

高耐久・低コスト燃料電池バイポーラプレートの開発

Development of High-durability and Low-cost Fuel Cell Bipolar Plate

布川 和男¹
Kazuo NUNOKAWA
石田 堅太郎¹
Kentaro ISHIDA

新海 洋¹
Hiroshi SHINKAI
後藤 修平¹
Shuhei GOTO

小山 賢²
Satoshi OYAMA

要 旨

新構造燃料電池スタック向けのバイポーラプレートをゼネラルモーターズと共同開発した。本研究のバイポーラプレートは、従来に対し機能を向上させつつコスト低減と生産性向上を両立させるために、ハイスサイクル成型を前提とするバイポーラプレート構造を開発した。ステンレス基材へプレス前にカーボンとチタンで構成されるコーティングを施した。シール構造については積層ゴムシール構造から、コーティング後のプレス成型によるメタルビードシール構造と溶接シール構造へ変更した。また、ハイスサイクル成型をおこなうためにゴム被覆レス構造を採用した。

ABSTRACT

A bipolar plate for a new structure fuel cell stack was developed jointly with General Motors Company. In order to achieve both lower cost and higher productivity while enhancing the functionality of the bipolar plate in this study, a bipolar plate structure that assumes high-cycle molding was developed. A coating consisting of carbon and titanium is applied to the stainless steel base material before stamping. The seal structure was changed from a multilayer rubber seal structure to a metal bead seal structure formed by stamping after coating and a welded seal structure. In addition, a structure without a rubber coating was adopted for high-cycle molding.

1. まえがき

燃料電池は地球温暖化やエネルギー問題に対応するため、CO₂や有害物質を排出しない循環型クリーンプラントとして期待されている⁽¹⁾。Hondaは1980年代から燃料電池技術の実用化に取り組んできた⁽²⁾。本稿では、新構造燃料電池スタック⁽³⁾へ適用した積層セルを構成する部品の一つである、Bipolar plate (BPP)に関して論じる。積層セルはFig. 1に示すように、1枚のUnitized Electrode Assembly (UEA)を2枚のBPPで保持し冷却液を流すセル構造を採用している。

BPPに求められる機能としてはFig. 2に示す通りである。

- (1) 水素、酸素ガスをUEAに供給する
- (2) 冷媒を流してBPPとUEAを冷却する
- (3) 水素、酸素、冷却液をシールする
- (4) セルとセル間の導電性を確保する
- (5) 発電環境下における耐食性を確保する

また、従来の燃料電池スタックのコスト比率はFig. 3に

示すように、BPP、UEAの構成割合が高い。

さらにBPPコスト構成の内訳ではシール、コーティング、プレス成型コスト割合が高く、それらの低減は課題であった。従来のBPP⁽⁴⁾では、シール機能に対してインジェクション成形を用いたゴムシール構造を採用していたため、生産サイクルタイムが長くなり大量生産には課題があった。また、耐食性のためのコーティングに貴金属を使用すること、およびBPP成型時にコーティングの品質検査が多いなどの課題があった。

