ハイサイクルダイカストマシンおよび鋳造技術の開発

UBE マシナリー株式会社　　○藤野 竣也・宮本 悠生
釼 祐一郎・石橋 直樹

1. はじめに

自動車の急激な EV 化が進展する中で，ダイカストへのニーズは EV 特有のインバータ，コンバータ，E-Axle およびバッテリーなどのケース類ならびにシャシー部材を一体成形するギガキャストへと変化している [1]．また，従来の完成車メーカや自動車部品メーカだけでなく，異業種からの新規参入も相次ぎ，EV 部品市場の競争激化，低価格化が進みつつある．このような市況下で競争に打ち勝つためには，製品単価の低減によりダイカスト生産で継続して利益を出すことが重要と考える．

これに対応すべく当社では，鋳造サイクルタイムの短縮による生産性向上を目的とした 850t ハイサイクル機を開発し，コンバータケースを模した 4 面スライド金型を用いた実鋳造において 22.5s というハイサイクル化を達成した．本報告では，ダイカストマシン本体，付帯設備および製品冷却におけるハイサイクル化の達成手段ならびに標準機との生産能力の比較結果を報告する．さらに，生産性向上に伴う消費電力削減による省エネルギー効果を検証した結果も記す．

2. サイクルタイムと開発目標の設定

アルミダイカスト(コールドチャンバ)のサイクルタイムは，式(1)に示すようにダイカストマシンの型締力との関係で整理されてきた [2]．**図 1** にサイクルタイムと型締力の関係を示す．サイクルタイムは時代と共に変化しており，近年に近づくほど短縮されている．1978 年では係数 6.0 [2] とされていたが，2009 年には係数 4.0 [3]，最近のダイカスト事例から推測すると 2024 年時点での最速は係数 1.4 程度であると考えられる [4]．このペースでサイクルタイムが短縮されていくと，2040 年頃には係数 1.0 が主流になるものと予測される．

そこで当社では，その傾向を先取りすべく係数 1.0，すなわち EV 部品向けの主流サイズである型締力 850t のダイカストマシンでサイクルタイム 29.8s の達成を目標としてハイサイクル機の開発に着手した．

$$\text{サイクルタイム}(s) = \sqrt{\text{係数} \times \text{型締力}(ton)} \quad \cdots(1)$$

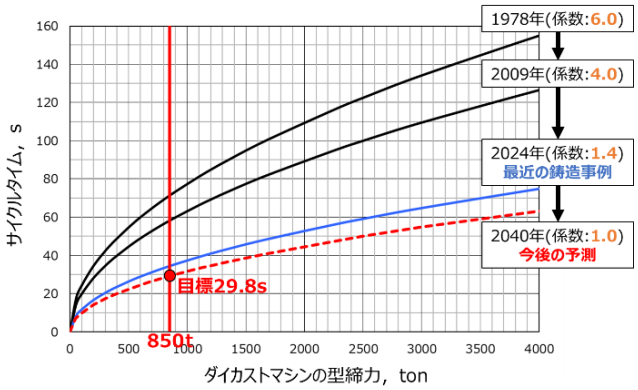


図 1 サイクルタイムと型締力の関係

3. 実験設備

3.1. ダイカストマシン

実験には，油圧トグル式の中型ダイカストマシン UB850iS3-s(以下，標準機と称す)を用いた．**表 1** に標準機の仕様をまとめる．ハイサイクル機は標準機を基本として種々の改造を施した．**図 2** に当社 DC ソリューションセンターに新設されたハイサイクル機の外観を示す．本機はお客様の金型を持ち込んでの鋳造トライも可能である．

表 1 UB850iS3-s(標準機)の仕様

項目	仕様
駆動方式	油圧トグル式
型締力	8,500kN
ダイストローク	760mm
油圧ポンプ用モータ	55kWサーボモータ
オイルタンク容量	1,300L

図 2 当社 DC ソリューションセンターに
新設されたハイサイクル機の外観

3.2. 試験金型および鋳造品

図 3 に本開発に供した鋳造品の形状を示す．これは EV 部品であるコンバータケースを模した当社オリジナルの形状であり，4 面スライド金型によって形成される．本モデルは，実際に量産されている標準的なコンバータケースと同等のサイズ(W320×H200×D100mm)とし，製品肉厚 3.0～3.5mm，鋳込重量 3.3kg，製品重量 2.0kg の設定とした．スリーブ径はφ100mm を採用し，ゲート比は 13.9，射出開始時のスリーブ充填率は 25.4%である．全投影面積は 936cm^2 であることから，型締力 850t とバランスする最大許容鋳造圧力は，91MPa（安全率=1.0)となる．

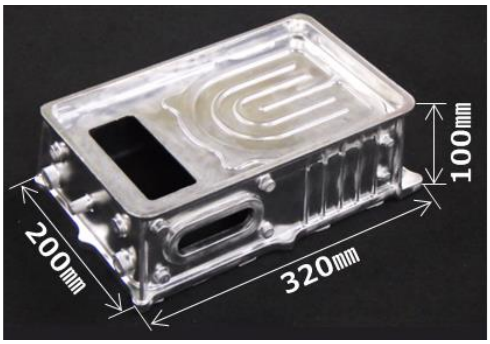


図 3 コンバータケースモデル

標準機で本鋳造品を鋳造する際の鋳造サイクルは 43.1s(係数 2.2)と見積もられ，係数が 1.0 となる目標のサイクルタイム 29.8s を達成するためには 13.3s のサイクル短縮が必要である．そこで，サイクルタイム短縮対象を，「ダイカストマシン本体」，「付帯設備」，「製品冷却」の 3 つの要素に分けて，それぞれの施策を検討することとした．

