydrogenesis	Small passenger ship which operates in Bristol	Bristol Boat Trips etc.	2012 - present	PEM	12 kW	Hydrogen
MF Vågen	Small passenger ship in the harbour of Bergen	CMR Prototech, ARENA-Project	2010	HTPEM	12 kW	Hydrogen
Class 212A/214 Submarines	Hybrid propulsion using a fuel cell and a diesel engine	CMR Prototech, ARENA-Project, ThyssenKrupp Marine Systems, Siemens	2003 - present	PEM	306 kW, 30-50 kW per module (212A) 120 kW per module (214)	Hydrogen
US SSFC	The program addresses technology gaps to enable fuel cell power systems that will meet the electrical power needs of naval platforms and systems	U.S. Department of Defense, Office of Naval Research	2000 - 2011	PEM MCFC	500 kW (PEM) 625 kW (MCFC)	Diesel
SF-BREEZE	Feasibility study of a high-speed hydrogen fuel cell passenger ferry and hydrogen refueling station in San Francisco bay area	Sandia National Lab., Red and White Fleet	2015 - present	PEM	120 kW per module. Total power 2.5MW	Hydrogen
MC-WAP	MC-WAP is aiming at the application of the molten carbonate fuel cell technology onboard large vessels, such as RoPax, RoRo and cruise ships for auxiliary power generation purposes	FINCATIERI, Cetana, OWI, TÜBITAK, RINA, NTUA, Techip KTI, etc	2005-2010	MCFC	Concept design of 500 kW, final design of 150 kW	Diesel
FELICITAS - subproject 1	Application requirements and system design for FC in heavy duty transport systems	Lürssen, FhG IVI, AVL, HAW, Rolls-Royce, INRETS, VUZ	2005-2008	-	-	-
FELICITAS - subproject 2	Mobile hybrid marine version of the Rolls-Royce Fuel Cell SOFC system	Rolls-Royce, Uni Genoa, Lürssen, HAW, Uni Eindhoven	2005-2008	SOFC	250 kW (60 kW sub system)	LNG, other fuel also evaluated
FELICITAS - subproject 3	PEFC-Cluster - improving PEFC reliability and power level by clustering	NuCellSys, FhG IVI, CCM	2005-2008	PEM	Cluster system (80 kW basis component)	Hydrocarbon fuels and hydrogen
FELICITAS - subproject 4	Power management - concerns general technical problems of FC-based propulsion	FhG IVI, Lürssen, NTUA, NuCellSys, CCM, Uni Belfort, AVL, CDL	2005-2008	PEM	-	-
Cobalt 233 Zet	Sports boat employing hybrid propulsion system using batteries for peak power	Zebotec, Brunnert-Grimm	2007-present	PEM	50 kW	Hydrogen

## 4.3 研究開発プロジェクトの概要

### 4.3.1 E-FERRY

E-FERRY は、CO<sub>2</sub>を排出せず、環境を汚染しない完全電気推進「グリーン」フェリーの設計、建造、実証に関する EU の「Horizon 2020」プログラム内の助成プロジェクトである。その目的は、欧州及び世界の島部、沿岸海域、内陸水路において、温室効果ガスの排出がなく、大気を汚染しないエネルギー効率の高い水上交通を実現することである。

プロジェクトでは、非常にエネルギー効率の高い設計概念を用い、排出ゼロの 100%電気推進の旅客、車両、トラック、貨物用の中型フェリーを開発し、フルスケールの実証を行う。同フェリーの航行距離は、完全電気推進船としては長い 5 海里以上で、デンマークバルト海域のエーロ島とデンマーク本土を結ぶ Soeby-Fynshav 航路（10.7 海里）、及び Soeby-Faaborg 航路（9.6 海里）という 2 つの中距離航路に就航する。

E-FERRY プロジェクトの開始時には、これまでの燃料電池推進船プロジェクトを超えた中距離航路に就航する、船用市場最大のバッテリーパックを搭載したフェリーとなるとされていた。確かに Leclanché 設計の出力 4.3MWh のバッテリーパックは比較的大きいが、その後更に大型のバッテリーパックを使用する新プロジェクトも開始されている。

### 4.3.2 BB Green : グリーンな高速フェリー

BB Green プロジェクトは、特殊なプロジェクトである。開発される船舶は、空気支持船体を持つバッテリー推進高速通勤フェリーである。現時点においては同船の市場化は実現していないが、2017 年のノルウェー Nor-shipping 展示会では、技術のみならず経済的な面でも優れた性能を持つと発表された。

BB Green の概念は、新設計の船体を基本としている。空気支持自体は新しい技術ではないが（ホーバークラフトは何十年も使用している）、特許技術である「Air Supported Vessel」(ASV) 技術は、水との接触を少なくすることにより、船体の流体抵抗を約 40% 低減させる。電気浮揚ファンシステムと特殊船体設計により、船体重量の約 80% は空気のクッションにより支持される。船体は、サンドイッチ構造のカーボン素材である。ディーゼル電動機の代わりに、電気駆動系を持つ。電力源は、Leclanché 社設計の最大出力 200kWh のチタン酸リチウムイオン (LTO) バッテリーバンクである。新設計のバッテリーモジュールは、軽量であるが大きな容量を持つ。高効率の二重反転プロペラが高い性能、操縦性、安全性を実現する。バッテリー充電用の電力には、風力、水力、波力等の再生可能エネルギーを使用する計画である。BB Green 船の航続距離は、最高速度で 14 海里、低速では更に長い。30 分という短い充電時間は、同船型を多くの航路において競争力のあるものとする。

BB Green プロジェクトの参加企業・組織は、Leclanché、Echandia Marine、SSPA、Lloyds、DIAB、SES Europe、Aqualiner、BJB / Latitude Yachts である。

#### 4.3.3 Yara Birkeland

Yara Birkeland はノルウェーの研究開発プロジェクトである。開発される船舶「Yara Birkeland」は、世界初のゼロ排出完全電気推進の自律航行型コンテナ船となる。Kongsberg が、遠隔操作と自律航行に必要なセンサーとその統合、電動機、バッテリー、推進制御システムを含む主要技術を提供する。

同船は、オープントップ型の 120TEU 型コンテナ船で、無人の自律航行が可能なバッテリー推進船である。同船の運航により、年間 40,000 回分のディーゼルエンジン駆動のトラック輸送が減少し、その分の NO<sub>x</sub> 及び SO<sub>x</sub> 排出量が低減される。同プロジェクトは、国連の持続性目標の達成を支援し、道路交通の安全性を高め、道路の渋滞を軽減する。

「Yara Birkeland」は、ノルウェー南部の 3 港湾間で運航し、沿岸 12 海里以内を航行する。

安全性確保のため、異なる機能を持つ 3 か所の遠隔操作センターが設置され、緊急時と例外時の操作、状態監視、運転監視、意思決定支援、自律航行船と周囲の状況の監視、その他の安全性に関する全ての機能を処理する。

同船は、2020 年までに完全無人化運航を行う予定である。

#### 4.3.4 ReVolt : ゼロ排出無人航行船プロジェクト

2014 年、DNV GL は、ゼロ排出で無人運航される近距離航行船の社内開発プロジェクト「ReVolt」を完了した。同プロジェクトは、DNV GL の戦略的研究・イノベーションプログラムの一環として、ノルウェー政府機関 Transnova からの補助金を受けて実施された。

プロジェクトのコンセプトは、ロジスティックチェーンの一部となる積載量 100TEU の沿岸コンテナ船である。同船は、3,000kW のバッテリーパックをベースとした動力システムが、ツインポッド型プロペラを駆動する。陸上からの遠隔操作が可能で、将来的には完全に無人の自律航行を行う。バッテリーの充電は寄港毎に迅速に行われる。

#### 4.3.5 Teekay : ハイブリッド・シャトルタンカー・プロジェクト

ノルウェーの石油メジャーStatoil は、最近、Teekay 社の新造オフショアシャトルタンカー船隊の用船契約を締結した。Teekay はサムスン重工に 2 隻を新造発注した後、追加 2 隻のオプション発注を行った。同船隊は、LNG 推進技術を含む実績のある技術を統合し、

