

NRA 技術報告

NRA Technical Report Series

中性子照射がコンクリートの強度に及ぼす影響

Effects of Neutron Irradiation on Concrete Strength

小嶋 正義 中野 眞木郎 田口 清貴

Masayoshi KOJIMA, Makio NAKANO, and Kiyotaka TAGUCHI

システム安全研究部門

Division of Research for Reactor System Safety

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,

Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

原子力規制委員会
Nuclear Regulation Authority

令和元年 8 月

August 2019

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究等の成果をまとめたものです。原子力規制委員会は、これらの成果が広く利用されることを期待し適時に公表することとしています。

なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本レポートの内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ システム安全研究部門
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル
電 話：03-5114-2223
ファックス：03-5114-2233

中性子照射がコンクリートの強度に及ぼす影響

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ

システム安全研究部門

小嶋 正義 中野 眞木郎 田口 清貴

要 旨

平成 25 年 11 月に制定された「実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準」では、40 年を超える原子力発電所の運転に対して、評価対象部位の累積放射線照射量が、コンクリートの強度に影響を及ぼす可能性のある値を超えている又は超える可能性が認められる場合は、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力評価を行うことを要求している。

累積放射線照射量の影響を示した既往研究には、コンクリートの強度に明確な中性子照射の影響が見られるものがある。その中には軽水炉で中性子に曝されるコンクリートとは異なる材料及び温度条件でデータを取得しているものや、中性子スペクトルを考慮せずに強度に及ぼす影響を評価しているものがある。また、コンクリートを構成する骨材に含まれる鉱物の一つである石英が、中性子照射により膨張し、その膨張量は累積放射線照射量によって異なることが分かっており、骨材の石英含有率により、コンクリートの膨張と強度に対する中性子照射の影響が変わると推定される。

本研究では、骨材の石英含有率と中性子照射による累積放射線照射量が、コンクリートの強度に及ぼす影響を明確にすることを目的とし、軽水炉で中性子に曝されるコンクリートの材料及び温度条件を考慮して、骨材及びコンクリートに中性子照射した試験体に対する材料試験を実施した。また、中性子スペクトルを考慮し、0.1MeV を超えるエネルギー範囲の累積放射線照射量に基づき評価を行った。

その結果、中性子照射を受ける環境では、骨材の石英含有率が高いほど、また、累積放射線照射量が高いほど、骨材とコンクリートは膨張する傾向が認められた。また、累積放射線照射量の増加に伴い、骨材の石英含有率が高いほど、コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数は低下する傾向が認められた。さらに、中性子照射がコンクリートの強度に及ぼす影響の評価では、骨材の石英含有率を考慮する必要があることが明らかになった。

Effects of Neutron Irradiation on Concrete Strength

Masayoshi KOJIMA, Makio NAKANO, and Kiyotaka TAGUCHI
Division of Research for Reactor System Safety

Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

The regulatory guide for reviewing the licensee's technical report for the extension of the operating period of commercial power reactors, enacted in November 2013, requires evaluation of the proof stress of the concrete structures of nuclear power plants operated for more than 40 years if the neutron fluence exceeds or may exceed a certain limit where neutron irradiation affects the concrete strength.

Although several previous studies showed effects on concrete strength, some obtained experimental data under material and temperature conditions different from those in the concrete biological shield (CBS) wall of light water reactor (LWR) and some evaluated the neutron effects without considering the neutron energy spectrum. Additionally, it has been shown that the neutron irradiation causes expansion of α -quartz, which is a mineral commonly contained in aggregates embedded in concrete; therefore, the effects of neutron irradiation on the concrete strength or the volumetric swelling may change according to the quartz content in the aggregates.

This report focuses on clarifying the effects of both the neutron fluence and quartz content of aggregates on concrete strength. Mechanical testing was performed using test specimens of aggregates and concrete irradiated with neutrons considering the materials and temperatures of the CBS wall of LWR. The evaluation was conducted based on the neutron fluence for the energy range above 0.1 MeV considering the neutron energy spectrum.

Consequently, the experimental data showed that the volumetric swelling of the aggregates and concrete tends to be greater with the neutron fluence and

quartz content. The compressive strength and Young's modulus of the concrete tends to be lower with the quartz content of aggregates. It was also shown that the quartz content of aggregates should be considered in the evaluation of the effects of neutron irradiation on concrete strength.

目 次

1.	序論	1
1. 1	研究の背景	1
1. 1. 1	国内の規制基準	1
1. 1. 2	コンクリートに作用する中性子照射の概要	1
1. 1. 3	中性子照射によるコンクリートの強度低下に関する既往研究	2
1. 2	研究の必要性	3
1. 3	研究の目的	4
1. 4	研究の手段	4
1. 5	報告書の構成	4
2.	試験方法	6
2. 1	中性子照射	6
2. 1. 1	中性子照射施設	6
2. 1. 2	中性子照射で使用した治具	7
2. 1. 3	中性子照射量の評価方法	8
2. 2	骨材試験の方法	12
2. 2. 1	骨材試験体の組成	12
2. 2. 2	骨材試験体の製作	13
2. 2. 3	骨材試験体への中性子照射	13
2. 2. 4	寸法測定	14
2. 3	コンクリート試験の方法	20
2. 3. 1	コンクリート試験体の組成	20
2. 3. 2	コンクリート試験体の製作	20
2. 3. 3	コンクリート試験体への中性子照射	21
2. 3. 4	管理試験体の作製	22
(1)	非照射・加熱試験体の作製	22
(2)	非照射・非加熱試験体の作製	22
2. 3. 5	寸法、圧縮強度及び静弾性係数の測定	23
(1)	寸法測定	23
(2)	圧縮強度測定	23
(3)	静弾性係数測定	23
3.	結果	31
3. 1	骨材試験	31

3. 1. 1	体積変化率	31
3. 2	コンクリート試験	33
3. 2. 1	体積変化率	33
3. 2. 2	圧縮強度	34
3. 2. 3	静弾性係数	34
4.	石英含有率と中性子照射が骨材及びコンクリートの物理特性に及ぼす影響 ..	38
4. 1	骨材及びコンクリートの膨張に及ぼす影響	38
4. 1. 1	骨材の膨張に及ぼす影響	38
4. 1. 2	コンクリートの膨張に及ぼす影響	38
4. 2	コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数に及ぼす影響	46
4. 2. 1	圧縮強度に及ぼす影響	46
4. 2. 2	静弾性係数に及ぼす影響	46
5.	結論	50
	参考文献一覧	51
	付録	54
	執筆者一覧	59

表 目 次

表 2.1	X線回折／リートベルト解析により求めた骨材の鉱物組成	15
表 2.2	LOI と蛍光 X 線分析法により求めた骨材の化学組成	16
表 2.3	骨材の特徴	17
表 2.4	骨材試験体の中性子照射条件	19
表 2.5	X線回折／リートベルト解析により求めたコンクリート試験体を使用した 細骨材の鉱物組成	24
表 2.6	LOI と蛍光 X 線分析法により求めたコンクリート試験体を使用した 細骨材の化学組成	24
表 2.7	X線回折／リートベルト解析により求めたコンクリート試験体を使用した セメントの鉱物組成	25
表 2.8	LOI と蛍光 X 線分析法により求めたコンクリート試験体を使用した セメントの化学組成	25
表 2.9	コンクリート試験体を使用した構成材料	26
表 2.10	コンクリート試験体の調合	26
表 2.11	コンクリート試験体への中性子照射条件	27
表 2.12	各試験体の中性子照射量	28
表 2.13	非照射・加熱試験体の作製条件	30

目 次

図 1.1	報告書の構成	5
図 2.1	JEEP II の水平断面のイメージ	9
図 2.2	JEEP II の炉心に装荷した照射治具のイメージ	10
図 2.3	照射治具の概要	11
図 2.4	骨材試験体の装荷概要	18
図 2.5	中性子照射におけるコンクリート試験体の装荷概要	27
図 2.6	非照射・加熱治具への装荷概要	29
図 3.1	骨材の石英含有率と照射量に依存した体積変化率	32
図 3.2	各条件におけるコンクリートの体積変化率	35
図 3.3	各条件におけるコンクリートの圧縮強度	36
図 3.4	各条件におけるコンクリートの静弾性係数	37
図 4.1	骨材試験体の石英含有率及び中性子照射量に対する体積変化率の変化	41
図 4.2	骨材 G91 の各中性子照射量における X 線回折結果の比較	42
図 4.3	骨材試験体及びコンクリート試験体の中性子照射量に対する体積変化率の 変化	43
図 4.4	非照射・加熱試験体の加熱時間に対する体積変化率の変化	43
図 4.5	$4.73 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) まで照射した Con91 試験体端面の様子	44
図 4.6	$4.73 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) まで照射した Con91 試験体端面の様子 (切断面側)	45
図 4.7	石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CH}) の変化	48
図 4.8	石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの圧縮強度比 (f_{CI}/f_{C0}) の変化	48
図 4.9	石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CH}) の変化	49
図 4.10	石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの静弾性係数比 (E_{CI}/E_{C0}) の変化	49

用語定義

本 NRA 技術報告では下記のように用語を定義して用いた。

中性子照射量：	時間積分された中性子束（単位： n/cm^2 ）
骨材試験体：	粗骨材を切り出して製作した円柱状（直径 $\phi 10mm \times$ 高さ $10mm$ ）の試験体
コンクリート試験体：	円柱状（直径 $\phi 40mm \times$ 高さ $60mm$ ）に成形したコンクリートの試験体
温度計測用試験体：	中性子照射中のコンクリート試験体の温度履歴を計測するために、コンクリートの中心に熱電対を埋め込んだ円柱状（直径 $\phi 40mm \times$ 高さ $60mm$ ）の試験体
サンプルホルダ：	骨材試験体を試験体キャプセル内に格納するために製作した、円柱状（直径 $\phi 40mm \times$ 高さ $10mm$ ）のアルミニウム製容器
中性子照射試験体：	コンクリート試験体に中性子照射した試験体
非照射・加熱試験体：	中性子照射で計測した温度履歴をコンクリート試験体を与えて作製した管理試験体
非照射・非加熱試験体：	$20^\circ C$ 封かん養生したコンクリート試験体を、一定の期間、室温のままの状態で放置して作製した管理試験体
物理特性：	骨材の膨張若しくはコンクリートの膨張、圧縮強度又は静弾性係数
圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CH}) 又は圧縮強度比①：	中性子照射試験体の圧縮強度 (f_{CI}) と非照射・加熱試験体の圧縮強度 (f_{CH}) との比
圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CO}) 又は圧縮強度比②：	中性子照射試験体の圧縮強度 (f_{CI}) と非照射・非加熱試験体の圧縮強度 (f_{CO}) との比

静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CH})
又は静弾性係数比① :

中性子照射試験体の静弾性係数 (E_{CI}) と非照射・加熱試験体の静弾性係数 (E_{CH}) との比

静弾性係数比 (E_{CI}/E_{C0})
又は静弾性係数比② :

中性子照射試験体の静弾性係数 (E_{CI}) と非照射・非加熱試験体の静弾性係数 (E_{C0}) との比

1. 序論

1. 1 研究の背景

1. 1. 1 国内の規制基準

核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号。以下「法」という。）第 43 条の 3 の 32 では、発電用原子炉設置者が実用発電用原子炉を運転することができる期間を 40 年間と定めている。また、発電用原子炉設置者がその期間を延長する場合は、法第 43 条の 3 の 32 第 2 項に基づく原子力規制委員会の認可（以下「運転期間延長認可」という。）を受けることにより、1 回に限り 20 年間を超えない期間で延長することができる。また、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則（昭和 53 年通商産業省令第 77 号。以下「実用炉規則」という。）第 113 条では、発電用原子炉設置者は実用発電用原子炉の運転を延長しようとする期間における運転に伴い生ずる原子炉その他の設備の劣化状況に関する技術的な評価の結果を記載した書類を含む運転期間延長認可の申請書を、原子力規制委員会に提出しなければならないと定めている。

これらの規定に関連して、原子力規制委員会は、この申請（書）について、実用炉規則第 114 条に規定する運転期間延長認可の基準への適合性の審査における基準を明確にする観点から、「実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準（平成 25 年 11 月 27 日制定、原管 P 発第 1311271 号、原子力規制委員会決定、以下「運転期間延長の審査基準」という。）」を定めている。運転期間延長の審査基準では、放射線照射によるコンクリートの強度に関する技術的な評価について、「評価対象部位の累積放射線照射量が、コンクリート強度に影響を及ぼす可能性のある値を超えている又は超える可能性が認められる場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ること。」と定めている。

1. 1. 2 コンクリートに作用する中性子照射の概要

コンクリートは、骨材（粗骨材、細骨材）、水、混和材及び化学混和剤などをセメントで凝固させた硬化物であり、主にセメントと水による水和反応がセメントペーストを構成し、骨材間の接着剤の役割を果たすことで凝固する。実際に軽水炉で使用されているコンクリートの調合には同じものはなく、コンクリートの構成材料、成分、形状、寸法等は、発電所、建屋の種類及び部位によって様々である^(参1)。日本国内の商用型軽水炉^(参1)では、粗骨材に、砂利又は砕石が使用されている。細骨材に、砂又は砕砂が使用されている。セメントに、ポルトランドセメント、ポルトランドセメントにフライアッシュ（石炭を燃料とする火力発電所の燃焼により発生した飛灰）を混入したセメント等が使用されている。また、化学混和剤に、AE 減水剤（AE: Air Entraining）、流動化剤等が使用されている。

軽水炉の原子炉容器近傍のコンクリートには、運転期間中に中性子が照射される。コンクリートに中性子が照射されると、コンクリートを構成する骨材の鉱物である石英（低温型石英： α -Quartz、以下「Quartz」という。）が、原子のはじき出しに伴い非晶質化

(Amorphization) する^{(参2)(参3)}。また、その過程で、Quartz は最大 14~18%程度膨張する^{(参3)(参4)(参5)(参6)(参7)}。この非晶質化に伴う Quartz の膨張により、コンクリートを構成する骨材自体の強度低下や、骨材とセメントペーストとの間に体積変化差が生じ、骨材周囲のセメントペーストが損傷することが懸念される^(参3)。さらに、骨材に含まれる石英含有率 (Quartz content (mass %)) の違いにより、中性子照射によるコンクリートの強度低下等の耐放射線性が異なる可能性が懸念される^(参3)。

また、原子炉容器近傍の照射環境では、コンクリートは中性子照射に加え、ガンマ線照射を同時に受ける。そのため、ガンマ線発熱 (ガンマ線入射による核発熱) によるコンクリート中の自由水の逸散 (乾燥) やガンマ線発熱に伴う熱応力の影響により、ひび割れが発生する可能性が懸念される^(参3)。なお、熱 (高温) によるコンクリートの劣化について、70°C程度ではコンクリートの基本特性に大きな影響を及ぼす様な自由水の逸散は生じないとされている^(参8)。また、100°C以下ではコンクリートの圧縮強度などの低下は少ないとされている^(参8)。

1. 1. 3 中性子照射によるコンクリートの強度低下に関する既往研究

Hilsdorf (ヒルスドルフ) ら(1978年)^(参9) (以下「Hilsdorf 論文」という。) は、加速照射による時間積分された中性子束 (以下「中性子照射量」という。) に対する、中性子を照射したコンクリートと、照射しないコンクリートとの圧縮強度比、引張強度比及び静弾性係数比の関係について、異なる研究者による過去の試験内容を収集文献により調査し、中性子照射量が 1.0×10^{19} n/cm² を超えると、コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数の低下に影響を及ぼす可能性があることを示した。また、静弾性係数については、 1.0×10^{19} n/cm² 未満でも僅かな減少をもたらすとした。さらに、中性子を照射したコンクリートの膨張について、中性子照射により徐々に膨張すること及び 1.0×10^{19} n/cm² 未満の領域では膨張に大きな影響を及ぼさないことを示した。国際原子力機関 (IAEA: International Atomic Energy Agency) は、IAEA-TECDOC-1025 (1998)^(参10) で Hilsdorf 論文を参照し、コンクリートの損傷が懸念される中性子照射量の閾値を 1.0×10^{19} n/cm² としている。なお、Hilsdorf 論文で示された結果は、後述するように様々な材料及び温度条件で行われた研究を基にしている。また、中性子スペクトルを考慮せずに、様々なエネルギー範囲の中性子照射量に基づき評価されたデータを区別せずに集約し、上記の傾向を説明している。

紺谷ら (2013年)^(参11) は、中性子照射がコンクリートの強度及び静弾性係数に及ぼす影響に関する Hilsdorf 論文での指摘について、参照された文献を調査し、試験結果の一部には、日本国内の商用型軽水炉に使用されているコンクリートとは異なる材料条件 (アルミナセメント又は水ガラスの使用) 及び温度条件 (試験体の温度が 100°C を超える条件) が含まれていることを示した^(参3)。筆者らは、この紺谷らが示した指摘から、100°C を超える温度で行った試験では、強度低下に及ぼす自由水の散逸や熱応力の影響が比較的大きくなり、取得データが軽水炉の健全性評価の参考データとして適さない可能性を懸念した。

Field (フィールド) ら (2015 年)^(参6) (以下「Field 論文」という。) は、コンクリートの圧縮強度比、引張強度比及び静弾性係数比と加速照射による中性子照射量との関係について、Hilsdorf 論文で参照された文献を含む収集文献により調査した。また、収集文献で示された試験について、中性子のエネルギー範囲や、試験体の材料及び温度条件を示しているものの、それらを区別せずに集約し評価した。その結果、中性子照射量に対する圧縮強度比の関係について、 2.0×10^{19} n/cm² を超えると、圧縮強度が低下することを示した。中性子照射量に対する引張強度比の関係では、 1.0×10^{19} n/cm² を超えると、引張強度が急激に低下することを示した。中性子照射量に対する静弾性係数比の関係では、 1.0×10^{18} n/cm² を超えると、静弾性係数が徐々に低下することを示した。 1.0×10^{19} n/cm² を超える中性子照射量における静弾性係数の減少に関する考察では、中性子、高温及び骨材の種類による複合的な影響の可能性を指摘した。また、収集文献が様々なエネルギー範囲の中性子照射量や材料及び温度条件で取得したデータに基づき評価されていることを指摘し、それらを考慮したコンクリートの特性変化に関する研究の必要性を示した。

1. 2 研究の必要性

中性子照射がコンクリートの強度に及ぼす影響について、より精度の高い技術的根拠を取得するために、軽水炉で中性子に曝されるコンクリートの材料及び温度条件を考慮した試験が必要である。

既に述べたように、Hilsdorf 論文及び Field 論文で示された結果は、熱中性子、速中性子、高速中性子、全エネルギーなど、様々なエネルギー範囲の中性子照射量に基づき評価した結果を区別せずに集約している。しかし、このような中性子スペクトルを考慮しない評価は、試験結果の不確かさとして、コンクリートの強度が低下し始める中性子照射量の値や、その後の低下の勾配などに影響を及ぼすことが推定される。よって、中性子照射量を評価する際には中性子スペクトルを考慮し、また、それに基づき得られた結果を使用して、コンクリートの強度に及ぼす影響を評価する必要がある。

1.1.2 で説明したように、骨材に含まれる石英含有率の違いにより、中性子照射が骨材の膨張若しくはコンクリートの膨張、圧縮強度又は静弾性係数(以下「物理特性」という。)に及ぼす影響など、骨材及びコンクリートの耐放射線性が異なることが推定される。しかし、骨材の石英含有率と中性子照射量の関係が、骨材及びコンクリートの物理特性に及ぼす影響について系統的に検討した研究は見当たらなかった。よって、それらの関係が、骨材及びコンクリートの物理特性に及ぼす影響を把握する必要がある。

なお、Quartz の膨張以外にも、長石類の体積が中性子照射により数%程度膨張するとされる既往研究^{(参2) (参7)} や、長石類以外の鉱物に対する中性子照射による体積変化に関する既往研究^(参7) が存在する。しかし、コンクリートを構成する骨材に含まれる鉱物のうち、含有量が多く中性子照射による体積変化率への影響が最も大きいと考えられる Quartz に焦点を絞った技術的知見の取得がまず必要である。

1. 3 研究の目的

上記の研究の必要性に対し、軽水炉で中性子に曝されるコンクリートの材料及び温度条件を考慮した試験により、コンクリートの強度に対する石英含有率と中性子照射量の影響に関する技術的知見を取得することを目的とした。

1. 4 研究の手段

平成 23 年度から平成 28 年度までの安全研究プロジェクトとして、「運転期間延長認可制度及び高経年化対策制度に係る技術的知見の整備に関する研究」を実施した。このプロジェクトにおいて、中性子照射が骨材及びコンクリートの物理特性に及ぼす影響を把握することを目的とし、株式会社三菱総合研究所（国立大学法人名古屋大学に業務の一部を再委託）に委託する形で、原子力施設等防災対策等委託費（高経年化技術評価高度化）事業（以下、「委託研究事業」という。）を実施した。

