

20. 水素内燃機関活用による重量車等脱炭素化実証事業

水素専焼エンジン油圧ショベル及び水素供給事業実証プロジェクト（第2報）

水素専焼エンジンの油圧ショベルへの適応性と交換式水素カードルを含めた機体の安全性の確認

株式会社フラットフィールド
環境省 水・大気環境局
脱炭素モビリティ事業室

○山浦 卓也
モビリティ環境対策課
須山 友貴

1. 背景と目的

1.1 課題と目的

我が国では 2030 年度に 2013 年比 38%の CO₂ 排出量削減、2050 年にはゼロカーボンを達成することを目標として掲げており、脱炭素化に向けた取組の推進が喫緊の課題となっている。我が国の産業部門からの温室効果ガス排出量のうち、建設機械からの CO₂ 排出量は 2.4%の割合を占め、その大部分が化石燃料を使用して稼働する重機から排出される。このような現状を受け、脱炭素社会の実現に向けて、国内外における複数の自動車・油圧ショベルメーカーでは重機の電動化や燃料電池、水素エンジン等の開発が進められている。水素エンジンは、燃料電池等と比較してコスト優位性が高く、本実証の水素供給方式(カードル式)であれば燃料供給も容易で(高压ガス保安法を順守しつつも必要且つ大幅な設備投資をすることもなく、十分な量の水素供給が可能である)あることから、費用対効果及び導入可能性が高いと考えられる。このことから、水素専焼エンジン重機の技術開発をすることを目的とし、環境省の令和 4 年度から水素内燃機関活用による重量車等脱炭素化実証事業（水素専焼エンジン油圧ショベル及び水素供給事業実証プロジェクト）として、CO₂ を排出しない水素専焼エンジン油圧ショベルの開発・製作し実証試験を開始したのでここに報告する。

2. 水素エンジンの出力特性を油圧ショベルに適応させる為の制御方法の構築

油圧ショベルに求められる出力特性に対応し、目標値及び性能が妥当であるかを実証試験において確認する。図 2-1 は開発した水素エンジン油圧ショベルのレイアウトイメージである。

(1)出力・定格回転数の設定

目標定格出力は、操作に違和感を及ぼさないことを目標としてベースエンジン出力の 90%の 108 kW（ベースエンジン：119.3kW/1,800min⁻¹）を目標とした。図 2-2 は開発した水素エンジンの外観である。また定格回転数は増加したフライホイー

