

地域共創・セクター横断型カーボンニュートラル技術開発・実証事業
令和5年度 成果発表会

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

令和6年1月15日

株式会社豊田自動織機 竹内 秀隆

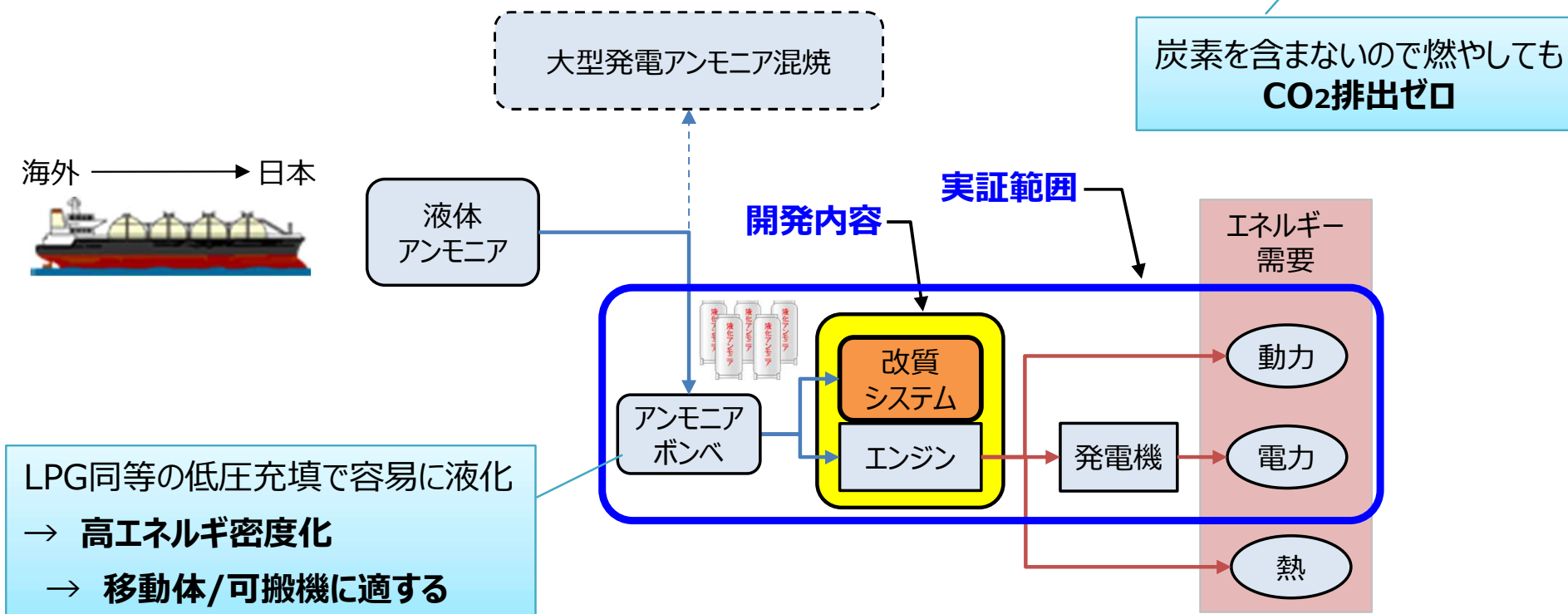
1. 技術開発の概要
2. 技術開発の経過と成果
3. CO₂削減効果
4. 事業化の取組み
5. 開発成果の発信

1. 技術開発の概要

1 -1) 開発と実証の範囲

開発内容： アンモニア(NH₃)を燃料とする小型レシプロエンジン

現在のNH₃利活用状況： 化学肥料、化成品、窒化处理、CVDなど ⇨ 将来：液体燃料として活用



産業界広く普及するエンジン機器からのCO₂削減を目指す

1. 技術開発の概要

1 -2) 燃料アンモニアの利点と課題

利点

Tank to WheelでCO₂排出ゼロ

ライフサイクルでは、製造方法により排出量が異なる

8.5気圧で容易に液化(液体燃料)

LPGと同様、可搬性に優れる

肥料・化成品原料としての利用実績・流通網

スケールアップは必要だが、運用/運搬技術は確立済

課題

著しく遅い燃焼速度(難燃性燃料)

技術
開発

強烈な刺激臭(劇物)

