

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「産業用燃料電池スタック実現のための金型技術、プレス技術、
実装技術及びめっき技術の高度化研究開発」

成果報告書

平成22年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人長野県テクノ財団

目 次

P

第1章 研究開発概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標 1
- 1-2 研究体制 2
- 1-3 成果概要 3
- 1-4 当該プロジェクト連絡窓口 5

第2章 金型技術の高度化

- 2-1 高集積スタックのための形状流路最適設計 6
- 2-2 金型技術の高度化のためのシミュレーション支援 7
- 2-3 金型技術の高精度化 8
- 2-4 金型性能評価試験 10

第3章 実装技術の展開によるスタック技術の高度化

- 3-1 スタック技術高度化のためのシール構造設計 13
- 3-2 実装技術の展開によるシール塗布装置開発、シール材選定・実装技術確立 14

第4章 高機能めっき技術の開発

- 4-1 高機能めっき技術の開発 15

第5章 高速劣化試験方法の開発及びめっき膜高度化支援

- 5-1 結果 18
- 5-2 解析とまとめ 18

第6章 金型評価としての成形セパレータでの燃料電池性能試験

- 6-1 燃料電池スタック性能評価 19

第7章 全体総括

- 7-1 全体概要 21
- 7-2 今後の展望 22

第1章 研究開発概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標:

1) 研究の必要性、社会的背景

地球環境対策に炭酸ガス低減が重大な課題として認識され、対応技術として燃料電池が注目されている。中でも、家庭用燃料電池は、1KW級を主体に、カーボン系樹脂成形セパレータが利用され、若干市場へ出始めているが、価格は高価で、家庭用ガスエンジン発電コジェネシステムと比較し価格競争力がない状況にある。一方自動車用の燃料電池は、金属セパレータ主体に開発され、約80℃、耐久4000時間を目標に開発されつつある。リン酸塩型等、高温で大出力燃料電池も実施・検討されているが、900℃と非常に高く、プラント運転となり一般的ではない。

この中で、数kw級以上で、熱を蒸気で利用でき、最も利用可能範囲が広い産業用燃料電池分野もあるが、高温水蒸気環境と超高集積スタックがネックとなり、カーボン系セパレータが利用出来ない等、開発が進まない現状にあった。

チタン製部分ロジウムめっきプレスセパレータによれば、振動や高温環境にも耐える特性があり、初めて産業用燃料電池の開発の可能性を見通すことができる状況となった。しかし、産業用燃料電池には、例えば、300セルスタックなどでの高出力大電力・超高集積スタックの長期運転信頼性と高温運転が要求されるが、現状では、プレス加工精度や流路形状の最適化が不十分なこともあり、超高集積スタックが困難で、スタックの長期耐久信頼性が低い状況にある。

産業用燃料電池では、家庭用燃料電池の10から20倍ものスタック、300セル以上等が必要であり、現状の平坦度では、スタックごとにセパレータの誤差が増幅され、300セルスタック時点では非常に大きくなり、シールで吸収できず、スタックが困難となる。さらに、金属セパレータは脆性材料と異なり、弾性変形の問題があって金属専用のシール技術の開発も必要である。特に、セパレーター内に非加工硬化部と加工硬化部が混在する結果、スタック運転時に非加工硬化部が変形しやすく、その変形を発電運転に支障の無い範囲以内に収められるように設計において比率や形状を適正化し、より狭いピッチとしないとスタックの長期信頼性を確保できない課題があった。また、高温水蒸気環境における大電流耐食劣化促進試験が未確立であり、迅速なフィードバックも困難である。

燃料電池の運転において電気導電性や耐久性に非常に優れる部分ロジウムめっきであっても、80℃運転耐久40000時間達成には、現状約0.3μmの厚さが必要であり、セパレータ価格が1枚1000円となる課題があった。また、作業用にも利用されるであろう産業用燃料電池では、200日×8時間稼働×5年で、最低実働8000時間の耐久性が要求されている。

2) 研究の目的:

本研究開発の目的は、300セル等、高温運転で、高出力が可能な、超高集積大出力産業用燃料電池スタックの実現を目指すことであり、そのために不可欠な課題を、関連する戦略的基盤技術、金型技術、金属プレス技術、実装技術及びめっきの抜本的高度化により達成しようとするものである。

3) 研究の目標

高集積スタックのための形状流路最適設計

金属などの弾性変形材料において、プレスによる極度な変形を受けた加工硬化部分と、変形を受けずに加工硬化されていない部分が局在することが遠因となって、スタック時の圧力により局部変形が起こるが、この変形をスタックの運転に影響の少ない形状となるよう設計時点で、超高集積スタック時の変形も吸収可能で長期信頼性を発揮できる構造、流路形状等の最適化をシミュレーション支援を受けつつ図る。

金型技術の高精度化

従来の倍以上の高密度設計を反映する金型において、チタン等の難加工材に対し、最適化された構造、狭ピッチ、微細構造を正確に転写でき、かつヒビ、割れ、減肉の少ない金型技術の確立を目指す。超精密な金型精度±1μm以下表面粗さRa0.1μm以下を追及し、金型製作を行う。確立された金型に対し、成形トライ等を実施し、更に得られたセパレータの形状計測、燃料電池特性を評価し、設計の優位性を実証する。

電子部品などの実装技術の展開による積層スタック技術の高度化

金属セパレータは、金属独特の弾性変形という特性があり、これに対応できる金属専用の積層、実装技術が必要である。このために、最適なシール構造設計、材料、接着剤、均一実装、積層技術の抜本的な高度化を図る。特に、電子部品の超多層積層技術や実装技術を燃料電池スタックへ展開して、超高集積スタックの信頼性向上と実現を図るための工法の開発と実証を行う。

高機能めっき技術の確立、燃料電池の低コスト化・長寿命化の両立。

めっき厚さ0.3μmで耐久40000時間が期待でき、将来1枚あたり1000円以下とできる見通しも得られて

いるが、ロジウムは高価であり、長期耐久性を維持しつつ1/3等に薄膜化し、低コスト化を図れるために、高機能薄膜めっき技術の開発を目指す。均一薄膜めっき析出技術の確立として、パルスめっきにより安定したロジウムめっき薄膜化形製法を確立し、従来より10倍高精度な膜厚制御、1/100μmレベルでの制御を目指す。

産業用燃料電池スタック開発のための高速劣化試験方法の開発。

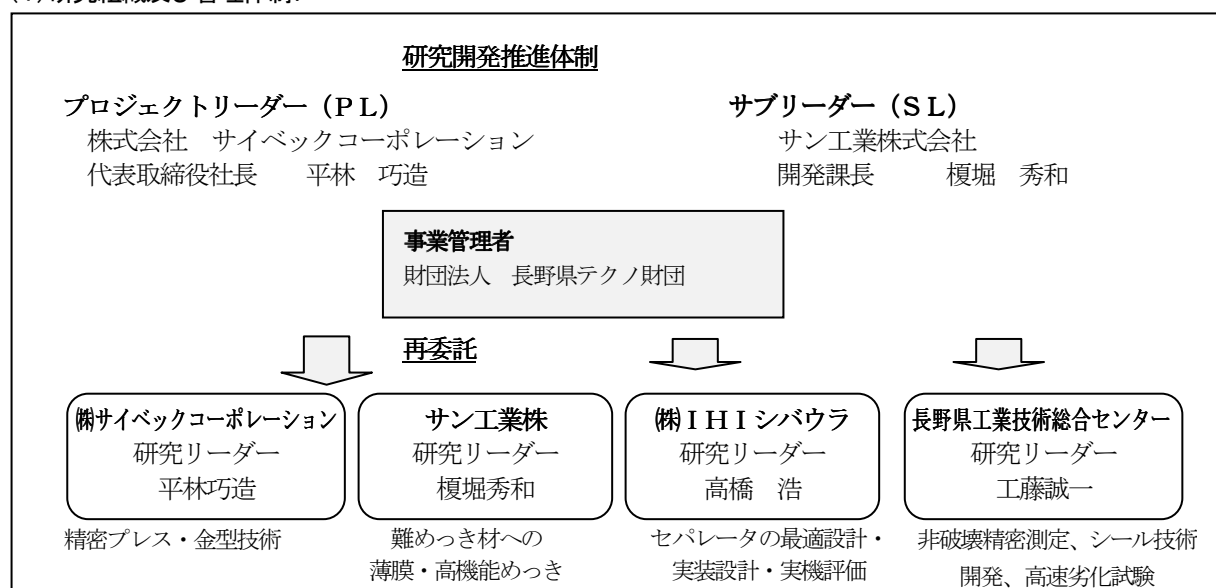
産業用燃料電池に利用される導電性めっき部分には、60A/dm²等以上の大電流密度だけでなく、100℃以上の高温水蒸気環境に耐えることが必要となり、この耐久性を評価できる高速劣化試験方法を確立する。

4) 研究の概要:

産業用燃料電池の実現には低コスト化・高温運転・超高集積スタック化が不可欠である。チタン部分めっきセパレータは高い適用可能性を持つが、超高集積スタック成立性と運転信頼性に課題がある。流路形状等構造の最適化と共に金型・金属プレス加工技術の大幅な高度化、低コスト化・高温防食薄膜導電性ロジウムめっきのためのめっき技術の高度化、更に実装技術を展開して、超高集積燃料電池スタックを実現し燃料電池、産業機械の発展に資する。

1-2. 研究体制：（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

(1) 研究組織及び管理体制:



(2) 管理員及び研究員:

【事業管理者】 財団法人 長野県テクノ財団 アルプスハイランド地域センター

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
山本 勝	事務局長	全般
須山 聡	テクノコーディネーター	管理、技術担当
牧垣あき江	経理担当	経理
丸山久友	コーディネーター	技術担当

