

平成 23 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「軽量薄肉高強度中空断面部品の革新的複合加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 24 年 3 月

委託者 中 国 経 済 産 業 局
委託先 公益財団法人ひろしま産業振興機構

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・目的・概要及び目標	1
1-1-1 研究開発の目的	1
1-1-2 研究開発の概要	2
1-1-3 研究開発の目標	4
1-1-4 研究開発の所在地	5
1-1-5 研究開発期間	5
1-2 研究体制	6
1-2-1 研究組織	6
1-2-2 管理体制	6
1-2-3 研究者等氏名一覧	8
1-2-4 他からの指導・協力者	9
1-3 成果の概要	10
1-4 当該研究開発の連絡窓口	11

第2章 本論

2-1 実験装置仕様	12
2-1-1 実験装置仕様	12
2-1-2 成形フローチャート	12
2-2 高周波通電加熱	15
2-2-1 通電加熱を高周波で行う理由	15
2-2-2 出力の選定	15
2-2-3 通電加熱実験装置目標値	16
2-2-4 実験装置詳細仕様	16
2-2-5 4分割部分接触式電極による均熱化	17
2-2-6 加熱時間の短縮	18
2-3 水蒸気圧発生装置	21
2-3-1 パイプ破裂圧力と温度	21
2-3-2 シール構造検証	22
2-3-3 水蒸気圧発生実験	23
2-4 冷却条件の確立	23
2-5 試作・実験結果	25
2-5-1 性能確認用試作品の製作	25
2-5-2 振り耐久試験結果	25

最終章 全体総括

3-1 達成目標と研究成果	26
3-1-1 高強度化目標	26
3-1-2 形状自由度	26
3-1-3 軽量化	26
3-1-4 設置面積	27
3-1-5 エネルギー消費量	28
3-1-6 製造設備費用	28
3-1-7 金型費用	28
3-1-8 工程数、個当たり加工時間	28

3-2 事業化へ向けた技術課題	30
3-3 事業化展開	30

**平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「軽量薄肉高強度中空断面部品の革新的複合加工技術の開発」
研究開発成果等報告書**

第 1 章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・目的・概要及び目標

1-1-1 研究開発の目的

地球温暖化を抑制するため、各国で CO₂ 排出量削減に取り組んでいる。自動車業界においても燃費向上による CO₂ 排出量削減に取り組んでおり、その効果的な手段の一つとして自動車の軽量化がある。

自動車の軽量化には、比重の小さな材料への置換や材料の高強度化、薄肉化、中空化などの方法があるが、これらの方法はコスト増加要因となるため、その採用は限定的である。今後軽量化を進めていくためには、より一層低コストで高強度な自動車部品製造技術の確立が求められている。

材料置換で軽量化と低コスト化を両立していくのは困難であるが、高強度化を前提とした薄肉化、中空化は、軽量化と低コスト化の両立が可能である。

現在、我々は、低コストで高強度な自動車部品製造技術として、液圧成形、ホットスタンプ等の製造技術を確立し、量産稼働させている。しかしながら世界的な CO₂ 排出量削減のニーズが高まる中、更なる軽量化、低コスト化、高強度化を実現しつつ、製造過程で消費するエネルギーも削減していかなければならないが、このニーズに応える上で現行の工法では以下の課題を抱えている。

(1) 成形工程

i) プレス成形の場合

素材強度と成形性はトレードオフの関係にあり、要求機能を満たす部品形状が実現できる成形性を保とうとすると、現状では 780 MPa レベルの素材強度が限界である。

ii) 液圧成形の場合

液圧による加工の為、液体の充満／加圧の時間がかかり、サイクルタイムが長くなる。その結果、高価な設備の償却負担が重く、低コスト化を阻害している。

(2) 加熱工程

i) 炉加熱の場合

エネルギーを熱エネルギーに変換する際の変換ロスに加え、熱エネルギーを炉体の予熱／アイドル／放熱／残熱に浪費するため、ワークの加熱効率が低い。加えて、加熱時間が長い為、生産量を確保する為には複数の炉が必要となり、設備の費用や、設置面積が悪化する。

ii) 通電加熱の場合（誘導加熱を含む）

短時間で加熱する手段として有効な手段ではあるが、成形後の一様ではない複雑な断面形状には適用できない。

(3) 冷却工程

高温のワークを冷却工程に運ぶ際に温度が下がる為、余分に加熱する必要がある。また、冷却設備が大きくなる。

これらの課題を解決するべく、通電加熱とホットスタンプ技術、液圧成形技術を複合化した革新的な製造プロセス技術を確立することを目的とする。

このことにより、軽量薄肉高強度中空断面部品の最大ユーザーである自動車業界の国際競争力の強化を下支えし、こうした軽量化部品が広く普及することを通じて、自動車の燃費向上・排ガス低減にも貢献する。

1-1-2 研究開発の概要

本開発は、前述の課題を解決する為に、一工程内で全てのプロセスを実行し、より低コスト／効率化を実現するものである。（図1、表1参照）

- ・金型内でパイプ材などの中空一様断面素材を通電により瞬時に加熱する。
- ・同時に素材内部で水蒸気圧力を発生させ、素材を内圧で保持させて金型形状に沿わせやすい状態を保つ。
- ・AC3 変態点以上の高温下で(80Mpa 以下の降伏点となる柔らかい状態)、プレス成形する。
- ・型締め直後に素材内部へ注水して直接急冷する。

いわば通電加熱とホットスタンプ技術、液圧成形技術を複合化した革新的な製造プロセス技術を確立し、低コスト、省エネルギー、高効率に軽量薄肉高強度中空断面部品の量産化を図る。

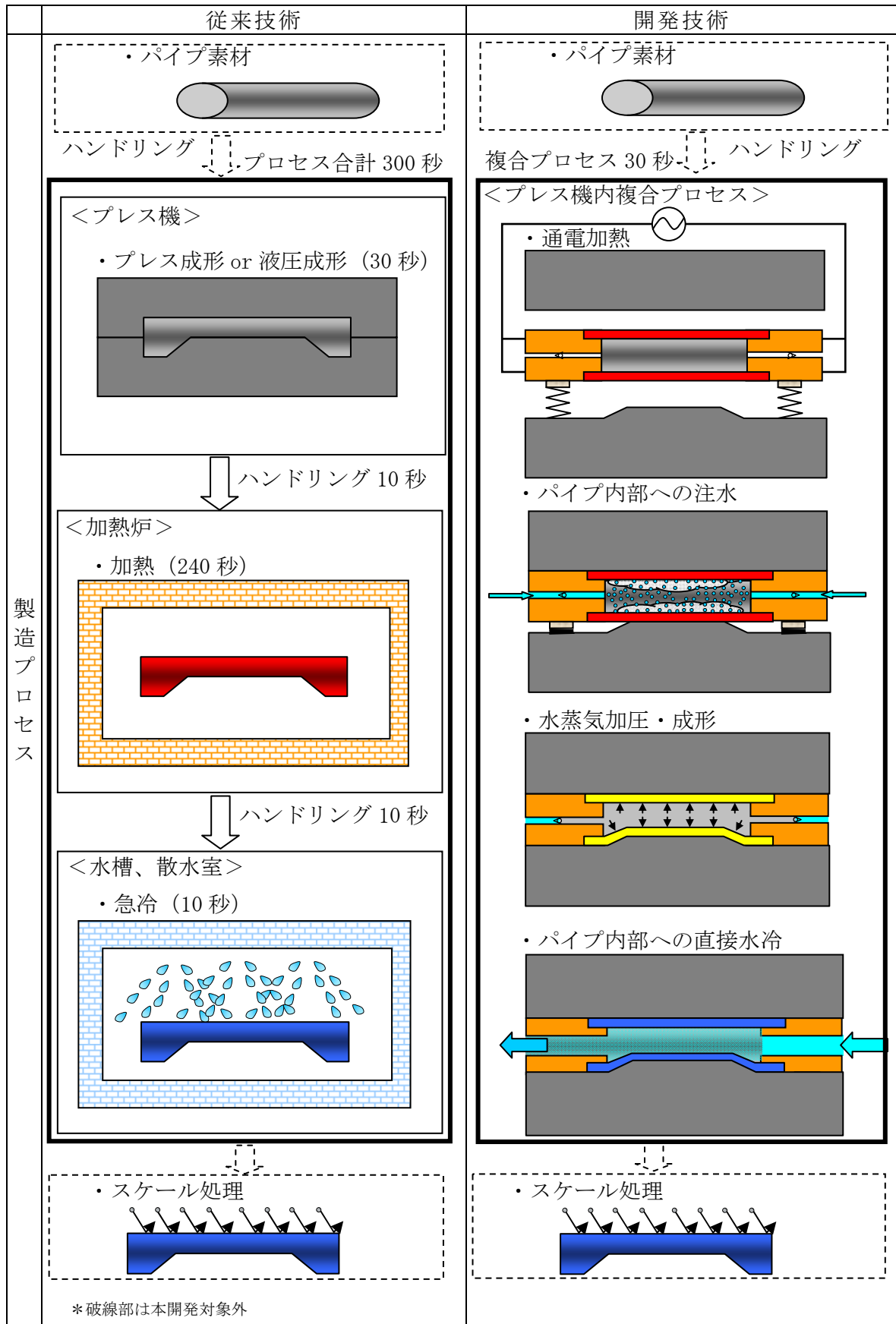


図 1 従来技術と開発技術の対比

	従来技術	開発技術
加熱	・成形後の複雑な断面形状では高効率な通電や、電磁誘導といった加熱は困難。	・パイプ材（一様断面）での加熱なので通電加熱が容易。
成形	・冷間での成形のため、成形性は材料特性に依存。 ・プレス成形の場合、パイプ内面への金型が無いので、出来合い形状となり、そのバラツキも大きく、必要に応じて液圧をかけて成形する。	・材料が低強度／高延性となる熱間での成形のため、冷間より成形が容易。 ・パイプ内部へは水蒸気圧をかけて形状を安定させる。
冷却	・冷却用の水槽、散水室が必要。 ・加熱炉から冷却工程への搬送時に大気に放熱するので、ワークを余分に加熱している。	・パイプ内部の直接水冷のため水槽、散水室は不要。 ・搬送が無いので必要最小限の加熱温度で焼き入れが出来る。

表 1 従来技術と開発技術の対比

1-1-3 研究開発の目標

区 分	2 1 年度（1 年目）	2 2 年度（2 年目）	2 3 年度（3 年目）
① 通電加熱による加熱技術の確立	・量産想定パイプ材を使って、量産想定1/8の能力を有する加熱実験装置を用いて、通電加熱実験を行い、高速で均一な通電加熱を可能とする給電方法を開発する。 なお、通電加熱装置の（量産想定レベル）大出力化に関する情報収集を行う。	・2 1 年度の結果を踏まえ ②の水蒸気圧発生装置技術と複合化した通電加熱方法（特に給電部）の研究開発を行う。	・IH加熱・表皮効果活用等、高強度が必要な部位のみ加熱する方法を見出し投入エネルギーの削減を行う。
② 水蒸気圧発生装置技術の確立	・量産想定パイプ材を模擬した水蒸気発生実験装置を使って、900℃まで加熱されたパイプ内部への注水・噴霧を行い、その圧力・温度の変化を計測し、最適な注水方法を開発する。	・2 1 年度の結果を踏まえ ①の通電加熱装置技術と複合化したパイプ内部への注水方法（特に給電部）の研究開発を行う。 ・実験金型設計・製作して成形トライの実施。	・2 2 年度の結果を踏まえ加熱・水蒸気加圧・成形・冷却の一連プロセスを模擬出来る実験装置により、最適な条件を見出す。
③ 冷却条件の確立	・技術情報の収集を行い、検証すべき事項を明確にし、実験装置仕様及び実験方法を具体化する。	・2 1 年度の①、②、③の結果を踏まえ、加熱・水蒸気加圧・成形・冷却の一連プロセスを模擬出来る実験装置の構想・仕様を開発する。	・加熱・水蒸気加圧・成形・冷却の一連プロセスを模擬出来る実験装置により、最適な冷却条件を開発する。
④ 試作品による性能の確認	想定量産部品の構想・設計。	想定量産部品の構想・設計。	当加工法で製作したトーシヨンビームで、トーシヨンビームアクスルの試作品を製作し部品の性能を確認する。

