

燃料電池および水電解装置の 低コスト製造方法と展望

Prospects for low-cost manufacturing of fuel cells and water electrolyzers

長谷川卓也*

1. はじめに

気候変動問題に対するソリューションの一類型として、水素社会構築に向けた取り組みが世界的に加速している。我が国では、2017年4月の再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議において当時の安倍首相から第21回気候変動枠組み条約締約国会議(COP21)で採択されたパリ協定のもと政府一体となって水素に取り組む旨の指示が出され、2018年4月に水素基本戦略が決定した。同年7月の第5次エネルギー基本計画発表、2019年3月の水素・燃料電池戦略ロードマップ改定を経て、同年9月にロードマップの目標達成に必要な技術開発事項を定めた「水素・燃料電池戦略・技術開発戦略」(以下、技術開発戦略)が策定された。経済産業省⁽¹⁾によるとこれは「2019年6月に開催した水素・燃料電池プロジェクト評価・課題共有ウィークの議論をもとに(中略)水素・燃料電池戦略協議会において重点的に取り組むべき技術開発事項を定めた」とされている。

近年、我が国では新しい技術開発を官民一丸となって行う習慣が定着しつつある。いわゆるオールジャパンであるが、意図的に多様性を制限して得られるものは、持続的イノベーション⁽²⁾であり破壊的イノベーション⁽³⁾ではない。例えば本田技研工業の本田氏やソニーの井深氏は強烈な個性で大集団と一線を画する戦略を策定し、瞬く間に競争優位を確立した。米国の大型バイク産業や真空管ラジオ産業の衰退と引き換えに一大産業を築いた点において、まさに破壊的イノベーションと呼べるだろう。その40年後に世界中の電話・小売・メインフレームの衰退と引き換えにインターネット産業を築き上げた米国情報産業の創業者達も含め、彼らは大集団が定めた「重点的に取り組むべき技術開発事項」に

は目もくれず独自の個性で思考した点で共通している。

ソニー社史⁽⁴⁾によると初期のトランジスタは高周波特性が悪く、井深氏はライセンス契約先のウエスタンエレクトリック社からラジオではなく可聴周波で事足りる補聴器を作るよう勧められたという。いわばこれが大集団の意向であったが井深氏は意に介さずトランジスタラジオに取り組み成功した。彼は後日、自らの成功を「これは一つのパラダイムシフトになっているかもしれない」と大変控え目に語っている⁽⁵⁾。

破壊的イノベーションには有名な逸話がある。第2次世界大戦中の1943年、ドイツのジェット戦闘機の実戦配備に危機感を持った陸軍航空隊(後の空軍)はこれを至急開発するようロッキード社に要請した。ロッキード社は、あえて主任設計者1名、エンジニア23名、職工30名からなる小さなチームを編成し、僅か143日で米国初のジェット戦闘機P-80を完成させた。これはスカンクワークスと呼ばれ、戦略偵察機SR-71やステルス戦闘機F-117など現在もロッキード社イノベーションの中核を担っている。空軍がこの小さなチームに国の運命を託したのは時間のかかる官僚主義を回避し、チームが臨機応変の決定を行えるようにすることで迅速にソリュー



図1 Lockheed P-80 Shooting Star (左), Honda A型 (中), SONY TR-55 (右)

* 法政大学経営大学院イノベーション・マネジメント研究科, 前日産自動車総合研究所 Senior Innovation Researcher, 博士(技術経営)

ション開発するためであったとされている⁽⁶⁾。

動物であれ、技術であれ、すべての進化は試行錯誤がもたらす統計的帰結であり、そこに小さな見落としがあることは避けられない。ただ、土台にヒビが入っていても差し支えなければ進めばいいし、差し支えるのなら見直せばいい。アンモナイトが円錐形から螺旋形に進化したのも恐竜のあとに哺乳類が栄えたのも大なり小なり土台の見直しである。かくも自然は見直しに長けているが、人類は必ずしもそうではない。ヒビがあろうがあるまいが臨機応変の決定などあり得ないとする傾向を構造的慣性と呼ぶが⁽⁷⁾、紀元前3世紀に地動説を提唱したアリストarcoスが16世紀まで評価されなかったのも、これを評価したコペルニクスが「天球の回転について」の出版を死の直前まで遅らせたのも、結局は官僚主義に由来する構造的慣性の帰結とあって良い。ただ、1800年という遅れ時間はアンモナイトにとっては短いが人類にとっては長すぎる。

科学哲学者のトーマス・クーンは1970年の「科学革命の構造⁽⁸⁾」でこうした問題を指摘し科学哲学界に大きな論争を巻き起こした。彼は小さなヒビをアノマリーと呼び、これが蓄積して従来の枠組みでは取り扱えなくなった時にはじめて土台を見直す機運が生まれると考えた。更に彼はパラダイムシフト以前の枠組みを通常科学と呼び、アノマリーを解消して新たな通常科学を成立させる枠組みを異常科学と呼んだ。

