

地下環境学への 誘い

自然に学ぶ知恵と技

地層処分と考古学

— 長期耐久性のアナログ —

第3回

◎名古屋大学博物館教授(環境地質学)
同大学院環境学研究科教授兼任

吉田 英一 氏

1986年名古屋大学大学院理学研究科博士課程(前期課程)地球科学専攻修了。核燃料サイクル開発機構(現日本原子力研究開発機構)主任研究員を経て、2000年名古屋大学博物館助教授、2010年～2014年同博物館館長。2013年より総合資源エネルギー調査会地層処分技術ワーキンググループ委員を務める。

地層処分は、人工バリアと天然バリアの「多重バリアシステム」で、放射性廃棄物を長期に隔離する方法だということを紹介しました。そして人工バリアには、それぞれのバリア素材としての特徴を活かしたガラス、鉄、粘土鉱物が採用されていることも述べました。では、これら人工バリアに用いられるガラスや鉄は、どれくらいの期間、そのバリアとしての機能を果たしてくれるのでしょうか。

地層処分には、数千年～数万年もの長期に渡った隔離機能が求められます。岩石などに含まれる天然素材の粘土鉱物は、その機能が人工物よりは長期に渡って持続すると思われる一方で、人工的に生成されたガラスや鉄の

溶解・腐食などに対する、長期的耐久性をどのように推し量ったらいのでしょうか。実は、その耐久性を推し量る方法として考古学の知見が活用されています。第三回では、「地層処分と考古学の意外な関係」として、「考古学に学ぶ」人工バリア材の耐久性研究の事例について紹介したいと思えます。

〈考古学に学ぶ〉

なぜ、「考古学に学ぶ」必要があるのでしょうか。それは、長期の溶解速度や腐食の度合いを推し量るためですが、実験的には、人工バリアに用いるガラスや鉄を実験室で地下水と反応させて、その溶ける速度や錆びる速

度が測定されています。実際、これまでに国内外において、数多くの実験が行なわれ、膨大な数の情報とデータが論文などで報告されています。しかし、それらは長くても数年程の実験結果であり、それ以上の長期の実験については、その方法や実験の持続性などの観点から非常に難しくなり、ほとんど皆無です。

一方で、私たちが知りたいのは、数百年や数千年を超える期間での、ガラスや鉄の溶ける様子や錆びる速度であったり、また放射性元素を含むガラスの長期的な状態変化であったりします。しかし、そのような長い時間の実験を行なうことは不可能です。そこで考えられてきたのが、

長期のガラス溶解や鉄の腐食についての類似現象（アナログ）として、考古学の知見を活用してはどうかというアイデアです。このような考え方は、第一回のオクロ天然原子炉で紹介した「ナチュラルアナログ・天然類似現象」に通じるもので、地層処分で生じる現象の類似現象研究として国際的に議論がなされ、そして進められてきたものです。

考古学に学ぶ(1) 黒曜石ナイフ：シリア

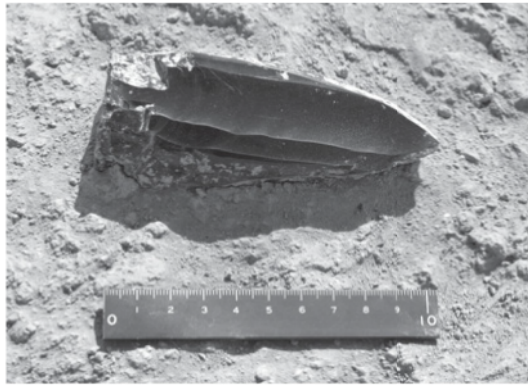
ガラスは天然にも存在します。その一つが黒曜石です。黒曜石とは、火山から噴出した溶岩が地表付近で急速に冷やされることよって形成されます。天然のガラスで、古くから石器の一つとしても用いられてきました。黒曜石の成分は、放射性廃棄物に用いられるホウケイ酸ガラスと同じではありませんが、シリカを基本とした非晶質の「ガラス」であることは同じです（ガラスについては、第二回参照）。古代

の遺跡からは、当時の人たちが用いた黒曜石が地層中に埋まった状態で出土します。ここで紹介しているのは、シリアのユーフラテス川周辺の遺跡から発見された、今から約八〇〇〇年前の黒曜石ナイフです（写真1）。このナイフは、ユーフラテス川によって運ばれた、厚さ約一・五メートルの砂層中に埋もれていたもので、ほとんど常時、地下水に浸った状態だったものです。

このようなナイフが、遺跡からは複数発見されます。中には途中で折れたものも出土しています。当時の使用用途

名古屋大学博物館蔵

写真1



●シリア・ユーフラテス川の遺跡より出土した黒曜石ナイフ

中で折れたのかもしれませんが。しかし、それらのナイフエッジはどれも非常に鋭く、現在でも紙などが切れるほどです。つまり、これらの試料のエッジ部分がどれほど溶解しているかを調べることで、数千年もの時間でのガラスの溶ける度合いが推し量れるわけです。

