論文・報告

ダイカスト工程における水素燃焼連続溶解量産実証

Mass Production Demonstration of Hydrogen-Fired Continuous Aluminum Melting in a Die Casting Process

塩谷　聡*　Satoshi Enya
茂泉　健**　Ken Moizumi
和田　淳一***　Junichi Wada
大村　正吾*　Syougo Oomura

要　旨

いすゞグループでは2050年の事業系カーボンニュートラル達成に向け、アルミ溶解炉の脱炭素化技術として水素燃焼技術の開発を進めている。本研究では125tダイカスト量産ラインに設置された小型高効率アルミ溶解保持炉を対象に、水素燃焼による5日間の量産実証を行い、量産適用の可能性を検証した。総溶解量2,622kg、総水素使用量2,007Nm^{3}の条件下で評価した結果、安全面で懸念となっていた逆火等の異常は発生せず、溶湯品質、鋳造品質及び溶解性能は都市ガス溶解と同等であった。また実証期間中の溶解工程のCN化を実現し、水素燃焼技術の量産適用可能性を実証した。

Abstract

A five-day production demonstration test of hydrogen combustion was conducted using a small high-efficiency aluminum melting and holding furnace on a 125-ton die-casting line. No flashback occurred, and molten metal quality, casting quality, and melting performance were equivalent to those of conventional city gas combustion. Carbon-neutral operation of the melting process was achieved during the demonstration period, demonstrating the feasibility of hydrogen combustion for mass-production aluminum melting furnaces.

1　はじめに

いすゞグループの2050年事業系カーボンニュートラル(Carbon Neutral：以下、CN)達成に向け、生産部門では、いすゞエンジン製造北海道株式会社(以下、IEMH) のグリーンファクトリー(以下、GF) に向けた取り組みの一環として、アルミ鋳造工程におけるCO_2排出量削減技術の開発を推進している。アルミ溶解保持炉は鋳造工程における主要なCO_2排出源であり、その脱炭素化手法として水素燃焼技術に着目した。本報では、小型高効率アルミ溶解保持炉を対象として実施した量産実証試験について報告する。

1.1 アルミ溶解炉CN化技術の検討

図1はIEMH GF計画のロードマップである。総排出CO_2の70%は電力調達によりCN化が可能であるが、残る30%のCN化には、都市ガスを燃焼利用するアルミ溶解工程でのCO_2排出量削減が大きな課題となっている。アルミ溶解炉のCN化手法としては、再生可能エネルギー由来の電力を活用した電化と、水素燃焼への燃料転換が有力な選択肢である。

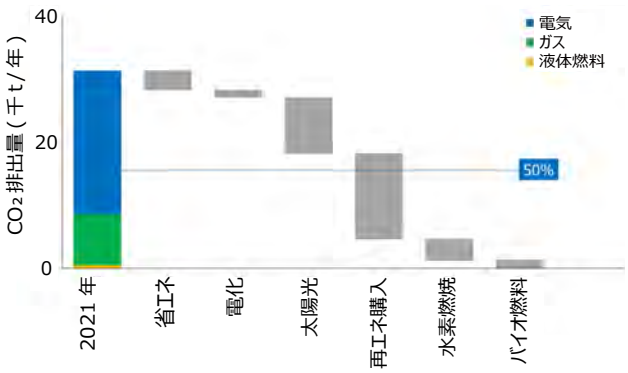


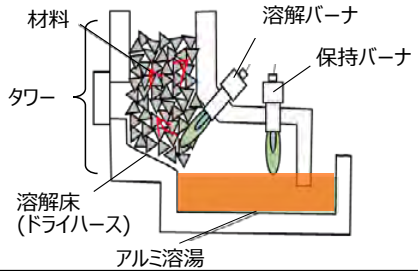
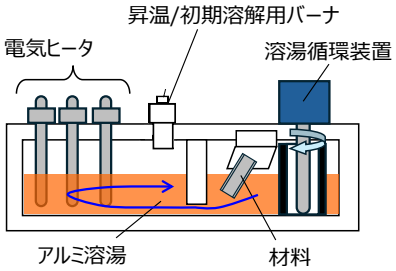
図1　IEMH GF計画ロードマップ

