

一橋大学 21 世紀 COE プログラム
「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」
大河内賞ケース研究プロジェクト

TDK
積層セラミックコンデンサの開発

小阪玄次郎
武石彰

2008 年 1 月

CASE#08-01

本ケースは、一橋大学 21 世紀 COE プログラム「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」から経費の支給を受けて進められている、「大河内賞ケース研究プロジェクト」の研究成果のひとつである。このプロジェクトは、大河内賞を受賞した業績について事例分析を行うもので、(財)大河内記念会と受賞企業のご協力をえながら、技術革新の概要やその開発過程、事業化の経緯や成果などを分析している。事例研究を積み重ねて、日本の主要なイノベーションのケース・データを蓄積するとともに、ケース横断的な比較分析を行い、日本企業のイノベーション活動の特徴や課題を探り出すことを目指している(詳細は <http://www.iir.hit-u.ac.jp/research/21COE.html> を参照のこと)。本プロジェクトを進めるに際して、(財)大河内記念会より多大なご支援・ご協力をいただいております、心よりお礼を申し上げます。

※本ケースの著作権は、筆者もしくは一橋大学イノベーション研究センターに帰属しています。本ケースに含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、もしくはコピーを行う場合には、一橋大学イノベーション研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【連絡先】 一橋大学イノベーション研究センター研究支援室

TEL:042-580-8423 e-mail:chosa@iir.hit-u.ac.jp

一橋大学 21 世紀 COE プログラム
「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」
大河内賞ケースプロジェクト

TDK
積層セラミックコンデンサの開発

2008/01/30

一橋大学大学院商学研究科博士後期課程 小阪玄次郎
一橋大学イノベーション研究センター教授 武石彰*

* 〒186-8603 東京都 国立市 中 2-1
Phone: 042-580-8425 Fax: 042-580-8410
Email: takeishi@iir.hit-u.ac.jp
<http://www.iir.hit-u.ac.jp/>

1. はじめに

携帯電話の外枠をはずして中身を見ると、緑色の基板の上に並べられた無数の様々な部品が目に入ってくる（図1）。MPU、メモリといった大きめの（といってもとても小さいが）半導体デバイスがまずは目につき、もう少し顔を近づけて目を凝らすと、その周りにさらに小さい、砂粒ほどの部品が整然と敷き詰められているのがみえる。これが本ケースでとりあげる積層セラミックコンデンサである。

積層セラミックコンデンサは、電子回路を構成する部品の中でも最も代表的な部品の1つである。セラミック誘電体、内部電極、端子電極から構成され、一時的に電気を蓄えることができる。蓄電・放電のはたらきを利用して、電流のノイズを取り除くとか、直流をカットして交流だけを通すといった機能を回路上で果たす。回路のあるところには必ず使われているといってもいいほど、電子・電気機器にとって欠かせない部品である。

携帯電話や、パソコン、薄型テレビといった身の回りにある電子機器の回路基板の上には、この小さなセラミックコンデンサが多数組み込まれている。携帯電話でいえば、多い機種になると一台当りおおよそ400個ほどが搭載されている。機器が高性能になればさらに多数のセラミックコンデンサが必要になる。

求められるのは、より高性能で、小さくて、信頼性が高く、そしてできるだけ低廉なものである。今、積層セラミックコンデンサの価格は平均して1個あたり1円弱程度だが、かつての値段はその十倍弱ほどであった¹。セラミックコンデンサのコストがこれだけ下がる上で重要なきっかけとなったのが、1990年代に入って、積層セラミックコンデンサの内部電極として、それまで主流だった高価な貴金属に代わって安価な卑金属のニッケルを用いた製品が本格的に実用化されたことにある。内部電極にニッケルを使うことは長年にわたって試みられていたが、信頼性に難点があり、なかなか普及するまでにはいかなかった。誘電体に使われるチタン酸バリウムとの相性がきわめて悪かったためである。

その課題を克服して、本格的実用化で業界の先陣を切った一社が、TDK株式会社（以下、TDK）であった。信頼性の高いニッケル内部電極積層セラミックコンデンサをいち早く市場に投入したTDKは、電子機器の急速な技術進歩と普及の流れに乗り、90年代初頭からの10年間でセラミックコンデンサの売上を3倍以上に拡大した。それまで有力であったアメリカ企業はニッケル化に追随できずに競争力を失い、その多くは市場から去っていった。いまや、年間1兆個を数える世界のセラミックコンデンサ市場の大

¹ 体積あたりの電気を蓄える容量が増加したことを加味すれば、実質的な値段の下げ幅は百分の一程度となる。

半は、TDK の他、村田製作所、太陽誘電などの日本企業によって供給されている。

TDK はもともとコンデンサを主力事業とする会社ではなく、ニッケル化への取り組みも後発だった。TDK はどのようにして信頼性の高いニッケル内部電極積層セラミックコンデンサを開発、事業化していったのか。1970 年代以降の日米の主要な企業の行動も視野に入れながら、その過程を記述することが本ケースの目的である²。

2. 積層セラミックコンデンサとは

2.1 コンデンサの働きと種類

コンデンサとは、電気を一時的に蓄える働きを持つ、最も基本的な電子部品の一つである。電子回路を構成する部品の中では、抵抗器、コイルと並ぶ 3 大受動部品の 1 つである³。

電気を通さない絶縁体を 2 枚の導体ではさんで電子回路上に配置すると、はじめは電流が流れるが、やがて流れなくなり、電荷が 2 枚の導体の部分に蓄えられる。これが、コンデンサが電気を蓄える基本的な原理である。絶縁体であれば、例えば 2 枚の導体の間に紙をはさんでもコンデンサとして機能する。間にはさむ絶縁体が薄いほど、また絶

² 本ケースは、一橋大学 21 世紀 COE プログラム「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」の研究プロジェクトのひとつ「大河内賞ケース研究プロジェクト」

(<http://www.iir.hit-u.ac.jp/reserch/21COE.html>) の一環として作成したものである。本ケースでとりあげる TDK のニッケル内部電極積層セラミックコンデンサは 1997 年度に第 44 回大河内記念技術賞を受賞している。本稿を作成するにあたって、後掲の参考文献の他に、以下の講演、インタビューを参考にした：野村武史氏（TDK 株式会社取締役常務執行役員・磁性製品ビジネスグループゼネラルマネジャー）講演会ならびにインタビュー（2006/12/22、2007/5/17、2007/6/14、2007/12/06）、中野幸恵氏（同基礎材料開発センター主任研究員）インタビュー（2007/5/17）、石垣高哉氏（同取締役常務執行役員・コンデンサビジネスグループゼネラルマネジャー）・建部学氏（同コンデンサビジネスグループ企画部企画課課長）インタビュー（2007/6/14）、渡辺猛氏（由利工業株式会社常務取締役）・真坂護氏（同取締役工場長）・小林和弘氏（TDK-MCC 株式会社秋田工場第二製造部製造一課統括係長）インタビュー（2007/6/14）、坂部行雄氏（株式会社村田製作所取締役上席常務執行役員・研究開発センター長）インタビュー（2007/7/19）、茶園広一氏（太陽誘電株式会社商品開発本部上席執行役員）インタビュー（2007/7/27）（所属、役職はいずれもインタビュー当時）。お忙しい中、貴重な時間を割いてご協力いただいた以上の方々に深く感謝する。「大河内賞ケース研究プロジェクト」を進めるに際して多くのご協力をいただいている大河内記念会にも感謝する。また、「大河内賞ケース研究プロジェクト」のコーディネーターである藤井由紀子氏には、ケース作成で多くのサポートをいただいたことに感謝したい。ただし、書かれている内容についての文責はあくまでも筆者にある。また本稿の記述は企業経営の巧拙を示すことを目的としたものではなく、分析並びに討議上の視点と資料を提供するために作成されたものである。

³ 受動部品とは、エネルギーを消費し、電流の流れによって回路の機能を実現させる部品である。コンデンサ、抵抗器、コイル、水晶部品などがこれに含まれる。一般電子部品には、この他に変換部品と接続部品がある。変換部品とは、例えばモータのように、電気的エネルギーを機械的エネルギーに変換する働きをする部品である。接続部品は、コネクタやスイッチのように、機械的に電気回路をつないだり切り替えたりする働きをする。

縁体が電気を蓄える性質、すなわち誘電率が高いほど、コンデンサはより多くの電気を蓄えることができる⁴。絶縁体のことを誘電体とも呼び、誘電体をはさむ 2 枚の導体はそれぞれ誘電体に対するプラスとマイナスの電極の役割を果たしている。

現在、主要なコンデンサとしては 3 種類がある。アルミ電解コンデンサ、タンタル電解コンデンサ、それに本ケースで扱うセラミックコンデンサである。

アルミ電解コンデンサは、アルミニウム電極の表面に非常に薄い酸化被膜を形成することで電気を蓄える容量を大きくしたものである。2 枚のアルミニウム箔の間に電解紙と電解液を入れて巻き取るという構造上、小型化が難しく、さらに発熱や電解液の液洩れといった信頼性の問題があった。タンタル電解コンデンサも、アルミと類似しており、タンタル粉体に酸化被膜を形成したもので、アルミほど大容量ではないが信頼性はより高い。

これらの電解コンデンサと比べると、セラミックコンデンサは全く異なる構造のコンデンサである。最も誘電率の高い物質であるチタン酸バリウム (BaTiO_3) を誘電体に用い、銀や銅、パラジウムといった金属ではさんで焼き固めて作る。電解コンデンサと比べると誘電体が厚く、電気を蓄える容量は劣るけれども、小型で、発熱しにくく、液洩れがないため信頼性が高いという利点がある。これらの特性の違いから、アルミ電解コンデンサが例えばハイブリッド車のモータを駆動させるインバータ電源用などに用いられ、タンタル電解コンデンサは薄型テレビやビデオカメラなどに用いられているのに対して、セラミックコンデンサは携帯電話をはじめとする比較的小型の電子機器に多用されている。

