

論 文 の 要 約

論文題目:ガンマ線照射がコンクリートの力学的特性に与える影響に関する研究 (Impact of gamma-ray irradiation on physical properties of concrete)

氏 名 : 石川 俊介

原子力施設におけるコンクリート構造物は、供用期間中の環境によって材料レベルで変質が生じる可能性がある。原子力施設におけるコンクリート構造物の大部分は、取り替えることができないため、長期間の運転のためには、経年変化を予測し、長期間に渡って健全であることを確認することが重要となる。放射線照射の影響に対して、構造物に要求される機能が維持され、コンクリート構造物が長期的に健全であることを評価する方法として、日本国内ではこれまで運転期間中の中性子およびガンマ線の累積照射量が下記を目安値以下であれば健全であると評価してきた。

中性子照射 : $1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$

ガンマ線照射 : $2 \times 10^{10} \text{ rad}$ ($2 \times 10^8 \text{ Gy}$)

この目安値は、Hilsdorf 論文を基に設定されている。コンクリートへの放射線影響を調べるための照射試験は 1960～70 年代に多く実施されており、Hilsdorf 論文ではそれらの結果を照射量と強度などの関係で整理し、放射線影響をまとめている。国際的な目安値としては、国際原子力機関 (IAEA) の技術報告書 IAEA-TECDOC-1025 や米国規制委員会 (NRC) の報告書 NUREG-7171、NUREG-2192 などに記載されているが、その根拠としては Hilsdorf 論文を引用しており、ガンマ線照射に関しては日本国内と同じ目安値 $2 \times 10^{10} \text{ rad}$ ($2 \times 10^8 \text{ Gy}$) としている。しかし、Hilsdorf 論文に引用されている元文献のデータは、軽水炉に用いられているコンクリートと異なる構成材料を用いた例や軽水炉の環境条件と大きく乖離しているもの、試験条件 (温度やセメントの種類など) が異なるものが含まれていることが指摘されている。

コンクリートは、水、セメント、骨材などの複数の材料から構成される複合材料である。構成材料により放射線照射の影響は異なり、個々の構成材料に生じた変化が組み合わさった結果としてコンクリートの強度や剛性などの力学的特性が変化することになる。そのため、放射線照射によるコンクリートの劣化メカニズム

を明らかにするためには、個々の構成材料レベルでの放射線影響の理解が必須となるが、その理解は十分ではない。

物質にガンマ線が照射されると、ガンマ発熱により温度上昇が生じ、同時に熱・乾燥の影響を受ける。そのため、ガンマ線照射正味の影響を正確に把握するためには、同時に生じる熱・乾燥による影響を把握して差し引く必要がある。コンクリートにガンマ線が照射されると、コンクリート中に含まれる水が放射線分解され、水素などのガスが発生する。コンクリート内部でのガス発生は内圧を高め、コンクリート中の水分を外部に押し出す、つまり、乾燥を促進させる。また、コンクリート中のどのような水がどの程度分解するのか、特に化学的結合水の分解程度の把握は、セメントペーストの安定性を知る上で有益な情報となる。

国際的に原子力発電所の長期運転や運転延長の重要性が高まる近年において、放射線照射がコンクリートの力学的特性に与える影響についてメカニズムから明らかにすることが望まれる。

本研究では、原子力施設におけるコンクリート構造物が受ける放射線のうち、ガンマ線照射がコンクリートの力学的特性に与える影響を把握することを目的として、コンクリートおよびその構成材料である骨材とセメントペーストに対して、コンクリートの健全性の目安値である **200 MGy** を最大の照射量としてガンマ線照射試験を実施し、実験的検討を行った。本研究を進めるにあたり以下の点に配慮した。

- ・セメントペーストや骨材といったコンクリートの構成材料レベルでのガンマ線照射による影響を把握し、その結果に基づきコンクリートとしての影響を把握する。
- ・ガンマ線照射時には同時に熱・乾燥が生じることから、リファレンスとして加熱試験および乾燥試験を実施し、熱・乾燥による影響を分離して、ガンマ線照射正味による影響を把握する。
- ・ガンマ線照射により生じるセメントペースト中の水の放射線分解について、特に化学的結合水の分解に着目した試験を実施し、セメントペーストの安定性について把握する。

