

小特集

核融合炉内外におけるトリチウムのメンテナンスと廃棄物処理

5. コンクリート壁中のトリチウム移行挙動

稲垣 八穂 広
(九州大学大学院工学研究科)

Tritium Migration in Concrete Walls

INAGAKI Yaohiro

Department of Applied Quantum Physics and Nuclear Engineering, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

(Received 12 July 2000)

Abstract

Concrete is a materials with a complicated composition and microstructure. Though much knowledge regarding the mechanical properties of concrete materials has been obtained empirically, knowledge concerning its physico-chemical properties, such as diffusivity of radionuclides and chemical durability for long-term, is insufficient for the performance assessment of concrete materials used for fusion plants and waste disposal.

Tritium, a major radionuclide to be managed in fusion plants, has some chemical and physical forms in concrete, which makes tritium migration in concrete more complicated. This article reviews tritium migration in concrete from a physico-chemical point of view.

Keywords:

concrete, tritium, tritiated water, diffusion, leaching, free water, bond water, microstructure

5.1 はじめに

コンクリートは我々にとって非常に身近な材料である。コンクリートはその優れた強度、耐久性、成形性、経済性から、住宅、ビル等の建築物や橋、ダムといった大型建造物まで、ほとんどすべての建築建造物に構成材料として用いられている。原子力発電所をはじめとする現在の原子力施設においても、原子炉建屋の外壁（建屋コンクリート）から原子炉压力容器を取り囲む遮蔽材（生体遮蔽コンクリート）に至るまで、大量のコンクリートが用いられている。また、現在、研究開発が進められている放射性廃棄物処分施設（一部はすでに操業中）や、核融合炉施設においても、コンクリートはその主要な構成材料として用いられる予定である。

このようにコンクリートは我々の生活に必要な不可欠な

author's e-mail: inagythe@mbox.nc.kyushu-u.ac.jp

材料であるが、コンクリートの性質に関して我々はどれくらいのことを知っているのだろうか？ これまで、コンクリートは主に建築建造物の構造材料として用いられてきたことから、その強度、耐久性については長年にわたる経験工学的な多くの知見が得られている。一方、原子力施設に用いられる場合には、構造材料としての強度、耐久性に加えて、放射性核種を閉じ込める機能や放射線（主に γ 線、中性子線）を遮蔽する機能が求められる。しかし、このような機能を評価するのに必要なコンクリートの物理化学的性質については、残念ながら、これまでに十分な評価が行われているとは言えない。その原因の多くは、コンクリートが複雑な組成、微細構造を有する非均質な複合材料であり、その物理化学的解析が難しいことに加え、このような物理化学的性質が工学的

に特に重要とされてこなかったことにあった。

放射性廃棄物の処分施設では、コンクリート、セメント系材料は構造材、廃棄物容器、固化材等として用いられ、長期間にわたり放射性核種を閉じ込める機能が求められていることから、核種の吸着性能や移行挙動およびその劣化の物理化学的機構を評価することが必要となる。また、寿命を終えた原子炉施設を安全、効率的に解体処分(デコミッションング)するためにも、コンクリート中の放射性核種の状態や移行挙動を評価することが必要となる。このようなことから、近年、放射性核種の移行に関連するコンクリートの物理化学的性質についての研究が活発に行われるようになってきている[15]。

核融合炉施設においても、他の原子力施設と同様、コンクリート中の放射性核種、特にトリチウム(³H)の移行挙動は、そのメンテナンスと廃棄物処理処分を考えるにあたって最も重要な評価項目の一つとなる[6]。本章では、コンクリートとは何か?という基本的な事象から出発し、コンクリート中のトリチウムの移行挙動について現在までに得られている研究成果を物理化学的観点から整理する。

5.2 コンクリートとは何か?

