

macnica

2025 MET REPORT

Macnica Exponential Technology

タネのタネ

—マクニカの最先端テクノロジー探索



タネ●まく、
MACNICA

「MET REPORT～タネのタネ」 刊行にあたり



人類の歴史において、テクノロジーは何度も大きな社会変革を引き起こしてきました。最近でも、スマートフォン、SNS、そして生成 AI など、たった一つの製品・サービスの登場が、それまでの常識を変え、生活様式までも大きく変えてしまう。そんな破壊的ともいえるイノベーションが世界中で生まれ続けています。特に、“エクスポネンシャルテクノロジー”と言われる、加速度的な進化が起これと言われている技術分野では、日々激しい開発競争が行われています。我々マクニカは、50 年以上前に半導体を次世代の「イノベーションのタネ」と着目し、独立系専門商社として取り扱いを始めたときから、常に時代の先を見据え、タネをまき続けてきました。時には、まったく芽吹かず消えて行ったタネもありますし、5年育てていたらある日いきなり芽吹いて成長し始め、時代を席卷する製品・サービスとなったタネもあります。

我々のポリシーは、「ファーストペンギンであること」。新しい未来のタネを見つけたら、まずは触っていじって、何に使えるのかを考える。パートナーの皆さんと一緒に、実際に手を動かしながら実装に向け、あれこれ試行錯誤する。考えすぎて立ち止まる前に、まずは飛び込んでみる。そうやって、休むことなくタネをまき続けることが我々の使命です。昨今の、驚くべき速度で進化するテクノロジーについていくには、もっとずっと先を見ていくことだと考えます。そのため、我々は社内に、未来技術探索の専門チーム「Frontier Research Lab (フロンティアリサーチラボ: FRL)」を立ち上げ、まだ実現できるかもわからない「タネのタネ」を研究することになりました。我々は基礎研究機関ではありませんし、もちろん学術機関でもありません。ですが、技術商社としてこれまでお付き合いをさせていただいたパートナーの方々や、商社だからこそ得られている人的ネットワークを最大限に活用し、探索活動を続けています。時には、研究機関に資金源をご提供したり、ともに市場開拓を考えたり。

我々の FRL の活動は、社員一人一人の未来に向けての純粋な好奇心と探究心で支えられています。専門知識や学術的な知見はもちろん専門の方にはかないませんが、新しい技術を世に出すお手伝いをしたい、と願っています。

今回のレポートはその第一歩。私たちがいま気になっている4つのトピックスについて、探索してきたことをまとめて皆様にご共有する機会とさせていただきます。ここから、何か気になるタネのタネを見つけていただき、一緒に世に実装していきたいと思っています。いただければ幸いです。

株式会社マクニカ 代表取締役社長 原 一将

原 一将

INDEX

01	BIOTECHNOLOGY	バイオテクノロジー	04
	ぼくらのバイオジャーニー		04
	バイオプロダクションとは		05
	Metabolic Engineering15		05
	The Global Synthetic Biology Conference		05
	合成生物学での技術の進化と課題		06
	合成生物学での技術要素		06
	生物の持つ複雑系		08
	海外トレンド		08
	クローニング		09
02	FUSION ENERGY	核融合発電	10
	核融合発電とは		11
	主な技術構成		11
	核融合発電の課題		12
	実現時期の見通し		14
	スタートアップの動向		14
	研究現場訪問		15
	まとめ		15
03	QUANTUM COMPUTER	量子コンピューター	16
	量子コンピューターの基礎		17
	CPUおよびGPU量子シミュレーター比較実績		18
	まとめと今後の展望		22
04	ARTIFICIAL PHOTOSYNTHESIS	人工光合成	23
	水と太陽で「グリーン水素」を作り出す人工光合成の今と未来		24
	「環境でメシが食えるまち」を目指す飯田市のグリーン水素戦略		30

"OUR BIO JOURNEY"

ぼくらのバイオジャーニー

マクニカの未来技術領域の探求を目的に、Sustainable Techという広範なテーマのもとで様々なトピックを検討していました。バイオという広大な領域に対する我々の出発点は、合成生物学というキーワードにありました。人工的に生物を創出するという概念に興味を持ち、そこから我々のバイオテクノロジー分野への旅が始まっていました。この分野の世界観や社会的変革の可能性、さらにはマクニカの将来の可能性という観点から、調査を進めることに決め、探求がスタートしました。この領域は、我々にとって完全に未知の領域であり、何をどこから始めるべきか手探りの状態で調査を進めました。

当初、Web上にある情報をたどったり、マクニカUS拠点が持つVC等との関係を活用したりしながら、日本国内側の経済産業省、NITE(製品評価技術基盤機構)、JST(科学技術振興機構)等とのつながりを作っていました。

その後、さらに理化学研究所、神戸大学、東京工業大学(現:東京科学大学)、東北大学、国内・海外スタートアップ等とつながりを広げたり、代謝工学関連の学会に参加したりしながら、多くの先端的な研究者と議論を重ねていきました。その中で、海外におけるこの分野への投資や盛り上がりを感じる一方、国内では先進的な研究者になかなか出会う事ができず、海外と国内の勢いにギャップを感じながら調査を進めていきました。

2023年のCES(Consumer Electronics Show)では、DNAストレージの技術を持ったスタートアップ企業に出会い、マクニカの主催するテクノロジーイベント(MET2024)にご招待し、未来の技術として紹介しました。

このように海外の学会や先進的なイベントに参加する中で、業界全体の技術的課題について理解を深めてきました。本レポートでは、我々のバイオジャーニーから得た知見の一部として、微生物発酵を利用したバイオものづくりについてレポートをまとめます。

DNAデータストレージを開発するBioSistemika社のTomaž Karčnik氏とMET2024にて
(2024-11-27、マクニカ撮影)



探索リーダー

株式会社マクニカ
Frontier Research Lab
Senior Researcher

栗本 欣行



バイオプロダクションとは

バイオプロダクションとは、人工的に生物から有用な物質を創出する技術です。微生物や植物の生命活動の原理である酵素や代謝を利用することにより、これまで化石燃料で生産されてきた様々な素材を生み出すことができます。現在ではプラスチック原料、食品添加物、ジェット燃料、香料、染料、肥料、農薬等の生産に応用が進められています。

バイオプロダクションでは細胞の遺伝子を編集することで、微生物の生命維持活動の基盤となる餌となるものの吸収と生物における化学反応である「代謝」を意図的に変更し、目的物質の吸収および有用化合物の生産を生物が行えるようにします。

「代謝」は生物内においての化学反応を指しますが、実際には酵素を触媒にした反応(酵素反応)を通してエネルギー

の生成や、細胞を構成する重要な物質の合成等が行われます。同時に生命活動には不必要な物質も生成されることもあります。これらの連鎖的な化学反応を代謝経路と呼びます。

バイオプロダクションでは、ターゲットとなる物質を生み出すための代謝経路を設計していくことになりますが、不必要な物質が反応を阻害したり、特定の環境条件でしか反応が促進できない場合もあります。生物を媒体とするが故に、まだ解明されていない振る舞いをすることもあります。

このようにバイオプロダクションを用いて、目的の有用な物質を安定的に大量に生産するためには考慮すべき点が多くあり、実用化に向けて世界中で様々な取り組み、議論が行われています。

Metabolic Engineering15

バイオプロダクションに関わる世界的なカンファレンスであり2023年にシンガポールで開催されたMetabolic Engineering15に参加してきました。

グローバルから700名の研究者が参加し各大学や研究機関の発表のほか、CO₂を微生物の代謝活動の栄養源と

してアセトンやイソプロピルアルコールを生成することによって、従来の石油由来の生産プロセスからのCO₂ネガティブでの生産プロセスを実現可能なLANZATECHの発表などバイオプロダクション市場拡大に向けた盛り上がりを感じたイベントでした。



Metabolic Engineering15の様子
(2023年6月11日、マクニカ撮影)



Metabolic Engineering15の様子
(2023年6月14日、マクニカ撮影)

The Global Synthetic Biology Conference

サンノゼで例年開催されるThe Global Synthetic Biology Conferenceにも参加してきました。2024年での特徴的な発表としてはGINKGO BIOWORKS Data As a ServiceとNVIDIAのBIONEMOとのコラボレーションや、気候変動、Food & Agritech、テキス

タイルなどへのアプリケーション適用に向けた議論、各国の将来的なレギュレーション対応などの発表、DNA CAD、DNA合成など開発プロセスに貢献が期待される新たなツールベンダの展示もあり市場の盛り上がりを感じられました。



The Global Synthetic Biology Conferenceの様子
(2024年5月8日、マクニカ撮影)

The Global Synthetic Biology Conferenceの様子
(2024年5月8日、マクニカ撮影)

合成生物学での技術の進化と課題

CRISPR-Cas9に代表されるゲノム編集技術によって、微生物から様々な物質をつくることを目指してきた合成生物学においては、1990年代後半から生物内のそれぞれのシステムを理解する学問であるシステムバイオロジーを追求していくことで、その目的が達成できると考えられました。

次世代シーケンサ(以降NGS)の登場により遺伝子機能解析が進み、それぞれでの遺伝子がどのような機能を担っているのかの解明が急速に進展しました。また遺伝子の発現量を分析するトランスクリプトームでもNGSの出現により2000年前後で解析が大きく進展しました。その後、2005年頃からのプロテオームでのタンパク質解析、メタボロームでの代謝産物レベルの解析、フラックスオームでの代謝反応速度の解析、生物学と化学の双方の分野を組み合わせたバイオケミストリーの研究が

進みました。それぞれの分析や解析手法は、生物が対象であるが故に頻繁にダイナミックな変化が起こり、遺伝子発現から実際の代謝反応まで複数の階層に影響を与えるため研究分野間での相互の関連を横断的に分析するマルチオミクスの考え方により進化が進んでいきました。

これらの研究開発はDBTL(Design, Build, Test, Learn)と呼ばれ、それぞれのプロセスをAIやロボティクスにより効率的に行うことで生命現象の解明に役立てられると考えられていましたが、現時点では新たに複雑系と呼ばれる生命現象として、まだ解明されていない領域での研究が必要であることがわかってきています。

合成生物学での技術要素

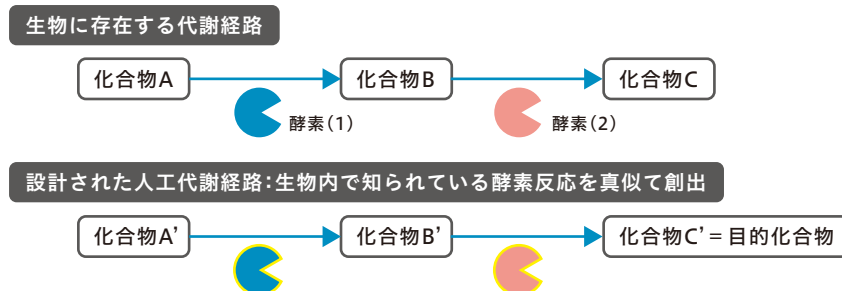
Design : 合成経路設計

目的物質、例えば石油由来のなにかの化学製品を新たに微生物由来で生産する場合には、自然界での生物の代謝経路を参照し目的物質が生産できるようにするための人工的な代謝経路を設計する必要があります。

