

令和7年度沖縄型クリーンエネルギー

導入調査事業

「島嶼地域向け地産水素昇圧及び利活用モデルの構築」

調査報告書

令和8年3月

内閣府府沖縄総合事務局

目次

1. 事業概要	1
1-1 事業目的	1
1-2 沖縄県における水素利活用の動向	1
1-3 本事業の全体構成	2
2. 水素吸蔵合金による昇圧技術について	3
2-1 水素吸蔵合金による昇圧技術	3
3. 水素利活用モデル検討	6
3-1. 全体システムの構想	6
3-2. 検討規模	6
3-3. 昇圧システム概略フロー	7
3-4. 昇圧コスト試算	8
3-5. 仕上がりコスト試算	11
4. 法規制に関する課題と規制緩和に向けた要件整理	12
4-1. システム構築及び法規制緩和を含めた事業展開	12
4-2. 水素ステーション等における高圧ガス保安規制合理化戦略	12
4-3. 水素吸蔵合金を用いた昇圧システムの社会実装に向けた規制対応戦略	13
4-4 水電解昇圧設備の規制事例	13
4-5. 神戸工業試験場のヒアリング結果	14
4-6. まとめおよび実証試験計画	14
5. 沖電工への将来的な接続イメージ	15
5-1 現状の運用体制	15
5-2. 外販水素継続時の課題	15
5-3. 地産水素活用および MH 昇圧技術の展望	16
6. CO ₂ 排出量の試算	17
6-1 評価目的	17
6-2 評価範囲	17
6-2-1 システム境界	17
6-2-2 評価対象とするケース及びシステム仕様	18
6-3 機能単位	18
6-4 インベントリ分析	18
6-4-1 データベース及びインベントリ分析	18
6-5 GHG 排出量算定結果	20
6-5-1 5 ケースの機能単位の CO ₂ 排出量	20
6-5-2 ライフサイクル全体の GHG 排出量の内訳	21

6-6	感度分析.....	21
6-6-1	電力係数の影響評価	21
6-6-2	シナリオ分析（再エネ電力・排熱利用）	21
6-6-3	比較 LCA（機械式ベンチマークとの比較）	21
6-6-4	水素ステーション全体における LCA.....	22
6-7	LCA 算定まとめ.....	23
6-7-1	結論.....	23
6-7-2	推奨されるシステムについて	23
6-7-3	今後の課題及び提言	23
7.	まとめ及び今後の展開	25
7-1	事業性評価・検討	25
7-2	まとめ	26
	参考資料.....	27

1. 事業概要

1-1 事業目的

本取り組みは、沖縄本島および離島に適した水素吸蔵合金を用いた昇圧技術の実証を行い、水素利活用の促進を目指すものである。

1-2 沖縄県における水素利活用の動向

沖縄県では化石燃料への依存割合が大きく、脱炭素化の観点からも水素エネルギーの活用が重要になっている。近年、うるま市で副生水素を供給する取り組みが進められている他、沖縄電力による水素ステーション（ST）の実証が進められていることもあり水素利活用技術の確立および発展が期待されている。（表 1-1）¹⁻⁴⁾

表 1-1. 沖縄での水素利活用の取り組み事例

時期	事業者	内容
2024 年 3 月	沖縄電力(株)	中城村吉の浦 LNG 火力発電所内マルチガスタービン発電所にて実証用系統化にて水素混焼試験を実施。調整力電源における水素混焼発電運用の技術確立を目指す
2024 年 4 月	うるま市 (株)りゅうせき	製品製造工程で発生する未利用の地産副生水素を活用するための貯蔵・出荷設備を整備し、うるま市内における交通部門（FCV 等）での利用促進、産業や電力部門含む広域への利用を通して脱炭素を推進する取組
2025 年 5 月	(株)りゅうせき	沖縄初の水素ステーションの実証を開始。移動式の水素ステーション車両を用いて水素供給先を限定（主に FCV 車両）した上で水素の製造から貯蔵・販売までの技術的な確認を行い、商用化に向けた試験運用開始
2025 年 10 月	(株)沖縄電力	水素を貯めておくことができる水素貯蔵モジュール(トヨタ自動車)、水素を簡易的に車両へ充填することができる BELL STATION MINI 35(鈴木商館)、水素を燃料として駆動する水素フォークリフトを中城湾事業所に導入
2026 年 1 月	(株)沖縄電力	日本航空株式会社の協力を得て、那覇空港構内に燃料電池フォークリフト（以下「FCFL」）および充填システムを試験的に導入し、実証事業を開始

1-3 本事業の全体構成

水素吸蔵合金による昇圧技術は、排熱を用いて水素を合金から放出・昇圧する仕組みである。従来の圧縮機と比較し、可動部がない点や、潤滑油等を使用しない。これによりメンテナンス負担（数百万/年）の軽減が期待できるので、圧縮機の維持管理にコストが掛かる地域に適している。

一方課題もあり、水素吸蔵合金を用いた昇圧設備は高圧ガス設備に該当するため、高圧ガス保安法による年1回の開放点検が義務付けられており、この点検によって水素吸蔵合金の酸化（失活）が懸念される。水素ステーション（ST）向け設備では開放点検の免除が認められているため、同様の規制緩和を適用できるよう規制機関と交渉し、開放検査が不要になるための条件を、海外事例等を調査しながら各規制機関と対話し、決定する。

調査事業終了後は実証事業⁵⁾に申請し、規制緩和に向けたデータ取りを実施し、水素吸蔵合金による水素昇圧技術の確立を行い、水素利活用を促進するため島嶼向け水素昇圧技術の確立を目指す。

表 1-2. 調査事業から社会実装までの計画

① 調査事業	技術課題整理、市場性評価、制度課題抽出	実証に向けた基礎情報の整理	実証計画・課題リストの作成
② 実証事業申請	実証スキーム設計、関係機関調整、申請手続き	実証フェーズへの移行	実証事業の採択
③ データ取得 (規制緩和検討用)	水素吸蔵合金による水素昇圧技術の性能・安全性・運用データ収集	規制緩和に必要な科学的根拠の整備	技術的妥当性・安全性データの蓄積
④ 技術確立	実証結果を踏まえた改良・最適化	水素吸蔵合金による水素昇圧技術の確立	島嶼向け水素昇圧システムの確立
⑤ 規制緩和	取得データを基に制度改正・基準見直しの提案	社会実装の障壁解消	新基準・運用ルール整備
⑥ 社会実装	島嶼地域への導入展開、水素利活用促進	地域における水素利用拡大	島嶼向け水素昇圧技術の普及

2. 水素吸蔵合金による昇圧技術について

2-1 水素吸蔵合金による昇圧技術

水素吸蔵合金（Metal Hydride、MH）は、金属の隙間に水素が原子状態で保存されることで液体水素よりも高密度に貯蔵できる。ほとんどの MH は、温度・水素圧の調節のみで水素の吸蔵・放出が容易に進行するため、取り扱いが簡単であることから、近年水素のデリバリー⁶⁾や定置式の水素システム⁷⁾なども実証が進んでいる。MH の水素吸蔵・放出圧力と温度の関係は、図 2-1 に示すように温度が上昇すると圧力は上昇する。

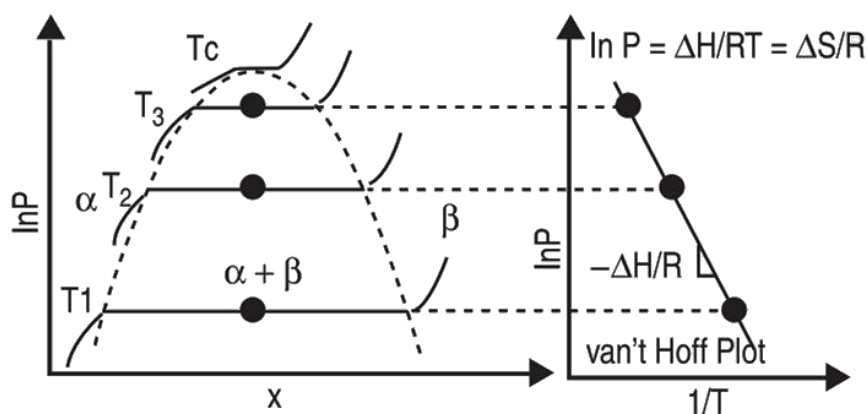


図 2-1. 水素吸蔵合金の吸蔵・放出圧の関係

利用する水素の圧力・温度帯を設定するには ΔH （エンタルピー変化）と ΔS （エントロピー変化）を制御する必要があるが、一般的に ΔS をコントロールすることは難しく、およそ $-100 \sim -130 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ の範囲になる。そのため ΔH をコントロールする必要があるが、金属の種類や組成を変更することで実現する。金属の性質としてその組成は整数比から外れることが可能であるため、その性能はある程度自在にコントロール可能となる。そこで本事業では、水素吸蔵・放出圧が $30^\circ\text{C} \cdot 10 \sim 15 \text{ MPa}$ から $80^\circ\text{C} \cdot 35 \sim 50 \text{ MPa}$ （中圧領域）、 $30^\circ\text{C} \cdot 25 \sim 35 \text{ MPa}$ から $80^\circ\text{C} \cdot 75 \sim 85 \text{ MPa}$ （高圧領域）となる ΔH の領域を計算した（図 2-2）。ただしヒステリシス（水素吸蔵・放出で圧力が異なる現象）は無いものと仮定した。

