第３３回原子力委員会定例会議議事録

１．日　時　　令和８年９月２日（水）１４：００～１５：２８

２．場　所　　中央合同庁舎第８号館６階６２３会議室

３．出席者　　原子力委員会

上坂委員長、直井委員、吉橋委員、青砥参与、畑澤参与、岡嶋参与、

小笠原参与

内閣府原子力政策担当室

北郷参事官、中島参事官

名古屋大学博物館

教授　吉田英一氏

４．議　題

（１）地震後の地下岩盤亀裂の急速シーリングについて（名古屋大学博物館　教授　吉田英一氏）

（２）その他

５．審議事項

（上坂委員長）時間になりましたので、令和８年第３３回原子力委員会定例会議を開催いたします。

本日は、青砥参与、畑澤参与、岡嶋参与、小笠原参与に御出席いただいております。

本日の議題ですが、一つ目が地震後の地下岩盤亀裂の急速シーリングについて、二つ目がその他であります。

それでは、事務局から説明をお願いいたします。

（北郷参事官）それでは、一つ目の議題は地震後の地下岩盤亀裂の急速シーリングについて、名古屋大学博物館、教授、吉田様より御説明いただきます。

本件は、原子力利用に関する基本的考え方の３．６．「廃止措置及び放射性廃棄物の対応を着実に進める」に主に関連するものでございます。

それでは、吉田様から御説明をお願いいたします。

（吉田教授）よろしいですか。改めまして、名古屋大学博物館の吉田です。館長を務めております。こういう形で吉田先生を通して皆さんといろいろ情報を共有させていただける場所を頂いたこと、非常に感謝しております。時間は３０分ほどということですので、要点をフォーカスをしながら、前回、１週間前にお話しさせていただいた部分もありますので、ちょっとオーバーラップするところもあるかもしれませんが、幾つかスライドを追加させていただいたところもありますので、今ちょっと御紹介いただきましたけれども、地層処分に関連するようなところ、何でこういうことをやっているかというのは、まさに地下、放射性廃棄物、今回茨城県も何か一つちょっと候補で国の方から申入れいたしましたけれども、そちらの委員会の方にも関わっておりますし、実際、地下３００メートルよりも深い環境に数万年から１０万年、どうやって安全に隔離するのかという技術に私自身も展開することを意識して開発しているという状況であります。

まず、簡単に自己紹介いたしますと、私も２０００年までは１０年ほど動燃から原子力研究開発機構でサイクル機構に２０００年まで所属していました。名古屋大学大学院で地球科学、地質学、構造地質学を経た後に地層処分のプロジェクトということで、動燃の中部事業所に所属しまして、そこで地層処分技術開発をやるということで１年後にはベルギーの地下研究所に３年ほど派遣され、戻ってきてからか釜石鉱山での地下研究、あと瑞浪での地下研究の立ち上げと幌延のスタートにちょっと関わったという状況です。

その後、名古屋大学に移籍しまして、地下研究に関してはずっと継続してやってきているという状況で、その中で先ほども言いましたけれども、国の放射性廃棄物、エネ庁の小委員会の委員とか、あとはＪＡＥＡの地層処分研究開発委員会の委員長も務めているという状況です。

そういう中で、やはり一番重要なのは、こういう地下に隔離するというので、どういう素材で安全に隔離すればいいのかということで、ナチュラルアラログという言葉もありますが、いわゆる自然現象から学んでそれを活用するということで、このコンクリーション化の技術も展開しているということになります。

そういう意味で、タイトルにちょっと付けているんですけれども、Ｇｅｏｍｉｍｉｃｒｙという言葉を最近展開して、いわゆるバイオミミクリーの地質版ということです。多分こういう形で使っているのは私だけなんですけれども、ナチュラルアナログと併用する言葉という形に認識していただければいいんじゃないかと思います。

今回のコンクリーション化については、「サイエンスＺＥＲＯ」とか、今度は「ＮＨＫＷＯＲＬＤ」で世界に発信したいということで、１１月ぐらいにも放送される予定ですので、興味がある方は見ていただければと思います。

さて、ではコンクリーションとは何かということなんですが、コンクリーションには幾つか種類があるんですが、今日取り上げるのは炭酸カルシウムを主成分とするコンクリーションです。海の底に堆積した砂とか泥の堆積物、地層です。それらの中から産出するものです。

左上の写真、あれはニュージーランドのものですが、４，５００万年前の泥で、ニュージーランド南島から出るものです。ここから大体数百個が確認されており、中からは鯨の化石が出てきました。

あと、カニのコンクリーションも、ニュージーランドで発見されたものですが、日本でも出てきますし、その下にあります世界でも最大級の大体直径９メーターぐらいのコンクリーション群、これは男鹿半島の鵜ノ崎というところで確認されたもので、２０２１年に私と現地のジオパークの方々と調査をして、コンクリーションだということで確認できたものです。中からはやはりこれも鯨が出てきます。

角の生えたような、あれはまさにツノガイの口の部分からコンクリーションができているというので、あれは小さいんですけれども、あれが今回のコンクリーションの形成プロセスを解き明かすきっかけになったものです。これは富山県の八尾町から出てくるもので、１，６００万年前のコンクリーションです。大きさは直径２センチほどですが、研究の結果ですけれども、２センチぐらいで大体２、３週間でできると。１メートルサイズで数年から１０年ぐらいで、９メートルだと２０年ぐらいでできてしまうというくらいのものです。

何でそんなに早いのかということなんですが、先ほど言いました炭酸カルシウム、炭素とカルシウムが過飽和状態で沈殿するというのが基本的なプロセスです。それを研究の成果として解き明かしたということです。２０１５年にその論文を「ネイチャーの電子版」にまずは発表したというものです。

どうして過飽和状態ができるのかというと、生物が死にます。微生物が分解します。そうすると、いわゆる炭素成分が重炭酸として海水中に広がります。その濃度は非常に高濃度です。いわゆる自分から溶けていっていますので、そこは高濃度のものが出てきます。そこに海水中のカルシウムイオンが反応して、そして急速に沈殿していくということです。海水中にはカルシウムイオンが４００から５００ｐｐｍぐらい含まれています。サンゴ礁なんかができるのはまさにその理由です。海の生物は大半が大体炭酸カルシウムを殻として活用して

いるというのは、やはり海水中にカルシウムイオンが豊富に入っているからということです。かつ、そこに重炭酸の高濃度が入ってくると過飽和になって、そしてどんどん沈殿していくと。

このプロセスは塩化カルシウムをビーカーに、高濃度の溶液にストローで吹き掛けると、いわゆる呼気の中に入っている二酸化炭素が溶けて、すぐ白く濁る。あの白く濁るのが炭酸カルシウムですので、それだけ速く沈殿する。それが海底に堆積した後、自分の殻を包むようにしてできていくというプロセスがコンクリーション化だということを解き明かしたということです。

その辺は２０１５年の論文からいろいろ展開してやっていますので、もし興味のある方は、コンクリーション化で、あるいはコンクリーションでググってもらえればたくさん出てきますので、見ていただければというふうに思います。

その次のスライドですが、それを立証するように、最近の研究は日本だけではなくて欧米でも、コンクリーションが速くできるということで、特に古生物分野では骨だけではなくて、筋肉組織だとか、ヘモグロビンだとか、そういう当時の生物が持っていたであろう体内の軟体組織がどういうふうになっているのかという、そういう解析の研究にまで展開し始めています。

これはフランスのメンバーが実際調べた結果ですけれども、２０１７年の、これも「Ｎａｔｕｒｅの電子版」の論文ですが、これはイクチオサウルスという２億年ぐらい前の魚竜です。海にすんでいる、恐竜というわけじゃないんですけれども、いわゆる魚竜という範疇の生物がコンクリーション化して、そのコンクリーションの部分から筋肉組織だとか、ヘモグロビンだとか、そういったものが確認できたと。もちろん、たんぱく質が残っているわけではないので、要は急速にその組織、形が炭酸カルシウムとしてコピーされるといいますか、固定されるというんです。したがって、その構造が残る。