自然界に存在しない代謝経路を実現するために、新たな酵素を遺伝子レベルから作成し、目的物質にたどり着くための合成経路を導入します。経路の選択においては反

応ステップ数の少なさや各ステップごとの収率、反応速度が高い経路を選択する必要があります。

また、代謝産物の活用領域が多い重要な経路は権利化されるため、バイオプロダクションを実現したい企業は権利を保持している企業に協力を委ねる事が必要となります。



Build：酵素開発

新たな合成経路の導入のためには、経路に則した目的化合物へと化合物を変化させる酵素反応を創出する必要があります。

モデルとなる自然界に存在する酵素を構成するアミノ酸の一時配列情報を参考にして、目的化合物の形状に適した新たな酵素形状を作るための遺伝子配列を設計します。

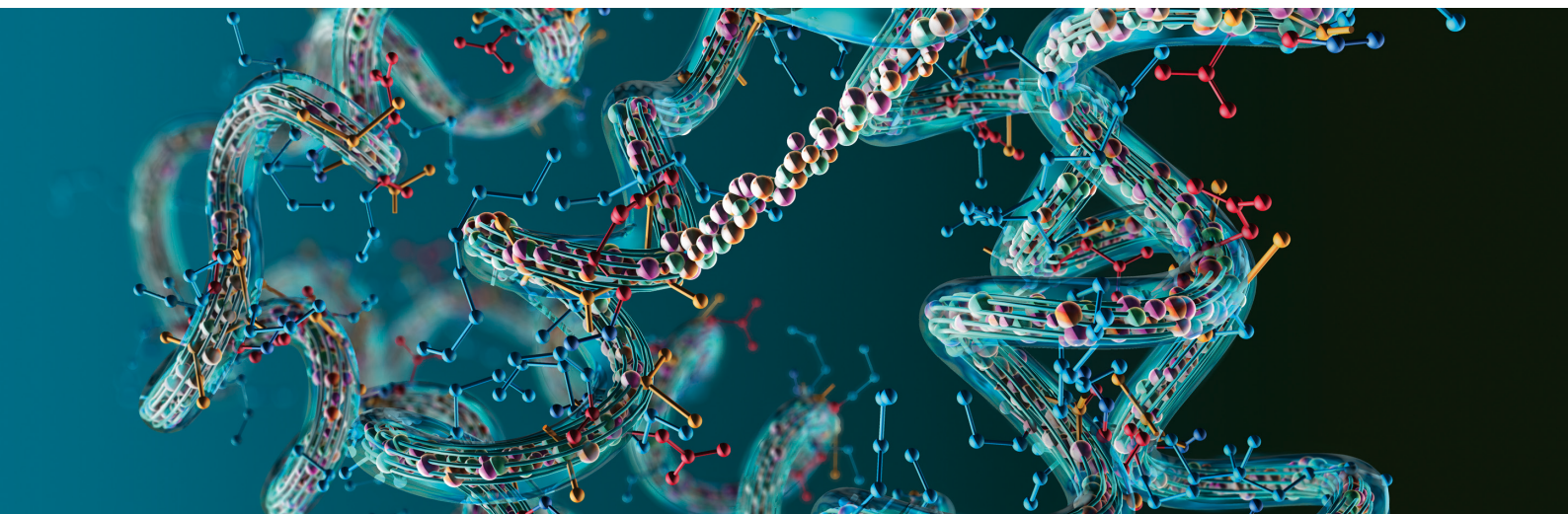
その際、リファレンスとなる自然界に存在する酵素の情報源として、過去に研究された論文やデータベースを頼ることがありますが、データベース作成時でのそれぞれの実験条件が異なる場合があるため、必ずしも研究開発に有効なデータとならないことがあります。

新たな酵素の開発には数百万から数千万通りの遺伝子

配列の組み合わせを試す必要がありますが、優先順位を付けるためには研究者のノウハウに依存しているのが実情です。

また、非生物試験となる試験管内での実験結果をもとにして、作成した人工酵素を導入する宿主となる微生物（シャーシ）によってもそれぞれの特性や酵素活性に差が生じます。

酵素自体の遺伝子配列の組み合わせと、設計された酵素とシャーシとの組み合わせによる反応特性の違いにおいても、それらを理解するための解析がまだ達成されておらず、酵素開発フェーズ内でもDBTLのサイクルが存在しています。



TEST：試験

設計した経路や必要となる酵素を微生物に導入した後は、フラスコや小規模のジャーファーマンターを用いてテストをおこないます。

テストには数日程度連続での発酵をおこない、試験中ガスクロマトグラフ、高速液体クロマトグラフによる代謝産物の分析が進められます。

分析にはリアルタイム性があるほど反応に対する原因分析が可能となり、微生物の反応に応じた微生物への最適な環境変化の把握につながりますが、通常的气クロマトグラフィーによる分析では気体を集めるための水上置換が必要であり作業者のいない夜間のデータ収集が困難であることから、水上置換の要らないリモートセンシングによって分析の高度化の余地があります。この課題に対してマクニカでは東北大発のスタートアップであるBallwave社の超小型ガスクロマトグラフ

の実証実験を理化学研究所のご協力により2025年に実施しました。この実験では非侵襲で微生物の代謝情報を取得できる可能性が示唆され、今後のバイオプロダクションにおける分析効率や生産性向上に期待できます。

実験での小型の設備から量産時には大規模な設備に移行していきます。規模の違いにより微生物にとっての環境条件が異なるために収率に大きな影響を与えることも大きな課題となっています。このためシミュレーション技術の活用が期待できますが、機構的な流体シミュレーションを提供する企業はあるものの、微生物の特性に関するデータセットが存在しないため、環境条件の異なる条件下での微生物自体の動態シミュレーション技術はまだ確立されていないのが現状です。

生物の持つ複雑系

生命科学の分野では、細胞の状態を詳しく調べる技術が大きく発展してきましたが、細胞内や細胞間の複雑なつながりや働き、エコシステムとしての活動については今後解明していくべきテーマの一つと考えられています。合成生物学の進歩により遺伝子を操作して新たな代謝産物を生成するためのDesignやBuildをする技術は進展してきましたが、自然界と比較した場合は、ペニシリン生産菌やアミノ酸生産菌のように、生物が本来持つ生命活動の能力を保ちつつ目的の化合物を高生産する菌と同等の生産能力は実現できておらず、生物活性と生産能力二つのバランスを保つ“複雑系”の仕組みの解明には研究自体のアプローチ検討が必要な段階です。

海外トレンド

バイオテクノロジーのトレンドの大きなターニングポイントとしては、2020年にCRISPR-Cas9という合成生物学の革新的なゲノム編集技術を開発した二人の研究者がノーベル化学賞を受賞したことで、世界的に注目されたことが挙げられます。この技術は、新型コロナウイルス感染症の診断や治療薬開発においても注目された技術です。

合成生物学が社会的信頼を徐々に得ることで、より広い領域での適用が期待されるようになり、世界中の投資家が新たなイノベーション投資領域としてバイオテックに注目することになりました。とりわけ2020年～2021年は、次の産業革命の鍵となる分野としての期待から、世界中で巨大な投資が行われたと言われています。(2021年で約US\$72B。Crunchbase newsから)

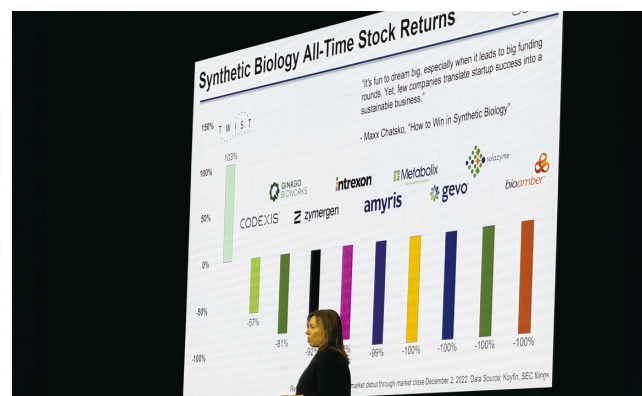
スタートアップからIPOを果たすバイオテック企業も年間100社を超え、Ginkgo Bioworks、Zymergen、Amyrisといった企業などは次世代のメインプレイヤーとの期待から膨大な資金と人材を獲得しました。医療、食品、農業といった従来の領域のみならず、環境エネルギー、モノづくりなど適用領域は拡大し、また研究開発プラットフォームや製造委託まで、エコシステム全体を支える産業基盤となる新たなプレイヤーも登場しました。

しかし、2022年～2023年にその勢いに一旦ブレーキがかかります。バイオバブルによって急激に膨張した企業が、その後持続的な成長を見せることに苦しみ、上場した企業も軒並み株価は低迷し、その後事業売却や人員削

“複雑系”とは、細胞の中で多くの要素が複雑に関係しあっているシステムのことで、何が結果に対する説明変数なのかが解明されておらず、今後の基礎研究による解明が望まれています。またこの領域にも小規模設備と大規模設備での環境条件の影響が生じるため小規模設備で得られた結果が必ずしも大規模設備に活用できるとは限らないといった難しさもあります。

説明変数が解明されていないためAIやロボットが複雑系解明への直接的な解決手段にはなっていませんが、基礎研究アプローチと急速に進展しているAIやロボット技術との継続した技術活用すり合わせが期待されます。

減のニュースが続くことになります。いわゆるGartner社のHype Cycle(※)における、誇張期の後にやってくる失望期が到来したと考えられます。その傾向は、我々が今年5月にシリコンバレーにて参加したThe Global Synthetic Biology Conference(by Synbiobeta)でも肌身で感じられました。しかし、そのような中で確実にこの業界の新たな標準として見えたのは、AI、生成AI、自動化などのテクノロジーの積極活用による進化です。生物学というまだまだ未開の地における膨大なデータ分析や知識化をAIや自動化のテクノロジー基盤で差別化していくことで、新たな勝ち筋が見えてくることが感じられました。Alphabet(DeepMind)、Microsoft、Meta、NVIDIAのような巨大テクノロジー企業もバイオテック業界での存在感を高めてきており、2024以降バイオテック業界への投資はまた堅調に成長を始めています。



The Global Synthetic Biology Conference 2025の様子
(2025年5月6日、マクニカ撮影)

また、今年7月末に意見交換をさせて頂いたマサチューセッツ工科大学で合成生物学や化学工学を研究されているKristala L. Prather教授は、経済合理性が持続的に成り立つビジネスモデルの確立がバイオテクノロジー企業にとって重要である、とおっしゃっています。ニッ

チであっても高付加価値性があり、そして変化への受容性が高い市場からバイオベースプロダクトは受け入れられていくと予測されており、そこにもまた今後の同業界の成長のカギが一つあると考えられます。

クロージング

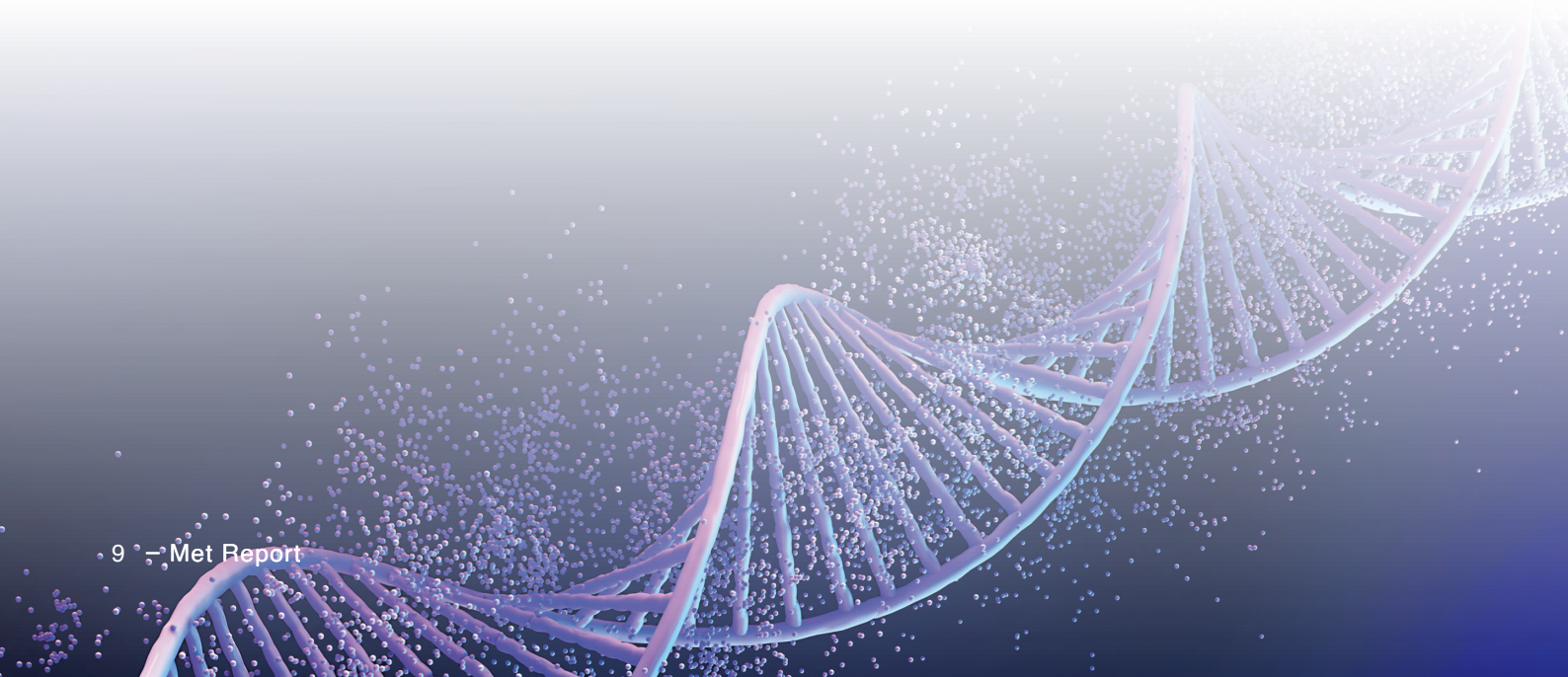
バイオプロダクションの数年前の期待値から現状でのトーンダウンの変化は、新たなテクノロジーが時間ごとでどのような期待値をたどるのかを表すHype Cycleに当てはまるのではないのでしょうか。