図 2 に示すように、セラミックコンデンサは、最近では、コンデンサ市場全体のうち数量ベースで 8 割、金額ベースでも 4 割程度を占めており、最も多く使用されている⁵。セラミックコンデンサの市場がこれほど大きくなっている背景には、大容量化に向けた技術開発の進展によって、徐々に電解コンデンサの市場を代替していったことがある。

図 3 は、主要なコンデンサの棲み分けの状況である。コンデンサが電気を蓄える容量を静電容量といい、従来、小容量はセラミック、中容量はタンタル、大容量はアルミと

⁴ 正確には、誘電率とは物質に電気が流れたときに分極という現象をどれだけ誘起するかを示す値である。コンデンサに電流を流すと、絶縁体の中で一様に分布していた分子がプラスとマイナスに分かれ、絶縁体をはさむプラス側の導体とマイナス側の導体にそれぞれ反対の電荷が集まって、電気を中和しようとする。これが分極であり、分極が生じやすいほど、絶縁体をはさむ 2 つの導体により多くの電荷が蓄えられる。

⁵ この値は日本の主要コンデンサ・メーカー 25 社を対象とした調査に基づいており、海外のメーカーの生産分は含まれていない。ちなみに、村田製作所 (2003) の世界のコンデンサ生産状況に関する資料によれば、2001 年時点で、セラミックコンデンサの占める比率は数量ベースで約 8 割、金額ベースで約 3 割となっている。

いう明確な棲み分けが成立していた。しかし、セラミックコンデンサが次第に静電容量の高い領域もカバーできるようになり、アルミやタンタルの領域とも重なるほど広い範囲を占めるようになっていく。この趨勢を作りだした最も重要な技術進歩が、本ケースで扱う積層セラミックコンデンサにおけるニッケル内部電極の開発である。以下では、セラミックコンデンサについてより詳しく記述し、なぜニッケル内部電極の開発が重要であったかを述べる。

2.2 積層セラミックコンデンサの構造

セラミックコンデンサには単板型と積層型の2種類がある。積層型は、一組の誘電体と電極からなる単板型を、大容量化するために何層にも積み重ねたものである。今日では積層型のほうが一般的で、セラミックコンデンサの総生産量の9割以上がこの型になっている。そのため、以下でセラミックコンデンサと記述する際、特に断りのない限り基本的に積層型を指すこととする。

積層セラミックコンデンサの構造を図4に示している。銀やパラジウムといった内部電極と、セラミックスの一種で誘電率の極めて高い物質であるチタン酸バリウムとが交互に積み重なった構造をしており、その両端に、回路との接続のための外部電極が形成されている。数 mm^3 ほどの大きさのコンデンサの中に、数10層から数100層もの積層がなされているのである。このような微細な積層構造は、次の製造工程によって作られる。

- ① ペースト状にした誘電体材料をPETフィルム上に薄く塗布し、その上に薄く内部電極材料を印刷する。
- ② 以上の誘電体材料と内部電極材料のセットを、数10層、数100層と積層し、圧着する。
- ③ 所定の寸法でチップ状に切断する。
- ④ 焼成炉で $1200\sim 1300^{\circ}\text{C}$ で焼き、材料を連結させる。
- ⑤ 焼成体の両端に外部電極を印刷する。

これら一連のプロセス技術が進歩するにつれて、より小型で、より多層のセラミックコンデンサが製造できるようになった。例えば1970年代頃に主流だったのは $3.2\text{mm}\times 1.6\text{mm}\times 1.6\text{mm}$ のサイズであった。今日の普及品は $1.0\text{mm}\times 0.5\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ や $0.6\text{mm}\times 0.3\text{mm}\times 0.3\text{mm}$ であり、最小では $0.4\text{mm}\times 0.2\text{mm}\times 0.2\text{mm}$ の製品も既に量産化されている。また、 $3.2\text{mm}\times 1.6\text{mm}\times 1.6\text{mm}$ の積層数を一例に挙げると、1985年には38層だったのが、近年では827層を積層し、1000倍の静電容量を保持できるようになっている。

多層化が進むにつれて一層深刻化して行ったのが、内部電極のコストアップという問

題であった。積層数を多くするほどコンデンサに占める内部電極のコストの割合は大きくなる。電極に用いられていたのは当初は白金であり、1960年代から70年代にかけて、より安価なパラジウムが採用されるようになっていた。しかし電極が白金やパラジウムといった貴金属では、数10層、数100層と積層するとコンデンサがいわば貴金属の塊になってしまい、コストが非常に高くなる。そのため業界では、セラミックコンデンサを大容量化するために、内部電極をより低価格な材料で代替することが望まれていた。その中でも、非常に安価だが、技術的には極めて難しいと考えられていたニッケルを内部電極に使って、十分な信頼性のあるコンデンサを開発することに成功した企業がTDKであった。

3. TDKの概要と沿革

TDKは、1935年、フェライトの工業化を目的に斎藤憲三が設立した企業である。フェライトとは、酸化鉄を主原料として焼き固めて作る磁性体で、強い磁石になるセラミックスの一種である。東京工業大学の加藤与五郎と武井武が世界で初めて発見し、その新材料に注目した斎藤憲三が特許権を譲り受けて設立した会社がTDKであった⁶。TDKは、フェライトの技術を基盤としてカセットテープやビデオテープに代表される磁性製品を展開し、1970年代以降これらが大きな収益源に成長した。磁性製品の技術蓄積は、現在の中核事業の一つであるハードディスク・ドライブ用磁気ヘッドまで受け継がれている。

TDKがセラミックコンデンサを開発し始めたのは1951年からである。この頃、ラジオの需要が急増していたので、ラジオ回路向け部品として、フェライトに加え、供給が不足していたセラミックコンデンサの生産も手がけたのが始まりだった。このセラミックコンデンサの生産を皮切りに、セラミックスの技術を用いた多様な電子部品事業への多角化が進展した。

図5は、TDKの2007年3月期の時点での事業構成を示したものである。連結売上高8620億円のうち、ハードディスク・ドライブ用磁気ヘッド事業が売上の3分の1を占める最大の事業である。これに次いで売上の2割強を占めるのが積層セラミックコンデンサを中心とする電子材料事業である。セラミックコンデンサの売上は1267億円であり、電子材料事業のうち過半を占めている。創業以来、伝統的に磁性製品を中核としてきたTDKであるが、近年ではコンデンサを中心とする電子材料も新しい柱として成長し

⁶ 創業時の社名は東京電気化学工業株式会社といった。加藤与五郎と武井武の所属していた東京工業大学電気化学科にちなんで名付けられた。社名をTDK株式会社に変更したのは1983年である。本稿では便宜上、表記をTDKで統一している。

てきている。

セラミックコンデンサ業界の主要企業としては、TDKの他に、村田製作所と太陽誘電の2社が挙げられる。図6に金額ベースの国内市場シェアを示している。2005年では、村田製作所が業界最大手であり、TDK、太陽誘電がそれに次ぐ位置にある。この上位3社だけで国内市場の約85%を占めており、世界シェアで見ても、過半のシェアを保持しているといわれている。村田製作所も太陽誘電も、誘電体材料のチタン酸バリウムを工業化し、セラミックコンデンサを事業化することから始まった企業で、現在もセラミックコンデンサが売上の3~4割を占める最大の事業である。フェライトを基盤として発展したTDKは、これら2社とは異なる歴史を辿ってきたのであり、ニッケル内部電極の開発に際しても、他社とは違う経路で成果を収めることになった。その経緯を、以下、たどっていくこととする（主な出来事を付表の年表に示す）。

4. 開発・事業化の経緯

4.1. 前史

3つの選択肢

1746年にオランダで発明されたライデン瓶から始まるコンデンサの歴史は、誘電体と電極の材料を変えながら様々な種類のコンデンサが生み出されてきた歴史であった。セラミックコンデンサの原型が発明されたのは1933年のことだった。

開発初期には米国海軍試験所が大きな役割を果たしており、内部電極に白金を使用したセラミックコンデンサが主に軍用に供給されていた。1960年代には、非常に高価な材料であった白金に替えて、パラジウム内部電極のセラミックコンデンサがアメリカで開発され、日本企業も1970年代にその技術を導入していった。

しかし、パラジウムも白金と同様に貴金属であるから、決して安価な材料ではない。大容量化のため電極の層数が増加していくことで電極のコストの問題はますます重要となっていった。そのため、パラジウム製品が市場を形成し始めた70年代の時点で、日米欧の各企業は内部電極材料の改良に向けた取り組みを開始していた。

1970年代から80年代には、次世代の技術として主に3つが考えられていた。①内部電極を銀パラジウム合金に替える、②内部電極をニッケルに替える、③誘電体をリラクサー材料（鉛ペロブスカイト）に替える、という3つの選択肢である。中でも、可能であれば最も望ましいと考えられていたのが②だった。ニッケルの材料価格がこれらの選択肢の中でも最も安かったからである。1980年代半ばころの価格は、パラジウムが1グラムあたり750円、銀70%・パラジウム30%の合金が250円であったのに対して、ニ

ッケルは0.8円だった⁷。

しかしニッケルを内部電極に用いるには難問が立ちはだかっていた。内部電極のニッケルと誘電体材料のチタン酸バリウムは、ともに焼結するには相性が悪すぎたのである。パラジウムのような貴金属と違い、ニッケルは卑金属なので、空气中で焼成すると酸化してしまい⁸、電極の役割を果たさなくなる。そのため酸素濃度を下げて水素気流中で焼結しなければならない。ところがチタン酸バリウムのような酸化物を水素気流中で焼結すると、チタン酸バリウムが還元⁹され、酸素が解離して特性が悪化してしまう。主成分である酸化チタンは特に還元されやすい酸化物材料として知られていた。したがって、ニッケル内部電極を可能にするためには、水素気流中でニッケルとチタン酸バリウムを焼結しても、チタン酸バリウムが還元されないように材料特性を改良すること、すなわちチタン酸バリウムに耐還元性を付与することが求められていた¹⁰。