*要素技術部　　**IM推進部．生産技術企画部　　***いすゞエンジン製造北海道(株)

Copyright© 2026 ISUZU MOTORS LIMITED.
All Rights Reserved. 無断転載・複製・配布禁止

表1にアルミ溶解炉の水素化と電化の比較を示す。電化の場合は、グリーンエネルギーの調達が容易である一方、大容量受電設備や電力インフラ整備といった設備対応には課題がある。また、水素燃焼は燃料調達の課題はあるものの、既存の燃焼炉技術を活用できるため既存設備の流用・改造による導入が可能であり、高温燃焼による十分な溶解能力も期待できる。どちらの手法も有力候補であり、将来のCN化に向けた技術獲得を進めている。本報では、IEMHで採用している高効率個別溶解保持炉との親和性も高い水素燃焼技術の量産適用性の検証結果を報告する。

表1　アルミ溶解炉の水素化・電化比較

	水素		電気	
概要				
炉構造	○	従来の炉とほぼ同じ構造 合成ガス導入時の適用が容易	△	炉体が大きい（浸漬タイプ） 立上時の炉体昇温及び初期溶解ができない （昇温・初期溶解用バーナが必要）
自由度	○	気体・液体燃料への置換が可能 都市ガス／水素／合成ガス／バイオガス等	×	電気以外の熱源変更ができない
品質	○	メーカ試験溶解で問題なし 連続運転の結果、浄化槽+浄化装置追加の可能性はあり	○	リターン材による溶湯汚染の検証が必要 NGの場合、浄化槽＋浄化装置追加が必要
投資	○	炉体イニシャルコスト；１（水素を１と仮定する）	△	炉体イニシャルコスト；２以上（水素１に対して）
コスト	×	5.8（電気１に対して）	○	１（電気を１と仮定する）

1.2 水素燃焼量産化に向けた課題

水素は都市ガスと比較して次の特徴を有する。

- 可燃範囲が広い
- 燃焼速度が速い
- 着火しやすい

そのため、配管内に空気が残留した状態で着火すると逆火や爆発が発生する危険性がある。

また、アルミ溶解工程では燃焼生成物が100%水蒸気となるため、アルミ粗材に対して次の品質影響が懸念される。

- 溶湯内水素量増加
- 機械的特性低下
- ブローホール発生

そこで量産設備を用いた実証試験を実施し、安全性、品質及び生産性の観点から量産適用の可能性を評価した。

2　水素量産実証試験の概要

2.1 技術検証ステップ

水素燃焼技術の量産化に向け、段階的な評価を実施した。第1ステップとして、2023年11月に(株)宮本工業所の試験炉を借用し、4時間連続溶解試験を実施した。この試験では、まず安全性を最重視し、逆火対策についての検証を行った。次いで、溶湯品質、溶解能力について、製品を鋳造しない状態での評価を行った。次のステップとして、量産ラインの改造を行い5日間連続の量産実証を実施した。**表2**に水素燃焼検証ステップを示す。

表2　水素燃焼検証ステップ

		1st STEP			2nd STEP		3rd STEP
		メーカ試験(2023/11実施済)			小型炉実機検証	大型炉実機検証	量産実証
対象炉		メーカ小型試験炉			IEMH 125tN#1	検討中	IEMH 対象 5 炉
溶解時間		4h連続			5日間(10直)連続	←	2030年～
課題/評価項目		目標	結果		目標	目標	目標
S	設備安全	逆火対策の検証 (JIS安全指針に準拠)	逆火なし	○	・自動パージ機能の検証 ・水素/都市ガス切替時 の安全対策検証	・大型炉での検証完了 →量産仕様見極め完了	・100％安全を確保 した状態で量産開始
Q	溶湯品質	成分他 いすゞ規格内	いすゞ規格内	○	・量産稼働条件下 連続10直稼働で 問題ないことを確認	・大型炉での検証完了 ・1,000kg/h以上 →量産移行判断完了	・4ケ月の連休ごと 年間の季節変動等 長期間での検証完了
	溶解能力	200kg/h 以上	250kg/h	○			
C	燃費	熱効率 45％以上	49％	○	・200kg/h以上	今回検証STEP	
	溶解歩留まり	97％以上	97.2％	○			
	設備コスト	–	–	–	・小型炉 水素改造費の 見極め完了	・大型水素溶解炉の 必要投資見極め完了 →量産展開予算申請	・水素炉 保守・メンテナンス 費用の見極め完了