現状のバイオプロダクションはHype Cycleで定義されるtrough of disillusionment(幻滅の谷)を超えることが新たな成長につながるはずであり、新たな課題である複雑系の解明など技術要素のブレイクスルーが必要となります。過去に文科省が進めたタンパク3000プロジェクトによる約3000種のタンパク質の立体構造及びその機能解析をはじめ、これまでの数々の研究データや知見が現在ではアルファフォールド(DeepMind社)のAIによるタンパク質構造予測の礎となっており、合成生物学においても酵素設計での従来の研究プロセスを

大きく短縮するブレイクスルーとなっています。この事例のように、バイオテクノロジー企業と日々進化するAI、ロボット、半導体技術など先端テクノロジーとドメイン特有の課題のすり合わせ、相互からの歩み寄りを継続し個々の技術解決要素を見つけていくことが次のステップへの重要な活動となります。

また、従来大規模生産、低コスト化を実現している石油由来の製品の代替品生産以外にも新たなバイオテクノロジーが実現可能なニッチエリアのユースケースを開拓し、小さな市場から技術革新を成長させていくことでイノベーションのジレンマ(Clayton Christensenにより提唱)によって提唱される破壊的イノベーションが実現されバイオプロダクションの適応領域と裾野の拡大が実現していくことを期待しています。

※「Hype Cycle(ハイブ・サイクル)」はGartner, Inc.の登録商標であり、技術の成熟度と期待値の変遷を示す分析モデルです。



"FUSION ENERGY"

核融合発電

近年のAIの進歩には目を見張るものがあります。実用面での飛躍的な向上は様々な業界での導入を促進し、利用範囲は拡大しています。AIの活用によるプロセスの自動化やデータ解析の需要増により、膨大な計算能力を要求されるAIモデルやシステムの運用は、電力消費が急増する主要因の一つになっています。将来に渡って電力需要の大幅な拡大を既存の発電方式だけで賄うのはとても困難な状況です。現在の主流である化石燃料発電や原子力発電、さらに再生可能エネルギーは、それぞれに利点を持つものの、急増する電力需要を全て賄うには柔軟性や規模に限界があります。化石燃料の使用は気候変動や環境汚染の問題を悪化させ、原子力発電は長期的な廃棄物管理の課題を抱えており、再生可能エネルギーは天候に左右される不安定な供給を伴います。

このような状況で、私たちは、持続可能かつ大量のエネルギーを効率的に供給できる新しい発電方式として期待されている核融合発電に注目して調査を始めました。核融合発電は、太陽と同じプロセスによりエネルギーを生成するものであり、そのプロセスでは、重水素と三重水素を用いて極めて高温高圧の条件下で融合させます。この方式は発電時に二酸化炭素を排出しないため、環境への負荷を大幅に低減します。また、核融合の燃料である重水素は海水を基にしており、理論的には大量供給が可能であるため、電力供給の安定性も確保することができます。核融合発電は、その持続可能性と供給能力の点において他の発電方式と一線を画しています。また、核エネルギーを利用しますが、放射性廃棄物の生成を必要最小限に抑えることができ、長期的な観点からも地球環境に優しい選択肢となります。AIの発展による新たなエネルギー需要に応え、さらなる技術進化に伴う電力増加にも対応可能な技術であるという側面から、核融合発電の実現は社会の持続可能な成長の鍵となるでしょう。

この技術が確立されれば、未来のエネルギー問題を根本的に解決し、安全で効率的なエネルギー供給の実現をもたらすことになるはずです。

探索リーダー

株式会社マクニカ
Frontier Research Lab
Senior Researcher

畠山 義秀



核融合発電とは？

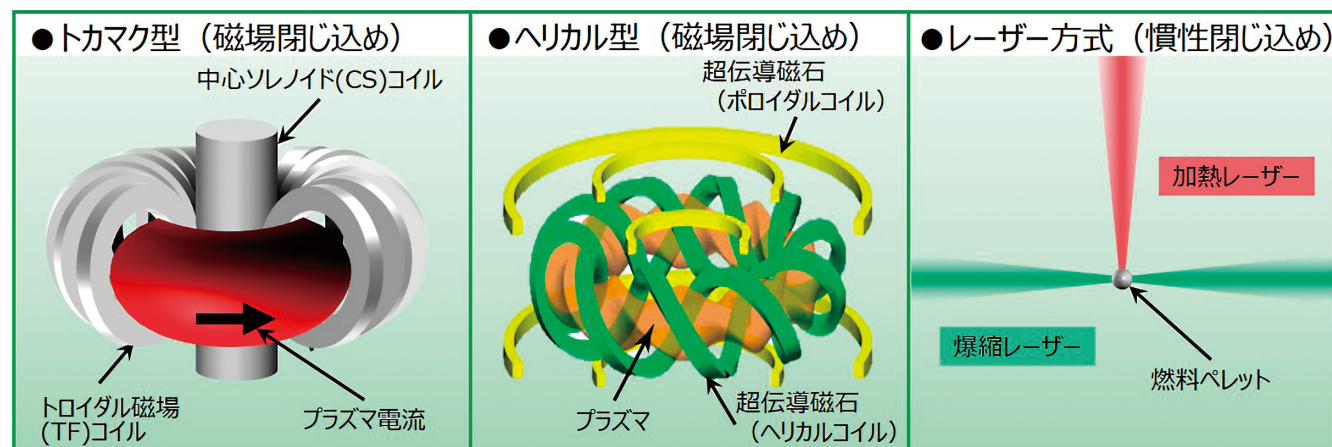
核融合発電は、太陽のエネルギー源と同じ核融合反応を利用した発電方式です。水素の同位体である重水素と三重水素を高温・高圧の状態では結合させると、より重いヘリウムと大量のエネルギーが生まれます。このエネルギーを熱に変えて蒸気を作り、タービンを回して電気を

生成します。燃料は海水から取り出せる水素で、資源の枯渇を心配する必要が少なく、二酸化炭素の排出もありません。安全性が高く、持続可能なエネルギー源として期待されています。

主な技術構成

■ 核融合反応方式

核融合反応方式には主に4つのアプローチがあります。



核融合反応を起こす方法（主な3つの方式）（出典：文部科学省「核融合研究」(https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/019.htm)）

01：トカマク方式

トカマク方式では、Dの形をしたコイルを円状に並べ、コイルの中にドーナツ状の磁場を発生させます。さらに、ドーナツの中心にあるコイルでプラズマに誘導電流を流し、誘導電流によりドーナツの断面を回るような磁場を発生させます。これら2つの磁場の重ね合わせによりねじれた磁場を形成し、プラズマを閉じ込めます。ちなみに、誘導電流を半永久的に流すことは現実的に不可能であるため、プラズマを長時間閉じ込めるためには、加熱装置を使用して電流を流し続ける必要があります。

02：ヘリカル方式

トカマク方式と同様に、ドーナツ状のねじれた磁場でプラズマを閉じ込めますが、磁場を作るために、ヘリカルコイルというねじれたコイルを使用します。複雑な形状のコイルであるため製作の難易度が高い一方、運転時にはプラズマに電流を流す必要がないという特徴があります。トカマク方式と比べると、長時間の運転を得意としますが、プラズマを閉じ込める性能に課題があり、研究が進められています。

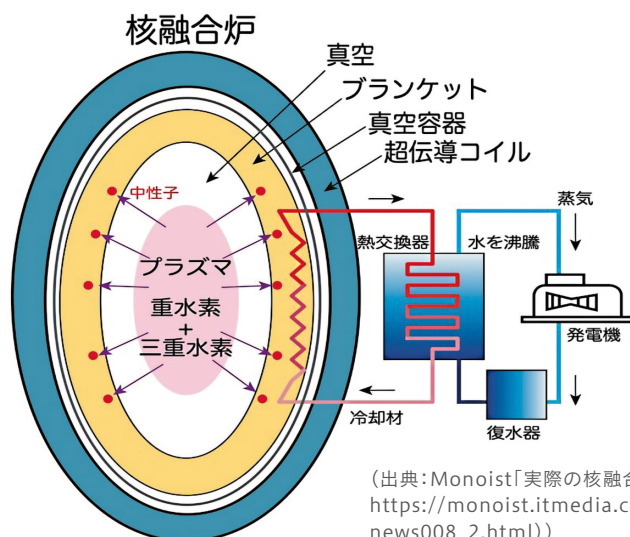
03：レーザー方式

強力なレーザーを、燃料を封じ込めたペレットに照射し、爆縮を起こして核融合反応を発生させます。爆縮とは、極めて強力なレーザーを10億分の1秒程度というごく瞬間的に燃料ペレットに当て、表面を爆発的に蒸発させ、その爆発的な圧力でペレットに封じられた燃料を瞬時に圧縮させるという現象です。この圧縮された燃料がレーザーにより瞬時に加熱されることで、超高温、超高圧となり、核融合反応が起こります。レーザー方式は、核融合反応を瞬時に引き起こすことができ、エネルギーの非連続的な生成が可能です。しかし、高いコストと技術的な難しさがあります。

04：その他の方式

その他のアプローチには、磁場を使用しない直線型加速器による核融合や、高温超伝導体を活用した新しい容器設計などがあります。また、プラズマを直接加熱する方法や、スフェリカルトカマクと呼ばれる新しい形状の炉なども研究されています。これらはまだ実験段階ですが、将来的には新しい技術の発展につながる可能性があります。

■ 熱を電力に変換する方法



図は、核融合発電の仕組みを模式的に表したものです。重水素と三重水素が核融合反応を起こすと、高速の中性子とヘリウム原子核が発生します。ヘリウムはプラズマ中にとどまりプラズマを加熱しますが、中性子は磁場の影響を受けないためプラズマから飛び出し、プラズマを完全に覆うブランケットと呼ばれる壁にぶつかります。これにより、中性子は減速し、その運動エネルギーが熱エネルギーに変換され、ブランケットの温度を上げます。ブランケットの温度は350℃から900℃にまで上昇します。ブランケットには冷却材が流れ、外部の熱交換

器へ熱エネルギーが輸送されます。冷却材としては、いくつか候補がありますが、リチウムを充填して、中性子と衝突させることで、核融合に必要な三重水素を生産することが可能になります。

その後、蒸気タービンに送られ、タービンのブレードを回転させます。タービンの回転運動は、発電機に伝達され、機械的エネルギーが電気エネルギーに変換されます。これが、核融合によって生成された熱エネルギーを直接電気に変換することが可能になります。

核融合発電の課題

核融合発電の実用化には、主に以下の課題を克服する必要があります。

01：核融合反応の安定的な継続

核融合反応に必要な高温プラズマの安定維持が極めて困難です。プラズマが炉壁に触れると不純物が発生し、プラズマ性能が低下します。また、プラズマ内部の乱流により熱や粒子が外部へ逃げ、温度が急冷されて反応が維持できなくなるため、プラズマを安定的に閉じ込める技術の確立が不可欠です。

02：連続稼働

現在の実験炉は数秒から数分の「パルス運転」が主流ですが、実用炉では連続的な発電が求められます。連続運転には、以下の課題を克服する必要があります。

■ 熱負荷の連続的な除去

核融合反応で発生する膨大な熱を効率的に除去し、炉壁の健全性を維持する仕組みが必要です。

■ 燃料の連続供給と排気

燃料(重水素とトリチウム)の途切れない供給と、反応生成物や未反応燃料の連続的な排出・再循環システムが必要です。特に放射性物質であるトリチウムの効率的な回収・再利用は重要です。

■ 材料の耐久性

高エネルギー中性子照射、高温、プラズマからの熱流束といった過酷な環境に長時間耐えうる、長寿命で耐熱性に優れた新材料の開発が不可欠です。

03：エネルギー収支

投入したエネルギーを大きく上回る熱エネルギーを取り出す「Q値」の向上が最大の課題です。

■ 自己点火の実現

核外部からの加熱なしに、核融合反応自身の熱でプラズマ温度を維持できる「自己点火」状態の達成が目標です。Q値が低いと常に外部加熱が必要となり効率が低下します。

■ 発電効率

核融合炉で得られた熱は電気に変換されますが、その効率は約30～40%と低いため、十分な発電量を得るには高いQ値が必要です。

■ 炉の運転維持

炉の運転にはプラズマ加熱だけでなく、冷却、真空排気、燃料供給、安全システムなど、様々な付属機器の電力を賄う必要があります。これらを賄いつつ売電するためには、発生エネルギーが消費電力を大きく上回る必要があります。商用発電所としての経済性を確保するには、Q値が20～30以上が目安とされており、国際実験炉ITERの目標であるQ=10は、あくまで科学的・技術的実現可能性を示すための通過点に過ぎません。

