

CRDS-FY2012-SP-07

戦略プロポーザル

# 「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」

STRATEGIC PROPOSAL

Development of a Novel Storage System for  
Stable, Long-Term Preservation of Digital Data



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

研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立つて行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする独立行政法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDSは、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。

「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください。

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

## エグゼクティブサマリー

本提言「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」は、今後の情報爆発時代に急激に増加すると予想されるデジタルデータを長期間安定に保存し、かつ読み出しと意味理解を保障（※）する「新規メモリ・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、情報処理を行う技術開発に集中しており、情報を長期的に保存する技術に対する認識は不十分である。その結果、データの保存期間は10年程度しか保証されておらず、歴史、文化、科学情報など後世に残す事に意味のある情報の継承が危ぶまれている。本提言では、この状況に対処すべく、信頼性の高い超長期保存メモリ・システムを開発するための重要研究開発課題とその推進方法を提案する。保存期間の目標としては、まず、100年程度をターゲットとし、その実用化を踏まえて、次のステップとして、500年から1000年程度を目標とする。

超長期保存メモリ・システムに要求される機能や性能を実現するためには、最上位層の商品ビジネス系（アプリ、応用ソフト）から情報系（標準化、基本ソフト）、システム系、回路・設計、デバイス、製造プロセス、そして下位層の材料まで、技術階層毎の研究開発課題を全て解決する必要がある。これらの解決に向けては、それぞれの技術階層内だけでなく、技術階層間で連携・協力し整合の取れた形で研究開発を進めていく必要がある。

具体的な課題としては、商品ビジネスでは、普及のための条件、開発戦略の検討、ビジネスモデルなどであり、情報系としては、チップ内に書き込まれるメタデータのスキーム、フォーマットの永続性の保障、ファイルシステムの検討およびこれらの標準化へ向けての検討などである。これらの課題は、読み出しと意味理解の保障のために重要である。システム系・回路・設計に関しては、アダプタ概念の導入、改ざん防止技術の開発などであり、製造プロセス・デバイス系に関しては、チップ全体としての信頼性保証技術、超長期保存メモリに適したプロセス技術の開発、パッケージ技術の開発などである。材料系については、腐食しない配線材料と腐食しないパッド材料の開発が、腐食メカニズムの解明と共に挙げられる。

現在、デジタルデータを長期保存するには、定期的にデータをシステムごと移行する方法（マイグレーション）が行われているが、今後、データの急増に伴いマイグレーションを含めた保存費用が膨大になり、将来はマイグレーションを続けることが困難になる可能性がある。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、究極的には必須になると考えられる。本提案はこの困難を解決するためのものである。また、本提案が実現すると、将来の経済効果として、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して（ボーン・デジタルのコンテンツ量の数%程度）、20～30兆円の市場規模が見込まれる。

研究開発の推進方法に関しては、この分野（テーマ）の重要性の認識が必ずしも共有化されていない現状に鑑み、まずは、技術関係のみならず社会・文化さらにビジネスなど様々な分野の有識者を集めて研究会などを開催し、この分野のコミュニティを広げることが重要と考える。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、国際標準化や世界市場を視野に入れてしかるべき施策をできるだけ早い時期に開始することが適当である。

※意味理解の保障：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。データの構造などをメタデータとして与え、データの解釈が出来るようにすることをいう。

## Executive Summary

As we move further into the era of information explosion, the amount of digital data being created and stored is expected to skyrocket. This proposal, entitled “Development of a Novel Storage System for Stable, Long-Term Preservation of Digital Data”, discusses the development of a new storage system that not only preserves digital data stably over a long period, but also guarantees accessibility and comprehension of the stored data. Target term of the first stage is 100 years, and that of the second stage may be 500 - 1000 years, based on the achievement of the first stage.

Efforts to develop electronic technologies to support today's digital information infrastructure are concentrated in the development of information processing technologies, and little attention has been paid to the need to develop information preservation technologies. For this reason, a significant gap exists between information processing technologies and information preservation technologies, a gap that could disrupt continuity in human society. Arguing that the development of a reliable, ultra-long-term storage system is necessary to reduce this gap and avoid relevant potential risks, this proposal discusses important development-related issues and suggests measures to promote such development.

In order to realize the functions and performance required for a ultra-long-term storage system, it is necessary to solve all of the R&D issues associated with different technical layers, which include a product business (application software) and an information system (standardization and an operating system) in the uppermost layer; the hardware system; circuits and design; devices; production processes; and materials in the bottom layer. Solving such issues requires R&D efforts that ensure cooperation and consistency not only within each technical layer, but also between the different layers.

Concrete issues associated with developing the product business include identifying the conditions for widespread adoption, examining the development strategies to be adopted, and exploring which business model should be followed. The issues associated with developing the information system include creating the scheme for metadata written on the chip, guaranteeing the permanence of the data formats to be used, examining the file systems to be used, and investigating the possibility of standardizing these aspects. All these issues are important for guaranteeing readability and comprehension of the stored data. Furthermore, issues related to the storage system and the circuit system include introducing the concept of adapters and developing technologies to prevent data tampering, while the issues related to processing and device systems include determining which technologies can guarantee

the reliability of a chip as a whole, developing processing technologies suitable for ultra-long-term storage, and developing package technologies. Lastly, issues regarding the materials to be used include developing non-degradable materials for wires and pads and understanding material degradation mechanisms.

Today, migration of data as well as migration of entire systems is conducted regularly for the long-term preservation of digital data. However, it is possible that the costs of data preservation, including the costs of data migration, will rise significantly, and that continuing data migration activities will be difficult in the future. Against this background, migration-free, maintenance-free data preservation will ultimately be essential. The purpose of this proposal is to solve the problems associated with data preservation. If the recommendations presented in this proposal are realized, the size of the market for the new storage system is expected to range from 20 to 30 trillion yen given the market size for current optical disk drives which have similar use (equivalent to several percent of the amount of “digital-born” content created and stored).

With regard to the promotion of R&D, since the importance of this field is not necessarily commonly recognized at present, it will be important to, firstly, expand the community of people associated with this field. This can be achieved by gathering together not only engineers but also experts in various fields like social science, culture, and business models and by organizing research seminars and other types of meetings. Subsequently, a national strategy should be created based on the common ideas developed by the participants in this field, and appropriate projects that take globalization into account should be launched as soon as possible.

## 目 次

エグゼクティブサマリー

### Executive Summary

1. 研究開発の内容 .....	1
2. 研究開発を実施する意義 .....	5
2-1. 現状認識および問題点 .....	5
2-2. 社会・経済的効果 .....	6
2-3. 科学技術上の効果 .....	10
3. 具体的な研究開発課題 .....	14
4. 研究開発の推進方法および時間軸 .....	20
付録 1. 検討の経緯 .....	24
付録 2. 国内外の状況 .....	27
付録 3. 専門用語説明 .....	32

## 1. 研究開発の内容

本提案は、今後の情報爆発時代に急激に増加すると予想されるデジタルデータの長期安定保存のための、「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、情報処理を行う技術開発に集中しており、情報を長期的に保存する技術に対する認識は不十分である。その結果、データの保存期間は10年程度しか保証されておらず、歴史、文化、科学情報など後世に残す事に意味のある情報の継承が危ぶまれている。本提言では、この状況に対処すべく、信頼性の高い超長期保存メモリ・システムを開発するための重要研究開発課題とその推進方法を提案する。

保存期間の目標としては、まず、100年程度をターゲットとし、その実用化を踏まえて、次のステップとして、500年から1000年程度を目標とする。

超長期保存メモリ・システムに要求される機能や性能を実現するためには、以下の図に示すような技術階層毎の研究開発課題を全て解決する必要がある。これらの解決に向けては、それぞれの技術階層内だけでなく、技術階層間で連携・協力し整合の取れた形で研究開発を進めていく必要がある。技術階層としては、商品・ビジネス系（アプリ、応用ソフト）、情報系（標準化、基本ソフト）、システム系、回路・設計、デバイス、製造プロセス、材料がある。



図 1-1 超長期保存メモリ・システム開発における技術階層構造と課題

まず材料系に関する研究開発課題としては、長期間安定な2つの状態を持つメモリ材料の開発である。使用する材料は長期的に安定であり、かつ2値のデータ記憶に対応する二つの物理的・化学的な状態が超長期間に亘って、ほとんど変化しないような材料が求められる。また、超長期の信頼性の確保や読み出しを保障するためには、記憶部以外の基板や配線・電極なども長期的に劣化しないことが重要である。しかし、耐久性・信頼性を100年以上継続して調べることは事実上困難であるため、使用する材料の腐食や劣化のメカニズムを多様な視点で科学的に解明し、その対策を講じられるようにすることが重要である。

デバイス・製造プロセスの課題は、高密度・高集積化可能なデバイス・媒体技術の開発、高信頼性プロセス技術の開発、高耐久性パッケージ技術の開発、超長期保存メモリ全体としての信頼性保証技術の開発などが考えられる。大容量のデジタルデータを長期に保存する必要性から、超長期保存メモリデバイスとしては、これまでとは桁違いの高密度化・高集積化が必要であり、このポテンシャルを有する材料、メモリ構造、メモリアレイ構造、新原理メモリなどの研究開発を進めることが重要である。超長期保存メモリの製造プロセスにおける品質管理も長期保存への対応が非常に重要である。機械的な衝撃や温度変化から超長期保存メモリを守るとともに、環境中の腐食性ガスと物質、劣化を引き起こす光線などの侵入を防ぎ、メモリデバイス・材料を長期的に保護しデジタルデータの保存を確実なものにするパッケージの開発も重要である。信頼性保証に関しては、100年以上のメモリ動作を保証するための考え方の確立と、その関連技術開発が重要である。

回路・設計技術関連の課題としては、高速・低消費電力な書き込み／読み出し回路の開発、改ざんの防止技術の開発などがある。大容量のデータを微小な領域に高速に書込んだり読み出したりすることが必要なため、安定した書き込み／読み出しを実現するためには、メモリセル間の干渉を抑制することや、高感度のセンス回路の開発が必要である。保存した機密情報などのデータに対して、第三者が内容を容易に解析したり改ざんしたりできないように、回路的に保護しておく必要がある。書き換え可能なメモリの場合には超長期保存メモリの特性に適合する形で、改ざん防止の回路を開発し組み込む必要がある。

システム関連の課題としては、一般的なデータ保存メモリとの互換・共存技術の開発、オンラインアクセス可能な超長期保存メモリを前提としたファイルシステムの構築が重要となる。書き込み／読み出しデバイスを長期的に安定して安価に供給するためには、超長期保存メモリアダプタと外部システムとのインターフェースと、保障が10年程度の一般的なメモリの外部システムとのインターフェースの互換性、共通化が重要である。超長期保存メモリに保存されるデータは頻繁にはアクセスが無いものの、必要となったときには迅速にデータを読み出せることが重要である。このためには、超長期保存メモリへの常時の電源供給は無くても、オンラインアクセスが可能なファイルシステムを構築しておく必要があり、メモリデバイス・媒体の特性に合わせてシステムレベルでのエネルギー消費を最小にし、アクセス遅延の少ないファイルシステムを構築する必要がある。