NH₃のみ供給

**広い回転数および負荷域において
過渡変化も含め
冷間始動時から暖機後まで
未燃NH₃を排出しない
エンジンシステムの構築**

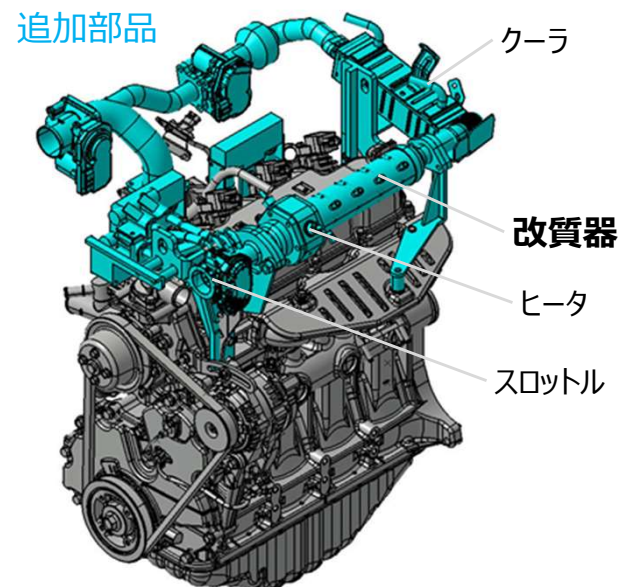
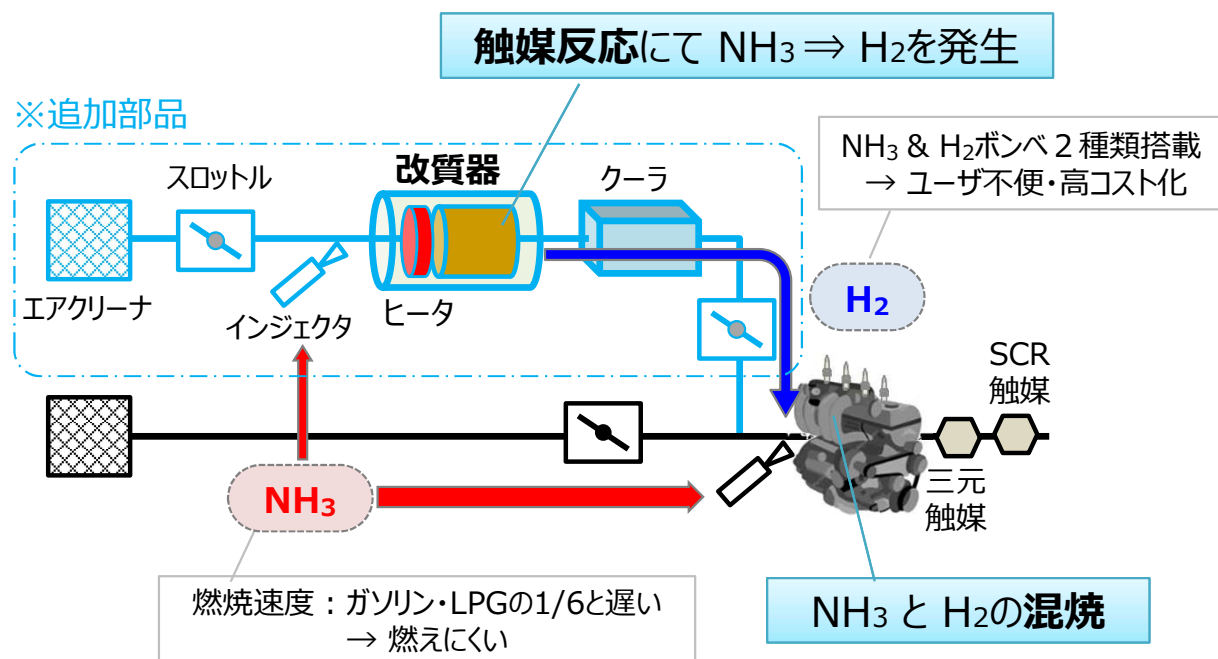
内燃機関によるCO₂ゼロ化に向けた選択肢の1つを提供