本稿の目的は、水素社会の主要技術である燃料電池および水電解装置の低コスト製造方法について通常科学の枠組みを越える視点を提供することにある。本稿の構成は以下の通りである。二章では電気化学デバイスの生産技術に潜んでいるアノマリーを考える。三章では見逃されたアノマリーを起点とする技術体系を考える。四章ではこれからのサプライチェーンのあるべき姿について考える。なお、本稿では既存のサプライチェーンについては言及しない。必要に応じて類書を参照されたい。

2. 通常科学について

「天体の運行を記述する数式が複雑すぎる」というアノマリーからコペルニクスは天文学の土台を見直した。本稿も先例にならって電気化学デバイスの土台を見直したい。とはいえ注目するのは電気化学のサイエンスではなくエンジニアリングである。サイエンスほど注目されてこなかったエンジニアリングにアノマリーの蓄積が予想されるからだ。

電気化学の歴史はボルタ電池によって定常電流が得られるようになって始まったと言われている⁽⁹⁾。ボルタの業績(1794-97)は、ガルvaniが見出した動物電気(1791年)を二種の金属と一種の電解液を浸み込ませた板紙からなる実証的概念、つまり電池に昇華した点にあり、Philosophical Transactionsで発表された1801年の論文は大きな反響を呼んだ。図2にボルタ電堆(でんたい)を示す。電堆とは単位起電力のボルタ電池(単セル)を積層したものをいう。ボルタ電堆の構造は現在の燃料電池スタックと瓜二つであるが、生産技術も瓜二つである。これについては次章でふたたび取り上げる。

ボルタ電堆最初のヘビーユーザーはファラデーの師デービーであった。彼はナトリウムやカリウムなどの元素を電気分解で単離しただけでなく、積層数を増やして高電圧を発生させる事で1802年にアーク放電を発見した。しかし当時はアーク放電以外に高電圧を必要とする民生用途など存在せず(現在は電動自動車などが存在する)、電信や電動ベル等の民生用途に使うには電解液を外気に晒しておく訳にもいかない。このためボルタは電堆よりも場所を取ることを承知の上で、電解液を満たしたカップに電極を沈めて外部配線で直列接続するchain of cupsを提案した。このカップ電池がダニエルやルクランシェらの手によって徐々に改良されていく。これを単電池という。その後、1885年と1888年に屋井先蔵とガスナーが初期の単電池の液漏れを改善した乾電池が広く普及するに伴い、電堆という用語は文献



図2 ボルタ電堆全体(左)、拡大(右)(出典:RoyalInstitution⁽¹⁰⁾)

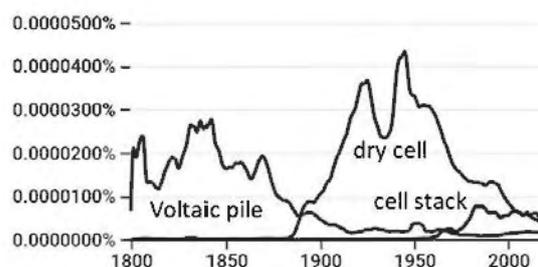


図3 文献における各用語の出現頻度(Google Books Ngram Viewer)

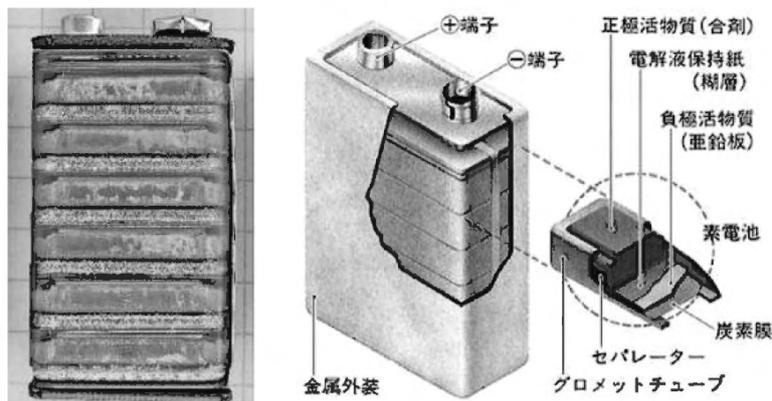


図4 9V 積層電池（角形素電池）の内部構造（出典：Wikipedia, 日本大百科全書）

からも徐々に消えていった（図3）。

1941年にアメリカで電子管への直流電圧印加用に高電圧積層電池が開発された。そして1957年には現在も身近な9V積層電池がソニーのトランジスタラジオ TR-63のために開発された（図4）。9V積層電池におけるアルカリマンガン電池の代表的形式は6LF22であるが、JIS 8500 C.2.2によるとこれは9V積層電池が6個のLF22素電池⁽¹¹⁾からなることを意味している。LF22のLはアルカリを意味し、マンガンの場合は省略される。Fは角形を意味し、円形ならRである。本稿ではこれを電堆構造と呼ぶ。

図5に円形のマンガン乾電池を示す。負極の役割を果たす亜鉛缶内部にセパレータを一巻きしたあと、二酸化マンガン、炭素粉末、電解液の正極合剤を投入して中心に集電体の炭素棒を挿入し、亜鉛缶入口をガスケットでシールしたものを外挿缶に入れて保護している。