コンクリートとは骨材を結合材(セメントペースト)で固めたものである。ここで骨材とは砂、石、岩石のことであり、一般に、粒径5mm以下のものを細骨材、粒径5mm以上のものを粗骨材と呼ぶ。一方、セメントペーストとはセメント粉末に水を加えて凝結硬化させたものである。また、骨材として細骨材のみ含むものをモルタルと呼ぶ。一般的なコンクリートでは、容積の約70%を骨材、約30%をセメントペーストが占めている。セメントペーストは大小様々な空隙を有しており、問題となるコンクリート中のトリチウムの移行は、主にこのセメントペースト中の空隙を介して起こるものと考えられる。したがって、コンクリート中のトリチウムの移行挙動を評価するためには、セメントペーストの性状を十分理解することが重要となる。

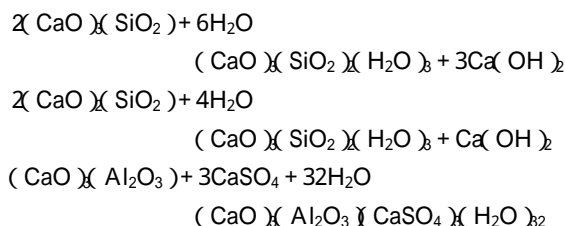
5.3 セメントペーストの性状

セメントの化学組成は、酸化カルシウム(CaO)、二酸化ケイ素(SiO₂)、アルミナ(Al₂O₃)、酸化鉄(Fe₂O₃)、無水硫黄(SO₃)およびその他の不純物からなる。セメントはその組成によりいくつかの種類に分けられるが、最も一般的なセメントである普通ポルトランドセメント(OPC)の組成をTable 1に示す。Table 1に示す酸化物

Table 1 Chemical composition of Ordinary Portland Cement (OPC).

Component wt%	
CaO	64.2
SiO ₂	22.2
Al ₂ O ₃	5.2
Fe ₂ O ₃	3.1
SO ₃	2.1
MgO	1.4
Na ₂ O	0.6
K ₂ O	0.2
H ₂ O	0.6
CO ₂	0.1

は、実際には(CaO)_x(SiO₂)_y、(CaO)_x(SiO₂)_y(Al₂O₃)_z、(CaO)_x(Al₂O₃)_z(Fe₂O₃)_w、(CaO)_x(Fe₂O₃)_w、CaSO₄等の化合物の形で存在し、CaSO₄(石こう)以外の化合物は、C₃S、C₂S、C₃A、C₄AF、C₂Fと略称で呼ばれる。セメントに水を加えると、これらの化合物が以下のような水和反応により凝結、硬化してセメントペーストとなる。



ここで主要な水和生成物である(CaO)_x(SiO₂)_y(H₂O)₃：C₃S₂H₃は、実際には(CaO)_{1.6}(SiO₂)_{1.7}(H₂O)_{1.7}のように各成分比が整数比にならないことが多く、幅広い組成を持つことから、通常、C-S-Hゲル(Calcium Silicate Hydrate gel)と記述される。C₃S₂H₃は天然鉱物であるトベルモライト(Tobermorite)と多くの共通点を持ち、トベルモライトゲルと呼ばれることもある。また、CaSO₄(石こう)はエトリンガイト((CaO)_x(Al₂O₃)_z(CaSO₄)_w(H₂O)₂：AFt)、モノサルフェート水和物((CaO)_x(Al₂O₃)_z(CaSO₄)_w(H₂O)₂：AFm)等の硫酸塩水和物を生成することで、セメントが急激に硬化するのを防ぐ役割を果たす。以上のことより、水和反応が進んだセメントペーストは、C-S-Hゲル、Ca(OH)₂、少量の硫酸塩水和物および水から構成されている。完全に水和したポルトランドセメントでは、C-S-Hゲルがセメントペースト体積の60~70%を、Ca(OH)₂が20~30%を占める。