燃料効率を向上させ、排出を低減する「Shuttle Spirit」設計をベースとしている。就航時には、これまで建造されたシャトルタンカーの中で最も環境性に優しい船隊となる。

搭載される最新技術の一つは、電力供給のベースとなる Wärtsilä の「Hybrid」システムである。同システムは、バッテリーが省エネ、ピーク負荷軽減を実現、また、全体的なシステムの冗長性を高める。これにより主機の稼働時間が減少し、メンテナンスの時間とコストが低減する。同船隊のバッテリーシステムに関しては、非常に限られた情報しか発表されていない。

各タンカーには、バッテリーパック 2 基と揮発性有機化合物 (VOC) ガスを燃料として利用するシステムが搭載される。大型タンカーにおける初のバッテリー採用となり、また Teekay と Wärtsilä が共同開発した石油貨物から排出される VOC ガスを推進燃料とする新たなシステムの重要な事例となる。

エネルギー貯蔵 (バッテリー) と VOC の利用により、タンカー 2 隻のプロジェクトは、環境に優しいエネルギーの利用と製造を促進するノルウェー政府機関 Enova から、約 1 億 3,300 万ノルウェークローネ (1,600 万ドル) の補助金を獲得した。

新コンセプトは、新たなレベルの経済性及び環境パフォーマンスを提供し、年間 CO<sub>2</sub> 排出量は従来型のシャトルタンカーよりも 40%以上削減される。さらに、主燃料として LNG を利用する以外に、DF エンジンは LNG と回収された VOC (石油貨物タンクから蒸発するガス) の混合燃料で駆動することも可能である。

回収した VOC を大気中に放出する代わりに燃料として再利用することにより、有害な排出ガスが除去されると同時に船舶の燃料消費量が大幅に減少する。また、このコンセプトにより、エンジンから排出される NO<sub>x</sub> は 80%以上低減、SO<sub>x</sub> 排出はほぼゼロ、PM 排出量も 95%以上低減する。

#### 4.3.6 HYBRIDShips : 水素燃料フェリー

HYBRIDShips (hydrogen and battery technology for innovative powertrains in ships : 船舶の革新的パワートレインのための水素及びバッテリー技術) プロジェクトは、バッテリーと水素技術をベースとした航続距離の長いゼロ排出の大型船の開発を目的としている。Fiskerstrand Holding AS が主導する同プロジェクトは、2016 年 12 月に、ノルウェーの Research Council of Norway、Innovation Norway、Enova のプロジェクト支援ツール PILOT-E からの補助金を獲得した。

プロジェクトの目的は、ゼロ排出ソリューションの利用を拡大することである。船舶がバッテリーのみを使用する場合、バッテリーのサイズは実用には大きくなり過ぎる。プロジェクトのアイデアは、環境に優しい持続性のある方法で製造された水素を利用して航続

距離を延長することである。

同プロジェクトには、次の幅広い企業・組織が参加している：Fiskerstrand Holding、Fiskerstrand Verft（造船所）、Multi Maritime（設計）、SINTEF、NEL（バンカリング技術）、Hexagon（水素輸送・貯蔵）、DNV GL、ノルウェー海事局、ノルウェー市民保護総局、ムーレ・オ・ロムスダール自治体。

同プロジェクトは、基本的に完全電気推進フェリー「Ampere」の開発プロジェクトと同じプロジェクトである。「Ampere」プロジェクトは、初期的な課題と問題点のいくつかを解決し、バッテリー技術の普及に貢献した。

現時点では、未だ検討段階である HYBRIDShips プロジェクトの詳細は発表されていない。

#### 4.3.7 SHORT SEA PIONEER：船舶とロジスティックス

Short Sea Pioneer (SSP) は、ノルウェー西岸の海事クラスター「Maritime Cleantech」が開発した船舶とロジスティックスのコンセプトで、2015年2月に発表された。

同プロジェクトのコンセプトは、母船及び港湾と母船の間を往復して母船に貨物の受け渡しを行う小型フィーダー船（娘船）の2要素から構成される。開発中の同コンセプトは自律型荷役システムを含み、その目的は、貨物輸送を混雑した道路から海上輸送にシフトすることである。

プロジェクトの船舶は、目的に適した高効率の推進システムを持つ。また、効率的な排出低減技術を利用し、陸地の近く及び港湾内のゼロ排出を目指す。

Norwegian Container Lines 社は、このような2隻コンセプトにより、同社売上の15%に相当する6,000万ノルウェークローネを削減できるとしている。

#### 4.3.8 PLAN B ENERGY STORAGE (PBES)：CellSwap バッテリー技術

バッテリーシステムのコスト削減と安全性向上その他の改善には、多くの方法がある。

PBES 社は数多い船用バッテリーメーカーの一つで、同社の特許技術「CellSwap」は興味深いコンセプトである。「CellSwap」は、船舶に搭載されたバッテリーの内部を再構築するレトロフィットプロセスである。コンセプト自体は目新しいものではない。船用バッテリーシステムの大部分はモジュール型で、モジュールの交換は比較的容易である。CellSwap のユニークさは、その名のとおり、セルのみを交換することである。バッテリーの寿命が近づいた時に、コアとなるリチウムイオンセルのみを交換し、配線、電子部品、

冷却システム、ラック、構造部品等の他の要素は再利用する。交換が必要な部品をシステムから切り離すことが出来る場合には、システム運転中の交換も可能である。運転を中断する場合には、CellSwap がモジュールの交換よりも効率的であるか否かは疑問である。

更に興味深いのは、CellSwap によりシステムのサイズを小型化させることが可能であるという PBES の主張である。これにはどういう利点があるのか。バッテリーシステムのコスト、サイズ、重量には全て意味がある。大部分のバッテリーシステムは、10 年間の使用が可能で、バッテリーの大きさは使用中の経年劣化を考慮して設計されている。

どのようにシステムのサイズを小型化するのか。同システムが他のシステムとどのように異なる動作するかを知ることは難しい。システムの小型化は可能であるが、そのためにはシステムの動作マージンを縮小することとなり、酷使されたバッテリーの寿命の低下に繋がる。バッテリー交換間隔は 10 年ではなく 5 年となり、バッテリーのサイズがどれだけ縮小できるかは不明である。バッテリーの船内交換もロジスティックス的な挑戦である。モジュールを切り離して交換する方が効率的であると考えられる。

セルの交換（他メーカーの場合はモジュールの交換）の利点は、バッテリーシステムのバランス修正である。セルの中には他のセルよりも劣化が早いセルがある。このような事態が発生した場合、システムのバランスを維持する唯一の方法はモジュール全体の交換（PBES の場合はセルバンクの交換）である。

#### 4.3.9 HH Ferries : 電気推進フェリー

HH Ferries Group は、ヘルシンゲル（デンマーク）とヘルシンボリ（スウェーデン）間のフェリー航路を「Scandlines Helsingborg-Helsingör」というトレードマークで運航している。同社は、この航海時間 20 分のエーレスンド海峡航路に、5 隻のフェリーを 15 分間隔で運航しており、毎日最大 50,000 人の乗客、9,000 台の自動車、1,600 台のバスとトラックを輸送している。

HH Ferries 社は過去数年間、EU のイノベーションとネットワークを促進する INEA からの部分補助を受け、フェリー 2 隻の改造プロジェクトに同社史上最大の投資を行っている。プロジェクトでは、同 2 隻の動力・推進システムを、ディーゼル電気推進から完全バッテリー電気推進に改造する。

ABB Marine 社が、バッテリーパック、エネルギー貯蔵制御システム、特許技術「Onboard DC Grid」技術を含む動力・推進システム一式を供給する。

各フェリーには出力 4,160kWh のバッテリーが搭載され、ヘルシンゲルとヘルシンボリ間の 4km の航路をバッテリーのみで航行する。

#### 4.3.10 GREEN COASTAL SHIPPING プログラムの第 3 フェーズ

ノルウェーの Green Coastal Shipping (GCS) プログラムの第 2 フェーズは、2016 年に完了した。DNV GL がコーディネーターを務める同プログラムには、ノルウェー海事産業から多くの企業・組織が参加した。この官民共同プログラムは、世界で最も環境に優しく効率の高い沿岸船の船隊を構築することである。具体的には、部分的又は完全バッテリー駆動、又は LNG その他の高環境性燃料を使用し、沿岸船隊の運航を革新的に向上させる。