1. 技術開発の概要

1 -3) エンジンへの適用システム

オンボードNH₃改質システム

触媒反応により、**難燃性NH₃**から**易燃性H₂**を取り出し、
助燃材としてエンジンへ供給



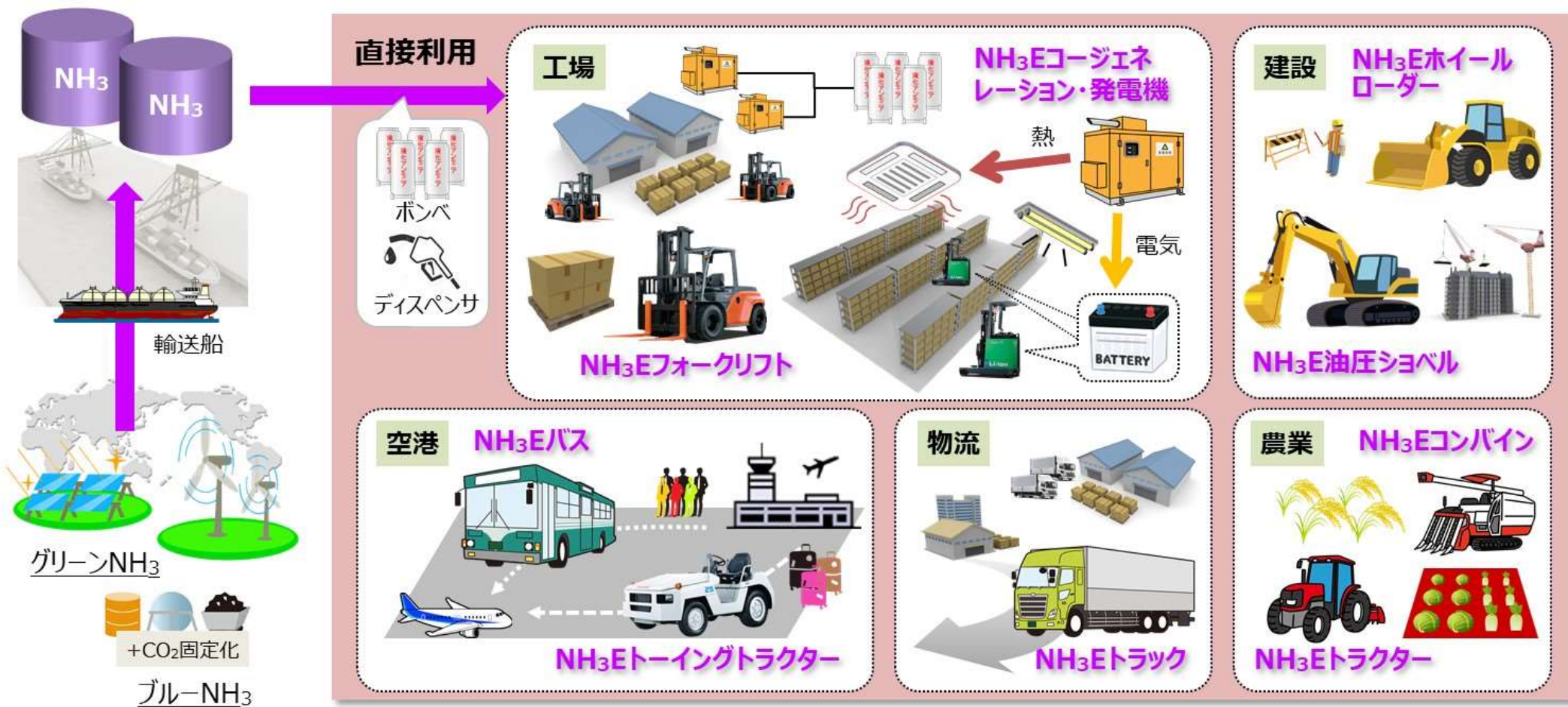
エンジンシステム外観図

NH₃燃料のみで『始動～運転～停止』・『通常エンジン相当の使用範囲』を実現

2. 技術開発の経過と成果

2-1) 社会実装イメージ

※NH₃E：アンモニアを燃料としたエンジンシステム



NH₃は劇物となるため広く一般市民が使うものではなく、適切な管理・運用できる**プロ向け**を想定

2. 技術開発の経過と成果

2 -2) 技術開発・実証項目

【A1】改質触媒早期暖機システムの開発

【A2】燃焼改善技術の開発

【A3】排気抑制制御技術の開発

【B,C】システム統合及び実証

◆実証機

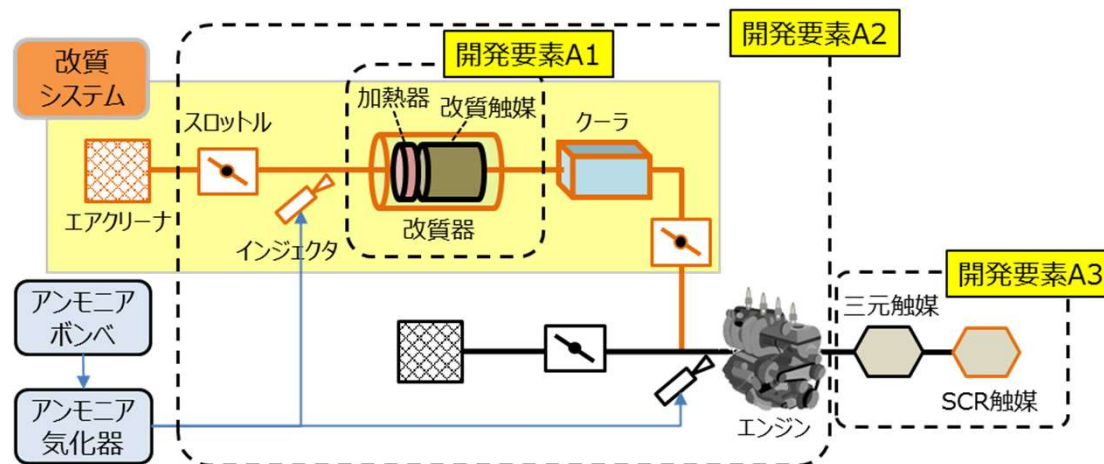


可搬形発電機



トーイングトラクター

◆システム構成



2 -3) 開発体制

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

共同事業者

大阪ガス(株)

