

発表No.A-72

燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた
共通課題解決型産学官連携研究開発事業／
共通課題解決型基盤技術開発／
大型モビリティに適應する
多用途型燃料電池モジュールの研究開発

山下 恭平

東芝エネルギーシステムズ株式会社

2022年7月29日(金)

連絡先：

東芝エネルギーシステムズ株式会社

<https://www.global.toshiba/jp/company/energy.html>

事業概要

1. 期間

開始 : 2019年9月
終了 : 2022年6月

2. 最終目標

船舶や鉄道などの大型モビリティに適用可能な、コンパクト、軽量かつ高出力の200kW級純水素燃料電池のモジュールを開発することで、燃料電池システムの多用途化を推進し、水素の活用を促進する。

3. 成果・進捗概要

研究テーマ	成果・概要
ア) 船舶向け標準型モジュールの開発	<ul style="list-style-type: none">船舶搭載において要求される仕様・取り合い条件を、「高出力燃料電池搭載内航船舶の実用化に向けた実証」との連携により調査し、標準型モジュール開発仕様に反映した。船舶向けの試作モジュールの性能評価試験の結果、定置用並みのNET発電効率50%-LHVを達成し、8万時間の耐久性の見込みを得た。船舶における規則・基準や環境条件への適合性を確認し、適合の見込みを得た。目標サイズに対して課題があるが、FC船実証(助成事業)の船舶搭載に向けては問題ないことを確認。
イ) 鉄道その他アプリケーション対応開発	<ul style="list-style-type: none">鉄道床下に設置可能なサイズ条件を明らかにし、試作モジュール高さに反映した。

1. 事業の位置付け・必要性

低炭素社会の実現に向けて、燃料電池の実用化は自動車、バス、定置発電用だけでなく、**更なる多用途への展開**が期待されている。特にエネルギー消費の多い船舶や鉄道に水素・燃料電池を活用することは、CN推進に大きく貢献することが期待されている。

