

革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）

終了時評価報告書（平成30年度）

「脳情報の可視化と制御による、活力溢れる生活の実現」

平成31年1月28日

P M 名：山川 義徳

P M補佐名：福田 紘己

：岡 宏樹

研究開発プログラムの全体計画

(1) 研究開発プログラムの構想

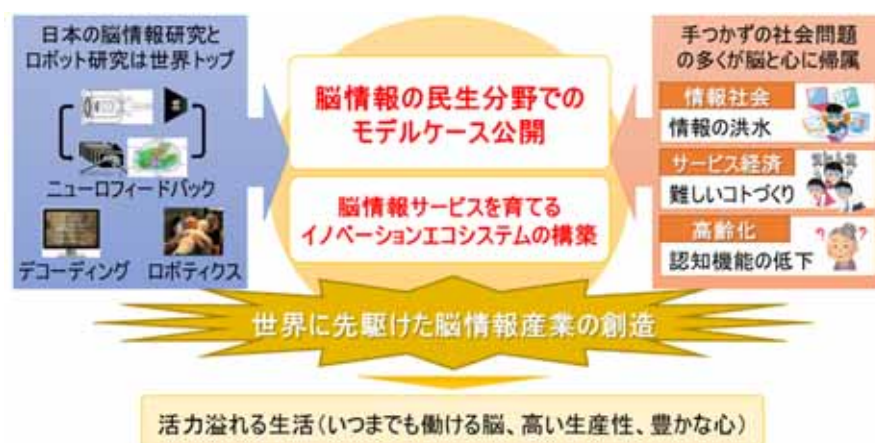
① 解決すべき社会的課題

高齢化・情報化が進む現代において、生活者は日々、認知機能の低下やストレスといった様々な脳と心の不具合の問題にさらされており、これらの問題の解決は、その難しさや社会に与えるインパクトの大きさとも相まって、喫緊の課題となっている。しかしながら、これまでのところ、脳と心の研究領域である脳科学がこういった生活者個々人の課題の解決に本当の意味で貢献できていないという問題点があった。

② 上記の社会的課題を解決し、産業や社会のあり方に大きな変革をもたらす PM の構想

上記の社会的課題の解決に向けては、これまで脳科学が紐解いてきた脳の情報を可視化し制御する研究を社会課題解決に結びつける、革新的な取り組みが必要となると考えられる。具体的には、自身も気づかない心の疲れや表現が難しいニーズや考えを可視化し、適切に制御する技術が必要とされ则认为られる。これらの技術は、かつてのインターネットがそうであったように、心の豊かさを実現する新たなイノベーションの素地となり、人々が日常的な簡易な方法でストレスや機能低下に対処し、脳と心の健康を保つことが可能となることが期待される。このことによる我が国の競争力の強化を促進する社会的波及効果は計り知れないとされる。

これらの取り組みにより、世界に先駆けた脳情報産業を日本から創出し、脳と心に関わる社会的問題を解決に導き、一人一人が活力溢れる生活を実現できる社会の実現を目指すという構想を持つに至った。



③ 出口目標及び出口に至る将来的なシナリオ

最終的な出口目標は、世界に先駆けた脳情報産業の創出となる。

本プログラムでは、開始当初より、ImPACT 期間及びポスト ImPACT 期間を含めた出口目標に至るシナリオを描いたうえで、取り組みを進めた。

出口目標の実現に向けた方策としては、下図に示すように、「モデルケースの公開を目標としたモジュール型研究開発による社会実装アプローチ」と「イノベーションエコシステム（生態系）形成に向けたアプローチ」（それぞれ下記④参照）の両方を進めることで、尖った脳科学研究成果の社会実装モデルケースの実現と、その普及や市場開拓に向けた活動という両輪で取り組みを進めた。



山川プログラムロードマップ

本プログラムでは、マネジメント上、4.5年間のImPACT期間を1.5年毎の3期に分けて進め、ステージⅠ～Ⅲを通じて、これらのシナリオを進めてきた。結果、モデルケースそれぞれの概念の実証とその先にある新規事業化やベンチャー企業の創出の成功例が数例出てきているほか、外部の資金やリソースとのマッチングを含む民間企業との連携の実施例や、脳情報取り扱いに関する国際標準化の実現、民間での脳科学研究を喚起する新しい脳の健康管理に関する指標の開発、30社程の異業種民間企業が有料で参加する産官学連携コンソーシアムの実現といったような具体的な成果が得られた。これらの取り組みを推し進めることで、ポストImPACT期間5年以内には、関連するベンチャー企業のIPOや企業の脳科学研究への投資額の増大、新指標の普及といった産業・社会において見える形で、世界に先駆けた脳情報産業の創出を実現していくことを想定している。

④ 解決のための発想・アイデア及びブレークスルーのポイント

脳と心の社会課題の解決は国際的な課題でもあるため、解決に向けた取り組みはグローバル且つ国家プロジェクトレベルの大規模さにて行われている（例えば、EUのHuman Brain Projectや米国のBRAIN Initiative、等。何千億円規模で行われており、日本においては金額の規模では到底及ばない）。そこでは、脳疾患の治療が目的である全脳シミュレーター研究やBMI研究、失われた脳機能の代償が目的のIoTやAIによるスマート化開発が主なアプローチとして取られている。しかしながら、これらは病気になった後の対処療

法であるため、市場性は高いものの個人にとって必ずしも満足できるものではない。また、日本国内においても、ニューロフィードバック技術や脳情報デコーディング技術といった脳情報研究やロボティクス技術分野において、世界最先端を走る研究開発がなされている。これらを踏まえ、本プログラムでは、個々人の脳の健康を目標とする脳情報の可視化と制御を可能にする、BMI や AI・ロボットの研究開発を主な研究主題として設定することとした。また、その成果を個々人が使えるようにするという社会実装の出口に向けて、脳科学自体の難しさや研究コスト等の問題によりほとんど進んでいない状態にあった民生分野での脳科学への取り組みを促進する環境づくりを進めることとした。

具体的なアプローチは以下の2つである。

●最先端科学に基づく技術開発を通じた新商品開発型のイノベーションアプローチ

携帯型 BMI・脳ビッグデータ・脳ロボティクスの3つの技術領域において、各領域の特徴を生かした健康サービス領域でのソリューションの創出を目指して、モジュール型の研究開発体制を進める。ステージゲートやマッチングファンドにより市場の視点も含めて研究を促進する。これにより、社会実装が可能となり、産業競争力への貢献に向けて、緊張感を保ちながらも切磋琢磨し合う事が可能となる。

●オープンプラットフォームによるイノベーションエコシステム（生態系）形成に向けたアプローチ

脳情報の利活用を促進する脳情報インフラ基盤をハード・ソフト面で構築・整備することで、その基盤を活用した産学連携やベンチャー支援を進めつつ、広範な領域への脳情報の利活用を促進する。これにより一部の研究者に限られていた脳情報の利活用について、大企業、ベンチャーや異分野の研究者へも広げ、脳情報によるイノベーションを創出する土壌の醸成が可能となる。

（2）研究開発プログラムの達成目標

前項で述べたシナリオの実現に向け、達成目標は以下とした。

①最先端科学に基づく技術開発を通じた新商品開発型のイノベーションアプローチ

プロジェクト毎に脳情報を活用した革新的な脳の健康サービスに関するソリューションの提案とその概念実証を達成し、研究開発型ニューロベンチャーの起業や民間企業連携による新規事業立ち上げといったビジネス化を実現させる。プログラム期間中に3つの主な技術分野において、それぞれビジネス化の道筋をつけるところまで達成する。

実現に向けた各ステージの目標は以下の通り。

ステージ1：技術的な基盤の開発

ステージ2：技術的な基盤の実証とソリューションの提案

ステージ3：ソリューションの概念実証とビジネス化

②オープンプラットフォームによるイノベーションエコシステム（生態系）形成に向けたアプローチ

数千人規模の脳情報取得の仕組み作りとデータベースを構築するとともに、その活用についての国際標準化も進め、ハード・ソフト両面で脳情報インフラ基盤を整備する。また、民間企業や脳ドックとの連携を進めることで、生活者個人がプログラムの成果を活用できるための仕組みやサービスを実現させる。

（３）研究開発プログラムの全体構成図

（１）で述べたアプローチを進めるにあたって、最先端科学に基づく技術開発を通じた新商品開発型のイノベーションとしては、BMI（AI）、ロボティクス、ビッグデータを中心とした３領域についてそれぞれ各領域を代表する研究者を統括技術責任者に任命し、それを補完するオープンプラットフォームによるイノベーションエコシステムの構築をPMが直轄して管理し、研究開発プログラムを進めることとした。なお、統括技術責任者を配置したプロジェクトに対して、代替可能なプロジェクトとしてPM直轄の開発プロジェクト（現在の「汎用型脳計測プロジェクト」）を設置することで、プログラム内での競争と協働関係が成り立つ仕組みとしている。これらの取り組みにより、脳科学による価値の深堀り（競争優位の獲得）、非医療分野での脳情報利用の拡大（新市場・新産業の形成）の両面で、世界に先駆けた脳情報産業の創造へと進む体制を構想した。



（４）具体的な取組

① 携帯型 BMI プロジェクト（「脳状態推定と誘導」）

i) 研究開発の概要

脳情報の可視化と制御を利用した、人々の活力溢れる生活を実現・支援するための技術のモデルケースの提案として、具体的な社会応用を視野に入れた携帯型 BMI の開発とその脳科学的な妥当性の検証を行う。

多様な社会的問題への対応を想定し、高齢化社会において加齢による認知機能の低下を防止・回復する技術の基礎開発、ストレス社会における情動を脳活動から推定する技術

の開発、NIRS ニューロフィードバックで脳の状態を良い方向に誘導する技術の基礎開発、脳活動による簡便な個人特性予測、を主な柱とする。

また、現在脳機能計測のデファクトスタンダードである高精度ではあるが大型・高コストな機能的核磁気共鳴画像法(fMRI)により取得可能な脳情報を、可搬・低コストな近赤外分光計測法(NIRS)または脳波計測(EEG)によって代替取得する技術を開発することを目指す。

ii) 成果目標

「高齢化社会において加齢による認知機能の低下を防止・回復する」、「ストレス社会における健康な脳を実現する」といった具体的な社会応用例について、また、「NIRS や EEG の活用により、従来の fMRI でかかっていた脳情報活用のコストを 10 分の 1 にする」といったことについて、ソリューションを提案し、その概念実証を行う。

② 脳ロボティクスプロジェクト（「ブレインロボットヘルスケア」、「アンドロイドフィードバック」）

「ブレインロボットヘルスケア」

i) 研究開発の概要

脳活動解析技術とロボティクス技術を融合した、装着型ロボット、セラピーロボット、対話型ロボットを開発し、ロボットを介したユーザーへの感覚・知覚入力により、高齢になっても健全な身体能力を維持する、ストレス軽減や意欲向上、認知機能の維持・改善を実現するといったことが可能であることの概念実証を行う。

具体的には、健全な身体機能の維持に向け脳による正確な姿勢の認識を支援する「感覚運動学習支援システムの研究開発」や、相手に伝わりやすい会話技術によって安らぎを与えるための「セラピー会話システムの研究開発」、話題に対する相手の理解状態を推定するための「対話活性化システムの研究開発」を行う。

ii) 成果目標

各目的に応じたロボットの試作品を開発するとともに、ロボットを介したユーザーへの感覚・知覚入力による、健康への貢献についての概念実証を達成する。

「アンドロイドフィードバック」

i) 研究開発の概要

加齢に伴うマルチタスク能力の低下や情報過多（メディアマルチタスキング）によるストレス状態といった、現代において特に注目されているマルチタスクという能力に関わる問題に対し、アンドロイドおよびニューラルフィードバックによる、本来の手足の代替ではない、追加肢（3 本目の腕）の制御を通じた解決の提案を試みる。具体的には、アンドロイドを用いた既存・追加肢の同時制御の実現、MEG による高精度のアンドロイド制御、動物での侵襲性 BMI による追加肢制御の実現及びマルチタスク機能機序の解明といった取り組みを進めることで、マルチタスク能力にかかわる脳活動を明確にすると

ともに、訓練を通じた脳活動の変化の検証を行う。これにより、冒頭に挙げた問題へのソリューションの提案や新しいユーザーインターフェース開発を行う。

ii) 成果目標

既存・追加肢の同時制御の実現とともに、現代におけるマルチタスクという能力に関わる問題に対するソリューション（マルチタスク能力の可視化や訓練手法等）の提案とその概念実証を達成する。

③ 脳ビッグデータプロジェクト（「脳サーチエンジン」）

i) 研究開発の概要

脳活動から心的イメージや感性、欲求など多様な心的情報を解読する方法を開発し、その方法を脳と心の健康の他、製品やデザインの評価等の様々なサービスに応用するための基盤技術の確立を目指す。具体的には、脳情報デコーディング技術から得られる大量の脳情報に、ウェブ等で得られる画像やテキストの大規模データ（多くの人々が体験した内容や心理状態を記述した「心的コンテンツの素材」）を組み合わせることで、脳情報から実環境に即したリアルな出力（心的状態を記述するコンテンツの作成）を実現する技術開発を行う。脳と心の健康に向けては、心安らぐようなコンテンツのRecommendや、コンテンツ生成をするとアートセラピーのようにストレスがリリースされるなどといった可能性を模索する。

ii) 成果目標

上記技術の概念実証として、1) 計測脳活動及び人工脳モデルによる予測脳活動を基に、脳活動ベースで画像コンテンツ評価を行うシステムや、2) 多様な画像を提示したとき及び想起したときの脳活動パターンから、知覚内容や想起した内容に関連する画像および言語情報を生成する技術の開発を行う。これらの精度検証を行うため、大量の画像を被験者に提示したときの脳計測データを収集した「大規模個人脳データベース」の構築も実現する。

④ 汎用型脳計測プロジェクト（「ニューロテイラーメイド」「脳波めがね」）

i) 研究開発の概要

実環境での利用が可能となる簡便な脳波計を開発し、それによって感覚特性や情動（ストレスや共感等）といった脳情報の可視化と制御を可能とする技術の開発を行う。プログラム当初から企業との強力な連携体制で進めることで、開発したものの製品化・事業化を実現することを目指す。用途規定型（眼鏡）「ニューロテイラーメイド」と新装置型（乾式電極）「脳波めがね」の二つのアプローチを並行して進める。

ii) 成果目標

開発した簡易脳波計による、感覚特性や情報といった脳情報の可視化についての概念実証を行うと共に、製品化・事業化を実現する。

⑤ 脳情報インフラプロジェクト

i) 研究開発の概要

脳情報産業はいまだ世界中のどこにも存在しない産業であり、産業としての土台や技術の産業化に向けてのツールが形成されていない状態である。脳情報インフラ領域においては、脳情報産業の創出を支える脳情報インフラの実現を達成目標として研究開発を進める。主には、3000人以上の高解像度脳情報を蓄積するクラウドの構築（脳情報クラウド）、1万人以上の検診脳情報を蓄積するクラウドの構築（脳ドッククラウド）の2つの取り組みを推進する。上記の取り組みについて、多様な企業・研究者に利用され、自立的かつ継続的なサービス提供を可能とする、脳情報インフラの新組織の構築を構想している。また、これらについて国際競争力を持たせると共に継続的運営の実現を目指す。

ii) 成果目標

3000人以上の高解像度脳情報を蓄積するクラウドの構築（脳情報クラウド）、1万人以上の検診脳情報を蓄積するクラウドの構築（脳ドッククラウド）とともに、データの取り扱いの国際標準化やデータを活用したヘルスケアサービスの開発を目標とする。

