

未来  
設計  
会議  
*Designing  
our  
future*

シリーズ 2

脳科学から見た社会デザイン

03

人と機械は  
どこまで  
つながる？

講師：川人光男 (ATR 国際電気通信基礎技術研究所)

企画構成＋執筆：高見裕一 企画監修：高橋里英子

# 人と機械 は どこまで つながる ？

## つながったらどうなるの？

まず、ここでは、人といっても

「脳と機械がつながる」未来を考えます。

では、脳と機械がつながると、どうなるのでしょうか。

例えば脳の情報で機械を動かすことができます。

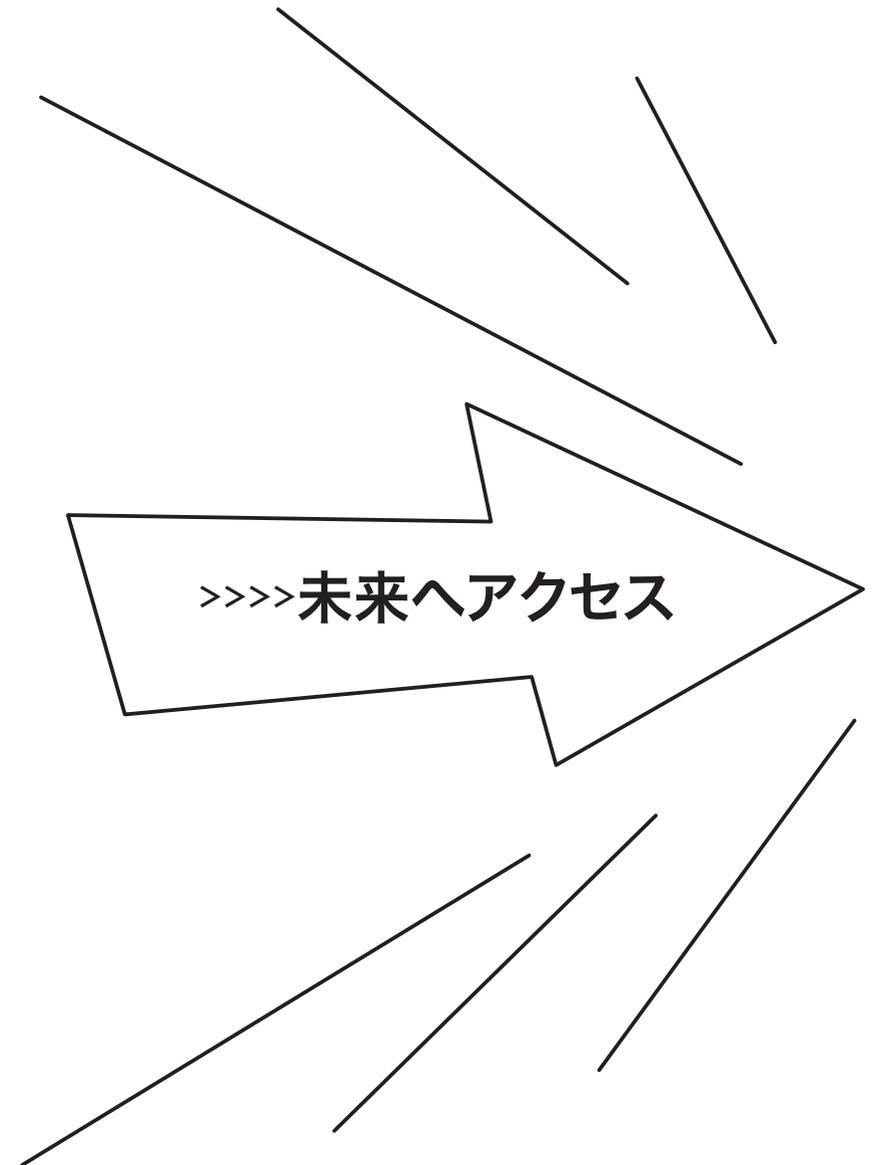
つまり、念じただけで、機械が動く。

さらには頭に浮かぶ映像をそのまま映写したり、

言葉にならない情動をそのまま伝えたり。

もしかすると、念写やテレパシーや

テレキネシスが、実現できるかもしれないのです。



では、詳しくみてみましょう。

脳と機械をつなぐ技術のプレ講座

# BMI研究とは

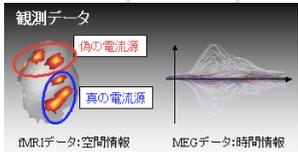
**BMIは、脳と情報通信機器を直接つなぐ技術を意味します。**

BMI (Brain-machine Interface) 研究は1970年代から始まりましたが、現実味を帯びたのは90年代以降。コンピュータなどの情報科学技術や脳波のスキャン技術などの確立が、BMI研究を加速しました。