GCS は、新環境技術導入への障害の排除を目的とした、数多くの開発プロジェクトを実施しているプロジェクト組織である。プログラムの第 2 フェーズは 2017 年に完了し、第 3 フェーズは 2018 年 2 月初めに開始した。

#### 4.3.11 BECKER MARINE : COBRA バッテリーシステム

ハンブルクを本拠地とする高性能ラダー及び操船技術企業である Becker Marine Systems は、2016 年 9 月のドイツ SMM 展示会において、新たなリチウムイオン電池システム「Compact Battery Rack (COBRA)」を発表した。同システムの発表とともに、Becker Marine は事業多角化に乗り出した。

COBRA システムは、他の数社 (Grenland Energy、Akasol/ZEM、Saft 等) も使用している標準型 18650 バッテリーセルで構成されている。同システムは、船用の型式承認を取得していない。

Becker Marine のホームページに掲載されたデータシートによると、同システムは競合製品よりも低いエネルギー密度を持つ。COBRA システムのモジュール出力は 4.4kWh、大部分の他社システムは 6.5kWh である。システムのサイズと重量の情報はないため、同システムが他社システムよりもどれだけ「コンパクト」かは不明である。

#### 4.4 バッテリー・ハイブリッド船の使用燃料

バッテリー・ハイブリッド船の使用燃料は、特定燃料に限定されず、各船舶に適したあらゆる燃料の組合せが利用可能である。本章では次の燃料について述べる。

- HFO (重油)
- MDO (船用ディーゼルオイル) / MGO (船用ガスオイル)
- LNG (液化天然ガス)
- メタノール
- 水素

現在燃料電池に使用されている、燃料の種類に関する総合的な情報はない。EMSA 燃料電池プロジェクトで研究された燃料電池船 23 隻の燃料は、水素 10 隻、メタノール 3 隻、ディーゼル油 3 隻、LNG2 隻（3 隻）である。これらの船舶のいくつかは、研究開発段階であり、未だ実現はしていない。

図 32 に、バッテリー推進船と使用燃料の概要を示す。データには Maritime Battery Forum の船舶登録情報<sup>19</sup>を使用した。よって、燃料電池搭載船は含まれていない。

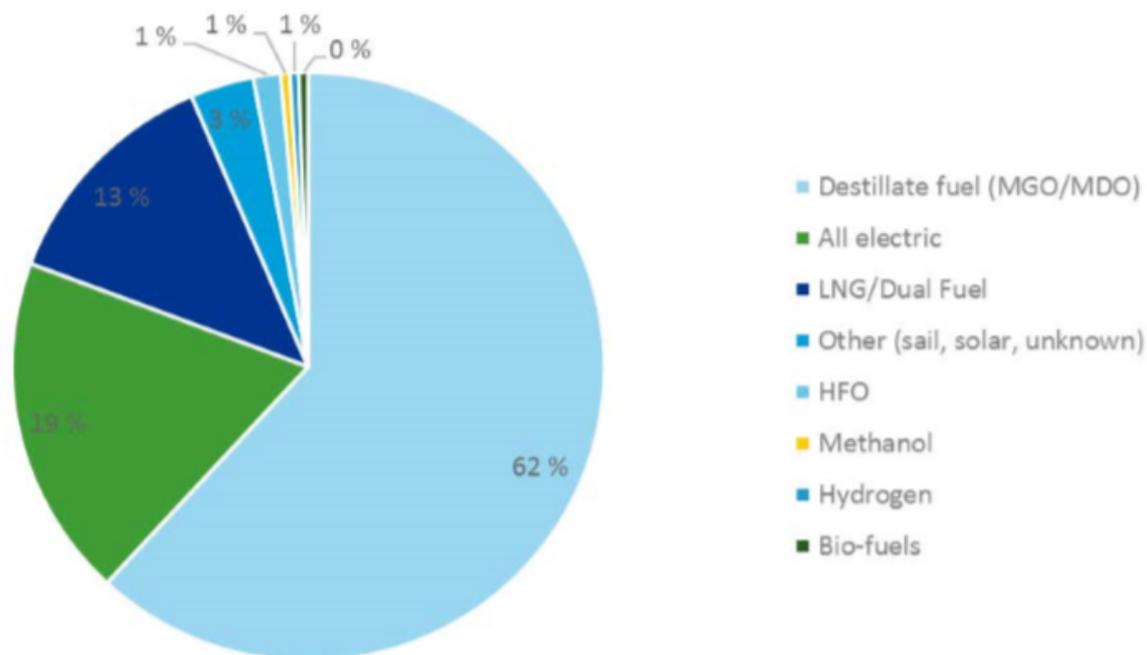


図 32 : バッテリー推進船及びバッテリー・ハイブリッド船の使用燃料比率（隻数）

バッテリー推進船の使用燃料の種類は、バッテリーを使用する船舶、即ち現時点で多くは沿岸航行船の使用燃料と一致する。

HFO の使用は、沿岸航行には禁止されている場合が多く、バッテリーを搭載する遠洋航行船が少ないため、バッテリー船の HFO 使用率は当然少ない（1%）。将来的には遠洋航行船もバッテリーを搭載するようになると予想されるが、その時期は不明である。

軽油燃料（MDO/MGO）は、沿岸航行船でも使用されるため、図 32 でも大きな比率を占めている（62%）。これらの燃料は、沿岸航行における排出規制により、比較的クリーンな燃料としてフェリーとオフショア船で多く使用されている。

<sup>19</sup> <http://maritimebatteryforum.com/news/mbf-ship-database-is-online>

地域的な排出規制は厳格化しており、軽質燃料油を使用する船舶でさえ、近い将来には排ガス浄化装置の設置、又は更にクリーンなソリューションのレトロフィットが要求されることが予想される。

LNG は注目の燃料である。未だ主流の燃料とはなっていないが、LNG の採用は増加している。LNG は、地域的な SO<sub>x</sub> と PM の削減に寄与し、また、NO<sub>x</sub> 排出量を大幅に削減する。NO<sub>x</sub> 排出量はエンジンの燃焼過程に影響される。エンジンがディーゼルサイクルで運転する場合には NO<sub>x</sub> を排出するが、ディーゼル燃料の代わりに LNG 燃料を使用した場合には、NO<sub>x</sub> 排出量は 20～30%低減する<sup>20</sup>。DNV GL の「LNGi ツール」は、グローバルな船用 LNG 燃料のバリューチェーンの常に最新の情報を提供している<sup>21</sup>。

---

<sup>20</sup> Dag Stenersen, O. T., 2017. GHG and NO<sub>x</sub> emissions from gas fuelled, Oslo: The Business Sector's NO<sub>x</sub> fund. (Dag Stenersen, 2017)

<sup>21</sup><https://www.dnvgl.com/maritime/mydnvgl-service-overview/lng-intelligence-lngi/index.html>

## 5 基金及び補助金制度

EU 及び欧州各国政府は、ソリューションの種類と普及度に合わせた数々の支援制度を打ち出している。本章では、バッテリー推進船及びバッテリー・ハイブリッド船を対象とした EU の基金及び補助金制度の概要を述べる。さらに、バッテリー推進船とハイブリッド船の普及が著しいノルウェーの支援制度について述べる。

### 5.1 EU

EU は、地域的な汚染防止とともに、全体的な環境負荷の削減を政策としている。以下に述べる補助金制度は、技術の成熟度によって異なる。「Horizon 2020」プログラムは、技術又は概念の更なる研究、開発、試験に関する研究・イノベーションのプロジェクトに対する助成を行っている。現行の「スマートでグリーンな統合輸送に関する Horizon 2020 作業プログラム」は、燃料電池及び電化を含む次世代推進システムに関するプロジェクトの応募受付を 2018 年中に開始する。募集に関する詳細及び「Horizon 2020」の他の募集 2 件に関する情報は、添付資料 Appendix III を参照。