(3) 研究者氏名・研究主担当

株式会社 サイベックコーポレーション

氏名	所属・役職	主研究実施項目 (番号)
平林 巧造	代表取締役社長	[1]
熊崎 武	執行役員	[1]
大久保 匡浩	バリューテクノロジー研究所 係長	[1]
藤澤 健	バリューテクノロジー研究所 主任	[1]

下條 由暁	バリューテクノロジー研究所 係員	[1]
大原 宏太	バリューテクノロジー研究所 係員	[1]

サン工業株式会社

氏名	所属・役職	主研究実施項目（番号）
榎堀 秀和	開発課 課長	[3]
足立 弘通	開発課 研究員	[3]

株式会社 I H I シバウラ

氏名	所属・役職	主研究実施項目（番号）
高橋 浩	技術開発センター センター長	[1]
元森 信吾	技術開発センター 開発G 課長	[1]
関口 重幸	技術開発センター 開発G 研究員	[1]

長野県工業技術総合センター

氏名	所属・役職	主研究実施項目（番号）
工藤 誠一	環境・情報技術部門 情報システム部長	[1]、[2]、[4]
北沢 俊二	環境・情報技術部門 環境技術部長	[1]
尾坂 一	環境・情報技術部門 人間生活科学部長	[1]
小林 耕治	環境・情報技術部門 情報システム部研究員	[2]
風間 武	材料技術部門 設計支援部 研究員	[1]
小杉 俊	材料技術部門 設計支援部 研究員	[1]
相澤 淳平	材料技術部門 設計支援部 研究員	[1]
畔上 達紀	材料技術部門 材料化学部 研究員	[4]
北野 哲彦	精密・電子技術部門 測定部 研究員	[1]
児野 武郎	精密・電子技術部門 測定部 技師	[1]

（４）他からの指導・協力者名 及び 指導・協力事項

なし

1-3 成果概要:

総括:

金属などの弾性変形材料においては、スタック時の圧力により局部変形が起こるが、この変形をスタックの運転に影響の少ない形状となるよう設計時点で、スタック時の変形も吸収可能で長期信頼性を発揮できる最適化を行った。2mmピッチの狭い流路設計及び構造設計を元に、金型技術の高度化を図る中で、得られたプレスセパレータは、スタック集積においても弾性変形も僅かで、塑性変形が全く見られないなど、再利用が可能な程度の変形にとどまることが確認できた。

シール材料の硬化条件の検討と共に物理特性の評価把握を行った。シール構造の最適設計、ディスペンサー装置、XYZθ4軸ロボットステージを駆使したシール断面形状の最適化、シール実装技術の確立を果たした。

均一薄膜めっき析出技術の確立のため、パルスめっきにより安定したロジウムめっき薄膜化形製法を確立し、従来より10倍高精度な膜厚制御、1/100μmレベルでの制御を目指した。その結果、薄膜めっき膜の形成が可能となった。しかし、薄膜とした時に、厚さ当たりの耐久性が急激に減少するなど膜特性の均一化、均質化が、解決すべき大きな課題として残った。

また、従来の倍以上の高密度設計、2mmピッチ流路を反映する金型において、チタン等の難加工材に対し、最適化された微細構造を正確に転写でき、ヒビ、割れ、減肉の少ない金型技術を確立し、金型精度±1μm以下、表面粗さRa0.1μm以下を満たした。セパレータは、平坦度0.15mmから0.27mmとスタック性にも比較的優れていた。

得られたセパレータを用い、20セルスタック試験を実施した結果、発電電流密度に依存する抵抗成分は、従来のチタン金属セパレータに比較して、 0.67cm^2 から、 $0.32\Omega\cdot\text{cm}^2$ と、 $1/2$ 以下に低減した。更に $0.1\text{A}/\text{cm}^2$ 運転では、セル間の電圧ばらつき、フラットニングもほとんど観察されず、発電電圧も 0.8V と高い等、非常に優れた発電運転が可能であった。

更に、 800W での燃料電池発電運転を実証できた。 $0.5\text{A}/\text{cm}^2$ の発電で、発電電圧 0.7V と、従来のチタンセパレータの $0.3\text{A}/\text{cm}^2$ レベルでの発電運転と同程度の電圧を得られるだけでなく、20セル間の発電電圧のばらつきは $\pm 3\%$ 程度と非常に優れた結果が得られた。更に短時間であり、水素の利用効率の問題は残るが、出力 1000W 以上の非常に高電流密度下での発電運転も可能であった。

残された課題は、ガスが消費されることで排出側での冷却水排圧とガス排圧の差が大きくなることに依存する、冷却水のガス側へのリーク等の抜本的な解決、更に200セルスタック等高集積スタックされた場合の誤差の増幅を解消するためのセパレータ平坦度の抜本的な改善とプレス技術の高度化、更には、セパレータの低コスト化、特に、薄膜化した場合のめっき厚さ当たりの耐久性の向上、緻密性・均一性の向上による高集積スタック技術の確立である。また、金属素材の更なる検討も課題として残った。

[1] 金型技術の高度化 (研究実施番号①)

長期信頼性維持のためのセパレータ構造、流路形状等の最適化に係る金型技術の高度化

[1-1] 高集積スタックのための形状流路最適設計 (研究実施番号①-1)

金属などの弾性変形材料において、プレスによる極度な変形を受けた加工硬化部分と、変形を受けずに加工硬化されていない部分が局在することが遠因となって、スタック時の圧力により局部変形が起こるが、この変形をスタックの運転に影響の少ない形状となるよう設計時点で、超高集積スタック時の変形も吸収可能で長期信頼性を発揮できる構造、流路形状等の最適化を行った。その結果得られたセパレータは、スタック集積においても塑性変形が全く見られず、スタックを分解した際にも、再利用が可能な程度の変形にとどまることが確認できた。

[1-2] 金型技術の高度化のためのシミュレーション支援 (研究実施番号①-2)

スタック性を阻害している各種要因、課題を踏まえつつ、打破するための最適な構造、形状を長野県工業技術総合センターにおける金型設計シミュレーション技術を活用し、試作トライの大幅な低減を図りつつ、開発の迅速化を目指した。また、非接触非破壊での高度な計測技術によるプレス品の形状評価をととして金型の検証支援を行った。

[1-3] 金型技術の高精度化 (研究実施番号①-3)

従来の倍以上の高密度設計、 2mm ピッチ流路を反映する金型において、チタン等の難加工材に対し、最適化された微細構造を正確に転写でき、かつヒビ、割れ、減肉の少ない金型技術の確立を目指し、金型精度 $\pm 1\mu\text{m}$ 以下、表面粗さ $Ra 0.1\mu\text{m}$ 以下を満たし、平坦度も 0.15mm から 0.27mm とスタック性にも優れるセパレータを得た。

[1-4] 金型特性評価試験 (研究実施番号①-4)

確立された金型に対し、成形トライ等を実施して、得られたセパレータの形状、板厚、平坦度を計測評価し、目標の形状・寸法特性であることを確認した。ただし平坦度は、 0.15mm から 0.28mm に留まり、高集積スタックでのプレス技術の高度化で解決すべき課題として残った。

[2] 電子部品などの実装技術の展開によるシール技術、積層技術の高度化 (研究実施番号②)

金属セパレータは、振動に非常に強い反面、金属独特の弾性変形があり、これに対応できる金属専用のシール構造、積層、実装技術が必要とされている。このために、シール構造、方法の設計、材料・接着剤選択、均一実装、積層技術の抜本的な高度化が必要であり、特に電子部品の超多層積層技術や実装技術を燃料電池スタックへ展開して、超高集積スタックの信頼性向上と実現を図るための工法の開発と実証を行った。

シール材料の硬化条件の検討と共に物理特性の評価把握を行った。特に、シール構造の最適設計、更には、ディスペンサー装置、XYZ θ 4軸ロボットステージを駆使したシール断面形状の最適化、シール実装技術の確立を果たした。また、シールシミュレーション支援により、スタック時のガスリークをほぼ解消でき、20セルスタック燃料電池の運転実証にも成功した。しかし、冷却水の微小なリークがガス側に対して発生し、高集積大出力スタックの実現には、更なるシール技術の高度化が課題として残った。

[3] 薄膜めっき技術の確立 (研究実施番号③)

燃料電池の低コスト化・長寿命化の両立。

開発したチタン部分ロジウムめっきプレスセパレータによれば、めっき厚さ $0.3\mu\text{m}$ で耐久 40000 時間が期待でき、将来1枚あたり 1000 円以下とできる見通しも得られている。しかし、ロジウムは高価であり、長期耐久性を維持しつつ $1/3$ 等に薄膜化し、低コスト化を図れる高機能薄膜めっき技術の開発を目指した。均一薄膜めっき析出技術の確立として、パルスめっきにより安定したロジウムめっき薄膜化形成法を確立し、従来より 10 倍高精度な膜厚制御、 $1/100\mu\text{m}$ レベルでの制御を目指した。その結果、安定して、薄膜めっき膜の形成が可能となった。しかし、薄膜とした時に、厚さ当たりの耐久性が急激に減少するなど、膜特性の均一化、均質化が、解決すべき大きな課題として残った。

[4] 産業用燃料電池スタック開発のための高速劣化試験方法の開発。 (研究実施番号④)

産業用燃料電池に利用される導電性めっき部分には、60A/dm² 等以上の大電流密度だけでなく、100℃以上の高温水蒸気環境に耐えることが必要となる。従来技術を用いつつ、電解質の工夫により、耐久性を評価できる高速劣化試験方法を確立できた。次年度からは、得られた高温高速劣化試験法を用いて薄膜めっき膜の更なる高度化、緻密化、均一化、耐久性向上のための技術開発支援を行っていく。