内外の企業の取り組み

耐還元性に関する先駆的な研究としては、1963年の英プレッシー（Plessey）社のハーバートの基礎研究があった。その後、1975年に米スプラグ（Sprague）社のバーンとメイアーの研究、1981年には蘭フィリップス社のハーゲマンとヘニングスの研究があり、これらの画期的な研究の蓄積をもとに、70年代後半から80年代にかけて、欧米の主要メーカーはニッケル製品の量産化に取り組んだ。日本企業でも、1976年には、村田製作所の坂部行雄らによる耐還元性に関する最初の特許出願があり、それに追随して太陽誘電も早くから研究を進めた。

それらの企業の中で、1970年代半ば、米セントララボ（Centralab）社がニッケル内部電極を商品化し、市場にいち早く投入した。だが、発売された製品は、初期特性は良好だったものの、寿命が短いという致命的な問題を露呈する。コンデンサの使用から半年もしないうちに、コンデンサが半導体化し、電気を蓄える機能を失って電気が流れるようになってしまうのである。これが原因で、回路がショートして火を噴くという事故が頻発した。事故を受けて、量産化を始めていたセントララボなどのメーカーはニッケルの製品化を断念し、アメリカの大手コンデンサ・メーカーは銀パラジウムの開発へと方向を転換した。

⁷ パラジウムの価格はピーク時（2000年頃）には4000円を超えるまで上昇する。

⁸ 卑金属はイオン化傾向が水素より強く、空气中で熱すると容易に酸化される。

⁹ 還元とは水素と結合して酸素が奪われることをいう。

¹⁰ こうした条件を克服する難しさについて、ニッケル内部電極の先駆的研究者であった村田製作所の坂部行雄（後述）は「矛盾だらけの仕事」と形容し、「理論、頭で考えていたのではできないですよ、ニッケル積層というのは」と語っている。

これに対し、日本の主要企業はニッケルの開発を継続しつづけていた。村田製作所は、多数のセラミックス技術者を投入して、銀パラジウムやリラクサーの開発を並行して進めながらも、ニッケルの開発を続けた。太陽誘電はニッケルだけに開発努力を集中した。太陽誘電はそもそも積層セラミックコンデンサの事業化に出遅れ、パラジウム製品ではほとんど実績を残せなかった¹¹。ニッケルの実用化によって市場地位を逆転することを企図していた。

1982年、村田製作所はディップ品によるニッケル製品の生産を始めた。ディップ品とは、誘電体の厚みを厚くし、しかも通常のチップの上に樹脂を塗装して信頼性を高めたものである。誘電体を厚くすることで、大容量化はできなくなるが、その代わりに寿命を数年は確保できる。1984年には太陽誘電がディップ品ではなく通常のチップ型を発売し、日本では村田製作所や太陽誘電が少しずつニッケル製品の市場展開を始めつつあった。ただし依然として寿命の問題は解決されておらず、ニッケル製品が使われたのは、寿命の問題が深刻には響かない一部の家電などの市場に限られた。

TDKは他社より数年後れ、1980年代に入ってからニッケル内部電極の開発を始めた。TDKが意図していたのは、今日のようにニッケルでパラジウムを完全に代替するというものではなかった。パラジウムの市場の一部だけでもニッケルに置き換えてみたいというものだった。少しでも安くするという意図から、次世代の技術としては銀パラジウムやリラクサーも並行して検討していた。パラジウムは高価な材料であり、「コンデンサ1個に1セントくっつけて売っていたようなもの」と言われるほど、既存の製品では収益をあげるのが難しかったからである。

TDKのコンデンサ事業の歴史

TDKにおいても、本格的なニッケルの実用化はなかなか進まなかった。それどころか、TDKは、既存のパラジウム製品では一定の市場地位を確立していたものの、85年にはパラジウム製品で品質不良問題を起こし、コンデンサ事業は危機的な状況に陥った。TDKにとっては、ニッケルの開発以前に、パラジウム製品の問題解決を行うことが急務となった。だが結果的には、このパラジウムの問題解決に関わった技術者が後のニッケルの実用化の成功を導くことになる。

¹¹ 1970年代に起きた「角丸戦争」と称される規格競争で劣勢に立たされたことで、太陽誘電は積層セラミックコンデンサの開発に出遅れていた。1970年代、電子機器の軽薄短小化に合わせて、電子部品をリード線のないチップ型にすることが要求された。この際に太陽誘電は実装の容易な円筒型コンデンサの普及に尽力した。しかし、円筒型よりも小型で大容量にすることが可能だった角型コンデンサがその後の主流となったことで、セラミックコンデンサ市場における太陽誘電の技術開発は一時的に競合から遅れをとるようになっていた。

TDK は、1968 年からチップ型の積層セラミックコンデンサ開発に着手して以降、1971 年には米 ACI 社との合弁で TDK-ACI を設立して技術導入を図るなど、積極的な技術蓄積を行っていた。その大きな成果が、1977 年に松下電器産業の薄型携帯用ラジオ「ペーパーラジオ」にパラジウム内部電極積層セラミックコンデンサが採用されたことである。これは積層セラミックコンデンサが民生用機器に導入された最初の例となった。この頃から、TDK のコンデンサ事業は、コンデンサ事業部と、TDK-ACI を前身とする秋田県にある主力生産工場の TDK-MCC、それに千葉県にある開発研究所の三者が関与して取り組むようになった¹²。パラジウム製品で村田製作所と肩を並べる地位を確立した TDK は、1980 年代初頭に、開発研究所セラミック研究部でニッケル内部電極の開発テーマを発足する。84~5 年には TDK-MCC に量産設備を設置し、立ち上げのためにセラミック研究部の開発チームも秋田へ異動した。

ところが 1985 年頃、TDK のパラジウム製品に大規模な品質不良問題が発生してしまふ。事業は「瀕死の重傷」ともいわれるほど致命的な状況に陥った。セラミックコンデンサはまだ TDK 全体の売上の数パーセントに過ぎなかったから、経営陣からは事業をやめるようにという声も聞かれたという。このとき、問題解決のため 1985 年の 12 月に千葉県の開発研究所から秋田に派遣されたのが、後にニッケル内部電極化の開発で中心的な役割を果たす野村武史であった。

野村は、元々はコンデンサでなくフェライトの開発を行っていた。1980 年に入社して以来、開発研究所フェライト研究部に所属していた。1985 年 12 月にパラジウム製品の不良対策を命じられ、秋田県にある TDK のコンデンサ事業部に出向し、コンデンサの開発に携わるようになった。野村はコンデンサを専門とはしていなかったため、この時点では材料面の改良には関与しなかった。その代わりに、電極を印刷する際の条件や、外部電極を形成する時に用いる電気メッキの改良など、主に生産工程に関する改良に取り組み、半年ほどで不良対策に成果を収めた。野村の貢献も手伝って、パラジウム製品は「一時のどん底を脱して、技術的にはいい勝負」という水準までに回復した。

事業部でのコンデンサの問題解決に成果を残した野村は、1986 年 5 月に開発研究所に戻ると、C プロジェクトというチップ開発のプロジェクトの立ち上げに取り組んだ。これはチップコンデンサやチップインダクタなどの開発を担うために既存の研究組織の外に設けられたもので、数名の新人研究者が集められてスタートした。野村は、ここで従来のフェライトに加えて、コンデンサ事業部と共同でパラジウム製品の生産工程の

¹² コンデンサ事業部は、現在ではコンデンサ・ビジネスグループと呼ばれており、またかつてはセラミック事業部の一部であったが、本稿では便宜上「コンデンサ事業部」という名称を用いる。

次世代技術の開発などにも携わるようになった。

パラジウム製品の品質不良や、アメリカでの過去のニッケル製品の事故を考慮して、同じ時期に進行していた TDK-MCC でのニッケル製品の量産化は安全性に配慮して慎重に始められていた。TDK は、1987 年頃からディップ品のニッケル製品を、信頼性に対する要求がそれほど高くない市場、例えばブラウン管テレビ、ラジオ、ビデオなどに対してごく少量販売し始めた。しかし、日本市場では村田製作所や太陽誘電が市場の開拓で先行しており、そのうえディップ品が利用される市場は未だ小さかった。TDK が生産していたニッケル製品は 80 年代後半にはほとんど収益に結びつかない状況であった。

4.2. TDK の革新

開発の立て直し

転機が訪れたのは 1989 年である。開発研究所の野村武史らのチームが新たにニッケル内部電極の開発に参加し、開発の立て直しが図られたのである。

コンデンサ事業部および TDK-MCC でニッケルの開発を行っていたチームは、ニッケル製品の市場を広げるためにコンデンサの大容量化に向けた取り組みを進めていた。しかし大容量化するために誘電体の厚みをパラジウム製品と同等に薄くすると寿命が急激に短くなるという問題が相変わらず立ちはだかっていた。同じ誘電体の厚みでは、パラジウムが計算上は 3000 年の寿命を持つのに対して、ニッケルでは 1 年程度しかなかったのである。なぜ寿命が短くなるのか。そのメカニズムを明らかにすることが大きな課題であった。そこで開発チームは開発研究所で信頼のあったフェライト研究部部長の奥谷克伸に開発の支援を依頼した。

依頼を受けた奥谷が白羽の矢をたてたのが、C プロジェクトでパラジウム製品用の新工法の開発を終えていた野村らのチームだった。1989 年 4 月、野村をリーダーとして、ニッケル内部電極積層セラミックコンデンサの「寿命のメカニズムの解明」が始まった。このとき、C プロジェクトにはフェライト研究部とセラミック研究部のメンバーを合わせて 20 人ほどの技術者が関わっていた。このうちコンデンサに関与していたのは野村を始めとする 5 人程度で、その他はフェライトなど別途の技術開発に従事していた。

開発テーマは受けたものの、実のところ、野村はニッケルの将来性を有望視してはいなかった。既存のパラジウムは高価だが信頼性が抜群に優れているので、依頼の時点では野村はパラジウムの小型化・大容量化をさらに推し進めていこうと考えていた。また、ニッケルと、銀パラジウム、リラクサー材料という 3 つの次世代技術のうち、第三の選択肢のリラクサー材料は特に可能性があるように思われた。リラクサー材料は、チタン酸バリウムよりも誘電率が高い唯一の材料であり、約 2 倍の誘電率を持つ。そのため誘