（5）研究開発プログラムの全体ロードマップ

マネジメントの仕組みとして、4年半の研究開発期間を、ステージ1(2014年10月～2016年3月)、ステージ2(2016年4月～2017年9月)、ステージ3(2017年10月～2019年3月)の3つに分け、各ステージの間に設けるステージゲートでの評価を基にダイナミックに体制を見直しながら、プログラムの目標達成に向けて進めた。(研究開発体制の移り変わりの詳細については、「5. 研究開発プログラムの推進体制」を参照のこと)



（6）研究開発プログラムのマイルストーン

プログラムの最終的な目標である、現代社会における脳の健康の実現に向けたソリューションの提案とその概念実証に向けて、各ステージゲートにおいては、ソリューション提案に向けた取り組みの科学的な基盤は良いか（ステージ1ステージゲート）、ソリューションの提案がありそれが科学的にも問題がなく社会実装面でも説得力のあるものか（ステージ2ステージゲート）といったマイルストーンを設けている。その上で、ステージ3では、ソリューションの概念実証を終えることを目指した。

(7) 研究開発プログラム実施期間

平成 26 年 10 月 1 日から平成 31 年 3 月 31 日まで（4.5 年間）

2. 研究開発プロジェクト毎の実施状況及び成果

(1) 携帯型 BMI プロジェクト（「脳状態推定と誘導」）

① プロジェクトの計画

ニューロフィードバックを用いて、認知機能の低下を防止・回復させる技術、ストレスを低減する技術の開発に取り組んでいる。1) 機械学習推定を用いた認知機能の低下の防止と回復チーム、2) ストレス社会における情動の脳活動からの推定チーム、3) NIRS ニューロフィードバックによる認知機能の低下の防止と回復チームに分かれ、脳の健康に関するソリューション提案とその概念実証に向けて研究を進めた。それぞれの計画概要は以下の通り。

1) 機械学習推定を用いた認知機能の低下の防止と回復チーム

ステージ 1 においては、様々な年齢における認知機能の低下を特徴づける脳活動や結合パターンの特定を行い、ステージ 2 においては、大型装置におけるニューロフィードバック技術を開発した。ステージ 3 においては、この技術の社会実装として、携帯型 BMI への技術移植を進め、概念実証を行った。

2) ストレス社会における情動の脳活動からの推定チーム

ステージ 1～2 においては、大規模実験データ解析及び EEG Fingerprint 分析を行った。ステージ 3 においては、情動状態推定システムとニューロフィードバック技術検証を行い、概念実証とした。

3) NIRS ニューロフィードバックによる認知機能の低下の防止と回復チーム

ステージ 1 においては、NIRS での fMRI 成果の検証を行い、ステージ 2 においては、NIRS での脳機能結合解析ソフトウェアを開発した。ステージ 3 においては、これらの成果を応用し、NIRS ニューロフィードバックについて検証し、概念実証とした。

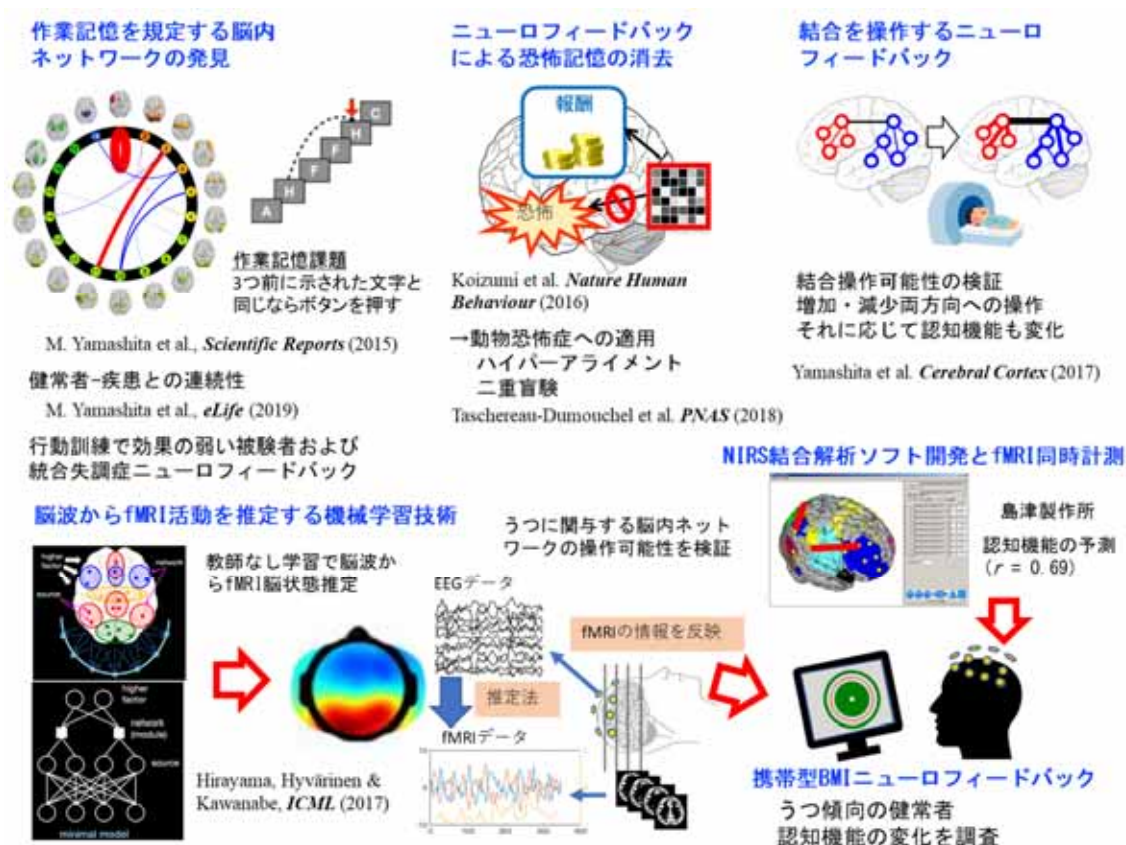
② プロジェクトの体制

国際電気通信基礎技術研究所（ATR）の川人光男所長を統括技術責任者とし、同研究所の今水寛所長をグループリーダーとした体制で進めた。企業としては、ATR の他、株式会社島津製作所が参加。

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

機能的磁気共鳴画像装置（fMRI）を用いて、ニューロフィードバックの概念・原理の検証の段階において、認知機能を規定する脳のネットワークを発見、恐怖反応を低減する技術の開発などの多くの成果を挙げた。現在は、fMRI のニューロフィードバックを脳波などの簡便な「携帯型 BMI」に移植することに積極的に取り組んだ。具体的には脳波パターンから、安静時 fMRI で同定された脳内ネットワークの活動を推定する機械学習技術（SPlice 法）を開発、それに基づく EEG ニューロフィードバックを実施した。また、fMRI ニューロフィードバックの成果に立脚した NIRS ニューロフィードバックを実施した。これらの取り組みは、ハイリスクではあるが、実現すれば、ニューロフィードバックをより広い範囲の人が利用することが期待でき、研究成果の社会への出口につながると期待される。





<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
2. 技術的な概念モデルが提案されている。	7. システムとして実証モデルが、実際の使用環境に近い条件のもとで試験されている。

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

認知機能の低下防止・回復に関しては、認知的な訓練（いわゆる脳トレ）が競合する技術になる。しかし、この方法では、脳の広い範囲に影響を与える。これに対して、ニューロフィードバックでは、脳の特定の場所に絞って介入することが可能である。また、ニューロフィードバックによる恐怖刺激の低減では、心的外傷後ストレス障害に対して従来から用いられてきた認知的な訓練（暴露療法）とは異なり、恐怖の原因となる刺激を見せずに、恐怖反応を低減することが原理的に可能である。

<獲得成果の革新性>

現代社会が抱える代表的な問題に、超高齢化社会とストレスによる社会不安がある。本プロジェクトで取り組んだ、認知機能の低下を防止・回復、ストレスにおける情動の制御は、これらの問題を解決する有力な方法である。本プロジェクトでは、これらの課題に取り組むために、ニューロフィードバックにおいて、fMRIの脳活動と、脳波・NIRSを

結びつける技術の基礎を開発した。人間の脳活動を正確に測るために必要不可欠ではあるが、重厚長大な装置を必要とする fMRI と、簡便ではあるが、それだけでは神経科学としての解釈が難しい、脳波・NIRS をニューロフィードバックにおいて結びつけたことは、神経科学で蓄積された膨大な知識と産業応用を結びつけ、将来のヘルスケア産業に大きな変革をもたらすことが期待できる。実際、産業界との連携・産業化は始まっている。具体的には、共同で研究を進めてきた島津製作所では、認知機能低下の予防ビジネスが中期計画の柱となった。また、一連の研究成果を元にして、ニューロベンチャーXNef 社が創業し、ニューロフィードバック技術成果の本格的な事業化・知財戦略に取り組んでいる。

＜獲得成果の独創性＞

高齢化社会における認知機能の低下、ストレス社会での情動のメカニズムを理解する上で、精神疾患における認知機能の低下・心的外傷後ストレス障害などの疾患・障害との連続性を考慮した点は独創的である。健康に生活を送っている人々における認知機能の低下・ストレスは軽微なものであり、そのものを研究対象としても、特異性は見いだしにくい。疾患との連続性の中で考えることで、深刻な事態に至る前の未病対策を取ることができる。この点において、様々な年齢層の認知課題と安静時 fMRI のデータを取得、データベースを構築した点は、この分野での貴重な資産となるはずである。また、脳波によるニューロフィードバックを行うに際して、fMRI の安静時機能的結合から導き出された脳のネットワークを推定した点、推定するにあたり、教師なし学習で脳波から fMRI 脳状態推定する機械学習技術を独自に開発した点は独創的である。

（２）脳ロボティクスプロジェクト（「ブレインロボットヘルスケア」、「アンドロイドフィードバック」）

「ブレインロボットヘルスケア」

① プロジェクトの計画

脳活動解析技術とロボティクス技術に基づく、脳の健康に対するソリューションの方向性として、運動系である 1) 感覚運動学習支援システムの研究開発、と対話系である、2) セラピー会話システムの研究開発、3) 対話活性化システムの研究開発、に分かれ、ソリューション提案とその概念実証に向けて研究を進めた。それぞれの計画概要は以下の通り。

1) 感覚運動学習支援システム

日常生活や運動中のケガや故障のない動作生成のために、脳の姿勢認知能力の計測と改善を目指した装着型ヘルスケアシステムの開発を行った。装着型ロボットによって与えられる姿勢教示を通じて体性感覚の認知能力を向上、脳機能の改善に貢献する。

ステージ1～2においては、手先位置や単関節の体性感覚の認知能力の計測とその改善方法の検討を行った。ステージ3においては、複数関節が関わる姿勢認知を対象とすることで概念実証を目標とした。

2) セラピー会話システム

聞き手に安心感や意欲向上をもたらすような会話技術の研究開発を行った。具体的には、対象者の脳活動を確認しながら効果的にセラピー効果をもたらす会話システムの実現とそのロボット（セラピーロボット）への実装を目指した。そういった効果をもたらすための説得会話の基礎として催眠に着目し、ステージ1～2においては、被暗示性（暗示のかかりやすさ）と脳活動の関係性の解明を進めた。ステージ3においては、脳活動に基づいて被暗示性の高さや暗示状態を推定するシステムを構築した。また、暗示の効果を高めるロボットシステムを構築し、被験者実験を通してシステムの有効性を確認した。

3) 対話活性化システム

対話を通して脳の健康へ働きかけるために、聞き手との対話を活性化する効果的なロボットシステムの開発を目指した。話を聞いている際だけでなく、話しているときや、対話相手が人やスピーカー、テレビ電話のときなど、様々な状況、課題、対話相手での対話を通じて、どういった対話がストレス軽減や意欲向上、認知機能の維持・改善といった効果を人にもたらすのかを明らかにした。ステージ1～2においては、ロボットが介在することによる会話の活性化や脳活動への影響について解明を進めた。ステージ3においては、これらの成果をふまえ、脳を活性化しうる話題や対話相手の選定をし、その効果検証を長期的な実験を通して行った。

② プロジェクトの体制

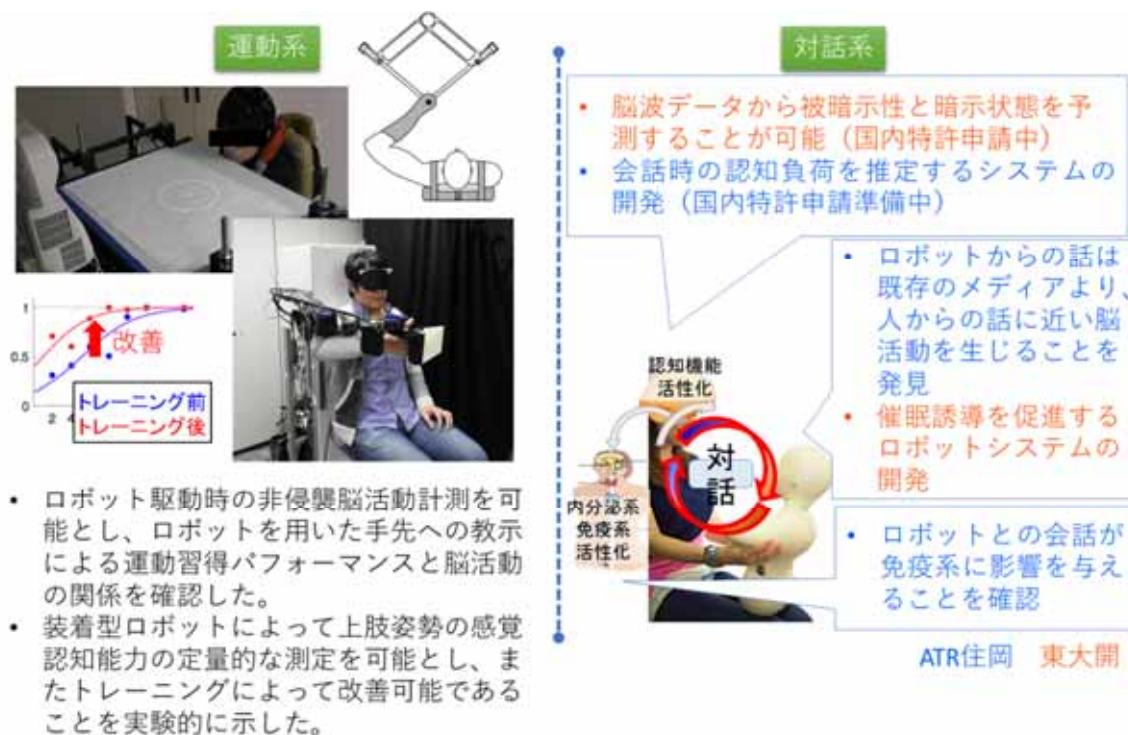
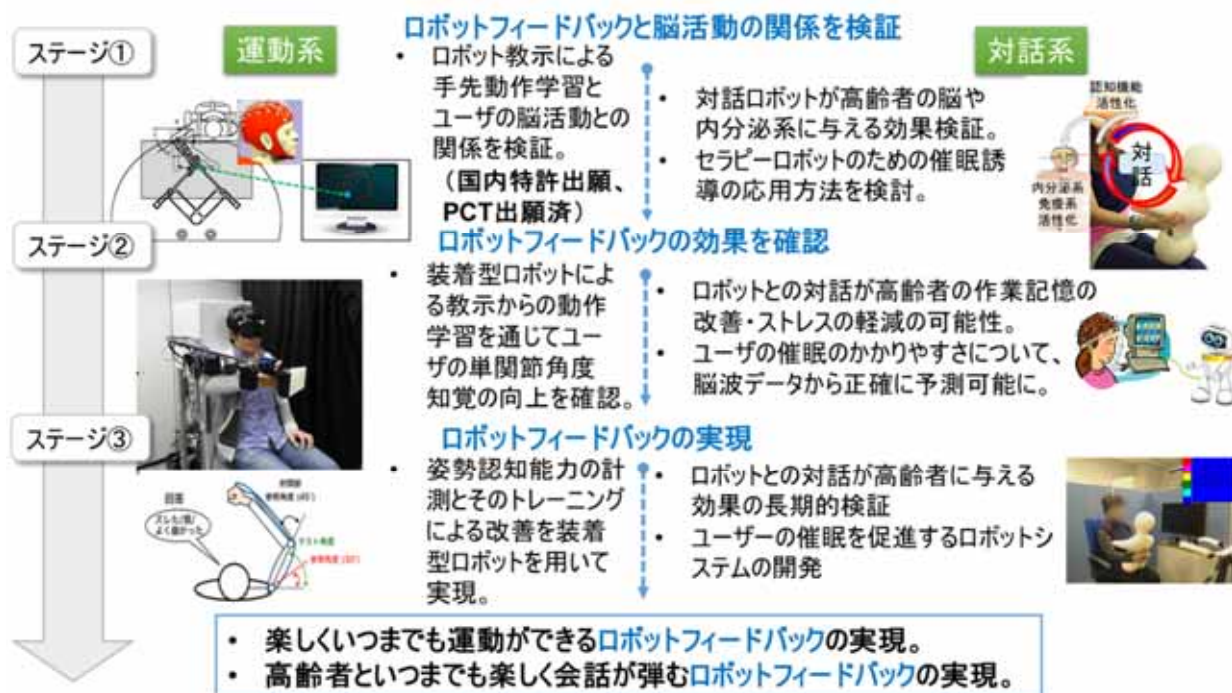
大阪大学の石黒浩教授を統括技術責任者とし、国際電気通信基礎技術研究所（ATR）の森本淳室長をグループリーダーとした体制で進めた。

