

# Synthesiology

3次元IC積層実装技術の実用化への取り組み

レアメタル資源の安定供給を目指して

構成型研究におけるシナリオ：その役割と表現

太陽電池モジュールの信頼性向上と  
試験法開発に関するコンソーシアム研究

シンセシオロジー編集委員会

本誌は、成果を社会に活かそうとする研究活動の目標と社会的価値、具体的なシナリオや研究手順、また要素技術の構成・統合のプロセスを記述した論文誌です。本号論文の価値が一目で判るように、編集委員会が作成したシンセシオロジー論文としてのポイントを示します。

シンセシオロジー編集委員会

### 3次元IC積層実装技術の実用化への取り組み

#### —基盤技術から実用技術へどのようにしてステップアップするのか?—

集積回路の高集積化が素子の微細化により進んできた中で、3次元化はその技術的困難さもあり、研究開発の主題とは言えなかった。しかし、微細化限界が認識されるようになった現在、改めて3次元積層技術が注目されている。青柳らは、3次元ICチップ積層技術開発のためのシナリオを描き、そのシナリオに沿って目標を実現する要素技術(TSV、円錐パンパ)とその統合設計技術等の成果を述べている。限られた研究リソースを効果的に利用する戦略の具体的な取り組みについて、課題の優先順位と研究リソースの確保状況について、時系列で分かるように記されている。

### レアメタル資源の安定供給を目指して

#### —レアアース資源確保のための取り組みと課題—

新興工業国の経済発展による金属資源価格の高騰や中国のレアアース輸出制限による危機を受け、レアメタル資源の安定供給を国として推進するための地質情報整備について、高木ら鉱物資源研究グループは、有望鉱床の確認、選鉱試験の拠点整備、データベースの構築、海外地質調査機関との協力関係の構築など期待に応えてきた。資源開発へつなげるための産総研の研究開発、資源国との連携、開発期間との共同研究体制等、実例を交えて記載されており、レアアース資源研究の体系を俯瞰する論文としてまとめられている。

### 構成型研究におけるシナリオ:その役割と表現

#### —シンセシオロジー誌の掲載論文による検証の試み—

基礎研究の成果を出発点とするイノベーションは現代における研究開発の主流であり、それは社会の諸問題を解決して持続的繁栄をもたらすものとされる。そのための研究資金が投入され、また研究者の努力が払われて多くの成果が得られているが、その中で一つの問題点が浮上してきた。それは基礎研究から社会的問題解決に有効な成果に至る過程が不明という問題である。その結果その過程に従事する研究者は、あらゆる可能性を探りながら、ある時は直観で、ある時は網羅的思考で、いずれも試行錯誤によって設定した解へと近づいてゆく方法で研究する。これはまだ明示されていないが独自の研究方法論であって第二種基礎研究と呼び、その成果が本誌シンセシオロジーの論文である。本誌の目的はその成果の発表と同時に、この研究方法を明らかにすることを目的としている。

本論文は発刊後8年を経て100編を超す論文を対象に多様な研究の背後に存在しながらその姿をまだ見せていない共通の方法を抽出することを研究した論文である。構成的研究である第二種基礎研究を特徴づけるものとして各論文に現れ、研究の中核をなすものと考えられるシナリオに注目し、それが持つ論理的特徴が共通であることを示し、構成型研究の特徴を構造的に示している。しかもシナリオは言語表現、図解によって明示的に表現可能であることを示して、研究の論理を抽出する研究が実証可能性を持ちうることを明らかにしたとすることができ、貴重な論文である。本論文は今後の第二種基礎研究にとって有益であると同時に、方法論抽出研究の方向にも有効な示唆を与えている。

### 太陽電池モジュールの信頼性向上と試験法開発に関するコンソーシアム研究

#### —「高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム」の運営—

太陽電池モジュールについてのコンソーシアムを設立、運営するに際して、当時の状況判断として、学界・業界においても信頼性評価技術が手薄な事を考慮して、太陽電池モジュールの試作ラインを整備し、科学的知見に基づく信頼性の評価技術を確立することを目指した。多数の企業が共通基盤技術の開発として協働できる場となるため、コンソーシアムでの課題設定や運営方針の決定の際に、参加企業と十分議論し、理解を得るプロセスをまとめた具体的論説である。コアとなる信頼性評価技術に関しては、ノウハウや経験則に替わる科学的根拠に裏付けられた研究により加速試験方法を確立した点などは高く評価される。この成功事例は、他の分野への波及効果が高いと言える。

# Synthesiology 第9巻第1号(2016.2) 目次

論文のポイント	i
研究論文	
3次元IC積層実装技術の実用化への取り組み — 基盤技術から実用技術へどのようにしてステップアップするの? — ・・・青柳 昌宏、居村 史人、加藤 史樹、菊地 克弥、渡辺 直也、 鈴木 基史、仲川 博、岡田 義邦、横島 時彦、山地 泰弘、 根本 俊介、Thanh Tung BUI、Samson MELAMED	1-14
レアメタル資源の安定供給を目指して — レアアース資源確保のための取り組みと課題 — ・・・高木 哲一	15-25
構成型研究におけるシナリオ:その役割と表現 — シンセシオロジー誌掲載論文による検証の試み — ・・・小野 晃、赤松 幹之、小林 直人	26-38
論説	
太陽電池モジュールの信頼性向上と試験法開発に関するコンソーシアム研究 — 「高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム」の運営 — ・・・増田 淳、井川 奈々子	39-50
編集委員会より	
編集方針	51-52
投稿規定	53-54
編集後記	59
Contents in English	
Research papers (Abstracts)	
Developing an application for 3D IC chip stacking technology — How to shift from fundamental to practical technology? — --- M. AOYAGI, F. IMURA, F. KATO, K. KIKUCHI, N. WATANABE, M. SUZUKI, H. NAKAGAWA, Y. OKADA, T. YOKOSHIMA, Y. YAMAJI, S. NEMOTO, T.T. BUI and S. MELAMED	1
Securing a stable supply of critical raw metals — Efforts and issues for the securement of rare-earth resources — --- T. TAKAGI	15
Scenario in synthetic-type research: its role and description — An investigation from <i>Synthesiology</i> papers — --- A. ONO, M. AKAMATSU and N. KOBAYASHI	26
Article (Abstract)	
Consortium style study on the development of highly reliable photovoltaic modules and acceleration test methods — Management of the “Consortium Study on Fabrication and Characterization of Solar Cell Modules with Long Life and High Reliability” — --- A. MASUDA and N. IGAWA	39
Editorial policy	55-56
Instructions for authors	57-58

# 3次元 IC 積層実装技術の実用化への取り組み

— 基盤技術から実用技術へどのようにしてステップアップするのか? —

青柳 昌宏<sup>1\*</sup>、居村 史人<sup>1</sup>、加藤 史樹<sup>1</sup>、菊地 克弥<sup>1</sup>、渡辺 直也<sup>1</sup>、  
鈴木 基史<sup>1</sup>、仲川 博<sup>1</sup>、岡田 義邦<sup>1</sup>、横島 時彦<sup>2</sup>、山地 泰弘<sup>1</sup>、  
根本 俊介<sup>1</sup>、Thanh Tung BUI<sup>1</sup>、Samson MELAMED<sup>1</sup>

ICデバイスを縦方向に積層して実装集積する3次元IC積層実装技術は、半導体デバイス、MEMSデバイス、パワーデバイス等の集積技術として、従来の基板面内での2次元的な集積化に加えて、基板を積層して3次元的に集積化できるため、近年、期待が高まっている。この論文では、半導体デバイスの3次元IC積層実装に求められる高密度・高集積の電子ハードウェア構築基盤技術を確認させるとともに、企業と連携して量産化技術への開発支援も行いながら、実用化に向けた応用システム開発の流れを作り出すために実施した、初期の応用フェーズの研究開発について、報告する。

キーワード: 半導体デバイス、IC、3次元積層、実装、TSV

## Developing an application for 3D IC chip stacking technology

– How to shift from fundamental to practical technology? –

Masahiro AOYAGI<sup>1\*</sup>, Fumito IMURA<sup>1</sup>, Fumiki KATO<sup>1</sup>, Katsuya KIKUCHI<sup>1</sup>, Naoya WATANABE<sup>1</sup>,  
Motohiro SUZUKI<sup>1</sup>, Hiroshi NAKAGAWA<sup>1</sup>, Yoshikuni OKADA<sup>1</sup>, Tokihiko YOKOSHIMA<sup>2</sup>,  
Yasuhiro YAMAJI<sup>1</sup>, Shunsuke NEMOTO<sup>1</sup>, Thanh Tung BUI<sup>1</sup> and Samson MELAMED<sup>1</sup>

3D IC chip stacking technology is expected to be the future of electronic device integration technology, because integration along the additional dimension affords efficient use of space and improvement of system architecture. We developed fundamental technology of high density integration for 3D IC chip stacking. To facilitate applications of this technology, a mass-production process was developed in collaboration with a production system company.

Keywords: Semiconductor device, IC, 3D stacking, packaging, TSV

### 1 はじめに

半導体集積デバイスを中核コア部品として発展してきた電子機器は、小型モジュール化、高密度集積化、低消費電力化等の性能アップのためのたゆまない技術開発により、産業機器から、民生家電機器、さらには、個人向け携帯電子機器へと事業化が展開され、事業所単位から、世帯単位、さらには、個人単位へと普及度を高めて、全世界レベルで大幅な製品個数の増加を達成してきている。2014 年末には、全世界で携帯電話契約台数と人口数が一致する 100 % 普及率が達成されている<sup>[1]</sup>。

これまでの半導体集積デバイス開発の歴史において特

筆すべきイノベーションは、N チャンネル MOS トランジスタおよび P チャンネル MOS トランジスタを一对にした相補型 MOS (CMOS) トランジスタ素子構造の採用によって、他の素子構造に比べて広い動作可能領域が確保できるため、素子特性の大きな製造ばらつきを許容できるようになったことである。これにより、現在では、10 億個を超えるトランジスタを集積した集積回路 (IC) が実現できるようになっている<sup>[2]</sup>。

一方、半導体 IC 技術については、微細加工の限界、製造コストの上昇等、さまざまな制限要因が明らかになり、今後の集積度向上に陰りが見え始めている。その解決策

1 産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第 2、2 早稲田大学理工学術院 〒162-0041 新宿区早稲田鶴巻町 513 スマートエナジーシステム・イノベーションセンター 120 号館 405 室

1. Nanoelectronics Research Institute, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan \* E-mail: m-aoyagi@aist.go.jp, 2. Faculty of Science and Engineering, Waseda University 120-405 Smart Energy System Innovation Center, 513 Wasedatsurumaki, Shinjuku-ku 162-0041, Japan

Original manuscript received October 26, 2014, Revisions received July 29, 2015, Accepted July 30, 2015

の一つである IC デバイスを縦方向に積層して実装集積する 3次元 IC 積層実装技術は、半導体 IC 技術の集積度向上を別次元で可能とする半導体デバイス集積技術として、近年、期待が高まっている。そこで、我々は、3次元 IC 積層実装に求められる高密度・高集積の電子ハードウェア構築基盤技術を確立させるとともに、本来は企業が進めるべき量産化技術の開発支援も行いながら、実用化に向けた応用システム開発の流れを作り出すため、応用フェーズの研究開発にも取り組んでいる。

## 2 3次元IC積層実装による電子ハードウェアシステム集積技術の高度化とこの研究の狙い

まず、システム性能の向上を目指した高密度・高集積化の要求に対応して製造技術を高度化させてきた電子ハードウェアシステム集積技術について、最近の開発動向を振り返ってみる。半導体 IC の平面集積技術と異なる縦方向で集積が可能となる、半導体 IC パッケージ内に複数の IC チップを積層化して、一つのシステムに収めるシステム・イン・パッケージ SIP (System in Package) <sup>用語1</sup> と呼ばれるシステム集積手法が目立っている <sup>13)</sup>。この SIP 手法については、携帯電子機器の小型化、高速化、低消費電力化に向けた実用レベルの研究開発が積極的に進められ、実際の製品への導入も進んできている。SIP は、More than Moore と呼ばれるデバイス寸法の定率縮小を表す Moore 則と次元の異なる縦方向での集積を実現する技術であり、IC チップ上にシステムを収めるシステム・オン・チップ SOC (System on Chip) <sup>用語2</sup> と呼ばれるシステム集積手法と相補的關係に位置づけられるものと考えられる。しかし、積層化した IC チップ間の接続は、ボンディングワイヤ、パッケージ内配線等比較的長い配線となるため、高速動作に不利な構造と

なっている。一方、IC チップの基板内に表から裏に貫通する電極 (Through-Si-Via: TSV <sup>用語3</sup>) と接続用微細バンブを形成することにより 3次元的に複数の IC チップ同士を直接積層する技術を使った 3次元 IC チップ積層実装技術は、電子ハードウェアの超小型高密度化、高速大容量化、低消費電力化等の多様な高性能化を達成する技術として期待されている <sup>14)16)</sup>。なお、3次元 IC チップ積層では、SOC 手法で実現が困難な異なる基板材料・プロセスによる IC デバイスの高密度集積にも対応できる点に注目すべきである。また、ハードウェアにおける配線空間が 2次元から 3次元に拡張されることにより、回路・システムの構成方法に大きな変革をもたらす可能性にも注目すべきである。

高密度・高集積の電子ハードウェア構築基盤技術としての 3次元 IC 積層実装技術をシステムレベルで応用して具体的な高性能電子機器として具現化するためには、3次元 IC 積層実装システムのプロトタイプ開発を進める必要がある。3次元 IC 積層のメリットを十二分に生かした新しい革新的回路・システム技術を開拓することによって、次世代のハードウェアシステム集積技術を社会に送り出すことが可能になる。

3次元 IC 積層実装システムの実現に求められる研究開発項目は、非常に多種類の技術分野に関連して、多岐に渡っているため、産総研の限られた研究リソースの中では、とても全部をカバーできる状況にはない。そこで、我々は、企業の取り組みが遅れており、かつ、重要度、緊急度の高い技術項目を優先的に進めるシナリオに沿って、これまで 15年に渡って基盤技術の研究開発を進めてきた。

図 1 に電子ハードウェアシステム集積技術について、これまでの進展を示す。まず、性能の高いシステムを達成できる SOC 技術については、システムを構成する多くの回

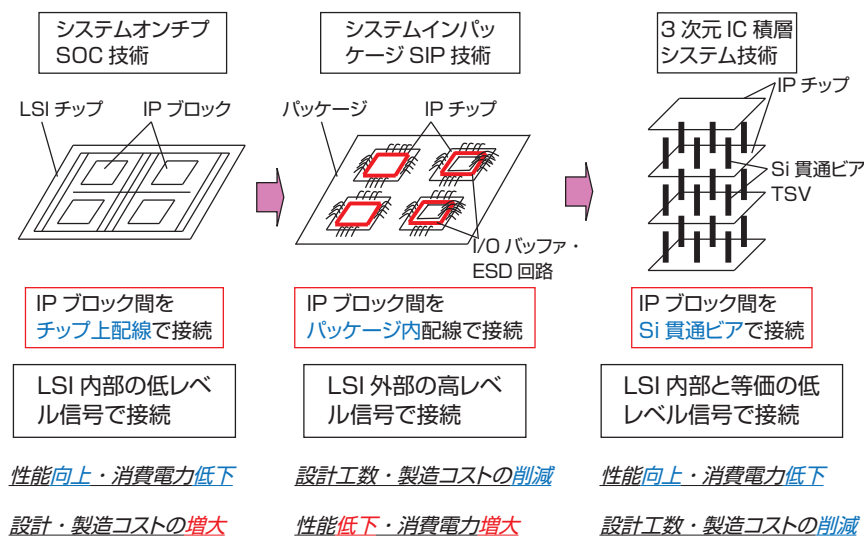


図 1 電子ハードウェアシステム集積技術の進展



路ブロックを一つの超大規模 IC チップ内に集積する技術であり、通常の大規模 IC 開発・製造に比べて、開発・製造に時間がかかり、大幅にコスト増となる。汎用性を高めた回路設計により、多くのシステム製品に組み込まれ、数百万個以上の大規模生産が見込める IC チップ（高性能汎用 CPU<sup>甲</sup>、汎用画像処理プロセッサ等）でないと、事業化が困難である。次に、複数の IC チップを小型に集積できる SIP 技術については、システムを構成する回路ブロックに対応した複数の IC チップを一つのパッケージ内に集積する技術であり、要求性能がそれほど高くない応用分野について、開発・製造のコストを大幅削減できるので幅広く適用されている。さらに、究極の SIP 技術とも言える TSV を用いた 3 次元 IC チップ積層実装技術については、SOC に匹敵する性能、さらに、3 次元配線を活用してシステムアーキテクチャーを工夫することで SOC を凌駕する性能が実現できる技術であり、開発・製造のコストについても、SOC より大幅に低減できる可能性がある<sup>17</sup>。次世代ノードで予想される微細化コストの急激な増大に対して、3 次元積層化によりトータルコストを抑えて集積度の向上を図ることが期待されている。

3 次元 IC チップ積層技術について、デジタルシステム応用上のメリットとしては、マルチコアのような機能回路ブロックの多重化による並列処理アーキテクチャーの採用でシステム演算処理能力の向上が期待できる<sup>18</sup>。このためには、演算ブロック間のデータ通信能力を大幅に高めることが重要な鍵となる。この観点から、IC チップ積層技術について、さまざまな演算処理等を実行する演算 IP<sup>甲</sup> ブロックを作り込んだチップ（IP チップと称する）間の信号伝送方式により分類してみると図 2 のようになる。薄型 IC パッケージを 3 次元積層したチップ積層方式は、低コスト重視の汎用

小型システムの構築に向いており、容量・誘導・電磁波結合を利用したワイヤレス接続によるチップ積層方式は、高速伝送性能と高い物理的接続信頼性が必要なロバストシステムの構築に向いていると考えられる。また、IC チップの基板内に貫通する TSV によるチップ積層方式は、多数の TSV を用いた高性能システムの構築に向いており、光電子複合実装技術、シリコンフォトニクス<sup>甲</sup> 技術等を用いた光導波路接続によるチップ積層方式は、最高性能が要求される基幹系ネットワーク、スーパーコンピュータ等ハイエンドシステムの構築に向いていると考えられる。

この研究では、最終的なアウトカムとして、3 次元 IC 積層実装技術を適用した実用ハードウェアシステムを普及させていくのに不可欠な、設計・試作・評価の研究開発環境を整備するとともに、3 次元 IC 積層実装の特長を生かす、システム応用例のプロトタイプ実証を進めていくことを目標とする。

### 3 3次元IC積層実装に関する製造プロセスと統合設計環境の整備

#### 3.1 3次元IC積層実装の製造プロセス要素技術

企業の研究開発技術者は、半導体デバイスの集積度向上の新たな手段として注目しているため、研究開発の段階でも量産プロセスへの展開を想定して、ウエハレベルの 3 次元 IC 積層実装プロセスの開発に取り組むのが一般的である<sup>19-15</sup>。しかし、産総研では、あえて回り道に見えても、高効率のプロトタイプ試作環境の構築を目指して、低価格のプロセス装置を利用して、高い歩留まりと短い製造期間で物づくりが可能なチップレベル 3 次元 IC 積層実装プロセスに着目して研究開発を進めてきている。特に、チップレベル 3 次元 IC 積層実装プロセスは、産総研から提唱さ

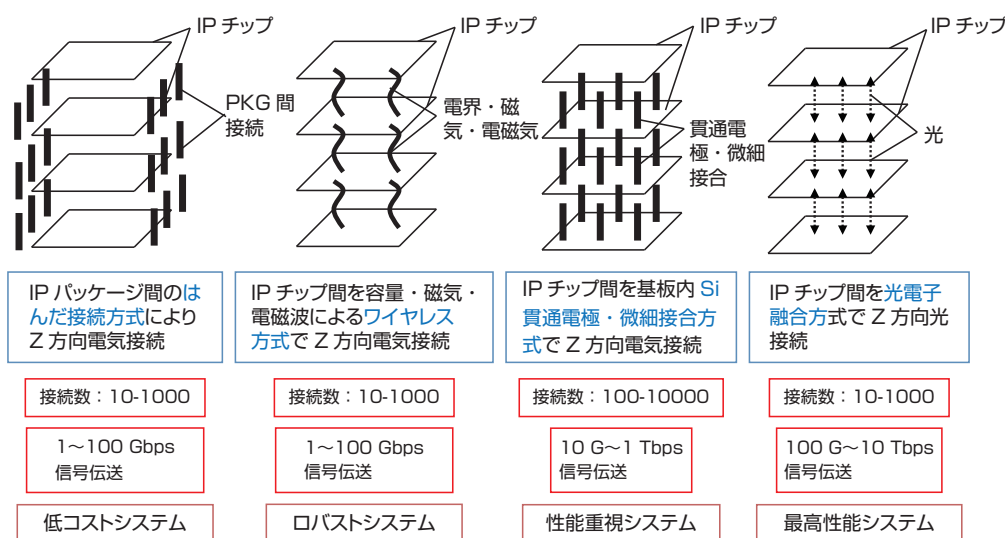


図 2 3 次元 IC チップ積層システム技術

れている極小の1/2インチSi基板を用いた半導体デバイス製造生産システムのミニマルファブ<sup>用語7</sup>コンセプトと親和性が高く、半導体ICデバイス製造から積層実装まで一貫したミニマル3次元積層プロセスラインを構築できる可能性について、強調しておきたい<sup>[16]</sup>。

一般的な3次元IC積層実装の製造工程は、通常のCMOS半導体製造プロセスを経た後に、表から裏に向かって深い埋め込みトレンチ電極を形成し、シリコン基板を裏から薄く加工し、トレンチ電極の底部を露出させ、裏面に配線を形成した後、配線上にはんだ材料による微細金属バンプを形成して、高精度積層技術により積層デバイス間にバンプ接合を形成して、一体集積化する工程フローが用いられる。その製造工程フローの中では、シリコン基板貫通電極（TSV）を形成する工程が難易度、コストの点

から根幹工程となっている。具体的には、図3に示すように、シリコン基板に表面から裏面にかけて深いトレンチ孔をボッシュ法でエッチング加工し、その孔の側壁にバリア層と絶縁層をCVD法で形成した後、その孔の中に金属をめっき法で充填させて、表面をCMP等の平坦化技術で電極を露出させ、さらに裏面から研削・CMP・RIEにより薄型加工して、トレンチ底部の電極を露出させ、独立した貫通する電極を形成する一連の工程である。

図4にこれまで産総研で研究開発を進めてきた3次元ICチップ積層システム集積化要素技術（プロセス・評価）の開発項目について、列挙している。具体的項目として、チップ積層プロセス要素技術として、側壁絶縁層にlow-k有機樹脂を用いた低容量低抵抗低内部応力TSV構造<sup>[17]</sup>、円錐形状の微細バンプにより熱圧着法で接合した微細ピッ

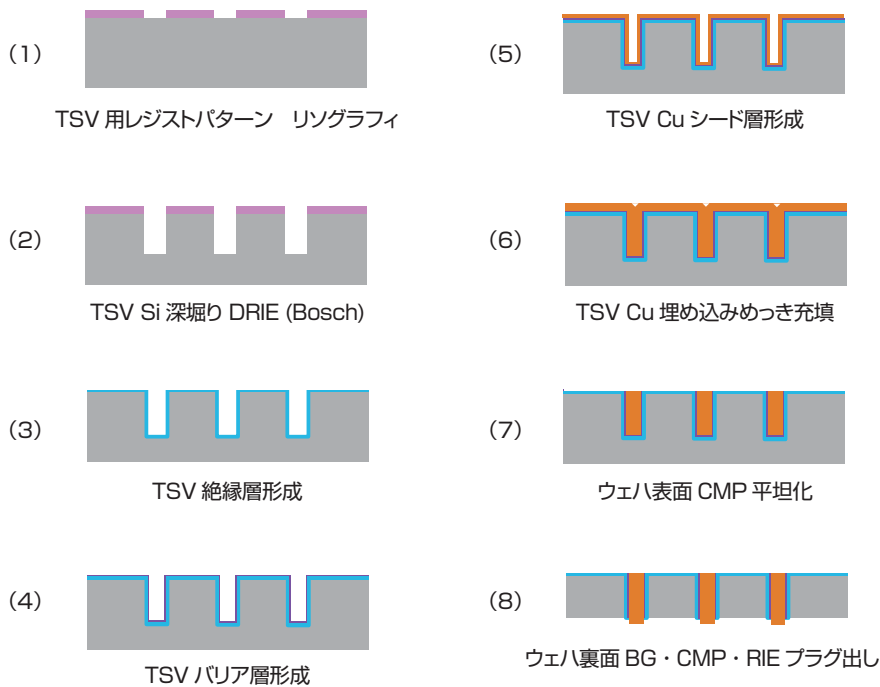


図3 シリコン基板貫通電極（TSV）の製造プロセスフロー

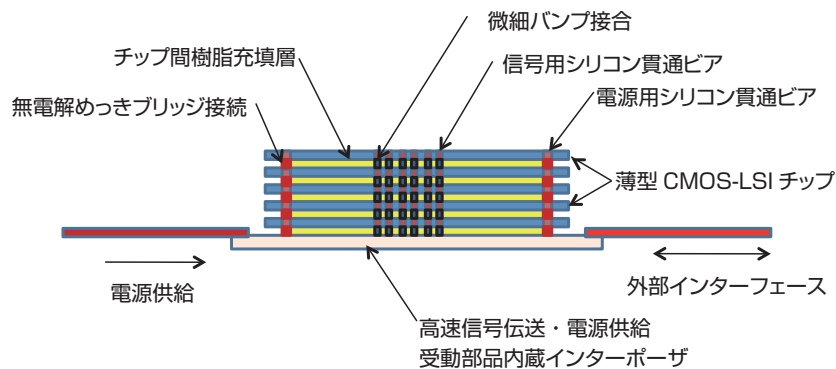


図4 3次元 IC チップ積層システム集積化要素技術（積層プロセス・評価検査）

チ高密度超多チャンネル微細バンプ接続<sup>[18]-[20]</sup>、チップ積層後の電源パッド電極間を直接めっき法で接続する電源パッド間ブリッジめっき接続<sup>[21][22]</sup>、薄膜コンデンサおよびチップコンデンサを基板内に埋め込んだ受動部品内蔵インターポザ<sup>[23][24]</sup>等、評価検査技術として、10 ps 高速立ち上がりステップ信号を用いた局所微細構造電気特性評価<sup>[25]</sup>、20 Gbps デジタル高速信号伝送評価<sup>[26]</sup>、10 Hz-40 GHz の超広帯域に対応したインピーダンスアナライザによる電源供給配線インピーダンス評価<sup>[27]</sup>、メンブレン微細ピッチコンタクトプローブによるチップレベルの電気検査が可能な良品チップ検査<sup>[28]</sup>、積層後に微細接続部の全数電気接続検査が可能なチップ間接続バウンダリスキャン検査<sup>[29]</sup>、レーザー照明と高速高精細画像センサーにより全数形状検査が可能な微細円錐バンプ高速検査<sup>[30]</sup>等が挙げられる。

低容量低抵抗低内部応力 TSV 構造の開発例として、TSV の側壁絶縁層にパリレン有機樹脂層を用いた TSV 構造の開発について、紹介する<sup>[17]</sup>。図 5 には、低温 CVD 法により TSV 孔に均一な膜厚で側壁絶縁層を形成可能なことを特徴とするパリレン側壁絶縁層 TSV 構造の製造プ

ロセスフローを示す。図 6 には、TSV 製造プロセスにおけるパリレン側壁絶縁層形成後の断面 SEM 写真を示す。SiO<sub>2</sub>、SiNx 等の無機系絶縁材料による側壁絶縁層に比べて、被覆性の高い均一で厚い膜形成が可能となっている。図 7 には、TSV 製造プロセスにおけるパリレン側壁絶縁層形成および Cu めっき充填後の断面 SEM 写真を示す。電解 Cu めっき法による TSV 孔への Cu 金属充填が可能である。Cu と Si の熱膨張係数の違いにより発生する側壁絶縁層の内部応力については、パリレン膜の弾性変形により Si 基板内の応力緩和が期待できる。

次に微細ピッチ高密度超多チャンネル微細バンプ接続の開発例として、ナノ粒子堆積法により形成した微細円錐形状バンプ接続の開発について、紹介する<sup>[19]</sup>。図 8 には、金ナノ粒子を真空蒸着装置において、He ガス雰囲気内で生成して、He ガスと共に小径ノズルより吐出させて堆積させるナノ粒子堆積法を用いて形成された円錐形状の微細金バンプ配列の SEM 観察写真を示す。直径 10 μm、高さ 12 μm の形状で配列ピッチ 20 μm の 100 × 100 (10000) 個の微細円錐バンプ配列である。基板上に丸孔形状のフォトリソマスクを形成した後、金ナノ粒子を小径ノズルよ

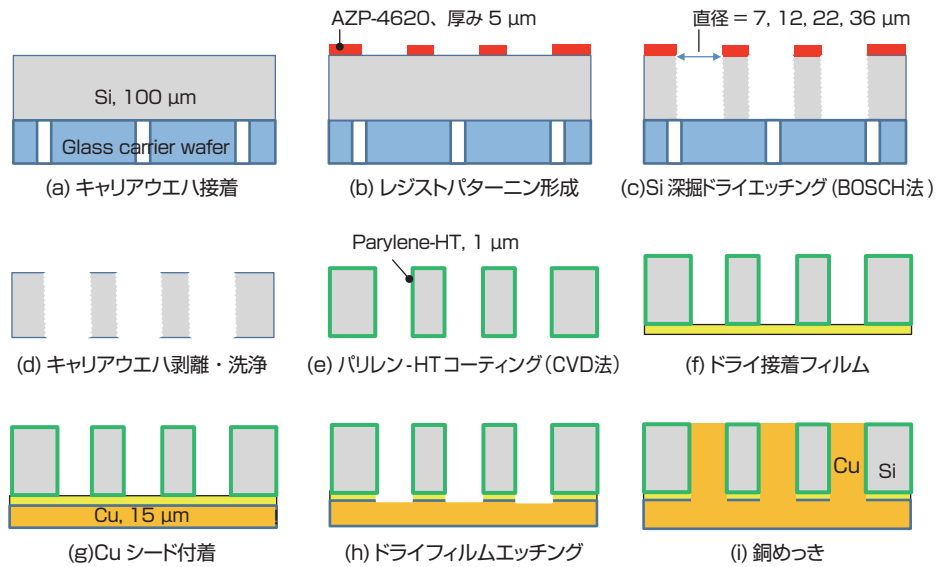


図 5 パリレン側壁絶縁層 TSV 構造の製造プロセスフロー

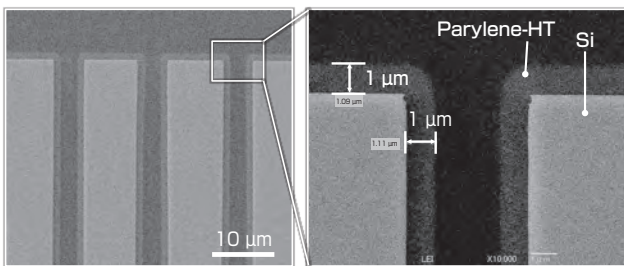


図 6 TSV 構造におけるパリレン側壁絶縁層形成後の断面 SEM 写真

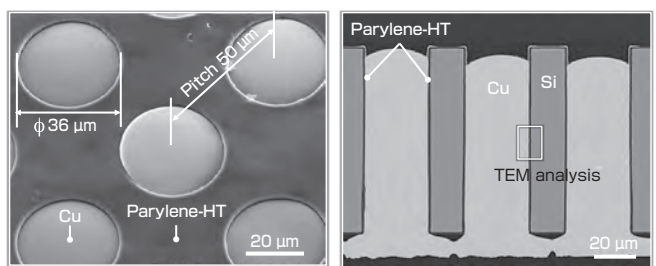


図 7 TSV 構造におけるパリレン側壁絶縁層、Cu めっき充填後の断面 SEM 写真



り吹き付けながら、基板をスキャン移動させることにより、膜形成を行うことで、同時にマスク孔開口上端部にひさし構造が成長するため、孔内部には自動的に円錐形状の金バンプが形成される。図9には、円錐金バンプを用いて熱圧着法によりバンプ接続を形成した円錐バンプ接続構造1個の断面 SIM 写真を示す。温度 200 °C で加圧することにより、高さが 12.6 μm から 7.1 μm まで 44 % 圧縮されて、8.6 m Ω の低抵抗接続が実現できる。その圧縮量は、印加圧力により制御することができる。

このようなチップレベルの 3 次元 IC 積層実装プロセス環境を構築することにより、研究開発段階でのラピッドプロトタイプングの要求に対応するとともに、マルチフィジクス設計解析環境の構築により、電気・熱・機械特性を統合的に設計解析できる複数 CAD ツール統合解析環境および IC デバイス設計からシステム全体設計まで上流から下流まで効率的に設計データを受け渡しできるシームレス設計環境の整備を進めて、最終的な実用段階における全体統合設計へも対応を進めている。

以上の開発シナリオにより、3次元 IC 積層実装の物理的なハードウェア集積環境を利用して、従来の 2次元 IC では実現できない、まったく新しい優れたコンセプトの回

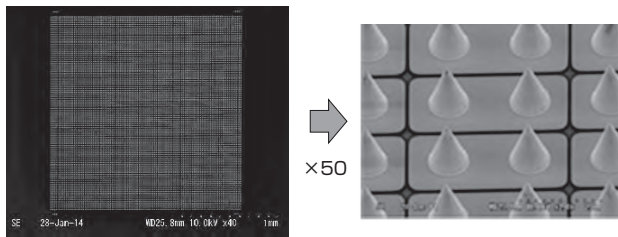


図8 10000 (100 × 100) 個の微細円錐金バンプ配列の SEM 写真 (一部拡大: × 50)  
(直径: 10 μm, 高さ: 12 μm, ピッチ: 20 μm)

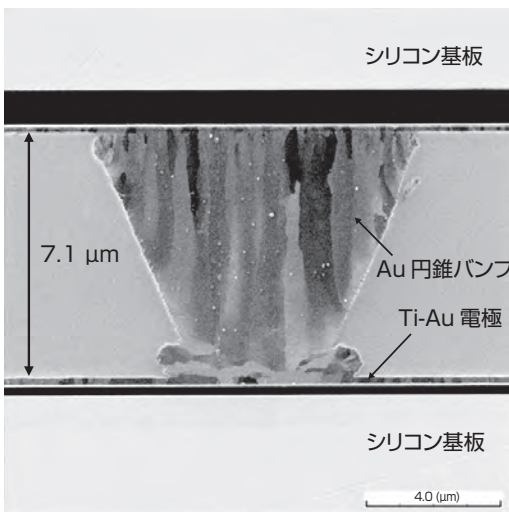


図9 円錐バンプ接続構造単体の断面 SIM 写真

路・アーキテクチャー技術の創出に寄与できると考えている。具体的には、積層デバイス間における 1000 本以上の多チャンネル電気接続を活用して、積層間で可能となる大容量インターフェース通信を応用した、新しいシステム機能を発現させることが目標となる。

### 3.2 3次元 IC 積層実装システムにおける総合化の手法

3次元 IC 積層実装システムの設計段階においては、物性（電気・熱・機械等）が大きく異なる微細な構成要素（シリコン基板貫通電極、微細金属バンプ接続、積層間樹脂インターフィル、熱拡散層等）を含んだ設計基本単位である 3次元 IC 積層スタンダードセルライブラリをベースにして、大規模な集積回路 IC の設計を進める必要がある。そのためには、まず、設計に必要な基本構成単位としてのスタンダードセル群について、各種設計パラメータを変化させた複数デザインの評価用 TEG<sup>用語8</sup> デバイスについて、設計・試作を行い、電気・熱・機械の諸特性評価を網羅的に行うことにより、標準セルのレイアウトデザインライブラリだけでなく、設計ガイドライン、設計ルール等を含む、3次元 IC 積層デザインツールキットの整備を進めていく。TEG デバイスによる設計・試作・評価の一連作業を数回に渡って実施して、徐々にステップアップするようにツールキットを整備することにより、最終的に実用システムの設計・試作・評価が可能となるレベルに到達することを目指す。