標準機を想定した上記サイクルチャートを**図 4** に示す．

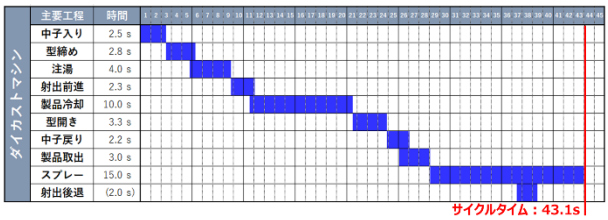


図 4 標準機におけるサイクルチャート

4. 実験方法および実験結果

4.1. ダイカストマシン本体

4.1.1. 型開閉動作

型開閉動作のハイサイクル化を達成するために，型締シリンダの動作速度を向上すべく，**表 2** に示す改造を行った．油圧ポンプ容量を増大することで作動油の最大吐出量を 1.2 倍に増加させるとともに，増加した作動油を効率よく供給・排出するために，油圧ポンプ–型締シリンダ間の油圧ライン配管径拡大ならびに油圧シリンダの 2 ポート化(配管数増)による作動油流路の増大を試みた．また，型締時には型締シリンダへのランアラウンド回路適用にて，ロッド側から排出される作動油をヘッド側に合流させることで，油圧ポンプからの供給量を上回る作動油を型締シリンダへ供給することを可能とした．

さらに，**図 5** に示すラチェット式安全フックを活用した型開中間停止機能により，製品取出しならびにスプレー動作時の型開量を必要最小限の任意とすることで型開閉距離の最小化と固定型・可動型両面の同時スプレーによるサイクル短縮化を実現した．

型締限から目標の型開中間停止位置までの移動は，**図 6** に示す 4 つの工程からなる．「離型」から「型開高速」に至る工程において動作速度を変化させながら型開を行い，目標位置手前から「減速」させ，補正値分の距離を滑動した後に目標位置で停止する制御とした．次サイクルでは目標位置との差分をフィードバックして自動的に補正値を修正する．なお，型開中間停止動作によって生じた目標位置との差分を取出ロボットに情報転送して製品チャック位置を補正することで，製品取出しや製品払出し位置で不具合が生じないようにした(**図 7**)．

図 8 に標準機とハイサイクル機との型開閉動作時間の比較を示す．ハイサイクル機への改造および型開中間停止機能の使用によって，1.6s の短縮が可能となった．

表 2 標準機とハイサイクル機の仕様比較

	標準機	ハイサイクル機
油圧ポンプ容量	850t サイズ	**1300t** サイズ
油圧ポンプ-型締シリンダ間の配管径	ヘッド側：2インチ×1本 ロッド側：1½インチ×1本	ヘッド側：2インチ×**2本** ロッド側：1½インチ×**2本**
型開中間停止機能	なし	**あり**

