

第 130 回 技術懇談会 講演記録

日時・場所

2021 年 11 月 13 日 (土) 13:30~16:00
ZOOM によるオンライン開催 参加人数 45 名

講演記録

1. 我が国の化学コンビナートにおける PSM(Process Safety Management)の現状と課題

講師 木村 雄二 氏 SCE・Net 会員、工学院大学 名誉教授

我が国の化学コンビナートではこの 10 年の間に重大な事故を数多く経験しています。これらの事故撲滅のために種々の試みがなされており、その一つ PSM(Process Safety Management) system の確立とその高度化が挙げられています。

本講演では、過去国内外の化学コンビナートで発生した重大事故の概要を紹介し、これらが非常作業時に発生していること述べ、これら事故の発生を未然に防ぐため欧米で提案・実施されている PSM system の考え方とこれに関連した規制の強化、民間組織として発足した CCPS 等の事故対策を組織化する活動に言及します。

我が国でも、重大事故を分析した結果、(1)リスクアセスメントの必要性、(2)教育・技術伝承の再認識、(3)反応暴走の理解 の重要性が指摘されました。これらの検討の成果とその普及から、その後、重大事故の発生は抑えられつつあります。

しかしながら、人命が失われるに至る事故は依然として発生し続けその数も下げ止まりの状況が続いています。また、労働災害も協力会社を中心に数多く発生していることが指摘されています。したがって、健康・安全・環境を意識した産業保安レベルのさらなる高度化が求められています。

これらを踏まえ、PSM の現状と課題について概説いたします。

2. イノベーションのジレンマの多面的な見方

講師 大橋 啓之 氏 工学博士 早稲田大学 ナノ・ライフ創新研究機構 研究院教授

(1) はじめに

日本語に翻訳された Christensen の「イノベーションのジレンマ」は原本では「イノベーターのジレンマ」である。これに対する批判があり、特に経営学ではなく経済学的観点からイェール大学の伊神氏は、「イノベーターのジレンマ」の経済学的解明という本(2018 年)を書き注目されている。Christensen の「イノベーターのジレンマ」の典型例であるハードディスクドラ

イブ(HDD)は、演者が NEC 入社以来 19 年間取り組んできたテーマであり、2019 年に Electrochemical Engineering という本の中に、Thin-film Head and the Innovator's Dilemma と題して演者の考えを書いた。これを分かり易く書き直した内容が、本日の講演の半分強です。

(2) クリステンセンの経営学的アプローチ

Christensen は、歴史上最も成功した企業でさえリーダーの座を追われており、成功を持続させるのはなぜ難しいのか疑問を持ち、以下のことを見出した。企業が成功するために不可欠な特定の慣行、例えば、①最良顧客のニーズを満たす、②収益性から見て最も魅力的な分野に集中投資する、などが失敗の原因になりうる、ということである。また、「イノベーターのジレンマ」の中で2つの重要な概念を挙げている。一つは、持続的イノベーションであり、性能の向上を持続し続けることは、業界主力企業が常に第一に行ってきたことである。これは、単純な改良から抜本的なイノベーションまで多岐に渡る。二つ目は、破壊的イノベーションであり、性能の軌跡を破壊し塗り替え、幾度となく業界の主力企業を失敗に導き、市場を大きく変えた。縦軸に製品性能、横軸に時間をとって図示すると、持続的イノベーションは右上がりの緩やかな直線、一方、破壊的イノベーションは、性能は落ちるが進歩が速い、前者はハイエンド市場で求められる性能に早く到達するが、後者はなかなか到達しない。しかし、後者はローエンド市場・新興市場では立ち上がることがある。典型的な例は銀塩フィルムとデジタルカメラである。コダックは 1975 年にいち早くデジタルカメラを開発したが、銀塩フィルムに磁気記録を併用したもので、中途半端だったため後続のデジタルカメラに追い抜かれた。イノベーターのジレンマによって敗れた例である。