今はこれを科博のメンバーとかはＣＴスキャナとか、そういったものを用いて、心臓の位置だとか、内臓の長さ、腸の長さ、あるいはどういうところにどういう組織があったのかとか、そういったものを調べる研究を展開したりしているということです。

古生物学的にはそれはそれで面白いので、どんどん展開していただければいいという状況でありますけれども、私の方はどれだけ速く固定し、かつ一旦固定すると数百年どころか数万年、数十万年、数百万年は維持できるという、このメカニズムを使わない手は、活用しない手はないだろうということで、工学的な分野、特に岩盤シーリングとか、地層の固定とか、

そういったものに展開し始めているということです。

球状コンクリーションについては、ですので皆さんのお手元にもありますけれども、基本は成分は炭酸カルシウム、今注目しているのは炭酸カルシウム。あと鉄とかシリカもあるんですが、それは今日は触れていませんが、そして丸いのは炭素の等方拡散。したがって、自分の体を中心にして広がるということで、丸っこくできるということです。

海にすむ生物がコンクリーション化しやすいので、海成の堆積物の中で基本できると。できる速さは数週間から数年程度で、これまでは９メーターで、元のというのは古いやつもあって、それは約５億年前のカンブリア紀のものを確認しています。

何でカンブリア紀からなのかというと、要は生物が巨大化するのは、化石もそうですけれども、カンブリア紀以降なので、先カンブリア紀というのは微生物はいるんですけれども、骨格を持った生物がいませんので、そうすると炭素成分はあっても大きなコンクリーションはできにくいということになります。

硬さはここにもありますけれども、御影石と書いていますが、要は未固結の砂とか泥の中でも、もう数年もたてば硬くなって、それが御影石、いわゆる花崗岩ぐらいの硬さにまでなりますよということで、これに類するコンクリーションを今日もちょっと持ってきていますので、もし興味のある方にはお見せしますが、名古屋港の海底から浚渫工事の際に出てきたカニのコンクリーション。これは７，０００年前の、炭素イオンで年代測定もできていますので、もう７，０００年でも十分に硬いというもので、できるのは速く、その後は未固結の中でも、地層の中でも非常に硬くなっているんです。

それを応用して、次のスライドにありますが、コンクリーション化剤というのを積水化学と共同で開発してきました。なぜ積水化学かということを聞かれることもあるのですけれども、積水化学は自然に学ぶものづくりという助成金を展開していまして、それに合致したということもありまして、２０１８年から共同で研究開発をして、２０２０年に最初のプロトタイプといいますか、コンクリーション化剤を作って、２０２１年から幌延の地下研究所とか、この後にお話をします、そこでの岩盤シーリングの実証試験とかも展開してきているという状況です。

話を戻しますと、コンクリーション化剤には大きく二つありまして、一つは液体タイプ、もう一つはマイクロパウダー、いわゆるパウダー状のものです。パウダー状のものは大きさが数ミクロンから数十ミクロンで、パウダー状のものからいうと、これはセメントと混ぜて使うということを念頭に開発をしています。

どういうことかといいますと、今の通常の岩盤を、トンネルを掘ったりするときに、水みちを止める、亀裂を防ぐというのは、セメントミルクというのを使います。セメントミルクというのはセメントの微粒子です。このサイズが大体１０ミクロンから３０ミクロンぐらいです。それと同じぐらいのサイズのコンクリーション化剤を作って、一緒に混ぜて注入すると。

この後にもちょっとお話ししますが、従来のセメントミルクだけでは注入するときに圧入をします。地下で圧入をするので、地下の間隙水圧よりも高い圧力で圧入しないと、微粒子ですから物理的に入っていきません。そうするとどうなるかというと、地下の岩盤を壊しながら入れていくという状況が生じます。そして、その後にセメントだけですので、水酸化カルシウムなので、それはまた水と反応して溶けてしまいます。とすると、また水みちが開放する。かつ、そのときには破壊した状態で広がりますので、今度は更に水の透水性が悪くなるという状態になります。

これはもう日本だけではなくて、世界中が直面している課題で、長期にどれだけ安定に地下の岩盤の水みちをシーリングできるかというのは、地層処分だけではなくて、二酸化炭素の地下貯留とか、そのほかの長期的な地下環境を利用。例えば、ＬＰＧの地下備蓄。今、韓国と共同研究をやっていますが、韓国は液体水素を岩盤の中に貯留しようとしています。その期間は１００年から数百年です。

今、液体、水素は次世代のいわゆるエネルギーという形でもう注目をされていますけれども、海水から水素を作るというのは、それだけ莫大なエネルギーを、電気を食いますので、今何が盛んになっているかというと、地下に液体で貯留されている水素を資源開発として見付けようとしています。結構そういうのが幾つか見付かっていまして、そこからも液体水素を取ってきてそれを貯留するという展開も今、世界的には考えられています。

いずれにしろ、地下を今後長期的に利用するというのは非常に重要なポイントでもありますので、かつその水みちをいかに長期にシーリングさせるかで、このシーリング剤に関しては、今セメントミルクと混ぜたものを言いましたけれども、ちょっと話しましたが、セメントミルクと混ぜれば、もしセメントミルクが溶けたら今度はセメントミルクからカルシウムイオンが出てくるので、そのカルシウムイオンを逆手に使って、炭酸カルシウム化して、更にシーリングを固定しようという、そういう目的です。

液体の方はそのまま、注入もできますし、また液体の方からもコンクリーション化は生じますので、どちらを使っても、あとは注入したら放置しておけばいいと。放置しておいて、

水が来ればそこからカルシウムイオンと、あと炭酸イオンが放出されて、過飽和状態ができて、そして周りの空隙、割れ目、微細な構造をシーリングしていくということです。

かつ、セメントミルクの場合は圧入しても、若干圧入してもいいですが、液体の場合は圧入する必要はありません。要は垂らすだけでいいと。あとは濃度勾配で広がっていきますので、極端なことを言うと、日本海溝の１０キロのような深いところでも、置いておけばそこで広がって、固まっていくというものです。濃度勾配ですので、間隙・水圧には関係ないというものです。

そういう性質を幾つか書いていますけれども、大体今、中性からアルカリで非常に効果を発揮して、温度はマイナス５０度から、大体２５０度から３００度ぐらいまで使える。なので、地熱発電とかそういったことにも今は展開できるだろうということでやっています。

あと、有害元素や重金属だとか、揮発性のものとか、そういったものを一切含んでいませんので、このいわゆる通常の部屋でも普通に使えます。何かマスクをしないといけないというものでもないということです。これはやっぱり地下で使う場合に、トキシックとか、そういう揮発性のものをもっていると、それなりのケアをしないといけなくなるので、地下はトンネルですし、閉鎖された空間なので、そうすると現場では非常にまずいとの認識で開発しています。

地層処分では、バリア機能としてコンクリートはカウントしていません。ＴＲＵではセメント系を一応カウントもしていますが、これは六ヶ所村でもそうですけれども、今、ＴＲＵだとか六ヶ所村で使っている低透水層、低拡散層として使っているコンクリートにも、このコンクリーション化剤を混ぜる、あるいは表面を覆うとかいうような形で補填できたらいいんじゃないかという話はしていますが、いずれにしろ従来のセメント系のシーリング剤というのは、地層処分であろうが、使用済み石油孔のシーリングだろうが、ＣＯ２の貯留であろうが、注入した後は、地下に持っていった後は必ず持っていった孔をシーリングしないといけない。それも数百年、数千年、地層処分に関しては数万年というオーダーなので、それをいかに担保するかということがやっぱり重要になるということです。