以上の目標達成により、一工程で加熱・成形・冷却の全てのプロセスを実効するなど、通電加熱とホットスタンプ技術、液圧成形技術を複合化した革新的な製造プロセス技術の確立し、車体の軽量化を目指す。

〔研究目標〕

- 目標従来技術に比べ、形状自由度、金型費用は同等
- 製品を20%高強度化(1500MPa)かつ10%軽量化
- 製造設備の費用は30%削減、工程数は1/3以下、設置面積は1/2以下
- 製造時間は1個当たり加工時間を1/10以下
- エネルギー消費量は1/2以下

1-1-4 研究開発の所在地

1) 事業管理者

公益財団法人ひろしま産業振興機構(最寄り駅:広島電鉄広電本社前電停)
〒730-0052 広島県広島市中区千田町三丁目7番47号

2) 研究実施場所(主たる研究実施場所については、下線表記のこと。)

株式会社ワイテック(最寄り駅:JR山陽本線海田市駅)

〒736-0003 広島県安芸郡海田町曾田3-7-4

株式会社富士技研(最寄り駅:名古屋鉄道三河線越戸駅)

〒470-0334 愛知県豊田市花本町井前1-2-9

株式会社山本水圧工業所(最寄り駅:阪急電鉄阪急神戸線神崎川駅)

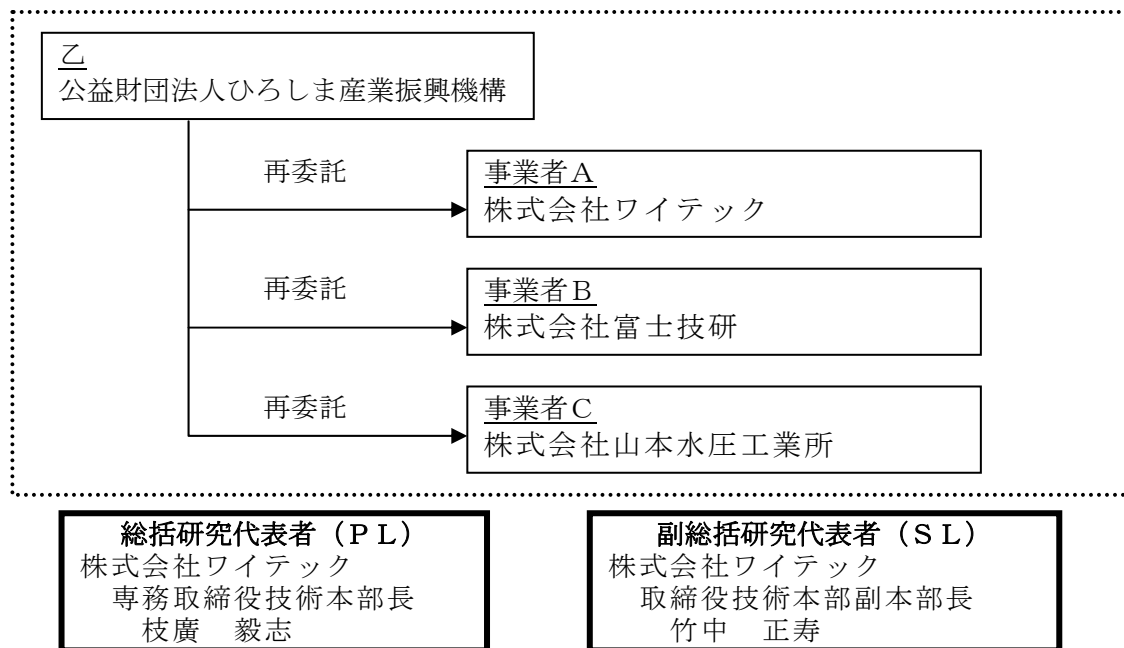
〒561-0835 大阪府豊中市庄本町2丁目8-8

1-1-5 研究開発期間

平成21年9月30日～平成24年3月30日

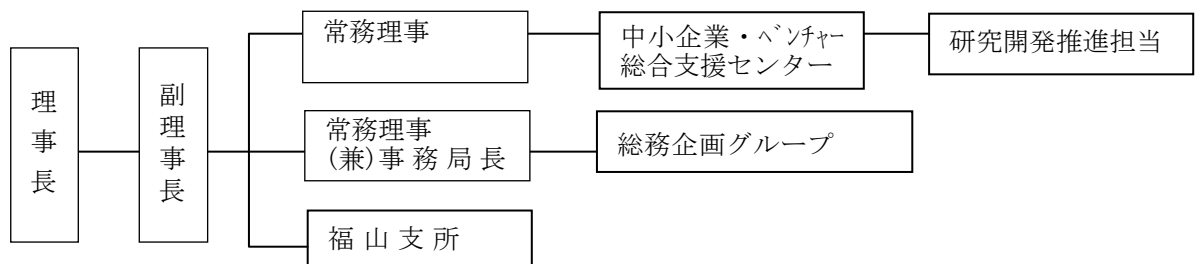
1-2 研究体制

1-2-1 研究組織



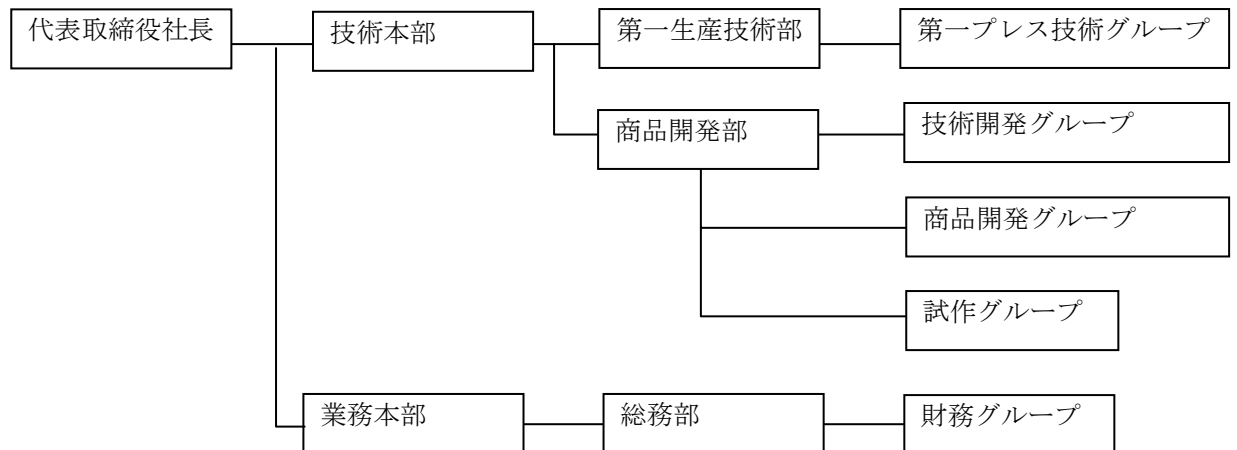
1-2-2 管理体制

1) 事業管理者 [公益財団法人ひろしま産業振興機構]

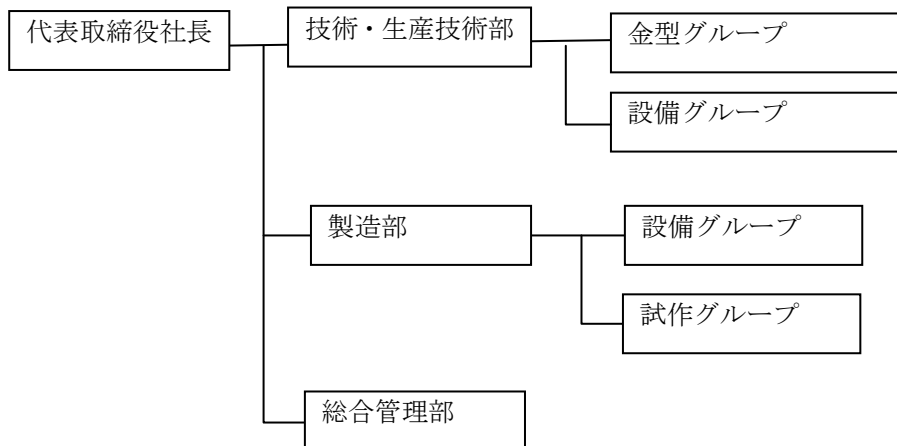


2) 再委託先

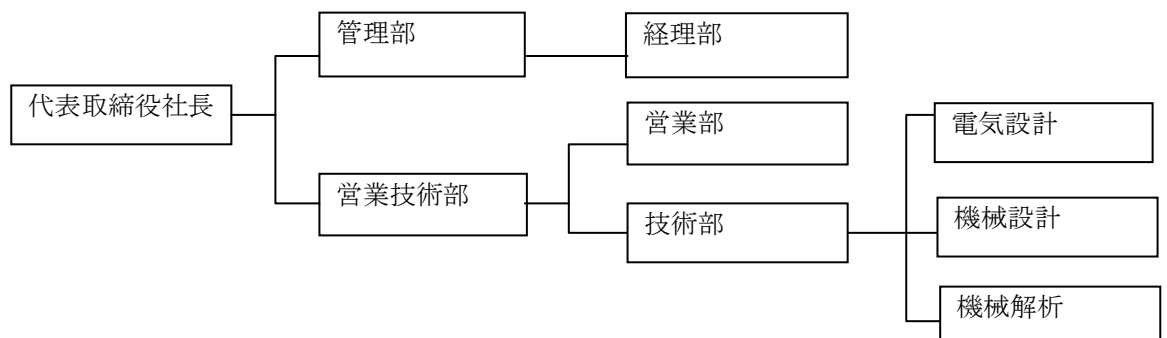
株式会社ワイテック



株式会社富士技研



株式会社山本水圧工業所



1-2-3 研究者等氏名一覧

1) 管理員氏名一覧

【事業管理者】公益財団法人ひろしま産業振興機構

氏名	所属・役職
渡辺 博之	常務理事
山縣 一郎	中小企業・ベンチャー総合支援センター 研究開発推進担当 マネージャー
池田 修	中小企業・ベンチャー総合支援センター 研究開発推進担当 参事
打田 準	中小企業・ベンチャー総合支援センター 研究開発推進担当 課長
藤瀬 一基	中小企業・ベンチャー総合支援センター 研究開発推進担当 課長
門永 吉章	中小企業・ベンチャー総合支援センター 研究開発推進担当 課長
松本 竜治	中小企業・ベンチャー総合支援センター 研究開発推進担当 主査

2) 研究員氏名一覧

【再委託先】

株式会社ワイテック

氏 名	所属・役職
枝廣 毅志	専務取締役技術本部長
竹中 正寿	取締役技術本部副本部長
上野 宰	技術開発グループ 主幹
山根 響太郎	技術開発グループ
田中 政昭	技術開発グループ 主任
近藤 裕樹	第一プレス技術グループ リーダー
石原 庸平	技術開発グループ
江村 弘章	第一生産技術部 部長
元谷 友彦	第一プレス技術グループ
馬場 和也	第一プレス技術グループ

株式会社富士技研

氏 名	所属・役職
岡田 晴雄	技術・生産技術部 部長
田之上 剛	技術・生産技術部金型グループ グループリーダー
白井 達也	製造部 工場長
橋本 勝	技術・生産技術部設備グループ グループリーダー
松本 雅樹	製造部 工場長補佐
鶴田 哲也	製造部 設備グループ
松本 久志	製造部 試作グループ
塚田 聡志	技術・生産技術部 金型グループ
山中 茂	製造部 試作グループ
柴田 勝弘	技術・生産技術部 金型グループ
青山 良一	製造部 設備グループ グループリーダー

