

【課題名】エンジン有する電動車両におけるCO2排出量を改善する排気熱発電機構の実装実証(委託)

【代表者】㈱三五 柴田 敏博

【実施年度】平成30～令和2年度

(1)課題概要

①【課題の概要・目的】

- 本邦のCO₂削減目標「2030年に2013年度比26.0%削減、2050年度80%削減」へ向け、運輸部門では、電動化によるCO₂排出削減が必須である
- トヨタグループでは2030年にグローバル販売台数における電動車を550万台以上、ゼロエミッション車を100万台以上とし、電動化要素技術開発を加速させる
- 発電機搭載EV(EREV)やプラグインハイブリッド(PHEV)の普及を支援する要素技術開発は2040年にかけて急務である
- EREVやPHEVでは発電用エンジンからの排気熱は未利用であり、熱電発電システムで回生電力化し、～6%以上の燃費改善(CO₂削減)を目指す
- 本取り組みは電動化同様、欧米に先行されている技術であるため、開発を急ぐ

②【技術開発の内容】

A1.【EREV、ハイブリッド系用途熱交換器一体型熱電発電装置の開発】

実用化に向けた技術課題として、排気ガス流路熱交換器および冷却系流路熱交換器の形状と熱接合の最適化による損失低減を実施する。熱発電の高出力化と高耐久化への新熱交換器形状と素子のタンデム実装を導入して実証する。

A2.【排気熱発電専用電力コンディショニング回路の開発】

熱発電モジュールの出力特性に最適整合した昇圧電力コンバータを開発し、さらに一部の熱電モジュールの故障喪失時の補償回路を実装する。温度分布によるモジュール出力不均一を吸収し最大出力を確保する車載電源回路製作をする。

A3.【熱電モジュールを高温域で安定動作させる熱接合機構】

発電能力の高い中温・低温型熱電モジュールを実装する際に、幅広いエンジン排気温度域100～800℃で過加熱破損せず、発電動作域を確保する初の車載用可変熱伝達管方式熱接合機構の量産化試行と、モジュールの高温度高耐久化を行う。

B. 開発要素のシステム統合

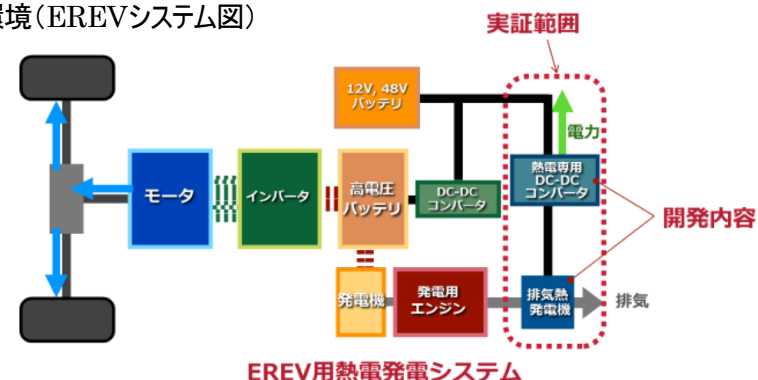
従来の排気熱発電開発では、熱発電に整合した発電電力の車載電源連携システムが構築されておらず、実用障害であった。本取り組みでは、熱発電機構と熱発電特化型電力変換器を連携開発し、熱発電電力の98%(従前は～60%)を高効率利用する。

