

フッ素と環境

岩井 伯隆

フッ素という元素をご存知だろうか? 「すいへいりべはくのふね……」で周期表を覚えていれば、比較的最初の方に出てくる元素なので思い出していただけるだろう。ハロゲンと呼ばれる属(周期表における縦の並び)の一番小さい元素で、塩素や臭素が同じ属に含まれる。環境中ではほとんどがフッ化物イオンという形で存在している。正確には、フッ化物イオンは水に溶けにくいので、海水中に含まれている濃度は低く、ほとんどがカルシウムなどと塩を形成し、地中に埋まっている。代表的なものがフッ化カルシウムからなる蛍石である。つまり天然に存在しているフッ素のほとんどが無機塩の鉱物資源である。

ところで、私たちの生活環境中でフッ素を目にしたことがないだろうか? たとえば、高校生にこのような質問をすると返ってくる答えは「歯磨き粉」が多い。一方、料理をする人にとってのフッ素と言えば、おそらくフッ素樹脂コーティングの調理器具ではないだろうか。車好きな人にとってはポリマーコーティング剤にフッ素が含まれているものをご存知かもしれない。あまり意識をしたことはないと思うが、私たちの身の回りにはさまざまな場面で「フッ素樹脂加工」などと表示されてフッ素が用いられている。その理由は、フッ素-炭素結合が持つ化学的性質に起因する。調理器具からも容易に想像がつくように、フッ素を含んだ化合物は耐熱性や防水性に優れ、酸やアルカリなどにも強い。物質としてそれだけ強く安定しているため便利であり、工業材料・一般家庭用品において幅広くフッ素は利用されてきたのである。

ではそれは自然環境や人体にとって安全なのだろうか? フッ素化合物は安定なため代謝されにくく、人体に入ったとしてもほとんど形を変えないまま排泄されてしまうから安全であるというのがもっぱらの考え方である。むしろ懸念すべきは自然環境への影響であろう。我々が社会で利用し、図らずも環境中に放出してしまっているフッ素は天然には存在しない化合物である。このような化合物に自然環境はどう対処しているのだろうか? 学術文献を見る限り、いくつかの化合物が、主に微生物によって分解され、フッ化物イオンに戻ることが報告されている。しかし、フルオロフェノールやフルオロ安息香酸など、そのほとんどが一箇所にのみフッ素が導入された化合物で、*Pseudomonas*属や*Rhodococcus*属などの土壌微生物による、化合物の酸化過程における自発的な脱フッ素化がほとんどである。一方、工業分野で用いられているフッ素化合物は多置換フッ素化合物が多

い。パーフルオロオクタンスルホン酸($C_8F_{17}SO_3H$)などはその代表格であり、半導体産業など我が国の経済を支える上で不可欠な化合物であるが、毒性の疑いから使用が厳重に管理されるようになった。この物質は難分解な化合物で環境中や体内での残留も問題視された。産業総合技術研究所のグループが350°Cの鉄を含む亜臨界水によって分解する技術を開発したが、環境中の化合物をいかに回収するかなどを考えると、いまだに処理が難しいのが現状である²⁾。廃棄物中のフッ素化合物の環境への流出・蓄積対策が今後の課題だろう。

このような背景の中で、今後フッ素化合物をどのように利用していくべきなのだろうか? 不幸にもフッ素資源である蛍石の生産国は偏在しており、先のレアアースのような社会問題を抱えながら、日本のフッ素社会は支えられている。この現状を考えると、必然的にフッ素化合物の回収・再利用の重要性が浮かぶ。前述のような化学処理による回収は一つの策だろう。しかし、筆者はここで生物機能を利用した方法を提案したい。生物機能でフッ素化合物を分解する技術はまだまだ発展途上である。しかし、PCBのように微生物はこれまでに自然界に存在しなかった化合物を分解できる能力を獲得してきている。それは人が環境中に放出したことに端を発するかもしれないが、この能力は是非利用すべきだろう。社会でよく用いられる多置換フッ化アルキル化合物を生分解するにはまだハードルが高いが、解決する日を強く期待したい。また、興味深いことにフッ素化合物を合成する能力のある酵素が報告された^{3,4)}。フッ素化合物の合成酵素に関する報告はこれが初めてである。この酵素はS-アデノシルメチオニンという生物の体内では頻繁にもちいられる化合物を基質として、SN2反応の様式でフッ化物イオンを炭素に結合させることができる。現在、がんの画像診断に用いられるPETへの応用が期待されている。このような酵素を利用することによって、フッ素を持続的に循環させ、環境問題をも解決できる夢のようなプロセスが実現できることを期待して本稿を締めくくりたい。

- 1) Natarajan, R. *et al.*: *J. Fluorine Chem.*, **126**, 425 (2005).
- 2) http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/aist_today/vol06_06/p28.html
- 3) Dong, C. *et al.*: *Nature*, **427**, 561 (2004).
- 4) Onega, M. *et al.*: *Chem. Commun.*, **46**, 139 (2010).