株式会社山本水圧工業所

氏 名	所属・役職
山本 知弘	代表取締役社長
浅井 健二郎	営業部 担当課長
山根 剛弘	技術部 次長【電気グループ】
木下 繁男	技術部 部長【機械グループ】
石垣 勝士	技術部 次長【機械グループ】
坂口 尚良	技術部 課長【機械グループ】
武内 大	技術部 主任【機械グループ】
川野 誠	技術部 電気グループ 電気設計員
橋本 康仙	技術部 電気グループ 電気設計員

3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

公益財団法人ひろしま産業振興機構

(経理担当者) 中小企業・ベンチャー総合支援センター

研究開発推進担当 課長 打田 準

(業務管理者) 常務理事

渡辺 博之

(再委託先)

株式会社ワイテック

(経理担当者) 業務本部総務部財務グループ

マネージャー代理

青垣 利昭

(業務管理者) 常務取締役 業務本部副本部長

松田 展兆

株式会社富士技研

(経理担当者) 総合管理部部長

柘植 実知子

(業務管理者) 技術・生産技術部 部長

岡田 晴雄

株式会社山本水圧工業所

(経理担当者) 経理部 経理次長

古高 純一

(業務管理者) 営業部 担当課長

浅井 健二郎

1-2-4 他からの指導・協力者

氏 名	所属・役職	備 考
吉田 総仁	国立大学法人広島大学大学院工学研究科 教授	アドバイザー

1-3 成果の概要

1) 通電加熱による加熱技術の確立

- (1) H21 年度では高周波通電加熱において、キュリー点以降での加熱時間が想定より大幅にかかり、目標の 900℃/85 秒に対し 874℃/120 秒となり 900℃まで昇温出来なかった。H22 年度においては電圧リミッター改造により出力電圧をアップさせる事で、キュリー点以降の昇温時間を短縮。これに加えて H23 年度では、給電部を 4 分割部分接触式（8 接点）に変更し給電を安定化。更に金型とワークのクリアランス確保及び通電ケーブル取り回しの見直しにより周辺設備への誘導加熱ロス削減により、目標の 900℃/85 秒（量産想定設備換算で 900℃/8 秒相当）に対し 900℃/82 秒まで昇温時間の短縮が出来た。
- (2) 給電方法により加熱ムラを意図して 8 箇所の部分接触式電極で実験したところ、総アタリ接触電極で見られた加熱ムラが無くなり、均等加熱が可能となった。また周辺装置への異常加熱も見られなくなった。総アタリ接触の電極では接触面圧に斑があり給電が不安定であったのに対し見かけの接触面積が減少しても、安定した接触面圧が得られたためである。
- (3) 高周波通電加熱は中空一様断面において鋼管を均等加熱させるのに表皮効果の特性を最大限生かす事が可能で、中空一様断面を急速加熱させるのに最適な加熱方法である事が実証出来た。

2) 水蒸気圧発生装置技術の確立

- (1) 加熱によりパイプ強度が著しく低下し、低圧力で破裂。水蒸気圧発生目標 22.1MPa→2MPa に修正。懸念された圧力減少によるワークと型の密着不足は、成形シミュレーション及び実機いずれも内圧 2MPa でワークの型密着を確認した。
- (2) 段付きメタル、シートガスケット、O リング、テーパの 4 種類シール構造をテストしたが、これらではシール性と量産性の両立が実現出来なかった。最終的にプレスシールパッキン構造の採用によりシール性と量産性の両立が実現出来た。
- (3) 空気が残った状態で密閉し、注水・水蒸気化するより、水蒸気を発生させた時にその水蒸気圧で残留空気を排出したあと密閉した方が水蒸気圧の上昇を早めることが分かった。
- (4) 加熱されたパイプに注水すると瞬時に水蒸気化し、水蒸気圧を制御している安全弁の通過可能流量を超えてしまうため水蒸気を逃がしきれず、設定値を超える圧力が発生、圧力制御が困難になる。速い昇圧に対応するためには、機械式安全弁では応答が鈍く注水量の制御及び水蒸気圧をフィードバックし応答性の高い電磁バルブで P I D 制御を行うことが必要。
- (5) 事前に注水した状態から加熱すると温度の上昇と共に随時水蒸気化するため安全弁の通過流量を超えない。水蒸気圧の制御は容易であるが水蒸気の対流によりエネルギーロスが発生する。また水蒸気圧が上昇する時間が長くなる。

3) 冷却条件の確立

- (1) 冷却水は当初パイプ一方端から注水、他方から排水の想定であったが、部品設計結果パイプ内部中央断面が冷却水路としては想定以上に狭くなった為、断念。注水は両サイドから注水、冷却水も両サイド端から回収する構造とし、複合プロセスにおいて焼き入れ必要部位に目標硬度が得られることを確認した。
- (2) 注水を下死点（金型閉）で開始すると冷却水がパイプ内に充填するまでのタイムラグのため、金型による外側からの冷却がメインとなりパイプ内面の硬度が上がりにくい。従って下死点手前より冷却注水を開始させた方が良いことが分かった。

4) 試作品による性能の確認

- (1) 量産想定部品の設計完了。試作品による性能の確認結果問題なし。板厚 2.9t→2.3t 化により従来比 24%の軽量化を実現。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(事業管理者)

公益財団法人ひろしま産業振興機構
中小企業・ベンチャー総合支援センター
研究開発推進担当 課長 三原 智之

TEL : 082-240-7712 FAX : 082-504-7317 E-mail : t-mihara@hiwave.or.jp

(再委託先)

株式会社ワイテック
技術本部 技術開発グループ 主幹 上野 宰

TEL : 082-823-4454 FAX : 082-823-2307 E-mail : ueno-t@ytec-gr.co.jp

第2章 本論

2-1 実験装置仕様

2-1-1 実験装置仕様

①高周波発振機

- ・ 200kw－10kHz (9.9kHz)
- ・ 入力 $\phi 3$ 440V 60Hz

電流逆流防止回路装備

②マッチングトランス（整合器）

- ・ 対象ワーク $\phi 89.1 \times t2.9 \times 1134L$
 $\phi 89.1 \times t2.3 \times 1134L$

③通電用ターミナル（接点部）

- ・ 外周通電を基本電極とする。

④外部リモート

- ・ 通電加熱装置、冷却水循環装置制御、水蒸気圧発生装置（インターロック）

⑤冷却水循環装置

- ・ 高周波発信器、マッチングトランス、通電用ターミナル、電極、水蒸気圧発生装置の冷却を行う

⑥実験装置

- ・ 複合プロセス実験装置（加熱、水蒸気発生、成形、冷却を複合した装置）
熱膨張吸収式構造、通電時衝撃対応（油圧テンション）

⑦テスト用電極

- 外周通電用（シリンダークランプタイプ）
2 分割部分接触式電極（最大 8 接点）
4 分割部分接触式電極（最大 8 接点）

想定対象ワーク

- ・ 対象ワーク $\phi 89.1 \times t2.9 \times 1134L$
 $\phi 89.1 \times t2.3 \times 1134L$

2-1-2 成形フローチャート

1) ワーク（パイプ）のセット（図 2）

- ・ ワーク（パイプ）を型内のリフター上にセット。

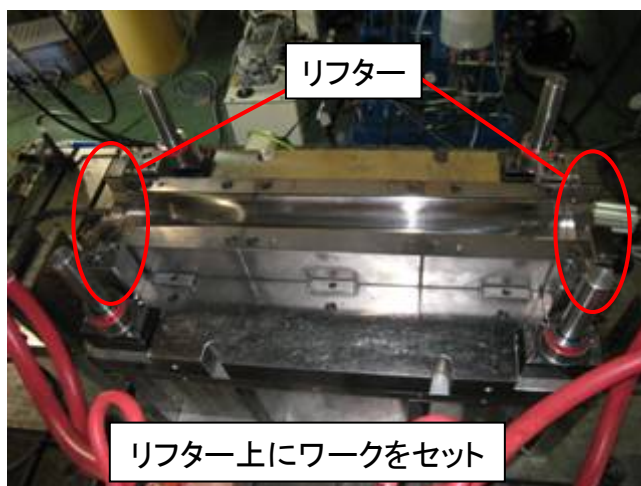
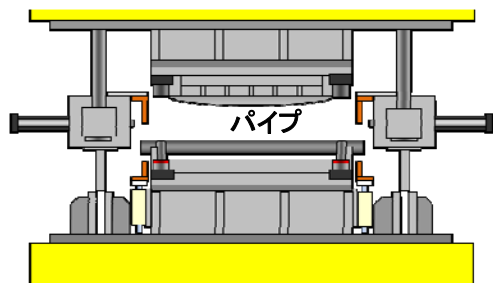


図2 ワーク（パイプ）のセット

2) メタルシールポンチの挿入（図3）

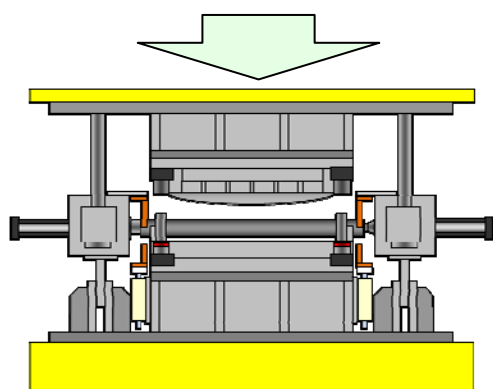


図3 メタルシールポンチの挿入

3) 通電加熱と内圧の発生（図4）

- ・パイプにメタルシールポンチを挿入した状態でプレスを上昇させワークを持ち上げ、ワークに電極をクランプ。
- ・ワーク内に内圧発生用の水を注入。
- ・通電加熱を開始し、ワーク温度 900°C で内圧 2Mpa を発生させ保持。
- ・プレスがメタルシールポンチ挿入位置まで下降。（中間停止位置まで下降）

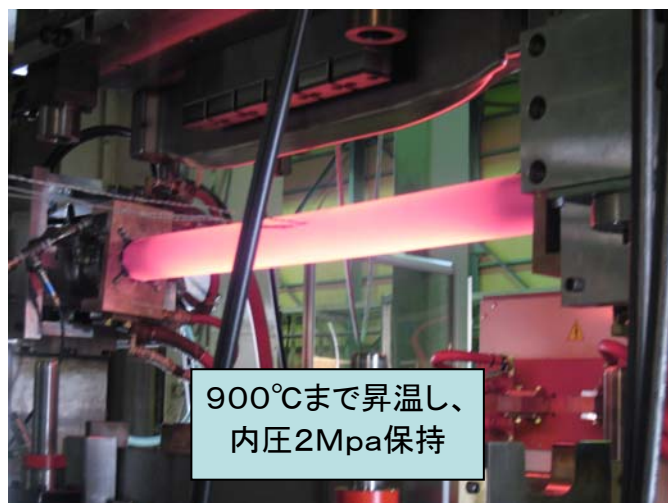
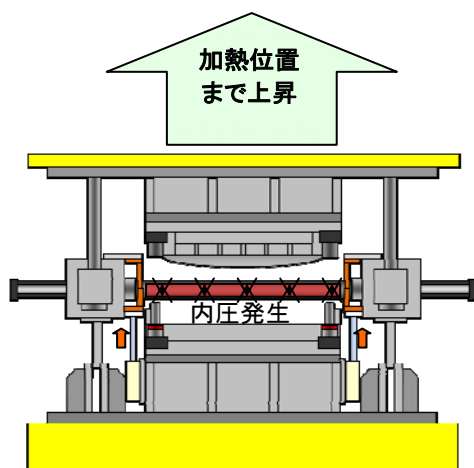


図4 通電加熱と内圧の発生

4) 成形と冷却【焼入れ】 (図5)

- ・ワーク温度 900℃、内圧 2Mpa 保持にて通電加熱を停止し、成形。
- ・成形圧保持の状態でワークを急冷させる為、冷却水を注入。(焼入れ)
- ・冷却水排出後、プレスの上昇を行いメタルシールポンチ後退。