C. その実証

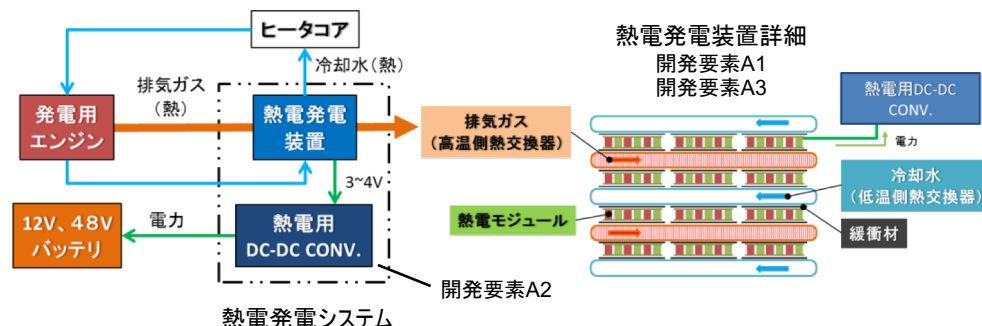
ラボ実証とともにライブ車載実証が重要であることから、EREV系既販車を試用導入して開発システム搭載クリアランス、動作時エンジンデータや各種システム稼働データ取得による開発・最適化項目のPDCAサイクルを実施する。

③【システム構成】

・システム環境(EREVシステム図)



・熱電発電システム構成



④【技術開発の目標・リスク】

○想定ユーザ・利用価値:

トヨタ自動車EREV車向け、および欧米・中国・インド完成車メーカへEREV車とハイブリッド車用として供給可能。発電エンジンの燃費向上に寄与。

○目標となる仕様及び性能:

1.0～1.2LのEREV発電エンジンシステムでの発電能力300W以上、回収熱量6kWおよびトータル6%燃費改善、耐用年数10年。(従前は車載実用化条件未設定)、かつ熱発電電力利用率98%以上(従前は60%程度)

○開発工程のリスク・対応策:

コスト低減へのプロセスが重要。排気系部品と電力コンバータは量産効果が見通せる。熱電素子の材料費の高騰がシステム費用に直結するため、モジュール開発3社と発電素材の製造法などに踏み込み、車載実用化へのコスト低減要素を積極協議する。

(2)実施計画等

①【実施体制】

<代表事業者>

(株)三五

(熱発電装置の開発、総括)
熱発電装置の開発実績あり
熱電分野について10年間の業務実績あり
課題終了後の製品化・販売を担当

<再委託先>

三菱電機(株)

(排気熱発電専用電力コンディショニング開発)
熱発電専用電力コンバータ分野について3年間の業務実績あり。終了後は車載製品化を担当

<再委託先>

東京理科大学

(熱電モジュール安定化熱接合機構)
熱発電専用電力コンバータ分野について8年間の実用化開発実績あり。終了後は技術トランスファーと製品化試行を担当

協力会社・機関(外注先・委託研究先)

(株)フェローテック
昭和電線ケーブルシステム(株)
古河機械金属(株)
(株)アドバンスドナレッジ研究所
三重県工業研究所

(株)ロータスサーマルソリューション
日本パーカライジング(株)

岡山理科大学

(株)アドバンスドナレッジ研究所
KOA(株)

③【事業化・普及の見込み】

○事業化計画

事業化を担う主たる事業者 (株)三五

- ・2021年:車両メーカーへのステップアップ方式量産開始
- ・2024年:車両メーカーへの大規模量産開始

○事業展開における普及の見込み

- ・対象市場規模 ⇒トヨタ自動車EREV車向け、および欧米・中国・インド(電動車推進国)の完成車メーカーEREV車、PHEV車用の他にハイブリッド車用を含めOEM販売
- ・想定事業規模 ⇒年数100億円超の事業規模

○年度別販売見込み

(1.0~1.2LのEREV、PHEV発電エンジンで発電能力300Wシステム)

【提案時当初計画】 ※実施期間中における分科会等で計画変更が認められた場合等はその設定値

年度	2020	2025	2030
目標単年度販売台数(万台)	0	26.7	80
目標累積販売台数(万台)	0	26.7	304
目標販売価格(円/台)	0	50,000	45,000

【現時点見込み】

現時点見込みの年次は固定

年度	2025	2023	2030	2050
目標単年度販売台数(万台)	26.7	-	80	143.3
目標累積販売台数(万台)	26.7	-	304	2568.2
目標販売価格(円/台)	50,000	-	45,000	45,000