BMIのしくみの概念図。脳と情報通信機器をつなぎ、脳の指令をデジタル信号に置き換え、機械を制御する

図版提供：ATR 脳情報研究所 (この頁すべて)



脳内信号の計測にも最先端技術が駆使される。脳の活動を三次元でとらえるfMRIと、時間変化をとらえるMEGを組み合わせて行なう例

**BMIの実現には、さまざまな科学技術を融合させる必要があります。**

脳の信号を計測するための研究、とらえた脳データを解読するための研究、脳と通信機器をつなぐBNI (Brain Network Interface) や、脳と身体機能を代替するロボットをつなぐBRI (Brain Robot Interface) の研究など、多様な研究の積み重ねがあって実現するのです。

**日本は「非侵襲型」のBMI研究で、世界をリードしています。**

BMIには、直接脳に電気回路を埋め込む「侵襲型」と、脳を傷つけることなく装置を装着して脳波を読み取る「非侵襲型」があります。日本はとくにfMRI、NIRS、脳波、脳磁図などを用いた非侵襲型を得意とします。

**BMI研究には、多様な応用と大きな経済効果が期待されています。**

失われた身体の感覚や運動・コミュニケーション機能の再建(医療・福祉分野)、超高速の情報伝達、遠隔機器の操作、意識下の脳情報の伝達(情報通信分野)、ヒューマノイドロボットのような複雑なシステムの脳からの直接制御(ロボティクス分野)、さらには、脳科学分野への貢献など。



BMI研究の一例。サルの大脳皮質活動の情報を、直接かつリアルタイムで伝送し、遠隔地のヒト型ロボットの歩行を生成 ©JST

**川人先生は、**

**BMI研究をまとめ、推進するリーダーとして、活動しています。**



## 【講師の研究】

### 社会を変える計算論的神経科学

本来、情報通信は、脳の中の情報そのものを伝えるものだと思います。脳科学と融合した情報通信科学が、遅かれ早かれ出てくるでしょう。

進展する脳科学の分野で注目を集めるBMI（ブレイン・マシン・インターフェイス）。脳と機械をつなぎ、脳内をゆき交う信号の動きを読みとり制御するこの先端科学技術は、福祉や医療、学習のほか、新たなコミュニケーションのあり方など、さまざまな領域での活用が期待されています。

川人光男氏は、「脳科学研究戦略推進プログラム」BMIの中核拠点であるATR（国際電気通信基礎技術研究所）脳情報研究所で、所長および課題Aの拠点長として日本のBMI研究を牽引してきました。現在のBMI研究はどのような状態にあるのでしょうか。最前線に立つ川人氏に、世界における競争や、これからの社会への影響について伺いました。

BMI研究は、さまざまな分野の科学技術研究が融合して成り立っています。脳の神経システムと情報伝達の生理的なしくみを理解するシステム神経科学、脳が発する信号や制御システムを人工的に再現する情報科学、さらには脳の指令にもとづく身体機能を代替する機械を探るロボット工学など。そうした広い分野に及ぶ研究を牽引する川人氏ご自身は、学生時代、はじめ物理を専攻し、途中から脳の研究に変わったそうです。物理研究と脳研究とは大きな距離を感じますが、「自分ではあまり不思議だと思いませんでした」と語ります。

「東大で物理を専攻していたときに、高橋秀俊先生が、“物理の研究は物質の理の学問である”と教えてくれました。物理とは、ものがシステムとしてどのように働いているか、その機能を調べるところに本質があるとお話をされていて、それに感化されていましたから、世の中にある全てのものが物理の対象になると思っていました。ただ生物物理に進もうか、脳に進もうかは迷いました。脳を選んだのは、やはり物質よりは“システムとしての心”を理解する方向性が、自分に合っていると考えたんでしょうね。」