図6に円形のリチウムイオン電池を示す。セパレータを一巻きだけするのはマンガン乾電池とアルカリマンガン電池までであり、ニカド電池以降はセパレータと電極の薄膜大面積化で出力特性を確保するため幾重にも巻かれている。具体的には集電体シートに正負の活物質を塗工して得た電極二枚とセパレータ二枚を交互に重ねて高速で巻き上げる。こ



図5 マンガン乾電池の製造方法（出典：FDK 株式会社）

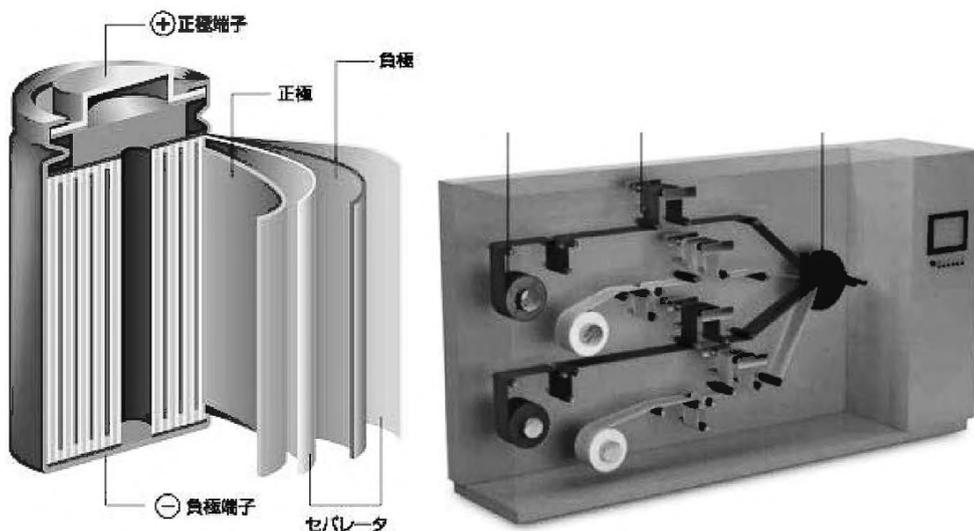


図6 リチウムイオン電池の構造（左）と巻回機（出典：堀場製作所, 三菱電機）



図7 9V 積層電池（円形素電池）の内部構造
（出典：Wikipedia）

れを巻回という。

燃料電池や水電解装置もセパレータと電極の薄膜大面積化で出力特性を確保するという思想に変わりはないが、これらは単位面積あたり電流密度がリチウムイオン電池の1,000倍にも及ぶため大電流を見据えた設計を行う必要がある。例えば自動車用途ではコスト的制約からケーブルや補機部品が取り扱える電流はおよそ500A以下である。燃料電池単セルの標準的な定格電流密度 $2\text{A}/\text{cm}^2$ 、定格電圧0.6Vで計算すると、500Aでの最大面積 250cm^2 、単セル出力300Wとなる。

モーターやインバーターに対しては、電圧のマッチングが求められる。2014年に発売されたトヨタの燃料電池自動車MIRAIはハイブリッド車用の650Vモーターインバーターを搭載しているため、最大出力114kW、370セルスタックの燃料電池が発生する約220Vの電圧をFC昇圧コンバーターで650Vに上げて供給している⁽¹²⁾。単セルの定格電圧は0.6Vなので、1,100セルあれば直接650Vを発生できるが、トヨタはあえて370セルに止めて昇圧する戦略をとった。スタックのセル数が3倍になると車載できない長さになるとはいえ、少しでも面積を小さくしてセル数を増せば最大電流が下がってジュール熱を抑えられるだけでなく、昇圧コンバーターの負荷も減るはずである。これを実行しにくい理由のひとつが面積を小さくしてもさほど価格が下がらない単セルのコスト構造にある。日常生活（ピザをピースで注文するときなど）では面積を小さくしてもさほど価格が下がらないと大問題なのでこれもアノマリーのひとつだろう。原因は次章で考察する。なお、巻回が作る同心円の中に電堆構造を作る方法は筆者の知る限り知られていない。幾何学的に可能か否かも不明である。

あらためて9V積層電池に目を転じる。マンガン乾電池の多くは現在も電堆構造（6F22等）を採用しているが多くのアルカリマンガン電池の内部構造は複数の円形単電池からなる組電池に変化してい

る。図7に、直列接続されたLR61（通称単6電池）6個からなる6LR61を示す。これを退化と呼ぶのは語弊があるが、せっかく電堆構造を開発しながら組電池に戻ったのはなぜだろうか。

何があったか正確には分からないが、ひとつ推測されるのがシール問題である。電堆構造で隣接する素電池の短絡を防ぐには、個々の素電池の側面を丁寧にシール⁽¹¹⁾する必要がある。長年稼働した電堆構造製造設備は減価償却が終わって安くなっているかもしれないが、円形電池の金属缶入口シール技術も日々進歩している。更に安全回路が挿入されることも普通になり、小型円形電池にスタイラスペン用電源などの新用途も現れてきた。だったら新工場は円形素電池の組電池で、という経営判断があっても不思議はない。