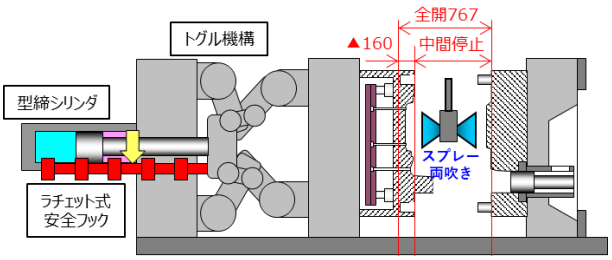


図 5 型開中間停止動作の概略図

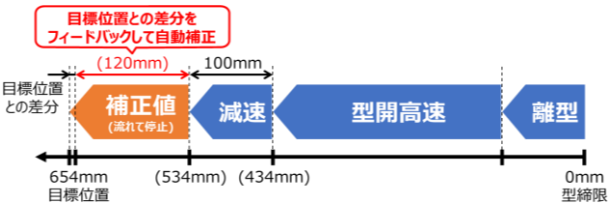


図 6 型開中間停止の位置補正制御

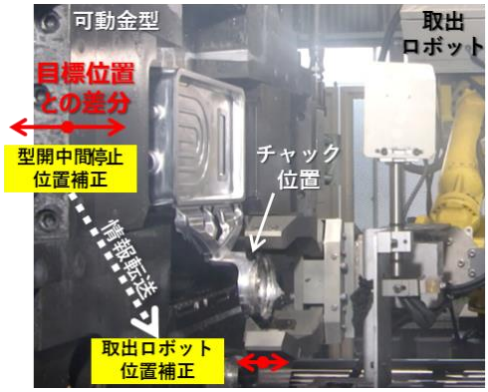


図 7 取出ロボットの位置補正制御

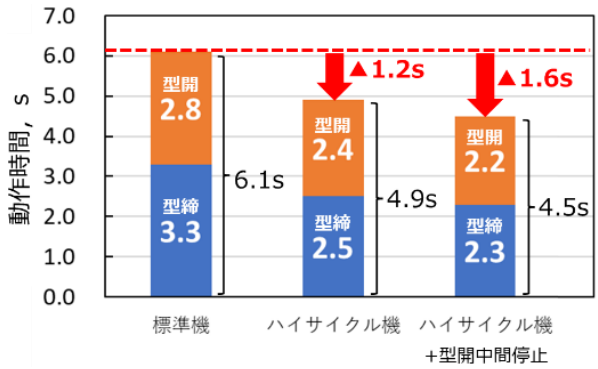


図 8 型開閉動作時間の比較

4.1.2. 中子動作

中子動作のハイサイクル化を達成するために，中子シリンダの動作速度を向上すべく，**表 3** に示す改造を行った．型締シリンダと同様に，油圧ポンプ容量の増大，油圧ポンプ-中子シリンダ間の油圧ライン配管径の拡大および中子入動作時のランアラウンド回路採用を行った．さらに，中子マニホールドの作動油取出口の口径を拡大することで，作動油回路の圧損軽減を図った．

図 9 に標準機とハイサイクル機との中子動作時間の比較を示す．ハイサイクル機への改造によって，0.6s の短縮が可能となった．また，大径部と小径部の 2 段構造からなるシリンダを採用することで，1.9s の短縮が可能となった．これは，大きな負荷が生じる離型時は大径部で中子を引抜き，離型後は小径部で動作させることで所要作動油量が低減されるためである．

表 3 標準機とハイサイクル機の仕様比較

	標準機	ハイサイクル機
油圧ポンプ容量	850t サイズ	**1300t サイズ**
油圧ポンプ-中子マニホールド間の配管径	3/4インチ	**1インチ**
中子シリンダランアラウンド回路	なし	**ON/OFF 選択可能**
作動油取出し口	3/4インチ	**1インチ**

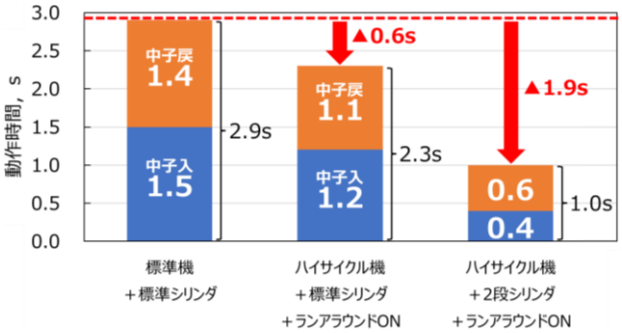


図 9 中子動作時間の比較

4.2. 付帯設備

4.2.1. 給湯機（ラドル式）

注湯動作時間および給湯機サイクルの短縮を達成すべく給湯機の改造を行った．注湯動作時間の短縮は鋳造サイクルの短縮に直結するが，その一方で**図 10** に示すように，鋳造サイクルと給湯機サイクルを同期させているサイクル調整タイマの調整代が無くなるほど，鋳造サイクルが早くなると，給湯機サイクルが律速となりダイカストマシンが給湯機動作を待つ無駄な時間が生じる．よって，ハイサイクル化には鋳造サイクルの短縮のみならず，給湯機サイクルの短縮も重要な要素である．

図 11 に給湯機の外観を示す．**図 11(a)** は従来のインバータモータ式の給湯機（以下，インバータ給湯機と称す），**図 11(b)** は新たに開発したサーボモータ式の給湯機（以下，サーボ給湯機と称す）である．サーボモータの加減速制御によって注湯や計量などのラドル動作時間，ラドルの前後進や上昇下降などのアーム動作時間を短縮することができた．さらに，ラドル前進動作の減速時，溶湯の慣性力でラドル内に生じる波をアーム動作に同期したラドル動作で打ち消すことで，最短の時間で湯こぼれなく溶湯を注湯口に搬送することを可能とした．また，注湯口周囲に取り付けたホッパーは，素早い注湯動作を行っても湯こぼれが防止されることから注湯動作時間短縮に寄与した．

図 12 にインバータ給湯機とサーボ給湯機との給湯機サイクル比較を示す．ラドル動作ならびにアーム動作時間の短縮によって， 14.0s の短縮が可能となった．これによって，鋳造サイクル 19.0s までは遅れることなく 給湯機を同期させることができる．

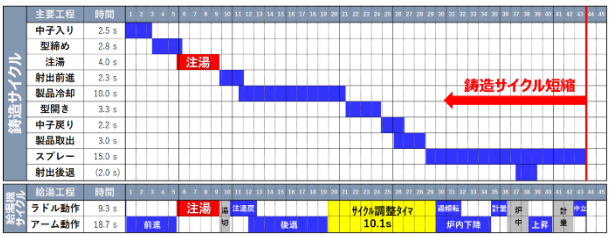


図 10 鋳造サイクルと給湯機サイクル

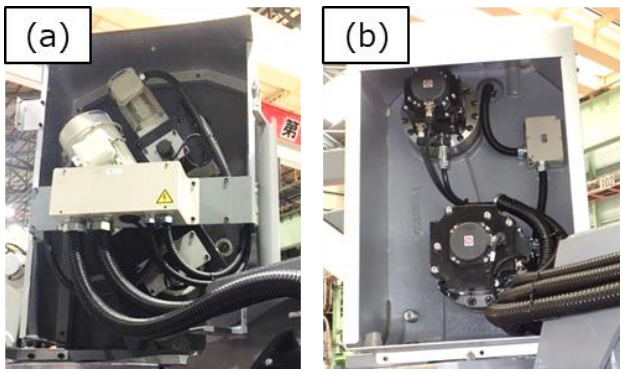
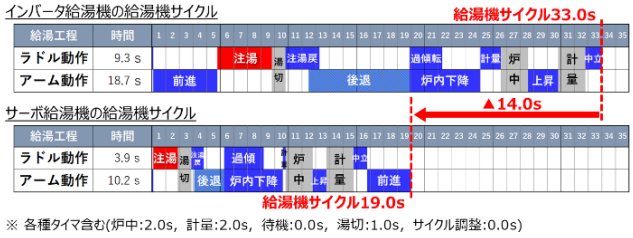