地層処分の場合は、１か所でもし作る場合は約３キロ四方で、約３万本のガラス固化体を処分するということになりますので、延長坑道を大体数十キロから、下手すると１００キロぐらいの坑道を掘らないといけない。かつ、そこに埋設していく中で、やっぱり掘削する孔と、あとトンネルの坑道周辺の掘削による擾乱です。

それを今、幌延なんかでも大体３５０メーターを掘ったときには、坑道周辺１メーターぐ

らいのところが擾乱されるんだけれども、それが今５００メートル掘りました。５００メーターになると掘削の影響領域が大体３倍ぐらい広がっていくというのがわかっています。

そうすると、こういった擾乱、この擾乱場所というのはどうなるかというと、幌延の場合だと割れ目がその新鮮な岩盤の大体１０倍から２０倍、かつ透水係数が大体新鮮な岩盤の１００倍から１，０００倍ぐらい上がると。そういったところにはなかなかやっぱり廃棄体は埋められませんし、もし埋めるとしたらそれなりのシーリング、ケアをしてやらないといけないというようなこともありますし、その辺のいわゆる全体の処分の建設コンセプトにも関わるというのがあると思います。

重要なのは、実際の日本の地下環境、岩盤を意識したチューニングといいますか、適切なレイアウトなり、バリア機能とか、そういったものを念頭に置きつつ、どういう岩盤が最終的に選ばれて、どういう処分場を建設するのかというのを考えつつ、そしてシーリング効果とか、そういったものもどう補填するのかというのをやっぱり整理しないといけないというのが今の状況、これからの状況だろうというふうに私は認識しています。

そういう中で、例えばロックボルトでこういったところは押さえるんですけれども、このロックボルトというのは、左下にありますように、大体１メートルから２メーター間隔で、長さとして５メーターから、長いものだと３０メーターぐらいで、ハリネズミみたいな形で打っていきます。その打っているところは全部孔を開けて、そこをセットして、そしてそこの孔の部分はセメントで注入するということなんですけれども、セメントはさっきも言いましたように溶けますので、そうすると、３０メートルも掘ってそれを固定したとしても、それで地下坑道、処分坑道は数十年間もって、そこで操業はできたとしても、最終的には、孔が結局溶けると空いてしまう。ということは、人工的に水みちを作っているということになるということです。

そういったことも含めた、やっぱりリアリティーと言っているんですけれども、現実的な補填として、どういう技術として展開するのか。もちろん、溶けないセメントも当然あると思うんです。ただし、本当かと言われたときに、もしそうであればなぜバリア機能にカウントしないんですかという話になると、やっぱり今の安全評価のフレームもそうですが、保守的な観点から全部溶けたとして考えざるを得なくなってしまうということで、これをカルサイトで置き換えてやれば、天然のカルサイト、いわゆる鉱物としてもありますので、それは非常に安全性をバックアップすることになるだろうということで、今実証試験をやっているということです。

次のページは、これ実際だから瑞浪の地下研究所の３５０メーターで、グラウト剤を入れた後に何年で元の状態に、いわゆる透水性がまた戻ったという実際の事例です。グラウト剤を入れると、１０のマイナス５乗から１０のマイナス８乗ぐらいまで一気にシーリングできるのですが、６年でまた元の状態に戻ってしまう。

同じような問題意識は、次のページにも書いてありますけれども、スウェーデンも意識していまして、スウェーデンは、最初に水力発電をやりました。それがもう６０年ぐらい経っています。そのダム底がセメントでシーリングしたのが漏れ始めているということです。それをどうやってケアしたらいいのかというのがやっぱり課題になっていて、そのためには長期的に維持できるものでやれないといけないだろうという、同じような認識に立っているということです。

そういう観点で、地下研究所、幌延の地下３５０メートルの実験坑道での岩盤シーリング実験をやっています。

ここに示す割れ目は、坑道を掘削したときに全部緻密にスケッチするんです。こういう調査を我々地質ではやるんですが、土木でもやるんですけれども、この割れ目がいわゆる新鮮な岩盤の割れ目の状態ということではなくて、さっきも言いましたように、掘ります。３５０メートルだと相当な地圧を受けます。そうすると圧力が緩んで、そして割れ目が生じると。その割れ目の本数の密度は、新鮮な岩盤の大体１０倍から２０倍ぐらいな程度。この割れ目を使って、割れ目がネットワークを作りますので、そうするとこの坑道周辺だけが透水性が上がってきますよということです。

そこをシーリングするために、次のページにありますように、床盤においてはこういう８本の孔を掘って、中心に透水試験装置を置いて、そしてこの８本に新たにコンクリーション化、これは液体タイプですけれども、垂らし込んだと。圧入はしていないというものです。

次のページのやつは、これは断層をターゲットに、同じような中心に透水係数の測定装置を置いて、そして６本に液体タイプのコンクリーション化剤を垂らし込んだということです。

同じような試験は、実はコンクリート、モルタルでも、幌延ではやっていますけれども、８本でも２０本でもモルタルでは水みちは改善できません。最初は８本でやれるかなと思ったんですけれども、結果としてああ結構うまくいきそうだなということが分かったので、断層においては６本にしているということと、岩盤のやっぱり中の水みちというのは大きく三つあって、一つは割れ目、二つ目が断層、あとはネットワークもそうなんですけれども、もちろん岩盤のマトリックスの部分も水みちにはなるんですが、少なくとも割れ目とそのネッ

トワーク及び断層が固定できれば、ほぼほぼどの岩種における水みちも対応できるというふうに考えています。

断層については、これは新しいスライドが付きましたけれども、右側にあるように幅大体３０センチぐらいのところが断層になっているということです。

そして、次のページがその結果ですが、床盤に関してはもう注入後、数か月から１年ぐらいまでにかけて、大体２桁、２オーダーから２オーダー半ぐらい落ちたところで、直下型の地震がトータルで１０回ありました。一番大きいのがマグニチュード５．４で、地下研の直下２キロから７キロぐらいだったので、いわゆるシーリングされた割れ目が揺らされることによって、またオープンしちゃったんです。物理的にオープンしたんですけれども、そこのオープンしたところが再度またその後シーリングが進行したというものです。

これは結局、コンクリーション化剤に残っているといいますか、最初にイオンをカルサイトを作る、いわゆるシーリングとしてさせるためにコンクリーション化イオンを入れているわけですけれども、そのコンクリーション化イオンの持続性というのも一つの我々の研究のターゲットとして見ていまして、それがどれくらい持続するかというのをこれでも確認できたということです。一応今のところスタートして、２０２１年からスタートして、今２０２６年で５年で、今年の１０月もまた測定しますが、８本入れたものに関しては一応８本で、１０年は最低でも持続するということが確認できています。

かつ、このコンクリーション化剤のやっぱり優れているところは、地下水にもカルシウムイオンとか重炭酸イオンというのは実は入っています。特に日本の堆積岩の地下水中には重炭酸イオンが非常にたくさん入っています。なので、これを活用するということです。これもコンクリーション化として固定に活用できるというもくろみでいます。もちろん、海水中でも大丈夫です。海水中にもカルシウムイオンも重炭酸イオンも入っていますので、今、沖縄の方でサンゴ礁を守るために人工ビーチロックを造れないかというので、今そういう実験をやっているんですけれども、サンゴ礁のところに液体、コンクリーション化剤を注入して、ビーチロックを今造る実験をやっているという、海水でも問題ないということです。

いずれにしろ、実験２の断層の方も、これも順調に低下しています。その対数的には低下していて、シーリングが進行して、もう今は元の新鮮な岩盤と同じぐらいのところまでいっている。

次のページで終わりますが、では、どういったところがシーリングされているのかというのを示したのが次のスライドで、こういうのがやっぱりできるというのが地下研の重要なと

ころです。実際のトンネルだとか現場では、こういうオーバーコアリングだとかはできません。

その結果ですが、亀裂表面に炭酸カルシウムの結晶が充填しているのがわかります。その次の写真も、これは薄片を作って、岩石の切片を作ります。それを偏光顕微鏡という岩石の光学顕微鏡で見て確認したもので、ああいうクリスタルが目詰まりさせるような形で詰まっていくという、そういうのができているということです。