〔5〕 チタンロジウムめっきセパレータの評価

(研究実施番号①ー4)

〔5ー1〕 2セルでの評価

低温型 MEA では、電流密度 0.3A/cm² までの負荷に対して発電電圧は約 0.74V と良好な結果となっている。

高温型 MEA は、低温型 MEA に比較し電圧の振れは無くほぼフラットであった。運転温度が 160℃のため発電による生成水は、スチームとなって排出されるため、フラッドイングの発生がまったく無いためである。しかし、発電電圧は、低温型 MEA に対し約 1 割以上低い結果であったが、メーカーデータとは大差なく、非常の良好な結果が得られた。

本金属セパレータによる低温型 MEA、高温型 MEA を使用した 2 セルスタックは、燃料電池として実用上問題ないレベルであった。

〔5ー2〕 20セルスタック燃料電池発電試験

20セルスタックにおいて、リーク試験及び発電試験を実施後、発電試験を実施した。その結果、発電電流密度に依存する抵抗成分は、従来のチタン金属セパレータに比較して、0.67Ωcm² から、0.32Ωcm² と、1/2 以下に低減した。

0.1~0.3A/cm² 運転では、20セル間の電圧ばらつきもフラッドイングもほとんど観察されず、発電電圧も高い等、非常に優れた発電運転が可能となった。

更に、800W 運転時の発電電圧は、0.7V と、従来のチタンセパレータの 0.3A/cm² レベルでの発電運転と同程度の電圧を得られるだけでなく、この大電流密度においても発電電圧のばらつきは±3%程度と、高電流密度下での発電運転が可能であった。更にガス利用率を下げた運転では、1000W を超える出力を実証した。

*残された課題

燃料電池でガスが消費されることに依存する、排出側での冷却水排圧とガス排圧の差が大きくなるため、排出側で冷却水がガス側へリークする問題の抜本的な解決。

200セルスタック等高集積スタックされた場合のセパレータ平坦度の寸法誤差の増幅を解消するためのセパレータの平坦度の抜本的な向上等を目指したプレス技術の更なる高度化。

セパレータの低コスト化、特に薄膜化した場合のめっき厚さ当たりの耐久性の抜本的な向上、緻密性・均一性の向上。

開発されたシール技術を十分応用しつつ、長期信頼性のある 200セルスタック等高出力産業用燃料電池を実現するための高集積スタック技術の確立。

また、金属素材の更なる検討も課題として残った。

1ー4 当該プロジェクト連絡窓口:

管理団体 : 財団法人 長野県テクノ財団 (アルプスハイランド地域センター)
担当 : 山本勝 (全般管理)、須山聡 (技術担当)、丸山久友
住所 : 松本市島立1020 松本合同庁舎内
電話 : 0263-40-1780、ファックス: 0263-47-8904

第2章 金型技術の高度化

目的

金属材料を用いた燃料電池用セパレータをプレスにより成形した際、金属などの弾性変形材料においては、プレスによる極度な変形を受けた加工硬化部分と、変形を受けずに加工硬化されていない部分が局在することが遠因となり、スタック時の圧力により局部変形が起こるが、この変形をスタックの運転に影響の少ない形状となるよう、設計時点で超高集積スタック時の変形も吸収可能で長期信頼性を発揮できる構造、流路形状等の最適化を行う。

2-1 高集積スタックのための形状流路最適設計

産業用燃料電池用セパレータとして使用するための最適なセパレータ設計を行う。セパレータに要求される仕様は以下の通りとする。

- | | |
|---------|-------------------------------|
| ①スタック出力 | : 5 kW |
| ②単セル出力 | : 0.7 V 以上@定格発電時 |
| ③反応面積 | : 120 cm ² |
| ④ガス利用率 | : Anode 70 % / Cathode : 45 % |
| ⑤耐久性 | : 40,000 時間 |

各セパレータ形状外観のイメージを図2-1、図2-2に示す。

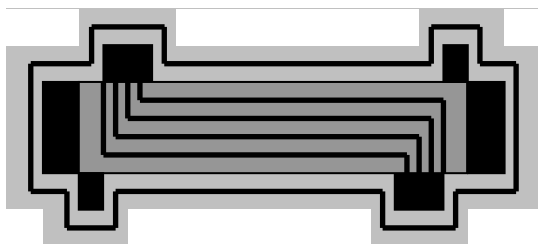


図2-1. アノードセパレータ外観イメージ

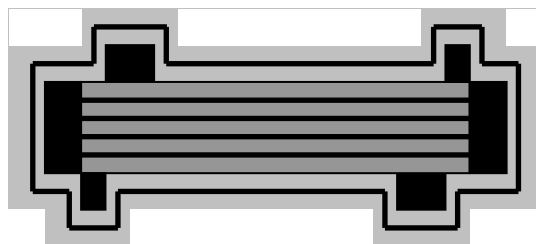


図2-2. カソードセパレータ外観イメージ

2-2 金型技術の高度化のためのシミュレーション支援

2-2-1 目的

薄板金属のプレス成形加工では、成形によって変形した部分と変形の影響を受けなかった部分で、加工硬化による成形面内の強度のばらつきが発生することが考えられる。また、プレス成形で形成された部分についても流路形状に成形された部分では、形状がもつ剛性の違いによって強度に差が見られることになる。この強度の違いは、外部圧力によって多層にスタックされ締め付けられる金属セパレータの面内変形を生じさせることとなり、燃料電池としての運転性能の低下・長寿命化に影響を及ぼすことになる。そこで、適切な流路ピッチの管理をし、最適なセパレータ形状の設計に役立てるために、数値シミュレーションによる強度解析を実施し、それぞれの形状がスタック締め付け時の外部圧力によって受ける影響について調べた。

2-2-2 流路部分の解析モデル

図2-2-1に流路部分の解析モデルを、図2-2-2に今回の解析で使用した応力-歪み曲線(K社製 TR270C を想定)を示す。解析モデルについては、成形される断面形状として奥行き方向が十分に厚いことから2次元平面歪みの問題として考え、初期の流路深さ 0.45mm に対して板厚方向に押し込むための荷重を算出することで評価することとした。

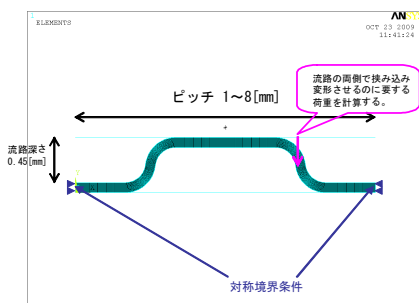


図2-2-1 解析モデル (流路: 条件1)

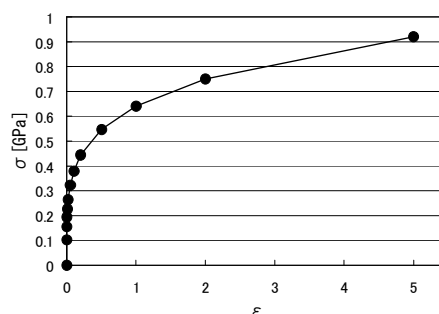


図2-2-2 応力-歪み曲線

2-2-3 解析結果

図2-2-3に流路部分における解析結果を示す。X軸(横軸)は初期の流路深さからの押し込み量を、Y軸(縦軸)は単位面積あたりの押し込み荷重(圧力)を示している。解析結果から、流路ピッチが広くなるに従って板厚方向の押し込み荷重(スタック締め付け荷重)による変形剛性が低くなっていることが分かる。これは、流路部分にスタックの締め付け荷重がかかった場合、流路壁として立ち上がった部分よりも剛性が低いフラットな部分が変形することとなり、ピッチ幅が広いほどフラット部分の剛性も低いいため変形荷重も低く現れたことと考えられる。

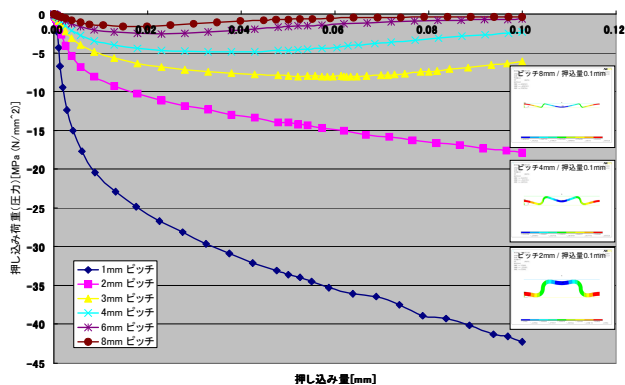


図2-2-3 解析結果

2-2-4 考察

高集積スタックの産業用燃料電池の開発を目的とした金属セパレータの設計を行うにあたり、流路形状の剛性の違いを明確にするため、スタックの締め付け荷重がかかった場合を想定した強度解析を行った。解析によって得られた結果から、当初の予想通り流路ピッチを狭くすることによって板厚方向の剛性が高くなることを確認することができたが、ピッチ幅を狭くすることはプレス加工を行う上で非常に困難であり、また今回の金属セパレータの材料として使用しているチタン材が難加工材であるため割れなどの不具合が存在しないようする必要があることから、実際の加工実験の結果をフィードバックしながら設計を行うことが重要である。

また、同じピッチ幅で同じ押し込み量であっても流路の中央部分と端部分では剛性が異なるなど、セパレータ形状の設計だけでは対策が困難な部分については、シール構造などの別のアプローチによる検討も必要となると考えられる。