図 11 給湯機の外観
(a)インバータ給湯機，(b)サーボ給湯機



※ 各種タイマ含む(炉中:2.0s，計量:2.0s，待機:0.0s，湯切:1.0s，サイクル調整:0.0s)

図 12 給湯機サイクルの比較

4.2.2. 取出ロボット

取出ロボット動作時間の短縮を達成すべく，**図 13** に示すように取出ロボットハンド上に製品検知センサを設置した．通常，センサは固定プラテンなどの金型外に固定されており，製品をチャックしたロボットはセンサの設置された位置まで移動する必要がある．これに対して，センサを取出ロボットハンド上に設置することで，金型内で鋳造品をチャックした時点で製品検知が可能である．これによって，取出ロボットが金型外に退避したと同時にスプレーロボットが金型内に侵入することができるため，取出ロボットが鋳造サイクルに影響する時間を短縮することができる．

なお，製品検知はしたが，本来製品部に付属して取り出されるべきオーバーフローなどが金型内に取り残されている場合には，当社 ICT システム群 Dsupport シリーズの Dsupport-Eye を活用して残留物の有無を検知することでアルミの挟み込みによる金型の傷つきを防ぐ．本システムはダイカストマシンに取り付けたカメラを用いて，マシンの動作指令に合わせた画像の集積・分析が可能な生産センシングシステムであり，鋳バリやスリーブ内焼付きの検知および注湯口や湯面検知棒の監視などに活用できる．

図 14 に活用事例を示す．固定プラテンに取り付けたカメラから金型を常時監視しており，取得した画像データから残留物の面積を判定する．製品取出後の金型内にアルミが残留していると，検知面積が設定値上限を越えて，型締前にマシンが停止する仕組みとなっている．

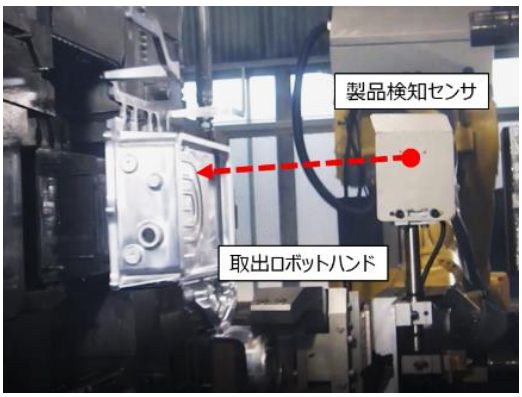


図 13 取出ロボットハンド上に設置された製品検知

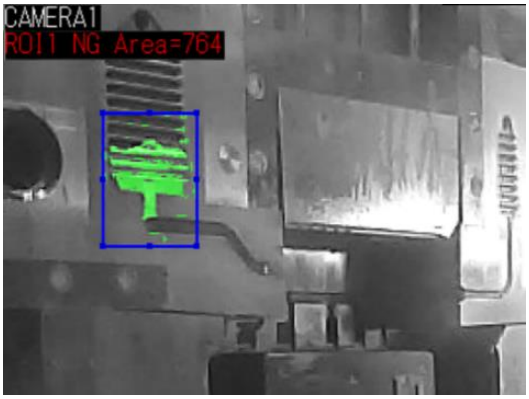


図 14 Dsupport-Eye による型内残留アルミの検知例

4.2.3. スプレーロボット

スプレーロボット動作時間の短縮を達成すべく，**図 15** に示す静電スプレー装置を用いた油性離型剤の少量原液塗布を行った．これは，高温付着性の高い油性離型剤を噴霧する際に，静電気を帯電させて金型に吸着させることで，極少量の離型剤を効率よく塗布する方法である．

ハイサイクル機では上述の型開中間停止機能によって固定側・可動側の両面を同時にスプレー可能であるとともに，静電スプレー装置を用いた油性離型剤の少量原液塗布によって，エアブロウ工程が廃止できる．これらによって，**図 16** に示すように製品取出およびスプレーにかかる時間を合計 10.2s 短縮することができた．また，本法はサイクル短縮に寄与するだけでなく，離型剤の使用量を抑えられ，廃液が皆無となるため，生産コストの低減も期待できる．