○普及におけるリスク(課題・障害)

- ・熱電モジュールのコストが安くない場合、新たなマーケットの掘り起こしが必要

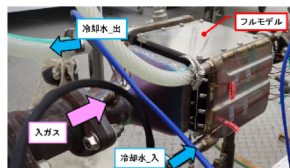
②【実施スケジュール】

要素技術・分担業務	H30年度				H31年度				H32年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
A1. EREV、ハイブリッド系用途熱交換器一体型熱発電装置の開発 熱抵抗低減型熱交換器開発と熱発電モジュール実装	設計	試作	評価	再評価	設計	試作	評価	量産化検討				
A1. EREV、ハイブリッド系用途熱交換器一体型熱発電装置の開発 熱発電モジュールのタンデム実装と発電出力向上		設計	試作	評価	設計	試作	評価	設計	試作	評価		
A1. EREV、ハイブリッド系用途熱交換器一体型熱発電装置の開発 耐熱化性と耐振動性の実証	初期検討	調整	試作	評価	調整	評価	調整	評価	調整	評価		
B. C. 開発要素の統合と実装・実証 システムの統合と実装実証			統合準備	評価			評価				評価	
小計	21,280千円				15,835千円				19,135千円			
A2. 排気熱発電専用電力コンディショニング回路の開発 熱発電電力出力整合の高効率電力変換器開発		変換器設計	試作・評価	改良設計	試作・評価	性能検証	最適化設計	インテグレーション	実証			
A2. 排気熱発電専用電力コンディショニング回路の開発 熱発電モジュール安定化回路		検証回路設計	試作・評価	仕様抽出	改良設計	試作・評価	高機能化設計	試作・調整				
小計	7,350千円				11,850千円				13,550千円			
A3. 高温域で安定動作させる熱接合機構の開発 可変熱伝達管方式熱接合機構の開発		計算・設計	1次試作	ラボ実証・計算改良	2次試作	ラボ実証	インテグレーション					
A3. 高温域で安定動作させる熱接合機構の開発 熱発電モジュール熱接合基板改良		設計	1次試作	検証	改良	2次試作	改良	3次試作	改良	4次試作		
小計	6,625千円				5,300千円				5,750千円			
その他経費	51,100千円				51,700千円				51,800千円			
合計(一般管理費除く)	86,355千円				84,685千円				90,235千円			

(3)技術開発成果

①【これまでの成果】

- ・1.0～1.2Lの定常運転するエンジンシステムへの搭載を想定し、フルモデルの試作品を製作。
- ・発電電力258W、熱回収量6kW以上を有する熱発電装置と、入力定格300W、システム効率90%で動作可能な電力コンディショニング装置との統合システム評価結果より、通期燃費効果6.05%を達成。



熱発電装置

②【エネルギー起源CO2削減効果】

【提案時当初計画】 ※実施期間中における分科会等で計画変更が認められた場合等はその設定値

開発品(装置/システム)1台当たりの単年度CO2削減量(t-CO2/台・年) ※2025年時(熱電装置販売開始時)	0.0686t-CO2/年
開発品(装置/システム)の法定耐用年数(新車の普通自動車)	6年

年度	2020	2025	2030
単年度CO2削減量(万t-CO2/年)	0	1.83	4.39
累積CO2削減量(万t-CO2)	0	10.98	118.56
CO2削減コスト(円/t-CO2)	0	121423	136736

【現時点見込み】

開発品(装置/システム)1台当たりの単年度CO2削減量(t-CO2/台・年) ※2025年時(熱電装置販売開始時)	0.0692t-CO2/年
開発品(装置/システム)の法定耐用年数(新車の普通自動車)	6年