2-3 金型技術の高精度化

2-3-1 製品形状検討

本研究では、高集積スタックの燃料電池を目指すため、高さのバラつきが大きいことや平坦度が悪いことはスタックしていく上で障害になる。また、スタックされ上下から締付けの圧力がかかった場合に、流路の加工されていない部分で変形が生じて運転特性が低下する現象があり、これを解決するために流路のピッチを狭くする必要がある。これらを踏まえた上で、本研究におけるセパレータに要求される精度は以下の通りである。

- ① 流路高さ精度 $\pm 0.01\text{mm}$
- ② 流路平坦度 0.05mm 以下
- ③ 流路ピッチ 2mm

本研究のセパレータにおいては、流路ピッチが従来技術によるセパレータ¹⁾の 3.6mm から 2mm へとかなり狭くなっている。ピッチが狭くなるということは加工としてはかなり厳しいものとなるため、割れ等が発生しないような工程設定と金型精度が重要となってくる。

2-3-2 工法と金型の検討

狭いピッチで形成された流路のセパレータを割れ等の不具合を生じないように、なおかつ前項に示したような精度でプレス加工するために、工程設定と金型精度が重要となってくる。工程設定では複数回の成型を行うことにより割れ等の不具合の無い精度の良いセパレータ成型を目指した。一方、金型の精度としては、特に成型の金型の精度がセパレータの精度に大きく影響するため、流路部品の精度として高さ精度 $\pm 1\mu\text{m}$ 以内、面粗度 $Ra0.1\mu\text{m}$ 以下を目指して加工を行い、さらに金型の剛性を上げることによって部品の精度が転写されやすい金型構造とした。

2-3-3 金型



図 2-3-1 主要な金型

図 2-3-1 に代表的な金型の写真を示す。

流路部部品の精度としては、目標精度である $\pm 1\mu\text{m}$ を達成できた。

図 2-3-2 に代表的な部品の面粗度の測定結果を示す。面粗度も $Ra0.1\mu\text{m}$ 以下を達成できた。

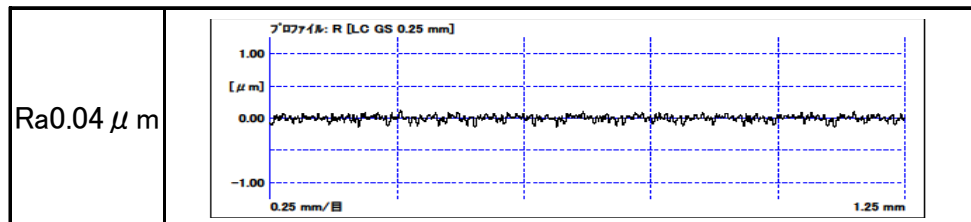


図 2-3-2 主要な金型の面粗度

2-3-4 プレス成型結果と課題

プレス成形トライを行い以下のような結果が得られた。

項目	要求精度	実績値	
流路高さ	0.55±0.01mm	アノード	0.543～0.550
		カソード	0.546～0.555
外周リブ高さ	0.45±0.01mm	アノード	0.444～0.452
		カソード	0.441～0.453
平坦度	0.05mm以下	アノード	0.76
		カソード	0.4
割れ、ダレ、バリ	無き事	アノード	○
		カソード	○

表 2-3-3 本研究における実績

本研究では、狭いピッチのセパレータに対して、高さは公差を満足し、割れ等の不具合も発生しなかった。しかし、上の表を見てもわかるように、平坦度が目標値を大きく上回る結果となってしまった。流路の中央部付近に大きな反りがでてしまったため、次年度以降この反りを改善して高集積スタックを目指す。

参考文献 1) H18-20 戦略的基盤技術高度化研究開発成果報告書【家庭用燃料電池の低コスト、長寿命化のための金型技術、プレス技術、めっき技術の高度化研究開発】

2-4 金型性能評価試験

2-4-1 セパレータの平坦度評価

(1) 目的

本研究で製作したサンプルを対象に、エッチング処理と熱処理の効果を評価することを目的に、実際の製品の使用状態を考慮しての測定を行い、平坦度による評価を行った。

(2) 方法

薄板を成形したセパレータの形状測定においては、接触式測定機は接触圧で試料が変形するため使用できない。またセパレータ全面に荷重する条件では、試料に接触できないことから、やはり接触式測定機による測定は不可能である。このため測定方法として、同様の条件でセパレータの測定を行った工藤ら¹⁾によるレーザ変位計を用いる方法を採用した。

測定対象としたサンプルと処理条件の組み合わせを表2-4-1-1に示す。エッチング、熱処理の効果については、未処理（プレスのみ）の状態での平坦度の大きいカソード側により評価した。

表2-4-1-1 測定対象サンプル

処理条件	アノード側	カソード側
未処理	①	②
エッチング	—	③
エッチング+熱処理	—	④

上記4種のサンプルについて、それぞれ荷重状態と荷重しない（フリー）状態で測定を行った。測定点は、変形の影響を受けやすいセパレータ周縁部の14点と、隣接セルと接触し、高い密着性が要求される内側の凸形状部の9点の計23点とした。

平坦度の定義は、テーブル面を基準面とした高さ方向の差によるものとした。荷重状態における平坦度は、全面23点、あるいは内側9点の測定点の最大高さと最小高さの差により定義した。一方、フリー状態の平坦度は、全体的な反りの大きさを評価する観点から、テーブル上に置いたセパレータ表面の最も高い点と最も低い点の高さの差により定義した。図2-4-1-1に定義の模式図を示す。

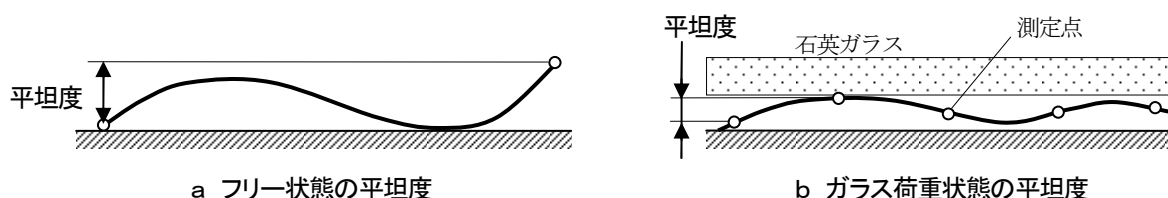


図2-4-1-1 平坦度の定義

(3) 結果

各条件での平坦度測定結果を表2-4-1-2に示す。未処理のアノード側（①）とカソード側（②）を比較すると、いずれの状態でもカソード側の方が平坦度が大きかった。処理条件間の平坦度を比較すると、エッチング処理を施した2例（③、④）では未処理のもの（②）に対し、荷重状態において平坦度が小さくなった。エッチング処理後の熱処理の効果については③、④の間で明らかな違いはみられなかった。

表2-4-1-2 平坦度測定結果

単位:mm

	形状	処理条件	フリー状態	荷重状態
①	アノード側	未処理	6.65	0.40
②	カソード側	未処理	9.14	0.76
③		エッチング	11.29	0.15
④		エッチング+熱処理	8.83	0.27

(4) 考察

本研究での目標値である平坦度0.05mmに対し、試作サンプルは3～6倍程度の大きさを持っている。未処理品に対し、エッチング処理品では平坦度が20%～44%と大幅に小さくなることから、エッチング処理により組立後の平坦度が改善していると考えられる。

2-4-2 セパレータの形状評価

(1) 目的

燃料電池はセパレータ、イオン交換膜を積層してセルスタックを形成することで作られている。セパレータには冷却水及びガスが通る細かい流路が形作られているため、僅かな流路のゆがみやセパレータの形状の狂いが燃料電池スタック全体の性能や耐久性に影響を及ぼす。特に今回開発する産業用燃料電池は、300セルスタック以上を目標にしているため、僅かな形状誤差も蓄積され大きな影響を与える可能性がある。また、プレス品質向上、精度維持のためにも、この計測が非常に重要である。今回の研究で主体となる細かい流路が複雑に交差・連続するような形状がプレスによって確実に成形されているか確認するため、形状測定機を用いてその形状を評価した。

(2) 方法

非接触でセパレータ表面の形状を測定する必要があるため、従来技術の測定方法であるレーザを用いた非接触三次元測定機を用いた。測定する位置はカソード1箇所とアノード3箇所（①流路入口付近、②出口付近、③流路中央付近）とし、測定箇所を図2-4-2-1～4に示す。

