

世界初！原子炉建屋コンクリートの放射線と熱による 岩石化現象を解明

名古屋大学大学院環境学研究科の丸山 一平 教授、中部電力株式会社、鹿島建設株式会社の共同研究チームは、建設後 47 年経過した浜岡原子力発電所 1 号機原子炉建屋から放射線とそれに伴う熱に曝されたコンクリートサンプルを採取して詳細に分析した結果、トバモライトと呼ばれる天然岩石にも認められる鉱物やその前駆体の生成によって、コンクリートの強度と耐久性が向上する現象を世界で初めて発見し、そのメカニズムの解明に成功しました。

本研究では、コンクリートの圧縮強度が、通常の強度に対して 2 倍以上の高い強度に達する現象を初めて発見しました。このコンクリート強度増大を起こすメカニズムを調べてみると、砂の中の鉱物とセメントの水和物とが 40°C 以上の温度と水があるときに生ずる岩石化の反応によるものとわかりました。この反応は 2000 年前のローマ時代に作られたコンクリートが現在も強度を増進しつづけるメカニズムと同一のもので、本成果は、これまで以上に耐久性に優れたコンクリートの開発に応用できる可能性があります。

本研究成果は、2020 年 11 月 5 日付で科学雑誌『Materials & Design』オンライン版に掲載されました。

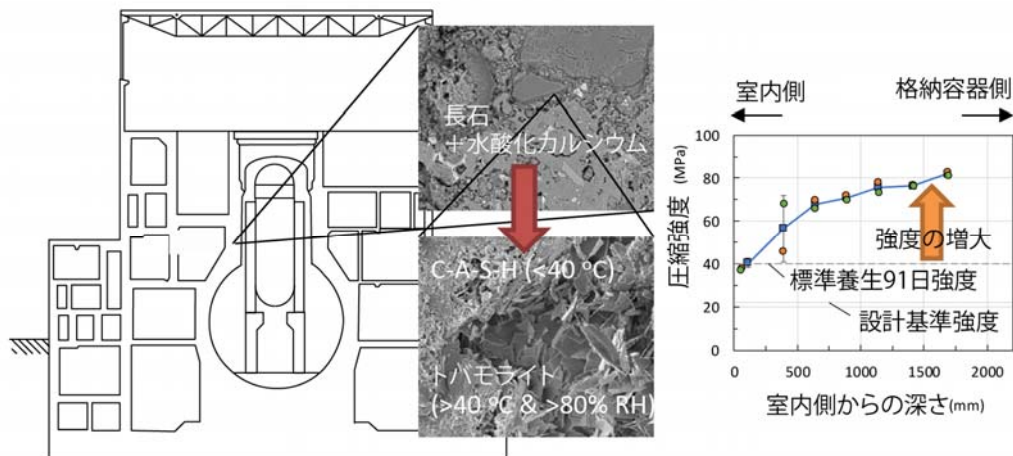
【ポイント】

- ・原子炉建屋コンクリートの放射線と熱による岩石化によって、強度が増大する現象を発見した。
- ・コンクリートの砂の中の成分（アルカリ長石類）とセメントの水和物（水酸化カルシウム）が反応し、カルシウムアルミノシリケート水和物と呼ばれる岩石鉱物の前駆体を生成して空間を充填して強度が増大する。
- ・さらに温度が高い場合にトバモライト（岩石鉱物の一種）が生成し、化学的安定性が増大するとともに強度も増大する。

【研究体制】 ※下記 3 機関の共同研究チーム



【研究背景と内容】



原子力発電所の主構造である鉄筋コンクリート構造物の安全性評価は、特に原子力発電所の長期運転を始めとして廃炉後の解体に至るまで重要な役割を果たします。一方で、現代で用いられているコンクリートは、特に一般建築物を中心に多くの理解が進んできましたが、原子力発電所のように1mを超える極厚の部材で、比較的高い温度（最大で65°C）に長期間暴露された場合に関する変質や安全性については、材料実験や比較的小さい部材の実験に基づき性能予測や規制が考えられてきました。

