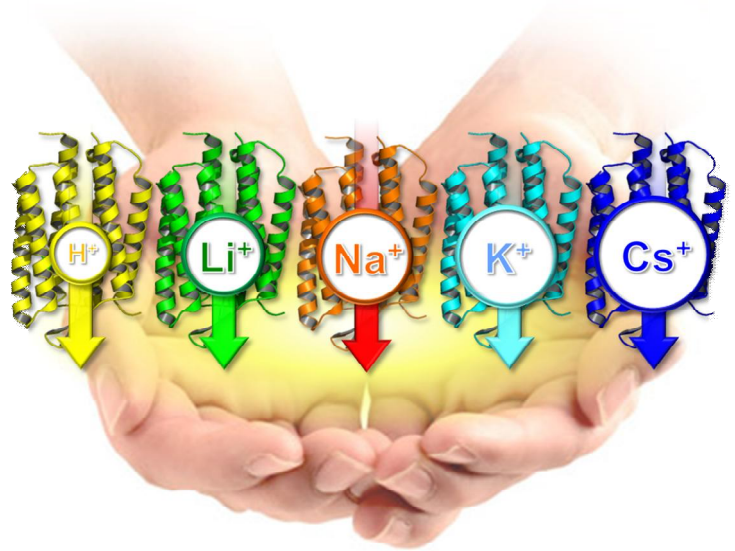


世界初、光でセシウムイオンを細胞から汲み出す タンパク質の創成に成功!

～光を使って放射性セシウムを回収する原理の開発～

◆大学院未来材料創成工学専攻 ナノ・ライフ変換科学分野およびオプトバイオテクノロジーセンターの神取秀樹教授・センター長、今野雅恵研究員らのグループは、光のエネルギーを使ってセシウムイオン (Cs^+) を細胞から汲み出すタンパク質を世界で初めて創成することに成功しました。東京大学大学院理学研究科・濡木 理教授のグループとの共同研究の成果であり、米国化学誌 *The Journal of Physical Chemistry Letters* 誌の 12 月 14 日号に掲載されました。



■光による荷電粒子の輸送

光のエネルギーを使って荷電粒子を自由に運ぶことができれば、さまざまな応用が可能になります。すでに実現しているものとして太陽光発電が挙げられますが、これは太陽電池を使って光エネルギーを電力 (= 電子の流れ) に変換します。材料としては固体の半導体や有機色素が使われていますが、タンパク質を材料とした植物の光合成には性能の点でまだまだ劣っています。

このように光による電子の輸送はさまざまな材料で実現していますが、他の荷電粒子を決まった方向に光で輸送する材料はほとんどありません。電子 (e^-) と比べて、水素イオン (H^+) は 1830 倍、ナトリウムイオン (Na^+) は 42300 倍、重く、材料開発は困難になると考えられます。

数少ない例外として、天然に存在する微生物型ロドプシンと呼ばれる膜タンパク質があります。これは光で水素イオン (H^+) を細胞の中から外に汲み出すはたらきをもっており、このため光駆動イオンポンプと呼ばれます。応用面でいうと、これらのタンパク質は最近、脳機能解明のための革新的技術である「光遺伝学 (オプトジェネティクス)」に使われることで脚光を浴びています。

ただし、微生物型ロドプシンは H^+ は輸送できても、 Na^+ は輸送できないと長い間、信じられていました。

■ナトリウムポンプ型ロドプシンの発見

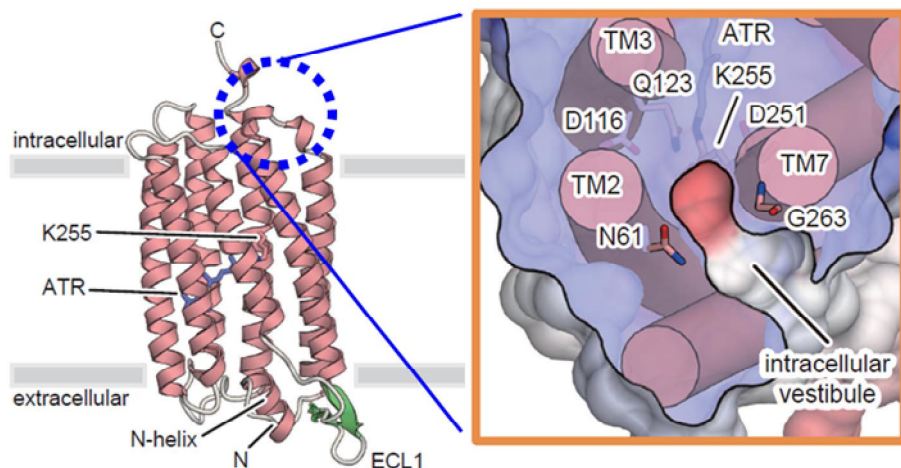
光駆動イオンポンプである微生物型ロドプシンは、我々の目の中で光センサーとしてはたらく視物質と同様、内部に結合したレチナールという分子を使って光を捉え、さまざまな機能を実現しています。

このレチナールは正電荷を持っているため、 Na^+ を輸送するロドプシンは存在しないと信じられていたわけですが、神取教授らは2年前に、 Na^+ を輸送するタンパク質が海洋性バクテリアに存在することを発見しました (*Nature Commun.* 2013)。

光駆動 Na^+ ポンプの発見は2つの意味で大きな反響を与えました。1つはどうやって Na^+ が輸送されるのかというメカニズムに対する疑問です。もう1つは、光遺伝学のツールとしての期待です。メカニズムを知るためには構造が必要ですが、神取教授のグループは東大・濡木教授のグループと共同で構造の解明に成功するとともに、このタンパク質が光遺伝学のツールとして使えることを今年、発表しました (*Nature* 2015)。