次のページは、その広がりがどれぐらいかという、大体２年、２．５年のときのオーバーコアリングとの結果を踏まえて、大体注入孔から半径５０センチぐらいは２．５年で広がっていく。今も５年ですので、大体その倍ぐらい。ですので、トータルとしては注入孔から半径１メーターの、トータルでいうとこれですから２メーター５０ぐらいから３メーターぐらいの範囲がコンクリーション化でシーリングされているということです。

今、コンクリーション化に関しては韓国とかイギリス、あとスウェーデンとも今、共同研究をやっています。韓国は液体水素が、地層処分で液体水素で、英国はオイルと地層処分、あとスウェーデンは地層処分とトンネルです、地下鉄とか。それと、今、福井県の一乗谷の朝倉博物館では、織田信長に滅ぼされた朝倉家の庭園遺跡、５００年前のものですけれども、この劣化をコンクリーション化剤で防げないかというような共同研究もやっています。これは奈良文化財研究所とか東京文化財研究所もやっていて、できれば世界遺産とかそういったものにも活用したいというので、今ユネスコとかそういうのも共同研究をやり始めているというものです。

最後に関連の論文とか、そういう参考資料を付けておきました。

済みません、時間がオーバーしました。以上で話を終わります。

（上坂委員長）吉田先生、自然と調和した重要なシーリングの新技術に関する御説明どうもありがとうございました。

それでは、ただいまの御説明に関しまして４０分間をめどに質疑をさせていただきます。

それでは、直井委員からお願いします。

（直井委員）どうも吉田先生、御説明ありがとうございました。

自然現象で、球状コンクリーションの形成メカニズムを科学的に解明されて、人為的にコンクリーションを起こす薬剤を開発されて、それを現代文明に役立てていこうという、すばらしい活動について御紹介いただきまして、大変感銘を受けました。

（吉田教授）ありがとうございます。

（直井委員）まさにＮＨＫの「サイエンスＺＥＲＯ」が取り上げるにふさわしいトピックスで、サイエンスや工学に若者たちが興味を持ってくれるということを期待したいというふうに思いました。

それで、私の方から幌延の新地層研究センターで行われた実証試験について幾つかお伺いしたいのですけれども、この８本のボーリング孔を開けて、コンクリーション化剤を投入されたということで、先ほど垂らし込むみたいな表現だったんですけれども、どういうふうにコンクリーション化剤を投入するのか、教えていただけますでしょうか。

（吉田教授）ここでは１本のボーリング孔が直径６０ミリ、６センチで、深さが１．５メーターなので、あとコンクリーション化剤はいわゆるＡ剤、Ｂ剤というか、２液で作られているんですけれども、それを大きなビーカーに１対１で混ぜればいいので、混ぜた後、本当にビーカーで垂らし込むような感じです。普通に垂らすという状態で、一応このコンクリーション化剤、比重が１．１なので、水があっても下にたまっていくという状態です。

なぜ圧入しないかと。実は圧入する技術ってあるんですけれども、圧入すると樹脂も広がるので、樹脂でシーリングされているんじゃないかという質問、いわゆるこういうふうに思われちゃうとまずいので、できるだけ樹脂はそのメインの掘った孔にだけ指定させて、それでそこから炭酸カルシウム化でシーリングするということを証明するために、そういう手法を取ったということです。

ちなみに、この樹脂は４８時間で完全に固まります。樹脂のそのときの粘り具合というか、それは蜂蜜ぐらいです。ですので、その後にオーバーコアリングすると、大体１ミリぐらいの隙間があるとちょっと入っていきますが、大体注入したボーリング孔がちょうど６０ミリだとこれくらいだと思うんですけれども、それの１０％ぐらい。だから両側に１センチ広がっているか広がっていないかぐらいですね、樹脂自体は。そこからあとはイオンが広がって、炭酸カルシウムで割れ目がシーリングされていくと、そういう仕組みになります。

（直井委員）ありがとうございます。

それで、１６ページのところで実験の結果で、たまたま地震が起こって、これ非常にいいデータが取れたなと思うのですけれども、この実験ではコンクリーション化剤は１回初めに投入して、それっきり。

（吉田教授）その１回のみです。

（直井委員）それで、持続性という点で、このグラフもどこまでいくか分からないですけれども、基本的にはこのまま維持できるだろうと。

（吉田教授）そういうことですね。

（直井委員）ありがとうございます。

（吉田教授）ちなみに、幌延がやっと昨年度といいますか、３年まだ実験研究が地元の厚意で延長させてもらいましたので、一応あと３年はモニタリングできるかな。そうすると、８年ぐらいはデータが得られるかなということですけれども、それだけ得られれば非常にインパクトのあるデータがそろうかなというのは思います。

（直井委員）ありがとうございます。

それから、この応用先という中で御紹介いただきましたけれども、自己修復コンクリートの開発というのもございました。これは高速道路の橋梁の劣化が今問題になっているので、大変期待のできる展開であるなというふうに感じました。

それで、通常のコンクリートと比べて、コンクリーション化剤を入れると密度がどれぐらい上がって、それからこれ強度も上がるというふうに考えてよろしいのでしょうか。

（吉田教授）それは、一言で言うとちょっとあれですけれども、入れるコンクリーション化剤の量によって変わってきます。いわゆる今ここにお見せしている、この写真で見せているのは、全体のセメントに対して５％のコンクリーション化剤を入れた状態です。

これ以上入れますと、シーリングは進行するんですけれども、どんどんいわゆるモルタルといいますか、セメントとしての強度が落ちていくので、そこはもう痛しかゆしと言ったらあれですけれども、やっぱりセメントはセメントとしてのいいところがあって、それは長期にもたないかもしれないけれども、構造物としてやっぱり大きいものを維持するという意味では、できるだけコンクリーション化は少ない方がいいだろうということにはなりますよね。

ただ、時間がたてばたつほど炭酸カルシウム化する。いわゆるカルサイト化すれば、それは強度はどんどん上がっていきます。その時間とともにどこからコンクリートが劣化して壊れていくのかというのと、かつそこから今度は反応して炭酸カルシウム化が進行するのか、そういう実験とかいうのは多分必要になるでしょうし、あとはどういうところに使いたいのかというニーズにもよると思うんです。

これはちょっと先週も簡単にお話ししたかもしれないんだけれども、今、ゼネコンとかが考えているのは、躯体そのものにコンクリーション化剤を使うんじゃなくて、表面を塗る、モルタルとかにコンクリーション化剤を使ったセメントでコーティングするというのはどうかというアイデアも出てきています。

なので、御存じのようにコンクリート構造物というのはやっぱり中性化で硬くなってひび

割れすると、中に水が入って、さびて、中から崩落するというのが避けるべき一つの課題になっているので、表面だけを例えばひびが入ってもコンクリーション化剤でシーリングする、水みちが塞がれるというような状況にすれば、内側はもともとのいわゆるコンクリートが存在していて、それで二つでいわゆる構造のメンテナンス期間を１０年でも３０年でも延ばせるようにできれば、それはメンテナンスコストも非常に下がるだろうというようなことで、そういう発想で研究開発をやっているところもあります。

（直井委員）どうもありがとうございます。社会実装が進むことを期待したいというふうに思います。ありがとうございました。

（吉田教授）ありがとうございます。

（上坂委員長）それでは、吉橋委員、お願いします。

（吉橋委員）吉田先生、ありがとうございます。自然に学ぶものづくりというのは非常に面白いですし、本当に子供とか、若い人たちが科学に興味を持つきっかけになるような技術だなと思っています。

　コンクリーション化剤についてもう一度教えていただきたいのが、先ほどのお話ですと二つを混ぜて、流し込んで、しばらくすると蜂蜜ぐらいに固まってきて、硬くなるという認識であっていますか