電体をリラクサー材料に替えて銀パラジウムや銅で電極を形成すれば、いっそうの大容量化にも対応可能であろうと期待された。誘電体はチタン酸バリウムのままで内部電極を銀パラジウム合金に替えるという第一の選択肢も悪くなかった。銀パラジウムでは価格の面でも性能面でもやや中途半端になるが、実用化に伴う困難はそれほど大きくないという見通しを持っていた。

これら2つの選択肢と比べると、ニッケルで信頼性の高い内部電極を作るという第二の選択肢は実現が難しい、と野村は考えていた。当時の常識では、チタン酸バリウムとニッケルを水素中で焼成することの困難は明白だった。それでも野村らは依頼の通りにニッケルの開発に着手した。それは野村の「仕事と飲みの誘いは断らない主義」という信条のためもあったし、技術者としては依頼に対して必ず何らかの回答を出す必要があると考えていたからでもあった。野村と、その部下としてニッケル内部電極の開発に携わった中野幸恵は、ニッケルに対する当時の見通しを振り返って次のように述べている。

野村：信頼性という意味では私はこれ（パラジウム）どっぷりでしたけれども、だけでもこれでいけるところまで薄くしようという気持ちは当時もちろんありましたよ。だけれどもそれで最後までいけるとは思っていなかったわけです、それは当然。ニッケルで本当に信頼性の高いものが出来るんだったらこっちの方が良いに決まっています。だけどニッケルで信頼性が高いものができるのかという感じがありました。ですから一番最初は反対派でした。だけど要請がある以上、やらなきゃいけないなというつもりで、みんなで一緒にやったわけです。

中野：駄目なら駄目という結果を出さなければいけない。どうやっても駄目でしたという結果を出さなければいけない。やらずに駄目だということは技術屋はできないです。

ニッケルには反対だったが、技術者としての信念に基づいて野村らはニッケル内部電極の開発を開始したのである。ただし自らの技術的な見通しを踏まえて、リラクサーなどの代替技術の開発を「保険」として進めておくことも必要であると考えていた。そのため、ニッケルの開発に着手した1989年には、野村自身がリラクサーと銀パラジウムの開発も並行して行っており、1990年に入ってから2つの技術開発のためにそれぞれ2名ずつの技術者を新たに配置した。

寿命の問題の解明と解決策

ニッケルは実現困難だと考えていた野村にとって驚きだったのは、水素気流中でチタン酸バリウムを焼結するという試みについて、ハーバートを始め、バーン、メイアー、坂部などの研究者が既に基礎研究を蓄積していたという事実だった。パラジウム製品が生産を開始して間もない時期に、次世代を見据えた研究が既に蓄積されていたことは、野村の開発意欲を触発した。

先行研究の示す通りにコンデンサを作れば、ニッケル内部電極でも初期の特性を満たすことはできた。しかし寿命がパラジウムと比較にならないほど短い。長年多くの技術者を悩ませてきたこの問題に対して、野村らは2つの解決法を見出した。それは、着手してからわずか半年後のことだった。

それほど短期間に成功を収めることができた要因は素人としての強みにあった。野村はもともとフェライトの技術者であり、誘電体材料そのものの組成に関しては「ずぶの素人」である。しかし素人であったからこそ、通念の枠内にとらわれずに幅広い試みを行うことができ、誘電体材料の専門家が積み重ねてきた試行錯誤のプロセスを大幅に短縮して成果に到達することができたのである。

見いだされた第一の解決策は、焼き方を変えるということであった。焼成はフェライトとも共通する重要な工程であったため、野村は焼成条件を様々に変えて結果を観察することに最初に取り組んだ。まず、最適な水素濃度を確かめるための実験を行った。その結果、水素濃度がやや高めの方が、チタン酸バリウムを還元させやすい条件のはずにもかかわらず、寿命が長くなるという意外な結果を得た¹³。これに加えて、焼いた後でもう一回、水素濃度をやや下げ、焼結温度 1200~1300℃よりも一段低い 1000~1100℃程度で焼くと、チタン酸バリウムから欠けた酸素を補い、寿命を延ばせることを発見した。このような焼成条件の変更によって、寿命を従来の 10 倍に延ばすことが可能になった。

第二の解決策が、材料を変えるということであった。焼成条件を変えるというフェライトと類似したアプローチではなく、チタン酸バリウムの化学的組成そのものに本格的に取り組んだのである。これが最も重要なブレイクスルーとなった。野村らは、チタン酸バリウムの特性を改良するための添加物として、毒性を持つものも構わず周期律表で入れられる限りの物質をすべて端から添加して、コンデンサを作って評価するという作

¹³ 寿命が延びた原因は、材料のニッケルに含まれる鉄やマンガンなどの不純物の挙動による。チタン酸バリウムとニッケルという組み合わせで焼いて初めて起きる現象であり、ニッケルとの組み合わせを必ずしも想定していたわけではなかった先行研究では、こうした結果は得られていなかった。

業を実行した。その結果、希土類元素のイットリウムを添加したとき、寿命をさらに10倍以上延ばせるということを発見した。

添加物として周期律表の物質を端から入れるという試みは、当時としては常識外であった。誘電体材料の領域では基礎研究が発達していたので、ある特性を得るためにどの物質を添加すべきかは既に自明であると考えられていたからである。野村は当時の一般的な考えについて次のように語っている。

アクセプターとかドナーとか、ちょっと頭が、この分野で気が利いている人は、全部入れないで、これは入れちゃ駄目とか、これは入れていいというのがわかるわけですよ。…(中略)…この分野で常識がある人だったらこれは入れちゃ駄目ということで実験しないわけです。

とりわけイットリウムのような希土類元素は、チタン酸バリウムに耐還元性を持たせるのとは全く逆の働きをする添加物だと考えられていた。普通、希土類を添加すると、チタン酸バリウムは半導体化する。すなわちチタン酸バリウムに電気が通るようになるのである。これは通常のコンデンサで電気を蓄えるために絶縁性を保つようにするのは正反対の作用である。希土類の添加がなされるのは、半導体コンデンサという特殊なコンデンサを作る場合に限られた。そのため通常のセラミックコンデンサに希土類を添加するという事は常識外れであり、いわば「タブー」として認識されていたのである。

しかし、一般的なセラミックスを対象として蓄積されてきたこうした常識は、ニッケルとチタン酸バリウムという組み合わせを必ずしも前提としていたわけではない。野村らは「素人」として、焼き方にせよ、材料の組成にせよ、従来の常識を超えた非常に広範囲の実験を行った。それによってニッケルとチタン酸バリウムという組み合わせで実験して初めて生じる現象を発見し、寿命の問題を解決することができたのである。開発に取り組んだのは後発でありながら、野村らの開発チームが常識外の様々な試行錯誤を一気に進めることで短期間のうちに技術開発の最先端までキャッチアップすることに成功したのだった。

1989年に達成したこれらの2つの成果により、ニッケル製品の寿命は合計で約100倍以上に伸び、パラジウムと同等の水準になった。野村らはこれを報告書にまとめ、寿命の問題に対する解決策としてコンデンサ事業部に提示した。寿命の問題が大幅に改善したことにより、1990年4月、Cプロジェクトは新たに「大容量コンデンサの開発」というテーマを定め、ニッケル製品のいっそうの大容量化と、量産への移行を推進することを次の目標とした。量産化への準備が本格的に進展し始めた1990年の後半には、野

村は銀パラジウムやリラクサーといった代替技術の開発打ち切りを決断し、ニッケルに開発努力を集中した。

量産準備、そして事業化へ

こうして技術的課題をかなりの程度克服できたとはいえ、研究段階での成功によって即座に量産が可能になるわけではない。実験用の小さな焼成炉で設定した条件を、工場の大規模な焼成炉で再現するのは決して容易なことではない。商品化のためには、研究所での数百グラム単位の実験ではなく、工場でのトン単位の実験が不可欠であった。

研究開発段階で得られた成果を量産段階に移行する際には、技術的な問題や、組織上の問題が発生する場合がしばしばあるけれども、TDKのニッケル製品に関しては比較的円滑に量産への移行が進んだ。野村らの前にニッケル内部電極を研究していたチームが既にコンデンサ事業部で量産化に向けた努力を続けていたためである。また、1985年には量産設備を設置していたので、大規模な実験を行うために新規の設備投資を行う必要がなかった。ただし、現場は実験のために設備を空けることに抵抗感を持っていた。

「人様が開発したものを苦勞して量産しても自分の手柄にはなりにくい」という心理もある。「自分で開発したものは自分で立ち上げる」と考えた野村らは、1991～92年ごろから秋田に随時足を運び、コンデンサ事業部やTDK-MCCの報告会でニッケル製品の説明を行い、量産化に向けた実験を行うよう説得した。

開発チームは、ニッケル製品について対内的な説得を行うだけでなく、対外的にも説明の努力が必要となった。かつてのセントララボの失敗から、販売当初は顧客のニッケルに対する抵抗感が強くなかなか普及しなかったためである。野村は、寿命向上のメカニズムに関する仮説を学会で展開し、話題を呼んだ。また開発チームのメンバーが営業と一緒に顧客のもとに赴き、ニッケル製品の安全性について技術面の説明を行った。これらの努力が寄与して、ニッケル製品は自動車用などで採用されるようになり、徐々に普及が始まっていった¹⁴。

事業化に向けた開発の過程でニッケル製品の信頼性がさらに高まったことも、普及を助けた。1991年、開発チームは寿命を延ばすためのもう一つの方法を発見していた。焼結助剤として使われていたシリカの添加量を少し減らすことで、チタン酸バリウムの

¹⁴ ニッケル製品を比較的早期から受容したのが自動車業界だった。パラジウムが貴金属ゆえに持っていたマイグレーションという問題がニッケルにはなく、自動車メーカーはニッケルの信頼性を評価していた。

微細構造を制御するという方法である¹⁵。これで寿命がさらに 10 倍延び、ニッケル製品はパラジウムよりも長い寿命を確保できるまでに至った。寿命の問題が完全に解決したことで、ニッケルによるパラジウム製品の代替が加速し始めた。TDK では、1992 年以降、セラミックコンデンサの様々な製品ラインのニッケル化が推し進められる。