2.2 量産実証設備

実証試験は、IEMHアルミ第1工場の125tダイカストラインに設置されたN#1小型個別溶解保持炉((株)宮本工業所)で実施した。使用した炉は、最大溶解能力200kg/h、貯湯量1,050kgの高効率溶解保持炉である。また、供給水素には99.99vol%以上の高純度水素 (エア・ウォーター産業・医療ガス(株)製)を使用し、タンクローリ方式で供給した。**図2**に実証設備の仕様を示す。



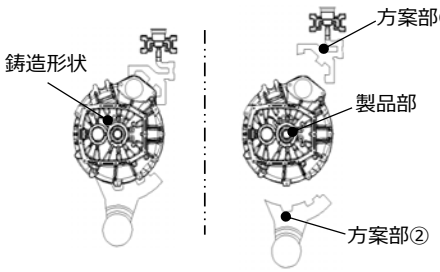
画像出展：(株)宮本工業所
製品カタログ
「ダイカスト用個別アルミ溶解保持炉 DMF･IMF」

125ｔN#1 個別溶解保持炉 仕様概要

メーカ	(株)宮本工業所
溶解能力	200kg/h（最大）
溶解バーナ出力	10万kcal/h（最大）
保持バーナ出力	5万kcal/h（最大）
雰囲気温度(℃)	650℃～750℃
溶湯温度(℃)	650℃～660℃（N#1生産車型）
溶解材料	① 100g塊 ② リターン材

<100g塊>





<リターン材>



図2　実証設備仕様

2.3 材料及び鋳造製品

量産実証で溶解した材料はADC(Aluminum Die Casting)12合金の100g塊を使用した。生産品目及び鋳込み重量、サイクルタイムー覧を**表3**に示す。

表3　生産品目一覧

生産日		品名	鋳造重量 (kg/shot)	サイクルタイム (min/shot)
1日目	AM	MYR VALVE C/CONT	0.98	0.61
	PM	EJ CAM BRAKET LOW#2/4	0.90	0.63
2日目	AM/PM	EJ CAM BRAKET LOW#2/4	↑	↑
3日目	AM/PM	EJ CAM BRAKET LOW#2/4	↑	↑
4日目	AM/PM	EJ CAM BRAKET LOW#2/4	↑	↑
5日目	AM/PM	EJ CAM BRAKET LOW#5	1.04	0.58

2.4 評価項目

評価項目を、安全性(S)、品質(Q)、性能・コスト(C)の3つの分類とした。**表4**に評価項目一覧を示す。

表4　評価項目一覧

		評価項目	評価基準
安全 S	水素供給	タンクローリ接続/切替作業	手順書通りに安全に作業できること
		バーナ交換作業	
		自動パージ機能	正常に動作すること
品質 Q	溶湯品質	成分変動	規格範囲内
		介在物量	都市ガス同等
		溶湯内水素ガス量	都市ガス同等
	鋳造品質	外観	規格範囲内
		内部品質	レベルⅣ以上
		機械的強度(引張/伸び)	都市ガス同等
性能・コスト C	溶解炉	熱効率・ガス使用量 (5日間連続溶解中avg)	都市ガス同等
		溶解歩留まり	3%以下

3　安全対策技術

3.1 水素燃焼リスクへの対応

2024年改訂JIS B8415「工業用燃焼炉の安全通則」に基づき、炉メーカ及び水素供給メーカの専門家を交えたリスクアセスメントを実施した。水素燃焼における最大の課題は逆火である。逆火とは配管内に残留した空気と水素が混合し、点火時に配管内部で燃焼が発生する現象である。量産設備において逆火防止及び逆火が発生した際の設備保護を行うため、次の安全対策を組み合わせた安全システムを構築した。