Christensen は既存市場のリーダーが失敗するメカニズムを HDD の例で以下のように説明している。1981 年時点では、8" (ミニコンピュータ向け) と 5.25" (デスクトップパソコン向け) の HDD を比較すると、容量では前者は 60MB に対して後者は 10MB と低性能で、価格では前者は 3000 ドル、後者は 2000 ドルでさほど安くなく、価格/性能比では前者は 50 ドル/MB、後者は 200 ドル/MB で、コストメリットがない。すなわち、小型化は既存市場の顧客には魅力がなく利益をあげられない。つまり破壊的イノベーションにリーダー企業が取り組むのは難しい。同じことが半導体でも起こり、日本の DRAM が失敗したのも同じ現象だと説明されている。HDD の世代交代・企業数の推移をみると、14" では IBM、8" では Shugart、5.25" では Seagate、3.5" では Conner、2.5" では PrairieTek と、毎回リーダー企業が変わっている。では実務者はどうすれば成功するのか、単純に小型化こそ破壊的イノベーションなのか、Christensen によればそうではない。1.8" の次は 1.3" になるが、これをやったヒューレットパッカーは失敗した。例えば、1.8" の時代には 1.3" の市場はなく、Christensen は存在しない市場は分析できないと、評論家的な見解で、これでは実務者には役に立たない。私の経験では、市場分析で有名な Disk Trend Report よりも自社のネットワークからの情報の方が最初は正確だった。部品メーカーも完成品メーカーと付き合っているので色々情報を持っているが、その部品メーカーも大失敗している。Christensen も続々と本を出す、何か臍に落ち

ないというのが私の感触である。

(3) 経済学のアプローチ

Christensen を含めこれまでの研究者は、結局失敗した経営者がバカだったという後付けの経営学になっている。伊神氏は合理的でより先験的説明を提供することを目的にしたと言う。伊神先生の論文を掻い摘んで説明する。経済学者はこの問題について例えば、Kenneth J. Arrow(1962)は既存企業が旧製品で稼いでいる場合、共食いを生む新技術導入はインセンティブが小さいという。また Richard Gilbert & Porter Newberry (1982)は、抜け駆け効果でライバルを出し抜くため、既存企業が先制攻撃して寡占を狙うという。Joseph A. Schumpeter は、既存大企業は多額の研究開発投資が可能で、新旧技術に共通点があれば既存大企業が新技術開発に有利（能力格差）であり、旧来市場では既存企業による寡占が進行するが、起業家により新商品・新産業が生まれて、古い技術を次々と葬り去る（創造的破壊）と言う(1942)。伊神先生はこの Schumpeter の概念を数値化している。市場から 5.25” HDD と 3.5” HDD の出荷数量と平均価格の経年推移をグラフ化し、経済学概念である需要の弾力性を 2.3 と計算した。2.3 というのは新製品が 1%値下がりすると旧製品を買う人が 2.3%減ることを意味する。これは共食いによる影響が大きい産業であることを示している。また、企業数と利益の関係を求めると、企業数が増えると急激に利益が減少し、独占する程利益が大きくなる産業であり、既存企業にとって抜け駆けは魅力的になる。伊神先生は市場構造モデルの計算結果と実データが一致することを示し、これを使ってパラメータ（共食い・抜け駆けの有無、特許戦略）を変化させたシミュレーションを行えば、企業の戦略検討に使えるという。

伊神先生の経済学の見方をまとめると、①イノベータのジレンマ現象を経済学的に説明するには、置換効果（共食いを避ける）が必要 ②Schumpeter の創造的破壊は、既存企業がグズグズしている間に起業家がイノベーションを起こしてしまうことが条件 ③既存企業が起業家に先駆けて新技術を占有してしまえば彼らの市場支配を覆す者はいなくなる。そこで、既存企業が創造的破壊プロセスを生き延びるには創造的「自己」破壊が必要であると結論づけている。