燃焼改善開発・システム評価・解析

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

2. 技術開発の経過と成果

2 -4) 本委託事業の実施スケジュール

実施機関	技術開発項目	目標	令和3年度				令和4年度			
チーム全体		アンモニア単一燃料にて始動～運転～停止が可能なエンジンシステムを実証する								○
株式会社豊田自動織機	A1	始動時間：4秒以内	改質触媒早期暖機の開発				改質触媒早期暖機の開発			
チーム全体	A2	熱効率：32%以上	改質ガス合流部の最適化				燃焼室副室化による燃焼改善			
							シミュレーション性能予測			
チーム全体	A3	排気濃度 ・アンモニア：25ppm以下 ・窒素酸化物：100ppm以下	排気抑制制御の開発							
チーム全体	B,C	・始動時間：4秒以内 ・出力：47kW以上 ・熱効率：32%以上 ・排気濃度 アンモニア：25ppm以下 窒素酸化物：100ppm以下	搭載機選定				システム搭載機試作			
			実装設計				システム性能評価			
							システム搭載機評価			

2. 技術開発の経過と成果

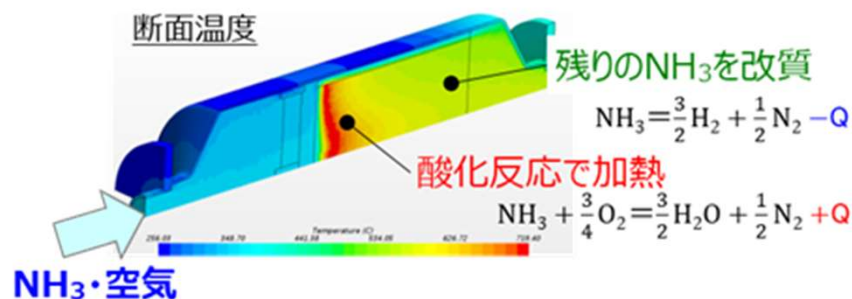
2 -5) 開発項目A1： 改質触媒早期暖機システムの開発

(1) 自己熱式改質器（ATR：Auto Thermal Reforming）

本事業前の実施内容

NH₃・空気の混合気を導入することにより、
触媒反応にて**一部のNH₃が酸化**(燃烧)し、
発生した燃烧熱を利用して**残りのNH₃が
水素へ改質**することを特徴とする。
但し、冷間時のみ外部からの加熱が必要

【作動イメージ】

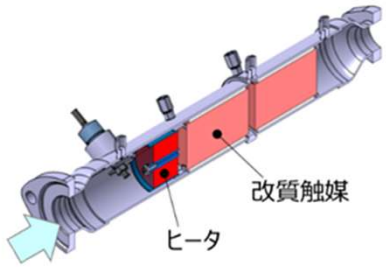
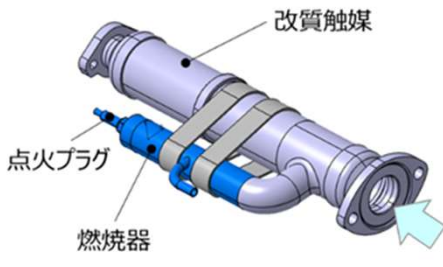


(2) 暖機システム

触媒の早期加熱方式 2種を検討

いずれの方式でも、目標とした
**始動時間※(4秒以内)を満足する
始動条件を見出した**

※常温状態にてイグニッションONから
回転数1000rpmに到達するまでの所要時間

方式	電気加熱式	燃烧加熱式
図		
メリット	安定加熱	起動時間・コスト
デメリット	事前加熱時間・電力消費・コスト	安定着火

事前加熱は必要だが、確実な始動が可能な**電気加熱式を実証機へ採用**

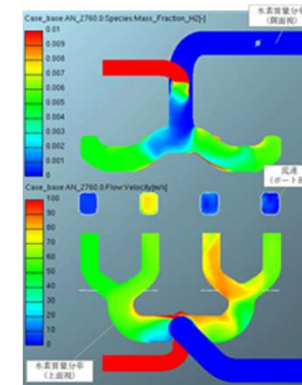
2. 技術開発の経過と成果

2 -6) 開発項目A2： 燃焼改善技術の開発

少量の水素にて安定燃焼させる手段として、以下2項目を実施

(1) 改質ガス合流部の最適化

シミュレーション(3D-CFD)により対策部品を設計・試作を行い、**実機にて改善効果を確認**



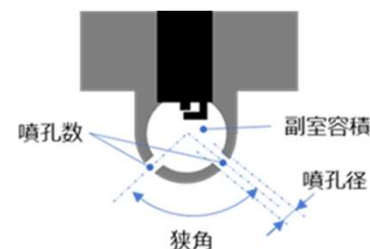
3D-CFD解析結果

(2) 副室燃焼技術の検討

実験計画法に基づき、**副室諸元の影響**
評価を単筒エンジンにて実施
圧縮比/燃焼室形状の影響も調査

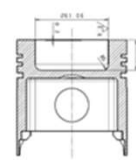
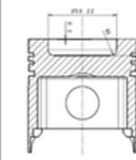
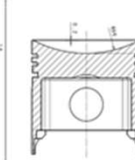
1次元系のサイクルシミュレーション
により、効果代(正味熱効率)を算出
⇒ +0.4pt(32.9%)を確認