筆者らは、本 NRA 技術報告の作成に当たり、委託研究事業の受託者である株式会社三菱総合研究所がまとめた平成 23 年度から平成 28 年度までの成果報告書^{(参3) (参12) (参13) (参14) (参15) (参16)}等（以下「委託研究事業成果報告書」という。）に記載された試験内容、試験データ等を参照した。さらに、委託研究事業成果報告書を著者らが精査した内容（精査の過程で得た新たな情報を含む）及び文献調査で得た内容を加えて、骨材に含まれる石英含有率に焦点を絞った整理を行った。また、中性子照射量と骨材に含まれる石英含有率の関係が、骨材及びコンクリートの物理特性に及ぼす影響についてまとめた。

1. 5 報告書の構成

本 NRA 技術報告は、図 1.1 に示すように、第 1 章（序論）、第 2 章（試験方法）、第 3 章（結果）、第 4 章（石英含有率と中性子照射が骨材及びコンクリートの物理特性に及ぼす影響）及び第 5 章（結論）で構成される。

第 2 章では、中性子照射の方法を説明する。また、骨材試験の方法として、石英含有率が異なる 6 種類の骨材試験体を使用し、中性子照射量が異なる加速照射による中性子照射の実施方法及び骨材試験体の寸法の測定方法を説明する。さらに、コンクリート試験の方法として、石英含有率が異なる粗骨材を有する 2 種類のコンクリート試験体を使用し、中性子照射量が異なる加速照射による中性子照射の実施方法及びコンクリート試験体の寸法、圧縮強度及び静弾性係数の測定方法を説明する。

第 3 章では、骨材試験の結果として、中性子照射量及び骨材に含まれる石英含有率に対する体積変化率の関係を示す。また、コンクリート試験の結果として、中性子照射量及び骨材に含まれる石英含有率に対する体積変化率、圧縮強度及び静弾性係数の関係を示す。

第 4 章では、中性子照射量及び骨材に含まれる石英含有率が、骨材及びコンクリートの膨張に及ぼす影響並びにコンクリートの圧縮強度及び静弾性係数に及ぼす影響を考察する。

第 5 章では、本研究で得られた成果を示す。

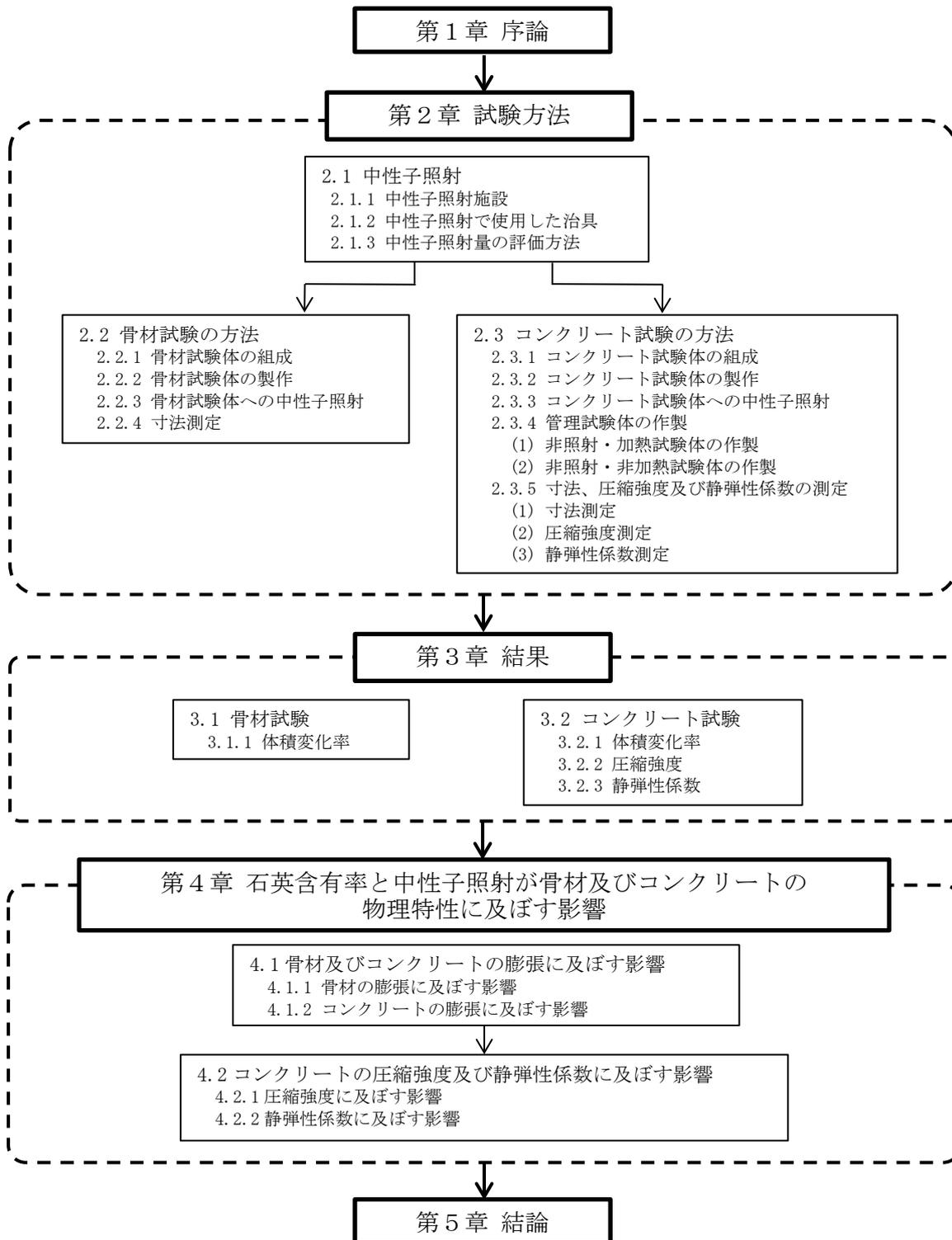


図 1.1 報告書の構成

Fig. 1.1 Overall Framework of this Report

2. 試験方法

本章では、試験方法の概要を示す。詳細は委託研究事業成果報告書を参照されたい。

2. 1 中性子照射

2. 1. 1 中性子照射施設

コンクリートは熱・乾燥によって水和物の分解が生じることにより、物理特性に変化が生じる。そのため、運転期間延長の審査基準では、コンクリートの熱による強度低下に関する技術的な評価について、「評価対象部位のコンクリートの温度が制限値（貫通部は90℃、その他の部位は65℃）を超えたことがある場合は、耐力評価を行い、その結果、当該部位を構成する部材又は構造体の耐力が設計荷重を上回ること。」と定めている。また、一般社団法人日本機械学会発電用原子力設備規格コンクリート製原子炉格納容器規格^(参17)も、コンクリートの温度制限値を貫通部は90℃、その他の部分は65℃と定めている。ここで、貫通部とは、シェル部、トップスラブ部及び底部における開口、または貫通孔の周辺部である^(参17)。

本研究では、コンクリート試験体の温度上昇による影響を極力抑えた中性子照射を行うために、中性子照射の施設としてノルウェー・エネルギー技術研究所（IFE: Institute for Energy Technology）の研究炉 JEEP II を使用した。JEEP II は最大熱出力が2MW と小さく、基本的な物理実験のために供用されてきた。また、重水炉であり中性子減速で発生するガンマ線レベルが低いため、高速中性子束のレベルに対して、ガンマ線発熱のレベルが他の研究炉と比較して小さい。すなわち、JEEP II では、中性子による加速照射（本研究における試験体の照射領域では、高速中性子束が $3\sim 4\times 10^{12}$ n/cm²/s (E>0.1MeV) 程度の加速照射）を実施する際に、ガンマ線発熱による温度上昇を極力抑えることが可能である。本研究で用いたコンクリート試験体の照射体系においても、軽水炉に使用されているコンクリートに対する温度の制限値に近い条件を得ることができる。

図 2.1 に JEEP II の水平断面のイメージを示す。本研究では、ガンマ線発熱に伴う試験体の温度上昇の抑制を目的として、炉の周辺付近に位置する Position 36 及び Position 52 の2カ所に、中性子照射用に製作した試験治具（以下「照射治具」という。）を装荷し、試験体への中性子照射を実施した。

図 2.2 に JEEP II の炉心に装荷した照射治具のイメージを示す。炉心の高さは900mmである。照射孔の軸方向には中性子束分布が存在し、炉心の中央付近で最も中性子束が大きく、中央付近から離れるに従って中性子束が小さくなる。よって、試験体を設置する軸方向の照射領域を600mmとした。図 2.2 に示すように、試験体の照射領域600mmでは、軸方向で中性子束の大きさが変化し、この外側の領域ではさらに中性子束が小さくなる。この試験体を設置する領域には、温度計測用試験体（コンクリートの中心に熱電対を埋め込んだ試験体）を設置する必要があった。そのため、最上部の60mmの照射領域に温度計測用試験体を、最下部の60mmの照射領域に骨材試験体を設置した。また、残りの480mmの照射領域に

コンクリート試験体（直径φ40mm×高さ60mm）を8体設置した。

ここで、コンクリート試験体の寸法を直径φ40mm×高さ60mmに決定した経緯の概略を以下に述べる。JEEPⅡのPosition36及びPosition52に対する照射治具の設置寸法の制限により、コンクリート試験体の寸法には制限が必要であった。また、中性子照射時のガンマ線発熱に伴う熱応力の観点から、コンクリート試験体中央部と表面部との温度差を可能な限り少なくするように、コンクリート試験体の寸法を制限する必要がある。そのため、JEEPⅡでモルタル試験体（φ50mm×100mm）を用いた予備照射を実施した。モルタル試験体の直径をφ50mmとした場合、モルタル試験体の中央部で計測した温度は82℃程度であった。また、モルタル試験体の表面で計測した温度は、JEEPⅡの冷却水（重水）の温度（50℃）に近い56℃程度となり、モルタル試験体の内外での温度差が約26℃となった。ここで、普通コンクリートにおける引張強度を4MPa、静弾性係数を20GPaと仮定すると、 200×10^{-6} のひずみが拘束されると、ひび割れに至ることになる。そのため、コンクリートの熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として考えた場合には、最外部のコンクリートにひび割れが入る可能性が懸念される。よって、コンクリート試験体の直径をφ40mmとすることで、試験体中心温度を下げるようにするとともに、試験体内外の温度差を小さくし、 200×10^{-6} 未満のひずみ差となるようにした。また、JIS A 1132:2006「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」^(参18)では、コンクリート試験体は、使用する骨材最大寸法比の3倍以上の直径を有することとされている。そのため、コンクリート試験体における粗骨材の最大径を13mm（粒度5～13mm）とすることで、コンクリート試験体の直径が骨材最大寸法比の3倍以上となるようにした。

2. 1. 2 中性子照射で使用した治具

図2.3に照射治具の概要を示す。照射治具の全長は3,250mmで、主に試験体キャプセル（Specimen capsule、アルミニウム製、外径φ46.4mm、内径φ40.7～40.8mm）及びシュラウド（Shroud、アルミニウム製、外径φ88mm、内径φ82mm）で構成した。また、試験体キャプセルの内部には、コンクリート試験体、骨材試験体及び温度計測用試験体を装荷した。なお、試験体キャプセル内径は、中性子照射によるコンクリート試験体の膨張を考慮した設計寸法とした。

また、試験体の温度上昇を可能な限り抑制するために、シュラウドには冷却材（重水）が出入りする冷却水入口孔（Water inlet holes）及び冷却水出口孔（Water outlet holes）を設けた。すなわち、試験体キャプセルは、シュラウドとの間を循環する冷却材により冷却される構造（Water channel構造）で、コンクリート試験体の中央部での最高温度は、目標値で72℃となるように設計した。また、図2.3に示すとおり、照射治具には試験体中央の温度を計測するための熱電対（Thermocouple）、水素ガス・酸素ガス・水分収集用のパイプライン（Gas lines（図2.2のGas/pressure Tubes））及びガンマサーモメーター（Gamma-thermometer）を内蔵した。

さらに、照射治具には3種類(Ni、Fe及びCo-Al)のモニタリングワイヤ(図2.2のFluence Monitoring Wires Full length Ni / Fe / Co-Al)を内蔵した。また、3種類のモニタリングワイヤにおける $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ 、 $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$ 及び $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$ の反応によって生じた ^{58}Co 、 ^{54}Mn 及び ^{60}Co の生成量から中性子束を求め、それに照射時間を乗じることで、照射治具への中性子照射量を評価した。

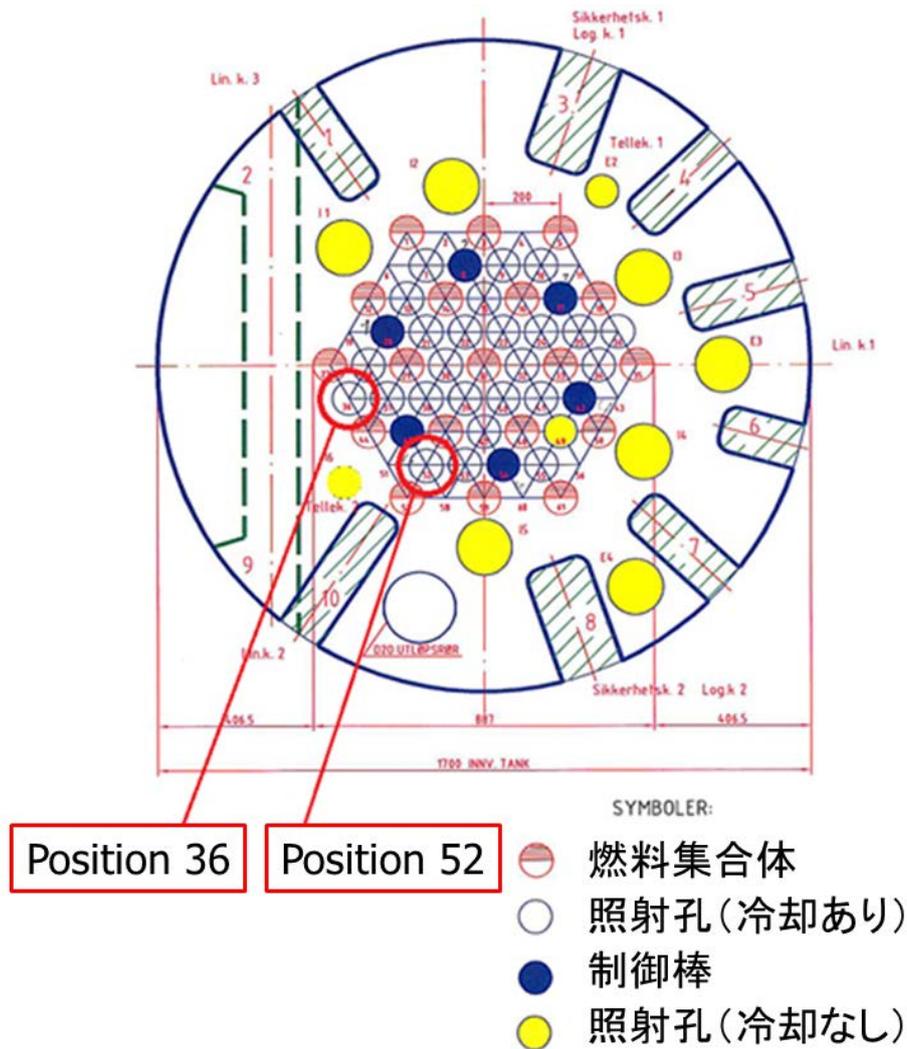
2. 1. 3 中性子照射量の評価方法

モニタリングワイヤによる試験体に対する中性子照射量は、軸方向の試験体の照射領域600mmにおける代表値として計測されるが、実際には軸方向に中性子束分布が存在する(図2.2参照)。そのため、米国ロスアラモス国立研究所で開発されたモンテカルロ法による中性子・光子輸送計算コードMCNP(Monte Carlo Neutron and Photon Transport Code System)により、軸方向の中性子束分布を基にした中性子照射量分布を算出した。そして、その最大となる評価位置において、モニタリングワイヤにより評価した中性子照射量に一致するような比率で調整することで、試験体の照射領域600mmにおける各試験体位置での中性子照射量を評価した。

また、比較的エネルギーの低い中性子については、中性子散乱の影響が大きく、モニタリングワイヤとMCNPを用いたいずれの手法によっても評価される照射量の不確かさが大きい。そのため、各試験体に対する0.1MeV以下の中性子の中性子照射量の評価値は、本NRA技術報告には記載しないこととした。

このように、本研究では、中性子照射量に依存した骨材及びコンクリートの物理特性について、中性子スペクトルを考慮し、0.1MeVを超えるエネルギー範囲の中性子照射量に基づき評価を行った。

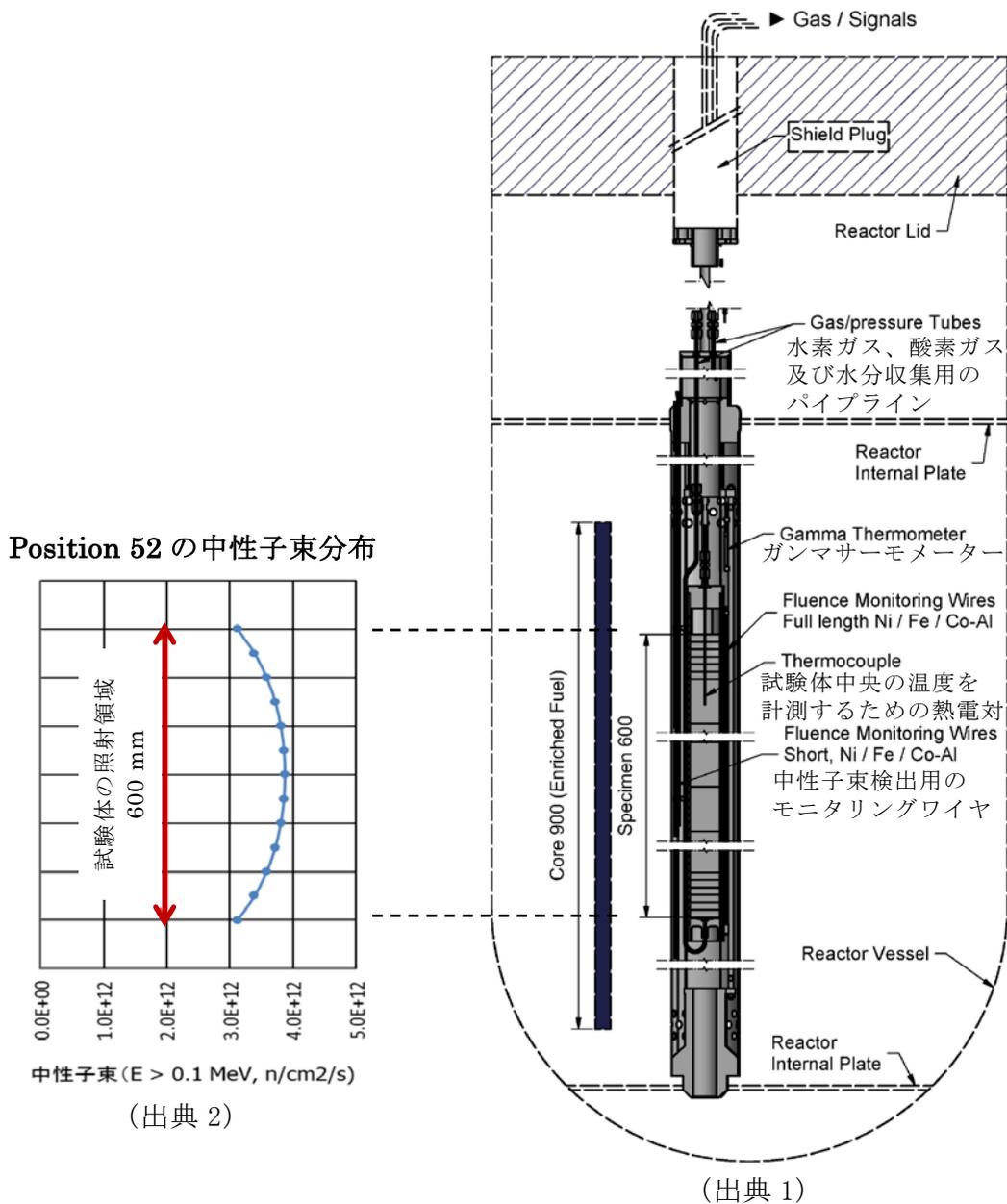
なお、Remec(レメク)ら(2017年)^(参19)は、骨材の中性子照射による膨張に伴うコンクリートの機械的性質への影響^(参6)に関連し、加圧水型原子炉の2ループ及び3ループを対象に、コンクリートを構成する骨材に含まれる鉱物のうち、代表的なQuartz、Calcite(方解石)、Anorthite(灰長石)、Microcline(微斜長石)及びAlbite(曹長石)について、中性子のエネルギー(E)に対するdpa(displacement-per-atom、中性子照射による原子の弾き出し損傷量)の関係を解析した。その結果、各鉱物とも、0.1MeVを超えるエネルギー($E > 0.1\text{MeV}$)を持つ中性子による損傷が、dpaの95%以上を占めることを示した。



出典) 平成 25 年度高経年化技術評価高度化事業 (経年プラントの総合的な安全評価体系の整備) 成果報告書 (第 3 分冊)、株式会社三菱総合研究所、pp. 3-1302 図 3. 4. 2-60、平成 26 年 3 月 (参 14)