(4) 薄膜磁気ヘッド（技術的な見方）

演者が入社したときは磁気記録の全盛時代で、MnZn(又は NiZn)フェライトのコアと巻線のバルク磁気ヘッドが使われていたが、薄膜ヘッドではそれまでバルクヘッドのコアや巻線の機械加工を半導体プロセスに置き換えた。磁気回路にフォトリソグラフィを用いた特許は 3M社から 1969 年に出されていた。今までのフェライト磁気ヘッドから Ni-Fe(パーマロイ)薄膜磁気ヘッドに変えることで、体積を 100 万分の 1 以下にし、非常にインダクタンスが小さな高性能な国産初の量産薄膜磁気ヘッドが 1983 年に実現した。その後、1枚のセラミック基板から半導体プロセスにより 1~2 万個の薄膜磁気ヘッドをつくる量産工場を立ち上げた。このとき、半導体プロセスもさることながら、重要だったのはめっきプロセスであった。それはスパッタリングで Cr、Cu をつけ、その上にフォトレジストでパターンを作り、その上に銅の金属めっきをし、フォトレジストを除去、イオンエッチングによりスパッタリングした銅の膜を除去してコイルを残すことで、比較的簡単にサブミクロンの銅回路ができる。銅メッキによりコイル、Ni-

Fe/CoNiFe メッキによりソフト磁性 Ni-Fe コアの膜ができる。求められるのは平面平滑化と結晶の微細化であり、めっきのポイントは、基板の表面処理/界面活性剤、結晶粒径制御、平滑化添加剤、応力減少剤である。この銅コイル配線の技術は、IBM により LSI 配線 Cu ダマシン法として大きく発展した。一方、Ni-Fe の磁性薄膜であるが、良好なソフト磁性を得るために、組成変動を 0.1% 以下にする必要があった。そのためパドル攪拌というカソード付近のイオン拡散層を強制的に薄くする技術が IBM により発明され、世界の大半の磁気ヘッドメーカーはこの技術を導入した。

記録データを増やすにはビット長を小さく、結晶粒を小さくする必要がある。しかし、記録密度が上がると記録が消失する現象が生じ始め、微細化した磁性粒子の熱ゆらぎによるものであった。その為には磁気異方性の強い材料を使う必要があるが、逆に書き込みなくなる。磁気異方性の強い磁気ディスクに書き込むには、強い記録磁場を発生する磁気ヘッドが必要になり、それには大きな飽和磁化を持つ磁気コア材料が必要となる。ここで早稲田大学の逢坂教授との共同研究が始まった。通常強磁性体というと Fe、Ni、Co の 3 種類しかなく、その合金の最適な組成を探ることになった。Fe に近い合金は bcc(体心立方)、Co に近いのは hcp(六方)、Ni に近い方は fcc(面心立方)になる。Ni-Fe(パーマロイ)は飽和磁化が 0.9 テスラと中程度であるが、磁気異方性が小さいため磁気ヘッドに使われている。記録密度が高い飽和磁化の最大は Fe-Co の 2.45 テスラであるが、これは磁石のように磁気異方性が大きい(ソフト磁性でない)ため、磁気コアには使えない。大学の実験での大きな発見は、bcc と fcc の相境界で結晶が微細化(ナノ結晶/アモルファス化)することであった。これはスパッタとか金属の熔融では生じない現象であり、電気めっきの場合、表面付着のエネルギーが小さいためと考えている。磁性体に関する Hoffmann の有名な理論—ランダムな微細結晶は、結晶異方性が平均化され磁化しやすくなるため、ソフト磁性が得られる—から、bcc と fcc の相境界で良好なものができる可能性が生まれた。めっき添加剤による結晶微細化であるが、逢坂研究室では Ni めっきの添加剤には通常、平面を光沢(平滑)にするためサッカリン Na が使われている。しかし更に強力な添加剤として、イオウがより取り込まれやすく、微細化しやすいチオ尿素で実験した。その結果、サッカリン Na での平均結晶粒径 12nm に対しチオ尿素は 8nm とより小さくなり、磁気特性がよりソフト化し、弱い磁界でも磁化できることを見出した。ところが大きな問題が生じた。チオ尿素を添加すると相境界が上方に移動、すなわちソフト磁性になる相境界が、磁化の小さい Ni-rich 側にシフトした。分析すると、サッカリン Na 添加ではイオウ含有量が 0.3% に対し、チオ尿素ではイオウ含有量 3% と多くなっていた。そこで添加剤なしを思いつき作製した所、相境界が下方に移動、飽和磁化の大きい材料が得られ、今までにないソフト材料の領域を発見した。それを逢坂教授との共同研究成果として Nature に投稿した。これは当時としては画期的で、1979 年の 83-パーマロイの飽和磁化の 2 倍を実現した。