電堆構造と円形単電池におけるシール問題の違いは、巻回構造を特徴とするリチウムイオン電池でより顕著になる。円形単電池では薄膜大面積化が進んでもシール総延長は金属缶入口の周長に他ならないが、電堆構造のフットプリント（面積）を変えないとしたら、無数の非常に薄い素電池の側面をシールすることになり大幅なコスト増を招く。反対に、フットプリントを増やすと電流の問題がつかまとう。

実際、近年の電気自動車市場で圧倒的存在感を示すテスラモーターは、18650型や2170型といった小型の円形リチウムイオン単電池数千個から構成される組電池を車載用電池パックとして採用した。その出力電圧は400V程度と推測されるが、これは電堆構造を採用するMIRAI燃料電池スタックの2倍弱に相当する。こうなるとリチウムイオン電池にとって電堆構造は解ではないように見えるが、果たして本当だろうか（500年前まで人類は地動説に解はないと思っていた）。本稿の主題は燃料電池と水電解装置なのでリチウムイオン電池についてはこれ以上は触れない。ただ、何か釈然としないとしたらアノマリーが見え隠れしているからではないだろうか。

以上がボルタ電池とボルタ電堆で幕を開けた通常科学の生産技術的側面である。次章では燃料電池と水電解装置に話を戻す。

3. 異常科学について

ここでは基本的概念の整理から電気化学デバイスの生産技術について考えてみたい。まず燃料電池および水電解槽の基本構造を巻回ではなく電堆構造に限定する。これはリチウムイオン電池の結論と逆で

あるが、この主な理由は単位面積あたり電流密度に由来する電流限界にある。仮に巻回によって円形燃料電池単セルを作るとしたら、容積あたり流体圧損がおそろしく高い反面、最大電力はおそろしく低い燃料電池が出来ることだろう。電堆構造を構築する技術をあらためて積層と呼ぶ。

積層を単位操作に分解すると、原材料→把持→移送→(狭義の)積層→仕掛品、と表わせる。このうち把持と積層は動作ではなく動作が完了した瞬間を表すのでタクトタイムはゼロとみなす。生産コストはつまるところ時間コストであるから把持や積層にかかわる設備費はあらかじめ移送にかかわる設備費に合算しておけばよい、つまり加工(化学反応など)を含まない積層では移送コストが唯一のコストとなる。図8から図11に典型的な生産方式を示す。

以上のうち、図8のようにロボットを用いて原材料を上下させながら移送する生産技術をレシプロ生産もしくは三次元生産と呼び、図9から図11のようにロールやベルトを回転させながら移送する生産技術をロータリー生産もしくは二次元生産と呼ぶ^(13, 14)。

図8では中央のロボットが原材料(左)を仕掛品(右)まで移送したあと、更に密着させる様子が描かれている。左の原材料は適切に切断された板・シート・フィルムである。これらを枚葉と呼ぶ。

図9では中央のベルトが原材料(左)を仕掛品(右)まで移送したあと、小径ロールが密着させる様子が描かれている。複数の原材料を用意すれば混合積層

も可能である。日本プラスチック板協会は、曲がらない平たいものを板、プレートもしくはボードとし、板より薄い、巻き取れる程度のもので、厚いものをシート、薄いものをフィルムと定義した。本稿では、巻き取れるものをシート、巻き取れないものを板、と単純化する。図8と図9はシートも板も取り扱えるが、図8では移送中にシートが自重で撓まないよう吸引板等の追加治具の助けを借りる必要がある。

図10では多数の補助ロール(直径2インチ程度)が原材料ロール4本(左)を仕掛品(右)まで移送しながら、その場で混合巻回する様子が描かれている。これは図6(左)に相当する。

図11では多数の補助ロール(同上)が原材料ロール4本(左)を仕掛品(右)まで移送しながら、その場で混合積層する様子が描かれている。図9は板も取り扱えるが枚葉を作る前工程を必要とするのに対して、図11は板は利用できないが枚葉を作る前工程は不要である。

我々が目指す生産方式は図11であるが、このような生産設備は世界のどこにも販売されていない。例えば米エネルギー省の研究報告書⁽¹⁵⁾で、電解質膜と触媒層とガス拡散層の積層体であるMEA(Membrane Electrode Assembly)のロータリー生産装置が提案されている。しかし⑭の詳細が省略されている事からわかるようにこれは近い将来の実用化をふまえた具体的設計ではない。同様の試みは冒頭の水素・燃料電池プロジェクト評価・課題共有

