

CRDS-FY2012-WR-07

科学技術未来戦略ワークショップ  
「超長期保存メモリ・システムの開発」

平成24年11月16日（金） 開催



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター  
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

## エグゼクティブサマリー

本報告書は、(独) 科学技術振興機構 (JST) 研究開発戦略センター (CRDS) が平成 24 年 11 月 16 日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ (WS) 「超長期保存メモリ・システムの開発」に関するものである。

現在のデジタル情報社会を支えている電子技術開発は、情報の処理を行う技術の開発に集中している。その一方で社会の連続性、永続性を担保するために必要な記憶の保存・保管を行う技術の必要性に対する認識は不十分である。その結果、処理系の技術と保存・保管系の技術の間に大きなギャップが生じており、文化、科学情報など短期に経済的価値を生むことが期待できない情報の継承が危ぶまれている。現在の高度電子情報社会の更なる持続的発展を保障するためにはこのギャップを埋めることが重要である。本ワークショップは、現在あるいは将来の処理系の技術に見合った保存・保管系の技術とは何なのか、さらにその開発を促進するための議論を行い、共通認識を醸成することによって有効な研究開発戦略策定の一環となることを目指して開催した。

本ワークショップで発表をいただいた方々に事前アンケートを行った結果、「期待するデジタルデータの保存・保管期間と、いつまでにデジタルデータを安定的かつ妥当なコストで保存・保管する技術が実現されるべきか」については、保存・保管期間については 100 年以上、1000 年程度との意見が多数であり、実現が期待される時期は、10 年以内が大勢を占めた。「必要とされる要件の優先順位」については、「意味理解の保障」\* と「保存・保管のコスト」の 2 つの項目が回答の上位を占めた。「要求項目を満たす物理原理、デバイス、仕組みのイメージ」に関しては、ニーズ側とシーズ側で回答が異なり、議論の余地があることが判明した。

「WS の課題と論点」では、早期のビジネスモデルの確立の必要性も指摘された。100 年単位の長期保存メモリ・システムのビジネスを考える上で難しい点は、最初に投資をした人と、将来利益を受ける人が異なることである。この様な状況下で初期投資を行う動機付けも議論をしておく必要がある。

超長期保存メモリ・システムに関するニーズ側からの発表では、今後の課題として、デジタルデータの長期保存・長期利用保障のためには、継続的な取り組みが欠かせないこと、しかし現在のところ「最良」の保存媒体は存在しないこと、長期保存において保存媒体の果たす役割は非常に大きいことなどが挙げられた。また、映像デジタルデータの保存に関しては、長期間保存のために超高速の大容量ストレージが必要なこと、今後圧縮技術の開発が重要になること、フォーマットの互換性をどう担保するかが課題であること、などが指摘された。

\* 「意味理解」: デジタルデータそのものは 0 と 1 からなるビットストリームなので、これだけでは何の意味か理解できない。データへの解釈が出来るようにデータの構造などをメタデータとして与えることが必要になる。

社会経済的効果に関する発表では、今後、企業のデータマイグレーションを含めた運用費用が膨大になること、将来はマイグレーション戦略が破たんする可能性があること、従ってマイグレーションフリー、メンテナンスフリーの保存手段が必要になることが指摘された。具体的な経済効果の一例としては、保存期間の違いはあるが、用途的に近いと考えられる今の光ディスクドライブの市場規模から推定すると、少なくとも3兆円程度の市場規模が見込まれることが示された。

一方シーズ側からの講演では、MASK・ROMを使い無線給電の技術を用いると1000年レベルでデータを保存できること、超長期保存メモリ・システムの実現には、材料、デバイスから情報系の多くの分野の研究者を巻き込み、既存の様々な技術をインテグレートすることで、それほど時間をかけないで達成できそうであること、国家や人類の文化を守る観点から、まずは国の主導で研究開発を進めていくべきであることなどが指摘された。また、長期保存メモリデバイスに関しては、保管温度を150℃以下に保てば、MONOS（窒化シリコン膜に電荷を溜め記憶を保持するメモリ）を用いて1000年レベルのデータ保持が可能であること、メモリと外部システムの間を結ぶ方法として、メモリ媒体と外部システムをつなぐ「アダプター」を導入し、その間のインターフェースを標準化すれば良いこと、などが示された。MONOSメモリデバイスに関しては、電荷注入によって構造が不可逆的に変化することから、超長期保存として適したデバイス構造であることも示された。

将来データを確実に読み出すためには、アクセスと意味理解を保障する仕組みを予め作り込んでおく必要があるが、そのためにはアダプタの物理インターフェースが単純なものであることと、将来のインターフェースの仕様が理解でき、再構築が可能であることが必須の条件である。ここでは、新システム上に旧システム上にあったメモリ・ストレージ媒体の読み出し環境を構築することができる「エミュレーション」戦略が重要になることが指摘された。エミュレーションが成立するためには、オリジナルの媒体が生きることが条件となるので、超長期間にわたって記憶を保持できる媒体の開発が必須となる。残る大きな問題は、将来にわたる意味理解の保障、アクセスの保障である。新たに作るシステムでは、あらかじめアクセスと意味理解を保障する仕組みを作りこんでおく必要がある。また、実現のイメージを明確にするため、今後実際にシステムを作る際に必要となる参照モデルと具体的な媒体のイメージの検討を進める必要がある。重要なのは媒体だけでなく、システムとしてどの様に考えるか、ソフトとの連携も含めて考えるべきである。

今後の研究開発の推進方法に関しては、学術・文化さらにビジネスモデルなど様々な分野の有識者を集めて研究会などを開催し、まずこの分野のコミュニティーを広げることが重要であることが指摘された。このプロセスを経て、関係者の共通認識を醸成した上で、国としての戦略を構築し、しかるべきプロジェクトをできるだけ早い時期に設立することが適当であるとの共通認識が得られた。

今回のワークショップでの議論を踏まえ、JST 研究開発戦略センターでは、今後国として重点的に推進すべき研究領域、具体的な研究開発課題を検討し、研究開発の推進方法を含めて、戦略提言として関係府省へ提案する予定である。

# 目 次

## エグゼクティブサマリー

趣旨説明 ビッグデータ時代の新規メモリ・システム開発 河村 誠一郎 (JST CRDS)…… 1

セッション 1 基調講演 …………… 3

1.1 デジタルデータの長期保管における課題と戦略 石原 直 (東京大学) …………… 3

セッション 2 WSの課題と論点 …………… 11

2.1 WSの課題と論点 小林 敏夫 (神奈川大学) …………… 14

セッション 3 超長期保存メモリの必要性と社会・経済的効果 …………… 15

3.1 国立国会図書館の電子情報と長期保存における課題 池田 功一 (国立国会図書館) … 15

3.2 映像デジタルデータの長期保存 山本 雅弘 (NHK) …………… 20

3.3 超長期保存メモリ・システムの社会・経済的効果 江連 三香 (三菱総合研究所) … 26

セッション 4 超長期保存メモリの技術的課題と開発推進方法 …………… 29

4.1 半導体デジタルロゼッタストーンの発表から学んだこと 黒田 忠広 (慶應義塾大学) … 29

4.2 ロバストな半導体アーカイブの要件 岡上 拓己 (ソニー) …………… 36

4.3 MONOSの長期信頼性について (計算科学からの考察) 白石 賢二 (筑波大学) … 43

4.4 意味理解の保障に向けて 小林 敏夫 (神奈川大学) …………… 52

セッション 5 全体討論 …………… 57

司会：小林 敏夫 …………… 57

付録…………… 65

付録1 開催概要・プログラム…………… 65

付録2 参加者一覧…………… 66

## 趣旨説明

### ビッグデータ時代の新規メモリ・システム開発

河村誠一郎（JST-CRDS）

ワークショップ（WS）にあたってまず、JST 研究開発戦略センター（CRDS）の活動内容を図1に示す。

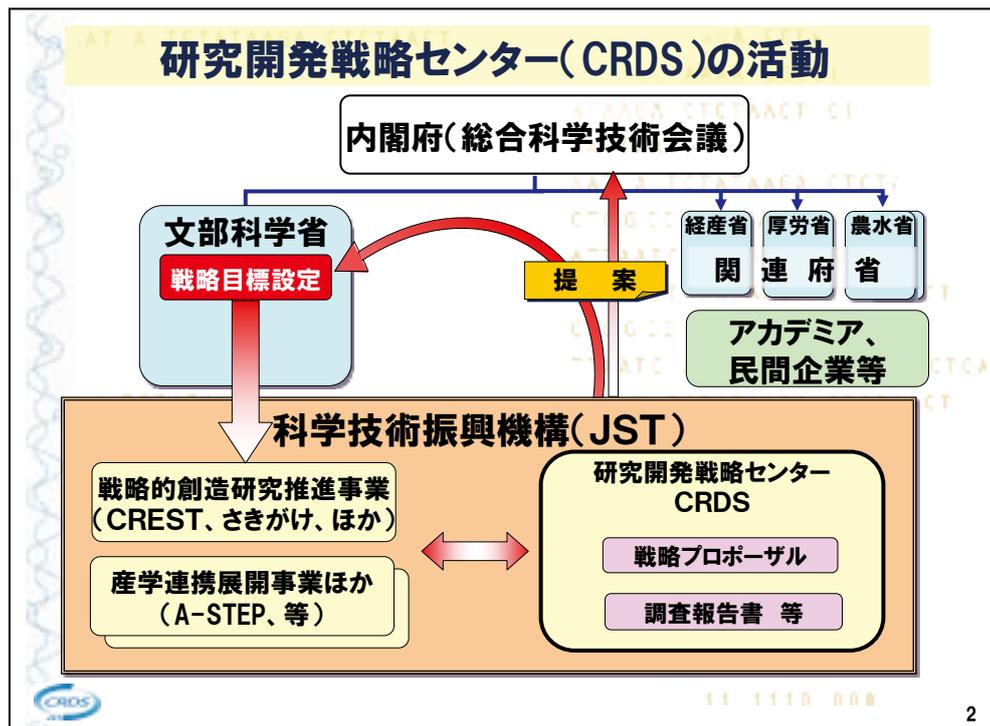


図1

CRDSの重要な任務の一つが、JST内の“CREST”や“さきがけ”の事業部門と協力をしながら、戦略プロポーザルとして提言書を策定することである。CRDSがまとめた戦略プロポーザルは、文科省、内閣府、関係府省に提示するが、例えば文科省における『戦略目標』として活用・決定され、JSTの研究事業として実施する場合がある。JSTではこの戦略目標を具体化するために、戦略的創造研究推進事業部門でCRESTやさきがけ、ERATOといった具体的な研究領域やプロジェクトを設立し、リーダーを選んで運営していくという仕組みが存在している。

CRDSでは、本年度に提言を作成することを目的として「新原理メモリチーム」を立ち上げ、今後のメモリデバイス・システムの在るべき姿、今後の方向性を検討してきた。その結果として、デジタルデータの長期安定保存、高速・低消費電力記憶を目指すことが重要だという結論に至った。「デジタルデータの長期安定保存のための新規メモリ・システムの開発(仮)」と題する戦略プロポーザルを作成する予定であり、本日のワークショップは、この戦略プロポーザルを作成するプロセスの上で、非常に重要な一環として位置づけている。

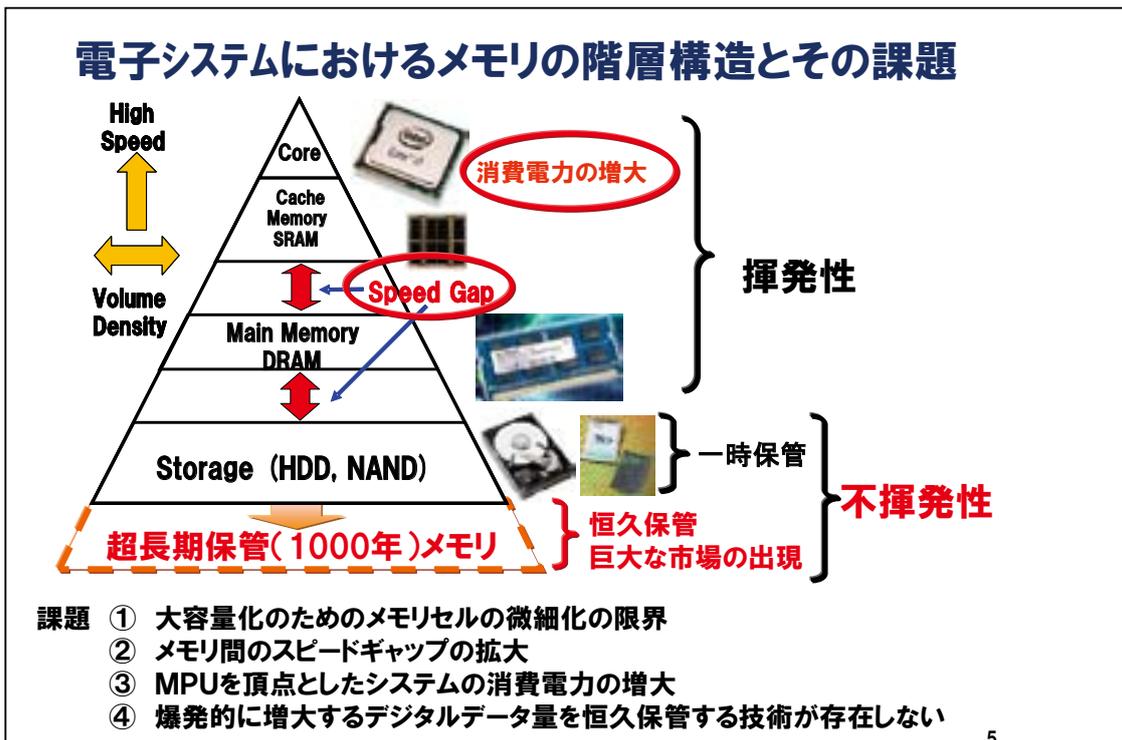


図 2

図 2 に、電子システムにおけるメモリの階層構造とその課題を示す。現在、キャッシュメモリとメインメモリ、およびメインメモリとストレージの間のスピードギャップが大きな問題となってきており、その対策としてストレージ・クラス・メモリ (SCM) の開発が盛んに行われている。私どもは、今までほとんど議論のなかった、最下層の部分の「超長期保管 (1000 年) メモリ」に注目し、この分野の研究開発の戦略を提言書としてまとめようとしている。

理想的には、高速で集積度も高く超長期保存も可能な「ユニバーサルメモリ」が実現できれば素晴らしいが、現実には非常に難しいと思われる。今回は、スピードと集積度は多少犠牲にしたとしても、1000 年レベルでデータが保存できる、信頼性の高い超長期保存メモリをターゲットとしている。

今年に入って半年間、国内のこの分野の有識者十数名の方々にヒアリングやセミナーをさせていただき、ニーズ側とシーズ側の両方から、様々なご意見をいただいた。

その結果、超長期にデータを保存できるメモリデバイスが実現しても、1000 年後に実際にデータを読み出すにはシステム開発や標準化なども不可欠であることがより明らかになった。そこで、今回の戦略検討では、単にメモリデバイス単体の開発に止まらず、システムも含めて検討するということで、「超長期保存メモリ・システムの開発」と題してワークショップを開催する。最近、国内ではデジタル文化資産推進議員連盟という超党派の議員連盟が設立され、国の機関として、デジタル文化資産保存センター (仮称) 設立を検討しているとも聞いている。

このような背景をもとに、ワークショップコーディネータとして神奈川大の小林先生、基調講演を東大の石原先生にお受けいただき、超長期保存メモリ・システム開発のワークショップを開催するに至った。時間的に非常にタイトなプログラムになっているが、質の高い戦略プロポーザルを作成するためにも、活発なご議論・ご討論をお願いしたい。

## セッション1 基調講演

### 1.1 デジタルデータの長期保管における課題と戦略

石原 直 (東京大学)

今日、情報技術あるいはネットワークの基盤がつぎつぎと整備され、デジタル技術に支えられた高度情報化社会、高度ユビキタスネットワーク社会が実現されている(図1-1-1)。ネットワークが発展し、コスト、料金が大幅に下がり、スマートフォン、携帯電話、パソコンを自由に使って仕事あるいは遊びをする時代になっている。インフラの整備、技術の発展が大きな役割を果たした中で、強力な原動力となったのは、この半世紀の間の半導体技術の進歩である。

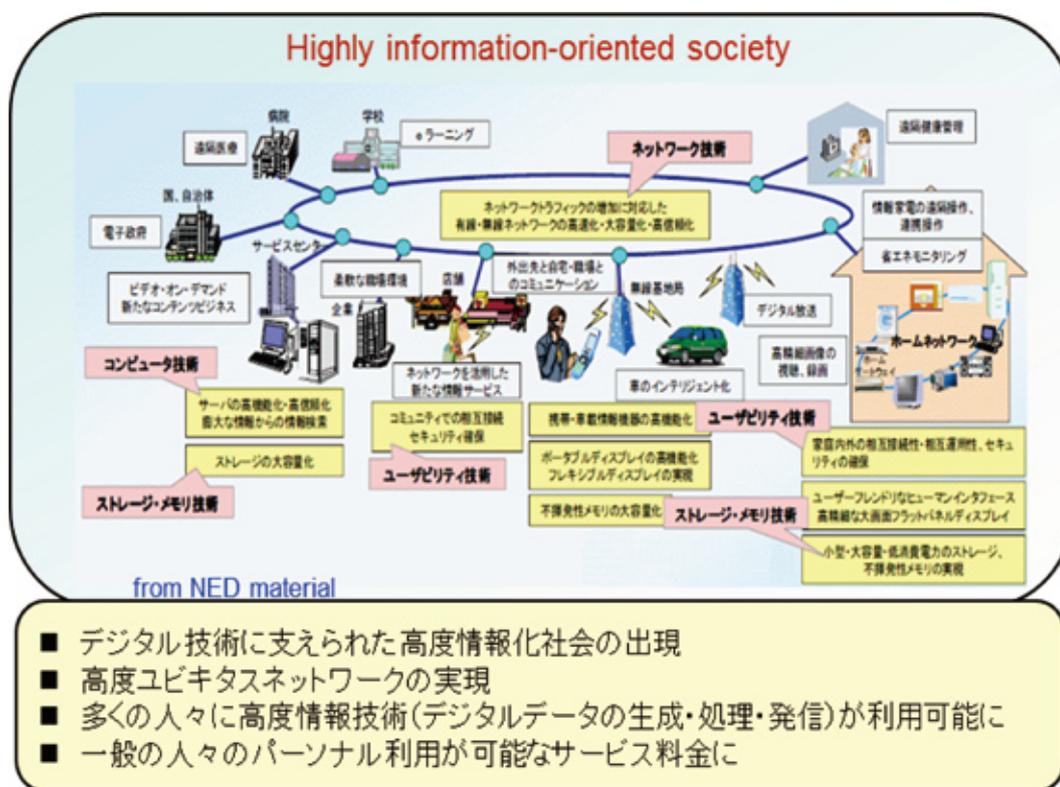


図 1-1-1 デジタル技術がもたらす高度情報化社会

半導体産業にはムーアの法則という経験則があり、半導体集積回路の集積度は3年で4倍になるとされる。市場はこのムーアの法則のとおり、約40年にわたって常に一本調子で拡大してきた。これを技術として支えたのが、CMOSトランジスタのスケールリング則である。寸法をK分の1にすると、集積度はKの2乗倍になり、トランジスタの性能をスピードと消費電力で評価すると、性能がKの2乗倍になるという原理である。基本構造は変えずに寸法を縮めていくだけで性能が着実に上がることに技術的な裏付けを与えるものである。トランジスタの基本構成を変えることなく、この40年間で半導体素子の集積度は100万倍、あるいはインテルのホームページによると、実は1000万倍に、単体の素子性能は1万倍になったとされる(図1-1-2)。それにも拘わらず、半導体チップの価

格はほぼ一定で推移しているのので、データ処理のコストは、10億分の1から100億分の1に削減されたことになる。この様に半導体の進歩が高度情報化社会発展の大きな駆動力であったことがわかる。

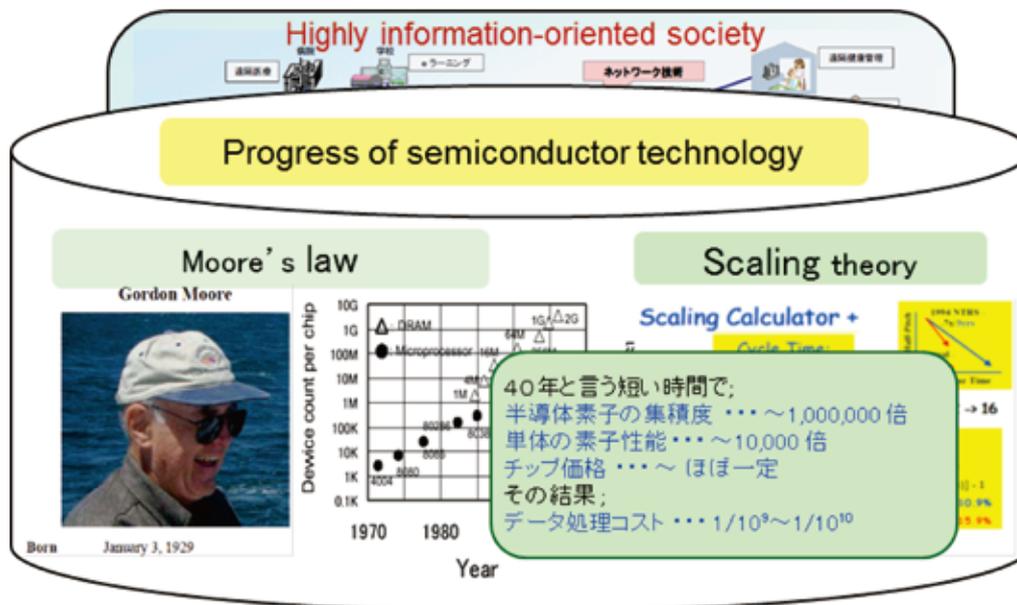


図 1-1-2 駆動エンジンは半導体技術

米国 IDC が公開している資料によると、2007年に全世界で生成されたデジタルデータ量は、281エクサバイト、2011年には1.8ゼタバイトに到達するとされた。生成されるデータ量は2007年には供給されるメモリ・ストレージの容量を上回り、今や、いわゆる情報爆発が起こっている（図 1-1-3）。このように生成されるデジタルデータの指数関数的な増大に比例して人類が保管すべきデータ量も急速に増大していると考えられる。例えば、世界中で発表されている論文の量は、ネットワークで論文を公開するようになった2000年以降に急激に増えている。このような身近な事例からも、今世紀に入っでの情報爆発は大いに実感できる現象である。

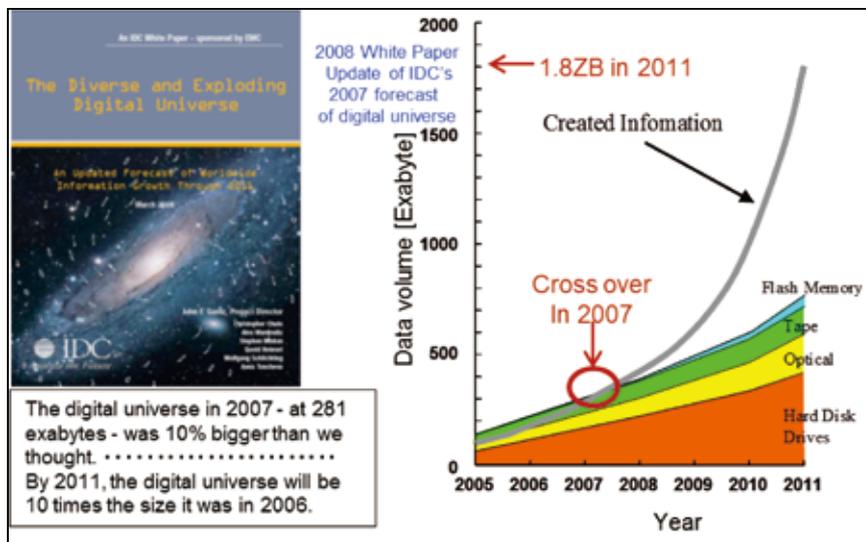


図 1-1-3 今日起こっている情報爆発 (Data Explosion)

高度情報化社会を支えてきたデジタル技術をもう一度振り返ってみると、我々人類社会が持続的に発展していくためには、基本的に二つのデジタル技術が必要と考えられる。一つはデジタルデータを処理する技術で、一般に情報技術（IT）と呼ばれる技術である。社会活動、経済活動、産業活動を支えるためのデータ処理のテクノロ

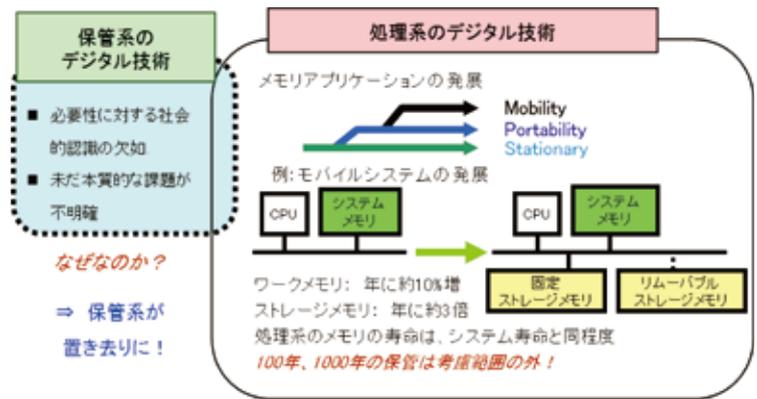


図 1-1-4 メモリ技術の発展経緯

ジー、テクニック、およびそのシステムである。社会が必要とするもう一つは、デジタルデータを保管する技術である。社会、産業、個々人のアイデンティティ、文化、社会的規範、歴史を継承する情報の記憶・保管の技術である。

これまで記憶に関するデジタルの技術といえば、処理系のデジタル技術としてのメモリ技術が主であった。システムに組み込まれたメモリがどのように使われてきたかを見ると（図 1-1-4）、ワークメモリは年に約 10%、ストレージメモリは年に約 3 倍増加してきた。ここで使われているメモリの寿命は、システム寿命と同程度であり、100 年あるいは 1000 年の記憶の保管ということは全く考慮されていないことに気付く。保管系のメモリ技術は、必要性に対する社会的認識の欠如とデジタル社会の本質的な課題が理解されてこなかったことが原因で、全く置き去りにされてきたのである。我々がデータ保管に関心なままに情報爆発が進行し、社会・文化・産業の貴重なデータの回復不可能な消失につながる危険性が増大している状況に気付く必要がある。