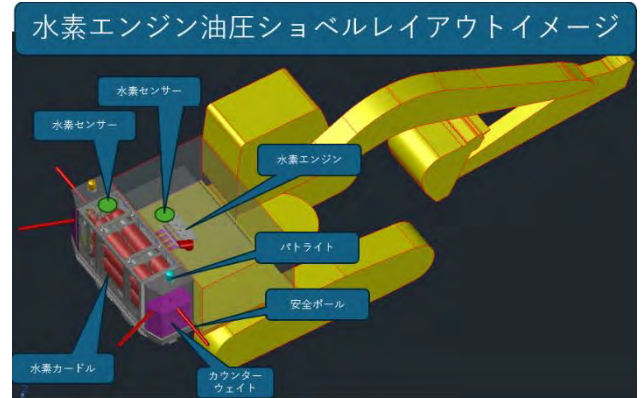


図 2-1 水素エンジン油圧ショベルのレイアウトイメージ

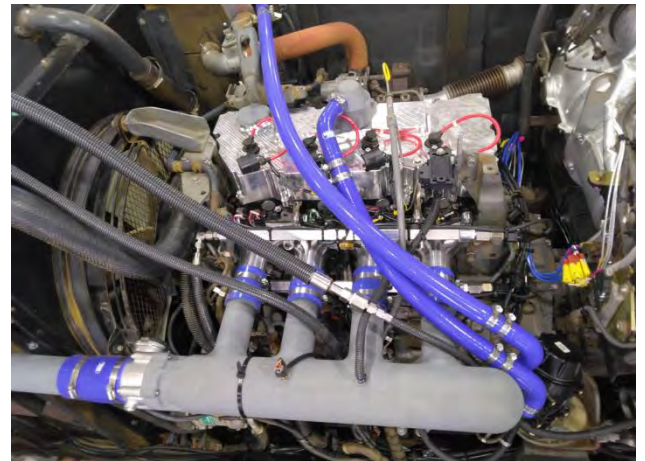


図 2-2 開発したエンジンの外観

ルの慣性力を有効に活用する事と排気エネルギーの確保の為、油圧ポンプの回転範囲を考慮した上で標準機の 1,500-1,800rpm よりも高い 2,000rpm としたが、微細な動作をさせたい時にポンプの油量を下げたい場面もありアイドルと定格以外に 1,200rpm 位の中速運転のモードも設定する事にした。

(2)水素エンジンの負荷入力増減に対する応答性

水素エンジンの特性に合わせる為、実証試験用のポンプ容積制御機を用いて可変容積式ポンプの制御を行う。これによりポンプ容積の増加速度を変化させる事で、エンジンにかかる負荷の増加を緩やかにする事が可能となり、実証試験の中で水

素エンジンに適したポンプ容積の変化速度を導出する。

ポンプの容積制御とエンジン回転数制御を併用し、エンジン回転数安定性向上を目指す。ポンプの容積制御を水素エンジン特有のトルク特性、応答性に対応させることで、オペレーターのディーゼル機に対する違和感を最小限にすることを試みる。

(3)水素エンジンのトルク特性とエンジン回転速度制御の関係

定格運転時に無負荷状態から急激に高負荷をかけると出力の増加に時間がかかり回転数が不足する。その程度によってはトルクカーブの値が低いところにかかる事があり、更にはその時点での排気エネルギーが低下する事で過給遅れも伴い出力の増加に対して不利な状況となる。その為出来るだけ回転数が不足するのを防止する目的でフライホイールの慣性重量を増加して対策した。

増強ウェイトを付けた場合のウェイトメントは純正フライホイールの約 1.6 倍となる。

図 2-3 は製作したウェイトをフライホイールに組付けた状態である。



図 2-3 フライホイールウェイトの取付状態

(4)スロットルバルブの開閉によるエンジン回転数制御

目標回転数に製定する為にエンジン回転速度制御を行う。(以降回転数制御とする) 回転数制御はスロットルバルブを制御する事でエンジン回転数を一定の回転数に制御するものである。回転数の差に応じたエンジン出力の制御を行う必要があり、負荷>エンジン出力の状況ではエンジン回転数が下がり、目標との差に比例しスロットルバルブを開きエンジン回転数を復帰させる制御を行うが、ターボラグの特性も相まって出力増加が間に合わない状況では回転数が瞬時に上昇せず、更にトルクが低い回転数まで下がった時は速やかに回転数が上昇せず、回転数制御は差分に比例しスロットルバルブを大きく開く。その後過給圧が上昇

し回転数が復帰し始める時には急激にトルクが上昇し、負荷<エンジン出力となる為、目標回転数よりも上昇してしまうが過給の勢いが強い為スロットルバルブを閉じてトルクの減少が間に合わず過回転になる。この場合油圧ポンプへの影響もある為過回転を防止しなければならず、スロットルバルブによる回転数制御とは別に燃料噴射量制御等の出力制御を併用する事で過回転を防止する制御を行う必要がある。エンジン回転数の低下量を小さくするために更なるエンジンの低速トルクの増強を課題としてVGターボの制御調整等を行う予定である。また当初のエンジン回転数変動幅目標は±200rpm以内とした。