情報系（標準化の推進）に関する課題としては、超長期保存メモリに書き込まれるメタ

データのスキームの確立や、超長期保存データ部分のフォーマットの永続性の保障、ディペンダビリティや持続性を考慮した情報の長期保存の標準化などが重要になる。保存したデータの読み出しと意味理解を保障するためには、超長期保存メモリにどのようなデータがどのような形（フォーマット）で書き込まれているかなど、意味あるデータとして読み取るための基本的な情報（メタデータ）について、事前に決めておく必要がある。実際にデータを保存したときのフォーマットが後年になって通常的に使われているかどうか不明なため、このフォーマットのデータの読み取りを永続的に保障するか、あるいはフォーマットを認識してエミュレーション機能（もとのソフトウェアからの命令を新たなプラットフォームで実行するための技術）によりデータを復元して読み出せるようにしておくことが重要である。情報の階層構成のどこから超長期保存データとするのかについても、国際標準としてあらかじめ決めておくことが重要である。

商品・ビジネス系の研究開発課題は、企業内における具体的な製品開発・ビジネスモデル策定が中心になる。

デジタルデータの長期保存については、強いニーズを持つ国会図書館、放送業界、出版・印刷業界などが個別に取り組みを行っているのが現状である。長期保存のニーズは、潜在的には行政組織、企業、医療機関、個人レベルまで幅広く存在すると考えられるが、100年、1000年という超長期間は、企業の通常の存続期間を超えるため、当初は国が積極的に関与すべきと考える。コラム1にあるように超長期においては我々の文化自体が大きく変容している可能性もあり、長期に亘って意味理解まで含めた情報の保存を実現するためには、言語学、記号論、文化人類学など人文社会系の研究者も含めた幅広い視点からの議論が必要となる。また、この分野（テーマ）の重要性の認識が必ずしも共通になっていない現状を鑑み、まずは、技術関係のみならず社会・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、この分野のコミュニティを広げることが重要である。このプロセスを経て、関係者の共通認識を醸成した上で、文部科学省や内閣府、経済産業省などを中心として、国としての戦略を構築し、グローバル化の観点も考慮した、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考えられる。デジタルデータ長期保存は、世界的に重要な課題であり、世界的な規模で市場化されることにより、大きな経済効果と安定した長期保存の環境構築が期待される。この点からみて、当初から世界市場、標準化を目指した研究開発の推進が必要であり、ICTの国際戦略を担う総務省が研究開発の当初から関与することが望ましい。

## コラム 1

### 「ファイストスの円盤とロゼッタストーンの教訓」

ファイストスの円盤は、紀元前 1600 年以前に作られた厚さ 2.1 cm、直径 16 cm の粘土製の円盤で、裏表に「絵文字」が螺旋状に記されている。両面を通じて 45 種類の「文字」が使われ、全部で 241 の文字が使われている。20 世紀の初頭に発見され、多くの人が解読を試みたが、同じ文字が記された粘土版が他に見つからないことなどのために未だに読み解くことができていない。「文字」自身は 3000 年もの長期保存に耐えたのに、「意味理解」の方法が伝わっていないため、情報が伝わらない例とされる。

これに対して、ロゼッタストーンは、紀元前 196 年にメンフィスで出された勅令が石に刻まれた碑文であるが、古代エジプト語のヒエログリフとデモティックとギリシア文字の 3 つの文字で記述されており、ギリシア文字は現代でも使われている文字だったおかげで、「意味理解」の方法が継承され、1822 年にシャンポリオンによって完全に解読された。

これら 2 つの考古学的遺物の物語から読み取れることは、1000 年の長期保存に耐えるメモリが技術的に出来たとしても、「意味理解」の方法まで伝承されないかぎり、無意味だと言うことである。

## 2. 研究開発を実施する意義

### 2-1. 現状認識および問題点

#### 2-1-1 電子データ量の急速な増加

2012年に全世界で作成・複製されるデータ量は2.8ゼタバイトであり、2020年までに40ゼタバイトに達すると予測されている（IDC Digital Universe Study、2012年12月）。これは世界の全人口が1人あたり約5,247ギガバイトのデータを保有する量に相当し、データ量増大のペースは、製造されるストレージ容量の増加ペースを上回っている。現在、情報技術の発達により、膨大な量のデータが生成されており、蓄積・分析することで新たな価値を創出できる可能性を持ったデータも含まれていると考えられるが、データ保存にはコストを要するため、多くのデータが消失しているのが現実である。そして、近い将来、保存の必要なデータ量がストレージ容量を上回ることは確実と言える。

また現在の通常の光ディスクや磁気ディスクなどのストレージデバイスも、寿命は20年程度しか保証されていない。これは、データ保持機能の劣化が環境の影響および経時変化で進行することなどによって、初期のデジタル情報が欠損あるいは消失することによる。

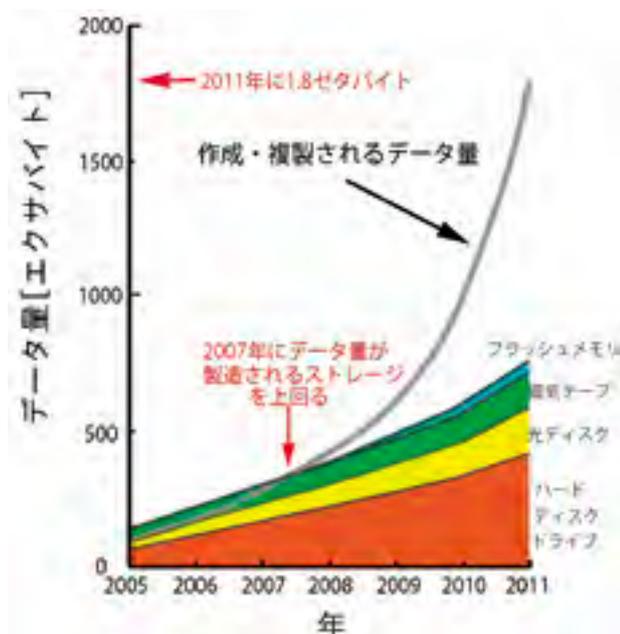


図 2-1 今日起こっている情報爆発 (Data Explosion) (IDC、2008 White Paper を基に作成)

#### 2-1-2 電子データの長期保存に伴う課題

現在、組織におけるデジタルデータの保存戦略はマイグレーションのみであるが、マイグレーションはコスト負担が大きく、また作業ミス等によるデータ消失リスクも大きい(コラム3参照)。今後、情報爆発の進行により、マイグレーション戦略はますます困難になると考えられ、データの長期保存には、マイグレーションやメンテナンスを効率的に進め、かつ保存のコストが小さい戦略が必要である。それを実現するのが超長期保存メモリ・システムである。

現在の仕組みの下では、保存されたデータを数百年・千年後に読み取るためには、保存

した時代のハードとソフトの双方が維持されていなければならない。しかし今のように、ハード・ソフトのシステム寿命が十年程度で、保存に対する考慮無しにシステムが変わっていく状況では、双方を維持することは不可能と言わざるをえない。保存されたデータを数百年・千年後に読み取るには、超長期保存を可能とし、その保存したデータを確実に読み出すことを可能とする新たな仕組みが必要である。

また、紙の時代とは比較できない大量かつ多様な情報をこれまでの分類体系に合わせることも困難になりつつある。デジタルデータの保存のためのメタデータとその付与手続き、すなわち保存処理のための参照モデルの検討が急務である。

## 2-2. 社会・経済的効果

本プロポーザルの実施によって将来、以下の社会・経済的効果が得られることが期待される。

- (1) 政府・自治体や文化・科学分野等における人類の知見の蓄積・継承と発展に資する社会的効果
- (2) ICT サービス等新規市場・産業創出による経済的効果

### 2-2-(1) 政府・自治体や文化・科学分野等における人類の知見の蓄積・継承と発展に資する社会的効果

#### データ長期保存の意義

超長期に渡るデータの保存とその読み出しを小さいコストで行うことができ、さらにいつの時代においても意味の理解を可能とする機能を持つ超長期保存メモリ・システムの実現により、長期の保存が必要な公文書や医療機関等におけるカルテ等の保存の信頼性の向上と保存コストの低減を同時に実現することが出来る。米国ではHIPAA（The Health Insurance Portability and Accountability Act：医療保険の相互運用性と説明責任に関する法律）によって患者の診療データを診断以降、その患者の死後2年間保存しなければならないと定められている。大病院では数ペタバイトものデータを保存しており、コストと信頼性が問題となっている。仮に日本でそのような法制度による義務付けが発生すると、超長期保存メモリ・システムに対するニーズが一気に拡大すると予想される。

さらに広くボーン・デジタル（最初からデジタル形態で作成される情報）のコンテンツの飛躍的な増加が今後も続くことが予想されることから、超長期保存メモリ・システムの市場の拡大が続くと考えられ、産業的にも極めて有望な市場であると考えられる。

また、低コストかつ高信頼な超長期保存メモリ・システムの実現は、経済的な恩恵だけでなく、人類の歴史・文化資産、科学的知識の継承にも大きな恩恵をもたらす。現在、大学などで保管されている文化的、科学的には価値があると認知されながら、短期的には経済的価値を生み出すことが難しい情報やデータは、保存のコスト、メンテナンスのコストを負担することができず消失の危機に瀕している。戦争や自然災害等の貴重な人類の経験や、地域独自の伝統芸能や少数民族に伝わる文化等は、後世にまで残し、伝承することが必要であるが、このような情報を何千年も長期に渡って保管する仕組みは存在しない。自然科学や歴史・文化的に価値あるデータを長期に保存し活用することができれば、人類の知的蓄積を後世に活かし、さらにそこから新たな価値を生み出す可能性があり、より豊か

な人類社会の実現に資すると考えられる。

例えば、今後、低コストで大量のデータ保存が必要となる科学技術の分野として宇宙・天文分野がある。今後全世界で生成される天文データは年間 200 ペタバイト以上という推計があるが、天文データはその性質上、長期間保存される必要があるだろう。同様の性格のデータを持つ分野として地球・海洋科学分野がある。今回の東日本大震災で認識されたように地質学や土壌科学の情報は、千年単位で継承、蓄積されるべきものである。

人類の科学・文明の発展とは情報の蓄積と活用の結果であり、これまでの長い歴史における人類のあくなき探究心が現在の文明社会を形成しているとも言える。今後、日本という国が成立するためには、これまでの日本の歴史を残し、未来にまで継承する必要がある。膨大なデータが生成・蓄積可能となった現在、今後の人類の持続的発展のためには、正にデータの長期保存は重要な課題である。