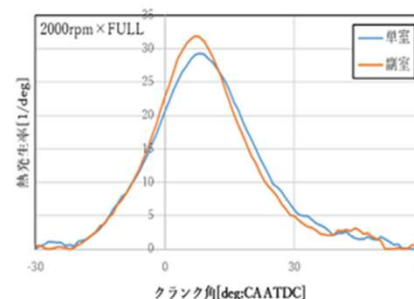
※実証機への搭載はせず、効果確認までが契約範囲



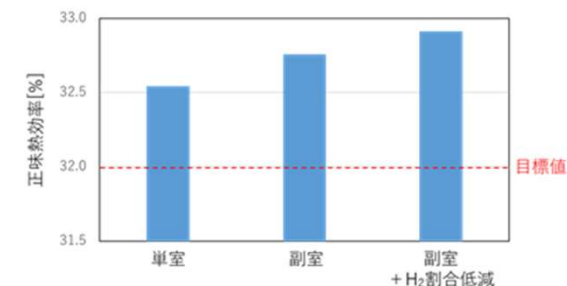
パッシブ型の副室諸元

圧縮比/燃焼室形状

燃焼室形状	バスタブ型	バスタブ型	浅皿型
圧縮比	9	16	16
キャビティ方向 最大スキッシュ流速	13.5 m/s	13.5 m/s	-
表面積	110 cm ²	87 cm ²	69 cm ²
形状			



熱発生パターン(実験値)



熱効率の計算結果

- ・必要水素量の低減 と 燃焼変動の抑制を確認
- ・熱効率改善には、高圧縮比化の効果が大きい

2. 技術開発の経過と成果

2 -7) 開発項目A3： 排気抑制制御技術の開発

(1) 排気浄化システム

本事業前の実施内容

一般的な三元触媒とその未活性時に通過する NH_3 を吸着する目的で**SCR触媒を組み合わせ**

始動時の NH_3 排気対策(SCR触媒の使いこなし)については目途付け完了

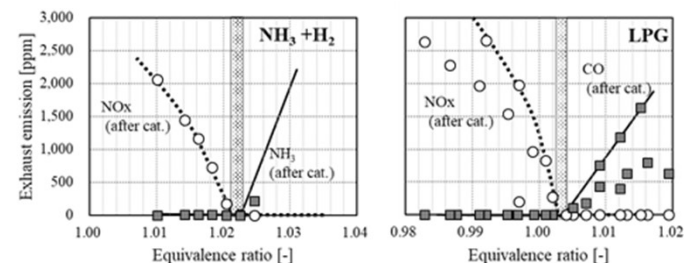
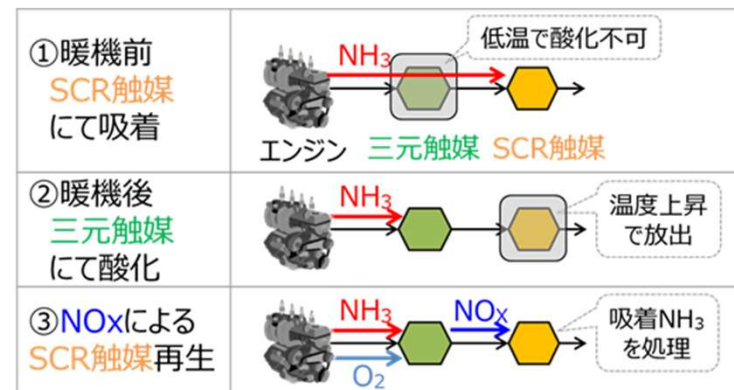
三元触媒の活性時に**浄化ウィンドウ幅はLPG同等**であり、**空燃比センサを用いた制御で対応可能**