- 自動窒素パージ機能
- 水素ガス漏れ検知器
- フレームアレスタ(消火装置)
- エクスプロージョンベント(爆発放散口)

図3に安全対策システム構成を示す。

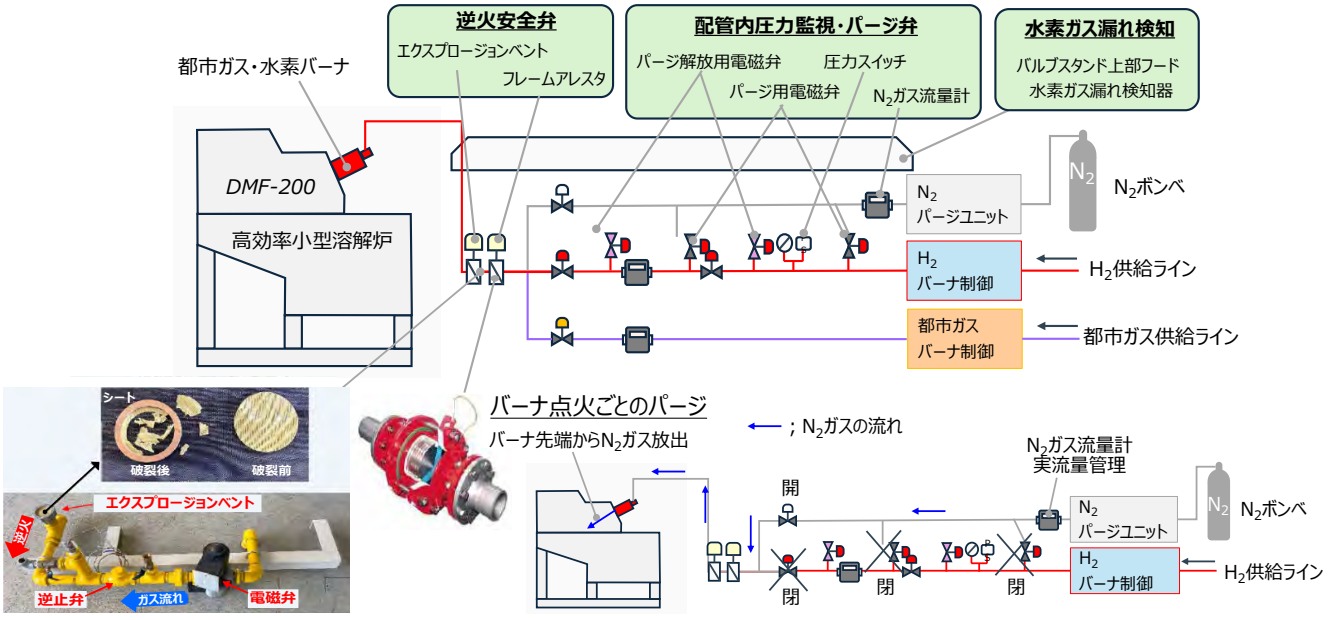


図3　安全対策システム構成

3.2 逆火実証試験

量産実証前に**図3**に示す試験装置を構築し、窒素パージを行わずに配管内へ水素と空気を導入して、意図的に逆火を発生させる検証試験を実施した。その結果、配管内最大圧力は0.2MPa以下であり、設備及び機器類が破損しないことを確認した。また、フレームアレスタ及びエクスプロージョンベントが正常に機能することを確認し、量産設備への適用に必要な安全性を確保して量産実証に臨んだ。

4 量産実証結果及び考察

4.1 実証結果

2025年8月19日から8月23日までの5日間、125tダイカスト量産ラインにおいて水素燃焼による量産実証を実施した。期間中は昼勤にて生産を行い、夜間は保持運転を実施した。**表5**に実証結果一覧を示す。全ての評価項目において基準を満足した。

