

水の計測とオープンイノベーションへの期待

Water Measurement and Expectation for its Open Innovation



鳥村 政基

Masaki TORIMURA

国立研究開発法人
産業技術総合研究所
National Institute of
Advanced Industrial Science
and Technology (AIST)

水の計測分野の技術は大幅に進歩した技術がある一方で、あまり進歩が芳しくなくまだまだ挑戦的な開発を進めて行く必要がある技術が残されている。特に水の総合診断技術や微生物やウイルスの迅速検出技術はまだまだ多くの課題が残されており、今後の技術開発に大きな期待がなされている。今後、こうした未達の水計測分野で技術革新を起こすためにも、ICTやAIの利用方法について考え、オープンイノベーションの可能性を検討していくことが重要だと考える。

While technologies in the water measurement field have greatly advanced technologies, there are some technologies (not very good progress) that need to go ahead with still more challenging development. Comprehensive diagnostic technology for water and rapid detection technology for microorganisms and viruses still have many problems left. From now on, in order to bring about technological innovation in such unachieved fields, it is important to consider deeply about the method of using ICT and AI itself and the possibility of open innovation.

はじめに

水の計測技術に関しては、引き続き社会の関心は強い。市場創出に関する技術分野、国の政策として推進すべき技術分野を中心に、今後の進展が予想される技術テーマとして平成28年度に「水処理」が選定され、特許庁で特許出願技術動向調査が実施された。この調査では、特許情報にもとづき、日本の産業が優位にある分野、あるいは日本が劣位にある分野等について分析が行われており、水質の評価技術に関する調査も含まれている^[1]。また、科学技術振興機構の研究開発戦略センターから研究開発の俯瞰報告書「環境分野(2017年)」として公開されたレポート^[2]の3.4.1では、水循環をテーマに技術課題の抽出が行われており、ここでも水計測の重要性を再認識することができる。

水質を目的の品質に管理するために評価が必要となる項目は、用いられる水の役割によって大きく異なる場合もあるが、例えば飲み水の場合は安全あるいは安心を担保できる項目となるべきである。また、水管理の観点からは、ただ単に「計測できる」というだけでなく、「どのような頻度でどのようなスピードで計測結果が得られるか」も水質の適性管理には大変重要な要素となる。例えば、米国では4時間毎の濁度モニタリングが課せられているように^[3]、新しい迅速簡便な評価・計測技術が必要となってくる場合もある。更に、「その測定が現場で可能なのか、あるいは実験室や計測所へ持ち帰って来ないと測れないのか」も求められる計測技術レベルが大きく異なる。もちろん、項目だけでなく、その管理レベルにより計測感度の課題も掲げられ、水計測

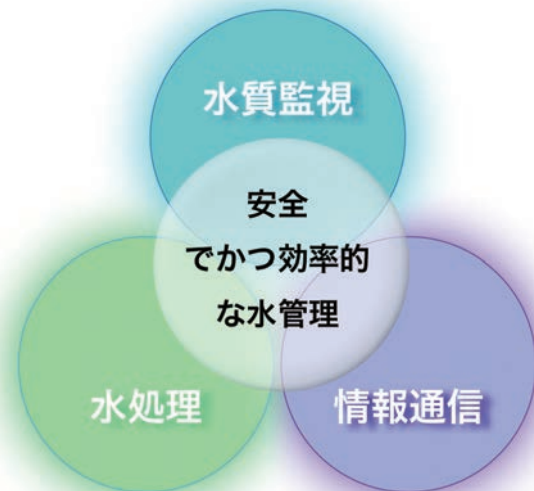


Figure 1 効率的な水管理を実現するための水質計測技術の概念図

に期待される技術レベルは課題に満たされている。

これまでの水計測技術の発展はめざましいものがあるが、一方でまだまだ不十分な技術対象分野も多く、今後はますます水質評価技術と水処理技術とを情報技術によって融合した、安全でかつ効率的な水管理技術の開発が期待される(Figure 1)。