(2) 空燃比センサを用いたフィードバック(F/B)制御

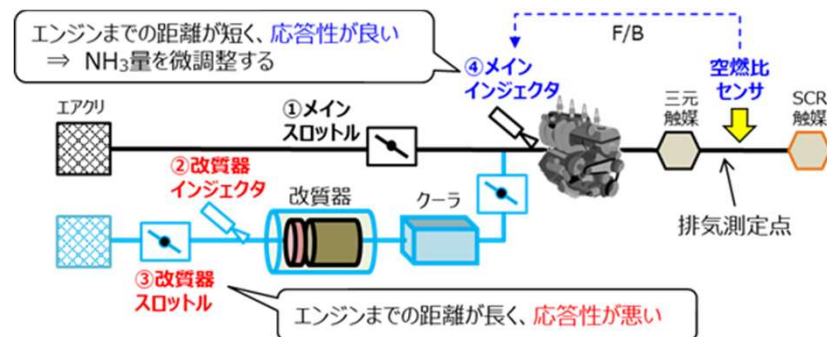
本エンジンシステムへの適用のため、F/Bパラメータを設定/調整し評価

排気浄化可能な空燃比制御ロジックを確立
⇒ ECUに落とし込み

未燃 NH_3 漏洩防止の考え方



排気浄化ウィンドウ



空燃比を決めるデバイス

2. 技術開発の経過と成果

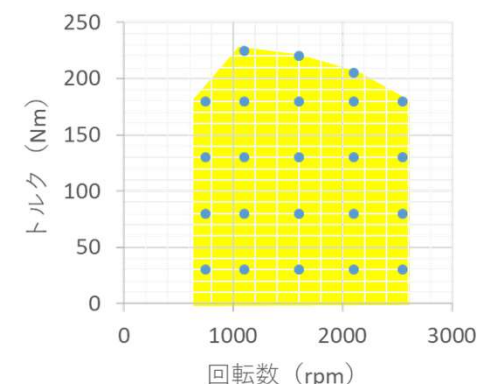
2 -8) 開発項目B,C： システム統合及び実証

(1) テストベンチでの性能評価結果

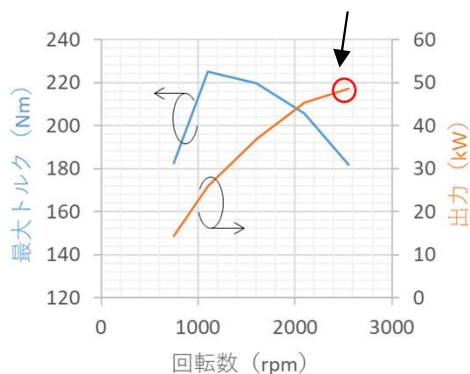
エンジン性能の定量化はテストベンチにて実施

項目		目標値	結果	判定
出力		>47 kW	48.6 kW	○
熱効率		>30%	32.4%	○
排気濃度	NH ₃	<25 ppm	<24 ppm	○
	NOx	<100 ppm	<52 ppm	○

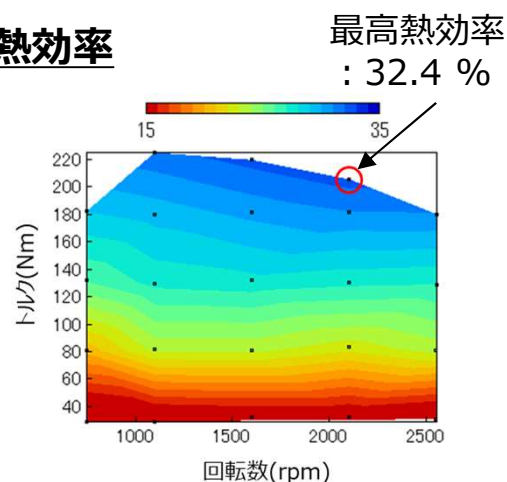
運転領域と測定点



トルク・出力



熱効率



排気濃度 (三元触媒後)

○ 各最大濃度 [NH₃ / NOx] (ppm)

トルク (Nm)	回転数(rpm)				
	750	1100	1600	2100	2550
最大	↓	4 / 32	9 / 30	12 / 4	↓
180	8 / 20	11 / 52	22 / 30	16 / 6	9 / 14
130	20 / 28	11 / 25	12 / 30	18 / 17	23 / 3
80	23 / 32	14 / 41	11 / 4	11 / 25	13 / 14
30	24 / 18	1 / 14	11 / 0	8 / 34	16 / 15

※一桁は検出下限のため参考値

目標達成率100%

2. 技術開発の経過と成果

2 -8) 開発項目B,C： システム統合及び実証

(2) 可搬形発電機への実装

搭載されているディーゼルエンジンを外して、
NH₃エンジンシステムを実装



エンジンコンパートメント内比較



(3) 可搬形発電機の性能評価結果

目標管理項目

測定項目	目標値	測定値	評価
始動時間	4sec以下	3.8sec	○
簡易排気濃度	25ppm以下	10ppm*1	○
振動・騒音	著しい悪化なし	著しい悪化なし (官能のみ)	○