04：材料や装置の開発

炉壁には10MW/m²もの熱負荷がかかるため、耐熱性に優れた材料が必要です。また、高エネルギー中性子による装置損傷を防ぐため、高温・強い放射線下で長期間稼働できる新材料や超伝導コイル、高出力加熱装置、大型冷却系などの新技術開発が求められます。

05：プラントシステムの統合

核融合炉は超伝導磁石、加熱装置、真空容器、ブランケット、冷却システム、燃料供給・排気システム、遠隔保守システムなど、巨大で複雑なコンポーネントで構成されます。これらを「一つの発電所」として調和させて運転するシステムインテグレーションが不可欠です。システム間の統合制御、運転モードの最適化、信頼性と安全性の確保、高いメンテナンス性と稼働率の実現が求められます。

06：トリチウム製造循環

核融合反応に必要な高温プラズマの安定維持が極めて困難です。プラズマが炉壁に触れると不純物が発生し、プラズマ性能が低下します。また、プラズマ内部の乱流により熱や粒子が外部へ逃げ、温度が急冷されて反応が維持できなくなるため、プラズマを安定的に閉じ込める技術の確立が不可欠です。

07：資金調達やスケジュールの遅延

国際実験炉ITERの建設は、資金や技術的な問題により、当初の予定より大幅に遅延しており、建設費用も数兆円規模に増大しています。商業炉の実用化にはITERのさらに先にDEMO炉の開発が必要であり、少なくとも数十年単位の長期計画となるため、安定した資金調達と計画的な開発が不可欠です。

これらの多岐にわたる課題を解決し、核融合発電を実用化するには、国際的な協力と継続的な研究開発が求められます。



実現時期の見通し

実用化の時期については楽観論から慎重論まで幅広い見通しがあります。

■ 楽観シナリオ

多数のスタートアップが2030年代前半までに商用原型炉を実現すると予測しています。核融合産業協会（FIA）報告でも「2030年代での実用化ペースは維持できる」という認識が示されており、一部企業は10年程度での実証炉実現を目指している。技術的なブレイクスルー（高温超伝導磁石や高効率プラズマ加熱など）が相次げば、2040年代には実運転可能な発電所が出現する可能性があります。

■ 中立シナリオ

ITERをはじめとする国際プロジェクトの進捗通り、まずは2030年代後半に原型炉（DEMO）レベルの検証機が完成し、その後2040～2050年代に商用原型炉が建設される見込みです。資金や国際協力が順調なら、2050年頃に小規模な電力網連系が可能となります。

■ 慎重シナリオ

科学的・工学的難題やコスト問題によりさらに遅延し、2040年代では概念実証止まり、初号炉は2050～2060年代後半にずれ込みます。多くの専門家は少なくとも2050年頃までは大規模な電力供給源とはならないと見ており、気候変動対策には間に合わない可能性が高いとの指摘があります。

スタートアップの動向

■ Alpha Ring

Alpha Ring は、独自技術である「電子触媒融合（ECF: Electron Catalyzed Fusion）」に基づく革新的な核融合エネルギーシステムを開発しています。

従来の核融合反応では、原子核同士の静電反発（いわゆるクーロン障壁）を克服するために、1 億℃を超える極高温および強力なプラズマ閉じ込めが要求されます。これに対しAlpha Ring のアプローチでは、高密度ホウ素と電子放出を組み合わせることで電位差を制御し、このクーロン障壁を大幅に低減。結果として、数千℃レベルの比較的低温・低エネルギー条件下でも安定した核融合反応を実現可能としています。

特に注目すべきは、陽子-ホウ素（p-B）融合反応がアンニュートロニック（非中性子）反応であり、反応過程で中性子や放射性廃棄物がほとんど発生しない点です。これにより、極めて高い運用安全性が確保されると同時に、放射線対策や廃棄物処理に係るインフラやコストを最小限に抑えることが可能となり、今後の規制適合性においても明確な優位性を持ちます。

Alpha Ring の技術は、構成モジュールの標準化と小型

化により高いスケーラビリティを実現しており、メガワット級の大規模発電用途から、キロワット～マイクロワット級の産業用熱源、オフグリッド電源、災害対応用電源、離島向け分散型電源まで、非常に広範な応用が可能です。

また、同社は教育用イオンビームシステム「Alpha-E」も展開しており、大学・研究機関における核融合技術の実験教育に貢献しています。これにより次世代の研究者・技術者の育成を支援するとともに、核融合技術全体の社会的認知向上にも寄与しています。加えて、「Fusion-as-a-Service」では、遠隔操作による融合実験の実施が可能であり、ユーザー間での研究成果の共有や技術的インサイトの交換を促進するプラットフォームとして機能しています。

コンパクト、高効率、安全性を兼ね備えた Alpha Ring の技術は、従来の大規模・高コスト型核融合プロジェクトとは一線を画しており、独自の市場ポジションを確立しつつあります。

nT-Tao

nT-Tao は、クリーンで安全な分散型電力として 20MW を発電することを目的に、コンパクトかつ高密度な磁気閉じ込め核融合システムを開発しているイスラエルのディー・プテック・スタートアップです。従来の大型トカマクとは異なり、nT-Tao のパルスモード炉は直径約 3 メートルの小型トロイダル設計を採用し、最大で従来の 1,000 倍のプラズマ密度を実現。これにより、迅速な研究開発、低コスト、スケーラブルな展開が可能となります。熱交換器やタービンを含む完全統合型システムは、船舶輸送、データセンター、産業施設などへの応

用が想定されています。燃料には重水素と三重水素を用い、プラズマを高度なパルス制御によって 100 百万度以上に加熱します。nT-Tao は、プリンストン大学、MIT、マックス・プランク研究所、テクニオンといった世界的研究機関と協力しています。オデッド・グール＝ラヴィ氏を中心とした経験豊富な物理学者・技術者チームが率い、2030 年代半ばの小型核融合の商業化を目指し、グローバルなクリーンエネルギーのリーダーを目指しています。

研究現場訪問

土岐核融合科学研究所

岐阜県土岐市の核融合科学研究所 (NIFS) は、世界最大級の大型ヘリカル装置 (LHD) を有し、磁場閉じ込め核融合の最先端研究を担っています。LHD では超伝導ヘリカルコイルが三次元磁場を形成し、自己駆動電流を必要としない定常的なプラズマ閉じ込めを実現します。これまでに中心イオン温度 2000 万度、48 分間の長時間プラズマ保持に成功しており、乱流輸送の抑制やネオクラシカル輸送理論の検証が進展しています。特に境界プラズマにおける粒子・熱の排出制御や、内部輸送障壁 (ITB) の形成機構など、閉じ込め性能向上に直結する現象解明を進めています。一方、核融合実現には高エネルギー中性子に晒されるブランケットや第一壁の材料開発も不可欠であり、中性子照射による構造材の損傷等の課題への対応が求められており、NIFS では、大学・企業との産学連携によって、新たな耐照射材料や冷却技術、被覆膜開発が進行中です。さらに、AI を活用したプラズマ状態のリアルタイム制御技術も実験に導入され、複雑な運転条件でも最適なプラズマ制御が実現されつつあります。プラズマ物理、材料科学、シミュレーション、計測・制御工学等の様々な分野の研究が融合し、核融合の実現に向け着実に歩みを進めていると言えます。

ギー中性子に晒されるブランケットや第一壁の材料開発も不可欠であり、中性子照射による構造材の損傷等の課題への対応が求められており、NIFS では、大学・企業との産学連携によって、新たな耐照射材料や冷却技術、被覆膜開発が進行中です。さらに、AI を活用したプラズマ状態のリアルタイム制御技術も実験に導入され、複雑な運転条件でも最適なプラズマ制御が実現されつつあります。プラズマ物理、材料科学、シミュレーション、計測・制御工学等の様々な分野の研究が融合し、核融合の実現に向け着実に歩みを進めていると言えます。



まとめ

核融合発電の実用化は、プラズマの安定制御、材料耐久性、連続稼働、およびエネルギー収支といった多岐にわたる技術的課題を克服することで、2040年代から2050年代の実用化が見込まれます。楽観的なシナリオでは

2030年代前半の商用原型炉実現も示唆されており、スタートアップ企業が主導する小型化・低コスト化アプローチは、既存の大型プロジェクトとは異なる市場を形成し、実用化を加速することになると考えます。

"QUANTUM COMPUTER" 量子コンピューター

量子コンピューティングの基礎および
GPUシミュレーションの実用性に関する技術調査と実験的知見

現在マクニカでは、次世代技術の調査活動として、量子コンピューティングに注目しています。この技術は、ChatGPTなどのLLMと同様に、将来的に世界を大きく変える可能性を秘めています。我々は、もともと量子コンピューティングに専門性を持つ組織ではありません。しかし、日本一の半導体商社として、量子ソフトウェアプラットフォームを提供するClassiq社と技術提携し、量子コンピューティング領域でのGPU活用をテーマに量子技術の習得を進めてきました。本記事では、「量子コンピューティングにおけるシミュレーターの必要性」と「量子シミュレーターにおけるGPUの有用性」を主なテーマとして我々の活動を通じて得られた知見を読者の皆さんに共有します。前述のとおり、我々自身ももともと量子の専門家ではない立場から本活動を始めました。そのため本記事では我々自身の実験結果や考察といった一次情報を除き、できる限り参考文献や引用文献に基づいて記述しています。より詳しく学びたい方や正確な情報を確認したい方は、ぜひ参考文献をご参照ください。

探索リーダー

株式会社マクニカ
Frontier Research Lab
Senior Researcher
高橋 峻



執筆者

株式会社マクニカ ネットワークス カンパニー
/CrowdANALYTIX Solutions Private Limited
Senior Engineering Specialist
井ヶ田 一貴



量子コンピューティングの基礎

■ 量子コンピューターの基本概念

国産量子コンピューターの研究開発を手がける産業技術総合研究所は、「量子コンピューターの定義」について30秒解説として次のように説明しています。

“量子コンピュータは、物質を構成する原子や電子などの「量子」の持つ性質を利用して情報処理を行うコンピュータです。量子の運動は「量子力学」に支配されており、量子の世界においては「量子重ね合わせ」というまかふしぎな現象が発現します。この0と1の重ね合わせ状態を用いて並列計算を行うコンピュータが量子コンピュータなのです。” [引用: 1]

量子コンピューターは、量子の重ね合わせ状態を利用して並列計算を行います。しかし、あらゆる計算を高速に解けるわけではありません。実際には、特定の問題に対して有効な「量子アルゴリズム」が存在する場合に限り、高速な処理が可能になります。[参考: 1]

それでも、量子コンピューターには大きな期待が寄せられています。現在のスーパーコンピューターでは膨大な

時間がかかる問題を、短時間で解決できる可能性があるためです。IBM社のロードマップによると、2029年にはエラー訂正機能を備えたコンピューターの開発が計画されています。[参考: 2]

これにより、実用的なアプリケーションの開発が加速していく可能性もあります。2035年ごろには材料物性や量子化学の分野で、2040年ごろには金融やAIの分野で、実用レベルに達すると見込まれています。さらに、情報セキュリティ分野では、2050年ごろにRSA暗号を破る能力を持つ量子コンピューターの登場も予測されています。[図: 1] [参考: 3]

■ 量子シミュレーターの役割

現在の量子プロセッサは、理論的に優れたアルゴリズムであってもノイズの影響を受けるため、実験的に検証することが難しいです。量子回路のシミュレーターを用いると、ノイズの影響なしで実機では観測できないような詳細情報を得ることができます。

そのため、量子回路シミュレーターは量子コンピューティングの分野を進歩させる上で重要なツールとされています。[参考: 4, 5]