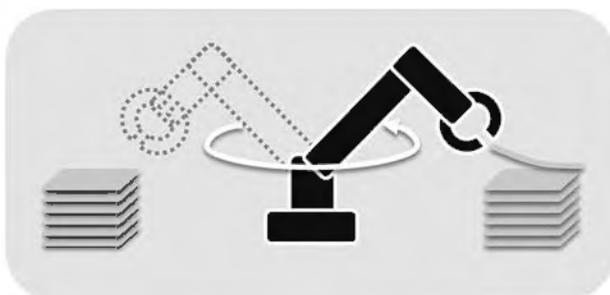


図8 レシプロ生産による積層, 電堆構造

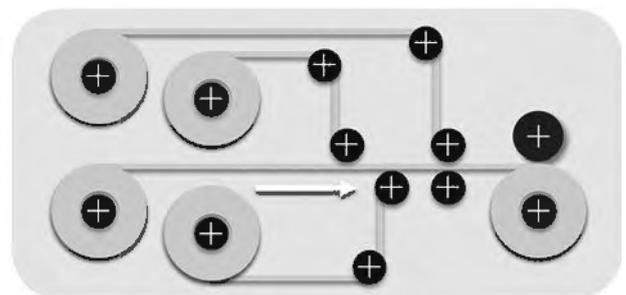


図10 ロータリー生産(ロール)による巻回, 巻回構造

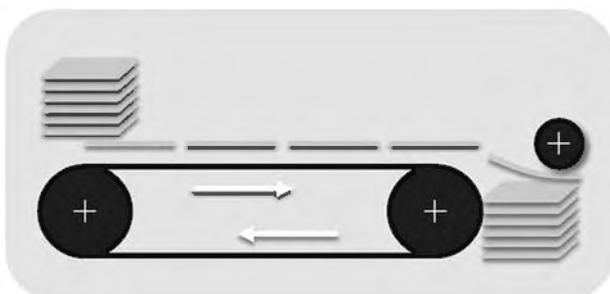


図9 ロータリー生産(ベルト)による積層, 電堆構造

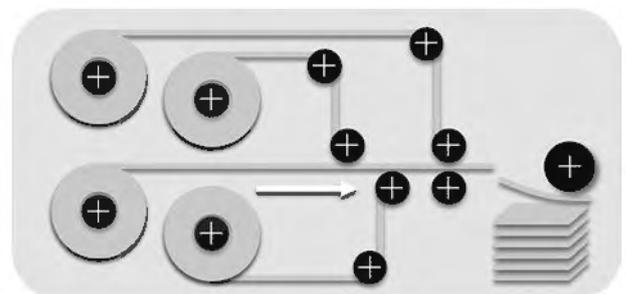


図11 ロータリー生産(ロール)による積層, 電堆構造

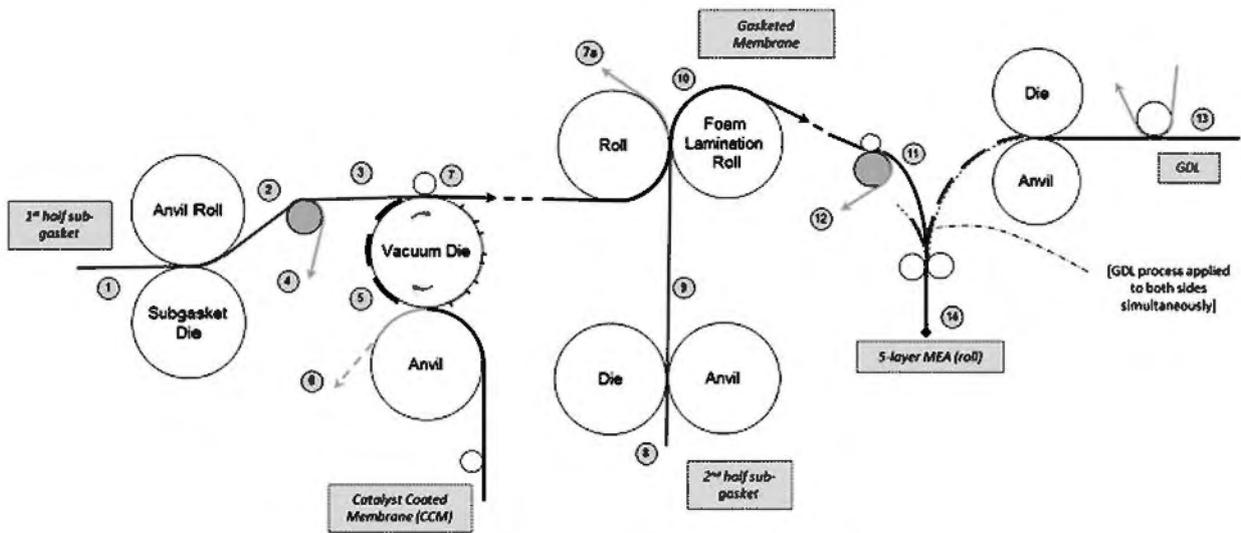


Figure 92. Roll-to-roll sub-gasket application process

図 12 米エネルギー省におけるロータリー生産概念図 (p110)

ウィークでも共有された。この装置は販売されているが対象範囲は図 12 の左半分相当に止まっている⁽¹⁶⁾。

生産設備が存在しないのは図 11 の技術的難易度が高いからだろうか。あるいは難易度とは別の理由だろうか。例えば、機械の内部構造・組み立て・相互運動などを対象として研究する機械工学の一部門を機構学という。機構学の主な対象は三次元生産であるが、二次元生産についても 19 世紀の新聞産業、20 世紀のシート産業を通じて多くの知見が集積されている⁽¹⁷⁾。その機構学が図 11 を構成する事は数学的に不可能という証明を行ったわけではない。つまり理由は難易度ではない。