表5 実証結果一覧

		評価項目	評価基準	結果	評価結果
S	水素供給	タンクローリ接続/切替作業	手順書通りに安全に作業できること	○	リスクアセスで策定した作業手順書 / Wチェックシートを用いて実作業を実施 → 手順書通りに安全に作業ができた。一部改善点が見つかった部分あり、手順書に反映済
		バーナ交換作業		○	
		自動パージ機能	正常に動作すること	○	試験期間中、逆火発生なし
Q	溶湯品質	成分変動	規格範囲内	○	試験期間中、成分NGなし（都市ガス溶解溶湯と同等）
		介在物量	都市ガス同等	○	K値；0.4 ～ 2.0、都市ガス同等
		溶湯内水素ガス量	都市ガス同等	○	都市ガス同等、水素の影響なし
	鋳造品質	外観	規格範囲内	○	外観NGなし（都市ガス溶解品と同等）
		内部品質	レベルⅣ以上	○	レベルⅤ以上OK、（都市ガス同等レベル、量産引当可受領済）
		機械的強度(引張/伸び)	都市ガス同等	○	都市ガス同等、水素の影響なし
C	溶解炉	熱効率・ガス使用量(5日間連続溶解中avg)	都市ガス同等	○	熱効率；41.2％ 溶解原単位；58.3万kcal/t
		溶解歩留まり	3％以下	○	2.9％（都市ガス溶解時と同等）

期間中の総溶解量は2,622kg、総鋳造数は2,695shotであり、総燃焼時間は164時間、総水素使用量は2,007Nm^{3}であった。今回の実証では昇温、初期溶解、量産運転、夜間保持及び溶け落とし作業を含む実際の量産運転条件で評価を実施した。従来の水素溶解試験は数時間規模の連続溶解が中心であり、著者らの調査範囲では、水素燃焼を用いたアルミダイカスト量産ラインでの連続溶解・鋳造に関する公開事例は確認されていない。本結果により、将来の量産適用に向けた重要な知見を得ることができた。

4.2 安全性評価

4.2.1 水素供給設備

実証期間中に実施したタンクローリ接続及び切り離し作業は全て事前に作成した作業手順書に従い実施した。作業中のガス漏れ、異常発熱、圧力異常は発生せず、安全に作業が可能であることを確認した。

一方で、タンクローリ切り替えには30工程以上の作業が必要であり、全てが安全重要作業に該当するため、将来量産設備へ展開する際には、人的ミスを排除するための自動化が必要であると考えられる。

4.2.2 自動パージ機能

評価期間中、逆火発生は確認されなかった。

また、失火及び再点火動作時には、自動パージ機能が正常に作動し、安全に再着火できることを確認した。

今回採用したのは、次に示す四重安全構造である。

- 窒素自動パージ機能
- 水素ガス漏れ検知器
- フレームアレスタ
- エクスプロージョンベント

これらの安全を組み合わせることで、量産設備として必要十分な安全性を確保した。

4.2.3 ガス漏れ検知

評価最終日に可燃性ガス警報が発報し、エクスプロージョンベント部のシール面からppmレベルの微小漏れが検出された。原因は、エクスプロージョンベント取り付け部のパッキンの不具合であった。意図しない形ではあったが、漏れ検知、自動停止、自動パージ、再起動(再点火)の一連の安全機能が正常に動作することを確認できた。