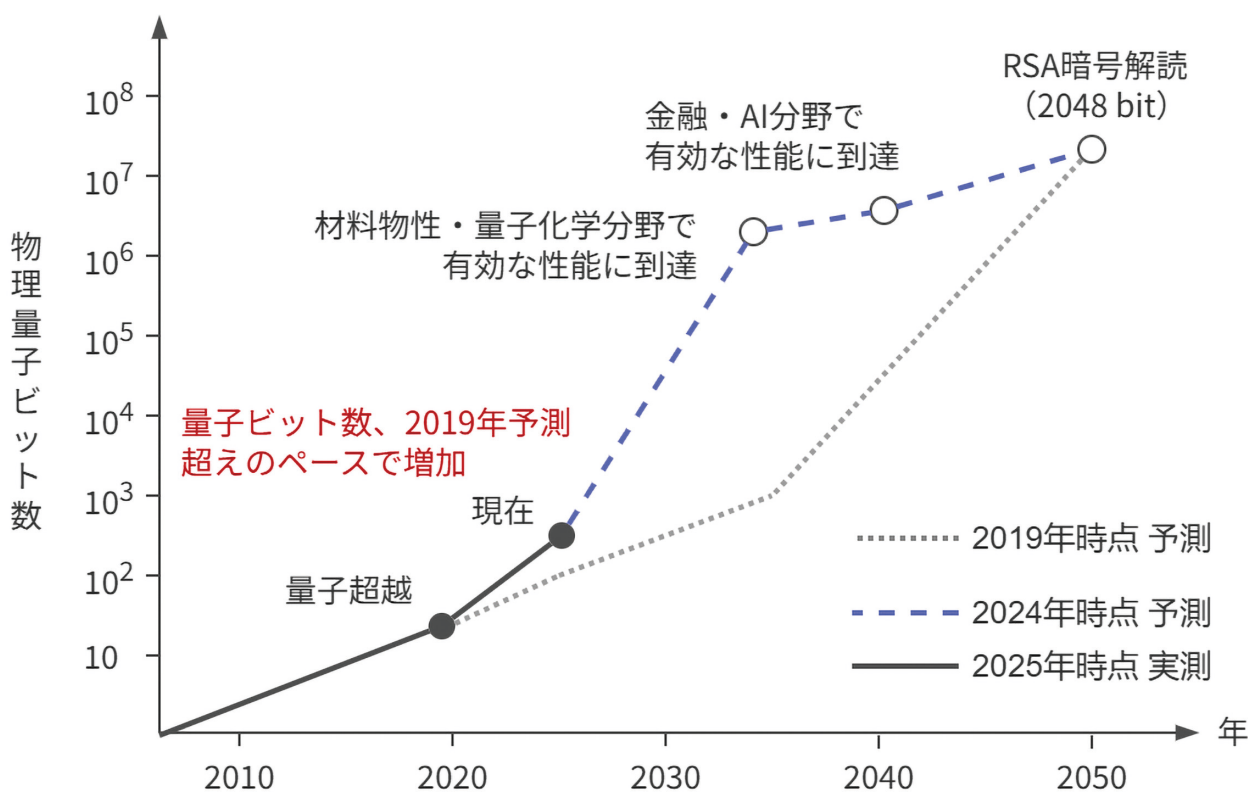


図. 1 量子コンピューターのロードマップ
(株式会社日本総合研究所「量子コンピュータの動向と展望」(2024-10-29発行, 2025-1-10 Ver.1.2,
<https://www.jri.co.jp/MediaLibrary/file/advanced/advanced-technology/pdf/15330.pdf>)をもとに作成) [参考: 3]

量子シミュレーションにおけるGPUの利点

量子シミュレーションにおけるGPUの利点を表す具体例として、NVIDIA社による30量子ビットの量子生成モデル[脚注1]学習における実行時間比較の実験結果を紹介します。

この実験では、multi-CPUシミュレーターを使用した場合は1回の学習に約8時間を要しましたが、GPU (cuQuantum SDK)を用いたシミュレーターではわずか数分で1回の学習が完了しました。GPUの活用により、約300倍の高速化が達成されたことになります。[参考: 4]つまり、量子アプリケーション開発や量子アルゴリズム研究開発を効率的に進めるにあたって、GPUの活用が有効だということです。

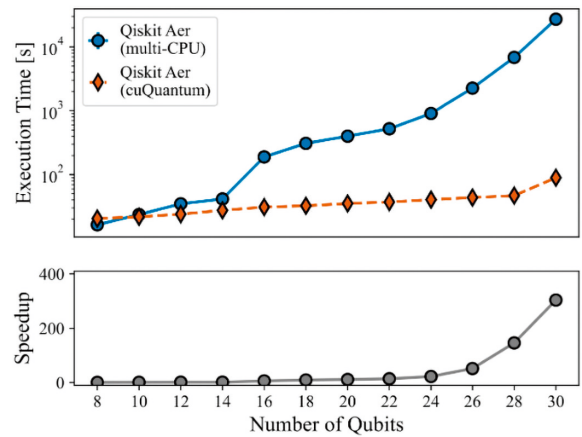


図. 2 CPUとGPUの量子生成モデル学習における実行時間比較の実験結果

(出典: NVIDIA社のブログ記事 "Benchmarking Quantum Computing Applications with BMW Group and NVIDIA cuQuantum" (2024-10-29, <https://developer.nvidia.com/blog/benchmarking-quantum-computing-applications-with-bmw-group-and-nvidia-cuquantum/>) [引用:2])

ここまで第2章では、量子コンピューターの基本概念と量子シミュレーションにおけるGPUの利点についてご説明しました。第3章～第4章では、一般的に言われている量子シミュレーターおよびGPUの有用性を我々の実験によって検証した方法や成果をご紹介します。

CPUおよびGPU量子シミュレーター比較実験

実験の概要

– 実験に用いた量子ソフトウェアプラットフォーム(Classiq)の紹介

今回の実験で我々が使用した量子コンピューティングプラットフォームで「Classiq」について簡単にご紹介します。Classiqは、図. 3に示すように高水準言語でのコーディングから量子コンピューターでの計算実行までを一気通貫で管理できるプラットフォームです。

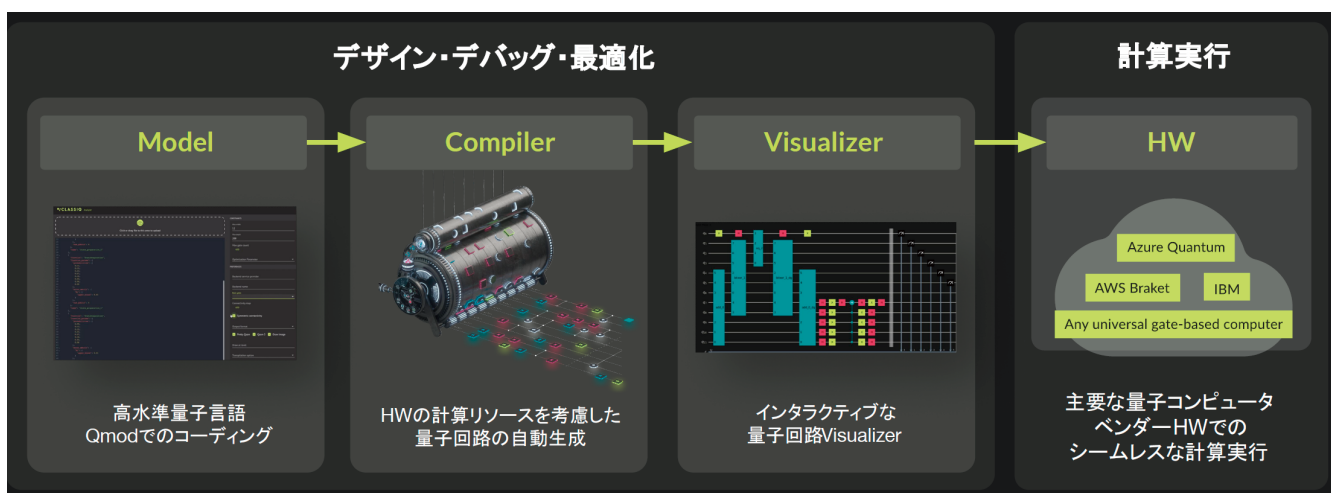


図. 3 Classiqプラットフォームの概要 (Classiq社作成資料より、許可を得て使用)

高水準量子プログラミング言語「Qmod」は、従来の低水準の量子プログラミングとは異なり、ユーザーが量子アルゴリズムの開発や課題の定式化に集中できるよう設計されています。

さらに、Qmodの量子回路生成エンジンは、ユーザーが指定した条件[脚注2]に基づいて量子回路を自動生成できます。これにより、将来起こる量子デバイス側の変化に依存しない形での研究開発が可能になるという利点があります。

－ 実験設定

本実験では、「Groverのアルゴリズムを用いて2-SAT問題を解く」という課題を通じて、CPUとGPUの量子シミュレーター計算時間を比較しました。本実験では以下の理由で「Groverのアルゴリズム」を選択しました。

Groverのアルゴリズムを採用した理由

- 量子アルゴリズムの教科書で必ず紹介される代表的なアルゴリズム
- 用途が直感的に分かりやすく、理解・実装しやすい

一方、「2-SAT問題」は古典的アルゴリズムでも効率的に解けるため、量子計算の優位性を示すには適していません。しかし、以下の理由から比較実験の題材としてあえて採用しました。

2-SAT問題を採用した理由

- Groverのアルゴリズムで比較的簡単に解ける
- 問題の構造がシンプルで、作問・評価・検証が容易
- 問題設定を変更することで、量子回路の幅(量子ビット数)や深さ(量子ゲートの数)を変更しやすい

－ 2-SAT問題

2-SAT問題は、次のような形式の論理式が与えられた際に式全体が真となる変数の割り当て(真偽値の組)の有無を判定する問題です。

$$(x_1 \vee x_2) \wedge (x_1 \vee \neg x_2) \wedge (\neg x_1 \vee x_2)$$

各節(カッコ内の部分)はリテラル(変数またはその否定)を2つ含み、それら2つはAND($\wedge$)またはOR($\vee$)で結ばれています[脚注3]。

さらに、複数の節同士はAND($\wedge$)で結合され、論理式全体を構成します。

たとえば、先ほどの式には変数が2つ、節が3つあり、解は1つ存在します。

その解は：

- $x_1 = \text{True}$
- $x_2 = \text{True}$

です。

変数数・節数・解の個数を変更することで、問題の難易度を調整できます。

－ 2-SAT問題の応用例

以下のような分野において、SAT問題は制約処理の手法として応用されています。

- スケジューリング(例:会議室の割り当て)
- 論理パズルやゲーム(例:数独、ナンプレ)
- グラフ理論に基づく制約処理(例:彩色問題)

－ Groverのアルゴリズム

Groverのアルゴリズムは、量子コンピューターを使ってデータ検索を速く行えるアルゴリズムとしてよく知られています。

ここではアルゴリズムの具体的な仕組みは説明しません。詳しく知りたい方は[参考文献: 6, 7, 8]をご参照ください。

このアルゴリズムの特徴は、古典的なコンピューターでは効率よく検索できないような、とくに構造がないデータの中から目的のデータを速く見つけれられることです。古典的なコンピューターでは、構造がないデータを検索するとき、平均でデータの半分程度を調べなければいけませんが、Groverのアルゴリズムを使うと、およそ $\sqrt{N}$ 回の計算で済むことになります(二次の高速化)[参考: 7]。一方で、このアルゴリズムには限界もあります。

Groverのアルゴリズムを実際の問題に適用するには、「オラクル」という特別なアルゴリズムを別に用意する必要があります。

もし、このオラクルの計算時間がGroverのアルゴリズムによって節約される時間を上回ると、全体として古典的な方法よりも遅くなってしまうことがあります[参考: 8]。

また、Groverのアルゴリズムが便利なのは、問題に特別な構造や情報を必要としないことです。

「解」を事前に知る必要はなく、「それが解かどうか判定できる」だけで利用できます。このように、ブラックボックス型の問題に広く使えるという強みを持っています[参考: 9]。

－ Groverアルゴリズムによる比較実験の詳細

量子プログラムの記述方法と実行結果の解釈方法

Classiq Platform上では、量子回路設計を意識せずにPythonからSDKを用いて量子プログラムを記述できます。Groverのアルゴリズムで2-SAT問題を解く際に必要なのは、「正解に対してのみ1を返す関数(オラクル)」を用意することだけです。その他の部分は、基本的に、Classiqが提供するテンプレートにしたがって記述できます。以下にサンプルコードを記載します。

```

import classiq

NUM_VARIABLES = 6

def _not(x):
    return x ^ 1

def sat_formula(x0, x1, x2, x3, x4, x5):
    return (
        (x4 | x3)
        & (x0 | _not(x1)) & (x5 | _not(x0)) & (_not(x2) | x3)
        & (x5 | x0) & (_not(x4) | _not(x5)) & (_not(x4) | x5)
        & (x0 | x1) & (_not(x1) | x2) & (_not(x2) | _not(x3))
        & (x3 | x4) & (_not(x1) | _not(x2)) & (x3 | _not(x4))
    )

@classiq.qfunc
def sat_oracle(x: classiq.QArray[classiq.QBit], result: classiq.QBit):
    result ^= sat_formula(*[x[i] for i in range(NUM_VARIABLES)])

@classiq.qfunc
def main(x: classiq.Output[classiq.QArray[classiq.QBit], NUM_VARIABLES]):
    classiq.allocate(num_qubits=x.len, out=x)

    classiq.grover_search(
        reps=1,
        oracle=lambda vars: classiq.phase_oracle(predicate=sat_oracle, target=vars),
        packed_vars=x,
    )

# 以下、回路の合成や実行のための定型文は省略