電気と熱を協調させた IC 設計技術の開発例として、既存の IC 設計ツールをベースに、独自開発の熱解析ソフトウェアを組み合わせ構築した IC 設計フローの開発について、紹介する<sup>[31]</sup>。図10は、電気・熱協調 IC 設計における熱解析設計工程フローを示している。初めに、通常の論理 IC 設計ツールを用いて、論理設計シミュレーションおよび回路配置配線を行い、IC 設計基本単位であるスタンダードセル単位での平均電力消費の値を求めて、セル内に配置されているすべてのトランジスタに消費電力の値を割り振って、値付けを行う。そのような消費電力値設定済みのレイ

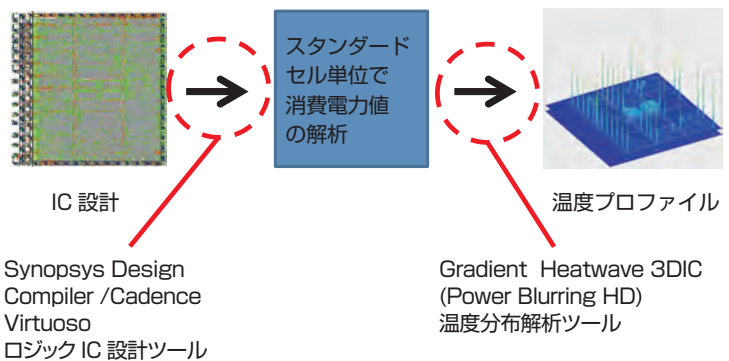


図10 電気・熱協調 IC 設計における熱解析設計工程フロー

アウト設計データに基づいて、独自に開発した効率的計算が可能なトランジスタレベルでの熱解析ソフトウェア<sup>[32]</sup>を用いて、熱解析シミュレーションを実施する。図 11 は、複数の設計ツールを用いた電気・熱協調 IC 設計における熱解析用レイアウト設計データのフローを示している。

#### 4 評価用 TEG デバイスを用いた設計・試作・評価による実証研究開発

評価用 TEG デバイスの設計・試作については、もし、ウエハ単位で実施した場合には、億単位の費用負担が必要になり、研究所で簡単に実施できる予算レベルではなくなってしまう。一方、複数のチップ試作案件が相乗りして、CMOS 半導体 IC デバイスをウエハ単位で設計試作する CMOS ファンドリのシャトルサービスを利用すると、1/10 以下の費用で評価用 TEG デバイスの試作が可能となる。このようなシャトルサービスによるデバイス試作を前提として、研究開発を進めることとした。

IC デバイスの設計に関しても、自前で設計を進めるためには、大規模 IC 設計 CAD 環境を整備する必要があり、数億円の費用が必要になるが、研究所で簡単に実施できる予算レベルではない。ちなみに、著者の青柳、仲川は、20 年前に Mentor 社の CAD ツールを用いて、超伝導集積回路の設計を実施していた時期があるが、その後、高額のライセンス費用を負担することができず、ツール環境の維持を諦めた経緯がある。

設計については、設計環境を保持して、設計受託のビジネスを進めているファブレス企業に協力を依頼する方向で対応することとなった。その協力先としての候補企業を探していたところ、地元、つくば市で起業されたトプシステムズ社との知遇を得た。

2007 年 8 月に同社が独自に開発したヘテロジニアスマルチコアアーキテクチャー TOPSTREAM に関する技術紹介のために産総研に来訪する機会があり、同アーキテクチャーが 3 次元 IC 積層実装システムとの親和性が高く、新しいシステム設計技術の具体化にチャレンジできる可能性を認識することとなり、具体的な連携を進めることとなった<sup>[33]</sup>。

2008 年に経産省の中小企業支援予算を活用して、3 次元 IC 積層対応したヘテロジニアスマルチコアアーキテクチャーとして、その中核となる積層インターフェース規格 Cool Interconnect を含めたアーキテクチャー全体の概念構築を進めて、数件の特許出願を行うとともに、積層インターフェースについて具体的に要素技術開発をスタートさせた。積層インターフェースに関しては、費用のかかる IC デバイス試作を避けて、これまでの技術蓄積を生かせる積層インターフェースのテスト検査技術の構築を優先して進め、特許出願を行った<sup>[34]</sup>。図 12 に Cool Interconnect の概念を示す。50 μm 厚の薄型 IC チップの中心部に 50 μm ピッチ 1600 個の 10 μm 径 TSV 配列を形成して、微細バンプ接続による最大 8 層のチップ積層を想定した、積層チップ

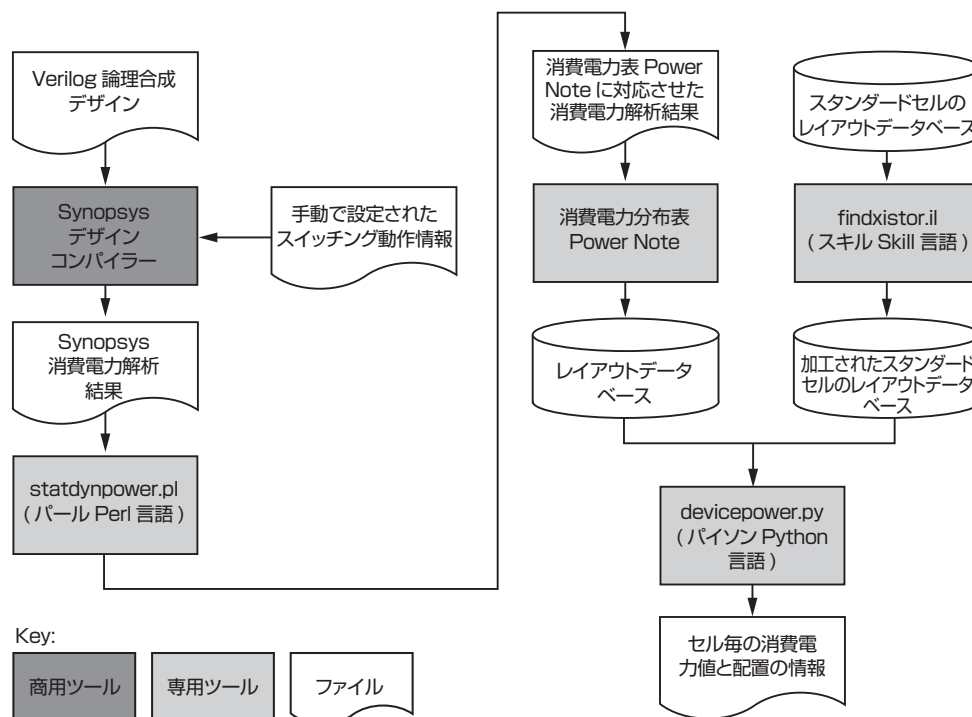


図 11 電気・熱協調 IC 設計における熱解析用レイアウト設計データフロー

間ワイドバス双方向通信インターフェース仕様となっている。

積層インターフェース規格 Cool Interconnect を含めた 3次元 IC 積層アーキテクチャの概念構築が完了したのを踏まえて、2009年5月に NEDO 省エネルギー革新技術研究開発事業へ同社と共同で研究開発プロジェクトの提案を行った。さいわい我々の提案が首尾よく採択され、この NEDO 研究開発プロジェクトにより、IC デバイスの設計・試作を含む 3次元 IC 積層アーキテクチャの実証研究を本格的に進めることができた。提案内容は、ヘテロジニアスマルチコアアーキテクチャの高精細画像処理システムを 3次元積層化により大幅に省電力化を達成できる省エネルギーデバイス技術の開発であった。図 13 に Cool Interconnect を用いた 3次元 IC 積層システム設計における省エネルギーの考え方を示す<sup>[35]</sup>。クロック周波数を数 10 MHz に低減させ、複数の異種演算プロセッサを Cool Interconnect で接続し、複合命令を活用して効率の良い

分散処理を行うことにより、大幅な省電力と高い演算能力の確保を目指すものである。

積層インターフェース規格 Cool Interconnect に基づく、1600 個のシリコン基板貫通電極と微細バンプ接続を想定した、3次元 IC 積層に対応した超並列バスインターフェース回路の評価用 TEG を設計・試作して、まず微細バンプで対面接続された積層デバイス間における 0.588 Gbps/1 mW の低消費電力信号伝送特性を評価した。積層インターフェース回路は、スタンダードセルのバッファ回路、レシーバー回路を用いて設計され、特殊なインターフェース用差動伝送回路を用いることなく、超並列化により高伝送容量を実現している。また、微細なシリコン基板貫通電極 TSV の形成について、信号伝送特性に影響する浮遊容量を低減させた低容量化 TSV の設計・試作を行い、電気評価により 10 μm 径 50 μm 深さの TSV について 0.25 pF/TSV (8 積層時でも 2 pF) の低容量特性を検証した。残念ながら、シリコン基板貫通電極も含めた積層後の伝送特性評価については、予算不足でプロジェクト期間内に実施できなかった。

図 14 に Cool Interconnect の仕様に基づく超並列バスインターフェース回路の通信機能を評価するための Cool Interconnect 評価用テスト IC デバイスの写真を示す。中心部 2.16 mm 角の領域に信号用 TSV、バンプが形成され、4 辺の周囲に電源 (Vdd: 2.5 V、Vio: 3.3 V)、GND 用 TSV、バンプが形成される。テスト IC デバイスの試作は、0.25 μm ノード CMOS ファンドリのシャトルサービスを利用して実施した。図 15 に、円錐バンプのみ (TSV なし) を形成したテスト IC デバイスを用いて熱圧着法により対面

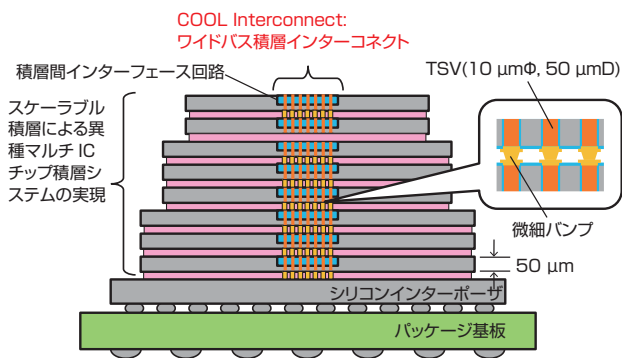


図 12 Cool Interconnect の概念図

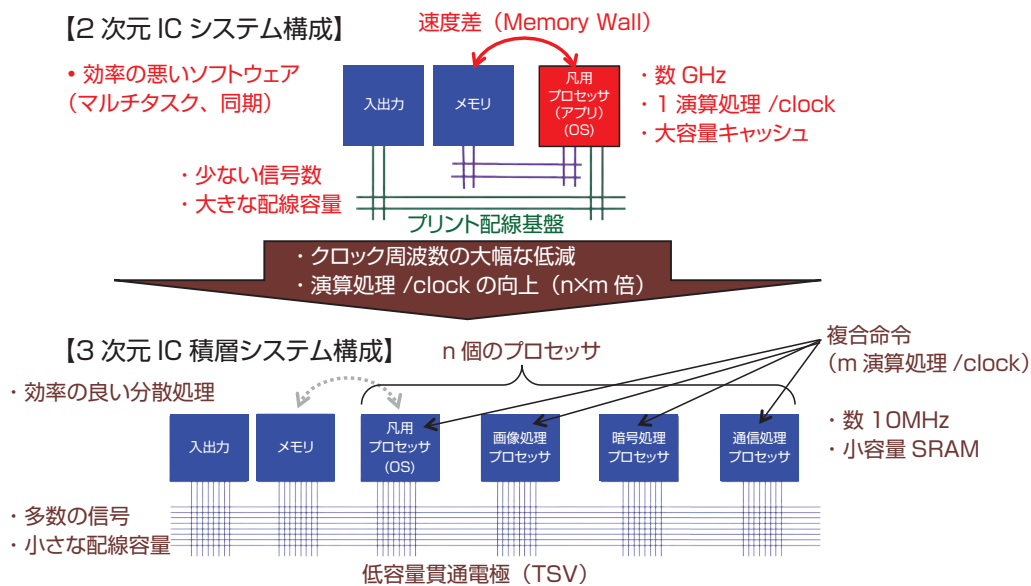


図 13 Cool Interconnect による 3次元 IC 積層システムの省電力化



で積層した後の断面構造を観察した顕微鏡写真を示す。図 16 には、評価ボードに搭載された積層後のテスト IC デバイスを示す。図 17 は、デバイスに組み込まれた超並列バスインターフェース通信機能について、評価実験を行った結果である。クロック周波数を 2-50 MHz の範囲で変化させた際のインターフェース回路における消費電力を示している。87 mW の低消費電力条件で 51.2 Gbps (1024 bit・50 MHz) の大容量伝送動作が検証された<sup>[36][37]</sup>。2.5V 電源動作の 0.25  $\mu\text{m}$  ノード CMOS デバイスからなるインターフェース回路としては、十分に低消費電力で大容量伝送が実現できた。より微細なノードのデバイスを用いれば、さらなる省電力化が期待できる。

なお、図 10 で説明した電気熱協調 IC 設計フローに基づいて、図 18 に 500 MHz 動作時 (発熱を強調するため、高いクロック周波数を設定している。)の超並列バスインターフェース通信インターフェース回路について、理想的ヒートシンク上に配置された単体シリコンチップにおける温度上昇分のプロファイルを解析した結果を示す<sup>[19]</sup>。ヒートシンク

による放熱が効いており、少ない温度上昇となっている。今後の温度実測実験と比較したシミュレーション解析においては、放熱経路の熱特性パラメータの把握が重要となる。

シリコン基板貫通電極 TSV を形成した、評価用 TEG による積層後の動作検証実験については、開発期間の制限と開発リソースの不足により、試作検証を実施できなかったため、今後の研究開発プロジェクトでの本格試作による、検証が望まれる。

## 5 研究成果に関する今後の展開

3次元 IC 積層実装技術の実用化開発は、産総研を研究拠点とする NEDO プロジェクトの立ち上げにより、新たな段階に入った。具体的には、2013 年度にセンサーデバイスと信号処理デバイスを積層してリアルタイム高速画像処理を狙った 3次元異種 IC 積層実装技術を含む NEDO スマートデバイス研究開発プロジェクト<sup>[38]</sup>の立ち上げが行われ、現在、研究開発が進行中である。その開発計画では、応用システムの製造メーカーから設計部隊の参画を得て、本格的なウエハ単位での実用レベル CMOS-IC デバイスの設計試作を実施する計画を含んでいる。同時に、製造装置メーカーの参画によりウエハレベルでの 3次元 IC 積層実装プロセスを実施できる試作製造プロセスラインの整備を産総研内で着実に進めることにより、プロジェクト終了時に本

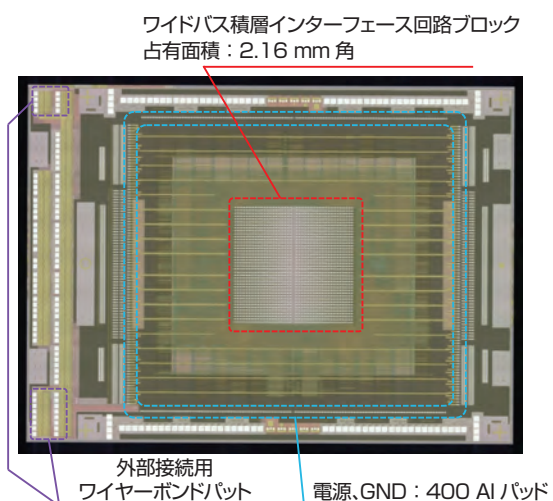


図 14 Cool Interconnect 評価用テスト IC デバイス

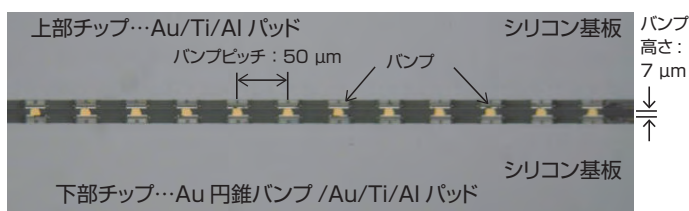


図 15 熱圧着法による積層後のバンブ接続構造断面の顕微鏡写真

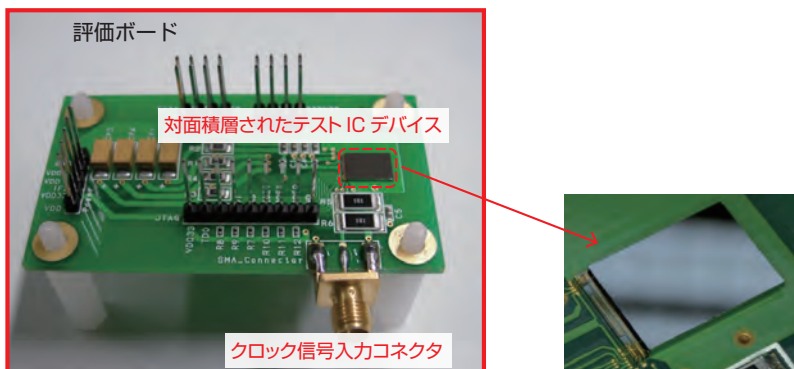


図 16 評価ボードに搭載された積層後のテスト IC デバイス



格的な国内における3次元 IC 積層試作拠点として機能させることを目指している。なお、TSV、バンプ形成との積層工程については、当面、チップレベルで実施されるが、ウエハレベルでの課題解決についても、同時並行的に進められる予定である。

最後に実証研究開発の経緯をまとめて表1に示す。

## 6 今後の課題

この研究が目指す最終的なアウトカムとしての実用システムに対応した設計・試作・評価の研究開発環境構築については、非常に多くの研究人材と研究リソースの投入が必要である。これまで研究開発を進めてきた要素技術の統合を進め、大きく発展させるために、相当規模の研究リソース確保に向けて、努力したい。

次世代のさまざまな低消費電力デバイス技術の開発が進められており、それらの技術と3次元 IC 積層実装技術を組み合わせることにより画期的な高性能・低消費電力システムの実現が期待できる。そのために、実用システムに対

表1 実証研究開発の経緯

開発経緯	
2007年	ヘテロジニアスマルチコアアーキテクチャと3次元 IC 積層実装の融合検討
2008年	積層インターフェース規格の基礎研究（経済産業省中小企業支援予算）
2009-12年	積層インターフェース回路の実証研究（NEDO 省エネルギー革新事業）
2013-18年	3次元 IC 積層実装技術の実用開発（NEDO 次世代スマートデバイス開発プロジェクト）実施中

応した3次元 IC 積層実装システムの設計・試作・評価の環境を活用して、回路・システム技術分野の研究者、技術者と協力して、3次元 IC 積層実装のメリットを最大限に生かした画期的で高機能な回路・システム技術の開発を加速する必要がある。今後、産総研に構築される3次元 IC 積層試作拠点が産学連携のオープンイノベーション拠点として有効に活用されることを期待したい。

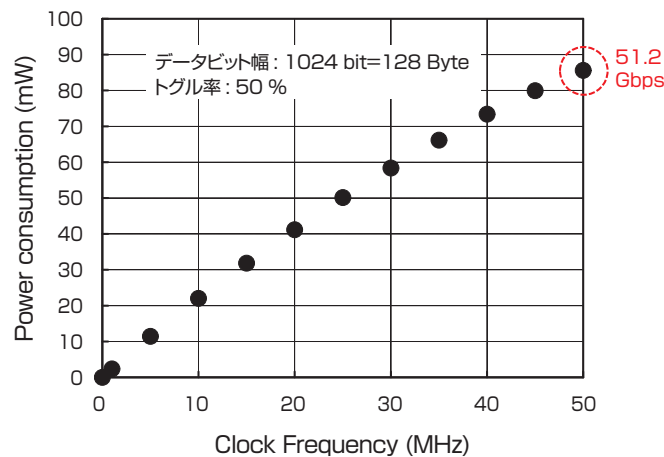


図17 並列バスインターフェース回路におけるクロック周波数に対する消費電力の依存性

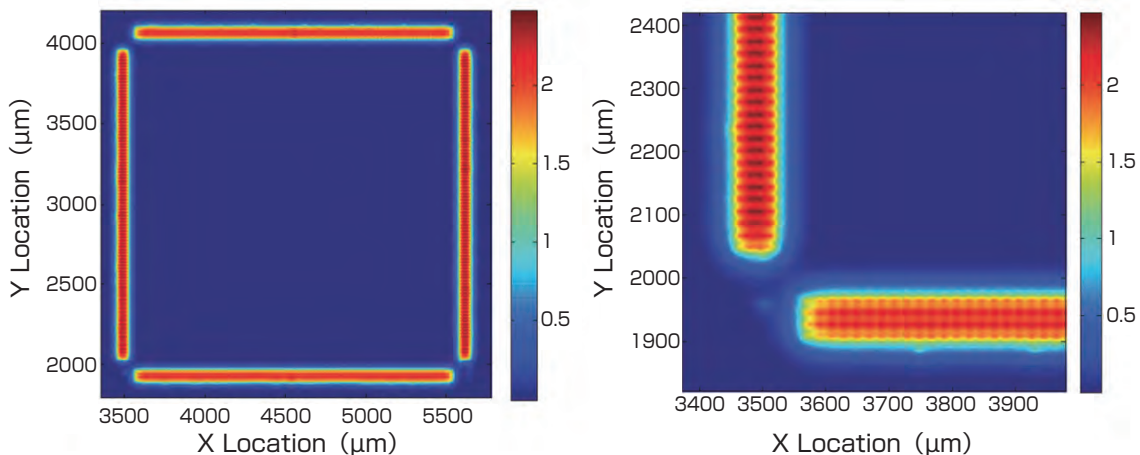


図18 500 MHz 動作時の積層インターフェース回路における温度プロファイルのシミュレーション解析結果

## 用語の説明

用語1: SIP: System in Packageの略称。集積回路ICシステムにおいて、動作に必要な機能を持つ複数のICチップを一つのパッケージ内に集積する方式。マイクロプロセッサチップを中心に各種のコントローラ回路チップやメモリチップ等を積層してパッケージ基板に実装する構成が多い。

用語2: SOC: System on Chip の略称。集積回路ICシステムにおいて、動作に必要な機能を持つ複数の回路ブロックを一つの半導体チップ内に集積する方式。マイクロプロセッサをコアに置いて、各種のコントローラ回路やメモリ等を統合したチップ構成が多い。一般の半導体チップは機能ごとに提供されるため、回路基板上に複数のチップを実装して相互に接続する必要があるのに対して、SOCでは複数のチップに分かれていた機能を統合し、一つのチップとして提供することができる。

用語3: TSV: Through-Silicon Viaの略称。シリコン半導体集積回路ICチップの基板内部を縦方向に貫通する電極。複数のICチップを積層して、高密度に集積できる3次元IC積層実装技術で用いられる。

用語4: CPU: Central Processing Unitの略称。コンピューターにおいて中心的な情報処理装置として動作する集積回路。プログラムによって、さまざまな数値計算や情報処理、機器制御等を実行することができる。

用語5: IP (コア) : Intellectual Property (Core) の略称。半導体集積回路ICを構成するための部分的な回路情報で、特に機能単位でまとめられているものを指す。単にIPと呼ぶ場合もある。

用語6: シリコンフォトニクス: 半導体集積回路として広く使われるシリコン基板に微細な光導波路構造を作り込み、さまざまな機能を持つデバイスの一つの小型チップに集積する技術。半導体集積回路と光デバイスの一体集積が可能となるため、電子システムの超小型化・低消費電力化を実現する技術として注目されている。

用語7: ミニマルファブ: 産総研が提唱している、ハーフィンチウエハを製造基板単位とする革新的な半導体製造生産システムであり、(1) ハーフィンチ径ウエハ、(2) 装置サイズ30 cm幅、(3) 局所クリーン化生産システムによるクリーンルームレス、という3点を特徴とする。

用語8: TEG: Test Element Groupの略。本格的な集積回路ICの設計・製造に先立って、基本的な諸々の設計パラメータを抽出することを目的として特別に設計・製造された評価用ICチップ。

## 参考文献

[1] 矢野経済研究所: 携帯電話の世界市場に関する調査結果 2015, (2015).

[2] 竹井淳: CPUアーキテクチャーの変遷, 第8回CKP研究会, (2012).

[3] 配線板製造技術委員会: SiPの技術ロードマップ, エレクトロニクス実装学会誌, 9 (1), 13-19 (2006).

[4] M. Koyanagi, H. Kurino, K. W. Lee, K. Sakuma, N. Miyakawa and H. Itani: Future system-on-silicon LSI chips, *IEEE Micro*, 18 (4), 17-22 (1998).

[5] T. Fukushima, H. Kikuchi, Y. Yamada, T. Konno, J. Liang, K. Sasaki, K. Inamura, T. Tanaka and M. Koyanagi: New three-dimensional integration technology based on reconfigured wafer-on-wafer bonding technique, *IEEE Int. El. Devices Meet. (IEDM)*, 985-988 (2007).

[6] K. Takahashi, H. Terao, Y. Tomita, Y. Yamaji, M. Hoshino, T. Sato, T. Morifuji, M. Sunohara and M. Bonkohara: Current status of research and development for three-dimensional chip stack technology, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40, 3032-3037 (2001).

[7] J. M. Yannou, "Roadmap Analysis: 3D Wafer Level Packaging", *ESTC2010 Workshop 3D WLP*, (2010).

[8] IBM, ソニー, SCEI, 東芝: IBM, ソニー, SCEI, 東芝 次世代プロセッサ「Cell」の技術仕様を公開, プレスリリース (2005).

[9] M. Kawano, N. Takahashi, Y. Kurita, K. Soejima, M. Komuro and S. Matsui: Three-dimensional packaging technology for stacked DRAM with 3-Gb/s data transfer, *IEEE Trans. Electron Devices*, 55 (7), 1614 - 1620 (2008).

[10] T. Maebashi, N. Nakamura, Y. Sacho, S. Nakayama, E. Hashimoto, S. Toyoda and N. Miyakawa: High density assembly technology using stacking method, *IEEE 9th VLSI Packaging Workshop of Japan*, 149-152 (2008).

[11] P. Ramm, M. J. Wolf, A. Klumpp, R. Wieland, B. Wunderle, B. Michel and H. Reichl: Through silicon via technology - processes and reliability for wafer-level 3D system integration, *Proc. 58th ECTC*, 841-846 (2008).

[12] J. U. Knickerbocker, P. S. Andry, B. Dang, R. R. Horton, C. S. Patel, R. J. Polastre, K. Sakuma, E. S. Sprogis, C. K. Tsang, B. C. Webb and S. L. Wright: 3D silicon integration, *Proc. 58th ECTC*, 538-543 (2008).

[13] M. Motoyoshi: Through-silicon via (TSV), *Proc. IEEE*, 97 (1), 43-48 (2009).

[14] U. Kang, HJ. Chung, S. Heo, SH. Ahn, H. Lee, SH. Cha, J. Ahn, DM. Kwon, J. H. Kim, JW. Lee, HS. Joo, WS. Kim, HK. Kim, EM. Lee, SR. Kim, KH. Ma, DH. Jang, NS. Kim, MS. Choi, SJ. Oh, JB. Lee, TK. Jung, JH. Yoo and C. Kim: 8Gb 3D DDR3 DRAM using through-silicon-via technology, *ISSCC Digest of Technical Papers*, 130-131 (2009).

[15] M. Scannell, G. Poupon, L. Di Cioccio, D. Henry, J.C. Souriau, F. Grossi, P. Leduc, P. Batude, M. Vinet, P. Geugen, L. Clavelier and N. Sillon: 3D packaging and interconnect technologies at CEA-Leti Minatoc, *Proc. ICEP*, 191-195 (2009).

[16] ミニマルファブハンドブック, 産業タイムズ社, (2013).

[17] B.T. Tung, X. Cheng, N. Watanabe, F. Kato, K. Kikuchi and M. Aoyagi: Investigation of low-temperature deposition high-uniformity coverage parylene-HT as a dielectric layer for 3D interconnection, *Proc. 64th ECTC*, 1926-1931 (2014).

[18] 五味義宏, 保坂泰司, 平林初人, 若林優治, 山岸光, 大里啓孝, 山地泰弘, 菊地克弥, 岡田義邦, 仲川博, 青柳昌宏: LSI高密度実装に向けた錐形状微細金バンプの形成, 第16回マイクロエレクトロニクスシンポジウムMES2006論文集, 23-26 (2006).

[19] 居村史人, 劉小軍, 根本俊介, 加藤史樹, 菊地克弥, 鈴木基史, 仲川博, 青柳昌宏, 五味義宏, 斉藤伊織, 長谷川弘: ナノ粒子堆積技術によるAu錐形バンプの作製, 第25回エレクトロニクス実装学会講演大会論文集, 229-232 (2011).

- [20] F. Imura, N. Watanabe, S. Nemoto, W. Feng, K. Kikuchi, H. Nakagawa and M. Aoyagi: Development of micro bump joints fabrication process using cone shape Au bumps for 3D LSI chip stacking, *Proc. 64th ECTC*, 1915-1920 (2014).
- [21] Y. Yamaji, T. Yokoshima, N. Igawa, K. Kikuchi, H. Nakagawa and M. Aoyagi: A method of fabricating bumpless interconnects applicable to wafer-scale flip-chip bonding, *Proc. 10th EPTC*, 657-662 (2008).
- [22] T. Yokoshima, Y. Yamaji, K. Kikuchi, H. Nakagawa and M. Aoyagi: A method of “chemical flip-chip bonding” without loading and heating for ultra-fine chip-to-substrate interconnects, *Proc. 59th ECTC*, 80-86 (2009).
- [23] K. Kikuchi, K. Takemura, C. Ueda, O. Shimada, T. Gomyo, Y. Takeuchi, T. Okubo, K. Baba, M. Aoyagi, T. Sudo and K. Otsuka: Low-impedance power distribution network of decoupling capacitor embedded interposers for 3-D integrated LSI system, *Proc. 18th EPEPS*, 25-28 (2009).
- [24] K. Kikuchi, M. Aoyagi, M. Ujiie and S. Takayama: Development of decoupling capacitor embedded interposers using narrow gap chip parts mounting technology with wideband ultralow PDN impedance, *Proc. EDAPS*, 9-12 (2013).
- [25] 青柳昌宏, 菊地克弥, 鈴木基史, 仲川博: 3次元LSI積層集積技術に求められる微細構造に対応した局所電気特性評価技術, *電子情報通信学会和文論文誌C*, J93-C (11), 388-398 (2010).
- [26] K. Kikuchi, H. Oosato, S. Itoh, S. Segawa, H. Nakagawa, K. Tokoro and M. Aoyagi: 10-Gbps signal propagation of high-density wiring interposer using photosensitive polyimide for 3D packaging, *Proc. 56th ECTC*, 2, 1294-1299 (2006).
- [27] K. Kikuchi, C. Ueda, K. Takemura, O. Shimada, T. Gomyo, Y. Takeuchi, T. Okubo, K. Baba, M. Aoyagi, T. Sudo and K. Otsuka: Low-impedance evaluation of power distribution network for decoupling capacitor embedded interposers of 3D integrated LSI system, *Proc. 60th ECTC*, 1455-1460 (2010).
- [28] N. Watanabe, M. Eto, K. Kawano and M. Aoyagi: Fine-pitch probing on TSVs and microbumps using a chip prober having a transparent membrane probe card, *Proc. 64th ECTC*, 2003-2007 (2014).
- [29] M. Aoyagi, F. Imura, S. Melamed, S. Nemoto, N. Watanabe, K. Kikuchi, H. Nakagawa, M. Hagimoto and Y. Matsumoto: Development of testing technology for wide bus chip-to-chip interconnection in 3D LSI chip stacking system, *Workshop Digest of 4th IEEE International Workshop on Testing 3D Stacked ICs*, (2013).
- [30] M. Aoyagi, N. Watanabe, M. Suzuki, K. Kikuchi, S. Nemoto, N. Arima, M. Ishizuka, K. Suzuki and T. Shiomi: New optical three dimensional structure measurement method of cone shape micro bumps used for 3D LSI chip stacking, *Proc. 3DIC*, 1-5 (2013).
- [31] S. Melamed, F. Imura, M. Aoyagi, H. Nakagawa, K. Kikuchi, M. Hagimoto and Y. Matsumoto: Method for back-annotating per-transistor power values onto 3DIC layouts to enable detailed thermal analysis, *Proc. ICEP 2014*, 239-242 (2014).
- [32] S. Melamed, T. Thorolfsson, T. R. Harris, S. Priyadarshi, P. Franzon, M. B. Steer and W. R. Davis: Junction-level thermal analysis of 3D integrated circuits using high definition power blurring, *IEEE Trans. Comput.-aided Design Integr Circuits Syst.*, 31 (5), 676-689 (2012).
- [33] Y. Matsumoto and T. Nakamura: Scalable multi-core SoC platform for low-powered architecture, *Proc. Cool Chips X*, (2007).
- [34] M. Chacin, H. Uchida, M. Hagimoto, T. Miyazaki, T. Ohkawa, R. Ikeno, Y. Matsumoto, F. Imura, M. Suzuki, K. Kikuchi, H. Nakagawa and M. Aoyagi: COOL interconnect low power interconnection technology for scalable 3D LSI design, *Proc. Cool Chips XIV*, 1-3 (2011).
- [35] Y. Matsumoto, T. Morimoto, M. Hagimoto, H. Uchida, N. Hikichi, F. Imura, H. Nakagawa and M. Aoyagi: Cool System scalable 3D stacked heterogeneous Multi-Core/Multi-Chip architecture for ultra low-power digital TV applications, *Proc. Cool Chips XV*, 1-3 (2012).
- [36] 居村史人, 根本俊介, 渡辺直也, 加藤史樹, 菊地克弥, 仲川博, 萩本有哉, 内田裕之, 大森貴志, 日比康守, 松本祐教, 青柳昌宏: 3次元積層LSIシステムに向けた超並列通信バス方式によるチップ間インターコネクト技術, *電子情報通信学会技術研究報告*, 112 (170), 43-48 (2012).
- [37] M. Aoyagi, F. Imura, S. Nemoto, N. Watanabe, F. Kato, K. Kikuchi, H. Nakagawa, M. Hagimoto, H. Uchida and Y. Matsumoto: Wide bus chip-to-chip interconnection technology using fine pitch bump joint array for 3D LSI chip stacking, *Proc. IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)*, 183-186 (2012).
- [38] NEDO次世代スマートデバイス開発プロジェクト, [http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100059.html](http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100059.html), 閲覧日2013-10-31.

