

28. 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

水素専焼エンジン油圧ショベルの開発に向けた検討

株式会社フラットフィールド

環境省 水・大気環境局 モビリティ環境対策課 脱炭素モビリティ事業室

○山浦 卓也

須山 友貴

1. 背景と目的

1.1 課題と目標

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排出量は約1.7%の割合を占める。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・建機メーカーでは建設機械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、水素専焼エンジン建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を目的とし検討を行った。

2. 水素エンジン建機の性能開発目標

油圧ショベルに求められる特性に対応し、実用上十分な性能及びその目標値が妥当であるかを実証試験において確認する。

2.1 エンジン性能開発目標

(1)出力

目標定格出力は、ベースエンジン出力の90%の108kW(ベースエンジン:119.3kW/1,800min⁻¹)を目標とする。この値は、ポート噴射式予混合火花点火方式に変更するに伴い発生する可能性がある、ノッキング、プレイグニッション、バックフ

アア等の異常燃焼を避けるべく、平均有効圧をできるだけ下げ、操作に違和感を及ぼさないことを目標として設定した。そのため、定格出力発生回転数は1,800-2,000rpmの範囲で未設定であり、これについては次年度以降の検討事項とする。前述した異常燃焼防止に加えて、エンジンアウト側でのNO_x排出量の最小化及び負荷変動時の応答性向上を目的として、油圧ポンプの仕様から可能な上記範囲のなかで、水素エンジン改造にともなう最適な定格運転回転数を検討する。表2-1に水素エンジンの開発目標仕様を、表2-2にベースショベル機カタログからエンジンに関する諸元を示す。

表2-1 水素エンジン開発目標値

	ベースエンジン	水素エンジン 目標設定値
エンジン出力 (Kw)	119.3	108
負荷応答性(Nm/sec)	-	300
エンジン回転数安定性 (rpm)	-	±200
排ガス性能(8モード) NO _x (g/ kWh)	0.4(規制値)	1.5 (エンジンアウト)

表2-2 エンジン諸元に関する項目¹⁾

SH200-7 (SH200LC-7)		
基本	バケット容量(新JIS)	0.8m ³ <0.9m ³ >
	運転質量	21,000kg(21,400kg)
	エンジン名称	いすゞ AR-4HK1X
	定格出力	119.3kW/1,800min ⁻¹
	排気量	5.193L(5,193cc)

(2)負荷入力応答性・許容回転数変動

ベース機による予備実験において300Nm/s以上の応答性があれば、大きなストレスなく運転できると考えられる。

(3)許容回転数変動目標

ポンプ制御との連携制御においては、シヨベル側のポンプ圧制御装置と連携をとり、エンジン回転数安定性向上を目指すことを検討する。コントローラの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、オペレータの違和感を最小限にすることを試みる。またエンジン回転数変動幅目標は $\pm 200\text{rpm}$ 以内とした。

実証試験前におけるエンジン単体試験での模擬入力応答性および回転安定性確認は表 2-3 に示す条件で行う。

表 2-3 トルク変動率

トルク変動	時間	変動率
0 \rightleftharpoons 300Nm	2秒	150Nm/sec
	3秒	100Nm/sec
	4秒	75Nm/sec
0 \rightleftharpoons 500Nm	2秒	250Nm/sec
	3秒	167Nm/sec
	4秒	125Nm/sec
300 \rightleftharpoons 500Nm	1秒	200Nm/sec
	2秒	100Nm/sec
	3秒	67Nm/sec

(4) 排ガス目標値の設定

現状、「特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律（通称：オフロード法）」において水素を燃料とする機関に適用される排ガス規制はない。しかしながら、建機に要求される排ガス性能において燃料による違いは小さく、今後水素エンジンの普及にとともに規制が必要になるのは明白である。このことを見据えた上で排ガス性能測定を行う。本事業においては、目標出力が 108kW のため、オフロード法で定める軽油を燃料とする特定特殊自動車の定格出力種別のうち 75kW 以上 130kW 未満のものに該当し、参考規制値は、NOx: 平均値 0.4(上限値 0.53)g/kWh、測定モードは NRTC ならびに 8 モードが妥当と考えられる。しかしながら、NRTC を測定できる設備を予定していないため、モードは 8 モードで参考データを取得する。それらの定常試験データをもとに、NRTC モードや後処理装置の検討は、シミュレーションで行う。図 2-1 に設定目標とする λ と NOx の排出予測値を示す。8 モードの重みづけを考慮した計算では、8 モード試験結果として 0.375 g/kWh となり参考基準を下回り、後処理を必要としない水素エンジンが実現できる。過給が十分になされて λ が達成できたとしても、混合気にも高い均質状態が求められる。また、同領域での NOx 生成は λ 変化にとともに敏感な発生特性を有するため、当初エンジンアウト側での NOx 排出量とし