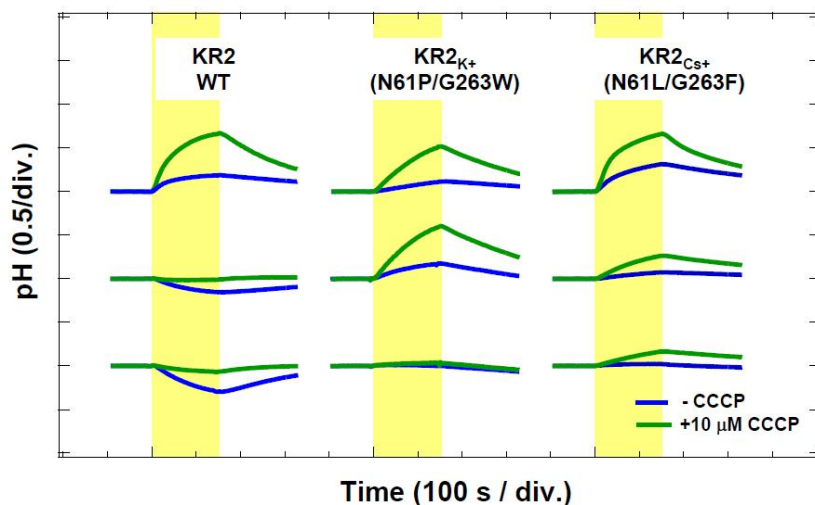
■光駆動カリウムポンプの創成と今回の研究とのつながり

アルカリ金属は周期表の順に、リチウム (Li)、ナトリウム (Na)、カリウム (K)、ルビジウム (Rb)、セシウム (Cs) と続きます。天然のタンパク質は Li^+ と Na^+ を輸送できる一方、 K^+ 以上のサイズのイオンは運べません。神取グループの今野研究員、井上圭一助教はこのタンパク質の入り口に狭い部分があるのを見つけ、この部分のアミノ酸変異を行うことで、 K^+ を輸送するタンパク質の創成に成功しました (*Nature* 2015)。



次はルビジウム、セシウムとなりますが、脳機能解明のための光遺伝学応用という観点からすると、 Rb^+ も Cs^+ も細胞内にあまり含まれないためさほど重要ではありません。一方、世界で誰も実現していない Cs^+ の光による輸送が実現すれば、環境中から放射性セシウム ($^{137}\text{Cs}^+$) を回収することが可能になるかもしれません。

そこで今野研究員らは K^+ 輸送の場合と同様、入り口の狭くなっている部分に着目し、さらにアミノ酸変異を進めた結果、セシウムイオン (Cs^+) を光で輸送するタンパク質の創成に成功しました。興味深いことに、大きなイオンを通すためには通り道を広くしないといけない (= 小さなアミノ酸を導入しないといけない) と考えられますが、実際には大きなアミノ酸を導入したことによって Cs^+ の輸送が実現しています。



天然の Na^+ ポンプ (左)、先に創成した K^+ ポンプ (中)、今回、創成した Cs^+ ポンプ (右)。上から Na^+ , K^+ , Cs^+ 中での測定結果。黄色の時間で光を照射し、溶液の pH 変化を測定した。上向きの信号はそれぞれのイオンの輸送、下向きの信号は H^+ の輸送を表す。

■今後の展望：環境問題へのロドプシンの利用に向けて

福島原発の事故以来、水中に含まれる放射性セシウムイオン ($^{137}\text{Cs}^+$) が大きな環境問題となっています。これまでに試されている放射性セシウムの回収法は、すべて Cs^+ の吸着を考えたものです。今回、光のエネルギーを利用して Cs^+ を輸送するシステムが実現したことにより、より積極的に $^{137}\text{Cs}^+$ を運ぶことで回収するという全く発想の異なった回収法が提案できるかもしれません。

ただし今回の成果はあくまでも回収のための新たな原理を達成したという段階であり、実用に向けてはいくつかのハードルがあります。

例えば、ポンプは中から外に輸送するため、膜小胞に回収するためには逆向きに膜タンパク質を配向させる必要があります（これは膜反転制御が実現しているので対応可能）。また今回、創成した Cs^+ ポンプは実際には Na^+ を 10 倍、効率よく輸送するので、「 Cs^+ も輸送できる Na^+ ポンプの変異体」というのが正しい表現になります。光反応の比較によれば、 Cs^+ 中で反応が遅くなっていることが低い Cs^+ ポンプ活性の一因であることがわかったため、今後、神取グループは物理化学的な性質を調べながら Cs^+ に選択的なポンプを目指すことを考えています。また真の実用化のためには、 $^{137}\text{Cs}^+$ を回収した膜小胞をどのように集めるか、といった問題もあります。

このように実際に使える技術とするためにはさらなる努力が必要となりますが、セシウム (Cs^+) を光で動かせるシステムの構築という今回の成果は、今後に向けて大きな期待を抱かせるものです。



<原著論文情報>

Masae Konno, Yoshitaka Kato, Hideaki E. Kato, Keiichi Inoue, Osamu Nureki & *Hideki Kandori
“Mutant of a Light-Driven Sodium Ion Pump Can Transport Cesium Ions”
The Journal of Physical Chemistry Letters (2015) DOI: 10.1021/acs.jpcclett.5b02385

本件への問い合わせ

名古屋工業大学工学研究科 未来材料創成工学専攻 ナノ・ライフ変換科学分野
神取秀樹 (かんどり ひでき)

電話 & F A X : 052-735-5207 電子メール : kandori@ni-tech.ac.jp