2章においては、まず、コンクリートの構成材料であるセメントペーストおよび骨材、そしてコンクリート自身に与えるガンマ線照射の影響について、既往の知見を整理した。

ガンマ線照射により、コンクリートの各構成要素は電離と励起の影響を受けるのと同時に、ガンマ線発熱による熱、乾燥の影響を受ける。セメントペースト中の層間水や吸着水、毛細管水などの水は電離、励起の影響により分解される一方で、水和生成物（主に C-S-H）の一部である化学的結合水は分解されにくいと考えられるが、統一的な見解には達していない。化学的結合水が分解するとなると、水和生成物への影響が考えられる。3章（化学特性試験）では、セメントペーストのガンマ線照射試験を実施し、含水量や水素発生量のデータを取得し、化学的結合水の分解程度について検討を行うこととした。

セメントペーストの固相、つまり主に C-S-H などの水和生成物については、二次電子が原子や分子を励起することによる結晶格子への影響が考えられるが、周囲に水が存在する場合は溶解・析出平衡状態であるため強度低下には至らないと考えられ、ガンマ線照射によるセメントペーストの強度への影響は、同時に生じる熱、乾燥による影響と同程度と考えられる。4章（物理特性試験（セメントペースト））では、セメントペーストのガンマ線照射試験およびリファレンスとなる非照射試験を実施し、ガンマ線照射がセメントペーストの力学的特性に及ぼす影響について、同時に生じる熱、乾燥の影響と分離して把握することを目的に検討を行うこととした。

骨材については、原理的には、電離作用により共有結合の結合角が変化し、非晶質化(メタミクト化)が生じ、鉱物によっては膨張するが、その影響は限定的と考えられる。ガンマ線発熱による熱、乾燥に対して、骨材は安定した材料であり、セメントペーストに比べ収縮量は小さい。また、普通強度のコンクリートの強度はセメントペーストが支配的に決定しているため、骨材自体の強度低下はコンクリートの影響としては小さい。4章（物理特性試験（骨材））では、骨材のガンマ線照射試験およびリファレンスとなる非照射試験を実施し、ガンマ線照射が骨材の体積変化や強度に及ぼす影響について、同時に生じる熱、乾燥の影響と分離して把握することを目的に検討を行うこととした。

以上のセメントペーストと骨材に対する影響を踏まえ、コンクリートについては、電離、励起による影響は限定的であり、ガンマ線照射の影響としては、同時に生じる熱、乾燥の影響により、セメントペーストの力学的特性が変化し、また、セメントペーストと骨材の体積変化の不整合により、骨材周りのセメントペーストに微細なひび割れが生じ、コンクリートの力学的特性が変化することと考えられる。つまり、ガンマ線照射によるコンクリートの強度への影響は、同時に生じる

熱、乾燥による影響と同程度と考えられる。4章（物理特性試験（コンクリート））では、コンクリートのガンマ線照射試験およびリファレンスとなる非照射試験を実施し、ガンマ線照射がコンクリートの力学的特性に及ぼす影響について、同時に生じる熱、乾燥の影響と分離して把握することを目的に検討を行うこととした。

原子炉から照射されるガンマ線のエネルギーは 10 keV から 10 MeV の範囲であり、さまざまなエネルギーレベルのガンマ線を対象とした検討を行うことが望ましいが、単色の異なるエネルギーレベルのガンマ線の照射試験を実施することは難しかった。そのため、 ^{60}Co を線源とするガンマ線照射試験（ガンマ線エネルギー：1.17 MeV と 1.33 MeV）を行うこととした。また、線量率効果を評価しなくては得られたデータの実機適用性判断が適切にできない。そのため、本検討では異なる線量率のガンマ線照射試験を行うこととした。

3章にてセメントペーストのガンマ線照射試験（化学特性試験）を行った結果、ガンマ線照射により分解される水分は主に蒸発性の水であり、化学的結合水はほとんど分解されないことを確認した。ガンマ線照射に対する健全性の目安値となる照射量 200MGy に対し、化学的結合水の分解は 2~3%程度にとどまると見積もられた。

