

ディビジョン番号	14
ディビジョン名	ナノテク・材料化学

大項目	4. ナノ機能・応用
中項目	4-3. エネルギー
小項目	4-3-4. 電池

概要(200字以内)

生物のエネルギー変換プロセスと同様にグルコースと酸素を燃料とすることで、電気エネルギーを取り出す生物燃料電池は、化学エネルギーを直接取り出すことができるため、エネルギー変換効率が高く、有害物質の発生も非常に少ない。また、現在実用化が進んでいる水素やメタノールと同等のエネルギーを生み出す可能性を秘めており、さらに水素やメタノールに比べ危険性・毒性が低く取り扱いが簡便であるという利点がある。

The diagram illustrates two energy conversion processes. On the left, 'Bioenergy' is represented by a human silhouette. A red arrow labeled 'Sugar' points into the figure, and two blue arrows labeled 'CO₂' and 'H₂O' point away from it. On the right, 'Electric Energy' is represented by a fuel cell diagram. A red arrow labeled 'Glucose' points into the cell, and two blue arrows labeled 'CO₂' and 'H₂O' point away from it. The fuel cell diagram shows two electrodes connected by a circuit with a light bulb.

現状と最前線

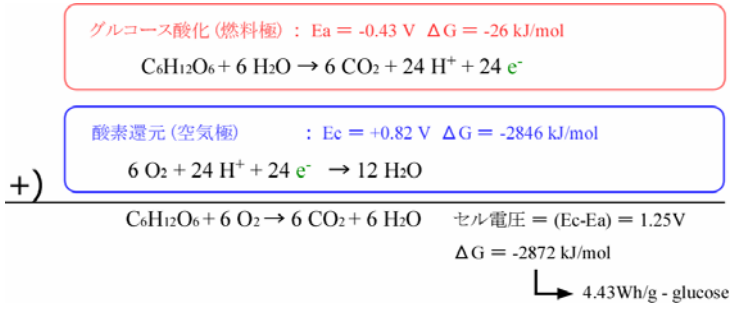
微生物や酵素など生体内に存在する触媒が持つ優れた機能を模倣し活用する研究は、医療・食糧・資源・エネルギー・環境などの諸問題に有力な解決手段を提供するものとして大きく期待される。生体内での電子移動反応の研究は生化学や生物物理化学の主要な分野の1つであり、タンパク質や酵素を触媒に用いた電子移動反応はバイオセンサーや生物燃料電池といった応用に向けて近年注目を集めている。Fig. 1-1 に酵素を触媒として含む燃料電池系の分類を示した。いわゆる生物触媒が各種のタイプの触媒に分類されるが、最終的には酵素と電極間反応にメディエーター(電子仲介物質)を必要とする「メディエータータイプ」と電極と酵素のみで直接電子授受が行われる「ダイレクトタイプ」に分類される。ダイレクトタイプには後述する種々の特徴があるが、一般に、酵素には直接電気化学反応には適さない要因が存在する。例えば、電子移動速度は電子授受のサイトの距離に依存するため、速い電子移動を達成するためには酵素の電子移動サイトを電極表面に向けて吸着させる必要がある。しかしながら、一般的には、酵素は電極表面に強く吸着することで変性し、酵素活性が失われてしまう可能性が高い。さらに通常、酵素の酸化還元中心が酵素の内側に埋もれているため酸化還元中心への電子のアクセスが不可能あるいは極めて遅くなり、酵素と電極表面の間の直接の電子移動を困難にしている。その結果、多くの酵素は電気化学反応を得るためにメディエーターを必要とする。

しかし、自己組織化膜を利用したプロモーター機能を含む適切な電極材料、および電極表面への適切な固定化方法を用いて固定化された酵素は活性を維持し、直接電子移動反応が可能となる場合もある。この酵素-電極間の直接電子移動反応の研究は、生物系での酵素触媒反応に関する研究、酵素の酸化還元での変形メカニズム、および酸化還元での変形を含む代謝過程などの電気化学的な基礎の発展に繋がるものである。