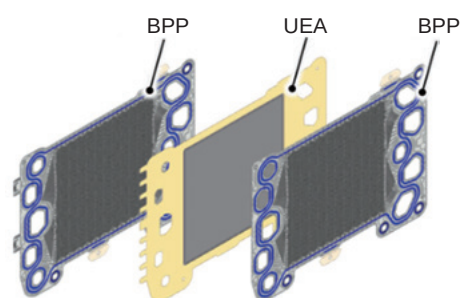


Fig. 1 Structure of BPP and UEA

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

E-mail: kazuo_nunokawa@jp.honda

² 本田技研工業株式会社

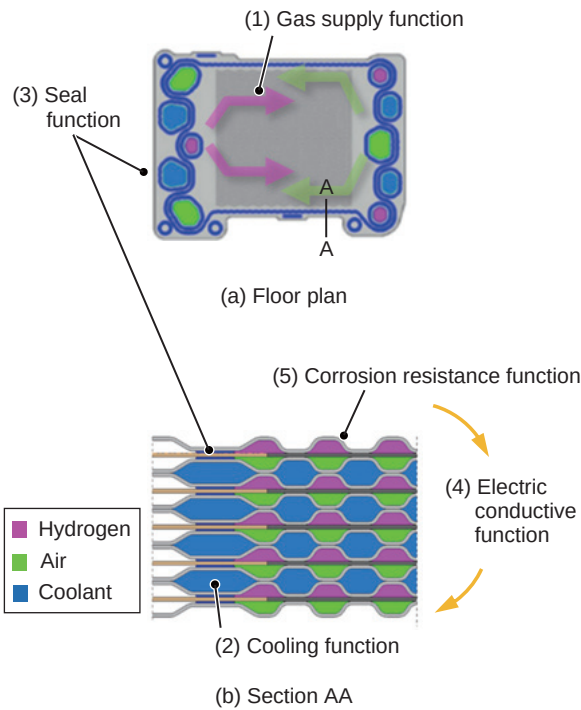


Fig. 2 Main functions of BPP

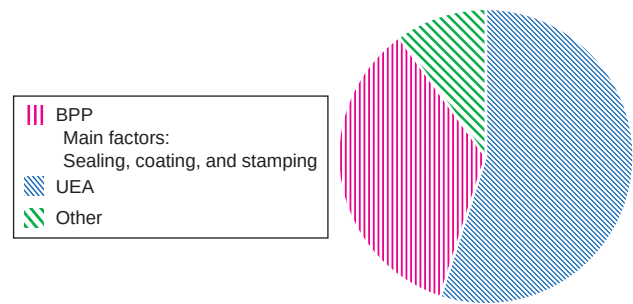


Fig. 3 Breakdown of conventional fuel cell stack cost

2. 開発のねらい

従来に対し機能を向上させつつコスト低減と生産性向上を両立させるために、ハイサイクル成型を前提とする BPP 構造を開発した。

Fig. 4 に従来と新構造 BPP の比較表を明示した。新構造として設定した目標生産台数を達成するため、製造工程と検査工程を簡略化できるシール構造が必要であった。そこで、積層ゴムシール構造からメタルビードシール、溶接

	Conventional BPP structure	New BPP structure
Seal structure	Rubber seal Plate	Micro seal Welded seal Metal bead
Coating structure	Au (conductive gold island plating) Base material stainless steel	Carbon Titanium Base material stainless steel
Outer insulation structure	Perimeter resin frame Rubber seal Plate	Metal bead+Micro seal No insulation coating
External shape	Gold plating	Active area Graphite-like carbon Header

Fig. 4 Comparison of conventional and new BPP structures

シール構造へ変更した。また、コーティングの材料と処理のコストを低減する必要があった。そこで従来の金処理コーティングから Graphite Like Carbon (GLC) コーティング処理をおこなったコイルを適用した。

従来BPPは外周ゴム被覆構造で絶縁を確保していたが、新構造では沿面、空間距離を設定し、外周ゴム被覆レス構造を採用することで絶縁検査工程を廃止した。

3. 新構造 BPP の特徴

3.1. メタルビード、溶接シール構造の成立性

メタルビードシール (MBS) 構造は Fig. 5 で示すようにプレスで成型した (a) 金属ビード部と (b) マイクロシールゴムから構成されており、積層、圧縮時の反力によりシールする構造とした。また Plate-A と Plate-B を (c) 溶接することで、冷却通路を形成した。

3.1.1. MBS 構造の設定

金属弾性を利用する MBS 構造では、ビードに高い荷重がかかると塑性変形することで必要なシール線圧が不足し、ガスや冷媒がリークしてしまう懸念がある。線圧とはシール部に発生した荷重をシール線長で除した値とする。

走行時に車両が振動すると、スタックにも振動が伝播し BPP シール部に高い荷重が発生する。その場合でも、シール機能の保持に必要な線圧を発生できるビード断面形状を設定した。さらに、車両衝突の減速度で内部荷重が発生するため、Fig. 6 に示すような BPP 外周部に荷重を受ける形状を設けることで、メタルビードが塑性変形することを防止した。