現時点見込みの年次は固定

年度	2025	2030	2030	2050
単年度CO2削減量(万t-CO2/年)	1.85	-	4.42	7.92
累積CO2削減量(万t-CO2)	11.07	-	119.55	870.92
CO2削減コスト(円/t-CO2)	120420	-	135606	135606

③【成果発表状況】

- ・【人とクルマのテクノロジー展横浜】(2018年5月23日～25日、2019年5月22日～24日)「排気熱を有効活用する熱発電装置」(出展社:(株)三五)
- ・【オンラインセミナー】熱発電の技術／研究開発と応用・適用動向(2021年4月27日 技術情報社主催)
「IV. 熱発電モジュールを用いた太陽電池パネルの排熱回収および、熱発電モジュールの電力制御技術」(発表者:三菱電機 森岡孝之)

④【技術開発終了後の事業展開】

○量産化・販売計画(2022年度に車両OEMメーカーとのPJT化に移行できた場合)

- ・2022年より先行検討車両開発を開始
- ・2023年に、車両OEMメーカーと受注確定し、生産準備を進める
- ・2025年より大量生産を開始し、その後車種展開を開始すると共に、原価低減による競争力強化を進める

○事業拡大シナリオ

年度	2022	2023	2025	2030
先行検討車両開発	★PJT化			
仕入れ先決定		★受注確定		
生産準備～量産対応				★量産開始
原価低減				

○シナリオ実現上の課題

- ・提案時当初と比べて、従来の内燃機関車からBEVへの移行が大幅に加速しており、車両OEMメーカーはBEV向けに開発費を大幅にシフト
⇒内燃機関技術のアイテム提案はサプライヤー内である程度完結する必要がある、PJT化までの対応に遅れ発生
- ・カーボンニュートラルに向けた車両OEMメーカーの電動化動向(車種×パワートレイン動向)
- ・熱発電モジュールの低コスト化
- ・熱発電モジュールメーカーとの販売網拡大のための連携強化

○参考資料1 CO2削減効果について

○2023年時点の削減効果

- ・販売前により割愛

- ・1台当たりの年間CO2削減量(t-CO2/年) : (間走行距離 ÷ 燃費) × 開発品による燃費効果 × ガソリン排出係数 ÷ 1000
- ・単年度CO2削減量(t-CO2/年) : 1台当たりの年間CO2削減量 × 熱電システム販売台数
- ・累積CO2削減量(t-CO2) : 期待される普及台数 × 1台当たりの年間CO2削減量 × 法定耐用年数
- ・削減コスト(円/t-CO2/台) : 目標販売価格 ÷ (1台当たりの年間CO2削減量 × 法定耐用年数)

○販売開始年(2025年)時点の削減効果

- ・EREV国内潜在市場規模(2025年新車販売台数) : 28万台予測
- ・上記の内、熱電システムが搭載されるEREV販売台数 : 26.7万台
- ・熱電システムが搭載されるEREV累積普及台数 : 26.7万台
- ・開発機器(システム、モデル) 1台当たりの年間CO2削減量 : 0.0692t-CO2/年/台
- ・削減原単位 : 年間走行距離=10000km/年、燃費=20.3km/L、開発品による燃費効果:6.05%、ガソリン排出係数:2.322kg-CO2/L、年間CO2削減量=0.0692t-CO2/年/台
- ・単年度CO2削減量 : 1.85万t-CO2
- ・累積CO2削減量 : 11.07万t-CO2
- ・CO2削減コスト : 120420円/t-CO2/台 (目標販売価格=50000円/台、法定耐用年数=6年)