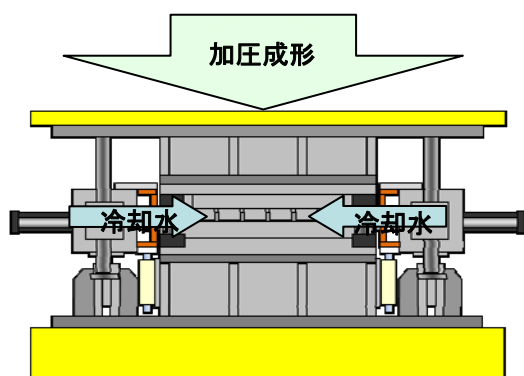


図5 成形と冷却（焼入れ）

5) 成形完了 (図6)

- ・プレス上昇にて成形完了。

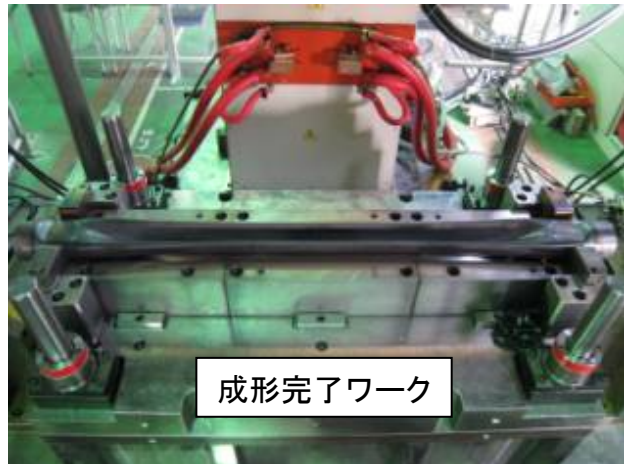
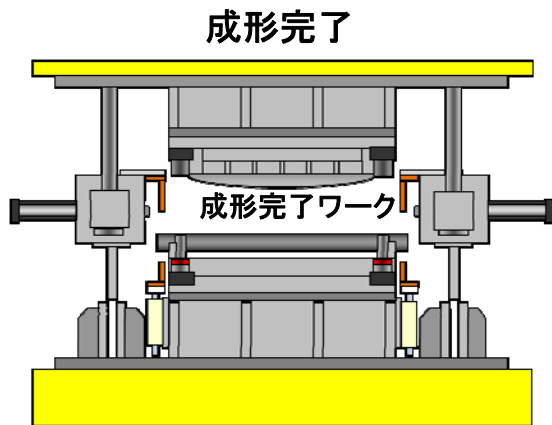


図6 成形完了

2-2 高周波通電加熱

2-2-1 通電加熱を高周波で行う理由

対象ワークは鉄で断面積が大きい為、抵抗値が非常に小さく、直流及び60Hzレベルの低周波通電だと大電流が必要となる。一方高周波通電だとワークは磁性体なので、その磁気ヒステリシスによる発熱が期待出来る上、そのインダクタンスにより大電圧低電流による通電加熱が可能である。

高周波の特徴として周波数が高くなるほどワークの表面にのみ電流が流れる。パイプの加熱に最適な条件として10kHz程度が理想である。10kHz時はパイプの表面から0.5mm程度まで通電加熱を受け残りのパイプ厚さ2.4mm (t2.9時。t2.3時は1.8mmとする)は熱伝導にて昇温する。

2-2-2 出力の選定

ワーク加熱個所の質量をM (9,276g)、25℃での鉄の比熱をc (0.45J/gK)とする。20℃から900℃まで加熱するのに必要なエネルギーをQとすると、

$$Q = M \times c \times (900 - 20) = 3681.3 \text{ kJ}$$

実際には外気や装置自身の回路などによるエネルギー損失があるので、熱変換効率を46%とする。また、この加熱を5秒間で行いたい。装置の必要出力をPとおくと、

$$P = \frac{Q}{\frac{0.46}{5}} = 1600.6 \text{ kW}$$

今回の実験は1/8のスケーリングモデルで行うため、装置の出力を200kWに決定した。

*実験後600℃近辺での温度上昇状況の変化を見て調査した所、鋼は温度により比熱が変化する事を確認した。この場合の平均比熱は0.58 (J/gK)となり、実際の比熱は59%大きい。

2-2-3 通電加熱実験装置目標値

- ・対象ワーク（製品寸法） $\phi 89.1 \times t2.9 \times L1134$
 $\phi 89.1 \times t2.3 \times L1134$
- ・目標温度 900℃
- ・昇温時間 85 秒（実機 8 秒 X8 + 大気放熱分 21 秒）

実験装置の能力は実機の 1/8 モデルとなっている為、目標昇温時間は 8 秒に対し本実験目標値は 85 秒とする。

2-2-4 実験装置詳細仕様

1) 実験用装置

実験用装置の詳細仕様を図 7 に示す。

2) 実験用電極

実験用電極 ・ 4 分割部分接触式電極を図 10 に示す。

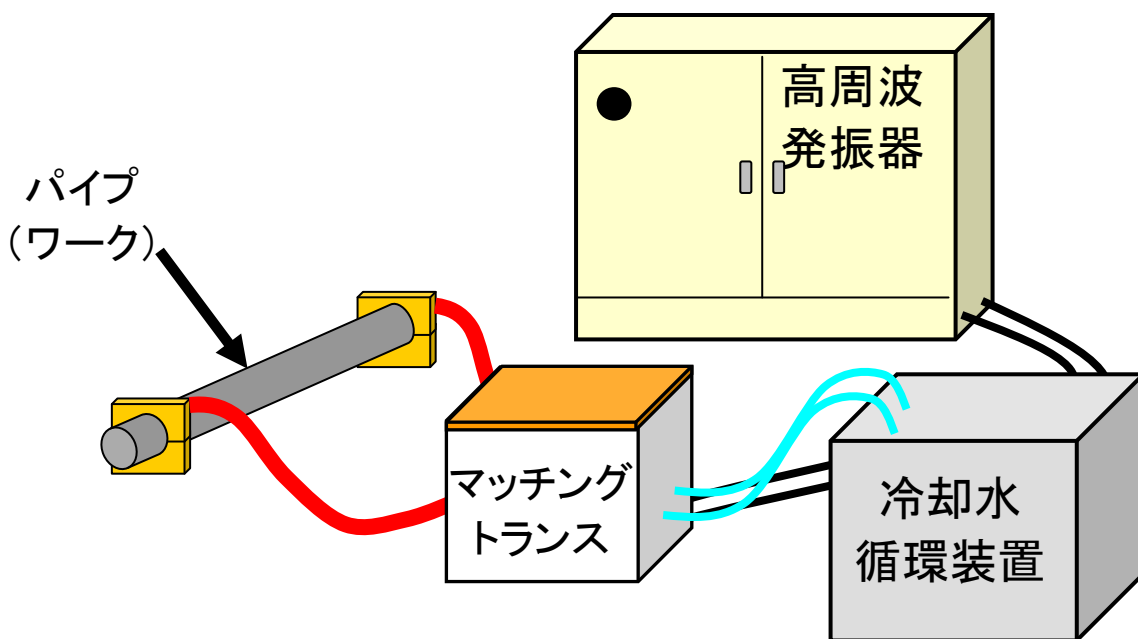


図 7 実験用装置

2-2-5 4分割部分接触式電極による均熱化

総アタリ電極（図 8）では使用頻度とパイプ（加熱対象物）によって接触箇所、接触面積、面圧力に差異が生じ昇温する過程において、均熱を維持することが困難であった。そこで、パイプとの接点部を制限することにより接触箇所、接触面積、面圧力の均等化が可能となり、均熱化を達成することが出来た。（図 9）しかしながら、電極 1 ブロックに対し 4 接点の構造の為、その接点の位置関係は固定であり、接点部の磨耗により接触不良が発生し、結果的には 1 ブロックで 2 接点となり総アタリ電極と同じ様な現象が発生した。



図 8 総アタリ電極

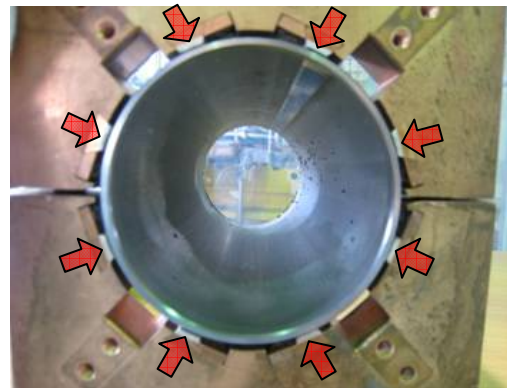


図 9 部分接触式電極

そこで 2 分割であった電極を 4 分割に変更し、1 ブロックに対して 2 接点とし磨耗に対応できる構造とした。（図 10）

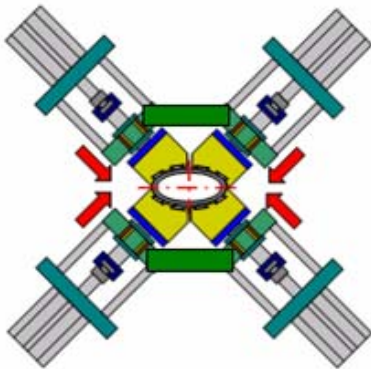


図 10 4 分割部分接触式電極

各電極での温度分布の様子を図 11 に示す。総アタリ電極ではパイプ全体に熱は回るが、昇温する過程において斑が発生している。2 分割部分接触式電極での接触不良時には、総アタリ電極と同様に斑が発生していることが分かる。それに対し 4 分割部分接触式電極は、繰り返し使用した状態であっても、2 分割電極時の均等加熱が実現できた当初の状態と同等の均熱が可能であると確認できた。

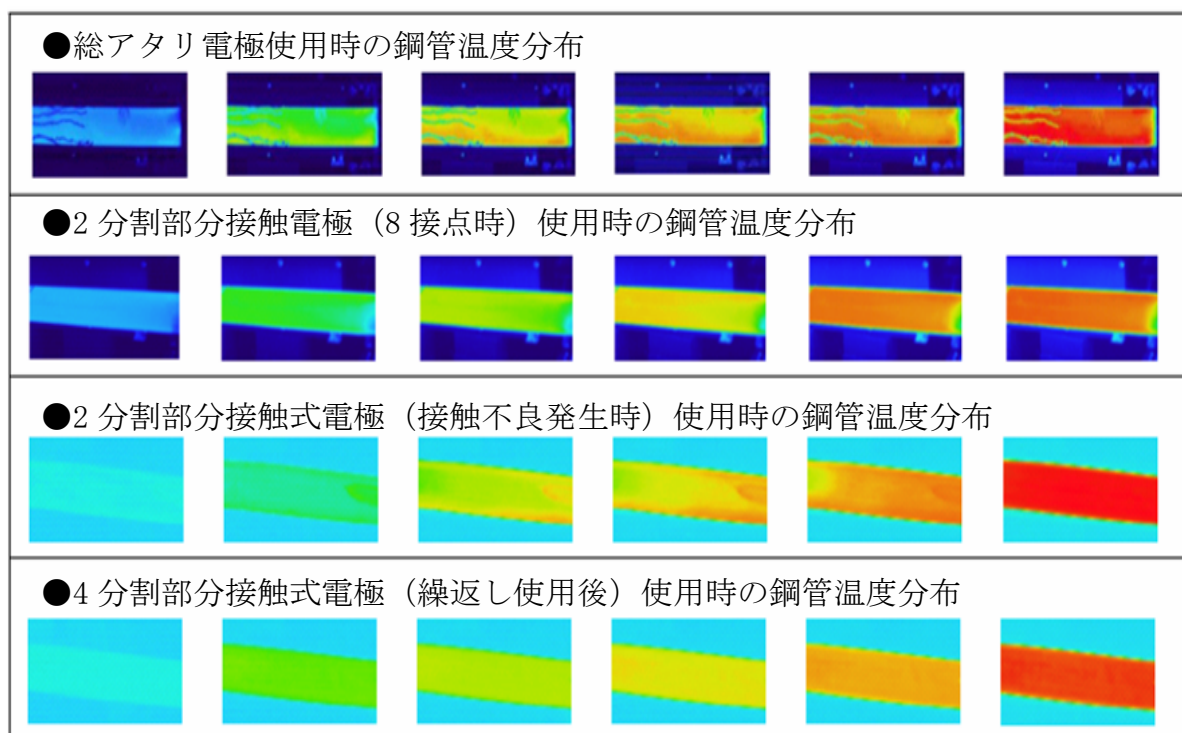


図 11 各電極で鋼管を加熱した時の温度分布

2-2-6 加熱時間の短縮

T_c 点にて電圧リミッター切替（スイッチング）による昇温速度アップ

鋼管 L1600 の通電加熱にて投入電圧 550V（最大）の昇温波形（図 12）を見ると、T_c 点付近までの昇温時間は約 35 秒であり、1 秒あたりでは 20.57℃/秒となるが、それ以降では 900℃まで昇温するのに約 100 秒かかり 2.12℃/秒と昇温の時間が急激に鈍化する結果となった。