（吉田教授）流し込むときぐらいにも蜂蜜ぐらい……

（吉橋委員）固まってきていて、水が入ってこないとその状態のままなんですか。

（吉田教授）そんなことはないです。二つを混ぜれば、もうそれは２４時間ぐらいでほぼ９０％ぐらいで、４８時間で完全に固まる。

（吉橋委員）完全に固まる。分かりました。そこに水が入ってくると、その時に更にカルシウムで放出されるということですか。

（吉田教授）そうですね、放出するということです。

（吉橋委員）すなわち先ほどの地震があってずれたというのは、そこに亀裂が入ったとしても、そこに水が入ってきて、カルシウムが溶け出してくるわけですね。

（吉田教授）そう、そういうことです。

（吉橋委員）それによってつながるという仕組みですね。

（吉田教授）はい。

（吉橋委員）ありがとうございます。このコンクリーション化剤というのは、コンクリーション化するためのスピードとか、そういったことは、何かコンクリーション化剤でコントロー

ルできたりするんでしょうか。また、どういうものまでコンクリーション化剤でコントロールできるものなんでしょうか。

（吉田教授）いい質問ですね。皆さん、同じようなことを興味を持たれていて、そこはそれこそ特許だからという意味じゃないんですけれども、コンクリーション化剤には先ほど言ったイオンが必要で、カルシウムイオンと炭素イオンがどういうソース源としてコンクリーション化剤の中に入っていればいいのかということになりますよね。そのときに、カルシウムイオンと炭素イオン、例えばＮａＨＣＯ３とか、ＮａＣＯ３とか、いわゆるあとはＣａだったらＣａＣｌ２とか、希酸とか、いろいろあるんですけれども、カルシウムを含むやつで、それは水との溶解度でコントロールできるんですね。なので、早く溶かしたい場合は、例えば塩化カルシウムと重炭酸ナトリウムを入れてやれば、それはもう水が来ればすぐ溶けるので、そうするとそこから放出して過飽和になって周辺が固まる。

例えば、ギ酸カルシウムとかそういうのを入れると、塩化カルシウムよりは少しは流出速度が遅いので、そうするとそれで時間をコントロールできると。あとは濃度をどれくらいコントロールするかで変わるし。

もう一つは固めたい周辺のものがどういう構造をしているか。つまり、非常に水が流れやすいところなのか、岩盤の硬いもので余り拡散だけでしかいかないところなのか、それをどのくらいの領域まで固定したいのかによっても、入れる量とか種類をソースを変えるという状態です。それで今、５か所ぐらいでいろいろ組合せでやっているという状況ですけれども、そういう形でいわゆる入れる量と入れるイオンの組合せで、それで今、先生がおっしゃられたような時間とか速度など、それがコントロールできるという状況です。

そのベースになる基礎的な実験は、積水がいわゆるラボで全部データを管理していて、それをベースに、特許化もあれですけれども、要は最終的には製品化するときに、どういうところだったらどういう組合せでやればいいですよという、やっぱりアドバイスといいますか、コンサルティングみたいなものも必要になりますので、それが恐らくホームセンターなんかに取られる場合は、これは土壌向きとか、これは岩盤割れ目向きとか、そういうレシピとして使ってくださいねという形でやっているという状況で、それの大体が見えてきたので、今度技術フォーラムで展開しましょうという今状況に来ているということです。

（吉橋委員）ありがとうございました。大変よく分かりましたし、化学が本当にベースになっていて、大変面白いなと思って。

本当に先ほども子供たちということも言いましたけれども、本当にこれからの人材育成だ

ったりするときも、どこで反応が必要なのかとか、どうしてそれが利用できるのか。社会実装できていくということを見せられるのはすごく面白いなと思います。

（吉田教授）そういう形で私も展開していきたいと思いますので、一緒によろしくお願いします。

（吉橋委員）はい。是非実験で、中高生相手に紹介できると非常に面白いと思いました。

あとは最後に、実際にこれを地下のトンネルに活用するということを考えたときに、先生が今、一番考える有用な利用方法について教えてください。私のイメージではハリネズミみたいな構造の針のところにこれを付けておくというのが一番理想的なのかなと思うんですが、先生が考えられる、今後こういった事象に対しての利用について教えてください。

（吉田教授）そうですね、その次やっているのは、北海道のトンネルで実際にちょっとその実験をやり始めているんですけれども、北海道のトンネルってやっぱり水が漏れると、冬場、トンネルの中がアイスバーンになっちゃうんですよ。それは非常に危ないということで、それを何とか止めたいということで、寒地土木研究所とかとも一緒にやり始めているんです。

それはどういうことが起こっているかというと、このハリネズミみたいなやつは新しいところであればそういうふうにやればいいと思うんですけれども、既に４０年、５０年たっているトンネルに関して言うと、岩盤掘りました、トンネル掘りましたで、セメントを注入します。そうすると、必ずセメントって１０％ぐらいシュリンクするんです。そうすると岩盤とセメントの間が必ず開口しちゃうんです。物性が違いますので。そうすると、そこに水がたまって、そうすると水がコンクリートを溶かして、割れ目ができて、そこから湧水が生じるということで、今それこそ先週実施した実験は、トンネルに孔を開けて、そこから液体タイプのコンクリーション化剤を注入して、そこの隙間をコンクリーション化しようという実験をやっています。それで、本当にそれが効いているかどうかというのは、今、湧水量とか透水試験をやって、ちょうど今１０日ぐらいたっていますけれども、もう既に１桁ぐらい透水性が落ちているというのはやられているので、まずは既存のトンネルに関してはそういうやり方になるかなと思います。

もちろん、割れ目とかそういったものが入っていてもそれは問題ないので、そこもシーリングできるということになりますけれども、新しいトンネルに関しては、したがって岩盤とコンクリートの間が必ずそれでシュリンクするんであれば、そこの間ももう既にコンクリーション化剤を塗布してあげているとか、設置するとか、そういう形で、表面は普通のコンクリートで覆うとかすれば、いわゆる二重構造ですよね。そうすると、メンテナンスも楽にな

るし、長期に維持できるんではないかと。それが５０年がもし１００年になれば、それでもっても全然違うと思うんで、そういうやり方がやれないかというので今、ゼネコンとかと協力してやっているということです。

（吉橋委員）ありがとうございます。こういった技術が早く世に出るといいなと本当に思いました。ありがとうございます。私からは以上になります。

（上坂委員長）それでは、参与からも御質問や御意見を伺います。青砥参与から御意見を頂ければと思います。お願いします。

（青砥参与）非常に興味深いお話をありがとうございました。

（吉田教授）いいえ、ありがとうございました。

（青砥参与）大変期待するところなのですが、コンクリーションの形成、耐久性、成長メカニズムについて、少し理解を深めるために確認をさせてください。

お話では、コンクリーション形成の支配的な要因に、炭酸カルシウムという物質があって、その早期形成や成長、あるいはその維持といったところにもこの物質に依拠するところが大きいと、そういう理解になるかと思います。

一方で、日本の自然の中に見られるものに、鍾乳洞という環境現象があって、御存じのように鍾乳洞は同じように、海産というか、海の中で生成された炭酸カルシウムを主因とした物質が、酸性水によって溶解することで形成される、言わば溶けてしまうというものです。

この同じように見られる自然に存在する環境についての対応というか、適応についての考え方、あるいはメカニズムの違いについて、どうお考えか教えていただきたい。

（吉田教授）いいですか。参考資料というか、それをちょっと持ってきたりはしているんですけれども、よろしいですか。

添付資料で、前回も非常にいい着眼点での御質問を頂いたなということで、参考資料のその次、次、これ、まず鍾乳洞の形成について次くらいに載っていないですか。その次ぐらいです。そうです。鍾乳洞というのは、この石灰岩、左側にもありますけれども、ほかの岩石というのと石灰岩というのがありますけれども、石灰岩というのは基本９５％以上は炭酸カルシウムということで、これも堆積岩の一種なんですが、基本カルサイトだけでできているというふうに認識していただければいいと思います。