表 2-1 長期保存の対象となる想定分野と利用ニーズ

分野	主な機関	利用ニーズ
政府・自治体	公文書館、図書館 等 政府	公文書の保管（法律による義務付け） 統計データの保管
公共インフラ	防衛、航空	宇宙、航空管制データの保管
サイエンス	天文台 地球科学 防災 生命科学 高エネルギー・物理 化学 材料	天文データの保管 地質、海洋データの保管 地震、津波データの保管 遺伝子情報、放射線被ばくデータ等の保管 素粒子、物質構造等データの保管 物質データの保管 材料データベースの保管
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） 音楽関係の機関 電子書籍関係機関	映像の保管・活用 音源データの保管・活用 電子書籍データの保管・活用
医療	医療機関	カルテの長期保存（法律による義務付け） 医療費削減

## コラム2

### 「ザ・デジタル・ジレンマ」

#### —ハリウッドが突きつけたデジタルコンテンツ保存の問題—

ハリウッドの映画芸術科学アカデミーの科学技術評議会は2007年「ザ・デジタル・ジレンマ」という報告書を刊行した。この中で、ほとんどの映画がデジタル制作され、デジタル配信されるようになったにも関わらず、フィルムと同等の寿命特性をもつデジタルアーカイブ・マスターフォーマットあるいは処理方法が存在していないという結論を導き、その上で、「デジタル映画の制作物の保存は、フィルムの保存とは根本的に異なる」ことを受け止めるべきで、「映画産業はデジタルアーカイブのテクノロジーとソリューションについて統一見解を出すようにすべき」と業界の真剣な取り組みを促した。

また、医療・地球科学・政府・企業等も調査し、デジタルデータの保存に関して、どの組織体も同じような問題を抱えており、大規模で継続的な設備投資や運用経費を必要としない長期的な解決法をもっている組織体は皆無であるとして、今後の課題として(1)「デジタル保存の問題と潜在的なソリューションの研究」、(2)「マスタリング・アーカイブ用のファイルフォーマットの開発」、(3)「デジタル保存ケーススタディ用システムの開発」、(4)「ステークホルダ間の論議の促進」を提言している。

(慶応義塾大学デジタルメディア・コンテンツ総合研究機構の翻訳・制作した冊子にもとづく)

## コラム3

### 「火星探査機バイキングのデータが25年後に復元できない」

#### —デジタルデータ特有の保存上の課題—

1975年にNASAは、火星探査機バイキングを火星に送った。初期のデジタルデータは、磁気テープに記録され保管庫で保管されていた。その24年後の1999年、南カリフォルニア大学のJミラーがデータをチェックしようとしたところ、データを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。これをきっかけに、米国では開放型アーカイブ情報システム(OAIS)が提唱され、ISOの標準規格となっている。

## コラム4

### 「デジタルブラックホール」

#### —スウェーデン国立公文書館2006年報告書—

2006年のスウェーデン国立公文書館は報告書を発表し、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膨大な費用が必要で、資金計画のないデジタル化プロジェクトは、宇宙のブラックホールのように資金を飲み込んで、結局は破綻するという警告を発信している。

## 2-2-(2) ICT サービス等新規市場・産業創出による経済的効果

### 超長期保存メモリ・システム市場規模

超長期保存メモリ・システム市場規模の推計にあたり、現在の保存用途のディスク市場規模を参考とした（株式会社富士キメラ総研、2012 ストレージ関連市場総調査、2012年2月）。すなわち光ディスクドライブ市場、及びニアライン（常時運用と即時応答性を特徴とするオンラインと、必要時のみ利用するオフラインの中間形態）HDD（ハードディスクドライブ）市場・外付けHDDの半分以上が保管に利用されていることを前提として、少なくとも2011年の光ディスク市場約3兆円（ディスクドライブ2兆2千億円＋メディア8千億円強）＋HDD市場の1割（ニアラインHDD市場＋外付けHDD市場の5割＝64,250千台をHDD市場全体622,500千台の約1割と仮定）である3,400億円の合計3兆3,400億円程度は存在すると考えられる。特に、インターネットサービスプロバイダ、データセンター、企業ストレージシステムの記憶データが日々増加していることを踏まえ、省電力・低コストに運用するためのニアラインHDDの需要はより拡大すると想定されているため、実際の市場規模はさらに大きくなるだろう。

さらに、超長期保存メモリ・システムの普及には、ユーザの使い勝手と低コストが必要である。製品の価格低下により普及率が上がると想定される。さらに、超長期保存の価値が認められれば、破壊的イノベーションが起こり、普及が一気に進展する可能性がある。2012年現在、日本人は1人あたり、20GB～500GBのデータを保管しており、一生に生成するデータは10PBとも言われている。ライフログ型クラウドサービス利用希望者の約3割が自身のデータに関する「一生」または「永遠」の長期保存を希望しており（三菱総合研究所調査、2012年2月）、代表的なライフログ型クラウドサービスであるfacebook利用者（全世界で約10億人、2012年10月）の3割が、自身のデータに関して長期保存を利用したとすると、約3億人の潜在市場があると想定され、市場が一気に広がる可能性は大きい。

市場に普及するための超長期保存メモリ・システム価格を、現状のメモリ価格を鑑み16GB＝400円程度とし、保存のための媒体市場とその1～2倍のアダプタ（メモリと既存のシステムをつなぐシステム；光ディスクのドライブに相当）市場が存在する仮定すると、2020年40ゼタバイトのデジタルデータのうち長期保存の対象が1%の場合、その保存には媒体10兆円、アダプタを加え20～30兆円の市場規模が想定される。さらに、長期保存の対象が5%と仮定すると、媒体で50兆円、アダプタを加え100～150兆円の市場規模が想定される。

このように、超長期保存メモリ・システムの実現により、数十兆円規模の大きな市場創出効果があると想定される。

### 日本における経済的効果

超長期保存メモリ・システムの開発においては、アプリケーションソフト、基本ソフト、システム、回路・設計、デバイス、製造プロセス、材料等、電子技術の様々な階層が連携する必要がある。それぞれの階層における研究が進展することで、関連製品・サービスへの波及効果による経済効果が生まれることが期待される。その中でも、特に、日本が強みを発揮し、世界で競争力を発揮できる可能性のある分野は、従来から強みのある情報記録媒体に関わる材料・デバイス製造技術の開発であり、付加価値の高い技術を先行して開発

することで、市場形成をリードすることが可能となる。デバイス製造はいずれ低コスト化が進むことが想定されるが、そこで開発された技術によって既存の電子部品の高信頼化、新たな対環境デバイス開発など、付加価値の高い領域において競争力を発揮することが期待される。

また、意味理解を保障する仕組み・システムを構築するためには、記録媒体のインターフェース仕様、システムの基本構成、意味理解のための仕組みを実装するための参照モデルを作る必要がある。これらの課題を世界に先駆けて取り組むことにより、システムホルダーとなることを目指すことができる。基本的なインターフェース仕様、読み出しシステムの基本概念は公開し標準化を進めることで、本分野の普及を図ると共に、技術、ビジネスの主導権を握ることが可能となる。

### 周辺分野における経済的効果

超長期保存メモリ・システムは、科学・医療分野等、様々な分野において活用されるシステムであり、各々の分野に波及する経済効果を生み出す可能性がある。例えば、超長期保存とニアライン機能を両立することができれば、超長期保存データに対して、従来の死蔵に近いオフライン保存とは比較にならないアクセス性の良さを実現できる。このことによって、時間軸上のビッグデータが出現する。具体的な可能性として、生命科学分野において長期保存されたゲノム情報の画期的な解析結果が得られ、難病の治療薬開発に寄与した場合、治療薬の市場創出と国家医療費の削減という経済効果が得られることが想定される。

このように、日本が主導して超長期保存メモリ・システムの開発を実現することは、システムそのものの市場化による経済効果と、システムが活用される分野に波及する大きな経済効果を生み出す可能性を持っていると言える。

## 2-3. 科学技術上の効果

### 2-3-1 学術分野の発展

100年から1000年単位の期間を想定した超長期にわたる電子情報の記録は、現代の科学者および技術者が過去扱ってこなかった領域である。

しかし、上述のように将来にわたるデータ保存に十分な対策をしないままに情報爆発は進行し、社会・文化・産業の電子データが回復不可能な消失につながる懸念は確実に増大している。こうした状況には、今後学術界も関与し、将来の考え方や方向性を社会に先駆けて発信していく必要がある。その過程において、情報を電子的に長期保存するということの学術的な位置づけや考え方・意義が明らかになっていくものと考えられる。

過去の情報は歴史上、1000～2000年もの長期間にわたって紙や石に記録されるかたちで残ってきたために、消失の懸念に対しての備えは喫緊のものとして扱われることがなかった。しかしながら、電子情報というのは国や産業界が意志をもって残さなければ、確実に残すことが難しいものあり、そのことにまだ十分な社会的認識はできておらず、学術界としての認識も乏しい。従って、そもそも情報を電子的に記録し保管するということが、社会・産業の情報記録のなかでどのように位置づけられ、今後のありようがどうあるべきかについての議論を積み重ねることが必要である。過去、日本では電子情報通信学会にお

いて「超長期保管メモリ時限研究会（2010年-）」が設置され、これまでのエレクトロニクス技術が目をつけてこなかった情報の保存の問題についての検討がおこなわれてきたが、研究会は約2年間の活動期間を経て、本プロポーザル発行の時点は終息している。今後はより広く、応用物理学会等の関連する主要学会間を跨ぐような、発展的な活動が求められるだろう。また、例えば日本学術振興会に設置されている研究会等の場を通じて、産学の識者間で議論を積み重ね、将来へ向けて課題を共有するなどの取り組みが求められる。そのような活動には、記録媒体に関わる技術者だけでなく、情報処理、さらにシステム工学や、社会科学等異分野の研究者間での協同が求められ、将来にわたる電子情報の保存に関する考え方や方向性が見出されることが期待される。また、そもそも情報を電子的に残すということは産業界が主導してきたものであり、その脆弱性について、学术界は十分な観察・分析・認識をしてきたとは言えず、警鐘や助言・対策等を社会に対して伝えてこなかった。従って、こうした社会的課題に対して学术界が果たすべき役割は大きい。

### 2-3-2 技術の発展

現在のデジタル情報社会を支えている電子技術は、すなわち“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、記録の保存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かった。その理由は、デジタル技術は生まれてまだ半世紀程しか経っていないということにあると考えられる。しかし、その間に半導体を中心とする処理系の技術は大きな進歩を遂げ、現在では膨大なデータが生成される状況になっている。このため、“処理”と“保存”の技術体系のアンバランスが今では非常に大きくなり、生成された電子データの保存が危機にさらされるという状況になりつつある。本プロポーザルの実施により、処理系、保存系、情報系の各階層間で、技術の統合や融合化が促進すると考えられる。また、関連する様々な研究を再構築することによって、技術的にも他分野に波及し新たな技術領域の発展を促進する可能性があると考えられる。