4章にてセメントペーストのガンマ線照射試験（物理特性試験）を行った結果、照射量 50 MGy の範囲ではセメントペーストの曲げ強度の低下は確認されず、むしろガンマ線照射下で中性化が進行する場合はセメントペーストの強度が増進する可能性があることが示された。熱重量分析および粉末 X 線回折/リートベルト法により、中性化が伴う環境でのガンマ線照射では、炭酸カルシウムとしてアラゴナイトとバテライトが多く析出することを確認した。密度の低いバテライトが多く析出することによる C-S-H の凝集構造中の空隙の効率的な充填、C-S-H の層間構造の保持が強度増大の一因と考えられる。

4章にて骨材のガンマ線照射試験（物理特性試験）を行った結果、照射量 100 MGy の範囲では、照射を行った 4 種類の骨材は熱・乾燥影響と同様に骨材の強度変化および体積変化は見られず、ガンマ線照射による骨材の物性への影響は有意ではないことを確認した。

上記のガンマ線照射がコンクリートの構成材料に与える影響を踏まえると、ガンマ線照射によるコンクリートの劣化メカニズムとしては、同時に生じる熱・乾燥の影響によりセメントペーストに収縮が生じ、骨材との体積変化の不整合によ

りセメントペーストに微細なひび割れが発生し、コンクリートの力学的特性が劣化する、つまり一般的な熱・乾燥による影響と同程度であることが考えられる。

4章にてコンクリートのガンマ線照射試験（物理特性試験）を行った結果。照射量 200 MGy の範囲において、コンクリートは中性化によって圧縮強度が増大する傾向があり、また、その影響は大きく卓越しておらず、同時に生じる熱、乾燥による影響と大きな差異はないことを確認した。

本研究において実施した一連のガンマ線照射試験では、ガンマ線照射による影響は同時に生じる熱・乾燥による影響と同程度以下であることを確認した。また、コンクリートの各構成材料に与えるガンマ線照射の影響は小さいと考えられることを踏まえると、ガンマ線照射特有の劣化は生じず、Hilsdorf 論文を基にした現行のガンマ線照射に対する規制は撤廃できる可能性があると考えられる。

今後の課題について述べる。

1点目として、ガンマ線のエネルギーレベルが挙げられる。原子炉から照射されるガンマ線の主要なエネルギーは 10 keV から 10 MeV の範囲にあるのに対し、単色の異なるエネルギーレベルのガンマ線の照射試験を実施することは難しかったため、本研究では、 ^{60}Co を線源とするガンマ線照射試験（ガンマ線エネルギー：1.17 MeV と 1.33 MeV）を行った。エネルギーレベルにより、二次電子の影響も含めて、相互作用のメカニズムが異なり、結果として生じる影響が異なることも考えられる。電子線照射の場合は、低エネルギー（低速）では、電子と物質の間で生じる相互作用は主に電離作用である。そのため、電子のエネルギーが大きくなると、つまり電子が高速になると、電子と物質が干渉し合える時間が短くなるため、電離作用の影響は小さくなる。一方で、電子のエネルギーがさらに大きくなると、今度ははじき出し作用が相互作用の支配的な要因となり、高エネルギーほどはじき出し作用の影響は大きくなる。しかし、ガンマ線照射時の二次電子は間接的な影響であり、ガンマ線のエネルギーレベルの違いによる影響は限定的と考えられる。ただし、信頼性向上という観点においては、エネルギーレベルの異なるガンマ線照射に対するデータの蓄積が望まれる。

2点目として、コンクリートに用いられる幅広い材料、調査に対するデータ取得による国際的なコンセンサスの獲得が挙げられる。本研究の実験的検討に用いたコンクリートの調査は 2 種類であるが、コンクリートに使われる材料やコンクリートの調査は様々であり、用いる材料や調査に応じて強度、剛性などの物理特性

や微細構造、化学組成や鉱物組成は異なる。また、コンクリートは半製品である生コンの状態では現場まで運ばれ、外気温や天候などの外部環境の影響を受ける中で打設され、徐々に硬化し、強度を発揮していくため、他の工業製品と比較して綿密な品質管理が行われる一方で、一定範囲内の品質の変動が想定されている。そのため、幅広い材料、調合によるコンクリートに対するデータを取得し、再現性を確認することにより、信頼性を向上させることが望まれる。