#### 執筆者略歴

青柳 昌宏 (あおやぎ まさひろ)

1982年名古屋工業大学工学部電子工学科卒。同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所に入所。以降、超伝導デバイスの集積回路・システム技術、高速・高密度実装システム技術等の研究開発等に従事。1991年名古屋工業大学博士(工学)取得。1994-1995年英国国立物理学研究所客員研究員。2001年(独)産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門高密度SIグループ長、2011年ナノエレクトロニクス研究部門3D集積システムグループ長。2012年同副研究部門長。2015年産総研つくばイノベーションアリーナ推進センター連携推進ユニット長。埼玉大学大学院連携教授。エレクトロニクス実装学会、応用物理学会、電気学会、日本機械学会、表面技術協会、IEEE、IMAPS、IET、SPIE、ASME各会員。3次元実装技術全般の研究開発を担当。



居村 史人 (いむら ふみと)

2002年熊本大学工学部電気システム工学科卒。2007年熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程システム情報科学専攻修了。博士(工学)。同年(独)産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門に所属、産総研特別研究員。2012年ミナマルファブ技術研究組合研究員。2015年産総研エレクトロニクス研究部門支援研究員。3次元積層実装基盤技術の研究開発を担当。



加藤 史樹 (かとう ふみき)

2004年立命館大学卒。2009年同大学院理工学研究科博士課程フロンティア理工学専攻修了。博士(工学)。同年(独)産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門に所属、産総研特別研究員。2012年産総研先進パワーエレクトロニクス研究センター特別研究員。2014年同任期付研究員。エレクトロニクス実装学会会員。3次元積層実装放熱技術の研究開発を担当。





菊地 克弥（きくち かつや）

1996年埼玉大学工学部電気電子工学科卒。2001年同大学院理工学研究科博士後期課程情報数理工学専攻了。博士（工学）。同年、(独)産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門高密度SIグループ所属。以降、LSI電子実装技術における三次元実装技術をはじめとする次世代電子実装技術、超高速・高周波実装技術、およびその計測・評価技術の研究開発等に従事。2011年同ナノエレクトロニクス研究部門3D集積システムグループ所属。2015年同3D集積システムグループ長。電子情報通信学会、エレクトロニクス実装学会、応用物理学会、IEEE各会員。3次元積層実装設計評価技術の研究開発を担当。



渡辺 直也（わたなべ なおや）

2004年九州工業大学大学院情報工学研究科博士後期課程修了。博士（情報工学）。九州工業大学、くまもとテクノ産業財団、福岡県産業・科学技術振興財団に所属。2011年(独)産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門研究員。IEEE、エレクトロニクス実装学会、応用物理学会各会員。3次元積層実装基盤技術の研究開発を担当。



鈴木 基史（すずき もとひろ）

1983年名古屋工業大学工学部電子工学科卒。同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。2007年エレクトロニクス研究部門高密度SIグループ。2009年評価部研究評価推進室。2010年同高密度SIグループ。2011年同3D集積システムグループ。2013年退職。エレクトロニクス実装学会、応用物理学会、情報処理学会各会員。3次元実装電気評価技術の研究開発を担当。



仲川 博（なかがわ ひろし）

1978年東京理科大学卒、1996年東京理科大学博士（工学）取得。(独)産業技術総合研究所において、超伝導集積回路、高密度電子実装技術、パワーエレクトロニクス実装技術の各研究に従事。エレクトロニクス実装学会、電気学会、応用物理学会各会員。3次元実装基盤技術の研究開発を担当。



岡田 義邦（おかだ よしくに）

1965年名古屋大学工学部電子工学科卒。1970年同大学院博士課程修了。同年通商産業省工業技術院電気試験所入所。論理システム・分散システム・情報ベース研究室・情報計算センター長を経て1999年技術研究組合新情報処理研究機構、2002年(株)知識情報研究所に所属。2004年(独)産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門高密度SIグループに所属。2010年退職。情報処理学会会員。3次元実装インターフェース技術の研究開発を担当。



横島 時彦（よこしま としひこ）

1997年早稲田大学理工学部応用化学科卒。2002年同大学院博士課程修了。博士（工学）。2001年早稲田大学理工学部助手。2003年同理工学総合研究センター客員講師。2004年同各務記念材料技術研究所客員講師（秋田県高度技術研究所出向）。2005年(独)産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門特別研究員。3次元実装プロセス技術の研究開発を担当。現在、早稲田大学理工学術院上級研究員・研究院教授。



山地 泰弘（やまじ やすひろ）

1983年東京工業大学工学部金属工学科卒。1985年同大学院総合理工学研究科材料科学専攻修士課程修了。同年(株)東芝入社。半導体事業本部にてアドバンスト・LSIパッケージ開発業務を担当。1999年技術研究組合超先端電子技術開発機構出向。2007年(独)産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門テクニカルスタッフ。2010年埼玉大大学院博士課程修了。博士（工学）。3次元実装プロセス技術の研究開発を担当。現在、(株)ジェイデバイス開発部所属。



根本 俊介（ねもと しゅんすけ）

2006年いわき明星大大学院修士課程修了。同年(株)アルプスビジネスサービス所属。2009年(独)産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門テクニカルスタッフ。2015年埼玉大大学院博士課程在学中。電子情報通信学会、エレクトロニクス実装学会各会員。3次元実装プロセス技術の研究開発を担当。



Thanh Tung BUI（たん とうん ぶい）

2004年ベトナム国家大学卒。2006年ベトナム国家大学電気電子通信工学部MEMSとマイクロシステム研究室研究員。2008年立命館大学大学院理工学研究科創造理工学専攻修士課程修了。2011年立命館大学大学院理工学研究科総合理工学専攻博士課程後期課程修了。博士（工学）。同年(独)産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門特別研究員。光電気複合実装技術、3次元実装プロセス技術の研究開発を担当。



Samson MELAMED（さむそん めらめど）

2004年メリーランド大学コンピュータ工学科卒。2007年ノースカロライナ州立大学電気工学専攻修士課程修了。2011年ノースカロライナ州立大学電気工学博士課程修了。PhD。2012年(独)産業技術総合研究所JSPSリサーチフェロー（欧米短期）。2013年産総研特別研究員。2014年JSPSリサーチフェロー（定着促進）。3次元実装設計解析技術の研究開発を担当。





## 査読者との議論

### 議論1 この論文の位置付け

コメント（小林 直人：早稲田大学研究戦略センター）

この論文は3次元 IC チップ積層技術開発のためのシナリオを描き、そのシナリオに沿って目標を実現する要素技術とその統合設計技術等と成果を述べたものであり、シンセオロジーの論文としてふさわしいものと言えましょう。ただし、最も重要な研究目標やその特色、要素技術を統合する中間統合技術の詳細がやや不明確なので、その点を補強するとともに研究全体を俯瞰した記述や図示等を期待します。

回答（青柳 昌宏）

「要素技術を統合する中間統合技術」について、まとめて記述できる段階にはまだないと考えております。次回の執筆機会がもしあるとすれば、異分野融合の研究手法の例として、ぜひチャレンジしてみたいと思っております。

コメント（金丸 正剛：産業技術総合研究所）

この論文は、集積回路の集積度向上を目指す新しい手法である3次元積層技術に関する産総研での研究開発の成果を報告したものです。3次元積層技術はアイデアとしてはこれまでもありましたが、集積回路の集積度が素子の微細化により進んでいるときには、3次元化の技術的困難さもあることから研究開発の主題ではありませんでした。微細化限界が認識されるようになった現時点では、改めて3次元積層技術が注目されています。しかし、この技術は多くの技術課題があり、そのための要素技術開発が必要です。産総研がこの課題に取り組むために、限られた研究リソースを効果的に利用する戦略を取ってきたと考えます。その観点での取り組みをこの論文でより明確に論じていただければ、要素技術のインテグレーションが必要な他の研究課題を遂行する場合の有益な情報になると考えます。

回答（青柳 昌宏）

3次元積層技術の課題に取り組むために、限られた研究リソースを効果的に利用する戦略の具体的な取り組みについて、課題の優先順位と研究リソースの確保状況について、時系列で分かるように追記いたしました。

### 議論2 目標について

コメント（小林 直人）

この論文では3次元 IC チップ積層技術の系統的な開発を目指していることは分かりますが、他にはない特色ある実用技術として何をどの程度実現することを目標としているのか、またその技術の実現により企業はどのようにそれを利用できるのか等を記述されることを望みます。特に、第6章に「最終的なアウトカムとしての実用システムに対応した設計・試作・評価の環境提供」と記されていますが、それを最終目標であるとした場合、この研究では現実的なアウトプットとして何を目標としたのか等の記載があるとよいと思います。記載の個所としては、2章の最後がよいと思いますが、その場合、2章のタイトルを例えば「3次元 IC 積層実装による電子ハードウェアシステム集積技術の高度化とこの研究の狙い」等としてはいかがでしょうか。

回答（青柳 昌宏）

ご指摘いただきました「この研究で目標とした現実的なアウトプットの記載があるとよいと思います。」について、2章の最後に追記をいたしました。

### 議論3 競合技術との比較

質問・コメント（金丸 正剛）

図1で示されたSOC、SiP、3次元積層技術の比較を、電子システムを構築する観点での利害得失をこの論文で分かりやすく論じてください。その結果として、技術的困難さの高い3次元積層技術が期待される理由が明確になると、この論文の価値が読者に理解されるのではないのでしょうか。

回答（青柳 昌宏）

3次元積層技術の実施形態は、性能向上の指標として、性能、消費電力、サイズ、設計コスト、製造コスト等を考えたとき、さまざまな値の組み合わせ（性能優先、コスト優先など）で実施可能であり、単純な利害得失を比較するのが難しいと考えています。この論文では、代表例として、消費電力優先の実施例を取り上げています。

### 議論4 3次元積層技術の具体的応用分野

質問・コメント（小林 直人）

汎用的な半導体技術は、開発に大きな投資が必要であり、また競争も厳しく変化の速い技術です。そのためSOC技術はビジネス上の苦戦を強いられていると文中（第2章）にも書かれていますが、3次元積層技術も役立つとなればこのようなハイエンド技術においても極めて近未来に実用化される可能性があり、同様のビジネス上の課題が生起すると思われます。その一方で、センサー、アクチュエータ等と組み合わせた機能性半導体デバイスの場合にはより特殊な技術も必要だと思われ、すでにTSVが利用されている部分もあります。この研究で狙っている3次元積層半導体の出口（具体的応用分野）はどんな点なのでしょう。

回答（青柳 昌宏）

この研究で狙っている3次元積層半導体の出口（具体的応用分野）について、5章に追記をしました。

### 議論5 3次元積層技術によるコスト削減

質問・コメント（小林 直人）

3次元積層技術はすでに世界中で注目されており、すでにSOCとDRAMの積層化等が取り組まれているものの、現状ではコストが隘路になっていると聞いています。文中（第2章）では、3次元 IC チップ積層技術により開発・製造のコストもSOCに比べて大幅削減が可能と書かれていますが、SiP技術の発展形としての3次元積層技術の具体的なコスト見積もりや見通しがあればご教示ください。

回答（青柳 昌宏）

コストに関する見積もりについて、公開情報の範囲内では、確度のある見積もりが困難な状況です。一般的な記述を追記するとともに、技術調査会社の関連資料を参考文献に追加しました。

# レアメタル資源の安定供給を目指して

## — レアアース資源確保のための取り組みと課題 —

高木 哲一

新興工業国の経済発展により、21世紀に入り金属資源価格が高騰し、さらに2009-2012年には中国のレアアース輸出制限によるレアアース危機が勃発した。これらを受けて、2010年より産総研では、レアメタル資源研究拠点の整備、海外地質調査機関との協力関係の構築を進めた。さらに、南ア、米国、ブラジル、モンゴル等でのレアアース資源調査を積極的に進めた。特に南アでは、有望な重レアアース鉱地を発見した。2011年秋以降、レアアース価格の暴落により、世界中のレアアース資源開発計画が頓挫し、レアメタル資源開発のリスクの高さを露呈した。民間にそのリスクに耐えて次のレアアース危機へ備えを求めるのは困難であり、産総研による調査研究体制の継続が求められている。

**キーワード:** レアメタル、鉱物資源、レアアース、安定供給、新興工業国

## Securing a stable supply of critical raw metals

### – Efforts and issues for the securement of rare-earth resources –

Tetsuichi TAKAGI

In the early 21st century, metal prices soared due to the economic development of newly industrialized countries. Moreover, a rare-earth resource crisis occurred between 2009 and 2012 due to export restrictions imposed by China. Against this background, AIST set up a research base for critical metal resources, and established collaborative relationships with some foreign geological survey agencies (GS) from 2010. Furthermore, joint surveys were conducted with GS of South Africa, United States, Brazil, Mongolia, and others. While undertaking these surveys, we found a promising prospect for heavy rare-earth in South Africa. After the autumn of 2011, however, the prices of rare-earths collapsed, and the majority of rare-earth exploration/mining programs worldwide were put on hold. This sequence of events revealed the risks that accompany the development of critical metal resources. To mitigate the impact of future crises, AIST should continue research and development of rare-earth resources.

**Keywords:** Rare metal, mineral resource, rare-earths, stable supply, BRICS

## 1 はじめに

### 1.1 レアメタルとは

金属資源は、鉄やアルミニウム等大量に生産・消費されるコモンメタル（汎用金属）、産業の基礎材料となるベースメタル、金・銀等の貴金属、産出量・使用量共に少ないが産業に重要なレアメタル等に分類される（図1）。日本では、レアメタルとして31種類の金属が経済産業省により指定され、他の金属資源とは区別して安定供給対策が講じられている<sup>[1]</sup>。レアアース（希土類元素）はレアメタル中の1金属として扱われるが、実際にはランタノイド元素15種にスカンジウム（Sc）、イットリウム（Y）を加えた17種の金属の総称である。ランタノイド元素の内、原子量がユーロピウム（Eu）より軽い元素を軽レアアース、重い元素を重レアアースと呼び区別する。軽レアアースは蛍光材、ガラス研磨剤、

鉄鋼用脱酸素剤、Ni-H電池、石油精製用触媒等に、重レアアースは高性能磁石に主に用いられる。

### 1.2 レアメタルショック

日本の金属鉱業は、第二次世界大戦後、鉱量の減少・枯渇等により徐々に縮小していたが、1980年代以降の円高、賃金の上昇、公害問題等により急速に衰退した。主力の大規模・高品位鉱山も相次いで採掘を終了し（秋田県北鹿地区黒鉱、1993年；岐阜県神岡鉱山、2001年；北海道豊羽鉱山、2006年）、現在は数ヶ所の金鉱山（鹿児島県菱刈鉱山等）が稼行するのみとなっている。今日、金属資源のほぼ全量を輸入に頼る日本の産業にとって、その安定供給は死活問題である。さいわい1980～2000年代初頭まで、金属資源の価格は比較的安定しており、経済力により自由に輸入できる時代が続いた。この時期、鉱物資源確保

産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 〒305-8567 つくば市東1-1-1 中央第7

Institute for Geo-Resources and Environment, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: takagi-t@aist.go.jp

Original manuscript received January 9, 2015, Revisions received September 7, 2015, Accepted September 10, 2015

に対する危機感は、官民共に十分に高かったとは言えない。

ところが、安定していた非鉄金属資源の価格が、2004年頃から急激に上昇を始めた。「レアメタルショック」の始まりである(図2、3)。これは、主にBRICS等の新興工業国における金属資源消費量が、市場のバッファー能力を超えて増加したことに起因する。この価格高騰はリーマンショックで一時収束するが、その後また価格が上昇し現在に至っている。レアメタル、ベースメタル等の非鉄金属資源は世界的な争奪戦の様相を呈しており、民間企業の対応範囲を超えて、国対国の構図となっている。鉱物資源の確保には、経済力のみならず、政治・外交や科学技術等の総合力が必要な時代に入ったと言える。経済産業省は、2009

年7月に「レアメタル確保戦略」<sup>[2]</sup>を策定し、国が前面に出て資源確保戦略を積極的に推進する政策を打ち出した。

## 2 レアメタル資源研究の目的

### 2.1 レアメタル資源研究

レアメタルの研究は、材料科学と地球科学に大きく二分することができる。前者は、レアメタルを利用した高性能材料、レアメタルの使用量削減・代替材料、リサイクル等のための研究開発が目的である。一方、後者はレアメタル資源の探査、資源評価が目的である(選鉱・製錬技術の開発は、一部両者にまたがっている)。産総研ではこれらレアメタル関連研究を総合的に実施していることから、2006年

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*1	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	*2	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn			Fl			Lv

*1	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
*2	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

<b>Ti</b>	レアメタル	<b>Cu</b>	ベースメタル	*1	ランタノイド
<b>Dy</b>	レアアース (レアメタルの一部)	<b>Au</b>	貴金属	*2	アクチノイド
<b>Fe</b>	コモンメタル (汎用金属)				

図1 金属資源の一般的な分類

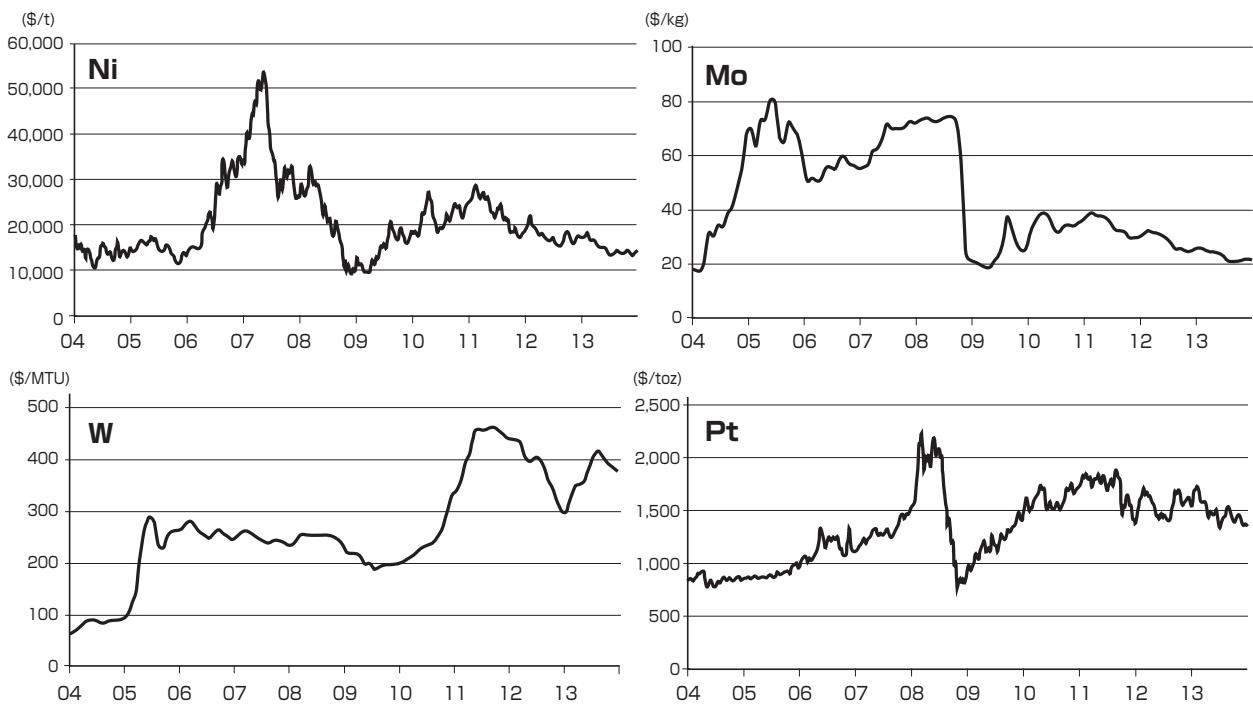


図2 主要レアメタル価格の推移 (ロンドン金属取引所価格を基に経済産業省が作成)

から産総研内にレアメタル・タスクフォースを設置し、材料科学と地球科学を車の両輪として研究の促進を図ってきた<sup>[3]</sup>。この論文では、レアメタルの地球科学的研究を「レアメタル資源研究」として取り上げることにする。

## 2.2 レアメタル資源の特徴

鉱物資源開発は、探査から開発まで一般に10～15年の時間がかかる。その間の各種調査や試験に多額の費用がかかるため、開発後の利益を確実に見込むことができなければ事業を推進することができない。動き出した開発計画が、可採鉱量・品位の不足や採掘・選鉱・製錬コストの問題等から途中で中止になる場合も数多い。ベースメタル、貴金属等の非鉄金属は、国際市場が形成されており、安定した価格で利益を上げることができる。また、銅・亜鉛は日本国内で製錬所が稼働しており、鉱石を炉に継続的に供給する必要があるため、販売量が安定している。したがって、大手鉱山会社・総合商社がこれらの開発リスクを負担し、積極的な投資・開発を推進している。一方レアメタルは、先端産業に必須であるにもかかわらず、採掘量・使用量共に少量であり、売買による利益が少ない。また、技術の進化により必要とされるレアメタルの種類が短期間に変化することがしばしばある。ほとんどのレアメタルは国際市場が形成されておらず、投機、戦争、鉱山ストライキ、保護主義等の政治・経済的理由により価格が大きく変動する。このような高いリスクから、レアメタル資源開発は、ベンチャー企業やジュニア鉱山会社（鉱山等の大規模な資本を持たない探鉱専門の企業）がリスクを取って推進する傾向がある。また、レアメタル鉱床は、ベースメタル鉱床等と産状が大きく異なる「非在来型」であることが多く、開発にあたっては高度な地質学的・選鉱学的知見を要するこ

とがある。レアメタル資源を確実に確保するためには、開発初期段階における資源ポテンシャル評価を公的機関（各国地質調査所、大学）が企業に代わって実施し、有望な案件を見極めることにより、投資リスクを少しでも軽減することが求められる。レアメタル資源研究を、産総研内の他の工学分野と比較すると、研究開発のサイクルタイムが非常に長く、かつリスク要因が技術開発以外の多岐にわたっている特徴がある。したがって、息の長い研究開発の継続が求められる。

## 3 レアメタル資源確保の戦略

前述のようにレアアースはレアメタルの一部であるが、最近の数年間に限ると我が国においてレアアース資源の確保戦略が、レアメタル資源確保戦略と同義語に近かった。そこで、本章ではレアアースを中心とした産総研の対応を述べることにする。

### 3.1 レアアース危機

1980年代までレアアースは主にインドの漂砂鉱床で生産されていたが、1990年代に入り需要が拡大すると、それに替わって米国マウンテンパス鉱山からの生産が中心になった。ところが、1990年代末から2000年代初頭にかけて中国の生産量が急激に伸び、安値攻勢により世界市場の90%以上のシェアを獲得するに至った。マウンテンパス鉱山はコスト面で中国品に対抗できなかったのみならず、鉱山廃水による環境汚染問題も影響し、2002年に休山に追い込まれた。中国は、その後2007年頃からレアアースの輸出枠を設けて徐々に出荷を規制するようになり、供給のリスクが認識され始めていたが、リーマンショックが一段落した2009年頃から輸出枠の絞り込みにより需給バラ

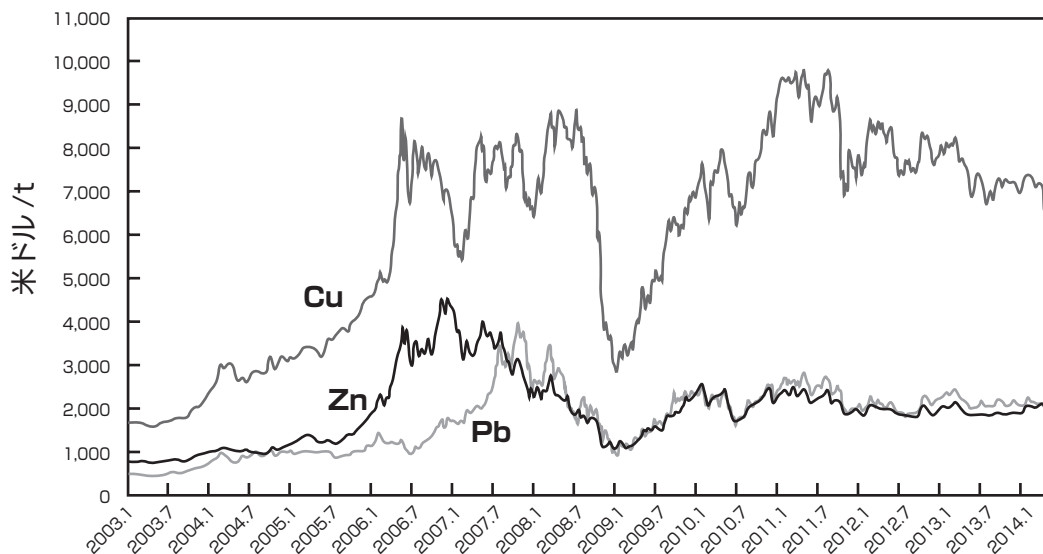


図3 ベースメタル（銅、鉛、亜鉛）価格の推移（ロンドン金属取引所）



スが崩れ、2010年後半から価格が急上昇した。2010年9月の尖閣諸島漁船衝突事件以後、対日レアアース輸出が事実上ストップしたため、日本の産業が深刻なレアアース供給不足に陥る「レアアース危機」が勃発した。2011年8月にレアアースは史上最高値を記録した(図4)。

### 3.2 レアアース資源開発のシナリオ

レアアース資源開発は、ベースメタルや貴金属資源と同様、鉱徴地(地表で鉱石の濃集が認められる露頭)の発見から始まる。鉱徴地は、専門家による地表調査で産状や広がりを明らかにし、それが鉱床(一定の規模で鉱石が濃集する場所)であることを確認する。次に来る概査では、熱水鉱床であれば、熱水変質帯の広がりや熱水の起源を、漂砂鉱床であれば重鉱物が濃集する層準の分布や厚さ等を把握することにより、鉱床のおおよその規模や埋蔵鉱量を評価する。レアアース資源の場合は、この段階で初期的な選鉱試験が行われることが多い。なぜならば、レアアースを含む鉱物が分離・抽出できなければ、鉱石中のレアアース含有量(品位)が高くても開発は難しいからである。ここまでの段階は、企業単独または公的地質調査機関が実施することが多い。

鉱床が有望と判断されると、精査段階に移り、ボーリング調査や物理探査が行われ埋蔵鉱量を確定する。さらに、密度の高いボーリング調査(数十~数千本)や試掘により可採鉱量を見積もる。ボーリング調査や物理探査は、多額の費用がかかるため、日本企業の権益が関係する案件では、まず(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)が単独あるいは民間企業と共同で実施し、適切な段階で民間企業に全面的に引き継ぐのが通例である。開発の主体となる企業等が決まり、鉱山の具体的な開発計画を策定する段階になると、鉱山開発に伴う周囲の環境影響評価やインフラ整備等を行い、これらをクリヤしてようやく開山となる。レアアースを含むレアメタル資源の場合、他の非鉄

金属よりも開発リスクが大きいので、開山後もJOGMECや(株)国際協力銀行(JBIC)の支援を必要とする場合がある。

### 3.3 レアアース資源開発の要件

現在、レアアース資源の供給源を中国がほぼ独占しているため、新たな原料の供給源を確保するには中国外のレアアース鉱床を開発・再開発するしかない。そのための要件としては以下の項目が挙げられる。

**品位:** 中国のレアアース鉱石に価格的に対抗するために、軽レアアースに富む鉱石の場合、全レアアース量(酸化物換算)が4%以上、重レアアースに富む鉱石の場合でも1%以上。

**レアアース含有鉱物:** 炭酸塩(バストネサイト等)やリン酸塩(モナザイト、ゼノタイム等)等の易溶性鉱物が望ましい。難溶性鉱物(アルミニウムを含むリン酸塩、ニオブ鉱物、ジルコン等)は分解にコストがかかる。また、平均粒径が100 $\mu\text{m}$ 以上はないと選鉱が難しい。

**埋蔵鉱量:** 全レアアース量で数万トン以上

**採掘方法:** 原則として露天採掘

**放射性物質:** モナザイトにしばしば高濃度なトリウムが含まれる。トリウム含有廃棄物の発生量が多い場合は、国際原子力機関(IAEA)の基準<sup>[4]</sup>に従って保管または埋設処分する必要がある。明確な閾値は決められていないが、未処理の鉱石(原鉱)で1,000 ppm未満が望ましい。

**社会的環境:** 道路、鉄道等のインフラが整備され、治安維持および鉱業法が確立していること。

産総研がレアアース鉱床の探査を行う場合は、対象とする鉱徴地が上記の要件を満たすかどうかを各種調査・分析で確認することになる。そのために、事前に当該国の地質調査所等に情報提供を依頼し、調査戦略を十分に練っておくことが重要である。

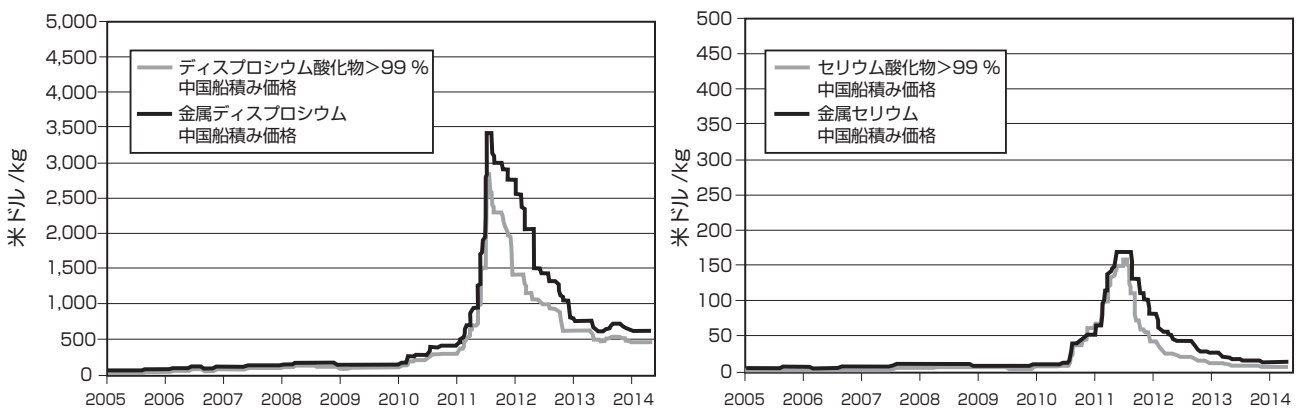


図4 ディスプロシウム(重レアアース) およびセリウム(軽レアアース) 価格の推移 (Metal Pages Web Site 資料より作図)

#### 4 レアアース資源研究への取り組み

本章では、国のレアメタル資源確保戦略に産総研が具体的に寄与した例として、前述のレアアース危機への対応を説明する。

##### 4.1 レアメタル・レアアース資源研究拠点の設置

レアアース危機を受けて、日本政府は、2010年度および2011年度補正予算にレアアース資源確保対策のための予算を盛り込み、産総研にも資源エネルギー庁委託事業として大型の予算措置を行った（実際の予算執行は、2011年度および2012年度）。それに先立ち、2010年秋に資源エネルギー庁は産総研に対しレアメタル・レアアース資源研究拠点の設置を要請した。しかし、産総研の鉱物資源研究体制は旧工業技術院時代から縮小の一途を辿っており、特に選鉱・製錬技術の開発を担当していた環境管理研究部門（旧資源環境技術総合研究所の一部）はリサイクル技術研究にすっかり衣替えをしていた。鉱床の成因研究や探査技術開発を担当している地圏資源環境研究部門でも、旧地質調査所の4課体制からわずか1研究グループ（1課相当）体制に縮小されており、研究拠点形成にはあまりにも弱体であった。そこで、レアアース鉱床探査と初期的選鉱試験を地圏資源環境研究部門で、本格的選鉱と製錬技術開発を東北大学で対応することとし、上記の補正予算を活用して新たに拠点形成を開始することにした。なお、環境管理研究部門には、2014年に戦略的都市鉱山研究拠点（SURE）が設置され、レアメタル等に関するリサイクル研究開発の中核となっている<sup>[5]</sup>。

地圏資源環境研究部門では、まず研究拠点を整備するために、2011-2012年の2年間で鉱物・鉱石分析設備および選鉱試験設備の導入を行った<sup>[6]</sup>。鉱物や岩石を分析する設備は、従来から所内に整備されていたが、金属鉱

石は通常の岩石と比べて特定の元素が極端に濃集しており、また特にレアアース鉱石はトリウム等放射性元素の濃度が高い傾向がある。そのため、本格的なレアメタル・レアアース資源研究を実施するには、コンタミネーションの回避や実験作業に伴う排水・粉塵処理のために、旧来の施設とは別に実験施設を構築する必要があった。導入された設備の中で特に注目すべき新鋭機器は、まずLA-ICPMS

（Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer）である<sup>[7]</sup>。LA-ICPMSは、レーザー光を分析対象の固体に集束して照射し、蒸発した表面物質を高純度アルゴンガスと共にエアロゾルとしてICPMSに導入し、化学分析を行う機器である（図5）。試料の前処理がほとんど不要で、局所高精度分析が可能である。同機器によるレアアース鉱石の分析では、従来の酸溶解法では不可避であった試料の溶け残りの問題がなく、1試料あたり2分という迅速分析が可能となった<sup>[8]</sup>。地圏資源環境研究部門の同機器は、鉱石分析用として独自の改良や新機能が加えられており、これまでに十カ国以上の数百個以上に上る鉱石を分析し、レアメタル資源研究に大きく貢献した。次に注目される機器は、MLA（Mineral Liberation Analyzer）である（図6）。MLAは、通常の走査型電子顕微鏡と強力な画像解析ソフトを組み合わせた機器で、鉱石中や鉱物粉末の鉱物量比、粒径、コンポジット率等の統計的データを1試料数時間で計算・表示する機能を持つ。同機器も、これまでに数十のレアメタル鉱石試料を解析し、鉱石の評価や選鉱方法の策定に大きく貢献した。その他、高感度高分解能年代測定装置SHRIMP<sup>®</sup>（図7）や高電圧パルス選択性粉碎装置SELFRAG<sup>®</sup>等も導入し、成果を挙げつつある。前述のように、選鉱実験室は排水・粉塵処理設備を完備しており、特に排水は真空蒸留減容



図5 LA-ICPMS（レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計）、レーザー光源：サイバーレーザー社製、ICPMS：アジレント・テクノロジー社製、その他の部分はインハウスで組み立て。



図6 MLA (Mineral Liberation Analyzer)、FEI社製



装置を用いて処理することにより、重金属や放射性物質の懸濁水が室外に流出することを防止している。

#### 4.2 海外地質調査機関との研究協力体制の構築

レアアース危機への対応において、海外地質調査機関との研究協力体制の構築は、研究推進環境の整備という点で必須である。その理由としては、主に以下の3つが挙げられる。

- 1) 資源国の信頼性の高い資源情報の収集：海外資源調査を実施する場合、必ず事前に当該国の公的地質調査機関から情報を得て、有望地域を絞り込む必要がある。
- 2) 海外調査時の安全性の確保：現地自然环境や治安状況に応じた安全な調査を実施するには、公的地質調査機関の協力が不可欠である。
- 3) 資源外交への貢献：資源国と研究協力を実施していることを対外的に示すことにより、日本が周到に資源確保対策を講じていることをアピールできる。これにより、他の資源国に対し、日本へのレアアース禁輸等極端な資源政策を抑制する効果が期待される。

国際研究協力の対象国は、有望レアアース鉱床のポテンシャルが高い国が前提となるが、経済産業省の政策、現地政府機関の要請、過去の協力実績、治安・政治状況等を総合的に検討して選択される。以下に、これまでの主な国際研究協力の経緯を示す。

米国：レアアース危機の勃発以降、日本政府では日米協力を軸にして問題の解決を図る動きが活発化した。2010年11月に米国ローレンスリバモア国立研究所にて日米レアアースラウンドテーブルが開催され、日米のレアアース関連研究者が一堂に会して意見交換を行った。産総研（省資源、リサイクル、資源探査各担当者）も、経済産業省、JOGMEC、（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、主要大学の専門家と共にこの会議に参加した。2011年1月に



図7 高感度高分解能年代測定装置 SHRIMP<sup>®</sup> (Sensitive High Resolution Ion Micro Probe)、Australian Scientific Instruments 社製

米国エネルギー省本部にて日米レアアース会議が開催された。この会議には、各省庁、JOGMECの担当者が参加し、産総研からは、資源探査分野の協力を先行させるという政策的判断から著者のみが参加し、その後の日米研究協力を討議した。この席上で、産総研と米国地質調査所 (USGS: United States Geological Survey) のレアメタル資源に関する研究協力が合意された。その後、非公式会合を経て、2011年12月にサンフランシスコにて産総研とUSGSとの研究協力覚え書きを正式に取り交わした。2011年8月にはアラスカ州南部、2012年11月にミズーリ州東部、2014年10月にはカリフォルニア州南部およびジョージア州中部のレアアース鉱徴地を現地調査し、2015年度も現地調査を計画中である。南アフリカ共和国（南ア）：南アは、白金族元素やクロム等のレアメタルを豊富に産する鉱業大国であり、レアアース危機以前の2007年に南アフリカ地球科学審議会 (CGS: Council for Geoscience)、JOGMEC、産総研の三者で研究協力覚え書きを取り交わした。それ以来、調査研究（後述）を活発に実施している。2013年に行われた日-南ア鉱業担当大臣会議での合意文書には、この研究協力の推進が明記された。2014年3月から産総研とCGSの二者による研究協力覚え書きに更新され、現在も継続している。

モンゴル国：旧工業技術院時代より、モンゴル国とは、国際産業技術協力 (ITIT) 事業やJICA事業等を通じた鉱物資源分野の長い研究協力の実績があり、産総研発足後も研究者レベルでの交流を継続してきた。レアアース危機を受けて、2010年10月に産総研、JOGMEC、モンゴル鉱物資源管理庁 (MRAM: Mineral Resources Authority of Mongolia) 三者間で研究協力覚え書きを正式に取り交わした。同年に南ゴビ地域、2011-2012年には、同国民間企業の協力も得て、モンゴル西部地域にてレアアース鉱徴地の現地調査を実施した。現在、モンゴル国では鉱業法の改正による既存鉱区の見直しが進んでいるため、同国のレアメタル資源政策が落ち着くまで、一時調査研究を見合わせている。