図 2. 1 JEEP II の水平断面のイメージ

Fig. 2. 1 Horizontal Cross Section on the JEEP II Reactor

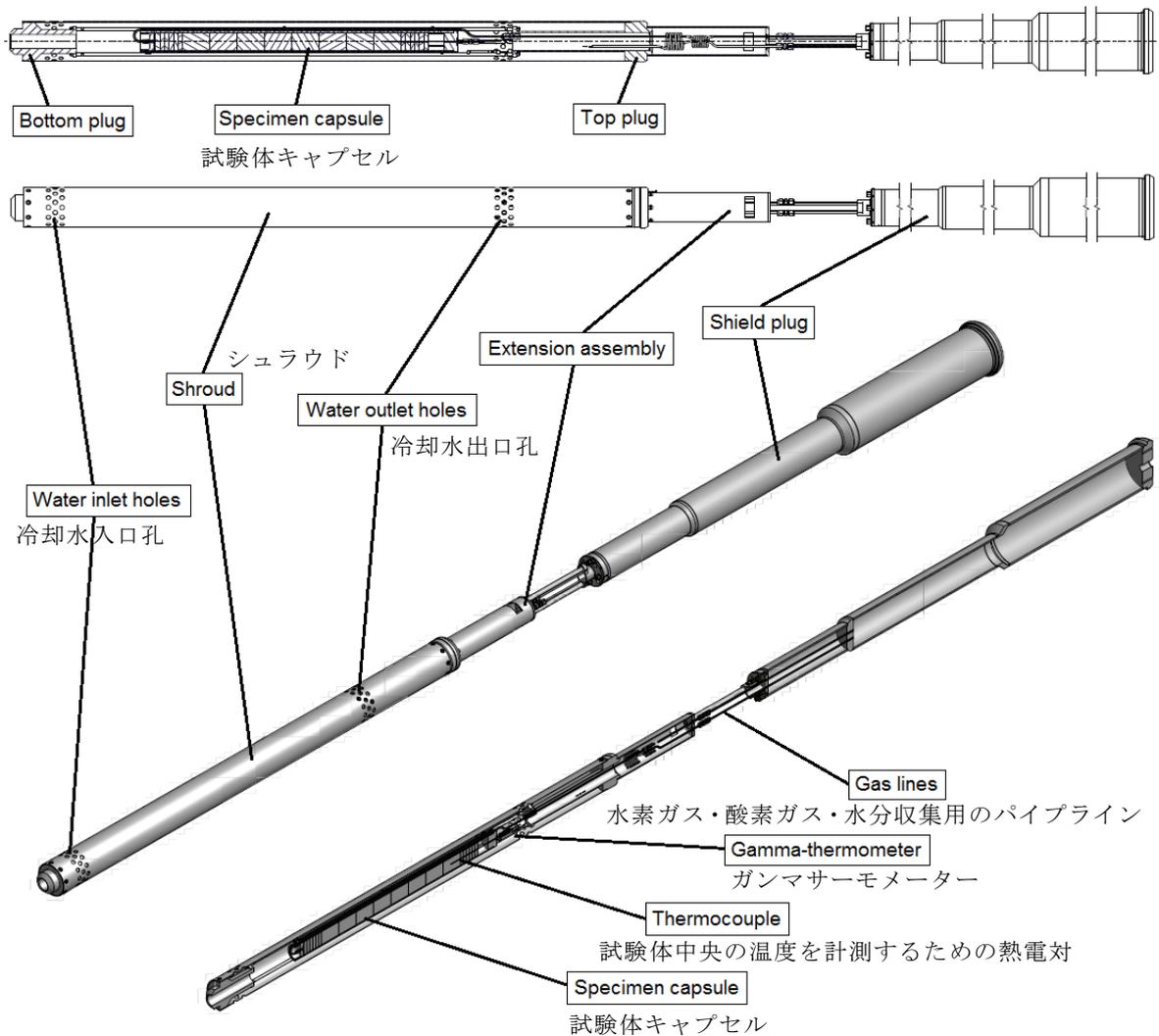


出典 1) 平成 23 年度高経年化技術評価高度化事業成果報告書〈第 3 分冊〉、株式会社三菱総合研究所、pp. 3-530 図 3. 2. 3-134 一部追記、平成 24 年 3 月 (参 12)

出典 2) 平成 26 年度高経年化技術評価高度化事業 (コンクリート構造物の長期健全性評価に係る調査研究) 成果報告書、株式会社三菱総合研究所、pp. 3-115 図 3. 2. 1-7(a) 一部追記、平成 27 年 3 月 (参 15)

図 2.2 JEEP II の炉心に装荷した照射治具のイメージ

Fig. 2.2 Jig for Neutron Irradiation installed in the JEEP II Reactor



出典) 平成 23 年度高経年化技術評価高度化事業成果報告書 (第 3 分冊)、株式会社三菱総合研究所、pp. 3-529 図 3. 2. 3-133 一部追記、平成 24 年 3 月 (参 12)

図 2. 3 照射治具の概要

Fig. 2.3 Front View and Bird's-eye View of the Jig for Neutron Irradiation

2. 2 骨材試験の方法

2. 2. 1 骨材試験体の組成

骨材試験体への中性子照射では、骨材の石英含有率をパラメータとして、中性子照射量と膨張量の関係を明確にすることを主な目的としている。

そのため、骨材試験体に用いた骨材は、表 2.1 及び表 2.2 に示す石英含有率の異なる 6 種類の骨材を使用し、各骨材を区別するための ID (Identification: 識別記号) を G91, G47, G40, G39, G23 及び G00 とした。表 2.1 に X 線回折/リートベルト解析により測定した骨材の鉱物組成を示す。表 2.2 に蛍光 X 線分析により測定した骨材の化学組成及び微粉末を電気炉で強熱し算出した LOI (Loss on Ignition: 強熱減量値) を示す。

表 2.1 の X 線回折/リートベルト解析による鉱物組成は、骨材を振動粉砕機で微粉末にした後、コランダム (α - Al_2O_3) 粉末を内部標準試料として、分析対象 (骨材粉末の試料) に 50 mass % となるように添加した試料の X 線回折パターンを測定し、リートベルト解析により鉱物量を定量した。X 線回折パターンは、粉末 X 線回折装置 (Bruker D8 Advance) により、Cu-K α 管球、管電圧 40kV、管電流 40mA、走査範囲 5~60°、ステップ幅 0.02°、スキャンスピード 5°/min の条件で測定した。リートベルト解析は、ソフトウェア TOPAS ver.4.2 (Bruker) を用いて、Quartz、Calcite、Dolomite (苦灰石)、Albite、Anorthite、Anorthoclase (曹微斜長石)、Orthoclase (正長石)、Microcline、Biotite (黒雲母)、Sericite (絹雲母)、Illite (イライト)、Chlorite (緑泥石) 及び Pyrite (黄鉄鉱) を定量対象として実施した。非晶質 (Amorphous) の量は、コランダムの定量値を用いて式 2.1 に従い算出した。ただし、使用した骨材 G91, G47, G40, G39 及び G23 の 5 種類は、リートベルト解析の範囲で非晶質がほとんど同定されなかったため、非晶質は無いものとして扱った。

$$A = 100 / (100 - S) \times (1 - S/S_R) \times 100 \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、A: 非晶質の量 (mass %)、S: コランダムの混合率 (mass %)、 S_R : コランダムの定量値 (mass %) である。

表 2.2 の蛍光 X 線分析による化学組成の分析は、微粉砕した試料について、ガラスビード調製装置 (日本サーモニクス NT-2100 型) を用いてガラスビードとした試料を、粘土類検量線 (理学電機工業 Primus) を用いた検量線法により分析した。分析項目は、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaO、MgO、 SO_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 及び MnO とした。また、LOI の測定は、微粉末を 1000°C の電気炉で 1 時間強熱した際の、質量減少量の割合 (mass %) とした。

表 2.3 に、石英含有率の異なる 6 種類の骨材 G91, G47, G40, G39, G23 及び G00 の特徴を示す。また、各骨材が選定された経緯の概略を以下に述べる。

日本国内の商用型軽水炉のコンクリートは、粗骨材に砂利及び碎石の両方が使用されている。そのため、異なる 4 種類の砂利を収集し、蛍光 X 線分析による SiO_2 及び Al_2O_3 の割合並びに X 線回折パターンによる Quartz のピークの強度を比較した。その結果、 SiO_2 の割合が多く Al_2O_3 の割合が少ない、また、Quartz のピークの強度が比較的高い G47 の 1 種類

を選定した。

また、異なる 6 種類の砕石を収集し、 SiO_2 の割合が多く Al_2O_3 の割合が少ない、また、Quartz のピークの強度が高い G91 を選定した。 SiO_2 と Al_2O_3 の割合が G47 と同程度である G40 及び G39 を選定した。石英含有率が低い G23 を選定した。

さらに、Quartz を含む異なる 5 種類の骨材 G91, G47, G40, G39 及び G23 との比較のために、これら 5 種類の選定のために収集した骨材とは別に、Quartz を含まない砕石として 1 種類の骨材 G00 を採取し使用した。

2. 2. 2 骨材試験体の製作

骨材試験体の寸法は、直径 ϕ 10mm×高さ 10mm の小型の円柱状とした。なお、骨材試験体のサイズは、後述するコンクリート試験体の粗骨材（最大径を 13mm（粒度 5～13mm）で製作）に近い寸法である。

骨材試験体は、各骨材からコアドリルで骨材コアを採取し、ダイヤモンドカッターで切断した後、回転研磨盤で端面研磨して直径 ϕ 10mm×高さ 10mm の円柱状に成形した。また、骨材試験体の製作後は、直径及び高さを計測した。計測後はアルミパックで密閉保管することで外部との水分のやり取りを遮断し、中性子照射開始前まで製作時の水分量が維持される封かん状態とした。また、骨材試験体の JEEP II への輸送では、輸送用の箱に蓄熱材を入れ、箱内の温度が 5～30℃の範囲になるように管理した。

2. 2. 3 骨材試験体への中性子照射

照射治具への骨材試験体装荷状況を図 2.4 に示す。また、表 2.4 に骨材試験体の中性子照射条件を示す。骨材試験体に対する 60mm の照射領域に厚さ 10mm のサンプルホルダ（アルミニウム製）を 6 枚積み重ね、それぞれに 6 種類の骨材試験体（G91, G47, G40, G39, G23 及び G00）を 1 体ずつ、強制的な拘束は設けずに装荷した。このように、試験体キャプセルの骨材試験体照射領域 60mm に、6 枚積み重ねたサンプルホルダを装荷・密閉した照射治具を 4 体製作し、照射時間を変えることで、それぞれの照射治具に中性子照射量（各照射治具における代表値） 0.701×10^{19} , 1.28×10^{19} , 4.12×10^{19} 及び 8.25×10^{19} n/cm² ($E > 0.1\text{MeV}$) まで照射を行った。

ここで、中性子照射領域最下部から 60mm の区間にある骨材試験体の中性子照射量は、最下部から 30mm の中間高さの中性子照射量（図 2.4 及び表 2.4 参照）を代表値として用いた。

なお、中性子照射量 0.701×10^{19} 及び 8.25×10^{19} n/cm² ($E > 0.1\text{MeV}$) まで照射した後の試験体キャプセルの内部では、骨材試験体を格納しているサンプルホルダへの浸水が確認された。試験体キャプセルの内部の浸水の原因は以下のように推測される。

中性子照射量 0.701×10^{19} n/cm² ($E > 0.1\text{MeV}$) までの照射では、試験体キャプセル内に一緒に装荷されているコンクリート試験体の自由水が、中性子照射により放射線分解するこ

とでガスが発生した。また、ガンマ線発熱の影響により自由水が蒸発し、水蒸気が発生した。放射線分解したガスの再結合や試験体キャプセル表面上への結露等により生じた水が試験体キャプセルの下側に溜まったことが主な原因であると推測される。中性子照射量 1.28×10^{19} 及び 4.12×10^{19} n/cm² (E>0.1MeV) までの照射では、浸水は確認されなかった。これらについては、中性子照射量 0.701×10^{19} n/cm² (E>0.1MeV) と同様の理由により一時は浸水したものの、その後は、コンクリート試験体の自由水の減少に伴いガス及び蒸気が発生が収束するとともに、長期の照射中に試験体キャプセル内の下側で溜まった水が、放射線分解でガスに変化又は蒸発したと考えられる。中性子照射量 8.25×10^{19} n/cm² (E>0.1MeV) までの照射では、照射治具と一緒に装荷したコンクリート試験体が中性子照射に伴い膨張し、試験体キャプセルを破断させた。そのため、試験体キャプセルの破断により冷却水（重水）が流入したとみられる。

そのため、中性子照射後の骨材試験体は、サンプルホルダごと恒温恒湿槽（Memmert UF 30 PLUS）で加熱・乾燥を行った。加熱・乾燥の条件は、純度 99.6%の窒素ガスの流量 100 ml/min の下で、 $76 \pm 1^\circ\text{C}$ の温度条件で約 3 週間とした。 76°C の温度条件は、温度計測用試験体で計測した照射中の温度を基に決定した。

2. 2. 4 寸法測定

中性子照射前後に、骨材試験体の寸法（直径、高さ）を計測した。

中性子照射前は、精度 0.001mm のマイクロメータ（ミットヨ Digimatic Micrometer MDC-25MJ）により、直径は骨材試験体の高さ中央位置 5 点で 3 回ずつ計測し、その平均値を算出した。高さは異なる位置 5 点で 3 回ずつ計測し、その平均値を算出した。

中性子照射後は、恒温恒湿槽による加熱・乾燥後に、精度 0.001mm の長さゲージ（Heidenhain MT 25）により、直径は骨材試験体の高さ中央位置 5 点を計測し、その平均値を算出した。高さは異なる位置 5 点を計測し、その平均値を算出した。

寸法測定のサンプル数は、中性子照射量 4.12×10^{19} 及び 8.25×10^{19} n/cm² (E>0.1MeV) については、各中性子照射条件での各骨材種類に対する 6 体の全てについて実施した。また、中性子照射量 0.701×10^{19} 及び 1.28×10^{19} n/cm² (E>0.1MeV) については、各中性子照射条件での各骨材種類に対して 4~6 体について実施した。なお、測定のサンプル数が 4 体又は 5 体の条件では、骨材試験体に記した識別マークの判別がついた物のみを測定した。

また、試験結果として、計測した直径及び高さを用いて、中性子照射前後での体積変化率を算出した。

表 2.1 X線回折／リートベルト解析により求めた骨材の鉱物組成

Table 2.1 Mineral Composition of Aggregate Samples Determined via X-ray Diffraction/Rietveld Analysis

ID	石英	石灰石		長石					雲母			その他		非晶質
	Quartz	Calcarius		Feldspar					Mica			Others		Amorphous
	石英 Quartz	方解石 Calcite	苦灰石 Dolomite	曹長石 Albite	灰長石 Anorthite	曹微斜長石 Anorthoclase	正長石 Orthoclase	微斜長石 Microcline	黒雲母 Biotite	絹雲母 Sericite	イリト Illite	緑泥石 Chlorite	黄鉄鉱 Pyrite	非晶質 Amorphous
G91	91.85 ±1.92	—	—	0.77 ±0.21	2.30 ±0.58	0.61 ±0.40	0.50 ±0.40	3.03 ±0.63	0.44 ±0.07	—	—	0.50 ±0.27	—	—
G47	47.13 ±1.04	—	—	23.59 ±0.44	7.21 ±1.18	—	—	4.64 ±0.52	—	10.06 ±2.51	4.33 ±1.56	3.04 ±0.48	—	—
G40	40.13 ±0.79	—	—	29.06 ±0.94	—	4.13 ±0.48	2.79 ±0.90	9.38 ±1.46	—	6.67 ±0.69	4.40 ±0.63	3.42 ±0.40	—	—
G39	39.71 ±1.51	2.79 ±0.17	—	29.60 ±0.57	—	2.93 ±0.43	3.13 ±0.63	8.73 ±1.44	—	6.67 ±1.38	—	3.60 ±1.08	2.83 ±0.35	—
G23	23.53 ±0.92	17.79 ±0.26	0.15 ±0.13	34.31 ±0.87	—	—	—	—	—	12.79 ±1.00	—	11.43 ±0.47	—	—
G00	—	91.98 ±0.72	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8.00 ±0.14

単位：mass %

表 2.2 LOI と蛍光 X 線分析法により求めた骨材の化学組成

Table 2.2 Loss on Ignition and Chemical Composition of Aggregate Samples Determined via X-ray Fluorescence Spectroscopy Analysis

ID	LOI 注	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
G91	0.93	86.99	5.09	2.25	0.68	0.98	0.69	0.49	1.25	0.24	0.10	0.17
G47	2.19	74.68	11.86	3.11	1.15	1.04	0.37	2.86	2.03	0.37	0.05	0.05
G40	1.63	74.11	12.81	2.58	0.80	0.70	0.05	3.79	2.48	0.35	0.03	0.05
G39	3.24	70.80	12.47	2.76	2.63	0.94	1.45	3.25	2.96	0.34	0.04	0.05
G23	10.25	52.61	13.08	4.82	11.49	2.03	0.04	3.18	1.48	0.62	0.11	0.09
G00	43.38	0.03	0.04	0.02	55.68	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00

注) LOI (Loss on Ignition : 強熱減量値)

単位 : mass %

表 2.3 骨材の特徴

Table 2.3 Properties of Aggregate Samples

ID	種類 Type	石英含有率 Quartz content (mass %)	SiO ₂ (mass %)	Al ₂ O ₃ (mass %)
G91	碎石 Crushed stone	91.9	86.99	5.09
G47	砂利 Gravel	47.1	74.68	11.86
G40	碎石 Crushed stone	40.1	74.11	12.81
G39	碎石 Crushed stone	39.7	70.80	12.47
G23	碎石 Crushed stone	23.5	52.61	13.08
G00	碎石 Crushed stone	—	0.03	0.04

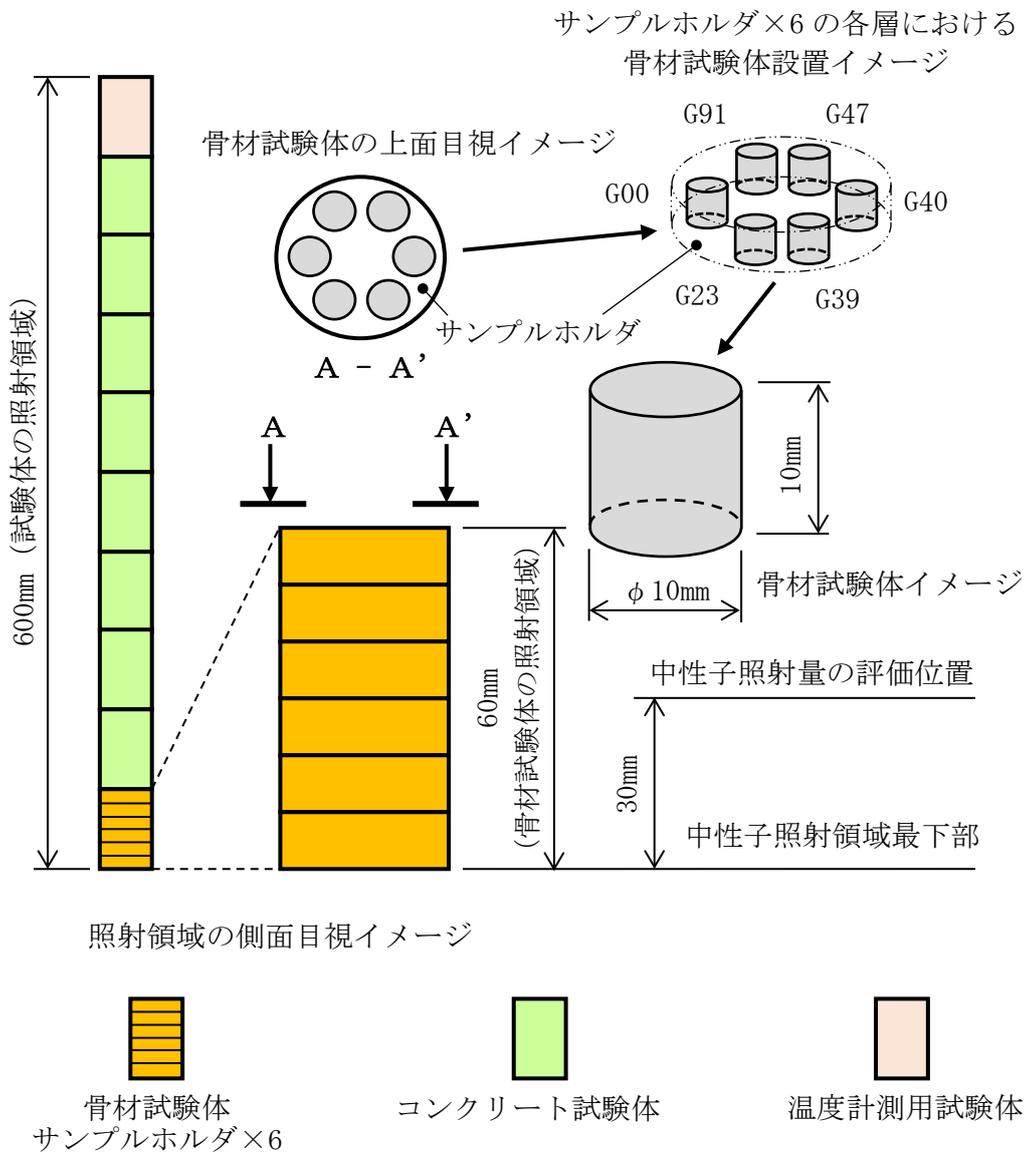


図 2.4 骨材試験体の装荷概要

Fig. 2.4 Setup of Aggregate Specimens during Neutron Irradiation

表 2.4 骨材試験体の中性子照射条件

Table 2.4 Conditions of Irradiated Aggregate Specimens

試験ケース	照射時間 (days) ^{注1} (全出力換算日数)	中性子照射量 ^{注2} ($\times 10^{19}$ n/cm ²) (E > 0.1 MeV)
IR-Agg-1	25.2	0.701
IR-Agg-2	45.3	1.28
IR-Agg-3	155.6	4.12
IR-Agg-4	299.4	8.25