```

量子コンピューターの実行結果は確率的であり毎回同じ結果にはならないため、多数回の実行によって得られた頻度分布から解を推定します。

先のコードを実行すると、図4のような測定結果が得られます。この結果からは、頻度が突出して高い`x=[1, 0, 0, 1, 0, 1]`つまり`x=[True, False, False, True, False, True]`が2-SAT問題の解であると正しく推定できます。

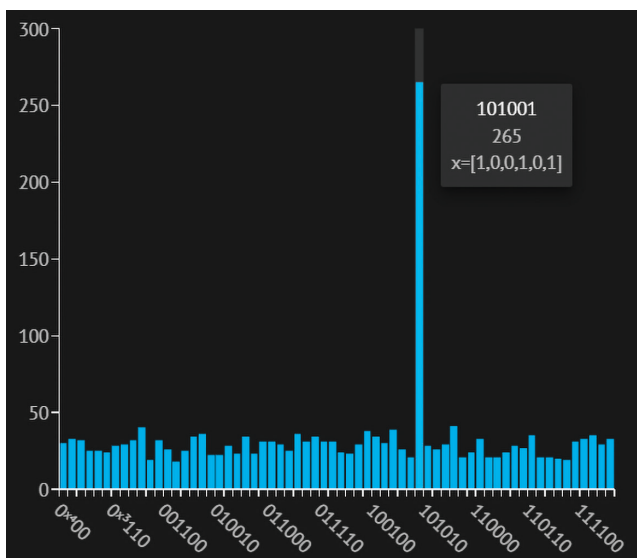


図. 4 Groverのアルゴリズムを用いた2-SAT問題の解探索における測定結果(counts) (ClassiqのWebUIをマクニカで画面キャプチャ)

ー 実験1: 回路の幅と深さの変化に対する実行時間の比較

ここからの実験は、Classiq Platformに用意されている2種類の量子シミュレーター—CPU版の `classic_simulator` とGPU版の `nvidia_simulator`—を使い、回路の幅と深さの両方を増加させていき、実行

時間を比較しました。その結果を図5に示します。

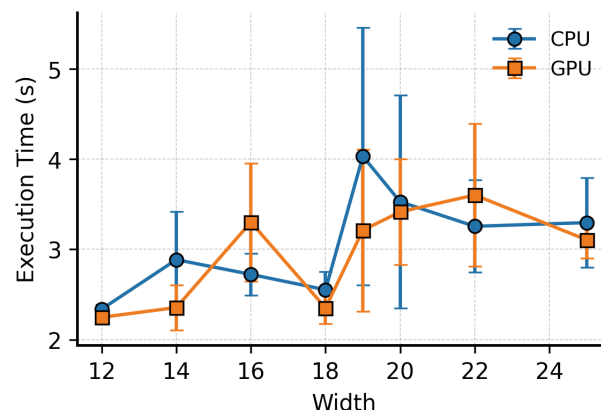


図. 5 Groverのアルゴリズムにおける回路規模と計算時間の関係(CPU vs. GPU, n=5)

2-SAT問題の変数と節の数を変えて回路の規模を変化させ、CPUおよびGPUでの計算時間を比較。

図5に示す通り、この問題設定では、GPUによる高速化の効果はほとんど見られませんでした。

また、前述のNvidia社による量子生成モデルのように、量子ビット数が大きくなるほどGPUの効果が高まるという傾向も、本実験では確認できませんでした。

今回の検証では、CPUシミュレーターの制限である25量子ビットまでの範囲で評価しました。しかし、回路の深さは最大でも約700程度という小さい値にとどまりました。

そこで次の実験では、回路深さに注目して検証を進めることにしました。

ー 実験2: 回路深さ変化に対する実行時間の比較

この実験では、Groverのアルゴリズムにおける「Grover反復」の回数を最適値よりも多く設定し、回路の深さを変化させて実行時間を計測しました。量子ビット数は24に固定しています。図6にその結果を示します。

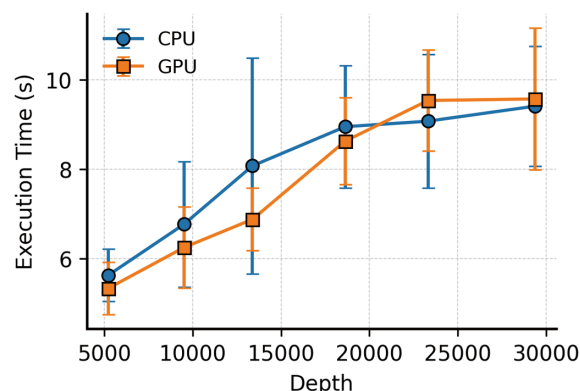


図. 6 Groverのアルゴリズムにおける回路深さと計算時間の関係(CPU vs. GPU, n=9)

2-SAT問題に対する量子プログラムにおいて、Grover反復の回数を最適値に対して100回から600回まで100刻みで加えて回路の深さを調整。その際のCPUおよびGPUでの計算時間を比較した。

図6が示すように、回路深さを約30,000まで増やしても、GPUによる大きな高速化は確認できませんでした。

この結果から、2-SAT問題に対してGroverのアルゴリズムを適用する場合、変数や節の数、あるいはGrover反復回数を増やして回路規模を拡大しても、GPUによる高速化はほとんど望めないことが分かりました。

－ Classiq社によるCPUおよびGPU比較実験結果

この章では、Classiq社が実施したCPUとGPUの比較実験の結果をご紹介します。この実験では、CPUに対してGPUの実行時間における明確な優位性が確認されました。

実験には、量子アルゴリズムの1つである**量子位相推定 (QPE)**を用い、水分子に対する量子化学計算を題材としました。

量子化学計算では、量子ビット数(量子回路の「幅」)が計算精度に直結します。精度を高めるには量子ビット数を増やす必要がありますが、それに伴って量子回路の深さ(量子ゲートの数)も増加します。

図7は、量子回路の幅と深さを変えた際の計算時間の変化を示したものです。

実験の結果、量子ビット数が20未満の小規模な回路では、CPUとGPUの計算時間に大きな差は見られませんでした。しかし、20量子ビットを超えたあたりから、CPUでの計算時間が急激に増加し、最大で1850秒となりました。同じ条件でのGPUによるシミュレーションは42秒となり、GPUが明らかに高速になる傾向が確認されました。

26量子ビット以降は、本実験で使用したシミュレーターの制約によりCPUによる計算ができず、GPUのみ結果が得られています。

－ 弊社とClassiq社の実験結果の比較

Groverの場合は実行時間が最大15秒程度と短く、QPEのように量子回路規模の拡大に応じて指数関数的に実行時間増加する条件では、GPUによる高速化の効果が顕著にみられることが分かりました。

また、図6に示した弊社の実験結果(Grover)と、図7に示されたClassiq社の実験結果(QPE)を比較すると、不思議な違いも見られました。

Classiq社の事例では、量子回路の規模が大きくなるほど、GPUによる高速化の効果が顕著に現れています。しかし、今回の弊社の実験では、そのような傾向は確認されませんでした。

とくにGroverのアルゴリズムにおいては、量子回路の規模を大きくしても、QPEと比べて実行時間が大きく増加しないという結果が得られています。

以下は、両アルゴリズムの量子回路の規模です：

- Grover: 量子ビット数=24, 量子回路の深さ=29359, CPU実行時間=9.4秒, GPU実行時間=9.6秒
- QPE: 量子ビット数=14, 量子回路の深さ=28417, CPU実行時間=20秒, GPU実行時間=11秒

GroverにおけるCXゲート(複数の量子ビットにまたがるゲート)の数がQPEより少ないのではないかと、という仮説も立ててみましたが、実際にはそうではありませんでした。現時点では、この違いの原因は分かっておらず、調査を続けています。

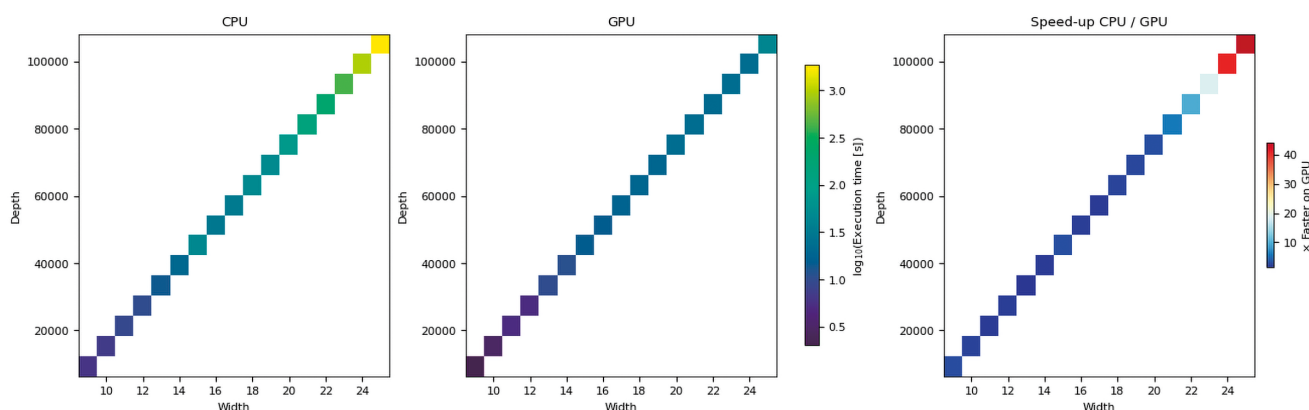


図. 7 量子位相推定(QPE)による水分子の量子化学計算における計算時間比較(CPU vs. GPU)

まとめと今後の展望

本記事では、量子シミュレーターの重要性和GPU活用の有効性について、文献調査と実験を通じて検証しました。主な知見は以下の通りです。

量子シミュレーターの重要性(文献調査より):

- ノイズのない理想環境で量子回路の動作を検証できる
- 実機では得られない詳細な情報を取得できる
- 量子アルゴリズムの開発や検証を効率化できる

GPUによる高速化の有効性(実験より):

弊社およびClassiq社の実験から、複雑な量子回路のシミュレーションにおいて、GPUの活用は効果的であることが分かりました。また、GPUの高速化効果は以下の要因に強く依存することが分かりました。

1. アルゴリズムの特性

- 量子位相推定(QPE)を用いた大規模な量子化学計算では、GPUの効果が顕著
- 一方、Groverのアルゴリズムを用いた2-SAT問題では、そもそもの実行時間が短く、GPUの効果も限定的

2. 量子回路の規模(QPEによる量子化学計算の場合)

- 20量子ビットを超える大規模回路では、明確な高速化が確認された
- 小規模回路(20量子ビット未満)では、CPUとの性能差は小さい

なお、Classiq SDKに備わる関数を使った回路合成は、迅速な実験に有効でした。しかし、量子ビット数やゲート数を2-SAT問題の変数・節数から間接的に設定する必要があり、狙い通りの回路を作るには多くの試行錯誤が必要でした。GPUを活用した最適な量子回路の設計手法は、我々エンジニアにとって非常にチャレンジングでありながら、将来性のある興味深い分野です。このため、社会実装を進めることを考えると、今後は自ら量子回路を組み立てて実験を進めることも増えてくると考えています。

マクニカでは、量子コンピューティングという新たな技術分野において、文献調査と実験を通じて、来たる量子時代に備えた技術習得を今後も積極的に進めてまいります。

引用文献

- [1] 国立研究開発法人産業技術総合研究所、『量子コンピュータとは』、産総研マガジン、2022年5月18日、https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20220518.html(2025年5月26日閲覧)
- [2] Florian Kiwit, Mark Wolf, Carlos A. Riofrío, Jin-Sung Kim, Johannes Klepsch, Andre Luckow,『Benchmarking Quantum Computing Applications with BMW Group and NVIDIA cuQuantum』、2023年12月12日、<https://resources.nvidia.com/en-us-quantum-computing-resource-center/benchmarking-quantum>(2025年5月26日閲覧)

参考文献

- [1] 東野仁政、『量子コンピュータの頭の中』、技術評論社、2023年、pp.24-38.
- [2] IBM Quantum,『IBM Quantum Developmen & Innovation Roadmap Explainer 2024 Update』、IBM、2024年12月11日、pp.3
- [3] 株式会社日本総合研究所、『量子コンピュータの動向と展望』、日本総研、2024年10月29日、pp.31.
- [4] Florian Kiwit, Mark Wolf, Carlos A. Riofrío, Jin-Sung Kim, Johannes Klepsch, Andre Luckow,『Benchmarking Quantum Computing Applications with BMW Group and NVIDIA cuQuantum』、2023年12月12日、<https://resources.nvidia.com/en-us-quantum-computing-resource-center/benchmarking-quantum>(2025年5月27日閲覧)
- [5] 湊雄一郎、『量子コンピュータシミュレータ導入ガイド(基本編)』、blueqat、2023年8月31日、https://blueqat.com/yuichiro_minato2/6a94c837-4c66-49dd-90ca-8f5b0847d625(2025年5月27日閲覧)
- [6] Ross Grassie,『Quantum Generative Modelling and its Applications』、Q2B24 Tokyo、2024年8月21日、<https://www.youtube.com/watch?v=1S7MTLnrbS0>(2025年5月28日閲覧)
- [7] Chris Bernhardt(著)、湊雄一郎、中田真秀(訳)、『みんなの量子コンピューター』、翔泳社、2020年、pp.216-222.
- [8] 東野仁政、『量子コンピュータの頭の中』、技術評論社、2023年、pp.308-333.
- [9] Michael A. Nielsen, Isaac L. Chuang(著)、木村達也(訳)、『量子コンピュータと量子通信Ⅱ』、オーム社、2005年[第7刷 2023年]、pp.105-116.