ブラジル連邦共和国：2009年11月にブラジル地質調査所 (リオデジャネイロ) で開かれた産総研、ブラジル地質調査所 (CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)、ブラジル鉱産局 (DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral) 合同セミナーにて、レアアース資源研究を含む複数の地球科学分野での研究協力が合意された。その後、2010年12月の日伯科学技術協力合同委員会や複数の非公式会合を経て、2012年12月に産総研とDNPMとの間で研究協力覚え書きが正式に取り交わされた。2013年6月にはブラジル議会上院公聴会にて、著者が日本のレアアース資源政策の講演を実施、同年ゴイアス州南



部、ミナスジェライス州中南部、2014年2月にはゴイアス州北部のレアース鉍徴地の現地調査を実施した。

**その他の国々：**レアメタル・レアース資源に関する研究協力覚え書きを取り交わした組織としては、ミャンマー地質調査所 (DGSE)、韓国地質資源研究院 (KIGAM)、タイ鉍物資源局 (DMR) があり、定期的な人材交流等を実施している。また、研究協力覚え書きの取り交わしは行っていないが、フィンランド地質調査所 (GTK)、トルコ地質調査所 (MTA)、豪州地質調査所 (GA) 等とも研究交流を行っている。

### 4.3 レアース鉍床・鉍徴地の調査研究—南アフリカ共和国の例—

本節では、最も調査研究が進んでいる南アフリカ共和国の例について、これまでの経緯や見通しを述べる。

**鉍徴地発見：**南アフリカ共和国の首都プレトリアを含む北東部には、東西460 km、南北250 kmに及ぶ巨大なブッシュフェルト深成岩体が露出している。この岩体は、マグマが約20億年前に地下深くで冷え固まってできた岩石で構成され、同国の主要レアメタル資源である白金族元素、クロムもブッシュフェルト深成岩体に付随する鉍床から産する。同岩体分布域には多数の螢石 (CaF<sub>2</sub>) 鉍床が分布しており、一部はフッ素の原料として盛んに採掘されている。螢石鉍床には、しばしば高濃度のレアースが伴われることが世界各地で知られており、同地域で稼行する螢石鉍山に関する2008年以前の予察的調査でもレアースの鉍徴が確認されていた。しかし、既存の稼行鉍山は外資系で白人経営のものが多く、南ア政府のBEE (Black Economic Empowerment) 政策の元での調査研究は容易ではなかった。2009年9月に産総研—CGS共同で行われた現地調査で、ブッシュフェルト深成岩体中央部近くの螢石旧鉍近傍にレアースの鉍徴地を見いだした。本鉍徴地は未開発地区であるが、螢石鉍床の探鉍に伴いCGSの研究者によって地表部の変質帯が検出されていた。産総研での分析の結果、同鉍徴地は重レアースに富む有望鉍床である可能性が確認された。

**探査鉍区の申請：**2009-2010年当時はレアースが高騰を続けている最中であり、まず本レアース鉍床を他の探査企業からプロテクトする必要があった。そこで、CGSから南ア国営鉍業公社 (AEMFC: African Exploration, Mining and Finance Corporation) に探査鉍区申請を依頼した。鉍床地区一帯は国有地であり、また土地の管理者はすべて先住民であったため、現地調査は障害なく進めることが可能であった。

**探鉍ボーリングの実施：**CGSによる放射能探査の結果から同鉍床の広がりやを絞り込み、2012年度に5本、2013年度に

3本の浅層探鉍ボーリングを実施した (図8)。その結果、地表から数十mのラテライト質風化帯はレアース品位が比較的高く、伏在する未風化の深成岩もペグマタイト質部は風化帯と同様な品位を持つことが明らかになった。平均レアース品位は、酸化物換算で1 %前後であるが、イットリウムと重レアースに富む特徴を持つ。また、レアース含有鉍物は比較的分解が容易なリン酸塩鉍物であり、トリウムも100 ppm未満と通常の岩石よりやや高い程度である。したがって、採掘が容易な風化帯から開発が可能であると判断された。

**選鉍試験：**本鉍床の開発には、地表部の風化帯に含まれるレアース含有鉍物を選鉍し、精鉍を作る技術を確認することが必須条件である。なぜならば、風化帯岩石をそのまま酸・アルカリ分解したのでは多量の薬品が必要となりコストが合わないからである。2013-2014年度は、現場から数十kgの試料を産総研に搬入し、ラボスケールの選鉍試験に軸足を移して作業を進めていた。2015年度は、早稲田大学、南ア鉍物処理研究所 (MINTEK) の協力も仰ぎ、精鉍のレアース品位の向上を目指して選鉍試験を加速する予定である。

**今後の見通し：**2013年12月に、都内で行った公聴会で本レアース鉍床の調査結果の一部を開示したが、その時点で興味を示す日本企業はなかった。今後、選鉍試験で一定の成果を得ることができた段階で、これまでの成果全体を取りまとめ、再度、企業・JOGMEC等に情報を開示

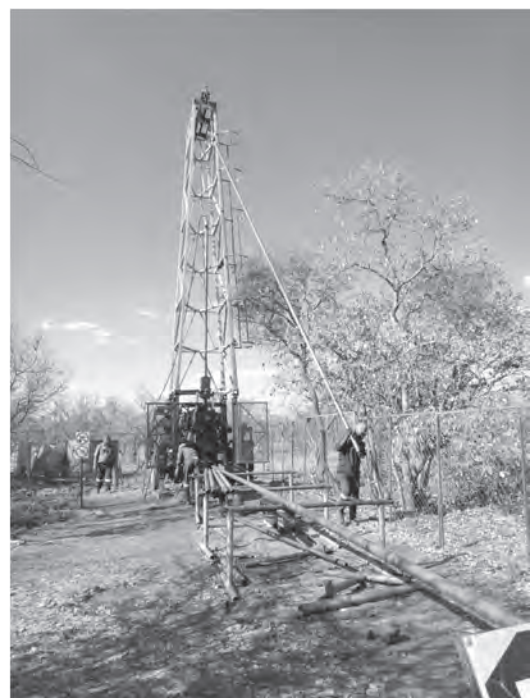


図8 南アフリカ共和国で実施した浅層探鉍ボーリング (2013年)

する予定である。また、判断材料を増やすために必要な調査研究をさらに追加する可能性も高い。いずれにしても、産総研およびCGSが自前の研究費で調査研究を継続するには限界があり、本鉱床の開発計画を前進させるには外部（JOGMEC、民間等）の資金が必要である。本鉱床から重レアアースを生産することができれば、中国外に新たな供給元が出現することになる。このことは、たとえ生産量が少量でも、中国というカントリーリスクを取らなくても重レアアースが入手できる、という安心感を市場にもたらし、価格の安定化に寄与すると期待される。

#### 4.4 レアアース資源データベースの構築

政府や民間企業がレアアース資源確保のための戦略を立てるには、まず世界のレアアース資源の分布、規模、性質等を把握する必要がある。また、レアアース資源の埋蔵量が特定の国に偏在していることが明らかになれば、その国に対し、国際社会への責任として適正な価格で輸出するように促すこともできる。そのため、USGSは、Mineral Commodity Summaries等の各種鉱物資源情報を毎年Web Site上に公開している<sup>[9]</sup>。レアアース資源の場合、2002年に報告されたOrris and Grauch<sup>[10]</sup>による世界的データベースが基本となり、世界中で探査・開発が行われた経緯がある。しかし、それから12年が経ち、レアアース危機が勃発した現在、レアアース資源のデータベースを全面的に見直し、再度資源確保の戦略を立て直す時期が来ている。そこで、産総研ではUSGSと共同でレアアース資源データベースの整備を実施しており、2016年中には最初の成果が出版される見通しである。

また、レアアースのマテリアルフロー解析や需給予測の研究も同時に実施しており、成果を挙げている<sup>[11][12]</sup>。この研究は、レアアースが輸入され、国内産業で製品化され、輸出または廃棄・リサイクルされるまでの流れを解析すること、および将来の価格・技術動向に基づく需給の変化を予測することにより、資源探査、省資源、リサイクルの戦略立案に資することを目的としたものである。

## 5 レアアース危機後の課題

### 5.1 レアアース価格の暴落

レアアースの価格は、2011年8月に最高値を記録して以降、2013年にはセリウムで30分の1、ディスプレイウムでも4分の1程度にまで暴落した（図4）。これは、中国が輸出規制によって溜まっていた在庫を放出したこと、レアアースを使用する日本企業が代替品への切り替えや、レアアース使用量の削減を積極的に進めたこと等に起因する。しかし、レアアース価格暴落の結果、世界中で進められていた100を下らないレアアース資源開発プログラムが、既

開発の米国マウンテンパス鉱山と豪州マウントウェルド鉱山を除き、ほぼすべて遅延・中断または廃止に追い込まれた。前述のように、鉱物資源開発には10～15年の時間が必要であり、レアアース危機が顕在化してから価格暴落までのわずか4年程度の時間では、新規の鉱山開発は困難であった。また、レアアース危機後もしばらく操業を継続してきた、米国マウンテンパス鉱山を経営するモリコープミネラルズ社が、2015年6月に民事再生法を申請し、経営破綻した。これらの経緯は、レアメタル資源開発のリスクがいかに高いかを鉱業関係者に思い知らせた。

### 5.2 本格研究としての産総研の役割

レアアース危機はとりあえず収束したが、レアアース供給源の多角化は進まず、レアアース危機以前と同じ中国の独占構造が現在も継続している。レアアースと同様に80%以上の供給源を中国が占めるレアメタルは、タングステンやアンチモン等他にも存在する（図9）。今後の国際情勢次第では、中国がいつそれら資源カードを切らないとも限らず、潜在的な危機性は低下していない。レアアース危機は決して一過性の出来事ではないのである。また、次のレアアース危機が生じてから対応を始めたのでは間に合わない。しかし、2章で詳述したように、レアメタル・レアアース資源開発は民間企業にとってリスクが大きく、事前の準備や投資には限界がある。現在の日本では、唯一産総研が、他機関（資源エネルギー庁、JOGMEC、海外の地質調査機関、大学等）と連携しつつ、レアメタル・レアアース資源に関する継続的・体系的な情報収集、調査研究、人材育成等を実施可能な研究機関である。将来必ず来るであろう第二、第三のレアアース危機に備えた、資源情勢に左右されない中・長期的視野に立った研究開発の実施こそが、本格研究として産総研が果たすべき役割である（図10）。2015年現在、主に中国の景気減速に起因する資源安により、鉱物資源供給に対する注目度・危機感は低下している。しかし、資源安は、鉱山において採算を取りやすい高品位部の選択的採掘につながり、結果として鉱山の寿命短縮、鉱量の枯渇を招く。近い将来に必ず来るであろう資源安の反動に備えて、産総研は確実に本格研究を遂行する責務を負っていると言える。

### 謝辞

この研究に携わっている地圏資源環境研究部門鉱物資源研究グループの皆様、渡辺 寧氏（秋田大学、元鉱物資源研究グループ長）に謝意を表します。また、この研究を終始ご指導いただいた資源エネルギー庁鉱物資源課の皆様および（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構金属資源開発本部の皆様にご心より御礼申し上げます。

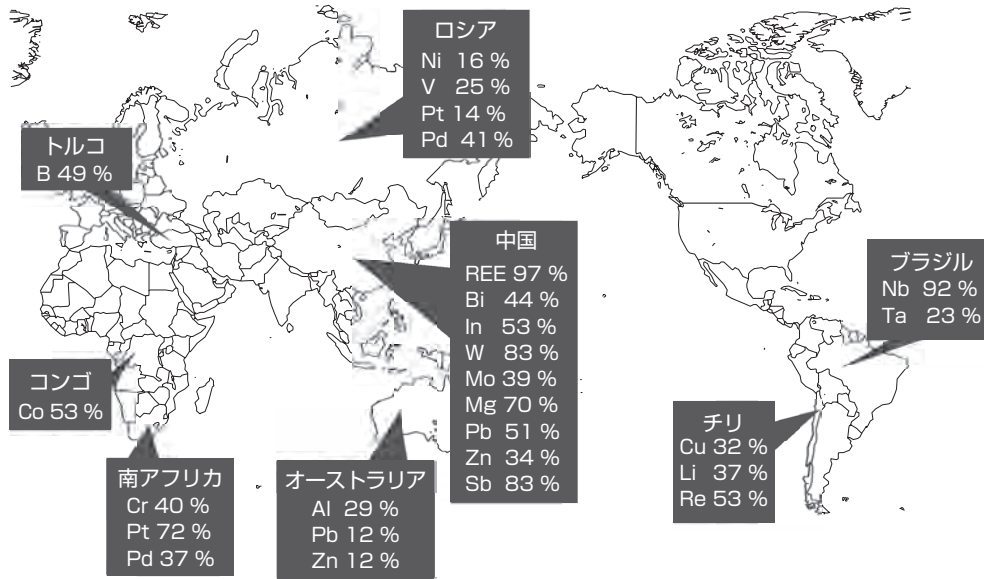


図9 各国レアメタル生産量の世界生産量に対する割合。偏在性の強いベースメタル等も含む。資源エネルギー年鑑<sup>[13]</sup>に基づいて作図。

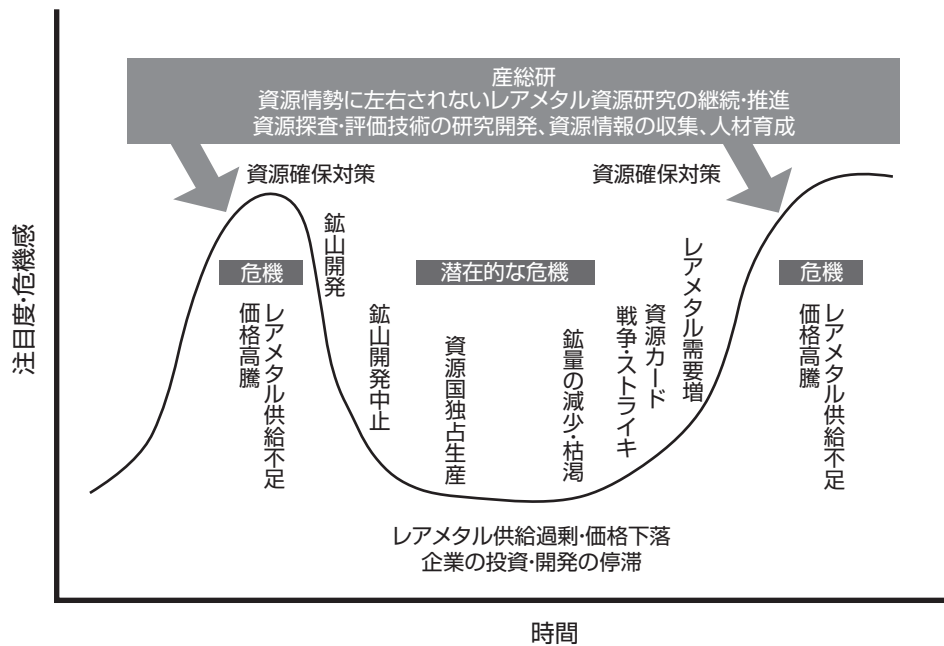


図10 レアメタル資源研究における本格研究の概念図

参考文献

[1] 経済産業省: レアアース対策, [http://www.meti.go.jp/policy/nonferrous\\_metal/rareearth/index.html](http://www.meti.go.jp/policy/nonferrous_metal/rareearth/index.html), 閲覧日2015-01-05.

[2] 経済産業省: レアメタル確保戦略, (2009).

[3] 中村守: レアメタル, *産総研TODAY*, 8 (5), 10-11 (2008).

[4] International Atomic Energy Agency (IAEA): *Management of NORM Residues*, IAEA-TECDOC-1712, (2013).

[5] SUREコンソーシアム: <https://unit.aist.go.jp/emtech-ri/sure/cons.html>, 閲覧日2015-08-20.

[6] 高木哲一: レアメタル資源分析・選鉱試験施設の整備, *産総研TODAY*, 13 (5), 22 (2013).

[7] 昆慶明, 高木哲一: レーザー光を利用したレアアース鉱石の化学分析, *産総研TODAY*, 11 (1), 23 (2011).

[8] Y. Kon, H. Murakami, T. Takagi and Y. Watanabe: The development of whole rock analysis of major and trace elements in XRF glass beads by fsLA-ICPMS in GSJ geochemical reference samples, *Geochemical Journal*, 45 (5), 387-416 (2011).

[9] U.S. Geological Survey: Mineral Commodity Summaries, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>, Accessed 2015-01-05.

[10] G. J. Orris and R. I. Grauch: Rare Earth Element Mines, Deposits, and Occurrences: U.S. Geological Survey Open-File Report 02-189, (2002).

[11] 森本慎一郎, 徐維那: 我が国のレアアース対策による需要削減量予測手法の提案, *エネルギー・資源*, 34 (6), 10-17 (2013).



- [12] Y. Seo and S. Morimoto: Comparison of dysprosium security strategies in Japan for 2010-2030, *Resources Policy*, 39 (C), 15-20 (2014).
- [13] 資源エネルギー年鑑編集委員会編: 資源エネルギー年鑑 2014, 通産資料出版会, 783 (2014).

### 執筆者略歴

高木 哲一（たかぎ てついち）

1986年島根大学理学部地質学科卒。1992年岡山大学大学院自然科学研究科修士（理学）。科学技術特別研究員PDを経て1994年に工業技術院地質調査所に入所、非金属鉱物資源の研究に従事。2001-2006年産総研深部地質環境研究センターにて高レベル放射性廃棄物地質層処分の研究に従事。2007年から地圏資源環境研究部門にてレアメタル資源の研究に従事。2009年より鉱物資源研究グループ長。レアメタル資源研究全般の調整、取りまとめを担当。



### 査読者との議論

#### 議論1 全体について

コメント（矢野 雄策：産業技術総合研究所地質調査総合センター研究戦略部、小林 慶三：産業技術総合研究所材料・化学領域構造材料研究部門）

レアメタル資源の安定供給を国として推進するための地質情報整備について、著者を含む鉱物資源研究グループには経済産業省から大きな期待がかけられ、その期待に応えてきた。それは有望鉱床の確認であり、選鉱試験の拠点の整備であり、データベースの構築であった。そのために、多くの海外地質調査機関との研究協力をを行い、南アフリカなど遠隔かつさまざまな困難な要素を持つ地域にもチャレンジしてきた。著者は、鉱物資源研究グループを育成指導し、調査と交渉の最前線に立ってきた。調査、分析、情報整備を行い、その経験に基づいてレアメタル資源、その中で特にレアアース資源研究の体系を俯瞰する論文をシンセシオロジーに掲載することはたいへん価値が高い。資源開発へつなげるための産総研の研究開発、資源国との連携、関係機関との共同研究体制等が実例を交えて記載されている。特に最近話題となったレアアース危機に対応するための事例を取り上げ、今後の我が国産業界の持続的発展に向けたリスクの高い資源確保に対して貴重な提言を行っている。資源開発は高いリスクを有し、長い時間を要する一方で産業需要や国際情勢の中で危機感は一足ではない。危機が顕在化している時のみでなく、危機が潜在化している間も長期的に資源研究を継続することの意義を明確に示した論文である。

#### 議論2 レアメタルとレアアース

コメント（矢野 雄策、小林 慶三）

一般の読者にはレアメタル、レアアースの区別が難しい。シンセシオロジーは鉱物資源の専門誌ではないので、レアメタル、レアアースそれぞれの定義や使い分けの考え方を示してほしい。

回答（高木 哲一）

レアアース、レアメタルの解説をこの論文の冒頭に付けました。日本では、レアメタルとして31種類の金属が経済産業省により指定され、他の金属資源とは区別して安定供給対策が講じられています。レアアース（希土類元素）はレアメタル中の1金属として扱われますが、実際にはランタノイド元素15種にスカンジウム（Sc）、イットリウム（Y）を加えた17種の金属の総称です。

#### 議論3 レアメタル・レアアースへの産総研の取り組み全体の中の資源研究

質問・コメント（小林 慶三）

産総研としては、レアメタルやレアアースの対策として、資源開発だけでなく、リサイクルや代替材料開発、省使用化技術開発等にも総合的に取り組んでいると思います。また、希少資源に対する需給バランスを考えながら、産総研らしい取り組み（総合的・戦略的取り組み）を行っていると思います。本格研究という考えに立てば、各希少資源に対して産業シナリオを考えた最適な対策技術があると思いますが、資源開発が最も有効と考えられる希少資源はレアアースでしょうか。できれば、産総研の総合的な取り組みを紹介しつつ、レアアースは資源開発が最も有効な対策技術（緊急性や代替実現性等を考慮して）であることを記載いただく方がわかりやすいように思います。

回答（高木 哲一）

2.1節に産総研のレアメタル研究を紹介しました。レアメタルの研究は、材料科学と地球科学に大きく二分することができます。前者は、レアメタルを利用した高性能材料、レアメタルの使用量削減・代替材料、リサイクル等のための研究開発が目的です。一方、後者はレアメタル資源の探査、資源評価が目的です（選鉱・製錬技術の開発は、一部両者にまたがっています）。産総研ではこれらレアメタル関連研究を総合的に実施していることから、2006年から所内にレアメタル・タスクフォースを設置し、材料科学と地球科学を車の両輪として研究の促進を図ってきました。

レアアースは、資源開発が最も有効な対策である元素の一つです。その理由は、消費量の少なさにあります。例えば、高性能磁石の耐熱性向上に必須なディスプロシウム（レアアースの1種）は、国内の年間消費量がわずか数百トンです。しかし、レアアース危機の際には、ディスプロシウムはほぼ全て中国南部で生産されていたため、価格が高騰し入手困難な元素でした。もし、ディスプロシウムを産する鉱山が中国外に開発されていれば、たとえ消費量の一部しか生産できなくても、市場原理が働くことにより価格を抑制できたはずですが、また、鉱山設備が小規模で済むため、生産が早く開始できます。同じレアメタルでも、消費量が比較的大きい元素（ニッケルやタングステン等）は、資源開発の効果が短期的には出にくく、代替材料やリサイクル技術の開発を総合的に推進する必要があります。

#### 議論4 レアメタル資源研究における産総研の役割と本格研究

質問・コメント（小林 慶三）

資源開発における産総研の立ち位置、JOGMECとの関係、資源国（地質調査機関）との関係等を記載いただいておりますが、資源国の資源開発における関係機関のそれぞれの役割が少しわかりにくいように思います。資源開発を行う国ごとに対応が違おうとは思いますが、それぞれのプレイヤーの役割を少し紹介いただくと本格研究としてより理解できるものと思います。

回答（高木 哲一）

各プレイヤーの役割については3.2節に記述しました。鉱徴地の発見、鉱床の確認、概査までの段階は企業単独または公的地質調査機関（産総研）が実施することが多いと考えられます。精査段階、すなわちボーリング調査や物理探査になるとJOGMECが単独あるいは民間企業と共同で実施し、適切な段階で民間企業へ全面的に引き継ぐのが通例です。その後開発の主体となる企業等によって、鉱山開発計画の策定、環境影響評価、インフラ整備を経た上で開山に至ります。開発リスクの大きいレアメタル資源の場合は、開山後もJOGMECやJBICの支援を必要とする場合があります。

質問・コメント（矢野 雄策）

レアメタル資源研究における本格研究とはどういうものか、産総研は死の谷を越えることにどのように貢献しているのか、はこの論文の核になる部分ですので、しっかりと論説をいただきたい。

回答（高木 哲一）

レアメタル資源開発（鉱山開発）という観点から見ると、現実には産総研の役割は限定的です。経済産業省傘下にはJOGMECという大きな組織があり、各鉱山会社も研究開発体制を持っています。したがって、レアメタル資源開発における「死の谷」を産総研が主体となって越えるというシナリオを描くことは、組織の過大評価になってしまいます。そこでこの論文では、レアメタル需給状況の波を、産総研の一貫した研究開発体制で越えていく概念を示しました。現在の日本では、唯一産総研が、レアメタル・レアアース資源に関する継続的・体系的な情報収集、調査研究、人材育成等が実施可能な研究機関です。資源情勢に左右されない中・長期的視野に立った研究開発の実施こそが、本格研究として産総研が果たすべき役割であると考えます。（図10）。近い将来に必ず来るであろう資源安の反動に備えて、

産総研は確実に本格研究を遂行する責務を負っていると考えています。

産総研と資源国の研究機関との連携も、本格研究を遂行する上での重要な柱です。レアメタル資源は、国際市場が十分に形成されていないものが多く、しばしば投機の対象にもなることから、公開情報では資源量や品位が誇張されている場合が少なくありません。正確な資源情報を得るには、資源国の公的地質調査機関（地質調査所）を通じた情報収集および共同調査が必要です。産総研は、国際地質調査所会議（ICOGS）の一員であり、主要国地質調査所との協力関係を長年にわたって構築してきました。レアアース危機の際、南ア、モンゴル、米国等で迅速に資源評価を実施できたのも、この協力関係によるものです。今後も、資源国地質調査所との連携を一層推進していく所存です。

# 構成型研究におけるシナリオ：その役割と表現

## — シンセシオロジー誌掲載論文による検証の試み —

小野 晃<sup>1\*</sup>、赤松 幹之<sup>2</sup>、小林 直人<sup>3</sup>

科学技術の方法によって社会的な価値を実現するために構成型研究が民間企業、公的研究機関、大学で行われている。シンセシオロジー誌は構成型研究のプロセスと成果を記述する学術論文誌として刊行されたが、編集委員会は著者に対して論文の中で研究のシナリオを記述することを要請してきた。この論文では分析型研究と対比して構成型研究の属性を考察し、またシナリオがもっている構造と性質を明らかにする。その上で、シンセシオロジー誌にこれまで掲載された論文を調査して、シナリオは構成型研究において中心的役割を果たし、それを科学技術の言葉で表現することが可能であることを示す。

キーワード：シンセシオロジー、論文、シナリオ、構成型研究

## Scenario in synthetic-type research: its role and description

— An investigation from *Synthesiology* papers —

Akira ONO<sup>1\*</sup>, Motoyuki AKAMATSU<sup>2</sup> and Naoto KOBAYASHI<sup>3</sup>

Synthetic-type research is conducted by private companies, public institutes, and universities to realize societal value by scientific and technological methods. *Synthesiology* is a scientific journal that enables authors to describe the processes and results of this kind of research. Editors specifically request authors to describe their scenario for synthetic-type research. In this paper, the characteristics of synthetic-type research are compared with those of analytic-type research, and the structures and properties of synthetic-type research scenarios are clarified. From the investigation of papers published in *Synthesiology*, we show that the scenario plays a central role in synthetic-type research and can be expressed using scientific languages.

Keywords: Synthesiology, paper, scenario, synthetic-type research

### 1 はじめに

イノベーションを創出するために研究開発と社会的価値とを効果的に結び付けることが現代の科学技術関係者の強い関心事となっている。多くの研究開発が民間企業、公的研究機関、大学で行われているが、それらは分析型研究と構成型研究とに大別される。

分析型研究は、自然や存在物を要素に分解した上で、知識要素を発見しその体系化を図ることを主目的とするタイプの研究である。大学で行われている研究開発の多くが分析型研究である。一方構成型研究は、要素を統合して目的とするモノやコトを作り出そうとする（すなわち、構成しようとする）タイプの研究である。民間企業や公的研究機関で

行われている研究開発の多くが構成型研究である。

構成型研究は現に社会で多く行われているにもかかわらず、そのプロセスと成果を記述するための論文の形式は従来定まっていなかった。2008年に刊行されたシンセシオロジー誌は、構成型研究のプロセスと成果を記述する新しい学術論文誌である<sup>[1]</sup>。刊行の趣旨は同誌の1巻1号に掲載されている「第二種基礎研究の原著論文誌」<sup>[2]</sup>の中で詳述されているが、この論文ではそれを踏まえて構成型研究の中心的存在であるシナリオについて考察する。

構成型研究のシナリオについては2章において改めて定義するが、シナリオは社会的価値を科学技術的な方法で実現するための戦略とも言え、イノベーション創出の重要な

1 産業技術総合研究所 特別顧問 〒305-8560 つくば市梅園 1-1-1 中央第1、2 産業技術総合研究所 自動車ヒューマンファクター研究センター 〒305-8566 つくば市東 1-1-1 中央第6、3 早稲田大学 研究戦略センター 〒162-0041 新宿区早稲田鶴巻町 513 (120-4号館)

1. Special Emeritus Adviser, AIST Tsukuba Central 1, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8560, Japan \* E-mail: ono.akira@aist.go.jp, 2. Automotive Human Factors Research Center, AIST Tsukuba Central 6, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan, 3. Center for Research Strategy, Waseda University 513 Waseda Tsurumaki-cho, Shinjuku-ku 162-0041, Japan

Original manuscript received June 17, 2015, Revisions received January 17, 2016, Accepted January 18, 2016



ポイントである。しかしながら現行の科学研究の成果を記述する学術論文誌ではシナリオに言及することを要件としていない。また企業が発行する技術報告（技報）でもシナリオが正面から語られることは多くない。

シンセシオロジー誌の編集委員会は当初、シナリオが構成型研究で中心的役割を果たし、研究者はそれを言語的に（文章によって）また視覚的に（図によって）表現することは可能であろうという仮説を立てて出発した。そして編集委員会は著者に対してそれぞれの構成型研究のシナリオを論文中に記述することを要請してきたのであるが、このような要請は従来の学術論文誌では行われたことがない新しい試みと言えた。

シンセシオロジー誌は刊行以来8年を経過し、これまで100編を超える原著論文が掲載されたところである<sup>[1]</sup>。我々はそれらの論文を調査して、シナリオが構成型研究において中心的役割を果たしているかどうか、またそれが論文の中でどのように言語化され描出されているかを調べ、編集委員会が当初立てた仮説が妥当であったかどうかの検証を試みる。

この論文の2章では分析型研究との対比を通して構成型研究の特徴を明らかにする。そして構成型研究ではシナリオがその中心的役割を果たすとの仮説を提示する。

3章では構成型研究のシナリオが共通の一般的性質をもつことを述べる。シナリオの基本構造を示すことにより、その言語化と描出が可能であるとの仮説を提示する。

4章ではシンセシオロジー誌にこれまで掲載された研究論文を調べて、構成型研究においてシナリオが中心的役割を果たしていることを確認し、またどのように言語化され描出されているかを示す。シナリオの表現形式にはいくつかの異なる類型が存在することを述べる。

5章ではシナリオが構成型研究の企画・立案、実施、評価の場面で有効に活用できる可能性を指摘する。

なお構成型研究において要素をどのような形で統合し研究目標を構成していくかという方法論的分析結果が、本誌の5巻1号の研究論文「Synthesiology 論文における構成方法の分析」<sup>[3]</sup>に掲載されているので参照されたい。

## 2 構成型研究と分析型研究

科学は17世紀以来要素還元の方法、すなわち自然や存在物を階層化しより細かい要素に分解して理解する方法(分析的方法)によって著しい発展を遂げてきた。ところが20世紀末に至って地球環境問題に代表されるような複合的な課題に直面して、分析的方法だけでは対処できないことが広く認識されるに至った。

一方、技術は20世紀において科学の裏付けを得て大き

く進歩したが、技術開発が分析的方法だけで成し遂げられたのではないことも明白である。研究開発と社会的価値とを効果的に結び付けるような、要素還元の方法とは別の新たな研究開発の方法がいろいろと模索されている。この論文が提示する「構成型研究」もその一つである。

構成型研究のプロセスを考えてみる。構成型研究では、まず、実現すべき社会的に価値のあるモノないしコト(人工物)を想定する。次にそれらを実現するために必要な科学技術的な目標、すなわち構成型研究の研究目標を設定する。さらに研究目標を科学技術的な要件や要素技術に分解(ブレイクダウン)する。この論文では、構成型研究の研究シナリオ(「シナリオ」と略記する。)を「構成型研究の研究目標を要素に分解し、研究目標と要素との論理関係および要素間の論理関係を表現したもの」と定義する。シナリオには科学技術的事項だけでなく、研究実施に影響する法制度や社会慣行、人的ネットワーク、共同研究等の枠組的事項も含めることとする。

構成型研究の実施においてはシナリオに基づいて、最適のやり方で要素技術を選択、開発、統合、構成して研究目標を達成し社会的価値を実現していくといったプロセスが取られる。

本章では、「シナリオは構成型研究において中心的な役割を果たす」との仮説を提示する。なおこの仮説に関しては4章において、実際に書かれた掲載論文を基にして検証を試みる。

### 2.1 科学研究と技術開発のプロセス

本節では科学研究と技術開発を異なる概念として取り扱い、それぞれ独自の метод論をもつものとする。図1は上部に科学研究、下部に技術開発のプロセスと成果物を模式的に示したものである。

科学研究の対象は自然および存在物である。現在の科学界には物理、化学、生物、電気、機械、医学といった

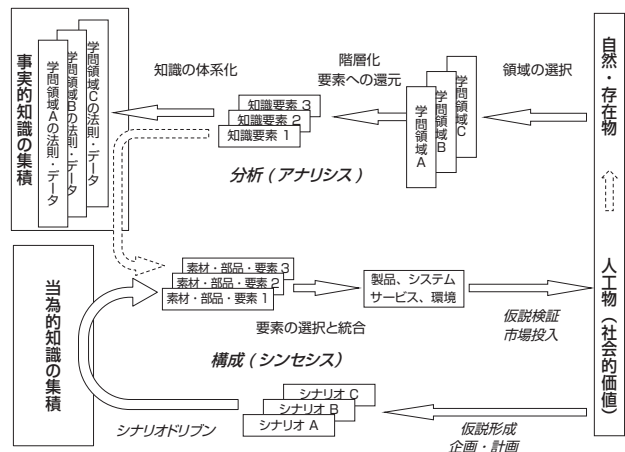


図1 科学研究と技術開発のプロセス

ような個別の学問領域が存在する。大学の理系の学生は学科の一つを選択することによって自己の勉学の領域を設定する。研究者も通常学問領域の一つを選択しそれを自己の専門領域とする。それぞれの学問領域には独自の自然への見方とアプローチの方法があり、それによって自然や存在物の特定の側面を切り取る。切り取られた側面におけるさまざまな現象を階層化し要素に還元することによってその学問領域における新たな知識要素を発見していく。さらに、発見された知識要素を相互に関係付けることによって知識を体系化し、それぞれの学問領域ごとに法則や公式を確立し、データを蓄積していく。この意味で科学研究の主流は要素還元の方法に基づく「分析型研究」と言えよう。

一方技術開発は、まず社会的な何らかの価値を作ろうとする人間の意志が発端にある。価値には製品やシステム等のモノだけでなく、サービスや方法等のコトも含まれる。また環境の保全や改変も含まれる。図1に示すように、社会的価値を実現するためのプロセスの最初の段階にシナリオの作成がある。

研究を実施する前の構想の段階でシナリオを作ることは仮説形成と言え。構成型研究はシナリオに基づいた（言い換えれば、シナリオドリブンの）形で必要な素材を選択し、部品・要素を製作し、目標とする製品やシステム、サービス、環境等を構成していく。このプロセスは「構成的方法」であり、技術開発は「構成型研究」と言えよう。

構成した人工物が当初目標とした社会的価値を実現しているかどうかの確認は仮説検証と言え。想定された社会的価値は、企業の場合であれば製品やサービスの市場への投入とそこから反応で検証されるであろう。研究機関や大学の場合であれば社会的価値は、出願特許、提案された共同研究、製作された試作品、構築されたデータベースとその公開、作成された技術基準とその標準化、開発された計量標準や標準物質とそれに基づいて提供される試験・校正サービス、作成された地質図幅とその公開、開発されたリスク評価方法と公開されたリスク評価結果等に対する社会や民間企業からの反応で検証されるであろう。

図1に示したようなプロセスで構成型研究が行われるとき、シナリオの良否は構成型研究全体の成否に大きく影響する。このことから、シナリオは構成型研究で中心的役割を果たすものと考えられる。これがこの論文が提示する第1の仮説である。