4.3 溶湯品質評価

4.3.1 成分変動

期間中に採取した全ての溶湯サンプル(生産開始前/昼休/生産終了後、3個/日×5日間)について成分分析を実施した。主要成分の測定結果を**図4**に示す。

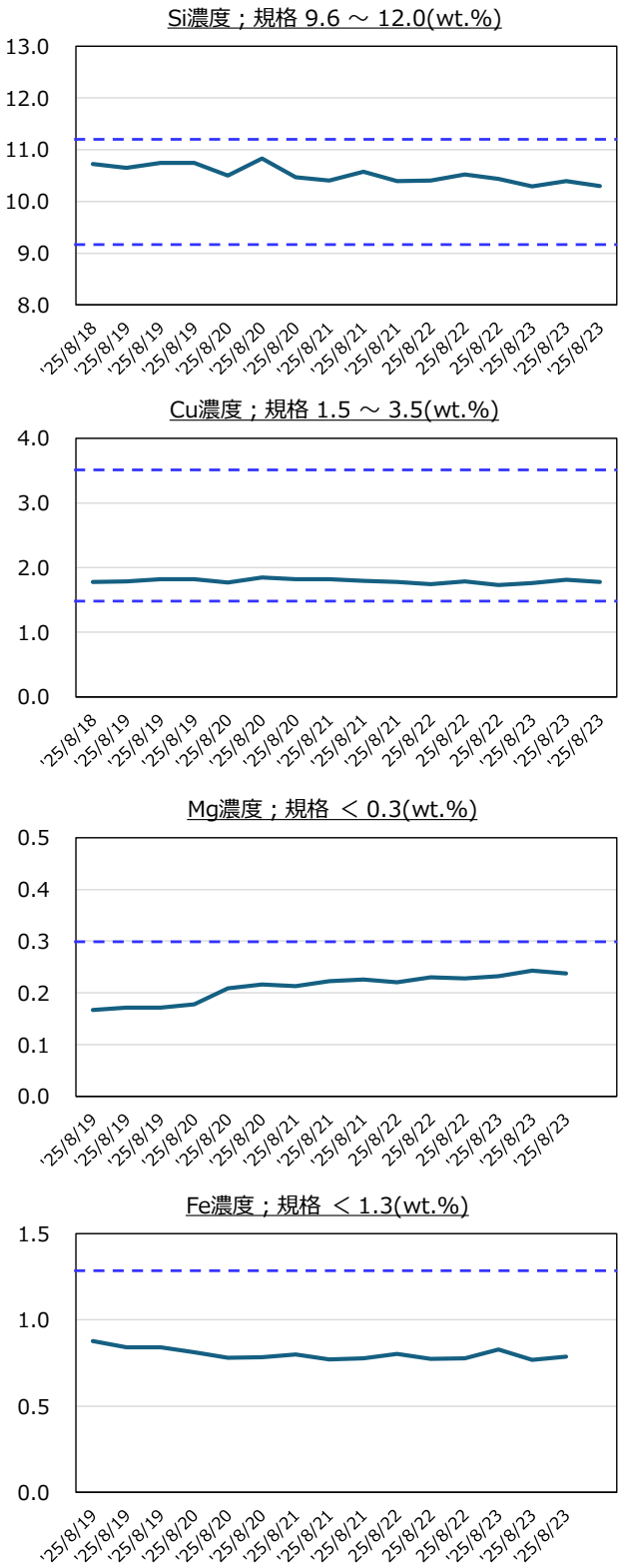


図4　主要成分の推移

図4に示す代表元素(Si，Cu，Mg，Fe)は全てADC12規格範囲内で推移した。また5日間の連続運転中に有意な成分変動は認められなかった。これにより水素燃焼による水蒸気の発生が溶湯成分へ大きな影響がないことを確認した。

4.3.2 介在物評価と引張・伸び評価

溶湯の清浄度評価として、Kモールド法(溶湯清浄度評価法)による評価を実施した。K値(溶湯中の介在物量を示す清浄度指標)は0～2.0の範囲で推移し、平均値は1.3であった。溶湯内介在物量と相関のある引張強度及び伸びについても併せて評価した。結果一覧を**表6**に示す。本評価範囲においては、一部で低下傾向はあるが、有意な差は認められなかった。これは高効率溶解炉特有の安定した燃焼制御及び定湯面制御の効果によるものと考えられる。

表6　都市ガス・水素の各データ

項目	都市ガス(N=3)	水素(N=10)
引張強度(MPa)	218 ± 8	220 ± 10
伸び(%)	2.3 ± 0.4	2.2 ± 0.5
K値	1.4 ± 0.5	1.3 ± 0.6

4.3.3 溶湯内水素量

ランズレー法(減圧凝固・密度測定法)による測定結果と引張伸び強度の結果を**図5**に示す。溶湯内水素量は0.31～0.55cm^3/100gの範囲で推移した。今回のADC12ダイカストでは機械的性質への影響は認められなかったが、AC4C(Al-Si-Mg系アルミニウム鋳造合金)等の重力鋳造用材料では影響が顕在化する可能性があり、今後の検証課題である。