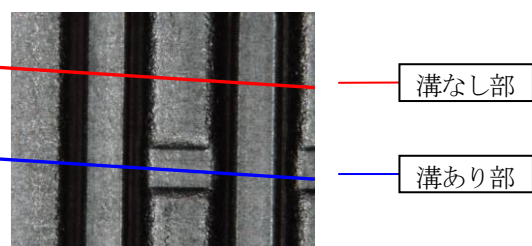


図2-4-2-1 カソード測定箇所



図2-4-2-2 アノード測定箇所①流路入口付近

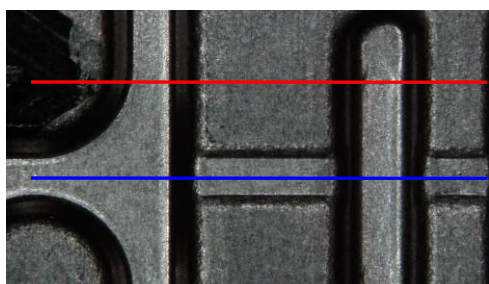


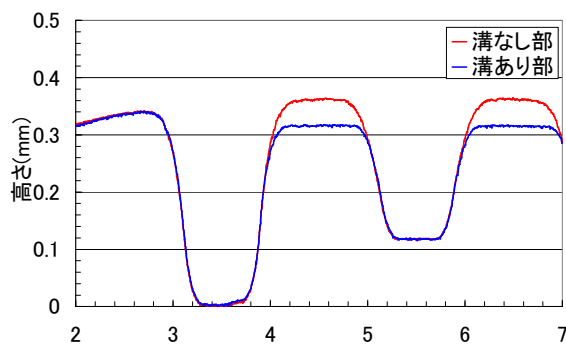
図2-4-2-3 アノード測定箇所②流路出口付近



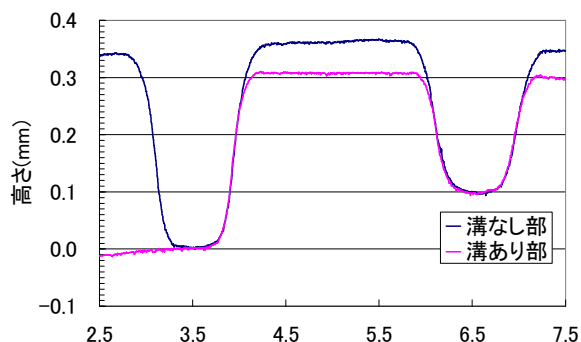
図2-4-2-4 アノード測定箇所③流路中央付近

(4) 結果

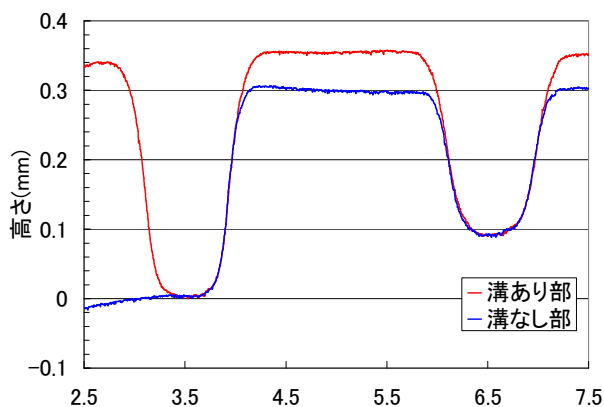
実際にセパレータの測定を行った結果を、図2-4-5 (a)～(d)に示す。測定はセパレータ流路部を5 μ mピッチで行った。



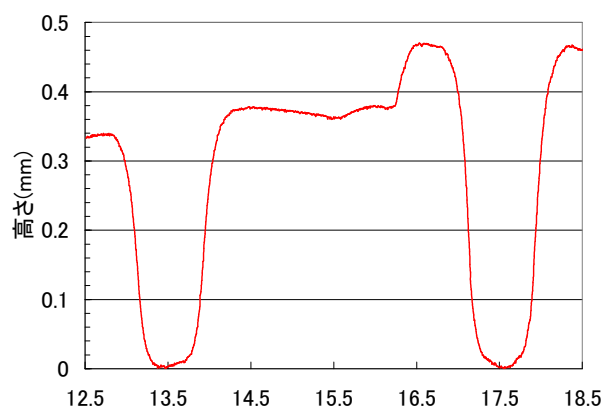
(a) カソード



(b) アノード測定箇所①流路入口付近



(c) アノード測定箇所②流路出口付近



(d) アノード測定箇所③流路中央付近

図2-4-2-5 流路形状カソード

以上より、カソードおよびアノードでの溝ある部の深さが0.05mm程度になっていることが分かった。また、周囲の溝部と流路深さの差が図2-4-2-5(a)～(c)で0.1mm程度になっていることがわかった。どちらも設計値に近い値となっている。

(5) 考察と課題

今回、非接触三次元測定機を用いてセパレータがプレスによって設計どおりの形状になっているかを形状の複雑な部分について確認した。非接触三次元測定機を用いることで、セパレータの形状データを得ることが可能となった。また、複雑な流路形状についてもほぼ設計どおりにプレス加工できていることがわかった。

しかし、今回のセパレータは流路が細かく、流路の種類によって深さが異なるなど、測定時の保持方法が問題となった。今回は、ごく一部の流路の測定であったため、測定結果に影響はでていないが、今後、セパレータ全面や流路全体にわたる広範囲な測定が必要になった場合、セパレータの加工による変形を考慮した測定をしなければならず、試料の保持方法や測定手法を開発しなければならない可能性がある。

参考文献

(1)「燃料電池セパレータの長寿命化、低コスト化に向けた金型技術、金属プレス技術、めっき技術の高度化研究開発」成果報告書、財団法人長野県テクノ財団

第3章 実装技術の展開によるスタック技術の高度化

目的

金属セパレータは、振動に非常に強い反面、金属独特の弾性変形という特性があり、これに対応できる金属専用の積層、実装技術が必要とされている。このためには、シール材料、接着剤、均一実装、積層技術の抜本的な高度化が必要であり、特に電子部品の超多層積層技術や実装技術を燃料電池スタックへ展開して、超高集積スタックの信頼性向上と実現を図るための工法の開発と実証を行う。

3-1 スタック技術高度化のためのシール構造設計

燃料電池用セパレータのガスおよび冷却水のシールは、従来のカーボン系のセパレータを用いた場合、溝に隣接する平坦な面に対してシールを施工するか、セパレータにシール溝を刻みＯリングなどのガスケットを挟み込むシール構造が取られている。しかし、今回開発した金属セパレータの場合シール溝が設けられており、このシール溝は幅が約 1mm と細く、シール溝内部に均一なシールを施工するのが非常に困難である。そこで、セパレータに対して直接シールを施工せずに別プレートにシールを施工し、そのプレートをセパレータで挟みシールする構造を採用した。

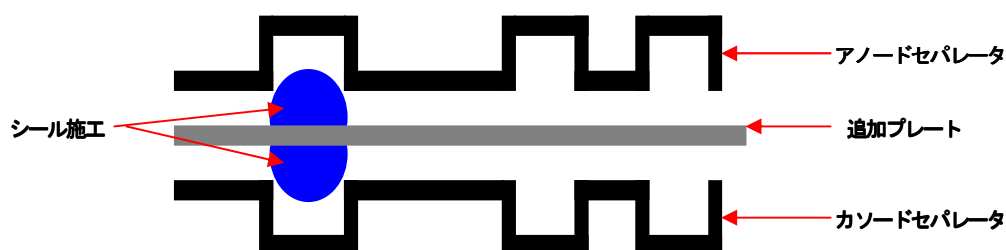


図3-1. シール構造イメージ

3-2 実装技術の展開によるシール塗布装置開発、シール材選定・実装技術確立

3-2-1 シール塗布装置の開発

燃料電池内部には、水素ガス、空気、冷却水が流れる。こうした流体のシール材を自動的に塗布するシール塗布装置を開発した。ディスペンサを図3-2-1のXYZθロボットステージに搭載した。ディスペンサおよびXYZθステージはCADデータを基に動作し、高精度にシール材を塗布する。

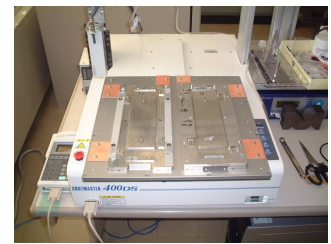
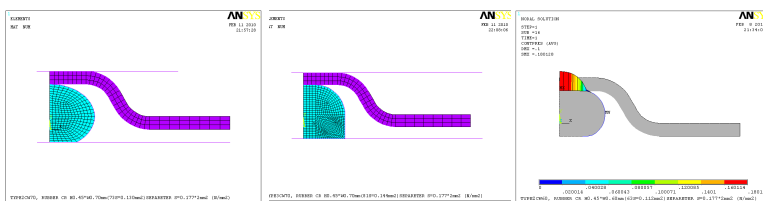


図3-2-1 XYZθロボットステージ

3-2-2 シール材選定・シール断面の検討

シール材として、燃料電池用途を想定して開発されたスリーボンド工業のオレフィン系シール材を選定した。このシール材の特性を各種試験から得て、シール材の断面形状の違いによるシール性の違いを汎用有限要素法のANSYSで解析した。シール高さは、設計により決定された0.45mmとなる。設計解析に用いたシール断面および解析結果の一例を図3-2-2-1に示す。



【楕円形モデル】 【かまぼこ形モデル】 【解析結果例 シール接触圧力】
図3-2-2-1 モデル形状と解析結果例

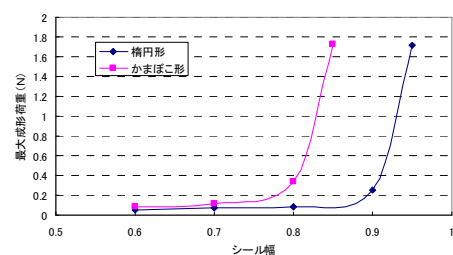


図3-2-2-2 シール幅ー接触反力線図

シール幅は、塗布環境により多少の変化が起こり得る。従ってシール幅の変化に対して、最大接触反力が大きく変化しない条件が必要となる。図3-2-2-2から、この条件を満たすシール幅として、 $0.7\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ を目標とした。

3-2-3 シール材塗布技術

適切なシール塗布のためにはシール材を加熱し粘度を下げる必要があった。

塗布に必要なパラメータは加熱温度、塗布速度、ノズル種類、ノズルとワークとのクリアランス、ディスペンサ圧力であった。

ノズル種類はジグとの横方向のクリアランスで、1種類に決まるため、その他の条件を実験等により最適化した。

通常の操作では、図3-2-3-1や図3-2-3-3に示すような不良となるため、ノズルの上下動作や軌跡の制御等、加熱温度、塗布速度、ノズル種類、ノズルとワークとのクリアランス、ディスペンサ圧力等を最適化することで、図3-2-3-2や図3-2-3-4に示すように、本研究の燃料電池でのスタックシールに要求されるシール材の形状と精度等を満たせる実装技術を確立し、その十分な性能を確認した。



図3-2-3-1 串刃形状 (不良)