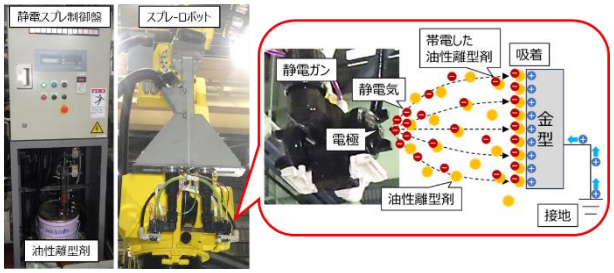


図 15 静電スプレー装置の概要

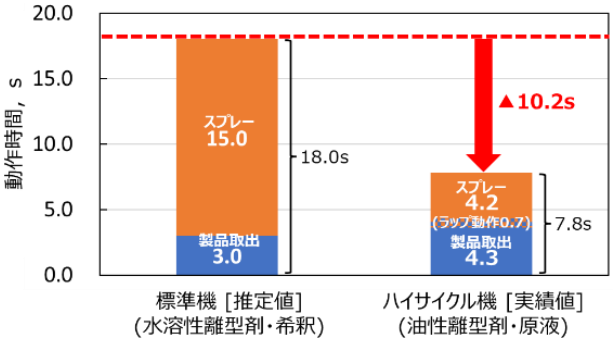


図 16 製品取出およびスプレーに要す時間

4.3. 製品冷却

鋳込部品に配置された冷却の概略図を**図 17** に示す．鋳造された製品の素早い冷却・凝固には，鋳込部品ならびに金型内の冷却が重要である．特に，厚肉部であるビスケット部では凝固が遅れるため，製品冷却時間を短縮すべく，ビスケットに隣接するプランジャーチップならびに分流子について形状や材質を変化させて冷却強化を図った．ここで，製品冷却時間とは，キャビティ内の溶湯が凝固して取出し可能な温度になるまでの冷却にかかる時間を指す．

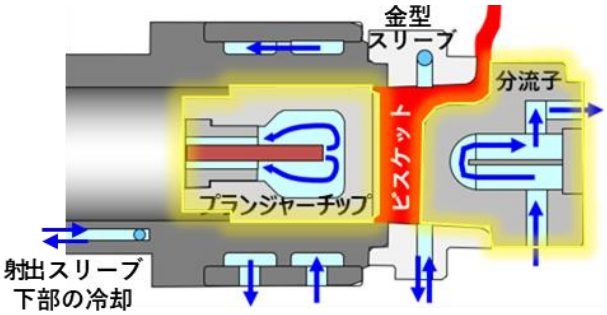


図 17 鋳込部品に配置された冷却の概略図

4.3.1. プランジャーチップの冷却強化

ビスケット部(チップ側)の冷却強化を図るために，材質および形状を変更した 5 種類のプランジャーチップを製作して冷却能力を比較評価した．**表 4** に製作した各チップをまとめ，**図 18** に各チップの外観および形状を示す．**図 18(a)** は標準機に搭載されている汎用工具鋼 SKD61 製のチップ(以下，標準チップと称す)である．**図 18(b)** は標準チップの中ぐりを深くし，先端肉厚を小さくした改良型のチップ(以下，標準改チップと称す)である．**図 18(c)** は冷却水の流路を作ることで，冷却効率を高めたチップ(以下，強冷チップと称す)である．**図 18(d)** ならびに**図 18(e)** は，(b)標準改チップの材質を熱伝導率の優れた FASTCOOL-55(SKD61 の 1.7 倍)およびベリリウム銅(SKD61 の 7.4 倍)に置き換えたチップ(以下，F.C.チップおよび銅チップと称す)である．

同一サイクル後に，型開直後のチップ先端中央部における表面温度を接触温度計(K 熱電対)で計測した結果を**図 19** に示す．測定開始時の最高到達温度は，(a)標準チップで 281℃，(b)標準改チップで 229℃，(c)強冷チップで 195℃，(d)F.C.チップで 160℃，(e)銅チップで 53℃であった．また，50℃から 20℃までの冷却にかかる時間を比較すると，(b)標準改チップ，(c)強冷チップ，(d)F.C.チップは(a)標準チップの 1/3 ほど，(e)銅チップは(a)標準チップの 1/10 以下であった．

この結果から材料の熱伝導率が高いほど，チップの冷却能力が高いことが分かった．また，熱伝導率が同じでも，先端肉厚の薄肉化や冷却水の流路形成など冷却効率を高めることで冷却能力の向上が確認できた．つまり，目標とするサイクルに応じて適切な冷却速度のチップを選択することで，ビスケット部の冷却・凝固にかかる時間を短縮できるものと考える．

表 4 製作したチップの形状および材質

チップの種類	材質	熱伝導率	硬度	先端肉厚	側面肉厚
(a)標準	SKD61	31W/m·K	Hs 64~67	25mm	17.5mm
(b)標準改				15mm	17.5mm
(c)強冷				15mm	12.5mm
(d)F.C.	FASTCOOL-55	54W/m·K	Hs 66	15mm	17.5mm
(e)銅	ベリリウム銅	230W/m·K	Hs 36	15mm	17.5mm