○2030年時点の削減効果

- ・EREV+PHEV国内潜在市場規模(2030年新車販売台数) : 168万台予測 (PHEVにも展開開始)
- ・上記の内、熱電システムが搭載されるEREV+PHEV販売台数 : 80万台
- ・熱電システムが搭載されるEREV+PHEV累積普及台数 : 304万台
- ・開発機器(システム、モデル) 1台当たりの年間CO2削減量 : 0.0553t-CO2/年/台
- ・削減原単位 : 年間走行距離=10000km/年、燃費=25.4km/L、開発品による燃費効果:6.05%、ガソリン排出係数:2.322kg-CO2/L、年間CO2削減量=0.0553t-CO2/年/台
- ・単年度CO2削減量 : 4.42万t-CO2
- ・累積CO2削減量 : 119.55万t-CO2
- ・CO2削減コスト : 135606円/台 (目標販売価格=45000円/台、法定耐用年数=6年)

○2050年時点の削減効果

- ・EREV+PHEV国内潜在市場規模(2050年新車販売台数) : 150万台予測 (人口減少・カーシェアリングなどにより規模減少)
- ・上記の内、熱電システムが搭載されるEREV+PHEV販売台数 : 143.3万台
- ・熱電システムが搭載されるEREV+PHEV累積普及台数 : 2568.2万台
- ・開発機器(システム、モデル) 1台当たりの年間CO2削減量 : 0.0553t-CO2/年/台
- ・削減原単位 : 年間走行距離=10000km/年、燃費=25.4km/L、開発品による燃費効果:6.05%、ガソリン排出係数:2.322kg-CO2/L、年間CO2削減量=0.0553t-CO2/年/台
- ・単年度CO2削減量 : 7.92万t-CO2
- ・累積CO2削減量 : 870.92万t-CO2
- ・CO2削減コスト : 135606円/台 (目標販売価格=45000円/台、法定耐用年数=6年)

○参考資料2 事業化計画について

一般的にトヨタ自動車を代表とする車両OEMメーカーによる新型自動車開発では搭載部品の選定から市販まで4年程度を要するが、現時点、対象PJTが決まっていないため、早急に車両OEMメーカーへの打診及びPJT化を進める。

仮に2022年度にPJT化へ移行できた場合の計画を以下に示す。

市販車への搭載による大規模量産は2025年度から開始する見込みであるが、受注後の先行検討車両における実証試験より

1次量産として以下に示すステップアップ方式量産を実施する。

車両メーカー新型車車載化に対応したステップアップ方式量産

2022年度～

(1)先行検討車用エンジニアリングサンプル供給用(20～200ユニット/年)

2025年度～

(2)車両メーカー車両適合取得 SOP(Standard Operating Procedure)ステージ
量産車搭載システム用(5,000～10,000ユニット/月)

事業化に向けた課題

- ・提案時当初と比べて、従来の内燃機関車からBEVへの移行が大幅に加速し、車両OEMメーカーはBEV向けに開発費を大幅にシフト
⇒内燃機関技術のアイテム提案はサプライヤー主体で完結する必要があり、PJT化までの対応に遅れ発生
- ・カーボンニュートラルに向けた車両OEMメーカーのパワートレイン動向
- ・熱発電モジュールの低コスト化及び販売網拡大のための連携強化

大日程	2022				2023				2024				2025			
	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12
仮PJT日程	☆PJT化 (RFQ発行)				☆仕入れ先決定 (量産開発移行)				☆正式図出図 ☆本型				☆本型・本工程 ☆量産開始			
生産準備	○先行検討車両開発															
	←> <車両への適合対応> ←>															
					←> <量産を見据えた設計> ←>											
									←> <性能・信頼性評価> ←>							
					●車載化に向けたサンプリング供給(量産)開始				○生産工場決定 ○内外製決定 ○生準確認、工程検討 ○仕入先決定							
量産準備													○量産試作移行 ○大量生産トライ			

規制当局関係者との調整等は不要、工場立地場所については仕向け先等PJTによって変更する

また、工場からのCO2排出量削減ニーズに対して、本事業の排気熱発電機構を流用できれば量産検討をする

○参考資料3 その他

カーボンニュートラル実現に向けて、車両走行時のCO₂排出量削減(図1)だけでなく、生産時のCO₂排出量削減も重要な取り組みになっている。
生産工場からのCO₂排出量削減ニーズに対して、本事業の排気熱発電機構の流用も検討している。