エージング問題の解決

様々なパラジウム製品をニッケルで置き換えていくのに伴って、寿命以外の新たな問題への対応も必要となった。当初開発を進めていたのは F 特性という製品ラインだった。F 特性のコンデンサは、誘電率が高いために比較的簡単に大容量化することができる。しかし温度特性が悪く、周囲の温度変化によって容量が変化しやすいという短所があり、市場が小さい。そこで野村らのチームは 1992 年から市場のボリュームゾーンである B 特性のコンデンサのニッケル化に着手した。B 特性は、低温から高温に至るまで容量が安定しており、低温や高温で容量が落ちてしまう F 特性と比べると温度特性が優れた製品であり、その分市場は大きい¹⁶、より厳しい規格が定められていた。このため、B 特性を製品化する上ではエージングという新たな問題が生まれてきた。

エージングとは、経年とともにコンデンサの静電容量が低下していくという現象である。これは寿命の問題とは異なる。寿命とはある年限が経つとコンデンサが壊れることをいうのに対して、エージングは時間が経つにつれ少しずつ性能が低下していくことを指す。エージングが甚だしい場合、コンデンサを作ってから出荷するまでの間に静電容量が低下し、B 特性の規格を満たすことができないという事態が起こるほどだった。このエージングの問題に直面したコンデンサ事業部は、問題解決を再び野村らに依頼した。

エージングの問題に取り組んだ野村は、1993 年の正月に突然、全く新しいエージングのモデルの着想をえた¹⁷。正月の夜にひらめいた野村は、そのまま会社に直行した。

¹⁵ 坂部の研究によって、チタン酸バリウムの成分のうちバリウムをチタンより少し多くしておくことで、耐還元性を持たせることができるということが既に示されていた。しかし野村らが焼結したものを分析すると、誘電体を形成する粒子と粒界という 2 つの部分のうち、粒子の中はバリウムが多くチタンが少なくなったが、粒界の部分はバリウムを入れていたはずなのにチタンの方が多くなっていた。この部分が還元されるために寿命が悪化するのだろうと考えられた。粒界はシリカ成分でできているため、焼結助剤として用いられていたシリカの添加量を変えることで、粒界の部分もバリウムが多くなるようにできるということがわかった。

¹⁶ 例えば、発熱する CPU 周りなどでは F 特性のコンデンサは使えない。現在では、TDK のセラミックコンデンサの販売数量のうち 76%が B 特性で、F 特性は 13%である。

¹⁷ 1948 年のマークスの研究以来、誘電体の静電容量は時間経過とともに直線的に低下するものと長く考えられていた。しかし実際のエージングの推移は直線とはやや異なっているようだった。また、野村が専門としていたフェライトの分野では、透磁率が時間経過とともにリヒター型という逆 S 字型の緩和曲線を描くことが知られていた。これらを手がかりとして、野村は誘電体のエージングもリヒター型を描き、電圧をかけていない自然状態では通常のリヒター型の緩和曲線で、

社内で当時最速のコンピュータでエージングの正確なモデルを算出してみると、野村の仮説は裏付けられた。エージングの原因の特定は容易になり、チタン酸バリウムの粒子径を小さくしたり、結晶構造を変えたりすることでエージングの解消が可能になった。

寿命に加え、エージングの問題にも一定の解決を得たことで、F 特性に加えて、B 特性のニッケル化が進行した。さらには別の技術開発によって、F 特性、B 特性といった容量の大きなコンデンサだけでなく、小容量だが温度特性が非常に良好な低誘電率系のコンデンサのニッケル化も始まるなど、ニッケルの製品ラインは次第に拡大していくことになる。

5. 結び

5.1 事業成果と競合他社の動向

1996 年には、TDK でのニッケル製品の売上高がパラジウム製品を越えて、パラジウムからニッケルへの内部電極材料の世代交代が鮮明になった。図 7 は TDK における製品別の生産金額と、セラミックコンデンサ市場での TDK の世界シェアの推移である。パラジウム製品の売上が漸減し、ニッケル製品の売上が 90 年代を通して急拡大している。また、ニッケル化の進展に伴って、TDK の世界シェアも 1992 年の 13% から 2001 年の 23% まで着実に拡大している。ニッケル化の成功によって、TDK はセラミックコンデンサ市場での強い競争力を持ったのである。

ニッケルを内部電極としたセラミックコンデンサが急速に成長した背景には、90 年代中頃から、携帯電話や薄型テレビなど様々なデジタル機器が生まれたことや、コンピュータの高速化と普及が進んだことがある。大量のコンデンサの需要が生じた時期に、ちょうどニッケル化によってセラミックコンデンサの大幅な低価格化が可能になったのである。パラジウムの地金の商品価格が 1995 年前後に高騰したことも、ニッケルへの代替を促す追い風となった。安価で信頼性の高いニッケル製品の急激な普及は、デジタル機器の市場成長を促すとともに、アルミ電解コンデンサなど他種のコンデンサの市場をセラミックコンデンサが代替するという結果ももたらした。

日本では、コンデンサを主力事業とし、ニッケル内部電極の開発に TDK よりも先行して開発を進めていた村田製作所と太陽誘電も、1990 年代に入ってから TDK とは異なる経路からニッケル製品の長寿命化で成果をあげていった¹⁸。他方で、ニッケル化を実現

電圧をかけた状態ではリヒター型を 2 つ組み合わせた緩和曲線ならば、実際のエージングの推移と一致するのではないかというアイデアに到達した。

¹⁸ 両社ともやはり希土類の重要性に着目し、ニッケル内部電極の長寿命化に向けた取り組みを進めた。添加物として用いられたのは TDK のイットリウムではなく、村田製作所はジスプロシウ

困難と考え、銀パラジウム製品の開発に転じていた欧米企業は、日本企業によるニッケル化に追随できず、急速に競争力を失った。1990年には京セラがAVXを買収し、1992年には総合電子部品メーカーの米ビシェイ社がスプラーグを買収、99年にはフィリップス傘下に入っていたセントララボがBCコンポーネンツとして分離されるなど、他社に買収されたり、あるいはコンデンサ事業から撤退したりする企業が相次いだ。

欧米企業の後退も相まって、いまや村田製作所、TDK、太陽誘電の日本企業3社がセラミックコンデンサの世界市場の過半、大容量品に限れば8割とも言われるシェアを占めるまでにいたっている。

5.2 TDKの革新の背景

ニッケル内部電極の開発に競合より遅れて着手したTDKは、なぜ長寿命化に短期間で成功したのだろうか。ここでは特に2つの点を指摘しておきたい。

第一に、野村らのチームは「素人」としての立場を活かし、非常に広範囲の実験を行ったことが開発成功に大きく寄与した。野村の部下として、開発チームでニッケル内部電極の開発に携わった中野の言葉は示唆的である。

かなり広範囲なことはやりましたよ。焼き方でも、添加物を周期表でやるというのでも。今までやってきたことからちょっと広げてやったりとかじゃなくて、かなりドラスティックに。例えば、還元雰囲気中の焼成のものなのに空気中で焼成したらどうなるかとか、そういうことをやってみるんですよ。…(中略)…普通の人がやらないところまでやっていたのかもしれない。周期表を全部ふるなんて、なかなかそういうことを今だにやりませんね。今も困っていても誰もそういうことは言いませんね、そういえば。困っているから視野が狭くなっちゃうんですね。早くしなきゃいけないから狭いところだけ一生懸命にやって。下がって大きくやったところが今とは違うような気がする。

問題解決を急ぎ、焦点の絞られた実験を行うだけでは、野村らの開発成果は得られな

ム、太陽誘電はホルミウムと、同じ希土類に属する別の元素であった。なお、京セラの藤川信義は、1980年代後半に内部電極のニッケル化における希土類元素の添加の効果を明らかにしているが、これは長寿命化を目的とした開発ではなく、また学会では当時の常識を否定するものとして批判を受けている。ただし、太陽誘電におけるセラミックコンデンサ開発の中心人物の一人であった茶園広一は、藤川の学会発表は希土類元素の添加の重要性を同社内で再確認させるものであったと振り返っている。

かった。直面している問題を既存の理解の枠内だけで捉えず、多様な可能性を視野に入れていたことが、開発の成功に結びついたのである。TDKにおいてこのような開発が可能となったのは、野村個人が優れた技術者であったことはもちろん、そもそもフェライト技術者だった野村がコンデンサ開発を任されるということがときに起こるような柔軟性がTDKの組織にあったためとも考えられる。専門化が進んだ硬直的な組織ではこのケースのような成果は生まれなかつただろう。

第二に、「素人」の開発努力だけで成果に結びついたわけではない。ニッケル製品がアメリカにおいて事故を起こし、アメリカ企業はニッケルの開発から撤退したにもかかわらず、後発のTDKも含めて日本企業がニッケルの開発を諦めずに継続したという事実は興味深い。

アメリカ企業が中止したニッケル電極の開発をなぜ日本企業は続けたのだろうか。一つの理由として、自社で材料まで内製していたかどうかの違いが考えられる。アメリカ企業は材料のチタン酸バリウムを外部から購入しており、しかも非常に大きなロットでの取引が慣行となっていた。チタン酸バリウムの品質は必ずしも安定せず、その特性を改良するという試みには制約があった。それゆえアメリカ企業がチタン酸バリウムの水素中での還元を避けるために試みていたのは、チタン酸バリウムに耐還元性を持たせることではなく、そもそも還元が起きないように炭酸ガスなどの気体の中で焼結するという方法であった。

これに対して村田製作所、太陽誘電、TDKは、チタン酸バリウムを内製しており、材料の特性の改善に取り組みやすい状況にあった。これらの企業で材料面からのアプローチがとりやすかったことが、日本のコンデンサ業界では内部電極のニッケル化の開発努力を支えたのかもしれない。加えて、そもそもこれらの日本企業が長期にわたって開発努力を継続した点にも注目すべきだろう。村田製作所の坂部がチタン酸バリウムに耐還元性を持たせる先駆的な研究を行った1975年から、ニッケル製品の市場が成長期に入る1995年まで、20年もの時間が経過している。野村らのチームが比較的短期間に成果を出すことができた背後には、競合他社のそれまでの十数年にわたる先行研究の試みや、コンデンサ事業部で小規模ながら生産に取り組んでいた経験など、社内外の有形無形の蓄積があったことを忘れてはならないだろう¹⁹。