注 1) 中性子照射の実施中における計画的な停止期間を含む

注 2) 中性子照射領域最下部から 30mm の高さの中性子照射量を代表値として評価した値

2. 3 コンクリート試験の方法

2. 3. 1 コンクリート試験体の組成

コンクリート試験は、異なる石英含有率を有する粗骨材を含むコンクリートにおける中性子照射量と物理特性の関係を明確にすることを主な目的とした。

コンクリート試験体に用いた粗骨材は、骨材試験体に対する中性子照射で使用した骨材のうち、最も石英含有率の大きい骨材 G91（石英含有率 91.9%、碎石）と G91 の次に石英含有率が大きく、かつ砂利である骨材 G47（石英含有率 47.1%、砂利）を選定した。G91 及び G47 の特徴は表 2.1、表 2.2 及び表 2.3 を参照のこと。

コンクリート試験体に用いた細骨材は、表 2.5 及び表 2.6 に示す砂を使用し、ID を S とした。表 2.5 に X 線回折/リートベルト解析により測定した細骨材の鉱物組成を示す。また、表 2.6 に蛍光 X 線分析により測定した細骨材の化学組成及び微粉末を電気炉で強熱し算出した LOI を示す。X 線回折/リートベルト解析、蛍光 X 線分析及び LOI の算出は、骨材試験体と同じ方法で実施した。

コンクリート試験体に用いたセメントは、表 2.7 及び表 2.8 に示す早強ポルトランドセメントを使用し、ID を C とした。早強ポルトランドセメントを選定した理由は、中性子照射前のコンクリート試験体の準備期間中に、できる限り水和を安定させるためである。また、コンクリート試験体への中性子照射中に、水和による強度増進を生じにくくさせるためである。表 2.7 に X 線回折/リートベルト解析により測定したセメントの鉱物組成を示す。また、表 2.8 に蛍光 X 線分析により測定したセメントの化学組成及び微粉末を電気炉で強熱し算出した LOI を示す。

表 2.7 の X 線回折/リートベルト解析は、コランダム粉末を内部標準試料として、分析対象（セメント粉末の試料）に 10 mass % となるように添加し、骨材試験体と同じ測定条件で、リートベルト解析により鉱物量を定量した。定量対象は、Alite (C_3S)、Belite (C_2S)、Aluminate (C_3A)、Ferrite (C_4AF)、Periclase（遊離 MgO ）、Bassanite（半水石膏）、Gypsum（石膏）及び Calcite とした。

また、表 2.8 の蛍光 X 線分析は、JIS R 5204:2002「セメントの蛍光 X 線分析方法」^(参20) に従い実施した。LOI の算出は、JIS R 5202:2010「セメントの化学分析方法」^(参21) に従い実施した。

2. 3. 2 コンクリート試験体の製作

水セメント比を 50% として、粗骨材に骨材試験で使用した G91 及び G47 を用いた 2 種類のコンクリート試験体を製作した。本研究では、主として中性子照射が 2 種類の粗骨材を使用して製作したコンクリート試験体の物理特性に及ぼす影響を調べる必要があった。そのため、コンクリート試験体の構成材料には、混和材及び化学混和剤を使用しなかった。また、2 種類のコンクリート試験体は、調合する粗骨材の体積を同一量とし、モルタルは同調合・同一量で製作した。また、これら 2 種類の粗骨材を使用して製作したコンクリー

ト試験体の ID を Con91（粗骨材が G91 のコンクリート試験体）及び Con47（粗骨材が G47 のコンクリート試験体）とした。表 2.9 にコンクリート試験体に使用した構成材料を示す。また、表 2.10 にコンクリート試験体の調合を示す。

コンクリート試験体の寸法は、直径 ϕ 40mm×高さ 60mm の円柱状とした。また、コンクリート試験体の製作後は、アルミパックで密閉保管することで外部との水分のやり取りを遮断し、中性子照射開始前、非照射・加熱開始前及び非照射・非加熱放置後まで製作時の水分量が維持される封かん状態とした。コンクリート試験体の JEEP II への輸送では、輸送用の箱に蓄熱材を入れ、箱内の温度が 5～30℃の範囲になるように管理した。

2. 3. 3 コンクリート試験体への中性子照射

図 2.5 に中性子照射するコンクリート試験体の照射治具への装荷概要を示す。コンクリート試験体の照射領域 480mm に、Con91 及び Con47 のコンクリート試験体を、強制的な拘束は設けずに交互に 4 体ずつ装荷した。また、コンクリート試験体に対する軸方向の最上部の領域には、コンクリート試験体の中心温度を測定するために、コンクリートの中心に熱電対（図 3.3 参照）を埋め込んだ温度計測用試験体を装荷した。このように、試験体を試験体キャプセルに装荷・密閉した照射治具を 3 体製作し、照射時間を変えることで、中性子照射量（各照射治具の試験体装荷位置における平均値） 0.778×10^{19} 、 1.41×10^{19} 及び 4.58×10^{19} n/cm² (E>0.1MeV) まで照射した試験体（以下「中性子照射試験体」という。）を作製した。中性子照射試験体の数は、各照射時間（3 照射条件）に対して、Con91 及び Con47 がそれぞれ 4 体ずつである。

表 2.11 に 3 照射条件における中性子照射条件の代表値を示す。また、表 2.12 に、Con91 及び Con47 のコンクリート試験体（試験体 2 種類×4 体×3 照射条件）に対する中性子照射量を示す。各試験体の中性子照射量は、図 2.5 の 8 層の軸レベル 90, 150, 210, 270, 330, 390, 450, 510mm の位置（照射領域最下部からの距離）で評価した。3 水準の中性子照射量 0.778×10^{19} 、 1.41×10^{19} 及び 4.58×10^{19} n/cm² (E>0.1MeV) は、これら 8 層の軸レベルで算出した中性子照射量の平均値（以下「平均中性子照射量」という。）である。

ここで、表 2.12 に示すように、平均中性子照射量 4.58×10^{19} n/cm² (E>0.1MeV) では、Con91 及び Con47 とも、最大の中性子照射量が 4.77×10^{19} n/cm² (E>0.1MeV) (Con91: 軸レベル 330mm、Con47: 軸レベル 270mm) である。これまでに運転期間延長認可を受けた原子炉の 40 年間の運転実績及びその後 20 年間の運転延長期間を含めた 60 年間の中性子照射量の予測値は、最大で約 4.49×10^{19} n/cm² (E>0.11MeV) (参²²) であるため、Con91 及び Con47 に対する最大の中性子照射量 4.77×10^{19} n/cm² (E>0.1MeV) は、この 60 年間の中性子照射量の予測値を上回る。

なお、平均中性子照射量 0.778×10^{19} n/cm² (E>0.1MeV) までの中性子照射後の試験体キャプセルの内部では浸水が確認された (2.2.3 参照)。そのため、全ての中性子照射試験体について、骨材試験と同様の方法で、恒温恒湿槽による加熱・乾燥を行った。

2. 3. 4 管理試験体の作製

中性子照射試験体における骨材膨張の影響とガンマ線発熱に伴う熱・乾燥の影響とを分離することを目的として、中性子照射中に計測した温度履歴に従い加熱のみをコンクリート試験体に与えた管理試験体（以下「非照射・加熱試験体」という。）を作製した。

また、コンクリート試験体を室温のままの状態に放置した管理試験体（以下「非照射・非加熱試験体」という。）も作製した。

(1) 非照射・加熱試験体の作製

照射治具における試験体キャプセル（図 2.3 参照）と同設計で作成した非照射・加熱専用の試験体キャプセル（以下「非照射・加熱治具」という。）に、コンクリート試験体を装荷した。図 2.6 にコンクリート試験体の装荷概要を示す。強制的な拘束は設けずに、Con91 及び Con47 のコンクリート試験体を交互に 4 体ずつを装荷するとともに、その上下に温度計測用試験体及びサンプルホルダの模造体（ダミー試験体）を装荷した。

密封した非照射・加熱治具を水槽内に浸漬し、水温を中性子照射での温度履歴を模擬して制御した。設定する水温の温度履歴は、中性子照射の実施中における停止期間を含めた制御とした。また、加熱条件として 2 種類の水温の条件を設定した。ひとつは、中性子照射中に温度計測用試験体で計測した中心温度（約 70℃）の履歴で制御した設定（以下「設定 a」という。）である。もうひとつは、中性子照射中の試験体キャプセル周辺の冷却材（重水）の温度と、温度計測用試験体で計測した温度との温度勾配から評価した温度計測用試験体の断面平均温度（約 65℃）の履歴で制御した設定（以下「設定 b」という。）である。

設定 a での加熱時間は、平均中性子照射量 0.778×10^{19} 、 1.41×10^{19} 及び 4.58×10^{19} n/cm² (E>0.1MeV) の照射時間に対応する時間（3 加熱処理条件）とした。また、設定 b では、平均中性子照射量 0.778×10^{19} n/cm² (E>0.1MeV) の照射時間に対応する時間（1 加熱処理条件）とした。表 2.13 に非照射・加熱試験体の作製条件を示す。非照射・加熱試験体の数は、表 2.13 に示す 4 加熱処理条件に対して、Con91 及び Con47 がそれぞれ 4 体ずつである。

非照射・加熱治具の内側では、中性子照射で発生したような浸水は確認されなかった。これは、中性子照射のようなコンクリート中の自由水に対する放射線分解及びガンマ線発熱の影響がなかったためと推測される。なお、中性子照射試験体と条件を合わせるために、非照射・加熱試験体も、恒温恒湿槽による加熱・乾燥を行った。

(2) 非照射・非加熱試験体の作製

アルミパックで密閉されたコンクリート試験体を、強制的な拘束は設けずに、室温のままの状態に約 24、30 及び 43 ヶ月間の 3 種類の期間に放置し、その後に後述する測定を行った。ここで、この 3 種類の放置時間（3 非加熱処理条件）は、中性子照射の進捗状況に合わせたものである。また、非照射・非加熱試験体の数は、3 非加熱処理条件に対して、Con91 及び Con47 がそれぞれ 3 体ずつである。

2. 3. 5 寸法、圧縮強度及び静弾性係数の測定

中性子照射試験体の中性子照射前後、非照射・加熱試験体の加熱処理前後及び非照射・非加熱試験体の非加熱処理前後に、寸法（直径、高さ）を計測した。また、中性子照射試験体、非照射・加熱試験体及び非照射・非加熱試験体の圧縮強度及び静弾性係数を計測した。

寸法、圧縮強度及び静弾性係数の計測は、中性子照射試験体（試験体 2 種類×4 体×3 照射条件）、非照射・加熱試験体（試験体 2 種類×4 体×4 加熱処理条件）及び非照射・非加熱試験体（試験体 2 種類×3 体×3 非加熱処理条件）の全数に対して実施した。

また、中性子照射試験体及び非照射・加熱試験体の寸法、圧縮強度及び静弾性係数の計測は、恒温恒湿槽による加熱・乾燥後に実施した。

(1) 寸法測定

寸法測定は、精度 0.001mm の長さゲージ (Heidenhain MT 25) を使用した。直径は各試験体の高さ中央位置 5 点で計測し、その平均値を算出した。高さは異なる位置 3 点を計測し、その平均値を算出した。計測した直径及び高さから、中性子照射、非照射・加熱処理及び非照射・非加熱処理の前後での体積変化率を算出した。

(2) 圧縮強度測定

圧縮試験機 (Matest E161N) により、载荷速度 0.6MPa/sec で最大荷重を計測した。計測結果を基に、JIS A 1108:2006「コンクリートの圧縮試験方法」^(参23) の「6. 計算」に従い、中性子照射試験体の圧縮強度 (f_{CI})、非照射・加熱試験体の圧縮強度 (f_{CH}) 及び非照射・非加熱試験体の圧縮強度 (f_{CO}) を算出した。中性子照射試験体及び非照射・加熱試験体の圧縮強度の算出に用いる断面積は、恒温恒湿槽で加熱・乾燥した後の寸法測定結果を用いた。

(3) 静弾性係数測定

万能材料試験機 (INSTRON EZ50) を用い、载荷速度 0.6MPa/sec で荷重を計測するとともに、精度 0.5 μ m の変位センサ (LVDT) を 3 つ用いた長さ 40mm のコンプレッソメータを各試験体の高さ 1/2 の位置を中心に取付けひずみを計測して、中性子照射試験体の静弾性係数 (E_{CI})、非照射・加熱試験体の静弾性係数 (E_{CH}) 及び非照射・非加熱試験体の静弾性係数 (E_{CO}) を算出した。静弾性係数評価は、JIS A 1149:2010「コンクリートの静弾性係数試験方法」^(参24) の「7. 結果の計算」に従った。中性子照射試験体及び非照射・加熱試験体の応力の算出で扱う断面積は、恒温恒湿槽で加熱・乾燥した後の寸法測定結果を用いた。

表 2.5 X線回折／リートベルト解析により求めたコンクリート試験体に使用した細骨材の鉱物組成

Table 2.5 Mineral Composition of Fine Aggregate in Concrete Specimens Determined via X-ray Diffraction/Rietveld Analysis

ID	石英	石灰石		長石					雲母			その他	
	Quartz	Calcarius		Feldspar					Mica			Others	
	石英	方解石	苦灰石	曹長石	灰長石	曹微斜長石	正長石	微斜長石	黒雲母	絹雲母	イリト	緑泥石	黄鉄鉱
	Quartz	Calcite	Dolomite	Albite	Anorthite	Anorthoclase	Orthoclase	Microcline	Biotite	Sericite	Illite	Chlorite	Pyrite
S	47.35 ±0.70	—	—	21.83 ±0.68	5.55 ±1.00	2.20 ±1.08	—	6.17 ±1.45	—	8.67 ±1.19	4.32 ±0.64	3.91 ±0.98	—

単位：mass %

表 2.6 LOI と蛍光 X線分析法により求めたコンクリート試験体に使用した細骨材の化学組成

Table 2.6 Loss on Ignition and Chemical Composition of Fine Aggregate in Concrete Specimens Determined via X-ray Fluorescence Spectroscopy Analysis

ID	LOI 注	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
S	2.12	75.84	11.37	3.01	0.99	0.98	0.27	2.61	2.04	0.36	0.04	0.05

注) LOI (Loss on Ignition: 強熱減量値)

単位：mass %

表 2.7 X線回折/リートベルト解析により求めたコンクリート試験体に使用したセメントの鉱物組成

Table 2.7 Mineral Composition of Cement in Concrete Specimens Determined via X-ray Diffraction/Rietveld Analysis

ID	C ₃ S Alite	C ₂ S Belite	C ₃ A Aluminate	C ₄ AF Ferrite	遊離 MgO Periclase	半水石膏 Bassanite	石膏 Gypsum	方解石 Calcite
C	61.8 ±1.8	17.6 ±1.2	8.2 ±0.4	6.8 ±0.6	0.8 ±0.2	3.2 ±0.2	0.9 ±0.6	0.8 ±0.3

単位：mass %

表 2.8 LOI と蛍光 X線分析法により求めたコンクリート試験体に使用したセメントの化学組成

Table 2.8 Loss on Ignition and Chemical Composition of Cement in Concrete Specimens Determined via X-ray Fluorescence Spectroscopy Analysis

ID	LOI 注	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
C	1.04	20.78	4.98	2.46	65.4	1.24	3.04	0.21	0.28	0.29	0.32	0.09

注) LOI (Loss on Ignition: 強熱減量値)

単位：mass %

表 2.9 コンクリート試験体に使用した構成材料

Table 2.9 Properties of Materials in Concrete Specimens

構成材料	ID	構成材料の詳細	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
水	W	上水道水	—	—
セメント	C	早強ポルトランドセメント (JIS R 5210) 比表面積 : 4340 (cm ² /g)	3.14	—
細骨材	S	砂、最大寸法 : 5 (mm) 単位容積質量 : 1.76 (kg/l) 、実績率 : 68.3	表乾密度 : 2.61 絶乾密度 : 2.57	1.48
粗骨材	G91	碎石、粒度 : 5~13 (mm) 石英含有率 : 91.9 (%)	表乾密度 : 2.66 絶乾密度 : 2.64	0.75
	G47	砂利、粒度 : 5~13 (mm) 石英含有率 : 47.1 (%)	表乾密度 : 2.64 絶乾密度 : 2.61	1.09

表 2.10 コンクリート試験体の調合

Table 2.10 Mixture Proportions in Concrete Specimens

ID	骨材 a		W / C 注1 (%)	s / a 注2 (%)	単体量 (kg/m ³)				
	細骨材 s	粗骨材			W	C	S	G91	G47
Con91	S	G91	50	45	183	366	799	995	—
Con47		G47	50	42	177	354	757	—	1057

コンクリートの調合条件 スランプ : 8±1.5cm、空気量 : 目標値なし (調合計算値 2.0%)

注1) W / C : 水セメント比

注2) s / a : 細骨材率

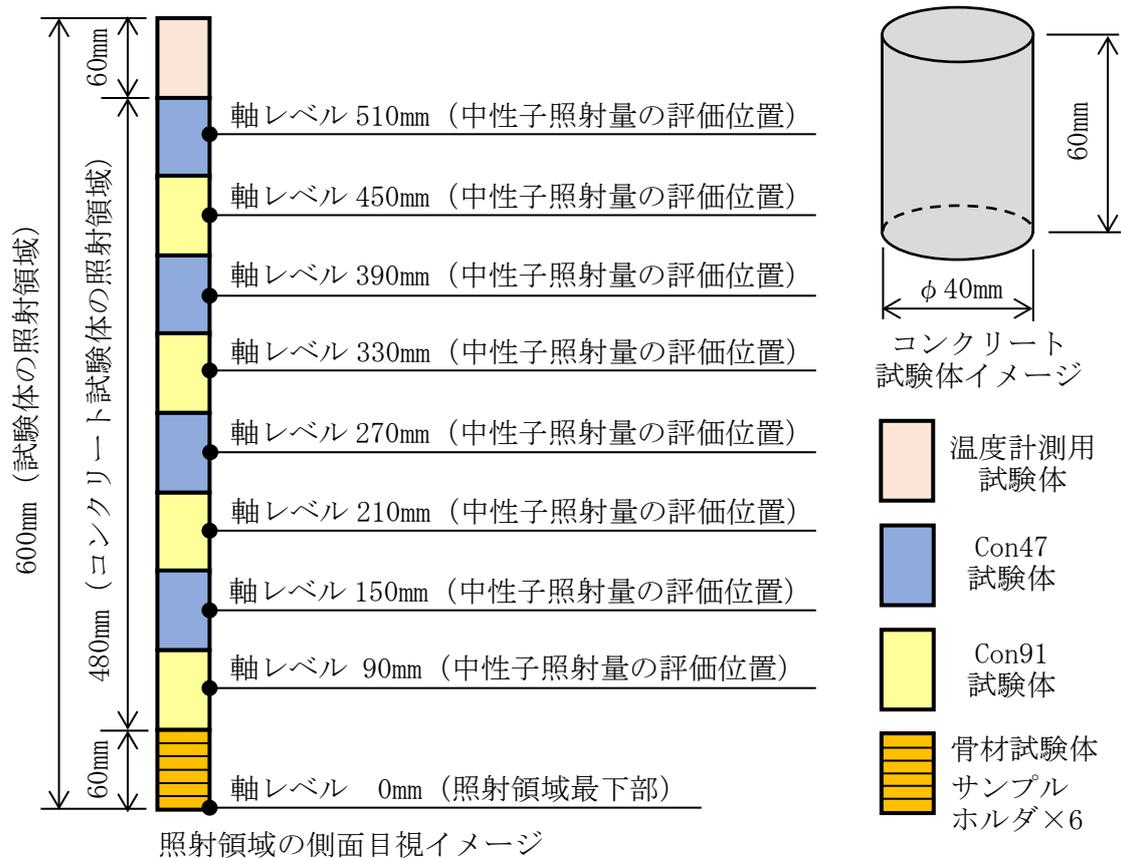


図 2.5 中性子照射におけるコンクリート試験体の装荷概要

Fig. 2.5 Setup of Concrete Specimens during Neutron Irradiation

表 2.11 コンクリート試験体への中性子照射条件

Table 2.11 Conditions of Irradiated Concrete Specimens

試験ケース	照射時間 ^{注1} (全出力換算日数) (days)	平均中性子照射量 ^{注2} ($\times 10^{19}$ n/cm ²) (E > 0.1 MeV)	中心部平均温度 ^{注3} (中心部最高温度) (°C)
IR-Con-1	25.2	0.778	69.3 (71.1)
IR-Con-2	45.3	1.41	69.0 (70.2)
IR-Con-3	155.6	4.58	69.7 (71.6)