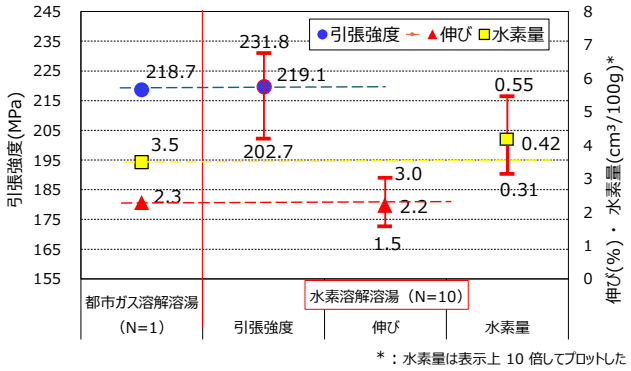


図5　溶湯内水素量

4.4 鋳造品質評価

外観検査では湯じわ、ひけ、湯回り不良等の異常は確認されなかった。またX線検査による内部品質評価でも、全サンプルが規格レベルを満足した。先

に記載した引張強度、伸びについても同様であり、水素燃焼による機械的性質への影響は確認されなかった。これらの結果から、ADC12ダイカスト部品においては水素燃焼による品質への影響はないと判断した。

4.5 溶解性能評価

熱効率は連続溶解中、溶け落とし溶解、直間保持を含み平均41.2%であり、都市ガス溶解と同等レベルであった。また溶解歩留まりは97.2%を達成した。一般に水素は燃焼速度が速くフレーム長さも変化しやすいため、溶解能力への影響が懸念されていた。しかし、今回の評価では最大200kg/hの溶解能力を確認しており、設備能力上の問題は認められなかった。一方で、燃焼容量を低下させた際にフレーム長が短くなり、熱効率が低下する傾向が確認された。この結果から、将来的には燃焼容量と連動してフレーム位置を最適化する技術が有効であると考えられる。

4.6 CO_2削減効果

今回の量産実証期間中の溶解量は、2,622kgであった。この溶解量を都市ガスで実施した場合のCO_2排出量を換算すると、約1,126kgとなる。これは、1年間で試算すると54t/年、IEMHの溶解炉全炉を水素で稼働した場合には、2,750t/年に相当する。アルミ鋳造工程のエネルギー消費量は、工場全体のエネルギー消費量に占める割合が大きく、今後、大型溶解炉へ展開した場合には更に大きな削減効果が期待できる。

5 今回得られた知見と今後の展開

5.1 爆発放散口取り付け構造

量産実証期間中、エクスプロージョンベント部で微小な水素漏れが確認された。原因調査の結果、ユニオン締結時にベント膜にねじり応力が発生していたことが判明した。そこでフランジ固定構造を考案し、特許出願を行った。**図6**に構造概要を示す。