て安全率を 4 倍にとり、1.5g/kWh を目指す、それ以下の達成となった場合においては必要となる過給、均質混合気形成などへの課題を抽出する。過渡時や中間点での性能に大きく影響される NRTC モードにおいて、後処理なしで参考規制値達成の実現可能性は小さくなるが、ターボ技術の向上などによる後処理を不要とする水素エンジンの可能性に期待したい。

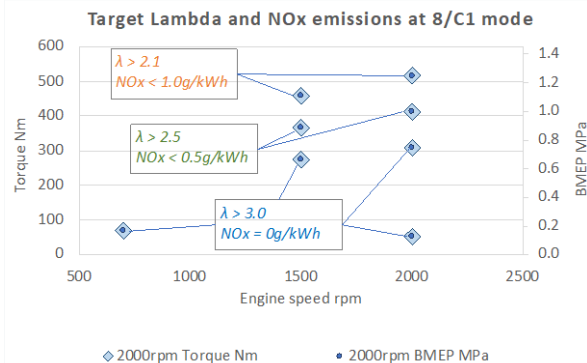


図 2-1 λ と NOx の排出予測値

2.2 想定される課題及び対応案の検討

出力、燃費、排ガス性能について、これらの性能は相互関連し、エンジン水温、吸気温度、混合気形成、過給圧が複合的に作用して、同時達成を困難とする懸念があるため、水温ならびに吸気温度上昇を抑えることを想定する。対策として、ラジエータ容量、ウォータポンプ能力、送風ファン、などの容量や性能の向上、さらにはインタークーラーウォータスプレイの導入を検討する。

2.3 建機開発に向けた検討

水素エンジン使用時には油圧シヨベルの負荷特性を水素エンジンの運転に適するよう抑制するとともに、建機に水素容器を搭載し一定時間ごとに容器交換を行うことから、その搭載方法や交換手段を確立する必要がある。以下に検討した概要を示す。

(1) 負荷変動特性の抑制：

油圧シヨベル側の制御として、ポンプ吐出容積制御を示す。従来油圧シヨベルに用いられるディーゼルエンジンは直噴圧縮着火エンジンのため、負荷が変動し出力が必要となった際に比較的高速に応答可能である。これに対し、今回の水素エンジンはポート噴射火花着火エンジンであるため、負荷の変動に対する出力の応答がディーゼルエンジンと比べ遅くなる可能性が高い。従来の油圧シヨベルはディーゼルエンジンで運用されることを前提とした設計となっており、水素エンジンで用いる際には負荷変動が大きすぎて応答しきれず、

回転変動による操作感の悪化やエンジンストールの可能性がある。これについて、以下で対策を検討する。図 2-2 に油圧ショベルの油圧系模式図を示す。エンジンは概ね一定の回転数指令を受けて回転数制御される。エンジンの出力軸には一連の油圧ポンプのみが連結されており、エンジン負荷は油圧ポンプの負荷で決定される。図中に示すように、油圧ポンプの入力トルクは、ポンプ吐出圧力およびポンプ吸入圧力（≒作動油タンク圧≒0MPa）とポンプ吐出容積で決定される。油圧ポンプは油を吐出するだけで、油が流れていった先の体積内で油が圧縮されることにより圧力が発生するため、油圧ショベルの動作に必要な圧力は本質的には機械仕様や動作、負荷によって決まり、操作者や制御によりコントロールできるものではない（動作や負荷を操作する場合を除く）。このため、油圧ポンプの入力トルクを制御する手段としてポンプ吐出容積が用いられる。