コンクリーションはどういうものかというと、ちょっと前に戻っていただいて、これがいいと思うんですけれども、さっきもちょっとお話ししましたが、海底に堆積している砂とか泥の中で生物が埋もれて、そこから放出するので、そのときに海底の砂とか泥は何でできて

いるかというと、石英とか長石でできています。つまり、風化で最も耐久性のあるものが海底に堆積しているという状況になります。

コンクリーションは、その隙間を、ここにちょっとあれ、ここでコンクリーションの一部を拡大したりしている写真ですけれども、模式的に書くとああいうふうな隙間のところに炭酸カルシウムが浸潤して、そして石英粒子とかそういったものを固めていくという状態になります。

ですので、ここに例えば酸性水がやってきても、表面の一部は炭酸カルシウムは溶けるんですけれども、その周辺を形づくっている石英というのは非常に酸に逆に強いので溶けないという状態です。それが３次元的に組み合わせた状態になっていますので、非常に砂粒、海底にたまっている砂粒の粒子サイズも大体０．５ミリとかそんなものですけれども、なので泥であれば０．１ミリ以下になっちゃうんですが、それくらいの微粒子のものがいわゆる酸に強いものを骨材として炭酸カルシウムで固めてあるものなので、そこに酸性水が来ても、石灰岩のように鍾乳洞のような孔がぽっかり空くということはないということです。

実際、コンクリーション化剤で天然のコンクリーションで溶けたものというのは、今まで一度も見たことがないという状態です。

（青砥参与）今のお話ですと、炭酸カルシウムとケイ素系の物質との相互環境影響によってコンクリーションが保たれるだろうと、そういうメカニズムがあるということですね。

（吉田教授）そういうことです、はい。

（青砥参与）ありがとうございます。私からは以上です。

（上坂委員長）それでは、畑澤参与から御意見を頂ければと思います。

（畑澤参与）吉田先生、どうもありがとうございました。

自然に学ぶということを原点にして、サイエンスの成果を社会実装するというプロセスだと思っています。

例えば、廃棄物にこれを応用しようとする場合には、かなり大きな仕組みというか、廃棄の方法の改良が必要になると思うのです。これを使う使わないというデシジョンをするときの。そうするとやはり大規模な実証実験というのが必要になるんじゃないかと思います。これが有効なのか、有効でないかという比較が必要だと思うんです。そういう意味では、この１７ページのたまたま地震が発生したときの前後というのは非常に大きな有効性のエビデンスだと思うんですけれども、これ一つでいいのでしょうか。

例えば、この地層処分をするときの仕組み自体、かなり大掛かりなプラスアルファをする

ことになると思うんです。それを採用するかしないかというのは、どこかでデシジョンしていかないといけないわけですね、システマティ手ックに。そのときのデシジョンの根拠になるデータというのは、これだけでいいのかどうかというのを先生はどういうふうに考えておられるか、まず教えていただきたいなと思います。もしそういう大規模な実証実験が更に必要だとすれば、それは企業が負担して行うことなのか、それともももっと別の公的なことが必要なのか、その辺のお考えをお聞かせいただければと思います。

（吉田教授）なかなか面白い、何と言ったらいいかな、失礼ですけれども、いい質問を、わくわくするような質問を頂いたなと思っているんですけれども。

大規模な実験が必要かどうかということに関しては、私個人は現在あれですけれども、それは必要ないですね。何でかというと、地層処分場の安全評価というのは核種移行解析でやります。

核種移行解析というのは、基本、水みち、いわゆる核種がどういったところを通っていくのかというのを、シナリオとかを作ったり何だりしてやるということなので、そういう意味では、例えば断層とか、割れ目帯とか、こういった例えば坑道周辺の擾乱帯とか、あとはそういう、そうですね、水みちとなり得るであろうところに対してどれくらいこの効果があるかというのを見ていけばいいというのがありますので、そこにフォーカスするようなデータを取るという意味では、そういう意味では何か数キロ四方だとか、数百メートル四方とか、そういう大規模、そういう意味でちょっと大規模と今私は理解したんですけれども、それは逆に必要ないかなと。

そこにフォーカスして、もちろん水みちとしては今、日本大学のキャンパスで３メーターぐらいの透水層というのを対象にした実験結果もやっているんですけれども、それはそういうところに処分場を設けるかというと、恐らくそれは未固結な地層なので、そういうことはないと思うんです。そうすると、３００メートルも深い岩盤に対してどういったところが水みちになり得るのかとすると、やっぱり活断層、活断層は排除するとして、古い断層とか、掘ったことによって遭遇する割れ目帯だとか、あとは人工的にできるようなものという話になってくるので、それらは大体スクリーニングされているので、というか分かっているので、どこで分かっているかというと、やっぱり瑞浪とか幌延の地下研究所でそれだけ２０年ぐらいやってきたデータの蓄積もありますし、かつスウェーデンとかほかの国々の岩盤、いわゆる地下環境の状態です。

こう言ったらあれですけれども、よくフィンランドだとかスウェーデンは２０億年の古い

岩盤でどうだこうだと言われるかもしれないですけれども、岩石は一緒なので、できている水みちも基本一緒です。それがどういうものでシーリングされているかどうかという天然の状態というのは、やっぱりその国のいわゆる地下水の状態とか成分とかで異なるんですけれども、基本一緒です。あとはその密度、いわゆる水みちの量が多いのか少ないのかとか、連続性が長いか短いかとか、それは岩種にもよるんですけれども、そういうデータもかなり蓄積してきていますので、そういった一番リスクになりそうなところにこのコンクリーション化剤を注入して、そしてデータを吸い上げるということで対応できると思います。

じゃ、それはどうやるのかと。まさに今、北海道でやっているゼネコンとの一緒の実証研究とか、別にそれは地層処分のためにやっているわけじゃないですけれども、そこは安山岩でやっているんですけれども。あとは花崗岩でもやっていますし、あとは堆積岩。例えば茨城でやるような、候補地になりましたけれども、同じような岩石というのは日本、西南日本に結構広がっていますので、そういうのをターゲットにした実験研究とかをやっていって、それで効果を見るというのがやっぱり一つなのか。私が言うのもあれですけれども、一番難しいのは、どれくらい長期にもつのかというのをどうやって実証するかということになると思うんですね。

それで、幌延は実際１０年ぐらいモニターできるので、それくらいのことは分かるのですが、じゃ果たしてそれが１００年、１，０００年、１万年と本当にもつのかと。皆さんやっぱりそこは絶対言われるんですよ。なので、コンクリーションがありますよ。コンクリーションは１００万年であろうが１，０００万年であろうが溶けていないですよね。地下の中にありますよね。それが事実なので、それを作っている素材はそれをというか、コンクリーション化剤はそれと全く同じ素材でシーリングしていますよと。地下の環境が変わらない限りコンクリーションと同じであるはずですよと。

それは実はそのロジックはナチュラルアナログなんですね。いわゆるオクロ天然原子炉をベースにして、なぜ地層処分するかというのは、天然がやったから地下だったら２０億年でもオーケーだろうと。それを模倣する以外ないでしょうと。じゃなければ、幾ら安全評価で１０万年やろうが何しようが人は信用しないですよ。そんなに安全かと。でも、天然がやっていることは絶対否定できないですよね。そこがやっぱり、自分で言うのもおこがましいですけれども、この技術のやっぱり真骨頂というので私は思っていまして、それを共有してもらいつつ。最もだから天然と同じ、だからそれを証明するためには、天然と同じ現象がちゃんと見られていますよねというのを常に言い続けることかなというように思っています。も