¹⁹ 村田製作所の坂部は、非常に長期間にわたって成果の不確実なニッケル内部電極の開発が同社で続けられたことについて、「そういうやらないかんこと、まして本業の最先端の仕事について、なんぼ人をかけたってなんぼ金を使うたって上は文句を言わない。むしろ全然違うことをやったら文句を言われる」と回想している。

5.3 新たな競争

困難と思われたニッケル化が実現したことで、コンデンサ業界における競争の構図は大きく変化した。技術面では、ニッケル内部電極の実用化により開発競争の焦点は材料面からプロセス面に移行していった。ニッケル化に取り組んでいた当初の段階ではチタン酸バリウムに耐還元性を持たせることが最大の課題であり、材料技術が開発競争の焦点だった。それが解決していったその大容量化が求められる段階になってからは、誘電体を薄くし、それを構造欠陥のないように積層するというプロセス技術の開発が競争上重要になっている。

事業面では、韓国、台湾メーカーからの追い上げが激しくなっている。ニッケル化の成功により、アメリカ企業は競争力を失い、現在のセラミックコンデンサ市場では日本企業が圧倒的なシェアを占めている。しかし最近になって、韓国や台湾のメーカーが小容量のセラミックコンデンサで一定のシェアを獲得し始めている。日本企業が数年分先行しているといわれる技術水準の差をどう活かし、いかに国際競争力を維持するか。これが TDK をはじめとする日本企業の重点課題となっている。

(文中敬称略)

参考文献

茶園広一「積層セラミックコンデンサ製造に関する技能・技術」『精密工学会誌』第 68 卷 1 号、2002 年、31-34 頁。

村田製作所編『驚異のチタバリ：世紀の新材料・新技術』丸善、1990 年。

村田製作所編『セラミックコンデンサの基礎と応用』オーム社、2003 年。

日本エコノミックセンター『'07 コンデンサ市場の実態と将来展望』日本エコノミックセンター、2006 年。

野村武史「Ni 内部電極積層セラミックコンデンサ」『ニューセラミックス』第 10 卷 3 号、1997 年、7-15 頁。

相良岩男『よくわかるチップ型電子部品のできるまで：R（抵抗器）・C（コンデンサ）・L（インダクタ）、2004 年。

坂部行雄「脱貴金属が可能になった：ニッケル電極積層磁器コンデンサー」『セラミックス』第 22 卷 10 号、1987 年、866-872 頁。

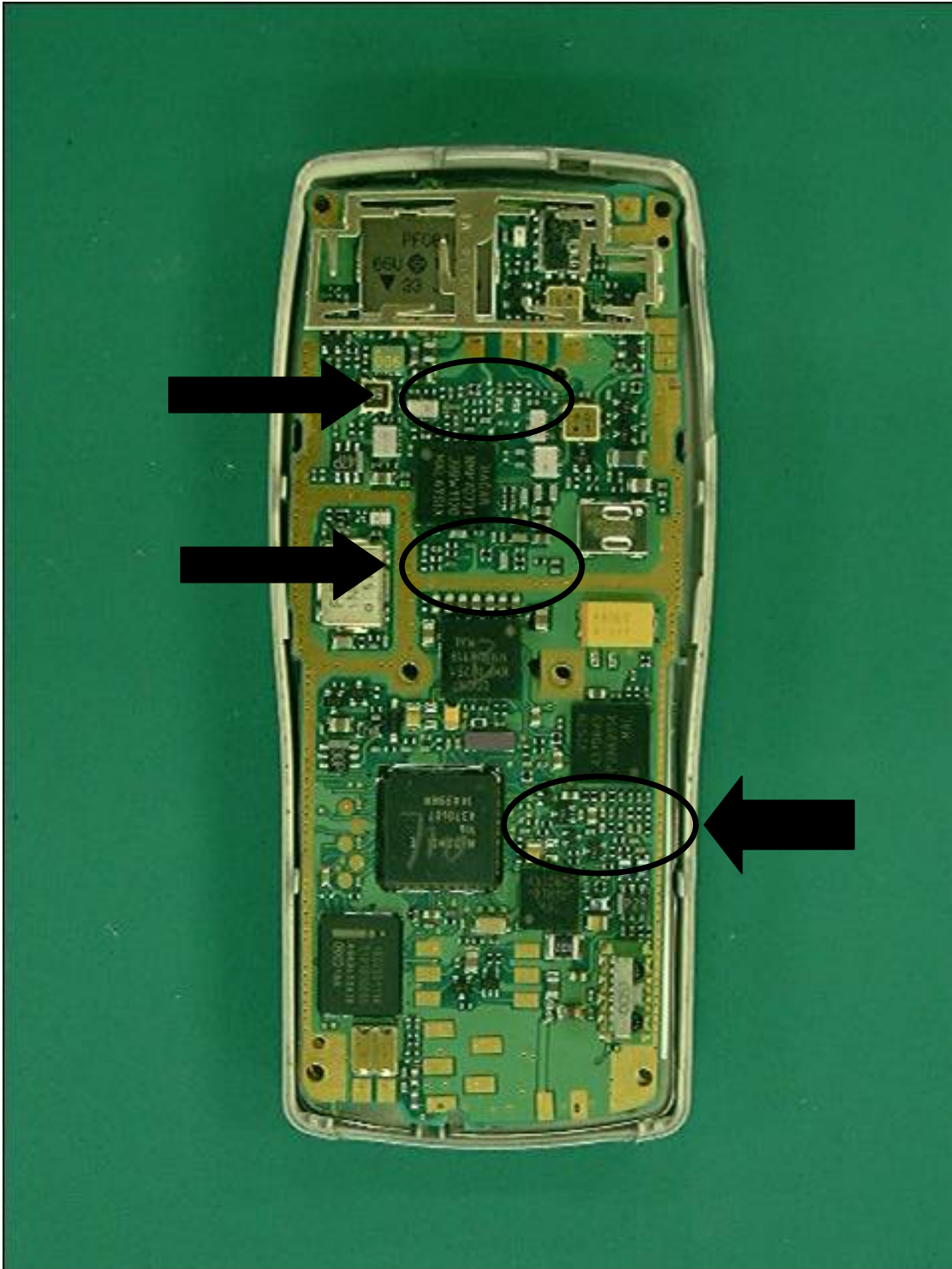
坂部行雄「プレイバック・セラミックストーリー(1)ニッケル積層コンデンサーの誕生」『セラミックス』第 38 卷 4 号、2003 年、820-824 頁。

太陽誘電株式会社社史編纂事務局編『太陽誘電太陽誘電 50 年史：やきものから高機能セラミックスへの道のり』太陽誘電株式会社、2002 年。

TDK 株式会社社史編纂室編『TDK60 年史、1935-1995：夢・勇気・信頼』TDK、1995 年。

図1 携帯電話端末

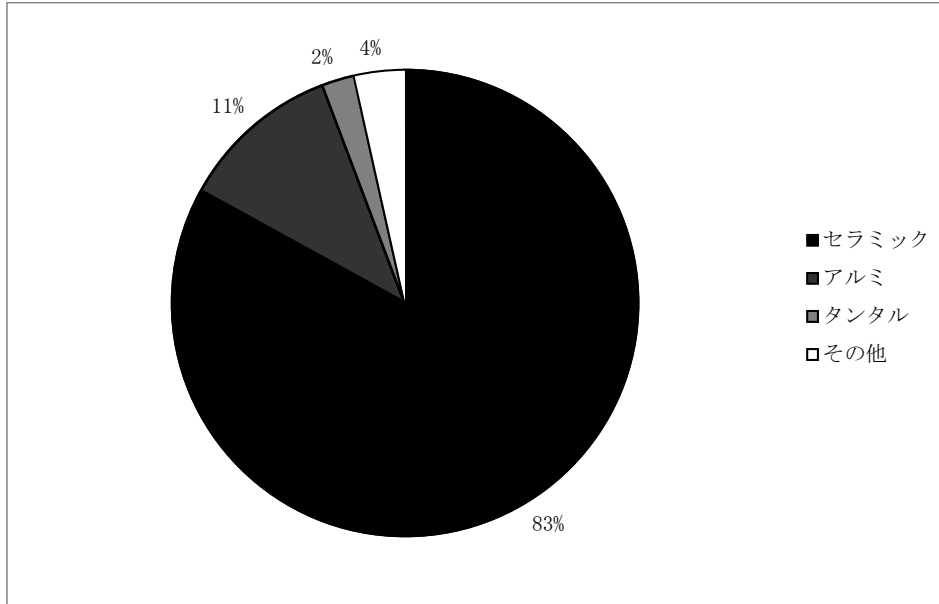
(囲った部分に見える小さい粒状のものが積層セラミックコンデンサである)