そもそも、現在主流のマイグレーションは今後いつの時代まで持続可能であるかについて、技術を担ってきた産業界でも疑問や不安の声が出始めている。もちろんマイグレーションの技術的進歩によって、コスト効率が向上することも想定されるため、現実的にはマイグレーションが担う部分というものは必ず存在し続けるべきと考えられる。しかしながら、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宿命にある。さらにこれが障害やエラー等の何らかの理由で一度移管が途切れてしまうと、その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有している。一方で100年や1000年の保存が可能なメモリ、すなわち保存環境に左右されず、かつメンテナンスフリーのメモリが仮に実現できれば、エミュレーションという方法を非常に有効な保存戦略にしていくことができる可能性がある。デジタル情報の保存は、紙と異なり、それを見ただけでは意味を理解することができないという本質的な特徴を有している。そのためデータが残っているだけでは不十分であり、データの意味理解を保障するためのデータ、すなわちメタデータが必要である。しかしメタデータそのものの長期に渡る意味理解と物理的な保存については、やはり保障されていない。マイグレーションと併存するかたちでの理想的なエミュレーション戦略を成立させるためには、データが消失し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が出来、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ることができるということが条件となる。また、そのための仕組み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障と媒体の再利用の容易性（利便性）の確保が重要になると考えられる。

これらを考えた場合、長期に保存と意味理解を保障する超長期保存メモリ・システムを開発することが一つの解決策であり、システム・回路技術と情報系の全体戦略を統合していく必要がある。十分に考え抜いてシステム設計をしなければ、作ってはみたが50年を経ずして消え去ってしまうということになりかねない。開発の最初の段階でハードとソフトにまたがるシステムを深く練っておく必要があるだろう。

これまで半導体技術が急速な進歩と成長を遂げたのは、技術開発の側からでも見通せるだけの十分大きな市場が存在し、世界中でその市場のために大きな研究開発投資が行われたことが要因の一つである。一方で超長期メモリに関しては、技術開発投資と、その便益をすべて回収するまでの時間的な差が生じるものであるために、現時点においてまだそうした取り組みは難しい状況にある。したがって、市場と収益を見通しにくいという特徴から、産業界が主導して技術開発を始めることは難しく、国や社会の文化・産業界、場合によっては個人の電子情報を守るという観点から、また、各学術・工学分野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、先導的な研究開発を官・学がまず始めることが必要である。より多くの研究者が関与する領域やコミュニティを形成するところから始めなければならないだろう。物性、ナノテクノロジー、電子デバイス、ソフトウェアの各学問を越えて言語学、記号論、文化人類学、など人文社系の研究者の学際的な協力が必要であり、このような取り組みの先に、処理系、保存系、情報系の各階層間で、技術の統合や融合化が促進すると考えられる。

超長期の情報保存は、社会や個人が本来非常に高い関心と興味を持っている領域であり、様々な研究を再構築することによって、技術的にも他分野に波及し新たな発展を促進する可能性が十分にあると考えられる。

### 2-3-3 人材育成

以上のような長期の情報保管要請に対して、それに呼応する科学技術人材の育成が期待される。すなわち必要な人材は、情報学者、ソフトウェア・システム工学者、半導体等のハードに関する電気・電子工学者は当然のことながら、材料、プロセス、システムの全体をつなぐことのできる人材であり、個別の専門を越えて活動できるような人材である。現時点では、これらを実現するための人材は不足しているが、本提言の実施により、他分野・異分野における技術者の協力・協同が促進され、こうした人材が育成されるための場を提供することにもつながる。また、各専門分野では、課題を基礎科学・学問として考え直すことも必要であり、大学における研究や、高等教育の現場においてこれら課題に取り組むことで、社会の課題に積極的に関与することのできる人材が育成されることにつながる。

## コラム5

### 「メディアがあってもドライブがない」

1994年、Aさんは自宅に太陽電池パネルを設置し、発電データをPC98の5インチのフロッピーディスクに落としていた。データ処理は別のPC98 (Windows 3.1)で行い、MOディスク(128MB)に蓄積していた。最近、Aさんは必要があってフロッピーディスクを読もうとしたが、手元に5インチどころか3.5インチさえ読めるドライブがなかった。外付けGIGAMOのドライブで当時のMOディスクを入れたら、ちゃんと読めた。そのMOディスクドライブも最近ではほとんど見かけなくなった。20年前のデータですら、メディアが健在でもドライブがなくて読めなくなっている。

これに限ったことではない。NHKが1970年代に使っていた2インチのアナログ・ビデオテープ。2インチ用のアナログVTR装置は放送博物館にしかないがそれを使っても当時のテープを再生できなかったという話をNHKの人がしていた。もちろん、ベータもVHSもドライブを見かけない。音楽CDは例外的に長寿命だが、ネット配信されたソフトを携帯音楽プレイヤーやスマートフォンで聴く時代が来て、CDも時代遅れになりつつある。

40年前を振り返って見れば、たとえ、超長寿命のメディアができて、ドライブが100年後にあると考えない方がよいことがわかる。「意味理解」以前の問題である。

### 3. 具体的な研究開発課題

#### 3-1. 超長期保存メモリ・システムに要求される機能・性能

##### 3-1-1. ストレージのレイヤー構造

デジタルデータを100年、1000年といった単位で超長期に保存・保管する具体的なシステムについてはまだ十分な検討がなされていない。このため、超長期保存システムとしての基本的な構造（レイヤー構造）とそれぞれのレイヤーで要求される機能や性能を明確にし、図3-1-2に示すようなこのシステムに関わる材料、デバイス・プロセス、装置、システムなど各技術階層内での研究開発課題の推進、および技術階層間での情報共有・連携を密にする体制の構築が重要である。

図3-1-1に代表的なストレージ（磁気テープ、光ディスク、半導体メモリ）のレイヤー構造を示す。下から、データの保存を担う記憶素子や媒体およびこれを安全に保護し外部とのインターフェースを持つパッケージからなるメディア層、記憶素子や媒体への確実なデータの書き込みや読み出しが可能な書き込み／読み取り装置、データの論理的な意味理解を行うファイルシステムから構成されている。基本的には、将来にわたり物理的界面および論理的界面においてデジタル信号や情報の受け渡しができ、システム側で意味ある情報として読めることを担保しておく必要がある。要求される機能・性能については、メディア層、および書き込み／読み取り装置・システムのレベルでそれぞれ考えておく必要がある。

各技術階層毎の研究開発課題としては、記憶素子・媒体に関わる集積密度・メモリ容量、高速データアクセス、100年以上のデータ保持などに加え、電極・パッケージなど実装に関わるもの、信頼性の評価手法、将来にわたり保存データの確実な読み出しができる記録フォーマット・規格、書き込み／読み出し装置、意味理解を保障するシステム構成などについても検討しておく必要がある。

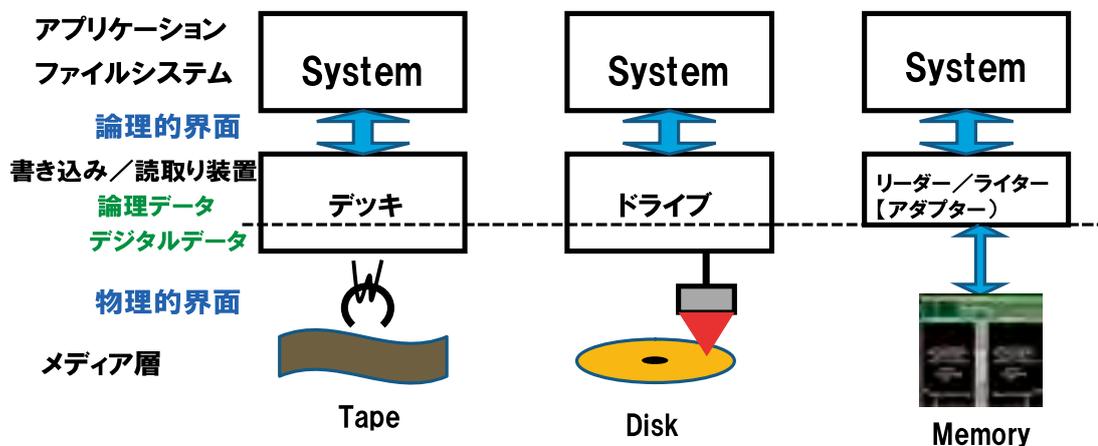


図3-1-1 代表的なストレージのレイヤー構造

### 3-1-2. メディア層への要求

デジタルデータの基本となる1ビットを記憶する素子や媒体は、そのものが通常の保存条件下で劣化せず長期間安定して存在し、原理的にエネルギーの供給無しで記憶された0と1の状態が長期間変化しないことが科学的に保障されている必要がある<sup>(\*)1</sup>。また、この2つの状態の違いを100年後(1000年後)でも検出できることが不可欠である。さらに、今後も増え続けるデータをできるだけ狭い空間に保存しておくために、ナノレベルやそれ以下のサイズで1ビットが記録でき、メモリの高密度化・大容量化への対応およびこれらのロードマップが描けることも重要である。一方、少なくとも1回の書き込みが可能であり、改ざん防止など必要に応じて書き換えを禁止できることも望まれる。また、高速なデータ保存・読み出しが可能で、消費電力が少なく、記憶素子・媒体の製造コストや運用コスト、総所有コスト(長期間安全に記憶素子や媒体を保管するための場所代や空調費用なども含めた所有しておくのに必要な全体の費用)が小さいことが求められる。

記憶素子・媒体とともに、その保護膜、半導体メモリの場合には書き込み/読取り装置(アダプタ)と接触する電極、およびこれらを納めるパッケージ等においても長期の安定性が求められる。記憶素子・媒体を機械的な衝撃や劣化を引き起こすガスなどから保護する保護膜には、組成、形状、密着性などその基本的な物性や機能性が長期的にも変化しない材料を用いることが必要である。また、パッケージも機械的な強度など特性劣化が無いことが必要である。電極や電気配線に使われる銅やアルミニウムなどの金属材料は酸化や腐食されやすく電気伝導度の低下や断線を招くため、これらの劣化への対策が必須である。

(\*)1 将来に亘って測定可能な2つの状態が超長期間維持できる物理原理が存在する。  
この物理原理を維持する実態としての構造体、物質(物性)が超長期間変化しないで壊れない。

### 3-1-3. 書き込み/読取り装置・システムへの要求

超長期保存メモリのパッケージとその内部が長期的に安定であることに加え、そこにデータを書き込んだり読み出したりする装置が正常に動作し、意味あるデータとして読み出せることが必要である。通常、これらの装置は世界標準の規格に則り、年々改良が加えられ、数年毎に書き込み/読み出しフォーマット規格の大幅な改定が行われるが、何らかの形で下位互換性を担保することが必要である。