名古屋大学と中部電力は、2015年より中部電力の自主的安全性向上の取り組みの一環として、世界で初めて廃炉した原子力発電所のコンクリート部材の詳細分析（図1）に関する研究を進めてきました。

具体的には、さまざまな環境条件にあるコンクリート部材から図2のように円筒状のコンクリートを抜き出し、圧縮強度を取得するとともに、コンクリート中に存在する水、平衡相対湿度、微細構造の走査電子顕微鏡観察、相組成（さまざまな鉱物の存在割合）、骨材の反応率などを確認しました。

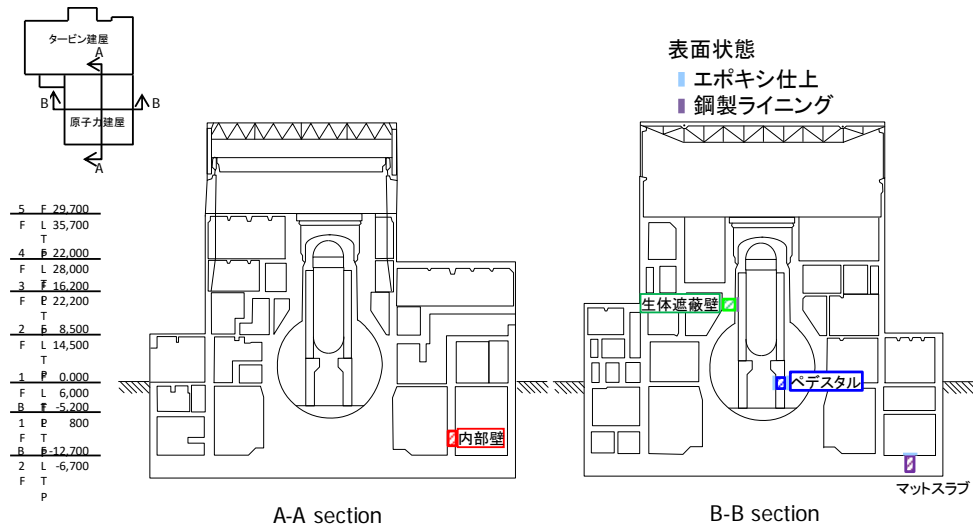


図1 コンクリートを抜き取り分析した部材

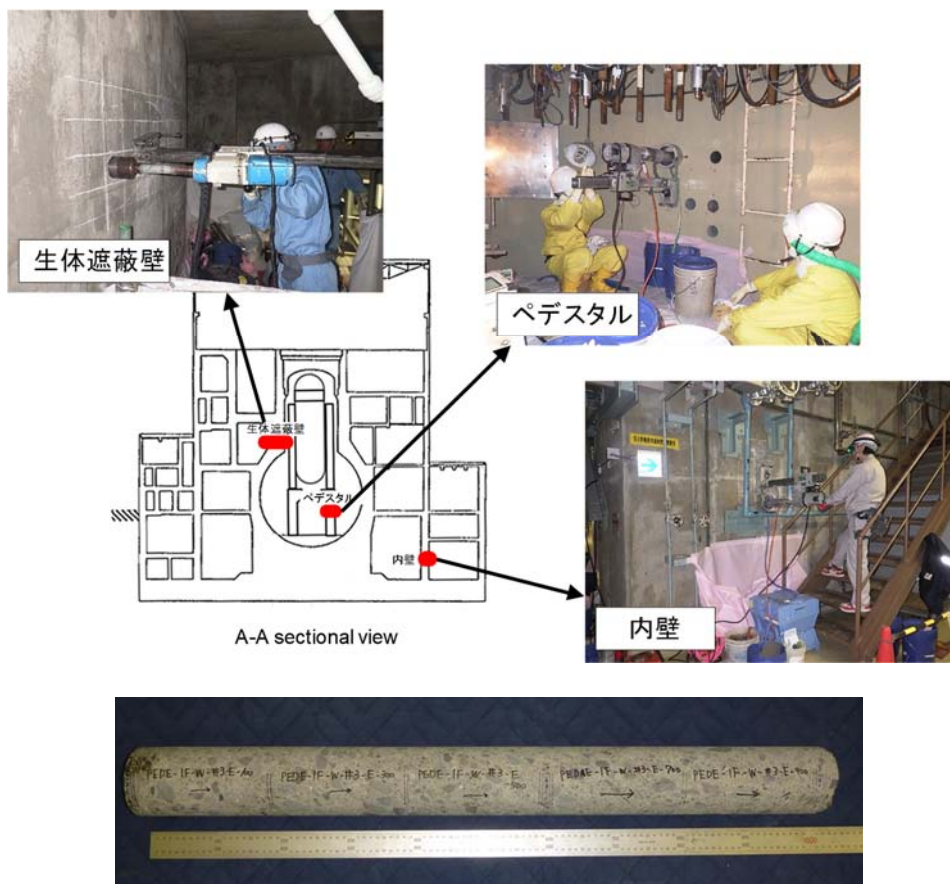


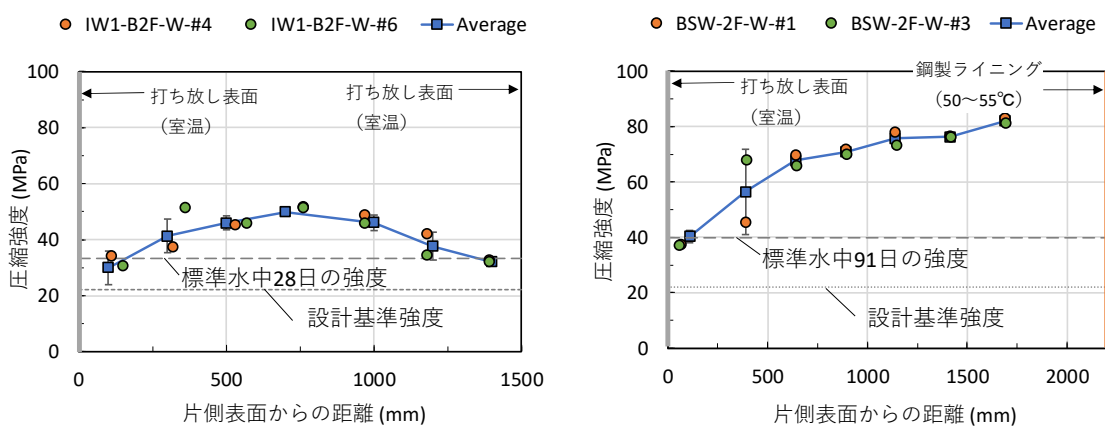
図2 コンクリートを抜き取る様子(上)と抜き取ったコア(円筒状コンクリート)の様子(下)

その結果、一般部のコンクリート壁（厚さ 1.5m）においては、内部が外側部分よりも 1.5 倍程度の強度を有すること（図3（1））、生体遮蔽壁のように高温や放射線にさらされた部材の場合には外側の 2.0 倍程度の高い強度に達する現象（図3（2））を発見しました。これは、材齢 28 日や 91 日に工場で取得する強度からは到底予測できない高い強度でした。

詳細な分析の結果、まず、この強度の分布はコンクリート中の水分分布と同様の傾向を有することがわかりました。また、骨材の反応率を評価してみると、水分が多いとこ

ろほど、骨材が反応していることがわかりました。走査線電子顕微鏡により細骨材の様子に着目してみると、細骨材の中のアルカリ長石類が反応している傾向が確認でき（図4）、粉末X線回折による分析の結果、セメントの通常の反応で析出するはずの水酸化カルシウムが消失されており、水分の少ない表層部分では水酸化カルシウムが残存している傾向が確認されました。また、非晶質なセメント水和物の量が水酸化カルシウムの減少に伴って増大していることもわかりました。

