

【課題名】 各種産業活動における脱炭素に向けたアンモニアを燃料とする小型内燃機関利用技術開発(委託)

【代表者】 株式会社豊田自動織機 竹内秀隆

【実施年度】令和3～令和4年度(令和5年3月終了)

(1) 技術開発・実証の概要

①【課題の概要・目的】

CO₂削減に向けアンモニアを直接利用する試みは、ガスタービンなど大型プラント向けに進められている。しかしながら、産業界では用途・使用環境・インフラ整備状況は様々であり、電化が難しい中小型の動力源も存在する。本事業においては、このような分野において内燃機関を対象に脱炭素を進める技術を開発・実証することを目的とする。アンモニアは燃焼性が悪いため他の燃料との混焼が検討されているが、ここではコストや利便性の観点から、アンモニア単体で利用可能なエンジンシステムを開発する。なお、エンジンに要求される動力性能や排気特性をクリアしたエンジンシステムを実証した例はこれまでに無い*。

(※当社調べ)

②【技術開発・実証の内容と成果】

○重要な開発要素

A1.【改質触媒早期暖機システムの開発】

オンボード改質にて得られる水素によって、アンモニア利用の課題である燃焼性を改善するシステム構成であるが、改質触媒の暖機が必要となる。早期に触媒暖機する手段として電気ヒータなどを開発。

(実用化レベルに2023年到達)

A2.【燃焼改善技術の開発】

安定燃焼には水素が必要だが改質反応に伴う熱損失が課題である。少量の水素にて安定燃焼させる手段として、改質ガス合流部の最適化ならびにガスエンジンで実績のある副室燃焼技術を検討。

(実用化レベルに2024年到達)

A3.【排気抑制制御技術の開発】

燃焼排気ガス中の未燃アンモニアと窒素酸化物対策として、三元触媒が適用できることや浄化ウィンドウが狭いことを確認している。要求される運転領域で三元触媒の性能を発揮するための空燃比制御技術を確立。

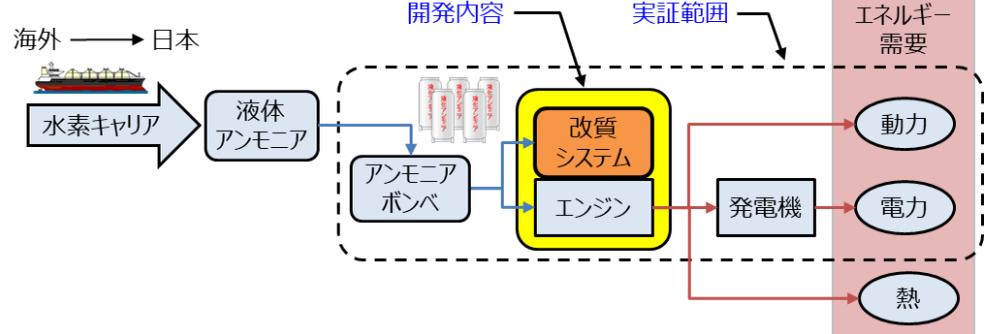
(実用化レベルに2023年到達)

BおよびC. 開発要素のシステム統合と実証

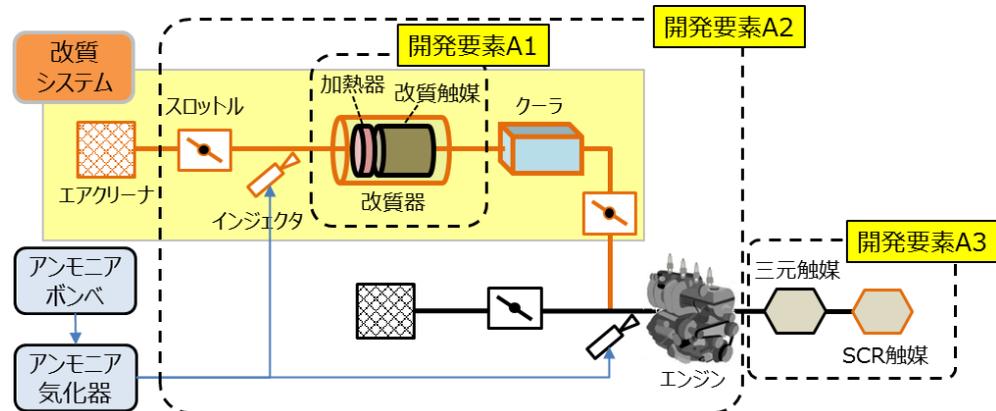
要素技術の統合については、水素生成量の変動に伴う失火やノッキングなどが課題となるが、空燃比制御で対策が可能であると考えている。また、エンジンシステムに付加する、アンモニア気化器や改質触媒、インジェクタなどによっては、エンジンコパートメントへパッケージできない可能性がある。これについては、ベンチ評価の解析結果を参考にしながら、搭載検討を行うことや、設計に必要な評価項目を適宜追加するなど柔軟に対応。