この問題に対して警鐘をならしている事例を紹介したい。一つ目は、2006 年のスウェーデン国立公文書館からのメッセージである。ここではデジタルデータを長期保管するためのプロジェクトを進めていくためには、初期投資はもちろんだがその後のメンテナンスの経費や継続的にリニューアルしていく経費など、資金の手当てを計画しておかないとデジタル化プロジェクトは破綻するという警告を発信している（図 1-1-5）。

**危機意識**

デジタルへの過剰な熱意は危険が伴う。デジタル変換プロセスを開始するにはかなりの初期投資が必要である。その投資は、デジタルのメンテナンス経費を継続的に保証する構造的な資金調達手段が無かったり、将来計画が廃止されたりした場合は無駄な投資になってしまう。

このような長期計画の無いデジタル化プロジェクトは、宇宙のブラックホールの様なものである。

スウェーデン国立公文書館の報告書（～2006）より  
[http://www.jiima.or.jp/pdf/Palm\\_Black\\_Hole.pdf](http://www.jiima.or.jp/pdf/Palm_Black_Hole.pdf)

図 1-1-5 長期保管プロジェクトからの警鐘

次は、デジタルデータに特有の保存上の課題に関する事例である。1975 年に NASA は、火星探査機バイキングを火星に送った。その 25 年後にバイキングの観測データを復元しようとしたところ、復元できないという事件が起こった。磁気テープに保存されたビットデータのフォーマットが失われてしまったため、ビットストリームである 0, 1 データの

意味が分からなかったためである。デジタルデータの意味解読には、データの構造を記述するためのデータが必要であることを思い知らされた事例である。

これらの事例をはじめとして、一般に、デジタルデータの長期保管技術に対する認識が不十分のまま、デジタル技術が社会に浸透するに伴ってデ

ジタルデータの長期保管を必要とする組織、団体、人々は着実に増えている。例えば映画業界についてみると、このところ、映画のデジタル化の急速な展開に呼応して、ハリウッドではデジタルデータの保管はどのようなシステムを使っていけばいいのかという問題を盛んに議論している。ちなみにハリウッドでは次に示す7つの条件、1) 世界的な標準、2) 長期で100年以上のアクセス、3) 複製マスターの生成、4) オリジナルと同等の品質保証、5) 技術プラットフォームに依存しない、6) 運用互換性、7) 財政事情の影響を受けないこと、を満たす技術・システムを求めている。現状でこのような7つの条件を満たす技術・システムは、フィルムアーカイブのみであるというのがハリウッドの結論である(図1-1-6)。デジタル技術が主流となる状況において、ハリウッドはおそらく世界で最もデジタルデータの保管に関心を持っている組織ではないかと思われる。他に、図書館関係が大きな関心を寄せて多くのプロジェクトを進めている。事情は公文書館においても同様である。この他にもFBI・警察関係でデジタル写真などの証拠の保管期間として100年以上が必要だと言われている。さらに、医療の分野でも急速に大きなデータの長期保管に関する需要が高まっている。



図 1-1-6 ハリウッド（映画業界）からのメッセージ

デジタルデータの長期にわたる保管においては、基本的に二つの課題がある。一つ目の課題は、現在のメモリ・ストレージとシステムの寿命が短命であることである。現在のデジタルメモリ・ストレージはシステムの一部として使われるため、期待される寿命はシステム寿命と同程度であり、そのシステム寿命は10年程度と非常に短いのが実情である。旧来の記録媒体、例えば紙は保証期間が250年、

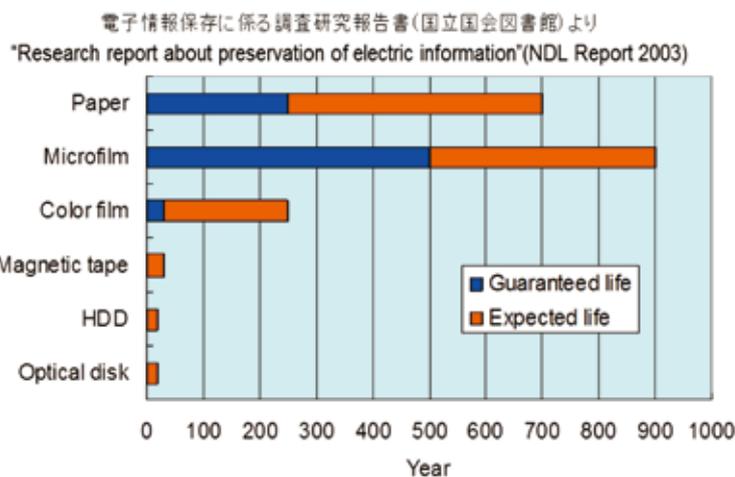


図 1-1-7 各種ストレージ寿命（信頼性）

期待寿命は700年といわれ、マイクロフィルムは保証期間が500年のものもある。一方、既存のデジタルメモリの期待寿命は、数10年程度と極めて短い状況である(図1-1-7)。

二つ目の課題は意味理解の問題である。デジタルデータ本体はビットストリームなので、これだけでは何の意味か理解できない。そこでメタデータという、データの持つ意味を理解するた

めに必要なデータを付け加えてやることになる。さらにメタデータのメタデータが必要となる場合もある。どの様なメタデータをどの様に付与すべきかについてのモデル(参照モデル)が提案されている(図1-1-8)。先に紹介したNASAバイキングのデータ消失を受けて、NASAとアメリカ政府がOpen Archival Information System(OAIS)というデジタル情報の保管モデルを作り標準化した。その概要は、記憶すべきデータの本体であるContent Informationと、その内容に対するメタデータであるPreservation Description Informationと、この2つを結びつけるPackaging Informationをまとめて1つのパッケージとし、さらにこのパッケージの外側にパッケージの内容の特性を記述するDescriptive Information Packageを付与するというものである。

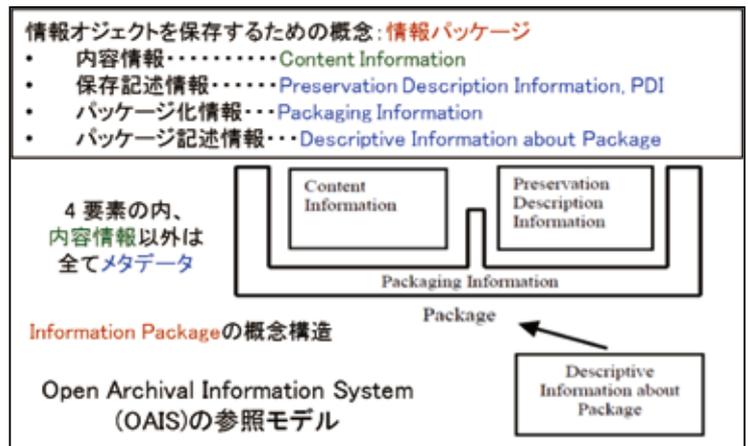


図1-1-8 メタデータの参照モデル

次に、デジタルデータを継続的に保管するための方法(戦略)について考える。現在、次の3つの戦略が有るとされる。まず、「リフレッシュ」は、単なるコピーの繰り返しである。次に「エミュレーション」と「マイグレーション」がある。長期保管システムとし

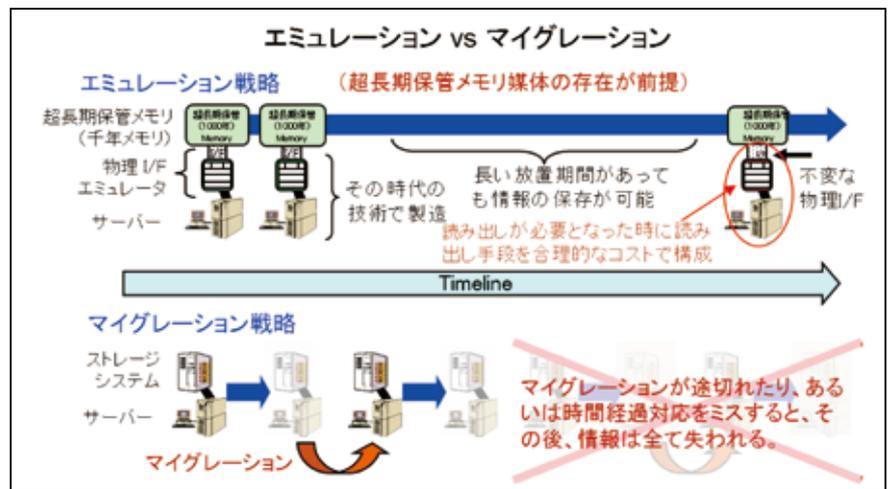


図1-1-9 期待される超長期保管システムは?

ては現在、マイグレーションが広く使われており、唯一の長期保管方法となっている。ただ、コンピュータとソフトウェアの世代が替わると、デジタルデータを新しいシステムへ移し変えていくという方法であるため大きなコスト負担が生じている。もう一つの方法であるエミュレーションは、新システム上に旧システム上にあったメモリ・ストレージ媒体の読み出し環境を作るといったものである。エミュレーションが成り立つためにはオリジナルの媒体が生きていることが条件であることから、現状では長期間生き延びる媒体がないため長期保管戦略としては成立していない。しかしながら、長期間記憶を保持する媒体さ

え存在すればデジタルデータの長期保管戦略として有力な方法になると考えられる。

ここで、期待される長期保管メモリ媒体とシステムには何が要求されるのかについて、基本に戻って考えてみたい。

そもそも現在主流のマイグレーションはいつの時代まで可能であろうか。マイグレーションは、コンピュータの世代が替わるたびに新しい技術体系で作ったシステムに移行していくため、膨大なコストを負担し続けなければいけない。さらに何らかの理由で一度移行が途切れると、データは永久に失われ二度と再生できなくなるという脆弱さを持っている。一方、今回のワークショップのメインテーマである 1000 年メモリ、すなわち保管環境に左右されず、かつメンテナンスがいらないメモリが実現できたとすると、エミュレーションという方法を非常に有効な保管戦略にすることができる（図 1-1-9）。

理想的なエミュレーション戦略を成立させるためには、データが消えないことはもちろんのこと、読み出しの際の技術的手段を合理的なコストで得られることが必要である。読み出すために必要な物理的なインターフェースを低価格で作ることでき、同時に意味理解の手段が存在すること、すなわちハード、ソフトともエミュレータを作れることが条件となる。また、そのための仕組としてデータフォーマット、メタデータの標準化を行う必要があり、さらにスケーラビリティの保証と媒体の再利用の容易性（利便性）の確保が重要となろう。

#### まとめ

今後、100 年以上、望むらくは 1000 年にわたって妥当なコストで意味理解を保証する記憶システムは必須である。現在、データ長期保管の主流であるマイグレーション戦略はデータ量とコストの増大に起因する破綻の恐れがあり、新たな保管戦略が必要と考えられる。そこで、超長期保管メモリ媒体を実現できれば、より低コストで堅牢なエミュレーション戦略が有効な方法となると考えられる。さらに意味理解を保証するために、メタデータとメタデータスキーマの構築・標準化が必要である。

#### 質疑・応答

Q：エミュレータの説明をもう少し詳しく聞きたい。たとえば作り方その他全部失われても、その媒体さえ残っていれば、必ずエミュレータを作ることができるということ。具体的にどの様なものなのか。

A：エミュレーションは、同じ機能を持ったものを、別のハードウェア、ソフトウェアの技術を使って作り上げるということだが、ご質問は本質に関わる部分。講演では必要性の指摘にとどまっているので、具体的な実現手段については、ワークショップで議論を深めていただきたい。

Q：デジタルデータというのは、現在のフォンノイマン型のコンピュータに結び付いている。将来、コンピュータのパラダイムが変わったときにも、デジタルデータという考え方が存在するか。

A：ノンフォンノイマンができたとしたら、おそらくメモリの形も変わる。

Q：エミュレーション戦略を成り立たせるために超長期保管メモリ媒体の“存在”が前提とあるが、光ディスクには 1000 年保証というカタログ製品がある。ISO で標準化

が進められている媒体試験法によって100年、200年もつものもある。この“存在”という意味について、コストなのか、量がどのくらいなのか、あるいはマイグレーションにも関係すると思うが、ドライブとの関係など、“存在”の前提、定義については。  
A：エミュレーション用の媒体として、すでに使えるものはある。しかし、インターフェース、意味理解など、まだいろいろな問題が残っている。

## セッション2 WSの課題と論点

### 2.1 WSの課題と論点

小林 敏夫 (神奈川大学)

基調講演で述べられていたように、現在のデジタル情報社会を支えている電子技術は、“今の仕事”を処理する技術という形で発達してきた。その一方で、記憶の保管のための技術の必要性に対する認識は不十分、あるいは無いに等しい。その理由は、デジタル技術は生まれてまだ半世紀しか経っていないためと考えられる。しかしながらその間に処理系の技術は大きな進歩を遂げ、膨大なデータが生成される状況が生まれている。このため、処理と保管の技術のアンバランスが今は非常に大きくなり、生成されたデータの保管が危機的な状況に成りつつある。このような危機感の下に、私は8年間ほど活動をしてきた。この2年間は各方面の方々にヒアリングを行ってきた。この結果を基に本ワークショップの課題、論点を述べて期待を述べる。

まずデジタルデータの保管を必要とするユーザーの皆さん、すなわち国会図書館、NHK、博物館、またサイエンスの分野の方々もそうであるが、図2-1-1に示す技術の体系、すなわち材料からアプリケーションソフトまでの技術の階層のなかの最上層しか見ていない。このことは、特に文系の方々にとって

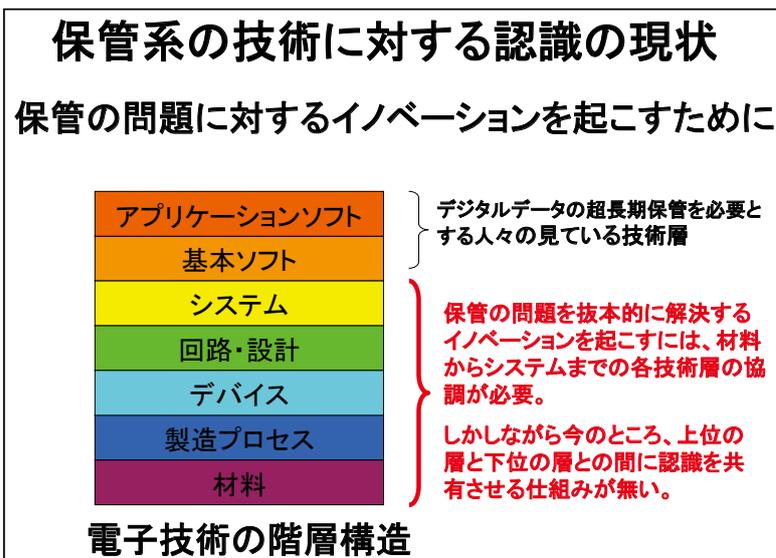


図2-1-1

は、無理もない話であるが、最上層の階層だけ見ていたのでは本質的なイノベーションを起こすことはできない。材料から一貫して全ての階層を突き通すような形でソリューションを探さないと、見つけることはできないと思われる。

それに対して、データ処理の技術開発をする人々には ITRS のロードマップというものが、材料からシステムまで一貫して、何年後にどのようなスペックの材料、デバイス、システムが必要かということ議論し目標値を設定し、世界中に提示してきた。すなわち、材料から基本システムに至る全ての階層を一貫して眺めて、何が必要かを認識して技術開発を進めてきた。このことが、40年近くにわたりムーアの法則が維持されてきた一つの原動力になっている。このような努力が処理系の技術開発においては成されてきたが、保管の話にはそのような形で技術開発を行うという認識は全く無かったし、今も無いと言える。

なぜなのかという、そもそも材料からシステム技術に携わるテクノロジー側の人々には、デジタルデータの超長期保管を必要としている人々の存在とその人々のニーズというものに対する認識が無い。言い換えると、デジタルデータの長期保管という分野にビジネスがあると思っていなかった。どのような市場が存在するのか、そもそもビジネスが存在するのかという課題に対して議論もなされていなかった。当然のこととしてモチベーションも生まれていない。この状況を打破するために、技術の最上層しか見ていない超長期保管技術を必要とする人々と、テクノロジーに携わっている人々の間にある認識のギャップを解消し、ニーズに対する共通認識を持たせることがまず必要である。

今、超長期保管技術を必要とする人々は、基調講演にあったように、図書館、公文書館などの限られた人々だけでなく、警察、医療そして個人へと広がっている。国会図書館の長期保管に関するホームページの中に、孫にデジタル写真を見せたいのだが、どうすればいいかという問いに対して、公式見解として印刷することであるとしている。デジタルデータはいつ消えるか、あるいは読めなくなるか分からないとされている。目標とする保管期間を100年にするのか1000年にするのかという議論はあるが、少なくとも100年を越える期間デジタル情報を保管するというニーズは、もはや限られた人たちだけの話ではない。言い換えれば潜在的なビジネスは広がっていると言える。この様な認識を技術開発側にきちんと持っていただくためにも、各階層に関係する人々が協調してこの問題に対する議論ができる場を作る必要がある。

今日の処理系のデジタル技術は、既に極めて大きなビジネスに成長している。はじめは高価な機器であったものが、今はコモディティ化し社会の隅々まで浸透している。今日の処理系の技術に対応できる保管形の技術を確立するためには、かなり大きな力で開発を動かさなければならない状況と考えられる。しかし、大きな力を使うためには、前提となる幾つかの課題に対する検討が必要である。

まずビジネスがあるのか、そもそも保管のビジネスとは何なのかを明らかにする必要がある。稼働モデルは、市場はどのくらいあるのかという疑問にも答える必要がある。100年単位の長期の保管を実現するメモリ・システムのビジネスを考える上で一つ難しくするものとして、最初に初期投資をする人が利益を得るわけではなく、利益を得るのは100年後あるいは1000年後の人だという考え方がある。投資した人と利益を受ける人が異なる。このような状況のなかで、初期投資をおこなうというコンセンサス、意思決定はどの様にして得られるのか。投資に対する動機づけを考えておかないといけない。そうでないと大きな投資が必要な開発に踏み切れない。

さらに、会社（製造主体）の寿命より長い商品を作ってどの様に保証するのかとの質問に答える必要がある。この保証の問題に関しては、先達である光ディスクの業界の対応が参考になる。個々の会社が保証するのではなく、保証する基準を外に出し、標準化してしまう。会社や個人が保証するわけではないという仕組みを作る。これは非常にいいアイデアだと思われる。

次の問題としては、情報系の問題がある。本当に100年あるいは1000年先の人が読める、意味を理解できるような仕組みというのが作れるのか。この課題に対しては、意味を理解するための仕組みの標準化を行うことが必要である。この仕組み作りというのは、非常に重要である。

媒体に対しては、既に100年あるいは1000年保存できるものがあるとの意見がある。しかし現存の媒体は意味の理解が保証できているのか、アクセスが保証できているのかという話に関しては、なお議論が必要である。この問題に対しては情報系の方にも入っていただいて、仕組みについて議論をする必要がある。

個別の媒体技術については、100年ないし1000年記憶を保持できる物理媒体を作る上で使用する製造プロセスやデバイスの信頼性保証が重要な課題となる。採用する媒体技術ごとに技術的な検討を十分に行っておく必要がある。材料についても、100年ないし1000年もたせようとする、材料に対する選択、選別が、保管条件との関係で非常に重要になる。これらは、環境フリーやメンテナンスフリーを実現するためにも重要な課題である。

長期に保存と意味理解を保証する超長期保管メモリ・システムの開発に際しては、システム・回路技術と情報系の話とを統合して議論する必要がある。よくよく考えてシステム設計しないと、作ってはみたが50年を経ずして捨てられてしまうということになりかねない。最初の段階でハード・ソフトにまたがるシステムを非常によく練っておく必要がある。

最後に、本ワークショップに対する期待としては、このワークショップが保管系のデジタル技術開発の礎となること、ニーズとシーズ側の連携のきっかけになり、共通認識の場をつくる礎になることを期待している。最終的には、世界に先駆けて、日本が文化や科学情報の未来への継承を保障するアクセスと意味理解を保証できるメモリ・システム技術を提案できるような活動に結び付くことを期待する。

#### 質疑・応答

Q：やはり「日本が」というところにこだわり、世界標準にならないと、膨大なデータを蓄えるといっても、データの大部分が合衆国にある状態において、われわれの技術がいくらよくてもガラパゴスになると思う。初めから国際という視点を失ってはいけないのではないかと思うが。

A：おっしゃるとおりだと思う。ただ最初から何も考えずにアイデアをアメリカに持っていくのがいいのかは疑問。日本だけで最終ゴールまで行けるとは思っていないが、アメリカや海外に投げかける際には、ある程度の素案というものを自分たちで持った上で投げ掛けなければ、投げ掛けたことにもならないと思う。残念なことに今のわが国の状況は、長期保管のシステム、デバイスがどうあるべきかという議論は起きていない。であるから、今回のワークショップを通じて、そのきっかけになるような活動が始まり、ある程度のシナリオができたならば、世界へ提案すれば良いと考える。

## セッション3 超長期保存メモリの必要性と社会・経済的效果

### 3.1 国立国会図書館の電子情報と長期保存における課題

池田功一（国立国会図書館）

国立国会図書館はパッケージ系電子出版物やデジタル化資料など、様々な電子情報を所蔵している。どのような電子情報を所蔵しているのか、それをどのように保存しているのか、これまでにやってきた調査研究を説明し、それらを踏まえて、電子情報の長期保存の課題にはどういったものがあるのかを述べる。

#### 1. どのような電子情報を持っているか

国立国会図書館で所蔵する電子情報は、パッケージ系電子出版物、デジタル化資料、インターネット情報の三つに大別できる。

一点目はパッケージ系電子出版物。光ディスクといった有形の媒体に固定された出版物であり、音楽CDやDVD、各種ソフトウェアのCD-ROM、ゲームソフトといった資料を収集している。これらの電子出版物は、2000年から正式に納本制度の対象となった。

二点目はデジタル化資料。図書や雑誌といった紙媒体の所蔵資料をデジタル化したデジタルデータである。紙媒体の資料は、紙質の劣化や頻繁な利用により、劣化や損傷が生じてしまう。デジタル化を行い、そのデジタルデータを代わりに利用することで、原資料を長期的に保存することができる。過去にはマイクロフィルムに保存していたが、現在はデジタル化を原則としている。インターネット公開することで様々な人々に利用してもらうことができるため、電子図書館サービス向上の観点からもデジタル化を進めている。

所蔵資料のデジタル化は2001年から着手しているが、平成21年度の補正予算によって大きく進捗した。これらのデジタル化資料は「国立国会図書館デジタル化資料」ウェブサイトで公開しており、著作権処理が完了した資料はインターネットでも利用できる。著作権の保護期間内の資料については、現在は国立国会図書館の施設内でしか見られないが、著作権法の改正によって、入手困難な資料については全国の図書館等に送信することが可能となる。改正著作権法の施行は平成25年1月だが、サービス提供開始にはさらに時間を要する見込みであり、実現に向けて取り組んでいるところである。

三点目はインターネット情報。ウェブサイトを集集保存して、過去のウェブサイトを見られるようにしている。インターネット情報は消失しやすいため、この有用な情報資源を保存して後世に残す必要がある。各国の国立図書館でも同様の取組が行われている。特に近年では、これまでは紙媒体で刊行されていた雑誌が、刊行を取りやめてインターネットでしか公開しないとといったケースが増えており、これらの収集も重要となっている。消失したウェブサイトの具体例としては、日韓ワールドカップのホームページといったイベントのページや、市町村合併でなくなってしまった市町村のホームページなどがある。

インターネット資料収集保存事業は、当初は実験事業として許諾によって収集を行ってきたが、法改正によって現在では、国・地方公共団体のウェブサイトについては制度的に収集することが可能となっている。なお、平成25年7月からは、納本制度に準じる形で、民間で出版された電子書籍・電子雑誌等のオンライン資料収集保存も開始することになっ

ている。当面は、無料かつ DRM（デジタルデータの著作権を保護するため複製を制限する技術）のない資料が対象となる。

## 2. どのように保存しているか

これらの電子情報をどのように保存しているかという、書庫に保存しているものとデジタルアーカイブシステムに保存しているものに分かれる。パッケージ系電子出版物と、デジタル化資料のうち保存用画像については、一定の温湿度に保たれた書庫で保存している。デジタル化資料のうち、実際にウェブサイトを提供している提供用画像とインターネット情報については、デジタルアーカイブシステムに保存している。

デジタル化資料の保存用画像は、圧縮率が低く高画質なもので、過去には DVD、現在はブルーレイディスクに記録している。ブルーレイ 1 枚を 50GB の容量と仮定すると総データ量は 5PB に達する。

デジタルアーカイブシステムの構成は、データが消失しないように、ハードディスクを RAID6 によって構成しており、エラーチェック、修復が自動的になされる。さらに、ディザスタリカバリの観点から、LTO (linear tape open：コンピュータ用磁気テープのオープン規格) テープにも保存して地理的に離れた別拠点で保管している。

災害等によってデジタルアーカイブシステムが被災しても、データを消失させないため。ただし、長期保存的な観点で問題がないわけではなく、これだけのデータ量になると、実際にデータを復元するためには長期間を要してしまう。先日お会いした大英図書館の開発部門の方によると、大英図書館では四つの拠点が、それぞれにオンラインでバックアップを取得し合っているとのことだった。コストも念頭に置きながらよりセキュアな方式を今後も検討していく必要がある。

## 3. これまでの調査研究

電子情報には、三つの要素が考えられる。一つ目はデータそのもの。二つ目はメタデータ。そのデータが何のデータであるかを示す、商品で言えばラベルやパッケージのような

電子情報の保存方法
<p><b>書庫に保存・保管</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 温度摂氏22°C、湿度55%前後 紙媒体の資料と同じく書架に配置</li> <li>□ パッケージ系電子出版物 録音資料(音楽CD等) 約67万点 映像資料(映画DVD等) 約28万点 電子資料(PCソフト等) 約11万点</li> <li>□ デジタル化資料の保存用画像 DVD-R 約3万枚 (150TB) BD-R DL 約10万枚 (5PB)</li> </ul>

図 3-1-1

電子情報の保存方法
<p><b>NDLデジタルアーカイブシステム</b></p> <p>デジタルアーカイブを構築し、各種の電子図書館サービスを実現、電子情報の提供と保存を担う。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 冗長化構成、バックアップ RAID6によりエラーチェック、修復がなされる。また、磁気テープ(LTO-5(Ultrium5))にも定期的に保存し、ディザスタリカバリの観点から別拠点で保管している。</li> <li>□ デジタル化資料の提供用画像 約220万点 140 TB</li> <li>□ インターネット情報 約7千タイトル 140TB</li> </ul>