## 2.2 科学研究と技術開発の相互作用

本節では研究開発が社会的価値と効果的に結びついた歴史的事例から科学研究と技術開発の相互作用を見ておきたい。

科学は17世紀に西欧で生まれたが、技術はそれよりは

るか前の人類の誕生と同時に生まれたと考えられる。歴史的にはるかに先行していた技術開発と、ごく最近現れた後発の科学研究とは基本的に性質が異なるものであり、それらを効果的に相互作用させることはそれほど容易でない。現在各国政府の科学技術政策等を中心にして、さまざまな試みが世界中で行われているところである。

技術開発と科学研究の相互作用は19世紀には始まっている。代表的な事例は蒸気機関の発明と熱力学の発展である。図1の右端に破線の上向き矢印で示したように、蒸気機関として発明された人工物を、科学は「存在物」と認識しその研究対象に取り込んだ。その結果として得られた熱力学の知識要素と体系が、図1の左側にある破線の下向き矢印で示したように技術開発に影響を及ぼして、さまざまな熱機関の高度化を促した。この事例は科学が技術の成果を研究の対象に取り込み、その後科学が技術に裏付けを与えて両者ともに大きく発展した事例である。

20世紀には中性子と核分裂の科学研究と、核兵器や原子力発電の技術開発が強く関連している。また固体物理学における種々の科学的発見と、トランジスターを初めとするエレクトロニクスデバイスの発明とが同様の関係にある。

21世紀の例を挙げれば、ナノサイエンスとナノテクノロジーがあろう。ナノサイエンスは当初電子顕微鏡による「観察の科学」とどまっていたが、走査型トンネル顕微鏡という技術上の発明により、原子の観測だけでなく操作を行ったり、ナノスケールでの加工や製造にも波及したりしてさまざまなナノ構造体が作られた。そして今度は逆に、それらが科学研究を刺激してナノサイエンスの一層の発展を促した。現在ナノサイエンスの裏付けを得てナノテクノロジーが急速に発展している。

生命科学と医療、農業にも同様の関係があろう。

## 2.3 構成型研究の属性

構成型研究と分析型研究の属性を対比して表1に示す。分析型研究の属性は科学の発展の歴史の中で長い時間を掛けて明確にされてきた。表1の各属性はほぼ定説とみなしてよいであろう。一方構成型研究の方は明確に提示されたのはごく最近であることから<sup>1)</sup>、その属性は十分に検討されたわけではない。従って以下に述べる見解は著者らの現時点でのものである。（今後時間を掛けてより明確になると期待される。）

表1の各項目に沿って順次説明する。

研究の方法に関してはその名称の通り、分析型研究が分析（アナリシス）であるのに対して、構成型研究は構成（シンセシス）である。研究の行為に関しては、前者が発見や解明であるのに対して、後者は発明や作成である。獲得する知識に関しては、前者は何が真実かという事実的知識で

表1 分析型研究と構成型研究の属性

属性	分析型研究	構成型研究
方法	分析（アナリシス）	構成（シンセシス）
行為	発見、解明	発明、作成
知識	事実的知識	当為的知識
動機	知的好奇心	社会的価値実現への意欲
シナリオ	周辺的存在	中心的存在
対象領域	単一の学問領域	複数の学問領域
解の一意性	唯一の解	複数の同等な解
重視する性質	知識の整合性と体系性	結果の社会的価値
オリジナリティ	知識の固有性	選択と構成の固有性
新規性	知識の新規性	選択と構成の新規性
評価	専門家によるピアレビュー	受益者によるメリットレビュー

あるのに対して、後者は何をどのようになすべきかという当為的知識である。

知識を獲得する動機に関しては、分析型研究が知的的好奇心であるのに対して、構成型研究は社会的価値の実現に対する意欲である。研究のシナリオに関しては、前者では重視されず周辺的な存在であるのに対して、後者では最も重視される中心的存在である。研究が関与する学問領域に関しては、前者が単一の学問領域において専門性を先鋭化する傾向が強いのにに対して、後者では複数の学問領域に跨ることが普通で、要素技術は必要に応じてさまざまな領域から取り込む。

研究における解の一意性に関しては、分析型研究では真実は一つであり唯一の解があると信じられている。そこでは解の候補が複数残っているうちは未解決問題として研究を継続し、一つの候補に絞られた段階で研究を終了する。それに対して構成型研究では、通常複数の同等な解が存在する。解の間の優劣は、その時点における社会の状況や関連する他の技術の状況によって左右されるので、時代とともに変化する可能性をばらむ。

重視する性質は、分析型研究では知識間の整合性と知識の体系性であるのに対して、構成型研究では結果の社会的価値である。研究のオリジナリティと新規性に関しては、前者が既存の知識体系の上に付加した知識の固有性と新規性であるのに対して、後者では要素技術の選択と構成の方法の固有性と新規性である。

研究の評価に関しては、分析的研究では知識の整合性、体系性、固有性、新規性を判断できるような当該分野の専門家が評価する。研究論文の査読の場合には当該論文と

最も近い専門性を有する者によるピアレビューとなる。それに対して、構成型研究では研究成果から直接メリットを受ける者や、選択と統合の方法の固有性や新規性からメリットを受ける広い分野の研究者・技術者が評価を担当する。このように研究論文の査読の場合にはメリットレビューとなる。専門性が異なる他分野の研究者・技術者が査読に参加することはむしろ望ましい。

### 3 シナリオの構造と性質

本章では、構成型研究のシナリオが一般的にもつと考えられる性質を考察し、シナリオの内部構造と階層構造について述べる。これらに基づいて構成型研究において研究者はシナリオの言語化と描出が可能であろうとの仮説を提示する。この仮説に関しては4章で検証を試みる。

#### 3.1 内部構造

図1においては構成型研究のプロセスを素材、部品、要素等という具体的な用語を使って表現したが、より一般的な用語を使ってシナリオの内部構造を描くことを試みる。第2章でシナリオを「構成型研究において研究目標を要素に分解し、研究目標と要素との論理関係および要素間の論理関係を表現したもの」と定義した。この定義から演繹的に、シナリオは基本的に図2のような内部構造をもつと推測する。図2はシナリオを描出するための基本的フォーマットということができ、構成型研究における研究目標と要素の間の論理関係を記述するためのツールとして利用することができる。

図2において右側から出発して左側へたどってみる。これは構成型研究におけるシナリオの抽出プロセスである。構成型研究においては社会的価値を想定した上で、それを実現するための研究目標を設定する。研究目標とは、構成型研究の結果生み出されることが期待される科学技術上の成果物である。研究目標はモノの実現であったり、サービ

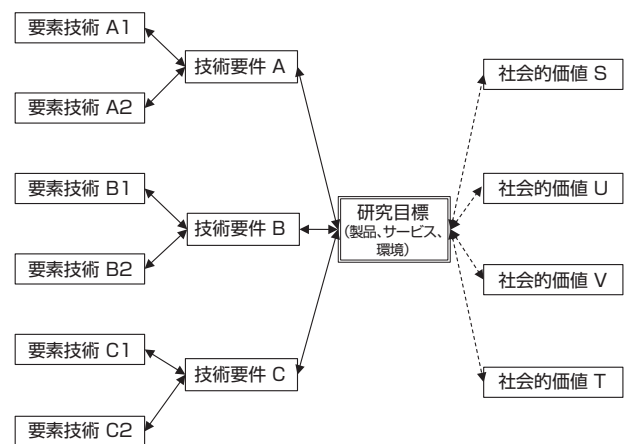


図2 シナリオの内部構造



スや方法等のコトの実現であったりもする。（それらをまとめて一般化製品と言うこともある。）

次に研究目標をブレークダウンして、必要な技術要件を設定する。技術要件とは具体的には、研究目標としたモノやコトに求められる機能や特性、安全性や寿命、またこれらを実現する製造方法等を指す。さらに技術要件をブレークダウンして必要な要素技術を設定する。要素技術とは、シナリオの基本単位である。

次に図2を左側から出発して右側へと逆にたどってみる。これはシナリオに基づいて構成型研究を実施するプロセスである。まず技術要件を考慮した上で、それに必要な要素技術を探し、過不足のないように最適に選択する。必要な要素技術で現在使えるものがない場合には、新たに開発する。次に技術要件を統合して研究目標を実現する。さらに実現された研究目標が、当初掲げた社会的価値に合致しているかどうか確認・検証を行う。

### 3.2 階層構造

構成型研究にはいろいろな規模のものがありうる。それに応じて構成型研究のシナリオも研究の初期段階における小規模で単純なものから、最終段階における大規模で複雑なものまでさまざまなレベルのものがある。大規模な構成型研究のシナリオは、図3に示すようなより小規模なシナリオからなる。このときシナリオは規模の大小にかかわらず、同じ形式の内部構造をもつ、すなわち互いに相似形であると考えられる。より小さなシナリオ群を包含してより大きなシナリオが形成されると考える。

階層構造の中では、小規模なシナリオのもとで設定した研究目標は、それを包含するより大きな規模のシナリオでは要素技術の一つとして扱われる。すなわちシナリオは全体が相似性をもつフラクタルな階層構造をもつと考えられる。

図2と図3に示したようにシナリオの内部構造と階層構造を設定するならば、構成型研究を行う研究者は自ら、研

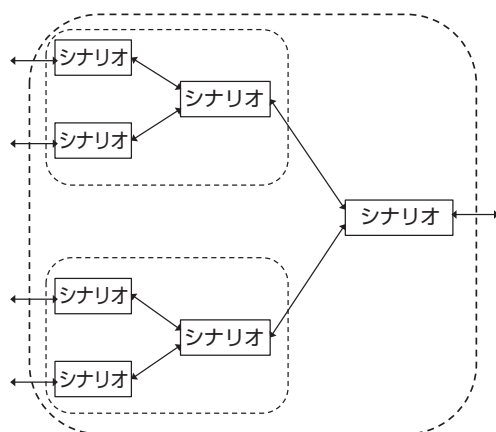


図3 シナリオの階層構造

表2 シンセシオロジー誌の研究論文の執筆要件

	項目	執筆要件
1	研究目標	研究目標（「製品」、あるいは研究者の夢）を設定し、記述する。
2	研究目標と社会とのつながり	研究目標と社会との関係、すなわち社会的価値を記述する。
3	シナリオ	研究目標を実現するための道筋（シナリオ・仮説）を科学技術の言葉で記述する。
4	要素の選択	研究目標を実現するために選択した要素技術（群）を記述する。また、それらの要素技術（群）を選択した理由を記述する。
5	要素間の関係と統合	選択した要素が相互にどう関係しているか、またそれらの要素をどのように構成・統合して研究目標を実現していったかを科学技術の言葉で記述する。

究目標と要素の間の論理関係を科学技術の言葉を用いて言語化し描出することは可能であろうと考える。これがこの論文が提示する第2の仮説である。

## 4 掲載論文に見るシナリオの表現

シンセシオロジー誌の編集委員会は著者に論文中で自己のシナリオを記述することを要請している。本章では著者がシナリオをどのように表現したかを掲載論文によって調べ、2章と3章で提起したシナリオに関する二つの仮説について検証を試みる。

### 4.1 記述の要請

表2はシンセシオロジー誌の編集方針<sup>14)</sup>で示されている研究論文の執筆要件（抜粋）である。この中で項目3「シナリオ」は同誌に最も特徴的なものである。このような形でシンセシオロジー誌は、構成型研究を行った著者に対して自己のシナリオを記述することを要請した。

### 4.2 共通的特徴

シンセシオロジー誌に掲載された論文調査と著者らへのインタビューにより、シナリオには技術分野によらない共通的な特徴がいくつか認められた。

#### 4.2.1 シナリオの発生

研究が大きなプロジェクトに発展した場合でも、その最も初期の段階では一人の研究者の直感的な「思いつき」や「ひらめき」がシナリオ発生のきっかけとなることがしばしばある。思いつきやひらめきが、研究の進展や経験の深化とともに「可能性」へと変化し、さらに研究者自身の中で整理されて「確信」に成長する。さらに同僚たちとの議論はシナリオの「言語化」と「論理化」を促し、次第に第三者が理解可能な形に進化すると考えられる。

上記のシナリオ発生の初期過程においては、シナリオの原型は通常一人の研究者の頭の中で、言語化と論理化が

十分なされないまま熟成されていく。複数の研究者がシナリオに関与するような集団的作業は言語化以降である。言語化以前の状態ではシナリオを他者へ論理的に伝達する手段がなく、研究者個人の中でのいわゆる言い難いアイデアにとどまる。

#### 4.2.2 シナリオの時間的发展

シナリオは研究の進展や研究グループ内での検討とともに発展し次第に精緻化されていく。シンセシオロジー誌の論文では通常著者が執筆している「その時点」におけるシナリオ、あるいは時間的に変化して最後に到達した「最終」シナリオが記述されることが多い。

一方研究プロジェクトが段階的に発展し、それとともにシナリオが発展的に変化していく様相を時間経過とともに記述する場合は、シナリオ間の関係は図3に示した階層構造をなすことがある。後発のプロジェクトは先発のプロジェクトの成果や経験を取り込んだ上で、社会的価値により接近した研究目標を掲げる。

#### 4.2.3 大規模なシナリオ

多数の研究者が関わるような大規模な研究プロジェクトの場合には、研究の範囲が広くなりシナリオは階層構造をもつようになる。複数の技術要件が設定され、技術要件ごとに数人から十人程度の研究者グループが配置されるといった組織運営がとられることがある。またそれぞれの要素技術に対応して研究者が専任で張り付くといった形もありうる。大規模プロジェクトでは、図3に示すような階層構造をもつシナリオが作られることが多い。

#### 4.2.4 シナリオの言語化

シンセシオロジー誌に掲載された論文の著者らにインタビューした結果次のような事例があることが分かった。実際に研究を進めているとき研究者は直感的、無意識的にシナリオをもっているが、それは必ずしも十分に言語化されておらず、記録に残っていない場合も多い。そのような場合シンセシオロジー誌の論文執筆を開始してみても初めて著者自身がシナリオを無意識的にもっていたことに気付くことがある。シンセシオロジー誌の論文には、無意識的にもっていたシナリオを改めて言語化、論理化したといったケースが少なからずあった。

研究を進める中で研究者がシナリオを言語化して記録していなかった場合、過去に遡ってシナリオを思い出し、その発展の過程を再現することはなかなか難しいようである。シナリオが時間的に変化し発展するとともに、過去のシナリオは研究者の記憶から消えてしまう傾向にある。

### 4.3 さまざまな表現形式

シンセシオロジー誌の論文の著者らがもっているシナリオの内部構造は基本的に図2に示すようなものと考えるが、

要素間の論理関係のどのような側面を強調してシナリオを表現するか、その形式は著者ごとに大きく異なっている。シンセシオロジー誌の論文で表現されたシナリオのいくつかが文献[5]に図示されている。我々はそれらを4つの特徴的な表現形式に類別した。

#### 4.3.1 要素間の論理関係

シンセシオロジー誌の論文には、図2に示した内部構造の形式に基づいてシナリオの論理関係を表現したものが論文全体の約半数あり、多くを占める。そこでは要素技術と技術要件を互いに論理的に関係付け、それらを統合して研究目標に至るとしている。

シンセシオロジー3巻4号に掲載された「日本全土の元素分布の調査とその活用」<sup>[6]</sup>はその典型的な例である。シナリオが図4に示されている。研究目標は、地殻表層の元素の分布を日本全土で調べ、元素分布図（地球化学図の一種）を作成・公開することであった。この地球化学図はヒ素、水銀、カドミウム等の有害物質による環境汚染の状況やその原因究明に使われることを意図したものである。

地球化学図はデータベースの一種であるので、このシナリオではデータベースが備えるべき技術要件として基本特性、網羅性、信頼性、ユーザー利便性、運用性の5項目を設定した。地球化学図が広く活用されるためにはそれぞれの技術要件に一定の水準が必要である。さらにその水準を満たせるような要素技術が図4に示すように13種類特定された。具体的な研究はこのシナリオに基づいて要素技術を開発したり、野外調査や分析作業を行ったりすることであった。

このプロジェクトの最大の論点は、技術要件の一つであるデータの網羅性であった。プロジェクトに参加する研究者の人数や研究期間に制約がある中で、最終的に10 km四方に1点という試料の採取密度を選択したが、そのよう

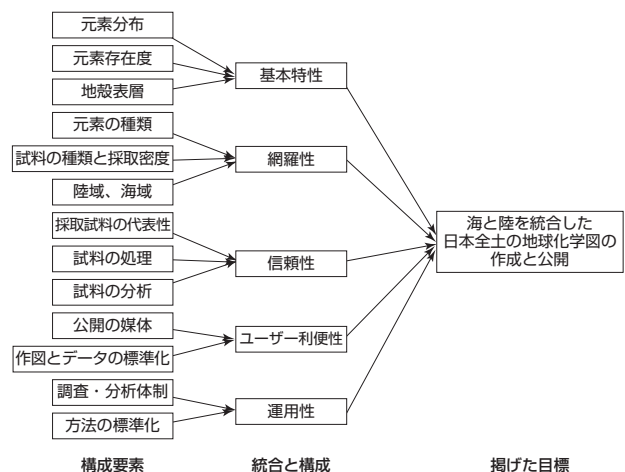


図4 日本全土の地球化学図の作成と公開のためのシナリオ（シンセシオロジー3巻4号、今井<sup>[6]</sup>より）





な知見と直感によって行われたものである。結果的に北海道の漁港に水揚げされる大量の雑魚の筋肉から実用上十分な量の不凍蛋白質を精製することに成功し、民間企業と共同で産業化を試みている。

この論文は、研究の中でさまざまな選択肢がある時に、時流に乗った方法を必ずしも優先しないという姿勢、選択において必要となる科学的な根拠を得るために基礎研究を重視する姿勢がポイントであることを示唆している。

#### 4.3.4 シナリオの時間変化

構成型研究の実施の途中で研究が思わぬ方向に進展したり、社会情勢が変化したり、新たな要素技術が出現したりすることによって、研究目標の変更を含むシナリオの大掛かりな修正が行われることがある。場合によってはプロジェクトが途中打ち切りになることもある。

長期にわたる構成型研究では、その期間内にシナリオが変化、展開していくことは当然であろう。シンセシオロジー誌には、シナリオの変化の様相が記述されている論文が全体の約 20 % がある。

図 7 はその一例で、実時間全焦点顕微鏡の製品化に至る構成型研究のシナリオである<sup>[9]</sup>。当初は科学的興味から出発したアイデアが研究の進行とともに発展し、要素技術の進展や協力企業との対話の中で次第に研究目標が具体化、明確化して製品化に至った時間的経緯を記している。そこでは、構成型研究のダイナミズムを理解することができる。

#### 4.4 表現の難しさ

掲載論文の中にはシナリオが必ずしも十分明確に記述されていないものがあるが、その背景には次のような状況があったと考えられる。

A) 編集委員会から各著者へシンセシオロジー誌の論文形式の趣旨説明が十分になされてなく、著者側として具体的なシナリオの記述方法がよく理解できないまま書き進めてしまった。

B) 構成型研究の論文形式はまだ定まっていないことから、個々の編集委員によってシナリオに関する多様な考え方が併存している状況であった。

C) 査読者の査読基準が必ずしも統一されてなく、それぞれが多様な基準のもとで掲載可否の判断をした。

構成型研究の論文形式は検討が始まってから高々 10 年でまだ試行錯誤の段階にあることから、上記 A) ~ C) の状況はやむを得ないことと考えられる。分析型研究を記述する現行の科学論文が、17 世紀以来の長い年月をかけて現在の論文形式と査読基準を確立してきたことを考えれば、構成型研究の論文形式と査読基準が現状で未確立なのはある意味当然のことであり、今後の論文の積み上げと経験の蓄積の過程で徐々に解決されていくものと考えられる。

#### 4.5 仮説検証の試み

シンセシオロジー誌の編集委員会は構成型研究に関する研究論文を投稿する著者にシナリオの記述を要請してきたが、それは 2 章と 3 章で述べたように、シナリオが構成型研究で中心的役割を果たし、かつそれを言語化し描出することは可能であろうとの仮説を前提とするものであった。これまでの掲載論文を調べることによってこれらの仮説の妥当性の検証を試みる。

シンセシオロジー誌への掲載論文は編集委員会の要請の通り、そのほとんどが明示的あるいは非明示的にシナリオに言及している。多くの論文でシナリオの記述のために独立した章が設けられたり、シナリオに特化した記述がなされたりしている。シナリオは構成型研究の全体を俯瞰し、それぞれの実施内容間の論理関係を説明している。

掲載論文のほとんどで、著者らがそれまでに他の学術論文誌で発表した研究論文が関連する参考文献として引用されている。シナリオは、著者らの過去の論文のいくつかを貫くような形で書かれている。シナリオはそれら複数の論文の関係を明確に描き出しており、また著者らの一連の研究の芯のような存在であることが推測される。事実著者へのインタビューから、シンセシオロジー論文を執筆することは、自己の一連の研究を総括する上で非常に役立つとの意見が多かった。

シンセシオロジー誌の掲載論文には、業界全体を巻き込むような大規模プロジェクトのシナリオから、研究者が一人で行っている小規模研究のシナリオまで多様な規模のものが記述されている。論文の中での著者の主張から推測すると、大規模プロジェクトと同等の重みで小規模研究においてもシナリオが記述されている。

掲載論文を読むと、もしシナリオに関連する記述を当該論文から削除してしまつたら、研究の羅列のみになって、一連の研究を貫く芯が著者によってどのように意図された

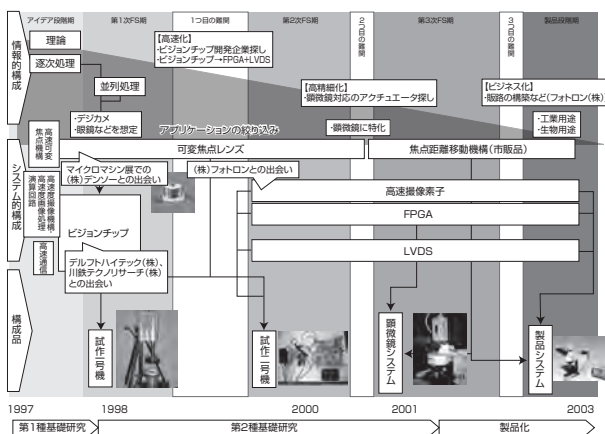


図7 構成の紆余曲折  
(シンセシオロジー2巻4号、大場<sup>[9]</sup>より)

かが分からなくなってしまう。その意味でシンセシオロジー誌の論文を特徴づけるものはシナリオであると言える。

以上のことから第1の仮説に関して、シナリオは構成型研究で中心的役割を果たしているとしてよいであろう。

シンセシオロジー誌の掲載論文の半数以上が、シナリオないしそれに相当するものを1枚ないし2枚の図に要約して描出している。図からは著者が構成型研究をどのようなシナリオで進めていったのか、その論理関係全体が概観できる。そして本文（テキスト）の中で研究目標と要素間の論理関係の詳細が記述されている。

シナリオを記述する際に、論文ごとに異なるが、科学技術的事項と枠組的事項を一定のバランスで記述している。論文によっては科学技術的事項のみを記述したものがある一方、枠組的事項に重点を置いたものもある。枠組的事項のうち最も多いものは共同研究に関するものである。その理由は構成型研究の多くが民間企業との共同研究で行われていることによる。このような重点の置き方の違いは、当該研究を行う上で最も重要なポイントがどこにあったのかという著者の見解の差から生じたものと想像される。

4.3節でシナリオは多様な形式で描出されることを述べた。図4は、図2のシナリオの内部構造がそのままで論理関係の表現形式になりうることを示している。また図5、図6、図7の3つの事例は図2とは異なる表現形式であるが、要素間の論理関係の特定の側面を強調したものになっている。この場合要素技術や技術要件は本文（テキスト）の中や他の図の中で記述されている。

掲載論文に見られるすべてのシナリオが、著者によってはじめて記述されたという意味で、オリジナルな創出物である。さらに図5で示した事例は、要素間に独自の循環的關係を設定して新しい研究スタイルを創出している。シナリオの形態自体にも高いオリジナリティが認められる。

掲載論文の著者らによる座談会が2回開かれ、執筆に当たった経験が披露されている<sup>[10][11]</sup>。また論文掲載後に著者が改めて構成型研究全体を記述した論説もある<sup>[12]</sup>。これらもこの論文の仮説をサポートしていると言える。

以上のことから第2の仮説に関して、シナリオの表現形式は著者によってさまざまではあるものの、研究分野によらず、また研究の規模によらずに、その言語化と描出は可能であると言えるであろう。

## 5 シナリオの活用

シナリオが構成型研究の中心的存在であることから、さまざまな場面でシナリオが有効に活用できると期待される。構成型研究の企画・立案、実施、評価において、シナリオがどのように活用できるか、その可能性を以下に論

じる。またシナリオを社会に公開し関係者間で共有することによって、イノベーションを目指す研究開発のスピードが社会全体として格段に高まる可能性を示唆する。

### 5.1 研究計画の企画・立案

研究計画は、シナリオの全部あるいは一部を切り出して、一定のリソース（期間、予算、人員、機材）に合致するように再構築したものとみなすことができる。具体的にはシナリオは次のように活用することができる。

#### 5.1.1 研究目的の設定

研究計画の企画・立案者は、シナリオ作成時に想定した社会的価値をベースにして、特定の研究目的に絞り込んだり、あるいは波及効果に敷衍したりして、社会的価値を研究計画の中に取り込むことができる。

#### 5.1.2 ロードマップへの展開

研究計画の企画・立案者はシナリオに時間的優先順位を加味して研究計画線図（ロードマップ）に展開できる。

#### 5.1.3 要素技術の開発

研究計画の企画・立案者はシナリオに基づいて、その各部分の役割を特定して研究プロジェクトの実施体制案を作ることができる。研究目標の達成に当たって足りない要素技術を特定し自ら開発するか外部に委託するか判断できる。

#### 5.1.4 潜在的ステークホルダーとの対話

研究計画の企画・立案者は、同じ関心をもつ民間企業等の潜在的ステークホルダーにシナリオを提示して意見のフィードバックを受け、その改善に反映させられる。民間企業が研究実施に関心をもつ場合には、シナリオで想定されている相互の役割を特定して共同研究の可能性を議論できる。

#### 5.1.5 リソースの見積もり

研究計画の企画・立案者はシナリオに基づいて、プロジェクト遂行に必要なリソース（人員、設備・機材、資金、時間）を確実に算定して所属機関や研究助成機関に申請できる。

## 5.2 研究の実施

### 5.2.1 研究実施体制の構築

研究の実施者はシナリオの各部分の役割に基づいて、過不足なく研究参加者を特定することができる。必要に応じて外部の共同研究相手先を選び、より大きな研究実施体制を組むことができる。

### 5.2.2 研究参加者の組織化

研究の実施者は、研究への参加者全員がシナリオを共有し、それぞれの位置付けと役割を認識していることを確認できる。産学官の共同研究であれば、組織を越えて参加主体がそれぞれの役割と相互の関係を明確に認識できる。

### 5.2.3 研究計画と体制の変更

研究の途中において中間評価等によりプロジェクトの実施計画を変える場合には、研究の実施者はシナリオ全体を柔軟かつ全体整合的に変更し、適切にプロジェクトを再構築することができる。

## 5.3 研究の評価

### 5.3.1 プロジェクトの評価

シナリオが明確に提示されていれば、研究資金の提供機関等の研究評価者は研究プロジェクトの申請段階で、シナリオに基づいて研究計画の合理性、革新性、実現可能性、リソース算定の妥当性等を的確に評価して採否を判断できる。

研究実施の半ばで中間評価が行われる場合には、研究評価者は当初のシナリオに照らして研究の進捗を評価したり、研究計画が変更される場合には状況や環境の変化に適合するように変更の是非を的確に判断したりできる。

研究実施の終了段階においても、研究評価者はシナリオに基づいて研究の実施状況と成果を評価できる。

### 5.3.2 シナリオの評価

シナリオは構成型研究の中心的存在であるがゆえに、シナリオの良否が構成型研究プロジェクトの成否に強く影響する。シナリオの良否の評価もプロジェクトの評価において重要である。シナリオ自体の合理性、革新性、実現可能性の評価の視点をここで述べておく。なお構成型研究のすべてが、その成果が社会的価値の実現と直接結びついていないわけではないので、図3に示すように、フラクタル的な階層構造の下位にある小規模なシナリオに関しては、いくつかの段階を経て最終的に社会的価値の実現や産業化に結びつく。社会的価値に至る「シナリオの連鎖」の妥当性も合わせて評価対象として考慮されるべきである。

シナリオの評価は具体的には次の視点からなされるべきであろう。

- a) 想定した社会的価値は、社会や産業の現状と将来動向から見て適切なものであるか。
- b) 設定した研究目標は、想定した社会的価値の実現に有効であり、不可欠なものであるか。
- c) 設定した研究目標を実現するためのシナリオは妥当なものであるか。さらに社会的価値の創出可能性は十分考慮されているか。
- d) 設定したシナリオは他のシナリオと比べて、課題をブレークスルーする可能性等の点で、明らかな優位性があるか。
- e) ブレークダウンした技術要件は、研究目標に対して過不足のないものであるか。
- f) 特定した要素技術は、対応する技術要件を満たすために過不足のないものか。
- g) 特定された要素技術は現状で十分入手可能か。

- h) 現状で入手可能でない要素技術に関して、自らの組織による開発あるいは他組織への委託開発の可能性は十分考慮されているか。

### 5.3.3 評価の質の向上

研究助成機関が助成する構成型研究においては、通常研究計画が申請書に記載されており、それが採択審査の対象となる。一方実際に行った研究の結果は終了報告書に記載される。申請書と終了報告書は別々の時期に別々の書類として提示されるため、申請から終了に至る全期間にわたる研究の妥当性や合理性を研究実施者自身が整合的に検証したり、研究助成機関側が整合的に評価したりするには少なからぬ努力が必要である。研究プロジェクトの申請時にシナリオが明確に提示されていたり、あるいは研究実施の途中でシナリオの変更が明確に提示されたりしているならば、研究プロセスと成果をよりの確に評価することができる。

研究の成否は研究成果の質と量で判断される。このとき成果の客観的な証拠として通常は学術論文誌に掲載された論文が用いられる。ところがこれらの学術論文誌のほとんどが分析型研究の論文形式を要請し、その評価尺度で査読する。このように研究プロジェクトが構成型研究であったとしても、その成果を分析型研究の尺度で評価するという事態になりかねない。

現状では学術論文誌に構成型研究の成果をそのまま発表する機会は極めて少ない。その理由は、現行の学術雑誌の多くが構成型研究の発表を想定していないことによる。また研究実施者自身が構成型研究のプロセスや成果をどのように表現してよいか理解していないことも理由の一つであり、学術論文誌の査読者が的確な評価尺度を必ずしも会得しているとは限らないことも大きな理由である。

構成型研究のプロセスと成果が客観的に記述され、論文としてシンセシオロジー誌をはじめとした諸雑誌に多く公開されるようになれば、明確に研究プロジェクトの評価が行える。シナリオの描出を含む構成型研究の積極的な論文発表が強く望まれる。

### 5.3.4 研究者の評価

研究論文の中でシナリオが記述されることで、構成型研究を遂行できる優れた研究者を見出し、その能力を評価することができる。また研究者自身もイノベーション創出のためにどのような能力を獲得すべきかを自己評価することができる。

構成型研究を行う際に研究者に要請される基本的な能力は次のようなものが考えられる。

- a) 新たな社会的価値（活用事例）を想定する能力
- b) 社会的価値に適合した研究目標を設定する能力



- c) 要素技術から研究目標までを俯瞰してシナリオを描出する能力
- c-1) 研究目標を実現するための技術的要件を社会の要求や制約等を考慮して、機能、特性、安全性、リスク等にブレークダウンする能力
  - c-2) 技術要件を構成するための要素技術を過不足なく特定する能力
  - c-3) 自己および自己の研究グループが強みをもつ要素技術を同定できるとともに、先行研究者の優れた要素技術を見出して選択する能力
  - c-4) 他の研究分野の研究結果から、自己の研究の要素技術として使えるものを見出して選択する能力
  - c-5) 未だに実現されてないキーとなる要素技術を自ら開発する能力

## 6 おわりに

シンセシオロジー誌に掲載された100編余りの研究論文を調査した結果、掲載論文の多くでシナリオが研究全体を俯瞰する要として機能を発揮していることが読み取れた。シナリオの記載の有無が、シンセシオロジー論文を他の学術論文と区別する最大の特徴となっている。また掲載論文の2/3近くでシナリオあるいはそれに相当するものが図を用いて視覚的に示されている。文章による記述も含めて、シナリオの言語的・視覚的表現が十分可能であることが確認された。

表現の巧拙は論文ごとに異なるが、今後シナリオの記述の経験を積み重ねていくことにより、表現形式はより洗練されていくものと思われる。今回はシンセシオロジー誌に掲載された100編余りの論文という限られた素材を対象とした仮説検証になったが、今後構成型研究の論文がより多く発表されていけば、改めて確実性の高い検証が可能になると期待される。

シンセシオロジー誌に掲載された論文が、他分野出身の査読者や読者にも理解可能な形で記述されていることは驚きである。分野ごとに細分化された現代の学術論文誌では、どの論文も他分野の読者には理解不可能なものがほとんどであるのに対して、シンセシオロジー誌の論文が、他分野の研究者・技術者が理解できる記述となっていることは注目に値する。構成型研究の表現形式が今後さらに進化し洗練されていけば、読者により理解しやすい論文となることが期待される。

著者へのインタビューでは、査読者との議論が有益であったとの意見が多く聞かれた。査読者の実名を公表して、著者との議論を論文末尾に掲載したことも新しい試みである。重要ではあるが著者が書き切れなかった論点を査読

者が指摘することで、読者にとって論文の理解度がより深まることが効果として挙げられる。

産総研では2000年代の前半に研究開発を第1種基礎研究、第2種基礎研究、製品化研究という3つにカテゴリー分けした上で、それらを同時かつ一貫して行う研究を本格研究と定義して実践してきた<sup>[13]</sup>。これらのうち、第2種基礎研究と製品化研究は構成型研究であり、第1種基礎研究は分析型研究と言えるであろう。

構成型研究の成果は業界雑誌や企業ごとの技術雑誌(技報)で公開されてきた。しかしその中心的課題であるシナリオについては明示的に記述されることは少なかった。一方構成型研究のプロセスと成果を現行の学術雑誌に発表するときには、構成型研究の一部を切り出して分析型研究の表現形式に変換して査読基準に適合させるような「工夫」が行われてきた。そのような中では構成型研究のシナリオをそのまま記述することは困難であった。

構成型研究のシナリオが、シンセシオロジー誌だけでなく多くの学術誌において発表され公開されるようになれば、それはより広く社会で共有され財産となる。シナリオが異なる分野の間で共有されれば、そこを基点として分野を跨ぐ新たな融合研究が促進される。シナリオが産学官を跨いで共有されれば、そこを基点として組織間の連携が促進され産学官連携の実体が強化される。異なる分野や組織の間の連携はそもそも困難な要因が多いので、関係者間で全員が理解し納得できるようなシナリオが共有されれば、連携のレベルは格段に高まり、スピードは加速されると考える。

優れたシナリオを共有することにより、研究を実施する側も大きな利益を得ることができ、また研究を助成する側も確かな評価を通してより効果的な資金提供ができるようになるであろう。

イノベーションの時代には構成型研究の重要性がより増大する。優れた社会的価値が実現された研究の裏には優れたシナリオがあったはずである。それを公開し社会的な財産として共有することによって、研究開発と社会的価値をより効率的に結び付けられるようになると期待される。シナリオの共有によって産官学を問わず研究者や研究グループが相互に触発され、イノベーションに向けた研究開発が一段と加速されるような新しいステージに社会の仕組みが進化することが可能であろう。

## 謝辞

シンセシオロジー誌の構成型研究論文のシナリオに関して地質分野に関して有益な議論をいただいた産業技術総合研究所富樫茂子氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 産業技術総合研究所: 学術誌*Synthesiology* (シンセシオロジー), [http://www.aist.go.jp/aist\\_j/aistinfo/synthesiology/index.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/synthesiology/index.html), 閲覧日2016-01-17.
- [2] 吉川弘之: 第2種基礎研究の原著論文誌, *Synthesiology*, 1 (1), 1-6 (2008).
- [3] 小林 直人, 赤松 幹之, 岡路 正博, 富樫 茂子, 原田 晃, 湯元 昇: *Synthesiology*論文における構成方法の分析, *Synthesiology*, 5 (1), 36-52 (2012).
- [4] シンセシオロジー編集委員会: 編集方針, *Synthesiology* 各号の末尾 (2008-), あるいは[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/aistinfo/synthesiology/regulation.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/synthesiology/regulation.html)
- [5] シンセシオロジー編集委員会: シンセシオロジー研究論文の執筆ガイダンス-要素技術、統合・構成シナリオの描き方 - 2012年4月, [http://www.aist.go.jp/pdf/aist\\_j/synthesiology/synthesiology\\_guidance.pdf](http://www.aist.go.jp/pdf/aist_j/synthesiology/synthesiology_guidance.pdf), 閲覧日2016-01-17.
- [6] 今井登: 日本全土の元素分布の調査とその活用, *Synthesiology*, 3 (4), 281-291 (2010).
- [7] 持丸正明, 河内まき子: 個別適合メガネフレームの設計・販売支援技術, *Synthesiology*, 1 (1), 38-46 (2008).
- [8] 西宮佳志, 三重安弘, 平野悠, 近藤英昌, 三浦愛, 津田榮: 不凍蛋白質の大量精製と新たな応用開拓, *Synthesiology*, 1 (1), 7-14 (2008).
- [9] 大場光太郎: 実時間全焦点顕微鏡の開発・製品化, *Synthesiology*, 2 (4), 264-275 (2009).
- [10] シンセシオロジー編集委員会: 新しい形式の論文を執筆して, *Synthesiology*, 1 (1), 66-73 (2008).
- [11] シンセシオロジー編集委員会: シンセシオロジー3周年記念座談会, *Synthesiology*, 4 (2), 115-120 (2011).
- [12] 駒井武: 技術開発におけるポートフォリオ構成と社旗実装, *Synthesiology*, 6 (3), 180-186 (2013).
- [13] 産業技術総合研究所: 第2種基礎研究を軸に本格研究へ, [http://www.aist.go.jp/Portals/0/resource\\_images/aist\\_j/information/honkaku/leaflet.pdf](http://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/information/honkaku/leaflet.pdf), 閲覧日2016-01-17.