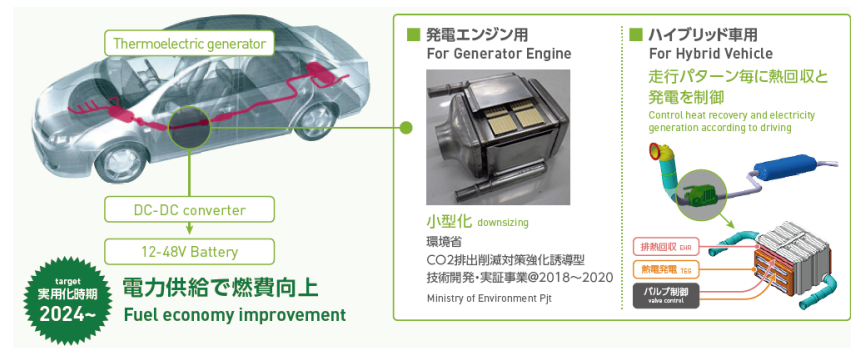


図1. 車両向け熱電発電装置

加熱炉からの廃熱を排気熱発電機構にて電力回生する机上検討状況(図2)を示す。
設備の廃熱からの発電で、多くのCO₂排出量を削減できる可能性を確認したが、
同時に実際の設備へ搭載した場合の影響も大きいことが分かっている。
今後、設備負荷の少ない構成等を調査し実現性を検討する。

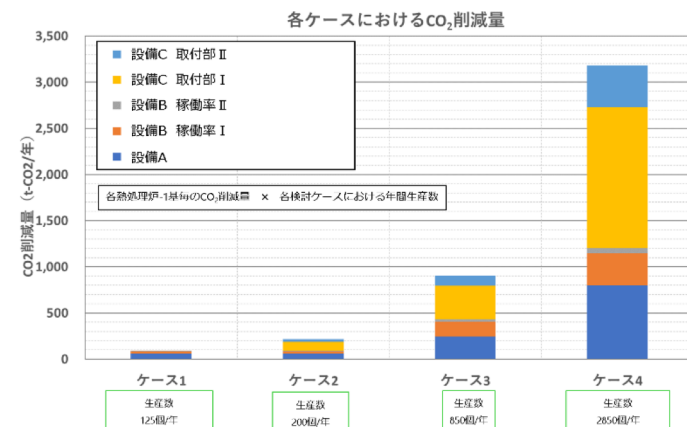
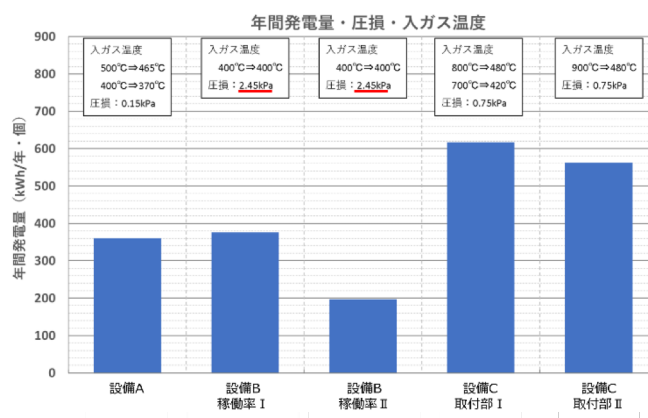
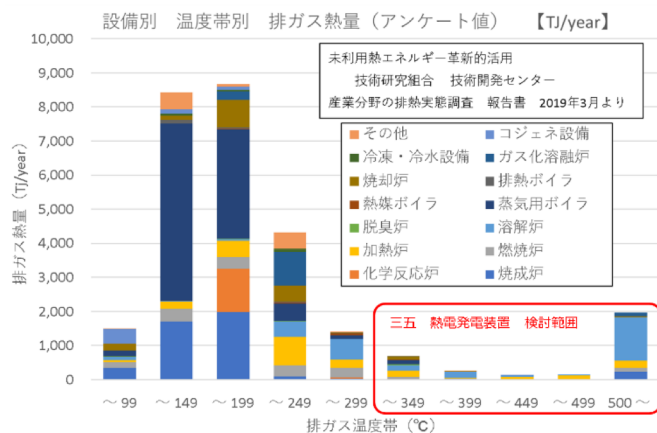