国内：「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」

- ・船舶産業、物流産業における燃料電池船の普及
- ・燃料電池鉄道の実装に向けた基準規制の整備

国際海事機関(IMO)：「GHG削減戦略」 2018年策定

- ・2030年までに2008年比でCO2排出量40%以上削減
- ・2050年までに2008年比でGHG排出量の半減
- ・今世紀中なるべく早期の排出量ゼロ

さらに、電動化の進展による

- 静音、低振動、無臭な観光船
- 架線レス・非電化区間での鉄道事業
- 制御性向上による無人化
- AI・IoTの活用の拡大更なる効率化・省力化

船舶鉄道をはじめとするHEAVY DUTY用の燃料電池モジュールの開発を推進することは、日本がリーダーシップをとるうえで大きな意義がある。



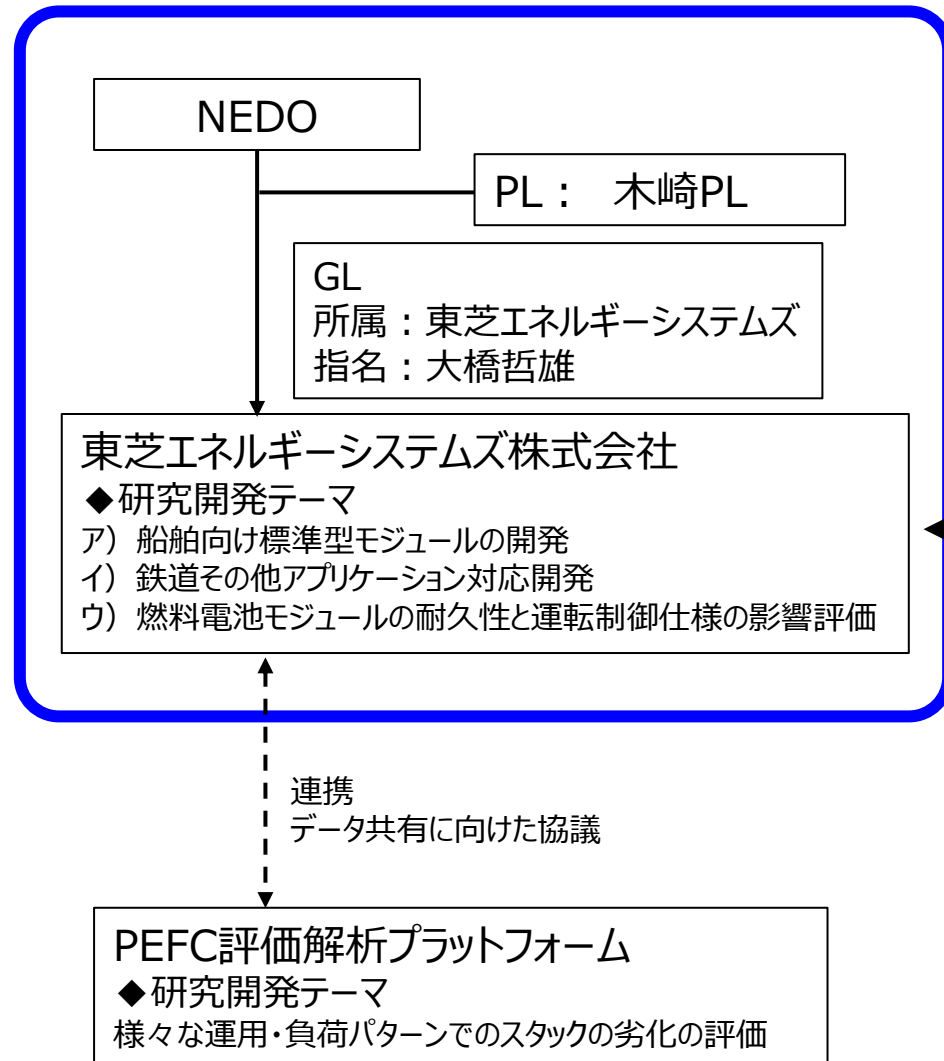
1. 事業の位置付け・必要性

定置用FCの強み（連続運転・高耐久性）を最大限活用し、Heavy Duty向けに展開する



2. 研究開発マネジメントについて

○研究開発の実施体制



連携
船舶向け要求仕様の調査
船舶向けモジュールの供給

FC船実証事業

研究開発項目Ⅲ
「燃料電池の多用途活用実現技術開発
高出力燃料電池搭載内航船舶の実用化に向けた実証」

Fuel Cell Ship Project

Supported by
New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO)

NYK LINE
TOSHIBA
Kawasaki
ENEOS
ClassNK

推進力に燃料電池を利用し、航行中のGHG排出量を100%削減する
高出力燃料電池搭載
船舶開発プロジェクト

日本郵船

株式会社 日本海洋科学
Japan Marine Science Inc.
海事コンサル

新日本海洋社
実証船運航

1. プロジェクトリーダー
2. 船型開発(造船所選定)
3. 新造発注・建造監督
4. 実証運航・運航マニュアル整備
5. 法規制対応

TOSHIBA
東芝エネルギーシステムズ

- ・ 高出力FCシステムの船舶への実装と運用技術開発

Kawasaki

- ・ エネルギーマネジメントシステム
- ・ 船内燃料供給システム (タンク含)