その後、「計算論的神経科学」を進めます。脳が機能するシステムを計算理論でひもとき、アルゴリズム（計算式）に起こしてハードウェアで実現できるほどに、深く、本質的に、脳を理解する研究です。特に、小脳の運動制御と高次認知機能の原理を明らかにし、その展開として「非侵襲型」のBMIの手法に注目。自ら提唱した小脳の原理を実証する脳信号のデータをBMI技術で取得し、さらには、ヒト型ロボットに、その原理にもとづく運動を実践させることに成功。大きな成果をあげたのです。BMIを用いたアプローチに対し川人氏は、「これまでの神経科学は、脳活動の原因と結果の因果関係を明確に証明できないのが最大の弱みでしたが、BMIはその弱みを根本的に解決する技法にもなりうる」と語ります。そんな川人氏の研究が機動力となり、近年、日本は非侵襲型で世界をリードし、侵襲型で世界をリードするアメリカに拮抗しています。

## BMI研究における世界との競争

しかし、「日本のBMI研究は、アメリカにくらべ10年遅れています」と川人氏は語ります。アメリカは、研究者の人口も圧倒的に多く、100億円

規模の研究費が10年間も続いているため、基礎体力が違うというのです。「アメリカが強い侵襲型のBMIが世界の主流であれば、勝ち目はなかったでしょう。我々は3年前に非侵襲型と低侵襲型を選び、この2つの分野では、少ない研究者人口ながら世界をリードしています。ですが、これからアメリカでたくさんの研究者が本腰を入れて日本の得意な ECoG やリハビリテーション BMI に集中すれば、競争は大変困難でしょう。いろいろな分野の方々がこの研究に参加し、国のサポートがないと、アメリカやドイツばかりではなく、中国やシンガポールにも負けてしまうおそれがあります」。

とくに中国の進展はめざましいものがあると感じているそうです。「去年の8月に韓国・上海・北京のBMIの調査旅行をしてきたのですが、脳波を使う非侵襲型のBMIでは、中国清華大学の顔(ガオ)氏の眼球運動を使う研究は、日本のレベルを突き抜けていました。ですからぜんぜん安心できません。中国のBMI研究への投資は半端でなく大きい。中国は今、国家政策として世界中に散らばった中国系研究者を呼び集めています。日本の優位はすぐなくなる可能性がありますし、もう負けているんじゃないかとすら思えます」。

そうした世界の激しい競争のなかで、日本はどうしたら良いのでしょうか。川人氏は、日本には独自のメリットがあると語ってくれました。「今の日本の経済状態では、アメリカや中国のような研究への投資は無理でしょう。つまり、BMIの研究所をつくるなどはナンセンスです。でも、異分野の研究者とのネットワークづくりは得策だと思います。日本のメリットは、国土が狭く、民族が比較的一様で、言語も同じこと。異分野の優れた研究者が連携し、物理的に一緒に会うことも含めて共創すれば、国際的なサイエンスの場で優位が保てるかもしれません。ただ、よほど良く考えて効率の良いシステムにしないと、なかなか競争には勝てないという気がします。最初にどういうネットワークをつくるかでかなり勝負がつくところがあって、その部分では、自信を持って進めています」。

国際競争の一方で、国際協力もなされています。川人氏は脳神経科学の国際的な組織 INCF<sup>(注1)</sup>の国際会議のプログラム委員長を務めていますが、日本はどういった役割を担っているのでしょうか。

「INCFは、2005年に、もともとヨーロッパでつくられたものですが、なかでもBMIは重要な位置にあります。日本とイギリス、アメリカとドイツ、アメリカとイスラエルは、BMI研究の協力関係が強い。INCFはヨーロッパ主導で、ヨーロッパとアメリカは勢力争いがありますから、日本は第3勢力として結構貢献しています。去年、日本で国際会議が開かれたのも、そういう理由だと思われます」。

注1: INCF / International Neuroinformatics Coordinating Facility (ニューロインフォマティクス国際統合機構)。経済協力開発機構(OECD)が、脳科学の急速な発展がもたらす社会貢献と経済的効果を見込み、脳科学と情報科学の融合による脳の総合的な理解とニューロインフォマティクスの進展、及び国際協力の必要性を訴える報告書を作成。これにもとづき、2005年8月1日に結成された。詳細は以下参照。INCF Japan Node

## BMI研究が社会にもたらすもの

加速するBMI研究ですが、川人氏は、この研究が社会に何をもたらすと考えているのでしょうか。

「医療、福祉には、当然、役立てたいです。実際に人工内耳、脳深部刺激、脳波トイなど“広い意味でのBMI”は、すでに役立っています。それを今後、より加速していきます。介護ロボットのような福祉の部分にも、すごく期待しています」。