水質評価技術の進展

水質評価技術の向上にかかる期待は大きいですが、このような

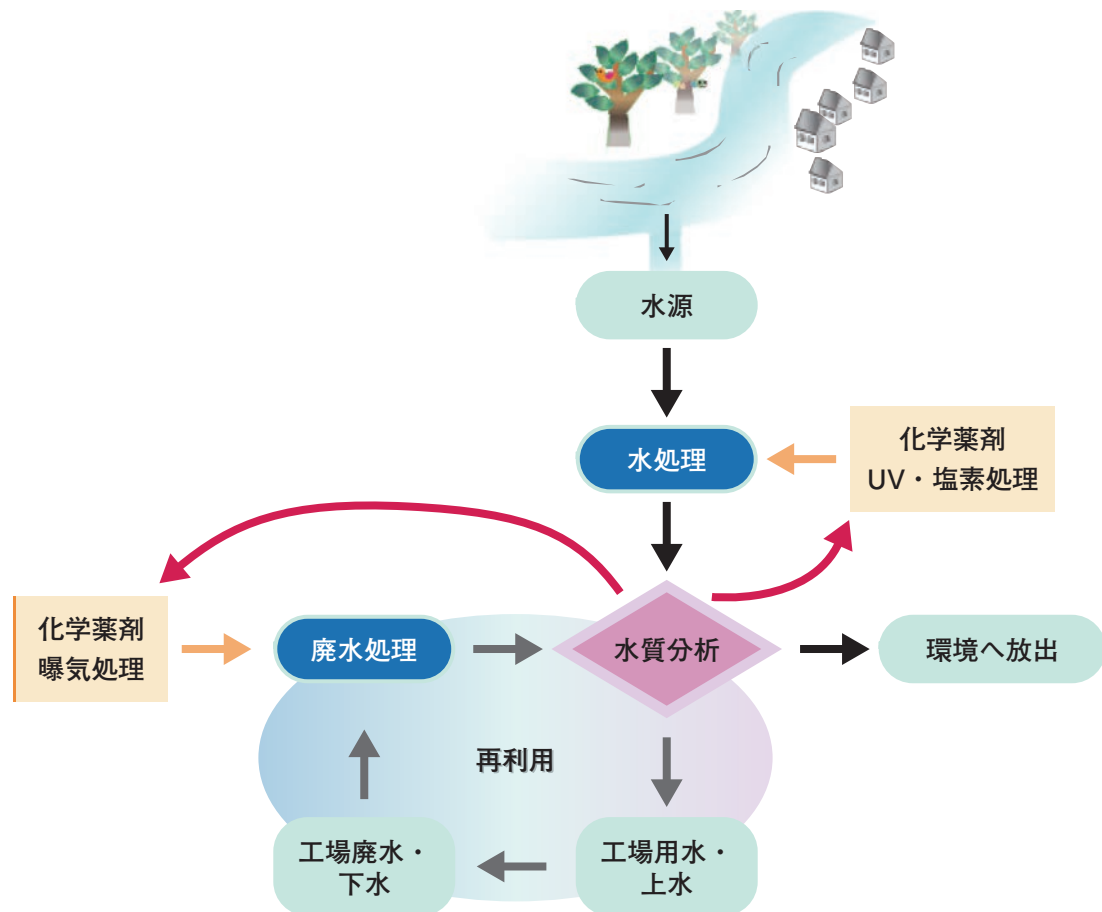


Figure 2 水の常時管理による処理エネルギー・薬剤の削減

状況に対応するためには、これまでの技術を改善・改良する技術開発も必要であるが、これまでの原理原則とは大きく異なるイノベティブな計測技術開発を強化することも必要である。産業技術総合研究所(産総研)でも、こうした水技術の現状を鑑み2012年に水プロジェクトを立ち上げ、水質モニタリング技術についても重点的な開発を進めている。水質の計測だけでなくその結果をリアルタイムに処理プロセスにフィードバックすることにより、従来大過剰にあるいは最適化されずに処理プロセスに投入していた試薬やエネルギーを削減することが可能になる(Figure 2)。

本プロジェクトで進めている各種水質評価技術の一部では、水の現場でオンライン評価できる手法を開発している。水質管理において水質汚濁指標となる全有機体炭素(Total Organic Carbon: TOC)の連続監視は有用であるが、既存手法では高価・有害な試薬を用いた煩雑な処理を必要とする場合があった。今回開発している技術は、これら試薬・触媒の代わりに光反応を利用した前処理技術^[4]を応用した。この方法は被測定対象の水を紫外線ランプ内に貫通させた反応管に導入することで水分子から水酸化ラジカルを発生させ、このラジカルを利用して短時間に溶存有機物を無機炭素にまで分解する仕組みであり、試薬を用いることなく水のTOC量を追跡することが可能になる。本手法は短