一般向けに商業運航する船舶のバッテリー及びハイブリッド技術の研究開発プロジェクトは、EU の輸送インフラ整備を目指す EU 「Connecting Europe Facility (CEF)」プログラムによる支援の対象となる。CEF 内の「Motorways of the Sea (MoS)」プログラムは、環境性向上を目指した船舶のアップグレードに対する補助金を給付する。これと並行して、現在受付中の「CDF ブレンディング・コール」では、欧州投資銀行 (EIB) 又は民間銀行からの融資と補助金を組み合わせた支援を行う。MoS とブレンディング・コールには厳格な応募条件があり、その詳細は添付資料 Appendix III を参照。

補助金制度以外では、既存環境技術に関しては、自社船の環境技術のアップグレードを行う船主への融資を行う EIB の新融資制度「Green Shipping Guarantee」プログラムがある。添付資料 Appendix III にその詳細を示す。

欧州では、グリーンな海運への信用保証というコンセプトも広まりつつある。国家プロジェクトの例としては、次のものがある。

- ・ ギリシャの「Europa Ship Plan」  
(<https://www.oceanfinance.gr/europa-venture/>)
- ・ イタリア、ポルトガル、スペイン及びフランスが MoS 補助金を利用して策定中の「Med-Atlantic Ecobonus」インセンティブスキーム  
(<https://ec.europa.eu/inea/en/connecting-europe-facility/cef-transport/projects-by-country/multi-country/2014-eu-tm-0544-s>)

海運に関係のある国の多くは、何らかの財政的支援制度を持つが、その大部分は環境技術のみを対象としたものではない。例えば、米国には一般船舶融資制度

(<https://www.marad.dot.gov/ships-and-shipping/federal-ship-financing-title-xi-program-homepage/>)があるが、環境技術とは無関係である。燃料電池関連の研究開発プロジェクトの大部分は欧州のプロジェクトで、EU の幅広い研究開発プログラムからの支援を受けて行われている。

## 5.2 ノルウェー

ノルウェーは、代替燃料とバッテリー分野のリーダーである。これにはノルウェー政府による支援策が貢献している。そのいくつかは他国の支援策とは大きく異なる。本章ではその概要を述べる。詳細に関してはリンクを参照。

### NOx 基金<sup>22</sup>

2017年5月、ノルウェー環境省と15のビジネス組織は、2018年～2025年のNOx排出量に関する環境合意を締結した。この合意がNOx基金のフレームワークとなる。今回の合意は、2008年～2010年及び2011年～2017年の同様の環境合意の延長となる。この合意により、15のビジネス組織は、環境に害を及ぼすNOxガスの削減を行う。合意に署名した企業は、NOx基金が要求する義務の実行と引き換えに、NOx税を免除される。NOx基金の主な役割は、NOx削減措置への資金を提供することである。NOx削減措置には、ハイブリッド、LNG、エンジンの改造、低NOxエンジン、バッテリー等がある。2018年1月1日以降に実施された削減措置に対し、1kgのNOx削減につき250又は500ノルウェークローネの補助金が支給される。補助金は、全コストの最大80%までである。

海事産業向けの2018年以降のNOx基金の補助率は、NOx 1kgにつき8ノルウェークローネである。2018年～2025年の期間中に、補助率は10ノルウェークローネに増加する。補助金は2025年以降に終了予定である。

### Enova<sup>23</sup>

Enovaは、ノルウェー海運産業に対するいくつかのインセンティブを提供している。最も関連の深いプログラムは「船舶のエネルギーと環境に関する方策」で、船舶のエネルギー消費量又は環境負荷を低減させる技術投資への財政支援を行う。これには、推進システム、負荷処理システム、エンジン、プロペラ、換気システム等多くの船用分野における技術が含まれる。企業の大きさにより、全コストの最大50%の補助を給付する。補助金の対象となる船舶は、航行の大部分をノルウェー海域で行う船舶、又はノルウェー港湾に定期的に寄港する船舶、又はノルウェー船籍・船級(NOR/NIS)を持つ船舶である。補助金申請者は、当該船舶の船主で、ノルウェー企業として登録されていなければならない。

<sup>22</sup> <https://www.nho.no/Prosjekter-og-programmer/NOx-fondet/The-NOx-fund/>

<sup>23</sup> <https://www.enova.no/about-enova/>

Enova は、エネルギー及び環境に関する最新技術を利用する企業に対する資金援助も行っている。補助金の対象となる技術は、現在市場で利用されている最良の技術を更に大きく改善した最新技術でなければならない。財政支援は、プロジェクトの追加コストの最大 50%までである。

#### イノベーション・ノルウェー<sup>24</sup>

イノベーション・ノルウェーは、ノルウェー海域を航行する旧式の既存船を環境に優しい新しい船舶に代替するプロジェクトを支援している。補助金受給の条件は、申請者がノルウェーで登録された企業であること、船舶がノルウェー近距離海運船隊に属すること、船舶が最低 12 か月間ノルウェー企業の所有であること、である。補助金は最大 200 万ノルウェークローネである。この補助金は、代替される既存船と比較して大幅に高い環境性能を持つ船舶の購入に使用されなければならない。

---

<sup>24</sup> <http://www.innovasjon Norge.no/en/start-page/>

## 6 燃料の利用可能性

本章では、前述のバッテリー及び燃料電池の諸技術に対応する燃料（又はエネルギー）の利用可能性（availability）に関する概要を述べる。新技術の採用には、常に「鶏が先か、卵が先か」というジレンマがある。この場合は、港湾及び燃料供給業者が先か、船主が先か、である。船主にとって、寄港先の港湾が対処できない技術を導入することは大きなリスクである。逆に、港湾、燃料供給業者にとっては、インフラを整備しても船主が利用しないというリスクがある。技術の導入には、両社の良好な協力関係が必要である。これまでの経験から、船主はインフラが未整備の場合は新技術の採用に消極的である。

陸上電力供給（cold ironing）は、現在、いくつかの分野に関する議論が交わされているトピックである。充電技術の標準がなく、また、船舶の使用する電圧と周波数はそれぞれ異なる（周波数 50～60Hz、低電圧、高電圧等）。現時点では世界の陸上電力供給設備を網羅する情報はないが、これはバッテリー推進船にとっては大きな問題にはならない。大部分のバッテリー搭載船は、ハイブリッドであり、船内の発電機からの余剰電力をバッテリーに貯蔵することが可能である。陸上電力は、全電気ソリューションに必要であり、バッテリーを搭載することにより最大の利点を享受することが出来る。陸上電力は、バッテリー推進船以外の船舶にとっても、停泊中に運転する船内発電機を減らすことが出来る有用な機能である。

現時点では、水素燃料は特殊なケースのみに用いられている。この理由は市場がまだ存在しないことで、水素も他の代替燃料と同じ挑戦を経験すると予想される。燃料電池技術も採用に関しては、ごく初期段階にある。

燃料電池に使用可能な燃料としては、LNG とメタノールがある。環境規制の厳格化により LNG を求める船主は増加しており、LNG を利用可能な港湾も増加している。DNV GL の LNGi ポータルは、その詳細情報を掲載している<sup>25</sup>。

メタノールと他のバイオ燃料は、水素よりも入手が容易であるが、その利用可能性に関する情報は少ない。これらの燃料は通常トラックで輸送される。全ての港湾で常時利用できる可能性は少ないが、基本的にトラックが輸送できる場所ではどこでも利用可能であるという利点がある。

---

<sup>25</sup><https://www.dnvgl.com/maritime/mydnvgl-service-overview/lng-intelligence-lngi/index.html> (DNV GL, 2018)

## 7 製造事業者

製造市場でも様々な動きがある。新技術に関しては、常に小さな企業が最初に市場参入するが、程なくして大企業が姿を現す。船用バッテリー市場でも同様のことが起こっている。大手の OEM 企業とシステムインテグレーターは現在自社バッテリーシステムの開発を検討している。

表 4 は、主なバッテリーメーカーの一覧である。大部分のメーカーがエネルギー、動力、カスタム化したソリューションを提供している。比較的小さい市場であるが、現在も企業数は増加している。発展途上の小さな市場に、これだけ多数の企業が参入しているということは、今後、勝者と敗者に分かれていくこととなろう。近い将来には、企業の統合や合併・買収も予想される。