脚注

1. 生成モデルとは、ある未知の確率分布から新しいサンプルを生成することを目的としたモデルです。古典的なアプローチでは、たとえばテンソルネットワークを用いる方法があります。一方、量子生成モデル(Quantum Generative Model)では、パラメーター化された量子回路を利用して同様の目的を達成します。[参考: 6]
2. 量子ビット数、量子ゲート数、ハードウェアのゲートセットやトポロジー
3. 2-SAT問題の「2」は、各節が2つのリテラルで構成されることを表しており、各節が3つのリテラルからなる場合は3-SAT問題と呼ばれます。

"ARTIFICIAL PHOTOSYNTHESIS"

人工光合成

水と太陽で「グリーン水素」を作り出す人工光合成の今と未来

水素をエネルギー媒体とすることで環境負荷を低減し持続可能な社会を構築する社会システムへの模索が続いている。

水素は太陽光や風力などの再生可能エネルギーで生成することもできる。信州大学は2025年度から2026年度にかけて、長野県飯田市に世界最大級（敷地面積約5,500㎡、受光面積約3,000㎡）の光触媒を用いたグリーン水素製造実証施設の建設を進めている。「グリーン水素」とは太陽光を利用して水を分解することで二酸化炭素（CO₂）を排出せずに製造される水素のことだ。

飯田市でのプロジェクトを主導しているのは太陽光水分解用粉末光触媒と反応システムを研究している信州大学 アクア・リジェネレーション機構 堂免・久富研究室である。堂免一成教授は1980年代から人工光合成の研究に取り組んできた。当初の光触媒の変換効率（量子収率）は0.1%程度しかなかったが、今では量子収率ほぼ100%の光触媒もある。今もさらに性能の高い光触媒の開発が進められている。水素を大量に生み出すことができれば、CO₂を炭素源として使って、様々な物質を製造することもできる。

光触媒を使う水素の生産は基本的に単純な仕組みであり、大規模化に向く。国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「二酸化炭素原料化基

幹化学品製造プロセス技術開発（人工光合成プロジェクト）」（2014年度～2021年度）では、2012年に関係企業が参集して発足した「人工光合成化学プロセス技術研究組合（ARPCHEM、アープケム）」を通じて、光触媒による太陽光水分解反応で得られるソーラー水素と二酸化炭素を原料とした基幹化学品製造プロセスの基盤技術開発に取り組んだ。

2020年には実際に水を分解する助触媒の改良により、光触媒の水分解活性を飛躍的に伸ばした。2021年度には25 cm角の水分解光触媒シート1,600枚からなる総受光面積100㎡のパネル反応器と、水素酸素ガス分離モジュールから構成されたソーラー水素製造システムを開発し、屋外環境で1年以上の長期運転実証に成功した。グリーン水素の量産技術の確立のためには、さらなる大規模化と、太陽光エネルギーの大部分を占める可視光を効率よく利用できる光触媒の開発が必要だ。研究者たちは可視光応答型光触媒、光触媒パネル、ガス分離モジュールの改良を進めている。最終的な目標は太陽光・水素変換効率（STH）を10%程度に引き上げること。そしてさらなる大規模化による実用化技術の確立だ。

堂免教授らに人工光合成研究の現在とこれからについて話を伺った。

探索リーダー

株式会社マクニカ
Frontier Research Lab
Senior Researcher

峰尾 基次



座談会：世界を先導する光触媒研究で「グリーン水素」を実用化へ

光を当てるだけで水素がブクブクと湧いてくる。それが粉末光触媒を使った人工光合成だ。構造がシンプルで大面積化が比較的容易であり、大規模展開とスケールアップメリットが期待できる。実用化されれば、再生可能エネルギーによるクリーンな水素の大量製造が手軽で安価に実現できる可能性がある。

太陽エネルギーの有効活用のためには、紫外光だけでな

く可視光にも応答する光触媒が必要だ。堂免・久富研究室では長波長の可視光を強く吸収できる半導体材料を使った世界最高水準のエネルギー変換効率と規模を持つ粉末光触媒と反応システムを開発中である。さらに現在、受光面積3000㎡以上と大規模な実証にも取り組もうとしている。エネルギーや環境問題解決への貢献を目指す先生方に参集して頂き、話を伺った。



信州大学 特別栄誉教授 堂免 一成 先生



信州大学 卓越教授 久富 隆史 先生



信州大学 教授 西山 洋 先生



信州大学准教授(URA) 宮原 大地 先生

人工光合成研究の現状 あと数年で実用化？



聞き手：
マクニカ Frontier Research Lab.
Senior Researcher 峰尾 基次

峰尾 まず、先生方の人工光合成研究について教えてください。

堂免 人工光合成は1970年頃、東京大学の藤嶋昭先生と本多健一先生が光電気化学的な方法で水を分解できることを発見したのが始まりです。私が始めたのは1980年頃です。「電極に繋がらない粉末のままでも水を分解できるのでは」と考えたのです。当時水の分解はできましたが紫外線応答型だったので「実用化はまだまだ」と言われていました。沈んでいる期間も長かったのですが、21世紀に入って再びクリーンなエネルギー源として注目され始めました。2005年頃から可視光を使う触媒も登場し、2016年には太陽光の1.1%を水素エネルギーに変換できることが確認されました。2019年には東大の柿岡教育研究施設に受光面積100平米のシステムを作り、屋外環境で1年以上の長期運転実証に成功しました。大規模化や安全設計に関する基本原理も確立できました。(図1)



図1 100㎡規模の光触媒パネル反応器の外観

(出典：NEDO「世界初、人工光合成により100 m²規模でソーラー水素を製造する実証試験に成功」, 2021-8-26, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101473.html)

粉末系光触媒のメリットは、ただの水から水素と酸素が出てくる点です。電極は使いません。非常にスケールビリティがあるのです。

現在、信州大学では2023年に文部科学省の「J-PEAKS」事業に採択され、飯田市に5500平米の土地を借りて3000平米の光触媒パネルを設置し、大規模に水素を作る実証に取り組んでいます。

久富 私は主に材料開発を担当しています。紫外光を使う光触媒については効率の良いものを量産できるようになりましたが、可視光を使わないと本当の意味で太陽エネルギーを利用したことになりません。可視光応答型材料の性能向上が私の研究テーマです。光触媒は半導体材料なので、ちょっとしたきっかけで性能が一気に上がる可能性があります。

堂免 可視光応答型の実用化は、順調にいけば2、3年、もしかすると1年でできるかもしれません。一方、5年経ってもできない可能性もあります。可視光で水分解できる反応系はいくつも発見されていますが、問題は「欠陥」が多いことです。可視光応答型なら量子収率50%程度でも十分実用可能と考えています。欠陥の除去が課題ですが、実用レベルに近づいていることは間違いありません。

西山 私は実験室で見出された性能の良い光触媒を実環境で動かす研究を行っています。研究室から実世界に出すと様々なことが起こるので、光触媒が上手に動作できる環境を作り出すことが私の仕事です。

宮原 私はアクア・リジェネレーション機構の堂免・久富研究室に代表される、校内の先端研究成果を社会実装に向けてコーディネートする役割を担っています。

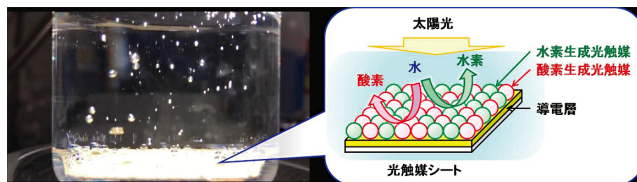


図2 光触媒シートによる水分解反応

(出典：信州大学工学部「太陽光と水からクリーンな水素エネルギーを作る光触媒の開発」(2018-3-26, <https://www.shinshu-u.ac.jp/research/highlight/2018/03/post-6.html>))

日本のエネルギー課題と人工光合成の意義

峰尾 我が国のエネルギー供給の課題について、人工光合成の観点からお聞かせください。

堂免 日本は化石資源がほとんどなく、太陽エネルギーも十分ではありません。海外からエネルギーを輸入せざるを得ない状況で、グリーン燃料をいかに作るかが重要です。たとえば中近東やサハラ、オーストラリアなど太陽光エネルギーが強い地域で人工光合成を使って水素

を製造し、他の材料にして輸送することもできます。淡水化コストは現在非常に安価になっていますので、海の近くも良いと思います。



国内では地産地消型が期待されます。飯田市のように地域で水素エネルギーを作って使うやり方です。ただし大都市圏の需要は賄えませんので、輸入は必要です。

峰尾 なぜ人工光合成なのか、水素なのか。改めて重要なポイントを教えてください。

堂免 現在の水素は化石燃料から作るグレー水素やブルー水素です。本当にCO₂を出さないならグリーン水素にせざるを得ません。水素と合成触媒があれば、二酸化炭素や窒素を組み合わせるとアンモニア、メタン、メタノールなどを安く作れます。足りないのは水素なんです。現在最も実用に近いのは太陽電池や風力発電による電気分解ですが、課題はコストです。現状のグレー水素より数倍、場合によっては一桁以上高価な水素になってしまいます。ですからコスト優位性が高い人工光合成なのです。更に大面積化できる点もメリットです。

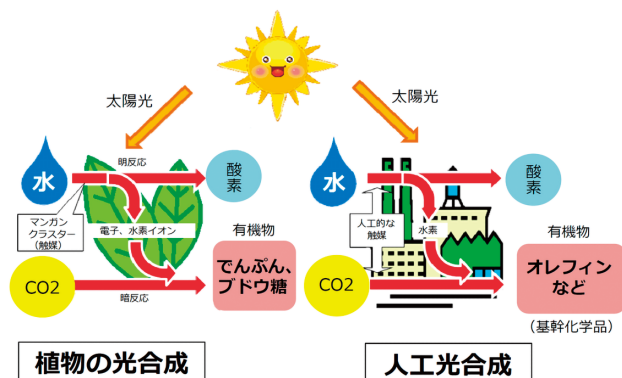


図3 人工光合成の概要

(出典：資源エネルギー庁「太陽とCO₂で化学品をつくる『人工光合成』、今どこまで進んで？」(エネこれ, 2021-03-04, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/jinkoukougousei2021.html>)

久富 水素以外にもアンモニアやメタンを直接光触媒で作る研究は行われていますが、「反応したかどうか」といった段階です。水素は研究の蓄積があり、高効率で働く系もあるので妥当な選択です。



堂免 水素ができてしまえば、あとは窒素を持ってくるだけでアンモニアを作れます。ハーバー・ボッシュ法は400度から500度くらいの温度でアンモニアを作っていますが、グリーン水素と窒素からアンモニアを作る場合は触媒さえ良いものを使えば200-300度でどんどん反応が進みます。はるかに低温低压でアンモニア合成が可能です。