図 3-1-2

もの。三つ目はこれらを実際に保存するメディア媒体。

世間で一般的に電子情報が語られるときは、主にメリットばかりが強調される。省スペース、複製・編集が容易、利用による劣化がないなど、よいことばかりに思える。しかし、問題も抱えている。省スペースではあるが、記録媒体を再生するための再生機器が必須となる。複製・編集が容易な分、データ流出や改ざんをどう防ぐかという問題もある。劣化がないが、紙より媒体の寿命が短く、一部分の欠損で全体が消失することもある。紙であれば、1ページ破れてもほかのページが読めるが、ハードディスクの一部分でエラーが起これば、全体が読めなくなる可能性が存在する。

このように、電子情報は長期保存を考える上ではいろいろと問題もあり、これまで各種の調査研究を行ってきた。一例としては、長期的な保存・利用に適した記録媒体の調査研究、長期的な利用を保障するためのシステムに関する研究など。また、厳密に言うとデジタルではないが、再生機器が必要であり、旧式化するという点では同じであるため、旧式録音映像資料に関する調査も実施してきた。

これまでの調査研究の報告書は当館ホームページで見ることができる。個別の調査研究報告書のほか、平成18年度～平成22年度の5カ年の調査をまとめた総括報告書も公開している。

#### 4. 長期保存の課題

電子情報の脆弱性として、まず一つは再生環境が必要だということがある。再生機器は旧式化によって入手不可能になったり、劣化によって壊れてしまったりする。レーザーディスクやMDなど、再生機器がなくなってきて再生が危ぶまれるものがある。また、再生ソフトウェアも旧式化する。Windows95の当時のバージョンのソフトウェアでないともう動かない、そのような情報も想定される。PhotoCD形式に対応するソフトウェアが少なくなっているなど、ファイルのフォーマット自体が旧式化してしまうこともある。それぞれの段階で旧式化に対抗する必要がある。

さらに、媒体そのものの寿命の問題もある。CD・DVDの寿命は、一般的なものは10から30年程度。保管条件によっては50年以上もつということも言われているが、紙には遠く及ばない。

電子情報の長期保存を考える上で重要なポイントが、**技術・環境の変化**に対応し

長期保存の課題

### 電子情報の脆弱性

- 再生環境が必要
  - 再生機器の劣化・旧式化 LD, MD ...
  - 再生ソフトウェア等の旧式化 PC, OS, アプリケーション...
  - ファイルフォーマットの旧式化 PhotoCD形式...
- 媒体の寿命が短い
  - 媒体の劣化 CD・DVDの寿命は10~30年程度ととも

図 3-1-3

長期保存の課題

### 電子情報の長期保存のために

- 「長期」保存の特徴
  - 電子情報は紙に記録された情報に比べて脆弱
  - 技術、環境の変化へ対応していく必要がある



ビット保存: 情報の欠損/変化がない  
論理保存: 情報の内容を理解できる

ファイストスの円盤  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diskos\\_von\\_Phaiistos\\_Seite\\_A\\_11-Aug-2004\\_asb\\_PIC73371.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diskos_von_Phaiistos_Seite_A_11-Aug-2004_asb_PIC73371.JPG)

ていく必要があるということ。保存レベルには、二つある。一つはビット保存（Bit preservation）であり、情報の欠損・変化がないということ。もう一つは、論理保存（Logical preservation）である。情報の保存とともに、その保存内容を理解できるという、この両方が同時に必要である。つまり、ビット保存だけでは不十分で、その情報を読み取り、さらに内容を理解できる必要がある。

したがって、データを受入れるときに保存に関するメタデータを入力しないとイケないし、保存後も適切なデータ管理が必要。保存してしまえばそれで終わりということではない。フォーマットを識別して正しく保存データ入力するなど適切にデータを受入れ、データが劣化・旧式化する前に検知し、それらに適切なマイグレーションを実施し、提供するためにエミュレーションを行う。このような対応が必要になってくる。

OAIS 参照モデルに沿って長期保存に必要な要件を示すと図のような対応が必要と考えられる。下線部については、システムによって自動化された対応が望ましいと考えている。

### 5. 今後の課題

長期保存の課題としては、次のようなことを考えている。

光ディスクなど、オフラインの電子情報においては、定期的なエラーチェックが必要である。劣化によってエラーレートが上がってきて、読み出せなくなってしまう恐れがある。ただ、エラーチェックに要する費用は安くなく、マイグレーションと同じぐらい費用を要することもある。ケースに収納されたディスクを検査機にセットし、光ディスク全

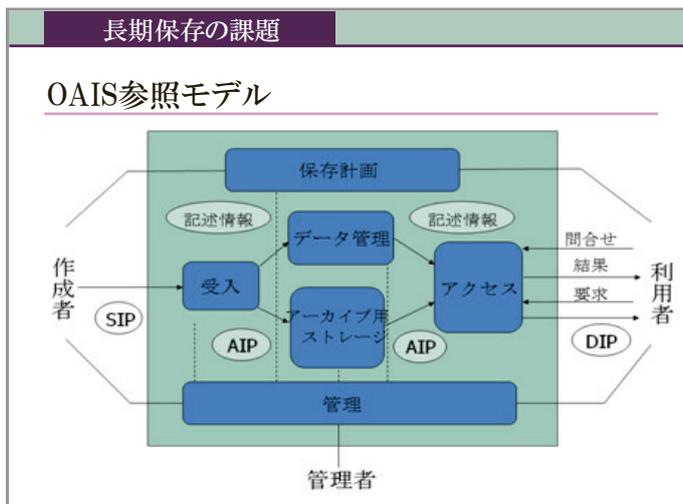


図 3-1-5

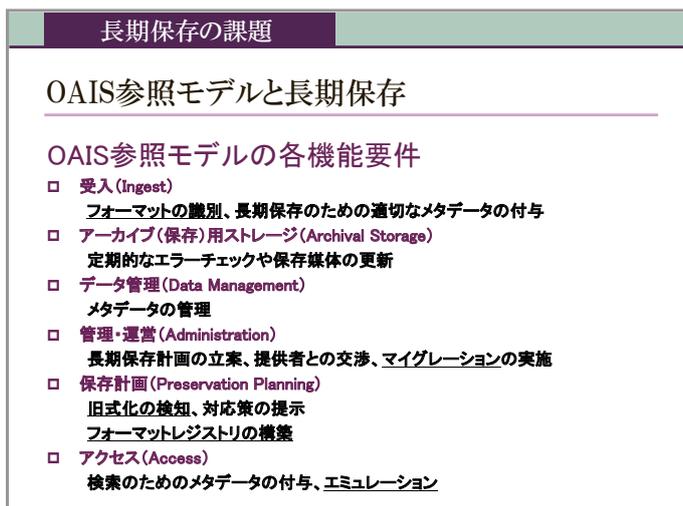


図 3-1-6

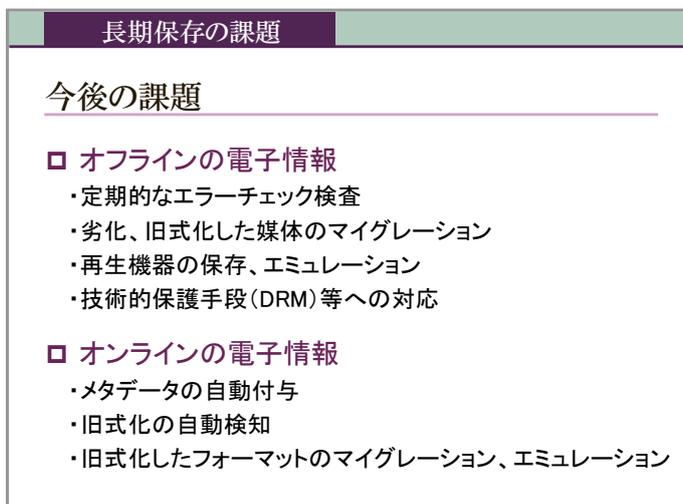


図 3-1-7

面を検査するためであり、実施する方法は今後検討を必要とする。劣化・旧式化した媒体のマイグレーションと、再生機器の保存、エミュレーションも必要となる。これらの実施においては、商用のパッケージ系電子出版物では DRM がかけられているものもあり、これにどう対応するのかという問題もある。

オンラインの電子情報については、メタデータの自動付与が課題となる。このファイルフォーマットは何であるかなど、そのような情報を自動的に記録する。人が記録するのはやはり限界があるので、自動付与の仕組みが必要である。旧式化が生じつつあるフォーマットを、自動的に検知する仕組みを構築しなければならない。また、オフラインのものほど顕著ではないが、オンラインの電子情報も将来的にマイグレーション、エミュレーションの必要が生じると思われる。

オフライン、オンラインともに、保存しただけでは駄目で、論理保存を考える上では、やはり継続的な取り組みが常に必要になってくる。

保存媒体としては、現在のところ、これを使えばいいという「最良」の保存媒体は存在しない。フランス国立視聴覚研究所では、映像テープ等を JPEG2000 のデジタルデータに何十万時間単位で変えているが、そこの方が言っていたのは、デジタルデータ化はベストなソリューションではなく、今のところベターな選択であり、他によりよい手段がないためとのことだった。わたしもある部分同意している。アクセスの利便性や再生機器の問題から、長期保存を考える上では現状デジタルデータに頼らざるを得ないが、劣化や旧式化など電子情報の脆弱性は解決されていないため、継続的な取組が必要である。

最後に、長期保存を考えた上で、今後の保存媒体に期待する機能について述べたい。

エラーレート監視といった劣化対策のため、またファイルフォーマット監視といった旧式化対策のため、定期的にデータにアクセスして調べる必要性があり、アクセスの利便性が重要である。また、再生機器及び再生技術が確保され、長期間担保されることが必要である。下位規格への互換性も期待される。たとえばブルーレイのドライブでは、今のところ CD と DVD の再生も確保されている。

また、何とんでも保存媒体のコストが低いことも重要である。長期保存に向いていても、コストが高ければ導入は難しい。それから、一般への普及度。やはり普及していない技術というのは旧式化しやすく、再生機器がなくなり、フォーマットの旧式化も起こりやすい。コストと一般への普及度には関連性があるように思う。

長期保存において保存媒体の果たす役割は非常に大きい。アーカイブに取り組んでいる各種の機関から、過去のメディアが読めなくなっているという話をこの頃よく聞く。日本だけの問題ではなく、世界的な問題であると認識している。ぜひ、よりよい媒体を開発していただきたいと思っている。

#### 長期保存の課題

##### さいごに

- 電子情報の長期保存/長期利用保障のためには、継続的な取り組みが必要。
- 現在のところ「最良」の保存媒体は存在しない。
  - ・長期保存性、アクセスの利便性、再生機器の担保、下位規格への互換性、コスト、一般への普及度などが重要。
- 長期保存において、保存媒体の果たす役割はひじょうに大きい。

図 3-1-8

### 3.2 映像デジタルデータの長期保存

山本雅弘 (NHK)

#### 1. 放送用メディア保存の変遷と保存の目的

テレビ放送は1953年(昭和28年)に日本で始まった。当時のメディアは生放送とフィルムで、放送を記録しようと思うとテレビ画面をフィルムで撮影するしか手段がなかった。NHKには当時放送したニュースフィルムはいまだに残っている。

その後はアナログビデオの時代で、2インチVTRは幅が2インチの磁気テープで90分で重さ10キロほどあった。次にヘリカル記録などで1インチ、3/4インチとテープ幅が小さくなっていった。

次がデジタルビデオで、いわゆるデジタルバースト記録で中身の記録はデジタル方式だけれども早送りすると絵が出てくる。アンキャッシュして、いわゆるビデオテープとして使える。これが現在のNHKの放送でも現役で使われている。D5というのはハイビジョン用のテープ、またソニーのHDCAM、このようなテープで放送している。これから整備をして、今後、ファイルベースへ移行しようとしている。

テレビ放送の開始以来、保存の目的は単なる記録ではなく、再放送、部分利用などにより、どこかでもう1回使い、視聴者のほうに戻していくことである。このため、フィルム時代に作ったものをアナログビデオ時代に1インチのテープにコピーし直した。さらに、1インチのテープは、現在は全部デジタルテープにコピーした。できる限り使える状態を保つということ、マイグレーションを脈々とやって今に至っている。これには、お金と時間がかかる。1インチのテープは、去年やっと、全部デジタルビデオに変換が

終わった。10年以上前に運用は終わっているが、その変換に10年以上かかった。ビデオテープだから1倍速でしかコピーできない。

フィルムに関しては、ビデオにした後も残してある。これは、将来の技術開発によって、もっといい映像などが取れるだろうと見込みがあるため。逆にアナログビデオは、単なる電気信号なので、これはそれ以上のものは取れないだろうということで割り切って全部捨てている。捨てているのは、再生環境がないからでもある。数年前に2インチテープが発掘されて、NHKの放送博物館の機械を動かそうとして、すでに退職した人も頼って修理して絵を出したが、最後は1分ほどは出て、それで回路が焼き切れてあとはもう駄目だった。この先、もし2インチのテープが見つかって、実際中身はわれわれの手では見られない。

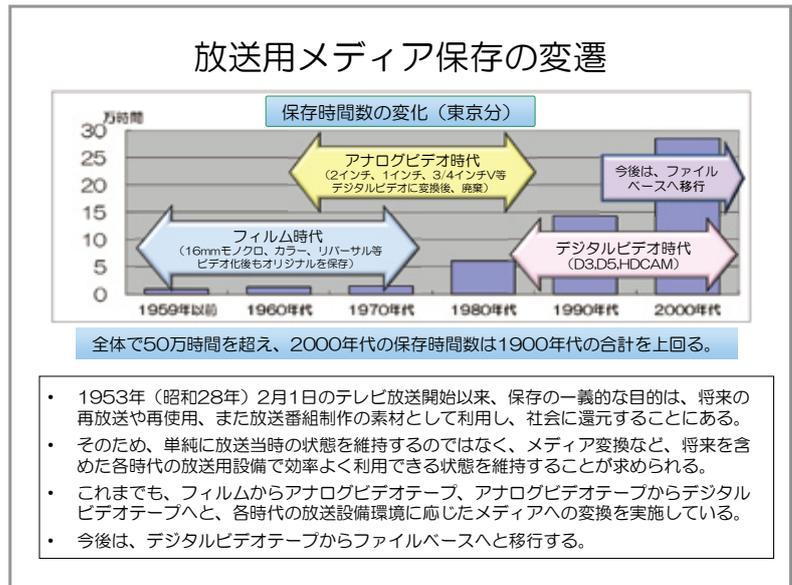


図 3-2-1

## 2. ファイルベース保存への期待と課題

ファイルベースにすること自身が多くの保存の課題を解決すると考えている。ひとつには、一度ファイルベースに移行してしまえば、高集積化によりスペースが小さくなる。それから、使いたいときにすぐ使えないという提供に関しても、ネットワークの利用等を含めて迅速化ができるだろう。さらに、保存の過程で必要なメディア転換に、毎回毎回、実時間で何十年もかかるというということも、次へのメディア移行を機械任せで自動的にということが望める。このようなことで考えていくと、ファイルベースにするだけでも、今抱えている課題はクリアできるのではないかと考えている。

そのようなことで、ファイルベースに移行する方向で検討を進めたが、映像テープ全体で時間数が99万時間、約100万本、このなかには予備や試写用もあるので、オリジナル分は、大体今現在は53万時間ある。さらに、ファイルベースへ移行していくには時間がかかるので、7万時間分ぐらい増えて、大体60万時間をファイルベースへ変換しなければいけない。単純に1日24時間で変換していくと68年かかる。68年もかけてファイル変換するのかという議論が最初にあった。結局、ファイルベース自身はこのような問題解決につながるが、移行する上で作業量やコストなどは問題がある。指摘されているように、デジタルメディアは非常に寿命が短く、68年先まで使えるメディアは今はなく、引っ越した方がいいが変換の途中で何回か変えなければいけないことになる。

ファイルベースの保存を考えた際に、いろいろな期待があった。デジタルファイルは壊れない、アナログみたいに劣化しないという非常に単純な話から、フィルム並みに100年以上の長期運用ができるのではないかと期待があった。それから、デジタルは1倍速ではなく何倍速のコピーができ、数倍または数百倍の高速で内容の読み書きができて、あっという間にいろいろなことができるのではないのかということもあった。も

うひとつは、保存に対するエネルギー消費が少なく置いておくだけであればエネルギー消費がありませんというもの。これは逆にハードディスク等は使えませんねという意味合いでの議論であった。

ところが、実際に現実に選ぶとすると、必要な性能や機能、コストを満たすような単一の記録メディアは存在しない。それから、メジャーにならない製品を選んでしまうと、後で大変なことになる。昔、3インチフロッピーと3.5インチフロッピーがあり、3インチフロッピーを買った人は大変困った。そのほかにもいろいろなメディアが一時期出たが、やはり困った人はたくさんいる。そのようなことが大規模で起こり得る状態になっている。

もうひとつは、フォーマットの互換性にもいろいろな課題がある。規格があっても、規

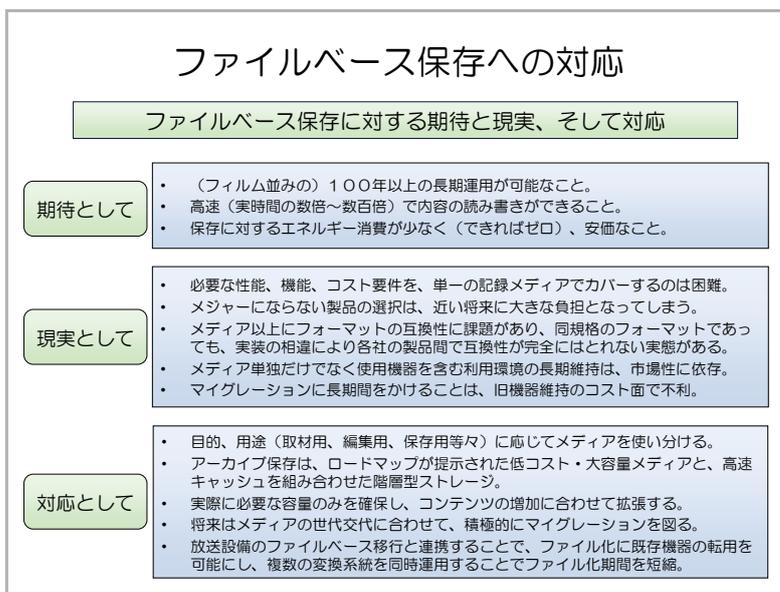


図 3-2-2

格をどこまで実装するかということに関しては実装サイドに委ねられていて、ある企業はフル規格で作ってあるが、別の企業は実用レベルで作ってある。そうすると、同じ規格のファイルのはずなのに、片方で作ったものが他方で読み書きできないという問題が実際に起きる。このように、規格を作っただけでは駄目で、規格どおりにものを作るまで確実に押さえないと、できたものがつながらないということが簡単に起きてしまう。

もうひとつは、先ほどの68年間とも絡むが機械を維持する期間をどのように考えるかということ。メディアは30年もつととっても、おそらく発売されて10年もすると、その機械はなくなる。家電だと7年間、業務用でも面倒を見てくれるのは毎年新しい機械を買えば別だが大体買ってから10年間といったところ。そうすると、新しいメディアを入れてメディアは30年後まで使えるのだが、機械はもっと短い期間しか運用できず結果的には寿命が尽きるということになる。

もうひとつが、マイグレーションのコストで、68年間も今の機器を維持するとしたら、それだけで莫大なコストが掛かる。なおかつ、その機械はマイグレーションでしか使えない。要するに現役の機械ではないということで、非常に無駄なコストが掛かってしまう。

このような課題がある中で、今われわれが採っている対策は、目的と用途、たとえば取材用や編集作業用、あと保存用などで、メディアを使い分けるということ。アーカイブ保存に関しては、ロードマップが提示された低コスト・大容量メディア、具体的にはLTOやT-10000（データ・カートリッジ）などを使って、それに高速キャッシュを組み合わせたような、階層型のストレージを構成する。これも、莫大な容量を一遍に作るとお金が掛かるので、必要な分だけ確保して、少しずつ増やせるような拡張性がなければいけない。

それから、将来メディアの世代交代に合わせて、とにかくマイグレーションをやることにしている。「マイグレーションは大変ですね」ではなく、マイグレーションすると決めている。今採用している機械は、10年も20年も使うつもりはない。なるべく早く次のものに載せ替える。載せ替えるに当たっては莫大なお金は掛けられないので、今以上に安いなど有利な点がないとできないが、いずれにしてもそのような割り切りをしている。さらに、そのような引っ越しをするのもアーカイブ単独ではやはり難しい。変換用の再生VTRというのは放送用のVTRで1台数百万から数千万する機械で簡単にはそろえられない。そこで、放送機能全体がファイルベースに移行するとすると、当然それまで使っていたVTRが現場から出てくるので、それを使ってアーカイブが持っているものを変換する。そのような形で、全体の計画のなかでうまくリソースを使い回すようなことまでセットで考えていかないと膨大なメディアの変換ということはできない。逆にそれをやって、1日24時間で68年間かかるものを、たとえば10系統用意すれば6.8年で可能にすることができる。そういうことも含めて対応していこうとしている。

### 3. 映像デジタルデータ長期保存の課題

現実的には、たとえばNHKのスタジオなどで扱っている映像品質のレベルだと、処理系の技術も、まだまだ性能が足りず、より発展してもらいたい。D5というハイビジョンは、圧縮だと300Mbps、HDCAMでも140Mbpsのビットレートが必要。これからファイルベースになるMPEG3やH.264でも100Mbpsや50Mbpsのビットレートが必要。非圧縮のハイビジョンやスーパーハイビジョンになると、もう桁違いのGbpsクラスのスループットが必要で、このようなものをすぐ扱えるメディアは現在はない。結局、ファイルも圧縮

しなければ使えないし、スーパーハイビジョンなどは、SSDでRAIDを組んだり、そういうことをやりながら記録しているので、実際には、たとえば30分の番組というのは作れない。要するに、ものすごい超高速の大容量ストレージがないと長時間の番組は作れない。今後、圧縮技術などとセットになり、より実用的なものになっていくと思うが、現実にはそういうことがある。

このような高品質化とは別に、フォーマットが必ずしも互換性がないということで、フォーマット変換がいろいろなところで発生する。ところが、変換器の中身というのはデコードしてエンコードし直していて、結局1倍速または少し速いぐらい。そのような意味で処理系の技術は充分ではない。大きなメモリを作っても、やりとりするアクセスの部分がきちんと確保されないと、結局使えないということになるので、そこはニーズとしていろいろなものがあるのではないかと考えている。

その他に、スクリーン等に応じたフォーマットの最適化、メタデータの充実など、同じ内容のものを複数持つというケースが、これから着実に増えていく。検索インデックスも複数で、データがおそらくコントロールできないような増え方をするのは確実に、そのようなことへの対応も必要になるだろう。

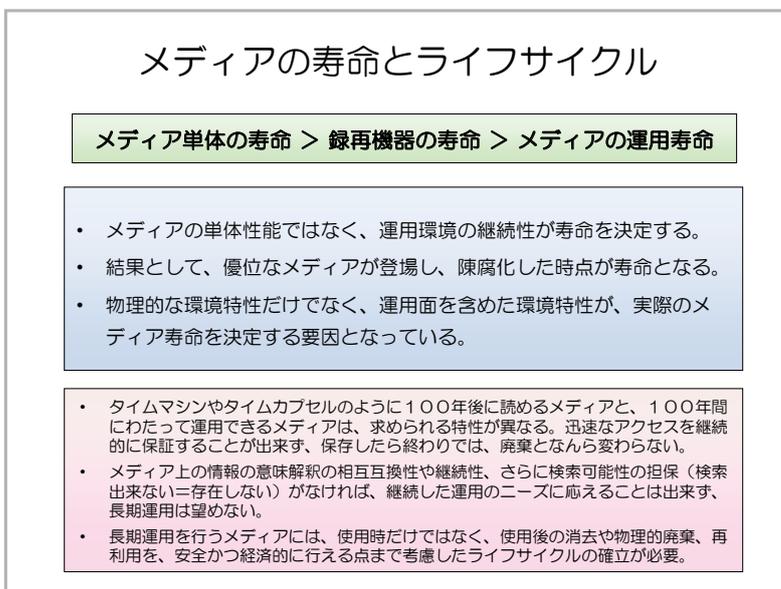
#### 4. メディアの寿命とライフサイクル

メディア単体の寿命と比べて録再機の寿命はそれより短い。30年もつテープを再生する機械は大体10年ほどしか使えない。では、作ってから10年使えるかというと、メンテナンスがされない。もっと言うと売っていないということも含めて、結局メディアの寿命というのは運用できる期間がどれぐらいかということで実際には決まっていく。

先ほど1インチVTRから変換するのに10年以上かけたと言ったが、今のデジタルテープからファイルベースに移行するのは6~7年でやろうと思っている。なぜかという、6~7年たつとデジタルビデオテープが、ほぼ保守も利かなくなってしまうから。テープもあり機械もあっても壊れたら終わりという状態に突入する。そうすると変換が保証されなくなるので早くやる必要がある。

ただ、これはメーカーから見ると裏腹のところがあり、ユーザがいなくなるから製品が使われなくなる。われわれが使い続ければ良いのだが、より良いものがあれば、みんなそちらに行くのは当然で、古くてお金が掛かるものを使っていることはよくないと言われる世の中で、新しくせざるを得ない。

そうすると、優位な新しいメディアが出てしまうと、何をしても、それ以前に使っ



ていたものは採用されないことになる。だから、物理的な環境特性だけではなく、いわゆる運用面や使用性を含めたような特性で見えていかないと、メディアの寿命というのは決まらないのではないかと、考えている。

長く運用するメディアというのは、100年後1000年後に読めるだけではなく、100年間1000年間運用できるようなものでないと駄目だと考えている。たとえば、1000年後まで大丈夫というメディアを作っても、それを誰も買ってくれないのであれば、1年後には読めないメディアになってしまう可能性がある。そのように考えると、必ずしも単体の長寿命ではなく、運用のなかで情報がうまく引き継がれていくような仕組みまで考えていかないと、本当に長い寿命というのは確保できないのではないかと個人的には思っている。

メディアの上でのいわゆる意味理解という話があったが、意味解釈というと文系の話みたいに思う方がいると思うが、実は規格解釈でどのくらい実装されているかというのは意味理解が違うということになる。そこのところは非常に重要な問題で、形もある、ものも入っている、でも読めない、でも再生できないという状況が、実は今でも普通に起きてしまっている。そのような部分をクリアしていくことも含めて考えないと、まさに長期運用というのはできないのではないのかと思う。