例えば三次元生産における材料要求が<軽くて強い>だとしたら、二次元生産における材料要求は<曲がりかつ巻き取れる>である。双方とも材料破損しないことを目的としているが要求特性は大きく異なる。これはそれぞれの思い込み、つまり、前者の通常科学が小変形、後者の通常科学が大変形を想定しているからと考えると分かりやすい。大変形とは図 10 や図 11 の補助ロールに追従したときの変形であり、これに耐える性質を追従性と呼ぶ。ところが追従性にはまだ適切な物性的解釈がない。ここでは仮に柔軟性+韌性と仮定しよう。主要部品の追従性をこの点から整理した結果を表 1 に示す。現在の一般的な燃料電池および水電解装置では、主要部品の中で流路付きセパレータのみ追従性を持たない。

「この事がいずれ大問題になるだろう」という予想は古くから燃料電池関係者の間で共有されてきた。例えば 2018 年の DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record⁽¹⁸⁾ に掲載された自動車用燃

表 1 主要部品の柔軟性と韌性

リチウムイオン電池		燃料電池, 水電解装置	
セパレータ	○	電解質膜	○
正極集電体	○	正極触媒層	○
正極活物質	○	負極触媒層	○
負極集電体	○	正極ガス拡散層	○
負極活物質	○	負極ガス拡散層	○
—	—	流路付きセパレータ	×

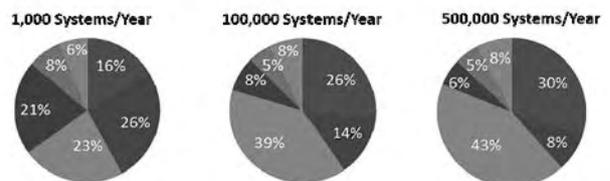


図 13 自動車用燃料電池スタック主要部品のコスト構成 (予測)

料電池スタックの主要部品コスト予測にその一端を見る事ができる (図 13)。ここで、円グラフの各領域は頂点から時計回りに Bipolar Plates, Membranes, Catalyst + Application, GDLs, MEA Frame/Gaskets, Balance of Stack を示している。

自動車産業における年産 1,000 台とは高級車やスポーツカーでようやく採算がとれる需要であり、年産 10 万台 (ベストセラー車種の販売台数相当) と年産 50 万台 (日産自動車の国内販売台数相当) は量産前提の需要である。各項目のうち、触媒コストは既存化学プロセスに立脚するためコスト予測がはずれる可能性はまずない。そこでこれを除いたコスト構成で比較すると、年産 1,000 台から年産 10 万台に増える事で膜と GDL が減少する一方、セパレータは増加している。これは他の部品でロータリー生



図14 燃料電池用流路付きセパレータ (出典：トヨタ紡織²²⁾)

産が進む傍らセパレータではレシプロ生産が継続するからであろう。前章でセル面積を小さくしてもさほど価格が下がらなかったのは、コストが面積の広さではなく上下運動の数で決まることに起因する。このため、著者らが以前行ったフェルミ推定によると同じ年間生産能力の燃料電池スタック工場投資額(生産設備のみで検査設備は含まず)はロータリー生産がレシプロ生産の1/100であった⁽¹⁹⁻²¹⁾。

図14にMIRAIに搭載された流路付きセパレータの形状を示す。右上に流路付きセパレータの写真が示されているが、中央部に形成された微細流路がH鋼の梁のような補強効果を生むため2インチロールへの追従性は持ち合わせていない。抱き角180度で追従させればおそらく破損するだろう。MIRAIではこれを2枚用意してその間に枚葉のMEAを挟み込み、セパレータの周囲を一筆書きで封止したものを一つの部品としている。こうした構成については自動車各社で大差はない。

燃料電池に用いるセパレータは、海外ではbipolar plateと呼ばれる方が多い。セパレータという用語の本来の役割は正極と負極を電子的に分離してイオンを導通させることにあり、燃料電池でこの役割を担っているのは電解質膜だからだ。一方、9V積層電池では素電池の上面と下面に形成した炭素膜と正極合剤を介して隣接する素電池と導通させている。燃料電池でセパレータが担っているのはまさにこの役割である。MIRAIではこの部分を冷却水流路として活用するため、隣の単セルと重ねたときに自ずから冷却水流路が形成されるようデザインされている。この冷却水流路が効率50%の燃料電池反応から発生する熱を厳密に除去することで安定な発電を可能にしている。

封止が行われる金属板の周辺部をフラットに保ったまま、中央部のみに流路形成を行うことは決して

容易ではない。流路形成で金属板が伸びた分をうまくいなさなければ周辺部にたわみが及びリーク等の不具合が生じるからである。トヨタがこれを克服するプレス金型技術を開発して自動車品質基準を達成したのは賞賛に値する快挙だ。ところが図13は、これが永続的ではないかもしれないことを示している。

天動説とは、宗教と哲学が未分化であった時代に惑星の軌道は『神の図形である真円で構成される』と盲目的に思い込み、正解である楕円軌道を複層真円軌道の数式群で近似していたようなものである。しかし $F = G Mm/r^2$ というひとつの式が発見されたとき、すべての数式群はその役割を終えた。双方とも回転に関わるという偶然は措くとして、筆者は地動説における万有引力の式に相当するものが電気化学デバイスにおけるロータリー生産ではないかという気がしてならない。