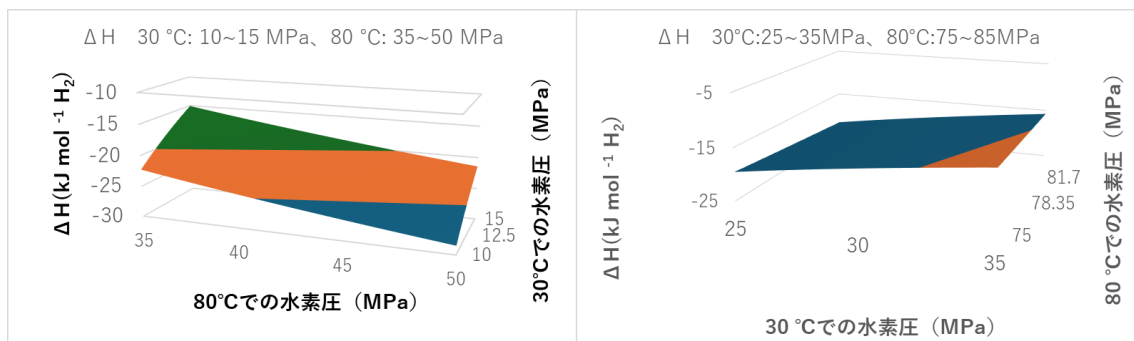


図 2-2. 目的の水素吸蔵・放出圧を達成しうる ΔH の値（左：中圧、右：高圧）

計算を 2 領域に分けた理由として、30 °C・0.7 MPa から 80 °C・80 MPa へ一段で昇圧可能な ΔH 、 ΔS を有する材料は未発見であることと、20 MPa 程度の昇圧までは機械式ポンプが県内で既に普及しており導入も容易であることや将来的に水素製造の段階（水電解）で 20 MPa まで昇圧できる技術が導入される可能性が高いため、それを利用することで設備投資を抑える狙いがある。なお ΔS は上記の範囲（ $-100 \sim -130 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ）を満たしている。これにより、候補となる MH の ΔH は中圧領域で $-14 \sim -28 \text{ kJ/mol H}_2$ 、高圧領域で $-13 \sim -22 \text{ kJ/mol H}_2$ と見積もられた。これらの値は一般的な MH が有する値に近いため、現実的に合成可能であると考えられる。また、高圧領域については、産総研が既に開発しており、 $\text{TiCr}_{1.25}\text{Mn}_{0.15}\text{Fe}_{0.6}$ が候補となっている⁸⁾。この材料は Mn が減少し Fe が増えると吸蔵・放出圧力が減少することが明らかにされている⁸⁾ため、報告されているデータをもとに組成を調整し、 $\text{TiCr}_{1.25}\text{Mn}_{0.75-x}\text{Fe}_x$ をアーク溶解により合成した（図 2-3。組成は非公表）。この合金の組成を分析した結果、Ti が若干多かったが概ね狙い通りの組成となっていたため、比較的容易に合成できることが明らかになった。今後は水素吸蔵・放出実験を行い合成した合金の ΔH 、 ΔS を決め、要求する性能を示すか検証する予定である。



図 2-3. 試作した水素吸蔵合金

水素吸蔵合金はそのままでは空気中で着火すると発火するため危険物に該当することが多い。そのため法令順守にコストや設置の上で制限されることがあるため、非危険物化する必要がある。実用化されている技術としては、合金自体の粒度・比表面積・酸素含有量の制御（特開 2006-309998）、JSW「ハイドレージ™」（特許第 4145339 号）に代表される樹脂コーティングなどがある。このうち樹脂コーティングであれば樹脂の脆化によって合金粉体が発生しない限り摩耗は生じず繰り返しによる圧密（細かい粉が集まって緻密化し、水素吸蔵・放出を妨げ性能が落ちる現象）も発生しないため設計面で有利である。しかしながら樹脂は水素吸蔵合金の表面に生じる活性な水素に還元されうる。その結果、

CO₂やメタンなどの炭化水素を放出する可能性があるため、図 2-4 のような自動で水素吸蔵・放出を行う装置を開発した。

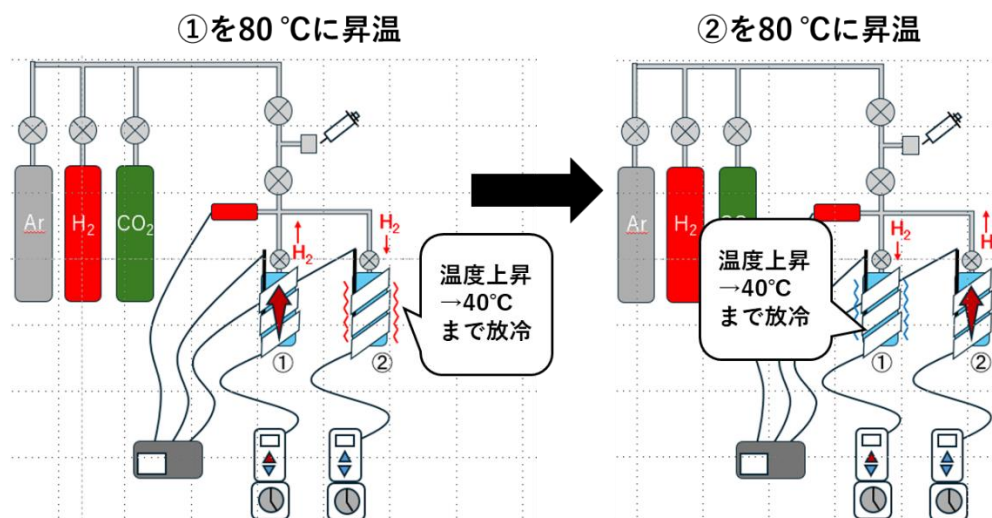


図 2-4. 自動吸蔵・放出装置と動作の概略

図中の①、②には合金タンクとして樹脂コーティングされた水素吸蔵合金が封入されている市販品を用いた。片方約 50 回ずつ、計約 100 回の水素吸蔵・放出をタイマーによって時間差で加熱することで繰り返し行い、オフガスをガスクロマトグラフィーによって分析した。その結果、CO は検出されず微量のメタンとエタンが検出された。しかしいずれも 1 サイクルあたりに換算すると 1ppb 以下であり、水素ステーション供給水素及び製造プロセスガスに求められる品質 (ISO14687 Grade-D) の規格値以下であったことから、樹脂コーティング法は有効であると考えられる。ただし更なるサイクルを繰り返した場合、樹脂コーティングが劣化して微粉化する可能性も考えられるため、この点においては更に吸蔵・放出サイクルを繰り返すことで検証する必要があると考えられる。

3. 水素利活用モデル検討

3-1. 全体システムの構想

従来、FCV や FC フォーク向けの水素ガスの昇圧には機械式昇圧システムが用いられてきた。しかし、機械式昇圧システムは内部に可動部を有し、運転には潤滑油等が必要である。そのため、定期的な点検・部品交換・潤滑油管理などのメンテナンス作業が発生し、維持管理にコストを要するという課題がある。特に沖縄県のような島嶼地域においては、専門的なメンテナンス要員を地域外から呼び寄せる必要が生じるケースが多く、結果として本土地域と比較して維持管理コストが高くなることが予想される。これらの地域特性を踏まえると、可動部の少ない、もしくは無可動部で維持管理負荷の小さい昇圧方式が望まれている。

そこで本検討では、水素吸蔵合金（MH）を用いた非機械式の水素昇圧技術を活用する。本技術は、水素吸蔵合金が有する吸蔵・放出特性と、平衡圧力の温度依存性を利用したものである。具体的には、冷熱を与えることで水素を吸蔵し、温熱を与えることで合金から水素を放出するとともに平衡圧力を上昇させる。これにより、水素の昇圧を実現することが可能となる。本方式は可動部を持たず、潤滑油も不要であるため、従来の機械式圧縮機に比べて故障リスクが低く、メンテナンス頻度も大幅に低減できる。加えて、水素吸蔵合金を用いることによる省スペースで静寂性が高く、排熱回収も可能である利点も得られる。

以上より、水素吸蔵合金を用いた昇圧システムは、島嶼地域のように維持管理コストが高く、かつ温暖地域故の未利用排熱が比較的多い地域において、従来方式に代わる有力な技術であると考えられる。