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

運動系については、ロボット駆動時の非侵襲脳活動計測を可能とし、ロボットを用いた手先への教示による運動習得パフォーマンスと脳活動の関係を確認した。また、装着型ロボットを用いた脳の感覚認知の改善を目指したシステム開発を進めた。具体的には、装着型ロボットによって上肢姿勢の感覚認知能力の定量的な測定を可能とし、またトレーニングによってその感覚認知能力の改善が可能であることを実験的に示した。

対話系については、対話ロボットが高齢者の脳や内分泌系に与える効果の検討を行っており、ロボットとの対話が電話での対話に比べて複雑な脳活動を引き起こすこと、話題によって脳への影響が異なること、ロボットとの対話によってストレス軽減や免疫力の向上の可能性のあることを明らかにした。加えて、脳波計（EEG）を用いたロボットセラピー技術に向けて、催眠における被暗示性のスコアをベースラインの EEG データから非常に

正確に予測すること、催眠時の脳波から催眠状態の予測を高精度で行うことができた。また、ロボットシステムを用いることで暗示にかかりにくい被験者もかかりやすくすることができた。



<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
感覚運動学習支援システム：1（原理的な可能性が示されている） セラピー会話システム：1 対話活性化システム：1	感覚運動学習支援システム：5（技術要素としての実証モデルが、実際の使用環境に近い条件のもとで試験されている。） セラピー会話システム：5 対話活性化システム：5

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

運動系については、運動出力をアシストするロボットがほとんどであり、ロボットを装着しない場合の感覚入力 of 認知能力を装着型ロボットにおいて計測・改善するという試みは知り得る限りにおいては他では行われていない。対話系については、高齢者に対する対話ロボットの効果はほとんど観察報告であり、十分に科学的な検証は行われておらず、他研究は今のところ存在しない。本研究を通じた客観的な評価は今後のロボットによる介護支援のためにも重要である。加えて、脳活動に基づいてセラピー（催眠療法）を実施している他研究は今のところ存在せず、さらに本研究では100名を超える協力者からデータを取得している点で、類似研究（マインドフルネス中の脳活動計測）などと比較しても遜色無い。

<獲得成果の革新性>

運動系については、装着型ロボットを体性感覚の認知能力の計測と改善に用いるという革新的な成果を獲得した。日常動作においてクセとなっている身体に負荷のかかる姿勢・動作の継続的な利用は、中高年においてははじまる身体の衰えとともに、筋骨格系の物理的な不具合として現れる。高齢者においては、その不適切な身体の利用がもとで健康を損なうことになり得る。そこで、姿勢に関わる関節運動の教示を可能とする上肢装着型ロボットシステムを用いた実験プロトコルを設計し、ユーザーの脳の体性感覚認知能力の測定と肘関節軌道追従課題を通じたその体性感覚認知の変化について検証した。その結果として、体性感覚認知の変化が関節運動学習にも影響することを実験的に確認した。開発した装着型ロボットを用いるアプローチは、将来的には現代人のヘルスケアに密接にかかわる姿勢の改善に貢献することで、社会に変革をもたらす可能性がある。

対話系については、脳の健康維持・促進に対話ロボットを用いるという革新的な成果を獲得した。ロボットとの対話を通じた脳活動の影響を検証したことで、我々の生活への導入が進む対話ロボットにおいて、脳の健康を維持するための対話のデザインが可能となった。それにより、ユーザーが意図的に訓練をせずとも日常会話を通して脳の健康を維持したり、重度認知症患者といった会話困難な対話相手に対して、対話を通して脳の活性化を引き起こしたりと、対話を通してユーザーの脳の健康を維持するパートナーロボットの開発が可能となる。また、暗示の研究を基に会話術をデザインすることで、行

動の変容を促進する会話も可能となり、対話ロボットとの対話を通して、身体と脳の健康を維持する社会の実現へとつながる。

＜獲得成果の独創性＞

運動系については、従来運動アシストのために用いられてきた装着型ロボットを、体性感覚の認知能力の計測と改善に用いることで、日常生活においてはロボットを装着することなくその効果が発揮されるところが独創的であり、他に類を見ないロボットを用いた脳機能改善へのアプローチである。

対話系については、高齢者に対する対話ロボットの効果はほとんど観察報告であり、十分に科学的な検証は行われておらず、他研究は今のところ存在しない。また、対話ロボットの効果を、脳活動を通して評価した点は独創的であり、これにより、対話ロボットの客観的な評価が可能となり今後のロボットによる介護支援のためにも重要である。加えて、脳活動に基づいてセラピー（催眠療法）を実施している他研究は今のところ存在しないが、本研究では 100 名を超える協力者からデータを取得している点で、類似研究（マインドフルネス中の脳活動計測）などと比較しても遜色無い。

「アンドロイドフィードバック」

① プロジェクトの計画

1) アンドロイドフィードバックによるトレーニング、2) MEG を用いたアンドロイド制御、3) BMI による身体機能拡張、に分かれ、脳情報の精密な計測・分析によるアンドロイドの制御を実現するとともに、このアンドロイド制御のフィードバックによるトレーニングを通じて、機械を脳情報により思い通りに動かせるような仕組みの実現及び脳の健康へのソリューションの提案と概念実証を目指した。それぞれの計画概要は以下の通り。

1) アンドロイドフィードバックによるトレーニング

ステージ 1 においては、従来の遠隔操作アンドロイドからのフィードバックに関する知見（一般のロボットではなくアンドロイド操作時のみ、脳活動パターンを変化させられる）について、詳細な検証を行った。ステージ 2 においては、実際にアンドロイド追加肢を実装し、その操作実験を通じて基礎データの蓄積を進めた。ステージ 3 においては、アンドロイド追加肢制御の手法を確立するとともに、アンドロイドによるフィードバック効果を明確化した。また追加肢制御に関わる脳部位の同定と、既存肢と追加肢とをマルチタスク状態で BMI 制御することを通じた、脳活動の向上や認知能力の拡大に関する研究を進めた。

2) MEG を用いたアンドロイド制御

ステージ1～2においては、時間・空間分解能がともに高い脳磁計（MEG）を用いて両上肢運動時の脳磁界を計測し、サポートベクターマシンを用いたデコーディング手法により、両上肢運動時の脳活動の解読を行った。次いで、MEG計測によるリアルタイムデコーディング・アンドロイド制御システムを開発した。ステージ3においては、追加肢制御時の脳活動をMEGで計測し、マルチタスクに関わるヒトの脳内処理機構について研究を進めた。

3) BMIによる身体機能拡張

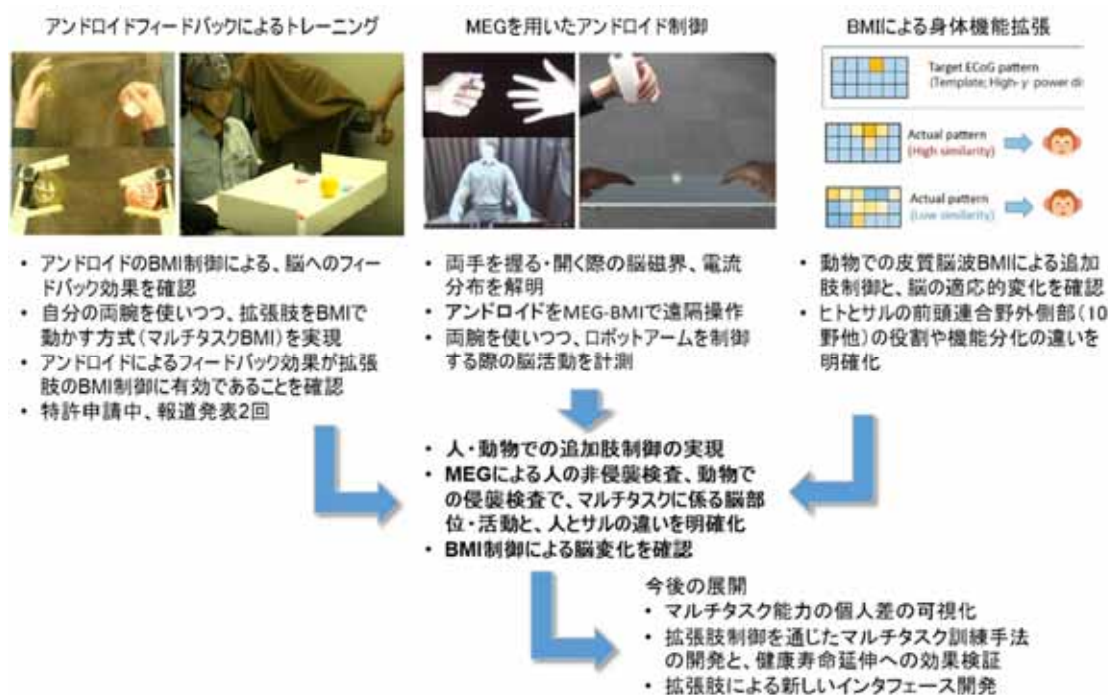
動物を対象とした侵襲的BMI手法を用いてマルチタスク機能の機序解明と向上を目指した。ステージ1～2においては、BMIによる外部機器制御系（追加肢）やマルチタスク実験系をラット及びサルを対象として構築することに成功した。また、それぞれを対象としたマルチタスク課題を実施し、マルチタスク遂行に直接かかわる神経活動を同定した。ステージ3においては、これらの追加肢制御実験を進めるとともに、マルチタスク遂行に関わるとされる前頭連合野の役割や機能分化について研究を進めた。

② プロジェクトの体制

大阪大学の石黒浩教授を統括技術責任者とし、国際電気通信基礎技術研究所（ATR）の西尾修一主幹研究員をグループリーダーとした体制で進めた。

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

アンドロイドフィードバックによるトレーニングでは、既存肢と追加肢とをマルチタスク状態でBMI制御することを実現できた。また、マルチタスクBMI制御における、アンドロイドのフィードバック効果を明確にすることができた。MEGを用いたアンドロイド制御においては、両手運動時の脳活動を明らかにし、デコーディングできた。それを用いてアンドロイドの両手をBMIで制御できた。これを発展させて、両手運動に加えて3本目の腕を制御する際の脳活動を計測・解析している。BMIによる身体機能拡張では、皮質脳波BMIによる追加肢（機器）制御が、動物（サル及びラット）において可能であることを実証するとともに、ヒトとサルにおける前頭連合野の役割や機能分化の違いを明らかにした。



<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
アンドロイドフィードバックによるトレーニング：1（原理的な可能性が示されている）	アンドロイドフィードバックによるトレーニング：4（技術要素としての実証モデルが実験室レベルで試験されている。）
MEGを用いたアンドロイド制御：1	MEGを用いたアンドロイド制御：4
BMIによる身体機能拡張：1	BMIによる身体機能拡張：4

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

<獲得成果の革新性>

アンドロイドフィードバックによるトレーニングにおいて、既存肢と追加肢とをマルチタスク状態での BMI 制御を実現し、人が 2 本以上の腕を意図どおりに制御しうる可能性を示したことは、従来全く考えられていなかった、革新的な成果である。本成果は人の新たな可能性を示すものであり、将来的に、現在の腕を 2 本使うことを前提とするものとは全く異なるインターフェースにつながりうるものであるとともに、3 本以上の腕の制御を通じた脳の活性化、労働生産性の向上や認知能力の向上に貢献する可能性があり、社会に大きなインパクトをもたらしうるものである。

最も基本的なマルチタスクである両手運動を、MEG の時空間分解能の高さを活かして、その脳活動の時空間分布を明らかにしたことは、マルチタスクに関わる脳内処理機構を解明するうえで貴重な成果と言える。また MEG の信号をデコーディングして、アンドロイドの両手を BMI 制御できたことは、マルチタスク BMI を段階的に構築するうえで革新的成果と言える。さらに両手運動に加えて追加肢を制御する際の脳活動を MEG で計測、デコーディングすることは、マルチタスクに関わる脳内処理機構を解明し、さらにマルチタスク能力を向上させる研究を進めるうえで、重要な研究と言える。

動物における侵襲的 BMI 手法（皮質脳波 BMI）による追加肢（機器）制御は、実験系の構築の可能性も含めて未知であったが、サル及びラットにおいて可能であることを実証した。多数の神経の同期活動として表れる皮質脳波がこうした系で適応的に変化することは、マルチタスク能力の向上だけでなく、脳損傷患者への BMI の適用やニューロリハビリテーションなど多くの応用につながる基盤的知見になるものである。また、マルチタスク遂行に関わるとされる前頭連合野の役割や機能分化のヒトとサルにおける違いを明らかにしたことは、マルチタスク能力の脳科学的基盤の解明につながる画期的な成果と考えられる。

<獲得成果の独創性>

近年、ロボット追加肢を用いて人の能力を高めようとする研究が世界的に始まっているが、既存研究では単一作業を追加肢が補助する仕組みの検討にとどまっていた。本研究での、既存肢と追加肢とを複数の意図のもとに、すなわちマルチタスク状態で制御する、脳活動によりこの制御を行う、という取り組みは、これまで検討すらされることがない独創的な取り組みである。

MEG で計測した脳信号をデコーディングして制御する対象をアンドロイドに設定した点は独創的と言える。また、脳磁図は筋電ノイズが混入しやすいため、両手運動を指運動という筋電ノイズが混入しにくい手法を導入した点は独創的であると言える。