超長期保存メモリ内に格納されているデジタル情報の多くは、アクセスされる頻度が少なくても、必要とされるときには迅速に読み出す必要がある。このため、必要とされるときには、直接あるいはネットワークを介してデータ処理システムに接続され、格納されているデータのインデックス情報(メタデータ)を高速に検索できるシステム構成が必須である。

これらの要求を実現するためには、書き込み/読取り装置やフォーマット、メタデータを世界標準化・規格化することが必要であり、記憶素子・媒体からパッケージ、書き込み/読取り装置・システムまでが一体となった研究開発と世界標準化の活動が不可欠である。

### 3-2. 技術階層毎の研究開発課題

超長期保存メモリ・システムに要求される機能や性能を実現するためには、図 3-2 に示すような技術階層毎の研究開発課題があり、これらの解決に向けてそれぞれの技術階層内だけでなく、技術階層間で連携・協力し整合の取れた形で研究開発を進めていく必要がある。技術階層としては、商品・ビジネス系（アプリソフト）、情報系（標準化、基本ソフト）、ファイルシステム、回路・設計、デバイス、製造プロセス、材料がある。商品・ビジネス系の研究開発課題は企業内における具体的な製品開発・ビジネスモデル策定が中心になるため、ここでは商品・ビジネス系を除くそれぞれの技術階層における研究開発課題を下位から上位へ向かって以下に示す。



図 3-2 超長期保存メモリシステムの開発における技術階層構造と必要な検討項目例(図 1-1 再掲)

#### 3-2-1. 材料系

- ・長期安定な 2 状態を持つ記憶部材料

記憶の機構（メカニズム）としては、これまでに不揮発メモリデバイス・材料として実用化や研究開発されてきたような、磁化の方向の違い [磁気テープ、ハードディスク、MRAM など]、電気分極方向の違い [FeRAM など]、光学特性の変化を伴う結晶状態の違い（多結晶とアモルファス） [書き換え型光ディスク、ブルーレイディスクなど]、電荷の蓄積状態と空の状態 [フラッシュメモリ、MONOS メモリなど]、（金属）配線の低抵抗状態（接続状態）と高抵抗状態（断線状態） [ROM など]、などがある。これらの記憶機構に対し、使用する素材自体が長期的に安定であり、2 値のデータ記憶に対応する二つの物理的・化学的な状態が 100 年以上にわたりほとんど変化しないような材料を作り出すことが不可欠である。また、記憶の原理・メカニズムを理解するとともに、揮発・劣化の要因を明確にしておくことが重要である。この中には、超長期のデータ保存を保障する信頼性の評価手法（加速試験の手法）の確立も含まれる。

- ・高信頼な基板、配線材料、電極材料等

超長期の信頼性の確保や読み出しを保障するためには、記憶部以外の基板や配線・電極

など補助的な部分も長期的に劣化しないことが重要である。例えば、一般的に無機の絶縁性（半導体）材料より劣化し易い有機材料を基板として用いる場合には、その保護膜を含めて長期的に劣化しない材料組成の開発が必要である。また、半導体チップの場合には配線やパッド・電極などの金属部分の電気伝道度の低下や断線・絶縁膜形成などを引き起こさないようにする必要がある。ストレスマイグレーション、エレクトロマイグレーション、腐食、などに強い金属材料の開発や、カーボンナノチューブやグラフェン、酸化物半導体など非金属の新規導電材料の開発が必要である。

- ・材料の腐食メカニズム／劣化メカニズムの解明・理解

超長期保存メモリに使われる材料は100年以上の耐久性・信頼性が必要であるが、耐久性・信頼性を100年以上継続して調べることは困難である。このため、使用する材料の腐食や劣化のメカニズムを多様な視点で科学的に解明し、その対策を講じられるようにすることが重要である。例えば、保護膜などに含まれる酸素や水分などによる金属配線の腐食については、金属の組成や欠陥と酸素濃度等との定量的な関係を知ることが重要であり、ナノレベルでの現象の理解が必要である。

### 3-2-2. デバイス・プロセス系

- ・高密度・高集積化可能なデバイス・媒体技術

大容量のデジタルデータを長期に保存する必要性から、超長期保存メモリデバイスとしては、これまでとは桁違いの高密度化・高集積化が必要であり、このポテンシャルを有する材料、メモリ構造、メモリアレイ構造、新原理のメモリなどの研究開発を進めることが重要である。また、高信頼プロセスも同時に検討を進める必要がある。さらには、なるべく安価に作るために、高価な微細加工技術に頼らず、多層化・多層構造に適するデバイス・媒体構造や、大面積基板利用のプロセス技術の開発の検討も重要である。

- ・高信頼プロセス技術

超長期保存メモリの作製プロセスにおける品質管理も長期保存への対応が非常に重要である。例えば、保護膜の成膜プロセス中における腐食性の残留ガスが取り込まれると、長期的に膜外にゆっくりと放出され、短期的には大丈夫であっても、メモリデバイスの腐食や特性劣化という長期信頼性を低下させる。このような残留ガスなどを含まない保護膜の成膜プロセス開発が必要である。また、メモリデバイスのプロセス中に結晶欠陥が導入されたり、異種材料の界面で機械的な歪が蓄積されたりすると、欠陥が広がったりはがれなど引き起こされ、長期信頼性を低下させる。このため、プロセスに起因する長期信頼性の低下の原因を科学的に理解・予測し、長期信頼性の高いプロセス技術を研究開発することが必要である。

- ・高耐久性パッケージ技術

機械的な衝撃や温度変化から超長期保存メモリを守るとともに、環境中の腐食性ガスと物質、劣化を引き起こす光線などの侵入を防ぎ、メモリデバイス・材料を長期的に保護しデジタルデータの保存を確実なものにするパッケージの開発も重要である。半導体のメモリであれば、書き込み／読取り装置と電源やデータのやり取りを行う電極パッドの耐磨耗

性・耐腐食性の確保が必要であり、超長期保存メモリの動作原理・特性を考慮したパッケージや電極パッドの材料・構造設計などの研究開発を行う必要がある。また、書き込み／読み出し装置間とパッケージの間で電源／データのやり取りを無線（電波）や光で行う非接触インターフェースについて検討する必要がある。信頼性に加えて、データ転送速度やエネルギー効率の視点も加えた検討を行っておくことが重要である。

- ・超長期保存メモリ全体としての信頼性保証技術

100年以上のメモリの動作を保証するための考え方の確立と、その関連技術開発を行うことが重要である。材料として100年以上安定であることに加え、メモリデバイスとしての書き込み／読み出しの繰り返し動作が100年後でも保証されることが必要である。保証するための考え方を検討し、メモリ全体に対して繰り返し動作が与える影響を科学的に明らかにし、超長期保存メモリ全体に対する加速試験などの信頼性評価手法を研究開発する必要がある。

### 3-2-3. 回路・設計技術系

- ・高速・低消費電力な書き込み／読み出し回路

大容量のデータを微小な領域に高速に書込んだり読み出したりすることが必要なため、安定した書き込み／読み出しを実現するためには、メモリセル間の干渉を抑制することや、高感度のセンス回路の開発が必要である。また、超長期保存メモリの場合には、超長期間保存後に材料の欠陥の影響が現れることによるビットエラーの発生や、読み出しを繰り返すことによるメモリセルの記憶状態に僅かな変化も長期的にはその影響が蓄積されてしまう可能性もあるので、このような変化の検出や修復の回路技術についても研究開発しておく必要である。

- ・改ざん等の防止技術

保存した機密情報などのデータに対して、第三者が内容を容易に解析したり改ざんしたりできないように、回路的に保護しておく必要がある。書き換え可能なメモリの場合には超長期保存メモリの特性に適合する形で、改ざん防止の回路を開発し組み込む必要がある。1回しか書き込めないメモリの場合には特に改ざん防止の必要は無いが、誤書き込みによるデータの破壊（非書き込みのセルが書き込まれることによるデータの破壊）に対しては同様に回路技術が必要である。また、半導体メモリの場合には、静電気破壊（ESD）が起きるとデータが書き換わったりすることもあり、ESDに対する対策も回路に組み込んでおく必要がある。

### 3-2-4. ファイルシステム

- ・一般的なデータ保存メモリとの互換・共存技術

書き込み／読み出し機器を長期的に安定して安価に供給するためには、超長期保存メモリアダプタと外部システムとのインターフェースと、保証が10年程度の一般的なメモリの外部システムとのインターフェースの互換性、共通化が重要である。これを実現するためには、データの書き込みや／読み出しに対して、一般的なデータ保存メモリと互換性を保つ方法や装置についての研究開発が必要である。

・オンラインアクセス可能な超長期保存メモリを前提としたファイルシステムの構築  
超長期保存メモリに保存されるデータは頻繁にはアクセスが無いものの、必要となったときには迅速にデータを読み出せることが重要である。このためには、超長期保存メモリへの常時の電源供給は無くても、オンラインアクセスが可能なファイルシステムを構築しておく必要があり、記憶のデバイス・媒体の特性に合わせてシステムレベルでのエネルギー消費を最小にし、アクセス遅延の少ないファイルシステムを開発する必要がある。また、保存するデータ量にあわせて多量のメモリデバイス・媒体を保管しておくことが予想されるため、これらをどのように配置・接続して保管するか、3次元レイアウトも含む最適なファイルシステムの構築が必要である。

### 3-2-5. 情報系 [標準化の推進]

・超長期保存メモリに書き込まれるメタデータのスキーム  
保存したデータの読み出しと意味理解を保障するためには、超長期保存メモリにどのようなデータがどのような形（フォーマット）で書き込まれているかなど、意味あるデータとして読み取るための基本的な情報（メタデータ）について、事前に決めておくことが重要である。また、このメタデータを物理的にどこにどのような形式で記録するかも決めておく必要がある。例えば、少なくともパッケージにメモリ媒体であることを示す記載は必要であるが、どこまでのメタデータをパッケージに記載しておくか、またどのような形式（言語、文字、記号、大きさなど）で記載するかも検討しておく必要がある。このような検討に際しては、文化の継続性が考えられる場合（100年程度）や、文化が大きく変わっている可能性がある場合（1000年程度）など、予想される社会の変化のレベルに分けて考えることも必要である。ここでは、技術の専門家だけでなく、言語学、記号学、文化人類学、社会学など人文社会系学者も含めた形での学際的な研究体制が重要になる。これらは重要な国際標準化の活動として位置づけて、国際協力の下に推進していく必要がある。

・超長期保存データ部分のフォーマットの永続性の保障  
実際にデータを保存したときのフォーマットが後年になって通常的に使われているかどうか不明なため、古いフォーマットも標準フォーマットとして永続的に残していくか、あるいは古いフォーマットを認識してエミュレーション機能によりデータを復元して読み出せるようにしておくことが重要である。従って、読み出し装置の国際標準化において古いフォーマットも読取り可能にする標準化活動、またはエミュレータの開発を継続していくことが必要である。