注1) 中性子照射の実施中における計画的な停止期間を含む

注2) Con91×4体及びCon47×4体の平均値(表2.12参照)

注3) 温度計測用試験体で60°C~80°Cの温度を計測したデジタル値の平均

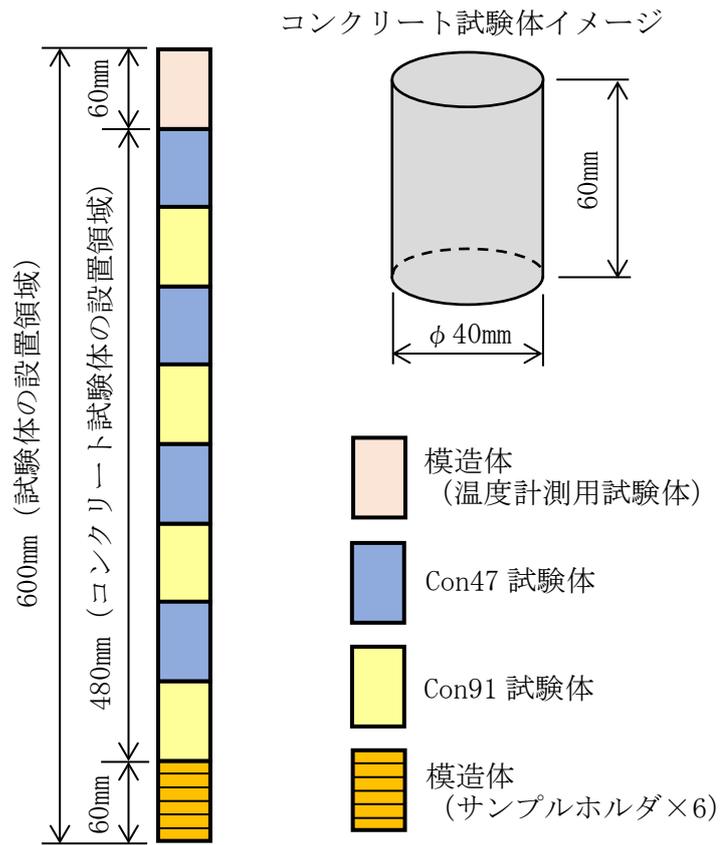
表 2.12 各試験体の中性子照射量

Table 2.12 Neutron Fluence in Each Concrete Specimen

試験体	軸レベル ^{注1} (mm)	中性子照射量 ^{注2} ($\times 10^{19}$ n/cm ²) (E > 0.1 MeV)		
		IR-Con-1	IR-Con-2	IR-Con-3
Con47 試験体	510	0.719	1.31	4.25
Con91 試験体	450	0.761	1.38	4.51
Con47 試験体	390	0.791	1.44	4.64
Con91 試験体	330	0.810	1.47	4.77
Con47 試験体	270	0.813	1.48	4.77
Con91 試験体	210	0.805	1.46	4.73
Con47 試験体	150	0.780	1.42	4.60
Con91 試験体	90	0.745	1.36	4.38
平均中性子照射量 (Con91×4 体及び Con47×4 体の平均値)		0.778	1.41	4.58

注 1) 中性子照射量の評価位置 (照射領域最下部からの距離)

注 2) 中性子束の軸方向分布から、各軸レベルでの中性子照射量を評価した値



非照射・加熱治具内に装荷された
コンクリート試験体の側面目視イメージ

図 2.6 非照射・加熱治具への装荷概要

Fig. 2.6 Setup of Concrete Specimens during Non-Irradiation/Heating

表 2.13 非照射・加熱試験体の作製条件

Table 2.13 Conditions of Non-Irradiated/Heated Concrete Specimens

試験ケース	水槽の水温制御で模擬した条件			
	対応する 中性子照射の 試験ケース及び 平均中性子照射量	加熱時間 ^{注1} (days)	加熱温度 ^{注2} (最高温度) (°C)	加熱条件
IH-Con-1a	IR-Con-1 0.778×10^{19} n/cm ² (E > 0.1 MeV)	25.2	69.3 (71.1)	設定 a : 温度計測用試験 体中心温度の履 歴で水槽内の水 温を制御
IH-Con-2a	IR-Con-2 1.41×10^{19} n/cm ² (E > 0.1 MeV)	45.3	68.9 (70.2)	
IH-Con-3a	IR-Con-3 4.58×10^{19} n/cm ² (E > 0.1 MeV)	155.6	69.6 (71.5)	
IH-Con-1b	IR-Con-1 0.778×10^{19} n/cm ² (E > 0.1 MeV)	25.2	63.9 (65.1)	設定 b : 試験体断面平均 温度に換算した 履歴で水槽内の 水温を制御

注 1) 対応する中性子照射の実施中における計画的な停止期間を含む

注 2) 水温が 60°C~80°C の平均 (デジタル値の平均)

3. 結果

3. 1 骨材試験

本節では、石英含有率の異なる 6 種類の骨材に対する試験結果^(参3)を参照し、中性子照射による体積変化率への影響を評価した。

なお、 $1.28 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) まで照射した骨材 G39 の骨材試験体 6 体のうち 1 体が、他の G39 の骨材試験体 4 体（残りの 1 体は骨材試験体に記した識別マークの判別が出来なかった試験体）と比べて、直径変化率が明らかに大きく、また、高さ変化率及び体積変化率が明らかに小さくなった。そのため、同試験体の直径変化率、高さ変化率及び体積変化率について、有意水準 $\alpha = 0.01$ （危険率 1%）でスミルノフ・グラブス検定による検証を実施した。その結果、直径変化率、高さ変化率及び体積変化率とも、他の G39 の骨材試験体と比べて「有意差あり（危険率 1%で棄却すべき外れ値）」との検定結果であった。したがって、筆者らは、同試験体の体積変化率を結果に含めなかった。

天然の岩石を破砕した砕石は、多くの鉱物を含んでおり、相組成が複雑であり砕石間で様ではない。当該試験体に含まれる特定の鉱物あるいは構造が、中性子照射の過程において特異な影響を受けた可能性が考えられる。なお、中性子照射後に、直径が増大したことは、当該試験体に含まれる石英含有率が高かった可能性等により説明できるが、高さ及び体積が減少した原因は、本研究の範囲では明らかにすることはできなかった。

3. 1. 1 体積変化率

図 3.1 に骨材試験体の石英含有率と照射量に依存した体積変化率を示す。石英含有率の異なる 5 種類の骨材 G91, G47, G40, G39 及び G23 について、高照射領域で体積変化率が急激に増加する傾向を示した。骨材 G47, G40, G39 及び G23 の 4 種類は、各中性子照射量に対する体積変化率の平均値に大きな差が無かったが、これらと比較し骨材 G91 では、中性子照射量 $8.25 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) で体積変化率が明らかに大きくなった。一方で、Quartz を含まない骨材 G00 は、中性子照射量によらず体積はほとんど変化しなかった。

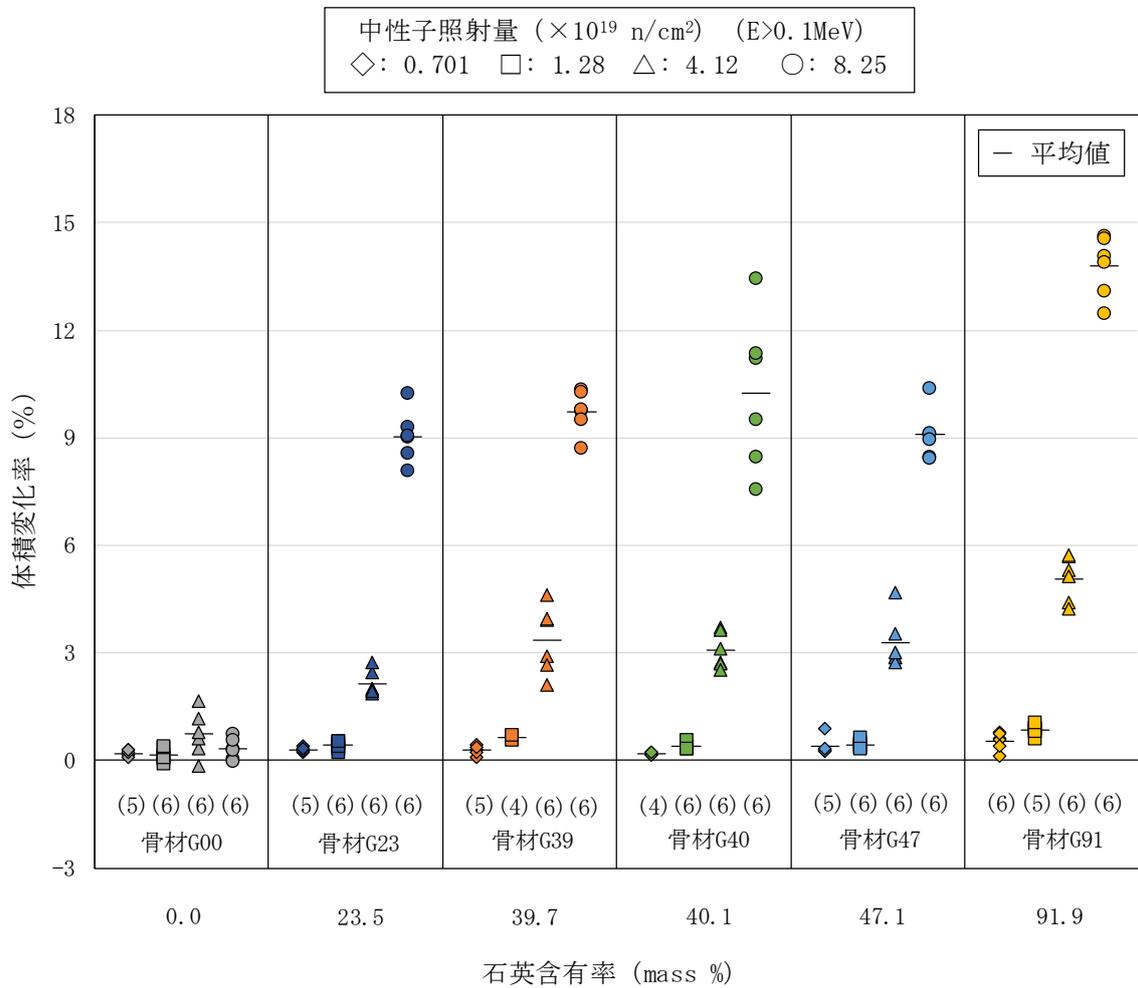


図 3.1 骨材の石英含有率と照射量に依存した体積変化率
 (括弧内に示した数字は測定した試験体数)

Fig. 3.1 Volumetric Swelling Depending on Quartz Content of Aggregate and Neutron Fluence

(Numbers in Parentheses Indicate the Number of Specimens Measured)

3. 2 コンクリート試験

本節では、石英含有率の異なる2種類の骨材で構成されたコンクリートに対する試験結果^(参3)を参照し、体積変化率、圧縮強度及び静弾性係数への影響を評価した。

ここで、各条件における2種類のコンクリートのサンプル数は、中性子照射試験体及び非照射・加熱試験体がそれぞれ4体ずつである。また、非照射・非加熱試験体がそれぞれ3体ずつである。

なお、平均中性子照射量 $4.58 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) まで照射した中性子照射試験体の寸法測定結果のうち、Con91の2体(4体中の2体)の直径が $\phi 40.702 \text{ mm}$ (軸レベル: 330mm、中性子照射量 $4.77 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$)) 及び $\phi 40.714 \text{ mm}$ (軸レベル: 90mm、中性子照射量 $4.38 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$)) であった。そのため、同試験体2体の直径は、試験体キャプセル内径(設計寸法 $\phi 40.7 \sim 40.8 \text{ mm}$) よりも大きかった可能性があった。よって、筆者らは、これらの寸法測定結果の除外について検討した。

その結果、寸法測定結果は試験体キャプセル内径の寸法下限値($\phi 40.7 \text{ mm}$)に極めて近く、Con91と試験体キャプセルとの干渉があったとしても中性子照射終盤のわずかな時期と考えた。また、残るCon91の2体の直径、高さ、圧縮強度及び静弾性係数と比較しても異なる傾向を示すものではなかった。したがって、筆者らは、直径が試験体キャプセルの内径よりも大きかった中性子照射試験体(Con91の2体)の体積変化率、圧縮強度及び静弾性係数を結果に含めた。

3. 2. 1 体積変化率

図3.2に各条件におけるコンクリートの体積変化率を示す。図3.2a)は中性子照射試験体の作製前後での体積変化率、図3.2b)は非照射・加熱試験体の作製前後での体積変化率、図3.2c)は非照射・非加熱試験体の作製前後での体積変化率である。また、図3.2b)における加熱時間25.2(days)は、図3.2a)における $0.778 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) までの照射時間に対応する。加熱時間45.3(days)は、 $1.41 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) までの照射時間に対応する。加熱時間155.6(days)は、 $4.58 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) までの照射時間に対応する。

図3.2a)が示すように、中性子照射試験体は、Con91及びCon47ともに中性子照射量が増加するに従って膨張する傾向が認められた。また、Con91の方がCon47よりも体積変化率が大きい結果となった。

一方で、図3.2b)が示すように、非照射・加熱試験体は、全て収縮したが、加熱時間による体積変化率の顕著な差はなかった。また、最高温度(約70°C)で模擬した設定aの条件(IH-Con-1a)と、断面内平均温度(約65°C)で模擬した設定bの条件(IH-Con-1b)の体積変化率に顕著な差はなかった。

また、図3.2c)が示すように、非照射・非加熱試験体は、中性子照射試験体及び非照射・加熱試験体と比較して体積変化が乏しい結果となった。

3. 2. 2 圧縮強度

図 3.3 に各条件におけるコンクリートの圧縮強度を示す。図 3.3a) は中性子照射試験体の圧縮強度 (f_{CI}) である。図 3.3b) は非照射・加熱試験体の圧縮強度 (f_{CH}) である。図 3.3c) は非照射・非加熱試験体の圧縮強度 (f_{CO}) である。

図 3.3a) が示すように、中性子照射量の増加とともに、圧縮強度 (f_{CI}) が減少する傾向が認められた。4.58×10¹⁹ n/cm² (E>0.1MeV) までの照射では、Con47 の圧縮強度 (f_{CI}) が、Con91 よりも大きい結果を示した。0.778×10¹⁹ 及び 1.41×10¹⁹ n/cm² (E>0.1MeV) までの照射では、Con91 と Con47 の圧縮強度 (f_{CI}) に大きな差はなかった。

図 3.3b) が示すように、加熱時間の増加とともに、非照射・加熱試験体の圧縮強度 (f_{CH}) が微減少する傾向が認められた。非照射・加熱試験体の圧縮強度 (f_{CH}) の方が、中性子照射試験体の圧縮強度 (f_{CI}) よりもやや大きい傾向を示した。非照射・加熱試験体は、全ての条件において、Con91 の圧縮強度 (f_{CH}) が、Con47 よりも大きい結果を示した。また、最高温度で模擬した設定 a の条件 (IH-Con-1a) の圧縮強度 (f_{CH}) と、断面内平均温度で模擬した設定 b の条件 (IH-Con-1b) の圧縮強度 (f_{CH}) に顕著な差はなかった。

一方で、図 3.3c) が示すように、非照射・非加熱試験体では、放置時間に対する圧縮強度 (f_{CO}) の結果に顕著な差はなかった。また、Con91 と Con47 の圧縮強度 (f_{CO}) に大きな差はなかった。

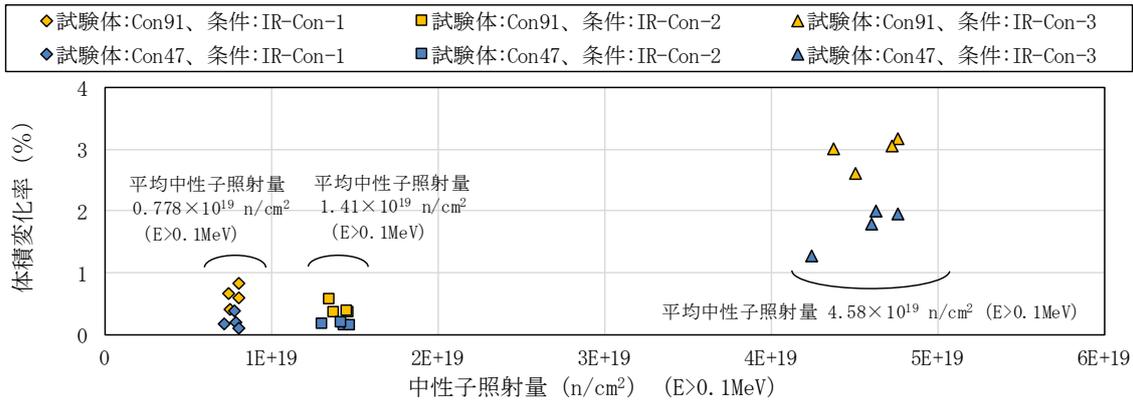
3. 2. 3 静弾性係数

図 3.4 に各条件におけるコンクリートの静弾性係数を示す。図 3.4a) は中性子照射試験体の静弾性係数 (E_{CI}) である。図 3.4b) は非照射・加熱試験体の静弾性係数 (E_{CH}) である。図 3.4c) は非照射・非加熱試験体の静弾性係数 (E_{CO}) である。

図 3.4a) が示すように、中性子照射量の増加とともに、静弾性係数 (E_{CI}) が減少する傾向が認められた。また、全ての中性子照射条件において、Con47 の静弾性係数 (E_{CI}) が、Con91 よりやや大きい傾向を示した。

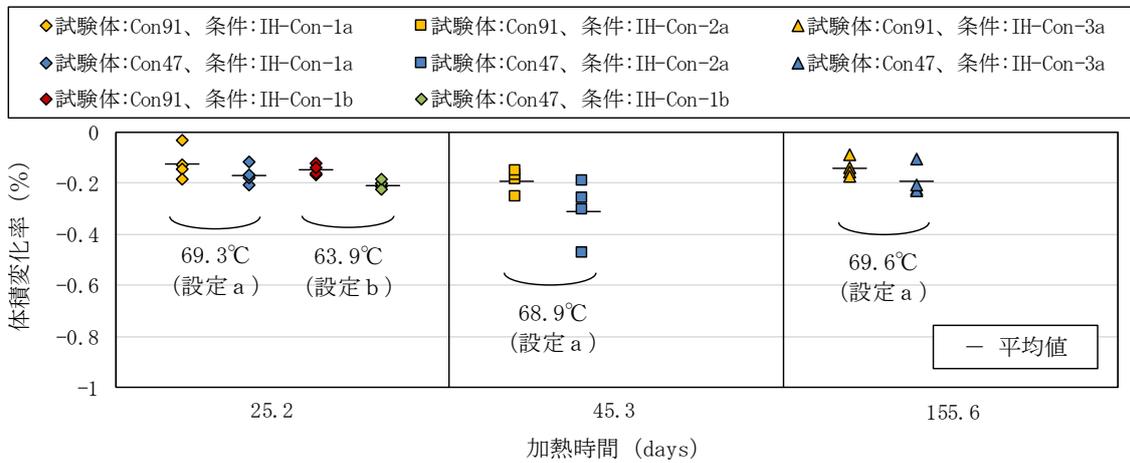
図 3.4b) が示すように、加熱時間の増加とともに、非照射・加熱試験体の静弾性係数 (E_{CH}) が微増加する傾向が認められた。非照射・加熱試験体の静弾性係数 (E_{CH}) の方が、中性子照射試験体の静弾性係数 (E_{CI}) よりもやや大きい傾向を示した。コンクリート試験体の石英含有率の違いによる静弾性係数 (E_{CI}) の相関関係は確認できなかった。また、最高温度で模擬した設定 a の条件 (IH-Con-1a) の静弾性係数 (E_{CI}) と、断面内平均温度で模擬した設定 b の条件 (IH-Con-1b) の静弾性係数 (E_{CI}) に顕著な差はなかった。

一方で、図 3.4c) が示すように、非照射・非加熱試験体の静弾性係数 (E_{CO}) は、中性子照射試験体の静弾性係数 (E_{CI}) 及び非照射・加熱試験体の静弾性係数 (E_{CH}) よりも大きい結果となった。また、コンクリート試験体の石英含有率の違いや放置時間の違いによる静弾性係数 (E_{CO}) の相関関係は確認できなかった。



