

原子力規制庁 御中

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

平成 29 年 3 月

MRI株式会社三菱総合研究所

本報告書は、原子力規制庁の委託業務により、三菱総合研究所が、名古屋大学との連携により作成し、原子力規制庁へ納品したものです。

したがって、本資料の公開、複製、転載、引用等には、原子力規制庁の承認が必要です。

目 次

I 序論	1-1
1 事業目的	1-1
2 事業項目	1-1
3 事業遂行体制	1-1
4 実施スケジュール	1-1
5 事業概要	1-1
II 放射線照射によるコンクリート強度劣化評価	
1. はじめに	2-1
1. 1 研究の背景	2-1
1. 2 研究の目的	2-7
1. 3 作業仮説の立案	2-7
2. コンクリートおよび構成要素の中性子線影響評価	2-16
2. 1 実施概要	2-16
2. 1. 1 照射試験の概要	2-16
2. 1. 2 試験条件	2-19
2. 1. 3 試験・計測方法	2-37
2. 2 相互作用試験	2-41
2. 2. 1 試験概要	2-41
2. 2. 2 試験結果	2-45
2. 3 物理特性試験	2-91
2. 3. 1 試験概要	2-91
2. 3. 2 試験結果	2-102
2. 4 試験結果の分析	2-218
2. 4. 1 水分放出量	2-218
2. 4. 2 ガス発生速度と成分分析	2-224
2. 4. 3 放射線分解による水素発生 G 値の検討	2-247
2. 4. 4 中性子によるコンクリート膨張評価と強度低下メカニズムの考察	2-254
2. 4. 5 コンクリート試験体の表面変状について	2-264
2. 5 JEEP II 炉内の照射に係る解析的検討	2-267
2. 5. 1 解析的検討の位置付けと目的	2-267
2. 5. 2 照射解析の検討手順	2-267
2. 5. 3 照射解析の検討の詳細	2-268
2. 5. 4 伝熱解析の検討手順	2-298

2. 5. 5	伝熱解析の検討の詳細	2-298
2. 5. 6	JEEP II 炉内の照射に係る解析的検討のまとめ	2-309
2. 6	まとめ	2-314
3.	コンクリートおよび構成要素のガンマ線影響評価	2-316
3. 1	物理特性試験（コンクリート）	2-316
3. 1. 1	試験概要	2-316
3. 1. 2	試験・計測方法	2-343
3. 1. 3	試験結果	2-354
3. 2	物理特性試験（セメントペースト）	2-390
3. 2. 1	照射試験	2-390
3. 3	物理特性試験（骨材）	2-430
3. 3. 1	試験概要	2-430
3. 3. 2	試験・計測方法	2-437
3. 3. 3	試験結果	2-444
3. 4	まとめ	2-496
4.	熱・乾燥影響に関するメカニズム解明の試験的検討	2-498
4. 1	物理特性試験（セメントペースト）	2-498
4. 1. 1	セメントペーストの熱・乾燥影響	2-498
4. 2	物理特性試験（モルタル）	2-502
4. 3	まとめ	2-526
5.	数値解析的検討	2-527
5. 1	実施概要	2-527
5. 2	コンクリート放射線影響評価	2-527
5. 2. 1	放射線照射環境に関する汎用性の向上	2-527
5. 2. 2	対象構造物の寸法制御	2-527
5. 2. 3	グラフの作成	2-527
5. 2. 4	出力材齢	2-528
5. 3	まとめ	2-528
6	長期健全性評価の検討	2-529
6. 1	長期健全性評価フロー	2-529
6. 2	コンクリート強度低下に関する累積照射量の目安値	2-531
6. 3	コンクリート強度の評価	2-533
6. 4	部材性能の評価	2-536
6. 5	まとめ	2-536
7.	今後の課題	2-537
7. 1	熱・乾燥影響評価	2-537

7. 2	中性子影響評価	2-537
7. 3	ガンマ線影響評価	2-538
8.	放射線影響に関する国際動向	2-539
III	事業進捗の管理と成果報告の実施	3-1
1	実施履歴	3-1
2	報告会	3-1
3	第三者有識者委員会	3-2
4	研究会	3-3
5	定例報告	3-3
6	品質管理活動	3-3
IV	結論	4-1
	謝辞	

I 序論

1 事業目的

本事業の目的は、運転開始後 30 年を超えて運転する経年プラントの高経年化技術評価に、常に最新知見を取り入れるため、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手法の高度化を図るものである。

2 事業項目

以下の項目について実施する。

- (1) 放射線照射によるコンクリート強度劣化評価
- (2) 事業進捗の管理と成果報告の実施

3 事業遂行体制

本事業は、三菱総合研究所が受託機関代表となり、国立大学法人名古屋大学（以下、名古屋大学）と連携し、業務を遂行した。図 3.1 に事業遂行体制図を記す。

なお、本事業で実施した研究の遂行体制については、5 事業概要に記載した。

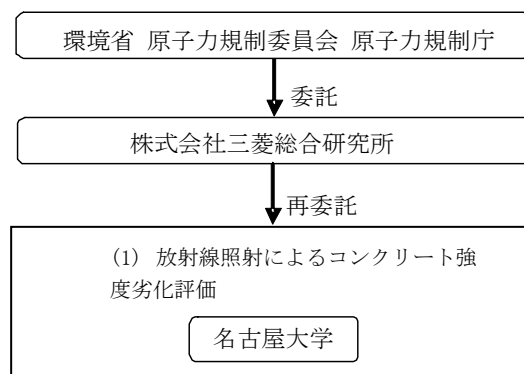


図 3.1 事業遂行体制

4 実施スケジュール

実施スケジュールは以下の通りである。

平成 28 年 4 月 15 日から、平成 29 年 3 月 31 日まで

5 事業概要

本事業で実施した研究の実施概要を以下に示す。

- (1) 放射線照射によるコンクリート強度劣化評価

1) 実施内容

原子力施設の遮蔽機能及び支持機能が要求される、ガンマ線や中性子の照射環境下にある安全上重要なコンクリート構造物に対して、放射線照射によるコンクリート劣化に関するメカニズムの解明と累積照射量の目安値の妥当性を確認する。

また、放射線の影響によるコンクリート部材の性能変化を予測可能な数値解析的検討を行う。

2) 実施方法

ガンマ線及び中性子の累積照射量の目安値の設定根拠の妥当性検証並びに放射線がコンクリートの物理特性に及ぼす影響を把握するため、試験条件や試験方法を選定しガンマ線及び中性子の照射試験を実施する。

ガンマ線については、照射量がコンクリート及びコンクリート構成材料（セメントペースト、骨材）の物理特性に及ぼす影響を評価するためのデータ取得と分析を行い、劣化メカニズムを解明するとともに、累積照射量と劣化の関係を評価する。

中性子については、照射量がコンクリート及びコンクリート構成材料（セメントペースト、骨材）の物理特性に及ぼす影響を評価するためのデータ取得と分析を行い、劣化メカニズムを解明するとともに、累積照射量と劣化の関係を評価する。