ClassNK
日本海事協会

1. 安全性に関する技術検証
2. ガイドラインの策定
3. 法規制対応支援

ENEOS

- ・ 水素供給技術・運用

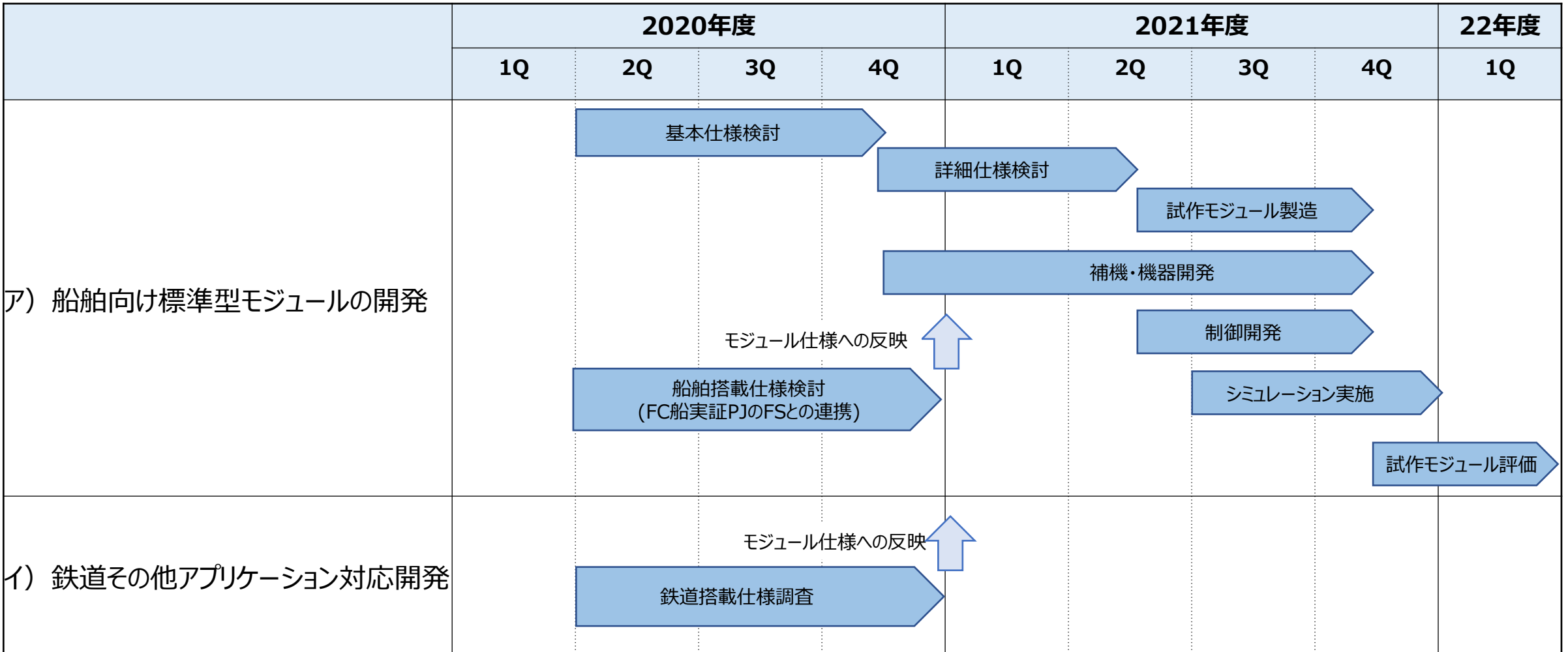
2. 研究開発マネジメントについて

○各研究テーマの目標値・目標設定の考え方

項目	目標値	目標設定の考え方
ア) 船舶向け標準型モジュールの開発		
①連続出力	≥200kW	船舶鉄道用途の電源としての市場分析の結果。
②モジュールとしての出力密度	≥0.067kW/L	高耐久連続出力のスタックを用いたモジュールサイズについて、2019年度比で2倍以上の出力密度とする。
③発電効率	≥40%LHV →50%LHV	船舶用途においては運行距離と水素タンクサイズ、及び経済性についても重要になる。高効率が求められる。事業開始時から目標変更し、定置用並みの発電効率とする。
④設計寿命	≥8万hr	船舶の耐用年数は20~30年、鉄道車両も15年程度とされている。 営業時間のみの定格連続運転を15年運用として約8万hr
⑤負荷変化速度	≥6kW/sec	FC船実証事業のFS結果より船舶における応答性を明確とし、対応する補機構成・制御システムとする。
⑥起動時間	≤60sec	
⑦MW級への対応	3MW対応	200kWモジュールをさらにMW級に展開できる構成・機能を開発する
⑧船舶環境・規則対応	船舶環境条件・規則要件に適合	船舶向けに必要な環境条件や規則要件を明らかにし、船用としての適合性を確認
イ) 鉄道その他アプリケーション対応開発		
①鉄道への搭載サイズ	搭載可能サイズの明確化	鉄道への展開を考慮して、鉄道車両に搭載可能なサイズを明確とし、標準型モジュールの構造に反映する。

2. 研究開発マネジメントについて

○研究開発のスケジュール



3. 研究開発成果について

○各研究テーマの目標達成状況

項目	目標値	成果状況
ア) 船舶向け標準型モジュールの開発		
①連続出力	≥200kW	200kW連続定格発電可能なシステム構成とし、発電試験により確認した
②モジュールとしての出力密度	≥0.067kW/L	目標サイズに対して課題があるが、FC船実証事業における実証船への搭載に向けては問題ないことを確認。
③発電効率	≥40%LHV →50%LHV	発電試験より、定格Net発電効率50%-LHV、最大Net発電効率58%-LHVを確認
④設計寿命	≥8万hr	加速劣化プロトコルに基づいた評価により8万時間を見込みを確認。
⑤負荷変化速度	≥6kW/sec	発電試験により、負荷変化速度20kW/secを達成
⑥起動時間	≤60sec	起動指令から発電開始までの時間60sec以内を確認
⑦MW級への対応	3MW対応	複数モジュールを連携させるMW級に展開できる構成とし機能確認した。
⑧船舶環境・規則対応	船舶環境条件・規則要件に適合	燃料電池船の安全ガイドラインへの準拠を確認。舶用機器に求められる環境条件への適合見込みを確認。
イ) 鉄道その他アプリケーション対応開発		
①鉄道への搭載サイズ	搭載可能サイズの明確化	鉄道床下に設置可能なサイズ条件を明らかにし、試作モジュール高さに反映した。