すでに実用段階に入っている“広い意味でのBMI”には、リハビリへの利用なども含みます。これらの医療・福祉への利用にくわえ、さらに社会を変えるであろう点として、コミュニケーションの分野にも注目しています。

「今までのITは、人の脳の中の情報そのものではなくて、結局はデータとしての画像、音声、テキストなどを情報と呼び、それを伝達する技術でした。でも、本来、情報通信は、脳の中の情報そのものを伝えるものだと思います。脳科学と融合した情報通信科学が、遅かれ早かれ出てくるでしょう。未来設計会議(P13)では、そんな未来をいやがるかなと思ったら、脳とネットがつながっても全然平気という人が少なくとも3人ぐらいいたので驚きました。でも実は私自身は、BMIをコミュニケーションに利用することを本当に望んでいるかどうか、よくわからないんです。ただ人間は、自分の能力を拡大する生き物です。PCや携帯などがこれだけ普及したことからもわかりますが、進んでいくのでしょうか」。

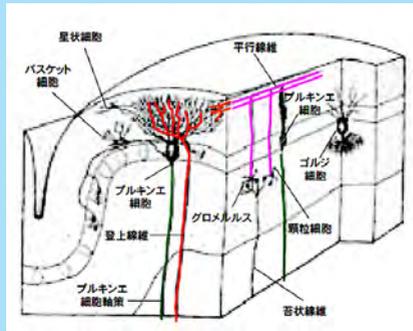
(→本文P11へつづく)

# 講師の実験紹介

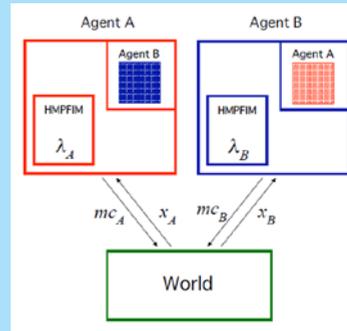


# 1

川人氏は、ヒトの運動制御と高次認知機能に重要な役割を果たす小脳の学習方法に注目。新しい道具を学び使うときの小脳のしくみを解明し、1984年に『小脳内部モデル理論』として発表。計算モデルに表わしました。



小脳を「入力した情報を出力に変換する神経回路の集まり」とすると考え、小脳内部の神経回路のしくみを詳しく観察(左)。右は、学習についての「心の理論の計算モデル」より

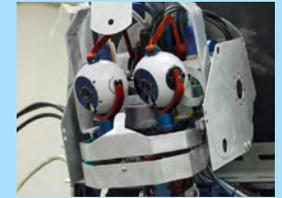


# 2

その後、実際に非侵襲型のBMIを使って小脳の情報の動きを観察し、データを取得。自らが提唱した計算モデルを実証することができました。

# 3

さらに『小脳内部モデル理論』の原理にもとづき、ロボットにバッティングや歩行、ふらつきの制御をさせる実験や、実際の脳内信号によりロボットにジェスチャーさせる実験など、数々の実験を行いました。



ヒト型ロボットCB-iによるバッティング実験。バットを握り、眼でボールをとらえ、軌跡を予測し、バランスを取りつつ、すばやくスイングする  
図版提供：ATR ©JST



## 【実験結果】

こうした一連の研究は、「計算論的神経科学」の研究です。脳のしくみを知り、計算機のプログラムに置き換え、人工的な機械で再現する。脳を“創ることによって知る”研究なのです。

(→ P9 のつづき)

情動、つまり言語化できないレベルの脳内の機能や情報をそのまま外部化するために、私たちはどのようなOKラインをつくれればよいのでしょうか。「人が言語化している部分は皮相にすぎません。例えば人が何かを選ぶとき、バイアスをかけて自分自身が傷つかないように結論を出すことが深層でなされています。「self-serving bias」といわれるのですが、意識下と意識上がせめぎあう部分でマインド操作がなされているのです。果たしてそこまでを、BMIで論理的に、サイエンティフィックに、解決すべきなのか。ひょっとすると、心の逃げ場がなくなるかも、とも考えてしまいます。悩ましいですね」。