・Dependability、Sustainability を考慮した長期保存情報  
情報の階層構造の何処から超長期保存データとするのかについても、国際標準としてあらかじめ決めておくことが重要である。例えば、画像データの場合に、圧縮された画像のデジタルデータから復元するソフトまで含めて超長期保存するかどうか、取り決めをしておく必要がある。画像の圧縮方法や復元ソフトが国際標準化されていれば、将来もどこからか手に入れられる可能性が高く、データと一緒に保存しておく必要は無いが、そうでない場合にはこれらも一緒に保存しておく必要がある。

## 4. 研究開発の推進方法および時間軸

### 4-1.

長期保存技術に対しては、図書館、美術館、博物館、放送・映画・出版印刷業界、科学研究機関等が、そのコンテンツ資源を長期に亘り保存し、再利用することを目的として、強いニーズを持っており、現在は大きなコストをかけてマイグレーション戦略により、それを実現している。また、行政組織、企業、医療機関なども社会・事業の継続性を確保する観点から、100年を超える長期に亘って記録を保存するニーズを持っていると考えられる。さらに、写真や映像など個人が過去の思い出を長期に亘って残したいというようなニーズも幅広く存在している。

このようなニーズがあるにもかかわらず、100年を超えるような長期保存技術は未だに市場化されていないが、その理由として以下のようなものがある。

- ①長期保存についてニーズ側と技術側との意思疎通が充分になされていない
- ②長期保存のための技術体系が構築されていない
- ③媒体だけでなく周辺環境も含めた維持のあり方が明確になっていない
- ④長期間の保存に対する保証のありかたが明確になっていない

しかし、行政、様々な経済活動、科学研究等がデジタル情報に基づいて行われるという傾向は急速に強まっており、早急に長期保存戦略を見直し、それに整合した保存技術を担保することが求められる。以上を前提として研究開発の推進方法と時間軸を提案する。

#### 4-1-1. 研究開発の推進体制

まず、ニーズ側と技術側の意思疎通を進め、多様なアプリケーションに応用可能な技術仕様を決めていく必要がある。その際、媒体だけでなく周辺環境も含めた検討が重要であるため、材料からシステムまでの技術層に加えて、基本ソフトやアプリケーションソフトまでを含む層にまたがった



図 4-1 超長期保存メモリ・システム技術に対する認識の現状

共通認識を醸成することが必要である。さらに、1000年といった超長期においては、我々の文化自体が大きく変容している可能性もあり、そのような長期に亘って意味理解まで含めた情報の保存を実現するためには、言語学、記号論、文化人類学など人文社会系の研究者も含めた幅広い視点からの議論が必要となる。このように、長期保存技術の研究開発は必然的にマルチプレイヤーの体制となる。

また、技術体系の構築だけでは不十分であり、最終的には媒体や周辺環境が市場におい

て長期に亘る安定的な提供が見込まれることによって、利用者は長期保存技術を信頼して利用することが可能となる。このためには、媒体、アダプタなどの市場化がマルチプレーヤーのもとでなされ、さらにそれらの相互運用性が確保されている必要がある。さらに、長期保存に対する世界的なニーズを考えると世界標準、デファクトスタンダードを目指したものである必要がある。

このような観点から研究開発の推進にあたっては公的セクターの関与、企業に中立的な組織の積極的な関与が必要である。この考え方は、長期保存技術が人類や国家の文化を守るために必要であり、人類や国家の文化を守る上で公的セクターが重要な役割を負うべきであるという観点からも妥当である。

具体的には、ニーズ側と技術側、技術の階層構造における材料などの下位からアプリケーションソフトの上位までの間での意思疎通を行う場としては、企業に中立的であるとともに、基礎研究を中心とした学と実用化研究や市場化を行う産が交流できる学会などが考えられる。技術の進展・変化にあわせて継続的に議論していく必要があることから、学会内の研究会、あるいは学会ではないが、学术界と産業界の交流の場である日本学術振興会の産学協力研究委員会なども共通認識を醸成する場として考えられる。これらの議論に参画すべきステークホルダとしては、ニーズ側として既に挙げた図書館、美術館、博物館、放送・映画・出版印刷業界、科学研究機関等、技術側としては大学、企業、さらに技術とともに長期保存を担保するために不可欠な市場性をどう確保していくかという点で、ICTの国際戦略を担う総務省、半導体を含む産業政策を担う経済産業省が関与していくことが求められる。

もちろん、数多くの科学研究機関を擁するとともに、基礎研究を担う大学を所管する文部科学省はニーズ側としても技術側としても関与が求められる。省庁横断的な取組みとなることや国立公文書館等を所管することから内閣府の関与も考えられる。

このような共通認識を醸成する場において、①媒体とアダプタ間における物理的な接点、信号、②データ構造レベルでのエミュレーションを可能とするメタデータと参照モデルへの組み込み方法、③意味解釈のためのソフトウェアエミュレーションを可能とするメタデータと参照モデルへの組み込み方法、についての仕様を明確にしていく必要がある。

これらの仕様は必ずしも一つになるとは限らず、多様なアプリケーションに応じていくつかのバリエーションができる可能性もある。例えば、大規模なデータセンターにおける長期保存と個人がメモリカードのようなものに長期保存する場合とでは、付与すべきメタデータや参照モデルが異なることが充分考えられる。さらに、保存以外の機能についても検討しておく必要がある。例えば、映像データのアクティブアーカイブが目的ならば非常に高速でのアクセス性が必要になり、バックアップ用ならば、それほど高速性は要求されない可能性があり、結果としてメタデータや参照モデルが異なってくる可能性がある。

このような検討を進めるには、多様なステークホルダの関与の下で可能性のある具体的な物理モデルを仮定、共有しながら進めていくことが重要である。

これらの技術的な要素に加えて、次の2. 国際戦略、標準化戦略の重要性で述べる国際戦略や標準化戦略を含むビジネスモデルについても共通認識を醸成し、役割分担を明確にした上で取り組むことが重要である。

研究開発のプラットフォームとしては、回路関係の大学・企業の研究者が参加することにより、材料設計、材料評価、シミュレーション、デバイス設計、デバイス作製プロセスから回路設計までの研究者が密な連携をとりながら実施することが可能な、つくばイノベーションアリーナ（TIA）のナノエレクトロニクスコア領域の活用などが考えられる。

#### 4-1-2. 国際戦略、標準化戦略の重要性

デジタル情報の長期保管は世界的に重要な課題であり世界的な規模で市場化されることにより、より大きな経済効果の創出と世界的な課題への貢献と同時に、より安定した長期保存環境の実現が期待できる。この意味で、研究開発の当初から世界の市場における、標準化、デファクトスタンダード化を目指した取組みが重要である。

我が国では、長期保存を主な目的とした研究プロジェクトは今のところないが、半導体チップ間の無接点での高速超低消費電力無線通信技術、MONOS メモリなど長期保存に貢献する可能性のある要素技術の研究開発が行われているほか、光ディスクの国際標準化における重要な基礎データを我が国の機関が提供したといった実績がある。このような技術の強みを活用し、評価技術も含めた形での長期保存技術の国際標準化活動と組み合わせながら市場化を狙っていく戦略が考えられる。

なお、長期保存技術の標準化にあたっては、長期保存性の保証を誰が行うのかという点も重要である。これに関しては、100年、1000年といった期間が企業の存続期間を超える可能性があり、特にIT関連企業の業績の変動の大きさを考えると、一企業が責任を持って保証することは考えにくい。さらに、標準規格を策定しても規格解釈のレベルで実際には相互運用性が担保されない可能性もある。このため、特定の企業に依存しない、ある程度、独立した組織が公平な立場で規格策定と後の相互運用性のチェックの責任を果たすような仕組みが考えられる。例えば、光ディスクでは、NPOのアーカイブディスクテストセンターが企業から独立した組織として標準化に貢献したモデルケースとして考えられる。このような仕組みは、長期保存メモリの製造を担う企業のリスクやコストを低減し、市場展開を促すといった点でも効果的と考えられる。

#### 4-1-3. 研究開発の時間軸

研究開発の時間軸としては、まず、上記の1. 研究開発の推進体制で述べたニーズ側と技術側からなるコミュニティを早急に立上げ、1～2年程度で研究開発から市場化、標準化までの戦略についての共通認識をつくり上げる。同時に、主要な業種・サービスについてケーススタディを行い、マイグレーションやデータ消失の危険性まで含めた全体コストに対するエミュレーション戦略のコスト軽減効果など、社会への貢献の姿をより具体的に明らかにして、必要性に対する社会的な認識を一層高めていくことも並行して行う。

技術仕様など研究開発に必要な共通認識ができた段階で速やかに産学官連携によるプロジェクトを立ち上げて研究開発を開始し、研究開発段階からできるだけ早急に標準化への取り組みを開始する。プロジェクトでは、速やかな実証、市場展開を狙い、現状の技術を

ベースに、実現可能性が高く、著作権期間が70年であり、また個人が生涯に亘るデータを保存可能であることから産業的にもニーズの高いと考えられる100年程度の比較的短期の長期保存を狙った研究開発を行うが、ビジネスモデルが成り立つコストで製造する技術が確立されるまで、公的研究資金も投入しつつ産学官の連携の下で継続的に研究開発を進めていく必要がある。

なお、国内での研究開発と並行して標準化活動や国際共同研究を行うことが国際標準化におけるイニシアチブを握るために効果的と考えられるが、その前提として我が国における共通認識の醸成が必須である。国際標準化に際しては、早期に基本的な仕組みのレベルでの標準化を図ることが重要で、より具体的な個別の用途に応じたものは重要性や市場の拡大のなかで順次進めていくことが考えられる。

次のステップとしての1000年程度の保存寿命を狙った研究開発は、100年程度の保存寿命の長期保存技術の市場化の後、潜在ニーズの掘り起こしや市場の拡大によるコストの低下を踏まえて開始し、10年後を目処に実証、その後の市場展開を目指す。

このようなスピード感を持って研究開発、実証、市場投入、標準化を行っていくことが重要であるが、各ステークホルダーが今後の研究開発や市場化の方向性や時期を連動させ、継続的な投資を実現するには、ハードディスクや磁気テープのロードマップ、国際半導体技術ロードマップのようなロードマップの作成と共有化が効果的である。このような取組みは、利用者が今後の技術の展開と継続性を認識し、長期保存の媒体として安心して利用することにも貢献する。

## 付録 1. 検討の経緯

CRDS ではナノテクノロジー・材料分野の「俯瞰ワークショップ」を定期的開催しており、俯瞰ワークショップの議論を経て抽出された今後の重要課題群において、電子情報の超長期保存を実現するメモリデバイスがあげられた。CRDS は平成 24 年度に、提言作成に取り組むスコープの一つとして新原理メモリ技術開発を指定し、これに伴い「新原理メモリ技術開発」チームを発足させ、本提言作成へ向けて以下の活動をおこなった。

