

2019. 4. 30

平成31年4月30日

畑 啓之

平成最大にして痛恨の置き土産、福島第一からの放射性物質

福島第一原子力発電所から放出されたセシウム 137（放射性元素）はその半減期が 30 年と長く、今後長期にわたり環境に影響を与え続ける可能性がある。セシウムイオンは粘土質の土壤に強固に吸着され、一旦吸着されたイオンを剥がすことは困難である。粘土は雲母が風化してできたものであり、雲母の層間にセシウムイオンの強い吸着が起こる。そのため、放射性セシウムは主に地表から 5cm までの深さに存在し、ほとんど移動することはない。J-stage（国立研究開発法人 科学技術振興機構の日本文献検索サイト）に放射性セシウムを土壤から除去するための種々の方法が報告されているが、残念ながらまだコレといった良い方法がない。現在は、汚染された土地の表面土壌を削り取る形で除染が行われている。しかし、除染で取り除いた土壌から放射性セシウムを取り除く良い方法は現在のところまだ存在しない。除染で出た土壌はどこかにまとめて管理していくことになる。

右図は土壤に放射性セシウムがどのように吸着されているかを示す。土壤結晶構造の膨潤層と非膨潤層との中間に位置するくさび形に開いた層電荷部分（これをフレイド・エッジと呼ぶ）では、空間的な制約により水和陽イオンが排除されるため、最も水和エネルギーが低く、六員環に形状的にフィットする  $Cs^+$  は、極めて高い選択性で吸着し、他の陽イオンによってほとんど交換されなくなる。その吸着の強さは、 $K^+$  に対して平均でおよそ 1000 倍、 $NH_4^+$  に対して平均でおよそ 200 倍と圧倒的に大きい。結合力は、水和エネルギーの小さい順、すなわち、 $K^+ < NH_4^+ < Rb^+ < Cs^+$  の順に大きくなる。（セシウムの土壤吸着と固定 中尾 淳、学術の動向 2012(10)、pp.40-45）

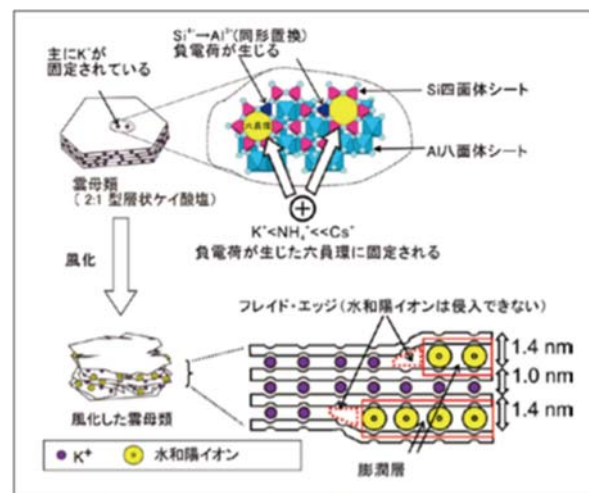


図. 雲母類の風化に伴う膨潤層およびフレイド・エッジの形成

土壤中のセシウムイオン ( $Cs^+$ ) は、カルシウム塩やナトリウム塩などではほとんど抽出されず、抽出するためにはカリウム塩あるいはアンモニウム塩が必要である。アンモニウム塩



土壌に非放射性セシウムイオンを吸着させ、強固に吸着している放射性セシウムイオンをはがし、その後炭酸アンモニウム水溶液ではがした放射性セシウムを溶液中に導びく。この方法での文献はないかと探してみたが、まだ発見に至っていない。この方法でうまく行けばラッキーである。

この方法は、具体的には例えば次のようになる。吸着されている放射性セシウムイオン ( $^{137}\text{Cs}^+$ ) が溶液中に脱離してくれることを期待して脱離液中への非放射性セシウムイオン ( $^{133}\text{Cs}^+$ ) を添加する。セシウム 137 (Wikipedia) によると 1 g のセシウム 137 の放射能の量は 3.215 TBq であるので、福島第一原子力発電所から放出された問題のセシウム 137 の全量  $15 \times 10^{15}$  Bq は重量に換算すると 4666 g となる (チェルノブイリ事故との比較 (Wikipedia))。100 万 Bq/kg の土壌 1 トンであれば約 0.3mg の放射性セシウム原子を含んでいる計算となる。

このセシウム原子の約 1 万倍のモル数の塩化セシウム ( $^{133}\text{CsCl}$ ) を脱離液に加えるとするとその量は約 4 g となる ( $^{133}\text{CsCl}/^{137}\text{Cs} = (133+35.5) / 137 = 1.23$  倍)。塩化セシウムの価格は富士フイルム和光純薬の分子生物学用 500g が 48000 円であるので、4 g は価格にして 384 円となる。マウスにおける塩化セシウムの半数致死量 ( $\text{LD}_{50}$ ) は体重 1 kg あたり 2.3g であり、これは塩化カリウムおよび塩化ナトリウムの値にほぼ等しく安全性に対する心配は小さい。(セシウムの毒性 (Wikipedia))。