MBS 構造は、ビードの断面形状やシールラインの平面レイアウトにより圧縮荷重特性が変化する。Fig. 7 に示すように、ビード断面形状 (ビード幅) を調整することで、圧縮荷重特性を変化させることができる。また、Fig. 8 に示すように、シールラインの平面 R および角度によっても圧縮荷重特性を変化させることができる。以上の特性を用いて、面内の特性を均一にするよう設計することで、局所的なシール線圧抜けによるリークを防止した。

3.1.2. 流路部及び MBS の 2Hit 成型

新構造 BPP ではプレス時に流路部のうねり量が大きく、積層時に面圧の不均一が発生し、Active area の接触抵抗が増加したため、うねり量を改善する対策を実施し

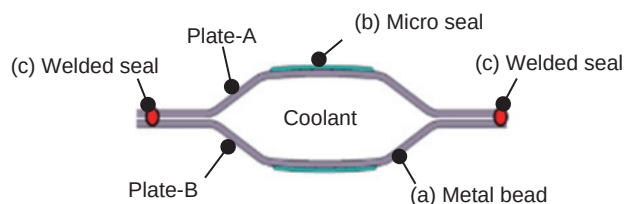


Fig. 5 Cross-sectional structure of MBS

た。また、車両衝突時などにおけるシール性を確保する必要があったため、MBS の圧縮荷重特性を増加する対策を実施した。

Fig. 9 に示すように流路うねりの原因は Flow channel stamp area の内側が Flow channel stamp area 外側より流路部垂直方向に長くなるため、この差は流路成型時のスプリングバックにより発生する。

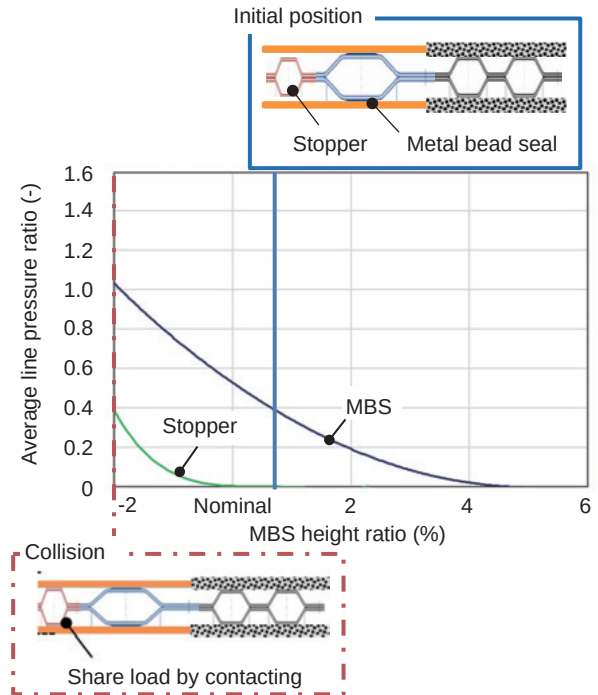


Fig. 6 MBS and stopper line pressure

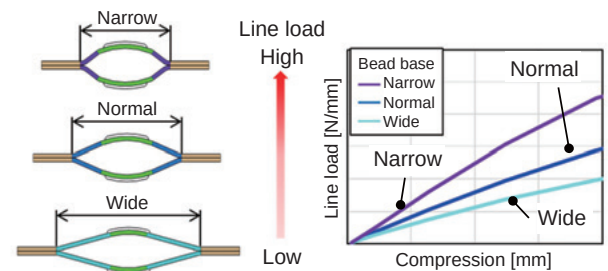


Fig. 7 Metal bead width and line load property

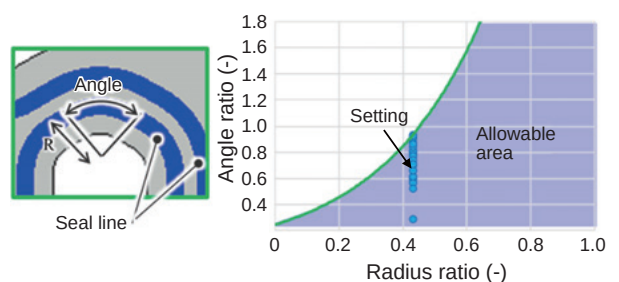


Fig. 8 Plane radius and angle setting

対策として Fig. 10 のように流路成型工程を2段階に分け、1段階目の成型工程 (1Hit) で発生したスプリングバックを2段階目で稜線を曲げることで吸収する2段階成型工程 (2Hit) 流路型構造を採用した。