動物における侵襲的 BMI 手法（皮質脳波 BMI）による追加肢（機器）制御は、そもそも実

験系の提案自体が従来にない独創的なものであり、前述のように多くの応用につながる可能性が期待される。

(3) 脳ビッグデータプロジェクト（「脳サーチエンジン」）

① プロジェクトの計画

1) 画像コンテンツ評価技術の開発

ステージ1～2において、脳計測データおよび人工脳モデルの出力からコンテンツ評価を行う解析技術および、解析結果を可視化する web インターフェイス構築を行った。ステージ2～3において、この技術のさらなる応用を目指し、個々人について大量の脳画像を収集した大規模個人脳ビッグデータの構築を進めた。ステージ3では、複数の被験者について、物体、風景、質感、情動など、高次の認知情報処理に関連する豊富な画像や音声など合計1万種類ほどの感覚刺激（コンテンツ）と関連づいた個人脳活動データベース構築を行った。各感覚刺激に対する豊富なメタ情報（言語記述&印象評価ラベル）も組み合わせることで、多様な感覚刺激情報の脳情報表現を探るとともに、個人の脳情報を反映したアプリケーションの実現を目指す。

2) コンテンツ生成技術の開発

知覚・想起内容それぞれに対して、テキストとしての出力と画像としての出力をマイルストーンとして研究開発を進めた。テキスト出力に関しては、知覚・想起内容に関する単語レベルでのテキスト出力からスタートし（ステージ1）、最終的には文章レベルでのテキスト出力の達成を目指した（ステージ2～3）。画像出力に関しては、多様な自然画像に対する知覚内容の画像再構成・生成を達成することを第一の目標とし、知覚内容解読の開発技術を想起内容に援用する形で、想起内容の画像再構成・生成を目指した（ステージ3）。応用として、文章生成にもとづくデザイン評価や生成文章・生成画像による情報通信・アート作品の生成といったものを目指した。

② プロジェクトの体制

京都大学の神谷之康教授を統括技術責任者及びグループリーダーとした体制で進めた。

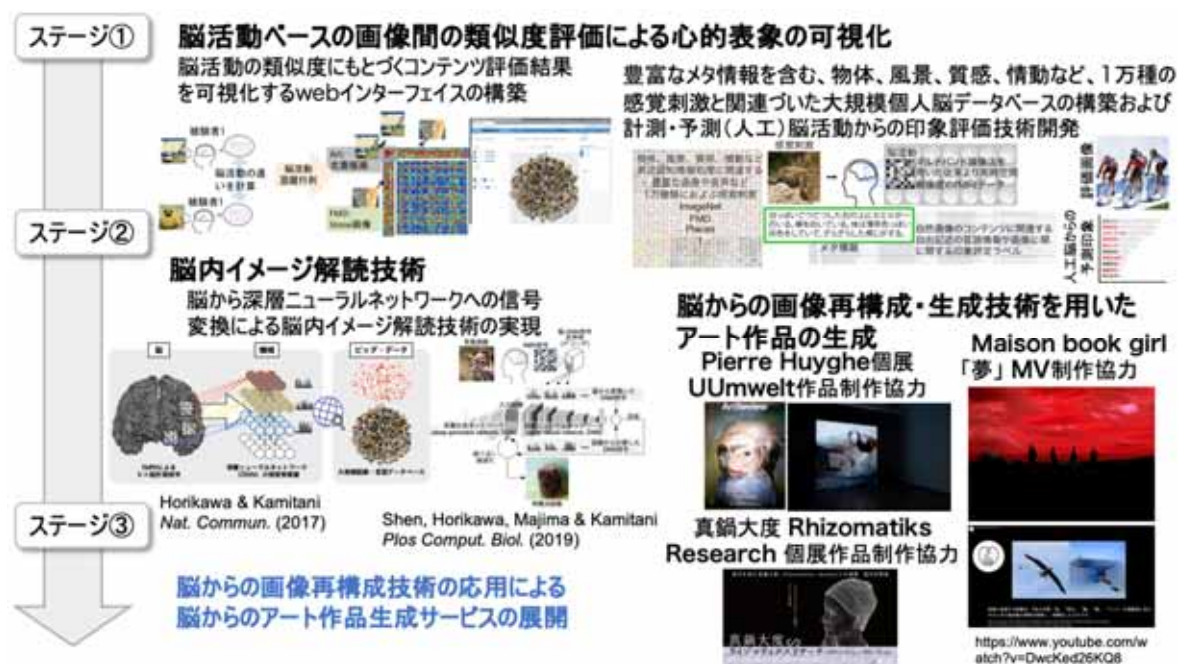
③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

<研究開発の進展状況>

コンテンツ評価に関しては、ステージ2までに完成させた、計測・予測（人工）脳活動に基づくコンテンツ評価技術・システムの有用性を高めるため、1万種類超の感覚刺激セット（物体、風景、質感、情動に関わる画像/動画/音楽）に関連づいた大規模個人脳データベースの構築を進めた。このデータベースは、画像~7,000枚、情動的動画~2,200 clips（~8時間）、2時間映画2本、音声刺激~2,000種類などの感覚刺激に対する脳活動を機能的磁気共鳴画像法（functional magnetic resonance imaging, fMRI）を用いて5人の被験者について計測したものである。また、感覚刺激にはメタ情報として、画像の物

体・風景などのカテゴリ情報や情動的印象評価ラベル（11~48種の情動ラベル）、画像・動画内容に関する言語記述（画像・動画の合計およそ10,000シーン×5記述）などがタグづけられており、脳活動に基づくコンテンツ評価においてより多面的な感性評価を可能にした。

コンテンツ生成技術に関しては、脳からの画像再構成技術を用いて、知覚画像や想像画像を脳活動から生成可能であることが確認できたため、この技術に基づく脳からのアート作品生成に取り組んだ。現在までに、3件のアート作品制作に対する技術提供・制作協力を行っており、1）フランス人アーティスト Pierre Huyghe 氏の個展 UUmwelt への映像作品制作協力、2）Rhizomatiks Research の真鍋大度氏の個展への映像作品制作協力、3）アイドルグループ Maison book girl の楽曲「夢」のMV制作協力、を行っており、プロジェクトの目標であった、技術応用としてのアート作品制作の実現を達成できた。脳からの文章生成に関しては、われわれが構築した大規模個人脳データベースのデータをもとに、自然画像観察中の脳活動から画像内容を記述する文章を生成可能であることを確認済みであり、さらなる精度向上と、具体的な応用先を模索している段階にある。



多様なコンテンツを含む感覚刺激セットと関連づいた大規模個人脳データベースを基盤とする、脳活動ベースの「コンテンツ評価技術」と「コンテンツ生成技術」の開発を行い、脳活動から心的イメージや感性を解釈し、解釈情報を応用利用するための基盤技術を確立

大規模個人脳データベース

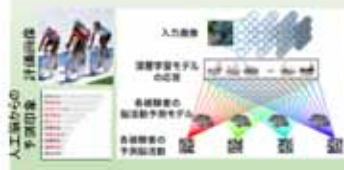
物体、風景、質感、情動など、1万種類超の感覚刺激と関連づいた大規模個人脳データベース(1万コンテンツx5被験者)

感覚刺激のコンテンツに関する言語記述や印象評定スコアなど豊富なメタ情報を付与



計測脳活動および人工脳モデルによるコンテンツ評価

脳活動の類似度にもとづくコンテンツ評価結果を可視化するwebインターフェイス構築



個々人の脳活動を予測する人工脳モデルを構築し、計測・予測脳活動からのコンテンツ評価を実現

脳活動ベースのコンテンツ類似度評価による心的表象の可視化

脳イメージ解釈技術によるコンテンツ生成



脳から深層ニューラルネットワークへの信号変換による脳内イメージ解釈技術の実現
Horikawa & Kamitani, Nat. Commun. (2017)
Shen, Horikawa, Majima & Kamitani
Plos Comput. Biol. (2019)

画像再構成・生成技術を用いたアート作品制作への応用



画像再構成技術の応用によるアート作品生成サービスの展開へ

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
3 (技術的な概念モデルが定量的に検討されている。)	8 (実際のフライトモデルが製作され、試験が終了している。)

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

< 獲得成果の革新性 >

脳からのコンテンツ評価において、脳波等を用いたニューロマーケティングサービスが存在するが、好き嫌いなど一面的な評価しかできない。本課題の開発技術では、fMRIによって計測された超多次元の脳活動パターンから得られる多面的評価が可能である。

われわれが構築した大規模個人脳データベースは、世界でも他に例を見ない規模であり、2018年にCarnegie Mellon大のグループが公開した個人脳データベースBOLD5000 (<https://bold5000.github.io>, ~5000種の物体・風景画像に対するfMRIデータ)と比べても、2倍以上のコンテンツ数と豊富なメタ情報(言語記述等)を有している。構築したデータベースの一部は、すでにウェブ上での公開を開始しており

(<https://openneuro.org/datasets/ds001506/versions/1.2.0>)、残りのデータの整備および公開を順次行っていくことが今後の課題となる。

脳からのコンテンツ評価に関する他の競合として、NTTによる動画広告への脳からの感性評価が行われているが、画像・音声・動画に対する脳データを含むわれわれの大規模個人脳データベースを利用することで、より多様な視聴覚コンテンツに対して、コン

テンツへの感情や印象などより多面的な評価をより高い精度で実現することが可能である。

＜獲得成果の独創性＞

脳からのコンテンツ生成において、脳の視覚野の階層的情報表現を利用した脳からの画像再構成技術は他に例がなく独創的である。脳活動パターンを深層ニューラルネットワークの信号パターンへ変換して、画像や文章を生成するデコーディング技術は、脳情報デコーディング技術開発における新たな分野の開拓に貢献している。さらに、脳活動からの画像再構成技術を用いて、脳を介したアート作品制作への応用を実現しており、デコーディング技術の新たな応用的価値を実証している点で、産業的貢献と意義は大きい。

（４）汎用型脳計測プロジェクト

「ニューロテイラーメイド」

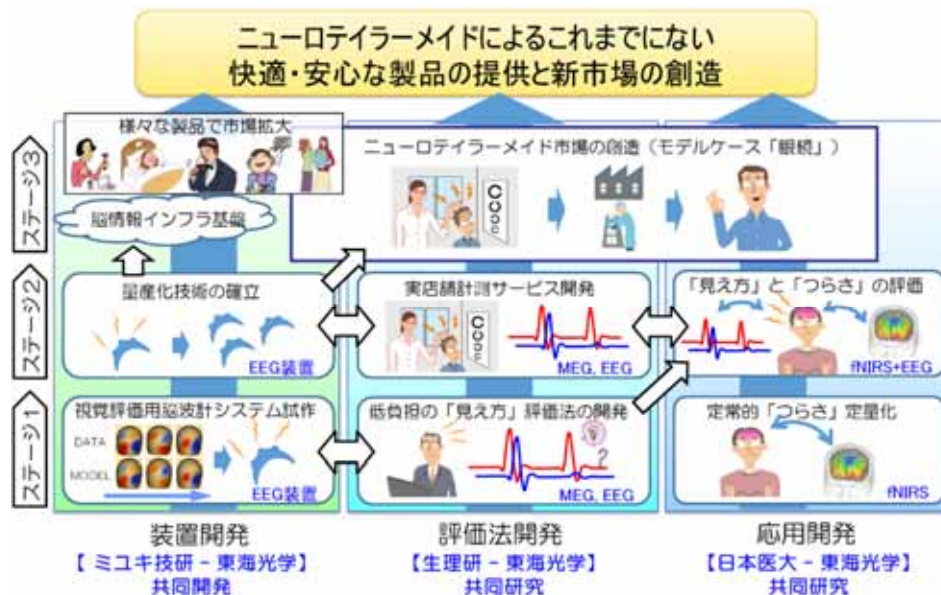
① プロジェクトの計画

一般社会にて活用するための効率的な誘発脳波の計測法確立、および、誰でも使いやすい脳波計システム設計と量産化を進めた。眼鏡をモデルケースとして、実店舗において視覚に関する感覚特性を取得し、その結果を基に製品をカスタマイズして提供するというニューロテイラーメイドの実現を目指した。眼鏡以外の分野での応用として、変化関連脳活動に着目した手法を開発した。また、脳波と fNIRS の同時計測についても進めることで、「つらさ」等との関係性を検討し、産業的な応用性を模索した。

② プロジェクトの体制

PM 直轄のプロジェクトとして、生理学研究所の乾幸二准教授をグループリーダーとした体制で進めた。成果の社会実装に向けて、企業としては、東海光学株式会社が主体となって参加。

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度



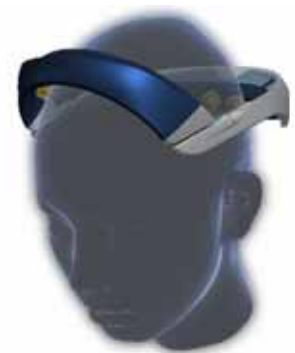
・評価法開発、装置開発、応用開発それぞれにおいて、計画をやや前倒して研究開発が進んだ。

・評価法では、モデルケース「眼鏡」を対象とし、屈折度数、まぶしさの感受性（個人特性）の評価方法確立した。また、眼鏡以外の応用を目的として、「抑制性回路の機能」を脳波により客観的に計測する方法を開発した（日本を含む8ヶ国に特許出願し、2ヶ国で権利化済み）。

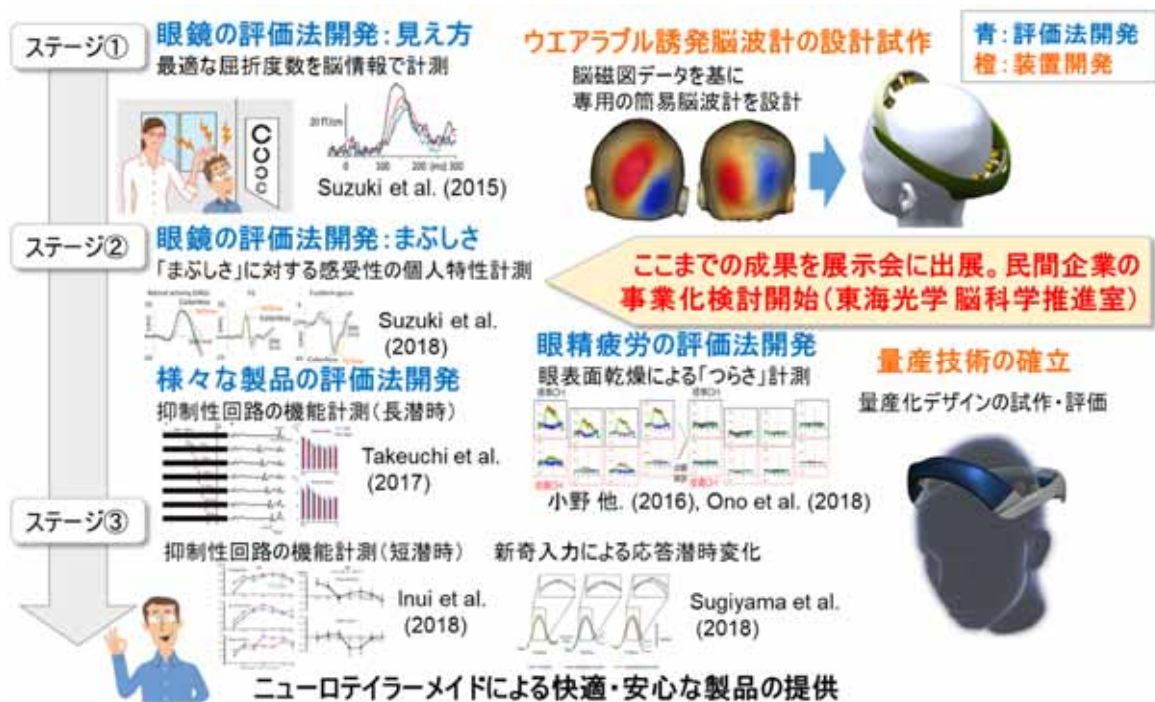
・装置開発では、アンプ一体型のヘッドセット型誘発脳波計を開発し、量産化モデルの試作機について既存の研究用脳波計と遜色ない品質で感覚特性の脳波が取得できることを確認した。この脳波計は専門の技術者でなくても極めて短時間で取り付けが可能であり、頭部形状や脳溝（特に鳥距溝）の個人差に配慮したデータを正しく取得できるものである。現在、社会実装に向け脳波室以外での実環境における計測テストを繰り返している。