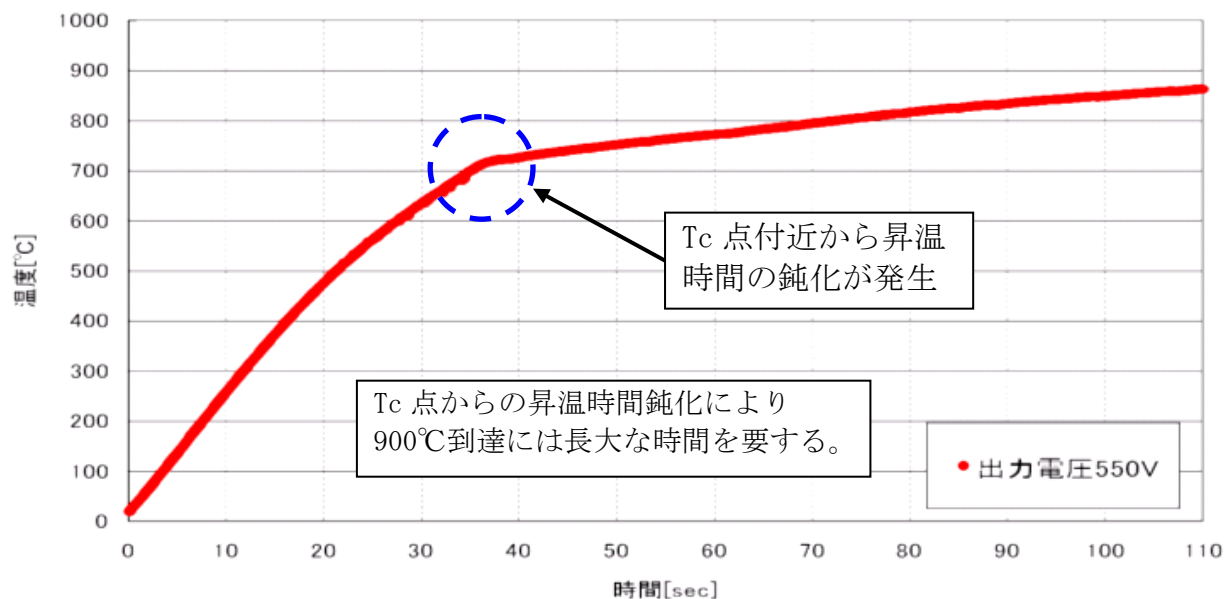


図 12 鋼管 L1600 を通電加熱（投入電圧 550V）昇温波形

●出力電圧 550V 時の各出力変化（1 次側）

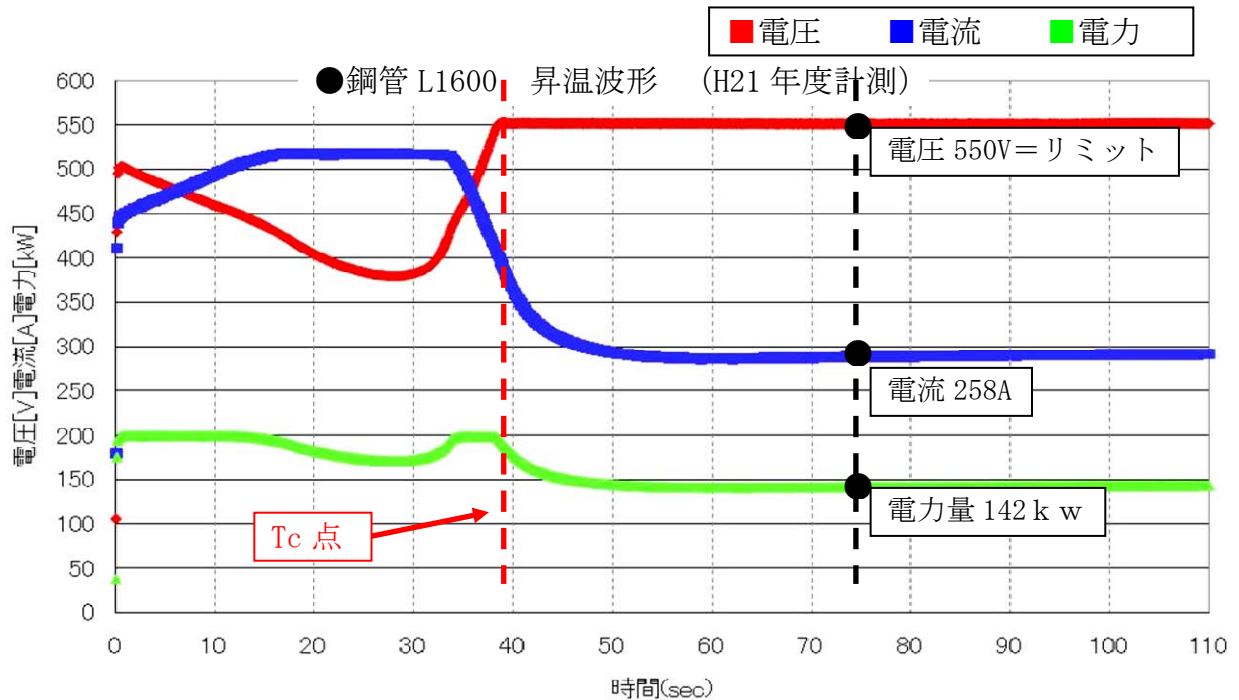


図 13 出力電圧 550V 時の各出力変化

この時の出力波形（図 13）を見ると T c 点以降は抵抗値が上がり電圧はリミット（550V）となるが、電流は 258A しか流れず 200 k w の能力に対して 142 k w の電力しか使えていない結果となった。

そこで T c 点にて電圧リミット切替えが可能な装置改造を行い昇温時間の短縮を図る。改造内容としてはコイル巻数により低電圧と高電圧に分け（コイル巻数少＝低電圧、コイル巻数多＝高電圧）それを電磁マグネットにて切替えを行える装置とした。

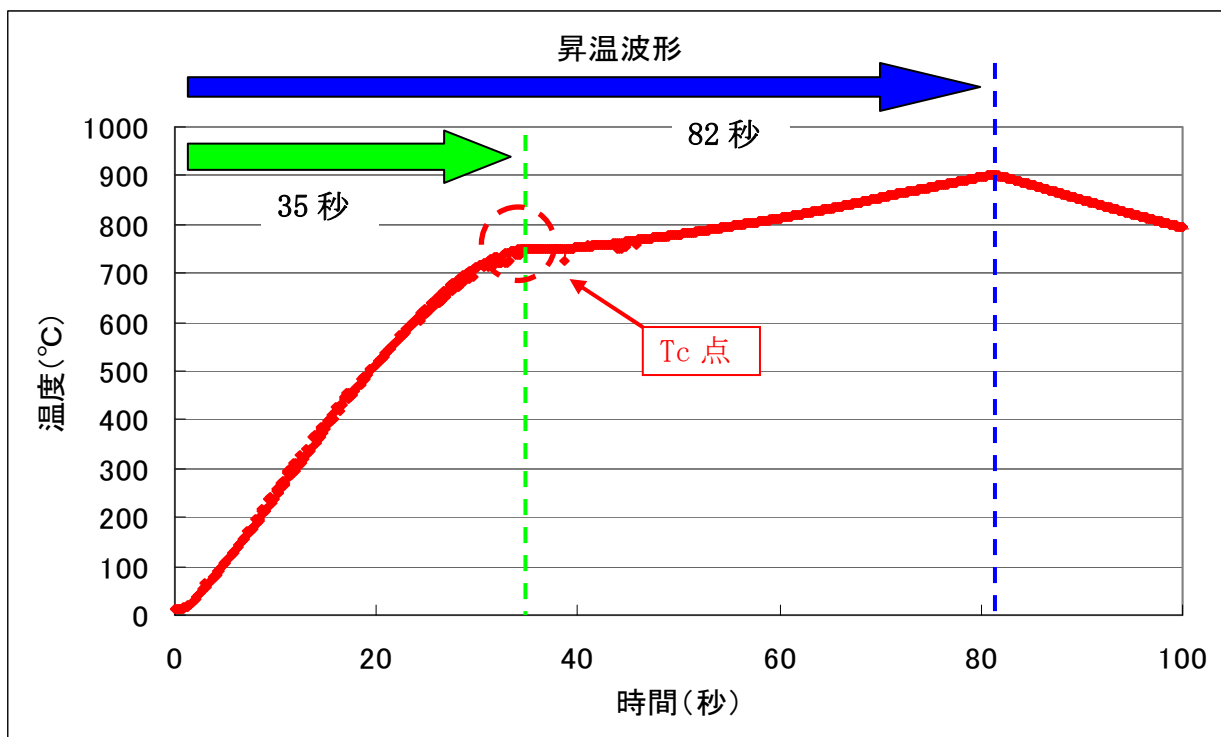


図 14 T_c 点にて電圧リミット切替による昇温波形

T_c 点にて電圧リミットを切替することによってT_c 点までの昇温時間 35 秒、T_c 点以降 47 秒の計 82 秒と目標値を上回る結果を得ることができ、実際にT_c 点にて電圧リミットを切替することによっての時間短縮が可能であることが証明できた。(図 14)

2-3 水蒸気圧発生装置

2-3-1 パイプ破裂圧力と温度

(図 15) に素管状態でのパイプ破裂圧力と温度を示す。

実験により、1MPa/1000℃、7.8MPa/700℃、16.7MPa/570℃でパイプが破裂（図 15 赤点部）。型締め前のパイプ内圧は2MPa レベルに抑える必要があり、成形時にワークが金型密着するかが懸念されたが 2MPa の内圧があれば十分にパイプを金型に沿わせることが出来、金型密着による冷却効果を想定通り得られる事が確認できた。

(図 16)