* 1：簡易濃度計のため水蒸気を含めて検知している可能性あり

性能測定結果

測定項目	測定値	備考
整定周波数変動率	1.7%	60Hz, 220V出力時
最大周波数変動率	-36.0%	50Hz, 0→60%負荷投入時

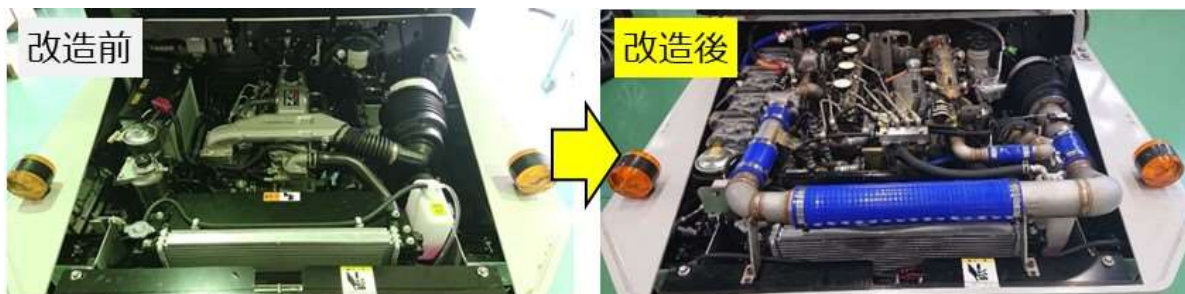
定常運転は実用上問題ないが、過渡特性の向上は必要

2. 技術開発の経過と成果

2 -8) 開発項目B,C： システム統合及び実証

(4) トーイングトラクターへの実装

搭載されているディーゼルエンジンを外して、
NH₃エンジンシステムを実装



エンジンコンパートメント内比較



(5) トーイングトラクターの性能評価結果

目標管理項目

測定項目	目標値	測定値	評価
始動時間	4sec以下	3.3sec	○
簡易排気濃度	25ppm以下	14ppm*1	○
振動・騒音	著しい悪化なし	著しい悪化なし (官能のみ)	○

* 1：簡易濃度計のため水蒸気を含めて検知している可能性あり

性能測定結果

測定項目	測定値
最高速度	30.2km/h
加速性	6.8sec(Dレンジ 20m)
16tonけん引速度	19km/h
最大けん引力	27825N

市販車に比べると加速性能は低い、けん引性能は実用上問題ない

2. 技術開発の経過と成果

2 -8) 開発項目B,C : システム統合及び実証

(6) トーイングトラクターの実証運転 動画



エンジン車なのにCO₂排出ゼロ ・ アンモニア臭なし ・ 普通に使える機器

3. CO₂削減効果

3 -1) 使用時の削減効果

炭素を含まないため、CO₂削減量は100%である

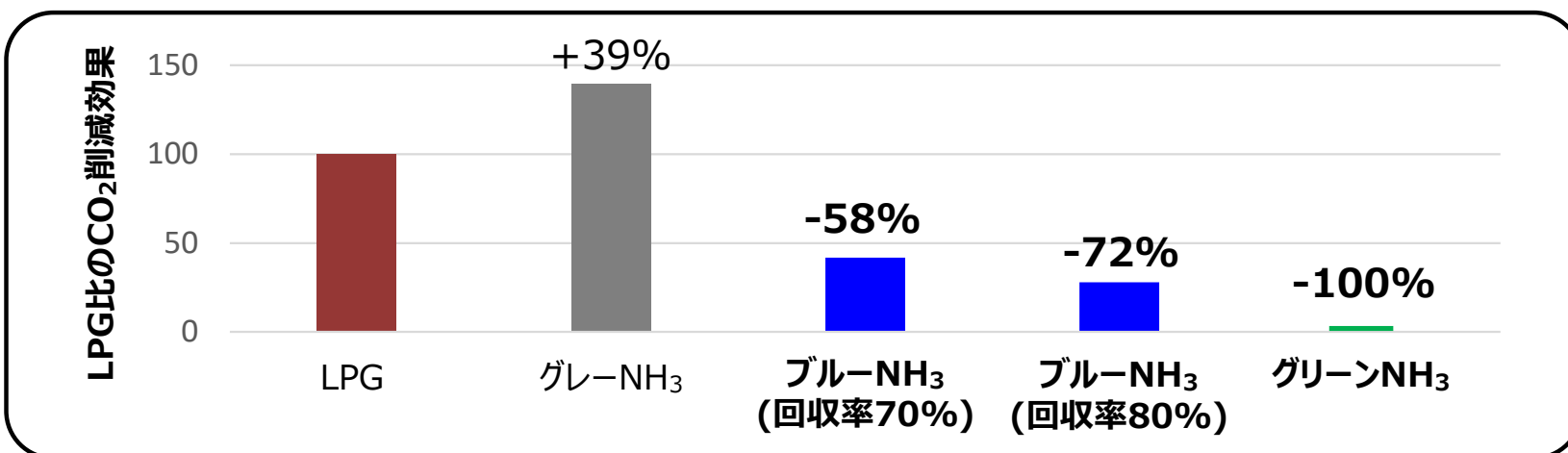
3 -2) 燃料製造エネルギーを加味した削減効果（試算）

【製造方法の違いによるNH₃の色分け】

色	製造方法	
グレー	天然ガス等の化石	CO ₂ 回収しない
ブルー	燃料から製造し	CO ₂ 回収する
グリーン	再生可能エネルギーから製造	

【試算の前提条件】

- ・運搬時のCO₂排出量は除外（化石燃料も同様に排出）
- ・天然ガスからNH₃製造した場合の原単位は1.8 t-CO₂/t-NH₃
- ・ブルーNH₃のCO₂回収率は製造全プロセスの70%と80%
- ・グリーンNH₃のCO₂排出量はゼロ