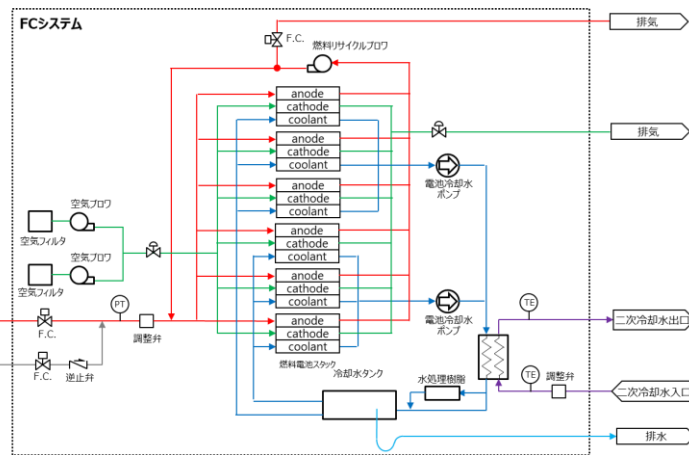
3. 研究開発成果について

ア) 船舶向け標準型モジュールの開発

定置用並みの高効率、長寿命、連続定格発電性能を維持したまま、船舶・鉄道への搭載に向けて、モジュールとしての出力密度を向上させた。

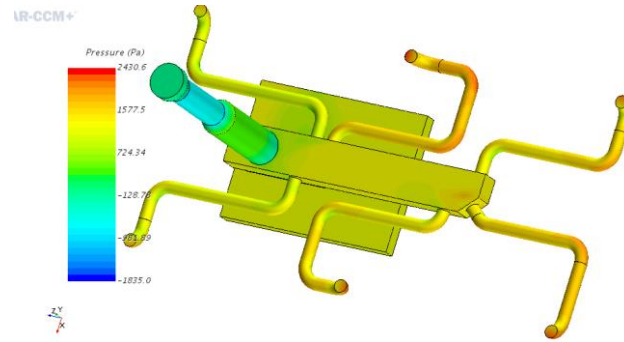
- 東芝製40kW級スタック6台を用いたモジュール構成とし、小型化軽量化技術を開発。
- モジュールサイズは鉄道床下に設置可能な高さとした。
- 船舶向けは設置フットプリント低減に向け、上面にサブモジュールを設置

➤ 大型補機の採用による補機点数削減



複数スタックに対する補機の共通化

➤ 均等なガス・冷却水供給と小型化を両立する機器・配管配置の開発。



EOL条件での最大流量時に流量配分ばらつき3%以内を確認

分岐管の流量配分シミュレーション結果

➤ 最適化したDCDCコンバータ・制御ユニットの開発

	開発仕様		
構成	<ul style="list-style-type: none"> 直列接続 昇降圧コンバータ 	<ul style="list-style-type: none"> 並列接続 昇圧コンバータ 	<ul style="list-style-type: none"> 2系統化 昇圧コンバータ
サイズ	80%	45%	45%