### 5. 将来の情報保存へむけたキーワード

今回の話が100年や1000年というオーダーの話ということで、自分がどのようなキーワードを思うかなということ、つらつらと書いていったもの。何でも書いているような状態になってしまったが、ひとつ、これからポイントだなと思っているのは、メディア単体よりも、そのメディアを含めて、いわゆる記録サービスなど、そういったものがどうなるかということ。

たとえばクラウドのサービスのDropboxのようなサービスがもう社会的ないろいろなところで普通にある状態になっている。そのようなときに、実はそのサービスがベンチャーであったり、海外の資本でしかカバーされていないという現状は、本当に良いのかということもある。災害対応ということと考えると、いろいろなところにそのような情報を置きたいのだが置けないという問題も実際にある。

実は記録して、なおかつアクセスを継続的に保証する仕組みというのは、非常にニーズがある状態になっていると思っている。そのような意味合いで、これから本当に50年100年たったときに、きちんとその情報が、なおかつ当たり前読み出せるようにすることは、非常に重要なことだと考えている。

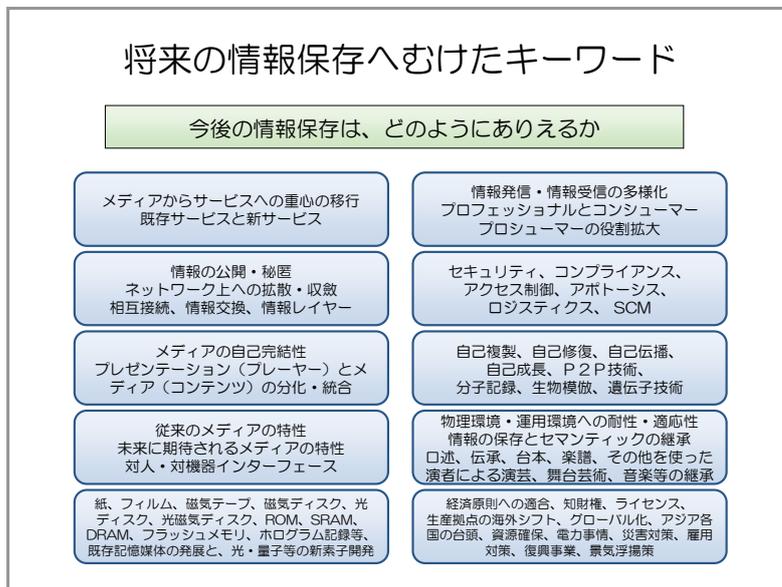


図 3-2-4

今日話したなかで、ビデオの映像の部分は、あくまでも NHK のなかの分だけで、たとえば民放や、それから個人が映像ファイルをいくらでも持っているなかで、そのような情報も考えると、本当に桁違いの情報を取り扱っていかなければいけない時代になっている。

#### 質疑

Q：映像へのメタデータは自動でつけているのか。

A：古い番組は放送日と番組タイトルしかない。最近の番組は EPG や他の番組にまつわる電子情報をセットで全部保存している。新しいものには充実したデータが付いているが、過去のものには付いていないものもたくさんある。

Q：ニュースのキーワードは保存しているのか。

A：ニュースでは 30 秒ほどの短いコーナータイトルごとに、例えばどこどこで何があった、どういう絵柄のものがでてくるという情報を人が見て付けている。

### 3.3 超長期保存メモリ・システムの社会・経済的効果

江連 三香（三菱総合研究所）

現在、全世界中のデータ量は 2011 年で 1.8 ゼタバイトとの推計もあり、デジタルユニバース拡大のペースはストレージの持っている容量の増加ペースを上回っている。その問題点は、現時点でのデジタルデータの保管戦略がマイグレーションになっており、マイグレーションを繰り返すことは、コストも掛かりリスクもあるという点である。一企業の例として、データ移行をする際の支出平均が初期投資の 200% という調査もあり、初期投資に比べて運用費用を非常に多く要する点が企業の負担になっているのが実態である。データ移行にコストがかかることを踏まえると、短期的に経済的な価値を生まないようなデータは徐々に消失されるという問題がある。また、マイグレーションの中で作業ミスによる消失のリスクも存在する。このようなマイグレーションの課題が存在するにも関わらず、データ量が増大している実態を鑑みると、マイグレーション戦略自体を今後続けることは難しく、長期保存を行う際には、マイグレーションフリー、そしてメンテナンスフリーであることが必要になると考えられる。

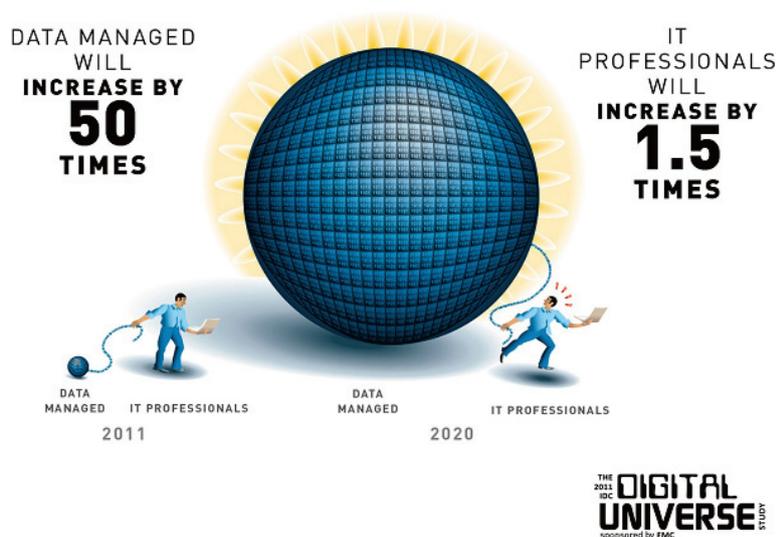


図 3-3-1 デジタルユニバース (<http://www.emc.com/images/about/news/press/2011/data-center-man-and-sphere.jpg>)

このようなデータの消失に関わる危機意識は、国立西洋美術館長の青柳氏も指摘しており、デジタル情報を読み取るには、保存した時代のハードとソフトの双方の維持が必要であるが、現時点では、ハードディスクを含めて、書き込んだ情報がいつまで保持できるかの保証はない。また、紙の時代とは比較できないほど大量に生産される情報を、これまでの分類体系にどう合わせていくのか、この問題を解決しないと、人類の知的蓄積を継承できないのではないかとこの点に警鐘を鳴らしている。

超長期保存メモリ・システムのターゲット市場としては、政府、サイエンス分野、文化・教育分野、コンテンツビジネス、医療分野等が想定される。今、非常に大きなデータを抱

えているユーザは長期保存に関して課題を感じており、そういった長期保存に対するニーズが顕在化している分野から、市場が創出されると考えられる。このようなユーザが保管しているデータ量に関しては、例えば全世界の天文データは 200 ペタバイトという推計もある。医療機関では、米国では法によって患者のデータを死後 2 年間持っていなければならないと定められており、大病院では 1 ペタバイトものデータを保管している。仮に日本でそのような法制度の義務付けが発生すると、大きなインパクトがあると考えられる。

さらに、そういった特定の用途が進んでいくことで、一般的なビジネス分野やコンシューマにも超長期保存メモリ・システム市場が広がっていくと考えられる。例えば、データセンター事業者や SNS 事業者といったビッグデータ、大量のデータを保有する企業のニーズは高いと想定される。個人に関しても、自分のデータを長期で保存したい、孫にまで写真を見せたいというニーズがあり、市場動向調査によると、ライフログサービスを利用する人の 3 割程度が一生あるいは永遠に自分のデータを持っていたいという結果もある。

表 3-3-1 超長期保存メモリ・システムのターゲット市場

分野	主な機関	利用ニーズ
政府	公文書館、図書館 等	公文書の保管(法律による義務付け)
サイエンス	天文台 地球科学	天文データの保管 地質、海洋データの保管
文化・教育	美術館・博物館	美術品等の保管
コンテンツビジネス	映像保有機関 (ハリウッド、放送局等)	映像の保管・活用
医療	医療機関	カルテの関連法制度による長期保存の義務付け、医療費削減
ビジネス	IT・インターネット関連 サービス事業者、一般企業 等	大量データの保管
コンシューマ	個人利用	個人データ(写真、音楽・動画等コンテンツ等)の保管

市場形成のために必要な点、すなわち超長期保存メモリ・システムが利用されるポイントはコストと使い勝手である。現在の長期保存によるコストを下回り、かつ使い勝手がよくないと利用は進まない。超長期保存メモリ・システム開発にあたっては、この部分の配慮が欠かせない。単位当たりデータ保管量が増えるほど保管コストは下がっていく関係にあるため、コストが下がれば、さらにより多くの保管が可能となり、現在消失しているデータも保管することが可能となるだろう。

では、超長期保存メモリ・システム市場規模はどの程度となるか、仮に現在の光ディスクドライブが保存に利用されていると仮定すると、少なくとも同程度の市場規模が見込まれると推計される。あるレポートでは、2011 年の光ディスクドライブ市場が 2 兆 2,000 億円、メディアが 8,000 億円強であることから、最低でも 3 兆円規模の市場が見込まれると推計される。さらに、光ディスク以外にも、ハードディスクドライブを保存用途で利用するケースは増えている、特に大量のデータを扱う ISP やデータセンター等事業者が保有するデータは日々増加しており、現在データ保存を低コストに運用するためにニアラ

インのハードディスクドライブを使っている。またこれらの事業者を利用する企業や個人のバックアップ用途として、外付けハードディスクドライブも利用されている。これらの市場も現在成長していることを踏まえると、さらに大きな市場規模が見込まれる。新たな技術が徐々に市場に浸透していった結果、ある時点で既存のメディアがガラリと変わる、いわゆる破壊的イノベーションが起こると普及が一気に進展する可能性もある。

超長期保存メモリ・システムの開発過程において、日本がどういう役割を果たしていくか、日本が勝てるシナリオを考えると、まず媒体の部分、今まで日本が強みにしている部分の技術を伸ばすことで世界における主導権を握ることが考えられる。もう1つは、意味理解を保障する仕組みやシステムを強みにしていくことである。保存しても読み出せなければ全く使えなくなってしまうため、意味理解を保障するための媒体のインターフェース仕様と読出システムの仕様という、基本的な仕組みで標準化を進めることが必要である。日本が基本的な仕組みを押さえた上で、各分野は各々の用途に応じて具体的な仕組みを構築していく、そういった市場を創っていくことが有効だと考えられる。

Q：3兆円は日本だけの数字か、世界規模の数字か。

A：世界規模の数値である。光ディスクだけの前提はかなり小さく見積もっているため、需要としてはもっと大きいと捉えている。

## セッション4 超長期保存メモリの技術的課題と開発推進方法

### 4.1 半導体デジタルロゼッタストーンの発表から学んだこと

黒田忠広（慶應大学）

2009年に「半導体デジタルロゼッタストーン」というタイトルの論文を国際会議で発表したところ、大変大きな反響が世界中からあった。そのときの個人的な体験をベースに、そのときにいろいろ学んだこと、その後いろいろと考えていることを話すので、議論の参考していただきたい。

これからの話の内容は3つある。1つ目は、こういった領域を研究開発するということ、国民あるいは人類の大きな関心と期待が寄せられているということを感じたということである。

2つ目は、この分野はゼロから学問を積み上げる必要は必ずしもなく、すでにあるいろいろな学術を再構築することによって、技術的にも経済的にも近い将来に実現可能性があると感じていることである。

3つ目は、それを主導していくのはJSTのような国、あるいは官・学会で主導していくのがやりやすく、産業界で主導してやるのは難しいのではないかとということである。

2009年にVLSI回路シンポジウムで論文を発表したが、この論文のタイトルが“Digital Rosetta Stone: A Sealed Permanent Memory with Inductive-Coupling Power and Data Link”であり、ここで「デジタルロゼッタストーン」という言葉を使ったために、大変大きな反響を得た。この研究はJSTのCRESTの研究領域「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」の中の「高性能・超低電力短距離ワイヤレス可動情報システムの創出」という研究課題の研究代表を務めていた2005～2009年度にやったものである。

どこにも超長期メモリや記録・保存といった言葉がない。超低電力短距離ワイヤレスという技術を研究開発している中から派生的に出てきたものである。必ずしも研究者は自分のやっていることと、ここで議論していることがどうつながるかをまだ十分に意識できていない。そこから始めてみるというのが非常に重要ではないかと、私自身が強く感じている。

この学会発表をしたところ、IEEE SpectrumというIEEEの会員が見る雑誌に大きく取り上げられ、世界中の研究者から問い合わせやメールなどをもらった。これはかなり技術的だったが、この他にもBBCニュースがもう少し一般向けに報道した。

「デジタルロゼッタストーン」ということと、長期にデジタル記録ができるということが、すぐに普通の人にもピンとくる。この分野は、世界的に大きな期待と関心が寄せられている。これは私の個人的な体験として大変強く印象に残った。

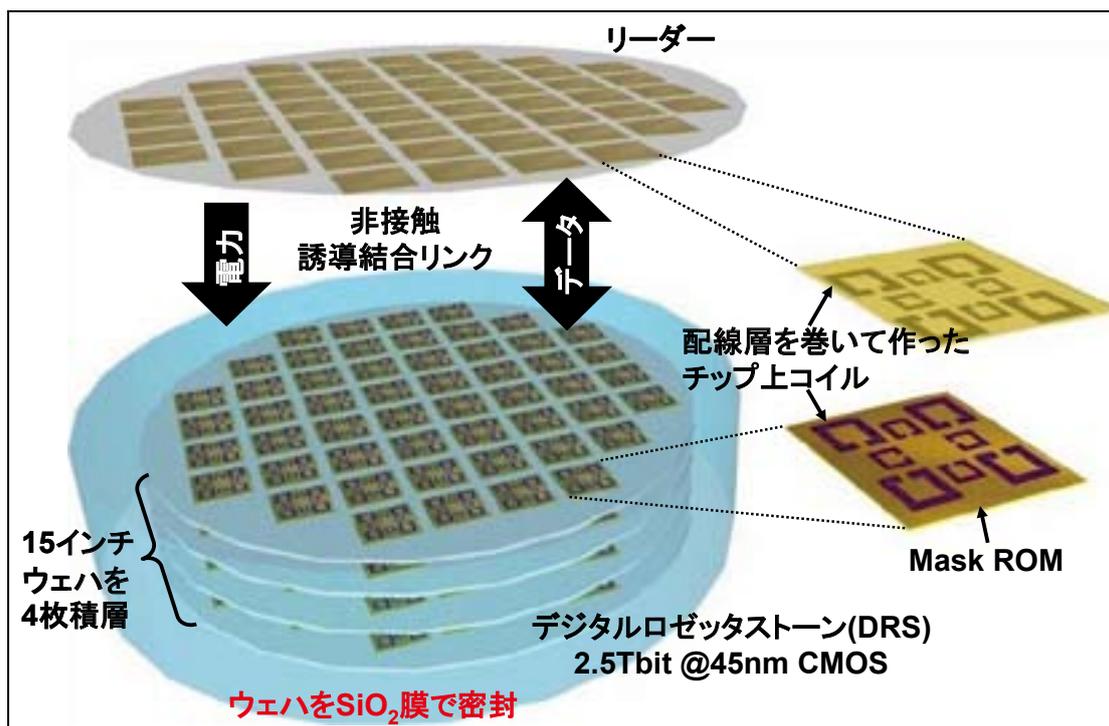


図 4-1-1 デジタルロゼッタストーン

次に、技術的にはこれまでの研究を集めると、実現可能性が見えているのではないかという話をする。その一例として、私が実際にやったことをご紹介します。密封した半導体メモリを使ったわけだが、必ずしもこれが一番いいとか、あるいはこれができればすべて解決するというつもりではなく、こういうアプローチをとると、実現可能性が見えてくるとい一例である。

私は半導体メモリの設計に携わっているが、半導体メモリの材料はシリコン (Si)、あるいはそれが酸化した SiO<sub>2</sub> (石と同様な材料) であり、1000 年前のロゼッタストーンがそのまま残るように、非常に安定した物質である。これにデジタル情報を記録する。書いたり消したりを繰り返すのではなく、一度書いたら、あとはそれを読み出したいだけなので、リードオンリーメモリのマスクロム (Mask ROM) を使った。Mask ROM はゲーム機のプログラムの格納や昔の PC の辞書の格納などにも使われてきた。

少し専門的になるが、この Mask ROM はコンタクトがあるかないかでデータをプログラムするというやり方である。図 4-1-2 に回路図があるが、トランジスタが並んでおり、この1つのトランジスタへアクセスしたときに、その先がビット線に配線がつながっているかないか (レイアウト図でコンタクトがあるかないか) で、データが1か0かを決めるものである。メモリの中には、そこに電荷が溜まっているかないかで1か0かを決めるものもあるが、これはそうではなく、配線がつながっているかどうかで決めるものなので、極端に言えば仮にこれが壊れたり割れてしまっても、中を覗けば1と0を後で再現できる。

- 半導体メモリの材料であるSiとSiO<sub>2</sub>は地上で最も安定した物質。
- Mask ROM はコンタクトの有無でデータをプログラムする。
- ボンディングパッドの開口部から水分が浸入し金属配線を腐食する。
- チップを密封し、無線で給電とデータ通信ができれば、チップ内部の湿度を2%以下に保ち寿命を1000年以上にできる。

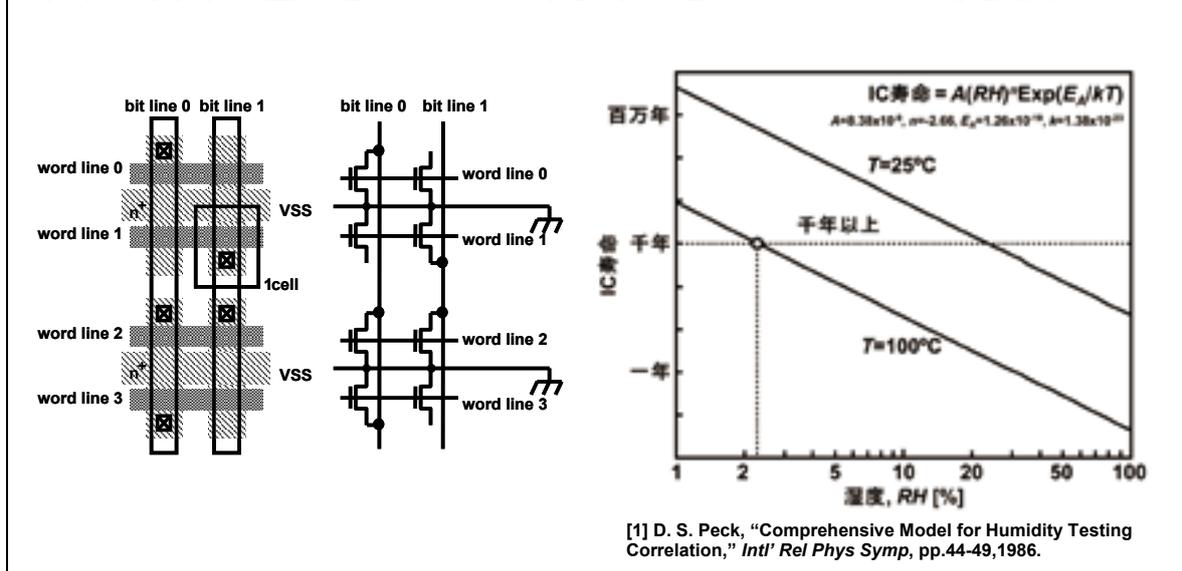


図 4-1-2 密封した半導体メモリのレイアウト図、回路図、およびその寿命予測

シリコンは非常に安定した物質だが、半導体チップには電源を与え、信号を入れたり出したりしなければならないため、パッドという穴が開いている。ここから水分が侵入する可能性があり、この水分が金属配線を腐食するのが問題だという指摘がある。したがって、この穴を埋めて完全に密封しチップの内部の湿度を十分に低く抑えることができれば、半導体集積回路は 1000 年以上持たせることができるという研究報告がある。図 4-1-2 の右下の図はその研究報告の一番重要な図であり、かなり古い研究（1986 年の論文）のため再検証する必要もあると思われるが、仮に温度が 100℃でも内部の湿度を 2%以下にできれば、IC の寿命は 1000 年以上持つという科学的なデータである。

話をまとめると、半導体チップを完全に密封して、内部の湿度を十分に低い状態のままにしておけば、1000 年以上その半導体デバイス（データ）を保存できる。あとは、どう電源を与え、どのようにデータの読み書きをするかが問題であるが、そこを無線でおこなえば解決するのではないかと考え、JST の CREST 研究につなげた。

図 4-1-1 にデジタルロゼッタストーンイメージが書かれているが、半導体チップがまだ個片に分けられていないウェハが何枚か重なって、膜で完全に密封されており、どこにも外部から水分が侵入するところがない。そこに上から無線で電力を供給し、データをやりとりすれば、この中にある回路を動かしてそのデータを読み出すことができる。発想は極めて単純で、Suica と似ており、Suica より 8 桁ぐらいメモリの容量が大きく、8 桁ぐらい高速データの読み出しができるもので、それほど特別な発想をしたものではない。

いくつかのチップをお互いにつなげ、広い面積を使って大容量化することもできるが、

我々はこの小さな1つ1つのチップの中に電力を供給し、データのやりとりをできるようにしたほうが良いと判断した。その理由は、それぞれを全部結びつけてしまうと集積回路の規模として大きくなりすぎ、どこか1カ所でも不良があると、それが全体に波及し歩留まりが著しく低下することを懸念したためである。このため、小さなチップ1個1個が上から電力の供給を受け、データの通信ができるためには何をすればいいかと考え、その技術開発をやった。

技術的課題の一つとしては、無線の電力供給と通信との間のお互いの干渉をどう回避するかがある。これはお互いを離せば問題は簡単に解決するが、小さなチップの中でそれぞれの給電と通信を行わなければいけない。例えば、時間を分割して、今は電力の供給を受けている、それが終わったら通信が始まるというような仕組みが考えられる。その際に、リーダー側はその時々工夫が加わってもかまわないが、ストーン（記録側）は一旦決めたら1000年は変えないようにできるだけ単純な構造にしておく配慮が必要である。

もう1つの課題は、無線での安定した給電である。最近、無線で電力を送ることに限っては、電気自動車に送るなどいろいろなところで研究が進んでいるが、その大部分は電池を充電している。電池を充電することを例えると、大きなプールに水を徐々に溜めていくようなもので簡単である。それに対して、これは小さなチップに直接電源を与えるのである。大きなプールがないところに外から無線で電力を与えながら、時々刻々と必要な電流が変化する状況で内部の電源を安定に保つためには、それなりの工夫が必要である。この課題をどのように解いたかはこの後で簡単に紹介する。

もう1つの課題は経済的な課題であり、Mask ROMがいくらかで手に入るかという話である。メモリ容量の目標としては、個人を考えると、自分の生きている間のすべての情報を高解像度の画像として記録し、その他のセンシングされた情報を記録・保存するためには10PBぐらいあれば十分だろうと言われている。

これを、例えば「1000万円で一生分を保存する」として4桁下げて換算すると、1TB（3日間分）が1000円ほどにならなければ、少なくともコスト的に合わない。果たしてこれが今のMask ROMのビット単価に合うのかが問題になる。

Mask ROMのマスクというのは、実は写真技術を使って、マスクを1個作ったら大量に同じコピーをつくることで安くする技術、つまり量産の技術だが、今回はそうはいかない。1つ1つの記録しておくべきデータが異なるので、1個マスクを作っても、それは1つのデバイスにしか使えず、非常に高くつく。これを補う方法として、直接電子ビームを使って、直接チップの上にパターンをプログラムする技術がある。これはSuicaと同じで、RFIDという技術領域で培った技術があり、これを使うとかなり安くなる可能性がある。

この後は少し技術の話になる。図4-1-3に示すように、リーダー側から電力を送り終わると、ストーン側が電力が途絶えたことを検出して、いろいろな通信をこの電力が送られていないときだけに行う。メモリの読み出しは電力を送っているときにやっても安定なので大丈夫だが、通信だけは電力が送られていないときだけにやる必要があるため、ストーンが電力が送られていないことを自動的に検出する回路技術が必要になる。

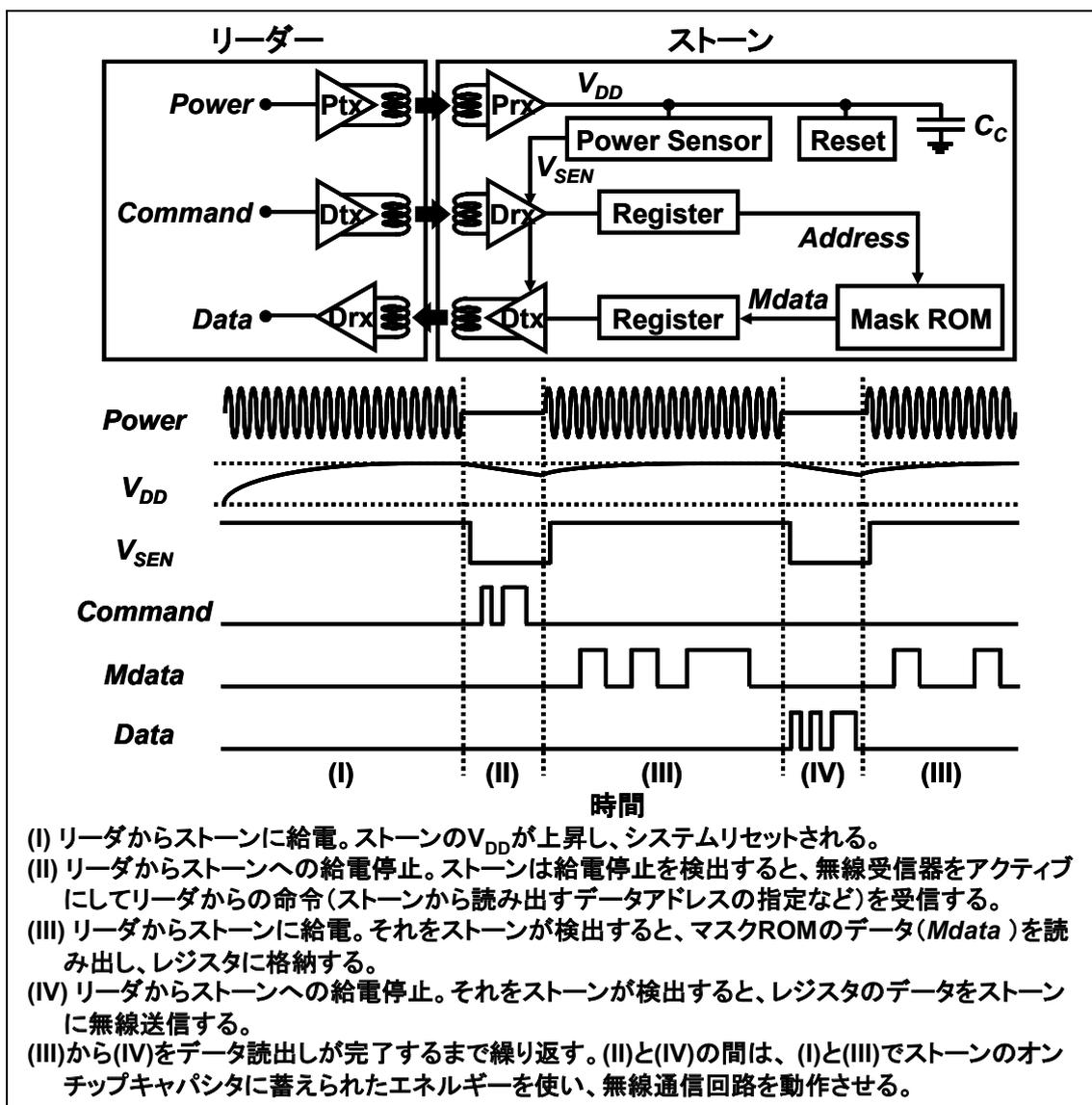


図 4-1-3 給電とデータ通信を時分割多重

また、プールに充電するのは割と簡単でも、チップに電力を送るのが非常に難しい1つの理由は、ACで送られた電力をDCに変換しなければならないところにある。ストーン側の全波整流器で整流してもリップル(電圧の上がり下がり)が現れる。これに対しては、複数の位相を変えたものを送り、これらを重ね合わせることでリップルが非常に小さくなることを利用して、技術的にある程度解決した。