時間に測定を繰り返し行うことが可能になるだけでなく、装置のメンテナンスの必要性が低い条件で、水質の連続監視が期待できる。

環境水や飲料水の安全性の指標として重金属イオン濃度についても現場での簡易測定が期待されている。重金属の簡易分析においては、その携帯性やコストの観点で電気的手法であるストリッピング・ボルタンメトリー法が注目されている。従来この手法で用いられていた水銀電極は重金属への応答性能が高いのが特徴であったが、材料としての利用が環境汚染の問題とリンクして難しくなってきた。水銀の持つ重金属への応答性能に匹敵するような材料の電極開発を目的に、高感度かつ耐久性に優れた新規カーボン材料を重金属イオン計測用の電極として開発した^[5]。この電極は、特にカドミウムや鉛に対する応答性能に優れている。これら新電極材料の応用として、ヒ素検出への適用も検討している^[6]。

飲料水中へのヒ素混入の確認も現場確認できる技術への期待が大きい。目視でヒ素濃度を確認できる比色法を用いた簡易ヒ素検出法の開発にも着手した。ヒ素の発色分析法として従来から用いられているモリブデンブルー法はリン酸やケイ酸の共存時に妨害反応が起きることが知られていた

が、この方法はヒ素を選択的に測定することが可能となり、水道水基準として定められている10 ppbレベルの低濃度ヒ素でも目視で確認が可能となった^[7]。

測れなかったものを測る技術

飲料水や環境水の中に含まれる微生物やウイルス、さらには近年注目を集めている医薬品および日用品等由来化学物質(Pharmaceuticals and Personal Care Products: PPCPs)等、微量化学物質については、種類によっては人に重大な健康被害をもたらすため、早期の検出が求められている。一方、これらの対象の計測手法は未だ現場のニーズを満たす完全な方法の開発に至っていない。近年、工場排水の毒性評価に生物応答を利用する全排水毒性(Whole Effluent Toxicity: WET)試験法が導入されている国もあるが、課題も多い。

産総研水プロジェクトでは、簡便かつ低コストな微生物検査法として光ディスクのスキャン技術を検討してきた。この手法は、微生物等の微粒子が含まれる水を光ディスク表面に塗布し、ディスク上の微生物を光ディスクのピットに見立てて測定を行うもので、高速(既存の顕微鏡観察技術に比べて100倍程度)でディスク上の微生物の形状像を取得することができる。検査対象となる水には、金属酸化物、ガスケット、ポンプなどの可動部から生じる樹脂等の微生物以外の様々な粒子が共存する可能性があり、さらにその一部は蛍光を発するため、微生物とそれ以外の粒子を光学的に識別する必要があるが、本技術では光学的工夫とソフトウェアによる精度向上によりそれらの識別能力を高めている^[8]。近年、レーザー散乱と蛍光を駆使した培養を必要としない微生物の検出技術がいくつか登場しているが、本光ディスク法も含めこれらの新たな技術が培養法を補完あるいは将来的には代替できる技術に発展することが望まれる。特に水の検査コストは重要な技術課題であり、本光ディスク法の進展にかかる期待も大きい。

水の健康被害の観点からはウイルスの監視技術も強く求められているが、現場で用いることができる迅速測定技術の開発に対する技術的ハードルは高い。産総研では極めてわずかな個数のウイルスを簡便に検出する基盤技術を開発した^[9]。微生物もウイルスも次の課題は水の汚染物の高効率濃縮技術である。

全ての懸念される項目について、リアルタイムに対象水の水質評価を行うことは時間的にもコスト的にも不可能である。こうした中、工場排水の分野で水の安全性をより分かりやすく総体的に管理する目標の下WET試験法が1995年に米国で導入された。工場排水を一つ一つの化学物質濃度ではなく、藻類、ミジンコ、魚類などの生物への毒性影響を通して評価する手法であるが、簡便かつ再現性の高い総