(5) 空燃比制御によるエンジン回転数制御

過回転を防止するにあたりスロットルバルブだけの制御では製定しきれない状況があり、エンジン制御の回転リミッターによる制御を試みたが、回転リミッター制御は点火や燃料噴射を間欠的に停止させる制御であり、バックファイアが発生する為この制御では対応出来なかった。その為点火時期や空燃比の調整によりエンジン回転数の製定を試みた。まず点火時期の調整においてはエンジン出力を効果的に下げる事が出来ず、次に空燃比による調整を行った。燃料噴射マップ上で過回転領域に燃料噴射量を減らす調整を行ったところ、リミッター制御に対し安定した速度制御に近づける事が出来た。

3. 交換式水素カードルの製作と水素エンジン油圧ショベル運用時の安全性向上の為の対応:

(1)交換式水素カードルの製作

稼働時間を確保する為 1 基 100m³ の水素カードルを 3 基製作し交換しながら運用する。使用済みのカードルは水素充填所に持ち込み再充填を行い

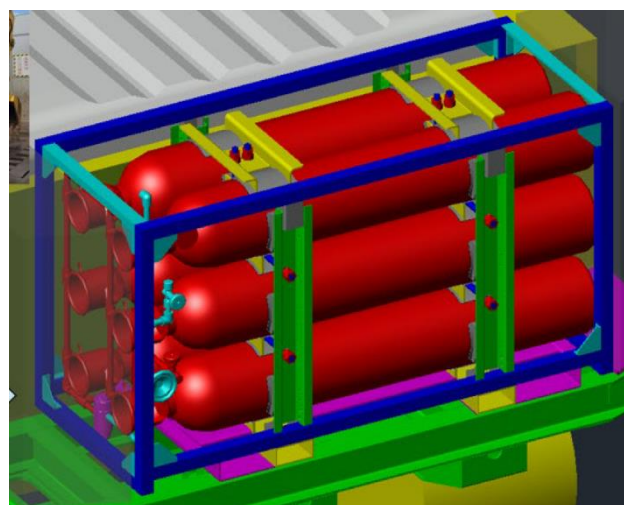


図 3-1 カードル内の水素容器のレイアウト



図 3-2 カードル3 基が完成した状態

充填後また作業場所に配送して運用する。

図 3-1 及び 3-2 は製作したカードルのレイアウトとその完成品である。

(2) カードルの設置、固定、配管配線の接続監視インターロックの構築



図 3-3 カードル検知スイッチ

カードル下部に4か所使用

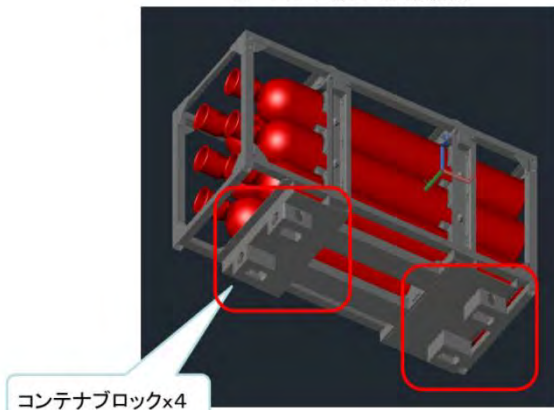


図 3-4 カードル下部コンテナブロックの取り付けイメージ

図 3-3 はカードル自体の設置状態を監視する検知スイッチである。図 3-6 のレバーロックの検知及び図 3-7 のケーブルの検知と共にインターロックとして機能し異常時はオペレーターへの警報と燃料の遮断を行う。図 3-4, 3-5 はカードルの固定具の図である