ちろん、それとどんどんシーリング効果が出ていますよねということだと思います。

（畑澤参与）ありがとうございました。

原理原則はサイエンスのロジックでいいと思うんですけれども、それを社会実装するときにはやはりまた大きなギャップがあると思うんです。

（吉田教授）そうですね。

（畑澤参与）最終的にはこの世の中が、社会がアクセプトするかどうかというところだと思うんですね。

（吉田教授）おっしゃるとおりです。

（畑澤参与）それからあともう一つはコストの問題だと思います。

（吉田教授）確かに。

（畑澤参与）その辺も含めて進んでいただければというふうに思いました。大変ありがとうございました。

畑澤は以上です。

（吉田教授）ですので今日は、私は皆さんが納得するかどうかという、納得してもらえるかどうかという、そこがやっぱり一つの、ハードルというわけじゃないですけれども、そこで何かのコミュニケーションで、やっぱりこういった方がいいよねとか、こうした方がよかったんじゃないかというのが見えてくれば、自分でもう一回フィードバック掛けて、それは次のもっと。

この間言ったように、皆さんはどちらかというと、こっち側の立場だと僕は思っていまして。ただ、その外側には恐らく本当かというのが絶対いると思うので、おられるはずなので、そういうメンバー等含めて。そういう意味で実はフォーラムを作って、研究会も作って、今やり始めているという状況です。ありがとうございます。

（上坂委員長）それでは、岡嶋参与から御意見を頂ければと思います。

（岡嶋参与）どうも御説明ありがとうございました。

「サイエンスＺＥＲＯ」も見ていまして、それで今日のお話を聞いて、コンクリーションという、言わば自然の中で起こっている言わば閉じ込めの現象であると理解しており、このことが実用化になるといいなと思って聞いていました。

ただ、放射性廃棄物等々のところで考えると、先ほどおっしゃっていた部分の中で言うと、その環境下では放射性廃棄物を閉じ込めようとすると、自然界よりは高放射線環境下になってくるわけなので、そのような環境下でこのコンクリーションの性能がどれだけ保持される

のかということについては、実証する必要があるだろうと思います。また、もし放射性廃棄物中のある特定の核種が流出したときに、そのコンクリーションを形成する、言ってみれば炭酸カルシウムなどの一部イオンが置き換わるとかが考えられないか、その結果脆くなるというようなことは考えられないかと思います。そこで、そのような研究というのが今行われているのか、今後する必要がある課題なのか。その辺は、いかがなんでしょうか。

（吉田教授）御指摘のとおり、そこはやっぱりデータは整備しないといけないなというのは思っていますし、まさにちょっと吉橋先生とつながったところでもありますので、実際のコンクリーション化剤の弱点は紫外線なのです。それは地表に露出しているときのデータとして言われてはいるんですが、ただこのベースになる樹脂自体も開発されて、世界中でも使われていますけれども、関連するものがです。６０年ぐらいのモニターで、何かそれで非常に劣化が進行したということは余り聞いていませんので。

かつ、地中であれば、これもほかの方々も言われるので、説明するときには成分としてはこはくと一緒です。アンバーと一緒なので、化石としてはアンバーというのは出てくるんですけれども、こはく、大体虫を含むやつですよね。それはやっぱり数万年、数百万年、そういう古いものも出てくるということで、地中における安定性というのは割と得られるだろうなと。

ただ、おっしゃるように放射線がどうなのか、実際の放射性廃棄物からのとか、そういう中低レベルでもそうですけれども、それを長期に受けたときにどうなるかというデータはどこかで取得したいなというのは思っています。もちろん、設置する場所、処分ピットに直接まくまかないとか、その辺はどうするかというのはまた今後の課題だと思うんですけれども、それが一つと。

もう一つ御指摘いただいた、今度はイオンです。放射性元素なり、それがマイグレーションしてきたときに、例えばセシウムだとか、ヨウ素だとか、そういったものがどういう影響をするのかというのは当然必要ですが、これに関しては一応作っているものがカルサイトなので、炭酸カルシウムなので、炭酸カルシウムの天然環境における放射線影響というのは、一応データはあることはあるんです。

ただ、コンクリーション化剤、いわゆるレジンを一緒に組み合わせたときにどうなのかというのは、またそれはそれでデータは必要だと思いますので、そういう浸潤試験というのと、あとはカルサイトなので、これもちょっと先週はお話しさせていただきましたけれども、ストロンチウムを選択的に吸収するというのがありまして、ストロンチウムは逆に言うと吸収

したからといって構造的に壊れるわけではないので、そういう意味ではストロンチウムだけにはなってしまいますけれども、選択的にそれを取り込むというような、そういう条件で活用するということもあり得るのかなというのは思います。

ただ、いずれにしろ、放射線影響、元素への影響というのは、是非吉橋先生とかと一緒に今後は進めていきたいと思っている分野です。

（岡嶋参与）ありがとうございます。是非その辺のところを詰めていただき、よりもっと実用的なものに高めていただければと思います。

私からは以上です。

（吉田教授）ありがとうございます。

（上坂委員長）それでは、小笠原参与から御意見を頂ければと思います。

（小笠原参与）どうも御説明ありがとうございました。

先生、自らコンクリーションの原理を解明されて、それを解明されただけでもすばらしい御功績だと思いますけれども、その技術を社会実装すべく、非常なスピードで色々な分野でそのための活動に取り組んでおられるということに、まず高い敬意を表したいと思います。

特に色々な企業を巻き込んでなさっていらっしゃるので、やっぱり社会実装を広げていくためには、そういった企業の力で収益につなげていく形で広げていくということは重要なのではないかと思います。そういったところにしっかり取り組んでおられるので、非常に期待が持てるなというふうに聞いておりました。

特に、日本は災害も多くございますし、それからたしか今年度からだと思いますけれども、国土強靭化計画も始まって、今回指摘されたような、色々な脆弱になっているインフラに対応していくことがまさに喫緊の課題となっております。そういった中で、この技術は社会実装されれば大きな貢献になるのではないかと思って、心強く伺っておりました。

（吉田教授）ありがとうございます。

（小笠原参与）特に原子力委員会との関係では、核燃料の廃棄物の深層地下処分というのが、大きな課題ですので、これは先ほどのお話を伺っておりますと、１回注入すればあとは自然のメカニズムに倣って自ら自己拡大すると、水があればということのようですので、そういった意味でも長期のメンテナンスの観点からも大きなメリットがあるんではないかなと思って伺っておりました。今後、いろいろな使い勝手が実証されて、早く社会実装されていくことを期待するばかりです。

一つ伺いたいのは、最終的にこれどんどん非常に透水性を低くして、強化されていって、

２２ページに、注入後にコンクリーション化によりシーリングされた後の形が出てきておりますけれども、ここに固定されてしまって、まさに長期に安定させて、地下で維持したいというときはこれが非常に役立つと思うんですけれども、私どもこの辺りに住んでおりますと、しょっちゅう何か地下を掘り返して、前やった構造物を破壊して、次の新しい構造物を建てていくという、割と柔軟に地下の構造物を改革していくというか、その上に新しい構造物を時代時代の需要に応じて造れるようにしておきたい、柔軟性も残しておきたい、という需要もあろうかと思うんです。

その場合に、これがもう一回固定してしまうと長期に動かせなくなってしまうので、そういった都会部での今後いろいろ変動を、変革が予定されるようなところでは、かえって使いにくいという面があるのかな。素人ながら思ったんですけれども。

（吉田教授）それはどうかということですか。

（小笠原参与）はい。そこら辺はいかがでございましょう。

（吉田教授）これで大丈夫です。何というか、剥がれというか、何というんでしょう、全く壊せないとか、そういう状況になるわけではないので、カルサイトベースの例えばこういうやつは、例えば岩石ですし、それをシーリングしているのが方解石という状態ですので、削岩機でも十分に壊せますから。ただ、本当に何というんでしょう、いわゆるイオンでの拡散なので、水はもう通しにくくなっていきますよという、そこですよね。