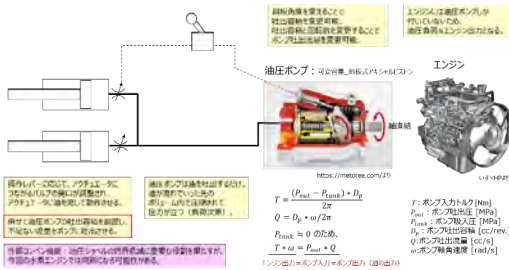


図 2-2 油圧ショベルの油圧系

油圧ショベルの主ポンプには一般に可変容量のアキシャルピストンポンプが用いられ、吐出容積を変更することで入力トルクを調整可能となっている。また、近年は吐出容積の変更に電磁比例減圧弁を用いるものが多く、比較的容易に吐出容積制御が可能となっている。エンジン回転数一定の際に油圧ポンプ吐出容量を変化させることで、ポンプ負荷、つまりエンジンに与える負荷が制御可能である。この変化率を水素エンジンに相応しい特性とすることで、負荷入力時などのエンジン回転数の安定性を協調制御する。

水素エンジンが出せるトルクレートに合わせて、ポンプ負荷トルクのトルクレートを抑制する（具体的にはポンプ吐出容量の増加率を抑える）ことで、エンストを回避可能である。副作用として考えられる急な動作が抑えられ、緩慢な動きとなることを考慮する。

参考にこれまでの予備実験にて得られた油圧ショベルの負荷パターンを示す。図 2-3 中の 138～139 秒付近に示すように、油圧ポンプ負荷トルクのトルク変動率を抑制することが可能であり、これを水素エンジンの出力特性に合わせて抑制することで油圧ショベルの稼働が可能となる。ただ

し、一定回転運転でポンプ吐出容積を抑制することになるため、油圧ポンプの吐出流量の増加速度が遅くなることになり、操作者の運転に対する機械の動作は緩慢な反応になることは避けられない。

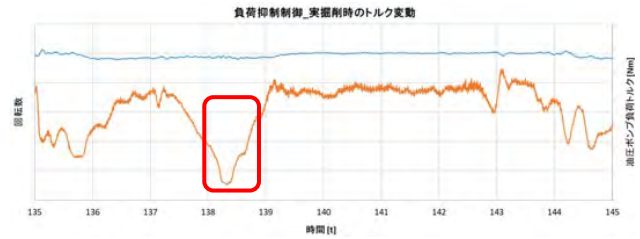


図 2-3 負荷抑制制御による実掘削時のトルク変動

また、制御対応に加えて、フライホイールを増量することでエンスト防止に対応し、総合的な対策を検討する。フライホイールは、搭載可能かつ慣性モーメントが最大となる形状を設計した。図 2-4 にフライホイールの搭載状況を示す。フライホイール後端にはカップリングを介して油圧ポンプが搭載されている。フライホイールとカップリングはベルフランジの中に格納されるが、ここに赤字で示す通りフライホイールの増強が可能なスペースが存在することがわかる。

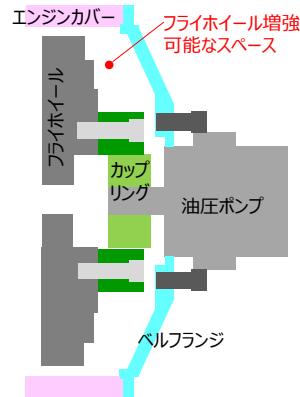


図 2-4 フライホイール搭載状況

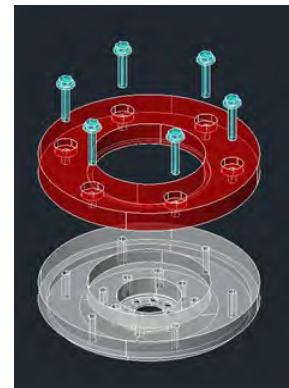


図 2-5 増量ウエイト搭載イメージ

図 2-5 には設計された増量ウエイトおよび純正フライホイールの図を示す。図中に赤色で示す増量ウエイトをボルト締結することとした。増量ウエイトを付けた場合の慣性モーメントは純正フライホイールの約 1.6 倍となる。