③【システム構成】

・システム環境



・システム構成



④【開発・実証成果のまとめ】

○開発・実証の目標及び達成状況:

- ・エンジン性能: 始動時間3.8秒以内、出力48.6kW、熱効率32.4%
- ・排気特性: アンモニア24ppm以下、窒素酸化物52ppm以下 (目標達成率100%を達成)

○想定ユーザ・利用価値:

アンモニアは容易に液体化できLPG同等のハンドリングが可能であること、燃料価格が比較的安価となる見込みであることなどから、従来のエンジンと使い勝手は大きく変えずに、CO₂ゼロを安価に実現したいユーザを想定している。

(2) 技術開発・実証の実施内容

①【実施体制】

技術開発代表者

(株)豊田自動織機

(統括・システム設計・制御開発)

10年間に渡るアンモニア改質
技術開発およびエンジン分野で
50年以上の開発・販売実績

課題終了後の製品化・販売を担当

共同事業者

大阪ガス(株)

(燃焼改善開発・システム評価・解析)

30年以上に渡る副室式ガスエンジン
研究開発およびガスエンジン搭載製品の
販売実績

協力者

(株)豊田中央研究所

(始動技術開発・システム評価・解析)

アンモニア燃焼分野にて10年以上の
開発実績

②【実施スケジュール】

	令和3年度	令和4年度
A1: 改質触媒早期暖機 システムの開発	19,965千円	4,731千円
A2: 燃焼改善技術の開発	105,125千円	54,692千円
A3: 排気抑制制御技術の開発	27,031千円	0千円
B: システム統合	14,278千円	70,313千円
C: 実証	0千円	63,452千円
その他経費	0千円	0千円
合計	166,399千円	193,188千円

③【成果発表・特許取得状況】

・プレスリリース

令和3年7月16日 大阪ガス(株)より「脱炭素社会に向けたアンモニア燃料用
小型エンジンシステムの技術開発・実証について」 他 計2件

・学会発表 論文発表

令和5年5月24~26日 自動車技術会春季大会「アンモニア単一燃料
エンジンシステム 第1報~第3報」(株)豊田自動織機 竹内 他 他 計6件

・特許出願実績

特願2021-208033 エンジンシステム 出願人:(株)豊田自動織機 他 計6件

(3) CO₂削減効果の評価

【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

開発品搭載製品1台当たりの CO ₂ 削減量(t-CO ₂ /台・年)	発電機	トラクタ	フォークリフト	油圧ショベル
	11.2	8.0	32.9	13.6
開発品搭載製品の耐用年数(年)	15	7	4	8

年度	2027 (販売開始)	2025	2030	2050
CO ₂ 削減量(万t-CO ₂ /年)	1.4	0	24.6	442.2
累積CO ₂ 削減量(万t-CO ₂)	8.9	0	155.0	7972.7
CO ₂ 削減コスト(円/t-CO ₂)	4,875	-	4,875	4,387

【本資料作成時点見込み】

開発品搭載製品1台当たりの CO ₂ 削減量(t-CO ₂ /台・年)	発電機	トラクタ	フォークリフト	油圧ショベル
	11.2	8.0	32.9	13.6
開発品搭載製品の耐用年数(年)	15	7	4	8

年度	2027 (販売開始)	2030	2050
CO ₂ 削減量(万t-CO ₂ /年)	1.4	24.6	442.2
累積CO ₂ 削減量(万t-CO ₂)	8.9	155.0	7972.7
CO ₂ 削減コスト(円/t-CO ₂)	4,875	4,875	3,412

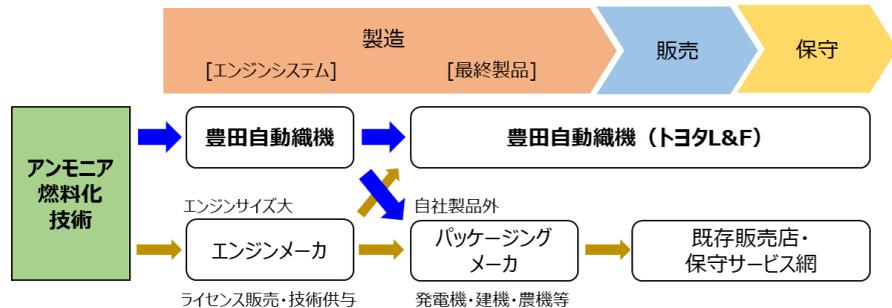
注. CO₂削減量は、グリーンアンモニア使用を想定し、システム導入に伴う削減率
を100%として上記を記載
仮にCO₂回収率70%のブルーアンモニアを使用した場合の試算では、CO₂削減量
は60%弱と試算される