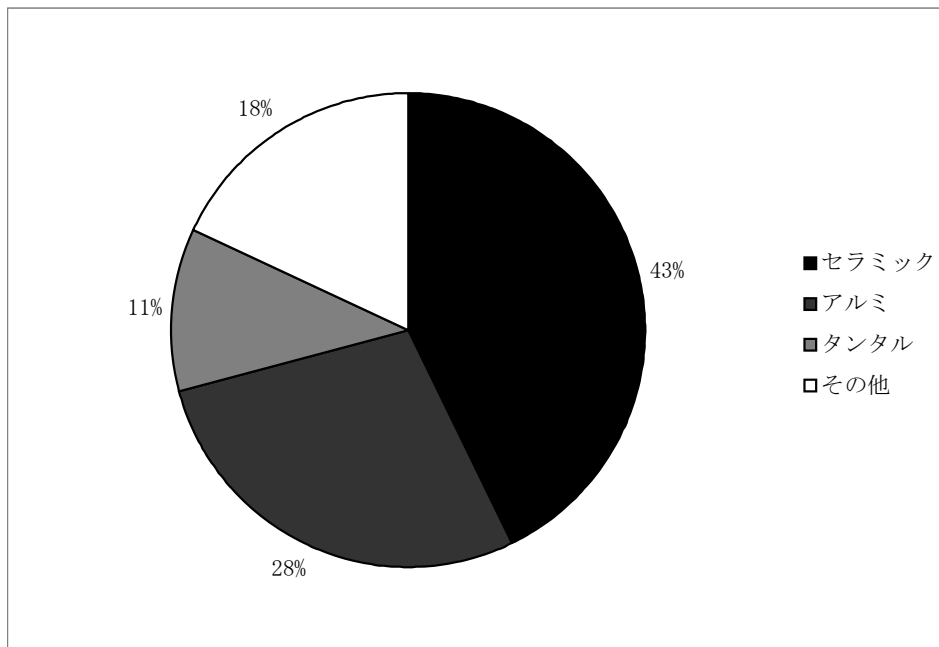
資料：TDK

図2 各種コンデンサの数量シェアおよび金額シェア

(1) 数量シェア



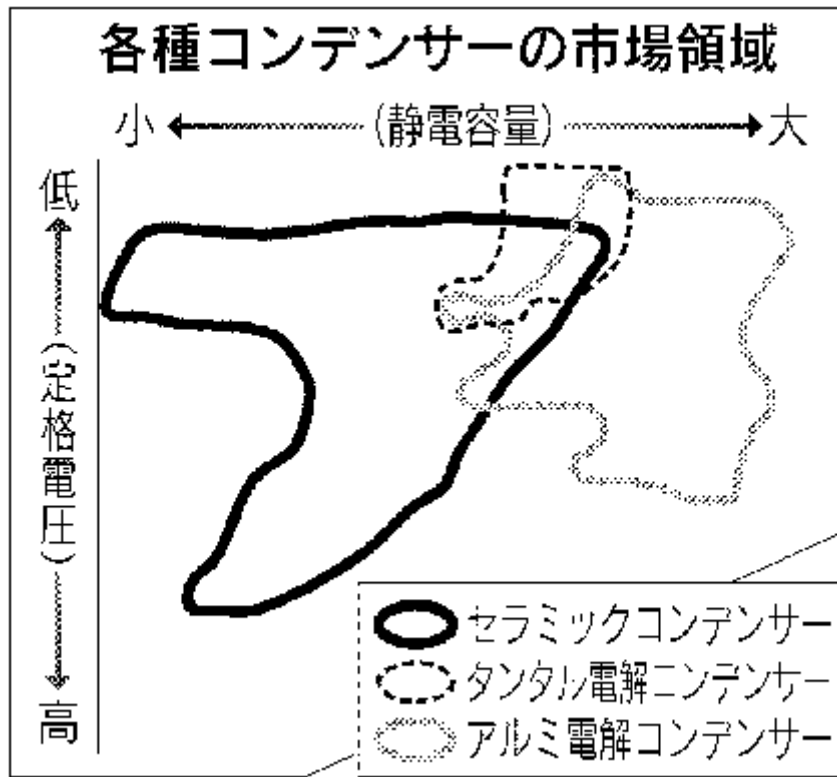
(2) 金額シェア



注：日本のコンデンサ・メーカー主要 25 社を対象としたデータ。

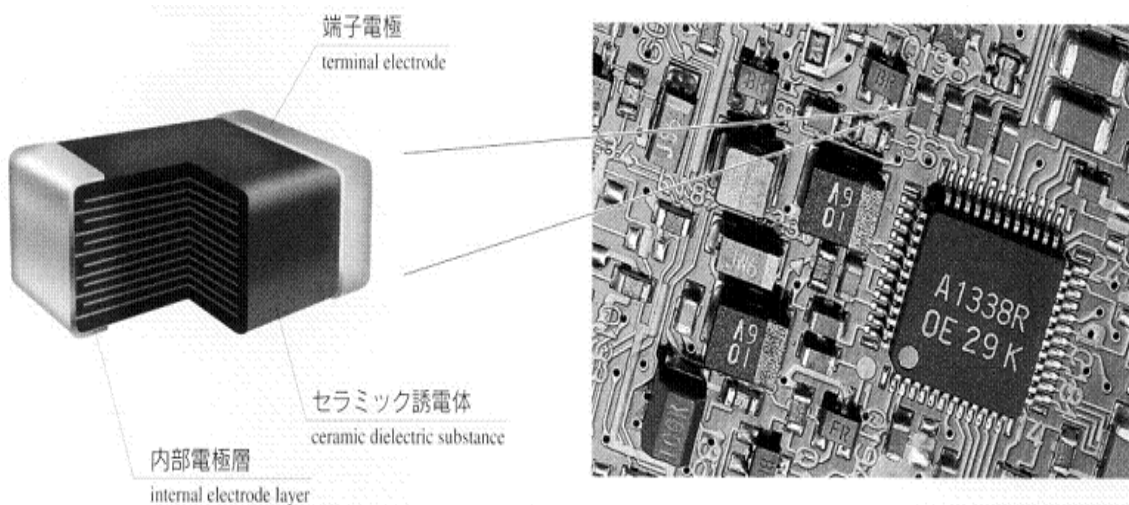
資料：日本エコノミックセンター（2006）より作成。

図3 各種コンデンサの市場領域



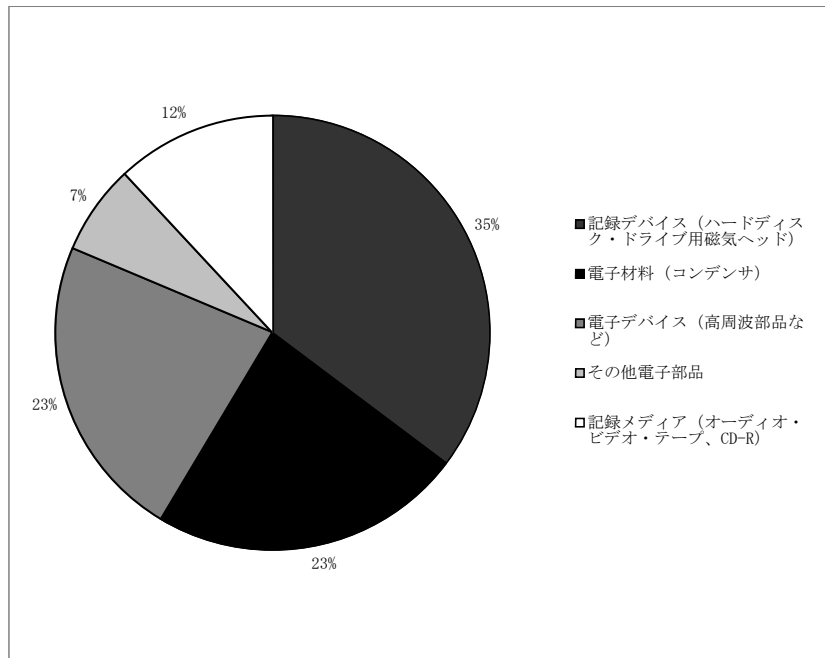
資料：『日経産業新聞』2000年6月16日，p. 8.