3-2. 検討規模

沖縄県は島嶼地域という特性から水素需要が比較的小さく、用途も限定的である。このため、商業用水素ステーションで用いられるような大規模な昇圧・供給設備を導入しても十分な稼働が見込めず、経済性を確保することは困難である。このような需要規模を踏まえると、沖縄県における初期段階の水素供給システムは、装置の稼働率と経済性を向上させるために小容量・ユニット型を前提とした設計が適していると考えられる。ユニット型の設計にすることで、現地工事が必要最小限の内容で良いため、現地工事のコストを大幅に低減できるメリットがある。また、移動式とすることで初期需要時の場合は需要場所が変わる可能性があるため、柔軟な対応が可能となる。

県内では既に、株式会社りゅうせきによる移動式水素ステーションの実証²⁾や、株式会社沖電工による水素貯蔵モジュールを用いた小規模充填設備の実証³⁾が進んでおり、こうした取り組みは小規模・ユニット型という方向性と一致している。

これらの状況を踏まえ、本検討では事業所をはじめ、建設現場、港湾、空港など、明確な局所需要が存在する領域を対象に、建設機械への水素充填を中心とした供給システムを構築する方針とした（図 3-1）。

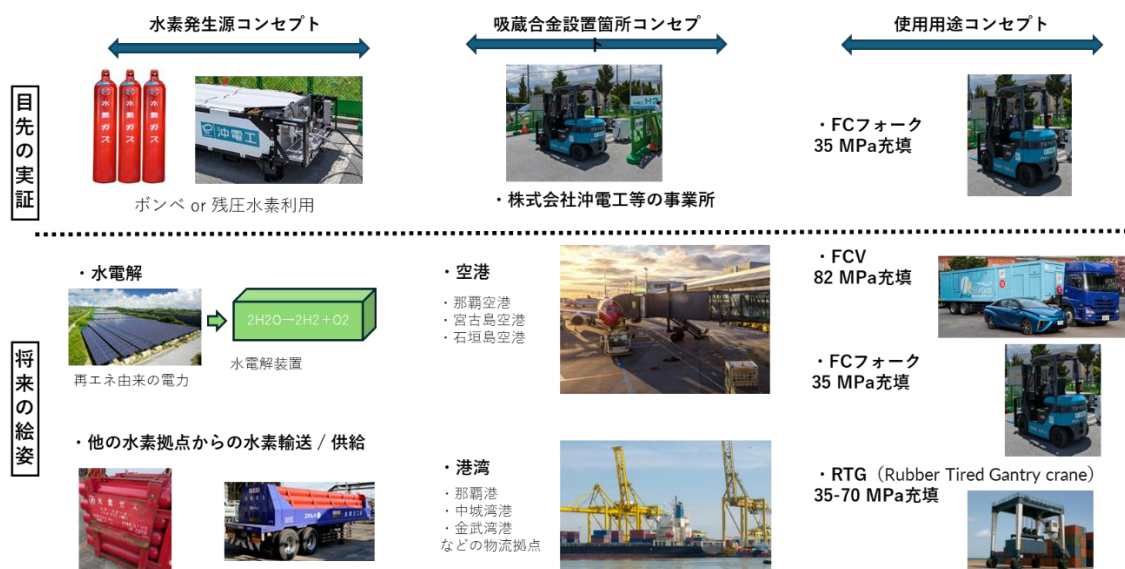


図 3-1 水素吸蔵合金を用いた実証スキーム

将来的には、建設機械向け供給で構築した基盤を基軸として、乗用車などへの供給拡大も可能であると考えている。すなわち、限定的である水素の初期需要に対して運用を開始し、そこで得られた実績をもとに段階的に用途を広げることで本システムを普及していくイメージを描いている。

3-3. 昇圧システム概略フロー

実証に向けた概略設計に関しては、前述のとおり小容量での運用を前提とし、実証が開始されている建機向けの水素供給を対象とする。具体的には、1 kg タンクを搭載した燃料電池フォークリフト（以下、FC フォークリフト）に対して、沖電工へのヒアリング結果を踏まえ 3 日に 1 回の充填を行う運用を想定した。この前提に基づき、必要となる水素の昇圧量は 1 時間あたり約 0.2 Nm³ と試算した（図 3-2）。供給圧力については、一般的な低圧水素発生装置の仕様を踏まえ、0.7 MPaG を入口圧力として昇圧を行う計画とした。FC フォークへの充填は 35 MPaG までの差圧充填を想定しているため、吸蔵合金ユニットにより水素を 45 MPaG まで昇圧し、その後蓄圧器に貯蔵して供給する構成とした。ただし、水素吸蔵合金を用いた昇圧技術そのものはラボ試験スケールで成立性が確認されているものの、本実証で想定するスケールや圧力範囲において同様の性能が得られるかについては未検証であり、スケールアップ条件で実証確認が必要である。そのため本計画で

は、0.7 MPaG から 19.6 MPaG までは機械式昇圧機で加圧し、それ以降の高圧領域について吸蔵合金による昇圧を適用する二段構成とした。19.6 MPaG の設定は、一般的な水素ボンベ充填圧力を基準としており、既存の小規模充填設備や供給システムにおける昇圧プロセスとの整合性を考慮したものである。さらに、実証段階において連続的に昇圧水素を供給するため、反応容器は複数本構成とし、吸蔵・昇圧・放出の三つの工程を循環運転させる方式を採用した。このサイクル運転により、供給を途切れさせることなく安定的な高圧水素の製造を行うシステムで検討を行った。水素吸蔵合金のみを用いて昇圧を行う場合についても検討を実施している。しかし、圧縮率を3と想定すると0.7から45 MPaGまで昇圧するのに3-5段の構成が必要となる。圧縮率をより高く設定し段数を削減する可能性については、今後の検討課題である。吸蔵および放出に必要な温度条件は、それぞれ30℃（吸蔵）、80℃（放出）と設定した。今回想定している ΔH が $-14 \sim -28$ kJ/mol H_2 の水素吸蔵合金を用いた場合、反応熱および反応容器の熱容量を考慮しても、必要となる熱量は0.1 kW未滿に収まり、小規模設備として十分に実装可能な範囲である。

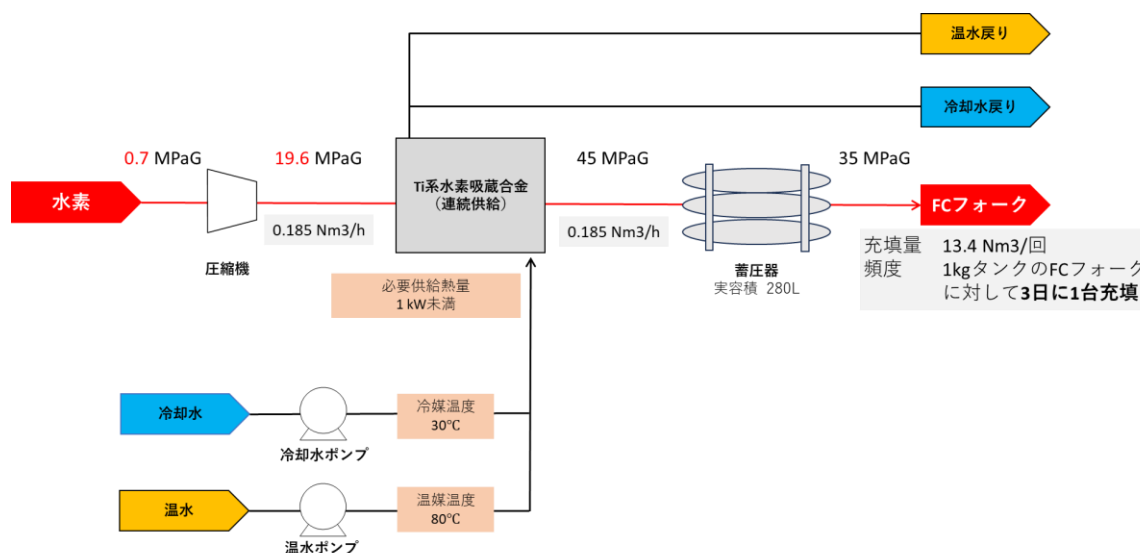


図 3-2. 水素吸蔵合金による昇圧システムの概略フロー

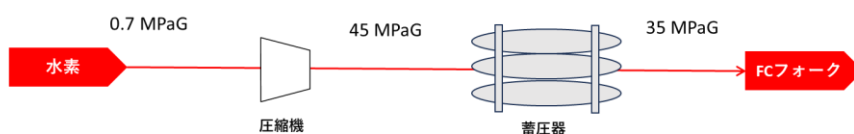
3-4. 昇圧コスト試算

本検討では、(1) 機械昇圧、(2) 機械昇圧+水素吸蔵合金昇圧、(3) 水素吸蔵合金昇圧システムの3caseについて、昇圧コストの比較を行った(図 3-3)。比較条件としては、3日に一度、FCフォークリフト1台へ充填を行う場合に必要となる約0.2 Nm³/h程度の昇圧能力を基準とした。また、需要拡大を想定し、スケールアップした4 Nm³/hの昇圧能力での機械昇圧、水素吸蔵合金昇圧システムに関する試算も実施した。基本的な条件を表 3-1でまとめる。