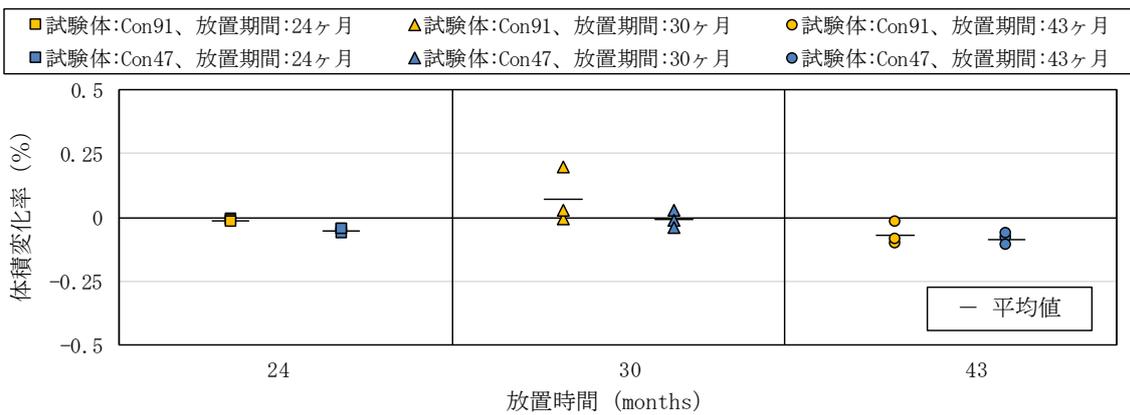
a) 中性子照射試験体の作製前後での体積変化率

a) Volumetric Swelling of Irradiated Concrete Specimens



b) 非照射・加熱試験体の作製前後での体積変化率

b) Volumetric Swelling of Non-Irradiated/Heated Concrete Specimens

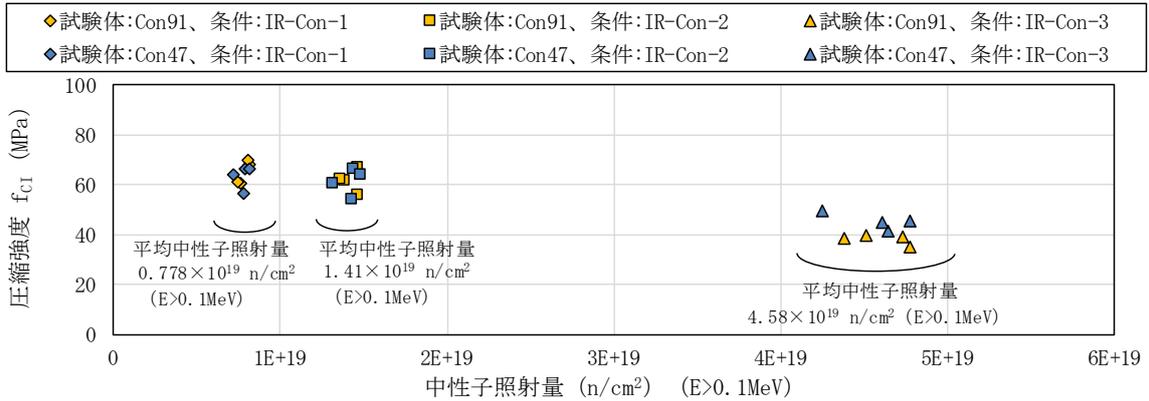


c) 非照射・非加熱試験体の作製前後での体積変化率

c) Volumetric Swelling of Non-Irradiated/Non-Heated Concrete Specimens

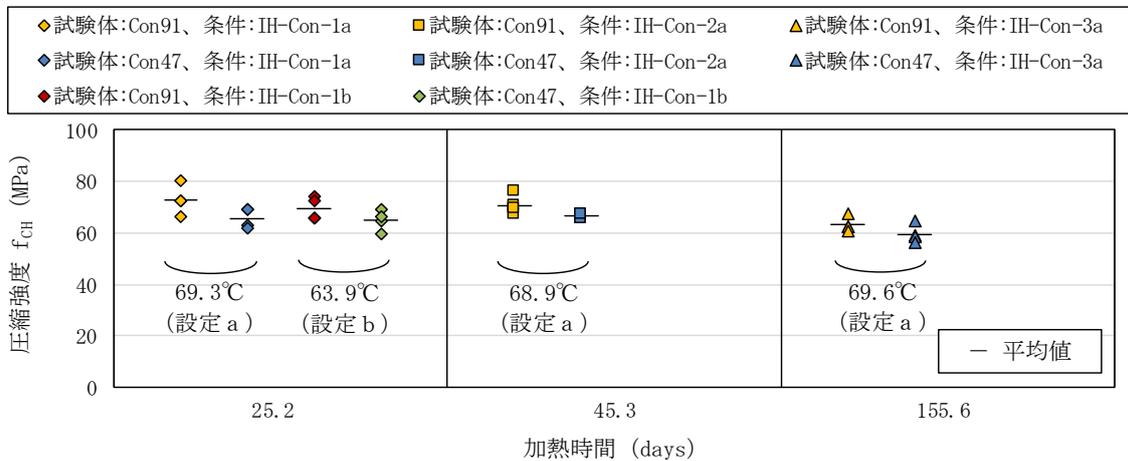
図 3.2 各条件におけるコンクリートの体積変化率

Fig. 3.2 Volumetric Swelling in Each Condition of Concrete Specimens



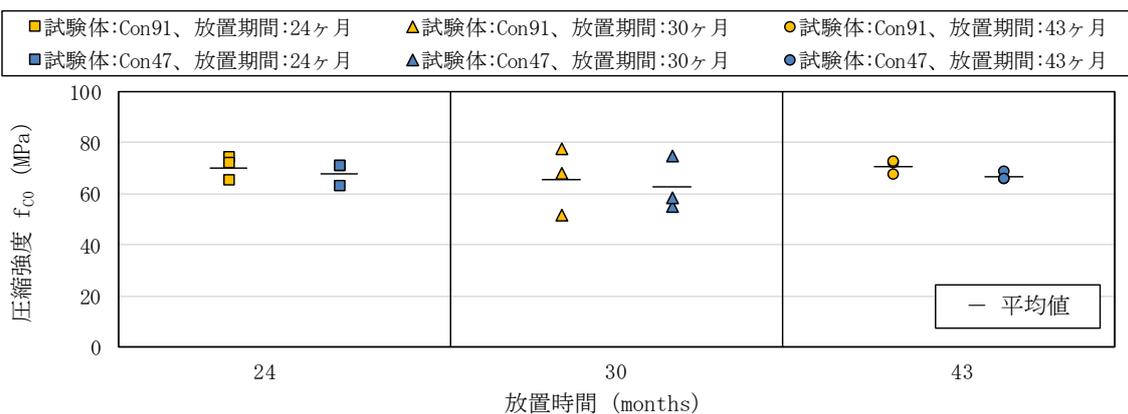
a) 中性子照射試験体の圧縮強度 (f_{CI})

a) Compressive Strength (f_{CI}) of Irradiated Concrete Specimens



b) 非照射・加熱試験体の圧縮強度 (f_{CH})

b) Compressive Strength (f_{CH}) of Non-Irradiated/Heated Concrete Specimens

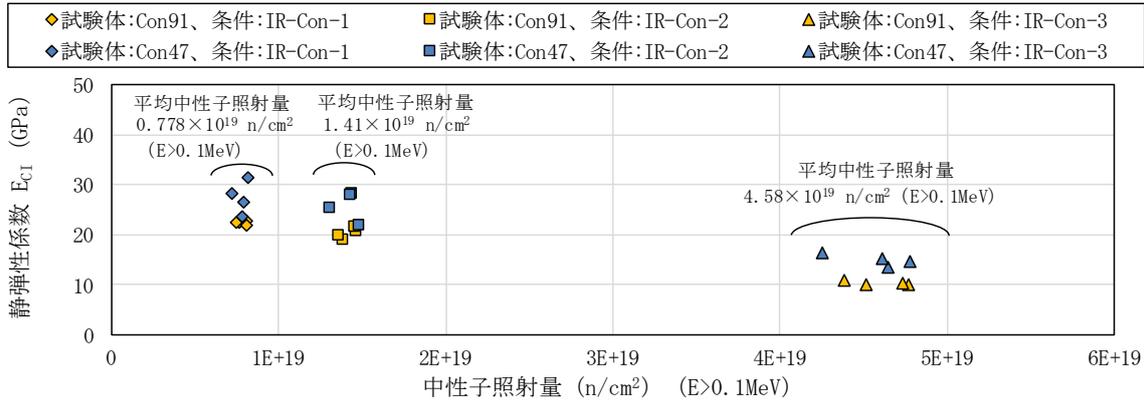


c) 非照射・非加熱試験体の圧縮強度 (f_{CO})

c) Compressive Strength (f_{CO}) of Non-Irradiated/Non-Heated Concrete Specimens

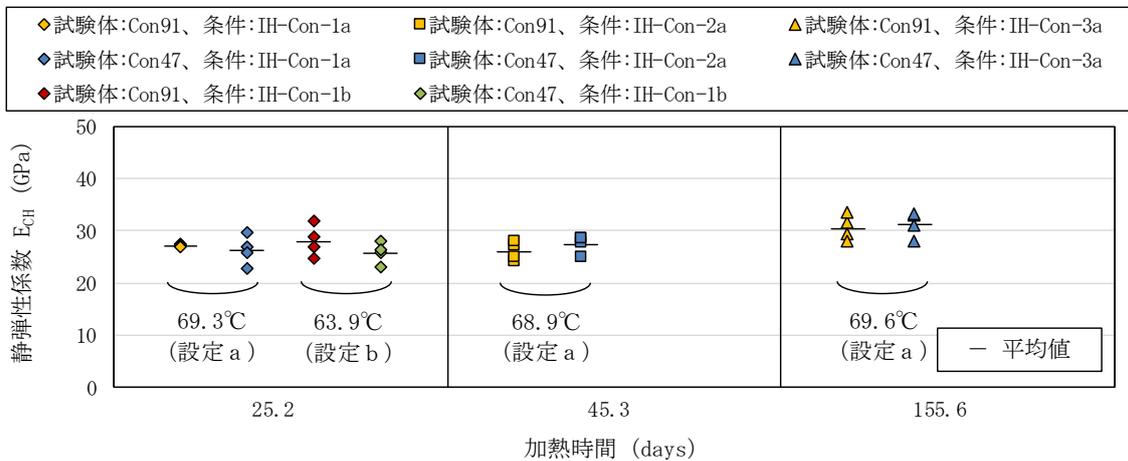
図 3.3 各条件におけるコンクリートの圧縮強度

Fig. 3.3 Compressive Strength in Each Condition of Concrete Specimens



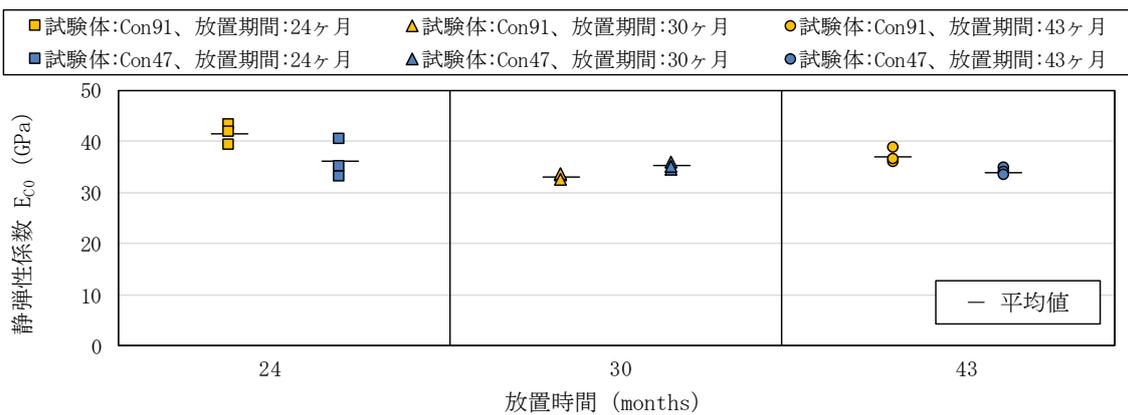
a) 中性子照射試験体の静弾性係数 (E_{C1})

a) Young's Modulus (E_{C1}) of Irradiated Concrete Specimens



b) 非照射・加熱試験体の静弾性係数 (E_{CH})

b) Young's Modulus (E_{CH}) of Non-Irradiated/Heated Concrete Specimens



c) 非照射・非加熱試験体の静弾性係数 (E_{C0})

c) Young's Modulus (E_{C0}) of Non-Irradiated/Non-Heated Concrete Specimens

図 3.4 各条件におけるコンクリートの静弾性係数

Fig. 3.4 Young's Modulus in Each Condition of Concrete Specimens

4. 石英含有率と中性子照射が骨材及びコンクリートの物理特性に及ぼす影響

本章では、骨材試験で得られた体積変化率並びにコンクリート試験で得られた体積変化率、圧縮強度及び静弾性係数の測定結果を基に、石英含有率と中性子照射が骨材及びコンクリートの物理特性に及ぼす影響について考察した。

4. 1 骨材及びコンクリートの膨張に及ぼす影響

4. 1. 1 骨材の膨張に及ぼす影響

図 4.1 に、骨材試験体の石英含有率及び中性子照射量に対する体積変化率の変化を示す。

図 4.1 は、各中性子照射条件において、石英含有率が最も高い骨材 G91 (石英含有率 91.9%) で、体積変化率の平均値が最も高い結果を示した^(参25)。この結果について、筆者らは、Quartz が中性子照射による骨材の膨張に最も貢献したと推定した。この根拠として、図 4.2 に、骨材 G91 の各中性子照射量に対する X 線回折パターンの比較を示す。ここで、図中の▼は、X 線回折における Quartz のピーク位置である。図中の▽は、定量性を評価するために添加した標準物質 (Silicon (シリコン)) のピーク位置である。図 4.2 に示すように、中性子照射量の増加に伴い、Quartz の X 線回折パターンにおけるピークの強度低下及び低角度方向への移動を観察した^(参25)。また、中性子照射量 $8.25 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) では、ピークの強度が激減した。さらに、Le Pape (ル・パペ) ら (2018)^(参7) は、中性子照射に伴う鉱物の体積膨張の予測について研究しており、Quartz の最大体積変化率の最適値が 17.8% であり、他の鉱物よりも高かった。

また、図 4.1 が示すように、骨材 G47、G40、G39 及び G23 の 4 種類では、石英含有率の大小が、体積変化率の大小と対応しないものがあった。この結果について、筆者らは、本研究における中性子照射に伴う骨材の膨張では、Quartz だけでなく、個々の骨材試験体に含まれる長石類にも影響を与えたためと推定した。この根拠として、Le Pape ら^(参7) の研究では、中性子照射に伴う Plagioclase (斜長石) の最大体積変化率の最適値が 7.0%、Potassium feldspar (カリ長石) が 7.7%、Pyroxene (輝石) が 2.8%、Hornblende (普通角閃石) が 1.5%であった。表 2.2 が示すように、骨材 G47、G40、G39 及び G23 の 4 種類は、 SiO_2 が多く含まれる長石類が複雑に混在している。

さらに、図 4.1 は、Quartz 及び長石類を含まない骨材 G00 でも、中性子照射により体積変化率が微増加する結果を示した。表 2.1 が示すように、骨材 G00 の鉱物は、90%以上の Calcite で構成される。この Calcite の中性子照射に伴う体積膨張について、Le Pape ら^(参7) の研究では 1%以下の領域であった。

4. 1. 2 コンクリートの膨張に及ぼす影響

図 4.3 に、骨材試験体及びコンクリート試験体の中性子照射量に対する体積変化率の変化を示す。なお、骨材試験体の体積変化率は、 $8.25 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) まで照射した条件 (IR-Agg-4) を除く結果を表示した。

図 4.3 が示すように、骨材試験体及びコンクリート試験体ともに、中性子照射量が最も低い条件である $0.701 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) と $0.778 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) までの照射において、同等の体積変化率の結果であった。また、 $1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) を超える中性子照射量では、中性子照射量の増加に伴い膨張し、骨材試験体の膨張の方がコンクリート試験体の膨張よりも大きい結果を示した^(参 25)。また、石英含有率の高い試験体 (G91 及び Con91) の方が、石英含有率の低い試験体 (G47 及び Con47) よりも大きく膨張する傾向を示した^(参 25)。

これらの結果は、中性子照射に伴うコンクリートの膨張について、骨材の膨張が、石英含有率に大きく関係していることを裏付けるものである。すなわち、石英含有率が高いほど、また、中性子照射量が高いほど、コンクリートは膨張する傾向を示すことが明らかとなった。

図 4.4 に、最高温度 (約 70°C) で模擬した設定 a の条件 (IH-Con-1a~3a) で加熱処理した非照射・加熱試験体の加熱時間に対する体積変化率の変化を示す。

図 4.4 は、加熱によりコンクリートが収縮する結果を示した。また、図 4.3 と図 4.4 が示すように、加熱時間が 155.6 (days) の非照射・加熱試験体 (IH-Con-3a) の収縮による体積変化率の絶対値は、照射時間が 155.6 (days) である平均中性子照射量 $4.58 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) まで照射した中性子照射試験体 (IR-Con-3) の膨張による体積変化率の絶対値と比較して、小さい結果であった。さらに、平均中性子照射量 0.778×10^{19} 及び $1.41 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) まで照射した中性子照射試験体 (IR-Con-1 及び 2) の膨張による体積変化率の絶対値は、非照射・加熱試験体の収縮による体積変化率の絶対値と同等であった。これは、Hilsdorf 論文が中性子照射によるコンクリートの体積膨張に関する調査で示した、 $1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 未満の領域における膨張による体積変化は、加熱した試験体の収縮による体積変化とほぼ等しいとした考察とも一致した。したがって、これらの結果から、中性子照射によるコンクリートの膨張では、熱・乾燥が及ぼす影響は、中性子照射による影響に比べて小さいことが分かった。すなわち、中性子照射試験体の膨張は、主に中性子照射による影響であった。

中性子照射試験体及び非照射・加熱試験体の体積変化の差が確認できたため、中性子照射による骨材の膨張がコンクリート試験体に与えた影響について、中性子照射試験体の端面を撮影した写真で観察した。

図 4.5 に、平均中性子照射量 $4.58 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) まで照射した中性子照射試験体のうち、中性子照射量 $4.73 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) の位置 (軸レベルが照射領域最下部から 210mm の位置、表 2.12 参照) に装荷した Con91 の試験体端面の写真を示す。なお、同試験体の照射前の直径は $\phi 40.250 \text{ mm}$ 、照射後の直径は $\phi 40.665 \text{ mm}$ であった。図 4.5 が示すように、表面に複数のひび割れを観察した。この結果について、筆者らは、既に述べた中性子照射による骨材の膨張、中性子照射試験体の膨張及び非照射・加熱試験体の収縮に関する考察から、中性子照射による骨材 (粗骨材と細骨材の両方) の膨張が、骨材とセメン

トペーストとの体積変化差をもたらしたと推定した。また、その結果として、セメントペーストにひび割れが発生したと推定した。この根拠として、図 4.6 に、図 4.5 で示した Con91 の試験体端面とは反対側の端面の写真を示す。図 4.6a) は、端面全体の写真である。図 4.6b) は、図 4.6a) における A 部を拡大して表示した。なお、図 4.6 に示す端面は、コンクリート試験体の製作過程で高さ寸法 (60mm) に調整するために切断された面である。図 4.6b) が示すように、骨材周辺のセメントペーストに複数のひび割れ (図中の矢印参照) を観察した。