セメントペーストは大小様々な空隙を有する微細構造

を持つ。セメント水和物の固相容積は水和前のセメントと水の容積和より小さいため、セメント粒子の水和が進行すると、粒子間に水和物で埋められない毛細管空隙 (capillary pore) が形成される。また、セメント粒子の水和物自体も小さなゲル粒子の集合体であり、ゲル粒子間にゲル空隙 (gel pore) が存在する。一方、C S H ゲルは厚さ 1.1 nm 程度の単位層が積み重なった層構造を持ち、その層間 (interlayer) には H₂O や Ca²⁺ が収まっている。このほかにも、練り混ぜの際に混入する空気泡や、遷移体 (transition zone) と呼ばれる骨材 - セメントペースト界面のポーラスな領域が存在する。このように、セメントペースト中には様々な空隙が存在し、便宜上、空気泡、毛細管空隙、ゲル空隙等に分類されるが、その分類は研究者によって異なり、必ずしも明確には定義されていない。硬化セメントペーストの細孔径分布の一例を Fig. 1 に示す [7]。このようにセメントペースト中には大小様々な空隙が連続的に存在し、また、空隙の大きさや分布はコンクリートの作製条件や材令によって大きく変化することが、空隙の明確な分類が困難な理由となる。大まかな分類では、ゲル空隙の大きさは 1~3 nm、毛細管空隙の大きさは 3 nm ~ 30 μm、空気泡の大きさは 20 μm ~ 数 mm 程度であると報告されている [8]。また、これら空隙の多くは水で満たされている。

5.4 コンクリート中のトリチウムの存在形態

トリチウムはコンクリート中に様々な形態で存在することから、コンクリート中のトリチウムの移行挙動を評価するためには、その化学形態、存在状態を理解することが重要となる。コンクリート中の水素は、水 (H₂O) または水酸基 (OH) の化学形態で主にセメントペースト中に存在する。セメントペースト中の水は先述の様々な空隙中に自由水 (free water) として存在し、また、C S H ゲル中に結晶水 (water of crystallization) としても存在する。一方、水酸基は C S H ゲルや Ca(OH)₂ の結晶構造内に存在する。結晶水や水酸基等の結合状態にある水は、自由水 (free water) に対して結合水 (bond water) と呼ばれることもある。Numata ら [9] による、硬化したセメントペースト中の水素の存在状態とその割合を Table 2 に示す。Table 2 に示すように、セメントペースト中の水素の 80 - 90% は水の状態で存在し、その存在場所により、毛細管水 (capillary water)、ゲル水 (gel water)、結晶水 (water of crystallization) 等に分類される。しかし、その分類方法は研究者によって異なり、必ずしも明確には分類されていない。これは、先述のように、セメ

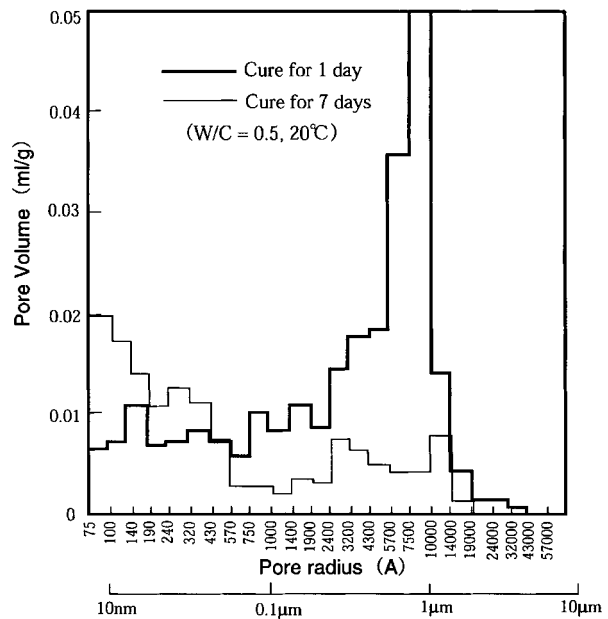


Fig. 1 Pore distribution in hardened ordinary portland cement paste [7].

Table 2 Hydrogen distribution in hardened cement pastes [9].