コンテナツイストロック

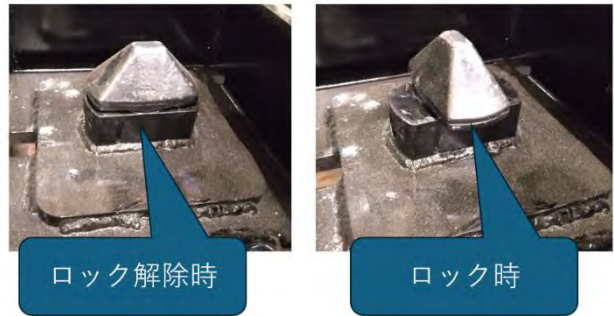


図 3-5 コンテナツイストロック

コンテナツイストロックレバーロック状態検知機構

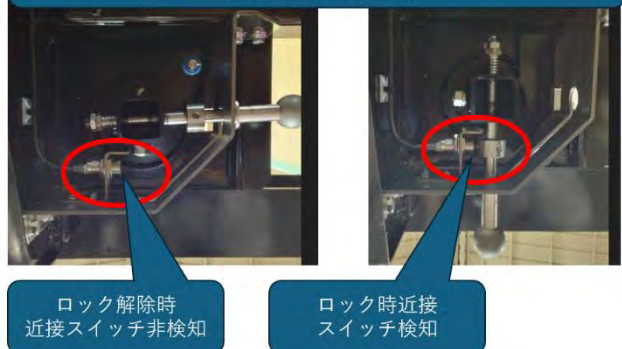


図 3-6 レバーロックの検知機構

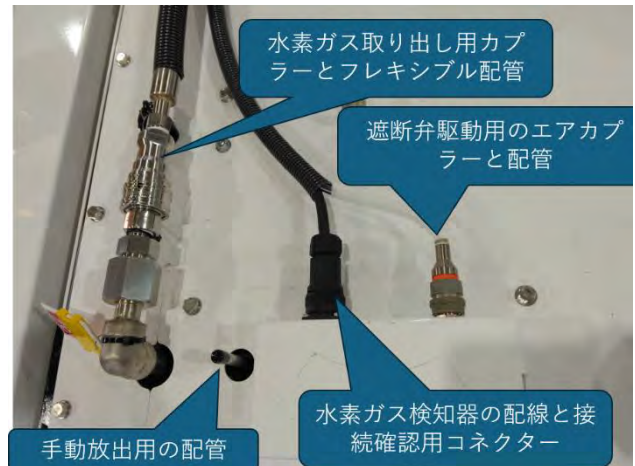


図 3-7 カードル上部配管と配線の接続状態

(3) 水素漏洩検知システムの構築：

エンジンルーム及びカードル内部に水素センサーを設置し漏洩検知時は燃料遮断と警報を発生し、センサー故障時は警告表示を行う。

図 3-8 は安全装置としての水素燃料遮断弁作動条件の図である。これはエンジンに水素燃料を供給する為の条件となる。それぞれの条件においてエンジン回転中に信号はエンスト時には速やかに遮断弁を閉じ、水素漏洩の検知時は燃料の遮断が

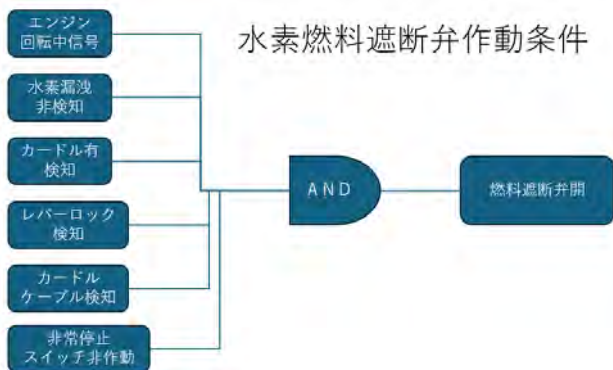


図 3-8 水素燃料遮断弁作動条件

必須であり、カードルが正しく設置搭載固定されていることを監視するものとして、カードル有検知・レバーロック検知・ケーブル検知の条件がある。併せて非常停止スイッチはオペレーターが危険を感じた際に任意に水素エンジンの運転を停止し燃料を遮断できるものである。これらをすべてアンド条件として安全装置としている。