効果として Fig. 11 のように Active area の面圧を感圧紙で確認したところ、面圧ばらつきが少なくなった。Fig. 12 に示すように 1Hit のみの成型に対し 2Hit 成型仕様の流路部のうねり量が減少した。

次に MBS の強度を増加させるために、流路成型と同じ工程内で 2Hit 型構造を採用し母材の加工硬化を付与した。

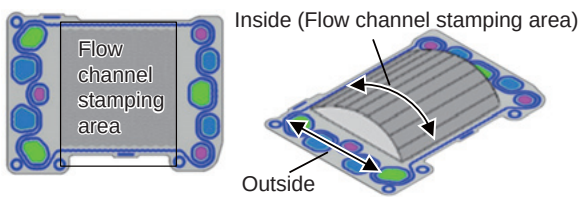


Fig. 9 Image of stamping area springback

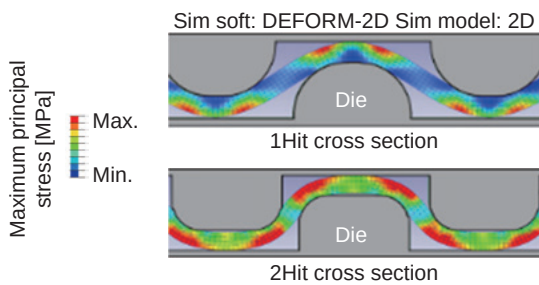


Fig. 10 1Hit and 2Hit of flow channel stamping process

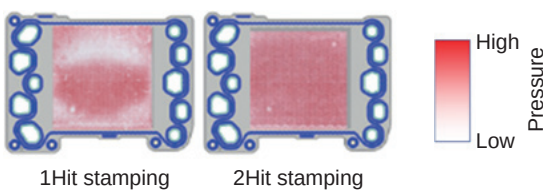


Fig. 11 Pressure of active area

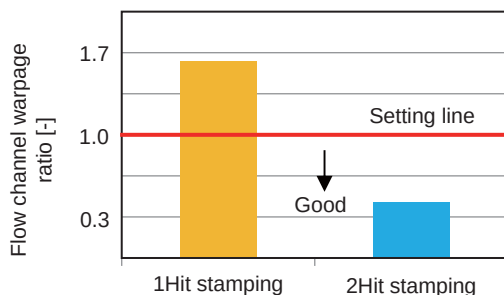


Fig. 12 Warpage of flow channel

1段階目に Fig. 13 のように MBS の中央をプレスし、2段階目に MBS 形状の最終形状をプレスすることで、断面全体に加工硬化をいれて強度を上げる 2Hit メタルビードシール構造を採用した。

強度を向上させた効果として、Fig. 14 に示す通り MBS の圧縮荷重特性の最大値が増加した。

3.1.3. マイクロシールの設定

新構造 BPP では Fig. 5 に示すように、メタルビードの上に、マイクロシールを配置する構造となっている。これにより、Fig. 15 に示すように圧縮永久ひずみによるシール線圧低下量を低減し、シール機能を保持できる構造となっている。一方でシールが薄いことは、製造時にシール上に異物が混入した場合にシール機能を保持することに不利となる。異物の混入を低減するためには、クリーンな環境での製造が必要となるが、製造コスト増大の要因となってしまう。