これらの技術を入れたチップを実際に作って実験を行い、電力が送られていないことをストーン側が検出したときに読み出しが始まるという基本動作をチップで確認し発表を行った。

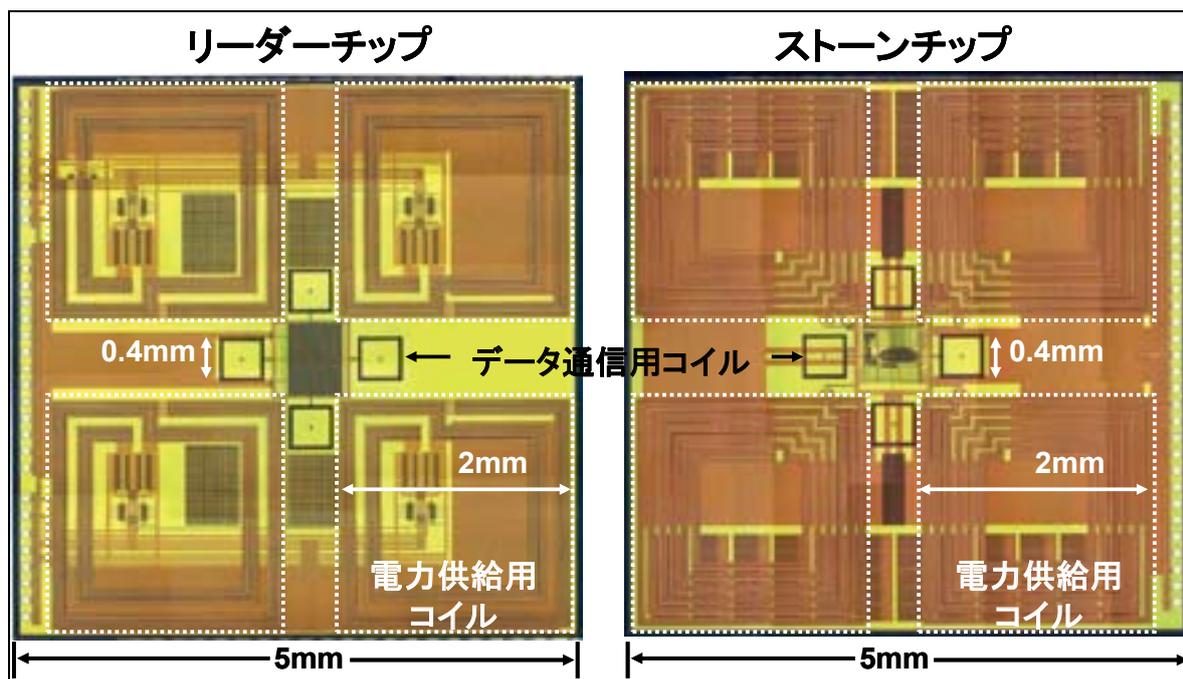


図 4-1-4 テストチップ

技術的には、それなりに課題がわかれば解決は困難でない場合が多いが、経済的にどうなのかが、今回の1つの大きな議論になっていると思う。これに関して言えば、半導体メモリのビット単価が10年後には100分の1に安くなるという非常に心強いところであり、1000年先のことを考えると、10年あるいは20年待ってもらえば、これだけ安くなるという計算が成り立つ。

例えば、2010年現在のテクノロジーとコストを考えると、10年待てば6Tbitで15ドルぐらいになるという試算がある。これは先ほどの計算で目標とした1TBが1000円ぐらいというところの射程距離に入っているので、今から10年あるいは15年経てば、先ほど概算したような10PB（1人の一生分のメモリ）が1000万円ぐらいで手に入る。科学技術に全世界で年間200PB使われているということであるが、それはこの20倍ということで、2億円ぐらいのコストで世界中の科学者たちのデータを長期保存することが可能になるということだと思う。ポイントは、半導体メモリは10年経てば100分の1に安くなるということであり、これが半導体メモリを使うことの1つの大きな特徴になると思う。

最後にJSTが主導してやるべきテーマだと考えている理由を述べる。この研究発表の後、反響が非常に大きかったため、産業界のいろいろな方にこの研究の出口を相談した。しかし、「どうして私が会社にあと5年しかいないのに、あなたは1000年のビジネスを持ってくるの」という話に当然なり、会社としては大きな市場が見えていない限り、すぐにはビジネスの判断ができないという難しい問題になっている。一方で、期待される市場があり、この睨み合いがずっと続いている。これまでの半導体技術が急速な成長を遂げたのは、そこに大きな市場があって、世界中でその市場に大きな研究開発投資が行われたためであるが、この長期メモリに関しては難しい状況にある。

資本の論理から産業界から技術開発を始めるのは難しいので、国家や人類の文化を守るという観点から、あるいはいろいろな学問で作られたものを再構築することでかなりのことが見えてくる可能性があるという点から、先導研究をJSTに始めてもらい、より多くの研究者を巻き込んで領域やソサイエティを形成するというところから始めなければならないと感じている。

話した内容をもう一度まとめると、この領域の技術開発とういのは大変意義があり人類が非常に高い関心と興味を持っていること、いろいろな研究を再構築すると技術的あるいは経済的にも可能性が十分にありそうだと思うこと、産業界がリーダーシップをとるのは難しい状況にあるためJSTが主導し官学主導で進めてほしいことの3点になる。

質疑：

Q：どうやって読むかという仕掛けは着実に変わっていきそうだが、その辺をどうするか。

A：果たして、マイグレーションは駄目でエミュレーションにすべきなのか。そうは言っても、現実にはマイグレーションでいくしか対応のとりようがないのか。その議論だけでも随分面白いと思う。これは、まさしくこれから議論しなければならないことである。単純に長期メモリデバイスができればすべて解決するものではないことを改めて認識した。

## 4.2 ロバストな半導体アーカイブの要件

### 岡上拓巳（ソニー）

私は、磁気テープ、光ディスク、半導体とストレージシステムをずっとやってきた。1000年持つメモリがあるという前提で、アプリケーションを使っている側とそのメモリとの間をどう結ぶか、1000年持たせるとしたらどういう問題点があるか、という観点で紹介する。

水戸光圀（黄門様）が「大日本史」を編纂したが、これは日本全国から本を集めてきて全部書き移させたという30年にわたる大事業である。これは紙の媒体時代のマイグレーションである。これによって水戸藩の財政が傾きかけたというぐらい、マイグレーションというのは大変な作業だったようである。この時代のデータ量において、それぐらい大変だったことを考えると、今後、データが膨大に増え続ける中でどうなるかは、なかなか想像できるものではない。

データ喪失の危険性は常につきまとっている。東北の大震災関係で会社に多くの問い合わせが来ている。テープが海水に浸かった、光ディスクが海水に浸かったので、何とかならないかというものである。メーカーの立場ではなかなか言い難いが、これらは何ともならない。結局、「印刷して残せ」という名言に従って、お客様にやってあげられるのは、アルバムから剥がした写真をデジカメで撮って再現し、これを返すということであり、この作業をずっとやっている。このままで本当に良いのか、考えざるをえない。

次は少し良い話である。10数年前、ハワイ沖で海洋研修船の愛媛丸が沈没したが、その中から引き上げられたデジカメの中のメモリーカードの端子は錆びていたが、半導体チップを剥がしてコントローラーをつけ直したらきちんと読み、映っていたデータを全部再現できた。半導体はこういう可能性を持っている。同様の例として、爆発の現場にあったカメラは壊れたが、データは生き残ったというのもあった。

このような可能性を秘めた半導体セルがあったときに、1000年にわたったときに他にどんな問題点があるかをこれから考察していく。図4-2-1はIDCのデータであるが、生成されるデータ量に対して保存されるデータ量はこのように予測されている。その内の一部でバックアッ

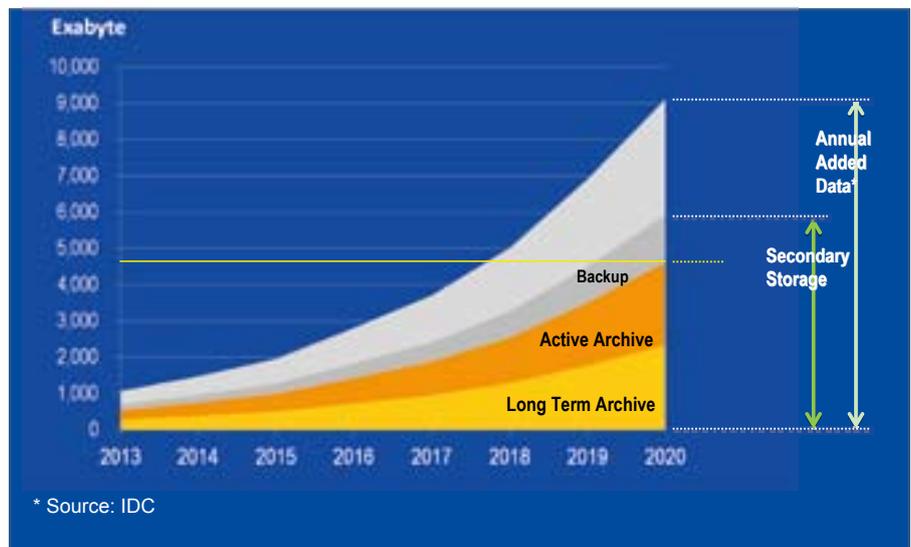


図 4-2-1 アーカイブデータ量の予測

プと言われる領域は、再び読まれるかわからないが、安全のために遠隔地のテープに保存するというものであり、残りがアクティブアーカイブと言われて頻繁に読み出されるものである。

アクティブアーカイブ系のデータを扱っている人たちのVOC（顧客の声）を何社か聞いたところ、主な要求事項としては、第1にTCO（Total Cost of Ownership）が挙げられた。これは、保存する場所のエアコンの電気代、場所（スペース）代、マイグレーションによるメディアのコストなど全てを合わせ、長い年月にどれだけかかるかを計算したものである。2番目はメディアがマルチサプライヤであることである。パフォーマンスが良いこと、セキュリティに優れていることがこれらに続くが、上の2つの要求が非常に高いという結果が残っている。

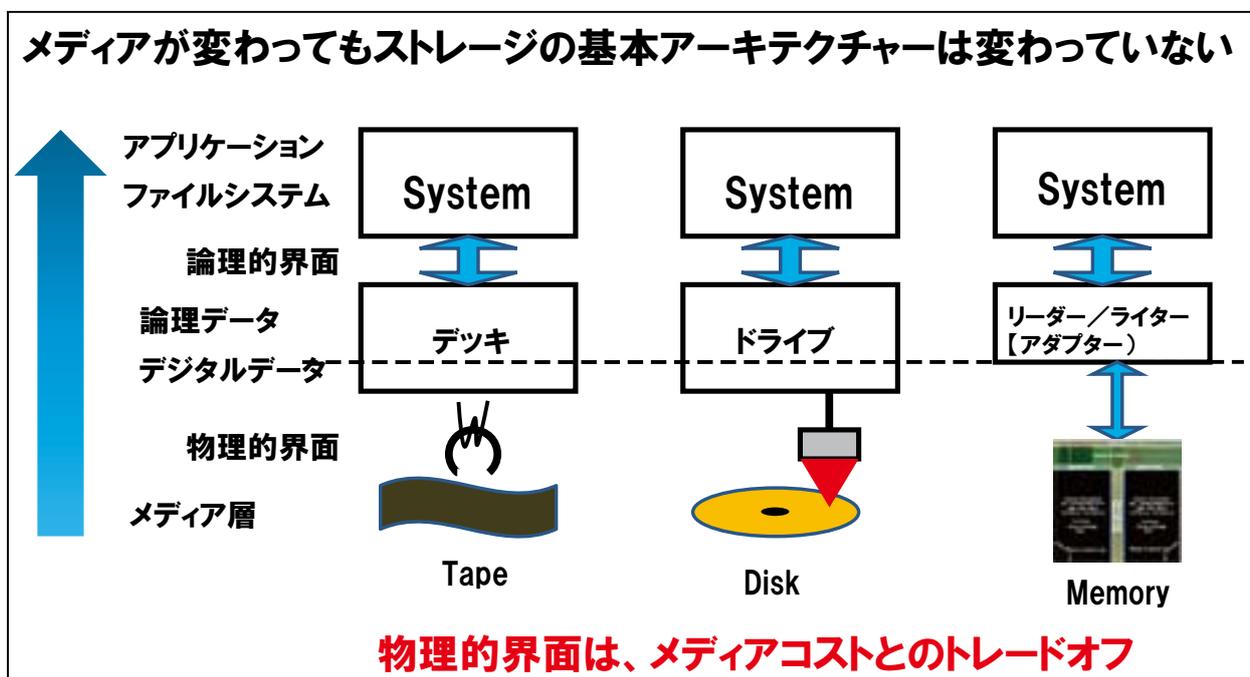


図 4-2-2 ストレージのレイヤー

図 4-2-2 はストレージのレイヤーを示す図であるが、メディアの話と上のアプリケーションの話在省いて、真ん中の話をする。過去の全てのストレージにおいては、メディアが変わってもストレージの基本アーキテクチャーは変わっていない。テープ、ディスク、メモリが変わったとしても、テープを再生するためのデッキがあったり、ディスクを再生するためのドライブがあったり、メモリを読み書きするためのリーダー・ライターというアダプタがあったりしている。この上のパソコンやメインフレームが読み出すときは、その境を論理的界面と言っているが、アドレスのデータを読む／書くというコマンドに対して、そのデータを読出したり、もらったデータを書いたりしているだけで、この界面が変わっているわけではない。

テープやディスクなどは途中にデッキやドライブをかませ、これだけが可搬で抜き差しできるメディアになっているが、その理由はコストである。大量に使う場合には、できるだけ単純にした方がコストは下がる。半導体メモリの場合は、ある程度の機能を入れられるので、デジタルデータの界面が少し変わる。今までのストレージには物理的界面が存

在し、磁気ヘッドで読める微小電気信号だったり、光変換される反射率の変化を利用してはいたが、メディアが変化していけば、これも変わっていかなければならない。この置き換えは大変である。

また、テープは徐々に記録密度が上がり、LTO などではもう第6世代まで来ているが、デッキは過去互換を2世代前までしか保障しない。このため、デッキが2世代進んだら、3世代前のテープを全部2世代進んだ次のテープに置き換える作業が必要であり、そのための専門業者がいたり、2世代前のデッキを大切にメンテナンスし保存することを生業とする業者もいる。

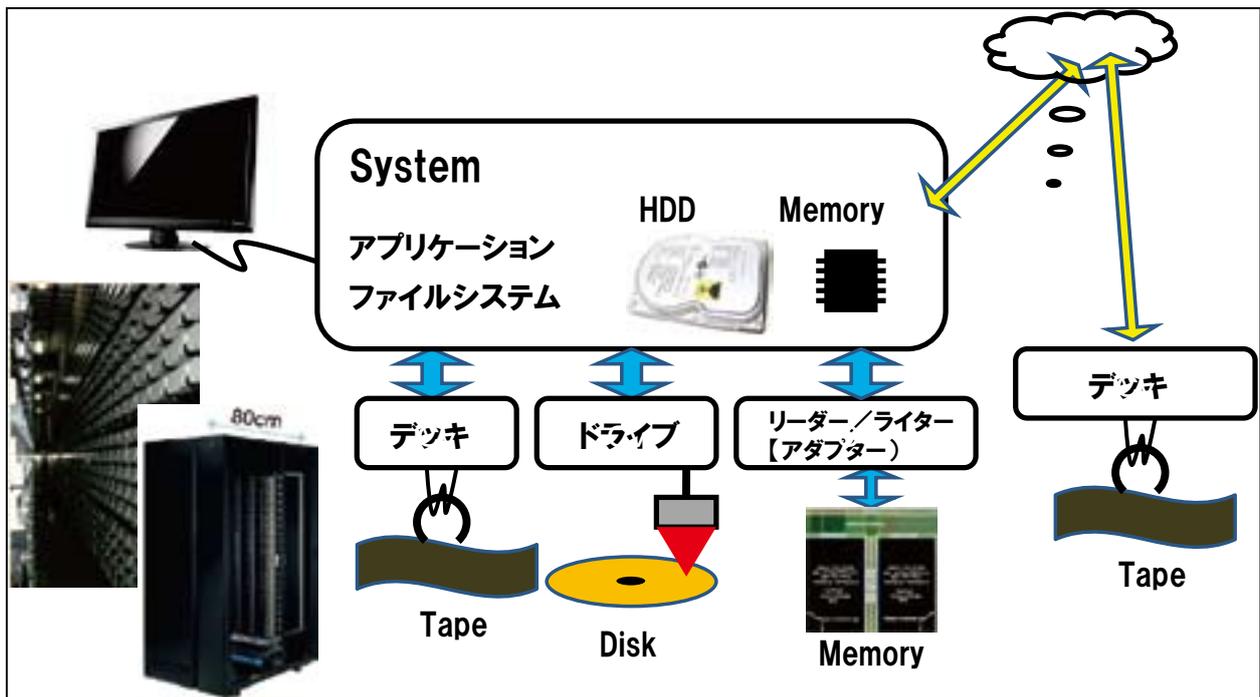


図 4-2-3 ストレージシステム (例)

トータルのストレージシステムとして単純にアーカイブを読み出すような仕組みのシステムでは、サーバーやメインフレームの中にハードディスクやキャッシュメモリ、それにストレージの何かがぶらさがっているという状態で運用されている。ロボットでメディアを運ぶため、出てくるデータが遅いこともあれば、頻繁に使われるデータがキャッシュされていて早いこともある。それ以外にも、これらに溜まっているデータを遠隔地に全部保存（バックアップ）している。これが一般的なデータセンターの組み方である。

最近では、これらのストレージのところはハードディスクの RAID を多く並べたものに徐々に置き換わってきている。サーバー業者は3年ごとにハードディスクを全部置き換えたほうが良いと言っている。マイグレーションする作業量を考えると、ハードディスクを一部分ずつ3年の期間に順番に少しずつ取り替えた方が、データ喪失の危険性が少ないとの考えである。

テープの物理的界面は媒体が進化するにつれて変わるということで、デッキはいつも変えなければならない。一方、半導体メモリはメモリのセルが変わろうが、この界面は変わらず、界面的な強みがある。

ストレージには、あるアドレスにデータが入っているというのをやりとりするこの論理界面があるが、ここで意味を理解しているわけではない。ファイルとして理解するのはシステム側である。サーバーやパソコンは、データがどういうつながりを持っているか、1つのファイルがどういうつながりでどういう順番に入っているか、というのを解釈するファイルシステムを持っている。パソコン上でエクスプローラで開くとファイルが見えるのは、これを解釈する部分がパソコン側にあるからである。

ここまでで、ファイルとしては理解でき、このファイルは1つの塊だというのはわかるが、ファイルの中身はここではわからない。画像の例では、JPEGなどで圧縮されたファイルに対しては、アプリケーションがそれを開くためのデコーダーにより中のデータを伸張して絵にしており、アプリケーションは内容の解釈まで含んでいる。

このような階層において、セル単位で1000年持つデータをどう扱うか考える必要がある。メディアの層では、他のコストがかからないことが重要であり、温度・湿度の管理なしで保存できることが必要である。半導体はその特性を備えているが、1000年となると空気中の酸素などにより端子が錆びて駄目になっていくと思われ、個人的には少し苦しいと思っている。同じプロセスでできるならば非接触の方が良いと思う。つまり、化学的な影響を受けない状態がメディアにとって必須となる。

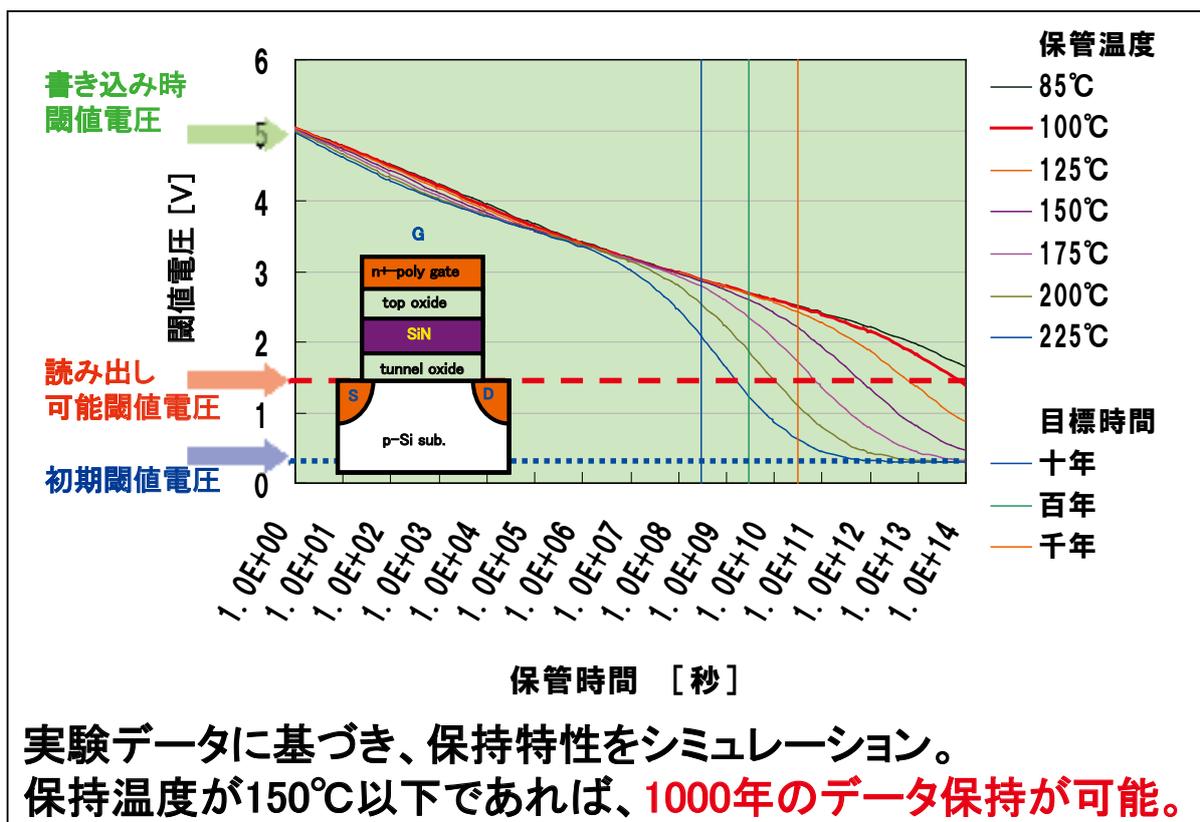


図 4-2-4 MONOS メモリ技術の優位性 (データ保持特性)

図 4-2-4 に示すように、半導体のセルそのものについてはある程度の加速試験からの予測で、100年とか1000年持つというのは十分保障される。詳細は割愛するが、エアコンなしで十分1000年持つという数値になっている。

インターフェースのスケラビリティと将来における互換性についての個人的な意見としては、ある程度決めたら技術の進化を止めてでも保存すべき領域だと思っている。将来のシステムに合わせるために、メディアとを仲介するものが必要になるので、今ある限りの技術によりスケラビリティと互換性を保障して決めたら、最後まで守るという姿勢が重要である。インターフェースを決めたら、中のメモリは何でもいいので、将来にもっと良いメモリが出てきてもメディアとしての互換性は保障されることになる。