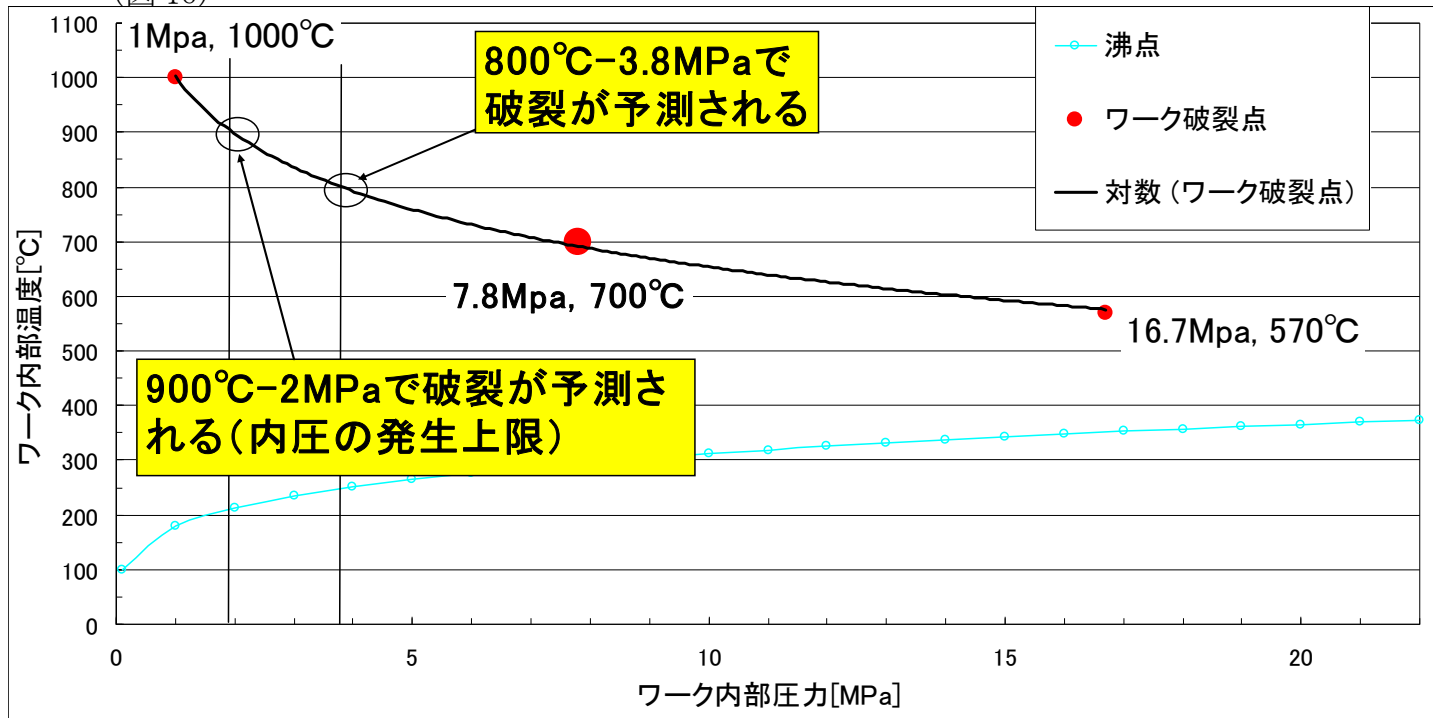


図 15 パイプ破裂圧力と温度

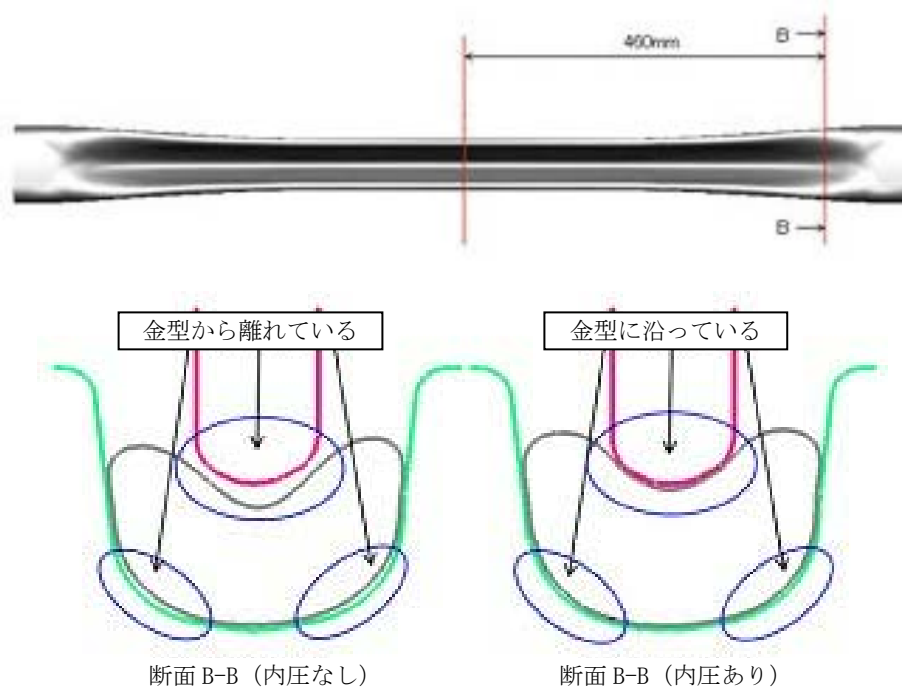


図 16 内圧なし／ありの断面形状比較

2-3-2 シール構造検証

プレシールパッキンでのシール性能

H22年度までの実験よりパッキンのシール性と量産性が両立出来る構造が得られなかったため、H23年度よりプレシールパッキンを採用し、実験を実施する。プレシールパッキンとはU型パッキンの内面側よりプレシール圧力(水圧=水蒸気圧+ α)を供給することで外面側へ張り出し、パイプとシールポンチのスキマを埋めシールする。(図17) 特徴として、

- ・シール性が良い。(シール性向上)
- ・端面シールと異なり、シールする為に押し付け推力が不要。(座屈防止)
- ・シールポンチ挿入時にパイプでパッキンが傷つきにくい。(寿命向上)

2 MPaの保持を確認。外部及びパイプ内部への水蒸気漏れ無し。(図18)

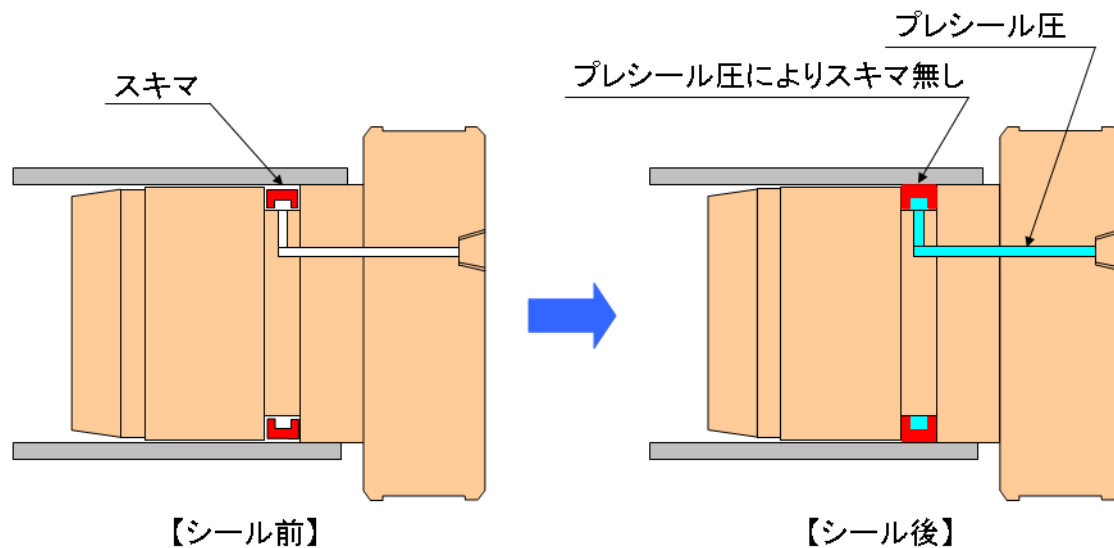


図17 プレシールパッキン構造

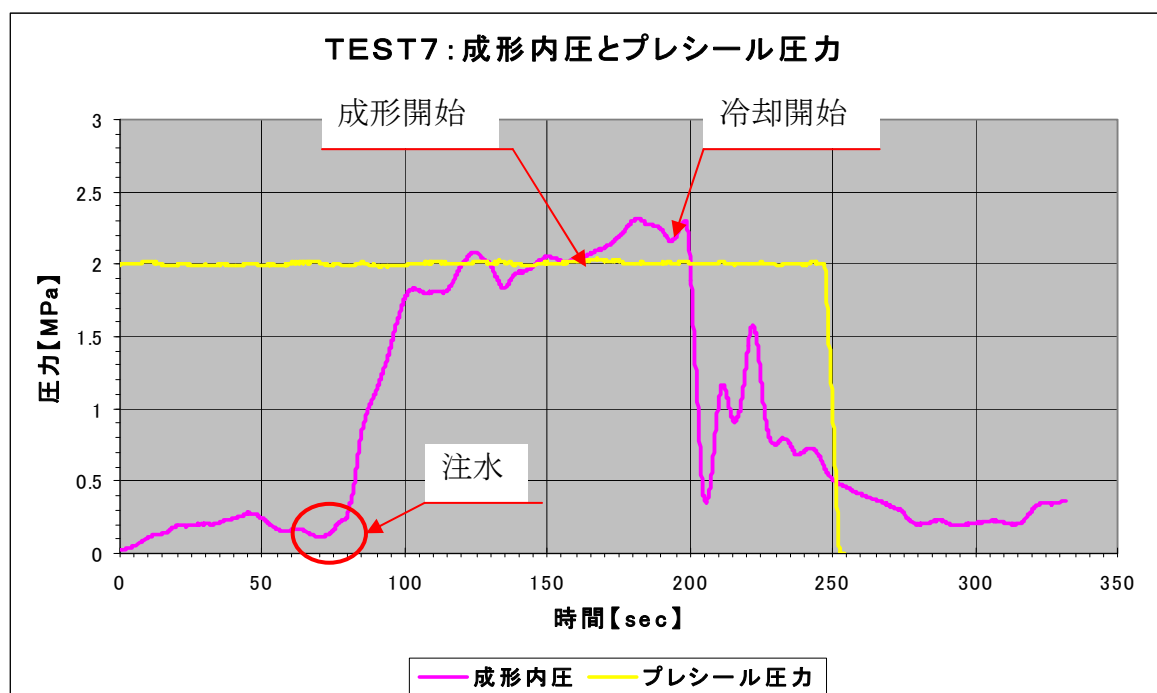


図18 成形内圧

2-3-3 水蒸気圧発生実験

プレシール圧 2. 2 MPa 保持後、300℃まで加熱し、加熱を一時停止した状態でパイプ内部へ注水。その後890℃まで再加熱し、成形を行った。冷却水は下死点（金型閉）55mm手前より開始。注水量が多い為、加熱途中の圧力コントロールは圧力をモニターしながら手動にて冷却水排出弁を開き、圧力が上昇しすぎない様にコントロールした。最大発生水蒸気圧は4.4 MPa、シミュレーションでは2 MPa がパイプを破裂させる事無く、成形出来る最大圧力となっているが、金型密着時は4.4 MPa でも破裂しない事が分かった。（図 19）