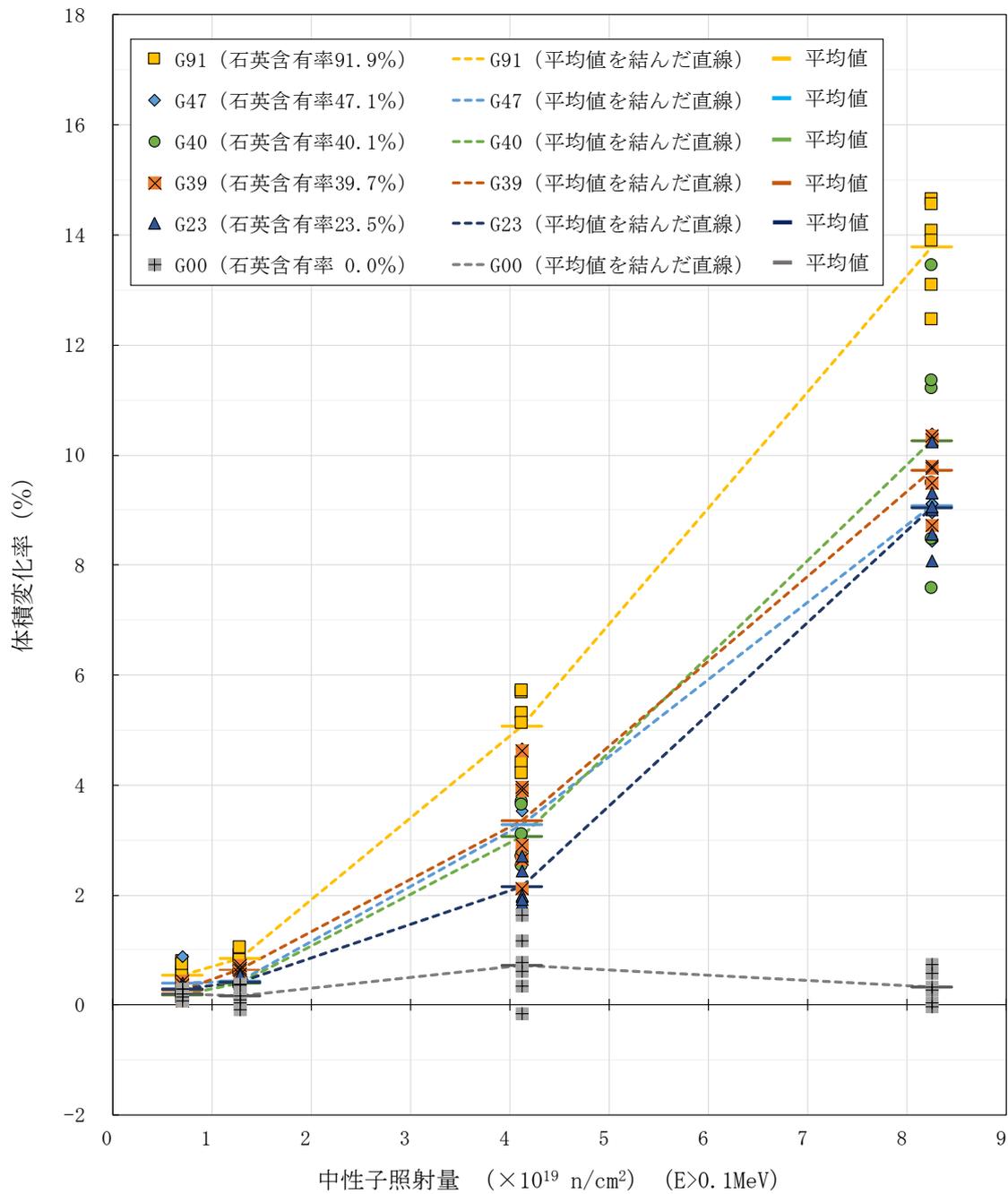
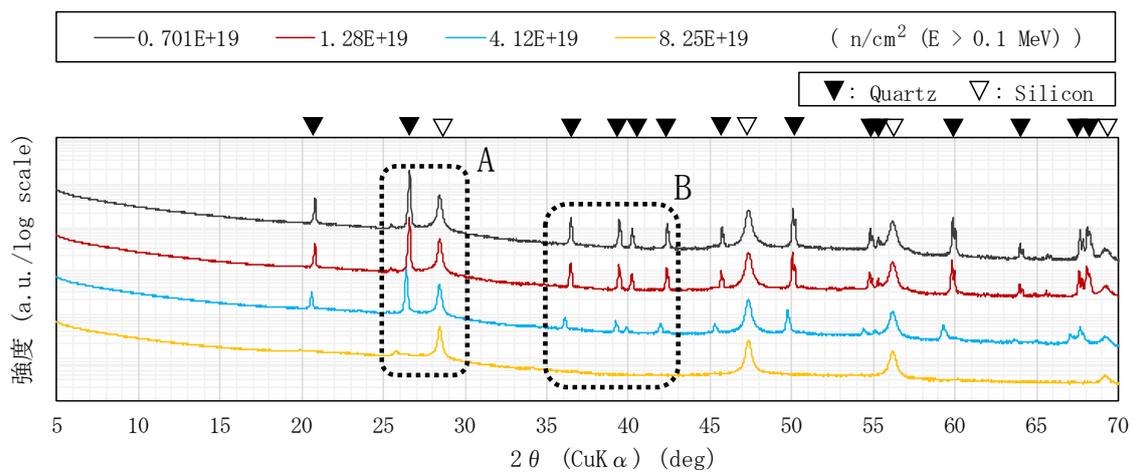
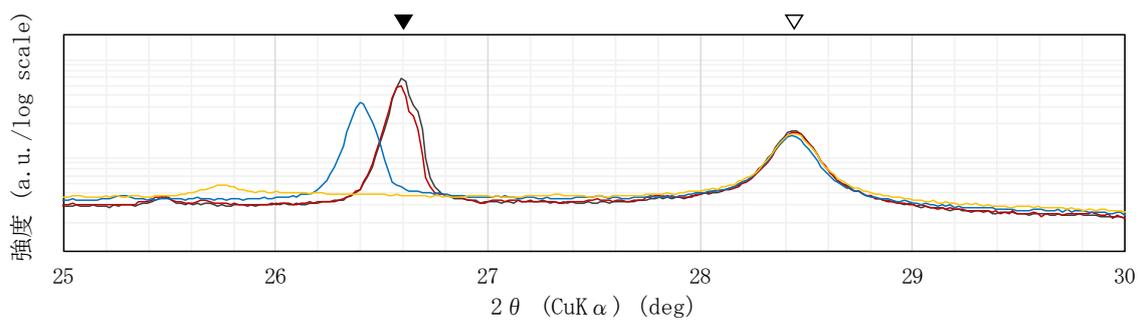


図 4.1 骨材試験体の石英含有率及び中性子照射量に対する体積変化率の変化

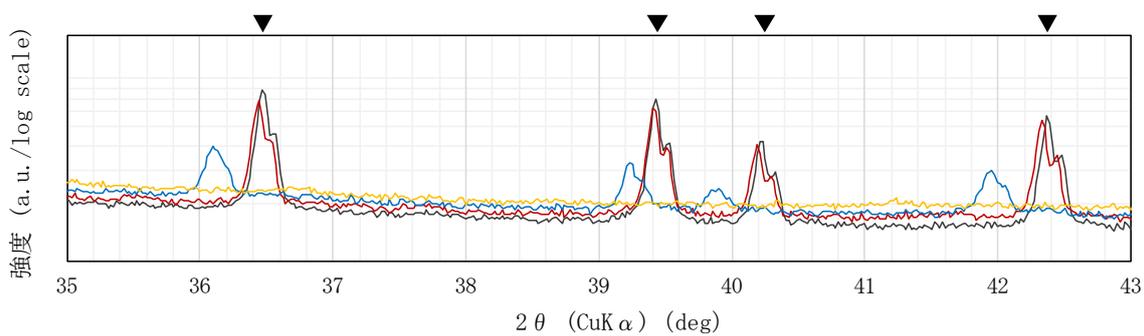
Fig. 4.1 Volumetric Swelling as a function of Neutron Fluence for different Quartz Contents of Irradiated Aggregates Specimens



a) X線回折結果^(参 25)
a) X-ray Diffraction Results



b) A部を拡大した結果
b) Detailed View of Part A



c) B部を拡大した結果
c) Detailed View of Part B

図 4.2 骨材 G91 の各中性子照射量における X 線回折結果の比較

Fig. 4.2 Results of X-ray Diffraction for Each Irradiated Aggregate of G91

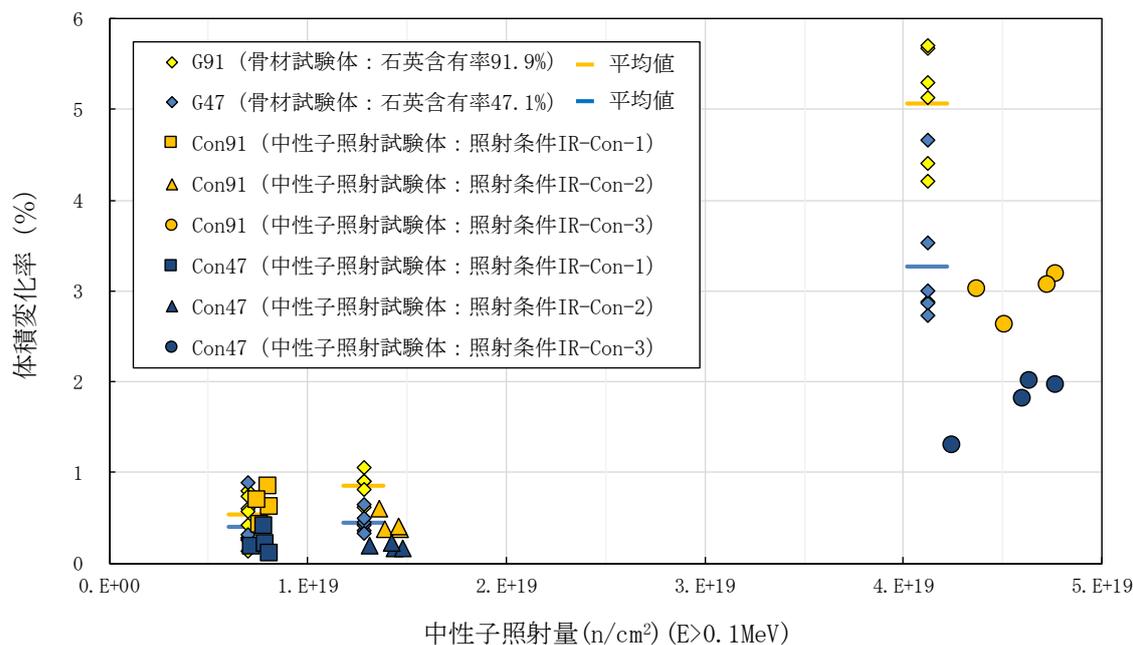


図 4.3 骨材試験体及びコンクリート試験体の中性子照射量に対する体積変化率の変化
 Fig. 4.3 Relation between Volumetric Swelling of Irradiated Specimens and Neutron Fluence

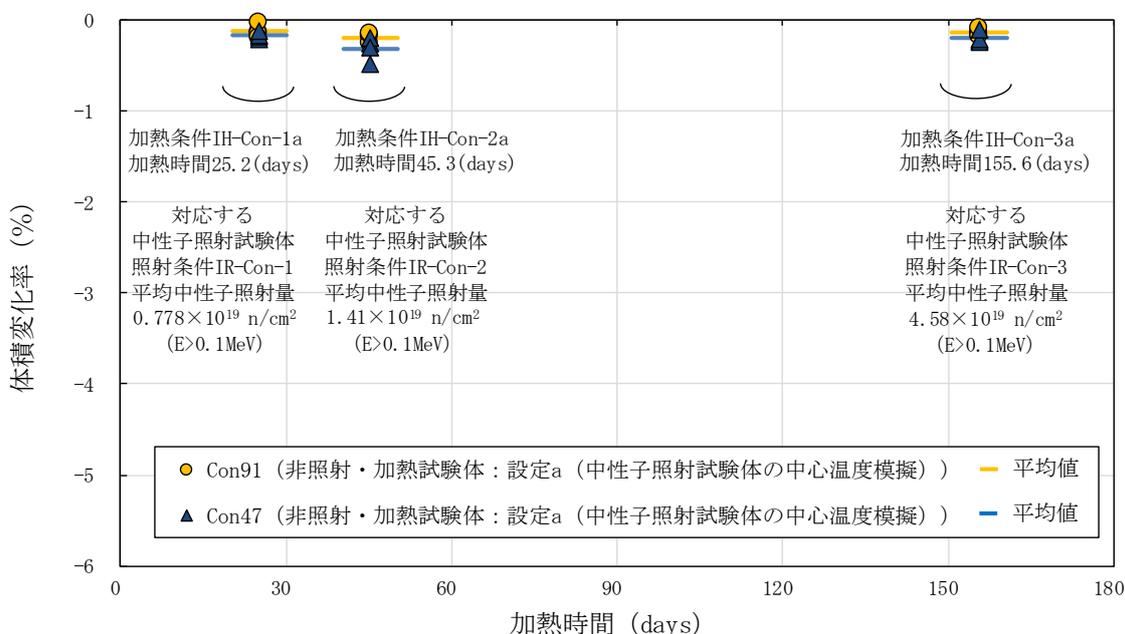
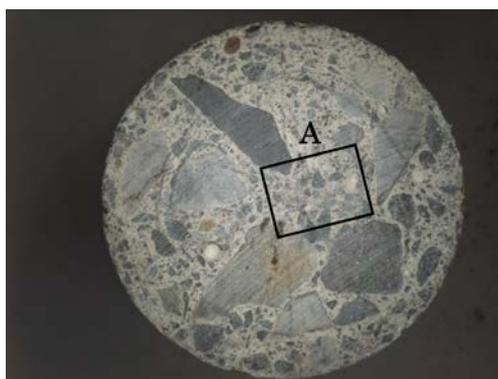


図 4.4 非照射・加熱試験体の加熱時間に対する体積変化率の変化
 Fig. 4.4 Relation between Volumetric Swelling of Non-Irradiated/Heated Concrete Specimens and the Number of Heated Days



(写真：株式会社三菱総合研究所提供)

図 4.5 $4.73 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) まで照射した Con91 試験体端面の様子
Fig. 4.5 End View of Irradiated Concrete Specimen of Con91 Irradiated by Neutron Fluence of $4.73 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$)



(写真：株式会社三菱総合研究所提供)

a) 中性子照射試験体の端面写真（切断面側）

a) End View of the Irradiated Concrete Specimen (The surface was ground.)



(写真：株式会社三菱総合研究所提供)

b) A部拡大（矢印はひび割れの観察部位）

b) Detailed View of Part A (Arrows indicate the observed crack locations.)

図 4.6 $4.73 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) まで照射した Con91 試験体端面の様子（切断面側）

Fig. 4.6 End View of the Irradiated Concrete Specimen of Con91 Irradiated by Neutron Fluence of $4.73 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) (The surface was ground.)

4. 2 コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数に及ぼす影響

4. 2. 1 圧縮強度に及ぼす影響

図 4.7 に、石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CH}) の変化を示す。ここで、圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CH}) (以下「圧縮強度比①」という。) とは、中性子照射試験体の圧縮強度 (f_{CI}) と非照射・加熱試験体の圧縮強度 (f_{CH}) の比で、相対的な影響を示した結果である。なお、図 3.3b) で示したように、最高温度 (約 70°C) で模擬した試験 (IH-Con-1a) の圧縮強度と断面内平均温度 (約 65°C) で模擬した試験 (IH-Con-1b) の圧縮強度に顕著な差はなかった。そのため、圧縮強度比①の算出に使用する非照射・加熱試験体の圧縮強度 (f_{CH}) は、各中性子照射量の照射時間に対応する加熱時間の非照射・加熱試験体について、Con91 及び Con47 のそれぞれの非照射・加熱試験体における最高温度 (約 70°C) (設定 a) で模擬した圧縮強度の平均値 (4 体の平均値) を使用した。

また、図 4.8 に、石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CO}) の変化を示す。ここで、圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CO}) (以下「圧縮強度比②」という。) とは、中性子照射試験体の圧縮強度 (f_{CI}) と非照射・非加熱試験体の圧縮強度 (f_{CO}) の比で、ガンマ線発熱に伴う熱・乾燥の影響を含めたものである。なお、図 3.3c) で示したように、非照射・非加熱試験体は、放置時間に対する圧縮強度 (f_{CO}) の結果に顕著な差はなかった。そのため、圧縮強度比②の算出に使用する非照射・非加熱試験体の圧縮強度 (f_{CO}) は、Con91 及び Con47 のそれぞれの非照射・非加熱試験体における全放置期間 (14、30 及び 43 ヶ月) で得られた圧縮強度の平均値 (9 体の平均値) を使用した。

図 4.7 及び図 4.8 は、中性子照射量が高いほど、コンクリートの圧縮強度比①及び圧縮強度比② (以下「圧縮強度比①②」という。) が低下する傾向を示し、およそ 1.0×10^{19} n/cm² ($E > 0.1$ MeV) の中性子照射量から低下する可能性が確認された。また、平均中性子照射量 0.778×10^{19} n/cm² ($E > 0.1$ MeV) 及び 1.41×10^{19} n/cm² ($E > 0.1$ MeV) での圧縮強度比①②は、Con91 及び Con47 とともに約 0.8~1.0 であった。一方で、平均中性子照射量 4.58×10^{19} n/cm² ($E > 0.1$ MeV) では、Con91 の圧縮強度比①②は、Con47 と比較して低く、Con91 が約 0.5~0.6、Con47 が約 0.6~0.8 であった。すなわち、コンクリートが中性子照射を受ける環境では、中性子照射量の増加に伴い、コンクリートを構成する骨材の石英含有率が高いほど、圧縮強度はより低下する傾向を示した^(参 25)。

よって、中性子照射がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響の評価では、コンクリートを構成する骨材の石英含有率を考慮する必要があることが明らかとなった。

4. 2. 2 静弾性係数に及ぼす影響

図 4.9 に、石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CH}) の変化を示す。ここで、静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CH}) (以下「静弾性係数比①」という。) とは、中性子照射試験体の静弾性係数 (E_{CI}) と非照射・加熱試験体の静弾性係数 (E_{CH}) の比である。非照射・加熱試験体の静弾性係数 (E_{CH}) は、圧縮強度 (f_{CH}) と同様に、最高温度 (約

70°C) (設定 a) で模擬した試験 (IH-Con-1a~3a) で得られた Con91 及び Con47 のそれぞれの静弾性係数の平均値を使用した。

また、図 4.10 に、石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CO}) の変化を示す。ここで、静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CO}) (以下「静弾性係数比②」という。) とは、中性子照射試験体の静弾性係数 (E_{CI}) と非照射・非加熱試験体の静弾性係数 (E_{CO}) の比である。なお、静弾性係数比②の算出で使用する静弾性係数 (E_{CI}) は、圧縮強度 (f_{CO}) と同様に、Con91 及び Con47 のそれぞれの非照射・非加熱試験体における全放置期間で得られた静弾性係数の平均値を使用した。

図 4.9 及び図 4.10 は、中性子照射量が高いほど、コンクリートの静弾性係数比①及び静弾性係数比② (以下「静弾性係数比①②」という。) が低下する傾向を示している。また、Con47 の静弾性係数比①は、およそ 1.0×10^{19} n/cm² ($E > 0.1$ MeV) の中性子照射量から低下する可能性が確認された。Con91 の静弾性係数比①については、 1.0×10^{19} n/cm² ($E > 0.1$ MeV) 未満の中性子照射量から低下する可能性が確認された。さらに、静弾性係数比②は、Con91 及び Con47 とともに、 1.0×10^{19} n/cm² ($E > 0.1$ MeV) 未満の中性子照射量から低下する可能性が確認された。また、全ての中性子照射条件において、Con91 の静弾性係数比①②が、Con47 よりも低い傾向を示した。すなわち、コンクリートが中性子照射を受ける環境では、コンクリートを構成する骨材に含まれる石英含有率が高いほど、また、中性子照射量が高いほど、コンクリートの静弾性係数は低下する傾向を示した。

よって、圧縮強度と同様に、中性子照射がコンクリートの静弾性係数に及ぼす影響の評価でも、コンクリートを構成する骨材の石英含有率を考慮する必要があることが明らかとなった。

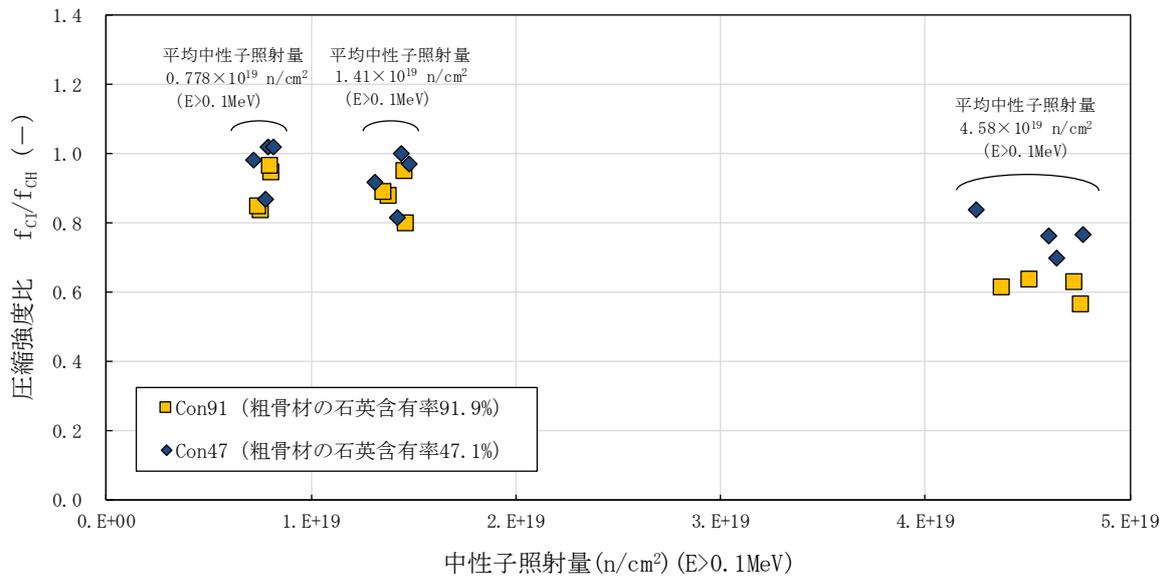


図 4.7 石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CH}) の変化

Fig. 4.7 Relative Compressive Strength of Concrete (f_{CI}/f_{CH}) as a function of Neutron Fluence for different Quartz Contents