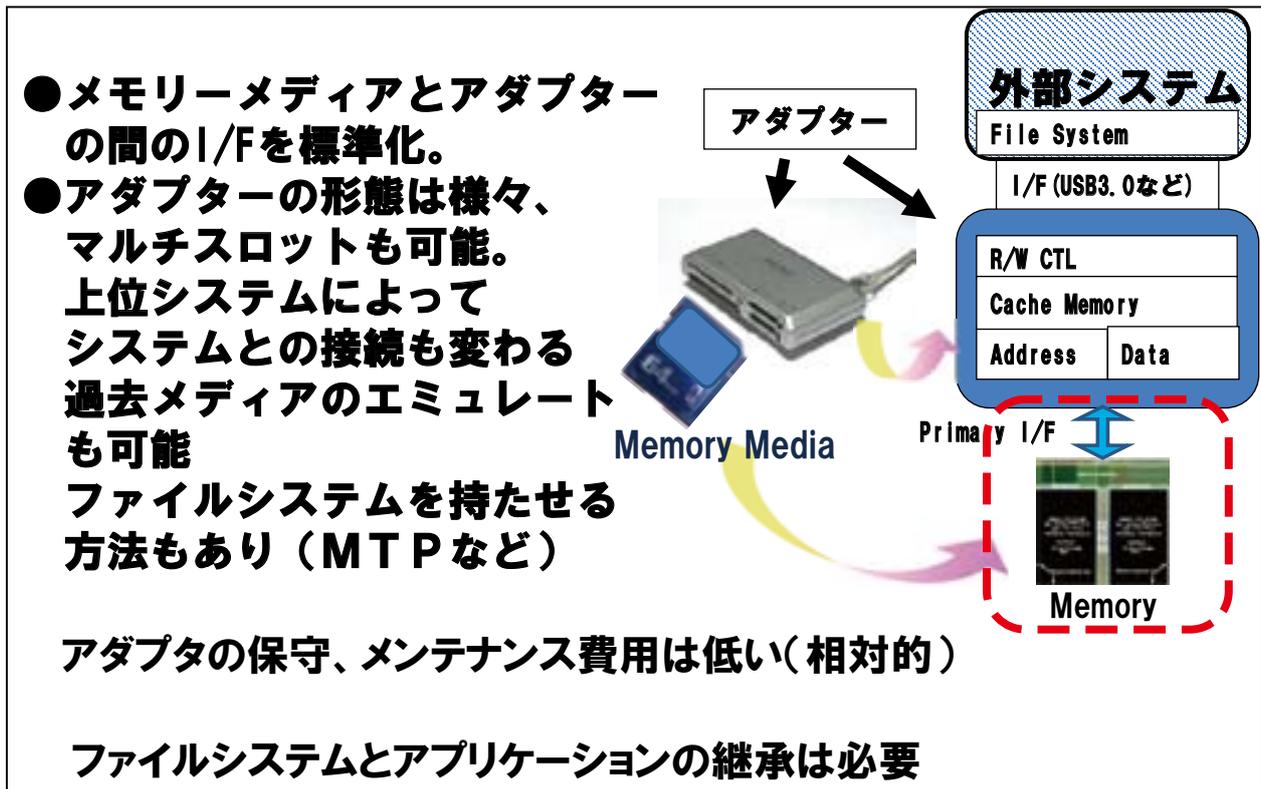


図 4-2-5 アダプタの概念

ここでアダプタという概念がどうしても必要になってくるが、デッキを置き換えるようなイメージでインターフェースは変えずに継続的に進化して変わっていかなければならない。ただし、光ディスクドライブやテープデッキと違い、機械的な構成要素はなく、有線もしくは無線になったとしても多数のソケットに半導体メモリが差してあるというシステムが組めるはずである。このため、今までやっていたマイグレーションを全部追いやってしまうことになり、メンテナンス費用は安くなると考えられる。

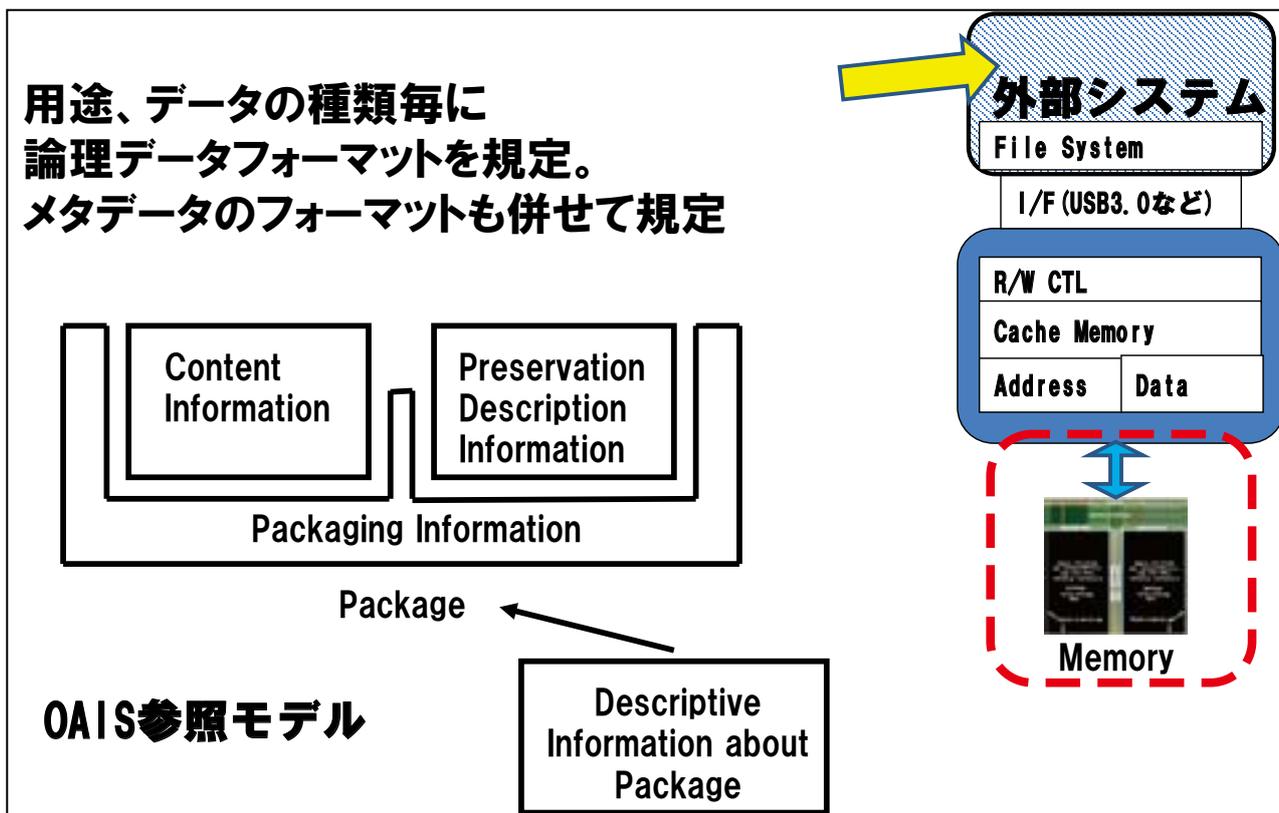


図 4-2-6 OAIS 参照モデル (ファイルフォーマット)

図 4-2-6 に OAIS (Open Archival Information System) の参照モデルを示す。このアイデアは、保存されているメタデータを人に解釈させてしまい、将来のシステム変更をここで吸収してしまおうというものである。

ここを一度決めてしまうと界面が決まってしまうので、将来はそれを守りながらもこの上で柔軟に対応し、少しずつ置き換えていくというやり方で対応できると考えている。一例はメタデータである。今のファイルシステムは Windows やアップルなど OS によって違うシステムを使っているが、例えば、このアダプタ領域でファイル構造を解釈してファイルとして受け渡しをするような MTP (メディア転送プロトコル) など、ファイルレベルのアクセスが主流になってくると、ここで吸収するという形に変わってくると思う。あくまでもメモリメディアとアダプタとのインターフェースは変えず、アダプタを徐々にマイグレーションしていくという考え方で 1000 年持たせていくというアイデアである。

全体をまとめる。不揮発性メモリ技術によって長期保存メモリを実現することは、原理的に可能である。長期保存だからこそシステムの変化に対応できる仕組みが必要で、内容解釈を保証する仕組みと、ファイルシステムや OS の変化を吸収するシステムを間に必ず入れていくアイデアを提案した。

質疑：

Q：アダプタというのは、意味がわからなくなる前に、いつも変わっていく必要があると  
考えてよいか。

A：そうなる。ただし、機械的な部分がなく電氣的な信号だけであるので、何世代か前ま  
でのものを解釈できる、つまり過去補完を持ちながらのアダプタはできると思う。

C：読み出し装置のハードウェアエミュレーションの部分は、電氣的接点を使えば非常に  
容易にできることが想像できる。ソフトウェアのエミュレーションまで考えた場合に  
は、何かもう少し工夫がいるかもしれないという気がする。OAISの参照モデルにつ  
いては、実装に際してどういう情報をどこに持たせるかというような設計の検討がま  
だ必要という印象を受けた。

Q：このような考え方は特許性があるか、もしあるのであれば、特許をとられているか、  
あるいはこれはもう公知で特許性はないのかななどを聞きたい。

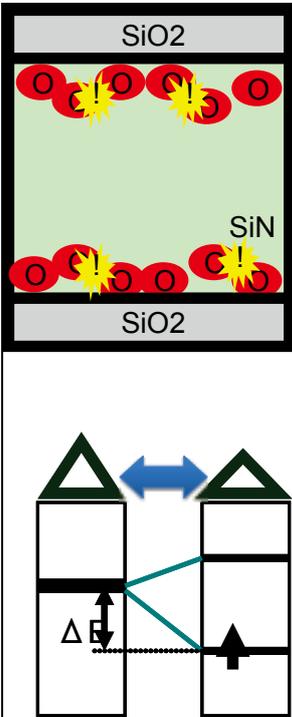
A：読み書き装置、アダプタという観点では、実は既知の技術となって特許性はないが、  
その途中の部分に意味解釈まで持たせるという観点では何件か特許が出ている。その  
特許を、そのまま使うかどうかはわからない。

### 4.3 MONOSの長期信頼性について（計算科学からの考察）

白石賢二（筑波大学）

私は、MONOS というものを 2006 年ぐらいからずっとやっている。今まで長期信頼性ということよりは、書き込みまたは消去を何回できるか、という観点でずっと研究をやっていたが、まったく逆の観点から見直してみたことを話す。

言いたいことは、電荷注入等によって大きなボンドの組み換えによる構造変化を大きく起こす欠陥は、一度書き込むと消えないので、長期保存メモリ材料としてのポテンシャルを持っている。これはロゼットストーンのように石に刻んで構造変化させたのと同じことである。MONOS は、こういう要件を満たしていると思う。電荷注入等で大きな構造変化を起こす材料があれば、もちろん MONOS 同様に高いポテンシャルを持つ。要するに、塑性変形を起こすことができれば良く、電荷注入以外にもいろいろな方法はあると思う。



- SiN中の欠陥(原子レベル)にキャリア注入(書き込み)を行うと荷電状態だけではなく大きな構造変化も伴う。
- SiN中に相互拡散して入りこんだO原子は書き込み／消去に対して不可逆的な構造変化を示す。  
→SiN中へのO原子の混入を押さえることが書き込み／消去に強いMONOS設計に不可欠。
- SiN中の窒素空孔はJahn-Teller 効果を示し、書き込み／消去に対して可逆的変化を示す。

**Yamaguchi et al. IEDM 2009**

図 4-3-1 MONOS について計算科学からわかっていること

私は、MONOS に関して書き込み / 消去回数を増やすという観点でずっとやってきた。MONOS は、図 4-3-2 のように SiO<sub>2</sub>、SiN、SiO<sub>2</sub> があって、その上に金属電極、下に半導体がある構造である。SiN 中の欠陥にキャリア(電荷)を叩き込むと荷電状態が変わる(プラスやマイナスの電荷が増える)が、それと同時に、この欠陥自体が大きな構造変化を伴うことがわかっている。実は SiO<sub>2</sub> と SiN との界面を MONOS は必ず使うが、SiN の界面付近に SiO<sub>2</sub> から酸素が入り込んでいると、酸素に起因する欠陥が形成され、書き込み

/消去に対して不可逆になる。このため、今までは書き込み/消去耐性の強い MONOS を作るために、酸素を減らす研究をしてきた。

SiN 中の窒素の空孔（窒素が抜けたもの）といった欠陥は書き込み/消去に対して可逆的な変化を起こすので、耐性が非常に高いということがわかっている。可逆的な変化ということで大きな構造変化ではないため、おそらく長期信頼性には向かないと考えられる。

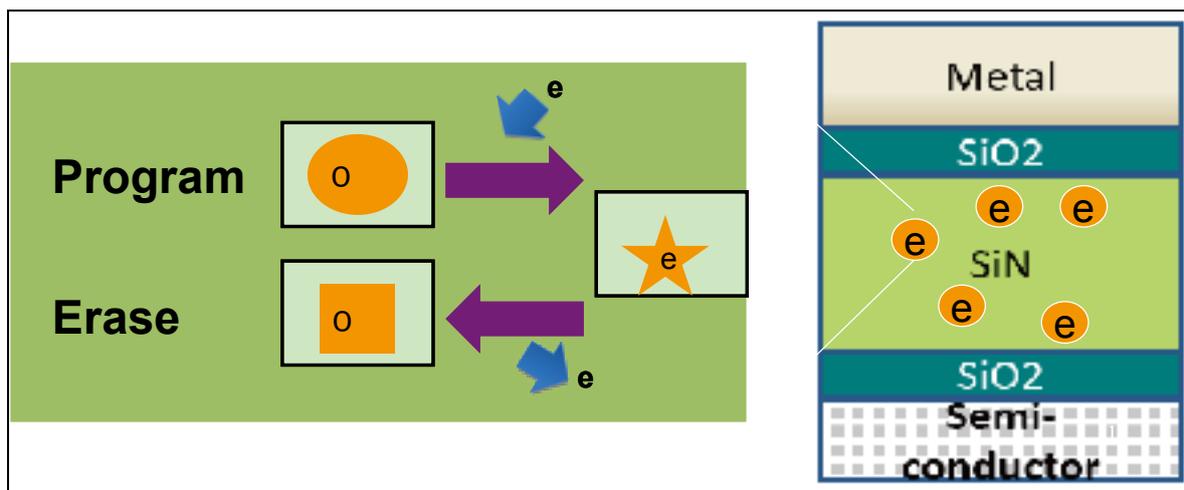


図 4-3-2 MONOS メモリ

MONOS はもともとフラッシュメモリの後継として、将来のメモリ微細化に対応する有力なメモリとして考えられており、いろいろなところで研究されている。SiN 層内に電荷のある状態を例えば 1 状態とし、電荷のない状態を 0 状態とすることで 1 ビットを表す。この考え方は、フラッシュメモリと一緒である。現在のフラッシュメモリはフローティングゲート型メモリであり、フローティングゲートと呼ばれるシリコンの島の中の電荷の有無で 0 と 1 を見分ける。フローティングゲートでは、電荷（例えば電子）は全体に広がっているため 1 カ所壊れると中に入っていた電子が全部漏れてしまうという欠点がある。一方、MONOS の場合は各欠陥に電子は局在しているため、あるところが壊れても他は残っている。半分電荷が失われても、半分残っていれば長い間経っても読めるということが予想される。

これまでの MONOS の研究は、いかに書き込み/消去を 100 万回、 $10^{15}$  回など、何度でもできるものを目指し、書き込み/消去耐性に優れた欠陥は何か、電荷を入れたり戻したりしたときの構造変化はどうなるか、何度でも繰り返してできる欠陥はどんな欠陥か、ということを追ってきた。今でもこれが MONOS の主流だと思うが、長期保存型といった瞬間に、全く発想の転換が必要になる。電荷注入によって構造が塑性変形のように不可逆に変化することが長期保存にはうってつけであり、ロゼッタストーンに文字を書くのと同じことである。

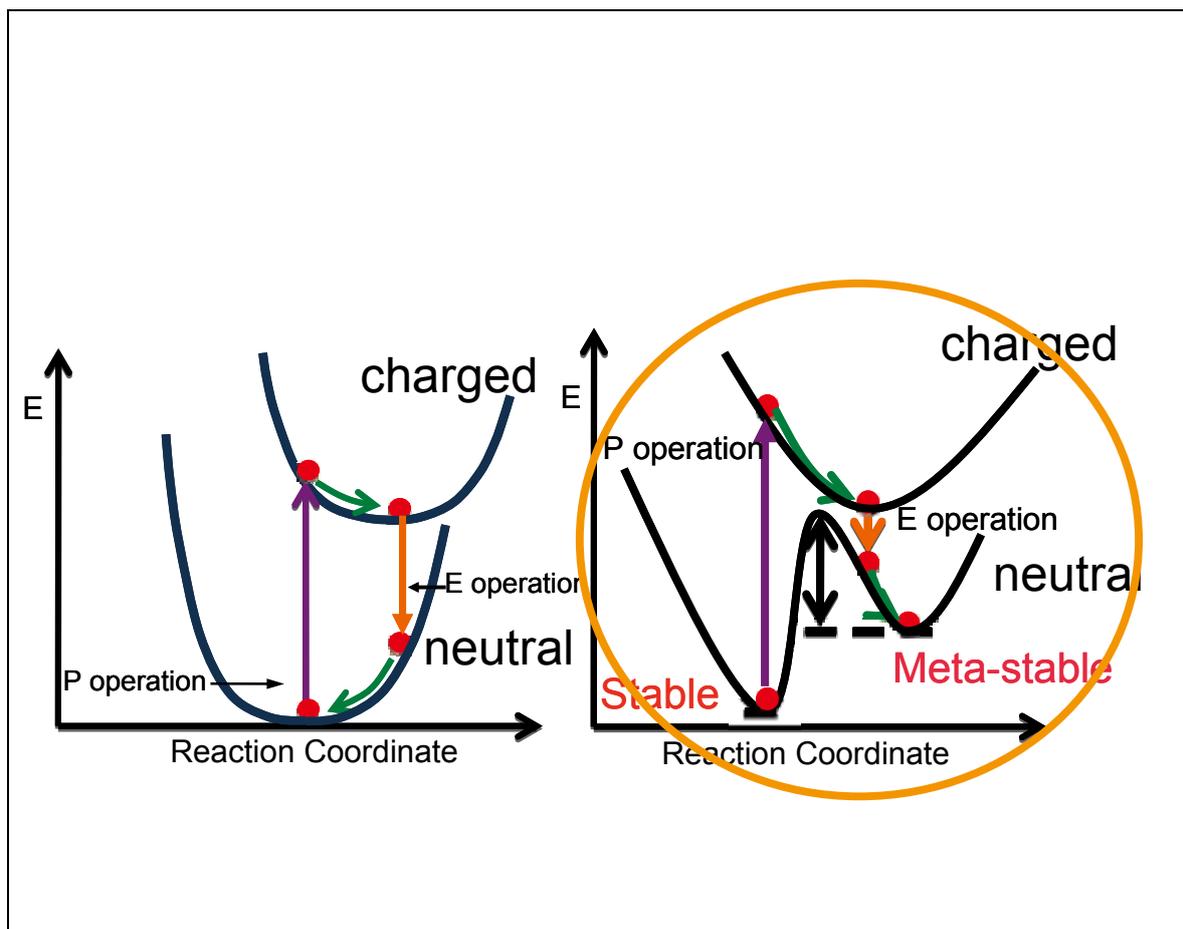


図 4-3-3 書き込み／消去に対する 2 種類の構造変化の模式図

もちろんフローティングゲートメモリでも、フローティングゲートと半導体との間の  $\text{SiO}_2$  を思い切り厚くするなどして使えば、超長期メモリはできないことはないと思うが、MONOSの方が  $\text{SiO}_2$  の膜厚を薄くでき、小さい電圧で使えるので、より省電力化が可能であり、より微細化に適していると言える。

$\text{SiO}_2/\text{SiN}$  界面の欠陥について、詳しく説明する。図 4-3-3 の左の図で、中性の状態に電荷を入れると、少し構造が変わるが、電荷を放出するとまた元に戻る。これが可逆的な構造変化を起こす欠陥である。一方、右の図のような  $\text{SiN}$  の欠陥に電荷を入れると、大きく構造が変化し、電荷を引き抜いても元には戻らず、全然違うところへ行ってしまう。何回も使う場合には可逆的な欠陥が良いが、一度書き込んで、そのままその情報を保持するのであれば、むしろこちらのほうが望ましい。

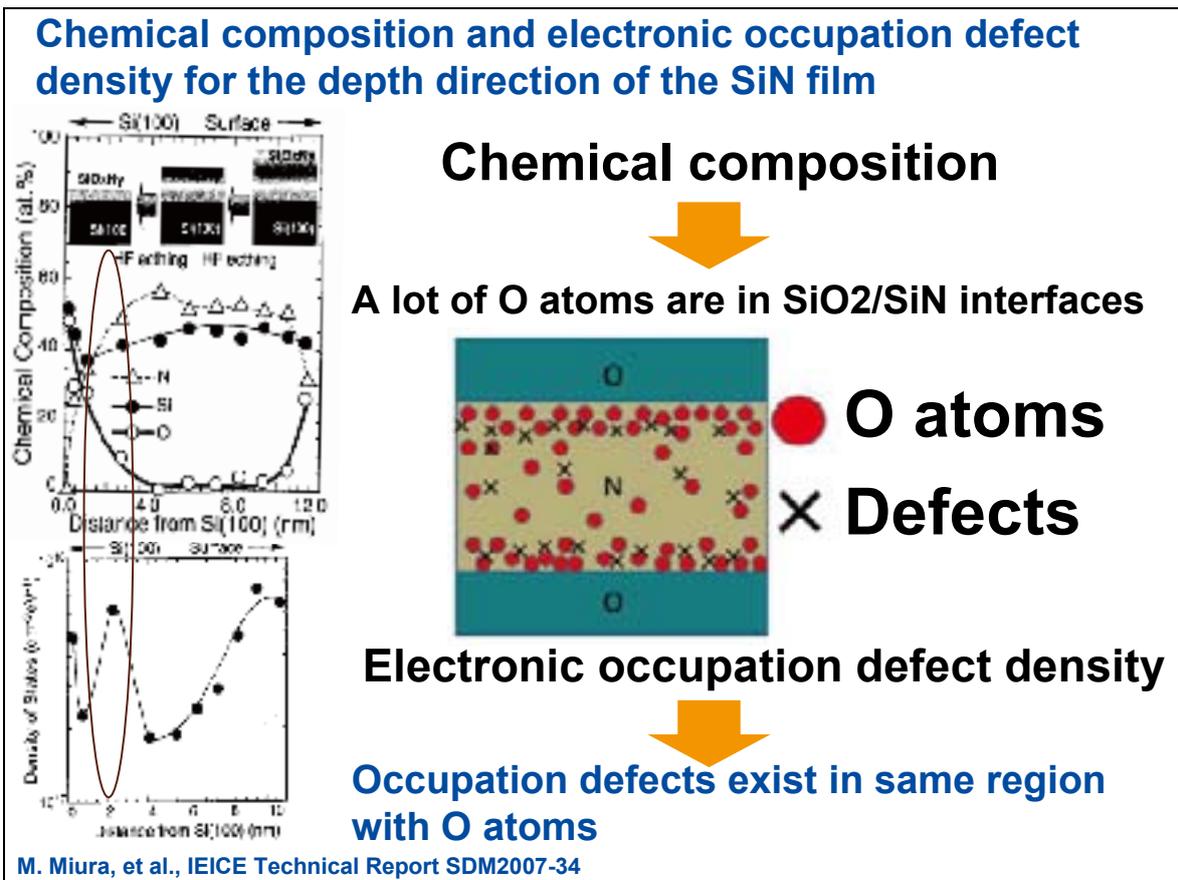


図 4-3-4 MONOS の実験的知見

実験的に知られていることを紹介する。図 4-3-4 は MONOS 構造のシリコンと酸素と窒素の比率（名古屋大学の宮崎先生 [当時は広島大学] の測定）を測ったものであり、界面付近で、窒素と酸素が混じりあっていることがわかる。つまり、界面付近は SiN でありながら、多くの酸素が入っており、そこには欠陥（ディフェクト）が多く存在する。欠陥が多くあるということは、ここに電荷がトラップされやすいことを意味している。

界面付近に酸素が多くあるといったことを反映して、計算では酸素が SiN の中に混じっているものを取り扱う。図 4-3-2 の左側にあるように、電荷を注入すると、もともと丸い格好をしていたものが、星形に構造が変わり、電荷を引き抜くと四角になるという計算を今までしてきた。

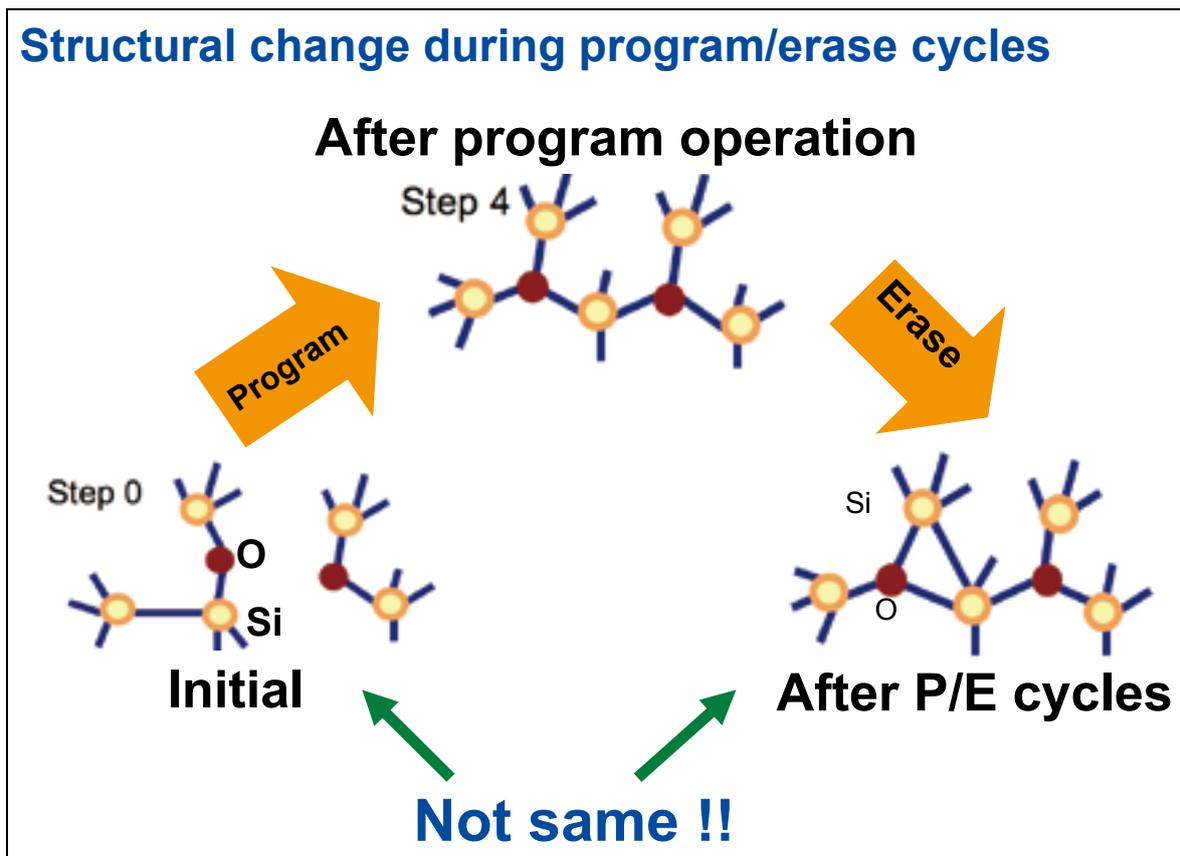


図 4-3-5 プログラム・消去における SiN 膜の構造変化

これを模式的に書くと、はじめは図 4-3-5 の左下のような格好をしており、酸素は 2 配位、シリコンは 4 配位で、どちらもストレスの無い状況にある。これにキャリア注入すると、シリコン・シリコン・ボンドは弱いのでここが切れ、逆に SiO のボンドをつくらうとする。さらに次は、この酸素が 3 配位になる (図 4-3-5 上部)。