その他、放射線の影響と区別することを目的に、非照射で照射試験の温度履歴を模擬した加熱試験を行い、熱単独による劣化メカニズムを解明するためのデータ取得と分析を行う。また、放射線の影響によるコンクリート部材内部の強度、温度、水分量、照射量等の経時変化及び分布を評価できる数値解析的検討を行う。

平成 28 年度は、ガンマ線の影響については、長期間（32M）の照射試験の温度履歴を模擬した加熱試験を実施し、コンクリートの物理特性に関するデータ取得と分析を行う。中性子の影響については、照射によるセメントペースト及び骨材の物理特性に関するデータ取得と分析を行う。熱の影響に関するメカニズム解明の検討では、物理変化と水分移動のプロセスを確認するため、セメントペーストとモルタルの温度をパラメータとした実験を実施する。これら及び過年度までに得られた結果から放射線照射によるコンクリートの劣化メカニズムを解明するとともに、累積照射量の目安値に対する見解をまとめる。また、数値解析的検討については、過年度に得られた知見及び 28 年度に得られる試験結果を含めて取りまとめる。なお、中性子による照射試験に使用した試験体及び試験器具は、適切に処分する。

また、放射線影響に関する国際会議（例：International Committee on Irradiated Concrete）に参加し、関連情報を収集する。

3) 研究体制

図 5.1 に研究実施体制を示す。

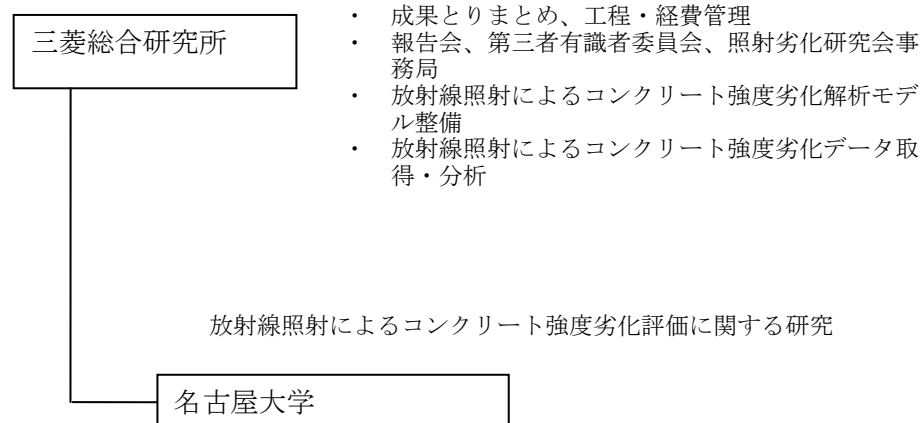


図 5.1 研究実施体制

(2) 事業進捗の管理と成果報告の実施

1) 実施内容

本事業で実施する（１）の研究について、研究計画に対する進捗度の確認、研究目標に対する実施内容の妥当性の確認及び研究成果の取りまとめ等に係る管理を行い、事業開始時説明、中間成果報告及び最終成果報告を行う。

2) 実施方法

本事業で実施する（１）放射線照射によるコンクリート強度劣化評価に関する研究に対して、研究計画の確認や進捗度の把握、研究目標に対する実施内容の妥当性の確認及び研究成果の取りまとめ等に係る管理を行う。

上記の管理を満足するため、下記の a. ～c. について記述する品質保証計画書を提出するとともに、品質保証計画書の記載内容について発注者の了解を得る。

a. 品質保証体制

- ・ 品質保証部署が、業務実施部署と独立していること
- ・ 品質保証責任者は、実施責任者と兼務していないこと
- ・ 品質保証に関わる責任及び役割が明確になっていること

b. 品質保証活動

- ・ 品質を保証するため、業務手順及び成果品（インプット、アウトプット）の審査・検証を確実に実施する活動フローが明確になっていること
- ・ 品質を保証するため、審査項目、審査内容、審査基準、審査者等を明記したチェックリストが作成されていること
- ・ 過年度までに実施した各調査研究の成果が、確実に取り入れられて業務を実施しているか確認すること

- ・その他、品質保証活動に必要な事項を記載すること
- c. 文書管理
 - ・業務で発生する文書の維持・保管方法について明確にされていること

また、発注者と1～2ヶ月に1回程度の打合せを行い、発注者との打合せ議事録、並びに月ごとの研究の進捗状況、課題状況及び課題への対応案をまとめた月報を提出する。

さらに、各調査研究について、事業開始時に実施計画書の提出及び説明、中間での進捗状況及び成果取りまとめ状況の報告（3回程度）、並びに最終成果取りまとめ報告を実施する。なお、実施者は第三者有識者（3名程度）による委員会を設置し、進捗状況、成果の妥当性等に関する意見聴取を行い、その結果を成果とりまとめの参考とすることとする。

II 放射線照射によるコンクリート強度劣化評価

1. はじめに

1. 1 研究の背景

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は、ほとんど取り替えが利かないため、その経年変化予測と健全性評価が重要となる。コンクリート構造物は一般の建築物、土木構造物に利用されているため、多くの劣化現象に関する知見が蓄積されているが、原子力施設特有の高温環境（～90℃）や放射線環境に対する知見蓄積は十分ではない。

一方、表 1.1 に示すように、すでに廃炉を表明している炉があるものの、日本において 40 年を超えて利用することが検討されている炉においては、運転開始後 60 年時点のコンクリートの中性子照射量の最大値が $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ($>0.1 \text{MeV}$) を超えるものが存在している。

表 1.1 運転開始後 60 年時点のコンクリートの中性子照射量⁷

Type	Name of plant	Location	Fast neutron (n/cm ²)	Gamma-ray dose (Gy)
BWR	Fukushima 1st -1	Outside of reactor pressure vessel.	3.0×10^{18} *1	$< 2.0 \times 10^8$
	Fukushima 1st -2		3.0×10^{18} *1	$< 2.0 \times 10^8$
	Shimane 1		3.0×10^{18} *1	8.0×10^7
	Tsuruga 1		1.1×10^{17} *2	$< 2.0 \times 10^8$
	Fukushima 1st -5	Reactor pressure vessel - pedestal structure.	2.8×10^{14} *1	2.3×10^4
	Hamaoka 1		5.7×10^{13} *1	1.6×10^4
	Hamaoka 2		1.9×10^{13} *1	5.3×10^4
	Fukushima 1st -3		1.6×10^9 *1	2.2×10^5
PWR	Mihama -2	Internal surface of the first biological shielding wall.	6.2×10^{19} *3	1.8×10^8
	Ikata -1		6.0×10^{19} *3	2.8×10^8
	Genkai -1		4.8×10^{19} *3	2.8×10^8
	Mihama -3		4.7×10^{19} *3	2.5×10^8
	Takahama -1		4.5×10^{19} *3	2.3×10^8
	Takahama -2		4.5×10^{19} *3	2.4×10^8
	Mihama -1		3.6×10^{19} *3	1.5×10^8

■：廃炉，*1： $> 0.1 \text{ MeV}$ ，*2： $> 1.0 \text{ MeV}$ ，*3： $> 0.11 \text{ MeV}$ 。

図 1.1 に、沸騰水型原子炉（BWR）及び加圧水型原子炉（PWR）における原子炉建屋の断面図と放射線の影響が大きいコンクリートの評価対象部位を示す。

⁷ I. Maruyama, K. Haba, O. Sato, S. Ishikawa, O. Kontani, M. Takizawa, A numerical model for concrete strength change under neutron and gamma-ray irradiation, Journal of Advanced Concrete Technology, 14 (2016) 144-162.