執筆者略歴

小野 晃 (おの あきら)

1969年東京大学理学部物理学科卒業。1974年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了(理学博士)。同年工業技術院計量研究所入所。2001年産業技術総合研究所に組織替えの後、計測標準研究部門長、理事、副理事長、2012年より特別顧問。専門分野は計量標準、標準化、計測技術。シンセシオロジー誌の創刊と編集、若手博士研究者の育成、ナノテクノロジーの国際標準化、温度標準・熱物性標準・リモートセンシング等の研究に従事。この論文では全体の構成と執筆を担当した。



赤松 幹之 (あかまつ ともゆき)

1984年慶應義塾大学工学研究科管理工学専攻博士課程修了(工学博士)。1986年工業技術院製品科学研究所入所。2005年産業技術総合研究所人間福祉工学研究部門研究部門長、2010年同所ヒューマンライフテクノロジー研究部門研究部門長。2014年11月より同所自動車ヒューマンファクター研究センター首席研究員。筑波大学システム情報系教授(連携大学院)、名古屋大学客員教授を兼務。本研究では、構成的研究の概念の具体化と科学技術における構成的研究の位置付け、シンセシオロジー誌の発刊意義および構成的研究論文の要件の具体化を担当した。



小林 直人 (こばやし なおと)

1973年京都大学理学部物理学科卒業、1978年京都大学工学研究科博士課程修了(工学博士)、同年工業技術院電子技術総合研究所入所。1997年より企画室長、量子放射部長を経て、2001年産業技術総合研究所光技術研究部門長、2003年同研究所理事、2009年4月より早稲田大学研究戦略センター教授。専門は光デバイス工学、半導体材料工学、量子ビーム工学、研究戦略・評価論等。この論文では構成型研究の位置づけ、意義、役割、使い方、作り方を考察した。



査読者との議論

議論1 全体評価

コメント (吉川 弘之: 科学技術振興機構)

この論文はシンセシオロジー誌に発表された論文に関する重要な課題を扱っており、今後本誌に投稿される論文の質的向上、および本誌の読者の理解にとって有用であると考えます。本誌に投稿される論文は実際に行われた研究開発に関して得られた構成に関する独自性を持つ知識の論文であるが、これらの synthesiological (構成的) な論文は、論文執筆の論理構造が伝統的に定められている一般の科学論文と異なり、その構造を執筆者自身が探りつつ論文を作成するという状況があり、その意味で、この論文のような投稿論文の調査に基づく論文の論理構造に関する検討は貴重なものである。

この論文は、100篇に至る発表論文の精査によって得られたevidenceの分析である。とすれば、発見された事実をまず述べ、それについての分析結果を示して、構成論文とはこのようなものと示せばよいということになる。しかしそれでは分析論文になってしまうとシンセシオロジー誌にふさわしくない。この論文では、構成論文のための論文の形式を本誌を計画した立場で仮説として提案し、100の論文を調べてその通りになっていることを実証し、仮説の正当性を実証するとともに、企画時には判明できなかった内容が豊富に得られて、シンセシオロジー論文の今後の作成に大きく寄与するという立場で読むことのできる論文となっている。ただの分析論文にしなかった執筆者の意欲を大いに評価するとともに、感銘を受けている。

Vol.5No.1 小林論文との併読が望まれる。

コメント (湯元 昇: 産業技術総合研究所)

原稿の第1版では、構成型研究の方法論を分析型研究と対比しながら考察するとともに、構成型研究のシナリオの作り方をシンセシオロジー誌に掲載された研究論文の例を引きながら述べています。しかし、シンセシオロジー誌の「研究論文」とするには、独自性のある議論までは発展していないと思われます。

また、第2版では、仮説の提示と実際の検証を明示的にするため、大幅な原稿改訂を行われた執筆者の努力は高く評価されます。提示された2点の仮説(第1点:シナリオが構成型研究で中心的役割を果たすであろうということ。第2点:シナリオを言語的および視覚的に表現することが可能であろうということ。)は、シンセシオロジー誌を発刊するときに前提としたものであり、その検証には大きな意義があります。ただ、シンセシオロジー誌への掲載に当たっては、上記仮説を前提として著者らにシナリオの記述を要請していますので、シンセシオロジー誌の論文を対象として仮説を科学的に検証するためには、バイアスがかかっていることを前提とした慎重な議論が必要ではないでしょうか。

さらに、2次査読回答の中に記述されているシナリオが明確化されていない論文についての考察は、仮説の検証の意味で重要だと思いますので、是非、本文に入れていただけますようお願いいたします。

回答 (小野 晃)

原稿の第1版では表題にシナリオの「作り方」を入れて強調した形



としました。しかし、シナリオはそれぞれの研究者の独創的な創出物であり、作り方を第三者が容易に指南できるものではないと考えられることから、シナリオの「作り方」を強調すべきでないと考え、改訂を行いました。また、原稿の第1版では、「仮説の提示と実際の検証」を明示的に表現することが足りなかったと考え、4.5節「仮説検証の試み」を新たに設けて詳述しました。

構成型研究それ自体は長い歴史があるものの、その論文形式の検討はシンセシオロジー誌の発刊以来高々10年の歴史しかありません。現行の分析型の科学研究の論文形式は17世紀以来長い年月をかけて形成され、現在ではすべての科学者が了解する常識として確立しています。それと比べると構成型研究の論文形式はまだ確立されたというには程遠い段階にあり、普遍的な検証ができる状態に至っているとは思いません。従いまして、この論文が提示する二つの仮説が完全に検証されるにはさらなる長い年月がかかると思います。そのため「シンセシオロジー誌が試みた数年間の実績から何が言えるのか」というスタンスで改訂を行いました。

掲載論文には「バイアスがかかっている」ことに関して著者らの考えを述べます。本文に述べたように、一部の執筆者に対しては掲載済みの論文のシナリオの例を説明したりして、シナリオ抽出の参考になるように編集委員会として努めました。しかしながら仮説の検証についての本質的な論点は、編集委員会による要請があったかにかかわらず、論文の中でシナリオが構成型研究の中心的役割を「本来的に果たしている」か、また研究者がシナリオを記述ないし抽出することは「本来的に可能であった」と判断できるかであると著者らは考えます。シナリオの内容はすべて彼らの創意によるもので、編集委員会はシナリオの書き方の例を説明したに過ぎません。シナリオに関する章が論文中に設けられているかどうかといった形式によるのではなく、掲載論文の内容を読み込むことにより本来的に「可能であったかどうか」を判断することで仮説検証を行いました。

さらに、4.4節「表現の難しさ」を新たに設けて、掲載論文の中でシナリオが明確化されていないものについての考察を記載しました。

## 議論2 分析科学と構成科学の違い

コメント（吉川 弘之）

図1では、分析科学と構成科学の違いを述べているが、一般的に行われている説明との関係がわかりにくい。一般の説明では、分析は自然存在が与えられ、それを説明する学問領域を創出（法則の導出）あるいは発展（知識の充実）するものであり、一方構成は期待（価値）が与えられ、それを実現する存在（製品、サービス、方法等）の作り方を創出し、あるいは実際に作り出すものとされる。両者は論理的に共通部分を持つが、各論理の出現の順序が違う。構成のシナリオは仮説形成であり、分析での法則発見が仮説である。しかし分析では仮説形成の過程は論文に書かないこととなっている。構成科学でシナリオ部分に力点を置いて、それを説明することが一般の科学論文と違う重要な点であり、それが分析と構成の両科学を分ける大きな違いである。この点が見える図にしてほしい。

回答（小野 晃）

構成科学の仮説形成に関するご指摘はその通りと思います。それを踏まえて、図1を、分析型研究と構成型研究の対比がより明確に描かれている図に置き替えました。

## 議論3 シナリオの内部構造

質問（吉川 弘之）

図2では、シナリオ抽出と構成型研究の実施プロセスが同じ図の右からと左からとの流れに対応するとされている。説明は次のように読める。「図2のような関係図が既存のものとしてあって（おそらく要件や要素は膨大なデータになるであろう）、その中から慎重に選択す

る、次に選ばれた要素を集約して具体的な存在物としての製品を構成する。」さて、ここで質問。投稿論文において、この図のようなものが既存のデータによって与えられる定式化したシナリオ抽出の場であったのか。実際はそのようなデータなしに、シナリオ抽出の過程でこの図に相当するものが創出される例が多いのではないかと。定式化された一般的なものを作り上げることがシンセシオロジーの目的であるとすれば、各論文は例題としてのエビデンスであり、その集積で一般的な図2のフォーマットが決まるという点を強調してほしい。

回答（小野 晃）

シナリオの内部構造と論理関係を説明する図2は、この論文の著者らがシンセシオロジー誌の創刊とはほぼ同じ時期に、構成型研究のシナリオの定義から演繹的に導きだしたものです。同図はシナリオに含まれる研究目標と要素との間の論理関係を説明するための基本的なフォーマットと考えます。

ご質問にある『実際はそのようなデータなしに、シナリオ抽出の過程でこの図に相当するものが創出される例が多いのではないかと』とのご指摘ですが、実際はその通りだと思います。シンセシオロジーに掲載された論文は、子細に見ればどれ一つとして同じシナリオでは描かれていません。研究者によっては自己のシナリオを最も適確に抽出できる論理関係は必ずしも同図のフォーマットに限られるものではなく、さまざまな異なるフォーマットがあるということです。それらの事例は4.3節「さまざまな表現形式」で示した通りです。図2の基本フォーマットは、構成型研究の研究者が自己のシナリオを表現するときに参考になるものではないかと考えますが、最適のフォーマットは研究者ごとに異なりますので、今後フォーマットの事例を蓄積し類型化していくことは有用なことと考えます。

## 議論4 シナリオの定義と役割

コメント（吉川 弘之）

シナリオを明解に定義してほしい。また、シナリオの重要性は十分説明されているが、シナリオとは何をすることなのか明示的に述べられていないので、論文を読み進むうちに、シナリオとは何か、またなぜシナリオを書くことが必然的なのかについての理解が深まらない気がし始める。論文中に、シナリオの役割についての説明が十分あるが、これは効用を述べるもので、必然的に必要というところまでいれない。しかし論文を読み進んで4章に至り、例題とともに、シナリオの必然性に触れている。例えば「4.2.4 シナリオの言語化」において、記憶のために言語化の必要性が述べられているが、言語化は記憶だけでなく、価値や目標の表現にはそれに含まれるであろう要素間の論理関係がないので、シナリオという文章にしてそれを発見するのがシナリオ目的であるということも言われているのであって、なぜ文章としてのシナリオを書くかについての積極的な説明が明快に述べられていると、この論文、ひいては構成型論文の意義がよりよく理解されるように思われる。

回答（小野 晃）

第1版では、シナリオの定義が明確でなかったため、「構成型研究において、研究目標を要素に分解した上で、研究目標と要素との論理関係および要素間の論理関係を表現したもの」と定義し、2章前文に記述しました。

また、『なぜ文章としてのシナリオを書くか』の理由は、ご指摘のように、研究目標と要素の間の論理関係、および要素相互間の論理関係を明確に描き出すためと考えます。この点が欠如すると、シナリオは「思いつき」や「ひらめき」の域から脱せずに、第三者との議論や協力もうまく成立しないように思います。シナリオを上記のように定義したことで、読者にシナリオ作成の必然性が理解していただけると良いと思っています。この点を念頭に置いて全般的に改訂しました。



# 太陽電池モジュールの信頼性向上と 試験法開発に関するコンソーシアム研究

— 「高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム」の運営 —

増田 淳<sup>1\*</sup>、井川 奈々子<sup>2</sup>

太陽電池モジュールの信頼性向上と長寿命化、さらにはモジュール寿命を正確に評価可能な試験法の開発を目的として、モジュール部材メーカーを中心に延べ90以上の機関が参画した「高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム」の設立経緯と運営方針について紹介する。競合する企業を含む多数の機関が参画するコンソーシアムが円滑に運営されるには、どのような点に留意すべきかを運営側の視点で解説する。

キーワード: 太陽電池モジュール、信頼性、コンソーシアム、部材メーカー、人材育成

## Consortium style study on the development of highly reliable photovoltaic modules and acceleration test methods

– Management of the “Consortium Study on Fabrication and Characterization of  
Solar Cell Modules with Long Life and High Reliability” –

Atsushi MASUDA<sup>1\*</sup> and Nanako IGAWA<sup>2</sup>

The “Consortium Study on Fabrication and Characterization of Solar Cell Modules with Long Life and High Reliability” was established by the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. The consortium has over 90 participating organizations, which are mostly module-material manufacturers. The purpose of the consortium is to improve reliability and lifetime of photovoltaic modules, and to develop acceleration test methods for accurate assessment of module lifetime. This paper details the establishment procedures and management policies of the consortium, with particular focus on resolving competing interests among the participants, as viewed from the perspective of the secretariat.

Keywords: Photovoltaic module, reliability, consortium, material manufacturer, human resource cultivation

### 1 コンソーシアム設立の経緯

太陽光発電のコスト低減には、高効率化や製造コスト低減に加えて、信頼性向上・長寿命化による生涯発電量の増加が欠かせない。太陽電池モジュールの信頼性・寿命を決めているのは、太陽電池セルの電極ならびに配線材、バックシート、封止材、端面シール材、ポッティング材等のいわゆるモジュール周辺部材である。図1に太陽電池モジュールの断面構造図を示す。配線材は太陽電池セルの表面側の電極と裏面側の電極を交互に半田付けで接続する役割

を果たす。バックシートは、モジュールを外界の水分浸入から守る役割を果たすと同時に、電気的絶縁性の維持、機械的強度の保持にも役立っている。封止材はセルの周辺を強固に固め、破損を防ぐ役割を果たす。端面シール材やポッティング材は、バックシート同様、モジュールを外界の水分浸入から守る役割を果たす。一方で、図1の枠内に示すように、太陽電池モジュールを長期に屋外で曝露するにつれ、これらの部材に起因した劣化が生じ、発電性能の低下に結びつく場合もある。したがって、太陽電池の信頼

1 産業技術総合研究所 太陽光発電工学研究センター 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2、2 産業技術総合研究所 イノベーション推進本部産学官連携推進部 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2

1. Research Center for Photovoltaic Technologies, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan \* E-mail: atsushimasuda@aist.go.jp, 2. Collaboration Promotion Division, Research and Innovation Promotion Headquarters, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan

(現所属: 1 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2、2 産業技術総合研究所 企画本部 〒305-8560 つくば市梅園 1-1-1 中央第1; current affiliation: 1. Research Center for Photovoltaics, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan, 2. Planning Headquarters, AIST Tsukuba Central 1, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8560, Japan)

Original manuscript received January 16, 2015, Revisions received July 12, 2015, Accepted August 4, 2015

性向上・長寿命化のためには、太陽電池メーカーとこれらの部材を製造している化学メーカーや部材メーカーの知見を結集し、物理学、化学、電気・電子工学、材料科学等の幅広い知識をもとに、劣化を抑止可能な材料開発からモジュールの組み立てに至るまで、多くの段階での研究開発が必須となる。そこで、独立行政法人産業技術総合研究所（当時、現在は国立研究開発法人産業技術総合研究所、以下、産総研と略す）太陽光発電研究センター（当時、その後、太陽光発電工学研究センターを経て、現在は再び太陽光発電研究センターに改称）では、太陽電池モジュール部材を現に扱っていたり、当該分野への進出を計画していたりする国内の化学メーカー、部材メーカーを中心としたコンソーシアムを創設し、太陽電池メーカーとの緊密な連携の上に研究開発を推進することを企画し、平成20年度下期から研究センター内で準備を開始した。この背景には、本コンソーシアムの設立を企画した平成20年当時は、モジュールの試作・評価を行える大学や公的研究機関が国内になかったため、ドイツのFraunhofer Institute for Solar Energy Systems (Fh-G ISE) やオランダのEnergy research Centre of the Netherlands (ECN) まで社員や部材を送らないとモジュール部材の有効性検証ができないので、試作・評価ラインを国内でも整備してほしいとの化学メーカー、部材メーカー等からの要望があった。もちろん、国内太陽電池メーカーでの検証も考えられるが、新規部材の検証にはなかなか応じてもらえないとともに、検証した場合でも結果が開示されなかったり、良い結果が出たとしてもその太陽電池メーカーとしか組めなかったりなど、

化学メーカーや部材メーカーにとっては好ましい条件でない場合が多かった。もう一つの背景として、大学や公的研究機関での太陽電池の研究は、いわゆる前工程であるセルの研究一辺倒であり、モジュール工程等のいわゆる後工程の研究が当時はほとんど行われておらず、太陽電池メーカーが社内でノウハウとしてきたモジュールの信頼性に関して、科学的知見に基づき学術的に体系化していきたいという産総研の意図があった。

コンソーシアムメンバーは、これ以前に太陽光発電研究センターで実施していた「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」<sup>[1]</sup>の経験を活かして、公募により広く集めることとした。公募説明会を平成21年2月2日に東京で開催し168名の参加者を、同年2月17日に福岡で開催し117名の参加者を得た。福岡で公募説明会を開催したのは、産総研九州センターで平成22年10月から運用開始する太陽電池モジュール試作・評価一環ラインを用いて研究の一部を実施する計画にしていたためである。公募説明会を通じて本コンソーシアム設立に興味をもった参加者とは後日個別に面談の機会を持つこととした。面談をしたコンソーシアム参加候補者101名を一堂に集め、平成21年5月28日に都内で設立準備会を開催した。設立準備会では、コンソーシアムの理念や運営方針等を説明し、候補者全員で意見交換と懇親の場を持った。同年7月9日には、つくばで第2回設立準備会を開催し、コンソーシアム参加が正式に確定した機関から90名が参加した。コンソーシアムは「高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム」と命名され、参加機関（民間企業31社）、連携機関（太陽

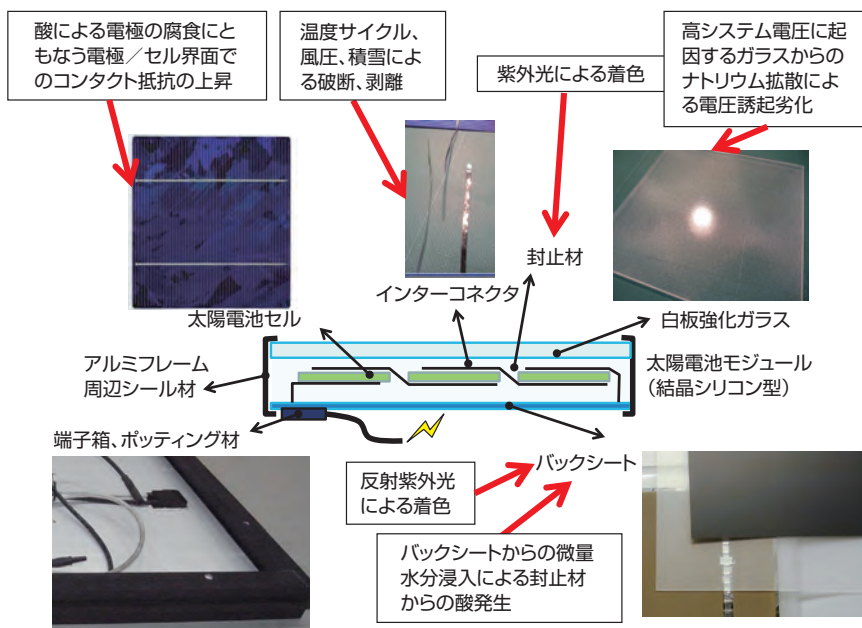


図1 太陽電池モジュールの断面構造図  
枠内にはモジュール部材に起因した劣化要因を示す。

光発電技術研究組合)、協力機関9機関の参加を得て、平成21年10月1日に正式に発足した(途中加入により、最終的には第I期の参加機関は民間企業33社、協力機関は10機関となった)。

同年10月21日には、経済産業省の鈴木正徳産業技術環境局長(当時)、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(現在は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)の植田文雄理事、太陽光発電技術研究組合の桑野幸徳理事長(当時)を来賓にお招きし、産総研の野間口有理理事長(当時)出席のもと、都内で発足式を開催した。

参加機関の会費(共同研究費)は一律500万円/年度とした。参加機関は1名以上の共同研究員を産総研に派遣するものとしたが、常駐は義務付けず、研究の進捗に応じて産総研に随時来所し実験を行うこととし、研究員派遣に柔軟性を持たせた。研究員を常駐させるのは困難との参加機関側の事情を汲むと同時に、産総研が所有する研究装置や産総研側スタッフ数の制約があり、31社からの派遣研究員全員が産総研に常駐し毎日実験することが現実的でなかったとの事情もある。また、太陽電池モジュールの信頼性に関しては、コンソーシアム発足前から太陽光発電技術研究組合との強固な連携の下に研究開発を進めていくとの合意が形成されていたこともあり、太陽光発電技術研究組合は連携機関と位置づけ、参加機関は同組合の組合員となることをコンソーシアム参加の要件とした。さらに、直接研究に従事するわけではないが、部材・装置、分析手法の提供、太陽電池モジュールに関するさまざまな知見の提供等によりコンソーシアム研究の進展に協力を依頼するメンバーを協力機関と定義した。協力機関には共同研究費の支払いは求めないものの、必要に応じて共同研究員の派遣は求めた。

この論文で紹介する内容は、コンソーシアム設立と運営に関わる事項を中心とする。コンソーシアムの具体的な研究成果事例については、第6章に一部を紹介するに留め、コンソーシアム期間中に計3回開催した公開の成果報告会で配布した成果報告書<sup>[2][4]</sup>ならびに成果報告書中にリストを記載している発表文献等を参照されたい。

## 2 コンソーシアムの理念と運営方針

コンソーシアムにとって何よりも大切なのは理念を掲げ、それに従った方針に基づき、ぶれずに運営することである。本コンソーシアムでは、産総研が提供する技術プラットフォームを用いて研究開発を行い、太陽電池モジュールの信頼性・寿命を大幅に改善し、発電コストの大幅低減と独創的な技術を創出することを基本理念とした。この理

念に従い、コンソーシアム参加機関によるオープンイノベーションの実現を図った。より具体的な運営方針としては、コンソーシアムで得られた研究成果は公開を原則とし、特許取得よりも論文や学会での発表を重視した。また、前述のように、モジュール化技術やモジュールの信頼性に関しては、これまであまり学術的な検討が行われてこなかったことを踏まえ、第4章で述べる第II期コンソーシアムのA会員の研究では、学術的かつ体系的な研究データを取得することを目的に、基盤研究に徹することとした。このような方針を実現するためにも、参加機関間の営利的な利害をコンソーシアムの場に持ち込むことは厳に戒めることとした。

上述の理念ならびに運営方針に基づき、共同研究契約と運営規程を策定した。策定は産総研だけで行うのではなく、コンソーシアム参加機関から有志を募り、産総研の産学官連携推進部門(当時、現在はイノベーション推進本部産学官・国際連携推進部)、知的財産部門(当時、現在はイノベーション推進本部知的財産・標準化推進部)、太陽光発電研究センターの研究者、参加機関からの有志で、半月に1回程度の頻度で議論を重ねた。共同研究契約と運営規程の策定に参加機関も関わったことが、有志として関わった参加機関のみならず、参加機関全体と産総研の間の信頼感を醸成する上で重要な役割を果たしたと考えられる。策定に関わった参加機関からの有志の大半は、コンソーシアム発足後、運営委員会幹事として、コンソーシアム草創時の迷走状態において、月に1回の頻度で開催された幹事会に臨み、数々の困難を産総研スタッフとともに解決した。運営規程では、運営委員会、技術諮問委員会、発明審査委員会等、コンソーシアムを構成する各種委員会についても定義している。とりわけ、10名程度の委員から構成される技術諮問委員会からは、コンソーシアムの理念に基づいた研究の方向性に関して貴重な助言があり、コンソーシアム草創期の運営に欠かせない役割を果たした。技術諮問委員は、太陽電池メーカー、装置メーカー、部材メーカー、大学、産総研のいずれかに所属する者から選出し、特に太陽電池メーカーが蓄積している技術的知見を、部材メーカーが中心のコンソーシアム参加機関の研究に反映させることにより、部材メーカーがより多角的な視点で研究を推進できるよう心掛けた。なお、運営規程に関しては、文献[4]に全文を公開している。

## 3 第I期コンソーシアムの運営

第I期コンソーシアムは、平成21年10月1日～平成23年3月31日の1年半の契約期間で発足した。発足当初のコンソーシアム運営は困難を極めた。その理由はさまざまあるが、産総研側の責に帰することとしては、産総研自体が



モジュールの研究をほとんど行った経験がなかったため、参加機関に対して十分に指導的な役割を果たせず、ほとんど手探り状態で日々の研究活動を行っていた点にある。また、産総研側スタッフも本コンソーシアム設立間近に新たに加わった者が多く、スタッフ間のコミュニケーションもうまく取れなかった点も挙げられる。一方で、参加機関側の課題としては、参加機関による温度差が挙げられる。すでに太陽光発電業界でビジネスを行っているメンバーもいれば、当時盛況を呈していた本業界での機会をうかがうため、ほとんど何の知識も持たずに参加したメンバーもいる。後者のメンバーに関しては、研究が行き詰まった場合に、産総研が解決策を与えるのを待つ姿勢も見受けられた。共同研究とは本来両者が共同で解決策を編み出すものであるが、コンソーシアム発足当初にそのような方針を明確化できていなかったことは反省点でもある。

コンソーシアムにおける発明に関しては、後述のように発明の件数自体が少ないこともあり、発明審査委員会の開催に至るようなメンバー間の意見の対立が生じたことは一度もなかった。全参加機関が同一の契約文書を締結し、同じ立場にあるコンソーシアムでは、他の機関と同じ振る舞いをすべきとの意識が働くこともあり、一対一の契約よりも発明に関するトラブルが生じにくいのではないかとの感もある。一方で、学会や論文での成果の対外発表に関しては、参加機関による文化や戦略の違いに基づく温度差があり、積極的な参加機関もあれば消極的な参加機関もあったことは否めない。

第Ⅰ期コンソーシアムも開始後半年程度を経ると、一部の研究員の間では、コンソーシアム全体としての活動に積極的に関わっていきこうという機運がようやく盛り上がってきた。それが、「共同研究テーマ調査」であり、各参加機関の短期的利益には直結しないが業界全体の課題解決に繋がるテーマを募集し、コンソーシアム全体から有志を募ってそのテーマについて共同で調査を実施するものである。具体的な調査内容は、1)「モジュール封止部材の物性がモジュール性能に及ぼす影響調査」、2)「PVモジュールの故障・劣化の実態」、3)「新モジュール試験法の開発」、の3テーマであり、それぞれ産総研の研究者が主査を務めた。調査結果については技術諮問委員会での意見交換を経て、比較的短期間で研究を開始可能なテーマ2)については直ちに着手し、テーマ1)とテーマ3)については第Ⅱ期コンソーシアムで研究を開始することとした。テーマ2)には11名の研究員が参加し、計12回の会合で研究成果を持ち寄り、議論を深めた。第Ⅰ期成果報告書327ページの1/3以上の紙面を割いて、その結果が詳細に報告されていることから、この共同研究テーマ調査がコンソーシ

アムの土台を固めるのに大きな役割を果たしたことがうかがえる。また、共同研究テーマ調査を実施することが、参加機関側からの提案であったことも特筆すべきことである。

#### 4 第Ⅱ期コンソーシアムの設立

第3章で述べたように、第Ⅰ期コンソーシアムでは未着手のテーマも含めて、3つの共同研究テーマを見つけることができたことにより、著者の中では第Ⅱ期コンソーシアムの構想が練られていった。つまり、参加機関全体で成果の共有が容易な基盤的な研究課題である上記テーマに従事することを軸としたA会員と、自社開発製品であるモジュール部材の有効性を検証することを軸としたB会員にコンソーシアム会員を区分するというものである。

A会員の活動は自社の短期的利益には直結しないものの、太陽電池モジュールの信頼性に関する基盤的な研究成果を生み出すものであり、学界、産業界の双方に貢献するものである。基本的には第Ⅰ期コンソーシアムの「共同研究テーマ調査」に掲げた3テーマを引き継いだ3つのコアテーマに従事する。表1にA会員が従事する3つのコアテーマの研究内容を示す。A会員の研究は太陽光発電業界全体に貢献するものであるため、当然のことながら、A会員の会費は、B会員の会費よりも安価の200万円/年度に設定した。また、コンソーシアム全般を通じた継続的な研究活動を保証する意味でも、A会員のメンバーは3年間の第Ⅱ期コンソーシアムの期間を通じて新規メンバーを加えず、途中の脱退も認めないこととした。また、A会員には特別会員制度を設け、会費を免除するとともに、太陽光発電技術研究組合の組合員であるとの要件を外すこととした。これには次のような理由がある。一つ目は、モジュールメーカーや関連団体を特別会員として会費を免除することにより、これらの参加機関のコンソーシアムへの積極的関与が期待できることである。第Ⅰ期コンソーシアムでは、部材メーカーを中心とするコンソーシアムメンバーと太陽電池メーカーの関連が薄いことが指摘されていたが、この課題を解消することを目的とした。二つ目は、基盤的な研究を行うA会員に学界の知見を取り込むため、会費を免除することで大学等の積極的な関与を得るためである。また、特別会員制度を設けたことで、太陽光発電技術研究組合の組合員でない一部の太陽電池メーカーや大学等がA会員として参加できる道が拓けた。

一方で、B会員の会費に関しては、基本額を300万円/年度に設定し、試作数に応じた額(従量制料金)を加算することとした。第Ⅰ期コンソーシアムでは全参加機関500万円/年度の同一の会費としていたが、平均的な活動に従事するB会員の会費が概ね第Ⅰ期コンソーシアムの会費と

表1 A 会員が従事する3つのコアテーマの研究内容

テーマ番号	テーマ名	テーマ概要	研究開発のポイント
1	長期曝露モジュールの詳細調査	長期曝露を経たモジュールの破壊分析あるいは設置中モジュールの調査を通じて、モジュール不良・不具合の発生状況、発電性能の劣化状況を解析する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・長期曝露モジュールの破壊試験を通じて劣化・不良要因を部材レベルでミクロに調査分析</li> <li>・メガソーラーに設置中モジュールの不良・不具合事例の収集</li> </ul>
2	テストモジュールによる劣化因子の明確化	劣化箇所が可視化可能なモジュールや故意に劣化因子を含むテストモジュールならびにセンシング技術を開発し、モジュール性能劣化因子を明確化する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・劣化箇所が可視化可能なテストモジュール、劣化因子を含むテストモジュールの開発</li> <li>・劣化状況を把握できるセンシング技術の開発</li> <li>・劣化因子の評価を通じた、モジュール部材ならびに構造に対する要求特性の明確化</li> </ul>
3	新規信頼性試験法の開発	コアテーマ 1、2 の成果も踏まえ、新規信頼性試験法を開発する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・主要な劣化因子を複合化させた加速試験法や高加速試験による試験時間の短縮等、新規信頼性試験法の開発</li> <li>・新規信頼性試験装置の開発</li> <li>・開発成果の規格・標準への反映</li> </ul>

同額となるように従量制料金を設定した。第I期コンソーシアムではメンバー間の温度差が課題であったと述べたが、参加機関それぞれコンソーシアムへの参加目的も期待も異なることが温度差を生み出すように思われた。第I期においてはこの温度差を完全に解消するには至らなかったが、第II期において、A会員の基盤研究と、B会員の短期的な開発研究に大まかに研究目的を区分することが、温度差の解消に大いに役立つものと思われる。また、従量制料金に基づいた会費設定も、メンバー間の温度差や不公平感の解消に役立つものと思われる。

さらに、年に4回開催される技術交流会への参加を経て、当該分野の知見を習得し、自社内での開発あるいはB会員への参加に繋げていくようなC会員制度を設けた。技術交流会では外部の専門家に講演を依頼するとともに、公知になる前のA会員の成果を聴講できることとした。実際に運営してみると、技術交流会には平均すると100名程度が参加し、A会員、B会員、C会員、協力機関、技術諮問委員等、コンソーシアム全メンバーの交流の場としての役割も果たすことができた。C会員は50万円/年度の会費設定とし、会費の障壁を低くすることで参加を容易にした。さらに、大学や公的研究機関がC会員に参加する場合の年会費は無料とし、本分野の裾野が一層広がることを期待した。また、C会員は本コンソーシアムの活動に参加するものの、A会員やB会員の研究活動の内容と比べて知的財産の創出に至る可能性が低かったため、A会員やB会員と同等の詳細な共同研究契約を締結することの是非についてはさまざまな議論がなされた。結果的に、知的財産の創出は有り得ないとの解釈を確認しつつ、知的財産に関する条項を大幅に簡略化した共同研究契約を締結するこ

とで、契約関係の保持と円滑な参加体制の確保を両立した。また、第I期コンソーシアム同様、部材・装置、分析手法の提供、太陽電池モジュールに関するさまざまな知見の提供等を通じて、コンソーシアムの研究開発の加速に貢献する協力機関の制度も設けた。A会員、B会員、C会員の主な役割と参加条件を、第I期コンソーシアムの参加機関と対比して、表2に示す。

なお、第II期コンソーシアム設立に際しては、幅広く有識者の知見も取り入れるため、第I期コンソーシアムメンバーの有志と外部有識者から構成される企画委員会を設置し、平成22年8月31日、10月5日、10月28日の3回にわたり、比較的短期間で集中的な意見交換を行った。著者の上記素案をもとに、3回の企画委員会での有識者等の意見も取り入れ、第II期コンソーシアムの骨子、理念を形成し、公募要領に反映した。第II期コンソーシアムの公募説明会は、平成22年12月16日に都内で、同年12月17日に佐賀県鳥栖市で開催し、それぞれ158名ならびに76名の参加者を得た。最終的には第I期コンソーシアムメンバーを上回るA会員19機関、B会員20機関、C会員27機関、協力機関15機関が参加し（機関数は発足時）、平成23年4月1日に第II期コンソーシアムが発足した。