このことから、コンクリート内部では、セメントの水和反応の結果として生ずる水酸化カルシウムが骨材のアルカリ長石類と反応を生じ、カルシウムアルミノシリケート水和物とよばれる非晶質物質を生成することが明らかになりました。さらに、原子力発電所の稼働中に比較的高い温度に曝される生体遮蔽壁やペDESTALといった部材について分析してみると、トバモライトを生成して非常に安定した強度の高い物質が生成していること（図5）、反応量と強度が高い相関性を持つこと（図6）が明らかになりました。



(1) 内壁（一般部） (2) 生体遮蔽壁

図3 壁の中のコンクリート強度分布の一例

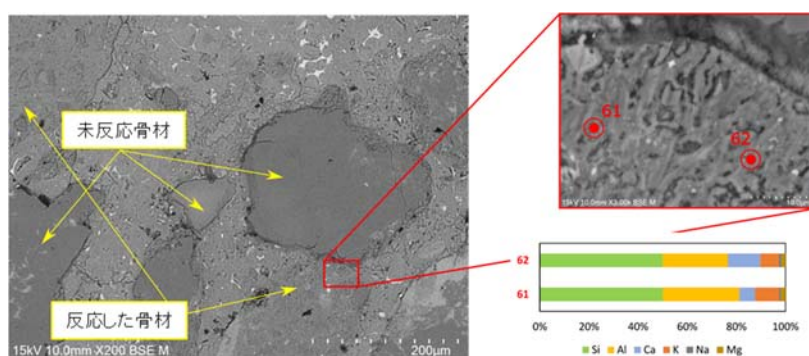


図4 反応している細骨材の様子とその化学組成

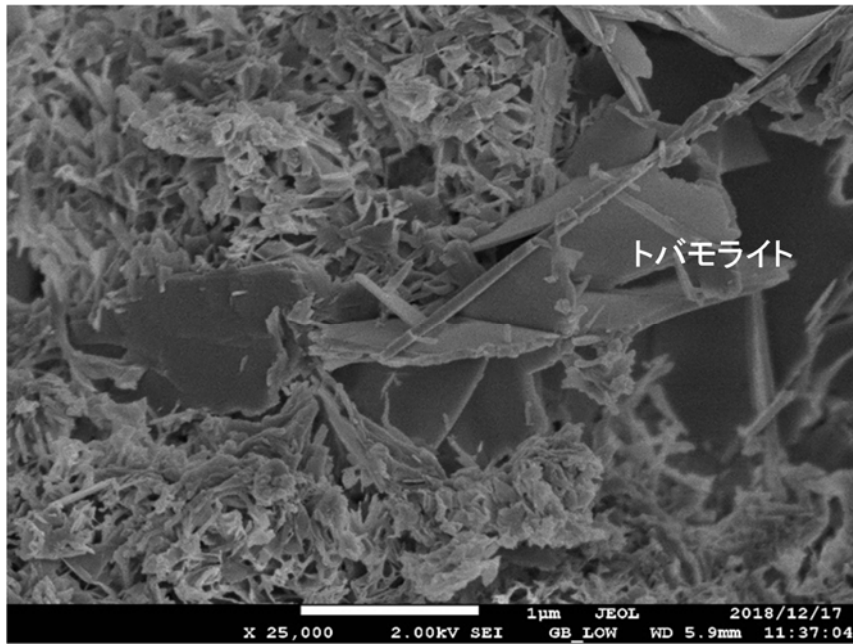


図5 トバモライトの電子顕微鏡像

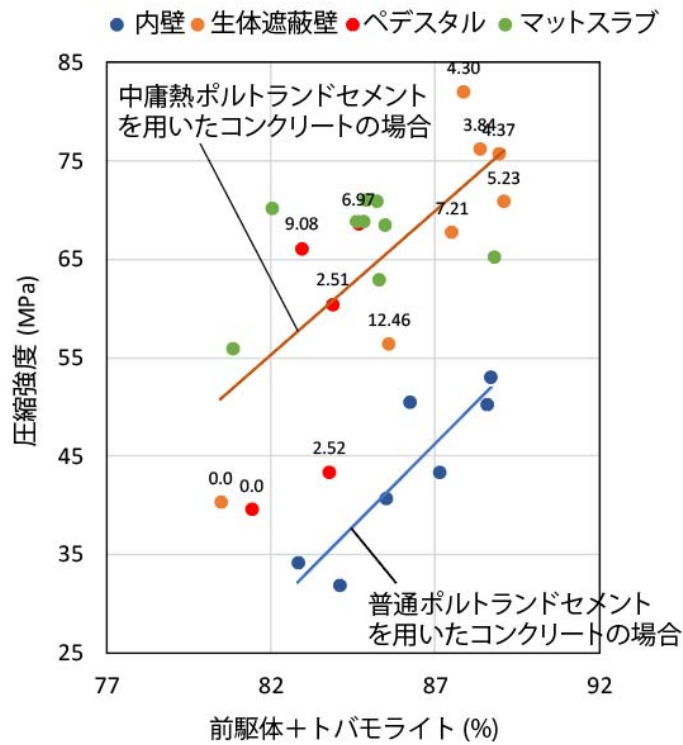


図6 コンクリートの中の前駆体とトバモライトの総量と圧縮強度の関係
 (コンクリートに用いたセメントの種類に依存して異なる2つの傾向がみられるが、
 いずれも傾きが同じ傾向が確認できる。内壁が普通ポルトランドセメントを用いた
 場合で、その他の3つの部材はいずれも中熱ポルトランドセメントを用いている。)

【成果の意義】

- ・これまで以上に耐久性に優れたコンクリートの開発や混和材、製造技術の開発に貢献します。
- ・原子力発電所のみならず、世界のコンクリート構造物を長期間利用した場合の性能予測や健全性の評価法に貢献します。コンクリート構造物の長期利用はSDGsの11番、住み続けられるまちづくりに役立ちます。

【用語説明】