・応用開発では眼精疲労をターゲットにし、輻輳負荷や眼表面乾燥による「つらさ」の前頭葉賦活による計測可能性を見出した。また、開発した脳波計試作機と前頭fNIRSとの同時計測により感覚野と前頭葉の情報を複合的に利用可能であることを確認した。

・誘発脳活動の利用は研究室や医療機関等に限られていたが、今回開発した計測法と装置により、その産業界での利用の垣根が下がることが期待できる。今後は、モデルケースの実現を目指して、店頭サービスにおけるアプリ化を進める。



開発した脳波計量産化モデル



<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
2 (技術的な概念モデルが提案されている。)	7 (システムとして実証モデルが、実際の使用環境に近い条件のもとで試験されている。)

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

<獲得成果の革新性>

- ・今回開発した計測法は、群間比較ではなく、個人ベースで特性を計測できるものである。特に、国際特許出願した抑制性回路の機能評価は、ヒトの計測において従来の手法ではなかなか達成できていなかった課題であり、個人ベースでその人の抑制性回路の機能を計測できる意義は大きい。今後、健常人の感覚特性に合わせた製品の提供だけでなく、創薬、精神疾患等の診断補助システムなど、応用範囲が広い。
- ・開発した記録装置（脳波計）については、既存の研究用脳波計、海外製の簡易脳波計が競合に成り得る。既存の脳波計に対してはコスト面と取り扱い面で圧倒的に有利であり、海外製の簡易脳波計については、脳波品質で有利である。特に、海外製の簡易脳波計では、感覚のような潜時の速い成分の記録は困難であるが、本脳波計では感覚特性の記録が可能である。また、完全にウェアラブル型でありながら誘発脳波が記録できるという

特徴を持つ。このような装置は今のところベンチマーク製品にはない。また、本研究開発の脳波計は、現時点で量産検討前の最終試作を行っており、量産を前提とした機構設計・コスト対策を行っているところが通常の研究開発アプローチとは異なる。

＜獲得成果の独創性＞

・抑制性回路の機能評価は、ヒトの計測において従来の手法ではなかなか達成できていなかった課題であるが、変化関連脳活動にプレパルス抑制を組み合わせるという独創的なアイデアにより計測可能になった。現時点で日本を含む2ヶ国で特許権利化に成功しており、今後、抑制性回路の機能評価の基本特許に成り得る。

・記録装置（脳波計）は、完全なウェアラブルでありながら、極めて高精度の誘発脳波が計測できる技術特徴を有している。高度な誘発脳波の計測のためには、刺激に対する同期信号をミリ秒のずれもなく取得する必要があるが、従来装置では、同期信号を得るために特殊な実験環境を整える必要があった。今回の装置は、誘発脳波を計測するシステムとして一体的に提供するため、誘発脳波に対する社会的なハードルを下げることに寄与すると考える。

「脳波めがね」

① プロジェクトの計画

超小型で安価な携帯型 EEG 計測装置「脳波めがね」を開発するために、独自の最先端 3 次元マイクロナノマシン技術を用い、高性能かつ低価格な乾式電極と人間工学的な頭部装着装置の開発を進めた。

1. 集中力レベルをリアルタイムに測定する簡便・高品位なウェアラブル脳波計を実現するため、従来の取り扱いと使用感が悪い導電性ゼリー付きの湿式電極に代わり、着脱自在の乾式電極および低コスト製造プロセスを開発する。
2. 最終製品としてメガネ型、カチューシャ型、ヘッドホン型、帽子型など様々な形状に対応できるように、独自のマイクロ・ナノテクノロジーを用いて、電極の極小化、表面形状の最適化を行う。
3. 長時間装着時での不快感を低減するヘッドギアのデザインと試作および、頭皮の炎症を防ぐ電極素材も開発する。
4. 本課題解決には、生田研究室が世界に先駆けて開発したマイクロ、ナノスケールの 3D プリント技術を駆使する。さらにポリマー素材に関しても多くの知見を持つため、実用化まで多種多様な新電極の試作と実験サイクルを実施できるメリットがある。

② プロジェクトの体制

東京大学の生田研究室が母体となった研究チームで開発を進めた。

生田幸士（教授）：概念考案、研究立案、指導

池内真志（講師）：生体実験評価

井上佳則（助教）：乾式電極試作と生体実験

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

1. 新型乾式電極の開発（ステージ1）（図1）

毛髪貫通能力と頭皮ダメージを最小化する最適形状を持つジュラルミン製の電極を開発。従来の乾式電極に比べ高性能かつ安価である。

2. 長期安定性の実証（ステージ2）（図2、3）

表面に Ag/AgCl 膜塗布し、表面分極を押さえ、1万回の長期の繰り返し使用にも耐えることを実験的に実証。コスト面でも安価である。

3. 脳波めがねに安定実装するため最適な圧力を維持するベース機構の開発（ステージ

3）

一般に乾式電極は頭皮の真皮を深く超えては安全上の問題がある。逆に浅すぎると信号が不安定となる。最適な圧力で頭皮に押し付けることが重要となる。

4. 汎用脳波計での使用可能な乾式電極の開発（ステージ3）

プロジェクトの主目的の脳波めがねだけでなく、従来の脳波計の湿式電極を本電極に置き換えて使用できる簡便な接続システムを開発した。今後、商品化により普及が期待される。

5. 電極間クロストーク無しの埋め込み型脳波電極の開発（ステージ3）（図4）

派生研究とし、理研入来チーム、NCL と共同しマーモセットなど動物実験で高精度に脳波測定可能な複数電極から成る埋め込み型電極を開発した。本電極は生田研の3次元マイクロ技術を用いて、各電極間の漏電を皆無にし、電極間のクロストークを皆無とした世界初のデバイスである。安価で設置も簡単であるため、商品化を進める。

評価実験用電極クラスター（7電極）（ステージ1）

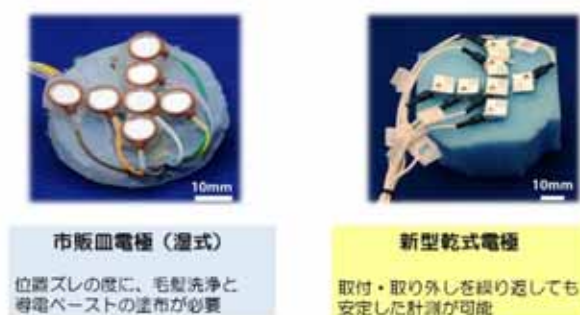


図1 新型乾式電極

Ag/AgCl塗布による電極特性改善の実証

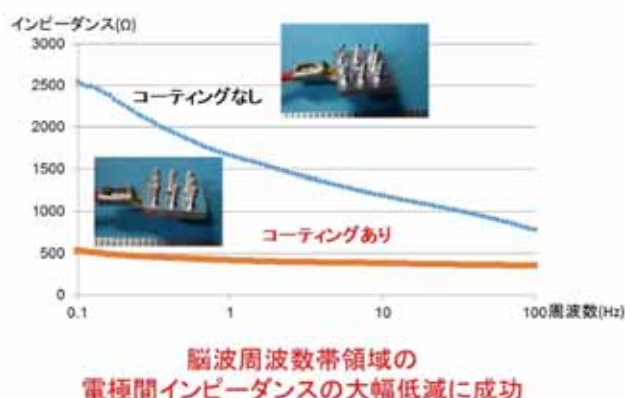


図2 インピーダンス特性の最適化

インピーダンス低減と耐久性の実証

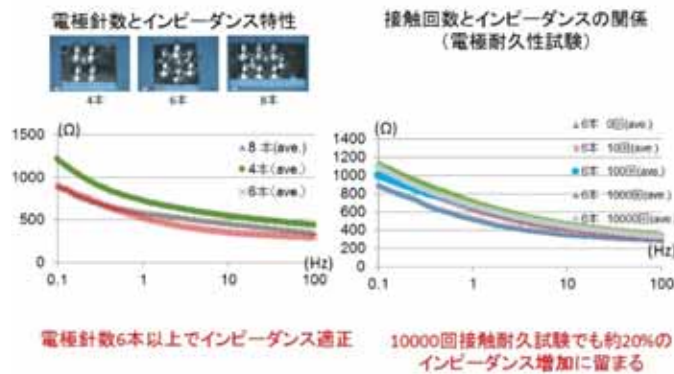


図3 長期安定性の実証

新開発埋め込み電極による安定記録確立

マーマセットへの絶縁用治具付リベット型ネジ電極装着手術法、記録法 (理研 入来チーム)

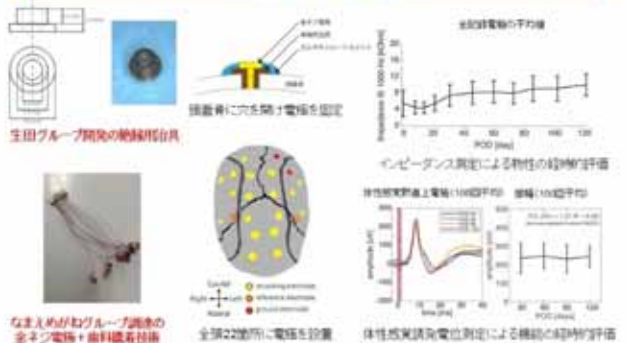
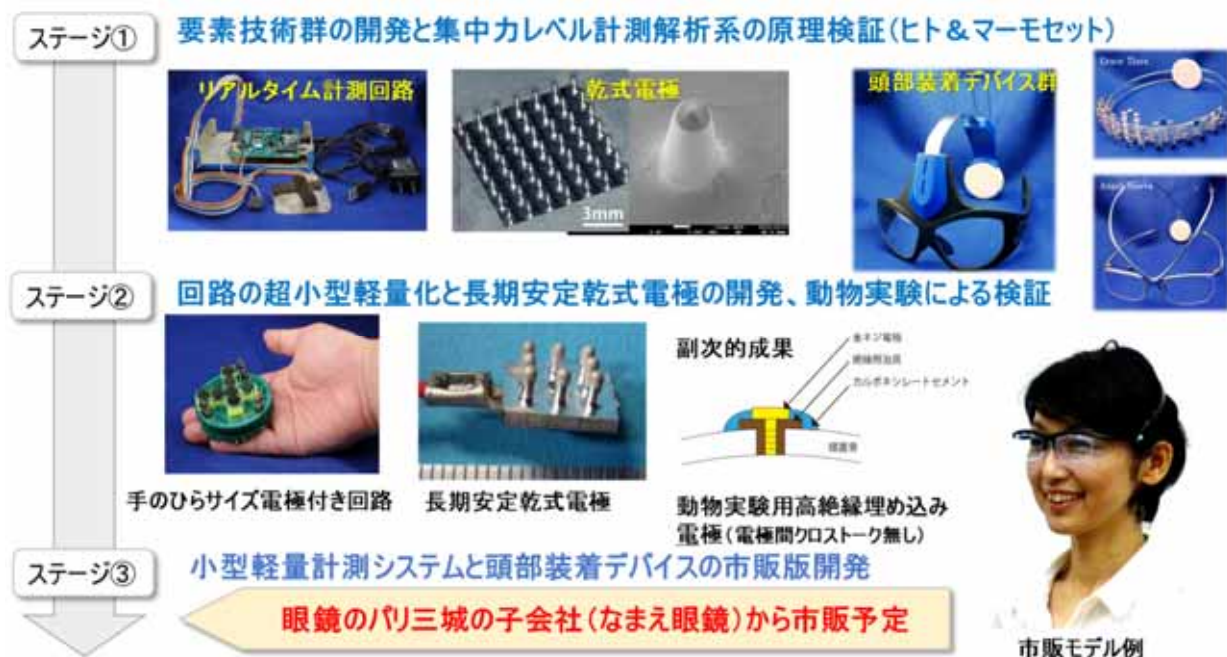


図4 クロストーク無埋め込み電極

<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
1 (原理的な可能性が示されている。)	8 (実際のフライトモデルが製作され、試験が終了している。)



脳波めがね（東京大学生田グループ最終成果）

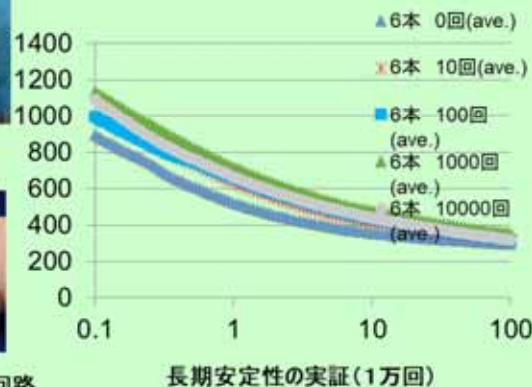
1. 髪の毛越しで無痛かつ長期安定計測可能な乾式電極の開発
2. 長期安定性の実証
3. 乾式電極アレイと装着デバイスの開発
4. クロストーク無し埋め込み電極の開発
5. 市販用めがねデザインとモデル製作



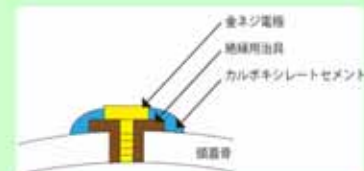
長期安定乾式電極



手のひらサイズ電極付き回路



市販モデル例



動物実験用高絶縁埋め込み電極(電極間クロストーク無し)

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

<獲得成果の革新性>

従来の湿式電極で不可欠な導電性ゼリーを不要とし、長期安定、かつ安価な乾式電極が完成した。さらに脳波めがねだけでなく、一般脳波計にも使用可能であることもメリットである。今後、湿式電極を置き換える可能性を秘める。

<獲得成果の独創性>

本研究で開発された「新型乾式電極」は、類似の研究段階のデバイスと比べ、使用安定性、繰り返し安定性、低コスト、従来脳波計への汎用性など優位性を持つことが実証された。

派生技術である「電極間クロストーク無しの埋め込み型脳波電極」は動物実験で高精度で安定した継続的な脳波計測が可能で、かつ低コストであり、類似のデバイスは存在しない。

(5) 脳情報インフラプロジェクト

① プロジェクトの計画

「脳情報クラウド」の研究課題は、大量の高解像度脳情報とその関連情報の蓄積と解析を実現するインフラ基盤の開発とその標準化をメインテーマとした。具体的には、3000人以上の脳情報データベース構築と脳情報の取得と蓄積の標準化を進めるMRI撮像拠点、脳情報の簡便な取り扱いを可能とする解析方法の開発拠点、これらの国際標準化を担う拠点、開発したものを実地で検証する拠点、社会との接点を検証する拠点、等といった役割分担で進めた。

「脳ドッククラウド」の研究課題は1万人以上の検診脳情報を蓄積するクラウドの構築をメインテーマとした。具体的には、脳ドック学会との連携を進め、脳ドックを実施している多様な条件の検診拠点からの1万人規模の脳情報（検診脳情報）の取得及び蓄積を可能とする拡張的な脳情報の蓄積基盤の構築を行う他、得られた脳情報の解析基盤の構築を進めることで、検診領域における大規模脳情報の蓄積・活用を支えるインフラの実現を目指した。