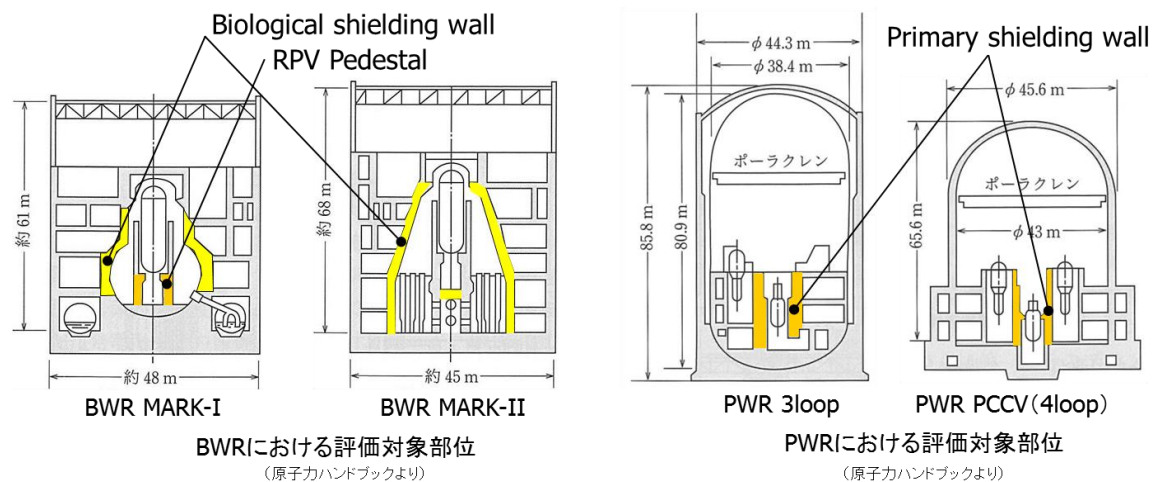


図 1.1 放射線の影響が大きい評価対象部位

旧（独）原子力安全基盤機構の高経年化技術評価に係わる審査マニュアル⁸（以下、「JNES マニュアル」という。）では、放射線照射によるコンクリートの劣化メカニズムについて、「コンクリートへの中性子照射やガンマ線照射によるコンクリート強度低下のメカニズムについては必ずしも明確になっていない。ただし、中性子照射やガンマ線照射を受けた物質は発熱することが知られており、コンクリート中に水分逸散が生じて、乾燥に伴うひび割れなどによりコンクリートの強度低下に結びつく可能性がある。」と記載されており、強度低下を発生させる可能性のある原因として、乾燥収縮によるひび割れなどを挙げている。

また、放射線に対するコンクリート構造物の健全性評価は、運転開始後 60 年時点の放射線照射量の予測値がコンクリート強度に問題となるようなレベル（下記を目安値）を超えているか否かを評価しており、中性子及びガンマ線について、目安値を超えていなければ健全であると評価している。

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

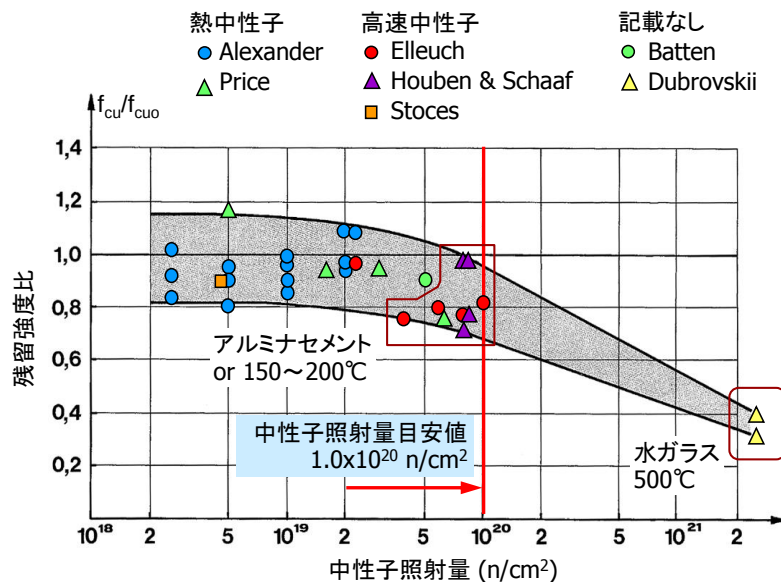
ガンマ線照射 : $2 \times 10^{10} \text{ rad}$ ($2 \times 10^8 \text{ Gy}$)

この値は、Hilsdorf 論文⁹に基づき定めたものとされている。Hilsdorf 論文においては、中性子について、コンクリートの変質が $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超えると顕在化することが指摘されている。また、ガンマ線について、特に影響は大きくないと記されている。しかし、Hilsdorf 論文に引用されている元文献を調査した結果、軽水炉に用いら

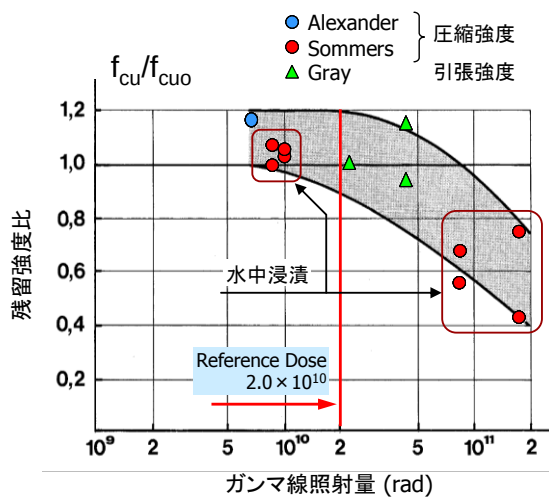
⁸(独)原子力安全基盤機構:高経年化技術評価審査マニュアル コンクリートの強度低下及び遮へい能力低下(含む鉄骨構造の強度低下), H21. 4. 3

⁹Hilsdorf, H. K., et al., "The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete," ACI SP-55, 1978

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）が異なるものが確認された。図 1.2 に Hilsdorf 論文の結果で軽水炉と異なる条件のため、特に信頼性が低いと推察される部分について赤枠で示す。



(a) 中性子照射量と残留強度比の関係



(b) ガンマ線照射量と残留強度比の関係

図 1.2 放射線照射量とコンクリートの残留強度比の関係³

(F_{cu} : 照射後コンクリート圧縮強度、 F_{cu0} : 照射前コンクリート圧縮強度)