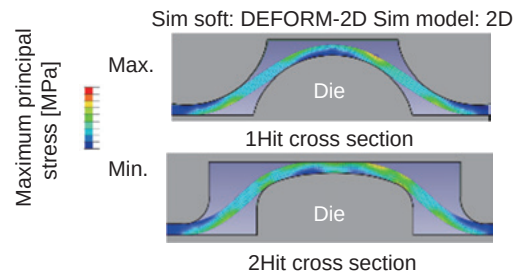


Fig. 13 1Hit and 2Hit of MBS stamping process

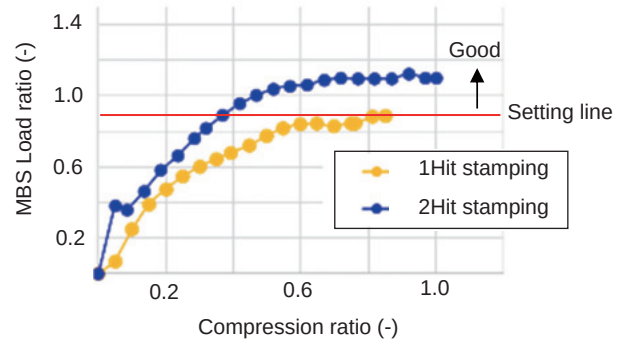


Fig. 14 MBS load characteristics

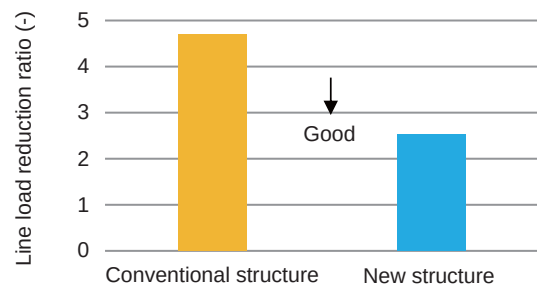


Fig. 15 Line load reduction comparison

まう、そのため Fig. 16 に示すように、異物が混入した場合でもシール機能を保持できるシール厚みと製造環境管理条件から最適なマイクロシールの厚み、幅を設定した。

3.1.4. 溶接シール構造の設定

BPP の界面は Fig. 5 に示すようにプレート同士を溶接により接合することで冷却液をシールする構造を採用している。Fig. 17 に示すように溶接幅を Faying length (FL) と定義している。Fig. 18 に示すように、溶接部にはガス、冷媒の運転圧力が掛かっても接合部が破断しないような接合強度を確保できる FL 幅を設定している。

一方で、一般的に溶接部の接合強度を高めるためには、溶接時の入熱量を高くすることで接合する幅を広くするが、溶接時の入熱が大きいと BPP には反りが発生しシー

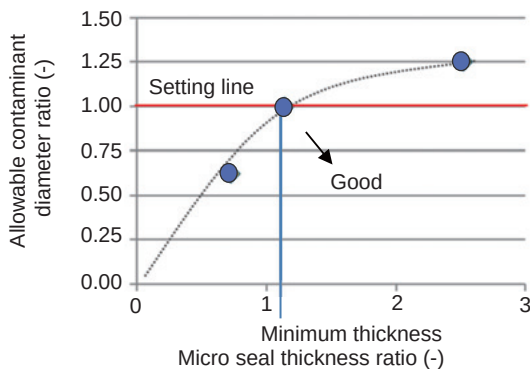


Fig. 16 Micro seal thickness setting

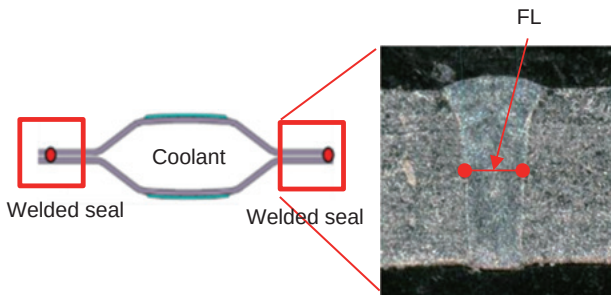


Fig. 17 FL Cross-sectional structure

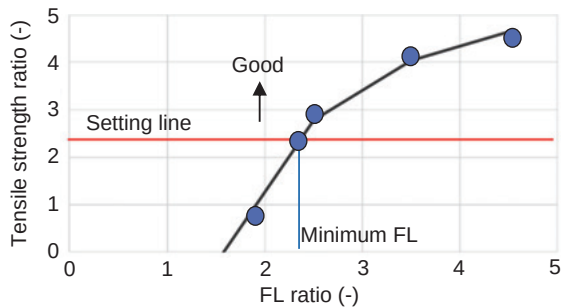


Fig. 18 FL and tensile strength

ル不良の要因となってしまう。そこで Fig. 19 に示すように、BPP が反り量を満足できるような溶接の入熱条件に設定している。また、ステンレス鋼の溶接においては鋭敏化が発生する場合がある⁽⁵⁾。鋭敏化は応力腐食割れの原因となりシール機能を保持ができなくなるため、鋭敏化が発生しないような溶接条件設定をおこなっている。