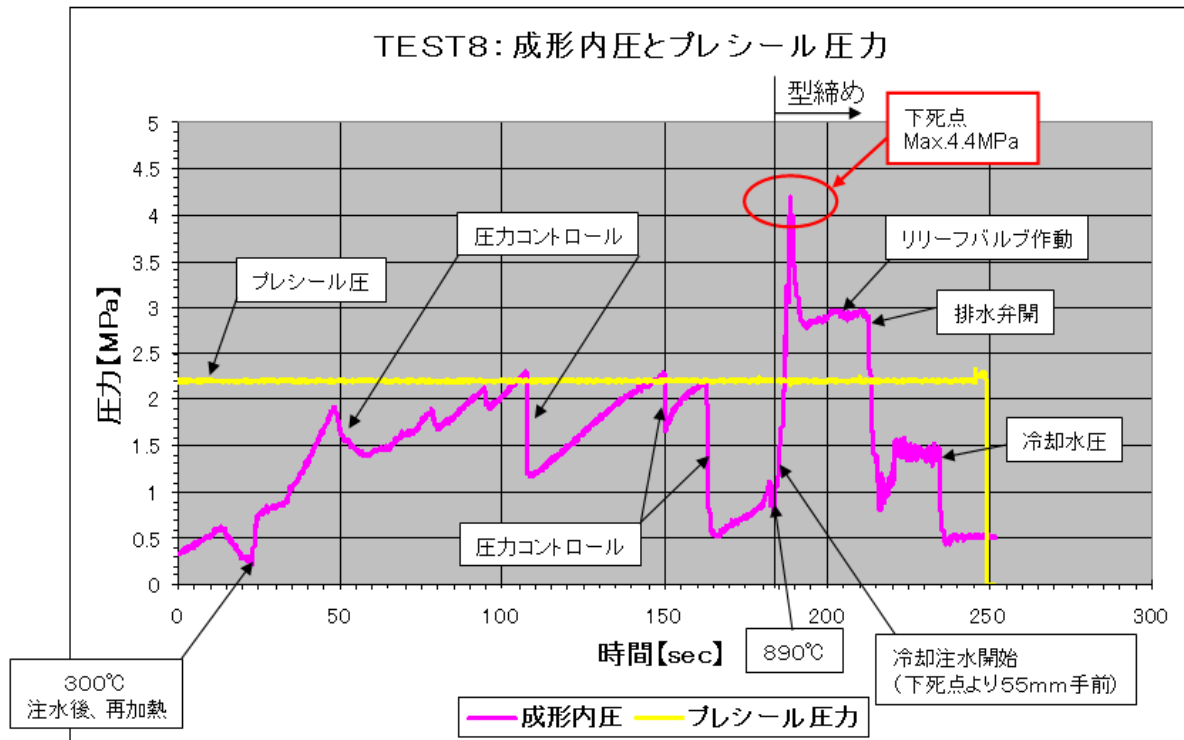


図 19 水蒸気圧発生実験②

この実験により金型密着時に水蒸気圧を確保することで、型密着度向上、形状安定・型冷却による硬度アップが得られた。

2-4 冷却条件の確立

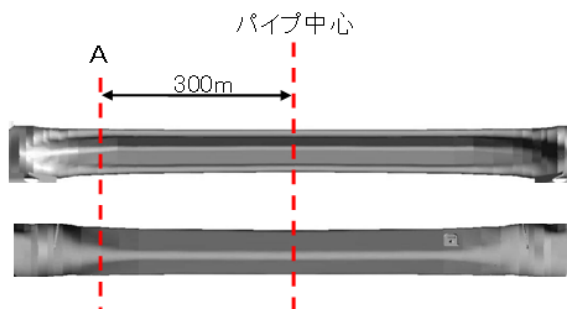
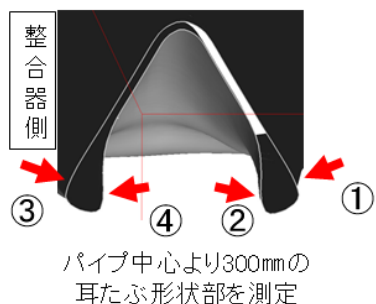
加熱・水蒸気加圧・成形・冷却の一連プロセスにて、冷却状況と焼き入れを行い、焼き入れ必要部位の硬度が380HVになることを目指す。

加熱・水蒸気圧発生・成形・冷却、一連プロセスにて成形実験とパイプの硬度測定。

「測定結果」

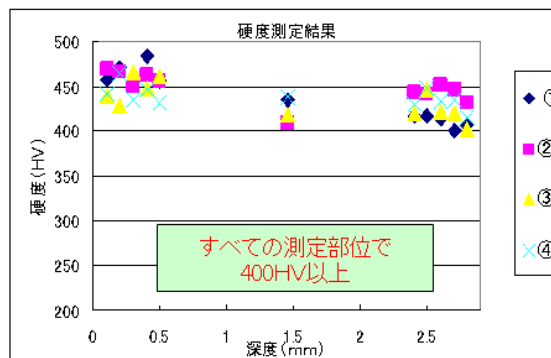
- ・ A断面：全ての測定部位において目標硬度380HVを超え400HV以上の硬度が得られている。（図 20）
- ・ B断面：A断面同様に全ての測定部位において目標硬度380HVを超え400HV以上の硬度が得られている。（図 21）

●A断面: 測定部位



●パイプ中心～300mm 部

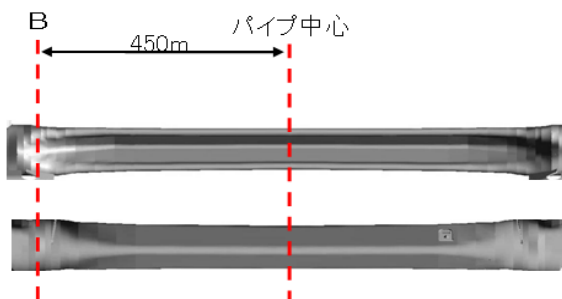
		反整合器側		整合器側	
		①	②	③	④
深さ(mm)	0.1	458.1	469.6	439.4	440.9
	0.2	471.3	466.3	427.5	464.6
	0.3	456.5	450.2	466.3	434.9
	0.4	483.3	463	447.1	445.5
	0.5	456.5	456.5	461.4	431.9
	1.45	434.9	409.3	419	437.9
	2.4	416.2	442.4	420.4	430.5
	2.5	416.2	440.9	445.5	448.6
	2.6	413.4	451.7	421.8	433.4
	2.7	401.2	445.5	420.4	434.9
	2.8	406.6	431.9	402.6	414.8
最大値		483.3	469.6	466.3	464.6
最小値		401.2	409.3	402.6	414.8
平均値		437.7	447.9	433.8	438.0



全体に硬度UPが見られ良好、中でも板外側の硬度が高く信頼性に奏功。

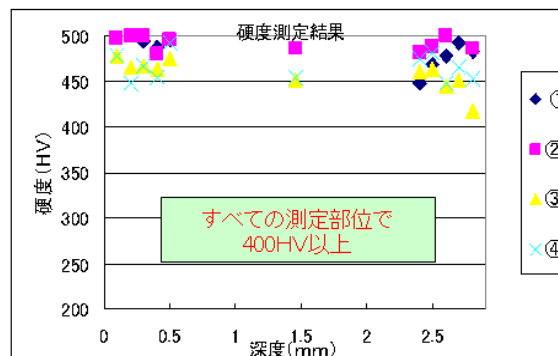
図 20 A断面硬度測定結果

●B断面測定部位



●パイプ中心～450mm 部

		反整合器側		整合器側	
		①	②	③	④
深さ(mm)	0.1	501.2	497.5	478.1	478.1
	0.2	501.2	499.4	464.6	447.1
	0.3	493.9	499.4	466.3	466.3
	0.4	486.8	479.8	463	453.3
	0.5	495.7	495.7	474.7	492.1
	1.45	510.5	485	450.2	453.3
	2.4	447.1	481.5	459.7	474.7
	2.5	467.9	486.8	463	481.5
	2.6	478.1	499.4	444	447.1
	2.7	492.1	508.6	450.2	464.6
	2.8	483.3	485	417.6	451.7
最大値		510.5	508.6	478.1	492.1
最小値		447.1	479.8	417.6	447.1
平均値		487.1	492.6	457.4	464.5



パイプ中心より300mm 部位よりも硬度が全体的に高い

図 21 B断面硬度測定結果

- ・一連プロセスにおいて焼き入れ硬度が得られることを確認した。
- ・注水は下死点（金型閉）で開始すると冷却水がパイプ内に充填するまでのタイムラグのため、金型による冷却がメインとなりパイプ内面の硬度が上がりにくい。従って下死点手前より冷却注水を開始させた方が良いことが分かった。

2-5 試作・実験結果

2-5-1 性能確認用試作品の製作

トーションビームアクスルの試作品は図 22 に示す。センタービームは当複合加工プロセスにて製作（素管径 $\phi 89.1$ t2.3）。サイドメンバー、ブッシュパイプ、スプリングシート、ハブプレートは現行量産品を流用し試作品を製作した。

（図 22）

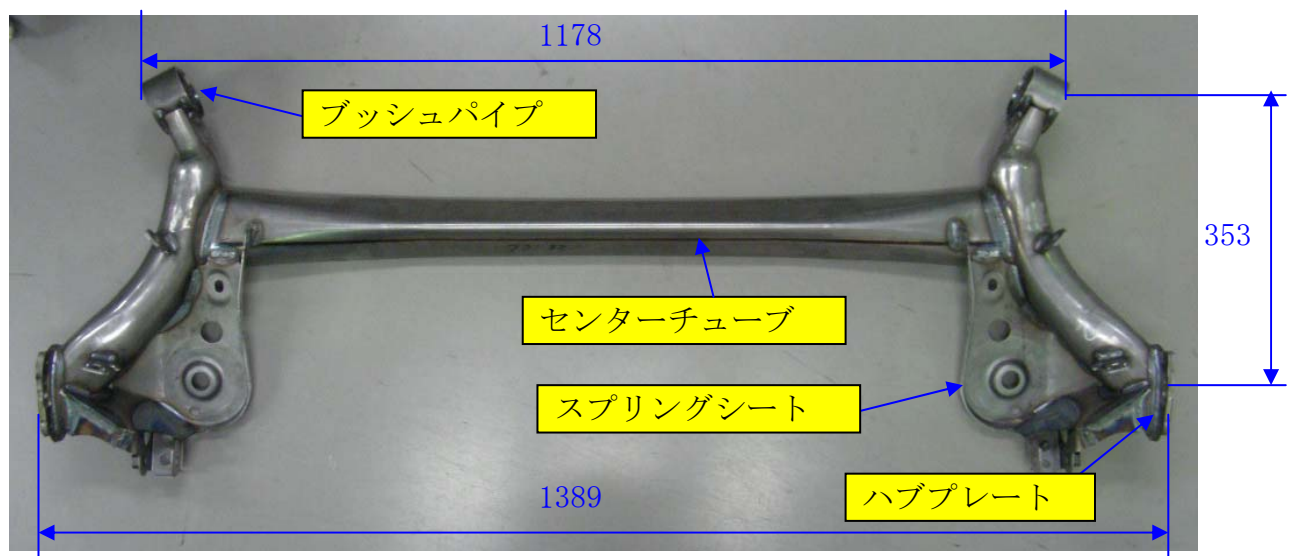


図 22 性能確認用試作品

2-5-2 振り耐久試験結果

ハイサイクル振り耐久試験結果解析で想定していた疲労寿命をはるかにしのぎ 300 万回でも亀裂発生は見られず、疲労限界を超える耐久性能が見られた。（表 2）

ローサイクル振り耐久試験においても、目標としている 4 万回を超え 4.5 万回となった。（表 2）

	目標値	実験結果
振り剛性	100%	-97.7%
ハイサイクル 振り耐久強度 (応力)	20 万回 (410MPa)	40 万回以上
ローサイクル 振り耐久強度	4 万回	4.5 万回

表 2 実験結果

最終章 全体総括

3-1 達成目標と研究成果

研究目標達成状況を表 3 に示す。表に示す様に全ての項目において目標を達成する事が出来た

	従来技術	開発技術 (従来技術比)	研究成果
高強度化 (1500MPa)	○	◎ (20%up)	◎ 20%up実現
形状自由度	○	○ (同等)	○ 同等
軽量化	○	◎ (10%軽量化)	◎ 24%軽量化 (図 2 3)
設置面積	△	◎ (50%削減)	◎ 55%削減見込み (図 2 4)
エネルギー消費量	×	○ (50 %削減)	◎ 53%削減 (表 4)
製造設備費用	△	◎ (30%削減)	◎ 32%削減見込み (表 4)
金型費用	○	○ (同等)	○ 同等
工程数	△	◎ (1／3以下)	◎ 1／3実現 (図 2 5)
個当たり加工時間	×	◎ (90 %削減)	◎ 90.7%削減 (図 2 5)

表 3

3-1-1 高強度化目標

目標とする強度必要部での焼入れ強度を 1500MPa (450HV) 相当に高強度化が出来た。(図 20、図 21 参照)

3-1-2 形状自由度

当工法における設計自由度は、材料加熱による材料強度の低下と水蒸気圧による形状張り出しにより、現行の冷間プレス成型や液圧成型に匹敵する形状自由度が得られた。(図 16 参照)

3-1-3 軽量化

高強度化及び形状設計の作りこみにより、板厚を 2.9mm から 2.3mm へ薄肉化を実現、24%の軽量化が実現出来た。(図 23)