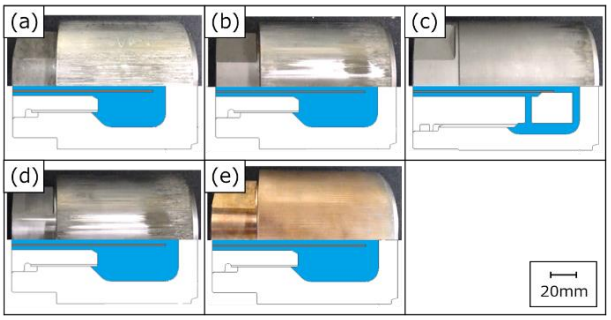


図 18 チップの外観および形状
(a)標準チップ，(b)標準改チップ，
(c)強冷チップ，(d)F.C.チップ，(e)銅チップ

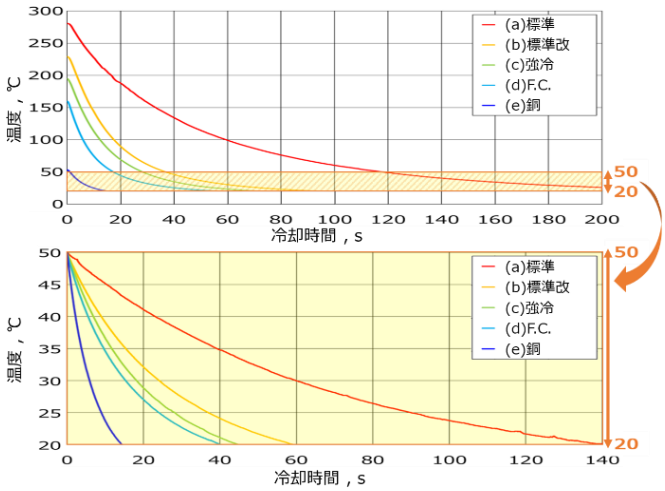


図 19 プランジャーチップの冷却能力

4.3.2. 分流子の冷却強化

前述のプランジャーチップと同様にビスケット部(分流子側)の冷却強化を図るために，材質を変更した2種類の分流子を製作して冷却能力を比較評価した．**図 20** に製作した分流子の外観を示す．**図 20(a)** は SKD61 製の分流子(以下，SKD 分流子と称す)である．**図 20(b)** は SKD 分流子の材質を FASTCOOL-55 に置き換えた分流子(以下，F.C.分流子と称す)である．上述の(a)標準チップならびに(c)強冷チップに上記 2 種類の分流子を加えた 4 つの組合せにおいて，製品冷却時間を徐々に短縮し，ビスケットが破裂するタイミングを比較することで冷却能力を判定した．**表 5** に示すように(a)標準チップにおいて SKD 分流子とした場合では 6.5s でビスケットのチップ側が破裂したが，F.C.分流子とした場合では 5.0s で分流子側が破裂した．(c)強冷チップにおいて SKD 分流子とした場合では 6.5s でチップ側が破裂したが，F.C.分流子とした場合では 4.0s で分流子側が破裂した．以上の結果から，チップと分流子の冷却能力を向上させることで，本鋳造品の製品冷却時間を 2.5s 短縮することができた．

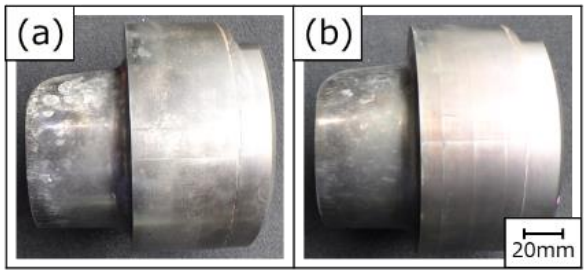


図 20 分流子の外観
(a)SKD 分流子，(b)F.C.分流子

表 5 ビスケットが破裂した製品冷却時間

ビスケットが破裂した製品冷却時間	SKD分流子	F.C.分流子
(a)標準チップ	6.5s (チップ側破裂)	5.0s (チップ側破裂)
(c)強冷チップ	6.5s (分流子側破裂)	4.0s (分流子側破裂)

▲2.5s

4.4. サイクルタイム

図 21 に上述のサイクル短縮効果を加味したハイサイクル機のサイクルチャートを標準機のそれとともに示す．最速のサイクルタイムは，目標の 29.8s(係数 1.0)を越えて 22.5s(係数 0.6)であり，ダイカストマシン本体，付帯設備および製品冷却におけるハイサイクル化によって合計 20.6s のサイクル短縮が達成できた．

上記結果をもとに年間生産台数および稼働時間を標準機とハイサイクル機で比較した結果を**表 6** に示す．稼働時間を標準機同等の 5,760 時間/年と仮定したケース①では，29.8s サイクルで年間生産台数＋203,989 台(45%増加)，22.5s サイクルで年間生産台数＋418,462 台(92%増加)となる．また，年間生産台数を標準機同等の 45.7 万台/年と仮定したケース②では，29.8s サイクルで稼働時間▲1,777 時間(▲74 日)(31%削減)，22.5s サイクルで稼働時間▲2,753 時間(▲115 日)(48%削減)となる．