表3に第I期、第II期を通じた全コンソーシアムメンバーのリストを示す。

## 5 第II期コンソーシアムの運営

第II期コンソーシアムは、平成23年4月1日～平成26年3月31日の3年間の契約期間で発足した。第II期コンソーシアム発足直前の平成23年3月11日に発生した東日本大震災により、産総研つくばセンターに設置していた実

表2 第I期コンソーシアムの参加機関ならびに第II期コンソーシアムのA会員、B会員、C会員の主な役割と参加条件の対比

	第I期参加機関	第II期A会員	第II期B会員	第II期C会員
コンソ ーシア ムでの 主な役 割	<ul style="list-style-type: none"> <li>各参加機関が定めたテーマ、目標に従って、基本的には個々に研究を進めるが、研究成果に関しては月次研究会で情報共有する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>複数のA会員と産総研がグループを形成し、共同でコアテーマ研究を実施する。テーマ毎にグループを形成するが、グループ間で情報を共有する。</li> <li>役割分担はメンバー確定後に産総研と協議の上、決定する。</li> <li>モジュールメーカー、標準化に関連する団体、大学・公的研究機関を特別会員と定義する</li> <li>派遣研究員は産総研でのコアテーマ研究に、協議の上定める比率以上で従事するものとするが、別途費用を支払えば、B会員としての研究課題に従事することも認める。</li> <li>特別会員については従事率の規程を定めない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>産総研との個別契約で提案者が所有する部材を用いたモジュール試作・評価を実施する。</li> <li>必要に応じて、産総研の仲介のもとに他のB会員と連携して共同研究を実施する。</li> <li>要望があればモジュールメーカーとの連携を産総研が仲介する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>技術交流会（クローズで運営、公知化される前のA会員、B会員の成果ならびに公知情報を提供）に参加する。</li> </ul>
基本 参加費	<ul style="list-style-type: none"> <li>500万円／年度</li> <li>平成21年度から平成22年度までの複数年度契約</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>200万円／年度（ただし特別会員は無料）</li> <li>平成23年度から平成25年度までの複数年度契約</li> <li>B会員としての研究課題にも従事する場合の追加基本参加費は100万円／年度（ただし特別会員は300万円／年度）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>300万円／年度</li> <li>単年度契約</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>50万円／年度（ただし大学、公的研究機関は無料）</li> <li>単年度契約</li> </ul>
試作・ 評価に 要する 費用	<ul style="list-style-type: none"> <li>基本参加費に含まれる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A会員としての研究課題に従事する場合は基本参加費に含まれる。</li> <li>B会員としての研究課題にも従事する場合は、試作・評価内容（サイズ、数量、占有時間等）を勘案し、従量制で設定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試作・評価内容（サイズ、数量、占有時間等）を勘案し、従量制で設定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>該当しない。</li> </ul>
産総研 との契 約	<ul style="list-style-type: none"> <li>共同研究契約を締結する。基本参加費、人頭経費は共同研究費として産総研に支払うものとし、支払い時期・方法については共同研究契約の定めに従う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>共同研究契約を締結する。基本参加費、追加費用、人頭経費は共同研究費として産総研に支払うものとし、支払い時期・方法については共同研究契約の定めに従う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>共同研究契約を締結する。基本参加費、追加費用、人頭経費は共同研究費として産総研に支払うものとし、支払い時期・方法については共同研究契約の定めに従う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>共同研究契約を締結する。基本参加費は共同研究費として産総研に支払うものとし、支払い時期・方法については共同研究契約の定めに従う。</li> </ul>
太陽光 発電技 術研究 組合と の関係	<ul style="list-style-type: none"> <li>太陽光発電技術研究組合への加入申請が必要である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>太陽光発電技術研究組合への加入申請が必要である（ただし特別会員は必要としない）。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>太陽光発電技術研究組合への加入申請が必要である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>太陽光発電技術研究組合への加入申請を必要としない。</li> </ul>



表 3 コンソーシアムに参加したメンバー

会員区分	機関名（五十音順）
第Ⅰ期参加機関	旭化成ケミカルズ、旭硝子、アルバック、エスベック、大倉工業、カネカ、クラレ、シーアイ化成、スリーボンド、積水化学工業、ソニーケミカル & インフォメーションデバイス(現・デクセリアルズ)、ダイキン工業、大研化学工業、ダイセル化学工業(現・ダイセル)、大日本印刷、DIC、デュボン、電気化学工業、東洋アルミニウム、東洋紡績（現・東洋紡）、東レ、東レエンジニアリング、凸版印刷、日産化学工業、日東電工、日立化成工業（現・日立化成）、富士フイルム、藤森工業、三井化学、三井・デュボンポリケミカル、三菱樹脂、三菱レイオン、リンテック
第Ⅰ期連携機関	太陽光発電技術研究組合
第Ⅰ期協力機関	エヌ・ピー・シー、菊水電子工業、Q セルズジャパン、コベルコ科研、Saes Getters S.p.A.、帝人デュボンフィルム、電気安全環境研究所、東レ・ダウコーニング、YOCASOL（現・ジャパンソーラーファクトリー）、レーザーテック
第Ⅰ期技術諮問委員選出機関	エスベック、カネカ、岐阜大学、産業技術総合研究所、シャープ、東レ、三菱重工業
第Ⅱ期 A 会員	アルバック、石川県工業試験場、エスベック、カネカ、ダイキン工業、大日本印刷、太陽光発電技術研究組合、長州産業、帝人デュボンフィルム、デュボン、電気安全環境研究所、東京エレクトロニクス、東洋紡績（現・東洋紡）、凸版印刷、日本電機工業会、日立化成工業（現・日立化成）、三菱電機、YOCASOL（現・ジャパンソーラーファクトリー）、立命館大学
第Ⅱ期 B 会員	旭化成、大倉工業、共同印刷、クラレ、信越化学工業、住友精化、ソニーケミカル & インフォメーションデバイス（現・デクセリアルズ）、ダイキン工業、大日本印刷、TANAKA ホールディングス、DIC、電気化学工業、東芝三菱電機産業システム、東洋アルミニウム、東洋紡績（現・東洋紡）、東レ、東レエンジニアリング、凸版印刷、日産化学工業、日東電工、日立化成工業（現・日立化成）、富士フイルム、三井・デュボンポリケミカル、リンテック
第Ⅱ期 C 会員	IHI、IMV、アイテス、岩崎電気、ウシオ電機、エーディーシー、オリックス、鹿児島県工業技術センター、神奈川科学技術アカデミー、金沢工業大学、北九州産業学術推進機構、九州電力、熊本県産業技術センター（くまもと有機薄膜技術高度化支援センター）、クラレ、恵和、佐賀県工業技術センター、佐賀県産業技術センター、佐賀大学、三永電機製作所、サンビック、シーアイ化成、住友化学、積水化学工業、千住金属工業、大研化学製造販売、DIC、デクセリアルズ、東京応化工業、東陽テクニカ、戸上電機製作所、日清紡ホールディングス、NEOMAX マテリアル、フジクラ、プリチストン、三井化学、三菱レイオン、村田製作所
第Ⅱ期協力機関	アイテス、エヌ・ピー・シー、オリックス・レンテック、菊水電子工業、Q セルズジャパン、コベルコ科研、Saes Getters S.p.A.、JFE テクノリサーチ、島津製作所、東レ・ダウコーニング、東レリサーチセンター、西川計測、NEOMAX マテリアル、富士電機、レーザーテック
第Ⅱ期技術諮問委員選出機関	エスベック、大阪大学、カネカ、京セラ、産業技術総合研究所、三洋電機、シャープ、ソーラーフロンティア、東レ、富士電機、ホンダソルテック、三菱重工業

験設備やインフラ等にも多大な被害が生じ、数ヶ月間は研究を行える状況ではなかった。また、第Ⅰ期コンソーシアム参加機関にも被災地に事業拠点を有する企業もあり、復旧が最優先された。このような事情もあり、第Ⅰ期コンソーシアムは半年間の延長を審議し、平成 23 年 4 月 12 日に余震等の混乱を避けるために産総研関西センターで開催した第Ⅰ期・第Ⅱ期臨時合同運営委員会で延長を正式決定した。したがって、第Ⅱ期コンソーシアムの最初の半年間は、実験室の復旧に追われるとともに、第Ⅰ期と第Ⅱ期のメンバーが入り乱れて研究を行うといういささか混乱した状況にあった。そのような中でも、つくばセンターの他に九州センターにも実験設備を設置していたことにより、研究への震災の影響が緩和され、危機管理の点からも有効であったと評価される。

第Ⅱ期コンソーシアムでは、自社開発部材の有効性検証を個別に実施する B 会員の研究内容に対しては、産総研はほとんど関知せず、自主性に任せた方が B 会員自身も研究を進めやすいのではないかと考え、産総研からの主体的な関与ではなく、B 会員が主体的に研究計画を策定・実施し、産総研は研究状況を踏まえて部材・装置、分析手法、その他知見の提供等を行った。その分、A 会員の研究に関しては、産総研が主導し、研究会も毎月 1 回の頻度で午

後半日を使って長時間にわたり開催し、データの解釈はもとより、研究の方向性についても細かくアドバイスをした。しかし、時間の経過とともに、B 会員からも定期的な研究会を設けてほしいとの声が上がりが始め、数ヶ月に 1 回の頻度で研究会を開催した。競合する同業他社にデータが開示されることよりも、研究会での議論の有益性をコンソーシアム会員が認識してきた証拠であり、第Ⅰ期コンソーシアムを開始した頃から考えれば、隔世の感がある。なお、第Ⅱ期コンソーシアムでは、技術諮問委員会自体は開催しなかったものの、技術諮問委員は上記 A 会員ならびに B 会員の研究会のメンバーとし、研究の方向性に関して貴重なコメントを得るなど、第Ⅰ期コンソーシアムにも増してその重要性が認識された。技術諮問委員には主として太陽電池メーカーの研究者が従事し、これまでノウハウとしてきたことについても一部については積極的な議論が進んだことから、本コンソーシアムの目的の一つである化学メーカー、部材メーカーと太陽電池メーカーの真の意味での連携も進展したと考えられる。

## 6 外部発表と知的財産

研究成果は原則として公開するとのコンソーシアムの理念に基づき、論文、学会、展示会等で数多くの外部発表を行っ

た。第Ⅰ期コンソーシアムでの外部発表は、コンソーシアムの立ち上げ期間であったこともあり42件に留まったが、第Ⅱ期コンソーシアムでは152件（コンソーシアム終了時）にのぼった。学会や展示会で受けたコメントが研究を進捗させる上で大きなヒントとなったこともある。何より、参加機関から派遣されている若手研究員が英語での論文執筆や国際会議での発表を通じて研究者として成長するのを実感できた。人材育成でも大きな貢献を果たせたと考えている。

本コンソーシアムで得られた代表的な研究成果としては、以下のようなものが挙げられる。

#### 第Ⅰ期コンソーシアムの成果

##### ・屋外曝露モジュールの調査

158枚の長期屋外曝露モジュールを調査・分析し、封止材とセル表面の剥離箇所にナトリウムが蓄積していること<sup>[2][5]</sup>や、インターコネクタの不良が主にセル裏面に生じていること<sup>[2][6]</sup>を見出した。

##### ・高加速試験法の開発

温度サイクル試験時の降温・昇温速度を加速することが、モジュールの物理的・機械的劣化の加速に有効であるとともに、試験中のインピーダンスの実時間観測が、劣化の予兆を見出すのに有効であることを見出した<sup>[7]</sup>。

#### 第Ⅱ期コンソーシアムの成果

##### ・長期屋外曝露と加速試験の関連

長年の懸案となっていた長期屋外曝露と高温高湿試験の関係を、モジュール内酢酸量を指標として明確化し、国内での屋外曝露30年が温度85℃、相対湿度85%の高温高湿試験4000時間に該当することを見出した<sup>[4][8]</sup>。この成果は、6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion Best Paper Awardの受賞対象の一部となった。

##### ・塩水噴霧と電圧誘起劣化の複合試験

塩水噴霧そのものではモジュールの発電特性に劣化は生じないものの、事前に塩水噴霧を行うことで電圧誘起劣化を促進するとの試験結果を得て、沿岸部で電圧誘起劣化が生じやすいとの事象を裏付けることができた<sup>[4][9]</sup>。

##### ・新規封止材の有効性実証

封止材にポリビニルブチラルを用いることにより、国際規格に定められた試験時間の15倍にあたる15000時間の高温高湿試験を経ても劣化が生じない薄膜シリコン太陽電池モジュールの開発に成功した<sup>[4][10]</sup>。

##### ・新規表面カバー部材の有効性実証

カバー部材にアクリル樹脂材料を用いたモジュールを

開発し、従来品のモジュールに比べて重量を半分程度に低減できたのみならず、火災試験ならびに各種信頼性試験に合格することを確認し、さらには電圧誘起劣化耐性にも優れることを実証した<sup>[4][11]</sup>。

特許に関しては、第Ⅰ期コンソーシアム、第Ⅱ期コンソーシアムの期間を通じて、わずか2件しか出願していない<sup>[12][13]</sup>。これは、部材の製法等、参加機関が重要視する技術に関してはコンソーシアム内で開示せずともよいとの方針を貫き、非競争領域での研究に徹した結果でもある。一方で、コンソーシアムで創出した特許は、コンソーシアム参加他機関の実施を妨げないとの規則も設けたため、実施例の一つにでもコンソーシアムの成果を挙げれば、その特許のすべてについて他機関の実施を妨げないことになり、その中には、競合する同業他社である他機関に実施許諾することなど到底考えられない製法に関する請求項が含まれることもある。このことに関しては、特許全体に対してコンソーシアム参加他機関の実施を妨げないのではなく、他機関の実施を妨げない範囲をコンソーシアムの研究成果に基づく請求項に限定するように共同研究契約ならびに運営規程の改正を図ることで解決を見た。一方で、参加機関の法務・知的財産部門からは、産総研と参加機関の一対一の契約が他機関の実施等に関して効力を発揮できるのかとの条文解釈上の疑問も投げかけられるなど、コンソーシアムの契約文書に関しては今後の課題とすることもあった。

## 7 コンソーシアム事務局

コンソーシアムは数多くの参加機関から構成されているため、各参加機関間の秘密保持の徹底が求められる。データはコンソーシアム事務局で一元管理し、各参加機関から得られたデータを明瞭に区分して保管し、アクセス権限も限定した。一方で、各参加機関の秘密保持を徹底しすぎると、コンソーシアムとしての一体感を保てなくなる。このバランス感覚を保つことは極めて難しいが、研究が進むにつれておのずと醸成される信頼感により、参加機関間での大きなトラブルが発生することなく、コンソーシアムとして一体の活動を維持することができた。もちろん、A会員の活動を非競争的領域に限定したり、B会員の活動に関して参加機関が秘匿したい情報はコンソーシアムに持ち込まなくてもよいとしたことが、コンソーシアムの一体運営に効力を発揮したことは大きい。最終的には参加機関と産総研ならびに参加機関間の信頼感を醸成する雰囲気づくりが重要であり、このようなことは完璧な規則だけを求めても決して得られるものではない。もちろん、順調に研究成果が得られることにより、産総研への信頼感が醸成され、その産総研の傘の下で運営されるコンソーシアムであるために、参

加機関間でも信頼感が醸成されたことは言うまでもない。

数多くの機関が参加するコンソーシアムにおいて、研究に使用する装置の多くが共用であるため、マシンタイムも限られ、スケジュール調整には当初困難が予想された。コンソーシアムメンバーがアクセスできるスケジュール管理機能を持ったソフトを導入したのはもちろんのことであるが、来訪メンバーのスケジュール管理や、多岐にわたる各種会合の日程調整、参加各機関との契約事務作業、研究に使用する物品の調達を含む予算管理、各種成果報告会等の会場予約から外部参加者への各種案内さらには当日の会の運営に至るまで、コンソーシアム事務局の業務が円滑に機能したのは、極めて有能なアシスタントの存在に負うものであり、そういった面でも、コンソーシアム運営は研究面のみならず、事務的業務の面でも人材に恵まれたから成功したと言っても過言ではない。

## 8 後継コンソーシアム

高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアムは、平成 21 年 10 月 1 日の第 I 期の開始から平成 26 年 3 月 31 日の第 II 期の終了まで 4 年半の活動を成功裡に終了することができた。この間に太陽光発電を取り巻く状況は大きく変化した。コンソーシアム開始当初は、半導体、液晶産業が苦境に陥る中、多くの部材メーカーが次の収益の柱にするべく太陽電池への展開を求めたが、国内太陽光発電産業は、半導体、液晶を上回る勢いで世界市場占有率を落としていき、セル・モジュールに関しては現在は 10 % にも満たない状況である。そのような状況の変化により、現在太陽電池用部材を製造販売しているメーカーですら、自社の地位を維持するのが精一杯であり、新たに当該分野

に参入しようとする部材メーカーは皆無に近い。この状況はコンソーシアム運営の予算規模や参加機関数にも如実に現れている。第 II 期コンソーシアムの後半に B 会員の 1/3 が継続しなかったものの、当該コンソーシアム期間中は契約の縛りにより、極端に参加機関数が減少したわけではない。しかし、図 2 に示すように、第 II 期コンソーシアム終了後は参加機関数が激減し、予算額も大幅に減少している。コンソーシアムに継続して参加しなかった理由としては、自社内に太陽電池モジュール試作・評価設備を揃えた、研究開発にある程度目処がたった、事業計画の見直しにより太陽電池モジュール部材に関する研究開発は中断した、等さまざまであるが、国内メーカーが太陽電池市場でのシェアを減少させていることと無関係ではない。したがって、新たにこのような大規模のコンソーシアムを創設するのは不可能であり、コンソーシアム終了後は第 II 期コンソーシアムに参加していた民間企業 3 社と小規模の後継コンソーシアムを設立した。

後継コンソーシアムでは、第 II 期コンソーシアム A 会員の研究を継続し、太陽電池モジュール劣化現象の解明や試験法開発に限定した基盤研究に専念するとともに、国費で運営するプロジェクトへの参画を目標とした。このような活動を続けた結果、後継コンソーシアムで共同研究を継続していたデュポン、東レ、さらには個別に共同研究を実施していた石川県工業試験場、岐阜大学、北陸先端科学技術大学院大学、東京農工大学と、新規メンバーの東京理科大学と産総研の計 8 機関の共同提案が、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託研究「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発／共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評

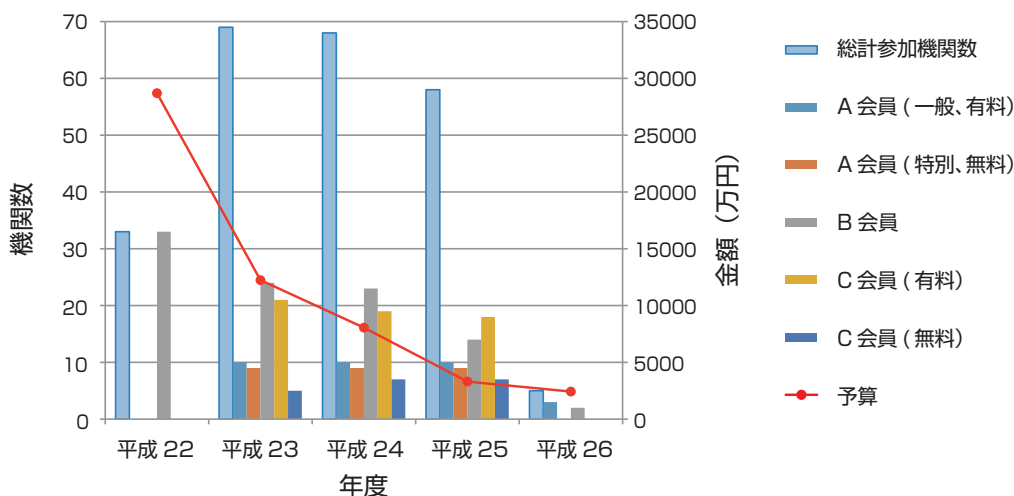


図 2 コンソーシアム参加機関数ならびに予算の推移

平成 22 年度には、平成 21 年度下期からの第 I 期コンソーシアムの一括契約の参加機関数ならびに予算を示す。C 会員 (有料) は民間企業、C 会員 (無料) は大学、公的研究機関等を示す。平成 26 年度は後継コンソーシアム参加機関を A 会員、個別契約機関を B 会員と定義した。



価技術等）／太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発」に採択され、太陽電池モジュールの劣化機構明確化や寿命を予測可能な試験法開発といった基盤技術に関し、平成32年2月まで約5年間の研究を継続することが可能となった。コンソーシアム創設時からの著者の思いであるモジュールの信頼性に関する科学的知見に基づいた学術的体系化に向けて、環境が整いつつある。また、国費で運営されるプロジェクトの成果を活用して民間企業との共同研究を推進するという方向が一般的であるものの、外部との連携は必ずしも単純なリアモデルで説明できるのではなく、周辺状況に応じて、民間企業との共同研究から国費で運営されるプロジェクトのフェーズに立ち返ることもあるとのモデルケースとなるのではないかと考える。

一方、第II期コンソーシアムのB会員が実施していた研究に関しては、コンソーシアム形式ではなく一対一の共同研究契約を締結している。この中の一社である信越化学工業との共同研究では、同社が開発した封止材がモジュールの信頼性向上に画期的な効果があるとともに、現行のモジュール試作装置への適合性も確認できたため、平成27年6月22日に両者連名でプレスリリースするに至った<sup>[14]</sup>。研究が実を結ぶまでには相当の時間を要するのが常であり、コンソーシアム終了後も地道に共同研究を継続することの重要性が示された事例である。

後継コンソーシアムに関しては、研究員が派遣元企業の利害から離れて、安心して学術的な成果を挙げることに専念できるよう、契約文書に「本共同研究が研究活動を通じて科学的・技術的な議論を行い、真理を探究する場であることを理解し、本共同研究の遂行を妨げるような契約当事者間の営利上の利害関係は持ち込まないことを確認する」との条項を盛り込んだ。また、一対一の共同研究に関しては、現在の契約相手先である機関以外の他のメーカーのモジュール試作にも応じられるよう、「甲（産総研）は、乙（契約相手先）への事前または事後の通知なく、本契約に反しない限りにおいて本共同研究と類似（甲の敷地内における同様の場所で、同一設備等を使用して実験等を行うことをいう。）の共同研究を、乙以外の他の共同研究者と実施することができる」との条項を盛り込んだ。第I期・第II期コンソーシアムでのさまざまな経験を活かし、状況に応じ、産総研、相手先機関の双方にとって研究活動を最大限に活性化できるような臨機応変な契約を締結することが肝要と考える。

本コンソーシアムの最大の目的は、非競争領域における共通基盤技術の研究と、研究成果の学術的深耕と体系化にあったが、今後は、本コンソーシアムの研究成果が応用を主たる目的とした開発研究に適用されていくことも期待したい。

## 謝辞

高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアムの設立・運営に関して多大なる御高配を頂いた産総研の矢部彰理事（当時）、瀬戸政宏理事、伊藤順司理事（当時）に心よりお礼申し上げます。コンソーシアム運営を御指導いただいた太陽光発電工学研究センター（当時、現・太陽光発電研究センター）の仁木栄前研究センター長（現・再生可能エネルギー研究センター長）、近藤道雄元研究センター長（現・福島再生可能エネルギー研究所上席イノベーションコーディネータ）に厚く感謝する。コンソーシアム事務局の事務作業の一切を円滑にこなし、コンソーシアムの運営に多大な貢献のあった太陽光発電工学研究センター太陽電池モジュール信頼性評価連携研究体（当時、現・太陽光発電研究センターモジュール信頼性チーム）の星野幸子秘書に心より感謝する。また、この論文の作成に際しては、イノベーション推進本部産学官連携推進部連携企画室（当時、現・イノベーション推進本部産学官・国際連携推進部連携企画室）の宮本健一室長（当時）との議論を参考にした。

## 参考文献

- [1] 増田 淳: フレキシブル太陽電池の高性能化技術開発 - 「フレキシブル太陽電池基材コンソーシアム」の運営と成果-, *Synthesiology*, 4 (4), 193-199 (2011).
- [2] 第I期高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム成果報告書, 2011-09.
- [3] 第II期高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム中間成果報告書, 2012-12.
- [4] 第II期高信頼性太陽電池モジュール開発・評価コンソーシアム最終成果報告, 2014-03.
- [5] K. Matsuda, T. Watanabe, K. Sakaguchi, M. Yoshikawa, T. Doi and A. Masuda: Microscopic degradation mechanisms in silicon photovoltaic module under long-term environmental exposure, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 51, 10NF07, 1-5 (2012).
- [6] S. Shimizu, T. Arai, T. Sagawa, Y. Aoki, T. Hirakawa, H. Hiraike, S. Hamamoto, S. Sakamoto, T. Doi, A. Masuda and M. Yamamichi: Failure assessments for outside-exposed photovoltaic modules, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 51, 10NF04, 1-4 (2012).
- [7] Y. Aoki, M. Okamoto, A. Masuda, T. Doi and T. Tanahashi: Early failure detection of interconnection with rapid thermal cycling in photovoltaic modules, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 51, 10NF13, 1-4 (2012).
- [8] A. Masuda, S. Suzuki, Y. Hara, S. Sakamoto and T. Doi: Possible measure of reliability for crystalline-Si photovoltaic modules, *Proc. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conf. Exhibition*, 2566-2569 (2014).
- [9] S. Suzuki, N. Nishiyama, S. Yoshino, T. Ujiro, S. Watanabe, T. Doi, A. Masuda and T. Tanahashi: Acceleration of potential-induced degradation by salt-mist preconditioning in crystalline silicon photovoltaic modules, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 54, 08KG08, 1-12 (2015).
- [10] S. Muguruma, T. Mukose, H. Yasuda, A. Masuda, H. Shibata and S. Niki: Newly developed PVB for high durability and low cost thin film PV modules, *Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conf. Exhibition*,

- 3026-3029 (2013).
- [11] T. Kajisa, H. Miyauchi, K. Mizuhara, K. Hayashi, T. Tokimitsu, M. Inoue, K. Hara and A. Masuda: Novel lighter weight crystalline silicon photovoltaic module using acrylic-film as a cover sheet, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 53, 092302, 1-7 (2014).
- [12] 青木雄一, 岡本 学, 土井卓也, 増田 淳: 太陽電池モジュールの信頼性試験装置、及び太陽電池モジュールの信頼性試験方法, 特許第5414070号, 2010.11.24出願, 2013.11.22登録 (2014).
- [13] 大槻陽子, 加治佐 平, 水原和美, 増田 淳: 太陽電池モジュール及びその製造方法, 特開2013-62423, 2011.9.14出願 (2013).
- [14] 信越化学工業(2015-06-22): 信頼性の高い太陽電池モジュール用シリコン封止材, <https://www.shinetsu.co.jp/jp/news/pdf/s20150622.pdf>, 閲覧日2015-06-22.

### 執筆者略歴

増田 淳(ますだ あつし)

1966年生まれ。1992年金沢大学大学院工学研究科電気・情報工学専攻修士課程修了。富士ゼロックス株式会社総合研究所勤務、日本学術振興会特別研究員を経て、1996年金沢大学大学院自然科学研究科物質科学専攻博士課程修了。博士(工学)。1996年北陸先端科学技術大学院大学材料科学研究科物性科学専攻助手。2005年産業技術総合研究所太陽光発電研究センター産業化戦略チーム長、2010年同太陽電池モジュール信頼性評価連携研究体長兼務、2011年同太陽光発電工学研究センター太陽電池モジュール信頼性評価連携研究体長、2015年より太陽光発電研究センター副研究センター長、太陽光発電研究センターモジュール信頼性チーム長兼務、再生可能エネルギー研究センター副研究センター長兼務、現在に至る。埼玉大学連携教授、北陸先端科学技術大学院大学客員教授兼務。2014年11月、この論説記載のコンソーシアム等の研究成果で6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion Best Paper Award受賞。この論説記載のコンソーシアムでは、コンソーシアムの運営全般、特に太陽電池モジュールの信頼性向上と試験法開発に資する基盤研究を通じて学術的体系を構築するとの理念に基づいた運営に貢献した。この論説では、主に1～3章、5章、7章の全体の執筆と、4章、6章、8章の一部の執筆を担当した。



井川 奈々子(いがわ ななこ)

1982年生まれ。2007年東京大学大学院公共政策学教育部修了。同年、産業技術総合研究所入所。企画本部、能力開発部門(人事部)人事室、産学官連携推進部共同研究支援室、広報部広報制作室、企画本部広報サービス室、現在に至る。産学官連携推進部在籍中、数多くの競合企業が参画する新しい形態のコンソーシアムにおける共同研究契約や運営規程を立案するとともに、その調整・整備に貢献した。この論説では、主に4章、6章、8章の一部の執筆を担当した。



### 査読者との議論

#### コメント1 全体

コンソーシアム設立に際して、多数の企業が共通基盤技術の開発として協働できること、ならびに、学界・業界の信頼性評価技術が手薄であり、太陽電池モジュールの試作から信頼性評価までのライン

と技術確立が価値を生むという状況判断に基づいてコンソーシアムの課題を設定した経緯と、その運営方針に参加企業の理解を得るプロセス等を纏めた具体的な論説であり、成功事例として今後、他の分野への波及効果も大きいと思われる。

コアとなる信頼性評価技術に関して、ノウハウや経験則に替わる科学的根拠に裏付けられた研究によって加速試験方法を確立した点は極めて高く評価できます。

これらのことからシンセシオロジー誌にふさわしいと判断します。

#### 議論1 コンソーシアムを成功に導く要因について

コメント(景山 晃:産業技術総合研究所研究支援アドバイザー)

このコンソーシアムが第I期、第II期を通じて大きな成果を挙げた要因として、基本理念を明確に定義し、理念達成のための共同研究契約と運営規程を産業界の実情も勘案して策定し、秘密情報の取り扱いや知財に関するルールを設ける等の事前準備を精緻に行ったことが記述されています(第2章)。また、第7章では産総研と参加企業間の信頼感の醸成が極めて重要なことを示しています。これらは大変参考になります。論説全体の構成を考えると、第2章に信頼感の醸成を意識しながら各種規程を定めていったことを示した方がよいと思います。もちろん、第7章にあるように事務局が公平かつ迅速、適切な対応に努めたことも大きな要因ですので、信頼感の醸成はこちらにも記述することは問題ないです。

また、参加当初は各企業がコンソーシアムに期待することがかなり異なっていたのではないかと思います。これをどのような対応でベクトルを束ねていったのかについて、もう少し具体的に記述することはできませんか。

回答(増田 淳)

的確な御指摘にお礼申し上げます。産総研と参加機関間の信頼感の醸成は、共同研究契約や運営規程を互いに協力して策定していった点に遡ると考えられますので、この点を第2章に追記しました。

後半の御指摘に関しては、第I期コンソーシアムの間は残念ながらベクトルを完全にそろえることはできませんでした。ベクトルをそろえるのに役立ったのは、第II期コンソーシアムで会員に区分を設けたことです。第4章の記述を追加しました。

#### 議論2 テーマ設定とその効果について

質問(矢部 彰:NEDO技術戦略研究センター)

オープンイノベーションについて幾つかの成功形態が考えられる中で、太陽電池の研究開発において、なぜ、寿命予測方法や劣化メカニズム等の共通基盤的な協調領域の研究課題を取り上げ、また、各企業の特徴ある材料の適用試験を取り上げたのかについて、その背景も含めてもう少し具体的に論述して欲しい。また、本コンソーシアムで取り上げた課題について、何がどこまでできたのか、それに至る過程で、どのような運営が有効であったのかという視点での加筆も重要と考えます。

一方、結晶シリコンの薄型化による低コスト化、セルモジュール以外のシステム機器の低コスト化という、今後の重要な課題を取り上げなかった理由は何ですか。

回答(増田 淳)

的確な御指摘を頂きましたことに、厚くお礼申し上げます。太陽電池モジュールの寿命予測法や劣化メカニズム等のいわゆる信頼性に関わる研究は、共通基盤的ではあるものの、学界では積極的に取り上げられておらず、産業界でノウハウとして秘匿されている部分が多いのが実情でした。本コンソーシアムは、モジュールの信頼性に関わる研究が日の目を見るようになり、科学的根拠に裏付けられた研究によって学術的に体系化することで太陽光発電業界に貢献できるようにしたいとの著者の強い意志のもとに推進したものです。さらに、当時は、公的機関でモジュールの信頼性に関する実証試験を行いたいとの産業界側の要望もあり、両者の思惑が合致する形で、コンソーシア

ムの創設に至った面もあります。

本コンソーシアムで最も重要な成果は、長期屋外曝露と加速試験を関連付ける指標を見出したことであり、高温高湿試験4000時間が国内での屋外曝露30年に相当するとの実験事実を得ることで、寿命予測に目途をつけたことです。従来はノウハウや経験則に頼っていたモジュールの信頼性に関して、科学的根拠に裏付けられた研究に昇華させたいとの思想に基づいて運営したことの成果であると考えています。これらについて、この論文に追記しました。

また、結晶シリコンの薄型化やシステム機器の低コスト化といったテーマが重要であることは御指摘のとおりです。ただ、前者は産業に直結したテーマであり、執筆者の思いとフェーズが異なることに加え、競合領域のテーマとなることからコンソーシアムを設立しにくいと考えました。後者は業界全体において重要性の認識が現在に比べて低かった上に、産総研側でも人材が不足しているという事情もありました。

### 議論3 会員の区分けと技術諮問委員会について

質問（景山 晃）

第Ⅰ期から第Ⅱ期に移行する際に、共通基盤技術の深耕を目的とするA会員と自社部材での試作・評価を目的とするB会員に分けていますが、なぜ、コンソーシアム運営の基盤に係わる改善・変更をしようと思ったのですか。

本件のように業種をまたがる（材料・部材、装置、太陽電池）コンソーシアムでは、いわゆる縦と横とを意識した全体マネジメントが極めて重要です。これについて、第Ⅰ期、第Ⅱ期ともに、参加企業の会員区分にとらわれない横断的な位置付けで技術諮問委員会を設けたことによって、広い視野角に立った研究の方向性を定める効果があったとの記述があります。執筆者はどのような状況分析に基づいて技術諮問委員会等を設置したのか、また、その委員にどのような機能を期待したのかについてもう少し丁寧に記述することはできませんか。

回答（増田 淳）

第Ⅰ期では参加機関に対してテーマ区分は行っていませんが、このことも会員間に温度差をもたらした原因と考えております。第Ⅱ期で会員区分を設けた最大の理由は、第4章に記述したように会員間の温度差を解消することによりコンソーシアム運営の円滑化を図ることです。

本コンソーシアムが部材メーカーの要望で発足した経緯もあり、コ

ンソーシアムのメンバーは部材メーカー中心に構成されていました。太陽電池メーカーは、モジュール信頼性に関しては、自社内でノウハウとして秘匿していたことも多く、組織としての参加は望めない状況でした。一方で、部材メーカーだけで研究を行ってはいけず、太陽電池メーカーの知見を活用できないとともに、両者の連携もできないことが運営側の懸念点でもありました。そこで、組織としてではなく個人としてコンソーシアムに知見を提供頂ける方に技術諮問委員として参画頂くことにしました。この狙いを第2章に追記しました。なお、運営委員会、発明審査委員会、技術諮問委員会は並列ではなく、技術諮問委員会は運営委員会の下に組織される常置委員会であり、発明審査委員会は発明当事者からの要請があり、かつその必要性が認められた場合にのみ設置される臨時委員会です。

### 議論4 コンソーシアムの成果と今後の展開について

質問（景山 晃）

初稿では、「この論説はコンソーシアムの設立、運営に係わる事項のみとし、成果については成果報告書を参照するように」と記述しています。しかし、マネジメントの下支えによってどのような成果が得られたのかは気になる場所ですので、大きな成果を5～6件程度、タイトルと1～2行の説明を加えることはできませんか。

また、今回の信頼性評価技術や寿命予測技術は太陽光発電産業に大きく貢献すると思いますが、今回の成果が次にどのように継承・発展していくのかについて、具体的な動きがあれば可能な範囲で記載してください。