## 研究推進の一方で求められる倫理形成

研究活動の一方で、川人氏は、科学コミュニケーションの専門家である東京大学佐倉統氏とともに、BMIの倫理4原則をつくるなどして、社会との対話活動も重視しています。BMIの倫理4原則とは、①戦争や犯罪にBMIを利用してはならない ②何人も本人の意思に反してBMI技術で心を読まれてはいけない ③何人も本人の意思に反してBMI技術で心を制御されてはいけない ④BMI技術は、その効果が危険とコストを上回り、それを使用者が確認するときのみ利用されるべきである、というもの。

BMIの発展は私たちの社会や科学技術の発展に、多大な影響をもたらすそうです。日本は世界の研究をリードする一方で、倫理面や社会的な問題を真摯に考え、社会の中でよりよい利用のしかたを見い出していく必要があるでしょう。

川人光男 かわた・みつお

(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)脳情報通信総合研究所 所長。

1976年東京大学理学部物理卒業。81年大阪大学大学院博士課程修了。同大学で助手、講師を経て、88年ATRに移る。2003年よりATR脳情報研究所所長、04年ATRフェロー、IEICEフェロー。2010年より現職。2008年から科学技術振興機構さきかけ領域総括、文部科学省脳科学研究戦略推進プログラム課題A中核拠点代表研究者を兼任。主な著書に、『脳の情報を読み解く』朝日選書、『脳の仕組み』読売科学選書、『脳の計算理論』産業図書。

## 未来設計のための会議報告

【今回のお題】

あなたは、BMI研究の成果を社会にどう役立てますか？

講師の研究についてお話をうかがった後、会場の参加者に2つの問いを投げかけながら、脳科学の成果を社会にどう活かせばよいのか議論しました。会議のまとめを報告します。

開催日：2010年12月25日

参加者の人数：46名



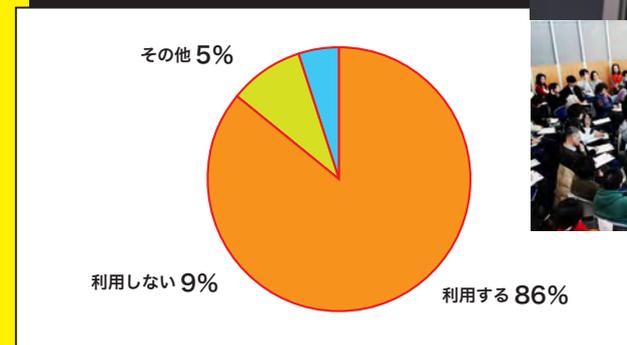
ファシリテーター 高見裕一

### Q1 BMI技術が普及したら、あなたは利用しますか？

BMIの技術が進歩し、これからの利用が模索されていますが、一般社会の皆さんはどのように考えているのでしょうか。

### A1

利用する	86%	(51人)
利用しない	9%	(5人)
その他	5%	(3人)



### ■考察

利用すると答えた参加者の意見には、「五感を失った人の感覚をとりもどすことができる」など、医療・

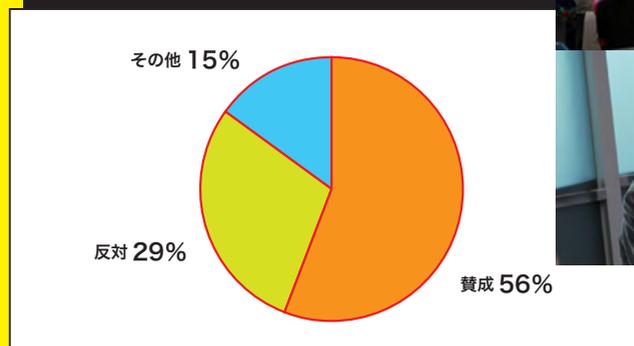
福祉への利用に期待する意見が複数あったほか、「コミュニケーションの可能性が広がる」など、コミュニケーションへの利用を考える意見もありました。一方で、「利用するのは良いことだが、怖い」などの技術的な不安や、怖さを感じている方もいました。全体として「利用したい」という意見が多く、とくに医療・福祉分野においては積極的な意見が数多くありました。では、医療・福祉以外の分野の利用については、どのように考えているのでしょうか。

## Q2 BMI 技術が医療・福祉以外の分野で利用されることに、賛成ですか？

Q1 では、ほとんどの方が「利用する」と答えています。その中で最も多かった医療・福祉以外での利用についてはいかがでしょうか。川人氏から BMI の利用について、「倫理 4 原則」(P12 参照) の紹介をしていただいた後、参加者の考えを聞いてみました。