State	Percentage
Capillary water, Free water	~65%
Water of crystallization	~20%
Ca(OH) ₂	~12%
OH base in C-S-H	~3%

ントペースト中の空隙の明確な分類が難しく、また、それら空隙中の水の挙動も明確な分類が難しいためである。Fig. 2 に、硬化セメントペーストの平衡含水量と湿度の関係 (乾燥曲線) の一例を示す。一般に、乾燥曲線はどこにも屈折点のない連続曲線となり、毛細管水、ゲル水、結晶水を明確に区別する水蒸気圧は存在しないことがわかる。すなわち、セメントペースト中の水はその存在場所により分類されるが、その挙動は連続的に変化し、明確に区別できない [10]。

コンクリート中のトリチウムの存在状態は、その導入のされ方により異なってくる。コンクリート中へのトリチウムの導入のされ方は二通りに大別できる。まず第一は、トリチウムが水または水蒸気の形でコンクリート表面に接触し、コンクリート内部に浸透していく場合であり、これは「浸透」と呼ばれる。浸透によりコンクリート中に導入されたトリチウムの多くは水の形態でセメン

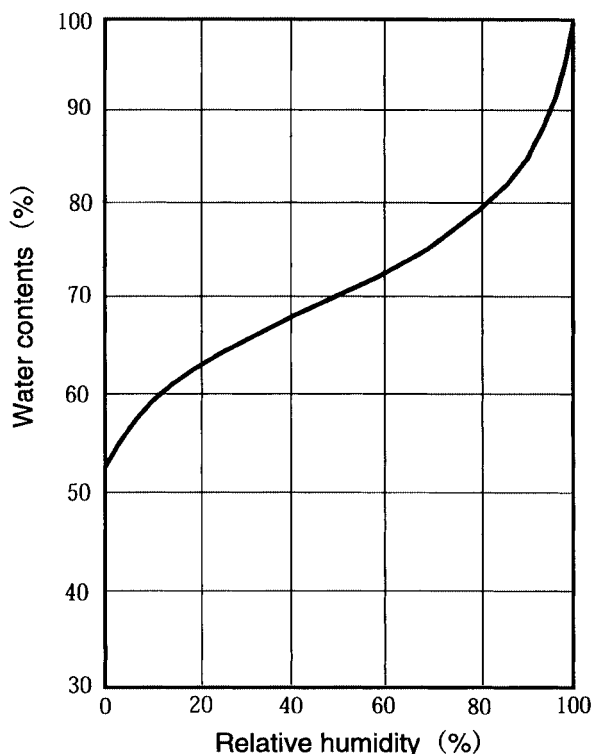


Fig. 2 Equilibrium water contents in hardened cement paste as a function of humidity [10].

トペースト中の各種空隙中に自由水として存在する。第二は、コンクリート中にわずかに存在する⁶Li(天然存在比: 7.5%)が中性子と反応し(⁶Li(n, α)³H), コンクリート中にトリチウムが生成される場合であり, これは「放射化」と呼ばれる。放射化により導入されたトリチウムは, 自由水としてセメントペースト中の各種空隙中に存在するものに加え, 一部は結合水(結晶水や水酸基)の形態でセメントペースト中のC-S-HゲルやCα(OH)₂の結晶構造中に, また, 一部は水または水酸基の形態で骨材中にも存在する。コンクリート中のトリチウムの移行挙動は, その存在形態, 存在場所により大きく異なる。

5.5 コンクリート中のトリチウムの移行挙動

コンクリート中の放射性核種の移行挙動については, 近年, 様々な放射性核種について拡散係数, 吸着係数等のデータ取得や, 移行機構の解明等が活発に行われている[15]。しかし, 残念ながらこれらの研究の多くは核分裂炉からの放射性廃棄物処分を対象としたものであり, 核分裂生成物(Fission Products)核種の移行に比べてトリチウムの移行に関する研究例は十分とは言えない。ここでは, コンクリート中のトリチウムの移行挙動につい