図2. 工場加熱炉向け熱電発電検討

CO2排出削減対策技術評価委員会による終了課題事後評価の結果

- ・ 評価点 6. 8点 (10点満点中。(10点:特に優れている、8点:優れている、6点:問題ない、4点:多少問題がある、2点:大きな問題がある))

・ 評価コメント

〔評価された点〕

- 発電機搭載EV(EREV)やプラグインハイブリッド(PHEV)の発電用エンジンからの未利用の排気熱を熱電発電システムで回生電力化する技術を開発し地道な改良を通じて、発電電力目標300Wに対して258W、燃費改善効果6.0%、十分な耐久性などを達成できており、CO2排出削減に寄与できる技術開発成果が得られている点は評価できる。

〔今後の課題〕

- 関連するコンポーネントを含むシステム全体を最適に集約し、コストダウンと車両への搭載性の確立を図った上で、燃費の改善に関わる費用対効果を明確にして自動車メーカーが採用可能なシステムとすることが必要である。さらに、本システムの製造過程を含めたLCAによるCO2排出量を算定して、これを車両で利用することによる優位性を明確にすることが望まれる。
- 開発技術の社会実装には、自動車メーカーで採用されることが不可欠である。そのためには、国内だけでなく日系以外の欧米・新興国の自動車メーカーも含め、技術協力が可能となるネットワークの構築や技術デモンストレーションによる認知度向上などの事業化に向けた取り組みを強化する必要がある。また、実車使用による開発技術の評価・検討を行い、普及展開に関する本質的な議論を自動車メーカーと進めることが重要である。提案時と比べて、従来の内燃機関車から電池を動力源とするBEVへの移行が大幅に加速していることから、自動車メーカーとのより緊密な情報交換が望まれる。
- 検討している加熱炉からの高温排気への適用について、設備への負荷が小さくなるよう工夫して自動車以外への応用も積極的に進めて欲しい。

〔その他特記事項〕

- 熱電発電装置の発電量が目標値を下回った点は残念である。また、従来のエンジン車両を前提とした熱発電装置という位置づけであり、CO2排出削減に対するインパクトがやや弱いように受け取られる。CO2削減に貢献できることを定量的に示し、発信することが必要である。
- 技術成果の対外発表が少ない。技術をPRするうえでも、積極的な対外発表が求められる。

〔事業化に向けたコメント〕

- 開発したシステムの事業化と本格的な普及に当たっては、システム全体のコスト、車両への搭載性、燃費改善に関わる費用対効果、製造過程を含めたLCAによるCO2排出量を明確にし、自動車メーカーと連携して、このシステムを車両で利用することによるメリットを明確にすることが望まれる。
- 自動車メーカーと情報交換を行い、費用対効果の値、熱電発電システムの使い方を確認したとあるが、それらに基づき開発技術の事業化へ向けた計画を検討すべきである。あわせて、熱発電モジュールの低コスト化などの自動車メーカーの要求課題を明確にすべきである。
- EV開発は自動車メーカーにおいて最も重要な分野になっており、EREVやPHEVも戦略や差別化要素は多様なものとなっている。そこで、低コストで航続距離の向上や小型化が可能であることなどの開発技術のメリットを自動車メーカー各社に幅広く訴求して、戦略的に合致するパートナーを早期に見つけることに注力すべきである。