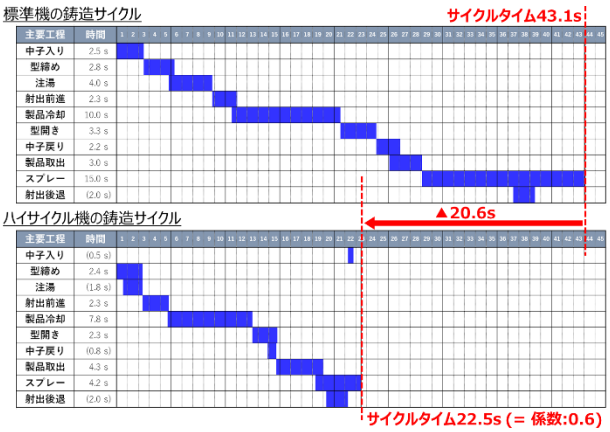


図 21 鋳造サイクルの比較

表 6 年間生産台数および稼働時間

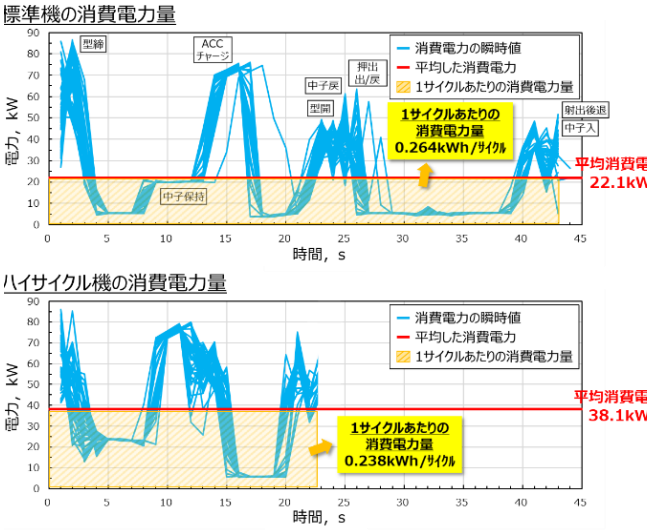
項目	単位	標準機 43.1sサイクル		ハイサイクル機 29.8sサイクル		ハイサイクル機 22.5sサイクル	
鋳造サイクル	s/ｼｮｯﾄ	**43.1**		**29.8**		**22.5**	
係数	-	2.2		1.0		0.6	
生産性		**基準**		**31%向上**		**48%向上**	
ケース①	**稼働時間を標準機同等の5,760時間/年と仮定した場合**						
1時間あたりの生産台数	台/時間	79	100%	115	145%	152	192%
年間生産台数	台/年	457,058		661,047		875,520	
標準機生産数との差異	**台/年**	**基準**		***203,989***	***45%***	***418,462***	***92%***
ケース②	**年間生産台数を標準機同等の45.7万台/年と仮定した場合**						
稼働時間	時間/年	5,760	100%	3,983	69%	3,007	52%
稼働日数	日/年	240		166		125	
標準機稼働時間との差異	**時間/年**	**基準**		***▲ 1,777***	***▲31%***	***▲ 2,753***	***▲48%***
標準機稼働日数との差異	**日/年**	**基準**		***▲ 74***		***▲ 115***	

【試算条件】
マシン台数：1台、製品取数：1台/ｼｮｯﾄ、稼働日：240日/年
稼働時間(日)：24時間/日、稼働時間(年)：5,760時間/年、稼働率：95%

4.5. 消費電力量

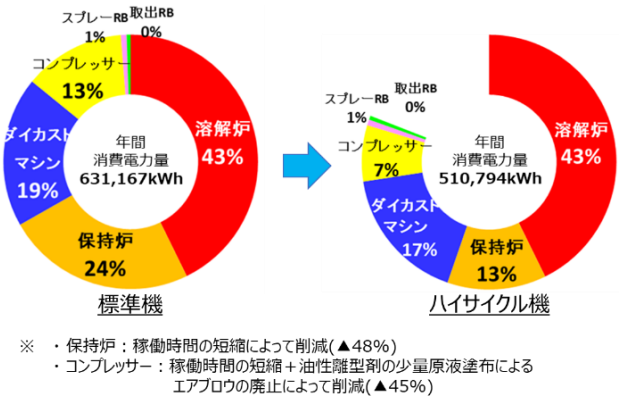
図 22 に，標準機およびハイサイクル機の 1 サイクルにおける消費電力の瞬時値からなる波形を 50 ショット分重ね合わせたものを青線で，これらを平均した消費電力を赤線で示す．平均した消費電力を標準機とハイサイクル機で比較すると，前者が 22.1kW，後者が 38.1kW と，駆動用油圧ポンプのモータ回転数が大きいハイサイクル機の方が大きい．しかしながら，ハイサイクル機はサイクルタイムが短いため，黄色のハッチング領域で示される 1 サイクルあたりの消費電力量を標準機とハイサイクル機で比較すると，前者が 0.264kWh/ｻｲｸﾙ，後者が 0.238kWh/ｻｲｸﾙと，ハイサイクル機の方が 9.8%少ない．すなわち，年間生産台数を標準機同等とした場合では，年間で 12,094kWh の省エネルギー化が達成できることを示している(ダイカストマシン本体＋給湯機の合計)．これは CO_2 排出係数を 0.436kgCO_2/kWh [5), 6)] とした場合，約 5.3t/年の CO_2 排出量削減効果に相当する．ダイカストマシンだけでなく**図 23** に示すようにハイサイクル化に伴って保持炉

やコンプレッサーの使用時間削減および油性離型剤の少量原液塗布によるエアブロウの廃止によって，更なる省エネルギー化も見込める．



※ 消費電力量は4面スライド金型を搭載したダイカストマシン本体と給湯機の合計

図 22 1 サイクルあたりの消費電力量



※ ・保持炉：稼働時間の短縮によって削減(▲48%)
・コンプレッサー：稼働時間の短縮＋油性離型剤の少量原液塗布による エアブロウの廃止によって削減(▲45%)