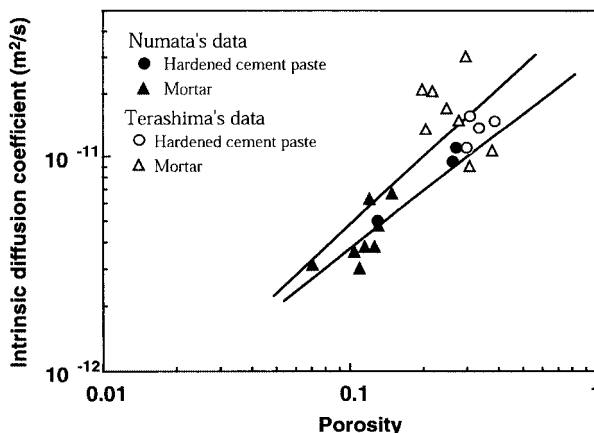


Fig. 3 Intrinsic diffusion coefficient of tritiated water in cement materials as a function of porosity [11,12].

て, これまで得られている研究成果のいくつかを, トリチウムの存在状態に着目して整理する。

5.5.1 トリチウム水の移行

コンクリートがトリチウム水と接触している場合, トリチウムは主に自由水の形態でセメントペースト中の空隙を移行するものと考えられる。前節で述べたように, セメントペースト中には大小様々な空隙が連続的に存在するため, トリチウムの移行挙動も複雑となる。Numataら[11]は, 空隙率の異なる各種セメントペースト, モルタル中のトリチウム水の拡散係数を透過試験により求めている。この試験は, ディスク状セメントペースト試料の空隙を水で満たした後, 試料片面にトリチウム水を接触させ, 試料を透過してくるトリチウム水量を時間の関数として測定するものである。このようにして得られたセメントペースト中のトリチウム水の拡散係数を Fig. 3 に示す[11,12]。室温でのトリチウム水の拡散係数は $10^{-12} \sim 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ であり, 拡散係数は空隙率の増加とともに増加することがわかる。また, この値はセメントペースト中の水の自己拡散係数とみることもしもできる。Dela-graveら[13]も, 各種セメントペースト, モルタルを用いて同様の透過試験を行い, トリチウム水の拡散係数として Numata らと同程度の値を求めている。また, トリチウム水の拡散係数は, 空隙率のみではなく, 空隙のサイズ, 分布や遷移体(transition zone)の状態等の微細構造に大きく影響されることを示している。

コンクリート中のトリチウムの拡散係数は, 浸出試験によっても求められている。これは, トリチウムを含有させたコンクリート試料を水中に浸漬し, 浸出してくるトリチウム量を浸出時間の関数として測定する試験であ

る。トリチウムの含有のさせ方としては、硬化コンクリートにトリチウム水を浸透させる方法、コンクリート作製時にトリチウム水を練り混ぜ水として用いる方法および中性子照射による放射化があり、含有のさせ方によってトリチウムの存在状態の割合が異なる。Fig. 4に筆者らが行ったトリチウム含有モルタル試料の浸出試験結果の一例を示す[14]。ここで用いられたモルタル試料はトリチウム水を練り混ぜ水として作製したものであり、トリチウムは試料中に毛細管水、ゲル水、結晶水の他、Ca(OH)₂、C-S-H中のOH基としても存在する。Fig. 4に示す結果より、試料中に含有させたトリチウムの約90%は速やかに浸出するが、残りの10%の浸出は極めて遅いことがわかる。前者は試料中に自由水として存在するトリチウムであり、後者は結合水(結晶水、Ca(OH)₂、C-S-H結晶中のOH基)として存在するトリチウムであると考えられる。自由水として存在するトリチウム(約90%)は空隙中を速やかに移行、浸出すると考えられ、浸出曲線から求めた拡散係数はNumataら[11]の測定結果と同様、10⁻¹¹ m²/s程度である。一方、結合水として存在するトリチウム(約10%)が移行するには、結合水が空隙中の自由水と入れ代わるまたは結合水を含む固相が空隙中の水に溶解する必要があるため、その速度は極めて遅いものと考えられる。