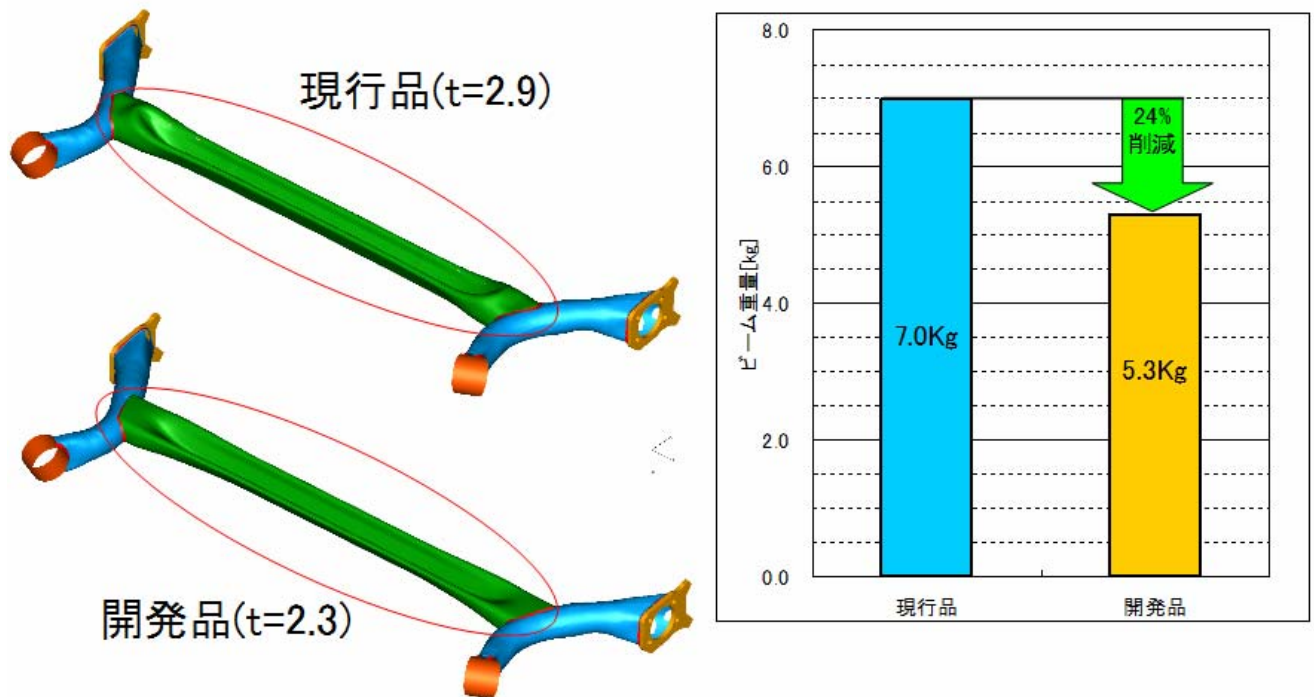
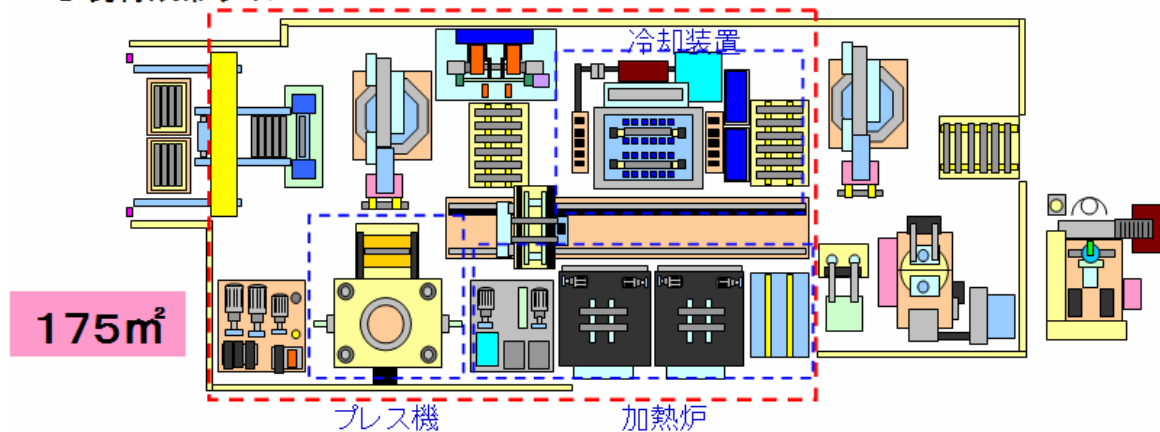


図 23 軽量化達成状況

3-1-4 設置面積

図 24 に示す様に、加熱炉・冷却装置及び付随する搬送装置が不要となり 55%の設備設置面積を見込んでいる。(図 24)

●現行成形ライン



●複合成形ライン(構想図)

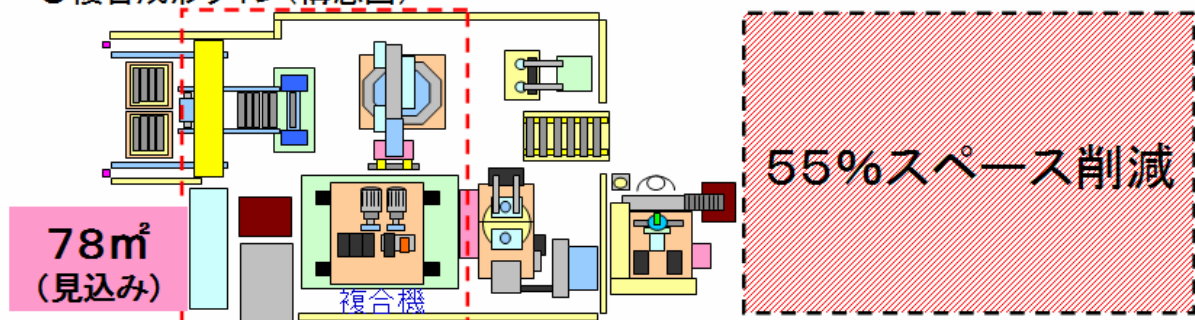


図 24 設備設置面積削減見込み

3-1-5 エネルギー消費量

現状の加熱エネルギー4.5kwh/台（2.9t×1360L）に対し 2.08 kwh/台（2.3t×1134L）と 53%のエネルギー削減を実現した。（表 4）

3-1-6 製造設備費用

複合成形機特有の通電加熱装置、金型注水成形装置が新たに必要となるが、現状の予備成形機、液圧成形機、加熱装置、搬送ローダ、冷却装置が不要となりトータルで 32%の設備費削減の見込みである。（表 4）

	現行成形ライン	複合成形ライン(ステータス)
熱処理電力量比較	加熱方法：バッチ式電気炉 既存ライン消費電力量⇒ 4.5kwh/台 (2.9tX1360L)	加熱方法：高周波直接通電 通電加熱消費電力量⇒2.08kwh/台 (2.3tX1134L) 53%削減
設備コスト比較	既存ビーム液圧成形 ライン設備コスト 100% ・予備成形機 ・液圧成形機 ・加熱装置 ・搬送ローダ ・冷却装置	通電加熱成形ライン設備コスト <複合成形機> ・通電加熱装置 ・金型注水成形装置 68% 32%のコストダウン見込み

表 4 電力量・設備コスト

3-1-7 金型費用

冷却水路等が必要となり複雑になるものの、液圧成形型に対してワークの材料強度が低い状態で成形する熱間成形の為、金型強度を落とせるので金型費用は同等レベルを見込んでいる。

3-1-8 工程数、個当り加工時間

図 25 に示すように、3 工程・300 秒から 1 工程・28 秒と当初目標を上回り、90.7%の加工時間の削減となった。

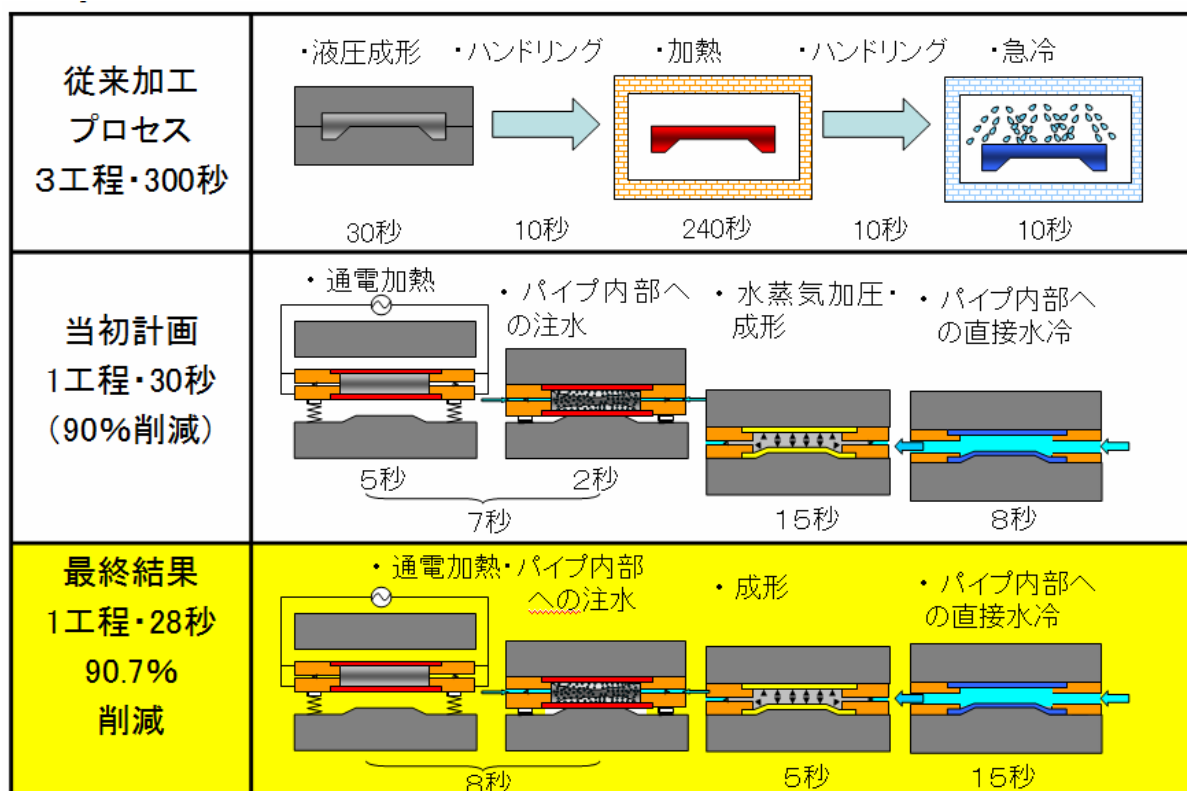


図 25 工程数・加工時間

3-2 事業化へ向けた技術課題

①通電加熱による加熱技術

- ・事業化に向けた製品品質を確保出来る各条件範囲の確認。
- ・事業化に向けて電源装置 1/1 モデルでのパイプ及び付帯設備に与える熱影響確認（本開発での電源装置は 1/8 モデル）。
- ・事業化に向けた温度管理方法の検討。

②水蒸気圧発生装置技術

- ・水蒸気圧コントロール P I D 制御の折込み。
- ・プレシールパッキン連続使用時の耐久性確認。

③冷却条件の確立

- ・更なる冷却時間の短縮。

④試作品による性能の確認（想定量産部品の構想・設計）

- ・事業化に向けて具体的な開発車種のパッケージや要求性能に合わせた開発（設計活動）。

3-3 事業化展開

当工法は現在の量産工法に対しコスト・重量面で有利な工法である。現在量産している車種をベースに試作品の実験結果を持って受注を目指して売り込みを開始している。

表 5 に事業化展開計画を示す H24 より受注活動を開始し、H24, H25 補完研究にて更なる量産化への課題の洗い出しと解決を行い、具体的車種への部品設計・開発と並行して量産設備詳細仕様の検証・量産管理基準の構築を行い量産化へつなげて行く。

また、TBA 以外にも当工法の適用可能な部品を洗い出し、並行してカーメーカーへの売込みを行っていく。

		H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32
製造装置・ プロセス開発	要素技術開発	→			サポイン								
	量産化への課題の 洗い出しと解決				→	→	→	→	→	→	→	→	→
自動車部品 設計・開発 (事業化)	カーメーカーへの技 術				→	→	→	→	→	→	→	→	→
	具体的車種への部 品設計・開発				→	→	→	→	→	→	→	→	→
	量産設備製作						→	→	→	→	→	→	→
	部品生産(TBA)										→	→	→
	他部品への適用検 討				→	→	→	→	→	→	→	→	→

表 5 事業化展開計画