なので、先ほどちょっと言いましたけれども、日大のキャンパスの地下１０メートルのところで透水層３メーターのをやっているんですけれども。そこはだから土壌汚染対策としてそういうデータが使えるといいよねということで、特に千葉とか、あっちの方とか、

とか、そういったところで、そうするとやっぱり重金属工場跡地とか、そういったところの重金属を整地してやろうとすると、漏れ出てきているとか、そういうのを下流に移動させない、どうしたらいいかとか、そういうときにやっぱりこれを注入することによって、透水性が１０のマイナス４乗から１０のマイナス７乗に例えば３桁下がるだけで１，０００分の位置になるわけですよね。そうすると、１年間に動くのが、今まで極端なことを言うと、１，０００メーター動いていたのが１メーターになっちゃうわけですよね。だから、それぐらいの効果でやれば、下流に対してのいわゆるメンテナンスだとか、それも非常にコストが落とせるとか、そういうのがやっぱりポイントでして、じゃそこを工事をして、工場地帯建てていけないのかと、そんなことは全然ないですので、そのときはまたこれを違うところに注入したりで補填してやるとか、そういうふうにとは思っていますので、その辺の柔軟性ももち

ろん考えつつやりますので、関心を持っていただければと思います。

（小笠原参与）大変心強いお答えありがとうございました。早く内外で社会実装されることを期待したいと思います。ありがとうございます。

（上坂委員長）それでは、上坂から意見を述べさせていただきます。

まず、６ページです。このすばらしい技術を原子力委員会としては使用済燃料を考慮に入れ、地層処分の周辺の透水防止技術に貢献されることを強く期待するところです。そのときの考慮しなければいけない期間といいますと、ここにありますように約１０万年とあります。

それで、ここまでの議論でもありましたが、例えば別の２ページ辺りで、既にある非常に古い化石的なコンクリーションを見てみます。この２ページにあるものはもうかなり古いものもあります。これはコンクリート的に見えますけれども、周辺が石英が多かったりすると、琥珀、アンバーというケースもあるということで。そうしますとこれからコンクリーションをやって、それで１０万年後の姿は、周辺の環境にもよりますけれども、こういうコンクリートっぽい形か、それから石英が多ければ透明が入った琥珀的なもの、そういうものに変わっていくと。自然から学ぶというふうに考えてよろしいのでしょうか。

（吉田教授）はい、いいと思います。

（上坂委員長）なるほどね。それで今おっしゃられるように自然から学べると。強度的には十分であるということですよね。

（吉田教授）はい。

（上坂委員長）強度はもともと岩盤に持たせて、透水性を防止するということでもあるということですね。

（吉田教授）そうです、そういうことです。

（上坂委員長）琥珀のような石英が残るのであれば、強度的にも強くなりますよね。そういうふうに考えてよろしいのですね。

（吉田教授）と思います。

（上坂委員長）分かりました。

それと、既に畑澤参与からも御質問があった、７ページに典型的な地層処分の地下の構造とあります。これをコンクリーションする場合も数百メートル、数キロメートルやるのではなくて、数十メートルか数メートルぐらい。とにかく水を止めればいいということですので、こういう施設の中にそれぐらいの層をコンクリーションしていけばいい。そういう規模でよろしいですね。

（吉田教授）はい。

（上坂委員長）分かりました。

（吉田教授）恐らくここの坑道周辺を、例えばロックボルトなんかも含めてシーリングしていくと、もちろんこういう水理学的にはこれが導水勾配というのがあるので、例えばこっちに山があれば水がこう流れるわけです。ここを避けるようにして下流に流れるという状況ができるということです。だから、ここだけがちょっとした不透水層みたいな感じにスポットとしてなっていくと。

それはもう全然、地球科学的に見ると、地質学的にもそういう不均一層というのはもう確認はできているので、それをやっぱり狙ったから、リージョナルスケールと我々は言いますけれども、そこでもって透水層がどれくらい、どういうところに分布しているかというのも分かりますので、そういうのを狙って全体を不透水層みたいなのに置き換えていくとか、それがこういうレイアウトとはもし一石二鳥みたいな形になれば、それはそれで非常にいいわけですし。そういうのも将来的にはやろうと思います。

（上坂委員長）まさに地質、水理、理工学の融合ですね。

（吉田教授）ええ。そこが発想的にはやっぱり最初のスタートですので、コンクリーションが何で天然の地層でも残っているかというと、周辺の地層とのコントラストというのがやっぱり１，０００分の１から万分の１なんですよ。だからもうそれだけコントラストが付くと、コンクリーションをわざわざ水が通る必要はないというか、全体としてのあれはよけて通るだけなので、そうするとますます残っていくということです。

だから、そういう仕組みも含めてバリア機能というか、処分場の性能を考えていけばいいと思っているんですけれども。

（上坂委員長）あと最後ですが、今後の様々な応用研究のお話もありましたが、実は日曜、月曜で、私と直井委員は福島の廃炉の国際シンポジウムに行ってきました。廃炉の進捗を聞いてきたのです。１、２、３号炉の燃料デブリの試験取り出しをして、それから１１年後に本格取出しが始まるのです。そのために新たにコンクリート構造物が造られますが、既にあるものは活用するということです。福島でのコンクリーションの応用研究というのはあるのでしょうか。

（吉田教授）はい。今、東電の方からもこの技術インタビューを受けている状況で、凍土壁にすぐに置き換えるとか、そこまではちょっとまだどうかというのはありますけれども、凍土壁は先週もありましたけれども、やっぱり今は透水係数ゼロでやっている状態なので、氷化

するということなので、このコンクリーション化剤を使っても、恐らく透水係数、１０のマイナス１０乗だとか、そういうのができたとしても、やっぱり水通るでしょうというような話になっちゃうと、必ずしも凍土壁に取って代わるというのはどうかな、というのはあると思うんです。

ただ、１０のマイナス１０乗でそのときの汚染水の汚染濃度のレベルがどれくらいなのかとか、あるいは今凍土壁の外側、あるいは凍土壁の上流側にこれを敷設することで、いわゆる汚染水の回ってくる回り方を軽減させるとか、そういうものの組合せ的なものとしてのアイデアというか発想ですよね。

実際、東電から今言われているのは、上流側の水みちをこれで止められませんかというのはやっぱり彼らは言っていて、どうしてかというと上流側の地層、あそこの若い地層は未固結地層で、やっぱりグラウト剤が効かないです。セメントミルクが微粒子で入っていかないので、いわゆる亀裂の岩盤ではないので。そうすると、この注入してイオンで広げさせるというのがやっぱり効果的だろうと。

実はこれ、六ヶ所村もそうで、六ヶ所村のＬ１の水みちはいわゆるセメントミルクが使えないというのは、以前から言われていて、それをシーリングするのにこのコンクリーション化剤が使えないかということがあるので、そこはやっぱりこういう未固結地層における適用性としては有効ではないかなと思います。

（上坂委員長）そこも期待したいところでございます。

それでは、どうも御説明ありがとうございました。

（吉田教授）こちらこそありがとうございました。

（上坂委員長）議題（１）は以上でございます。

吉田先生におかれましては、大変恐縮ですけれども、御退席いただきます。

（吉田教授）はい、ありがとうございました。

（吉田教授　退室）

（上坂委員長）それでは、次に議題（２）について事務局から説明をお願いいたします。

（北郷参事官）今後の会議予定について御案内いたします。

次回の定例会議につきましては、令和８年９月８日火曜日、１４時から、中央合同庁舎８号館６階６２３会議室において予定しております。議題については調整中でありまして、原子力委員会ホームページなどによりお知らせいたします。

以上です。

（上坂委員長）ありがとうございます。

その他、委員から何か御発言はございますでしょうか。

御発言がないようですので、これで本日の委員会を終了いたします。お疲れさまでした。

－了－