(5) 意味がなかった

今まで私が述べたことは意味がないと Christensen は言う。Christensen の本に、縦軸に 1989 年における記録密度の順位、横軸が薄膜技術採用の順序(左側はよりパイオニアで右は

フォロワー) を採った図がある。Christensen はこの図は相関がなく、相関がないことが重要だと指摘する。すなわち、パイオニアがフォロワーよりはるかに有利だったことを示す事実はなく、また、率先して薄膜技術を開拓した企業で大幅にシェアを拡大した企業はない。先陣を切ったことで学習効果が得られ、初期のリードを活かして他社より高い記録密度を達成した様子もない、と書かれている。つまり、Christensen は、薄膜磁気ヘッドは抜本的イノベーションであり、持続的イノベーションであるが、破壊的イノベーションではないという。伊神氏は破壊的イノベーションの定義があいまいでよく分からないと言う。経済学流のイノベーションははっきりしている。すなわち、新製品・新商品・新サービスの投入によるプロダクトイノベーションと、同じものをより少ない費用で作る、工程を変えて品質を高めるといふ、2つのプロセスイノベーションがある。両方とも明確に定義できるものである。伊神氏は更に、プロダクトイノベーションが「共食い」なら企業にとって不要であり、しかし、両者は重複することも多いと言う。そこで私は、薄膜磁気ヘッドはプロダクトイノベーションでもあり、プロセスイノベーションでもあったと位置づけた。

(6) 破壊を可能にした技術

では破壊はどのような技術で可能になったのか。ハードディスクの小型化が Christensen の言う破壊的イノベーションに繋がったかは、後知恵であるが、実は小型化すると低消費エネルギーになることが重要である。ディスクを回転させるときの風損は寸法の 3 乗に反比例して小さくなる。また壊れにくさを示す衝撃力もまた寸法の 3 乗に反比例して小さくなる。落とすと壊れると言われたハードディスクが壊れなくなった。これが今まで大型コンピュータ室に納まっていたハードディスクが、モバイル、家電、車載などの巨大新市場の創出につながったのである。更に重要なことは、発熱問題からも低消費電力化した HDD がエレクトロニクスに対する破壊的イノベーションになった。更にそれを支える抜本的イノベーションが連続したことであった。その第 1 は、MR(磁気抵抗)効果であり、従来の再生方式は電磁誘導方式で再生信号電圧がディスク速度に比例するが、磁気抵抗方式の MR ヘッドは再生信号電圧がディスク速度(\propto ディスク径)に依存せずすなわち小型 HDD でも信号電圧が低下しない一磁束に比例する。Ni-Fe は偶然にも代表的 MR 材料であった。記録ビットからの信号磁束読み出し用に、簡単な MR 薄膜を付けた MR 素子にすることで、小型ディスクでも性能がよい磁気ディスクができる。しかも従来の薄膜磁気ヘッド工場への追加投資で対応できる。これは非常に大きなことであった。