体的水質監視技術の構築にはまだまだ課題も多い。

光合成微生物を用いたセンサは、光合成微生物が本来持ち合わせている光合成能力を電極反応に共役させることで光照射の際に得られる光応答電流を利用した技術となる。光合成微生物がいくつかの毒物に暴露されると、この光応答電子移動に影響が生じる場合があるため、その変化を電気信号として追跡することで対象となる水の毒性を評価できる。さらに、この方法は光合成微生物の細胞そのものを使うだけでなく、細胞内部から取り出したクロマトフォアと呼ばれるタンパク質複合体を使っても達成される^[10]。一般に細胞や生体素子をセンサ材料として用いる場合、その安定性を制御・管理することは極めて大きな課題となるが、長期的な保管も含めて安定的なセンサ材料として期待できる。

ホルモン様化学物質も環境水中に多種類の存在が確認されており、その網羅的な計測技術が求められている。これまで、こうした化学物質は抗体を用いた抗原・抗体反応に基づくイムノアッセイ法が主流であったが、本法はこれらホルモン様化学物質を総体的に捉えることが受容体タンパク質とその受容体が化学物質を認識した際に発光する発光プローブの開発により網羅的な計測の可能性を見いだした^[11]。本法では測定水とプローブ溶液を混合するだけで発光の観察が可能となるため、測定手順が極めて簡便である。今後、PPCPs測定への適用性や測定感度の課題を克服ができれば、現場の自動水質測定への応用が期待できる。

ここまで、網羅的な水安全性評価の新しいバイオアッセイ技術の開発を紹介してきたが、ヒトへの影響評価を定量的に行える簡易水質評価技術の確立は大きな目標である。生き物の種類により化学物質に対する応答性が異なることは知られているが、近年急速に利用期待が高まっているヒトiPS細胞等を用いてヒトへの影響評価を実現できないか、検討を開始している^[12]。種々の検討初期データから、様々な化学物質に対してヒトiPS細胞内部のDNAやRNA量変化が観察されており、生きたままの細胞内遺伝子発現の可視化技術の開発により、水質の迅速評価技術を構築したい。

水質管理におけるICTやAIへの期待

情報通信技術(Information and Communication Technology: ICT)を活用したスマートな水管理システムの開発は水の分野でも広く期待されている^[13]。水質管理における計測技術の重要性は言うまでもないが、これを有効に活用した水利用システムを構築できるような知見や情報の体系立てが求められている。水の分野に限らず、こうした情報の見える化は、これまでの水の管理運営における監視のハードルを下げるだけでなく、今まで経験や勘に頼っ