3.2. GLC コーティングによる低コスト化と耐食機能の両立

従来の BPP は、ステンレスの表面に金処理 (島状金メッキ) をおこなった後、ステンレス露出部に形成される不動態被膜によって導電性と耐食性の両立を図っていた。

一般的にステンレスを基材とする BPP は、高温高湿の酸性腐食環境下でステンレス露出部の不動態被膜の破壊により鉄イオンが溶出し、イオン交換膜の耐久性が低下してしまうことが知られている⁽⁶⁾。そのためステンレスを基材とする BPP は、耐食性能の向上が求められている。

今回開発した BPP は、前章で説明した Fig. 4 のようにステンレス基材に従来の金処理よりも安価である GLC 層と中間層としてチタン層 (Ti) をコーティングすることで、ステンレス基材の露出を抑制し導電性を確保しながら耐食性を向上させている。

また、GLC 層と中間層の Ti 層は、ステンレス基材に連続的にコーティングされており、プレス成型後に BPP をバッチ処理によりコーティングをおこなう必要が無いため、生産効率を向上させている。GLC 層と中間層の Ti 層は耐食性に優れており、GLC 層と Ti 層のコーティングをおこなうことで高温高湿の酸性腐食環境下においても、ステンレスに対して鉄イオンの溶出量を約 1/30 まで低減することができた。

一方、表面処理後にプレス成型すると、GLC 層と中間層の Ti 層にはプレス成型時の基材の伸びによるクラックや金型との擦れにより傷が発生し、Fig. 20 に示すように基材のステンレスの露出が確認された。

BPP からの鉄イオンの溶出量は基材ステンレスの露出量に依存することが分かっているため、流路断面形状の設

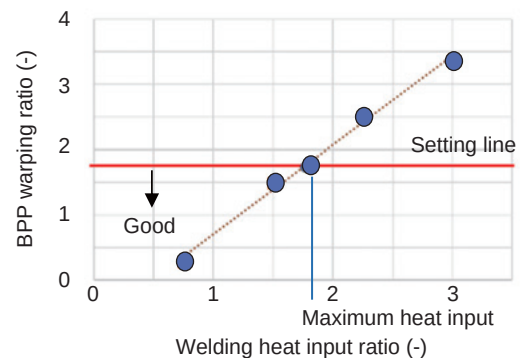


Fig. 19 BPP warpage by welding heat input

定においては、プレス成型時の基材の伸びを考慮した形状設定により基材であるステンレスの露出量の抑制が重要である。今回開発した BPP はプレス成型後のステンレス露出率を従来の BPP に対して抑制することで Fig. 21 に示すように鉄イオン溶出量を 1/10 まで低減し、コーティング処理コストを下げることもできた。

3.3. 流路、メタルビードシール部のハイサイクルプレス成型の確立

3.3.1. 樹脂成形および絶縁検査工程の廃止

従来の BPP は外周ゴム被覆構造で絶縁を確保していたが、新構造では IEC60664-1⁽⁷⁾を参考に、Fig. 22 に示すような Cell(発電部)に対して沿面、空間距離を設定した。さらに外周ゴム被覆レス構造を採用したことで、絶縁検査工程を廃止した。前モデルと比較し、ゴム使用量を 6%/Cell、樹脂使用量を 54% 削減することができた。

また、これにより樹脂成形工程と絶縁検査工程を削減することができた。

3.3.2. 生産性コンセプト

Fig. 23 に従来と新構造における生産工程の流れを示す。従来はプレス後に別工程で表面処理をおこなっていたが、新構造では、GLC 処理済コイルでプレス成型を実施することで、サイクルタイムを改善しつつ工程を短縮することができた。