以上のことより、コンクリート中のトリチウム水の移行は主にセメントペースト部分の空隙を自由水として拡散する過程に支配され、その拡散係数は10⁻¹² ~ 10⁻¹¹ m²/sであると判断される。また、その拡散係数は、空隙サイズ、分布等の状態によって大きく変化し、コンクリート中に大きな亀裂等が存在する場合等では、トリチウム水の移行速度はより速くなるものと予想される。前述のように、コンクリート中には、空気泡、毛細管空隙、ゲル空隙等の様々な空隙が存在し、また、トリチウム水も、毛細管水、ゲル水、結晶水等の様々な状態にある。トリチウム水が、どのような状態でどの空隙を移行するかについては十分評価されておらず、その移行機構に関する系統的な研究が必要であると思われる。

5.5.2 トリチウム水蒸気の移行

コンクリートが大気と接触している場合、セメントペースト中の空隙はすべて水で満たされているわけではない。したがって、トリチウムは主に水蒸気の形態でセメントペースト中の水で満たされていない空隙中を移行するものと考えられる。Numataら[11]は、空隙率の異なる各種セメントペースト、モルタル中のトリチウム水蒸気の移行挙動を非定常吸着試験により求めている。こ

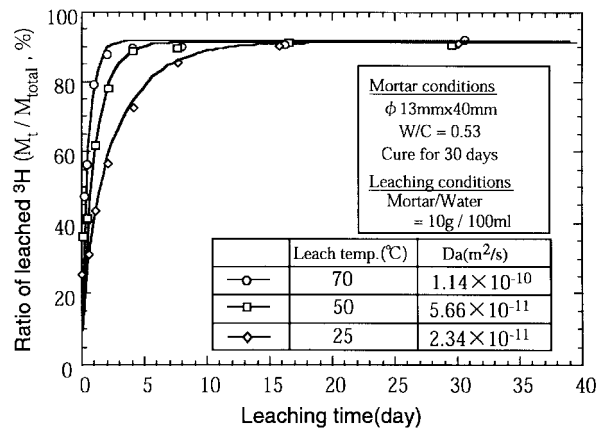


Fig. 4 Leaching of tritium from tritium doped mortar [14].

れは、トリチウム水蒸気を含む相対湿度93%の空気をセメントペースト試料の一面に接触させ、トリチウム吸着量および試料中のトリチウム濃度プロファイルから移行挙動を評価するものである。それらの結果によれば、トリチウム水蒸気の移行は蒸発凝縮を伴って空隙中を拡散する過程に支配され、その見かけの拡散係数は10⁻¹¹ m²/s程度である。また、拡散プロセスとして、速い拡散プロセスと遅い拡散プロセスの2種類が存在することも示されている。

Onoら[15]は、セメントペーストへのトリチウム水蒸気の吸着試験および放出試験を行い、トリチウム水蒸気の移行挙動の評価を行っている。それらの結果によれば、トリチウム水蒸気の移行は拡散過程に支配され、その見かけの拡散係数は10⁻¹² m²/s程度である。また、トリチウム水蒸気の移行には速い拡散プロセスと遅い拡散プロセスがあり、前者は比較的大きな空隙を拡散するプロセス、後者はより微細な空隙中に同位体交換によって拡散するプロセスであると考えられている。また、トリチウム水の放出は、その存在状態により3つのステージに分けられ、毛細管水、ゲル水、結晶水の順に放出されることが示されている。

以上のことより、コンクリート中のトリチウム水蒸気の移行は主にセメントペースト部分の空隙を蒸発凝縮を伴って拡散する過程に支配され、その拡散係数は10⁻¹² ~ 10⁻¹¹ m²/sであると判断される。この場合、セメントペースト中の空隙は水で満たされている部分と水で満たされていない部分が混在するため、空隙の大きさや分布だけではなく、空隙中の水の状態によっても大きく変化する。したがって、湿度、温度等の条件もトリチウム水蒸気の移行に大きな影響を及ぼすものと考えられ、これら