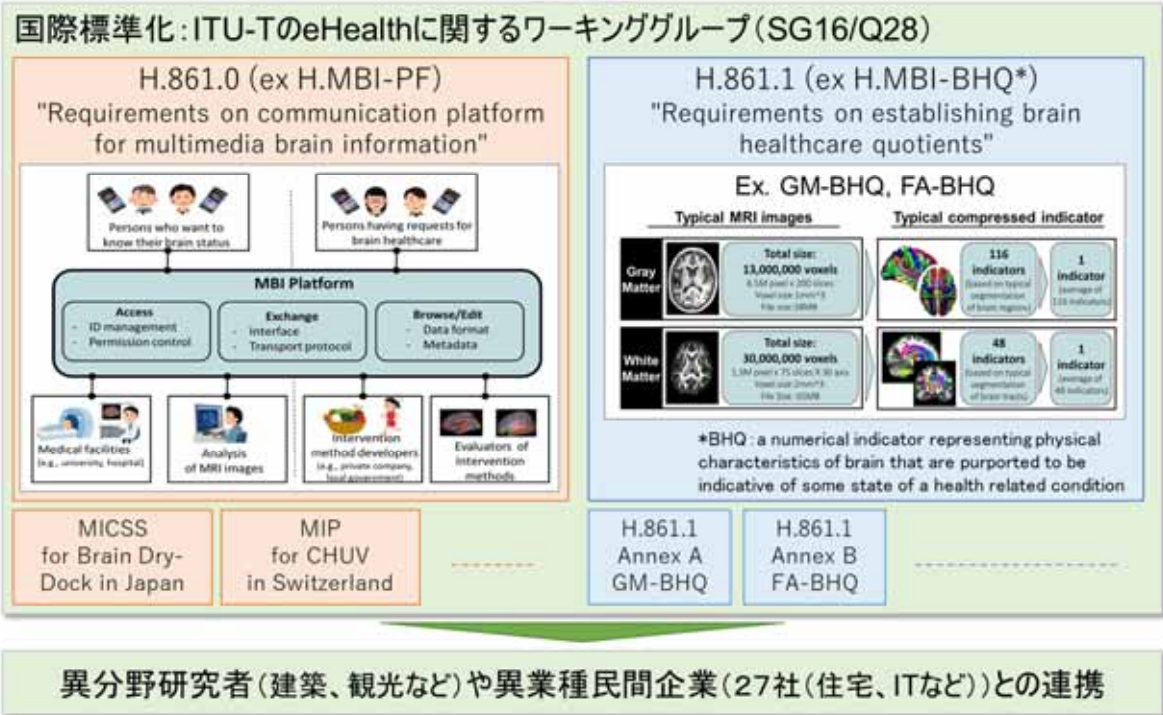
② プロジェクトの体制

PM直轄のプロジェクトとして、脳情報クラウドは理化学研究所の渡辺恭良センター長を、脳ドッククラウドは島根大学の小林祥泰特任教授前学長をグループリーダーとした体制で進めた。これに加え、脳情報クラウドにおいては民間企業が、脳ドッククラウドにおいては脳ドック拠点が複数参加した。

③ プロジェクトの進捗状況、目標達成の見通し及び今後の課題

「脳情報クラウド」においては、理化学研究所を中心に京都大学、東京大学、東京工業大学などの拠点を連携させ、誰もが利用できるように共通の撮像プロトコル、倫理ガイドラインに従った脳情報の取得を可能にし、のべ3000人のデータ蓄積を実現した。脳情報の取得の際には、多様な利用を想定して、標準的な高解像度撮像に加えて、各種生理データ取得や心理アンケート等を同時に実施することで、データベースの充実を図った。そのようにして進めた脳情報の蓄積ノウハウを活かし、脳情報の取り扱いについて、国際標準化活動を進め、ITU-TがWHOと連携して進めるeHealthのWGでの合意をへて、システムアーキテクチャーに関してITU-T勧告草案H.861.0 (H.MBI-PF “Requirements on communication platform for multimedia brain information”）、脳の健康管理指標の作成に関してH.861.1 (H.MBI-BHQ “Requirements on establishing brain healthcare quotients”）という形で承認されるに至った。後者の脳の健康管理指標については、当初は想定していなかったものであるが、非専門家が利用するにあたって、わかり易い指標が必要とのニーズから本プログラムで考案したものである。結果として、異分野の研究者としては、建築分野や経営分野、観光分野との連携に繋がり、また異業種の民間企業としては、住宅やIT、自動車、食品など多様な企業との対話の場の形成にもつながりつつある。

標準的な高度撮像ができるMRIの提供(のべ3000人@理研、京大、東大、東工大)



異分野研究者(建築、観光など)や異業種民間企業(27社(住宅、ITなど))との連携

図 脳情報クラウドの取り組み

「脳ドッククラウド」においては、大規模脳情報の蓄積に関し、多施設での同時利用と1万人の脳情報の蓄積を可能とするセキュアで平易なクラウド基盤を構築するとともに、数十の脳ドック拠点とのデータ蓄積に向けた連携の取り組みを進めた。また、さらなる脳情報取得の仕組み作りに向けて、低磁場MRIの構造画像の撮像法・解析法の最適化と改良による低コスト脳画像蓄積・解析体制の構築を進めた。これらを組み合わせて、脳ドック向けの脳画像診断および脳の健康維持・増進をサポートするクラウドサービスを開発し、脳ドック学会と連携し脳ドック施設へのトライアルサービスを進めつつある。

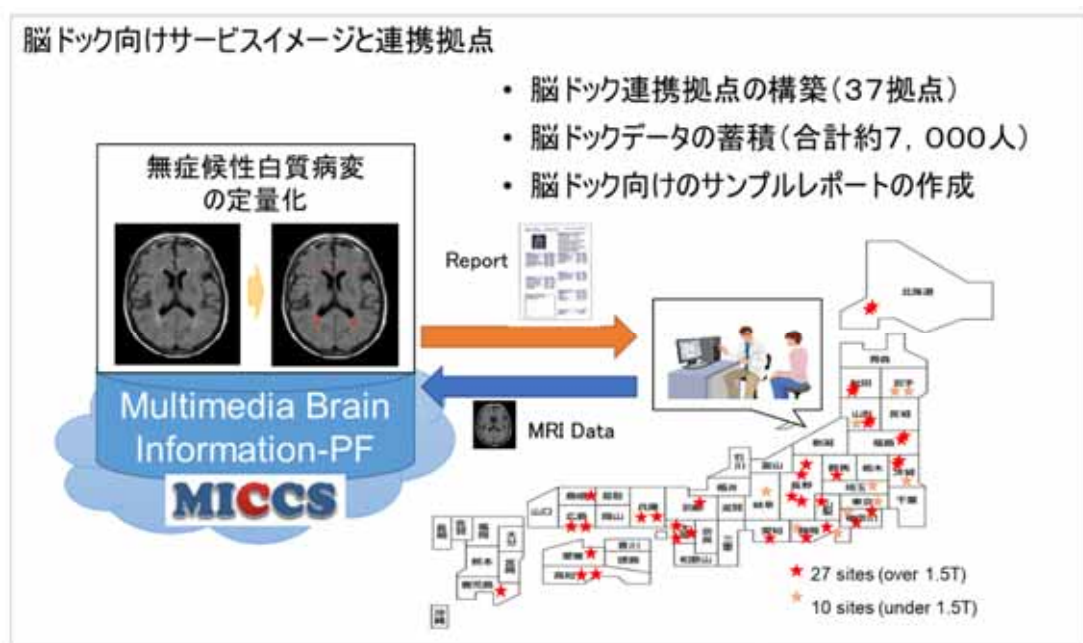


図 脳ドッククラウドの取り組み

<研究開発の進展状況>

プロジェクト開始時のTRL	プロジェクト終了時のTRL
3 (技術的な概念モデルが定量的に検討されている。)	7 (システムとして実証モデルが、実際の使用環境に近い条件のもとで試験されている。)

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

<獲得成果の革新性>

脳情報が適切に活用された製品・サービスがいまだ一般社会に普及していないのは、脳科学自体の専門性が非常に高く、一般企業等が扱うための障壁が高すぎるということがボトルネックとなっている。脳情報インフラにおいて、産業や社会のあり方に大きな変革をもたらすという観点で目指したのは、この障壁をできるだけ低くし、脳情報を活用した製品・サービスの開発を進めたいと希望する一般企業にも広く門戸を開くということである。脳情報インフラにおいて主に扱っている技術は、その要素1つ1つは、研究開発の世界においても比較的検証の進んでいるものである。しかしながら、それらを組み合わせ、一般社会における社会実装を進めたところにアプローチとしての革新性があるといえる。取組みの中では、プロジェクト内外の研究者や一般企業から活用が可能な、大規模なデータベースや、関連する同意書や契約書等を含むその活用の仕組みの整備を整えた。これらの仕組みについては、プロジェクト期間中に、実際に運用を試し、機能することを確認できている。なお、脳情報の取り扱い方や非専門家でも扱える脳の状態指標については、国際標準化活動を積極的に進めているのも特徴であり、開発を進めるサービスの国際競争力も十分なものとなりつつあるといえる。

<獲得成果の独創性>

健常者の脳情報（MRI 脳情報）について、これほどの蓄積を進めたプロジェクトは国内外にも無く、独創性がある。非専門家でも扱える脳の状態指標 BHQ については、そのコンセプトについては 2017 年に実施された専門家ヒアリングにおいても一定の評価を得、社会的な影響の大きさも鑑み、今後もしっかりとしたエビデンスの蓄積に務めるように後押しいただいているところ。

3. 研究開発プログラムの全体成果

（１）目標達成の状況（目標達成できた場合の要因分析、目標達成が困難となった場合の原因分析も記載）

当プログラムでは、ステージ１（技術的な基盤の開発）、ステージ２（技術的な基盤の実証とソリューションの提案）といったように、目標達成に向けてステージゲート等の段階を踏んで進めている。ステージ３（最終ステージ）の目標は、プログラムの最終目標でもある、「ソリューションの概念実証とビジネス化」である。大きく分けて５つの領域（(1)～(5)）において、４つの領域は TRL の値も 7 以上となっており、概念実証にとどまらず、より本質的な社会実装と言える具体的なビジネスの段階にまで進んでいるプロジェクトもある状況である。また、終了時の TRL が 4～5 の「脳ロボティクス」領域の取り組みについても、TRL が 1 の状態から始め、実験室レベルでは概念の実証に至っている。以上より、目標はおおむね達成されたと考えている。今後は、さらにビジネス化を進め、一般社会との対話の中で、より一層の社会実装の推進を図ることとなる。

（２）参考指標

① 民間企業等とのマッチング及び橋渡しの状況

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
企業の研究者数	130	48	102	101	112	(138)
協力企業数 ※	10	7	18	10	10	(10)

注：（ ）は見込み数

※ 研究開発に参画する企業だけでなく、研究成果の展開に意欲を示し、ImPACT で得た機密情報を開示する秘密保持契約等を具体的に結んだ企業の数

② 論文

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全 体 数	約 230 報	0	49	66	55	(60)
うち IP ファクター 10 以上	3 以上	0	0	3	2	(2)

注：（ ）は見込み数

③ 学会発表

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全 体 数	730	7	176	153	202	730
学会賞等の受賞数		0	5	9	5	(5)

注：（ ）は見込み数

④ 国際学会における招待講演

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全 体 数	75	2	16	6	26	(10)

注：（ ）は見込み数

⑤ 特許出願件数

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
国内	10	0	5	7	16	(4)
海外	10	0	1	3	12	(3)
合 計	20	0	6	10	28	(7)

注：（ ）は見込み数

⑥ 知財・標準化等の取組状況

知財については、基盤技術の開発から実証へと進められたステージ1～2（平成26年～28年）を経て、最終であるステージ3において、国内外共に各プロジェクトより特許出願が積極的になされ、ソリューションの概念実証とビジネス化に向けた取り組みが着実に進められた。

一方、国際標準化については、脳情報インフラプロジェクトにて、システムアーキテクチャーに関しては、ITU-T 勧告草案 H.861.0 (H.MBI-PF “Requirements on communication platform for multimedia brain information”)、脳の健康管理指標の作成に関しては、同 H.861.1 (H.MBI-BHQ “Requirements on establishing brain healthcare quotients”) という形で承認されるに至った。

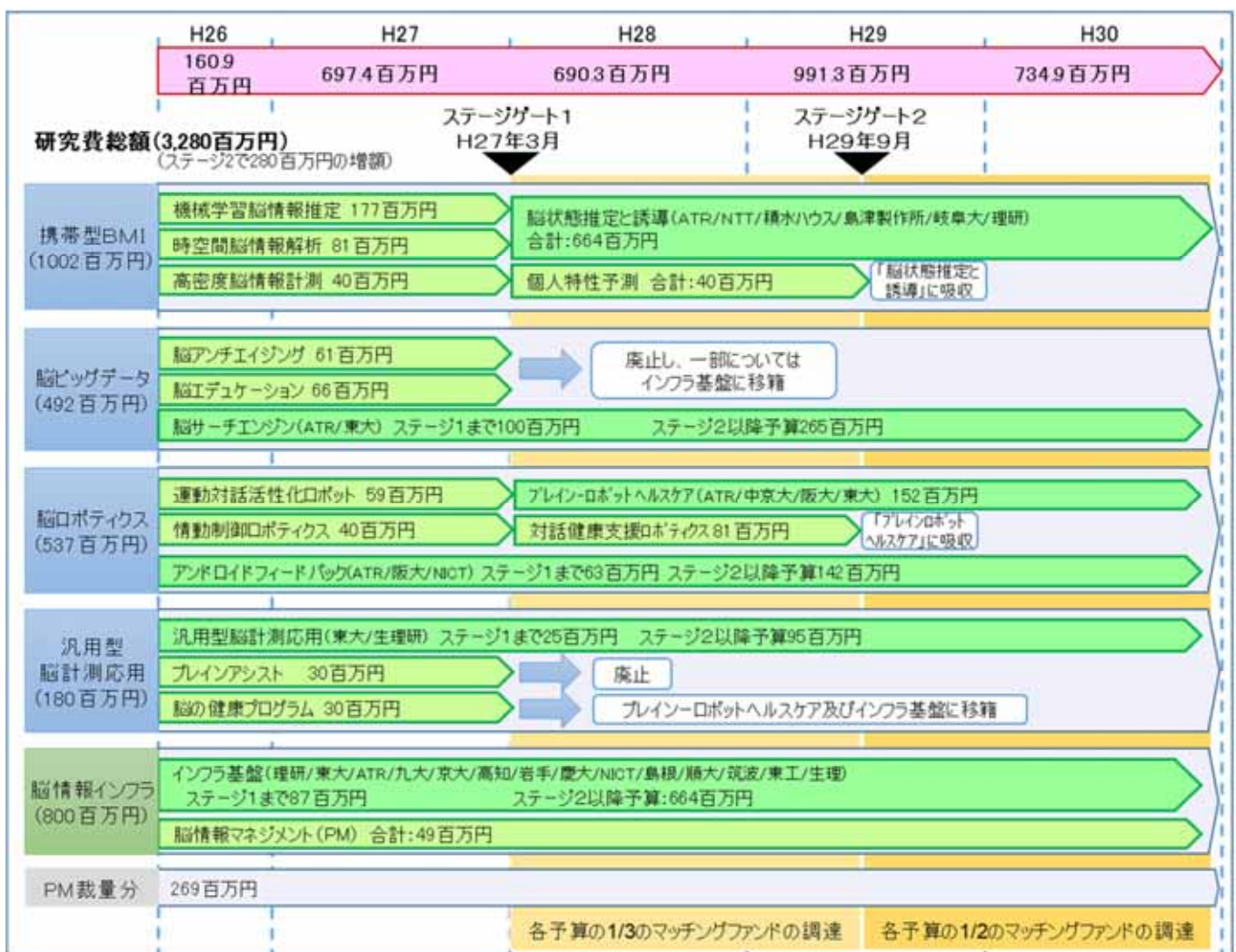
⑦ アウトリーチ等の状況

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
アウトリーチ回数	155	3	46	30	47	(40)
新聞、TV等の報道数		0	23	53	28	(30)