### 1. 研究者セミナー及びインタビュー

電子システムにおけるメモリシステムについて、①大容量化のためのメモリセルの微細化の限界、②メモリ間のスピードギャップの拡大、③ MPU を頂点としたシステムの消費電力の増大、④爆発的に増大するデジタルデータ量を恒久保管する技術が存在しないという 4 つの課題の解決をスコープの対象として、メモリシステムに対するニーズの把握、技術的課題を把握するために研究者セミナー・ディスカッション及びインタビューを実施した。

#### 〈研究者セミナー・ディスカッション〉

開催日	講師（敬称略）	セミナーテーマ
(1) 7月6日	池田 功一（国立国会図書館）	国立国会図書館の電子情報の保存方法、長期保存
(2) 7月13日	屋上公二郎（ソニー）	探索系将来メモリ技術、CNT-RRAM
(3) 7月25日	田中陽一郎（東芝） 喜々津 哲（東芝）	HDD、光ディスクとホログラフィックメモリ
(4) 7月26日	福島 伸（東芝）	新原理メモリに関する考え方
(5) 7月27日	大野 鋭二（パナソニック）	光ディスク (Blu-ray) の高密度化・大容量化・長期保存に関する記録媒体や記録技術
(6) 7月30日	宮下 英一（NHK）	映像デジタルデータの長期保存に関わる記録媒体やメモリデバイス
(7) 7月31日	茂原 暢（渋沢栄一記念財団） 山田 仁美（渋沢栄一記念財団）	実業史関連資料の長期保存の必要性
(8) 8月6日	井上 光輝（豊橋技科大）	ホログラムメモリ技術
(9) 8月29日	加茂 竜一（凸版印刷）	アーカイブの保存の必要性
(10) 8月30日	小林 敏夫（神奈川大）	超長期保存メモリの必要性
(11) 10月19日	三橋 慶喜（アーカイヴディスクテストセンター）	光ディスク産業の動向と ADTC の標準化活動

#### 〈インタビュー〉

MRAM、PRAM、原子移動型スイッチの研究動向についてインタビューを行った。

(12) 6月20日 住広直孝、木村紳一郎、杉井寿博、高浦則克、波田博光（LEAP）

## 2. ワークショップ

上記の研究者セミナー及びチームによる調査・分析結果を踏まえ、提言内容としてデジタルデータの超長期保存・保管、低消費電力記録を目指した「超長期保存メモリ・システムの開発」をターゲットとして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」を開催した。

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」

主 催：独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）

開催日時：2012年11月16日（金）12時45分～17時30分

場 所：JST 東京本部別館 4階 F 会議室

コーディネータ：小林敏夫（神奈川大）

オーガナイザー：田中一宜（JST/CRDS）

プログラム

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和社会・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アーカイブス部）

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）

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

招聘識者（敬称略）

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

上記以外の参加者（JST 内部からの参加者は未記載）

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	慶應義塾大学理工学部 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	慶應義塾大学理工学部 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

上記のワークショップ参加者には、本提言検討に関する助言や最新の研究開発動向についての知見を随時提供していただいた。ワークショップの詳細内容・結果は、下記の報告書にまとめている。

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」報告書  
 2013年2月発行 科学技術振興機構研究開発戦略センター  
 CRDS-FY2012-WR-07 下記 URL よりダウンロード可  
<http://crds.jst.go.jp/domains/nanotech/201303050012>

## 付録 2. 国内外の状況

### 1. 国内の状況

わが国においては、デジタルデータの長期保存に関する危機意識は10年ほど前から認識され、危機意識を持ついくつかの機関により検討が行われてきた。デジタルデータの長期保存の技術に対する強いニーズを持つ国立国会図書館や、大量の画像・映像メディアを扱う放送、出版、印刷業界の企業などが個別に調査や必要な取り組みを行ってきた状況である。保存媒体から保存システム、ユーザーまでデジタルデータの長期保存に係る幅広い分野の関係者が集まって対策を議論するような場の形成はまだない。

下記に国立国会図書館、国立公文書館、内閣府における電子情報の保存に関する主な調査報告を示す。

表 付2-1-1 国立国会図書館の主な調査活動（平成18年度～22年度）

	平成18年度	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度
録音・映像資料のデジタル化調査	デジタル化調査		所蔵状況調査 デジタル化試行	アンケート調査	媒体変換試行
電子情報の長期利用に関する要件調査	FDのマイグレーション試行				
		エミュレーション等技術要素基礎調査			
	マイグレーションプロトタイプによる検証				
保存システムの構築のための調査			技術要素調査		
				プロトタイプ	

(国立国会図書館)

- 「電子情報保存に係る調査研究報告書」平成15年3月
- 「電子情報の長期的保存とアクセス手段の確保のための調査報告書」H16年3月
- 「電子情報の長期的保存とアクセス手段の確保のための調査報告書」H17年3月
- 「パッケージ系電子出版物の長期的な再生可能性について」図書館調査研究リポート No.6 (H18年3月)
- 「電子情報の長期利用保証に関する平成18年度調査報告書」H19年3月
- 「平成19年度電子情報の長期利用保証に関する調査報告書（平成20年3月）」
- 「平成20年度電子情報の長期利用保証に関する調査（1）旧式録音・映像資料のデジタル化に関する調査 調査報告書」（平成21年3月）
- 「電子情報の恒久保存メディア及びそれを用いたシステムに関する調査報告書」（平成22年3月）
- 「保存システムの構築に係る要素技術に関する調査報告書」（平成22年3月）
- 「録音資料の技術仕様等に係る調査報告書」（平成23年3月）
- 「国立国会図書館が所蔵する録音資料の状況に係る調査報告書」（平成23年3月）
- 「録音資料の媒体変換に係るガイドライン調査報告書」（平成23年3月）
- 「録音資料の媒体変換の試行及びそれに基づく調査報告書」（平成23年3月）

- 電子情報の長期利用保証に係る調査研究（平成 18 年度～平成 22 年度）総括報告書（平成 23 年 8 月）  
（国立公文書館）
- アーカイブズの観点から見る電子記録管理ガイド（1997 年 ICA 報告書 8）日本語版
- 電子記録：アーキビストのためのワークブック（2005 年 ICA 報告書 16）日本語版
- 電子媒体による公文書等の適切な移管・管理・利用に向けて—調査研究報告書（H18 年 3 月）
- 電子公文書等の作成時又は作成前からの評価選別」に係る調査研究報告書（H21 年 3 月）  
（内閣府）
- 電子公文書等の管理・移管・保存・利用システムに関する調査 報告書（H21 年 3 月）

最近では、デジタルデータ量の爆発的な増加が予測され、長期保存に適する記録媒体が明確になっていないことから、文化財を持つ機関や関係学会（電子情報通信学会など）からも再び警鐘が鳴らされている。このような背景から、文化財をデジタル化して長期に保存することを推進する超党派の国会議員からなるデジタル文化資産推進議員連盟が 2012 年 6 月 11 日に設立されている。会長・副会長からは「博物館や美術館、図書館、大学、企業、寺院、など、かけがえのない多くの文化財をデジタル化し大切に長く保存したい（高木会長）」、「超長期保存についても考えたい。1000 年もたせ、ハード・ソフト両面から研究したい（鈴木寛副会長）」というコメントも出されている。

一方、長期保存を目指した技術的な取組みとしては、散発的ではあるがいくつか注目すべきものが出てきている。例えば、慶応大学の黒田忠広教授が 2009 年に VLSI シンポジウムで発表した「半導体ロゼッタストーン」は大きな反響であった。半導体メモリウェハとワイヤレスで電力の供給と情報の入出力をするものであり、可動部が無く腐食される部分が露出してないことなどから、デジタルデータの長期保存に適する方法の一つである。また、日立製作所は石英ガラス内部にフェムト秒レーザで 3 次元的にデジタルデータを記録することで、半永久的（10 万年以上）にデータ保存を実現できる可能性を示している。さらに、半導体メモリの一種である MONOS 構造で 1000 年以上の保存も可能というデータも示されている。このような回路技術や媒体技術、それに光ディスク開発で培われた評価技術・国際標準化活動をコアとすることにより、わが国がデジタルデータの長期保存の技術に関して、世界的に研究開発を主導し、産業競争力に結びつける可能もある。

## 2. 海外の状況

海外においては、デジタルデータとして保存していたバイキング火星探査機の重要なデータが 25 年で読めなくなってしまうという、大きな失敗をした米国の活動が目される（コラム 3 参照）。この事件が「デジタルデータの絶滅」と呼ぶ危険に対する重要な警鐘となった。その後、米国では計画的にデータ移行を行うことで、連邦政府内のデータ資産を保護することを目的として、Open Archival Information System（OAIS、開放型アーカイブ情報システム）と呼ばれるものが提唱され、現在 ISO の標準規格になっている。

米国の文化財や公文書のデジタルデータの保存に関しては、以下のような取組みがある。

**●アメリカ議会図書館 (Library of Congress)**

デジタル情報インフラおよび保管の国家計画 (NDIIPP) を推進している。議会は 2000 年に、NDIIPP の共同プロジェクトに 1 億ドルの予算を付けた。

**●国立公文書記録管理局 (National Archives and Records Administration : NARA)**

アメリカ政府の全公式記録の保管を担当し、何千というフォーマットで作られた何兆にもなるデータを「永久に」保存する。このため、長期的な計画の立案のため **Electronic Records Archive (ERA、電子記録アーカイブ)** 計画を立ち上げた。

また、社会・経済的に影響を与えるものとして、ライフ・臨床医学関係の取組みがある。1996 年に米国で施行された健康保険の携行性と責任に関する法律 (HIPAA) が契機となって、医療現場の臨床データ保存 (100 年間の保存が必要) が義務付けられたため、医療用データのアーカイブの需要が生まれている。米国で最も規模の大きな病院は、2007 年当時 1 ペタバイトのデジタルデータを保存している。アーカイブは、1 週間に 3 テラバイトの割合で増え続けており、2008 年にはデータ量が 2 倍にも増えるため、巨大なマーケットが期待されている。

米国における技術開発において、長期保存メモリに関する国家プロジェクトの表立った研究開発は見られないものの、SunDisk 社の WORM や Nantero 社の NRAM など長期保存を目指したメモリの研究開発や市場化の取組みがなされている。WORM は改ざん防止機能があるため、日本の警視庁からも大量受注を受けている。先に述べた医療情報の長期保存では義務化を含む HIPAA が施行されており、このようなニーズを背景とした研究開発の加速が予想される。

欧州では、デジタルデータの長期保存のテーマが FP6 (2002年-2006 年) および FP7 (2007年-2012 年) において、特に FP7 では「Digital Preservation」というプロジェクトにて継続的に産学連携による研究開発が推進されている。2011 年 5 月には、「The Future of the Past」という FP7 以降の研究開発に関するワークショップが開催され、今後も研究開発投資が継続されていくことが予想される。内容的には、e-サイエンスなどのための科学データ、Web、ソーシャルメディア、文化遺産としての音声や画像の保存などを対象として、長期保存のスキルやツールの開発を行っている。しかし、長期保存に適した媒体そのものの研究開発は十分な取組みはされていない。