図3-2-3-2 串刃形状 (改良後)

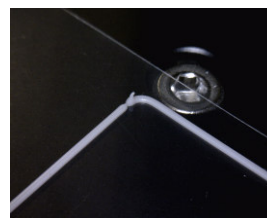


図3-2-3-3 糸引き (不良)



図3-2-3-4 糸引き解消 (改良後)

第4章 高機能めっき技術の開発

4-1 高機能めっき技術の開発

4-1-1 従来技術と高度化目標の設定

セパレータにおける表面処理での耐久性は、めっき層の厚みが影響していると考えられるが、これは、めっき結晶粒子の結合力と相関があると考えられる。したがって、薄いめっき膜厚であっても、結晶粒子が微細化し、緻密な構造を持つ皮膜であれば、耐久性を向上させられる可能性がある。また、めっきは電流密度分布、めっき時間などによって、必要めっき膜厚よりも厚くなってしまいう部分及びロットが存在してしまう。よって、本研究の目的として、めっき結晶粒子の微細化、緻密化を行い、従来の $0.3\sim 0.4\mu\text{m}$ のめっき膜厚を $1/3$ 以下にするとともに、従来より10倍高精度な膜厚制御技術、 $1/100\mu\text{m}$ レベルでの制御を目指す。

本研究では、チタン材へのロジウムめっきにパルス電源を応用し、結晶粒の緻密化及び微細化を図り、めっき膜厚の薄膜化を行う。また、めっき液の低濃度化研究によって、持ち出しロスを低減し、低コスト化に寄与するとともに、さらなる微細化、緻密化、均一化を図る。前処理については、従来の高温濃硫酸によるめっき法の低温化、別法による前処理も検討し、薄膜化について研究を実施する。

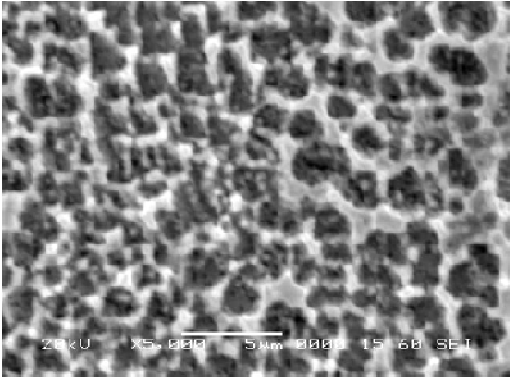
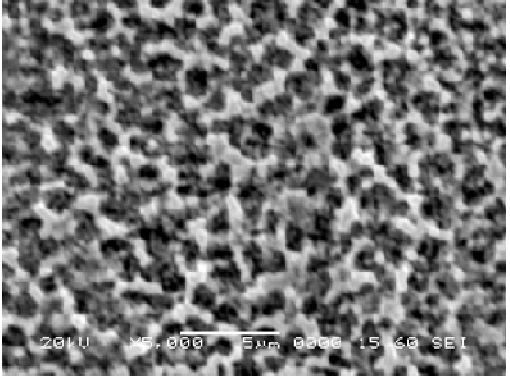
4-1-2 研究実施内容

4-1-2-1 めっき電流によるめっき析出状態確認

直流法とパルス法、エッチング時間によって、チタン上のロジウムめっき析出状態がどのように変化するかを試験した。前処理のエッチングは以下の条件で実施した。テストピースサイズは $50\times 50\text{mm}$ を使用した。

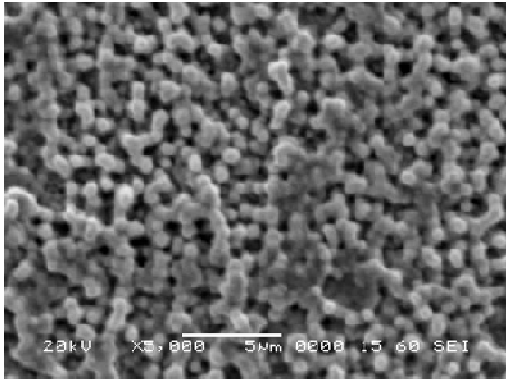
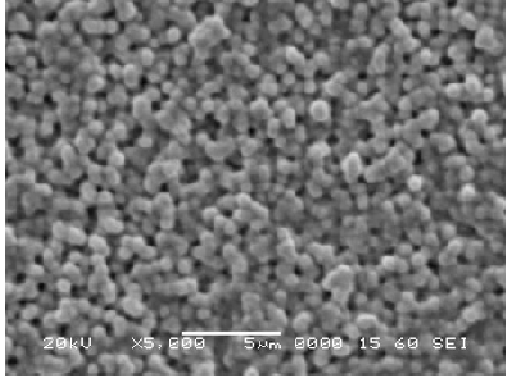
サンプル表面の電子顕微鏡観察結果を以下に示す。

図4-1-1 めっき電流による析出状態

電流条件	電子顕微鏡 (5000 倍)	粗さ、膜厚
直流めっき 前処理エッチング 40 秒		Ra : $0.21\mu\text{m}$ Rz : $1.20\mu\text{m}$ 膜厚 : $0.42\mu\text{m}$
パルスめっき 前処理エッチング 40 秒		Ra : $0.28\mu\text{m}$ Rz : $1.40\mu\text{m}$ 膜厚 : $0.41\mu\text{m}$

本結果から、同一45アンペア秒でめっきした場合、直流法よりも、パルスめっきを用いた方がより細かい結晶粒子になっていることが判明した。

図4-1-2 エッチング時間によるめっき析出状態

電流条件	電子顕微鏡 (5000 倍)	粗さ、膜厚
直流 : 90 アンペア秒 前処理エッチング 40 秒		Ra 0.30 Rz 1.4 膜厚 0.61 μm
直流 : 90 アンペア秒 前処理エッチング 20 秒		Ra 0.21 Rz 2.3 膜厚 0.61 μm

前処理のエッチングがめっきの析出状態に対する影響についてトライした結果、エッチング時間が短いほどめっきの析出粒度は小さくなることが判明した。しかし、エッチング時間が短いと、めっき皮膜が平滑になるものの、密着がやや弱い結果となった。

4-1-3 実機セパレータめっき方法と研究結果

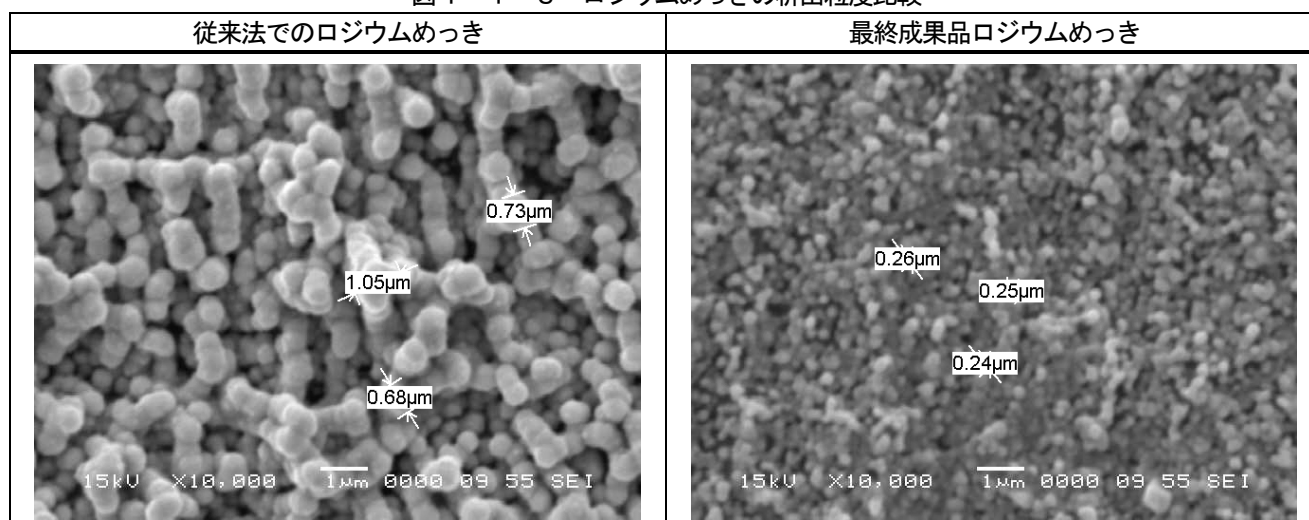
H21 年度実機プレスセパレータについては、以下の仕様をもとにめっき方法を研究した。

表4-1-1 実機セパレータ検討結果

実験No.	めっき条件	濃度	エッチング	薄膜化	均一性
①	直流電流DC16A 10秒⇒DC4A 70秒	高濃度浴	高温 40秒	×	×
②	パルスめっき 電流20A×20秒	高濃度浴	高温 40秒	×	○
③	パルスめっき 電流20A×32秒	低濃度浴	高温 40秒	×	×
④	パルスめっき 電流2A×300秒	低濃度浴	低温 35秒	×	○
⑤	DCパルス複合めっき 92秒	低濃度浴	低温 35秒	○	○

以上の結果、ロジウムめっき液成分及びエッチングを最適化し、直流パルス複合めっきによって、チタン材プレスセパレータに対して、薄い膜厚でも、比較的均一で微細なロジウムめっきを実施することが可能となった。

図 4-1-3 ロジウムめっきの析出粒度比較



本研究にて開発しためっき方法を用い、産業用高出力チタン製セパレータに対して、ロジウムめっき処理を実施した結果、従来法に較べてめっき結晶粒の微細化と平滑化が可能になった。平滑化においては、めっき液とパルス法の相乗作用であると考ええる。また、微細化と平滑化が可能となったことで、薄膜化についても実施可能となった。薄膜化については、2段階ステップを踏むめっき電流条件で実施できた。目標に対する達成度については、以下にまとめる。