注：() は計画数

⑧ その他特筆すべき取り組み

4. 研究開発プログラム予算の推移



5. 研究開発プログラムの推進体制

3人の統括技術責任者を配置した3つの研究領域に対して、PM直轄の1つの研究領域およびインフラ領域を配置し、競争と協働を促進。

■ステージ1体制図（2014年10月～2016年3月）



ステージ1においては、PMの構想による非公募指名の研究者に加えて、1/3程度は公募採択による体制の強化を図った。

↓

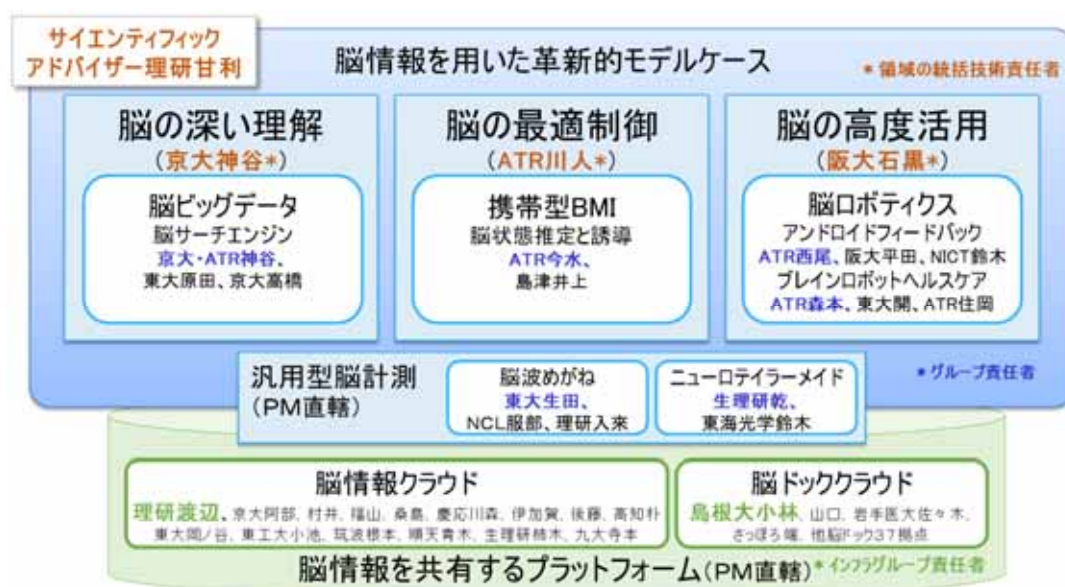
■ステージ2体制図（2016年4月～2017年9月）



ステージ1終了時のステージゲートでの評価に基づき、研究グループの廃止・統合を進めている。また、情報、教育、健康と3つに分けていた出口イメージも、健康への統合に向けて調整を進めた。

↓

■ステージ3体制図（2017年10月～2019年3月）



ステージ2終了時にもステージゲートを実施し、さらに研究グループの廃止・統合を進め、プログラムの最終ステージとして、出口に向けてリソースを集中する体制とした。

6. 研究開発プログラムの実施管理状況

(1) 研究開発プログラムのガバナンス

① 進捗状況の把握及び指導・管理状況

進捗状況については、日常的に PM が各拠点に足を運んで議論を行うことで把握をしてきた。加えて、各ステージ終了時のステージゲートにて、各プロジェクトの評価とそれに基づく指導やプロジェクトの廃止・改変を実施した。まとまった拠点の研究責任者が集まる、運営会議に当たる会議としては、ステージ開始時のキックオフ等で年度に2回実施した。

	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
運営会議等の開催数	2	2	2	2	2
研究開発機関等の訪問回数	100	100	100	(100)	(100)

② 新たな発想・アイデアの採用（若手・女性人材の育成を含む。）に関する取り組み

PM が日々各拠点に足を運んで議論する中で新たな発想・アイデアの採用を積極的に進めた。なお、プログラムでは、ステージ1の段階で、公募による研究開発機関の追加を行った。その他、30社程度の民間企業が参加する産学連携コンソーシアムを運営し、会員に対するアンケートや議論を通じて、社会実装に足るサービス開発に向けた情報収集を図った。

③ 研究開発機関等の評価及び追加変更の状況

	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
参画研究機関数	13	54	46	42	45
参画研究者数	74	300	267	273	327
うち中止（解任）	0	7	161	63	32
追加（新任）	0	233	128	69	86

④ 「選択と集中」に向けた取り組み

当プログラムにおいては、ステージ2のステージゲートでの選択と集中を経て、2017年10月から最終ステージであるステージ3を開始した。プログラム期間終了まで基本的にはこの体制で進むこととしたが、各取り組みにおける概念実証や社会実装の進捗とその必要性に応じて、逐次予算措置は実施してきた。

（2）研究成果の展開に向けた取り組み

① これまでの取り組み

当プログラムにおいては、研究成果の社会実装に特に力を入れており、各プロジェクトにはビジネス化を明確に意識したアプローチを積極的に働きかけてきた。その結果、多くのプロジェクトの終了時TRLが7以上となり、ベンチャー企業化の具体例も出てきた。当プロジェクトの主要な成果の一つであるデータベースの活用については、まずは研究者のレベルでの取組みを進め、プログラム内にとどまらず、プログラム外の研究者に対しても、データの有効利用（2次利用）の仕組みを使った共同研究の実績も作ってきた。

② 今後の方針と具体的な取り組み計画

プログラム終了後についても、各研究拠点とのネットワークを維持しながら、成果の社会実装活動を積極的に進める予定である。

7. PMの自己評価

(1) PMが実施管理を行った研究開発プログラム（研究成果）に関する評価

- ① 産業や社会のあり方の変革（漸進的でなく、非連続的なイノベーション）をもたらす見通しは得られたか。以下の視点を踏まえて記載すること。

本プログラムでは、人生 100 年時代における高齢化に伴う認知機能の低下や、AI や IoT による情報化の進展に伴うストレスの増加といった、医療の範疇を超えた脳や心に関する世界的な課題の解決を目指した。これにより多くの先進国やグローバル企業がフォーカスしている医療とは異なる、ゲームチェンジを実現できると考えている。

この解決に向け、脳情報の可視化と制御技術の研究開発を進め、結果として、脳の状態が見える化し、より良い状態に変えるための携帯型ブレインマシンインターフェース (BMI) の実装を中心に、高度な可視化技術であるブレインロイドや高度な制御技術であるアンドロイドニューロフィードバックのプロトタイプ作成にも成功した。加えて、脳情報の国際的な流通を可能にする国際標準化についても日本が主導となって実現することができた。

これらのことは、世界中の人々が望むいつまでも健康で若々しい脳を実現する最初の大きな一歩となったと考えている。加えて、知財戦略を通じたクローズドなコア技術の獲得や標準化戦略を通じたオープンな国際協調についても一定の成果がえられ、日本が世界に新しい価値を発信していく橋頭堡を作ることができたと考えている。

・将来の産業や社会のあり方の変革をもたらすような革新性を有する研究成果が獲得されたか。

BMI 領域については、大型計測装置を用いて認知機能を規定する脳内ネットワークの操作や恐怖反応の低減のニューロフィードバック技術を成功させるとともに、fMRI 活動を推定する機械学習技術を開発し、携帯型 BMI ニューロフィードバックを実装するに至った。これにより、家に居ながらにして認知機能を高めることやストレスを解消できるような全く新しい製品を提供することが可能となる道筋が得られた。

一方、脳ビッグデータ領域では、脳情報と画像情報、テキスト情報を蓄積し、AI 技術を組み合わせることで、脳活動を予測する技術開発及び脳活動から新しいコンテンツを生成する技術開発に成功した。これらを発展させることで、脳の状態推定を踏まえたストレスを癒すコンテンツの生成や認知的負荷の少ない空間デザインの設計などに繋がると考えている。

また、脳ロボティクス領域では、人が両腕を使いつつ、BMI でロボットアームを操作する実験を行い、高い成功率で操作できることを示した。これは、マルチタスク能力など、

人の認知能力の向上に役立つと考えている。合わせて、装着型ロボットの動作教示による脳の体性感覚認知能力の改善やロボットとの対話による脳の活性化なども実装した。これらは健全な心身を維持するための脳ロボティクス技術の基盤になっていくと考えている。

このように、誰もが認知機能の維持とストレスの解消が可能になる将来の社会のあり方を見据えつつ、これまで不可能と思われていた脳情報の可視化と制御に関する革新的かつ基盤的な技術を生み出すことができた。

・産業や社会のあり方変革に向けた戦略が具体的かつ明確となったか。

ゲームチェンジに向けた戦略として、前述のようなコア技術の開発を通じたクローズド戦略を中心に据えることで明確な道筋と成果をえることができた。これに加えて、様々なステークホルダーを巻き込んだオープン戦略も並行して推進してきた。

まず、日本にしか普及していない脳ドック拠点のネットワーク化及びグローバル展開を進めた。具体的には、脳ドックデータのシェアリングルールを策定し、初期の連携先として37の脳ドック拠点との合意に至り、併せて国際標準化のユースケースになった。但し、国内には600拠点以上が脳ドックを提供していることもあり、また日本以外にはスイス、イギリス、フィリピンなどまだ限られた国との連携しか議論出来ていないことからさらなる活動が必要と感じている。

また、民間企業の脳科学研究を支援するためのインフラとしてMRI研究拠点の組織化及び産学のエコシステム作りを進めた。理化学研究所を中心に東京工業大学、京都大学、東京大学などのMRI拠点での、撮像ルールの共通化や倫理ガイドラインの一本化により、これまで脳情報を扱ったことのなかった民間企業にも試行的な取り組みが可能となった。但し、まだ脳研究を本格化する民間企業を多く生み出すに至っていないことから道半ばである。

しかしながら、これらの取り組みを継続していくことによって、今回得られた革新的な研究開発成果が、脳ドックを通じて提供されたり、民間企業が自社の新しい製品やサービスの基盤として使うようになると考えている。

・戦略の実現に向けた課題が整理・明確化されたか。

携帯型BMI領域では、革新的な研究成果にとどまらずベンチャー企業の設立、さらにはVCや民間企業からの資金調達にも至り、脳情報技術の産業化への非常に有用なモデルケースとなった。今後、このモデルが将来開発される脳情報技術についても適用されることを期待している。加えて、脳ビッグデータや脳ロボティクスなどのコア技術の研究成果についても、民間企業の新規事業の要素技術とみなされていることから、有用な連携・橋渡しになったと考えている。

一方、国際標準を梃にして、グローバルなMRIベンダーとの連携やイスラエルやスイス、アメリカ、ドイツ、イギリスのMRI保有研究機関との連携も進みつつあることから、

道半ばとも言え、継続的な活動を進められればと考えている。加えて、異業種民間企業のオープンな連携母体として設立したコンソーシアムには27社が参加しているが、さらなる規模の拡大を進め、より多くの企業に対して脳情報の可能性を検証する場を提供し続けていきたい。

・技術的課題を克服するためのアイデア・着眼点の斬新さ、技術的なサプライズは存在したか。

携帯型BMI領域は、川人統括技術責任者に先導して頂き、安静時MRIでのスパースコーディングを用いたネットワーク分析によって認知機能を推定するネットワークの同定及びニューロフィードバックによる機能改善に成功した。さらに困難と思われた携帯化に道筋をつけた。

脳ビッグデータ領域は、神谷統括技術責任者に先導して頂き、古典的な脳情報解析ではなく、AI技術の活用及びWeb上のコンテンツを利用するという斬新な手法によって、脳活動の多次元評価に留まらずコンテンツ生成、さらには個人の脳のエミュレータであるブレインロイドの開発にまで至った。

脳ロボティクス領域は、石黒統括技術責任者に主導して頂き、運動支援ロボットや対話ロボットの実装によって脳への健康への貢献に道筋をつけるだけでなく、アンドロイドと脳計測を接続するという他に類を見ない融合によって追加肢の制御にまで到達した。

・戦略の実現に向けた道行き（ロードマップ）が適切に描けたか。

プログラムの目標は、クローズド戦略としてコア技術の開発である3つの領域において脳への健康に貢献するソリューションのモデルケースの提供を行うことと、オープン戦略として多様なステークホルダーとの連携によって脳情報のサービス化とビジネス化への道筋をつけることである。

前者については、3つのステージを設け、ステージ1ではより多くの取り組みをトライアルする意味も含め22の研究グループを実施したが、ステージゲートを通じて、ステージ2では8グループへ、さらにステージ3では6グループへと廃止・統合を行い、競争と協力の中でロードマップにそった強いコア技術の開発ができたと考えている。

一方、オープン戦略についても、脳ドック拠点のネットワーク化や国際標準化の承認に至るなど一定のロードマップを進めることができたが、既存企業との産学連携については、描いていたロードマップが必ずしも十分ではなく、企業との適切な役割分担を描くに至らなかった点があったと感じている。

・戦略の実現に向けた産業界との連携・橋渡し等が行われたか。

携帯型 BMI 領域では、革新的な研究成果にとどまらずベンチャー企業の設立、さらには VC や民間企業からの資金調達にも至り、脳情報技術の産業化への非常に有用なモデルケースとなった。今後、このモデルが将来開発される脳情報技術についても適用されることを期待している。加えて、脳ビックデータや脳ロボティクスなどのコア技術の研究成果についても、民間企業の新規事業の要素技術とみなされていることから、有用な連携・橋渡しになったと考えている。

一方、国際標準を梃にして、グローバルな MRI ベンダーとの連携やイスラエルやスイス、アメリカ、ドイツ、イギリスの MRI 保有研究機関との連携も進みつつあることから、道半ばとも言え、継続的な活動を進められればと考えている。加えて、異業種民間企業のオープンな連携母体として設立したコンソーシアムには 27 社が参加しているが、さらなる規模の拡大を進め、より多くの企業に対して脳情報の可能性を検証する場を提供し続けていきたい。

・ 知財・標準化戦略は明確かつ適正か。

クローズド戦略に沿ったコア技術の開発については、特許取得はもちろん、関連するノウハウの蓄積や高品質なデータの蓄積を進めており、他組織や他国では容易に模倣できない水準になりつつあると考えている。但し、この競争優位を維持するためにも継続的な研究開発が必須であると考えている。

一方、オープン戦略の中心である国際標準化については、脳情報の利活用につながるプラットフォームの国際標準化については、ITU-T が WHO と連携して進める eHealth の WG での合意をへて、システムアーキテクチャーに関して ITU-T 勧告草案 H. 861.0 (H. MBI-PF “Requirements on communication platform for multimedia brain information”)、さらには、後述する脳の健康管理指標の作成に関して H. 861.1 (H. MBI-BHQ “Requirements on establishing brain healthcare quotients”) という形で承認されるに至っており、継続して改定を進めていきたい。