(4)事業化について

【事業化計画】

○事業化の体制

事業化を担う主たる事業者	・株式会社豊田自動織機 ・エンジンメーカ(技術供与先)、パッケージャ(外部)
--------------	---



○事業展開における普及の見込み

- ・対象市場規模：20万台/年(エンジン搭載製品)
- ・導入コスト目標：50万円/台(アンモニア燃料化システム分)
- ・運用コスト目標：ガソリン同等以下の燃料価格
- ・製品単年回収年数(フォークリフト ローリ配送での試算例)
ブルーアンモニア(CO₂回収率70%)：1年未満
グリーンアンモニア(炭素税5,000円/t-CO₂)：6.1年

○年度別販売見込み

【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	販売開始年度	2023	2030	2050
目標販売台数(台)	2030	0	400	20,000
目標累積販売台数(台)	2030	0	400	300,000
目標販売価格追加分(円/台)	2030	-	500,000	450,000

【本資料作成時点見込み】

年度	2027 (販売開始)	2030	2050
目標単年度販売台数(台)	400	4,000	20,000
目標累積販売台数(台)	400	7,000	360,000
目標販売価格追加分(円/台)	500,000	500,000	350,000

○量産化・販売計画

- ・2025年までに、エンジン機能・耐久試験によるロバスト性開発
- ・2026年までに、客先機台での各種評価
- ・2027年を目処として、生産準備・サービス体制構築
⇒ フェーズイン販売開始
- ・2030年より本格量産開始

○事業拡大シナリオ

目標累積販売台数(台)

年度	2027	2030	2050 (最終目標)
高耐久性 技術開発	440	7,700	396,000
小型化 技術開発	600	10,500	540,000
ゼロエミッション 技術開発	792	13,860	712,800

○事業化におけるリスク(課題・障害)とその対策

商品力強化に向けた開発

- ・改質触媒の耐久性向上に向けた材料開発
- ・搭載性向上に向けた改質システム小型化のための要素技術開発
- ・排気ガス規制対応に向けたゼロエミッション技術開発

各種規制/基準の整備、規制緩和

- ・搭載機器OEM業界における排気規制の制定と同規制への準拠開発
- ・安全性に関する指針(監督省庁主導で業界連携も必要)
- ・アンモニア輸送に関する規制緩和(トラックでのトンネル通行制限等)

燃料アンモニア使用に対する認知度向上

- ・既存石油系燃料比で価格増となることへの支援
(機器初期費用・燃料ランニング費用)
- ・OEMならびに機器エンドユーザの“劇物”に対する啓蒙活動
(グリーンアンモニアの流通・ハンドリング環境などを含む)

開発要素のシステム統合と実装 トーイングトラクター



図4-1. トーイングトラクター エンジンコンパートメント(改造前)



図4-2. トーイングトラクター エンジンコンパートメント(改造後)



図4-3. トーイングトラクター外観(改造後、左前視)



図4-4. トーイングトラクター外観(改造後、右後視)

開発要素のシステム統合と実装 発電機

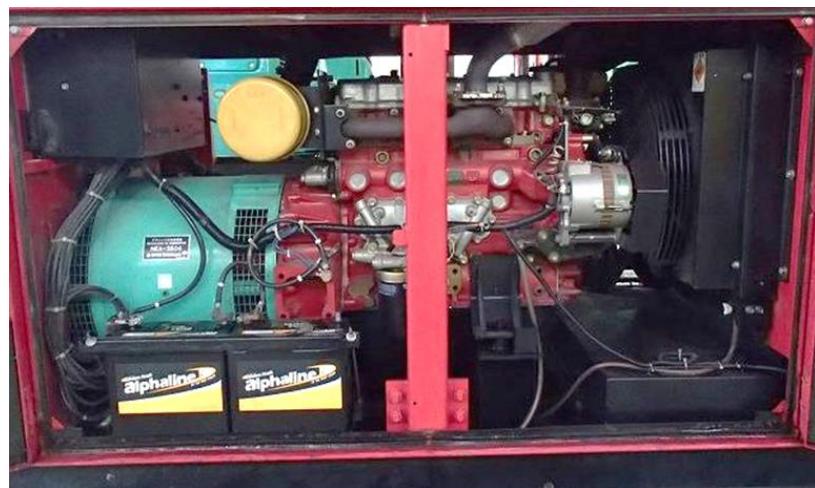


図5-1. 発電機 エンジンコンパートメント(改造前)