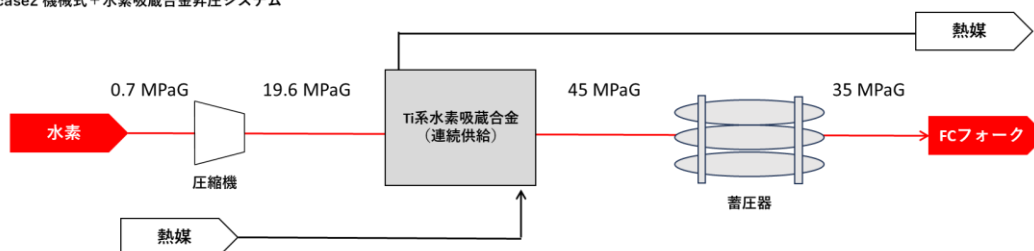
表 3-1. 昇圧コスト試算基本条件

基本条件			
昇圧流量	Nm ³ /h	0.20	4.0
年間運転時間	hr	8,000	
耐用年数	年	8	
電力単価	円/kWh	30	

・ case1 機械式昇圧システム



・ case2 機械式 + 水素吸蔵合金昇圧システム



・ case3 水素吸蔵合金昇圧システム

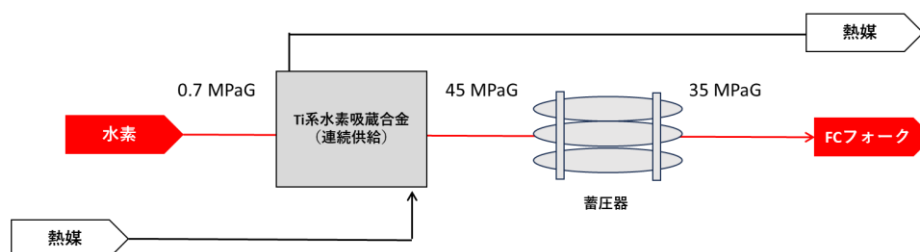


図 3-3 case 別昇圧システムイメージ

- 検討の結果、1 Nm³当たりの水素昇圧コストは機械昇圧（case1） < 機械昇圧 + 水素吸蔵合金昇圧（case2） < 水素吸蔵合金昇圧（case3）の順となった（表 3-2）。機械昇圧 + 水素吸蔵合金昇圧システム（case2）については、吸蔵合金ユニットの材料費が大きく、導入コストが機械昇圧のみ（case1）の場合に比べて高くなる。また、吸蔵・放出に必要な熱量が増加するため、変動費も機械昇圧の約 1.3 倍となる。さらに、機械昇圧機を併用することにより、吸蔵合金方式の利点であるメンテナンス費不要のメリットがなく、結果としてコスト的に不利となる。水素吸蔵合金昇圧システム（case3）の場合も、同様に合金材料費が高額で初期導入コストが大きくなる。さらに、吸蔵・昇圧に要する熱量が大きいため、変動費は機械昇圧方式の 約 7.3 倍と試算

された。メンテナンス費不要という特徴を考慮しても、全体としてコストメリットは見込めない結果となった。ただし水素吸蔵合金は再溶解できる（特開 2002-146449）ため、耐用年数後に回収し、再溶解・再利用する場合は大幅なコスト低減になる。そのため低コスト再利用技術の確立も実証事業を行う上での検討課題と考えられる。なお、水素吸蔵合金の吸蔵・放出に必要な熱源として 未利用熱源（排熱等）を活用できる場合（case2'、3'）、変動費を大幅に削減できる可能性がある。特に吸蔵合金昇圧システムでは熱源コストの占める割合が大きいため、未利用熱源が利用可能であれば、3case の中で最も変動費が小さくなる。したがって、吸蔵合金昇圧システムを実証する上では、未利用熱源の活用が必須条件であるといえる。なお、水素需要が拡大し、処理量を増加させた場合（case4、5、5'）でも、3case 間のコスト順位は上記と同様の傾向を示した。大規模化によって一定のスケールメリットは得られるものの、吸蔵合金方式の導入コストおよび熱源コストの大きさが比例的に影響し、順位の逆転には至らなかった。今後、補助金等により初期投資である固定費を削減できる場合には、吸蔵合金を用いた方式の経済性が改善する可能性はある。特に、未利用熱源と組み合わせ、メンテナンス費用の低い小規模供給システムとして位置づけることで、島嶼地域に適した供給方式となる可能性がある。

表 3-2 条件毎の概略検討結果一覧

			Case1	Case2	Case2'	Case3	Case3'	備考
項目	中項目	単位	機械昇圧 0.2Nm3/h規模	機械+合金昇圧 0.2Nm3/h規模	機械+合金昇圧 0.2Nm3/h規模 未利用排熱/冷熱	合金昇圧 0.2Nm3/h規模	合金昇圧 0.2Nm3/h規模 未利用排熱/冷熱	
基本条件	水素供給量/昇圧能力	Nm3/h	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185	
	運転時間	hr/Y	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	
	昇圧水素	Nm3/Y	1,480	1,480	1,480	1,480	1,480	
変動費	電力合計	kW	1.057	1.343	1.040	7.759	1.000	概算
	電力単価	円/kWh	30	30	30	30	30	
	昇圧コスト	円/Nm3	171	218	169	1,258	162	
固定費	耐用年数	年	8	8	8	8	8	
	固定費	円/Nm3	2,689	2,729	2,729	3,068	3,068	
圧縮機 メンテナンス費	メンテ費_ガス単価	円/Nm3	321	321	321	0	0	概算
仕上がり単価（概算）		円/Nm3	3,181	3,267	3,218	4,327	3,230	

			Case4	Case5	Case5'	備考
項目	中項目	単位	機械昇圧 4Nm3/h規模	合金昇圧 4Nm3/h規模	合金昇圧 4Nm3/h規模 未利用排熱/冷熱	
基本条件	水素供給量/昇圧能力	Nm3/h	4.0	4.0	4.0	
	運転時間	hr/Y	8,000	8,000	8,000	
	昇圧水素	Nm3/Y	32,000	32,000	32,000	
変動費	電力合計	kW	2.200	147.1	1.0	概算
	電力単価	円/kWh	30	30	30	
	昇圧コスト	円/Nm3	17	1,104	8	
固定費	耐用年数	年	8	8	8	
	固定費	円/Nm3	703	814	814	
圧縮機 メンテナンス費	メンテ費_ガス単価	円/Nm3	94	0	0	概算
仕上がり単価（概算）		円/Nm3	813	1,918	822	

3-5. 仕上がりコスト試算

沖縄県には大規模な水素製造設備がなく、地域で利用可能な水素供給源は、一部の化学製造プロセスから発生する副生水素、再生可能エネルギーを用いた水電解による水素、県外からの輸送となっている。そこで、本検討では公開されている情報をベースに水素ガス単価を仮定し本昇圧システムを用いた場合の製品水素の仕上がりコストを概算した。また、水素ガス単価の想定として沖縄県内の副生水素、水電解由来の水素、国が目標として掲げている水素単価を基に検討した(表 3-3)。

表 3-3 検討に用いた水素ガス単価

種類	単位	想定単価	備考
沖縄県内副生水素単価	円/Nm ³	100	公開情報より設定 ⁹⁾
水電解由来水素単価	円/Nm ³	121	公開情報より設定 ¹⁰⁾
国目標水素単価	円/Nm ³	30	

副生水素や水電解で製造単価が例えば 100～120 円/Nm³程度と仮定した際、昇圧システムを適用した場合の仕上がり単価は 900～950 円/Nm³になることが想定される。また、国目標としている 30 円/Nm³にまで水素製造のコストダウンが進んだ場合に、昇圧水素の仕上がりコストは 850 円/Nm³程度にまで低減されると推察される。現状では、水素需要が比較的小さい島嶼地域において大型化によるコストダウンは非現実的であり、水素需要を定着させるためにも稼働率の向上が重要である。将来的には、水素需要の拡大に伴う設備の大型化、または水素吸蔵合金のコスト低減により、より安価な水素昇圧が実現可能になることが期待される。

4. 法規制に関する課題と規制緩和に向けた要件整理

法規制に関して、最終的な許認可を与える政府機関との調整の前に、情報や論点を整理する必要がある。そのため水素吸蔵合金による 80 MPa 昇圧技術を保有している産総研、高圧ガス保安協会（KHK）および政策提言を行っている日本水素バリューチェーン推進協議会（JH2A）にヒアリングを行った。また、同様の課題を抱えている水電解昇圧装置や海外の事例について調査を行い、既に国内で水素吸蔵合金による昇圧装置の実証機を製造した神戸工業試験場へのヒアリングも行った。以下にその内容をまとめる。