(2)カードル搭載時の安定性確保：

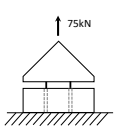
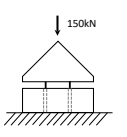
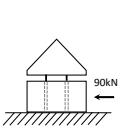
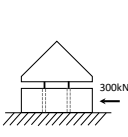
機体の安定性確保及び、運転者の視界確保の観点から、カードル搭載は機体後方が望ましい。

(3)カードル搭載・交換システムの検討：

簡単かつ安全なカードル脱着の仕組みとして貨物コンテナ用金具の活用を提案し、カードルは上部旋回体後部に搭載することが望ましいと考えら

れる。脱着用の金具として JIS Z 1629 貨物コンテナ-上部つり上げ金具及び緊締金具に規定されるツイスト形緊締金具（通称ツイストロック）および JIS Z 1616 国際貨物コンテナ-すみ金具に規定されるすみ金具を使用することを検討する。表 2-4 に示すように、両金具を用いた場合は金具 1 セットにつき、上向き 75 kN、下向き 150 kN、横手 90kN、長手 300 kN の荷重に耐える強度を持つため、カードル重量 1t 以内に対し十分な強度を持って保持しながら、比較的簡単に脱着することが出来る。

表 2-4 上部つり上げ金具及び緊締金具の強度 2)

記号	上向き荷重又は力	下向き荷重又は力	横手荷重又は力	長手荷重又は力
B-TF				

3. 燃料補給と稼働時間の確保

3.1 燃料搭載方式カードル式の水素供給方式(カードル式)

水素燃料容器を建機に搭載するにあたり、そのために最適化した容器容量を検討する。燃料供給・運搬の安易さ及び使用・保管において、届出・管理者不要の搭載量とするため、300m³以下・タンク内圧力 20MPa 以下とする。また、コスト削減のため、タンクは汎用品である鋼製タンクを使用した設計とする。建機には瞬発的な荷重がかかるため、設計段階においては強度及び耐久性を満たした設計及び使用部材を選定する。図 3-1 に水素燃料容器イメージを示す。

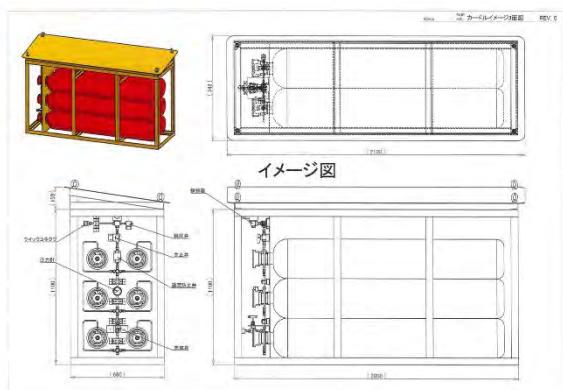


図 3-1 水素燃料容器イメージ図

3.2 燃料供給方法の検討

(1)水素の充填方法

本実証事業で想定している水素カードルは、充

填圧力が既存の産業利用されているカードルの圧力(20MPa 以下)と同じ規格で設計検討されているため、通常の水素を取り扱うガス会社での充填が可能である。よって、充填に関して新たな設備や特別な充填方法は必要としない。

充填時間も、300m³、20MPa のカードル 1 個であれば 1 時間未満で充填が可能である。

(2)補充水素の配送方法

補充水素の配送において、今回検討する水素カードルの容量では資格者を必要とせず、届け出も不要であり、輸送車両に高圧ガス搭載の表示のみで対応可能であるため、通常の見送会社及びガス会社による輸送が可能である。

カードルがあればガス会社のほか、事業者本人及び委託先運送会社でも輸送可能である。建機へのカードル脱着に関しても、高圧ガス保安法の規定範囲に収まる為、有資格者を必要としない。

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)エンジンベンチで水素エンジンの目標性能の確認、課題の抽出と対策の実施。
- (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
- (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ショベルの環境性の検証を実施。
- (4)水素燃料カードルを製作し、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。

参考文献

- 1) 住友建機株式会社 SH200-7カタログ P23 一部抜粋
- 2) 一部抜粋 (出典：JIS Z1629 表2)