表 1.2 中性子照射影響に関する Hilsdorf に引用された試験に関する軽水炉との対応¹⁰

Author	Property Measured	Cement Type	Specimen Size (mm)	Irradiation Conditions	
				Temperature (deg C)	Neutron Energy Level & Fluence (n/cm ²)
Alexander ^[1]	Compress .	OPC	51x51x51	20 to 100	Thermal Neutron 0.29x10 ¹⁹ to 2.3x10 ¹⁹
Batten ^[2]	Compress .	OPC	51x51x203	Not Available	No Information 5.0x10 ¹⁹
Dubrovskii ^[3]	Compress .	Liquid glass	φ15x15 cylinder	200 to 550	No Information 2.0x10 ²¹ to 2.4x10 ²¹
Elleuch ^[4]	Compress .	Aluminous cement	25x25x50	210	Fast Neutron 2.6x10 ²⁰ to 11.1x10 ²⁰
Houben ^[5]	Compress .	OPC	8x8x70	150 to 200	Fast Neutron 3.0x10 ¹⁹ to 8x10 ¹⁹
Price ^[6]	Bending	OPC	51x51x203	50	Thermal Neutron 0.5x10 ¹⁹ to 7x10 ¹⁹
Stoces ^[7]	Comp.	OPC	φ50x70 cylinder	<80	Fast Neutron 4.2x10 ¹⁸

OPC : Ordinary Portland cement

灰色網掛け：軽水炉（ポルトランドセメント系材料、60℃程度）と異なる条件

青色網掛け：試験条件が他と異なり特に信頼性が低いと推察される部分

赤色網掛け：照射条件が高速中性子ではないと推察される部分

- [1] Alexander, S. C., "Effects of Irradiation on Concrete, Final Results", Atomic Energy Research Establishment, Harwell, 34 pp., 1963.
- [2] Batten, A. W. Ch., "Effect of Irradiation on the Strength of Concrete", Atomic Energy Research Establishment, Harwell, 13 pp., 1960.
- [3] Dubrovskii, V. B.; Ibragimov, Sh. Sh.; Ladygin, A. Ya. and Pergamenschkik, B. K., "The Effect of Neutron Irradiation on Certain Properties of Refractory Concretes", Atomnaya Energiya 21, pp.108-112, 1966.
- [4] Elleuch, M. R.; Dubois, F. and Rappenau, J., "Behavior of Special Shielding Concretes and of their Constituents under Neutron Irradiation", Fourth United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, 7 pp., 1971.
- [5] Houben, J. A., "De Bestraling van Mortelproefstukken", (Radiation of mortar specimens), Commission of the European Communities, Brussel, pp. 170-178, 1969.
- [6] Price, B. T.; Horton, C. C. and Spinney, K. T., "Radiation Shielding", International Series of Monograph on Nuclear Energy, Pergamon Press, New York, London, Paris, pp.276-278, 1957.
- [7] Stoces, B., Otopal, P., Juricka, V. and Gabriel, J., "The Effect of Radiation on the Mechanical Properties of Concrete", Ceskoslovenska Akademie, Translated from the Czech; Oak Ridge National Laboratory, Purchase Order: 34B-83481, Letter Release No.: T81, STS No.: 10487.

中性子照射影響において、図 1.2 の引用文献を調査した結果を表 1.2 にとりまとめた。ここに示すように、軽水炉と異なる条件が含まれており、Hilsdorf らの見解と現行の目安値の妥当性及び科学的根拠にはさらなる検討が必要であると考える。

そこで、Hirsdorf 論文を含むコンクリートの中性子照射影響に関する文献から軽水炉と同等の構成材料で中性子照射量の高い試験結果を収集した結果を図 1.3 に示す。図 1.3 に示すように、 $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ を超える中性子照射量から強度の低下傾向が確認

¹⁰ O. Kontani, Y. Ichikawa, A. Ishizawa, M. Takizawa, O. Sato, Irradiation Effects on Concrete Structures, Infrastructure Systems for Nuclear Energy, John Wiley & Sons, Ltd 2014, pp. 459-473.

され、高い照射量領域の研究の必要性が再確認された。なお、2015 年には、オークリッジ国立研究所の研究チームから図 1.4 に示されるように、Hilsdorf 論文の参考文献を含む収集文献によるコンクリート強度比と中性子照射量の関係が発表されており、同じく $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ を超える中性子照射量から強度の低下が指摘されている。

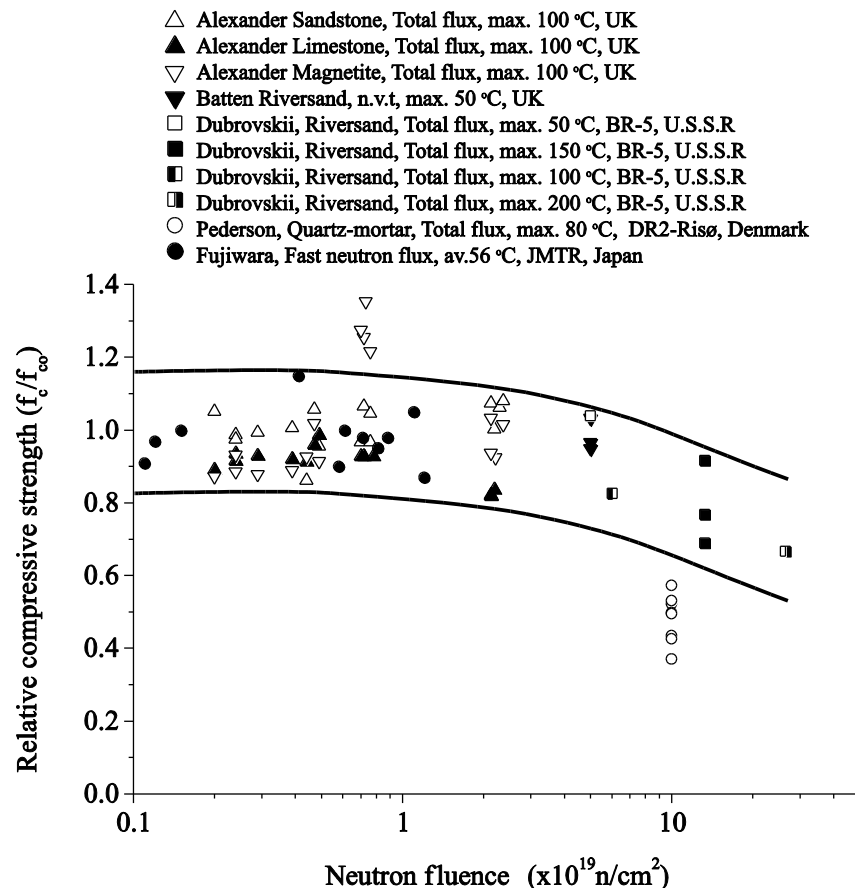


図 1.3 軽水炉と同等の構成材料によるコンクリート強度比と中性子照射量の関係

11

¹¹ I. Maruyama, O. Kontani, S. Sawada, O. Sato, M. Takizawa, G. Igarashi, Evaluation of irradiation effects on concrete structure - background and preparation of neutron irradiation test-, ASME Power conference 2013, Boston, Massachusetts, USA, 29th July-1st Aug. 2013, Power2013-98114.