研究開始前実績とのkW当たり体積(L/kW)の比較

DCDCコンバータ回路構成によるサイズへの影響

3. 研究開発成果について

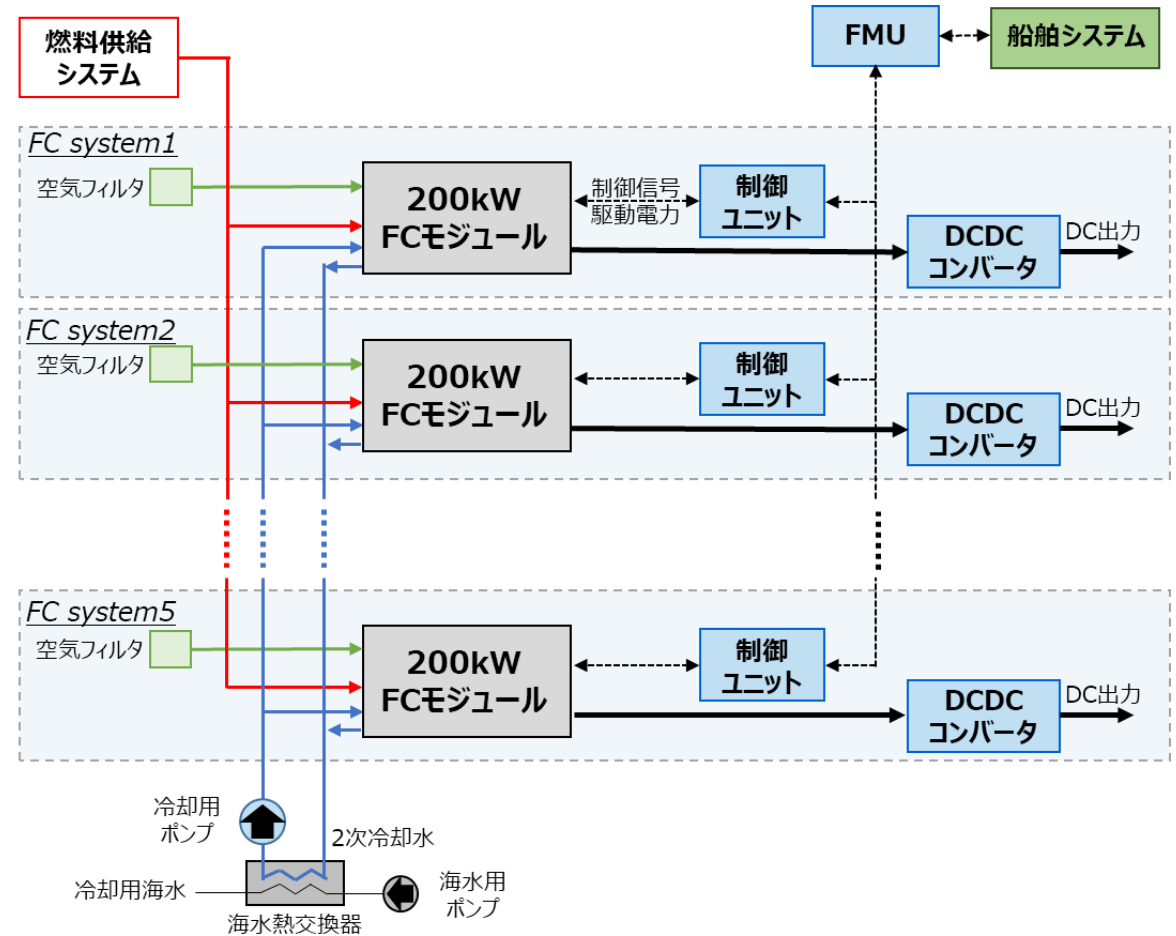
ア) 船舶向け標準型モジュールの開発

○200kW~数MWへの対応

- 200kW連続定格出力が可能なモジュール構成として開発し、試作機での性能評価を行った。
- 数MW級への拡張に向けた複数台連携機能に加え、船舶システムとの制御および安全監視の連携に必要な機能をFMUに持たせる構成とした。