図5-2. 発電機 エンジンコンパートメント(改造後)



図5-3. 発電機外観(改造後、右前視)

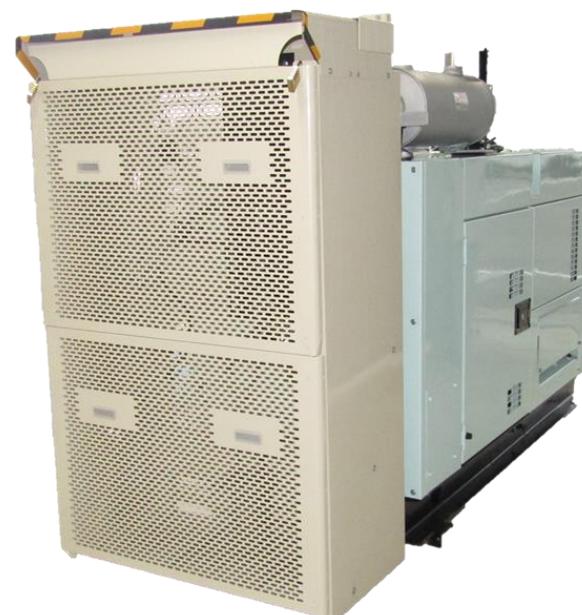


図5-4. 発電機外観(改造後、左後視)

○競合技術の開発状況／開発技術の優位性

- ・現在産業界ではエンジンの他に、蓄電池や燃料電池にモータを組み合わせた電動パワーユニットが利用されている。蓄電池や燃料電池の性能向上や価格低下に伴い電動化割合が増えているが、使用環境や製品サイズ・出力などの観点で棲み分けされている(図6参照)。
- ・都市部や屋内使用であれば排気や静寂性の観点から、電動ユニットが利用されることもあるが、高い出力が要求される領域ではエンジンが選択される。また、郊外・屋外であれば充電や水素充填環境(インフラ)が無いこと、騒音はそれほど気にされないため出力が低くてもエンジンが選択される。本開発は、出力自由度が高いなどエンジンの持つ強みを最大限利用する。
- ・Tank to Wheelの観点でCO₂排出がゼロであるパワーユニットの強みと弱みを『化石燃料エンジンを基準』として比較した(表3参照)。それぞれに特徴があり、すべての要件を満足するパワーユニットはない。電動ユニットの出力や駆動時間は技術的にエンジン同等とすることが可能だが、現状では大幅なコストアップが否めない。システムコストを抑えつつ高出力が維持できることがアンモニア燃料エンジンの強みである。
- ・燃料の側面(Well to Tank)では、グリーンアンモニアを燃料とすればCO₂排出量はほぼゼロとなる。燃料供給の観点では、副生水素供給拠点もしくは高圧充填設備(インフラ)近くであれば燃料電池は安価に運転できるが、インフラ整備が困難な離散した現場では、輸送や貯蔵効率(低圧で液化)に優れるアンモニアが、流通も含めてLPGインフラを活用できるなどの点で好適である(図7参照)。