(7) 抜本的イノベーションの連発

更に抜本的イノベーションの第 2 は、2007 年のノーベル物理学賞を受けた GMR(巨大磁気抵抗)であり、MR と同様にディスク(速度)依存性がなく、大きな信号が得られる。それは基礎研究から生まれ予想できないことであった。バルクの磁気抵抗材料ではなく、人工格子(強磁性/非磁性ナノ積層膜)の積層界面における電子のスピン依存散乱を使っている。しかも、作り方は再生専用ヘッドの MR 素子の代わりに GMR 素子である強磁性/Cu の人工格子を用いるだけであり、画期的技術にも拘わらず追加投資で対応できた。従来の材料探索と人工格子開発の違いであるが、MR 材料の磁気抵抗変化率(MR 比)は Ni-Fe が 1~2%、Ni-Fe-Co が 3%程度

(デバイスにした時は 1%以下)であり、材料探索でそれを大きくしのぐ性能を得ることは困難である。一方、GMR は人工格子の界面構造、材料制御により 10%を超える MR 比になり、ナノレベルの界面制御が大幅に性能を上げている。Egelhoff はその論文で、積層界面の鏡面化を目的に、真空下で酸素を導入して Cu 表面を酸素に晒すことで抵抗が下がる結果を示した。いわば界面活性剤としての酸素の導入である。

抜本的イノベーションの第3は TMR(トンネル磁気抵抗)である。TMR は理論的には知られていたもので、更に GMR の上に TMR があり、GMR 以上に抵抗変化率(MR 比)が大きいと予想された。演者は 1999 年の日本応用磁気学会の研究会で、現在は GMR が全盛だが今後は TMR ヘッドの開発をやりたいと宣言した時、不可能との声が学会では主流だった。TMR の原理は以下である。トンネル障壁(バリア)の片側に金属の磁化固定層、反対側に信号磁束で磁化の向きが変わる金属の磁化フリー層を形成し、磁化固定層と磁化フリー層のスピンが同じなら電気抵抗が小さく、スピンの向きが反対のときは電気抵抗が大となり、大きな抵抗変化率になる。磁化フリー層が磁気ヘッドになりスピンの向きを変える。これにはノイズが少ない極薄トンネル障壁をつくることが重要であり、NEC の超伝導デバイス研究者からの提案により、Al 成膜後に真空中にわずかな酸素を導入し、その場自然酸化することで、ピンホールのない極薄の Al_2O_3 障壁を形成できて成功した。このとき、導電性をみるため第一原理計算を実施してもらったが、本来なら両側はパーマロイであるが、計算できないため両側の磁性体も Al のまま計算した。低ノイズ TMR ヘッドを作製、40Gbit/inch² の記録を GMR 同等以上の SN 比で実現でき、学会に発表した(2000 年)。

学会での TMR ヘッドの発表であるが、INTERMAG(国際磁気学会)1999 で、Mallary (Quantum) から TMR は抵抗が大きく使えないという発表があった(理論)。しかし INTERMAG2000 で、NEC が GMR ヘッドに置き換え可能な TMR ヘッドを発表し、それを覆した(実験)。発表後 CN Tower(トロント)の展望レストランで、Seagate の Sining Mao 氏に TMR ヘッドを売り込んだ。そして、2004 年 Seagate が TMR ヘッド搭載 HDD を発売し、現在 HDD のヘッドはほとんどが TMR ヘッドである。その後、Mao 氏は数奇な運命を辿った。Mao 氏は Seagate 退職後、競合他社である Western Digital (WD) に入社し、2014 年にミネソタ州の最高裁で、Seagate は Mao 氏と WD 社に対して、「Mao が Seagate の企業秘密および機密情報を盗みそれを WD に提供した」とし制裁を求める申し立てを行い、その結果 5 億ドルを超える額の裁定が下り、Mao 氏はこの分野から退場することになった。