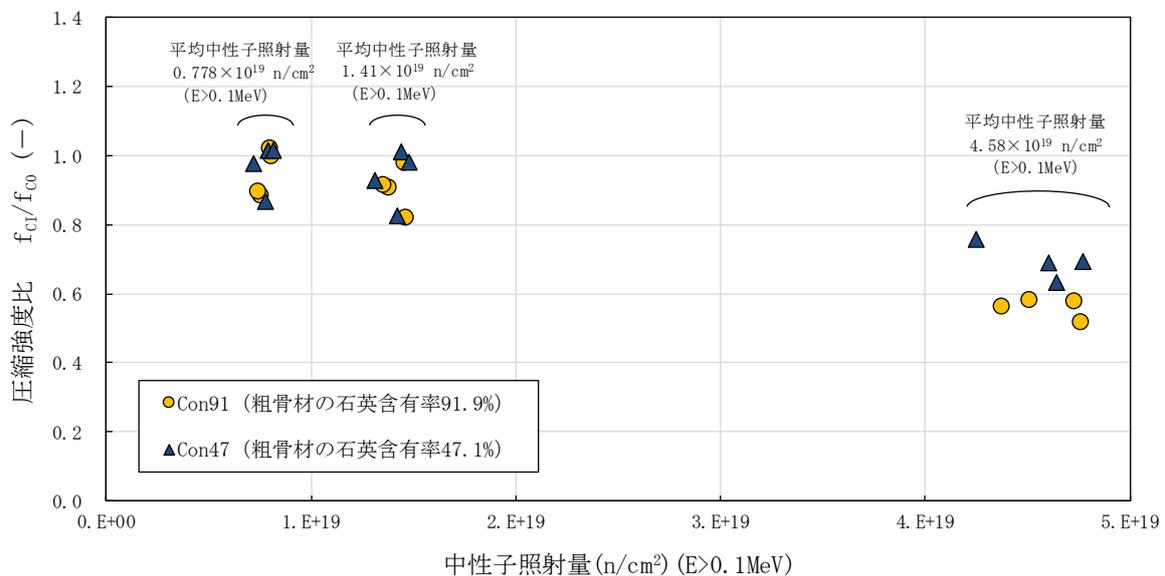


図 4.8 石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの圧縮強度比 (f_{CI}/f_{C0}) の変化

Fig. 4.8 Relative Compressive Strength of Concrete (f_{CI}/f_{C0}) as a function of Neutron Fluence for different Quartz Contents

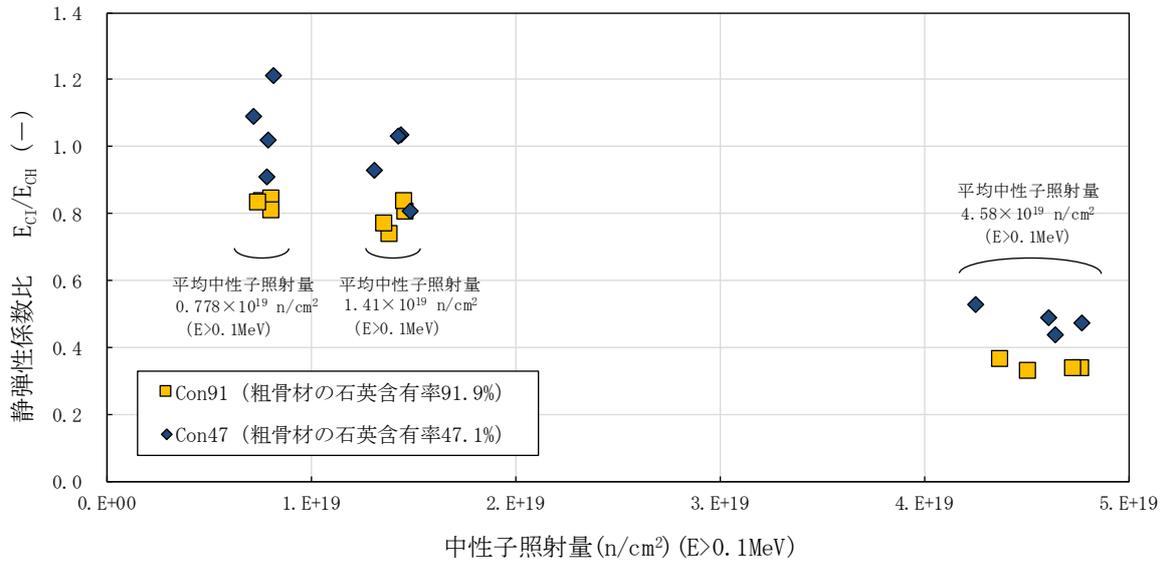


図 4.9 石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの静弾性係数比 (E_{C1}/E_{C0}) の変化

Fig. 4.9 Relative Young's Modulus of Concrete (E_{C1}/E_{C0}) as a function of Neutron Fluence for different Quartz Contents

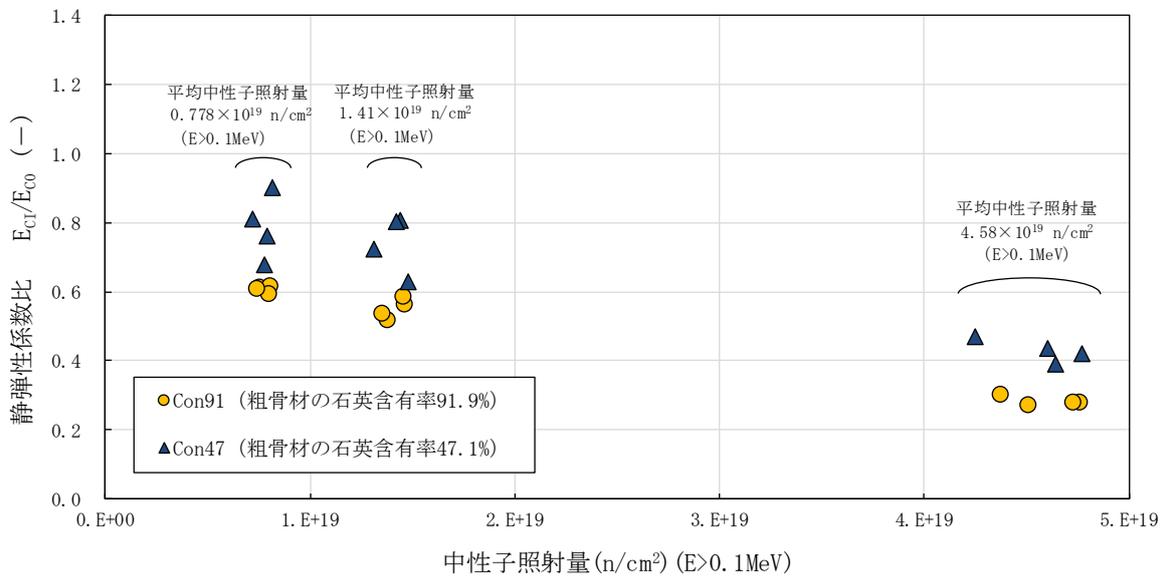


図 4.10 石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの静弾性係数比 (E_{C1}/E_{C0}) の変化

Fig. 4.10 Relative Young's Modulus of Concrete (E_{C1}/E_{C0}) as a function of Neutron Fluence for different Quartz Contents

5. 結論

本研究では、コンクリートの強度に対する石英含有率と中性子照射量の影響に関する技術的知見を取得することを目的に、石英含有率の異なる骨材及びコンクリートに中性子照射した試験体に対する材料試験を実施した。

試験では、軽水炉で中性子に曝されるコンクリートの材料及び温度条件を考慮した。また、中性子照射量に依存した骨材及びコンクリートの物理特性については、中性子スペクトルを考慮し、0.1MeVを超えるエネルギー範囲の中性子照射量に基づき評価を行った。

その結果、以下のような成果が得られた。

- (1) 骨材又はコンクリートが中性子照射を受ける環境では、骨材の石英含有率が高いほど、また、中性子照射量が高いほど、骨材及びコンクリートは膨張する傾向がある。
- (2) コンクリートが中性子照射を受ける環境では、中性子照射量が高いほど、コンクリートの圧縮強度は低下する傾向がある。また、中性子照射量の増加に伴い、コンクリートを構成する骨材に含まれる石英含有率が高いほど、圧縮強度はより低下する傾向がある。
- (3) コンクリートが中性子照射を受ける環境では、コンクリートを構成する骨材に含まれる石英含有率が高いほど、また、中性子照射量が高いほど、コンクリートの静弾性係数は低下する傾向がある。
- (4) 中性子照射がコンクリートの強度に及ぼす影響の評価では、コンクリートを構成する骨材の石英含有率を考慮する必要がある。

参 考 文 献 一 覧

- 参 1 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事、一般社団法人日本建築学会、pp. 89-306、2013 改定（第 3 次）
- 参 2 L.W. Hobbs, F.W. Clinard Jr, S.J. Zinkle, and R. C. Ewing, Radiation Effects in Ceramics, Journal of Nuclear Materials, Volume 216, pp.291-321, 1994
- 参 3 平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費（高経年化技術評価高度化（放射線照射によるコンクリート構造物の長期健全性評価に関する研究））事業 成果報告書、株式会社三菱総合研究所、pp. 2-1~2-315、pp. 2-529~2-538、平成 29 年 3 月
- 参 4 W. Primak, Fast-Neutron-Induced Changes in Quarts and Vitreous Silica, Physical Review, Volume 110, Number 6, pp.1240-1254, 1958
- 参 5 V.N. Bykov, A.V. Denisov, V.B. Dubrovskii, V.V. Korenevskii, G.K. Krivokoneva, and L.P. Muzalevskii, Effect of Irradiation Temperature on the Radiation Expansion of Quartz, Soviet Atomic Energy, Volume 51, pp.593-595, 1981
- 参 6 K.G. Field, I. Remeč, and Y. Le Pape, Radiation Effects in Concrete for Nuclear Power Plants - Part I: Quantification of Radiation Exposure and Radiation Effects, Nuclear Engineering and Design, Volume 282, pp.126-143, 2015
- 参 7 Y. Le Pape, M.H.F. Alsaïd, and A.B. Giorla, Rock-Forming Minerals Radiation-Induced Volumetric Expansion - Revisiting Literature Data, Journal of Advanced Concrete Technology, Volume 16, pp.191-209, 2018
- 参 8 原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説、一般社団法人日本建築学会、pp. 35, pp. 48, pp. 144-146、2015 改定
- 参 9 H.K. Hilsdorf, J. Kropp, and H.J. Koch, The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete, Special Publication of the American Concrete Institute, Volume 55, Number 10, pp.223-254, 1978

- 参 10 Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Concrete Containment Buildings, International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1025, pp. 34-43, 1998
- 参 11 O. Kontani, Y. Ichikawa, A. Ishizawa, M. Takizawa, and O. Sato, Irradiation Effects on Concrete Structures, Infrastructure Systems for Nuclear Energy, Chapter 27, pp. 459-473, 2013
- 参 12 平成 23 年度高経年化技術評価高度化事業 成果報告書〈第 3 分冊〉、株式会社三菱総合研究所、pp. 3-387～3-470、pp. 3-528～3-536、平成 24 年 3 月
- 参 13 平成 24 年度高経年化技術評価高度化事業 成果報告書〈第 3 分冊〉、株式会社三菱総合研究所、pp. 3-316～3-333、pp. 3-420～3-468、平成 25 年 3 月
- 参 14 平成 25 年度高経年化技術評価高度化事業（経年プラントの総合的な安全評価体系の整備） 成果報告書〈第 3 分冊〉、株式会社三菱総合研究所、pp. 3-1224～3-1245、pp. 3-1300～3-1378、平成 26 年 3 月
- 参 15 平成 26 年度高経年化技術評価高度化事業（コンクリート構造物の長期健全性評価に係る調査研究） 成果報告書、株式会社三菱総合研究所、pp. 3-1～3-10、pp. 3-107～3-246、平成 27 年 3 月
- 参 16 平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（高経年化技術評価高度化（コンクリート構造物の長期健全性評価に関する調査研究））事業 成果報告書（2/3）、株式会社三菱総合研究所、pp. 3-1～3-10、pp. 3-141～3-444、pp. 3-490～3-496、平成 28 年 3 月
- 参 17 発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格（2014 年版）、一般社団法人日本機械学会、JSME S NE1-2014、pp. CVE-14、2014 年 9 月
- 参 18 日本産業規格、コンクリート強度試験用供試体の作り方、JIS A 1132:2006
- 参 19 I. Romec, T.M. Rosseel, K.G. Field, and Y. Le Pepe, Characterization of Radiation Fields for Assessing Concrete Degradation in Biological Shields of NPPs, EPJ Web of Conference, Volume 153, Number 05009, 2017

- 参 20 日本産業規格、セメントの蛍光X線分析方法、JIS R 5204:2002
- 参 21 日本産業規格、セメントの化学分析方法、JIS R 5202:2010
- 参 22 高浜発電所運転期間延長認可申請書（2号発電用原子炉施設の運転の期間の延長）
（添付書類二 高浜発電所2号炉劣化状況評価書）、関原発第111号、高浜発電所2号炉
コンクリート構造物および鉄骨構造物の技術評価〔運転を断続的に行うことを前提とした評価〕、関西電力株式会社、pp.24-27、平成28年6月13日
- 参 23 日本産業規格、コンクリートの圧縮強度試験方法、JIS A 1108:2006
- 参 24 日本産業規格、コンクリートの静弾性係数試験方法、JIS A 1149:2010
- 参 25 M. Kojima, Irradiation Effects on Concrete Strength, U. S. Nuclear Regulatory Commission's 30th Annual Regulatory International Conference, TH32 Concrete Degradation Part II: Perspectives on Radiation Effects on Structural Capacity of Nuclear Concrete Structures, 2018

付録

石英含有率と中性子照射がコンクリートの圧縮強度及び静弾性係数に及ぼす影響の試験データ

本付録Aでは、石英含有率と中性子照射がコンクリートの圧縮強度及び静弾性係数に及ぼす影響について、4.2節で示した図4.7～図4.10の試験データを示した。

付録表1に、石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CH}) (圧縮強度比①) の変化に関する試験データを示す。付録表2に、石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの圧縮強度比 (f_{CI}/f_{C0}) (圧縮強度比②) の変化に関する試験データを示す。付録表3に、石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CH}) (静弾性係数比①) の変化に関する試験データを示す。付録表4に、石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの静弾性係数比 (E_{CI}/E_{C0}) (静弾性係数比②) の変化に関する試験データを示す。

付録表 1 石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CH}) の変化

Appendix Table 1 Relative Compressive Strength of Concrete (f_{CI}/f_{CH}) as a function of Neutron Fluence for different Quartz Contents

試験体	軸レベル (mm) 注1	中性子照射条件 IR-Con-1		中性子照射条件 IR-Con-2		中性子照射条件 IR-Con-3	
		中性子照射量 (n/cm ²) 注2 (E > 0.1 MeV)	圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CH})	中性子照射量 (n/cm ²) 注2 (E > 0.1 MeV)	圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CH})	中性子照射量 (n/cm ²) 注2 (E > 0.1 MeV)	圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CH})
Con47 試験体 粗骨材の石英含有率 47.1%	510	0.719×10^{19}	0.98	1.31×10^{19}	0.92	4.25×10^{19}	0.84
	390	0.791×10^{19}	1.02	1.44×10^{19}	1.00	4.64×10^{19}	0.70
	270	0.813×10^{19}	1.02	1.48×10^{19}	0.97	4.77×10^{19}	0.77
	150	0.780×10^{19}	0.87	1.42×10^{19}	0.81	4.60×10^{19}	0.76
Con91 試験体 粗骨材の石英含有率 91.9%	450	0.761×10^{19}	0.84	1.38×10^{19}	0.88	4.51×10^{19}	0.63
	330	0.810×10^{19}	0.94	1.47×10^{19}	0.79	4.77×10^{19}	0.56
	210	0.805×10^{19}	0.96	1.46×10^{19}	0.95	4.73×10^{19}	0.63
	90	0.745×10^{19}	0.84	1.36×10^{19}	0.89	4.38×10^{19}	0.61

注 1) 中性子照射量の評価位置 (照射領域最下部からの距離、図 2.5 参照)

注 2) 中性子束の軸方向分布から、各軸レベルでの中性子照射量を評価した値

付録表 2 石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CO}) の変化

Appendix Table 2 Relative Compressive Strength of Concrete (f_{CI}/f_{CO}) as a function of Neutron Fluence for different Quartz Contents

試験体	軸レベル (mm) 注1	中性子照射条件 IR-Con-1		中性子照射条件 IR-Con-2		中性子照射条件 IR-Con-3	
		中性子照射量 (n/cm ²) 注2 (E > 0.1 MeV)	圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CO})	中性子照射量 (n/cm ²) 注2 (E > 0.1 MeV)	圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CO})	中性子照射量 (n/cm ²) 注2 (E > 0.1 MeV)	圧縮強度比 (f_{CI}/f_{CO})
Con47 試験体 粗骨材の石英含有率 47.1%	510	0.719×10^{19}	0.98	1.31×10^{19}	0.93	4.25×10^{19}	0.76
	390	0.791×10^{19}	1.01	1.44×10^{19}	1.01	4.64×10^{19}	0.63
	270	0.813×10^{19}	1.01	1.48×10^{19}	0.98	4.77×10^{19}	0.69
	150	0.780×10^{19}	0.87	1.42×10^{19}	0.82	4.60×10^{19}	0.69
Con91 試験体 粗骨材の石英含有率 91.9%	450	0.761×10^{19}	0.88	1.38×10^{19}	0.90	4.51×10^{19}	0.58
	330	0.810×10^{19}	1.00	1.47×10^{19}	0.82	4.77×10^{19}	0.52
	210	0.805×10^{19}	1.02	1.46×10^{19}	0.98	4.73×10^{19}	0.58
	90	0.745×10^{19}	0.89	1.36×10^{19}	0.91	4.38×10^{19}	0.56

注 1) 中性子照射量の評価位置 (照射領域最下部からの距離、図 2.5 参照)

注 2) 中性子束の軸方向分布から、各軸レベルでの中性子照射量を評価した値

付録表3 石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CH}) の変化
 Appendix Table 3 Relative Young's Modulus of Concrete (E_{CI}/E_{CH}) as a function of Neutron Fluence for different
 Quartz Contents

試験体	軸レベル (mm) 注1	中性子照射条件 IR-Con-1		中性子照射条件 IR-Con-2		中性子照射条件 IR-Con-3	
		中性子照射量 (n/cm ²) 注2 (E > 0.1 MeV)	静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CH})	中性子照射量 (n/cm ²) 注2 (E > 0.1 MeV)	静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CH})	中性子照射量 (n/cm ²) 注2 (E > 0.1 MeV)	静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CH})
Con47 試験体 粗骨材の石英含 有率 47.1%	510	0.719×10^{19}	1.09	1.31×10^{19}	0.93	4.25×10^{19}	0.53
	390	0.791×10^{19}	1.02	1.44×10^{19}	1.04	4.64×10^{19}	0.44
	270	0.813×10^{19}	1.21	1.48×10^{19}	0.81	4.77×10^{19}	0.48
	150	0.780×10^{19}	0.91	1.42×10^{19}	1.03	4.60×10^{19}	0.49
Con91 試験体 粗骨材の石英含 有率 91.9%	450	0.761×10^{19}	0.84	1.38×10^{19}	0.74	4.51×10^{19}	0.33
	330	0.810×10^{19}	0.84	1.47×10^{19}	0.81	4.77×10^{19}	0.34
	210	0.805×10^{19}	0.81	1.46×10^{19}	0.84	4.73×10^{19}	0.34
	90	0.745×10^{19}	0.83	1.36×10^{19}	0.77	4.38×10^{19}	0.36

注1) 中性子照射量の評価位置 (照射領域最下部からの距離、図 2.5 参照)

注2) 中性子束の軸方向分布から、各軸レベルでの中性子照射量を評価した値

付録表 4 石英含有率及び中性子照射量に対するコンクリートの静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CO}) の変化

Appendix Table 4 Relative Young's Modulus of Concrete (E_{CI}/E_{CO}) as a function of Neutron Fluence for different Quartz Contents

試験体	軸レベル (mm) 注1	中性子照射条件 IR-Con-1		中性子照射条件 IR-Con-2		中性子照射条件 IR-Con-3	
		中性子照射量 (n/cm ²) 注2 (E > 0.1 MeV)	静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CO})	中性子照射量 (n/cm ²) 注2 (E > 0.1 MeV)	静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CO})	中性子照射量 (n/cm ²) 注2 (E > 0.1 MeV)	静弾性係数比 (E_{CI}/E_{CO})
Con47 試験体 粗骨材の石英含 有率 47.1%	510	0.719×10^{19}	0.81	1.31×10^{19}	0.72	4.25×10^{19}	0.47
	390	0.791×10^{19}	0.76	1.44×10^{19}	0.81	4.64×10^{19}	0.39
	270	0.813×10^{19}	0.90	1.48×10^{19}	0.63	4.77×10^{19}	0.42
	150	0.780×10^{19}	0.68	1.42×10^{19}	0.80	4.60×10^{19}	0.44
Con91 試験体 粗骨材の石英含 有率 91.9%	450	0.761×10^{19}	0.61	1.38×10^{19}	0.51	4.51×10^{19}	0.27
	330	0.810×10^{19}	0.61	1.47×10^{19}	0.56	4.77×10^{19}	0.28
	210	0.805×10^{19}	0.59	1.46×10^{19}	0.58	4.73×10^{19}	0.28
	90	0.745×10^{19}	0.61	1.36×10^{19}	0.54	4.38×10^{19}	0.30

注1) 中性子照射量の評価位置 (照射領域最下部からの距離、図 2.5 参照)

注2) 中性子束の軸方向分布から、各軸レベルでの中性子照射量を評価した値

執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ

システム安全研究部門

小嶋 正義 主任技術研究調査官

中野 眞木郎 技術参与

田口 清貴 首席技術研究調査官