4-1. システム構築及び法規制緩和を含めた事業展開

システム構築及び法規制緩和を含めた事業展開に関する各機関と協議し、下記のアドバイスを得た。

- ① 産業保安の専門機関を巻き込み事業を進めた方が良い。
- ② 高圧水電解ポンプは、自主規制を作成した事例があるため、詳細について調べ、参考にする方が良い。
- ③ システム構築と法規制緩和について、どちらが先に構築するべきかについて議論がなされたが、同時に進める必要がある。
- ④ 必ず開放検査をするというわけではなく実情に合った運用をすべきで、管理された水素であれば代替検査などを行うことで開放検査を実施しなくて良い。尚、エロージョン（腐食）やコロージョン（摩耗）が無い場合という条件付きであり、合金が充填されている場合は摩耗が無いと言い切れるかどうかのポイントである旨が示された。合わせて、内容器を作ることも考えられ、摩耗がこれだと起こりえないということを然るべき機関等で判断してもらう必要はある旨が提示された。

4-2. 水素ステーション等における高圧ガス保安規制合理化戦略

高圧ガス保安規制の合理化に向けた戦略について 4 点アドバイスを受けた。

- ① 開放検査の合理化に向けたアプローチについて。現状の課題と方針として昇圧プロセス等の複雑な高圧水素設備において、一律の開放検査は負担が大きい。そのため管理された水素環境や海外の運用実績（コンディションベースのメンテナンス）をエビデンスとして活用する。また、寿命評価と環境要因として、設備の余寿命診断に加え、離島特有の「塩害環境」における腐食データ等を提示し、開放検査の周期延長やスキップの妥当性を立証することが挙げられる。
- ② 制度活用のルートとして大臣特認及び特区制度について。大臣特認の取得として、通常の実証を超えた運用を実現するため、大臣特認プロセスを進める。また、沖

縄特区の活用として、沖縄県における特区制度を敷くことで、地域特性に合わせた柔軟な運用スキームを構築する。

- ③ ステークホルダーとの連携強化を図り客観的なアドバイスを受ける体制を構築する。また、行政窓口において、グレーゾーン解消制度に頼りすぎず、経済産業省の産業保安グループへ直接相談を行う。
- ④ 技術的・制度的リファレンスについて。類似事例の調査では水電解昇圧ポンプなど、類似の圧縮設備の規制上の扱いを確認し、論拠の参考にする。また、海外事例の参照として、海外でのコンディションベースの検査運用実績をベンチマークとする。

4-3. 水素吸蔵合金を用いた昇圧システムの社会実装に向けた規制対応戦略

規制対応に関する戦略について以下4点のアドバイスを得た。

- ① 実証事業の目標とステップとしてフェーズを分ける。フェーズ1では産総研の合金技術（70～80 MPa 昇圧）をスケールアップし、沖電工のフォークリフト用 35 MPa ディスペンサーへ接続・供給する。フェーズ2では将来的に沖縄県内の既存水素ステーションのバックアップ電源・供給源としての導入を目指す。それらの波及効果として、本実証を水素吸蔵合金搭載タンクによる水素輸送など、将来的な規制緩和の足がかりとする。
- ② 高压ガス保安法への対応（開放検査の代替措置）として下記を示す。基本戦略として水電解装置の先行事例を参考に、構造上困難な「開放検査」に代わり、センサーによる常時モニタリング等での安全性担保を模索する。また海外事例も活用し、欧州（5年に1度の非破壊検査）や、スイス（GRZ社）、イタリア（Cosma-i社）等の事例調査や海外動向とLCA算定を整理し、国内適合性を協議する。
- ③ 規制当局へのアプローチとして、最終的な承認機関である経済産業省の高压ガス保安室に対し、装置の定義（圧縮機・熱交換器）と適用基準を早期相談する。その際にシステム概略図や懸念点を網羅した高精度な説明資料を準備する。
- ④ 推進体制の構築として下記を示す。外部専門家委員会の設置や実証を通じて材料への影響評価データを蓄積し、将来的な安全性を証明する客観的な根拠（エビデンス）を蓄積する必要がある。

4-4 水電解昇圧設備の規制事例

現行の高压ガス保安法で水素ポンプシステムは圧縮機と分類されず、「その他の圧力容器類」となる。山梨県企業局向けの水素ポンプシステムについては、高压ガス保安法（一般則6条対応）で設計・製作している。水素ステーション対応である一般則第7条3項に準拠した設計・製作は、スタックが「圧縮機」と認められなかったため、大型化・高压化し

た場合「特定設備」として扱われ製造コストが非常に高額となることが判明した。更に、 $82\text{ MPa} \cdot 5\text{ Nm}^3/\text{h}$ 供給可能なスタック開発が大幅に遅れたため NEDO 事業の間では未達となった。また、高圧水電解の強度設計は例示基準がないため、加圧試験（4 倍加圧）を併用することとなった。

※NEDO 報告資料より一部抜粋¹¹⁾

4-5. 神戸工業試験場のヒアリング結果

神戸工業試験場では、2020 年に 20 MPa 昇圧、供給量 $1\text{ Nm}^3/\text{h}$ 以上の装置を開発し、実証機として試験運転に成功しており¹²⁾、この時は高圧容器として登録している。水素吸蔵合金を用いた昇圧システムを市場投入する場合、高圧ガス保安法の定期検査で開放試験をすることが課題であると認識している。法規制への対応は同社も現在検討中であるため、今後も情報交換を行いながら連携を模索したいという回答を得られた。

4-6. まとめおよび実証試験計画

上記のヒアリング・調査内容をまとめると、水素吸蔵合金は高圧タンクに分類される可能性が高い。また、樹脂コーティングを行い、設計上で摩耗が起こらないことを示しつつ、肉厚試験や内部の構造を調べる方法、随時のモニタリングなどを用いて安全性を担保していくことで高圧ガス保安法が指定する定期検査の開放試験を免除できる可能性が高いことが明らかになった。ただし今後も海外事例の動向を注視しながら経産省と密に連携し、詳細を定めていく必要があると考えられる。

5. 沖縄への将来的な接続イメージ

5-1 現状の運用体制

沖縄は現在、県外から持ち込んだ高圧水素タンクを事業所へ搬入し、そのまま水素ステーションで FC フォークリフト向けに充填する運用を実施している。また、導入されている水素燃料電池発電システム（ヤマハ HP35FA1Z）は、FC フォークリフト実証事業の一部として、残圧の水素を再度有効利用するシステムとして活用されている。（図 5-1）



図 5-1 株式会社沖縄水素充填システム実証事業²⁾

この取り組みは、内閣府の「沖縄型クリーンエネルギー導入促進実証事業費補助金」を活用し、水素燃料普及加速の基盤整備として進められている。現状では沖縄県外からの外販高圧水素での運用が主軸であり、同時に水素燃料電池と FC フォークの運用ノウハウ等を蓄積する段階にある。直近の未来としては外販水素の利用もしくは地産水素の利用が可能性として考えられる。

5-2. 外販水素継続時の課題

(1) 外販水素運用を継続する場合の課題

外販水素は、運搬距離が長いこと及び専用車両による高圧輸送が必要であるため、輸送費が価格に上乗せされる点が避けられず、事業者にとってコスト高となる傾向がある。沖縄は島嶼地域であるため、本土と比較して輸送コストの負担は大きく、長期的には経済性の面で不利になる可能性がある。

(2) 地産水素の製造・必要機能および MH 昇圧技術の推進イメージ

沖縄では再エネ導入が進む中で地産水素製造の可能性があると考えられる。しかし、地産低圧水素を FC フォークリフトに供給するには、高圧化が必須となる。現状、機械式コンプレッサによる昇圧は技術的に確立済みで社会実装が可能なレベルであるが、設備コス

ト、メンテナンス負荷、騒音、油管理などの課題が残るため、経済性のよい技術が求められ、排熱エネルギーを活用可能な MH による昇圧が有望技術である。ただ、MH による低圧から高圧までの昇圧は商用規模での技術実績はないため、商用レベルでの技術実証が必要なほか、X で示した規制緩和に必要なデータ取得のための試験が普及における必要条件となる。現状の選択肢としては機械式の昇圧のみであるが、並行して FC フォークを実際に運用している沖縄工にて MH による昇圧技術の実証・データ取りを進めることで、将来的な水素利用に貢献可能であると考えられる。