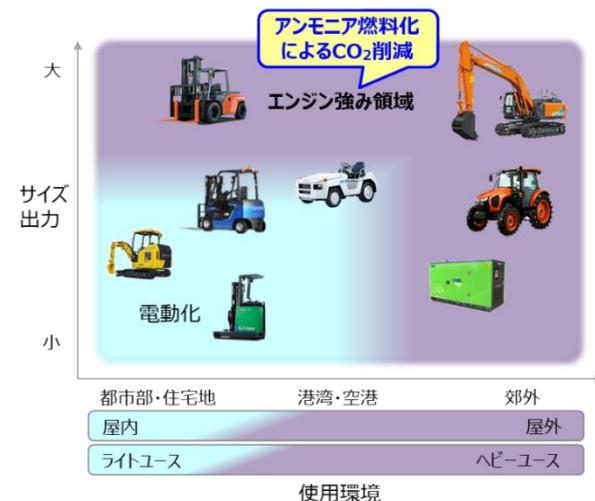


図6 パワーユニット棲み分け

表3 パワーユニット比較

パワーユニット	蓄電池+モータ	燃料電池+モータ	アンモニア燃料エンジン
システムコスト	蓄電池が高い(特に高容量型)	燃料電池が高い(低価格化は進む)	若干高い(追加部品のみ)
ランニングコスト	電気代が安い(電池交換有なら同等)	安い(将来30円/Nm ³ 想定)	同等(ガソリン・軽油同等想定)
出力・馬力	低下(技術的に同等可だがコストUP)	低下(技術的に同等可だがコストUP)	若干低下(アンモニア物性)
燃料補給・充電	時間がかかる	同等	同等
インフラ	既存利用可能(充電時間大)もしくは電力系統増必要	高圧充填設備必要(定置式もしくは移動式)	工業利用の流通網を利用(タンクローリもしくはポンペ)
排気	無し	無し(水のみ)	同等(煤は出ない)
騒音	静か	静か	同等
Well to Tank CO ₂ ゼロ化	難しい(日本エネルギーmix次第)	容易(グリーン水素利用)	容易(グリーンアンモニア利用)

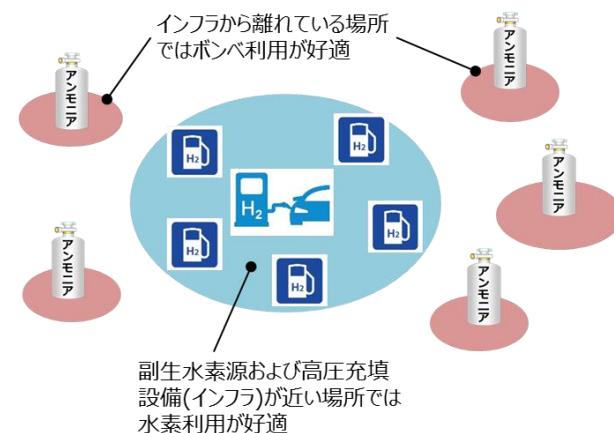


図7 燃料利用の適材適所

事後評価結果

評価点 6.9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

[評価される点]

- ・ 水素キャリアの有力候補であるアンモニアを燃料とする小型エンジンシステムの開発事例が少ない現状で、燃焼性の悪いアンモニアを内燃機関で使用可能にする技術開発として、小型アンモニアエンジンが実用化の見込める段階であることを実証したことは評価できる。
- ・ 本技術は、産業プラントにおける発電機のエンジンやトローイングトラクター等の移動体エンジンとして様々な分野に応用できる可能性があり、社会の脱炭素化を進める技術開発として評価できる。

[今後の課題]

- ・ 冷始動や暖機、アイドルも含めたエンジンの運転条件に対応した改質するアンモニア割合を最適に制御する方式を確立した上で、改質触媒システムや排出ガス後処理装置の信頼性・耐久性をさらに改善する必要がある。さらには、エンジン全体のコスト低減を行うことが、本エンジンシステムの実用化の鍵であり、これらに留意して早期に販売を開始することが望まれる。
- ・ 開発したエンジン用の燃料としてアンモニアを使うことに対して、①アンモニアの取扱いについて利用者への啓蒙活動を進めること、②アンモニアに関連する規制緩和について必要な事項を監督官庁へ伝えること、③ブルーアンモニア・グリーンアンモニアの早期普及に向けて、供給量の確保やサプライチェーンの整備に努めること、を開発システムの事業化と併せて実施することが望まれる。

[その他特記事項]

- ・ 中国がけん引する形で蓄電池の価格は再び低下傾向を示しており、蓄電池とモーターの組合せの適用範囲が広がる可能性がある中で、小型アンモニアエンジンが強みを持つ用途の範囲を明確化するとともに、アンモニアエンジンシステムの特徴と有用性を利用者にアピールして普及を目指すことが期待される。

[事業化に向けたコメント]

- ・ 実用化を進めるには、まず自社内での発電システム等の利用を通じて改善を図りながら、アンモニアエンジンの実績を上げることが望ましい。また、コージェネレーションシステム等の動力源としての応用可能性も検討することが期待される。
- ・ アンモニアエンジンの普及のためには、特定分野での用途を起爆剤とすることも重要となり、脱炭素化を進める政府、需要開拓の役割を担う商社、アンモニアエンジンシステムを供給するメーカーが一体となって、そのような特定の応用分野の開拓を進めることが期待される。
- ・ 事業化計画において、燃料アンモニアについては2027年時点でJERAのブルーアンモニアの一部を転用することを想定しており、政府が実施する値差支援を受けることができれば、ある程度安価なアンモニアを利用できることが見込まれる。一方で、数量、立地等の観点からこのアンモニアの利用者が限定される可能性もある。こうした状況で、アンモニアのサプライチェーンによる制約を事前に把握して、可能な範囲でより多くの利用者が安価なアンモニアを利用できるように取り組むことが望まれる。