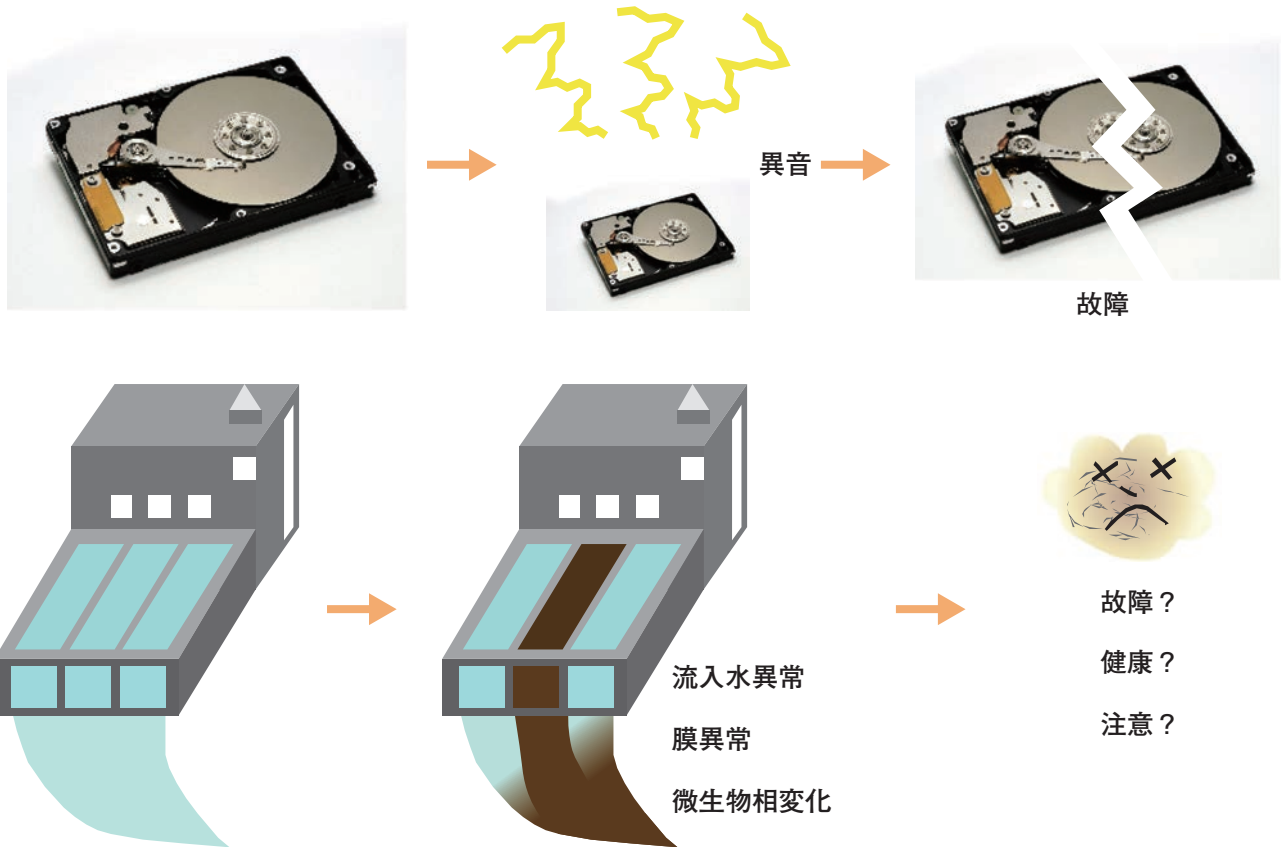


Figure 3 ICTやAIを利用した次世代水管理技術への期待

ていた管理運営の方法を大きく変える可能性がある (Figure 3)。例えば、ハードディスクドライブの早期異常を検知するための異音の検出はよく知られた方法であるが、水の現場では様々なモジュールが複雑に組み合わさったシステムとして運用されている場合が多く、こうした場合には一つの計測情報だけから、水処理システムの健全性や不健康な状態を判断することは難しい。水分野におけるICT (Information and Communication Technology) や人工知能 (Artificial Intelligence: AI) の利用可能性について議論することは水計測技術の発展にも極めて有意義である。上述した経験や勘に頼った水管理技術をICTやAIで補完するために、我々はどの場所にどのようなタイプの計測技術が必要になるのかを改めて問われることになる。

さらに、水質評価手法を組み込んだ既存の水処理技術の組合せの対応においては、水を移動するためのエネルギーやコストまで考慮して総合評価する手法の構築が求められることになる。近年、水質の計測データをクラウドでコントロールすることはそんなに難しい技術では無くなり水質情報の見える化が一般的になって行く中で、新たなプレイヤーが参入可能となることは、水分野のイノベーションにも大きな影響を与えるであろう。

特に、水の処理に関しては、今後はエネルギーと食糧問題

を一体とした持続可能なシステムの構築を考えて行く必要がある。そこではこれまでの水計測データだけでなくシステム評価のための新たな評価技術が必要になってくる。水処理の課題を食糧問題およびエネルギー問題と包括的に解決する考えが米国を中心にFood-Energy-Water Nexusという概念で提唱されている。この技術革新で特に分離精製技術 (水処理、エネルギー回収、栄養分回収など多くの用途に使用される膜技術や吸着剤) や微生物制御技術を中心に分析技術が重要な役割を果たすと考えられる。ウイルスや細菌の迅速検出、分析対象物を限定しないnon-target analysis、細胞応答を利用したバイオアッセイなどの計測技術の発展と、それらをICTやAIを用いてリスク評価やシステム制御に展開することが重要である。また、微生物制御技術における計測技術の重要性も高まってくると予想され、バイオガス (メタン、水素等) 生成だけでなく有価物への変換のプロセスモニタリング技術、膜技術の障害となるバイオフィアウリング*1の解析・制御等に繋がる新計測技術に期待がかかるところである。