### A2

賛成	56%	(33 人)
反対	29%	(17 人)
その他	15%	(9 人)



### ■考察

賛成とそれ以外で分けると、56%と44%と、ほぼ半数に割れるかたちになりました。賛成の意見では、「コミュニケーションの可能性が広がる。言語、表情、口調、ジェスチャ等とは異なる意志伝達の可能性が開けると思う」など、新しいコミュニケーションの広がりに期待する意見が出ました。反対の意見では、「人と人とのコミュニケーションに利用する必要はないと思う。例えば、「この人苦手」と思うだけで相手に伝わってしまうと混乱を招く危険性もある」など、具体的な利用を想定した意見が出ました。他に、「ルールを作成する必要がある」「平和利用に限るべき」という意見もありました。

会議中、それぞれ個人の中でも葛藤があった様子がうかがえます。賛成反対どちらでもない「その他」が15%もあり、またワークシートの欄外には、「BMI 技術はツールか？体か？」「本当に、(頭の中で)考えていることを、社会と接している部分に表面化させてよいのか？」「便利なら利用したい」「悪意なく使われるならば良いと思う」など、考えさせる内容がメモ書きされていました。議論も活発に交わされ、BMI の利用についてより良い未来社会を築くため、社会全体で考え議論していく必要があると考えさせられる会議となりました。

## Q3 脳科学の成果をどのように社会に役立てたいと思いますか？

以上の議論を経て、参加者それぞれが考える「脳科学の社会への役立て方」を提出してもらいました。

- ・知識を学習で習うのでなく、知識が生まれた時点で一瞬にして得る(ような使い方)。
- ・BMI が導入されても脳自身が変化していくと思う。脳に都合が悪いことは脳自身がブロックするかもしれない。脳自身が技術を欺くように変化するかもしれない。
- ・世界平和に役立つとよいと思います。文化が違うことで誤解が生じ紛争につながる例も少なくないと思います。違う言葉を使っても、出ている脳波は同じかもしれません。それを見つけて、コミュニケーションの補完として利用すれば、わかりあえ、互いの利害を整理し紛争を回避することに役立つと思う。
- ・正直わからない。インターネットができた時も、ここまで人々にしあわせを与えるものになると思えなかったはず。
- ・人間を幸せにするための携帯が本当に人を幸せにしたか？メールは？だが、医療、福祉が人間を不幸にすることはない。
- ・あくまで平和利用。コミュニケーションツールとして日常化すると「人間力」が低下するのは、
- ・第2の自分を脳波で操作する技術は、危険な場所での作業で事故のリスクを下げると思う。
- ・障害者の方々に利用するならばよいかもしれないが、元気な人の脳に何かするのは危険性(リスク)やコストを考えるとどうなのかと思う。だから医療福祉以外には使わない方がよいと思う。脳や人を改造するのではなく、ロボットをもっと進化させてほしい。
- ・倫理的にむずかしい問題が残っていると思った。技術自体は素晴らしい成果だと思う。脳の理解が進めば、有効活用を考えることができる。心理療法など、病気の中でも外科的なもの以外に活用できれば、もっと未来が広がると思った。
- ・身体が動かなくなったり目が見えない人の役に立って欲しい。便利なことではなく、限界を超えるためにあって欲しい。健康増進。部屋の内装や服などを脳内で着せ替えできれば無駄な資源を省ける。
- ・脊髄損傷の人の身体を動かせるというのは成果だと思う。健康な人でも体調をくずして数日寝込んだだけで身体が鈍るのだから、脊髄損傷の人が筋肉を動かせるようになれば希望がある。ぜひ医療分野で役立てていただきたい。
- ・障害者がこれまでの技術では実現できなかった活動を行えるメリットは、イノベーションによるデメリットを補い、それでもなお、おつりがくると思う。
- ・積極的に情報・産業・医療など、広範囲な分野への展開を考えてほしい。倫理的問題がありそうなら、その時々時代と文化と価値観などを判断して決めればよいと思う。



発行：日本科学未来館

〒135-0064 東京都江東区青海 2-3-6

電話：03-3570-9151

<http://www.miraikan.jst.go.jp/>

©2011 National Museum of Emerging Science and  
Innovation (Miraikan) All Rights Reserved