図4 積層セラミックコンデンサの構造



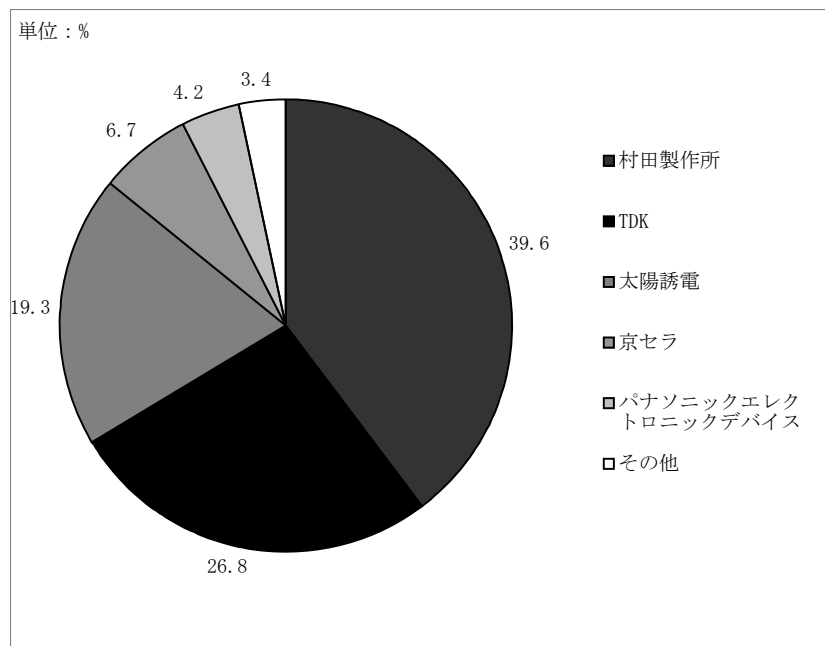
資料：由利工業株式会社・会社案内

図5 TDKの売上構成（2007年3月期）



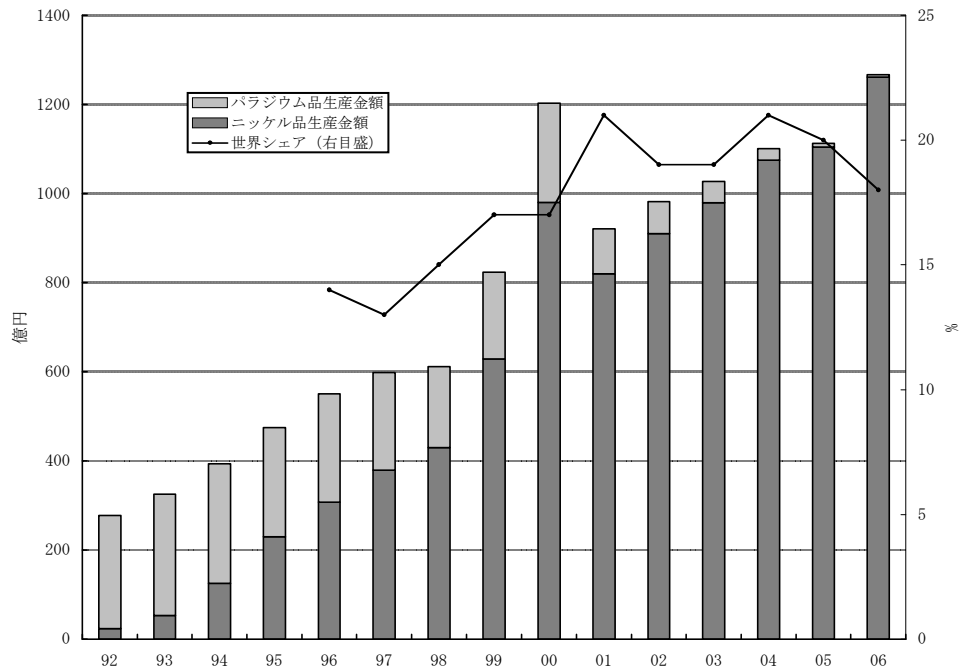
資料：TDK 株式会社有価証券報告書より作成。

図6 セラミックコンデンサ業界の国内市場シェア（金額ベース、単位：%）



資料：日本エコノミックセンター（2006）より作成。

図7 TDKの製品別のセラミックコンデンサ生産金額および世界シェア



資料：TDK資料

付表：TDK および業界各社における主なできごと

年	TDKのできごと	関連するできごと
1963		ハーバート（英ブレッシー社）の基礎研究
1965		村田製作所、積層チップコンデンサの開発に着手
1968	積層チップコンデンサ開発に着手	
1971	米ACI社との合弁でTDK-ACIを設立、技術導入	
1974		坂部行雄（村田製作所）、ニッケル内部電極の開発開始
1975		バーンとメイヤー（米スブラーグ社）の「耐還元性」に関する研究／坂部行雄、CaO添加による誘電体の特性改善に成功
1970年代後半		米セントララボ、ニッケル製品の生産開始するが、絶縁抵抗劣化事故により生産中止
1977	松下電器産業のペッパーラジオに積層セラミックコンデンサ搭載	
1978		坂部行雄、ニッケル製品開発から一時離れアメリカへ
1970年代後半		太陽誘電、ニッケル内部電極の開発開始
1980	野村武史、TDK入社、開発研究所フェライト研究部でフェライトの開発	村田製作所、大手コンデンサ・メーカー米エリー社を買収
1981		ハーゲマンとヘニングス（フィリップス）の「耐還元性」に関する研究／坂部ら（村田製作所）の同様の研究
1982		村田製作所、ニッケル製品の社内向け販売開始
1984		太陽誘電、ニッケル製品をチップ型で商品化
1984-85	（1980年代前半に始まった開発研究所でのニッケル内部電極の開発を経て）ニッケル製品の量産ライン、秋田工場に設置。初期の開発チーム、立ち上げのため秋田へ異動	
1985	野村武史、パラジウム製品の不良対策のため事業部に異動（12）	
1986	野村武史、開発研究所フェライト研究部に復帰し、Cプロジェクト発足（5）	
1987	ニッケル製品のディップ品販売	藤川信義（京セラ）、チタン酸バリウムへの希土類添加を学会発表
1989	野村武史、ニッケル内部電極の開発開始（4）／寿命の問題を解決する方法のうち、焼き方と素材とを変えるという2つの方法を発見。報告書提出	
1990	Cプロジェクトの野村らのチーム、開発テーマを「大容量コンデンサの開発」に転換。F特性のコンデンサの薄層化や量産への移行を推進（4）／野村らのチーム、市川から成田へ移動（5）／ニッケル以外の代替技術の開発打ち切り	京セラ、大手コンデンサ・メーカー米AVX社を買収
1991-92	ニッケル内部電極積層セラミックコンデンサを商品化	
1992	寿命の問題を解決する方法のうち、シリカを微量にするというもう1つの方法を発見／B特性のコンデンサのニッケル化に着手	
1993	エージング問題を解決	
1996	ニッケル製品の売上、パラジウム製品を越す	

注：（）内の数値は月。

IIR ケース・スタディ 一覧表／2004-2009

NO.	著 者	タ イ ト ル	発行年月
CASE#04-01	坂本雅明	「東芝のニッケル水素二次電池開発」	2003 年 2 月
CASE#04-02	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(1): 自動販売機—自動販売機業界での成功要因」	2004 年 3 月
CASE#04-03	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(2): 自動販売機—新たなる課題への挑戦」	2004 年 3 月
CASE#04-04	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(3): 自動販売機—飲料自販機ビジネスの実態」	2004 年 3 月
CASE#04-05	伊東幸子 青島矢一	「ハウス食品: 玉葱催涙因子合成酵素の発見と研究成果の事業化」	2004 年 3 月
CASE#04-06	青島矢一	「オリンパス光学工業: デジタルカメラの事業化プロセスと業績 V 字回復への改革」	2004 年 3 月
CASE#04-07	堀川裕司	「東レ・ダウコーニング・シリコン: 半導体パッケージング用フィルム状シリコン接着剤の開発」	2004 年 3 月
CASE#04-08	田路則子	「日本開閉器工業: モノづくりから市場創造へ「インテリジェントスイッチ」」	2004 年 3 月
CASE#04-09	高永才	「京セラ: 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2004 年 3 月
CASE#04-10	坂本雅明	「二次電池業界: 有望市場をめぐる三洋、松下、東芝、ソニーの争い」	2004 年 3 月
CASE#04-11	三木朋乃	「前田建設工業: バルコニー手摺一体型ソーラー利用集合住宅換気空調システムの商品化」	2004 年 3 月
CASE#04-12	伊諒重 武石彰	「東洋製罐: タルク缶の開発」	2004 年 3 月
CASE#04-13	藤原雅俊 武石彰	「花王: 酵素入りコンパクト洗剤「アタック」の開発」	2004 年 10 月
CASE#04-14	軽部大 井森美穂	「オリンパス: 超音波内視鏡の構想・開発・事業化」	2004 年 10 月
CASE#04-15	軽部大 小林敦	「三菱電機: ポキポキモータ 新型鉄心構造と高速高密度巻線による高性能モーター製造法の開発」	2004 年 11 月

CASE#05-01	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(1): 組織風土の改革プロセス」	2005年2月
CASE#05-02	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(2): カテーテル事業の躍進と今後の課題」	2005年2月
CASE#05-03	青島矢一 河西壮夫	「東レ(1): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の技術開発」	2005年2月
CASE#05-04	青島矢一 河西壮夫	「東レ(2): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の事業戦略」	2005年2月
CASE#05-05	兒玉公一郎	「ヤマハ(1): 電子音源に関する技術蓄積」	2005年2月
CASE#05-06	兒玉公一郎	「ヤマハ(2): 携帯電話着信メロディ・ビジネスの技術開発、ビジネスモデル構築」	2005年2月
CASE#05-07	坂本雅明	「二次電池業界(改訂): 技術変革期における新規企業と既存企業の攻防」	2005年2月
CASE#05-08	高永才	「京セラ(改訂): 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2005年2月
CASE#05-10	坂本雅明	「東北パイオニア: 有機ELの開発と事業化」	2005年3月
CASE#05-11	名藤大樹	「ハイビジョンプラズマディスプレイの実用化 プラズマディスプレイ開発協議会の活動を中心に」	2005年7月
CASE#05-12	武石彰 金山維史 水野達哉	「セイコーエプソン: 自動巻きクォーツ・ウォッチの開発」	2005年7月
CASE#05-13	北澤謙 井上匡史 青島矢一	「トレセンティテクノロジーズによる新半導体生産システムの開発 —300mm ウェハ対応新半導体生産システムの開発と実用化—」	2005年10月
CASE#06-01	武石彰 高永才 古川健一 神津英明	「松下電子工業・電子総合研究所: 移動体通信端末用 GaAs パワーモジュールの開発」	2006年3月
CASE#06-02	平野創 軽部大	「川崎製鉄・川鉄マシナリー・山九: 革新的な大型高炉改修技術による超短期改修の実現 大ブロックリング工法の開発」	2006年8月

CASE#07-01	武石彰 宮原諄二 三木朋乃	「富士写真フイルム： デジタル式 X 線画像診断システムの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-02	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(A)：事業の立ち上げと技術課題の克服」	2007 年 7 月
CASE#07-03	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(B)：事業モデルの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-04	武石彰 伊藤誠悟	「東芝： 自動車エンジン制御用マイコンの開発」	2007 年 8 月
CASE#07-05	青島矢一 朱晋偉 吳淑儀	「無錫小天鵝株式会社： 中国家電企業の成長と落とし穴」	2007 年 8 月
CASE#07-06	青島矢一	「日立製作所： LSI オンチップ配線直接形成システムの開発」	2007 年 9 月
CASE#07-07	坂本雅明	「NEC： 大容量 DRAM 用 HSG-Si キャパシタの開発と実用化」	2007 年 9 月
CASE#08-01	小阪玄次郎 武石彰	「TDK： 積層セラミックコンデンサの開発」	2008 年 1 月
CASE#08-02	福島英史	「東京電力・日本ガイシ： 電力貯蔵用ナトリウム—硫黄電池の開発と事業化」	2008 年 3 月
CASE#08-03	青島矢一 北村真琴	「セイコーエプソン： 高精細インクジェット・プリンタの開発」	2008 年 5 月
CASE#08-04	高梨千賀子 武石彰 神津英明	「NEC： 砒化ガリウム電界効果トランジスタの開発」	2008 年 9 月
CASE#08-05	小阪玄次郎 武石彰	「伊勢電子工業： 蛍光表示管の開発・事業化」	2008 年 9 月
CASE#09-02	青島矢一 大倉健	「荏原製作所： 内部循環型流動層技術の開発」	2009 年 6 月

CASE#09-03	藤原雅俊 積田淳史	「木村鑄造所： IT を基軸とした革新的フルモールド鑄造システムの開発」	2009 年 7 月
------------	--------------	---	------------