The flowchart classifies bio-catalysts. At the top is '生物触媒' (Bio-catalyst), defined as 'セル全体の中に、酵素を触媒として含む。' (Containing enzymes as catalysts in the whole cell). It branches into '微生物触媒' (Microbial catalyst) and '酵素触媒' (Enzyme catalyst). '微生物触媒' is described as '触媒となる酵素を断片的に供給する生物を用いる。' (Using organisms that supply enzymes as catalysts in fragments). '酵素触媒' is described as '分離、精製した酵素を触媒に用いる。' (Using separated, purified enzymes as catalysts). Both lead to '活性溶液' (Active solution) and '活性電極' (Active electrode). '活性溶液' is defined as '活性物(酵素)が電解質溶液中に分散しているもの。メディエーターは電極表面に固定化、または溶液中に存在。' (Active substances (enzymes) are dispersed in the electrolyte solution. Mediators are immobilized on the electrode surface or present in the solution). '活性電極' is defined as '活性物(酵素)が電極表面に「なんらかの方法」で固定化されているもの。多くはメディエーターも同様に固定化されている。' (Active substances (enzymes) are immobilized on the electrode surface by 'some method'. Many are also immobilized with mediators). Both '活性溶液' and '活性電極' lead to three types: 'プロダクトタイプ' (Product type), 'メディエータータイプ' (Mediator type), and 'ダイレクトタイプ' (Direct type). 'プロダクトタイプ' is '酵素が生成した物質を燃料として、酵素的反応を用い、電極上で反応させる。' (Using the substance generated by the enzyme as fuel, using enzymatic reactions on the electrode). 'メディエータータイプ' is '分子を電子移動の媒介として、酵素的反応により電極との電子授受を行う。' (Using molecules as mediators for electron transfer, using enzymatic reactions for electron transfer with the electrode). 'ダイレクトタイプ' is 'メディエーターなどを用いず、直接、電極との電子授受を行う。' (Using no mediators, direct electron transfer with the electrode).

Fig. 1-1 Grouping of bio catalyst.

ヒトを含め多くの生物は生体内で糖類を二酸化炭素まで酸化し、酸素を水まで還元することによりエネルギーを得ている。この反応は燃料電池のそれと同じものであり、換算するとヒト1人は1日に約 2500 kcal の食事を摂取しエネルギーに変換しており、ある計算結果ではヒトは 100 W の電球と同じ熱量で動いていることになる。もちろん機能は全く異なるため直接比較することは困難ではあるが、生体のエネルギー変換効率の高さが伺われる。このプロセスと同様にグルコースと酸素を燃料として、電気エネルギーを取り出すプロセスが、グルコース-空気生物燃料電池の基礎原理である。



グルコースは 1 分子当たり 24 個の電子を保持しており、上図に示すように二酸化炭素まで酸化することができれば、1 g のグルコースで 4.43Wh もの電力を生むことが可能となる。現時点での生物燃料電池はほとんどの場合2電子のみが反応に用いられているが、解糖系の酵素との組み合わせにより将来的にはより高い出力が達成できると考えられる。24 電子酸化が達成できれば、現在実用化が進んでいる水素やメタノールと同等のエネルギー生み出すことが可能で、さらに水素やメタノールに比べ危険性・毒性が低く取り扱いが簡便であるという利点を持つ。

グルコース-空気燃料電池の開発には 2 つのアプローチが考えられる。1 つは触媒に金属を用いて反応を行う金属触媒燃料電池、もう1つは生体内と同じく触媒に酵素を用いて反応を行う生物燃料電池という方向であるが、どちらのアプローチであってもグルコースの酸化反応の電位と酸素の還元反応の電位の差によって電圧が、グルコースの酸化電流及び酸素の還元電流すなわち反応速度によって電流値が決定される。そのため、高効率の生物燃料電池を作製するためには、グルコースの酸化反応がよりネガティブ側で、酸素の還元反応がよりポジティブ側で起こり、かつ電流値の大きな電極の開発が必要である。現在、カーボンナノチューブ、フラーレンなどの炭素材料の表面改質により、酵素の安定な吸着サイトの構築が試みられている。

現時点では金属触媒の燃料電池はアルカリ溶液を必要とするが、生物電池は酵素を触媒とするため中性溶液下でも作動するため、グルコース-空気生物燃料電池が進歩した将来においては、人工臓器やペースメーカーといった人体埋め込み型機器への応用が期待されている。これには、低電力で非常に長期間の作動を期待できる他に、体内で血液中のグルコースを燃料として機器が自律的に取り込むことも理論上可能であるため、手術によるバッテリー交換を不要にできることのメリットが挙げられる。

また、ユビキタス社会の構築においても、ポータブル、ウェアラブル、インプラントといった人間と機器の密接な関係が社会の成り立ちに大きく重点を占めており、その実現のために出来る限り人体に優しいエネルギー源を研究開発することが鍵となる。そのためには、生物に害となるプロモーター・メディエーターの完全な固定化、もしくは反応系から省略した「ダイレクトタイプ」の達成は必要不可欠な課題となる。

以上の目的からも生物に害となるメディエーターを用いない「ダイレクトタイプ」の生物燃料電池が将来的には有望であると考えられる。

将来予測と方向性

- ・5年後までに解決・実現が望まれる課題
- 複合酵素系の導入による多電子酸化
- ダイレクトタイプ生物燃料電池の実現
- 長期安定性
- ・10年後までに解決・実現が望まれる課題
- バイオテクノロジーによる高機能酵素の利用
- 体内グルコースの利用
- 生体内電池としての安全性の確保

キーワード

酵素反応、燃料電池、インプラント、酵素固定化、電子移動反応