5-3. 地産水素活用および MH 昇圧技術の展望

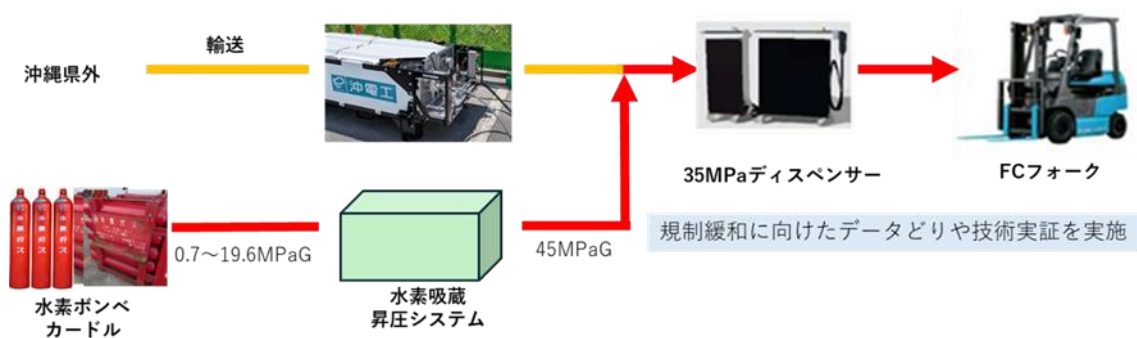


図 5-2 技術実証フェーズのイメージ

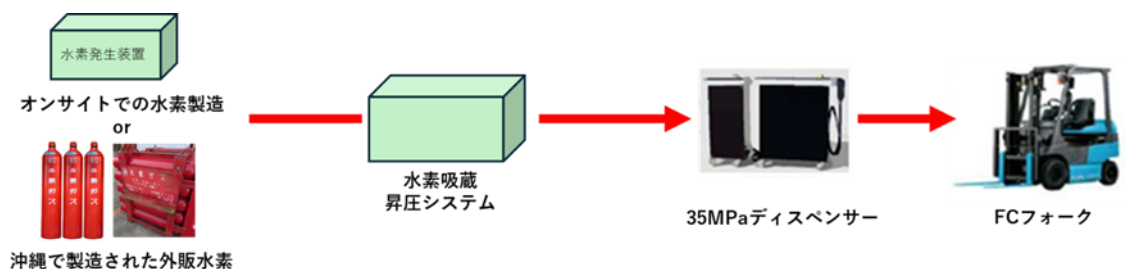


図 5-3 通常運用フェーズのイメージ

6. CO₂排出量の試算

6-1 評価目的

本 LCA（ライフサイクルアセスメント）評価の目的は以下の 2 点を実施することで環境負荷の実態を明らかにすることである。一点目は島嶼地域向けの水素ステーションにおいて水素吸蔵合金（Metal Hydride, MH）を用いた昇圧システムとして、従来の機械式圧縮機と金属水素吸蔵合金（MH）式昇圧システムの環境性能を定量的に比較評価することである。二点目はライフサイクル全体の温室効果ガス（GHG）排出量を定量的に評価することである。具体的には以下の 3 点を目的とする。一点目に機能単位あたりの GHG 排出量（kg-CO₂eq/Nm³-H₂）を算定し、環境性能を定量化する。二点目にライフサイクル各段階（製造、建設、運用、メンテナンス、輸送）の排出寄与を分析し、ホットスポットを特定する。三点目に改善シナリオ（再生可能エネルギー利用、排熱活用、スケールアップ）の環境削減効果を評価し、最適化の方向性を示す。

続いて、評価の主要な項目として以下の 4 点を挙げる。一点目は感度分析を通して電力係数変化の影響評価を実施することである。二点目は再生可能エネルギー電力利用と排熱活用の効果検証を通して再生可能エネルギーの電力利用と排熱活用の効果検証である。三点目は機械式昇圧システム（ベンチマーク）と MH 式の環境性能比較として比較 LCA を実施することである。四点目は全体評価として水素製造を含む水素ステーション全体での LCA 評価を実施することである。

本評価は、離島地域における小規模・ユニット型水素供給システムの環境適合性を検証し、従来の機械式昇圧システムとの比較を通じて、MH 昇圧技術の環境面での優位性と課題を明確化することで、今後の技術開発および実証事業の一助になることを想定する。

6-2 評価範囲

6-2-1 システム境界

本評価のシステム境界は、クレードル・トゥ・ゲート（Cradle-to-Gate）とし、MH 昇圧システムのライフサイクル全体を以下の 5 項目（製造から運用までを対象）に区分して評価し以下の表の通りに示す。

表 6-1 評価項目について

分類	項目
① 製造	チタン合金、ステンレス鋼、鋼管、電気機器の製造
② 建設	建設工事、設備据付
③ 運転	電力消費（加熱・冷却・制御）、未利用熱利用

④ メンテナンス	定期点検、部品交換（機械式のみ）
⑤ 輸送	材料・部品の輸送

6-2-2 評価対象とするケース及びシステム仕様

本評価では規模（0.2 Nm³/h vs 4 Nm³/h）、技術方式（機械式、MH 式、ハイブリッド）、排熱利用の有無を組み合わせた 8 ケースを評価対象とし以下の表の通りに示す。

表 6-2 評価対象とする仕様一覧

Case	項目	規模 (Nm ³ /h)	技術方式	排熱利用
Case1	機械昇圧 4Nm ³ /h	4.0	機械式	無
Case2	機械昇圧 0.2Nm ³ /h	0.185	機械式	無
Case3	機械+合金昇圧 0.2Nm ³ /h	0.185	ハイブリッド	無
Case3'	機械+合金昇圧 0.2Nm ³ /h（排熱）	0.185	ハイブリッド	有
Case4	合金昇圧 0.2Nm ³ /h	0.185	MH 式	無
Case4'	合金昇圧 0.2Nm ³ /h（排熱）	0.185	MH 式	有
Case5	合金昇圧 4Nm ³ /h	4.0	MH 式	無
Case5'	合金昇圧 4Nm ³ /h（排熱）	4.0	MH 式	有

6-3 機能単位

本評価の機能単位は、「1 Nm³の水素を 0.7 MPaG から 45 MPaG に昇圧すること」とし、表記単位は kg-CO₂eq/Nm³-H₂ とする。機能単位の詳細は、入口圧力を 0.7 MPa（大気圧の約 7 倍）、出口圧力を 45 MPa（燃料電池自動車充填圧）、水素量を標準状態で 1 Nm³（ノルマル立方メートル）、評価期間を 8 年間（システム寿命）、処理水素量は Case1・Case5 は 256,000 Nm³、Case2・Case3・Case4 は 11,840 Nm³とする。尚、機能単位を体積基準（Nm³）とすることで、他の水素昇圧技術や水素製造プロセスとの比較可能性を確保している。

6-4 インベントリ分析

6-4-1 データベース及びインベントリ分析

各プロセス（水素吸蔵合金を用いた昇圧システム）のインベントリデータを収集し、投入物・排出物・生産物にかかる GHG 排出量原単位を元に、各プロセスの GHG 排出量を

算定した。GHG 排出原単位は表 1 に記載のデータベースから引用した。また使用したデータベースを表 6-3 に示す。本評価の LCA 手法は ISO 14040/14044 および日本 LCA 学会の実務指針¹³⁾に準拠した。なお、本インベントリ分析では、水素吸蔵合金（MH 合金）の廃棄時の副生成物として「リサイクル金属」を計上しているものの、合金の再溶解・再利用については評価範囲外としており、原材料製造に係る CO₂は新規材料を投入することを前提に算定している。ただし、前述のように水素吸蔵合金は再溶解が可能であり、耐用年数後に回収・再溶解・再利用した場合には、チタン合金等の新規原材料の製造に伴う CO₂排出量を大幅に削減できると考えられる。特に、本分析において廃熱利用ケース（Case 4'・Case 5'）では製造段階の CO₂が全体の 34～83%を占める支配的な排出源となっており、再溶解・再利用シナリオを適用した場合の環境負荷低減効果は相対的に大きくなる可能性がある。合金の再利用を考慮した評価シナリオの組み込みは今後の課題であり、再利用技術の確立は実証事業における重要な検討事項と考えられる。

表 6-3 GHG 排出原単位一覧

分類	引用文献・資料またはデータベース
電力	沖縄電力株式会社 2024 年度 CO ₂ 排出係数 ¹⁴⁾
その他項目	AIST-IDEA Ver.3.5.1 標準版 (2025/05/30) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ ¹⁵⁾

※AIST-IDEA の個別データセットは企業秘密保護のため本報告書では非表示

表 6-4 各プロセスにおける投入物・排出物・生産物

分類	項目
投入	・エネルギー：電力（沖縄電力、2024 年値: 0.677 kg-CO₂/kWh）、未利用熱（排熱利用ケースのみ） ・原材料：チタン合金（金属水素吸蔵合金材料）、ステンレス鋼（圧力容器・配管）、鋼管（構造材）、電気機器（制御システム・センサー等） ・サービス：建設工事、保守メンテナンス、輸送
排出	・温室効果ガス：運転時 CO₂（電力消費由来）、製造時 CO₂（材料製造由来）、建設時 CO₂（工事由来）、メンテナンス時 CO₂、輸送時 CO₂
生産物	・主生成物：高圧水素ガス（0.7 MPa → 45 MPa） ・副生成物：排熱（未利用の場合は廃棄、利用の場合は他プロセスへ供給）、リサイクル金属（廃棄時）