② 上記①以外の派生的な効果（派生的に生み出された成果、新たな学術的知見の創出、失敗から得られた知見等）として、どのようなものが得られたか。

多様なコア技術の開発をポートフォリオ管理していく上で、各技術のパフォーマンスを共通の仕組みで評価する必要性を強く感じるようになった。その派生的成果として、蒸気機関におけるワットや半導体におけるクロックを参考にした、誰もがわかり易く、容易に使える脳の客観的指標として BHQ (Brain Healthcare Quotients) のコンセプトを考案することができた。

実際、この指標のプロトタイプは、内部の技術評価だけでなく、民間企業においても一般の生活者においても試行的に利用されるに至った。結果として、前述の通り脳情報の共有に関する標準化だけでなく、指標の作り方の標準化として国際標準化することができた。しか

し、民間企業と共同記者会見を行った際には、予備的な指標の事例を伝え、民間企業主導の脳科学の研究開発及び研究投資へとつなげる意図について丁寧な説明ができず、民間企業へのお墨付きを与えるものと受け止められる結果となってしまったと反省している。

世界に発信できた成果という観点だけでなく、その後の反省から得られた教訓という意味においても、有意義な取り組みかつ知見であったと考えている。

(2) PM自身の活動（プログラム・マネージメント）に関する評価

① <目標設定>産業や社会のあり方変革を目指した研究開発プログラムとして、目標設定の水準は妥当であったか。

本プログラムが目指す新しい産業や社会は、個々人が日常生活の中で脳の健康を管理でき、ストレスにも負けずいつまでも働き続けられるようになるというものである。そのような、まだ存在していない脳情報サービスの創造及び産業の創出に向けた研究開発課題として、革新的な脳情報の可視化技術及び制御技術の開発とその実社会への応用を進めた。

具体的な目標としては、5年間という研究期間において、①民生分野における脳情報モデルケースの公開②脳情報エコシステムの構築という目標を設定した。これは、欧米の大規模な脳科学研究プログラムが数千億単位の研究予算、10年以上の研究期間を投入し基礎研究を集中させている状況と比較して、数十分の1以下の研究予算、半分以下の期間で産業応用までを視野にいたったものである点でハイリスクハイインパクトなものであったと考えている。

加えて、目標①に関しては、社会実装を想定したニューロフィードバック技術やブレインロイドのアルゴリズムなど卓越した研究成果が得られるとともに新たなスタートアップの創業や新しいコンセプトのロボットなどに繋がり、目標②については脳科学と脳情報サービスを橋渡す土壌作りを進め、結果として脳ドック学会との連携を通じて多数の国内脳ドック拠点とのネットワーク化や複数大学との連携による大規模な脳情報の蓄積基盤の構築、さらには脳情報を活用するための国際標準化の承認に至るなど、一定の成果を獲得できた。これらの点からも、本プログラムの設定した目標が欧米のプログラムに比較して野心的であった一方で、一定の成果を獲得することができた点で、ImPACTプログラムの趣旨を踏まえた目標設定水準として妥当であったと考えている。

② <作り込み>トップ研究者の採用や異分野研究者との融合、外部専門家からの助言聴取など、国内外から斬新なアイデアや最先端の知見等を結集して研究開発を推進できたか。また、研究開発の実施体制は適切であったか。

本プログラムの研究開発の実施体制として、携帯型BMI・脳ロボティクス・脳ビッグデータの3つの研究課題について、それぞれの領域のトップ研究者に統括技術責任者をキャスティングし、科学視点での推進を任せた。一方、自身はPMとして、科学的取り組み

を踏まえた技術開発及び産業化のマネジメントに注力するという研究体制を設計した。また、研究体制の構築にあたっては、PM が直接指名した研究機関だけでなく、公募による研究機関の募集も行い統括技術責任者に加えて外部委員による評価を踏まえた選定を通じて、オープンかつオールジャパンでの体制づくりを進めた。

PM としての研究マネジメントを実施する手法として、携帯型 BMI・脳ロボティクス・脳ビッグデータの領域毎に各研究機関の進捗状況を把握する会議体を設置することに加え、グローバルな研究開発トレンドを PM チームが調査分析し各領域へフィードバックする体制を整え、進捗に応じた関連する異分野研究者や異業種民間企業、関連団体との対話の場を形成することによってサービス化、産業化の推進を図った。

上述の研究体制と運営を行うことで、脳科学を専門にする研究者だけでなく、これまで脳科学研究に携わったことのない様々な専門家や実業家が脳科学の産業化という未知の目標に向けてチャレンジする土壌を醸成することができ、PM は研究者ではなく、プログラム全体のプロデューサーであるという役割・任務を常に意識したマネジメントが実行できたと考えている。

③ <進捗管理> 研究開発の進捗状況や国内外における研究開発動向（ベンチマーク）等に応じ、各プロジェクトの加速、減速、中止、方向転換等を果敢に行うことができたか。

脳科学の産業応用にむけて各研究機関の競争と協調を促進するため、研究期間を3つのステージに区切りステージゲートを設けて、ステージ毎の成果に応じて研究課題の統廃合及び予算増額を実施した。ステージゲートに際しては、研究開発の学術・技術的評価と I m P A C T 後の展望についての技術的・事業的な観点から評価の二つの側面を持った評価を実施した。また、各成果を評価する上では、関連する米国の Brain Initiative や EU の Human Brain Project などのグローバルな研究トレンドはもちろん、イスラエルなどを中心として脳のスタートアップの創業状況なども加味して、日本として注力すべき研究開発領域を絶えず意識して進めた。

結果、ステージ1では26の研究グループが実施されていたが、ステージゲートの結果、ステージ2では12グループへ、さらにステージ3では8グループへと廃止・統合を行った。脳科学の産業応用に向けて多様な可能性を模索するため複数の研究グループのポートフォリオ管理が重要と捉えていたが、ベンチマーク結果を踏まえたステージゲートを実施することで、選択と集中を行い産業化にむけた研究開発を加速させるマネジメントが実施できたと考えている。

④ <関係者の巻き込み> 研究開発に関連する産業界を巻き込み、それら関係者の自発的な研究開発投資を誘導することはできたか。

本プログラムでは、脳科学は多くの産業分野に関連するという前提に立ち、これまで脳科学研究に関心がありつつも、その専門性の高さから十分な研究を行えていなかった消費財から耐久財、インフラ系まで幅広い産業界を巻き込むことを重視した。そのため、脳の研究に挑戦しようとする民間企業だけでなく異分野の研究者も支援するプラットフォーム構築を進めた。

具体的には、大学研究機関の MRI の撮像環境及びデータ利用環境を誰もが安心して利用できる環境（二次利用可能なインフォームドコンセントの取得や倫理ガイドライン策定など）を整備するとともに、大規模なデータの蓄積を進めた。結果、一般的な脳ドックで使われる脳画像データを 1 万人以上、高度な研究機関で使われる脳画像データを 3 0 0 0 人以上蓄積することができた。一方、それらのデータを非専門家でも扱えるものとするために脳の健康管理指標として BHQ（Brain Healthcare Quotients）を提唱した。これによって脳画像データを直接扱うことなく、数値データとして扱えるようになり、多くの民間企業や異分野の研究者が脳科学研究をトライアルすることにつながった。

これらのデータ蓄積や指標化によって、産学連携のマッチングの場として新たに形成したコンソーシアムにおいては、会費制としているにも関わらず、27 社の企業が参加する規模のものとして運営が行えている。また、その中からは個別に研究開発投資を行う企業も生まれている。このように本プログラムでは関連する産業界や関連研究機関を巻き込み脳科学領域への投資を誘導する道筋を形成することができたと考えている。

⑤ <成果の展開>得られた研究成果の産業界への橋渡しや将来的な実用化・事業化に向けた戦略（知財及び標準化を含む。）及び体制が構築できたか。

本プログラムでは、脳情報を社会全体で利用することで、人々が生活の中で脳の状態を確認したり、脳情報に基づいて開発された製品やサービスを利用したりするなど、新しい価値の創出につながる社会実装を目指した。社会実装に向けた課題として、産業界が脳情報を自社の研究開発へ活用したくても脳情報の利用に高い専門性が有されるため活用が進められず、脳科学研究成果が産業界に展開されづらいという状況があった。そこで本プログラムでは、専門性の高い脳科学の技術シーズを産業界にとっても扱いやすくすることを目的に、コア技術の知財化を進めライセンスアウト可能な状況にしたり、ベンチャー化を進めることによって産業界への橋渡しを進めたり、さらには脳情報の国際標準化を進めるなど、進める研究課題に応じた実用化、事業化戦略を描いてきた。

例えば、ニューロフィードバックについては、そのコア技術を知財化するだけにとどまらず、スタートアップとして創業することによって、既存企業へのライセンスアウトを可能にすることができる体制を整えるに至っている。このことは、ニューロフィードバックにかかわらず、その他の技術についても一つのマネジメント上のモデルケースになると考えている。一方、個別のコア技術だけでなく、脳画像データを共有する仕組みについては標準化による国際協調を重視した。具体的には、国際連合の専門機関である ITU-

T(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector) が世界保健機構 WHO と連携し進めている eHealth の標準化のワーキンググループへ参画し、脳情報のデータベースを共有するためのアーキテクチャーの標準化を提案し、H.861 として承認されるに至った。

このようにコア技術の特許化というクローズ戦略と国際標準化というオープン戦略を状況に応じて適切に使い分けることができたと考えている。

⑥ <PM 支援機能の活用>PM 補佐や JST、外部支援の活用など PM 支援機能を有効に活用できたか。

本プログラムでは、脳科学分野における科学的成果から技術的成果に展開する難しさはもちろん、技術的成果をサービス化、産業化する困難さがあることが当初より想定されていた。前者の研究支援については、研究機関へのファンディングなどに経験豊富な JST の支援のお陰で、PM が全体の戦略を描くことに集中できる環境ができた。後者についても、PM 補佐にビジネス経験豊富なスタッフを揃えることにより、多くの困難を超えることができたと考えている。

⑦ <アウトリーチ>アウトリーチ活動等が積極的に行われ、研究開発の意義・重要性等に関し、関連する産業界や一般の理解が深まったか。

本プログラムの研究成果については、国内でのシンポジウムなどだけでなく、国際標準化の場を活用したり、国際的な研究集会を開催したりするなどして国際的にも発信し、アウトリーチ活動に努めた。その際には、脳科学分野の研究者だけではなく、異分野の研究者や産業界の非研究者へも、本プログラムの取組や成果を伝えるために、脳科学研究の個人にとっての意義や産業における可能性を伝えるように心がけた。

実際、国内のシンポジウムにおいては、脳の研究者だけでなく、民間企業の脳科学を専門としない関係者にも参加頂き、各開催において150名～300名ほどの参加があった。また、国際研究集会においては、日本だけでなく多くの国からの参加を頂き200名ほどの参加を頂くに至っている。さらに、公開のシンポジウムだけでなく、PM 自らが経営者を対象にしたクローズな研究会やスタートアップの創業を目指すような学生向けへの講演、グローバル企業への研究成果の紹介なども行うことによって、より多くの人に日本の脳科学の産業化の可能性を伝えることができたと考えている。

一方で、企業との取り組みについての発表では、一部メディアに内容について誤解を与えてしまった点もあったので、社会への影響について慎重に考慮した上でのアウトリーチ体制の構築が行えれば、より本プログラムの意義が広く社会へ発信できたのではないかと考えている。

⑧ <人材育成>若手や女性を含め研究人材の育成にどの程度貢献できたか。また、基礎研究からイノベーションを生み出す取り組みに関する参画研究者の意識改革がどのように進んだか。

脳科学の産業応用実現は、これまでの基礎研究としての脳科学に応用研究としての脳科学を生み出すことをも意味していると考えており、このためには新たな人材の育成が必須であった。この実現に向けて、前述のようにステージゲートにおいて事業性評価を導入することに加えて、企業からの資金提供やリソース提供、他の研究費の獲得などマッチングファンドによる評価制度を導入した。これにより、参加頂いたすべての研究者が学術的な価値だけでなく、市場での価値を意識する大きな意識改革を進めることができたと考えている。このことは、参加した若手や女性の研究者にとっても、これまでの脳科学研究のように基礎研究に取り組むだけでなく、応用研究にも取り組むことが新たなイノベーションにつながると肌で感じて頂くことができ、またそれは自らが新たに活躍できる場を得られると感じてもらえたと考えている。

⑨ <全体>更なる研究開発の発展や、我が国の産業競争力の強化、困難な社会課題の解決に向け、どれほどの貢献ができたか。

本プログラムでは、人生100年時代における高齢化に伴う認知機能の低下や、AIやIoTによる情報化の進展に伴うストレスの増加といった脳や心の世界的な課題を解決するため、脳情報の可視化と制御技術の研究開発を進めてきた。結果として、脳の状態を見える化し、より良い状態に変えるための携帯型ブレインマシンインターフェースの実装を中心に、高度な可視化技術であるブレインロイドや高度な制御技術であるアンドロイドニューロフィードバックのプロトタイプ作成にもこぎつけた。加えて、脳情報の国際的な流通を可能にする国際標準化についても日本が主導となって実現することができた。

これらのことは、世界中の人々が望むいつまでも健康で若々しい脳を実現する最初の一歩となることはもちろん、その中でクローズドなコア技術の観点からもオープンコラボレーションの観点からも日本が世界に新しい価値を発信していく橋頭保を作ることができたと考えている。

⑩ <全体>目標通りの成果が得られなかった事例等の原因分析や解析が適切に行われ、そこから得られた知見や教訓を次の挑戦に活かすことができるか。失敗を通して次の挑戦につながる道筋は描けたか。

本プログラムでは、失敗を恐れずに困難な研究開発課題に果敢に挑み（チャレンジ）、新たな成長分野を切り開いていく（イノベーション）というImPACTの精神を絶えず心に据えて活動を進めてきた。その中では脳科学の産業応用を進める上で、脳を健康を維持・管

理するための研究開発を積極的に推進。また、それら研究成果を民間企業に橋渡し、速やかに社会実装に導くための脳情報プラットフォームを構築することにより、世界初の「脳情報サービス産業」の創出を目指してきた。

そうした中で、民間企業等が脳科学研究に積極的に参加し、脳の健康管理といった観点から様々な商品・サービスの研究開発を推進できるようにするため、民間企業と共同記者会見を行ったが、予備的な実験の結果を基に本格研究を開始するという会見の趣旨について十分に丁寧な説明ができてなかった部分があったため、社会に誤解を与え結果となってしまったと反省している。

外部専門家から頂いた助言も踏まえ、社会実装を進める企業との共同発表においては慎重が必要であり、野心的かつ前例のない本プログラムを実施するに当たっては、責任の所在と社会的アピールを含む戦略の立案が必須であることを認識した上で、共同研究のパートナー（民間）が実施する広報活動についても、プログラム側が責任を持つ形でしっかりとガバナンスを発揮する体制を構築することで、今後も脳科学の産業応用に挑戦していきたいと考えている。

（３）その他、ImPACT プログラム全体に対する所感・提言（自由記載）

ImPACT プログラムにおいては、CSTI による大所高所からの的確な指導と内閣府による政策に沿ったタイムリーなアドバイス、JST による研究開発の継続的なサポート、さらには PM 補佐制度という PM を支える素晴らしい制度を持っていたと考えている。

一方、社会に大きな影響を与える国家プロジェクトであるため、より複雑な知財関係、グローバルな研究や標準化のネットワークの必要性、社会への広範なアウトリーチ活動など、通常の研究開発プログラム以上に高度なマネジメントが求められた。

このため、上記の助言やアドバイス、サポートなどについて、独立した単一の組織として一体となって推進することができれば、さらなる革新的かつ社会にインパクトを与える成果を生み出すことができるようになって感じた。