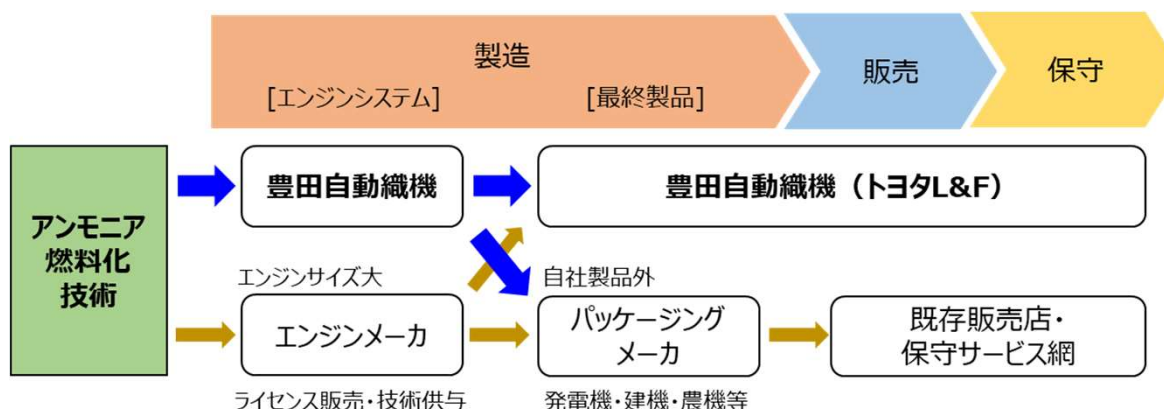


[参照1] SIP「エネルギーキャリア」終了報告書「CO₂フリー水素利用アンモニア製造・貯蔵・輸送関連技術の開発」「アンモニア合成触媒の開発・評価」産業技術総合研究所
 [参照2] 燃料アンモニアの供給コスト分析について（中間とりまとめ）2022年9月：燃焼アンモニア・サプライチェーン官民タスクフォース

4. 事業化の取組み

4 -1) 事業化の体制

弊社が製品化・販売を目指していくが、幅広い出力ラインナップなど
自社で補えない部分は他メーカーなどと協業も視野



4 -2) 量産化・販売計画

本実証事業終了後、最終製品OEMとのフィジビリティスタディの検討を開始。業界団体での意見調整を経て、規制当局への提案を進める構想を立案中。

- ・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
- ・発電用途などの大規模な商用化を目標に、

- ・発電用途などの大規模導入以降の入手が現実的
- ・事業者が無理なくNH₃を活用できる

5. 開発成果の発信

自動車技術会 2023年春季大会にて、3件連続発表を実施(学術論文として掲載済)

【狙い】本事業の成果アピール、新エンジン技術への誘導、燃料NH₃有効性の理解促進

自動車技術会

2023年 春季大会

5/26(金)

パシフィコ横浜

5月24日(水)～5月26日(金)

【9:30～12:10】

85 ガス燃料エンジン I
- カーボンニュートラル化技術 -
Gaseous-Fuel Engines and Carbon Neutral Technology for Gaseous-Fuel I
< OS > 座長：菊池 勉 (日産自動車)

【OS 企画趣旨】天然ガス、水素、LPG、DME、バイオガスなどのガス燃料をエンジンに利用するときの性能、実用性や、ガス燃料のカーボンニュートラル化技術について討論する。
【企画委員会】ガス燃料エンジン部門委員会
【オーガナイザー】森吉 泰生 (千葉大学)、菊池 勉 (日産自動車)、鈴木 健太 (いすゞ自動車)、佐古 孝弘 (大阪ガス)

380 アンモニア単一燃料エンジンシステム
- (第1報)システム成立性-
竹内 秀隆・本間 隆行 (豊田自動織機)
381 アンモニア単一燃料エンジンシステム
- (第2報)動力性能と排気特性-
本間 隆行・竹内 秀隆 (豊田自動織機)
薬師寺 新吾・高島 良胤・佐古 孝弘 (大阪ガス)
382 アンモニア単一燃料エンジンシステム (第3報)
-冷間始動特性-
宮川 浩・鈴置 哲典 (豊田中央研究所)
中谷 規之介・本間 隆行・竹内 秀隆 (豊田自動織機)

383 Overcoming Traditional Limitations of Heavy Duty

主 題	アンモニア単一燃料 エンジンシステム	エッセンス
副 題	(第1報) システム成立性	世の中では未知の 『アンモニア燃料のみで動くエンジン』の解説
	(第2報) 動力性能と排気特性	ベンチ評価と実用機器 ¹⁾ への搭載にて 『アンモニアエンジンの有効性』を検証 1) トーイングトラクター と 可搬形発電機
	(第3報) 冷間始動特性	アンモニアエンジンの最大課題である 『冷間始動の成立 ²⁾ 』を実証 2) 排気NH ₃ と NO _x 低減の両立

その他： プレスリリース 計2件、各術論文等の成果発表 計6件



豐田自動織機

Copyright(c) 2023 TOYOTA INDUSTRIES CORPORATION. All rights reserved.