考古学に学ぶ(2) ウランガラス：チェコスロバキア

黒曜石ガラスには、放射性元素は含まれていません。したがって、遺跡から出土した黒曜石ナイフでは、長期のガラスの溶解速度は推測できても、内部からの放射線の影響による、ガラス自体へのひび割れや曇りガラスになるなどの影響を調べることはできません。放射線の長期的なガラスへの影響を調べるために用いられた考古学的資料が、約二〇〇年前にチェコスロバキアで造られたウランガラスです。

チェコは地質的にウラン鉱床が多く、ウランは酸化すると黄色く色づきます。チェコではこの性質を用いて、

写真2

ウランをガラスの着色剤として使用してきました。写真2に示すのは、当時の貴族たちが造った、ウランを約5%（ガラス固化体の一／四程度の量）含むワイングラスとワインデカンターです。おそらく、ウラン独特の黄金色に近い黄色と、透き通



●約200年前のチェコで作成されたウランを含むワイングラス

●デカンター

ずに造っていたことになりました。もし、その性質を知っていたら造ることもなかったでしょう。ですが、彼らがウランガラスを作成してくれたことで、二〇〇年間での放射線によるガラスへのダメージを調べることに応用できるわけです。

ったガラスの美を味わうことを目的に作成されたのだと考えられます。約二〇〇年たっても、その透き通った黄金色のガラスは独特な雰囲気をもたらしています。ワイングラスの他にも、ビー玉などの娯楽用品なども造られています。ウランの含有量の違いで、山吹色から薄黄緑までさまざまな色合いを示します。当時、まだ放射線は見えられていません。当時の貴族たちは、ウランが放射線を発することを知ら

考古学に学ぶ(3) ローマ時代の釘・スコットランド

人工バリアにオーバーバックとして用いられる鉄の長期的な腐食に関するアナログとしては、どのような事例があるのでしょうか。鉄は、人類史においてもすでに数千年もの使用歴史があります。したがって、その時空間で使用されたもので、できれば地下に埋設されたものがあれば、地下環境での長期的な腐食速度を推し量ることができるともなりません。

その目論みのもと、一つのユニークな発見が一九九五年にスコットランドでありました。今から約二〇〇〇年前に、当時、侵攻していたローマ兵によって埋められた数万本以上の大量の鉄釘が発見されたのです。釘は、地表から二メートルほどに掘られた縦穴に埋められていました。その背景は定かではありませんが、形勢不利な状況に陥ったローマ軍が、利用されることを恐れて（もしかすると再利用することも期待して）、地中に埋設して隠した

図 1

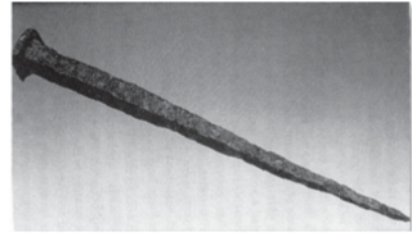


●ローマ兵が鉄釘を埋める様子(イメージ)

内部の鉄釘が錆びることを防いだと考えられます。このような知見から、二〇〇〇年間での鉄の腐食状態や錆びる速度を見積もることができます。もちろん、地層処分での地下の状態と全く同じというわけではありませんが、より地表に近い状態での過酷な試験条件での鉄の長期的腐食実験と見ることができそうです。

これらの鉄の考古学的な資料についての研究の

写真 3



●約 2000 年前の鉄釘

のではないかと考えられています(図1と写真3)。そして、再利用されることなく、二〇〇〇年後に発見されたのです。

発見当時、数万本が塊状に埋設されていた釘は、周辺の釘は錆びているものの、内部のものはほとんど錆びずに、そのままの状態でも十分に使用できるほどのものだったことが分かっています。これは、周辺の釘が、浸入してきた地下水中の酸素と結びつくことで(つまり先に錆びること)、内側は酸素の少ない還元状態が維持され(鉄釘が還元剤として働き)、

ほかにも、スウェーデンでは海底から引き上げられた青銅製の大型の腐食研究の事例もあります。これは、スウェーデンでは、オーバーパックに銅を用いることを検討しており、銅の長期腐食に関する知見が重要だからです。長期的な素材の変質や腐食に関する科学的なデータは、室内の実験では得ることができない非常に貴重なものとなります。

このようなデータや情報の積み重ねによって、現在の多重バリアの素材の成分や厚さなどが調整され、より信頼性の高いバリアシステムの構築に役立てられています。

今回は、多重バリアシステムに用いられている人工バリアのうち、ガラスとオーバーパックの鉄について、その長期的な耐久性を推し量る手法としての考古学との関係を紹介しました。第四回からは、これらの多重バリアシステムを埋設する日本の地質環境の特徴や、地下環境の状態について、最新の研究成果も含めて紹介します。

写真 2、3、図 1 の出典：Miller et al.,2000. Waste Management Series 2. PERGAMON