その後、TMR では大きな発明があり、それは Al_2O_3 の代わりに MgO を障壁に用いた $Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)$ で、磁気抵抗変化率が 1000%以上になることが第一原理計算で示されたことである。その実験での確認だが、当初低い MR 比しか得られなかった。湯浅(産総研)らはその原因が、多結晶電極(計算では単結晶)とアモルファス MgO にあると推測、MBE(分子線エピタキシー法)でエピ成長させた単結晶積層 $Fe/MgO/Fe$ で MR 比 180%を得た。同じ論文誌にパーキン(IBM)らは、アモルファス下層上にスパッタ法で形成した多結晶 TMR 接合 $MgO/CoFe$ の MR 比が 220%になると報告した。これは非常に重要で、スパッタ

は量産に適しており、多結晶金属膜を用いる薄膜磁気ヘッドに適した製造方法に繋がった。そこに ANELVA の恒川チームは、GMR ヘッド製造用に平滑表面ナノ酸化物層を堆積するマグネトロンスパッタ装置を開発し、その装置が高い MR 比と低い抵抗を持つ優れた TMR 接合を提供することを発見、TMR ヘッド用の MgO 膜がスパッタ装置で製造できることを示した。その後多くのヘッドメーカーは TMR ヘッド製造にその装置を導入、そして 2004 年に Seagate が TMR ヘッド搭載 HDD 商用化を実現した。やがて HDD 用ヘッドの大半が、ANELVA の装置を使用した TMR になった。

(8) まとめ：背景と歴史

Christensen は、1997 年にはノート PC 搭載可能なレベルにフラッシュメモリ価格低下し HDD を追い越すと予測していた。しかし予測は当たらず、むしろ HDD は MR ヘッドの導入によりフラッシュメモリとの価格差は 1997 年時点で 100~300 倍に広がった。

まとめると、破壊を確実にしたのは抜本的イノベーションであった。Christensen が軽視していた薄膜ヘッドで製造技術が確立していたことが、MR ヘッドの導入を可能にした。MR というディスクが小さくても性能が低下しない磁気記録技術の導入が強力な破壊的イノベーションを引き起こした(1995 年頃)。その後、専門家も予想していなかったことであるが、基礎研究によって生まれた GMR、TMR の発明が、立て続けに磁気記録の性能を大幅に向上させた抜本的イノベーションに繋がり、フラッシュメモリの追従を引き離した(21 世紀初頭)。なぜ抜本的イノベーションが可能になったかは、それを支えるプロセスイノベーションがあったからである。それは磁性薄膜における深い研究があり、ナノ結晶/アモルファス化制御、当初のめっきから原子レベルまで、工場の製造プロセスレベルで管理されたことと考える。すなわち、薄膜から TMR に至る抜本的イノベーションの連続が、装置/ライン/工場の部分変更の継続による小型 HDD の破壊的イノベーションに市場で意味を持たせ続けたと考える。

Christensen が言うように、小型 HDD が破壊的イノベーションを引き起こし、巨大市場を維持し続けたのは、自明のことのように思われるかも知れないが、決してそうではない。記憶容量当たりの価格の推移を半導体と HDD でみると、半導体の DRAM の技術の延長では永久に MR に追い付かなかった所に、東芝等によって NAND が発明され性能が大幅に向上した。ハードディスクの方は、MR ヘッドの開発がなかったなら 2005 年頃に半導体メモリに追い付かれ、GMR 現象が発見されなかったら 2010 年頃 NAND メモリに追い付かれ、更に GMR も頭打ちになる所で TMR ヘッドが発明され、その寿命は延びている。自明なことではなく奇跡的発見が連続して起こったためハードディスクは生き残ったと強調したい。恐らく MR ヘッドまではある程度予想されたが、それ以降は誰も予想できなかったと思う。