の条件と空隙中の水の状態を明らかにし、トリチウム水蒸気の移行挙動を評価していく必要があると考えられる。

5.5.3 結合水として存在するトリチウムの移行

トリチウムがコンクリート表面から浸透する場合は、トリチウムは主に自由水または水蒸気として空隙を拡散することにより移行すると考えられる。一方、放射化によって導入された結合水（結晶水、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 C-S-H 結晶中のOH基）として存在するトリチウムはどのように移行するのであろうか。結合水の移行に関してはこれまであまり多くの研究が行われていないが、ここではその移行機構として考えられる以下の過程について整理する。

(1) 空隙中自由水との交換反応

結晶水として存在するトリチウムは結晶から束縛を受けており、自由水として存在するトリチウムに比べてその移行は遅い。Onoら[15]が、セメントペーストからのトリチウム放出の温度依存性から求めた活性化エネルギーは、毛細管水：7.1 kJ/mol、ゲル水：31 kJ/mol、結晶水：64.9 kJ/molであり、結晶水として存在するトリチウムの移行は、自由水として存在するトリチウムの移行に比べて十分に遅いことが判断される。結晶水として存在するトリチウムは空隙中自由水との同位体交換反応によって空隙中に移行し、自由水となったトリチウムは水または水蒸気として空隙中を速やかに移行できる。したがって、結晶水として存在するトリチウムの移行速度はこの同位体交換の過程に支配されるものと推測される。

(2) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶解

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ の水に対する溶解度は1.29 g/l(25℃)と比較的大きく、一方、 C-S-H の溶解度は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ に比べて十分に小さい。したがって、コンクリートが水に接触した場合、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が溶解析出平衡に達するまでコンクリート表面から選択的に溶出し、それに伴ってトリチウムも放出される。



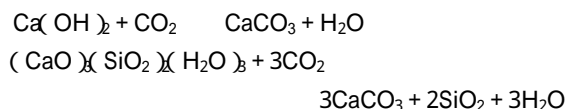
コンクリートが大量の水と接触した場合、コンクリート内部の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ も空隙中の水を介して溶出していく。したがって、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ として存在するトリチウムの移行は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶解速度および空隙中の水の拡散に支配されるものと推測される。

一方、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が溶解析出平衡に達した後もトリチウムはゆっくりと放出される。溶解析出平衡は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶解速度と析出速度が見かけ上つり合っている状態で

あり、それぞれの反応は溶解析出平衡に達した後も進行する。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶解反応では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 中のトリチウムが空隙中の水に放出され、一方、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の析出反応では、空隙中の水からトリチウムを取り込む。ここで、溶解反応で放出されたトリチウムは自由水として空隙中を速やかに移行するため、析出反応では、放出されたトリチウムの全量を取り込むことはできない。すなわち、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と空隙中の水ではトリチウムの濃度差が生じ、溶解析出反応の進行によって、トリチウムは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ から空隙中の水へ移行することになる。これは同位体交換反応と見ることができ、拡散過程に支配されて進行するものと推測される。

(3) 大気中二酸化炭素による炭酸化

大気と接触するコンクリートは大気中の二酸化炭素との以下のような反応により、ゆっくりと炭酸化(中性化)していく[16]。したがって、炭酸化反応とともに、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 C-S-H 中のトリチウムは水として放出される。



これらの炭酸化反応は固相の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 C-S-H と気相の CO_2 との直接反応ではなく、空隙中の水に溶解した Ca^{2+} と CO_3^{2-} が反応することにより進行する。したがって、炭酸化の速度は大気中の二酸化炭素濃度や空隙の大きさのほかに、湿度や空隙中の水のpH等に大きな影響を受ける。一般に、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の炭酸化速度は C-S-H に比べて極めて速いが、これは、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の水に対する溶解度が C-S-H に比べて極めて高いためである。また、通常、炭酸化反応は時間の平方根に比例して進行することから、何らかの拡散過程に律速されるものと考えられている。これらの炭酸化反応により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 C-S-H から空隙中の水に放出されたトリチウムは水蒸気として空隙中を移行し、コンクリート表面から放出される。通常の大気中では、炭酸化の速度はトリチウム水蒸気の拡散速度に比べて小さく、トリチウムの放出速度は炭酸化速度に律速されるものと考えられる。