MBS, 流路部のプレス工程の詳細を Fig. 24 に示す。前述の 2Hit プレス成型をおこない、品質管理のためのレーザー刻印工程や検査工程を全自動化した。

樹脂成形工程と絶縁検査工程およびレーザー刻印工程や検査工程の全自動化を実施したことで、新構造 BPP 生産のサイクルタイムは従来と比較して 1/20 に低減することができた。

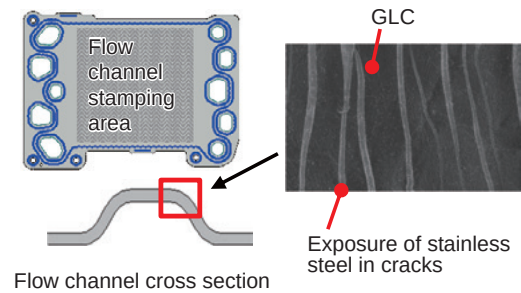


Fig. 20 Coating cracks on surface of flow channel

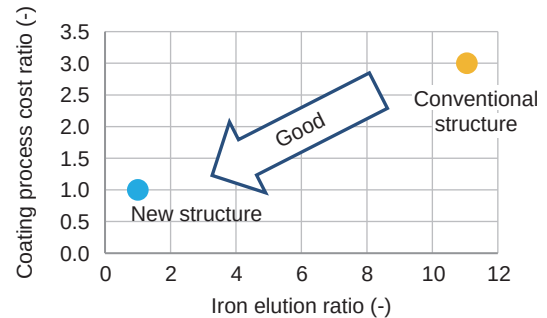


Fig. 21 Iron elution of BPP

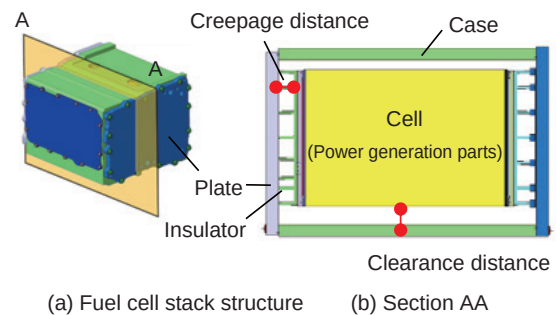


Fig. 22 Layout of creepage and clearance distances

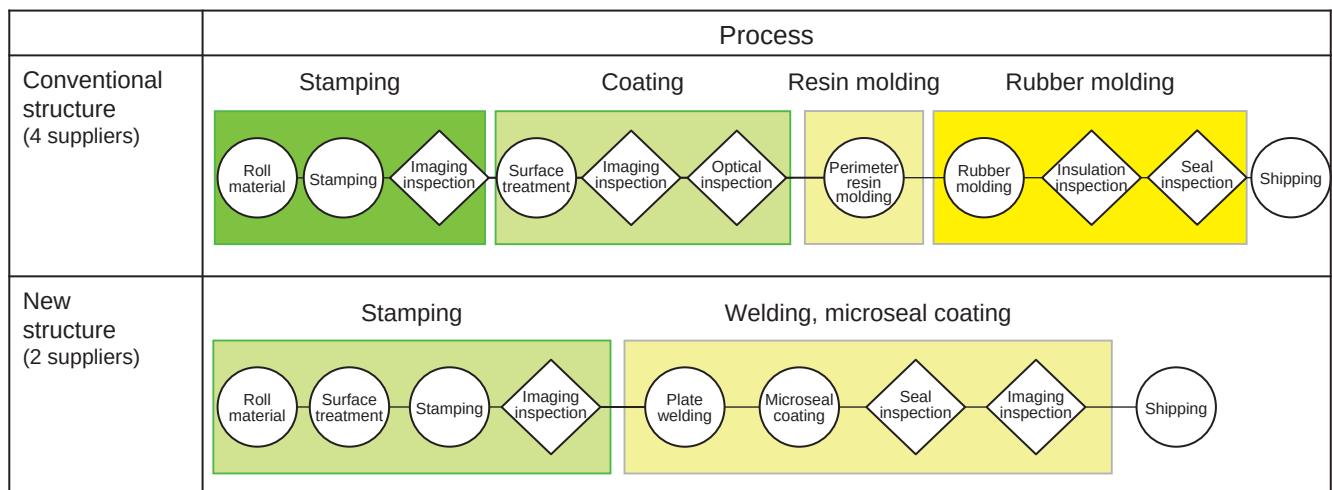


Fig. 23 Comparison of BPP processes between conventional and new structures

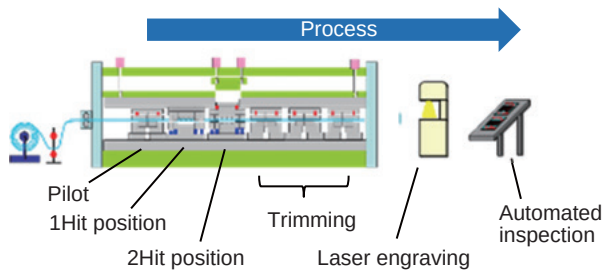


Fig. 24 Progressive stamping process flow

4. まとめ

生産性の向上および材料や機能の見直しによるシール機能と耐食性性能、およびコストの低減を両立させた新構造BPPを開発し、以下の成果を得た。

- (1) メタルビード部は面内の圧縮荷重特性を均一にするような断面形状と平面レイアウトを設計し、荷重受け構造を設けることで衝突時のシール性を向上させた。また、金属ビードとマイクロシール構造にすることで線圧低下量を低減しシール機能を保持できる構造とした。溶接シール部については、BPP 反りと鋭敏化を防止し、接合強度を確保できる溶接条件を設定した。
- (2) 2Hit 金型構造を採用し、成型時のスプリングバックを抑制し流路のうねりを改善した。同時にメタルビードシール部も 2Hit 金型構造にし、加工硬化を入れてMBS の圧縮荷重特性を向上することができた。
- (3) コイルに GLC コーティング処理を施し、プレス成型時の流路を考慮した形状およびステンレスの露出量を抑制することで、従来比にして鉄イオン溶出量を 1/10 まで低減した。