ジャレット・ダイヤモンドはその著書で、グーテンベルグの印刷術が多種多様な技術を組み合わせで完成したことから、科学は自己触媒的に発達するという。つまり、①ある過程の結果がその過程の促進を早める正のフィードバックとして作用する、②新しい技術や材料が登場することによって、新旧のものの組み合わせで別の新しい技術が可能になる、である。それに倣って、TMR ヘッド実用化までの歴史を、多くの基礎研究と実用技術の絡みで説明できる。

最後にエピローグとして 2 つの技術、フラッシュメモリと量子コンピュータについて簡単に言及する。半導体のフラッシュメモリももう一つの破壊技術である。大学の講義資料から引用すると、2008 年に MacBook Air に初めて SSD フラッシュメモリが採用されたが、この年の HDD と SSD フラッシュメモリの Apple Store 価格を比較すると、前者が 229,800 円、後者が 388,400 円で値段が違い、講義では使い分けで説明、2010 年では前者が 148,800 円、後者は 178,800 円と差が縮まり、SSD フラッシュメモリが魅力的になった。その年の秋には HDD モデルは消え、現在持ち運べるノート PC は全てフラッシュメモリになった。

メモリ、ストレージの価格の歴史をしてみる。フラッシュメモリは HDD に近づいたが、ここ 2 年で全ての技術が停滞し始めた。エレクトロニクスの進歩がこの分野で止まっているようである。最初コンピュータが発明された時、色々なメモリが試みられた。その時超伝導を使ったメモリも検討されたが、磁気メモリに敗れた。超伝導デバイスに関しては、超伝導がメモリに使えることを発見したのは Dudley A. Buck (1955 年) であり、超伝導は発熱しないことから低消費エネルギーであるが、インダクタンスが大きいので低速であり、磁気メモリ・半導体メモリに敗れ、Cryotron は実用化されなかった。その後 1962 年、Brian D. Josephson が Josephson 接合を発明し、半導体より高速なスイッチングができ、Josephson コンピュータの研究が IBM、日立、NEC、富士通などで行われたが、結局集積 Si 回路の進歩に太刀打ちできずに消えてしまった。しかし、この技術は SQUID (超伝導量子干渉計) として磁気センサに使われ (1964 年)、その製造技術は低抵抗 TMR 接合にも使われた (1997 年)。この SQUID の技術を発展させたのが当時の NEC の J. S. Tsai と Y. Nakamura であった。彼らは Josephson コンピュータの研究を中断せずを得なかった後、海のものとも山のものともつかない量子コンピュータの研究に入り、1999 年に世界で初めて量子コンピュータ演算を超伝導素子で実現し、2020 年度朝日賞を受けた。先日 J. S. Tsai (東京理科大学教授) の講演が早稲田大学で行われ、Josephson 素子の研究から量子コンピュータに如何に至ったかを話された。『暗黙知が醸成され伝達される場の重要性』— 山口栄一の著書「イノベーション破壊と共鳴」(NTT 出版、2006) — を改めて認識し、当時の NEC がそのような場であったと感じる。

最後になるが、今のことを Schumpeter の本から、真の突然変異には忍耐が必要である。すなわち、Schumpeter は資本主義を進化的プロセスと見なし、絶え間ない革新の中で進化的な意義を持つものは比較的少ないと考えた。彼はそれを突然変異 (mutation) と呼んだ。進化は新たな消費者ニーズによって引き起こされ、変異が持続するにはそのニーズとの調和が欠かせない。資本主義のエンジンを起動し動かし続ける基本的欲求は、新たな消費財・生産手段・輸送手段・市場、そして企業が作り出す新形態の組織から生まれる。私たちが扱っているのは全ての要素の、真の特徴と最終的な影響が分るまでに時間がかかるプロセスで、成果の是非は数十年〜数百年の経過を見て判断しなければならない。すなわち、突然変異を起こすには時間が掛かることを許す環境が必要である。

(文責・飯塚弘)