試作した200kWFCモジュール



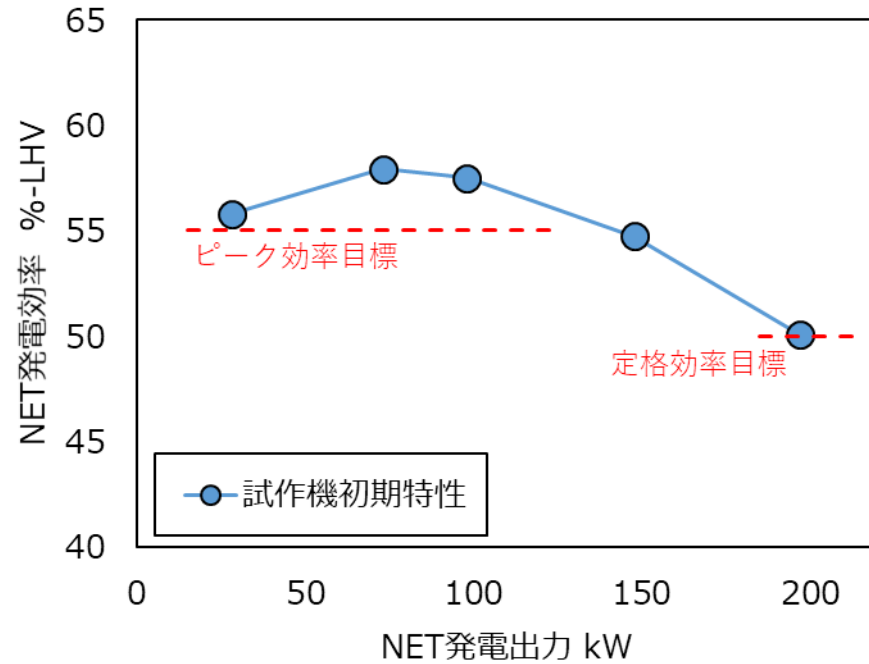
MW級に対応するシステム構成

3. 研究開発成果について

ア) 船舶向け標準型モジュールの開発

○発電効率

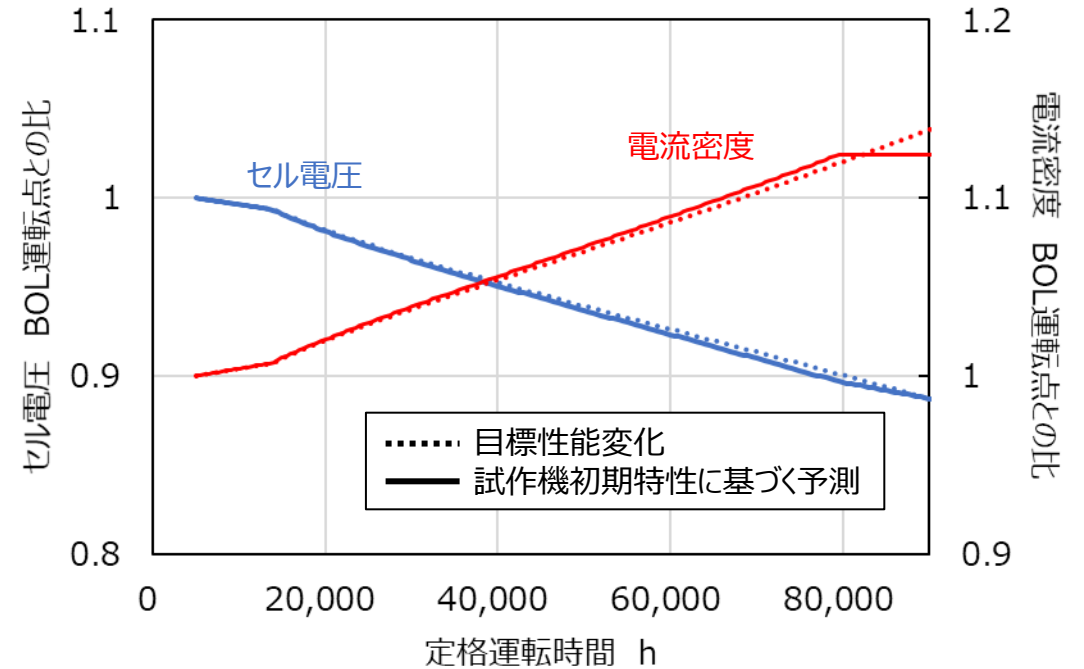
- 高効率な補機の開発・採用や各種損失の低減により、定置用システム並みの高いNet発電効率⁽¹⁾を達成。



Net発電効率特性

○寿命予測

- NEDO事業にて開発した劣化加速プロトコルを用いた寿命評価を実施⁽²⁾。
- 試作機の初期特性よりスタック運転点の推移を予測した結果、定置用並みの8万時間の定格発電が可能な見込み。