4. ロータリー生産のサプライチェーン

現代の新聞工場では、ロールから時速40km以上で繰り出された新聞紙がその速度を維持したまま輪転印刷機で印刷され、裁断したあと折り畳まれて新聞が作られている。これは折り畳み工程を除けば図11と同じである。アメリカのパロックが輪転印刷機を開発したのは1867年であった。このとき輪転印刷機以上の生産技術を必要とする蒸気自動車はその何十年も前から街を走っていた。つまりパロックは1867年まで生産技術が成熟するのを待っていた訳ではない。それ以外に欠けていたさまざまな事物が収穫されるのを待っていたのである。これらをサプライチェーンという。

そのひとつが新聞紙のロールであった。手すきの紙は中国の蔡倫が古代に発明したとされているが、フランスのロバールが世界初の長網抄紙機を発明し

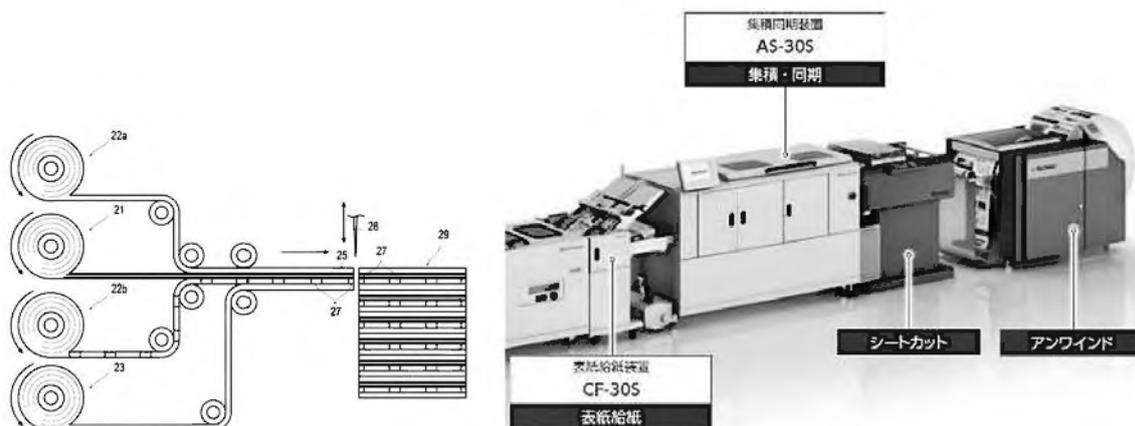


図 15 ロータリー生産設備（出典：特許第 5369531 号，ホリゾン・ジャパン株式会社）

たのは 1778 年で、イギリスのギャンブルとドンキンによる世界初の生産が行われたのは 1802 年であった。ただし、当時の紙はぼろ布や植物繊維を用いたため原料供給が不安定で価格が高かった。現在でいうと電解質膜のようなものだ。この時代に生まれたのがインクを乗せた版の上に枚葉の新聞紙を乗せ、これをロールの下にすべり込ませて印刷する円圧印刷機であり、1811 年にドイツのケーニッヒが開発した。ドイツのケラーが木材をすり碎くことで大量安価に作れるパルプを考案したのは 1840 年であり、イギリスのバージェスやドイツのフェルターが最終的にパルプの開発を終えたのは 1860 年であった⁽²³⁾。バロックが輪転印刷機を開発したのは、このわずか 7 年後である。

ケーニッヒやバロックが作り上げたロータリー生産技術の基本は今も変わらない。もちろん部品によっては新しく開発すべきものも多いだろう。新聞から大きく異なる部品ではなおさらである。しかし、例えそうであってもインターネットもない時代に手探りで図 11 のすべてを作り上げた彼らの苦勞に比べればいかばかりだろうか。

生産技術から部品に目を転じると、流路付きセパレータ以外は殆どロールで入手できるようになった。しかし、積層技術の歩みは今も遅い。

図 11 は 4 本のラインが全て等速でなければ機能しない。意図的に特定ラインを他より遅くすることは可能だが、何も対策しなければそれ以外の全てのフィルムが床に山積みとなるだけだ。現在、この位置づけにあるのが流路付きセパレータである。

「全て等速でなければ意味がない」のはサプライチェーンも同じである。例えば、パルプと長網抄紙機が同時開発されていたら輪転印刷機は 82 年早く開発されていただろう。もっともその頃、すなわち

1778 年は産業革命初期であり十分な新聞需要が存在しなかった。しかし現在は違う。パリ協定⁽²⁴⁾は 2050 年にカーボンニュートラルを実現する事を求めている。もしこの実現を目指すのであれば、82 年後を 10 年後に短縮する努力が必要ではないだろうか。

5. おわりに

2006 年に自動車会社に移ったとき、燃料電池の試作現場でボルタ電堆以来のレシプロ生産が行われていることに驚いた。それ以前の会社生活をロータリー生産に囲まれて過ごしたとはいえ、自動車会社だからこそ想像をこえた自動化が進んでいるだろうとの期待があった。