以上のことから、結合水(結晶水、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 C-S-H 結晶中のOH基)として存在するトリチウムはいくつかの過程を経て、最終的には自由水または水蒸気として空隙中を移行する。また、結合水として存在するトリチウムの移行速度は空隙中に移行するまでの過程に支配さ

れ、その多くは何らかの拡散過程であると推測される。結合水として存在するトリチウムの移行挙動を評価するためには、その物理化学的機構の解明とともに、それぞれの移行過程の速度論的評価が今後の課題であると考えられる。

5.6 まとめ

トリチウムはコンクリート中に自由水または結合水の状態で存在する。コンクリート中のトリチウム移行の主要な過程は、自由水または水蒸気の形態でセメントペースト中の毛細管空隙等の比較的大きな空隙を拡散する過程であると判断される。その拡散係数は空隙の状態によって異なるが、概ね $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} \sim 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ である。結合水の状態にあるトリチウムもゆっくりではあるが、同位体交換、固相の溶解、炭酸化反応等の過程を経て空隙中に放出され、最終的には自由水または水蒸気の形態でセメントペースト中の空隙を拡散、移行するものと考えられる。結合水の状態にあるトリチウムの移行速度は空隙中に放出される過程に律速され、その過程は何らかの拡散過程に支配されるものと推測される。

コンクリート中のトリチウムは複雑な移行挙動を示す。これはコンクリートが複雑な組成、微細構造を有する非均質な複合材料であり、その状態が、作製条件や材令、環境により大きく変化することに起因する。また、トリチウムがコンクリート中で様々な状態を取ることとも一因である。コンクリート中のトリチウムの移行挙動を正確に評価するためには、コンクリート中の空隙やトリチウムの状態を把握し、移行の物理化学的機構を明らかにするとともに、移行を支配するいくつかの過程について、速度論的な評価を進めていくことが必要であると考えられる。

参考文献

- [1] 田中 知, 長崎晋也他: 日本原子力学会誌 39, No.12, 2 (1997).
- [2] 田中 知, 長崎晋也他: 日本原子力学会誌 42, No.3, 34 (2000).
- [3] J.R. Clifton, J.M. Pommersheim and K. Snyder, NIST IR 5690, Building and Fire Research Lab., National Institute of Standard and Technology (1995).
- [4] A. Atkinson and A.K. Nickerson, Nucl. Technol. 81, 100 (1988).
- [5] K. Idemitsu, K. Kuwata, H. Furuya, Y. Inagaki and T. Arima, Nucl. Technol. 118, 233 (1997).
- [6] M. Lowenthal, Fusion Technol. 34, 46 (1998).
- [7] 山田順治, 有泉 昌共編: わかりやすいセメントとコンクリートの知識, § 3 .ポルトランドセメントの水和反応と水和生成物 (鹿島出版, 1989).
- [8] H. Uchikawa, S. Uchida and S. Hanehara, IL CEMENTO 2/1991 (1991) p.67.
- [9] S. Numata, H. Amano and M. Okamoto, J. Nucl. Mater. 171, 350 (1990).
- [10] 村田二郎, 岩崎訓明, 児玉知巳: コンクリートの科学と技術, 第1章材料 (山海堂, 1996).
- [11] S. Numata, H. Amano and K. Minami, J. Nucl. Mater. 171, 373 (1990).
- [12] Y. Terashima and T. Kumaki, *Proc. Jpn. Soc. of Civil Engineering* (1976) Vol.256, p.91.
- [13] A. Delagrave, J. Marchand and M. Pigeon, *Advn. Cem. Bas. Mat.* 7, 60 (1998).
- [14] 石本 清, 杉本純一郎, 市島常雄, 稲垣八穂広他: 日本原子力学会1998秋の大会予稿集 (1998) M5, p.822.
- [15] F. Ono, S. Tanaka and M. Yamawaki, *Fusion Eng. Des.* 28, 378 (1995).
- [16] 岸谷孝一, 西澤紀昭他編: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化, 1 . 中性化のメカニズム (技報堂出版, 1986).