回答（増田 淳）

御指摘に従い、コンソーシアムの代表的な研究成果6件を第6章に記載しました。また、本コンソーシアムで得られた学術的・基盤的知見を、薄型ウエハを用いた高品質結晶シリコン太陽電池の開発等を目的とした「次世代結晶シリコンPVコンソーシアム」をはじめとして、応用を目的とした開発研究に活用していくことは意義深く、十分な可能性があると思います。今回の成果が新たな国プロジェクトにつながった事例と、後継個別共同研究においてプレスリリースに値する成果が得られた事例を新たに追記し、第8章を充実させました。今回のコンソーシアムは科学的根拠に裏付けられた研究によって学術的に体系化することを意図して進めましたが、そのことが次の展開につながったものと考えています。



# 編集方針

シンセシオロジー編集委員会

## 本ジャーナルの目的

本ジャーナルは、個別要素的な技術や科学的知見をいかに統合して、研究開発の成果を社会で使われる形にしているか、という科学的知の統合に関する論文を掲載することを目的とする。この論文の執筆者としては、科学技術系の研究者や技術者を想定しており、研究成果の社会導入を目指した研究プロセスと成果を、科学技術の言葉で記述したものを論文とする。従来の学術ジャーナルにおいては、科学的な知見や技術的な成果を事実（すなわち事実に基づく知識）として記載したものが学術論文であったが、このジャーナルにおいては研究開発の成果を社会に活かすために何を行なえば良いかについての知見（すなわち当為的知識）を記載したものを論文とする。これをジャーナルの上で蓄積することによって、研究開発を社会に活かすための方法論を確立し、そしてその一般原理を明らかにすることを目指す。さらに、このジャーナルの読者が自分たちの研究開発を社会に活かすための方法や指針を獲得することを期待する。

## 研究論文の記載内容について

研究論文の内容としては、社会に活かすことを目的として進めて来た研究開発の成果とプロセスを記載するものとする。研究開発の目標が何であるか、そしてその目標が社会的にどのような価値があるかを記述する（次ページに記載した執筆要件の項目1および2）。そして、目標を達成するために必要となる要素技術をどのように選定し、統合しようと考えたか、またある社会問題を解決するためには、どのような新しい要素技術が必要であり、それをどのように選定・統合しようとしたか、そのプロセス（これをシナリオと呼ぶ）を詳述する（項目3）。このとき、実際の研究に携わったものでなければ分からない内容であることを期待する。すなわち、結果としての要素技術の組合せの記載をするのではなく、どのような理由によって要素技術を選定したのか、どのような理由で新しい方法を導入したのか、について論理的に記述されているものとする（項目4）。例えば、社会導入のためには実験室的製造方法では対応できないため、社会の要請は精度向上よりも適用範囲の広さにあるため、また現状の社会制度上の制約があるため、などの理由を記載する。この時、個別の要素技術の内容の学術的詳細は既に発表済みの論文を引用する形として、重要なポイントを記載するだけで良いものとする。そして、これらの要素技術は互いにどのような関係にあり、それらを統合

するプロセスにおいて解決すべき問題は何であったか、そしてどのようにそれを解決していったか、などを記載する（項目5）。さらに、これらの研究開発の結果として得られた成果により目標にどれだけ近づけたか、またやり残したことは何であるかを記載するものとする（項目6）。

## 対象とする研究開発について

本ジャーナルでは研究開発の成果を社会に活かすための方法論の獲得を目指すことから、特定の分野の研究開発に限定することはない。むしろ幅広い分野の科学技術の論文の集積をすることによって、分野に関わらない一般原理を導き出すことを狙いとしている。したがって、専門外の実験者にも内容が理解できるように記述することが必要であるとともに、その専門分野の実験者に対しても学術論文としての価値を示す内容でなければならない。

論文となる研究開発としては、その成果が既に社会に導入されたものに限定することなく、社会に活かすことを念頭において実施している研究開発も対象とする。また、既に社会に導入されているものの場合、ビジネス的に成功しているものである必要はないが、単に製品化した過程を記述するのではなく、社会への導入を考慮してどのように技術を統合していったのか、その研究プロセスを記載するものとする。

## 査読について

本ジャーナルにおいても、これまでの学術ジャーナルと同様に査読プロセスを設ける。しかし、本ジャーナルの査読はこれまでの学術雑誌の査読方法とは異なる。これまでの学術ジャーナルでは事実の正しさや結果の再現性など記載内容の事実性についての観点が重要視されているのに対して、本ジャーナルでは要素技術の組合せの論理性や、要素技術の選択における基準の明確さ、またその有効性や妥当性を重要視する（次ページに査読基準を記載）。

一般に学術ジャーナルに掲載されている論文の質は査読の項目や採録基準によって決まる。本ジャーナルの査読においては、研究開発の成果を社会に活かすために必要なプロセスや考え方が過不足なく書かれているかを評価する。換言すれば、研究開発の成果を社会に活かすためのプロセスを知るために必要なことが書かれているかを見るのが査読者の役割であり、論文の読者の代弁者として読者の知りたいことの記載の有無を判定するものとする。

通常の学術ジャーナルでは、公平性を保証するという理由により、査読者は匿名であり、また査読プロセスは秘匿される。確立された学術ジャーナルにおいては、その質を維持するために公平性は重要であると考えられているからである。しかし、科学者集団によって確立されてきた事実的知識を記載する論文形式に対して、なすべきことは何であるかという当為的知識を記載する論文のあり方については、論文に記載すべき内容、書き方、またその基準などを模索していかなければならない。そのためには査読プロセスを秘匿するのではなく、公開していく方法をとる。すなわち、査読者とのやり取り中で、論文の内容に関して重要な議論については、そのやり取りを掲載することにする。さらには、論文の本文には記載できなかった著者の考えなども、査読者とのやり取りを通して公開する。このように査読プロセスに透明性を持たせ、どのような査読プロセスを経て掲載に至ったかを開示することで、ジャーナルの質を担保する。また同時に、査読プロセスを開示することによって、投稿者がこのジャーナルの論文を執筆するときの注意点を理解する助けとする。なお、本ジャーナルのように新しい論文形式を確立するためには、著者と査読者との共同作業によって論文を完成させていく必要があり、掲載された論文は著者と査読者の共同作業の結果ともいえることから、査読者氏名も公表する。

## 参考文献について

前述したように、本ジャーナルの論文においては、個別の要素技術については他の学術ジャーナルで公表済みの論文を引用するものとする。また、統合的な組合せを行う要素技術について、それぞれの要素技術の利点欠点について記載されている論文なども参考文献となる。さらに、本ジャーナルの発行が蓄積されてきたのちには、本ジャーナルの掲載論文の中から、要素技術の選択の考え方や問題点の捉え方が類似していると思われる論文を引用することを推奨する。これによって、方法論の一般原理の構築に寄与することになる。

## 掲載記事の種類について

巻頭言などの総論、研究論文、そして論説などから本ジャーナルは構成される。巻頭言などの総論については原則的には編集委員会からの依頼とする。研究論文は、研究実施者自身が行った社会に活かすための研究開発の内容とプロセスを記載したもので、上記の査読プロセスを経て掲載とする。論説は、科学技術の研究開発のなかで社会に活かすことを目指したものを概説するなど、内容を限定することなく研究開発の成果を社会に活かすために有益な知識となる内容であれば良い。総論や論説は編集委員会が、内容が本ジャーナルに適しているか確認した上で掲載の可否を判断し、査読は行わない。研究論文および論説は、国内外からの投稿を受け付ける。なお、原稿については日本語、英語いずれも可とする。

## 執筆要件と査読基準

(2008.01)

項目	執筆要件	査読基準
1	研究目標 (「製品」、あるいは研究者の夢) を設定し、記述する。	研究目標が明確に記述されていること。
2	研究目標と社会とのつながり	研究目標と社会との関係が合理的に記述されていること。
3	シナリオ	道筋 (シナリオ・仮説) が合理的に記述されていること。
4	要素の選択	要素技術 (群) が明確に記述されていること。要素技術 (群) の選択の理由が合理的に記述されていること。
5	要素間の関係と統合	要素間の関係と統合が科学技術の言葉で合理的に記述されていること。
6	結果の評価と将来の展開	研究目標の達成の度合いと将来の研究展開が客観的、合理的に記述されていること。
7	オリジナリティ	既刊の他研究論文と同じ内容の記述がないこと。

# 投稿規定

シンセシオロジー編集委員会

制定	2007年12月26日
改正	2008年6月18日
改正	2008年10月24日
改正	2009年3月23日
改正	2010年8月5日
改正	2012年2月16日
改正	2013年4月17日
改正	2014年5月9日
改正	2014年11月17日
改正	2015年4月1日
改正	2015年10月1日

## 1 掲載記事の種類と概要

シンセシオロジーの記事には下記の種類がある。

・研究論文、論説、座談会記事、読者フォーラム

このうち、研究論文、論説は、原則として、投稿された原稿から査読を経て掲載する。座談会記事は編集委員会の企画で記事を作成して掲載する。読者フォーラムは読者により寄稿されたものを編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。いずれの記事も、多様な研究分野・技術分野にまたがる読者が理解できるように書かれたものとする。記事の概要は下記の通り。

### ①研究論文

成果を社会に活かすことを目的とした研究開発の進め方とその基となる考え方（これをシナリオと呼ぶ）、その結果としての研究成果を、実際に遂行された研究開発に関する自らの経験や分析に基づき、論理立てて記述した論文。シナリオやその要素構成（選択・統合）についての著者の独自性を論文としての要件とするが、研究成果が既に社会に活かされていることは要件とはしない。投稿された原稿は複数名の査読者による査読を行い、査読者との議論を基に著者が最終原稿を作成する。なお、編集委員会の判断により査読者と著者とで直接面談（電話・メール等を含む）で意見交換を行う場合がある。

### ②論説

研究開発の成果を社会に活かすあるいは社会に広めるための、考えや主張あるいは動向・分析などを記述した記事。主張の独自性は要件としないが、既公表の記事と同一あるいは類似のものではないものとする。投稿された原稿は編集委員による内容の確認を行い、必要な修正点等があればそれを著者に伝え、著者はそれに基づいて最終原稿を作成する。

### ③座談会記事

編集委員会が企画した座談会あるいは対談等を記事にしたもの。座談会参加者の発言や討論を元に原稿を書き起したもので、必要に応じて、座談会後に発言を補足するための追記等を行うことがある。

### ④読者フォーラム

シンセシオロジーに掲載された記事に対する意見や感想また本誌の主旨に合致した読者への有益な情報提供など

を掲載した記事とする。1,200文字以内で自由書式とする。編集委員会で内容を検討の上で掲載を決定する。

## 2 投稿資格

投稿原稿の著者は、本ジャーナルの編集方針にかなう内容が記載されていれば、所属機関による制限並びに科学技術の特定分野による制限も行わない。ただし、オーサーシップについて記載があること（著者全員が、本論文についてそれぞれ本質的な寄与をしていることを明記していること）。

## 3 原稿の書き方

### 3.1 一般事項

3.1.1 投稿原稿は日本語あるいは英語で受け付ける。査読により掲載可となった論文または記事はSynthesiology (ISSN1882-6229) に掲載されるとともに、このオリジナル版の約4ヶ月後に発行される予定の英語版のSynthesiology - English edition (ISSN1883-0978) にも掲載される。このとき、原稿が英語の場合にはオリジナル版と同一のものを英語版に掲載するが、日本語で書かれている場合には、著者はオリジナル版の発行後2ヶ月以内に英語翻訳原稿を提出すること。

3.1.2 研究論文については、下記の研究論文の構成および書式にしたがうものとし、論説については、構成・書式は研究論文に準拠するものとするが、サブタイトルおよび要約はなくても良い。

3.1.3 研究論文は、原著（新たな著作）に限る。

3.1.4 研究倫理に関わる各種ガイドラインを遵守すること。

### 3.2 原稿の構成

3.2.1 タイトル（含サブタイトル）、要旨、著者名、所属・連絡先、本文、キーワード（5つ程度）とする。

3.2.2 タイトル、要旨、著者名、キーワード、所属・連絡先については日本語および英語で記載する。

3.2.3 原稿等はワープロ等を用いて作成し、A4判縦長の用紙に印字する。図・表・写真を含め、原則として刷り上り6頁程度とする。

3.2.4 研究論文または論説の場合には表紙を付け、表紙には記事の種類（研究論文か論説）を明記する。

3.2.5 タイトルは和文で10～20文字（英文では5～10ワード）前後とし、広い読者層に理解可能なものとする。研究



論文には和文で15～25文字（英文では7～15ワード）前後のサブタイトルを付け、専門家の理解を助けるものとする。

3.2.6 要約には、社会への導入のためのシナリオ、構成した技術要素とそれを選択した理由などの構成方法の考え方も記載する。

3.2.7 和文要約は300文字以内とし、英文要約（125ワード程度）は和文要約の内容とする。英語論文の場合には、和文要約は省略することができる。

3.2.8 本文は、和文の場合は9,000文字程度とし、英文の場合は刷上りで同程度（3,400ワード程度）とする。

3.2.9 掲載記事には著者全員の執筆者履歴（各自200文字程度。英文の場合は75ワード程度。）及びその後、本質的な寄与が何であったかを記載する。なお、その際本質的な寄与をした他の人が抜けていないかも確認のこと。

3.2.10 研究論文における査読者との議論は査読者名を公開して行い、査読プロセスで行われた主な論点について3,000文字程度（2ページ以内）で編集委員会が編集して掲載する。

3.2.11 原稿中に他から転載している図表等や、他の論文等からの引用がある場合には、執筆者が予め使用許可をとったうえで転載許可等の明示や、参考文献リスト中へ引用元の記載等、適切な措置を行う。なお、使用許可書のコピーを1部事務局まで提出すること。また、直接的な引用の場合には引用部分を本文中に記載する。

### 3.3 書式

3.3.1 見出しは、大見出しである「章」が1、2、3、…、中見出しである「節」が1.1、1.2、1.3…、小見出しである「項」が1.1.1、1.1.2、1.1.3…、「目」が1.1.1.1、1.1.1.2、1.1.1.3…とする。

3.3.2 和文原稿の場合には以下のようにする。本文は「である調」で記述し、章の表題に通し番号をつける。段落の書き出しは1字あけ、句読点は「。」および「、」を使う。アルファベット・数字・記号は半角とする。また年号は西暦で表記する。

3.3.3 図・表・写真についてはそれぞれ通し番号をつけ、適切な表題・説明文（20～40文字程度。英文の場合は10～20ワード程度。）を記載のうえ、本文中における挿入位置を記

入する。

3.3.4 図については画像ファイル（掲載サイズで350 dpi以上）を提出する。原則は白黒印刷とする。

3.3.5 写真については画像ファイル（掲載サイズで350 dpi以上）で提出する。原則は白黒印刷とする。

3.3.6 参考文献リストは論文中の参照順に記載する。

雑誌：[番号] 著者名：表題、雑誌名（イタリック）、巻（号）、開始ページ～終了ページ（発行年）。

書籍（単著または共著）：[番号] 著者名：書名（イタリック）、開始ページ～終了ページ、発行所、出版地（発行年）。

ウェブサイト：[番号] 著者名（更新年）：ウェブページの題名、ウェブサイトの名称（著者と同じ場合は省略可）、URL、閲覧日。

## 4 原稿の提出

原稿の提出は紙媒体で1部および原稿提出チェックシート（Word ファイル）も含め電子媒体も下記宛に提出する。

〒305-8560

茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第1

産業技術総合研究所 企画本部広報サービス室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

なお、投稿原稿は原則として返却しない。

## 5 著者校正

著者校正は1回行うこととする。この際、印刷上の誤り以外の修正・訂正は原則として認められない。

## 6 内容の責任

掲載記事の内容の責任は著者にあるものとする。

## 7 著作権

本ジャーナルに掲載された全ての記事の著作権は産業技術総合研究所に帰属する。

問い合わせ先：

産業技術総合研究所 企画本部広報サービス室内

シンセシオロジー編集委員会事務局

電話：029-862-6217、ファックス：029-862-6212

E-mail：synthesiology-ml@aist.go.jp

## Editorial Policy

*Synthesiology* Editorial Board

### Objective of the journal

The objective of *Synthesiology* is to publish papers that address the integration of scientific knowledge or how to combine individual elemental technologies and scientific findings to enable the utilization in society of research and development efforts. The authors of the papers are researchers and engineers, and the papers are documents that describe, using “scientific words”, the process and the product of research which tries to introduce the results of research to society. In conventional academic journals, papers describe scientific findings and technological results as facts (i.e. factual knowledge), but in *Synthesiology*, papers are the description of “the knowledge of what ought to be done” to make use of the findings and results for society. Our aim is to establish methodology for utilizing scientific research result and to seek general principles for this activity by accumulating this knowledge in a journal form. Also, we hope that the readers of *Synthesiology* will obtain ways and directions to transfer their research results to society.

### Content of paper

The content of the research paper should be the description of the result and the process of research and development aimed to be delivered to society. The paper should state the goal of research, and what values the goal will create for society (Items 1 and 2, described in the Table). Then, the process (the scenario) of how to select the elemental technologies, necessary to achieve the goal, how to integrate them, should be described. There should also be a description of what new elemental technologies are required to solve a certain social issue, and how these technologies are selected and integrated (Item 3). We expect that the contents will reveal specific knowledge only available to researchers actually involved in the research. That is, rather than describing the combination of elemental technologies as consequences, the description should include the reasons why the elemental technologies are selected, and the reasons why new methods are introduced (Item 4). For example, the reasons may be: because the manufacturing method in the laboratory was insufficient for industrial application; applicability was not broad enough to stimulate sufficient user demand rather than improved accuracy; or because there are limits due to current regulations. The academic details of the individual elemental technology should be provided by citing published papers, and only the important points can be described. There should be description of how these elemental technologies

are related to each other, what are the problems that must be resolved in the integration process, and how they are solved (Item 5). Finally, there should be descriptions of how closely the goals are achieved by the products and the results obtained in research and development, and what subjects are left to be accomplished in the future (Item 6).

### Subject of research and development

Since the journal aims to seek methodology for utilizing the products of research and development, there are no limitations on the field of research and development. Rather, the aim is to discover general principles regardless of field, by gathering papers on wide-ranging fields of science and technology. Therefore, it is necessary for authors to offer description that can be understood by researchers who are not specialists, but the content should be of sufficient quality that is acceptable to fellow researchers.

Research and development are not limited to those areas for which the products have already been introduced into society, but research and development conducted for the purpose of future delivery to society should also be included.

For innovations that have been introduced to society, commercial success is not a requirement. Notwithstanding there should be descriptions of the process of how the technologies are integrated taking into account the introduction to society, rather than describing merely the practical realization process.

### Peer review

There shall be a peer review process for *Synthesiology*, as in other conventional academic journals. However, peer review process of *Synthesiology* is different from other journals. While conventional academic journals emphasize evidential matters such as correctness of proof or the reproducibility of results, this journal emphasizes the rationality of integration of elemental technologies, the clarity of criteria for selecting elemental technologies, and overall efficacy and adequacy (peer review criteria is described in the Table).

In general, the quality of papers published in academic journals is determined by a peer review process. The peer review of this journal evaluates whether the process and rationale necessary for introducing the product of research and development to society are described sufficiently well.

In other words, the role of the peer reviewers is to see whether the facts necessary to be known to understand the process of introducing the research finding to society are written out; peer reviewers will judge the adequacy of the description of what readers want to know as reader representatives.

In ordinary academic journals, peer reviewers are anonymous for reasons of fairness and the process is kept secret. That is because fairness is considered important in maintaining the quality in established academic journals that describe factual knowledge. On the other hand, the format, content, manner of text, and criteria have not been established for papers that describe the knowledge of “what ought to be done.” Therefore, the peer review process for this journal will not be kept secret but will be open. Important discussions pertaining to the content of a paper, may arise in the process of exchanges with the peer reviewers and they will also be published. Moreover, the vision or desires of the author that cannot be included in the main text will be presented in the exchanges. The quality of the journal will be guaranteed by making the peer review process transparent and by disclosing the review process that leads to publication.

Disclosure of the peer review process is expected to indicate what points authors should focus upon when they contribute to this journal. The names of peer reviewers will be published since the papers are completed by the joint effort of the authors and reviewers in the establishment of the new paper format for *Synthesiology*.

## References

As mentioned before, the description of individual elemental technology should be presented as citation of papers published in other academic journals. Also, for elemental technologies that are comprehensively combined, papers that describe advantages and disadvantages of each elemental technology can be used as references. After many papers are accumulated through this journal, authors are recommended to cite papers published in this journal that present similar procedure about the selection of elemental technologies and the introduction to society. This will contribute in establishing a general principle of methodology.

## Types of articles published

*Synthesiology* should be composed of general overviews such as opening statements, research papers, and editorials. The Editorial Board, in principle, should commission overviews. Research papers are description of content and the process of research and development conducted by the researchers themselves, and will be published after the peer review process is complete. Editorials are expository articles for science and technology that aim to increase utilization by society, and can be any content that will be useful to readers of *Synthesiology*. Overviews and editorials will be examined by the Editorial Board as to whether their content is suitable for the journal. Entries of research papers and editorials are accepted from Japan and overseas. Manuscripts may be written in Japanese or English.

## Required items and peer review criteria (January 2008)

	Item	Requirement	Peer Review Criteria
1	Research goal	Describe research goal (“product” or researcher’s vision).	Research goal is described clearly.
2	Relationship of research goal and the society	Describe relationship of research goal and the society, or its value for the society.	Relationship of research goal and the society is rationally described.
3	Scenario	Describe the scenario or hypothesis to achieve research goal with “scientific words” .	Scenario or hypothesis is rationally described.
4	Selection of elemental technology(ies)	Describe the elemental technology(ies) selected to achieve the research goal. Also describe why the particular elemental technology(ies) was/were selected.	Elemental technology(ies) is/are clearly described. Reason for selecting the elemental technology(ies) is rationally described.
5	Relationship and integration of elemental technologies	Describe how the selected elemental technologies are related to each other, and how the research goal was achieved by composing and integrating the elements, with “scientific words” .	Mutual relationship and integration of elemental technologies are rationally described with “scientific words” .
6	Evaluation of result and future development	Provide self-evaluation on the degree of achievement of research goal. Indicate future research development based on the presented research.	Degree of achievement of research goal and future research direction are objectively and rationally described.
7	Originality	Do not describe the same content published previously in other research papers.	There is no description of the same content published in other research papers.



# Instructions for Authors

“*Synthesiology*” Editorial Board

Established December 26, 2007

Revised June 18, 2008

Revised October 24, 2008

Revised March 23, 2009

Revised August 5, 2010

Revised February 16, 2012

Revised April 17, 2013

Revised May 9, 2014

Revised November 17, 2014

Revised April 1, 2015

Revised October 1, 2015

## 1 Types of articles submitted and their explanations

The articles of *Synthesiology* include the following types:

- Research papers, commentaries, roundtable talks, and readers' forums

Of these, the submitted manuscripts of research papers and commentaries undergo review processes before publication. The roundtable talks are organized, prepared, and published by the Editorial Board. The readers' forums carry writings submitted by the readers, and the articles are published after the Editorial Board reviews and approves. All articles must be written so they can be readily understood by the readers from diverse research fields and technological backgrounds. The explanations of the article types are as follows.

### ① Research papers

A research paper rationally describes the concept and the design of R&D (this is called the scenario), whose objective is to utilize the research results in society, as well as the processes and the research results, based on the author's experiences and analyses of the R&D that was actually conducted. Although the paper requires the author's originality for its scenario and the selection and integration of elemental technologies, whether the research result has been (or is being) already implemented in society at that time is not a requirement for the submission. The submitted manuscript is reviewed by several reviewers, and the author completes the final draft based on the discussions with the reviewers. Views may be exchanged between the reviewers and authors through direct contact (including telephone conversations, e-mails, and others), if the Editorial Board considers such exchange necessary.

### ② Commentaries

Commentaries describe the thoughts, statements, or trends and analyses on how to utilize or spread the results of R&D to society. Although the originality of the statements is not required, the commentaries should not be the same or similar to any articles published in the past. The submitted manuscripts will be reviewed by the Editorial Board. The authors will be contacted if corrections or revisions are necessary, and the authors complete the final draft based on the Board members' comments.

### ③ Roundtable talks

Roundtable talks are articles of the discussions or

interviews that are organized by the Editorial Board. The manuscripts are written from the transcripts of statements and discussions of the roundtable participants. Supplementary comments may be added after the roundtable talks, if necessary.

### ④ Readers' forums

The readers' forums include the readers' comments or thoughts on the articles published in *Synthesiology*, or articles containing information useful to the readers in line with the intent of the journal. The forum articles may be in free format, with 1,200 Japanese characters or less. The Editorial Board will decide whether the articles will be published.

## 2 Qualification of contributors

There are no limitations regarding author affiliation or discipline as long as the content of the submitted article meets the editorial policy of *Synthesiology*, except authorship should be clearly stated. (It should be clearly stated that all authors have made essential contributions to the paper.)

## 3 Manuscripts

### 3.1 General

3.1.1 Articles may be submitted in Japanese or English.

Accepted articles will be published in *Synthesiology* (ISSN 1882-6229) in the language they were submitted. All articles will also be published in *Synthesiology - English edition* (ISSN 1883-0978). The English edition will be distributed throughout the world approximately four months after the original *Synthesiology* issue is published. Articles written in English will be published in English in both the original *Synthesiology* as well as the English edition. Authors who write articles for *Synthesiology* in Japanese will be asked to provide English translations for the English edition of the journal within 2 months after the original edition is published.

3.1.2 Research papers should comply with the structure and format stated below, and editorials should also comply with the same structure and format except subtitles and abstracts are unnecessary.

3.1.3 Research papers should only be original papers (new literary work).

3.1.4 Research papers should comply with various guidelines of research ethics.

### 3.2 Structure

3.2.1 The manuscript should include a title (including subtitle), abstract, the name(s) of author(s), institution/contact, main text, and keywords (about 5 words).

3.2.2 Title, abstract, name of author(s), keywords, and institution/contact shall be provided in Japanese and English.

3.2.3 The manuscript shall be prepared using word processors or similar devices, and printed on A4-size portrait (vertical) sheets of paper. The length of the manuscript shall be, about 6 printed pages including figures, tables, and photographs.

3.2.4 Research papers and editorials shall have front covers and the category of the articles (research paper or editorial) shall be stated clearly on the cover sheets.

3.2.5 The title should be about 10-20 Japanese characters (5-10 English words), and readily understandable for a diverse readership background. Research papers shall have subtitles of about 15-25 Japanese characters (7-15 English words) to help recognition by specialists.

3.2.6 The abstract should include the thoughts behind the integration of technological elements and the reason for their selection as well as the scenario for utilizing the research results in society.

3.2.7 The abstract should be 300 Japanese characters or less (125 English words). The Japanese abstract may be omitted in the English edition.

3.2.8 The main text should be about 9,000 Japanese characters (3,400 English words).

3.2.9 The article submitted should be accompanied by profiles of all authors, of about 200 Japanese characters (75 English words) for each author. The essential contribution of each author to the paper should also be included. Confirm that all persons who have made essential contributions to the paper are included.

3.2.10 Discussion with reviewers regarding the research paper content shall be done openly with names of reviewers disclosed, and the Editorial Board will edit the highlights of the review process to about 3,000 Japanese characters (1,200 English words) or a maximum of 2 pages. The edited discussion will be attached to the main body of the paper as part of the article.

3.2.11 If there are reprinted figures, graphs or citations from other papers, prior permission for citation must be obtained and should be clearly stated in the paper, and the sources should be listed in the reference list. A copy of the permission should be sent to the Publishing Secretariat. All verbatim quotations should be placed in quotation marks or marked clearly within the paper.

### 3.3 Format

3.3.1 The headings for chapters should be 1, 2, 3..., for subchapters, 1.1, 1.2, 1.3..., for sections, 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, for subsections, 1.1.1.1, 1.1.1.2, 1.1.1.3.

3.3.2 The chapters, subchapters, and sections should be enumerated. There should be one line space before each paragraph.

3.3.3 Figures, tables, and photographs should be enumerated. They should each have a title and an

explanation (about 20-40 Japanese characters or 10-20 English words), and their positions in the text should be clearly indicated.

3.3.4 For figures, image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be in black and white.

3.3.5 For photographs, image files (resolution 350 dpi or higher) should be submitted. In principle, the final print will be in black and white.

3.3.6 References should be listed in order of citation in the main text.

Journal – [No.] Author(s): Title of article, *Title of journal* (italic), Volume(Issue), Starting page-Ending page (Year of publication).

Book – [No.] Author(s): *Title of book* (italic), Starting page-Ending page, Publisher, Place of Publication (Year of publication).

Website – [No.] Author(s) name (updating year): Title of a web page, Name of a website (The name of a website is possible to be omitted when it is the same as an author name), URL, Access date.

### 4 Submission

One printed copy or electronic file (Word file) of manuscript with a checklist attached should be submitted to the following address:

*Synthesiology* Editorial Board  
c/o Public Relations Information Office, Planning Headquarters, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)  
Tsukuba Central 1, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8560  
E-mail: synthesiology-ml@aist.go.jp

The submitted article will not be returned.

### 5 Proofreading

Proofreading by author(s) of articles after typesetting is complete will be done once. In principle, only correction of printing errors are allowed in the proofreading stage.

### 6 Responsibility

The author(s) will be solely responsible for the content of the contributed article.

### 7 Copyright

The copyright of the articles published in “*Synthesiology*” and “*Synthesiology English edition*” shall belong to the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST).

Inquiries:

*Synthesiology* Editorial Board  
c/o Public Relations Information Office, Planning Headquarters, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)  
Tel: +81-29-862-6217 Fax: +81-29-862-6212  
E-mail: synthesiology-ml@aist.go.jp

## 編集後記

Synthesiologyの発刊から、本号で9年目に入りました。本号では、「3次元IC積層実装技術の実用化への取り組み」、「レアメタル資源の安定供給を目指して」、「構成型研究におけるシナリオ：その役割と表現」、「太陽電池モジュールの信頼性向上と試験法開発に関するコンソーシアム研究」に関する論文4編をお届け致します。研究の内容は多岐にわたりますが、実用化への取り組み、資源確保のための取り組み、企業が共通基盤技術の開発をするためのコンソーシアムの設立(取り組み)など、技術開発を社会へ活用するための具体的事例を論述した、研究開発プロセスを系統立ててまとめられています。これは、Synthesiologyの趣旨である、研究活動とその社会寄与との間に横たわる「死の

谷」を埋める(克服する)為の活動記録であります。

産総研は第4期中長期目標では「橋渡し」機能の強化が求められており、個々の研究者が持つ研究ポテンシャルを如何に進めて行けば実用化、事業化へ繋がるか(成功するのか)、大いに参考となるモノであります。

また、「構成型研究におけるシナリオ：その役割と表現」に記載されているように、現代の学術論文誌では、どの論文も他分野の読者には理解不可能なものがほとんどであるのに対し、シンセシオロジー誌に掲載された論文は、他分野出身の読者や査読者にも理解可能な形で記述されています。是非ご一読を。

(編集幹事 高橋 正春)





## シンセシオロジー編集委員会

委員長：金山 敏彦

副委員長：湯元 昇、四元 弘毅

幹事（編集及び査読）：池上 敬一、栗本 史雄、清水 敏美、富樫 茂子、山田 由佳

幹事（普及）：赤松 幹之、小林 直人（早稲田大学）

幹事（出版）：高橋 正春

委員：安宅 龍明、綾 信博、一村 信吾（名古屋大学）、小賀坂 康志（国立研究開発法人 科学技術振興機構）、小野 晃、景山 晃、後藤 雅式、竹下 満（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）、多屋 秀人（株式会社 J-Space）、内藤 茂樹、藤井 賢一、松井 俊浩（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）、吉川 弘之（国立研究開発法人 科学技術振興機構）

事務局：国立研究開発法人 産業技術総合研究所 企画本部広報サービス室内 シンセシオロジー編集委員会事務局

〒305-8560 つくば市梅園 1-1-1 中央第1 産業技術総合研究所企画本部広報サービス室内  
TEL：029-862-6217 FAX：029-862-6212  
E-mail：synthesiology-ml@aist.go.jp  
ホームページ：http://www.aist.go.jp/aist\_j/aistinfo/synthesiology/index.html

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

---

## *Synthesiology* Editorial Board

Editor in Chief: T. KANAYAMA

Senior Executive Editor: N. YUMOTO, H. YOTSUMOTO

Executive Editors: K. IKEGAMI, C. KURIMOTO, T. SHIMIZU, S. TOGASHI, Y. YAMADA, M. AKAMATSU, N. KOBAYASHI (Waseda University), M. TAKAHASHI

Editors: T. ATAKA, N. AYA, S. ICHIMURA (Nagoya University), Y. OGASAKA (Japan Science and Technology Agency), A. ONO, A. KAGEYAMA, M. GOTOH, M. TAKESHITA (New Energy and Industrial Technology Development Organization), H. TAYA (J-Space Inc.), S. NAITOU, K. FUJII, T. MATSUI (New Energy and Industrial Technology Development Organization), H. YOSHIKAWA (Japan Science and Technology Agency)

Publishing Secretariat: Public Relations Information Office, Planning Headquarters, AIST

c/o Public Relations Information Office, Planning Headquarters, AIST  
Tsukuba Central 1, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8560, Japan  
Tel: +81-29-862-6217 Fax: +81-29-862-6212  
E-mail: synthesiology-ml@aist.go.jp  
URL: http://www.aist.go.jp/aist\_e/research\_results/publications/synthesiology\_e

● Reproduction in whole or in part without written permission is prohibited.

## 「Synthesiology」の趣旨 — 研究成果を社会に活かす知の蓄積 —

科学的な発見や発明が社会に役立つまでに長い時間がかかったり、忘れ去られ葬られたりしてしまうことを、悪夢の時代、死の谷、と呼び、研究活動とその社会寄与との間に大きなギャップがあることが認識されている。そのため、研究者自身がこのギャップを埋める研究活動を行なうべきであると考え。これまでも研究者によってこのような活動が行なわれてきたが、そのプロセスは系統立てて記録して論じられることがなかった。

このジャーナル「Synthesiology - 構成学」では、研究成果を社会に活かすために行なうべきことを知として蓄積することを目的とする。そのため本誌では、研究の目標設定と社会的価値、それに至る具体的なシナリオや研究手順、要素技術の統合のプロセスを記述した論文を掲載する。どのようなアプローチをとれば社会に生きる研究が実践できるのかを読者に伝え、共に議論するためのジャーナルである。

## *Aim of Synthesiology* — Utilizing the fruits of research for social prosperity —

There is a wide gap between scientific achievement and its utilization by society. The history of modern science is replete with results that have taken life-times to reach fruition. This disparity has been called the *valley of death*, or the *nightmare stage*. Bridging this difference requires scientists and engineers who understand the potential value to society of their achievements. Despite many previous attempts, a systematic dissemination of the links between scientific achievement and social wealth has not yet been realized.

The unique aim of the journal *Synthesiology* is its focus on the utilization of knowledge for the creation of social wealth, as distinct from the accumulated facts on which that wealth is engendered. Each published paper identifies and integrates component technologies that create value to society. The methods employed and the steps taken toward implementation are also presented.

Synthesiology 第9巻第1号 2016年2月 発行

編集 シンセシオロジー編集委員会

発行 国立研究開発法人 産業技術総合研究所





## Research papers

Developing an application for 3D IC chip stacking technology

—*How to shift from fundamental to practical technology?*—

M.AOYAGI, F.IMURA, F.KATO, K.KIKUCHI, N.WATANABE, M.SUZUKI, H.NAKAGAWA, Y.OKADA,  
T.YOKOSHIMA, Y.YAMAJI, S.NEMOTO, T.T.BUI and S.MELAMED

Securing a stable supply of critical raw metals

—*Efforts and issues for the securement of rare-earth resources*—

T.TAKAGI

Scenario in synthetic-type research: its role and description

—*An investigation from Synthesiology papers*—

A.ONO, M.AKAMATSU and N.KOBAYASHI

## Article

Consortium style study on the development of highly reliable photovoltaic modules and acceleration test methods

—*Management of the “Consortium Study on Fabrication and Characterization of Solar Cell Modules with Long Life and High Reliability”*—

A.MASUDA and N.IGAWA

## Editorial policy

### Instructions for authors

### Aim of *Synthesiology*