図 23 鋳造設備全体の消費電力量

4.6. 鋳造品質

本研究ではただ単にハイサイクル化による生産効率向上や消費電力削減を目指すのではなく，同時に鋳造品の品質担保も必要不可欠な要素と捉えている．そこで，ハイサイクル機にて 22.5s サイクルで鋳造した鋳造品の外観および内部の鋳巣の状況を調査した．その際の鋳造条件の詳細を**表 7** に示す．

表 7 鋳造条件

低速速度	高速切換位置	高速速度	減速位置	減速速度	鋳造圧力
0.3m/s	505/520mm	3.0m/s	615mm	1.0m/s	40MPa
増圧弁開度	昇圧時間	真空開始位置	減圧箇所	材料	溶湯温度
50%	13ms	110mm	チルベント2か所	ADC12	660℃

4.6.1. 外観

鋳造品の外観写真を**図 24** に示す．22.5s サイクルでの鋳造であるが，湯じわや焼付きなどは発生しておらず，標準機サイクルと同等の外観品質であった．

図 24 ハイサイクル鋳造した鋳造品の外観写真

4.6.2. 鋳巣

図 25 にブリスタ試験(490℃3h)後の外観写真を示す．窓部周辺および天側に細かなフクレ(赤点)が観察された．ガス量測定の結果から鋳造品中に含まれるガス量は 4.4cc/100gAL であった．**図 26** に製品部全体の X 線 CT 画像を示す．ボス部などの厚肉部に引け巣と思われる空隙が観察された．

22.5s サイクルで鋳造した鋳造品の内部品質は，標準機サイクルと同等であり，品質の悪化は認められなかった．

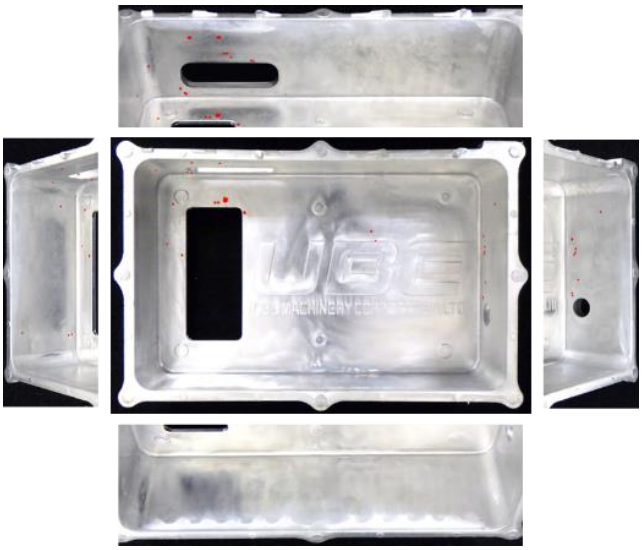


図 25 ブリスタ試験後の外観写真

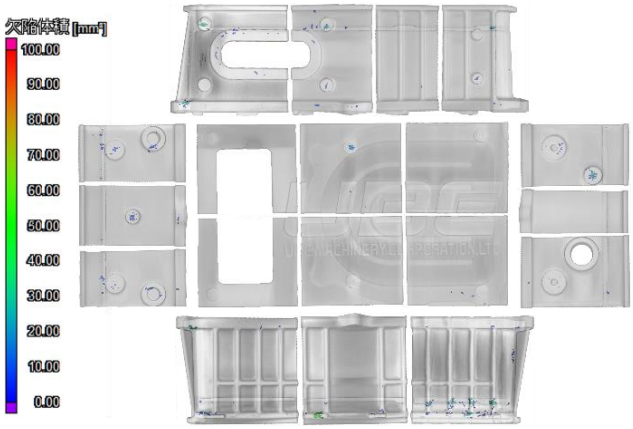


図 26 X 線 CT 画像

5. まとめ

油圧トグル式の中型ダイカストマシン UB850iS3-s をベースに，ダイカストマシン本体，付帯設備および製品冷却時間短縮によるハイサイクル化を目指し，種々の施策を展開した結果，以下の成果ならびに知見を得た．

1) サイクルタイムを 20.6s 短縮でき，最速サイクルタイムは 22.5s(係数 0.6)であった．なお，外観品質ならびに内部品質は標準機サイクルと同等であった．

2) 年間生産台数を標準機同等とした場合では，稼働時間を約 2,800 時間削減することが可能である．稼働時間を標準機同等とした場合では，年間生産台数を約 41.8 万台増加させることが可能である．

3) 年間生産台数を標準機同等とした場合では，ダイカストマシン本体と給湯機の合計で年間，約 12,000kWh の省エネルギー化が達成できることを示しており，これは約 5.3t の CO_2 排出量削減効果に相当する．

6. おわりに

UB850iS3-s をベースに今回開発した個々のハイサイクル化技術は，同 UB-iS3 シリーズ機ならびに当社ダイカストマシンへ適宜展開していくとともに，お客様のダイカスト工場における生産性向上と省エネルギー化実現の有効手段のひとつとして，カーボンニュートラル社会に貢献することができれば幸いである．

参考文献

1) 神戸：AL-ある 7 (2021)，11-16
2) 金子：実務表面技術 27 (1980)，284-289
3) 神戸 他：鋳造工学 全国講演大会概要集 (2010)
4) 奥：鋳造工学 96 (2024)，210-214
5) 環境省：温室効果ガス排出算定方法検討会 https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/committee/index.html
6) 化学経済研究所：基礎素材のエネルギー解析調査報告書 (1993)