現在、規模は小さいが急成長するバッテリー市場には、多数のメーカーが参入している。市場リーダーは **Corvus** で、**EST** がそれに続くが、バッテリーシステムの販売実績の少ない企業も、今後、市場シェアを伸ばしていくと予想される。**Siemens** も主要企業となるであろう。現在、大きなプロジェクトを受注しているメーカーは、**Leclanche** と **ZEM** である。**Rolls Royce Marine** も、今後自社システムとともに市場参入が予想される大手メーカーの一つである。

表 4 : 船用バッテリーメーカー一覧

Company	Website	Main Product(s)	Comments	Type approved according to DNV GL rules?
<b>Corvus</b>	<a href="http://corvusenergy.com/">http://corvusenergy.com/</a>	Orca Energy and Orca Power	Market leader, having delivered about 40 % of all current projects. Majority owners are Statoil, Hydro and BW.	Yes
<b>PBES</b>	<a href="http://www.pbess.com/">http://www.pbess.com/</a>	Harpoon Energy and Harpoon Power	Split from Corvus. The company is currently one of about four who have a close to equal share of the market after Corvus.	Yes
<b>ZEM</b>	<a href="https://www.zemenergy.com/">https://www.zemenergy.com/</a>	Custom products	Smaller company with a lot of experience. ZEM delivers custom systems (as most others also do) for a wide range of applications. The company started with EVs, but have moved into the marmite market. Vision of the Fjords is one of their reference projects.	No
<b>EST Floattech</b>	<a href="https://www.est-floattech.com/">https://www.est-floattech.com/</a>	Green Orca	Similar market share as PBES. Recently passed the propagation tests enforced by the Norwegian Maritime Authority. EST has been around for as long as Corvus. EST passed the strictest safety tests required by the Norwegian Maritime Authority early in 2018.	No
<b>Spear Power Systems</b>	<a href="http://www.spearpowersystems.com/">http://www.spearpowersystems.com/</a>	Trident	Still relatively small in terms on maritime projects. Spear is also providing batteries for other industries.	No
<b>Grenland Energy</b>	<a href="http://grenlandenergy.com/">http://grenlandenergy.com/</a>	Energy, power and custom	Grenland specialises in customised solutions and are recognised as a high quality company. Grenland has a laboratory and battery testing facility, even though the company is relatively small with only about 13 employees.	No
<b>Siemens</b>	<a href="http://w3.siemens.com/markets/global/en/battery-manufacturing/pages/battery-manufacturing.aspx">http://w3.siemens.com/markets/global/en/battery-manufacturing/pages/battery-manufacturing.aspx</a>	Product range not known	Siemens has recently announced that they will supply their own battery system. Siemens has a large market share as system integrator. Little is known about their current projects as a battery supplier at this point.	No
<b>Electrovaya</b>	<a href="http://electrovaya.com/">http://electrovaya.com/</a>	Not primarily working in	Vertically integrated Lithium Ion battery supplier, that designs and manufactures	No

		maritime	everything from cell components to turnkey systems for the clean transportation, smart grid, renewable energy and material handling markets. Have delivered one project, a cable ferry named Hisarøy.	
<b>Leclanche</b>	<a href="http://www.leclanche.com/markets-solutions/transportation/">http://www.leclanche.com/markets-solutions/transportation/</a>	The Marine Rack System (MRS)	The Marine Rack System (MRS) is Leclanche's state of art, ready to sail, battery system for marine applications. Leclanche produces their own cells, and have recently secured contracts for some of the biggest batteries in Maritime.	Yes
<b>Visedo</b>	<a href="https://visedo.com/marine/marine-systems/">https://visedo.com/marine/marine-systems/</a>	PowerMASTER, PowerBOOST DC/DC, PowerCOMBO	Visedo delivers a full range of equipment for the propulsion of electric vessels. They have not delivered many commercial marine projects at this time, however, they are very large for leisure crafts.	No
<b>Becker Marine</b>	<a href="https://www.becker-marine-systems.com/products/product-detail/becker-cobra-compact-battery-rack.html">https://www.becker-marine-systems.com/products/product-detail/becker-cobra-compact-battery-rack.html</a>	Cobra	No known commercial projects in maritime.	No
<b>Saft</b>	<a href="https://www.saftbatteries.com/mark-et-sectors/transportation/marine">https://www.saftbatteries.com/mark-et-sectors/transportation/marine</a>	Seanergy	Saft is a relatively large, French battery company with some 4000 employees. Saft is owned by Total (takeover in 2017). Saft has delivered battery systems for more than 100 years for various applications, such as vehicles, space, various industry, and maritime. Saft has delivered several maritime projects. Saft also make their own cells, and for maritime they focus on LFP (iron phosphate battery cells).	No

間もなく、ABB や Rolls Royce Marine 等の大企業もバッテリーシステムの提供を開始すると予想される。

船用燃料電池は、未だ商業化のごく初期の段階にある。現在の船用燃料電池プロジェクトは、船用利用に適した燃料電池システムを個別に開発し、試験と承認を行う必要がある。いくつかのメーカーは、小型の船用燃料電池システムを製造し、試験を行った実績があるが、将来的には更に大型のシステムが必要となる。下表は、船用燃料電池プロジェクトに参加した経験のあるメーカーの例である。

表 5：燃料電池メーカー一覧

Company	Website	Main Product(s)	Comments
<b>Ballard</b>	<a href="http://www.ballard.com/fuel-cell-solutions/technology-solutions">http://www.ballard.com/fuel-cell-solutions/technology-solutions</a>	FCgen, FCvelocity, ElectraGen, ClearGen	Experience with <a href="#">automotive and buses, telecom backup power</a> . HQ in Vancouver, Canada. Manufacturing in Vancouver and Mexico.
<b>Proton Motor</b>	<a href="http://www.proton-motor.de/gb/anwendungen/">http://www.proton-motor.de/gb/anwendungen/</a> (website in German only)	HyRange (automotive)	Grid and housing, automotive. Experience with one maritime project "Alsterwasser" (Hamburg), a 50 kW FC.
<b>PowerCell</b>	<a href="http://www.powercell.se/technology_head">http://www.powercell.se/technology_head</a>	Unknown	Fuel cell power solutions for stationary and mobile customer applications.  (Part owner of Hyon)
<b>Hydrogenics</b>	<a href="http://www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/fuel-cell-power-systems/mobility-power/">http://www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/fuel-cell-power-systems/mobility-power/</a>	HyPM, Celerity and CelerityPlus	Hydrogenics has over 60 years of experience designing, manufacturing, building and installing industrial and commercial hydrogen systems. HQ in Mississauga, Canada.
<b>Hyon</b>	<a href="http://hyon.no/">http://hyon.no/</a>	Powercell provides the fuel cell technology.	Hyon aims at covering the whole hydrogen value chain, and enables clean and profitable energy solutions, providing complete, world-class hydrogen technologies. Hyon is equally owned by Nel ASA, Hexagon Composites ASA and PowerCell Sweden AB, and utilises each partner's respective world leading technologies and competencies to manage and develop projects for effectively integrated and optimal zero-emission power solutions for the customers.

上記のどのメーカーも、現在、船用燃料電池製品の市場化は行っていない。

通常、制御・監視システムは、メーカー又はシステムインテグレーター又はその両社が提供する。例としては、全てのバッテリーメーカーは BMS<sup>26</sup>を搭載している。また、制御システムと燃料電池システムの統合は、バッテリーの場合と同様に重要である。

<sup>26</sup> Battery Management System

## 8 2020年以降の動向

海運と船舶は進化している。本章では、今後の動向について概説する。

短距離海運に関しては、更に厳格化する排出規制と効率への要求がハイブリッド化を促進する。どのような燃料とエネルギーのミックスが実現するかは、正確な予想が難しいが、次のトレンドが考えられる。まず、バッテリーは近い将来に新造船に標準装備される要素となるが、特に沿岸航行船、近距離船には普及が早いと予想される。完全電気推進船は、フェリー等の特定船種のみで可能であるため、将来的にはハイブリッドが主流となる。ハイブリッドとはバッテリープラス「何か」である。この「何か」が決まるのもそう遠くはないであろう。ゼロ排出を可能とする技術は、燃料電池とバッテリーである。この場合の「ゼロ排出」は、エネルギー生成方法次第である。DNV GLの「Energy Transition Outlook 2050」レポートは、次のように予測している。