峰尾 なるほど、人工光合成と親和性がいいいですね。

堂免 水素と窒素までできてしまえば、アンモニアにするのはダウンヒル反応(物質が、より安定した状態の物質に変化する反応)なので自動的に進んでいきます。

27 - Met Report

光触媒技術の優位性と技術的課題

峰尾 では改めて、光触媒のメリットを教えてください。

西山 当該研究の光触媒は非常にシンプルなので特に大面積化しやすいんです。水と粉(触媒)さえあればよく、リアクター(反応容器)さえうまく作れば簡単なシステムになります。メガ水素ファームに向けたスケールアップにも適用出来る事もメリットと考えています。

宮原 社会実装するためには光触媒シートの長寿命化も重要で、性能保持期間は実力値として1年は確認できています。



堂免 寿命については今後さらに伸ばせます。劣化してもシステム全体を交換するのではなく、シートのみの変換や劣化触媒の再生方法の研究にも取り組んでいます。

峰尾 必要な要素技術で重要なもの、欠けているものはなんでしょうか。

堂免 一番は光触媒の欠陥をどう潰すかです。合成法が最も大事ですが、我々だけでは原因がはっきりしないことが多い。AIなども使って探っていくつもりです。

■ 国際競争と共同研究

峰尾 他国との競争や共同研究の状況はいかがですか？

堂免 オーストラリアとは共同研究をやっています。彼らはフレネルミラーで集光型、我々は通常の太陽光強度です。アメリカのベンチャーにも協力しています。

久富 中国の研究者とは繋がりが多いですが、資金も豊富で研究設備も最先端です。ものすごい勢いで、うかうかしてられません。彼らから学ぶことも多いです。

堂免 個々の研究者としては良心的な人が多いのですが、政府レベルになると別の問題もあります。中国は水素エネルギー輸出国になりたがっていますから。

■ 産学官連携の展望 最も必要なリソースは人材

峰尾 産学官連携の課題と今後の展望をお聞かせください。

堂免 近年は経産省の大きな予算のプロジェクトが進んできました。複数の研究室と産業界、産総研などが一緒に入った大きなプロジェクトは非常に助かりました。これからは信州大学のJ-PEAKSと、産業界やベンチャーキャピタルからの話を組み合わせて進めていきます。飯田市の「エス・バード(S-Bird)」の敷地内に建設許可をいただけたのは非常にありがたいお話です。

峰尾 研究を加速するために必要なリソースについてお聞かせいただけますか？

堂免 一番は人的リソースです。研究開発ができて、自分で価値判断できる人材が欲しい。装置の進歩は非常に速く、AIなど最先端技術を使いこなせる人材も重要です。そこはまさにマクニカさんが得意な分野ではないかと思うので、アドバイスしていただけるとありがたいです。

峰尾 オンプレミスのGPU環境、AIプラットフォームなどは提供できると思います。マクニカにも「AI Research & Innovation Hub」という組織がありますので、そのメンバーと協働することはできるかもしれません。

西山 遺伝的アルゴリズムやAIを使って人に変わって設計したロケットエンジンの性能がすごい、といった記事を見ました。あれはどうやってAIに設計させたのか知りたいですね。そういう設計ツールが本研究にも必要かもしれません。

峰尾 弊社サプライヤから最先端の情報を得られることもありますので、適宜共有いたします。

■ 飯田市「エス・バード」の大規模プラント

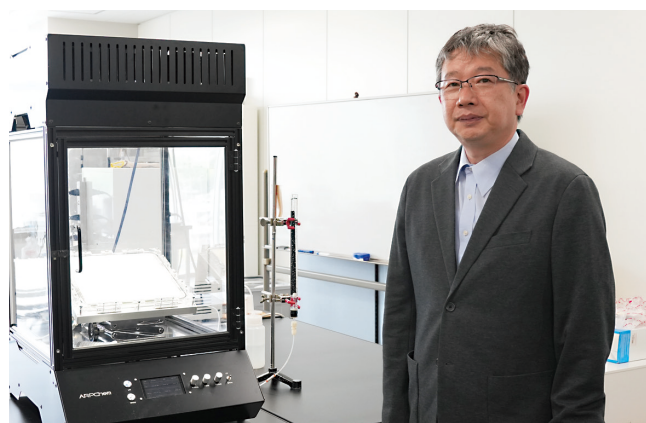
峰尾 では、飯田市の産業振興施設「エス・バード」に建築されるプラントの意義について教えてください。

西山 2019年の100平米規模施設は「できるかどうか」の実証でした。飯田は「いかに社会実装できるか」です。おそらく人工光合成プラントのメッカになっていくでしょう。受光面積3000平米で実現できれば、さらなる大規模化のハードルはかなり低くなります。

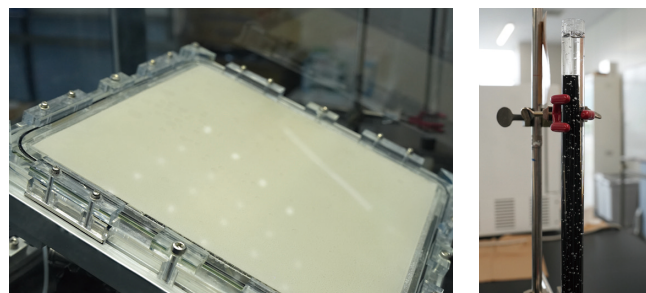
峰尾 どんなパネルが並ぶのでしょうか？

堂免 均一ではなく、色々なレシピの光触媒パネルを並べます。実際にある程度動かしてみないと、どれが一番良いかは分からないので、何種類かを試して「これだ！」となった場合にまとめて作りたいですね。

西山 中身も簡単に換えられるようにするつもりです。低コストでありながら「こんなこともあろうか」ということにも備えた設計にするコンセプトで進めています。



触媒パネルの実験装置 (2025-5-15, マクニカ撮影)



水素と酸素が発生している様子
(2025-5-15, マクニカ撮影)

峰尾 実際の着工はいつ頃ですか？

西山 2025年の夏着工、今年中に順次稼働させたいと考えています。



堂免 3000平米だと30kg程度の光触媒が必要になります。大学の研究室だけでは十分でないため、パートナー企業と組んで量産体制を構築している最中です。本番になると1000倍の「30t」くらいは必要になると思います(笑)。

堂免 飯田市と協働して、水素を使った実証テストベッド、水素活用のモデル都市を目指していきたいと考えています。水素を使った自動運転車などを走らせてはどうかとの意見も出ています。

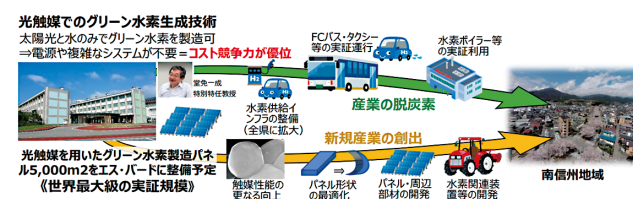


図4 南信州地域での水素活用社会実装の概念図

(出典：長野県「令和7年度 緑水素導入に向けた技術開発の推進」
(2025-3-24, <https://www.pref.nagano.lg.jp/sansei/sangyo/documents/r7greensuiso.pdf>))

■ 人工光合成のノーベル賞受賞の可能性

峰尾 堂免先生は2024年に学术论文の被引用数に基づいて注目すべき研究領域のリーダーを称える「クラリベイト引用栄誉賞」を受賞されました。

西山 もらった私が一番驚きました(笑)。

1980年頃からずっとやっているの、全部合わせた結果です。みんなの力、総合力ですね。

峰尾 受賞者は「ノーベル賞受賞の有力候補者」とも言われています。

堂免 よくからかわれます(笑)。「120歳くらいまで生きていたら」と言っています。

久富 可視光の光触媒開発においても、堂免先生による一段階反応で水を分解する光触媒の開発が原点ですから、私は堂免先生を紹介するときによく「原点にして頂点」と言っています。

堂免 そんなに褒めてくれているとは知らなかった(笑)。

信州大学工学キャンパスにて (2025-5-15, マクニカ撮影)



「環境でメシが食えるまち」を目指す 飯田市のグリーン水素戦略

出席者：

飯田市長 佐藤 健 氏

信州大学准教授(URA) 宮原 大地 先生

聞き手：

マクニカ Frontier Research Lab.

Senior Researcher 峰尾 基次

長野県飯田市の産業振興施設「エス・バード」で建築中の大規模人工光合成プラントは、実環境での大規模なプラントの実証を目的とする。太陽光-水素変換効率の目標は5%で、日照時間が長く温暖な気候で知られる飯田市は「2050年いいだゼロカーボンシティ」を掲げている。飯田市長の佐藤健氏に、人工光合成で生産されるグリーン水素への期待を伺った。

人工光合成が実現する「エネルギーの地産地消」

峰尾 飯田市は日本における人工光合成を先導することになります。どういう世界を描いていらっしゃるのでしょうか。

佐藤 飯田市は2007年には「環境文化都市宣言」、2009年には、国から「環境モデル都市」選定と、再生可能エネルギーに先駆的に取り組んできました。水素は大部分が海外からの輸入や化石燃料由来なので少し距離を置いていましたが、堂免先生たちの研究は、水と光触媒、太陽光を使って全くのCO2フリーでグリーン水素を作る、夢のような技術です。地域状況に合わせて水素を作り、作った場所で使う。エネルギーの地産地消ができる。日本国内だけではなく世界中のエネルギー問題に大きくプラスに働く。夢のある取り組みです。



佐藤市長

宮原 市長が仰っていたように水素の生産プロセス自体にはほとんどコストがかかりません。施設の減価償却が終われば、現行手法よりもはるかに安く作れます。水素はエネルギー密度も高く非常に効率がいいエネルギー源です。その利点を活かして、地域での水素活用をしっかりと考えたいと思います。



宮原先生

佐藤 パネル設置にはぜひ地元企業にも携わってもらいたいです。変換効率も、ここ5年くらいで急激に上がってきたと聞いています。今から3年～5年で実用化というのもあながち大袈裟な話ではありません。



■ 信州大学との多様な連携

佐藤 水素活用についても、水素とバイオエタノールを使ってバイオプロパンを作る道筋もあると聞きました。この地域は都市ガスの普及率が低くて、ほとんどの家庭がプロパンガスを使っているのが現状です。信州大学農学部ではバイオエタノールの原料になるスイートソルガムという植物品種を開発しています。耕作放棄地をソルガムの栽培と人工光合成のパネル設置に置き換えてバイオプロパンを作ることができれば、身近なところでグリーンエネルギーが製造され使われることになります。

峰尾 とても面白いですね。バイオプロパンに市としての支援はありますか？

佐藤 まだまだこれからです。これから企業を誘致しようとしています。地元のプロパン業者との連携も重要になります。有機的に様々な取り組みが繋がってくるというと思っています。

■ 「環境をメシのタネにする」まちへ

峰尾 飯田市がグリーン水素に注目する理由として追加することはありますか。

佐藤 世界のエネルギー事情を変えるかもしれない、ワクワクする取り組みです。飯田市は「環境文化都市」を謳っていますが、これまで環境関連の産業誘致はできていませんでした。「環境でメシが食えるか」と言われたこともあります。人工光合成による変革を「飯田発」で起こせるならば、環境関連産業を集積する将来像を描けます。「環境をメシのタネにする」ことができます。「日本で環境のまちといえば飯田だね」と言ってもらえるくら

い頑張りたい。人工光合成にアクセスしたい企業が集まるまちになれば、様々な反応も起こるでしょう。集積が集積を呼ぶことを期待しています。



■ リニア新駅前はテクノロジーショールームに

峰尾 将来はリニア中央新幹線の長野県駅が飯田市に設置予定です。

佐藤 リニア駅前は環境関連技術のショーウィンドーと考えています。2次交通として水素燃料自動車などを動かし、リニア駅から市街地や観光地、ローカル鉄道（JR飯田線）に接続していく。「市内の公共モビリティはグリーン水素を燃料として運行されています」というのは目指す姿です。リニア新駅構内もゼロカーボンシティのモデルにしたい。もちろん人工光合成の「水素がブクブクしているパネル」を駅に置くといった展示もあるでしょう。世界でも卓越したグリーン水素の技術が、飯田市を水素活用実証タウンとして各方面とも協力し国内外に発信していくことを目指して行きたいと考えています。



macnica.co.jp



お問い合わせ先: **株式会社マクニカ**

〒222-8561 横浜市港北区新横浜1-6-3 マクニカ第1ビル

Mail : info@macnica.co.jp

2025年9月 第一版 ©Macnica

macnica