*1: バイオフィアウリング: 菌体由来物質が、水処理などに用いられる膜を目詰まりさせる現象

オープンイノベーションへの期待

上述したように今後の水処理・水管理においては、水計測技術は水処理システムの総合評価として機能することが求められており、計測技術の専門家だけでは打開できない内容も含まれてくる。また、下水の再利用技術を例に挙げると、環境衛生やヒトへの甚大な被害を及ぼす可能性が懸念される新たな処理技術や社会変化で発生する新規有害物質や新種ウイルス・微生物への懸念に対する適切なリスク評価法が無い中、その生体影響評価の構築には社会科学的な視点も必要になる。さらに、今後の少子化等の対応で世界的にも分散型水処理システムが推進されていくと予測されているが、水の安全性や性状を把握するための評価技術には、より簡便かつ安価な技術が期待される。膜を多用する水処理技術においては膜破断や閉塞をリアルタイムに検知する新たなセンシング技術の開発も求められるが、ここでも異分野融合のコンセプトは成功の秘訣になろう。廃水処理を従来の水プラントの概念から、新たにエネルギー製造プラント、栄養分製造プラント、水製造プラントとして捉え直す方向性においても、同様のコンセプトは求められる。この観点のもと、その技術革新を求める手法としてオープンイノベーションの果たす役割はますます高まっていると言える。

近年、国内外を問わず技術を広く取り込むことがますます重要となっており、オープンイノベーションに対する期待が高まっている。世界の製造業がいち早く「自前主義・抱え込み主義」を脱したのに対して、日本は「オープンイノベーション」はなかなか進展していないように見受けられる。今後、水の水計測分野はオープンイノベーションを進める上で有利な立場にあるのではないかと思う。外部資源を巧く活用してイノベーションを主導するためにはコーディネータと言われる人材の役割もますます重要になってくる。

おわりに

今後の世界の水関連技術について俯瞰してみると、環境負荷低減や慢性的水不足対策の技術だけでなく、創エネルギー的な視点の技術開発の重要性が見えてくる。新たな水技術の開発に伴い、今後取り組むべき課題として、水の水計測に関する領域だけでも多くのテーマがあり、これらに関わる技術は多分野にわたることから、オープンイノベーションを取り入れた開発に期待がかかることである。

繰り返しになるが、ICTやAIにより最適化された(水のビッグデータを適切な水管理にフィードバックするための技術開発)分散型水利用システムの構築、毒性物質やウイルス／微生物の水質リスク評価手法の開発、PPCPs等、微量化学物質の処理系内での挙動解明や迅速生体影響試験法の研

究開発、など多くの課題が水計測分野には残されている。

参考文献

- [1] 平成28年度特許出願技術動向調査報告書(概要)水処理, https://www.jpo.go.jp/shiryoku/pdf/gidou-houkoku/h28/28_11.pdf
- [2] <http://www.jst.go.jp/crds/report/report02/CRDS-FY2016-FR-03.html>
- [3] 米国環境保護局(EPA), Comprehensive Surface Water Treatment Rules Quick Reference Guide: Systems Using Conventional or Direct Filtration. <https://www.epa.gov/dwreginfo/surface-water-treatment-rules>
- [4] 特許第3268447号(2002/1/18), 米国特許第6299844号(2001/10/9)
- [5] H. Yanagisawaら: Effect of sp2/sp3 ratio in a hybrid nanocarbon thin film electrode for anodic stripping voltammetry fabricated by unbalanced magnetron sputtering equipment. *Anal. Sci.*, **31**/7(2015), 635-641.
- [6] D. Katoら: Au nanoparticle-embedded carbon films for electrochemical As³⁺ detection with high sensitivity and stability. *Anal. Chem.*, **88**/5(2016), 2944-2951.
- [7] Y. Wakuiら: Solvent extraction of arsenic(V) with dispersed ultrafine magnetite particles. *Anal. Sci.*, **18**/7(2002), 793-798.
- [8] 特開2005-65535「微生物の特異的検出、同定及び/又は定量方法」
- [9] 産総研プレス発表, 極めて低濃度のウイルスを簡便に検出できるバイオセンサーを開発, http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2016/pr20161220/pr20161220.html
- [10] M. Kasunoら: An Evaluation of Sensor Performance for Harmful Compounds by Using Photo-Induced Electron Transfer from Photosynthetic Membranes to Electrodes. *Sensors* **16**/4(2016)438.
- [11] PCT/JP2013/075202「人工生物発光酵素」
- [12] 産総研プレス発表, 迅速に多くの検体を処理できる化学物質の有害性評価手法を開発, http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2016/pr20161226_2/pr20161226_2.html
- [13] 内閣府, 科学技術基本計画 <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html>