図 15 に、2008 年に筆者が出願した特許図面と、最新の中綴じ製本システム⁽²⁵⁾の事例を示す。左で生産される燃料電池スタックが右で生産される書籍と同じ品質に達するには生産技術とサプライチェーンの双方でまだ多くの課題が待ち構えているだろう。しかし、左に関する技術課題はすべて既存技術の組み合わせで解決された。これは今後も変わらないと信じている。

参考文献

- 1) 経済産業省。“水素・燃料電池技術開発戦略を策定しました”：<<https://www.meti.go.jp/press/2019/09/20190918002/20190918002.html>>, published on Sep 18, 2019, accessed on Sep 12, 2020.
- 2) 山中伸弥。“日本分子生物学会若手教育ランチョンセミナー 2011”：<https://www.mbsj.jp/admins/ethics_and_edu/doc/111214_wakate_sympo_all.pdf>, published on Dec 14, 2011,

- accessed on Sep 20, 2020.
- 3) Christensen C. M., Raynor M. E. and McDonald R., Harvard Business Review (2015) .
 - 4) ソニー. “Sony History 第4章 初めての渡米 <トランジスタの自社生産> ” : <<https://www.sony.co.jp/SonyInfo/CorporateInfo/History/SonyHistory/1-04.html>>, published on Aug, 2020, accessed on Sep 20, 2020.
 - 5) 明豊. “ソニー創業者・井深大が2400人の幹部に発したパラダイムシフトという遺言” : <<https://newswitch.jp/p/2478>>, published on Oct 27, 2015, accessed on Sep 20, 2020.
 - 6) BOMMER M., DeLaPorte R. and Higgins J., Journal of Management in Engineering, 18, 21-28 (2002).
 - 7) Michael T. Hannan, John Freeman, American Sociological Review, 49, 149-164 (1984).
 - 8) Kuhn T., “The Structure of Scientific Revolutions,” 2nd ed. University of Chicago Press, Chicago, IL, 1970, pp. 210.
 - 9) 田中実, 化学教育, 11, 195-201 (1963).
 - 10) Royal Institution. “Alessandro Volta's voltaic pile.” : <<https://www.rigb.org/our-history/iconic-objects/iconic-objects-list/voltaic-pile>>, accessed on Sep 22, 2020.
 - 11) 柿木良一, 清島五夫, 特願昭 25-5656 (1951).
 - 12) 野々部康宏, 灘光博, 渡辺修夫, Toyota technical review, 61, 15-19 (2015).
 - 13) Huya-Kouadio J. M., James B. D., Houchins C., ECS Trans., 83, 93-109 (2018).
 - 14) 長谷川卓也, 水素エネルギーシステム, 44, 230-237 (2019).
 - 15) Kawamoto R., Mochizuki H., Moriguchi Y., Nakano T., Motohashi M., Sakai Y. and Inaba A., Sustainability, 11, 2690 (2019).
 - 16) NEDO. “製造時間を短縮し生産コスト低減に貢献する燃料電池製造装置を開発” : <https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100672.html>, published on Nov 17, 2016, accessed on Sep 20, 2020.
 - 17) 橋本巨, “Theory and application of web handling,” 加工技術研究会, 2015.
 - 18) Guerrero Moreno N., Cisneros Molina M., Gervasio D., Pérez Robles J. F. “DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record.” : <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/16020_fuel_cell_system_cost_2016.pdf>, published on Sep 30, 2016, accessed on Sep 20, 2020.
 - 19) Hasegawa T. and Fujimoto T., 2D Parts Revolution
-How Electrochemical Power Generation Devices Bring Economic Opportunities, Paris, France, June 1, 2016.
 - 20) Hasegawa T. and Fujimoto T., Production models and strategies : reciprocating and rotary technologies, São Paulo, Brazil, June 11, 2018.
 - 21) 長谷川卓也, 化学工学, 84, 18-21 (2020).
 - 22) トヨタ紡織. “燃料電池(FCスタック)セパレーター” : <<https://www.toyota-boshoku.com/jp/content/wp-content/uploads/161025sH6k.pdf>>, published on Oct 22, 2016, accessed on Sep 20, 2020.
 - 23) 馬渡力, “印刷発明物語” 2nd ed. 日本印刷技術協会, 2003.
 - 24) United Nations, “Paris Agreement,” 2015.
 - 25) Horizon. “デジタル印刷向け中綴じ製本システム” : <https://www.horizon.co.jp/products/ja/products/digital_finishing/stitchliner6000digital/stitchliner6000digital_j.html>, accessed on Sep 20, 2020.

著者略歴



化学メーカーと自動車メーカーを経て、現職はエネルギー企業、及び、法政大学経営大学院グローバルMBA兼任教員。リチウムイオン電池用セパレーター開発リーダーを務めたあと、ディーゼルエンジン用窒素富化空気モジュール、車載用新構造燃料電池、水電解システム、および、これらの生産技術革新にプロジェクト責任者として従事。専門領域は二次元生産技術及び再生可能エネルギー技術戦略など。著書に Energy Technology Roadmap in Japan, Introduction (共著, Springer 2016)。