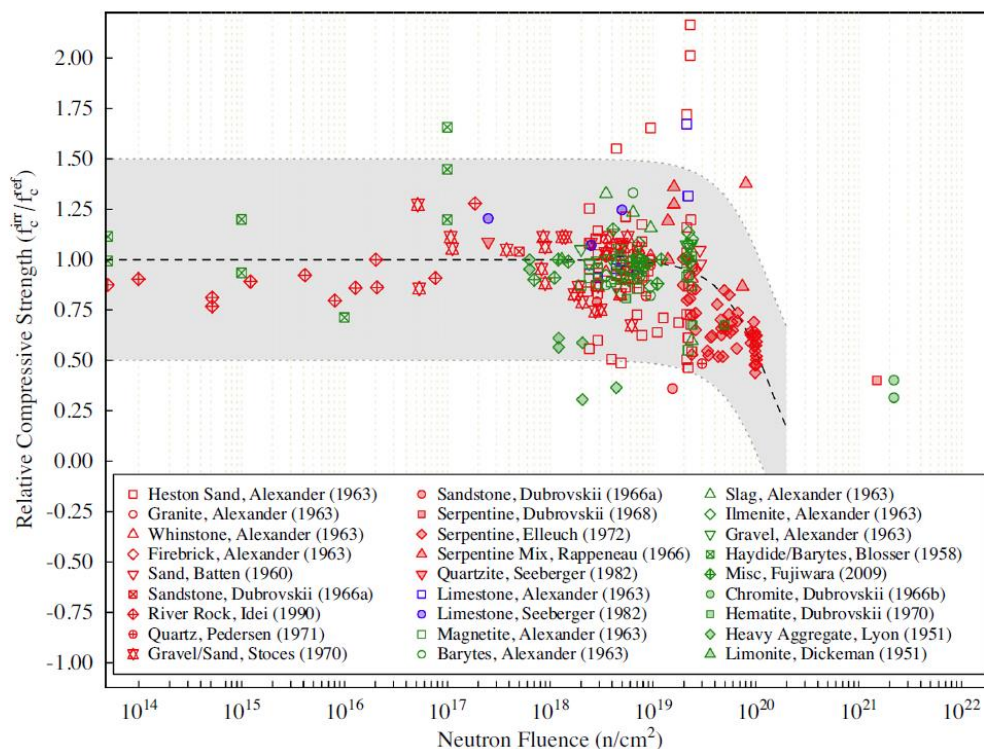


図 1.4 コンクリート強度比と中性子照射量の関係¹²

ガンマ線照射影響に関しては、図 1.2 に赤枠で示す Sommers らの試験¹³がイオン交換水にコンクリートを浸漬させた条件の試験であり、水酸化カルシウムの溶脱の影響があることが明らかとなっており、Hilsdorf 論文ではガンマ線影響を大きな劣化要因と考えていない。

しかし、現行の目安値の妥当性とその根拠については不明な点が多いこと、また、中性子照射環境では常に（二次）ガンマ線の影響が伴うことを考えるとガンマ線の影響についてもさらなる検討が必要であると考え。さらに、ガンマ線影響には常にガンマ線発熱とそれによるコンクリート中の水分逸散現象が伴うことから、中性子照射及びガンマ線照射の影響において、熱・乾燥影響に対する理解が不可欠であると考えられる。

従って、放射線のコンクリートへの劣化影響を科学的に理解するためには、放射線環境下にあるコンクリートに生ずる環境劣化外力の抽出と構成材料への影響を明確にし、コンクリート構成材料と放射線の相互作用と物性変化に関するメカニズムを明確にする必要がある。

¹² K.G. Field, I. Remec, Y. Le Pape, Radiation effects in concrete for nuclear power plants - Part I: Quantification of radiation exposure and radiation effects, Nuclear Engineering and Design, 282 (2015) 126-143.

¹³ Sommers, J. F., "Gamma Radiation Damage of Structural Concrete Immersed in Water," Health Physics, Pergamon Press, Vol. 16, pp. 503-508, 1969.

1. 2 研究の目的

本研究は、原子力施設の遮蔽機能及び支持機能が要求される、ガンマ線や中性子の照射環境下にある安全上重要なコンクリート構造物に対して、放射線照射によるコンクリート劣化に関するメカニズムの解明と累積照射量の目安値の妥当性を確認することにある。コンクリートに使用されている骨材の種類は全国一律でなく、また、セメントの種類もまちまちである。これらのコンクリートの健全性評価に資するためには、構成材料（セメントペースト、骨材）への放射線影響を明らかにした上で長期健全性評価の考え方を整理する必要がある。

コンクリート構造物の長期健全性を評価するためには、目安値の妥当性評価を確認するために必要なデータの取得のみならず、メカニズムを明らかにした上で放射線環境下にあるコンクリート部材内の物性分布及びその経時変化を予測／外挿する数値解析的検討が必要である。

1. 3 作業仮説の立案

コンクリートは、水、セメント、細骨材（砂）、粗骨材（砂利）及び混和剤より構成される。セメント（ $\sim 10\mu\text{m}$ ）、細骨材（ $\sim 2\text{mm}$ ）、粗骨材（ $\sim 15\text{mm}$ ）に示されるように寸法も様々、材質もさまざまであり、さらにセメントと水が反応してでき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。この水和反応によって生成される水和物は、数 nm $\sim$ 数 μm の構造単位を有しており、水和物の種類（水酸化カルシウム、珪酸カルシウムなど）も多く、極めて多層・マルチスケール複合材料である。コンクリートに放射線が照射される場合、中性子、ガンマ線、及びこれらのエネルギー沈着による熱の影響から、内部の構成物質が変質し、その結果としてコンクリートの巨視的な性能を変化させるものと考えられる。研究に当たって、これらの相互作用を予め、既往の物理化学の知見から推察しなくては、適切なパラメータを設定しメカニズムを抽出することができない。この観点から、本研究では国内外の専門家にインタビューを行うと共に、既往の知見^{3, 5}を調査し、中性子とガンマ線がコンクリートの構成材料及びコンクリートに及ぼす影響について取りまとめた。その結果を表 1.3 に示す。