表 4-1-2 高度化目標と達成計画

高度化研究対象		従来技術	達成結果	達成状況
めっき膜厚の薄膜化		最厚部 0.49 μm	最厚部 0.19 μm	従来技術の 39% に薄膜化
高精度膜厚制御	結晶粒子	0.82 μm	0.25 μm	従来技術の 1/3 に微細化
	製品内ばらつき	0.33 μm	0.09 μm	従来技術の 1/3 に低減

第5章 高速劣化試験方法の開発及びめっき膜高度化支援

概要

従来の技術¹⁾では、セパレータ上の貴金属めっきについて高速劣化試験を行い寿命式を得ていた。従来は、80℃の低温型を想定していたが、今回は、160℃程度的高温型で、この関係が成立するかも不明であり、また、ロジウムでの特性も不明確なため、同様な実験を試み、高温型での寿命推定の可能な式を見出そうとした。

5-1 恒温負荷試験結果

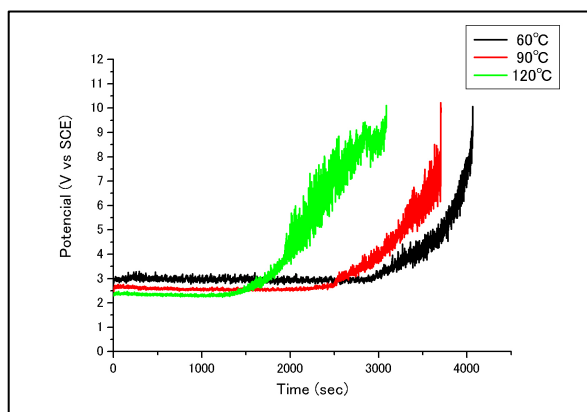


図5-1-1 電位変化曲線

表5-1-2：測定結果

試験浴温度	終了時間(sec)
60℃	4066
90℃	3705
120℃	3089

膜厚あたりのRh寿命秒/μm 膜厚あたりのAu寿命秒/μm

5-2 解析

5-2-1 膜厚の効果

図中に赤線で示すように、従来の金めっきでは、膜厚当たりの耐久時間は、ほぼ定数であったが、ロジウムの場合は、めっき厚さが厚くなるにつれて加速的に耐久性は向上し、0.37μmでは、従来のデータと同様に、約10倍の耐久性が、0.78μmでは、約200倍の耐久性となる等、著しい耐久性の向上が起こる。しかし、薄膜化するにつれて、急速に耐久性は低下し、金めっきよりも低くなる。これは、検討しためっき膜質に依存するものと思われ、改善すべき大きな課題として残された。

5-2-2 反応温度の効果

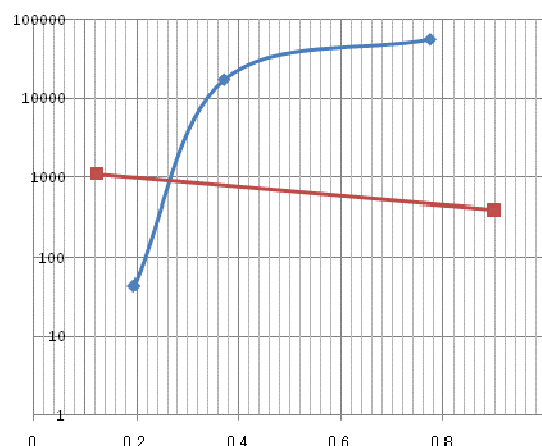
寿命時間の温度依存性は、60から120℃の範囲では、図及び次式に示すように、

$$\text{寿命時間 (Y)} = (\text{定数他}) * e^{4900/RT}$$

と表現することができた。

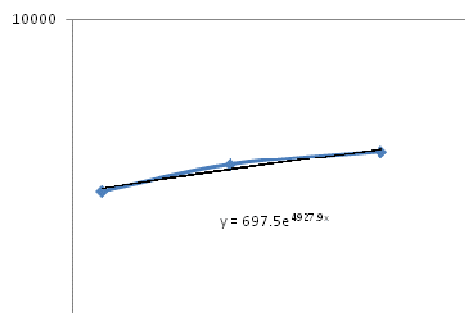
この範囲内では、耐久性の激変を示すような、大きな変曲点は観察されていない。また、このまま160℃まで、変曲点がなく直線関係が成立するならば、80℃で発揮した寿命時間の約60%程度の寿命を、160℃の燃料電池運転で期待できる可能性も判明した。

ロジウムの寿命は電位、電流密度、温度に影響されることが判明した。適切な電位、電流、温度環境下で試験することで、短時間で耐久性の評価を行うことが可能であった。



めっき厚さ (μm)

図5-2-1 1μmの厚さに換算した場合の耐久時間 (寿命時間)



1/RT

図5-2-2 寿命時間の温度依存性 8

第6章 金型評価としての成形セパレータでの燃料電池性能試験

目的

確立された金型に対し、成形トライ等を実施して得られたチタンメタルセパレータにロジウムメッキを施したものにおいて、更に実装技術を展開して得た、スタックにおける燃料電池特性を総合的に評価することで、流路構造設計、実装構造、実装技術、めっき技術、金型設計、金型技術の優位性を総合的に実証する。

6-1 燃料電池スタック性能評価

6-1-1 2セルスタック性能評価

燃料電池の成立性を確認した後に、2セル燃料電池に対して発電試験により性能評価を行う。

性能評価に使用するMEAは、低温型MEAと高温型MEAの2種類について行う。

(1) 発電試験方法

試験条件を表6-1-1に示す。燃料電池への負荷は $0.1\text{A}/\text{cm}^2$ より行い、負荷の保持時間は1.5時間とし、保持後は $0.05\text{A}/\text{cm}^2$ 毎負荷を増大し $0.3\text{A}/\text{cm}^2$ まで負荷を加える。低温型MEAは燃料電池の運転温度を 70°C とし、高温型MEAは燃料電池の運転温度を 160°C としている。

表6-1-1. 発電試験条件

	供給ガス	ガス露点温度 ($^\circ\text{C}$)		ガス利用率 (%)	
		低温型	高温型	低温型	高温型
アノード	H ₂	70	無加湿	70	
カソード	Air	70	無加湿	45	

(2) 発電試験結果

低温型MEAと高温型MEAの発電試験結果を図6-1-1に示す。

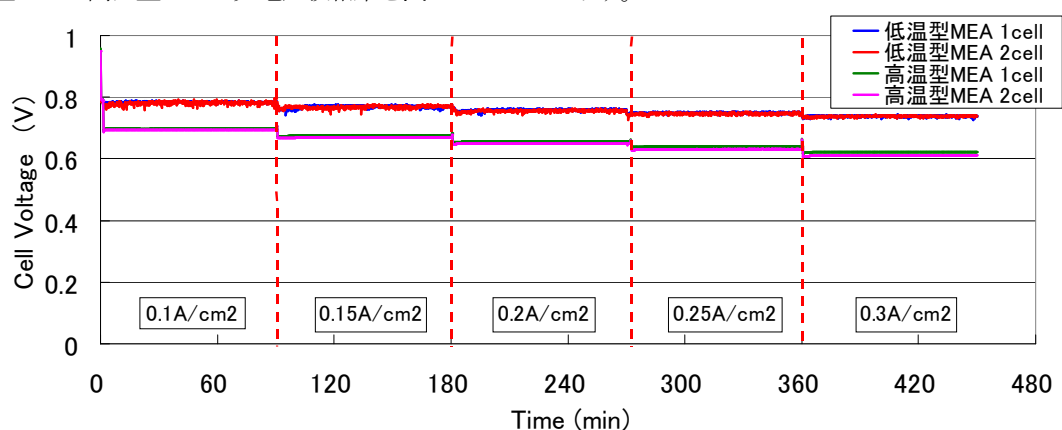


図6-1-1. 発電試験結果

低温型MEAの発電状態は、若干フラiddiingが発生しているが実用上問題ないレベルであり、電流密度 $0.3\text{A}/\text{cm}^2$ でも電圧は 0.74V 程度と高く、またセル間における電圧の開きもなく良好な結果が得られた。

高温型MEAの発電状態は、低温型MEAに比べると1割程度低い値となっているが、これはメーカーカタログ値と同程度であり膜の特性である。高温型MEAは運転温度が高いため、発電時に生じる生成水もスチームとして排出されるためフラiddiingもなくフラットな発電状態となっている。

また、高温型MEAを用いた燃料電池でも、低温型MEAを用いた燃料電池と同様に、セル間における電圧の開きがない事からも、セパレータ形状およびスタック構造に問題がない事が予想される。