これは、実は酸素に正のキャリアがトラップされているので、酸素が窒素のふりをして SiN になっており、結構安定な構造である。

電荷を引き抜いても実は戻らない。図 4-3-5 の右下の図のように、最初の構造とは全く違った構造になる。これは典型的な不可逆過程である。なぜなら、大きな構造変化、すなわち化学結合の組み換えが起きている。こういうものは、書き込み/消去耐性には適さないが、長期保存には適する。まさに石に字を書いたようなものであり、何度も使うことには向かないが、石に書かれた字は長くもつのも同じである。

逆に、窒素空孔のようなものは、構造はほとんど変わらない。正三角形が二等辺三角形になるだけで、構造変化は極めて小さい。これは可逆的欠陥でフラッシュメモリの代替には良いが、長期保存には不適ということになる。これまでの MONOS の研究では、酸素関係の欠陥は書き込み/消去に弱いので、酸素関係の欠陥を減らして、窒素空孔関係の欠陥を増加させるのが良いと考えてきた。このため、MONOS の開発では、各社同じようなことをしていると思うが、シリコンリッチのシリコン窒化膜を積層する方法がとられて

きた。ところが、長期保存では、逆に酸素関係の欠陥を増やすことが設計指針となる。したがって、シリコンリッチのシリコン窒化膜をつくるというのは大変な努力をしたと思われるが、この用途ではむしろ単に積めば良いということで、コスト的あるいは技術的にはかえって楽になるのではないかと考えている。

どの程度長期保存できるかという問いに対して答えるために、SiNの欠陥（酸素関係の欠陥）の構造変化のエネルギー障壁を計算してみた。なお、ここでは Simon Sze の教科書などと同様に、物理的な性質が 1000 年にわたって変わらないという前提の上でやっている。SiNの欠陥のある構造から、エネルギー障壁を通過して他の構造にどう移っていくかを計算してみた。

1つは電荷注入なしの中性状態はどの程度安定に存在するのかという中性状態のエネルギー障壁、もう1つは電荷注入後大きく変化した構造はどの程度安定するのかという電荷プラスの状態のエネルギー障壁を計算した。後者は計算の途中だが、あまりにもエネルギー障壁が大きいので、これはこれ以上やらなくてもいいと卒論生に言っているところである。

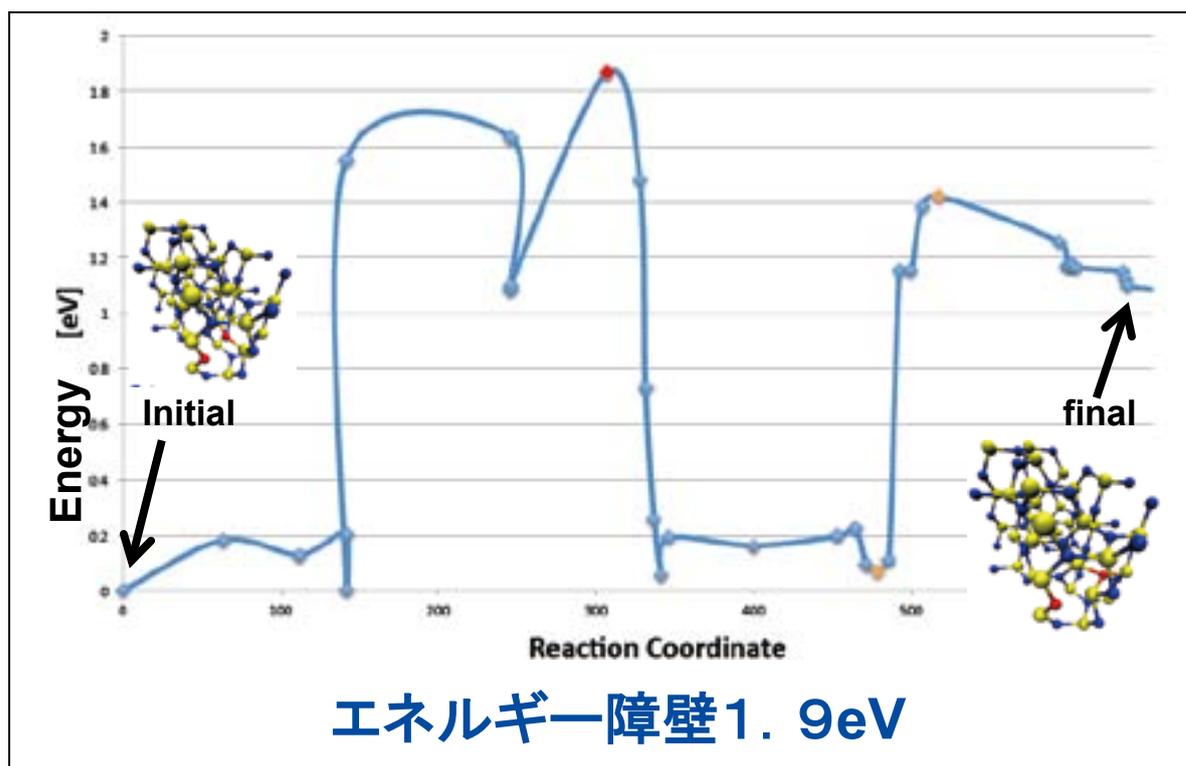


図 4-3-6 中性状態（電荷注入なし）のエネルギー障壁

図 4-3-6 は中性状態のエネルギー障壁（バリア）を示したものである。これはイニシャル（初期状態）からファイナル（最終的な安定状態）に行くところだが、およそバリアは 1.9eV ぐらいある。1.9eV というと結構高いバリアである。アレニウスプロットで見積もるのは問題もあって、本当は配置のエントロピーなどいろいろなことを考えてやる必要があるが、ここでは大まかな見積もりをする。Y を寿命、 $\nu$  を SiN の固有振動数、 $\Delta E$  を

エネルギー障壁とすると、寿命  $Y$  は下記の式で表される。

$$Y=1/(v \exp(-\Delta E/kT))、v=1.6 \times 10^{14}$$

この式に  $\Delta E=1.9\text{eV}$  を入れ、 $T=70^\circ\text{C}$  ( $343\text{K}$ ) として計算すると、寿命はおよそ 1000 年になる。これはアレニウスプロットでの簡便な見積りなので、更なる検討は必要だが、MONOS が長期保存メモリとしてのポテンシャルを有していることを示唆している。欠陥の構造といった物理的な性質が 1000 年間は変わらないということは、だいたい言うことができると思っている。ただし、このエネルギー障壁の計算というのは、いろいろ難しい問題もあるので、もう少し検討していきたい。

電荷注入後の状態 (+2 の状態) については卒論生にやってもらっているが、間違いなく  $5\text{eV}$  以上あるため、1 回書きこんだものに関しては寿命の問題は無い。したがって、書きこまない状態が変化しないかどうかを見ることが重要だと思われる。また、MONOS の物理的な状態も、きちんと封入していれば変わらない可能性が高いと思っている。

構造が変わるという意味では、他にもいろいろなメモリがある。例えば、抵抗変化型メモリでは、フィラメントができたり消えたりして、ここで大きな構造変化を起こしている。これも一度の書き込みぐらゐであれば、良い候補になるかもしれない。TiO<sub>2</sub> の場合は、1 個 1 個の Ti 原子の活性化のバリアは  $0.7\text{eV}$  ぐらゐである。まとまった場合にはどうなるか興味深い。例えば、ハードディスクで利用されているスピンのについても、スピン 1 個をひっくり返すのは、たいしてエネルギーはいらないが、束になっているので、毛利元就の 3 本の矢のような強さを持っている。しかし、それがじわじわシロアリのようにならされて破壊されるということが、おそらくハードディスクなどのエラーの原因だと思う。その意味では、抵抗変化型メモリは大きな構造変化を伴うが、1 個 1 個の原子の結合が弱いので、MONOS に比べてよくないかもしれない。MONOS が優れている理由は、一言でいうと、SiN や SiO などの非常に強い共有結合から構成されているからである。電荷の注入で SiO<sub>2</sub> のボンドを切るか、SiN のボンドを切るか、という類のものなので、まさに文字を書くあるいは、塑性変形に対応するのではないかと考えている。

以上をまとめる。MONOS は電荷注入によって大きく構造変化を起こす欠陥と構造変化の小さい欠陥の 2 種類がある。構造変化の大きい欠陥 (ボンドの大きな組み換えを伴う欠陥) は一度書き込むと消えないので、長期保存メモリとしてのポテンシャルを持つ。

指針としては、SiN 中への酸素の混入を促進するプロセスが、長期保存には適する。今の MONOS で SiO<sub>2</sub> の膜厚を厚くするというだけでも良いかもしれないが、より低電圧、より微細化を目指すのであれば、こちらのやり方が良いと思っている。書き込み/消去耐性の向上といったフラッシュ置き換えを考える場合の全く逆のことを考えなければならない。

電荷注入で大きな構造変化を起こす材料があれば、MONOS 同様に高いポテンシャルを有すると考えられるが、その際には構造変化がボンドを切るなど大きなエネルギーを有している必要があると思う。

質疑：

Q：中性状態をいかに保つかが今後のご研究の対象と聞いたが、設計の立場からは、どうリードディスタンスを抑えるかということになると思う。どういう取り組みの仕方を考えているか。

A：欠陥の密度は  $10^{13}\text{cm}^{-3}$  ぐらいあるので、全部がバリアの高いものでなくても良いと思っている。例えば3分の1程度でも良い。酸素は凝集する傾向があるので、そんな性質を利用すると、 $\text{SiO}_2$  と  $\text{SiN}$  はまったく違うので、そこにチャージを叩き込むと、窒素は酸素のふりをし、酸素は窒素のふりをするというような、とてつもない組み換えが起きる。このため、電荷を入れたときに、どうやって酸素ならば窒素のふりをさせる、窒素ならば酸素のふりをさせるか、それに適したような構造を界面付近でつくっていくか、そのプロセスは何か、ということ原子レベルとプロセスの両方から考える必要があると思う。先ほど説明した2+の状態が全然動かないというのは、酸素が窒素のふりをして、二度と酸素に戻りたくないといっている状況である。答えになっているかわからないが、そのようなことを考えている。

Q：一般に、こういうものは複合欠陥を作りやすいが、そういう可能性はないか。

A：まったくその通りで、複合欠陥を作りやすい。例えば、窒素空孔と一緒にいるということも検討している。最初に見せた中性といっている構造は、ある意味で複合欠陥とみることができる。複合欠陥になったおかげでシリコンは4配位、酸素は2配位でラッキーな状態になっている。

Q：それは、例えば、陽電子消滅などでチェックできると思うが、その辺りの研究はないか。

A：陽電子消滅をやっている先生が大学にいるが、MONOSについての共同研究はやっていない。 $\text{SiO}_2$  ではよく見えており、 $\text{SiN}$  は聞いてみないとわからないが、見えると思う。

Q：具体的な欠陥のモデルはいろいろあると思うが、キャリアを入れずに何か大きな衝撃的な雑音など（具体的にはわからないが）で同じような欠陥が誘起されることはないか。それが一番大きな問題だろう。

A：そう思う。キャリア以上のインパクトのあるものがあるか、いま考えているところである。キャリアを入れた後の複合欠陥構造というのは、シリコンは4配位、酸素は2配位でいたものが、キャリアを入れたら酸素が3配位になってしまったということである。もともとは複合欠陥で安定だったものが、キャリアを入れた瞬間に（少なくとも学生の計算では）、5eVなどとんでもないエネルギー差になっている。

Q：何か偶然に、あるいは災害が起こって、大きな放射線や雷などが原因でキャリアが入ることはないのか。そうだとすると、それは大きな問題であろう。

Q： $10^{13}\text{cm}^{-3}$  ある欠陥のうち、1000年経っても例えば3分の1残っていれば良いという考え方をしている。宇宙線などが来る可能性もあると思うが、1000年経って半分残っていると十分読めるし、おそらく5分の1でも読めるだろうと思う。

Q：この高密度化はどのくらい行くのか。

A：おそらく企業のほうが詳しいと思う。MONOSでは3次元化、さらに多値化などいろいろなことをしており、非常に高密度になっている。ナノワイヤ構造などにも対応でき、原理的には高密度化に適している。

## 4.4 意味理解の保障に向けて

小林 敏夫 (神奈川大学)

基調講演にあったように、デジタルデータの超長期保管戦略としてエミュレーションはマイグレーションに対して堅牢な戦略である。エミュレーション戦略を実現するには、デジタルデータを超長期に保管できるメモリの存在とそのメモリの内容を読むためのシステムがいつの時代にも手に入ること、さらに意味理解が保障されていることが必要である。

デジタルデータを超長期に保管できるメモリは、先のご講演から、全く新規の技術を多く開発せずとも実現できそうである。残る大きな問題は、将来にわたる意味理解の保障、アクセスの保障である。新たに作るシステムでは、あらかじめアクセスと意味理解を保障する仕組みを作り込んでおく必要がある。

作り込む上で、考えておかなければいけない要件を以下に述べる。

まず、ハードウェアエミュレータについて述べる。これは §4.2 ロバストなアーカイブの要件のご講演にあったアダプターに該当する部分であるが、それがいつの時代でも容易にかつ安価に作れる必要がある。そのためには、物理インターフェースは単純なものが望ましい。物理インターフェースとは、例えば光ディスクでは光カップラが、ハードディスクは磁気ヘッドが該当すると考えられる。磁気ヘッドにはマグネティックトンネルジャンクションという素子が入っており、このヘッドだけでハードディスク全体のコストの2割を占めるといえる。こういう物理インターフェースが非常に簡単なものであれば、将来、その媒体を見つけた人が、その媒体にアクセスするための装置を容易に再構築できると期待できる。電気的接点が一番簡単な物理インターフェースと考えられる。信頼性の点から非接触、無線という選択もある。これからの検討課題だと思われる。

もう1つ重要なのは、インターフェース仕様である。仕様が変わってしまうと読み出しが困難になる。仕様は不変であることが望ましいが、必ずしも不変でなくとも仕様を理解でき、再構築できれば読み出しは可能になる。

アダプターすなわちハードウェアエミュレータができたとしても、それだけでは単なる1、0のビット情報が出てくるだけである。それだけでは意味が分からない。ビット情報から意味の理解できる形に変換するためには、メタデータが継承される必要がある。そのためには、メタデータを記述している言語に永続性があるかが非常に重要になる。さらに、1000年、数100年先の人がビットデータの

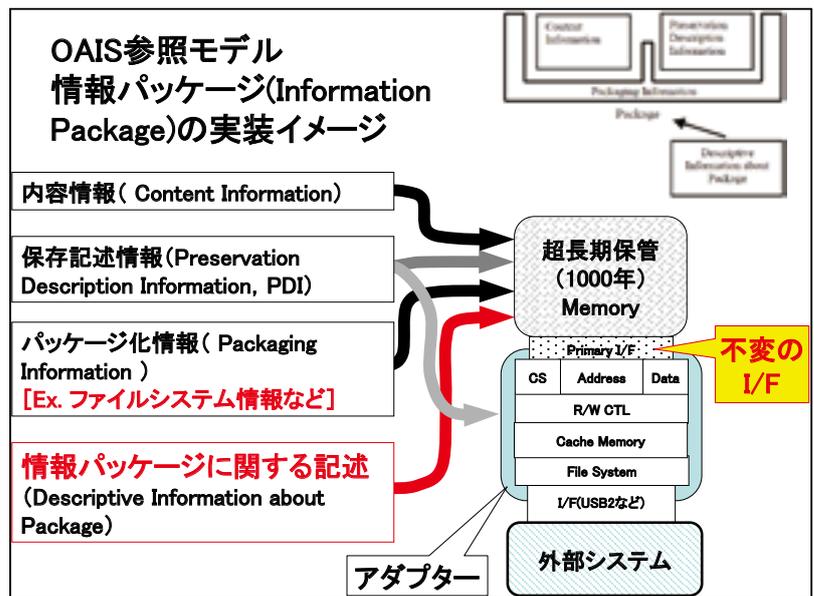


図 4-4-1

意味が理解できることを保障するためには、データの解読性を保障する仕組みが必要である。そのためには、基調講演で述べられている OAIS のモデルの 4 要素を実際の物理実態(ハードシステム)の中にどのように入れ込むか。そのデザインを最初に規定しておかなければならない。解読できる仕組みを標準化し、将来に伝わる形にしておかなければならない。(図 4-4-1)

次に、幾つかのアイデアと課題について述べる。1 つは、媒体チップの表面に見た目情報である自然言語すなわち継承されることが期待される文字を使って媒体の仕様を記載しておくという案がある。OAIS のモデルで言う「情報パッケージに関する記述」に該当する。端子情報、すなわちどの端子にどのような信号を加えるのか、どの端子からどういうビット列が出てくるのか、そのビット列の何

ビットまでにどういうフォーマットのメタデータが入っているか。それをまず解読することによって、メモリ内の本体情報の解読が可能になる。また、この媒体の内容がどういうものなのかという情報も必要である。(図 4-4-2)

さらに、OAIS の情報パッケージの情報をメモリ媒体とアダプタというシステムの中に、どのように組み込む(実装する)かについてのモデルを作る必要がある。(図 4-4-1)これは大変な仕事になる。まず基本となる参照モデルが必要である。それを個々のアプリケーション毎に適用していくことになる。

まず、OAIS のモデルの情報をチップ媒体へ入れようとすると、容量が問題なる。1 媒体の中に全ての情報を入れるとコンテンツ本体よりもメタデータの方がボリュームが大きくなってしまう場合もある。そのため、こういう意味理解を保

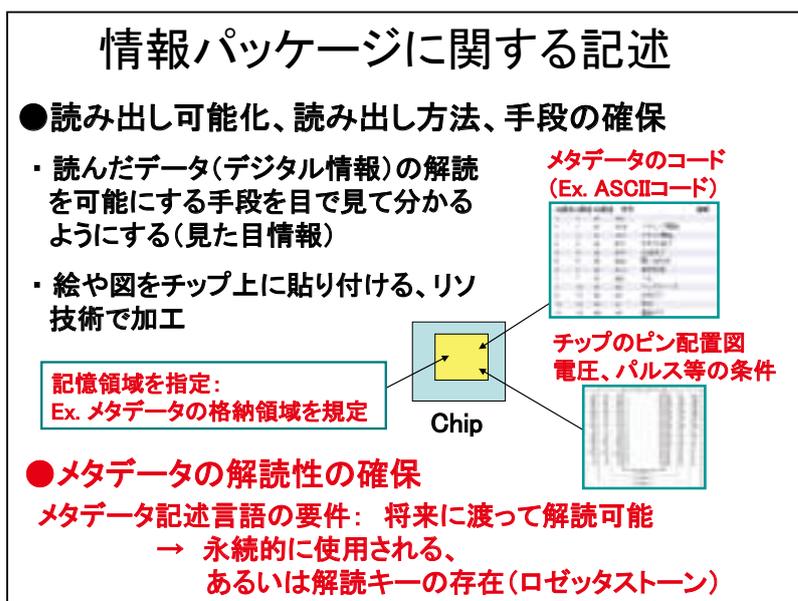


図 4-4-2

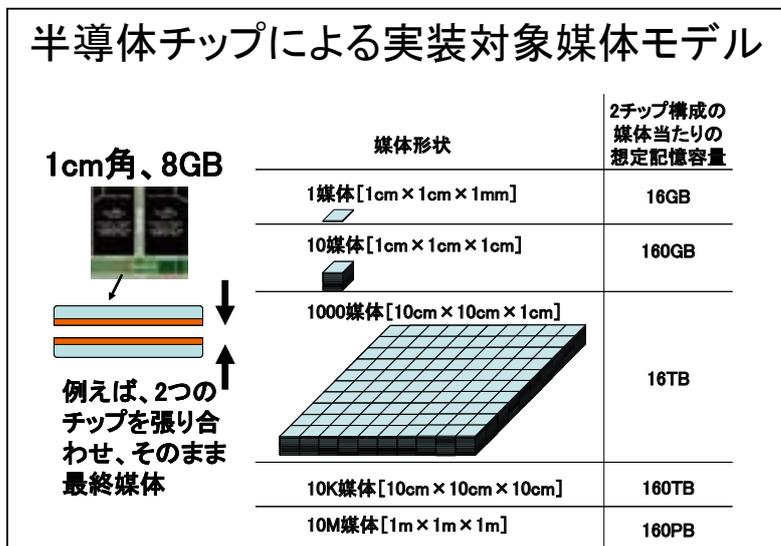


図 4-4-3

障するための情報を実装するモデルを参照モデルを基にいろいろ考えなければならない。当然のことながら、媒体のメモリ容量によって考え方が影響を受ける。たとえば1チップで8GBくらいのメモリができたとし、2チップで16GBの媒体を作ったとする。この媒体の大きさが厚さ1mmで1cm角ぐらいとすると、これを例えば10個積みれば160GBになる。1m<sup>3</sup>のキューブにすれば160PBになる。(図4-4-3)このようなユニットで考えれば、OSから全てのメタデータを入れることも可能となる。一方、デジタルカメラの写真フィルム代わりにメモリを使ったとすると、そこにOSから全てのメタデータを入れることには無理がある。例えば代表して別のチップに写真に直接関係しないメタデータだけを入れるような仕組みを考える必要がある。どういう媒体ユニットを考えるか、使い方によって、メタデータとして入れるものをどう選別するのかということも考えていく必要がある。

このような議論は、具体的な物理モデルが出てこないに進まない。何か1つリアリティのある物理モデルを作ることが重要である。

おそらくアダプタといわれるブリッジのシステムの物理的な形態は、用途によって大きく変わると思われる。データセンターや大規模な画像を処理するようなシステムの場合には、多くの超長期保管メモリ媒体を載せたボードを多数実装した形の巨大なラックを考えればよいし、個人がカメラのフィルム代わりに使うのであれば、メモリカード状のものがアダプタとなる。(図4-4-4)メモリ媒体は、そこに差して使う。

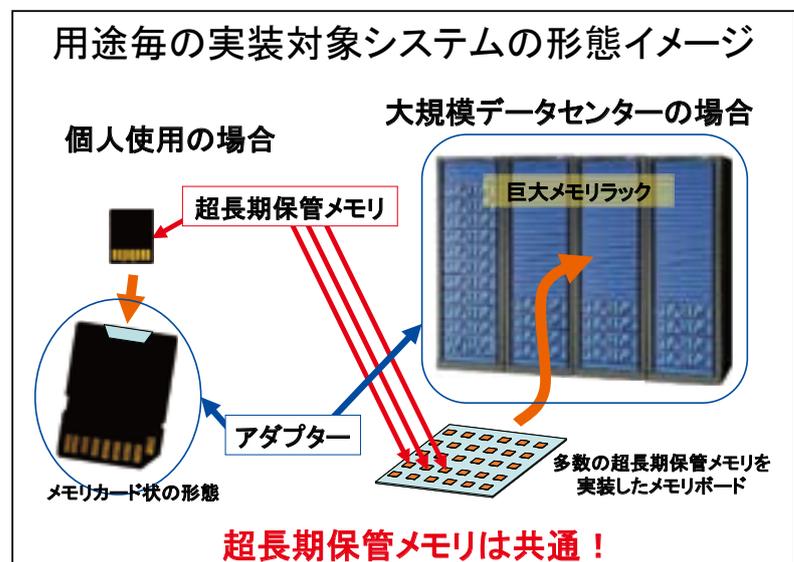


図 4-4-4

ただ、そのときにメタデータをどこまで入れるのかということは、先に述べたとおり用途ごとに考えていかなければいけない。

早速に、物理システムのモデルについての検討と、意味理解を保障するためのメタデータとそれを実装するための参照モデルの検討を可能にする環境を作る必要がある。超長期保管メモリ・システムの案、すなわち物理モデルと意味理解を保障するための参照モデルを作り、世界に問い標準化を行うという活動を進める必要がある。

まとめとして、いつの時代においても読み出しを可能とするためには、いつの時代においても読み出し装置（ハードウェアエミュレータ）が存在できることが必要である。そのために、その装置を容易に低コストでつくるのが非常に重要である。あまりにも高いコストや複雑な作業が伴えば、媒体が残っても、誰もそれを読もうとはしなくなる。安いコストで簡単にできるように最初から設計しておくことが重要である。

さらに当然だが、意味を理解するためにはメタデータとそのスキーマが必要である。メタデータを記述する言語としては、将来にわたって解読性が保障されるようなものを探さ

なければならない。メタデータとスキーマをメモリ媒体と読み出しシステムに実装する参照モデルを早急に構築し標準化する必要がある。

媒体を作る部分については海外で行うことになる可能性がある。安く作れる所が媒体を生産することになる。しかし、参照モデルあるいはシステムの仕様を日本が主導して作ることができれば、アダプタ（ブリッジのシステム）開発においては優位に立てると期待できる。アダプタは新しいセットである。DVDであればレコーダがアダプタに該当し、テープであれば読み出しユニットが該当する。このアダプタは、その時代の技術でつくればよく、容易に作れるように仕組みを作っておけば、いつの時代でも作れる。このセットの部分のビジネスは、普通の電気メーカーができるビジネスである。§ 3.3 社会・経済的効果の講演でも述べられていた様に、媒体そのものよりもドライブ（アダプタ）の方が金額ベースの市場規模は大きい。媒体ビジネスも取れば良いが、少なくともセットの部分のビジネスは、日本が市場を押さえることを期待する。

#### 質疑・応答

- Q：ホログラムなどを上手に活用することが必要。ホログラムは安く作れる。メタデータを入れてしまえる。光技術は日本の得意とするところ、インテグレートされるといい。全部電子的にするというのは、やめたほうがいい。
- A：電氣的接点のメリットは、スケラブルなファイルシステムを容易に構築できる、ニアラインの機能を持たせることができるなどメリットがある。ホログラムは、非常に大容量の1つのユニットができるという魅力がある。
- Q：それに、見られる。ピクトグラムとして読める。
- A：画像はそうだが、デジタル情報にした場合、画とはまた違った入れ方になる。
- Q：1、0、1、0で記録するよりも、ピクトグラムのような形、絵で記録してはどうか。そういうもののほうが、いつまで経っても読める。1000年後の人にも読める。
- A：そういう形で保管した場合の記録の容量をどう考えればいいのかということについては、検討する必要がある。
- Q：キーだけ読めば、あとはここに書いてあるということでは使えるのでは。
- A：その通り。メタデータの階層の入り口の部分を画にしておく。同じ媒体の中にデジタル情報はビット情報として入れておく。まだ媒体の物理原理を決めていない。ホログラムの安定性が半導体と同等あるいは優れていれば、もちろんホログラムが採用される可能性があると思う。今の時点でホログラムを否定しているわけではない。
- Q：一番気になったのが、1000年後に電気があるのか。私も光屋なので、やはり電気でないものが良いのでは思う。
- A：しかし光も結局、読み出し装置はエレクトロニクス。
- Q：そうだと思います。だからこそ、電気がいつまで続くのか考えなければいけないと思う。
- A：電気のない世界というのは、私の想像力の範囲を超えている。
- C：国際標準化というところで仕事をしてきた。ISO、IEC、JTC1、SC23、光ディスクの標準化が長かったが、4～5年前からはリムーバブルハードディスクのインターフェースの国際標準化をやった。3年前からはフラッシュメモリもスコープに入れ、今はウォッチしている状態。2年前には、ストレージクラスメモリを入れた。