- バッテリーからの電力が3分の1の船舶を駆動する。
- バッテリー推進船の多くは小型船であるため、海運全体のエネルギー需要の約30分の1に相当する。
- LNG及びLPGが海運全体のエネルギー需要の32%、バイオ燃料は約18%と予測される。

遠洋航行船は、エネルギー需要の大きさとそれに伴うエネルギー貯蔵の必要から、沿岸航行船と比べてバッテリーや燃料電池の導入は遅れると予想される。「Energy Transition Outlook 2050」レポートでは、次のように予想している。

- 主に船型と機器の改良によりエネルギー効率が向上し、船舶1隻当たりの燃料消費量は平均18%低減する。
- 航行速度は平均約5%低下し、燃料消費量の10%削減に繋がる。
- 船舶の稼働率は、ばら積み運搬船以外の遠洋航行船は約25%、遠洋ばら積み運搬船5%、近距離航行船20%等全船種で改善する。Vessel utilization will increase in all segments: about 25% for deep sea trades except bulk, around 5% for deep sea bulk, and some 20% for short sea ships. (原文49ページ)
- 遠洋航行船の平均サイズは大型化する。LNGタンカーは40%（遠洋航行船の増加による）、コンテナ船は30%、ばら積み運搬船は10%大型化する。

石油ベースの燃料は、2050年時点でも海運の使用燃料の大きな部分を占めていると予想される。DNV GLの予測では、2050年までには、海運のエネルギー消費量の半分近く(47%)は石油ベースの液体燃料、32%はガス、21%のみが電力、バイオ燃料等の低炭素燃料である。短距離海運は、海運全体のエネルギー消費量の37%を消費し、この市場では電力がエネルギー消費の9%を占めるようになると予想される。

バッテリーと燃料電池の普及に関しては、バッテリーは新造船の標準要素となる。燃料電池のポテンシャルは大きいですが、バッテリーほどは普及が進まないと予想される。現在の最大の問題点は、市場化された船用燃料電池がないことであるが、この問題は近い将来に解決されるであろう。

参考資料：

- Chuang Yu, S. G. E. R. V. E. H. W. S. B. Z. L. & M. W., 2017. Accessing the bottleneck in all-solid state batteries, lithium-ion transport over the solid-electrolyte electrode interface. *Nature Communications*, 8(1086).
- Dag Stenersen, O. T., 2017. GHG and NO<sub>x</sub> emissions from gas fuelled, Oslo: The Business Sector's NO<sub>x</sub> fund. Desmond, K., 2017.
- *Electric Boats and Ships: A History*. s.l.:McFarland. DNV GL, 2016.
- *DNV GL Handbook for Maritime and Offshore Battery Systems*, Oslo: DNV GL Maritime Advisory. DNV GL, 2017.
- *EMSA Study on the use of Fuel Cells in Shipping*, Lisbon: European Maritime Safety Agency. DNV GL, 2018.
- *DNV GL Rules for Classification of Ships, Part 6, Chapter 2, Section 1 Battery Power*. [Online] Available at: <http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-SHIP/2016-07/DNVGL-RU-SHIP-Pt6Ch2.pdf> DNV GL, 2018.
- LNGi. [Online] Available at: <https://www.dnvgl.com/maritime/mydnvgl-service-overview/lng-intelligence/ngi/index.html> [Accessed 2018].
- FuelCellToday, 2018. Fuel Cell Today. [Online] Available at: <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/afc> Maritime Battery Forum, 2018.
- Maritime Battery Forum Ship Register. [Online] Available at: URL available for members in MBF only Norwegian Maritime Authority, 2018. NMA. [Online] Available at: <https://www.sjofartsdir.no/contentassets/87f39103a890462a81b43a3dd6544023/en-gmaritime-batteri-systems-18-07-2016-005.pdf?t=1506594447348>

## 添付資料 APPENDIX I : バッテリー技術の基本

### バッテリー・マネジメントシステム

バッテリー・マネジメントシステム (Battery Management System : BMS)<sup>27</sup>は、通常モジュール内に搭載される電子制御システムである。モジュールレベルでは、BMS はセルの電圧、温度、電流を監視するセンサーで構成される。電流は通常モジュール全体で総合的に監視されるが、電圧と温度は各セルで監視されることもある。各セルの挙動と状態を正確に把握することは、異常の早期感知と問題回避のために役に立つ。

モジュール BMS のもう一つの主要機能は、セルのバランス機能である。同じメーカーの同一モデルの場合でも、セルには電圧、エネルギー容量、内部抵抗等にバリエーションがある。このため、放電、充電を繰り返す毎に各セルのエネルギー量にはごく僅かな差が生じ、時とともにその差は大きくなる。BMS は、バッテリーのバランスを保つ目的で搭載された電気回路を制御する。

モジュール内のセルのバランス機能に加え、同様な挙動を行うラック内のモジュールのバランス機能も必要である。モジュールもそれぞれ僅かに異なる特性を持ち、時とともに劣化や挙動に差が生じる。

### 充電率と健全度

BMS の他の機能は、通常モジュールレベルではなく、バッテリーシステム全体で監視する。この機能は、充電率 (State of Charge : SOC) と健全度 (State of Health : SOH) の診断である。SOC は、自動車の燃料計、又は携帯電話のバッテリー残量表示に相当する。

バッテリーセルのエネルギー容量は時とともに減少する。これが SOH で、初期状態のセルのエネルギー容量と比較したパーセンテージで示される。このため、SOC の評価は SOH と比較して行うべきである。

バッテリーの劣化は即座に始まり、避けることは出来ないため、SOH の減少を加速する要因の回避がその対処法となる。温度は最大の劣化原因となり、高温でも低温でも劣化を加速する。また、バッテリーの使用方法も劣化に関係する。高レベルの電力は、低レベルの電力よりもバッテリーの劣化を促す。さらに、運転中の SOC の最高値と最低値も劣化に影響するため、通常バッテリーの SOC は 20%と 80%の範囲内で運転される。

---

<sup>27</sup> BMS、サーマル・マネジメント、SOH、SOC、バッテリーの詳細は、DNV GL, 2016. DNV GL Handbook for Maritime and Offshore Battery Systems (DNV GL, 2016)を参照

## バッテリーのサイズ

SOH 分析の結果によると、特定の用途に最適なバッテリーのサイズを決定するには高い技術力を必要することが分かる。小さ過ぎるバッテリーは酷使されることとなり、劣化が早まるため、保証のクレームや顧客の不満足に繋がる。逆に、大き過ぎるバッテリーは、初期コストの不必要な増加に繋がる。しかしながら、バッテリーサイズの決定には深い知識と、使用されるバッテリーセルの試験が必要となる。バッテリーサイズは、システムの温度及び電子化学的特性の試験も可能な高度バッテリーモデルによって決定される場合が多い。

## サーマル・マネジメント

SOH と同様に、温度は劣化に関係する最大の要因であるため、バッテリーの温度管理は非常に重要である。また、バッテリーは数千個のセルを持つため、全てのセルが均一に動作するためには全てのセルの温度管理を行う必要がある。

サーマル・マネジメント（熱・温度管理）は、空気冷却又は液体冷却の 2 つの方法が主流である。空気冷却システムは、バッテリー室内温度を人間向けの空調システムと同様に 25°C 以下に管理する。バッテリーの上の空気を循環させるファンが、モジュール内のセルを直接冷却又は熱交換プレートの冷却を行う。液体冷却システムも同様にセル又は熱交換プレートを冷却する。液体冷却の方が冷却効率が高く、迅速に冷却することが出来る。

## 安全性

リチウムイオン電池には、熱暴走とオフガスという 2 つの大きな安全性リスクがある。

熱暴走はバッテリー内の発火である。バッテリー内のエネルギー価の高い材料が燃焼中に酸素を排出し、自己酸化する火炎を発生させる。このような火炎は消火が不可能で、また、火炎に直接アクセス可能な抑制材料の設置も難しい。しかしながら、セル 1 個は比較的小さいため、少なくとも船舶全体の安全性や機能へのリスクとなる可能性は低いが、発熱の量によっては近隣のセルに延焼し、連鎖反応を引き起こす危険がある。船用バッテリーシステムは数千個のセルで構成されるため、最悪のシナリオでは避難が容易ではない船内の重大事故に繋がる可能性もある。