6-5 GHG 排出量算定結果

6-5-1 5 ケースの機能単位の CO₂排出量

機能単位における CO₂排出量を下記の通り示す。

表 6-5 ライフサイクル全体における GHG 排出量

Case	水素処理量 (Nm ³)	電力消費 (kWh)	総 CO ₂ 排出量 (kg)	機能単位 CO ₂ (kg-CO ₂ /Nm ³)	評価
機械昇圧 4Nm ³ /h 規模	256,000	140,800	1,643,752	6.42	優秀
機械昇圧 0.2Nm ³ /h 規模	11,840	67,634	231,260	19.53	良好
機械+合金昇圧 0.2Nm ³ /h 規模	11,840	85,961	245,623	20.75	要改善
機械+合金昇圧 0.2Nm ³ /h 規模 (排熱利用)	11,840	66,560	232,488	19.64	良好
合金昇圧 0.2Nm ³ /h 規模	11,840	496,568	383,332	32.38	要改善
合金昇圧 0.2Nm ³ /h 規模 (排熱利用)	11,840	64,000	90,483	7.64	優秀
合金昇圧 4Nm ³ /h 規模	256,000	9,416,822	7,137,415	27.88	要改善
合金昇圧 4Nm ³ /h 規模 (排熱利用)	256,000	64,000	805,554	3.15	最優秀

Case5' (MH 4 Nm³/h + 排熱利用) は 3.15 kg-CO₂/Nm³であり良いケースと判断できる。一方で Case4 (MH 0.2 Nm³/h 排熱なし) は 32.38 kg-CO₂/Nm³ (約 10 倍の差) であり望ましくないケースである。尚、機械式昇圧は 6.42~19.53 kg-CO₂/Nm³ (規模により約 3 倍の差)、排熱利用では MH 式では-76~-89%の削減効果が得られ (最大の環境対策)、スケール効果は大規模化により固定費が分散、機能単位 CO₂が低減している。

6-5-2 ライフサイクル全体の GHG 排出量の内訳

各ケースの CO₂排出量をライフサイクルステージ毎に分けると、技術方式や排熱利用の有無により排出構造が大きく異なることが明らかとなった。尚、技術方式別の排出構造の特徴として、機械式 (Case1, Case2) はメンテナンス CO₂が最大 (48~60%) であり、沖縄等の離島では部品交換・輸送コストが環境負荷の主因である。MH 式・排熱なし

(Case4, Case5) は運転時電力 CO₂が支配的 (88~93%) であり加熱冷却の電力消費が極めて大きい。MH 式・排熱利用 (Case4', Case5') は製造時 CO₂が最大 (34~83%) であり、運転時 CO₂は大幅削減されメンテナンスフリーの利点を最大化している。

6-6 感度分析

6-6-1 電力係数の影響評価

沖縄電力の CO₂排出係数は、2024 年実績値 0.677 kg-CO₂/kWh と年々改善傾向にある。本分析では、電力係数の変化が各ケースの環境性能に与える影響を評価した。感度分析の結果、電力係数が 0.1 増加すると、機能単位 CO₂は約 0.5~2.0 kg-CO₂/Nm³増加 (ケースにより異なる) する。MH 式 (排熱なし) では電力係数の影響を最も強く受け

(Case4: 32.38→41.44 kg-CO₂/Nm³, +28%)、排熱利用もケースでは電力係数の影響が小さい (Case5': 3.15→3.20 kg-CO₂/Nm³, +1.6%)。また、再エネ 100%電力 (係数 0.000) では、全ケースで大幅に削減 (-5.8~-89.3%) しており、機械式は電力係数の影響が相対的に小さい (メンテナンス CO₂が支配的なため)。

6-6-2 シナリオ分析 (再エネ電力・排熱利用)

4つのシナリオ (S1: ベースケース、S2: 再エネ 100%電力、S3: 排熱利用、S4: 再エネ+排熱) について、各ケースの環境性能改善効果を評価した。シナリオ別の削減効果として、S2 (再エネ 100%電力) は機械式で-5.8~-19.8%、MH 式 (排熱なし) で-87~-89%の大幅な削減効果が得られる。S3 (排熱利用) では MH 式で-76~-89%の劇的削減。機械式は排熱利用不可のため変化はない。S4 (再エネ+排熱) では MH 式で最大-89%削減したものの、既に排熱利用済みのケースでは追加効果は限定的である。重要なこととして MH 式における排熱利用は再エネ電力導入以上の削減効果を持つことができ、大規模 MH 式+排熱 (Case5') はどのシナリオでも最優秀 (2.98~3.15 kg-CO₂/Nm³) であるといえる。

6-6-3 比較 LCA (機械式ベンチマークとの比較)

Case1 (機械昇圧 4Nm³/h、6.42 kg-CO₂/Nm³) をベンチマークとして、他の 7 ケース

の相対的な環境性能を評価した。機械式ベンチマーク（Case1）を上回るケースは Case5' のみ（-51.0%、3.15 kg-CO₂/Nm³）である。機械式の小規模（Case2）はベンチマークより+204%悪化（19.53 kg-CO₂/Nm³）しスケール効果が顕著である。MH 式・排熱なし（Case4, Case5）ではベンチマークより+334~+404%悪化し実用性に課題がある。MH 式・排熱利用小規模（Case4'）はベンチマークより+19%劣位（7.64 kg-CO₂/Nm³）している。結論として、離島での環境性能では、大規模 MH 式+排熱利用が機械式を圧倒している。

6-6-4 水素ステーション全体における LCA

水素昇圧システムは水素ステーション全体の一部であり、水素製造、輸送、貯蔵、ディスプレイも含めた全体評価が重要である。本分析では、4つの水素製造方法別にステーション全体の CO₂排出量を評価した。（表 6-6）

表 6-6 水素ステーション全体における製造方法別の CO₂排出量

製造方法	製造 CO ₂ (kg/Nm ³)	昇圧 CO ₂ (kg/Nm ³)	その他 CO ₂ (kg/Nm ³)	合計 CO ₂ (kg/Nm ³)	昇圧シェア (%)
副生水素（低炭素）	1.50	3.15	1.00	5.65	55.7
系統電解（沖縄）	25.00	3.15	1.00	29.15	10.8
再エネ電解	2.00	3.15	1.00	6.15	51.2
化石燃料改質	10.00	3.15	1.00	14.15	22.2

※上記は Case5'（MH 4 Nm³/h + 排熱利用、最優秀ケース）の結果

※水素製造段階の CO₂排出量は NEDO「水素エネルギー白書」（2023）¹⁶⁾の値を参照

水素ステーション全体における LCA の知見として、以下の4点が挙げられる。一点目は低炭素水素（副生水素、再エネ電解）では、昇圧システムの CO₂シェアが 51~56%と支配的である点である。二点目は系統電解（沖縄電力）において製造段階の CO₂が 86%を占め昇圧は 11%に留まる点である。三点目は昇圧システムの環境性能改善は、低炭素水素を使用する場合に最も重要である点である。四点目は化石燃料改質において製造 71%・昇圧 22%とバランスし両方の改善が必要である点である。以上より戦略として低炭素水素ステーションでは、昇圧システムの選択（MH+排熱）が全体環境性能を左右する。

6-7 LCA 算定まとめ

6-7-1 結論

LCA 算定における主要な結論として以下 6 点が挙げられる。一点目に最優秀ケースとして Case5' (MH 4 Nm³/h + 排熱利用) は 3.15 kg-CO₂/Nm³であり、機械式ベンチマーク (6.42) を 51%下回る点である。二点目に排熱利用の重要事項として MH 式では排熱利用により -76~-89%削減し排熱なしでは機械式の 2~5 倍の CO₂排出する点である。三点目にスケール効果として大規模化 (4 Nm³/h) により機能単位 CO₂は 1/2~1/3 に低減し固定費の分散効果が大きい点である。四点目に電力係数の影響として MH 式 (排熱なし) は電力係数に極めて敏感 (係数 0.1 変化で±28%) であり排熱利用で影響を軽減できる点である。五点目に機械式の特長としてメンテナンス CO₂が 48~60%であり、離島では部品交換・輸送の環境負荷が大きい点である。六点目にステーション全体として低炭素水素では昇圧 CO₂が 51~56%を占め、システム選択が全体性能を左右する点である。

6-7-2 推奨されるシステムについて

ケース毎で比較した際の推奨されるシステム (ケース) は下記である。大規模・排熱利用可能な場合は Case5' (MH 4 Nm³/h + 排熱) の最優先を推奨する (環境性能・メンテナンス性の両面で最優秀)。小規模・排熱利用可能な場合では Case4' (MH 0.2 Nm³/h + 排熱、7.64 kg-CO₂/Nm³) が機械式 Case2 (19.53) より優位であるため条件付きで推奨する。続いて、小規模・排熱利用不可の場合は MH 式排熱なし (32.38) より環境負荷が小さいため Case2 (機械式 0.2 Nm³/h、19.53 kg-CO₂/Nm³) をおおむね推奨する。一方、加熱冷却電力が過大で実用性に欠ける点から Case4 (MH 0.2 Nm³/h 排熱なし) と Case5 (MH 4 Nm³/h 排熱なし) は推奨しない。尚、離島での戦略として、沖縄等の離島では、排熱源の確保を最優先課題とし、確保できれば MH 式を選択すべきである。