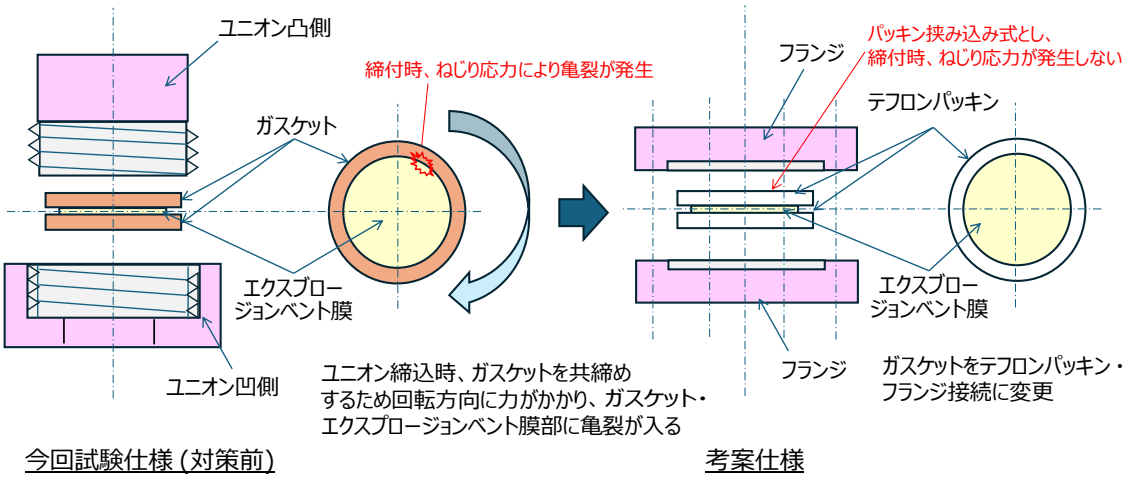


図6　エクスプロージョンベント考案構造

5.2 フレーム長可変機構

水素フレームは、燃焼容量によって長さが変化する。この特性により低負荷運転時の熱効率低下が発生する。そこで、燃焼容量に応じてバーナ位置を自動調整する機構を考案し、同様に特許出願を行った。この技術により、将来的には水素燃焼においても熱効率50%以上の達成を目指している。**図7**に考案構造概要を示す。

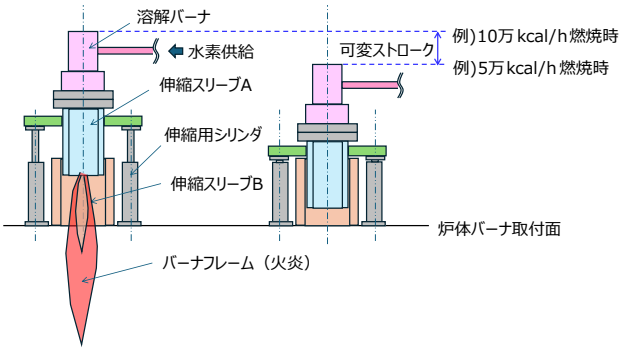


図7　燃焼容量自動可変機構考案構造

今回の量産実証により、小型高効率溶解保持炉における水素燃焼技術の量産適用可能性を確認することができた。また、①～③の知見を得た。

① タンクローリ切り替え作業自動化の必要性
② エクスプロージョンベント構造改善案
③ フレーム長可変機構による熱効率向上案

これらの知見は、将来水素の供給インフラが整備され、水素価格が低下した場合、大型炉に展開する際にも有効なものである。

6　おわりに

小型高効率アルミ溶解保持炉を対象とした水素燃焼量産実証試験を実施し、以下の結果を得た。

(1) 自動パージ機能及び逆火対策機器により、量産設備に必要な安全性を確保できた。
(2) ADC12溶湯の成分、清浄度、鋳造品質及び機械的特性は都市ガス溶解と同等であった。
(3) 熱効率及び溶解歩留まりは、都市ガス溶解と同等レベルであり、量産適用可能な性能を有することを確認した。
(4) 量産実証期間中に約1.1tCO_2削減効果を確認し、アルミ鋳造工程のCN化技術として有効であることを実証した。
(5) タンクローリ切り替え自動化技術及びフレーム長可変機構など、将来展開に向けた技術課題を明確化できた。

以上より、小型炉における量産実証ステップを完了し、大型炉量産実証へ移行するための技術的基盤を確立した。

今後は、水素供給体制及び燃料コストの動向を注視しながら大型溶解炉への展開も視野に、アルミ鋳造工程全体のカーボンニュートラル化を推進していく。

参考文献

(1) 横山賢介：アルミ溶解炉の水素バーナー溶解におけるリスク検証試験，生産技術技報vol.19(2024)，p.13-18
(2) 塩谷聡 ほか：大型ダイカストに対応したコンパクトな省燃費アルミ溶解保持炉の開発，月間素形材vol.66，No.12(2025)，p.18-23
(3) 塩谷聡 ほか：小型ダイカスト水素燃焼による量産実証テスト結果報告，鋳造工学会 25年度秋季全国講演大会(2025)
(4) 茂泉健：商用車のカーボンニュートラル戦略と素形材産業への影響，素形材，Vol.67，No.2(2026)，p.15-23
(5) JIS B 8415-2:2020/AMENDMENT 1:2024
工業用燃焼炉の安全通則―第2部：燃焼及び燃料取扱システム(追補1)，(2024)