セル 1 個の熱暴走は、繰り返される過充電、過放電、過熱、過出力等の外部要因によって引き起こされる。これらの要因は、通常 BMS により回避、又は少なくとも事前に検知され、運転を停止することが可能であるはずであるが、このような保護機能が成功するという保証はない。また、製造過程におけるセルの欠陥により、内部で短絡その他の故障が発生し、セルの熱暴走に繋がるおそれもある。さらに、セルの数の多さから、問題が発生する可能性は統計的に存在する。現在の技術と経験では、各セルの均一な挙動に保証はな

いため、熱暴走の他のセルへの拡大を防ぐことが第一の安全要件となる。これに関するノルウェー海事局（NMA）の試験通達（Norwegian Maritime Authority Testing Circular, Norwegian Maritime Authority, 2018）は、GNV GL の船級規則に組み込まれている。

ノルウェー海事局の試験通達では、熱暴走がモジュール内の一つのセルの内部で人工的に引き起こされることを要求し、また、この問題が近隣のモジュールに拡散しないことを要件としている。いくつかのバッテリーシステムでは、この機能を更に進化させ、問題が同一モジュール内の他のセルに拡散することを防止する機能を持ち、リスクと不確実性を大幅に軽減している。

リチウムイオン電池のもう一つの安全性懸念は、オフガスの発生である。オフガスは通常運転時にはごく少量しか発生しないが、熱暴走時に発生するオフガスはある程度の爆発性と毒性を持つ。現行の DNV GL 規則（DNV GL, 2018）では、換気システムを要求している。

海事産業は、リチウムイオン電池の安全性レベルを向上させ、知識の蓄積も進んでいるが、保証と合理的プロセスには未だに問題点がある。この問題の解決に向けて、DNV GL は、船用バッテリーの安全性に関する共同開発プロジェクトを開始した。このプロジェクトには、多数の企業・組織が参加している。（Corvus、NMA、DMA、FFI、Plan B、ABB、Rolls Royce、Stena、Damen、Scandlines、FIFI4Marine、Nexceris）

#### 船用バッテリーに関する規則

船舶の環境規則に係る要件は、船級協会の主導で策定を行ってきた。DNV GL は、2012 年に安全性に係るいくつかの側面に関するリスクベース評価を組み込んだ業界初の規則を発表した。他の船級協会は、リスクベースの評価に重点を置いており、規則要件の策定は遅れて開始している。大部分の船級協会は、DNV GL のルールを基礎としている事実を公表している。現行のルール及び要件の制定経緯は次のとおり。

- 2012 年：DNV GL が業界初の規制要求を発表。
- 2016 年：ノルウェー海事局が通達を発表。厳格な複数回のフルスケール火災試験を要求。
- 2017 年：DNV GL がノルウェー海事局の試験通達を盛り込み、規則改正を行う。換気システムを要件化。
- 2017 年：BV がバッテリーに関する船級規則を発表。2 番目の船級協会となる。
- 2017 年～2019 年：DNV GL が、船用バッテリーの安全性に関する共同開発プロジェクトを主導。

このように、2012 年の DNV GL の船級規則発表からノルウェー海事局の通達に至るまで、ノルウェーが船用バッテリー規則の制定を主導してきた。ノルウェー海事局の試験要

件は難しく、保守的であると見られているが、多くのバッテリーメーカーは、大幅なコスト削減と同時進行で有効なソリューションを次々に開発して、これに対応している。従って、DNV GL の安全要件を満たさない船用バッテリーを採用する意味はない。大部分の船級協会はこれら DNV GL の安全要件を踏襲しているため、DNV GL の安全要件は事実上のグローバル・スタンダードであると言える。

最近制定された IEC 62619 標準は、バッテリーの安全性に関する最も国際的で分野横断的な標準である。同標準は、要件と試験方法を総合的にカバーしており、DNV GL 規則でもこの点を強調している。

## 添付資料 APPENDIX II : 有望な船用燃料電池技術

2017年、DNV GLは、表6に示すパラメーターを用いて燃料電池技術の評価を行った(DNV GL, 2017)。各技術の専門家が、各パラメーターの重要度(1~3)とスコア(1~3)の評価を行い、各パラメーターの最高スコアは9である。燃料電池技術の評価は表7に示す。

表 6：燃料電池評価のパラメーターと重要度

パラメーターグループ	特性	概要
技術	モジュール出力レベル	モジュールユニットの最大出力レベル。モジュールはシステムの構成要素であり、システム全体の出力は数 kW から MW 級までが可能である。このパラメーターの重要度は、小型システムが不利とならないよう「2」としている。小型システムもバッテリーサイズへのモジュール化が可能である。
技術	寿命	このパラメーターは電池運転の経年変化を示すが、用途のサイクル寿命は考慮に入れていない。産業界からの要求の高さにより、このパラメーターの重要度は「3」である。
技術	サイクル運転への耐久性	サイクル運転には、始動/停止、及び負荷変動による移行を含む。燃料電池はピークシェイピングと燃料効率向上のためにバッテリーに統合されることが多いため、このパラメーターの重要度は「2」とする。
技術	効率	効率パラメーターは、スタンド・アローンの電気効率及び熱回収使用時の効率を含む。既存技術ではなく燃料電池を導入する理由としては、省エネ目的が多いため、このパラメーターの重要度は「3」である。
技術	技術成熟度	このパラメーターには、コア技術の成熟度と船用利用に関する成熟度の両方を含める。新技術導入に関する海運産業の保守性を考慮し、このパラメーターの重要度は「3」とする。
技術	燃料中不純物への耐性	特定の燃料電池システムは高純度の水素のみが使用可能であるため、燃料の改質が必要となる。LNG は後処理が必要である。一方、燃料柔軟性の高いシステムもある。アルカリ燃料電池等による空気汚染もこのパラメーターに含まれる。
コスト	相対的成本	このパラメーターは、他種類の燃料電池と比較した場合のコストである。予算は常に重要な要素であるため、このパラメーターの重要度は「3」である。
環境	排出	NOx、SOx、CO <sub>2</sub> 、PM 等の大気汚染ガスの大気中への排出。排出は燃料の種類に影響されるため、このパラメーターの重要度は「2」である。排出ゼロの水素燃料を使用するというオプションもある。特定システムは高純度水素を必要とし、また、燃料に柔軟なシステムもある。この要件は、上記の不純物への耐性パラメーターに含まれる。
安全性	特殊安全要件	高温と水素燃料の使用という危険な組合せは除外する。MCFC と SOFC に関しては、水素はセル内部と改質器等 BOP (balance of plant) 内のみに存在し、独立した水素タンクと循環システムは使用しない。新技術の安全性の重要度は「3」である。
船用利用	物理的サイズ	このパラメーターには、コアとなるセルのエネルギー密度と補助システムを含めたシステム全体設置サイズの両方を含める。燃料電池の船用利用に関しては、小型サイズが好まれるため、このパラメーターの重要度は「3」である。
船用利用	燃料	このパラメーターは、燃料電池の使用燃料の柔軟性と、燃料の船用利用の容易性を考慮する。船用燃料の重要性からこのパラメーターの重要度は「3」とする。

表 7 : 燃料電池技術の評価

Technology/ Attributes	Relative cost	Module kW levels	Lifetime	Tolerance for cycling	Fuel	Maturity	Size	Sensitivity fuel im-purities	Emissions	Safety Aspects	Efficiency	Total
<b>Weighting</b>	3	2	3	2	3	3	3	3	2	3	3	
<b>Alkaline fuel cell</b>	3	3	2	3	1	2	2	1	3	3	2	
	9	6	6	6	3	6	6	3	6	9	6	66
<b>Phosphoric acid fuel cell</b>	2	3	3	2	2	2	1	2	3	2	2	
	6	6	9	4	6	6	3	6	6	6	6	64
<b>Molten carbonate fuel cell</b>	1	3	3	1	3	3	1	3	1	2	3	
	3	6	9	2	9	9	3	9	2	6	9	67
<b>Solid oxide fuel cell</b>	1	3	2	1	3	3	2	3	2	2	3	
	3	6	6	2	9	9	6	9	4	6	9	69
<b>Proton Exchange Mem-brane</b>	3	3	2	3	1	3	3	2	3	3	2	
	9	6	6	6	3	9	9	6	6	9	6	75
<b>High Temperature PEM</b>	2	2	2	3	2	2	3	3	3	2	3	
	6	4	6	6	6	6	9	9	6	6	9	73
<b>Direct methanol fuel cell</b>	2	1	2	3	3	1	2	3	1	3	1	
	6	2	6	6	9	3	6	9	2	9	3	61