本提案方法の一例をさらに具体的に書くと、つぎのようになる。

1. 放射性セシウムに汚染された土壌に、炭酸アンモニウムと微量の非放射性塩化セシウムを含む水溶液を加え、加温しながら攪拌する。
2. 所定時間攪拌後、ろ過して土壌を分離し、土壌は水で洗浄する。土壌に若干の炭酸アンモニウムと微量の塩化セシウムが残存したとしても、環境に影響を与える心配は少ない。
3. ろ液は加熱すると含まれている炭酸アンモニウムがアンモニアと二酸化炭素、水に分解して溶液から出ていく。アンモニアと二酸化炭素は低温部において水蒸気の下に再結合して炭酸アンモニウムの固体を生じる。
4. 固体として回収した炭酸アンモニウムは水に溶かして再利用する。
5. 炭酸アンモニウムを取り除いた後の残存水は、既存の方法で処理して放射性セシウムを取り除く。

ステップ 3 での条件は  $\text{NH}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  系の平衡データより設計することができる ( $\text{NH}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  系の平衡 大塚英二等 工業化学雑誌第 63 巻第 7 号 pp.1214-1218 (1960))。

参考までに、各種金属イオンを吸着した土壤にセシウム化合物（セシウムイオン）を加え、各種金属イオンの脱着量を確認した研究がある（陽イオン交換平衡に基づく陽イオン選択係数および交換性陽イオン含量の測定法 駒田充生、竹内 誠 日本土壤肥料学雑誌 第75巻 第2号 p.217-221 (2004)）。たとえば、土壤を0.01M塩化セシウム溶液中で室温、1時間攪拌処理すると、溶液中のセシウムイオン濃度は低下し、各種金属イオンが溶液中に溶けだす。この研究は福島第一原子力発電所の事故前に実施されたものであるが、「土壤のイオン交換反応は活性化を必要としない反応であるから、陽イオン交換平衡は常に成立すると考えられる」と記述している。水和イオンが吸着している部分（膨潤層）のイオン交換は容易に達成されるということだろう。フレイド・エッジ・サイトに吸着されているセシウムイオンの吸脱着が容易に起こるかの検討は本方法案のキーポイントとなる部分であり、今後の検討でその可能性が見えてくる。

最近、強力なレーザーを用いて核変換の試みを伝えるニュースがありました。ブルームバーグの4月2日付けです。かなり波長が整った（波の山がシャープである）、強力なレーザーが必要とのこと。ただ、一般的に言って光反応では、反応に用いられる光は一部であり、そのほとんどが反応に利用されない（吸収されずに反応系から離れていく）ので、効率が悪いものになります。また、今回計画されているレーザーを発生させる装置は非常に特殊なものになると考えられ、この装置が実験的に放射性セシウムを他の非放射性原子に変換できたとしても、おそらくは経済的には成り立たないものと考えられます。

2018年ノーベル物理学賞を受賞したフランス人のジェラルド・ムールー氏は、特別なレーザー装置を使用することによって、核廃棄物の放射能の分解期間を数千年から数分に短縮することを提案している。

ムールー氏が提案するのは、核廃棄物を放射性ではない新たな原子に瞬間的に変換するという方法で、原子レベルでの廃棄物のこうした変換は高精度レーザーインパルスによって行われる。そのためにムールー氏は、米カリフォルニア大学のプラズマ物理学者、田島俊樹教授と共同で、極端な集中度を持つレーザー装置の開発に取り組んでいる。

フランスでは、ムールー氏の発表は歓迎された。有害廃棄物問題に対する包括的な解決策を持つ国は一つも存在しない。しかし、エネルギーの72%を原子力発電所が賄うフランスでは、核廃棄物量の問題は深刻で、年間の廃棄量は国民1人当たりで割った場合、ほかのどの国よりも多い2キログラムとなっている。ムールー氏がレーザー装置の開発に成功すれば、フランスだけでなく他の国々にとっても救いとなる。

<https://www.bloomberg.com/graphics/2019-nuclear-waste-storage-france/>

Zapping Nuclear Waste in Minutes Is Nobel Winner's Holy Grail Quest

2019年4月2日 抜き出し

A physics professor who looks a little like Doc from the “Back to the Future” movies has captured the imagination of France’s nuclear industry.

Gerard Mourou—one of the three winners of the 2018 Nobel Prize for Physics—claims that the lifespan of radioactive waste could potentially be cut to minutes from thousands of years. Although Mourou, 74, is quick to say that the laser option for nuclear waste that he and Irvine, California-based Professor Toshiaki Tajima are working on may be years away, its promise has created a flurry of excitement for the sector in France.

Laser Pulses

Enter Mourou, with his high-intensity laser option. The physicist’s work has paved the way for the shortest and most-intense laser pulses ever created. In his Nobel Lecture on Dec. 8, Mourou laid out his vision for using his “passion for extreme light” to address the nuclear-waste problem.

“Nuclear energy is maybe the best candidate for the future, but we are still left with a lot of dangerous junk,” he said. “The idea is to transmute this nuclear waste into new forms of atoms which don’t have the problem of radioactivity. What you have to do is to change the makeup of the nucleus.”

‘Like Karate’

The process he and Tajima are working on is called transmutation, which involves changing the composition of an atom’s nucleus by bombarding it with a laser. “It’s like karate—you deliver a very strong force in a very, very brief moment,” said Mourou, wearing the golden pin of the Nobel Prize on his lapel.

Mourou and Tajima want to create a high-speed laser-driven accelerator to produce a beam of protons that can penetrate atoms. The idea is to shrink the distance the beam would have to travel by 10,000 times, avoiding the impracticability of current accelerators.