表 1.3 中性子及びガンマ線がコンクリートの構成材料及びコンクリートに及ぼす影響

		中性子	ガンマ線
セメント ペースト	水	・ガンマ線と同様。 (ただし、水素発生 G 値^{*1}は異なる可能性がある。)	・ガンマ線発熱により、水分は蒸発し、乾燥する。 ・水は放射線分解により水素と酸素に分解し、空隙内に圧力が蓄えられ水分移動が加速し、乾燥が促進する。 ・ガンマ線照射により、水素や酸素が発生し、水和物と反応し、変質する。
	固体	・中性子エネルギー$\geq$結合エネルギーの場合、水和物の原子の弾き出しが発生し、変質する。 (特に共有結合^{*2}に影響があると考えられる。しかし、周囲に水分があれば、溶解・析出により治癒する。) ・弾き出しがなくても、エネルギー沈着により非回復性の欠陥が生ずる可能性がある。 (しかし、結晶構造単位が小さいので影響は顕在化しにくい。)	・ガンマ線照射により、ペーストは乾燥の影響で収縮する。一部の水和物は脱水・変質・分解する。 ・ガンマ線照射により、Si-O 結合は電離し、Si-O-O-Si 結合を形成する。 (ただし、周囲に水分があるときは溶解・析出反応によりすぐに影響は治癒する。非晶質^{*3}なので影響が無い。) ・ガンマ線照射により、Ca-O 結合 (CH、C-S-H) は電離し、変質を生じる。 (ただし、周囲に水分があれば治癒する。また、結晶構造単位が小さく、強度、ヤング率は分子間力で決定しているので、大きな影響は無い。)
骨材	水	・中性子照射により、少量の結晶水・吸着水が分解・蒸発し、乾燥する。	・ガンマ線照射により、少量の結晶水・吸着水が分解・蒸発し、乾燥する。
	固体	・中性子照射により、原子の弾き出しが発生し、結晶結果の発生と結晶構造の歪みが生ずる。 (一部の結果は熱的振動によって治癒する。) ・中性子照射により、二次ガンマ線の影響によって電離し、メタミクト化^{*4}が生ずる。 (原子の弾き出し効果と重畳し、欠陥が残る確率が高くなる。) ・中性子照射により、岩石鉱物の密度が低下し、骨材が膨張する。 (ただし、岩石鉱物によってその膨張量と照射量の関係は異なる。現在のところ石英が極めて鋭敏に膨張することがわかっている。)	・ガンマ線照射により、共有結合は電離作用により結合角が変化するなど、メタミクト化が生じ、鉱物によっては密度が増大する。 (ただし、その影響は中性子よりも非常に小さい。また、熱的振動により一部は治癒する。) ・ガンマ線により発生する電子線で、原子の弾き出しが生じ、メタミクト化が加速する。 ・ガンマ線発熱により、脱水し、一部の岩石鉱物 (粘土鉱物など) は収縮する。
コンクリート		・中性子照射により、岩石鉱物がメタミクト化によって密度低下し、骨材が膨張する。 ・中性子照射によりペーストが熱の影響	・ペーストの収縮により、骨材周囲にひび割れが発生し、ヤング率が低下する。 ・ガンマ線照射により、未反応セメ

	響で収縮し、骨材の膨張とペーストの収縮によるひずみの不整合から骨材周囲に損傷が発生し、ヤング率や強度が低下する。 (特に密度の大きいシリカ質、石英含有量の高い骨材の場合、影響が大きい。)	ントが反応し、強度が増加する。 ・ガンマ線照射により、C-S-H が熱により変質し、強度が増大する。
--	--	---

- *1 電離放射線による化学作用の効率を表す量
- *2 原子間での電子対の共有をともなう化学結合
- *3 結晶とは異なり原子や分子が規則正しく配列しておらず、乱れた配列をしている状態
- *4 放射線によって結晶格子が破壊され、X 線に対しても可視光線に対してもガラスのような非晶質とみなされる状態

表 1.3 に示す内容がコンクリートにどのように影響するかについて、概要をここに記す。放射線環境下にあるコンクリート部材を想定したときの環境劣化外力とコンクリート構成材料の関係を図 1.5 に示す。中性子がコンクリートに照射された場合、中性子と物質の相互作用の結果、中性子が弾性・非弾性散乱を生じて部材内部に減衰しながら拡散する。その際、二次ガンマ線が生じ、電子対生成やコンプトン散乱を生じつつ、電子の形や電子励起を生じさせながら、最後は物質を構成する原子の熱的振動となり、二次ガンマ線のエネルギーが吸収されていく。すなわち、中性子のエネルギーは最終的に熱となる。一部、弾き出しにより結晶欠陥や結晶格子のひずみを生じるため、力学的エネルギーに変換されるがその割合は極めて僅かである。この過程から、中性子、ガンマ線がコンクリートの構成材料に与える影響を考える際には、熱・乾燥の影響も考慮しなくてはならないこと、中性子照射試験といえども、ガンマ線影響、熱・乾燥影響が同時に生ずるため、中性子単体の影響を取り出すためには、適切なリファレンス試験が必要である。

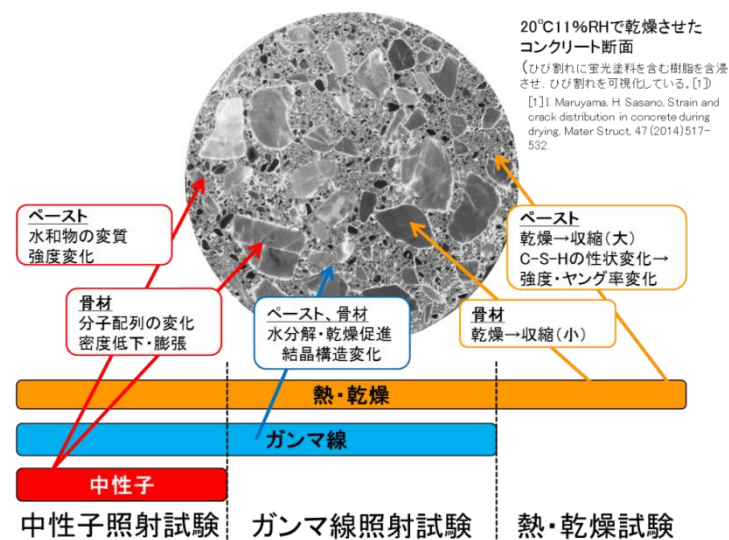


図 1.5 放射線環境下における環境劣化外力とコンクリート構成材料の関係
(コンクリート中のひび割れ部は白色で示されている¹⁴⁾)

(1) 熱・乾燥影響

まず、熱・乾燥影響から中性子・ガンマ線照射において、もっともコンクリートの変質に与える影響が大きい因子について導出する。図 1.6 はコンクリートを構成するセメントペーストと骨材が湿潤状態から乾燥に伴って生ずる相対湿度とひずみ（湿度の長さの関係である長さ変化等温線）を比較したものである。ここに示すようにセメントペーストは非晶質・コロイド的性状を有する水和物がセメントの水和反応によって生ずるため大きく収縮し、日本の平均湿度である 60% RH の環境であっても 3000μ 程度のひずみを生ずる。

なお、コンクリートの調合は、施工性を確保するためにセメントの水和反応に必要な水量を用いることが一般的であり、硬化後であっても多くの余剰水を持つためこのように一般環境下に暴露した場合に乾燥して収縮する。

一方、骨材は地下環境において数万年以上安定化した岩石を用いることが多いため、せいぜい数百（一般的には 300μ ）以下の収縮ひずみしか生じない。特に、日本では地下環境において安定化し、カルサイトの純度が高い石灰石が産出するためほとんど収縮しない。一般的に利用されている砂岩の中には収縮しやすい成分が含まれているため、産地によっては 1000μ 程度の乾燥収縮ひずみを生じるものも存在する。だが、いずれの場合にも乾燥下にあるコンクリート中においては、このように構成材料であるセメントペーストと骨材の体積変化が著しく異なるため、内部に微細なひび割れが多く生ずる。このように一般的に使用されている環境下であってもコンクリートの内

¹⁴ I. Maruyama, H. Sasano, Strain and crack distribution in concrete during drying, Mater Struct, 47 (2014) 517-532.