劣化加速プロトコルに基づく寿命予測

(1) Net発電効率：DCDC昇圧ロス、補機損失を含む発電出力ベースの発電効率

(2) 東芝独自にて実施したスタック劣化加速試験結果を利用

3. 研究開発成果について

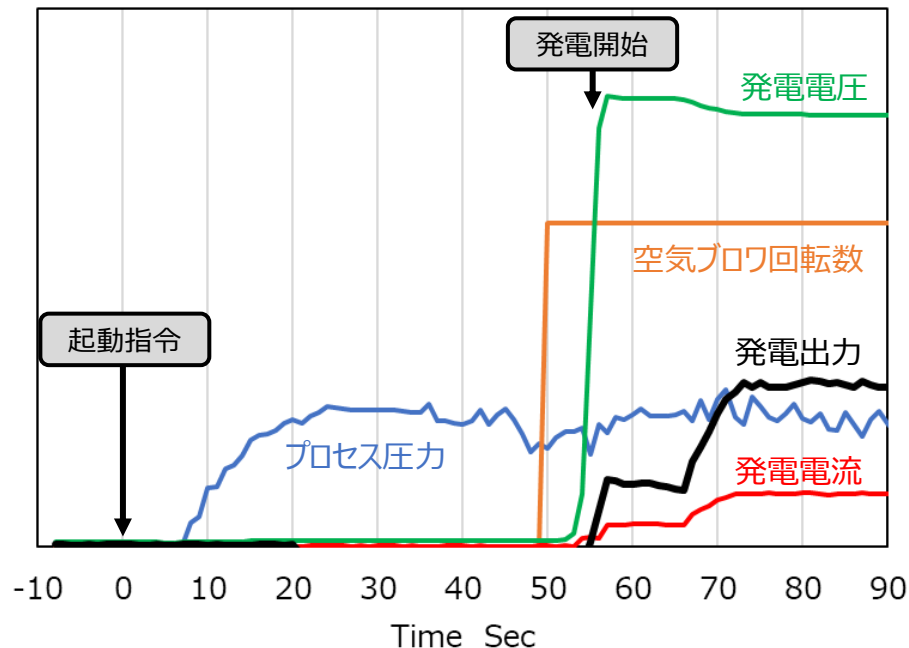
ア) 船舶向け標準型モジュールの開発

応答性の高い補機を用いたモジュール構成及び制御開発を実施。

特に、比較的低圧での水素供給に対応した水素比例弁にて高精度・高応答の水素流量制御技術を開発。

○起動応答性

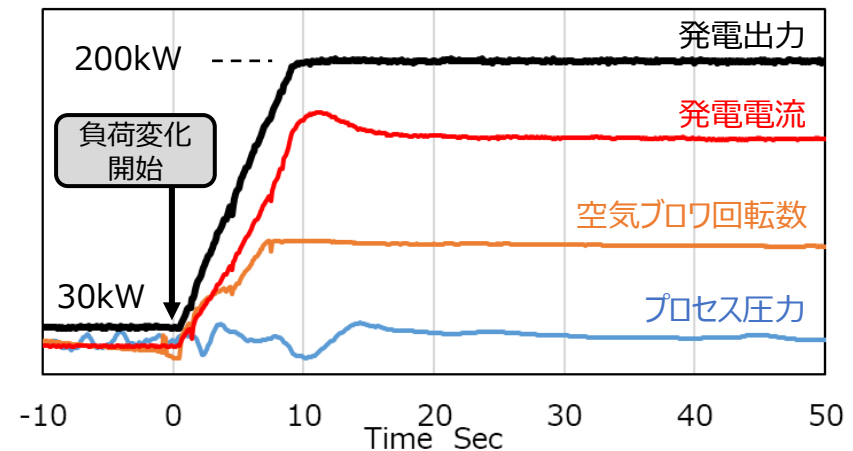
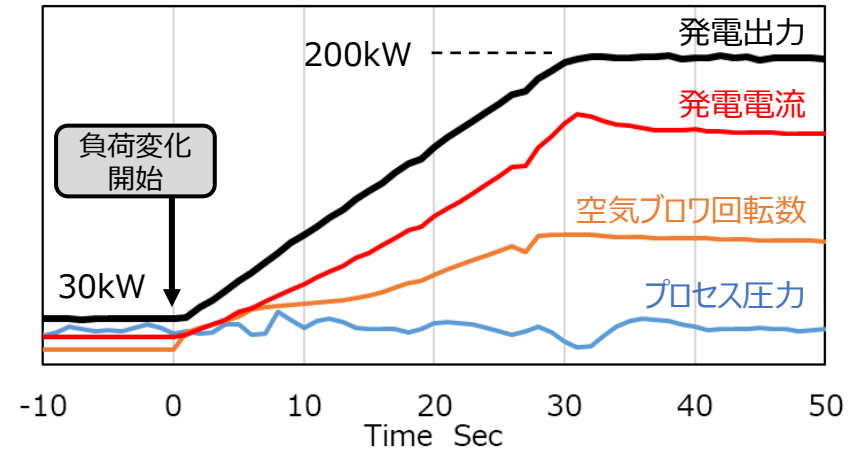
- 長寿命を実現する定置用の起動・停止シーケンスを改良し、発電開始まで60sec以内を達成。



起動シーケンス時の状態量変化

○負荷応答性

- 船舶において求められる負荷変化6kW/secを確認。さらに実力値としては20kW/secを達成。



最低→定格負荷変化 30sec(上)、10sec(下)