- ・トバモライト：トバモライトとは結晶性の珪酸カルシウム水和物のことで、 $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ の化学組成を持つ。人工的にも軽量気泡コンクリートに用いられている。本研究では、このトバモライトの内部元素のシリカの一部がアルミニウムに置換したものが発見された。ローマ時代のコンクリートにも、同じ種類のトバモライトが存在することが近年明らかになっている。
- ・カルシウムアルミノシリケート水和物：非晶質の珪酸カルシウム水和物の一部がアルミニウムに置き換わった物質で、化学組成は特に決まっていない。周期的な構造をもっていないため、どのようなものかは解明されていない。しかしながら、現代のコンクリートのセメントや混和材と水が反応してできる主たる水和物であり、強度を始めとしたコンクリートの物性を決定づける重要な物質である。
- ・アルカリ長石類：岩石を構成する鉱物グループ名で、カリ長石 KAlSi_3O_8 とソーダ長石 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ の固溶体系列に属する長石類の総称である。

【論文情報】

雑誌名：Materials & Design, 2020

論文タイトル：Long-term use of modern Portland cement concrete: The impact of Al-tobermorite formation

著者：Ippei Maruyama, Jiří Rýmeš, Abudushalamu Aili, Shohei Sawada, Osamu Kontani, Shinya Ueda, Ryu Shimamoto

丸山一平、ユーリ・リムス、アブデウシャラム・アイリ（名古屋大学環境学研究科）、澤田祥平、紺谷修（鹿島建設株式会社）、上田真也、島本龍（中部電力株式会社）

DOI：10.1016/j.matdes.2020.109297

【研究者連絡先】

名古屋大学大学院環境学研究科

教授 丸山 一平（まるやま いっぺい）

TEL：052-789-3761 FAX：052-789-3764

E-mail：i.maruyama@nagoya-u.jp