部に目に見えない微細なひび割れが生じ、強度や剛性に変化を与える。このことから、放射線環境下において重要な因子として、1)構成材料間の体積変化の差異を拡大させるもの、2) 構成材料自体、(特にセメントペースト) の強度を変化させるものの2つが重要である。

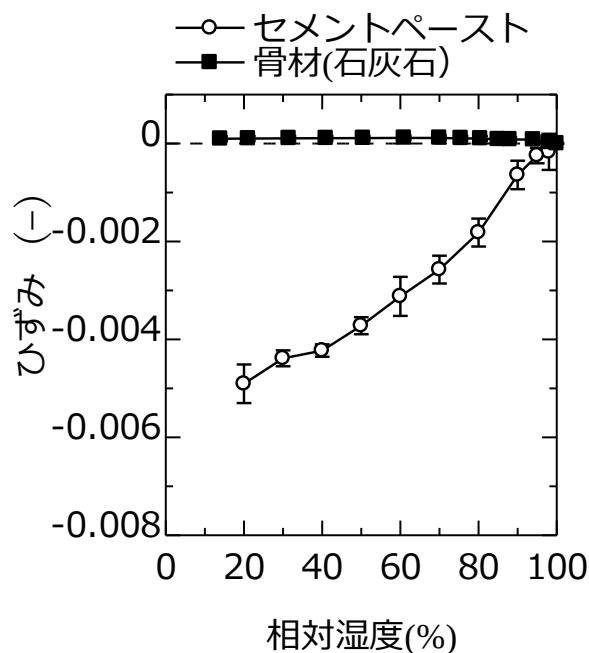


図 1.6 相対湿度とひずみの関係¹⁵⁾

(2) 放射線照射影響

次に放射線影響からコンクリートの変質に与える影響が大きい因子について導出する。

既往の研究では中性子照射に対してセメントペーストは収縮するが強度は変化しないことが試験的に確認されている¹⁶⁾。セメントペーストの強度を担うカルシウムシリケート水和物 (C-S-H) は、結晶単位が小さく、強度の基本となる CaO の構造に対し

¹⁵⁾ I. Maruyama, O. Kontani, A. Ishizawa, M. Takizawa, O. Sato, Development of system for evaluating concrete strength deterioration due to radiation and resultant heat, in: Proceedings of 3rd International Conference on NPP Life Management for Long Term Operations, IAEA-CN-194-096, Salt Lake City, May, 2012, pp. 12-14.

¹⁶⁾ Elluech, M. R., F. Dubois and J. Rappenau (1971). "Behavior of special shielding concretes and of their constituents under neutron irradiation." Fourth United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, pp. 7.

て SiO_4^{2-} が 2 対となっているダイマー構造 ($\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$) が付着している構造をとる¹⁷。この $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$ が CaO レイヤーにくっつくと、残りの $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$ の手はマイナスの電荷状態になる。このマイナスを Ca^{2+} が補うことで CaO レイヤーが互いに束ねられて、積層方向に周期を生ずるが、もととなる CaO レイヤーの結合が弱く湾曲したり切断されていることが多いため、結晶構造としては大きく成長しない^{18, 19}。そのため、ガンマ線による電子励起があったとしても、また、中性子によるはじき出しがあったとしても、周囲に水があるときには溶解平衡状態となっているために結晶の損傷として強度低下に至ることはほとんどない。また、たとえ周囲に水が無かったとしても、すでに結晶欠陥が多く、緩い分子間力によって支えられている構造であるため、強度低下が顕著に生ずるものとは考えにくい。図 1.7 に示すように、セメントペーストは乾燥あるいは照射環境で脱水による収縮が生じるが、強度自体の変化は乾燥あるいは照射環境による違いで大きく異なることは考えられない。

すなわち、中性子及びガンマ線照射環境下においては、セメントペーストの物性はせいぜい乾燥による強度増大と収縮が生ずるのみであり、その他の影響は少ないものと想定される。

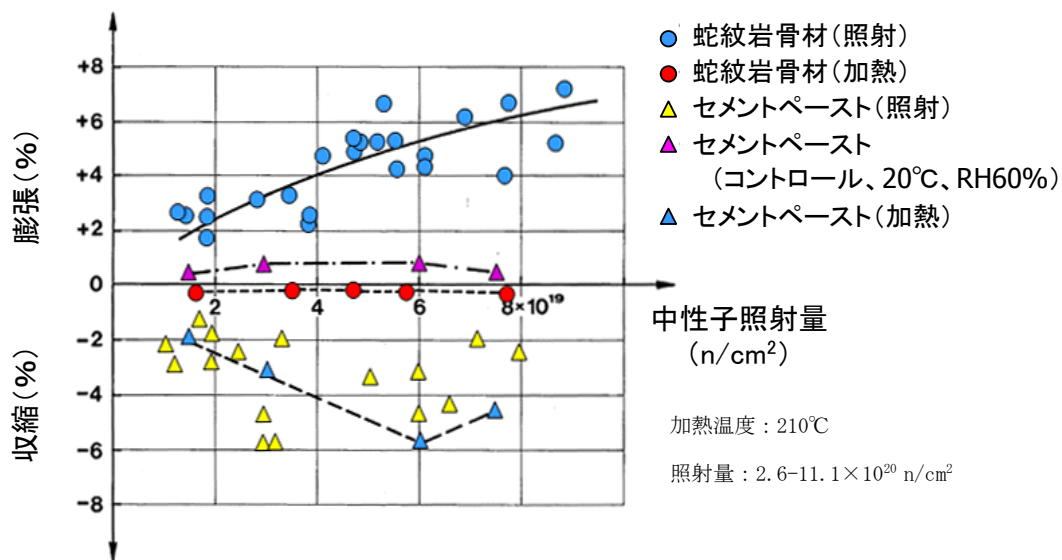


図 1.7 中性子照射環境にあるセメントペーストと骨材の挙動²⁰

¹⁷ I. Richardson, Model structures for C-(A)-S-H(I), Acta Crystallographica Section B, 70 (2014) 903-923.

¹⁸ E. M. Gartner, A proposed mechanism for the growth of C-S-H during the hydration of tricalcium silicate, Cement and Concrete Research, 27 (1997) 665-672.

¹⁹ A. Nonat, The structure and stoichiometry of C-S-H, Cement and Concrete Research, 34 (2004) 1521-1528.