- (4) 新構造では、GLC 処理済コイルでプレス成型を実施することで、サイクルタイムを改善しつつ工程を短縮することができた。また、IEC60664-1 を参考に、Cell (発電部) に対して沿面、空間距離を設定し、外周ゴム被覆レス構造を採用した。

参考文献

- (1) <https://global.honda/jp/stories/057.html>, (参照 2024/6/12)
- (2) 松永稔, 福嶋達也, 尾島邦明, 木村顕一郎, 小川隆行: FCX クラリティ用燃料電池パワートレイン, Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.7-14
- (3) 石川暢一, 岩井田学, 内藤秀晴, 稲井滋, 吉田弘道, 室本信義: 高耐久・低コスト新構造燃料電池スタックの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 37, p. 19-25
- (4) 菊池英明, 加地勇人, 西山隆之, 小此木泰介, 原田仁:

CLARITY FUEL CELL 搭載の新型燃料電池スタックの開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 2, p. 44-51

- (5) 中澤崇徳, 鈴木俊一, 田中良彦, 小松肇: 304 系ステンレス鋼の粒界鋭敏化に及ぼす高温・動的ひずみの影響, 日本金属学会誌, 第 62 巻, 第 9 号, p. 812-819, (1998), doi: 10.2320/jinstmet1952.62.9_812
- (6) Zatoń, M., Rozière, J., Jones, D. J.: Current understanding of chemical degradation mechanisms of perfluorosulfonic acid membranes and their mitigation strategies: a review, Sustainable Energy & Fuels, Royal Society of Chemistry, Vol. 1, Issue 3, p. 409-438, (2017), doi: 10.1039/C7SE00038C
- (7) JIS C 60664-1: 低圧系統内機器の絶縁協調, (2009)

■ 著 者 ■



布川 和男



新海 洋



小山 賢



石田 堅太郎



後藤 修平