## 添付資料 APPENDIX III : EU の補助金制度

スマートでグリーンな統合輸送システムに関する「Horizon 2020」作業プログラム

LC-MG-1-8-2019: 水上輸送の次世代推進システムのレトロフィットソリューション  
(Retrofit Solutions and Next Generation Propulsion for Waterborne Transport)

同プロジェクトは、水上輸送からの排ガス対策に関するプロジェクトで、可能性のあるソリューションとして、ハイブリッド・バッテリー、燃料電池、電気／ハイブリッド船を挙げている。

プロジェクトは、研究開発に関する次の 2 つのサブテーマを持つ。

- サブテーマ A : 高出力燃料電池駆動、又は更に高い効率が得られる場合は内燃機関又はタービンとの組合せによるコンバインドサイクルで駆動される旅客船の開発及び実証。
- サブテーマ B : 電気、クリーンな燃料、再生可能エネルギー等を使用する少なくとも TRL (Technology readiness level : 技術成熟度 1~9) レベル 5 以上の次世代高効率船用推進システムの開発及び実証。

プロジェクトの募集は 2 段階で、2018 年 9 月 5 日に開始される。一次募集の応募期限は 2019 年 1 月 16 日、二次募集の応募期限は 2019 年 9 月 12 日である。

詳細は以下のリンクを参照 :

<https://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/lc-mg-1-8-2019.html>

参考までに、「Horizon 2020」には、輸送機関、特に船舶からの排出削減に関する次のようなプロジェクトがある。

- LC-MG-1-1-2018 : 輸送機関による大気の大気クオリティへの影響軽減に関する国際協力プロジェクト (InCo flagship on reduction of transport impact on air quality)  
<https://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/lc-mg-1-1-2018.html>
- MG-BG-02-2019 : 船舶からの排出抑制のシナリオ、海洋環境への影響軽減 (Ship emission control scenarios, marine environmental impact and mitigation)  
<https://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/mg-bg-02-2019.html>

## 海上輸送関連プロジェクトへの補助金制度の概要

- 1) コネクティング・ヨーロッパ・ファシリティ・モーターウェイズ・オブ・ザ・シー（現在募集停止中）

（Connecting Europe Facility - Motorways of the Sea）

<https://ec.europa.eu/inea/en/connecting-europe-facility/cef-transport/cef-transport-motorways-sea>

「Motorways of the Sea」(MoS) プログラムは、環境、安全性、インフラ/ロジスティックス等に関する多様な海事プロジェクトへの補助金を提供している。同プログラムは、LNG とスクラバー開発、船舶の電化とバッテリーに関するプロジェクト等、EU の優先課題に焦点を当てたプロジェクトへの支援を行ってきた。

補助金申請に関しては、次のような条件に留意しなければならない。

- MoS 補助金は EU 加盟国間のリンクとなる：従って、EU 加盟国 2 か国以上と EU 指定港湾のうちの 2 港湾以上が参加するプロジェクトでなければならない。この条件により、複数企業・組織のコンソーシアムを構成する必要がある。
- MoS 補助金はプロジェクトの「ロケーション」を選ぶ：MoS は法的コンプライアンスを超えたプロジェクトのみを支援するため、例えば、北海/バルト海 SO<sub>x</sub> 排出規制海域 (SECA) を航行する船舶が現行の SO<sub>x</sub> 規制に適応するためのプロジェクトは、補助金支給の対象とならない。一方、SECA 以外の海域 (欧州南部等) のプロジェクトは、2020 年に SO<sub>x</sub> 規制が発効するまでは補助金の対象となる。
- MoS 補助金は、プロジェクトの活動に応じて全コストの 30~50%を補助する。よって、残りのコストは船主がカバーすることとなる。
- 現時点では、次回の MoS 補助金のプロジェクト募集時期、予算、優先課題は発表されていないが、2018 年秋には募集が開始される可能性もある。

ブレンディング・コール（現在募集中、締め切りは 2018 年 4 月 12 日）

<https://ec.europa.eu/inea/en/connecting-europe-facility/cef-transport/apply-funding/2017-cef-transport-blending-map-call>

ブレンディング・コール (Blending call) は、補助金と融資を組み合わせた新しいタイプの補助金制度である。プロジェクトに応募するためには、MoS 等の補助金に加えて欧州投資銀行等からの融資を申請しなければならない。この目的は、EU 部分補助金と同時に民間融資への保証を提供することにより、輸送システムへの投資を促進することである。

補助金は、プロジェクト募集要項で指定された優先テーマに沿って決定される。(優先テーマはブレンディング・コールのウェブサイトを参照。)

- MoS の優先課題に関するプロジェクトのブレンディング・コール応募条件は、上記の MoS の条件と同様である。
- もう一つの補助金の流れは、全輸送モードを対象としたイノベーションと新技術 ([https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/2017\\_blending\\_innovation.pdf](https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/2017_blending_innovation.pdf)) に関する優先課題 ([https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/2017\\_blending\\_mos.pdf](https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/2017_blending_mos.pdf)) を支援するプログラムである。優先課題には電気と水素技術が含まれており、海事プロジェクトの応募も可能である。プロジェクトは欧州の輸送のコアネットワーク回廊 ([https://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure\\_en](https://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure_en)) に影響するものでなければならないため、上記の「ロケーション」が重要となる。

ブレンディング・コールの応募者は、補助金申請と同時に、残り又は一部のプロジェクト資金に関しては、民間銀行、欧州投資銀行等の民間金融機関からの融資（コスト上限等の条件あり）を申請しなければならない。その後、応募者は、1 行以上の民間金融機関からの支援レターを提出し、資金調達の用意があることを示さなければならない。

留意すべき重要な点は、補助金はプロジェクトの「イノベーション」のみをカバーすることである。一方、民間融資に関しては、そのような制限はなく、例えば、新造船の建造コスト等に利用することが出来る。補助金は、新技術の開発コストのみを対象とする。

ブレンディング・コールの予算、優先課題、日程は以下のリンクを参照：

[https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/cef\\_transport\\_blending\\_2017\\_call\\_2nd\\_cut-off\\_leaflet\\_web.pdf](https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/cef_transport_blending_2017_call_2nd_cut-off_leaflet_web.pdf)

## 2) グリーン・ SHIPPING・ギランティー・プログラム (Green Shipping Guarantee Programme)

欧州投資銀行 (EIB) は、環境投資へのリスク軽減により環境に優しい海運プロジェクトを支援する「グリーン・ SHIPPING・ギランティー・プログラム」を実施している。EIB は、多くの提携銀行 (Société Générale、ABN AMRO 等) との合意を締結し、提携銀行によるグリーン海運プロジェクト融資に対して総額 7 億 5,000 万ユーロの信用保証を提供している。このプログラムは補助金制度ではないが、企業が環境技術に投資する際の融資条件を改善するものである。

同プログラムは、補助金ではなく融資に関するものであるため、応募条件は比較的緩やかである。応募プロジェクトは、EU の付加価値 (航路、船籍等) を持ち、海運の持続性

向上を目的としたものでなければならない。融資額は新造船建造の借入金の最大 50%、環境技術のレトロフィットに関しては最大 100%である。

グリーン・ SHIPPING・ ギャランティー及び EIB のその他の海運融資に関しては、次のリンクを参照。

<http://ec.europa.eu/transparency/regexpert/index.cfm?do=groupDetail.groupDetailDoc&id=26985&no=3>

この報告書はボートレースの交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました。

## 欧州における電池推進船の動向調査

2018年（平成30年）3月発行

発行 一般社団法人 日本船用工業会

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-13-3

虎ノ門東洋共同ビル 5階

TEL 03-3502-2041 FAX 03-3591-2206

一般財団法人 日本船舶技術研究協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 2-10-9 ラウンドクロス赤坂

TEL 03-5575-6426 FAX 03-5114-8941

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。