**3. 半導体不揮発メモリに関する学会の動向 (半導体集積回路に関する国際会議 [ISSCC2013])**

超長期保存メモリ・システムに関わる技術動向の一つとして、2013 年 2 月 18 日～20 日に米国サンフランシスコで開催された半導体集積回路に関する国際会議「2013 IEEE INTERNATIONAL SOLID-STATE CIRCUITS CONFERENCE (ISSCC2013)」における、最新の情報通信技術の方向性、不揮発性メモリ技術および近距離無線技術に関して紹介する。

ISSCC は電子回路・集積回路技術に関する世界トップレベルの会議であり、今後のコンピュータシステム、通信システム、民生用機器・システムなどの情報通信技術の最新の動向を知るのに適した会議である。全体の傾向としては、高性能化を追求するよりも低消費電力化やモバイル用途を強く意識したものが多かった。プレナリーセッションでは、Lisa Su (AMD) から今後のコンピュータシステムとしては CPU と GPU (画像処理用

の補助デバイス) が連携して動くことが重要になり、ヘテロジーニアス・コンピューティング (Heterogeneous Computing) に関する技術開発が必要になること、宮部義幸氏 (パナソニック) から民生機器の将来の方向性としてスマートライフがあり、センサ、通信技術、パワーデバイス、低消費電力技術などの革新的なデバイス・集積回路技術が重要になることが示された。これらの将来の情報処理システムでは多くのデータが生み出されると考えられるが、生み出されたデータをどのように長期的に安全・安価に保存・蓄積するかというところまでは意識されていなかった。

不揮発メモリの発表件数は不揮発ロジックを目指したものも含め、11件と全体 (209件) の5%程度であった。不揮発メモリのデバイスとしては、MONOS (Metal-Oxide-Nitride-Oxide-Silicon) メモリ、フローティングゲートメモリ、ReRAM (Resistance Random Access Memory)、STT-MRAM (Spin Transfer Torque Magnetoresistive Random Access Memory)、FeRAM (Ferroelectric Random Access Memory) が報告された。

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」報告書 (CRDS-FY2012-WR-07) の中でも議論され、1000年以上の情報の保存が可能と考えられる MONOS メモリについては、ルネサスエレクトロニクスと台湾の Macronix / 国立交通大学がそれぞれ発表した。ルネサスエレクトロニクスは自動車向けの組み込み用不揮発メモリとして、分離ゲート型の MONOS 型フラッシュメモリを発表した (講演 12.2)。40 nm のプロセスで作製し、データの保持用のメモリは 170°C で  $10^7$  の書き換えができ、高速書き込みが必要なコード保存用メモリは  $10^4$  回書き換えが可能としている。一方、台湾の Macronix / 国立交通大学は 45 nm プロセスによる 6 b/cell の MONOS メモリを発表した (講演 12.7)。1つのトランジスタからなるメモリセルの6か所に電荷を貯めセンス方法を工夫して6ビットの動作をさせるものであり、大容量化に有利な構造となっている。これらの発表では、保持時間やプロセスの詳細についての報告はなかったが、MONOS 構造のメモリ特性をかなり制御できる技術をもっていることが伺えた。メモリ特性を自由に制御でき、微細化にも優れているのであれば、超長期保存メモリとして有望であると思われる。

フローティングゲートメモリに関しては、マイクロンが 20 nm プロセスで 128 Gb の 3 b/cell の NAND FLASH について発表した。(講演 12.5)。25 nm プロセスでは立体的なゲート構造であったが、20 nm プロセスではプレーナ構造にしている。フローティングゲート間やワードライン/ビットラインとの間にエアーギャップも設けて、相互干渉を小さくして、微細構造を実現している。保持特性についての情報はなかった。

ReRAM に関しては、サンディスク/東芝が 24 nm 技術による 2層構造の 32 Gbit ReRAM テストチップを発表した (講演 12.1)。ReRAM を 3D FLASH の後の長期的なスケーリングの解と位置付けており、セル面積は  $24 \times 24 \text{ nm}^2$  と小さく、従来より約3桁集積度を高めている。メモリ部分は金属酸化物としているが、特性の詳細な説明はなかった。集積度および周辺回路の準備は整いつつあるので、微細化を進めていったときの保持時間の変化など長期的な保持特性についての評価を期待したい。

MRAM に関しては、インフィニオン/ミュンヘン工科大学が 40 nm プロセスで STT-MRAM を試作した (講演 12.4)。また、TSMC も 40 nm プロセスで 1 Mb の STT-MRAM マクロを試作し、書き換え耐性が向上するような最適な方法を示した (講演

12.8)。さらに、東北大／NECはMRAMに使われるMTJ (Magnetic Tunnel Junction) を用いた不揮発ロジック (Logic-in-Memory) を報告し、自動的にレイアウトデザインまでもっていく設計ツールの開発により多様なロジックへの対応が可能であることを示した (講演 11.2)。MRAMは不揮発メモリや不揮発ロジック用のメモリデバイスとして着実に技術力を高めてきており、超長期保存メモリとしての可能性についても詳細な評価を期待したい。

FeRAMに関しては、メモリ単体としての発表はなかったが、MIT／TIはFeRAMを不揮発メモリ部に使用した130 nmプロセスによる不揮発Dフリップフロップを試作した (講演 11.1)。最近ではFeRAMについての報告はほとんど聞かなくなっているが、微細化への対応や超長期の保持の評価を期待したい。

電極の腐食を防止する対応策の一つとして、半導体メモリチップを完全に封止し、近距離無線伝送技術により電源供給と信号の入出力をすることが注目されるが、Gb/sを超える高速信号伝送技術が慶応大学、ルネサスエレクトロニクス、KAIST／サムソンから紹介された。

慶応大学はスマートフォンなどの高精細ディスプレイへの信号供給に、接続端子を使わずに近距離無線で高速のデータ転送する技術を発表した (講演 11.5)。電界結合型の縦型方向性結合器を用いたシリアル信号伝送とすることにより、接続部の厚さを0.15 mmまで薄くし、2.3 Gb/sの通信速度を確認している。韓国のKAIST／サムソンも同様な応用を狙って、1.2 Gb/sの近距離無線技術を発表した (講演 11.6)。磁束結合型とすることにより、コイル間の距離が1 mmを超えても伝送可能にしている。ルネサスエレクトロニクスは、磁束結合により5 mm離れても一方向への高速伝送 (6 Gb/s) が可能であり、それと同時に、容量結合により低速 (50 Mb/s) の双方向信号伝達が可能な結合器を報告した (講演 23.4)。これらの腐食しやすい金属端子を使用しないで高速なデータ転送が可能なこの技術は、超長期保存メモリシステムの構築に向けた基盤技術として有望であり、今後のさらなる高速化と長期的な信頼性の評価を期待したい。

半導体集積回路に関する最先端の国際会議においても、超長期保存メモリに関わる要素技術の発表はあったが、超長期保存の要求に対する問題意識はまだ醸成されていない。このように、超長期保存にまだ注目していない段階で、メモリ媒体からメモリシステムまでを明確にしていくことにより、日本が世界を引っ張っていくことが可能になると考えられる。

### 付録3. 専門用語説明

**アーカイブ (archive)** : 公文書など歴史的に重要な1次記録情報を、個人あるいは組織の寿命の期間を超えて蓄積・保存・伝達することをいう。(コンピュータ用語では、複数のファイルを一つのファイルにまとめること、またはそのまとめたファイルを指すが、このプロポーザルにおいてはこの意味では使わない)

**アダプタ (adapter)** : 異なる複数の機器に接続する際に用いられる中間装置の総称であるが、このプロポーザルでは、メモリとシステムとの中間にあって、メモリとのインターフェースは変えずに、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もつような装置を指す。ワークショップ報告書の岡上拓巳氏の提案参照

**意味理解 (semantic understanding)** : 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。データの構造などをメタデータとして与えデータの解釈が出来るようにすることをいう。

**エミュレーション (emulation) とマイグレーション (migration)** :

**エミュレーション**とは、もとのソフトウェアからの命令を新たなプラットフォーム上で実行するための技術を指す。エミュレーションでは、新しいプラットフォームになっても、もともと符号化されていた状態のまま変換せずにデータを保持するので、元の姿を再現しやすい、維持コストが低いという利点がある。一方、**マイグレーション**とは、現行の技術環境から、新しい技術環境へと情報を移すことによって資料を保存するやり方で、一般にデータのエンコードの変更を伴うので、資料の見た目が変わる、機能性が失われるなどの欠点がある。

**エレクトロマイグレーション (electromigration) とストレスマイグレーション (stress migration)** : **エレクトロマイグレーション**とは、金属を構成している結晶粒が、電流を流すことによって移動し、断線にいたる現象。一方、**ストレスマイグレーション**とは、金属を構成する結晶粒が応力によって移動し、断線にいたる現象である。

**加速試験 (acceleration test)** : 製品を高温・高湿度・紫外線照射など過酷な環境下で試験し、意図的に劣化を進め、製品寿命を推定する手法のことをいう。

**ペタバイト (PB)、エクサバイト (EB)、ゼタバイト (ZB)** : データ量やコンピュータの記憶装置の大きさを表す単位である。ペタバイトは  $2^{50} = 1,125,899,906,842,624$  (約  $10^{15} = 1000$  兆) バイトであり、エクサバイトは  $2^{60} = 1,152,921,504,606,846,976$  (約  $10^{18} = 100$  京) バイト、ゼタバイト (zettabyte) は  $2^{70} = 1,180,591,620,717,411,303,424$  (約  $10^{21} = 10$  垓) バイトである。

**メタデータ**：データについてのデータ。データそのものではなく、そのデータに関連する情報のこと。データの作成日時や作成者、データ形式、タイトル、注釈など、データを読み解くため、あるいは、データの中身を検索しやすくするためにデータに付加される情報のことをいう。

## ■戦略プロポーザル作成メンバー■

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・リーダー	(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)

※お問い合わせは、下記ユニットまでお願い致します。

CRDS-FY2012-SP-07

### 戦略プロポーザル

## 「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」

### STRATEGIC PROPOSAL

Development of a Novel Storage System for Stable,  
Long-Term Preservation of Digital Data

平成 25年 3月 March, 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.

---



ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC  
CT CTCGCC AATTAATA  
TAA TAATC  
TTGCAATTGGA CCCC  
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC  
ATAAGA CTCTAACT CTCGCC  
AA TAATC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT  
CTCGCC AATTAATA  
ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT  
CTCGCC AATTAATA  
TTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT  
ATTAATC A AAGA C CT  
GA C CTA ACT CTCAGACC  
0011 1110 000  
00 11 001010 1  
0011 1110 000  
0100 11100 11100 101010000111  
001100 110010  
0001 0011 11110 000101