3. 研究開発成果について

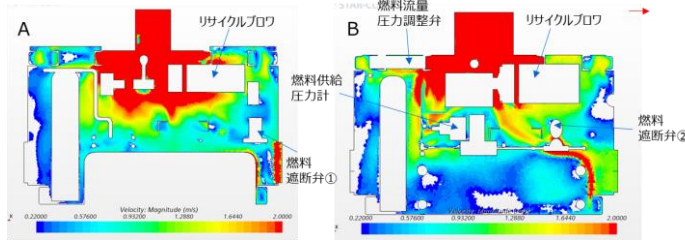
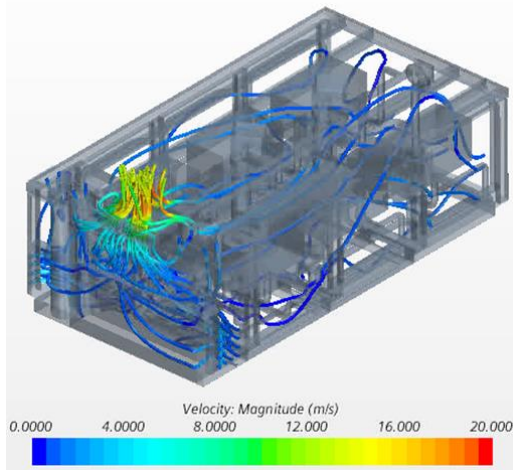
ア) 船舶向け標準型モジュールの開発

○燃料電池船の安全ガイドライン(3)への準拠

- FC船実証事業にて実施したFC船のリスク評価結果をモジュール内の機器配置や制御に盛り込んだ。
- 水素リークに対する安全性確認に向け、換気流れのシミュレーションを実施。パッケージ内換気流れの流速により非危険区域を確認

IEC-60079-10の危険区域設定に基づく換気流速閾値

- 燃料減圧前 <0.22m/s
- 燃料極系統 <0.04m/s



換気流れシミュレーション

(3) 以下の2つのガイドラインへの準拠を確認

- A) 国内500t以下の内航船 → 燃料電池船の安全ガイドライン（国交省海事局）21年9月改訂
- B) 国内外の外航船 → 暫定FCガイドライン（IMO:国際海事協会）ドラフト版

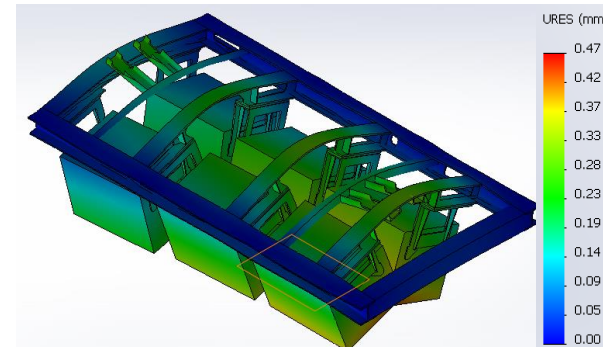
○舶用機器の規則

- FCモジュールに使用する機器が舶用の規則や基準に準拠している、または準拠見込みであることを確認

○振動揺動に対する開発

- 船舶において求められる振動や傾きに対する強度構造及び、機器配置構成の開発を実施

項目	条件	閾値	参照規則 (NK規則)
振動	2(+3,-0) Hz ~ 13.2 Hz 13.2 Hz ~ 100Hz	振幅 ± 1.0mm 加速度 ± 0.7g	船用材料・機器等の承認及び認定要領第7編1章表7.1-1
傾斜	静的傾斜(横傾斜)	15°	D編(機関) 表D1.1 主機 H編(電気設備) 表H1.2 一般電気機器
	動的傾斜	22.5°	



強度構造各箇所の最大応力に対する安全率を確認

フレーム強度解析シミュレーション

部位	シミュレーション		
	最大発生応力 kgf/mm ²	安全率	
ベースフレーム		2.25	18.2
	最弱部	0.75	
柱フレーム	6本受け	7.7	5.3
	1本受け		
上部フレーム	ビーム2本	7.7	5.3
	ビーム1本		

4. 今後の見通しについて

本事業の成果まとめ

- 大型移動体に対応する燃料電池モジュールとして、船舶向けのモジュール開発を行い、初期特性の評価を完了した。
- 「高出力燃料電池搭載内航船舶の実用化に向けた実証」との連携により、船舶搭載において要求される仕様・取り合い条件を調査し、標準型モジュール仕様に反映した。
- 初期特性評価の結果、定置用並みの高効率と、連続定格発電性能を確認し、また8万時間の長寿命を見込みを得た。
- サイズに対しては課題があり、特に舶用機器の採用により大型化した。FC向けに開発が進む機器について舶用規則・基準に対応する開発を行うことで、さらなる小型化が可能と考えられる。



今後の取り組み

- 2022年6月にて本事業は終了
- 今後の燃料電池の多様化展開に向け、本事業の成果を活用する。