6-1-2 20セルスタック性能評価

20セルスタックの性能評価を実施した。試験条件は2セルスタックと同様であり、試験風景を図6-1-2に、スタック外観を図6-1-3に示す。

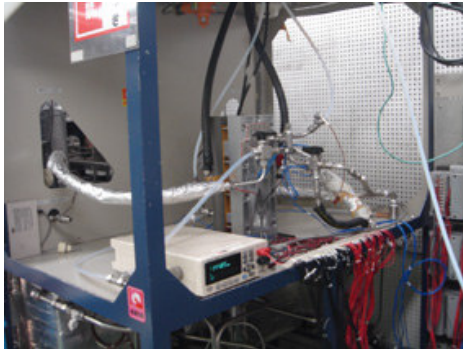


図6-1-2. 20セルスタック発電試験風景

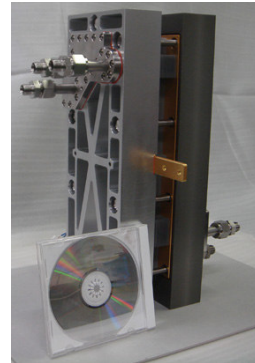


図6-1-3. 20セルスタック外観

(2) 発電試験結果

20セルスタック発電試験概要を図6-1-4、図6-1-5に示す。

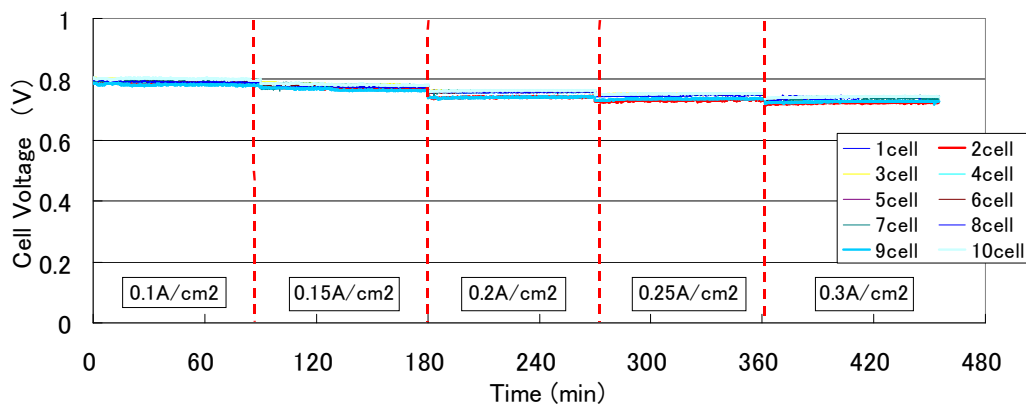


図6-1-4. 20セルスタック発電試験結果（1セルから10セル）

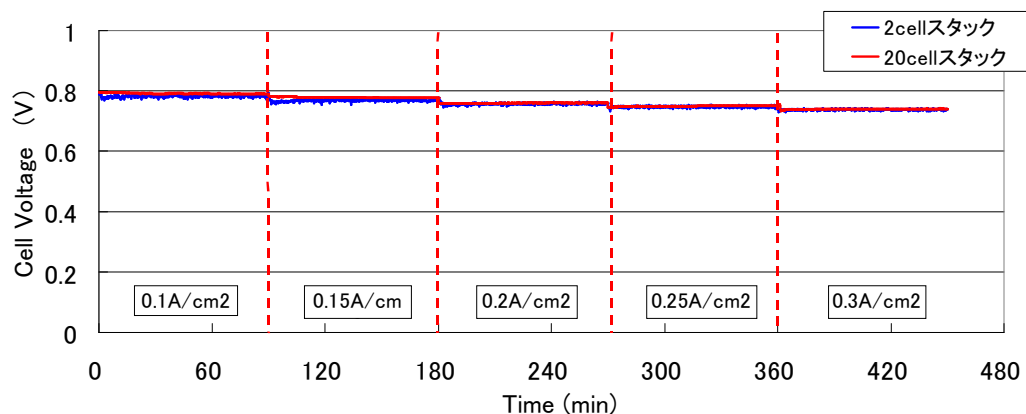


図6-1-5. 平均セル電圧比較

図6-1-4に示されているように、各セル電圧のバラツキは小さく安定した発電状態である事が分かる。また、図6-1-5に示されている2セルスタック平均セル電圧と20セルスタック平均セル電圧を各負荷において比較しても、ほぼ同程度の値を示している。つまり、セルを多積層した場合においても、セル間における電圧の開きは小さく安定した発電が出来ているため、目標としている5kW級スタックを実現するための多積層化は達成できる可能性がある。

今後は高温型MEAを用いた20セルスタック試験、更なる多積層化したスタック試験を行う予定である。

第7章 全体総括

7-1 全体概要

事業管理者として財団法人長野県テクノ財団は、プロジェクト参加各企業における研究の円滑な進展と連携に務める中で、参加各企業の積極的な研究遂行と情報交換、協力により、極めて短期間で、多大な成果を上げることができた。

金属などの弾性変形材料においては、スタック時の圧力により局部変形が起こるが、この変形をスタックの運転に影響の少ない形状となるように、設計時点でスタック時の変形も吸収可能で長期信頼性を発揮できる最適化を行った。

2mmピッチの狭い流路設計及び構造設計を元に、金型技術の高度化を図る中で、得られたプレスセパレータは、スタック集積においても弾性変形も僅かで、塑性変形が全く見られないなど、再利用が可能な程度の変形にとどまることが確認できた。

シール材料の硬化条件の検討と共に物理特性の評価把握を行った。

シール構造の最適設計、ディスペンサー装置、XYZθ4軸ロボットステージを駆使したシール断面形状の最適化、シール実装技術の確立を果たした。

均一薄膜めっき析出技術の確立のため、パルスめっきにより安定したロジウムめっき薄膜形成法を確立し、従来より10倍高精度な膜厚制御、1/100μmレベルでの制御を目指した。その結果、薄膜めっき膜の形成が可能となった。

しかし、薄膜とした時に、厚さ当たりの耐久性が急激に減少するなど膜特性の均一化、均質化が、解決すべき大きな課題として残った。

また、従来の倍以上の高密度設計、2mmピッチ流路を反映する金型において、チタン等の難加工材に対し、最適化された微細構造を正確に転写でき、金型精度±1μm以下、表面粗さRa0.1μm以下を満たした。セパレータは、ヒビ、割れもなく、平坦度0.15mmから0.27mmとスタック性にも比較的優れていた。

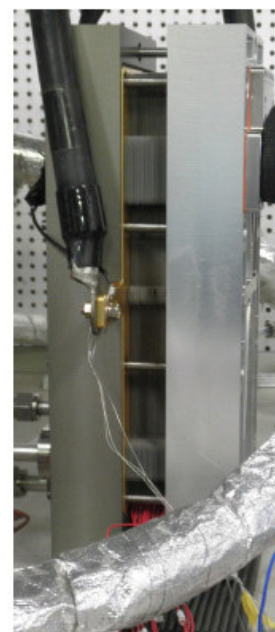


図1 得られた20セルスタック

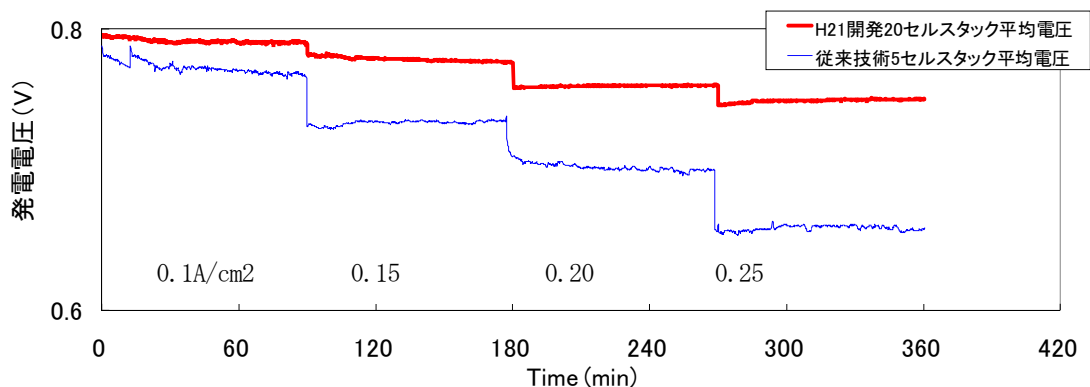


図2 得られた20セルスタックの発電平均電圧と従来技術との比較

得られたセパレータを用い、20セルスタック試験を実施した結果、発電電流密度に依存する抵抗成分は、従来のチタン金属セパレータに比較して、 $0.67\Omega\cdot\text{cm}^2$ から、 $0.32\Omega\cdot\text{cm}^2$ と1/2以下に低減した。またセル間の電圧ばらつき、フラiddiingもほとんど観察されず、発電電圧も高い等、非常に優れた特性があり、 $0.25\text{A}/\text{cm}^2$ 運転では、約16%発電効率を向上することができた。(図1、図2)

また、 $0.5\text{A}/\text{cm}^2$ の発電では発電電圧0.7Vと、従来のチタンセパレータの $0.3\text{A}/\text{cm}^2$ レベルでの発電運転と同程度の高い電圧を得られるだけでなく、20セル間の発電電圧のばらつきは±3%程度であり、800W級の燃料電池発電運転を実証できた。

短時間であるが、20セルスタックにおいて出力1000W以上の出力も確認しており、更に高電流密度下での発電運転が可能であった。

また、2セルでの運転であるが、 160°C での燃料電池運転にも成功し、非常に安定した発電電圧を得ると共に。得られた電圧は、想定以上の電圧であった。

7-2 今後の展望

残された課題

① プレス技術の更なる高度化（平坦度の向上）

更に200セルスタック等高集積スタックされた場合の誤差の増幅を解消するためのプレス技術の高度化、セパレータ平坦度の大幅な向上。

② セパレータの低コスト化、めっき技術の高度化（均質、緻密化、核発生制御）

特に、薄膜化した場合のめっき厚さ当たりの耐久性の向上、緻密性、均一性の向上である。

③ 超高集積スタックの長期信頼性の確立

ガスが消費されることで、排出側での冷却水と排出圧力の差が大きくなることに依存する、冷却水のガス側へのリークの抜本的な解決及び200セル等高集積スタックの長期信頼性確保のための高集積技術の確立。

④ 高集積スタックの試作実証と事業化

今後は、10kW級の産業用燃料電池の実用化を目指した研究開発を進める中で、高集積大出力燃料電池スタックの試作と長期信頼性・発電性能の実証評価が課題として残った。

また産業用燃料電池の実用化と商品化、事業化のための事業化企画・計画等の具体化を進める。