われわれの委員会で出来るとすれば、そのインターフェースだろうということで、日本から提案していく可能性は十分あると思う。ただし、情報技術の世界で HP が主導的立場をとっていて、IBM も動いていて、日本でなにか提案できないかと言ってきた。それで、今回、何かの形で立ち上げていけるとよいと思う。

## セッション5 全体討論

司会：小林 敏夫（神奈川大学）

《はじめに》

発表をいただいた6名に、事前アンケートにご回答をいただいた。集計結果を紹介する。1番目の設問は、期待するデジタルデータの保管期間と何時までに長期間にわたってデジタルデータを安定的かつ妥当なコストで保管する技術が実現されるべきか、というものである。結果を表5-1に示す。保管期間については、100年以上、1000年程度という範囲が出た。実現が期待される時期は、10年以内がほとんどである。すぐにでも必要との意見もある。

	(a) 想定する技術によるデジタルデータの保存・保管期間	(b) 実現すべき、あるいは実現が期待される年
A	2つを想定。 ①多少コスト高でも、データの内容を劣化させずに長期的に保存できる技術・媒体。最低でも次の世代へ受け渡せる(デバイス革新に耐えられる)保存期間を持つ。データの保存だけではなく再生機器が保障されている。 ②コスト的に優れた技術・媒体。長期的な保存よりは迅速な記録と読み出しが行えることが必要。もちろん両方のよい性質を持つものが望ましい。前者を保存用データ、後者を提供用データと用途を分けて対応。	②については、今のところハードディスクがその役割を担っており、これを代替することになると想定され、できるだけ急いでほしい。 ①については、現在のところこれを満たす媒体が存在せず、10年以内に実現を期待。
B	永久保存。保存対象となるデータ自体の保存は永久保存ですが、保存保管の技術側の運用期間は30年～100年。	10年以内。
C	1000年を目標にPJを進め、結果、500年程度に収まれば。	早ければ早いほど宜しいが、現実的には5年～8年後に試作システムができ、その評価を得て、10年後にはシステムが商品になっている。
D	1000年。	2020年以降。
E	100年。	2015年。
F	最低50年、できれば200年	2020年。

表 5-1

2番目の設問は、必要とされる要件の優先順位についてである。保管の保障の次にどのような要件が必要かという設問である。「意味理解の保障」と「コスト」の2つの項目が回答の上位を占めた(表5-2)。

順位	1	2	3	4	5
A	意味理解の保障	コスト	利便性、書き込みの容易さ、検索、関連付けの容易さ		
B	意味理解の保障	記憶容量	耐久性、対障害性、保守性	利便性、書き込みの容易さ、検索、関連付けの容易さ	コスト
C	意味理解の保障	コスト	利便性、書き込みの容易さ、検索、関連付けの容易さ		
D	コスト	意味理解の保障			
E	コスト	利便性、書き込みの容易さ、検索、関連付けの容易さ	互換性の保証の仕組み	意味理解の保障	
F	意味理解の保障	利便性 1. 検索、関連付けの容易さ 2. 書き込みの容易さ、	コスト		

表 5-2

3番目の設問は、要求項目を満たす物理原理、デバイス、仕組みのイメージについて行った。表のA、B、Cはニーズ側の方である。ニーズ側は、具体的なデバイスや原理について詳しくない。既存の世の中で使われている語彙を使って説明されている部分が多い。一方、D、E、Fのテクノロジー側の人々は、自分の得意な分野について話されている。まだまだ議論の余地があることがわかる（表5-3）。

A	(1)書き込み時に元のデータとの整合性が保障される(同一性の問題)、(2)エラー訂正能力が高い、(3)物理的な損傷に強い、(4)媒体の劣化が生じづらい、(5)オンラインでのアクセスが容易、(6)再生するための技術が普遍的、(7)コスト面でも優れている。
B	サービスとしては、オープンまたはプライベートなクラウド等の垂直統合環境。 サーバサイドは、大規模災害も考慮した相互補完可能な統合された遠隔分散環境。 ネットワークは、モバイルおよびファイバー、および広域送電グリッド。 物理原理やデバイスとしては、分子メモリ、量子メモリへ期待。
C	半導体で1000年メモリを作り、出来るだけ単純なインターフェイスとデータフォーマット・メタデータ管理を標準化し、出来るどころ(多分公的なものから)保管システムを導入して行く。
D	デバイス:マスクROM 書き込み:電子ビーム直描でコンタクトをプログラム 保存:完全密封して保管 読み出し:無線給電・通信で読み出す
E	・100年間のデータ保持が可能なNVM。 ・NVMと同じプロセスで形成可能な非接触高速転送の仕組み(ミリ波など) ・システムの変化に対応しながらNVMへのアクセスを保證するアダプタ
F	構造を電磁場、光、キャリア注入等によって変化させることが不可欠です。いわば、デバイスの中に文字を各イメージです。その意味では通常のフラッシュは電子注入だけですので、全く論外。PCRAM等相転移を伴うものの方が当該用途には適していると考えます。

表 5-3

実現のイメージを明確にするには、実際にシステムを作る際に必要となる参照モデルと具体的な媒体のイメージの検討を進める必要がある。どういう方式が本当に良いのかはまだ決まらない。重要なのは媒体だけでなく、システムとしてどの様に考えるか。ソフトとの連携も含めて、考えなければならない。

### 討論

・このワークショップにそれぞれの分野の多くの方が参加し、これまでと逆の発想や、これまでと違う技術、具体的な提案が出ている。重要な場だと思う。

この問題は、単に資金を投入すれば良いという問題ではない。たとえば先ほどの「1000年後に電気はあるのか」という問いかけ、またインターフェースを決めるのが重要だけでも、決めた瞬間から時代遅れが始まるなど、どう考えるのか、1000年先を見通した議論をしようとしている。学術的、技術史的な観点もある。国際標準化という話もある。国際関係論的な話もあるのかもしれないし、文化人類学的な話も必要となるかもしれない。それを大きな枠組みの中でとらえて議論し、その中で学術の再構築や創出、あるいは科学技術における波及効果を考える。こういう大きなテーマに取り組むことができる場合は、CRDS だと思う。

(CRDS)：この半年ほど調査してきて、まだコミュニティは狭いが潜在的なプレーヤーはたくさんいるという印象。提言書を発行し、その後も1年間ぐらい研究会形式で、関係者を集めてコミュニティを広げていき、共通の認識を醸成したい。

司会：超長期保管を必要としている現場は、明確である。NHK、映画などの映像産業、国会図書館、公文書館、さらに天文台、地球科学、鉱物石油などの資源関連の産業、警察、医療など社会のあらゆる分野に広がっている。にもかかわらず、この問題に対する社会的に認識が広まっているとは言いがたい。ニーズ側と技術開発を担う側との意識の擦り合わせが必要である。開発の主体が誰なのか、研究者が何処に居るのか、そもそもどの様な分野の研究者が必要なのかという基本的な課題も残っている。ニーズははっきりしているが、何をなすべきか、保管系の技術とは何なのかについての認識が十分ではない。

このような状況の中、早急に開発を具体化するには、まずビジネスモデルを明確にし、人を呼び込むことが必要である。人々の意識の中には大きな慣性があり動きが鈍い。手遅れとならないようにするために、自律的に開発が回りだすまでは、JST、国などの公的な機関が主導し、リアリティを出し、前に進める必要がある。

当面期待する仕組みや体制については、先ほどのアンケートにあったように10年以内に立ち上げ商用にする、世界に先駆けて情報の超長期保管技術のプロポーザルを行うという目標を達成するために、大きく分けて2つほどシナリオが考えられる。

(1) できるだけ早く国プロを立ち上げる。最初は規模が小さくて良い。10年以内の実用化を達成するためには、時間がない。研究者の獲得、開発主体を明確にするという環境整備から始める。小さくとも国プロということで求心力を付ける。本格的な開発に移行出来る段階(1~2年後)に再度判断する。

(2) 研究会を立ち上げて、意識を広める活動と研究者の獲得、開発主体を明確にする活動を行う。国プロとして体制が取れると判断した時点で国プロ化を図る。

いずれにしても、時間的な余裕はあまり無いと考えるべきである。

・今日とは違う領域の方々を集めて、このようなワークショップをおこなう価値は十分にある。場合によってはコンペをしてもいいと思う。審査員には、ニーズ側のNHK、国立図書館などに入っただき、学術的な観点から大学から、あるいは文化的な観点からも入っただき、広く、電気なのか、光なのかという壮大な議論をしてもいいし、それからインターフェースを決めるにあたって、国としての戦略はどうあるべきなのか、国際標準の作り方とのすり合わせはどうすべきなのかという政策議論をしてもいいと思う。

(CRDS)：すぐに国プロを立ち上げられればよいと思うが、答える立場ではない。文科省、内閣府の方にお聞きしたい。

もう少しコミュニティを広げたり、共通認識を積み上げていく必要は感じている。司会者へ質問だが、10年以内に開発・実用化する場合に、どのぐらいの研究開発費が必要と考えるか。

司会：物理的な超長期保管メモリ記憶媒体を半導体チップベースで考えると、それほど多くの新規の開発要素はない。現にMASK ROMならば問題ないし、不揮発性メモリでも

1 回しか書かないという前提であれば、今の MONOS で 1000 年以上記憶保持を保障できる。フラッシュでも可能かもしれない。あとは配線と外とのインターフェース部分すなわちパッドの問題が残る。RF、無線によるインターフェースも解となる可能性がある。技術開発は必要であるが、まったく新規のデバイスを作るのに比べれば、たとえばナノの新しいデバイスを作るという話に比べると、相当に少なくて済むのではと思う。ハードウェアの開発については、かなり道筋が見えている。むしろ本当の意味で大変なのは、ソフトの仕様、システム仕様だ。それは知恵の問題なので、お金をいくら投入しても、知恵がなければ結局何も出てこない。逆に知恵さえあれば、ごくわずかな予算でシステム仕様ができる。知恵を持つ人をいかに見つけ出すかが重要である。

あとはビジネスがどれだけあるか、メーカーが参加できるかなどがポイントである。

最初は高くてもいいと言って下さる NHK や、最近話題になっている天文台のようなどころからビジネスを広げるシナリオを考えることが重要。天文台では、来年以降、全世界で 200PB の画像データが年間に生まれる。天文データというのは、今の空の様子なので、二度と再現できない情報であり、消すという性格のものではない。すぐに膨大な量のデータを保管しなければいけないという問題にぶつかるは目に見えている

JST はもちろん、文科省や総務省からもメッセージを出して、資金の大小ではない部分すなわち知恵の部分で人を集める努力をしていただくことが重要である。まずは声を出し、大きな慣性のあるテーマを動かしてほしい。

・2008 年に、国会図書館の当時の館長の長尾先生や西洋美術館の青柳館長、ハリウッドをお呼びして、シンポジウムを行った。そのときも、「なぜこんなに人が来ないのか」、「興味や関心はないのか」と言われた。それから 4 年、5 年が経つが、何も進んでいなかったのだと認識した。

私の経験から、それぞれの分野でそれぞれの技術や要求を持っている人はいるが、それを 1 カ所に集めようという試みが今までなかったのだと思う。

最初から 1 つの決まったやり方に向かってチャレンジするのではなく、最初はいろいろなアイデアを融合して、1 つの動くものをつくっていく試みが必要だ。実際にハリウッドでは、この 12 月に公開される映画は 1 作品作るのに 8PB のデータを使う状況になっている。もう悠長にフィルムに保存するという時代ではなくなっている。まず、動くものから作って、その中で部分的に更新していくようなやり方で、よりよい組み合わせを見つけしていくという進め方がよい。

今日の話は、どちらかというとデバイス側から話が進んでいるような感じがする。デジタル技術は数学の塊だ。数学的な力を使うと、もっといいものができる可能性がある。幅広い連携で何かプロトタイプをコンピートしながらつくっていく、そういうメカニズムを用意していただけると非常ありがたい。

・私は映画の原版と素材を管理している。先ほどから市場ターゲットに日本の映画産業が入っておらず残念である。大口でないのでは仕方がないかと思うが、今の日本映画界全体の状況を述べさせていただきたい。

なぜ映画が 100 年もったのかというと、フィルムであったことが大きい。実例を述べると、映画会社の倒産によって、数年間、管理されず放置されたことがあった。それでも、

フィルムは存続していた。エミュレーション手法だったのかなと考えている。

いま日本の映画業界は、上映については一気に9割以上の劇場がDCP（デジタルシネマパッケージ）というデジタル上映にシフトした。それに伴い、制作の方もデジタル工程で製作されている。ポーンデジタル化している。一方、保存についてはまったく進んでおらず、現状、各社ばらばらである。結局、われわれがフィルムを捨てたような形になってしまっているのが現状である。その結果、フィルムの状況は日に日に悪くなっている。ハリウッドの資料によると、デジタルの保管コストはフィルムに比べて11倍かかるとある。

しかし、フィルムを過信してはいけない。実際、1920年以前の映画がどれぐらい残っているかというハリウッドで20%前後、日本映画では、おそらくゼロに限りなく近い。一刻も早く、超長期保存ができ、マイグレーションが不要なメモリ・システムの実現を期待する。フィルムと同じような感覚で放置していても大丈夫なデータが非常に強く望まれる。

さらに、映画会社の立場からいうと、著作権期間が70年なので最低70年保管したい。当然著作権期間の延長は望ましいので、100年以上は保管したい。

司会：映画は価値を生む資産として使われているが、大学の研究室などには科学的には非常に価値があっても、短期的な経済的価値を生まない情報はたくさんある。そういうものは打ち捨てられている状況で消えてしまう。映画ももちろんであるが、放置しておいてもきちんと未来に継承できるような仕組みを、一刻も早くつくる必要があると思われる。

・今日議論されている話は、仕組みの話で、一般の人から見ると関心の無い話だと思う。例えば電気がどうやって来るかを真剣に考えている人はほとんどいない、原発は嫌だけれども電気は使うというぐらいの話である。そういう意味で、こういう基盤の上に実現される保存・記録というファンクションがどういう形で社会にフィードバックされていくのかというイメージを伝えないと、興味を持ってもらえない。それはおそらくわれわれがいくら考えても難しい。こういうことができますが、皆さんはどう使いますか、どんなアプリケーションを考えますかということまで話を広げないと難しい。もしかすると、思いもよらないような使い方が提案されるかもしれない。記録・保管技術を使ってまったく別のサービスを考える人もいるかもしれない。そういう人たちも参加できる形でプロジェクトを進めていく必要があると思う。

もう1つ、保管の話をしているが、一番の課題と思っているのは、保管したものをどうやって取り出すかということだ。弊社では50万時間の映像データをマイグレーションした後、どうやって取り出すのか、どうやって把握していくかが問題である。マイグレーションはできるが、その全体を把握する技術が実はない。メタデータの検索技術はあるが、画像の検索技術はない。50万時間の映像データを検索する技術がなく、課題になっている。この近未来の課題も含めて、国家プロジェクト、国家10年の計、100年の計という中で検討していくべきと思う。

(CRDS)：非常に興味深いディスカッションを今日はお聞きしたが、たとえば私個人の立場でいうと、白黒写真やカラー写真がどれだけ持つかというのは大変重要と考えている。今は長く持つものをどんどん切り捨て、刹那的な文化あるいは文明をいま社会として促進するようになっている。

そういう意味で、このプロジェクトのテーマというのはアンチテーゼ的なところがあって、1000年先はもうほとんど考えようがないと思う。100年先というのは、かなり意味のある問題であって、そういう面からこれを進めていくのは大きな意味があるだろうと思うが、一方で、現在の日本はそういうものにお金を出す国であるのかが疑問。いま指摘されたように一般の人たちに、こういう技術を本当にどういう立場から必要としているのかという議論をやっていかなければ、うまくいかないのではと思う。

今は国家100年の計を考えていない。10年先も覚束ない。ほとんど考えている人がいない。その中でどうやっていくか、議論を続けるための環境づくりをよく考える必要がある。そういうものがないと、なかなか進められないと思う。

たとえば、欧州やキリスト教の歴史、イスラムが引き継ぎ記録に残し、それによって文明が引き継がれた。家族制度でいうと中国や朝鮮は父系家族集団で全部たどれる。韓国は本貫というものが残っていて、自分の先祖を全部たどれる。おそらく市民レベルで長く持つものに対する欲望や欲求は強いのではないかと思う。そういうところも調べてみたい。CRDSとしてどうするか考えたい。

(CRDS)：今日の議論の非常に重要な点は、やはり文化としての長期保存だと思う。文化には、コストをかけなければいけないもの、つまり高くても残さなければいけない部分と、一般の市民が残したいというもの、それはコストが安くなければいけないものがある。これらは違うと思う。文化として残さなければいけない、国家として残さなければいけないものに関しては、国のレベルでやらなければ駄目だと思う。税金を払っている国民の理解を求めなければいけないにしても、国家レベルで多少金がかかっても、たとえば先日の大震災、それから防衛も同じような意味で非常に重要なことである。

コストの問題で、安くして多くの人が使うこととは分けて考えたほうが良いと思う。それを一緒にしてしまうと中途半端になってしまうと思う。将来的には皆に使えるとしても、最初は多少コストがかかっても国として大切なものをぜひ残してほしい。

(JST CREST)：今、国として残すべきという話が有ったが、人類の歴史をみると、文化遺産を次の世代に渡し、それをまた後世に伝えるという流れがある。その中で、デジタルという非常に便利なものができたために、今までのやり方を、便利さを追求するが故に、消滅させてきた。今、技術の進歩によって、非常に危うい状況になっている。技術者、企業人、国のあらゆる立場の人は、人類として伝えるべきものを後世に伝える手段を構築する努力をすることが重要だと思う。たとえば色、色彩ひとつを取ってもきちっと継承することが、非常に難しい。

今回の議論が、国の流れ、そして人類に向けて貢献し、世界に貢献するということをベースに進められればありがたいと思う。

(CRDS)：いかに儲かるかということに対する回答も用意しておかないといけない。多面的に考えていいと思う。たとえば企業活動につなげる意味で、いろいろなやり方があると思う。先ほども申したが、宗教が自分の生活の中に生きている人たちの考え方とわれわれとは、おそらく違うと思う。多面的に調査してみる必要があると思う。

・私は主業務の出版とは別に、文化財のデジタルアーカイブをやっている。文化財をデジタル化して後世に残す。あるいは文化財をわかりやすくコンテンツにして価値を広く喧伝するといったことをやっている。いま言われたように、正しい色をどう伝えていくかは、まさに今研究しているところである。

「文化財は残していかなければいけない」と言うと、反対されないが、そのことにお金をいくら出すかということ、非常に難しい問題である。文化財をデジタル化し、デジタルコンテンツにするところには比較的資金が集まるが、残すということに関しては、非常にビジネスがしにくい。今までは1000年も2000年も紙や石で情報が残ってきたために、デジタルというのは、意志をもって残さなければ残っていかないということに、まだ社会的認識がない。そこを強くやっていく必要があると思う。超長期保管メモリの開発に非常に期待している。

(CRDS)：文化と国家的に非常に重要なものは残さなければならない。一方では、もうデジタル化は避けられない。映画界も先ほど指摘されたように、90%以上のコンテンツがデジタル化されている。可急的速やかにやらなければいけない部分は、多少コストがかかってもやらなければいけない。

そのために、いろいろな技術を、今は半導体の技術で行けるという話であったが、先ほどの処理系の技術も十分ではないという話、まだデジタルの処理のやり方を数学を駆使して改善するなどのもう少し基礎的な部分について、関係する方々にまた集まっていただいて、もう一度議論するような機会を設けて、もっと広くやっていかなければいけないということを痛感した。

また、こういうことはJSTだからできたと言っていたのは大変嬉しいことで、実際なかなかこういう場を提供したとしても、人々に来ていただけないのだが、JSTという名前で来ていただけることは大変嬉しいことだと思う。

われわれは、報告書を作り、提言をする。それをさらに発展させて、公的投資に持っていくために、いろいろな皆さんの知恵を拝借しなければいけないと思う。今日は本当にありがとうございました。引き続きよろしく申し上げます。

## 付録

### 付録 1. 開催概要・プログラム

#### 開催概要

科学技術未来戦略ワークショップ「超長期保存メモリ・システムの開発」  
開催日時：2012年11月16日（金）  
会場：JST 東京本部別館 4階 F 会議室

#### プログラム

（敬称略）

12:45-12:50	主催者挨拶	田中 一宜（JST CRDS）
12:50-13:00	趣旨説明 ビッグデータ時代の新規メモリ・システム開発	河村 誠一郎（JST CRDS）
セッション 1 基調講演		
13:00-13:35	デジタルデータの長期保管における課題と戦略	石原 直（東京大学）
セッション 2 WSの課題と論点		
13:35-13:50	WSの課題と論点	小林 敏夫（神奈川大学）
セッション 3 超長期保存メモリの必要性と社会・経済的効果		
13:50-14:10	国立国会図書館の電子情報と長期保存における課題	池田 功一（国立国会図書館）
14:10-14:30	映像デジタルデータの長期保存	山本 雅弘（NHK）
14:30-14:45	超長期保存メモリ・システムの社会・経済的効果	江連 三香（三菱総合研究所）
セッション 4 超長期保存メモリの技術的課題と開発推進方法		
15:00-15:25	半導体デジタルロゼッタストーンの発表から学んだこと	黒田 忠広（慶應義塾大学）
15:25-15:50	ロバストな半導体アーカイブの要件	岡上 拓己（ソニー）
15:50-16:15	MONOSの長期信頼性について（計算科学からの考察）	白石 賢二（筑波大学）
16:15-16:40	意味理解の保障に向けて	小林 敏夫（神奈川大学）
セッション 5 全体討論		
16:40-17:30	司会：小林 敏夫	

## 付録 2. 参加者一覧

### 招聘識者

(敬称略、WS 開催時点)

氏名	所属・役職
小林 敏夫 (コーディネータ)	神奈川大学理学部情報科学科 非常勤講師
石原 直	東京大学大学院工学系研究科 教授
池田 功一	国立国会図書館 関西館 電子図書館課 研究企画係長
江連 三香	(株)三菱総合研究所 情報通信政策研究本部 クラウドセキュリティグループ 主任研究員/JST 研究開発戦略センター 特任フェロー
岡上 拓己	ソニー(株) デバイスソリューション事業本部 ストレージメディア事業部 メモリーシステム技術部 シニアテクニカルIPマネジャー
黒田 忠広	慶應義塾大学理工学部電子工学科 教授
白石 賢二	筑波大学大学院数理物質研究科 教授
山本 雅弘	NHK 知財展開センター アーカイブス部 副部長

### 参加者

山崎 剛生	内閣府総合科学技術会議事務局 ナノテクノロジー・材料担当 上席政策調査員
山田 直史	文部科学省研究振興局情報課 行政調査員
大見 俊一郎	東京工業大学大学院総合理工学研究科 物理電子システム創造専攻 准教授
大脇 幸人	(株)東芝 半導体研究開発センター メモリシステム開発部 部長
金子 晋丈	慶応義塾大学理工学部 情報工学科 専任講師
工藤 真	(株)日立製作所中央研究所 先端ストレージ研究部 部長
斎藤 英雄	慶応義塾大学理工学部 情報工学科 教授
竹村 誠洋	(独)物質・材料研究機構 調査分析室 室長
田中 重幸	(株)角川書店 映像事業局 映像コンテンツ部 映像著作権・音楽・原版管理課
柄折 早敏	ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局次長
中山 香一郎	凸版印刷(株)文化事業推進本部 デジタル文化財開発部 2T 課長
藤原 一郎	ソニー(株)ADPF STDD デバイス技術部
三橋 慶喜	NPO アーカイブディスクテストセンター 理事長
宮下 英一	NHK 放送技術研究所 撮像・記録デバイス研究部 主任研究員
茂原 暢	財団法人 渋沢栄一記念財団 専門司書
山田 仁美	財団法人 渋沢栄一記念財団 専門司書

## JST

秋山 俊恭	独立行政法人科学技術振興機構	産学基礎基盤推進部 主任調査員
石正 茂	独立行政法人科学技術振興機構	戦略研究推進部 部長
古川 雅士	独立行政法人科学技術振興機構	戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ 調査役
星 潤一	独立行政法人科学技術振興機構	産学基礎基盤推進部 調査役
村山 浩	独立行政法人科学技術振興機構	CREST「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」領域参事

## JST CRDS

田中 一宜 (オガナ伊)	独立行政法人科学技術振興機構	研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット 上席フェロー
石原 聡	独立行政法人科学技術振興機構	研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー
河村 誠一郎	独立行政法人科学技術振興機構	研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー・エキスパート
佐藤 勝昭	独立行政法人科学技術振興機構	研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー / JST さきがけ「次世代デバイス」領域 研究総括
鈴木 慶二	独立行政法人科学技術振興機構	研究開発戦略センター 電子情報通信ユニット フェロー
永野 智己	独立行政法人科学技術振興機構	研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
馬場 寿夫	独立行政法人科学技術振興機構	研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
宮下 永	独立行政法人科学技術振興機構	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット兼ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー

## ■ワークショップ企画メンバー■

田中 一宜	上席フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
河村 誠一郎	フェロー・エキスパート	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
佐藤 勝昭	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
鈴木 慶二	フェロー	(電子情報通信ユニット)
永野 智己	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
馬場 寿夫	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
江連 三香	特任フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2012-WR-07

### 科学技術未来戦略ワークショップ

## 「超長期保存メモリ・システムの開発」

平成 24 年 11 月 16 日 (金) 開催

平成 25 年 2 月 February 2013

独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料  
ユニット

Nanotechnology/Materials Unit, Center for Research and Development Strategy  
Japan Science and Technology Agency

---

〒 102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地

電 話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

© 2013 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to [crds@jst.go.jp](mailto:crds@jst.go.jp). Any quotations must be appropriately acknowledged.

---