6-7-3 今後の課題及び提言

今後の課題及び提言を下記の通り 6 つ挙げる。一点目に離島における未利用排熱源 (工場、発電所、焼却施設等) の賦存量調査と利用可能性評価として排熱源の実証調査が挙げられる。二点目に沖縄電力の CO₂係数低減ロードマップに合わせた昇圧システムの最適化として再生可能エネルギー導入計画が挙げられる。三点目に LCA 結果とライフサイクルコスト (LCC) 分析を統合した総合評価としてコスト分析との統合が挙げられる。四点目にモンテカルロシミュレーションによる入力データのばらつきが結果に与える影響評価として不確実性評価が挙げられる。五点目に CO₂排出の社会的費用 (炭素価格) を考慮した経済評価として社会的費用分析が挙げられる。六点目に Case5' (MH 4 Nm³/h + 排熱) の実証プラントによる性能検証として実証実験が挙げられる。七点目に水素吸蔵合金の再溶

解・再利用技術の確立が挙げられる。水素吸蔵合金は再溶解が可能であり、耐用年数後に回収・再溶解・再利用した場合には、チタン合金等の原材料製造に起因する CO₂排出量の削減と、大幅な材料コストの低減が同時に期待される。本 LCA 分析では廃熱利用ケース（Case 4'・Case 5'）において製造段階の CO₂が全体排出量の 34～83%を占めており、再利用シナリオを適用した場合は、すでに最優秀・優秀と評価されたケースの LCA 値がさらに改善する余地がある。また、材料コスト低減の観点からは LCC との統合評価（三点目の課題）との相乗効果も見込まれる。実証事業においては、合金の回収・再溶解工程の設計および環境・経済両面からの定量的評価を進めることが重要な検討課題と考えられる。

7. まとめ及び今後の展開

7-1 事業性評価・検討

本事業における水素吸蔵合金（MH）方式昇圧技術の事業性について、技術面・経済面・市場面の観点から総合的に評価を行った。

まず経済面では、昇圧コストが水素仕上がり単価に与える影響が非常に大きいことが明らかとなった。特に MH 方式では、吸蔵合金材料費が高額であること、ならびに吸蔵・放出時に必要となる熱エネルギーコストが支配的要因となる。このため、現状条件下では機械式昇圧単独方式と比較してコスト競争力は限定的であり、小規模需要を前提とする島嶼地域ではスケールメリットも得にくい状況にある。

一方で、MH 方式は無可動部であることから保守頻度が低く、潤滑油不要で故障リスクも小さいという特長を有する。維持管理コストや突発停止リスクを抑制できる点は、物流制約や保守要員確保が課題となる島嶼地域において一定の優位性を持つ。また、未利用熱を活用できる環境下では熱源コストを大幅に削減できる可能性があり、この条件が成立すれば経済性は大きく改善する。

市場面では、初期段階において建設機械や事業所内フォークリフトなど、局所的かつ需要量が明確な用途に限定することで、設備規模を最適化し導入リスクを抑制できると評価される。その後、稼働率向上と需要拡大を図りながら段階的に用途展開するモデルが現実的である。

さらに、合金材料費の低減、量産化による設備コスト削減、補助金等の制度支援の活用が事業成立の重要な前提条件となる。加えて、実証データの蓄積により制度合理化が進めば、維持管理負担の軽減が図られ、事業性向上に寄与する可能性がある。

総合的に見ると、現時点では単純なコスト競争では厳しい側面があるものの、未利用熱活用を前提とした運用設計、局所需要からの段階的展開、水素吸蔵合金の再溶解・再利用による真のライフサイクルコスト評価、制度支援の活用を組み合わせ検討することで、島嶼地域に特化した分散型水素供給モデルとして成立する可能性を有していると評価される。

表 7-1. MH 昇圧技術 将来イメージ・評価一覧

	現状	2030 年	2050 年
技術面	△ 商用機規模での技術実証と規制緩和が必要	○ 現状課題克服すれば技術的には問題なし	◎ 技術の進捗により大型化成立

経済面	× 開放検査で運用コスト 大きい	△ 未利用排熱の活用が鍵	◎ MH 低コスト化、燃料 転換が進み十分量の排 熱を確保
市場面	○ 現状の小規模運用と現 状の需要はマッチ	○ 限定的な需要	◎ 技術・経済性の向上に より市場も拡大

7-2 まとめ

本調査事業では、沖縄本島および離島地域における水素利活用拡大を見据え、水素吸蔵合金（MH）方式による水素昇圧技術の適用可能性について、技術面・経済面・制度面の観点から総合的な検討を行った。

技術面では、MH 方式が無可動部・低騒音・低メンテナンスといった特長を有し、維持管理負担の大きい島嶼地域に適した方式であることを確認した。また、小規模・分散型ユニットとしての構成や、機械式との二段昇圧構成による実装可能性について整理し、実証段階へ移行可能な技術的見通しを得た。

経済面では、合金材料費および熱源コストが支配的要因であり、現状では機械式単独方式と比較してコスト優位性は限定的であることが明らかとなった。ただし再溶解などによるリサイクル技術が確立できれば材料費の大幅なコスト低減が見込まれるため、将来的には優位な技術となることが予想される。一方で、未利用熱の活用や稼働率向上、合金コスト低減、補助制度の活用等を組み合わせることで、経済性改善の可能性があることを確認した。

制度面では、高圧ガス保安法に基づく年 1 回の開放点検義務が技術運用上の課題となることを整理し、海外事例調査や実証データの取得を通じた合理化の方向性を明確化した。今後は関係機関との協議を進め、技術的安全性を根拠とした制度整備を目指す。

以上より、本調査事業においては、沖縄の地域特性に適合した水素昇圧モデル構築に向けた技術的・制度的課題とその対応方針を明確化し、実証事業へ移行するための基盤を整備した。今後は実証を通じたデータ蓄積と段階的な需要拡大を図り、島嶼地域における持続可能な水素供給モデルの確立を推進していく。

参考資料

1. 沖縄電力株式会社, 2024 年 3 月 15 日, 「プレスリリース 吉の浦マルチガスタービン発電所において 水素混焼発電実証を開始」
https://www.okiden.co.jp/shared/pdf/news_release/2023/240315.pdf
2. 株式会社りゅうせき. 「副生水素活用に関するプレスリリース」. 2025 年 6 月 6 日. <https://www.ryuseki.co.jp/PressRelease20250606.pdf>
3. 株式会社沖電工 「水素充填システム実証事業開始」 2025 年 10 月 07 日 水素充填システム実証事業開始 | お知らせ | 株式会社沖電工 | 総合建設業 【建設工事・設備工事・電力工事】
4. 株式会社沖電工 「那覇空港にて燃料電池フォークリフトの実証事業を開始」
<https://www.okidenko.co.jp/topics/1768887433/>
5. 沖縄型クリーンエネルギー導入促進実証事業 (PressRelease20250606.pdf)
<https://www.ryuseki.co.jp/PressRelease20250606.pdf>
6. ブラザー工業株式会社 グリーン水素製造・充填・配送プロジェクト グリーン水素製造・充填・配送プロジェクト | 導入事例 | 燃料電池 | ブラザー
<https://www.brother.co.jp/product/fuelcell/biz/green-h2-mizuho/index.aspx>
7. 清水建設 建物付帯型水素エネルギー利用システム「Hydro Q-BiC」建物付帯型水素エネルギー利用システム「Hydro Q-BiC」 | 技術・ソリューション | 清水建設
<https://www.shimz.co.jp/solution/tech362/>
8. 榎浩司ほか. 「水素エネルギーシステム」 Vol.50, No.4, pp.214-221. 2025 年.
9. NEDO 水素・燃料電池成果報告会 2023 沖縄エリアの吉の浦マルチガスタービン発電所を核とした地域水素利活用トータルシステムの構築に関する調査 (別紙 01-13 別添 分科会発表資料)
<https://www.nedo.go.jp/hydrogen2023/pdf/C1-83.pdf>
10. 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2024 年度～2025 年度成果報告書「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/カーボンリサイクル・次世代火力推進事業/産業間連携によるカーボンリサイクル技術実装推進事業／大分コンビナートにおける産業間連携によるカーボンリサイクル事業の実現可能性調査」, p.39, 2025 年 9 月
11. NEDO 「水素社会構築技術開発事業/総合調査研究/ (イ) 水素製造・輸送・貯蔵・利用等に関する調査研究/水素製造装置の常用圧力引上げに係る規制適用の適正化に関する調査」 2023 年 3 月 100963655.pdf
12. 神戸工業試験場 (KMTL). 「水素吸蔵合金を用いた 20 MPa 昇圧実証装置」.
<https://www.kmtl.co.jp/archives/3422>
13. 日本 LCA 学会. 「LCA 実務入門」. 2020 年.

14. 沖縄電力株式会社. 「2024 年度 CO₂排出係数」. 2024 年.
https://www.okiden.co.jp/shared/pdf/corporate/profile/s_and_d.pdf
15. 産業技術総合研究所 (AIST). 「AIST-IDEA Ver.3.5.1 データベース」. 2025 年 5 月 30 日.
16. 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 「水素エネルギー白書」, 2023.