図 3-9 はオペレーターが確認できる水素エンジン関連のモニターディスプレイである。



図 3-9 水素エンジン情報ディスプレイ

ディスプレイのレイアウトを図 3-10,3-11 に示す。

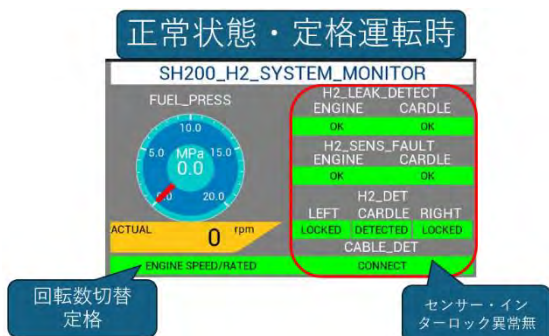


図 3-10 ディスプレイ表示 (正常時)

(4) 水素エンジン油圧ショベル稼働時の周知：

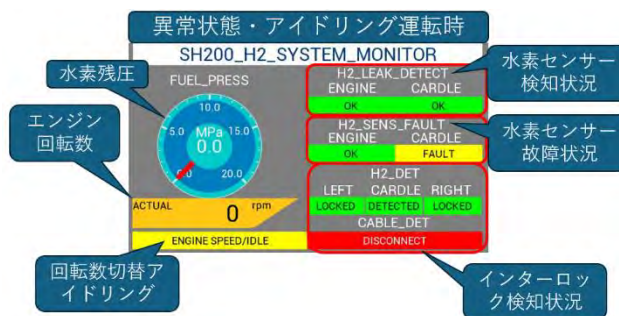


図 3-11 ディスプレイ表示 (異常時)

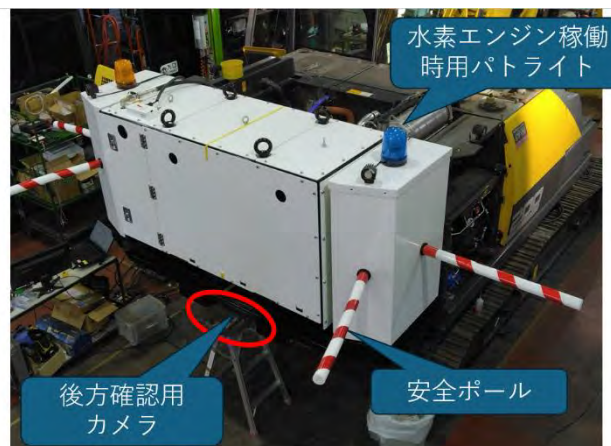


図 3-12 パトライト及び安全ポールの設置状態

まだ一般的でない水素エンジン油圧ショベルの稼働時には青色のパトライトを点滅し周囲に対し稼働を周知する。図 3-12 は実機のパトライト及び安全ポールの取り付け状態を示すものである。

後方視界用カメラについて標準機はカウンターウェイト上部に取り付けられていたが、交換式カードルへの取り付け及び交換時のカードルの移動経路に設置出来ない為カードルの下部ベースフレームに取り付けた。

4. まとめ

今年度の検討結果を踏まえ、今後の方針を以下に示す。

- (1) エンジンベンチで開発した水素エンジンを実機に搭載し実際の現場における運用時の課題の抽出と対策を実施。
- (2) 油圧ショベルの要求性能に対する水素エンジンの適用性と、油圧制御の最適化の検証を実施。
- (3) 水素エンジン油圧ショベルの環境性を評価する基準として、ディーゼルエンジン油圧ショベルの環境性の検証を実施。
- (4) 製作した交換式水素カードルの実機での運用時や交換作業時における課題の抽出や実用性の検証を実施。
- (5) 水素油圧ショベルの導入及び水素運搬によって排出されるにおける CO₂ 排出量削減効果を評価する。