²⁰ L. F. Elleuch, F. Dubois, J. Rappeneau, Effects of Neutron Radiation on Special Concretes and Their Components, Special Publication, 34 (1972).

一方、骨材については、岩石鉱物である石英 (α -quartz) が中性子照射によって膨張することが知られている。図 1.8 左に示すように、中性子照射により石英は体積で 16~18%、長さ変化で 5~6% 膨張することが知られている¹⁵。この間、石英内部の構造はメタミクト化してしまい明確な結晶構造が確認できなくなる。このメタミクト化は電子線照射でも生ずることが知られており¹⁷、このことから、電子線と照射による影響が同じであるガンマ線でも生ずると考えられる。電子線照射の場合、加速電圧が大きくなると分子との相互作用が小さくなる関係で、メタミクト化へ至る電子照射量は多くなる（低線量効果）が、さらに加速させていくと弾き出しによるメタミクト化が生ずるようになるため、メタミクト化に必要な電子照射量は少なくなるようになり結果として、図 1.8 右下に示されるように横軸に電子線の加速電圧、縦軸にメタミクト化に必要な電子線照射量をとると、上に凸な形状が示されるようになる。電子線照射によるはじき出しが明確になるのは、石英の場合 1500KeV であることが知られている¹⁷。

これらの観点からまとめると、中性子、ガンマ線の両者ともに岩石鉱物の石英はメタミクト化する。しかし、それらが同程度膨張するかどうかはわかっていないが、いずれも膨張傾向にあると考えられる。このことから、中性子、ガンマ線の照射によって岩石鉱物の石英がメタミクト化し、骨材が膨張することでコンクリート内に損傷が生じ、強度低下が生ずるものと考えられる。その際、骨材自体の強度も低下すると考えられるが、コンクリートの主要なマトリクスであるセメントペーストが、すでに骨材の膨張により大きくダメージを受けているため、コンクリート強度や剛性に骨材自体の変化がおよぼす影響は小さいと考えられる。それ故、コンクリートの劣化の主要因として考えるのは放射線による骨材膨張挙動であり、収縮するセメントペーストに対して大きな損傷を与えられと考えられる。膨張する岩石鉱物としては石英のみが知られているが、それ以外の岩石鉱物が膨張するかどうかについて、確認する必要がある。また、電離作用の観点から考えれば共有結合がイオン結合よりも大きな影響を受けるので、イオン結合性を主体とする岩石鉱物（例えば、石灰岩）がどのような挙動を生ずるかについても確認することが重要である。

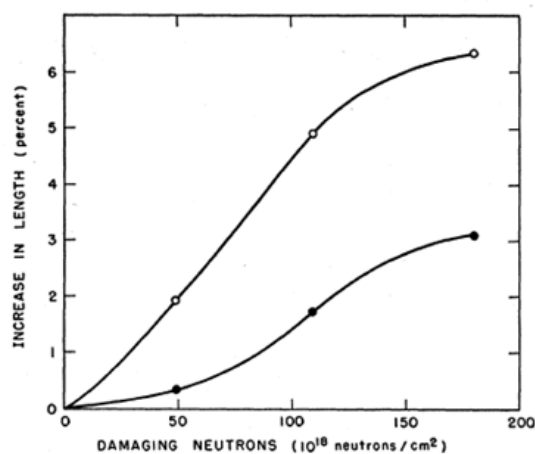
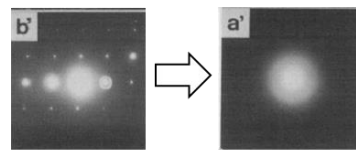


FIG. 3. Nuclear-reactor radiation-induced linear expansion of quartz cut parallel (solid circles) and perpendicular (open circles) to the optic axis. For the initial changes see Primak, Fuchs, and Day,⁹ but note that their expansions are mislabelled.



電子線照射による石英のアモルファス化[3]

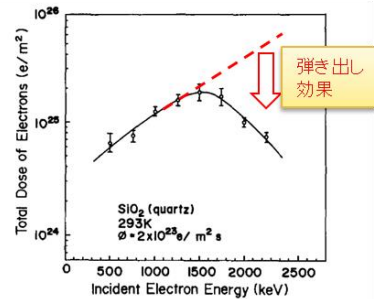


Fig. 2. Incident electron energy dependence of the total dose of electrons required for the C-A transition at 293 K, in the range from 500 to 2250 keV. The irradiation was carried out with an electron beam at a constant flux of $2.0 \times 10^{23} \text{ e/m}^2 \text{ s}$.

図 1.8 中性子照射（左）²¹及び電子線照射（右）²²による石英のメタミクト化

以上の知見から、表 1.4 に示す放射線の影響に関する作業仮説に基づいてコンクリートの変質を理解するにあたっては、研究計画を定める必要がある。

²¹ W. Primak, Fast-neutron-induced changes in quartz and vitreous silica, Physical Review, 110 (1958) 1240-1254.

²² H. Inui, H. Mori, T. Sakata, H. Fujita, Electron irradiation induced crystalline-to-amorphous transition in quartz single crystals, Journal of Non-Crystalline Solids, 116 (1990) 1-15.

表 1.4 中性子及びガンマ線の影響に関する作業仮説

		中性子	ガンマ線
セメント ペースト	水	・ガンマ線と同様。 (ただし、水素発生 G 値 ^{*1} は異なる可能性がある。)	・水は放射線分解により水素と酸素に分解し、空隙内に圧力が蓄えられ水分移動が加速し、乾燥が促進する。
	固体	・弾き出しがなくても、エネルギー沈着により非回復性の欠陥が生ずる可能性がある。 (しかし、結晶構造単位が小さいので影響は顕在化しにくい。)	・ガンマ線照射により、ペーストは乾燥の影響で収縮する。一部の水和物は脱水・変質・分解する。 (強度への影響は熱・乾燥影響と同等かそれよりも小さい。)
骨材	水	・中性子照射により、少量の結晶水・吸着水が分解・蒸発し、乾燥する。	・ガンマ線照射により、少量の結晶水・吸着水が分解・蒸発し、乾燥する。
	固体	・中性子照射により、岩石鉱物の密度が低下し、骨材が膨張する。 (ただし、岩石鉱物によってその膨張量と照射量の関係は異なる。現在のところ石英が極めて鋭敏に膨張することがわかっている。)	・ガンマ線照射により、共有結合は電離作用により結合角が変化するなど、メタミクト化が生じ、鉱物によっては密度が増大する。(ただし、その影響は中性子よりも非常に小さい。また、熱的振動により一部は治癒する。)
コンクリート		・中性子照射によりペーストが熱の影響で収縮し、骨材の膨張とペーストの収縮によるひずみの不整合から骨材周囲に損傷が発生し、ヤング率や強度が低下する。 (特に密度の大きいシリカ質、石英含有量の高い骨材の場合、影響が大きい。)	・ペーストの収縮により、骨材周囲にひび割れが発生し、ヤング率が低下する。 (熱・乾燥影響と同程度か、それ以下である。)

2. コンクリートおよび構成要素の中性子線影響評価

2. 1 実施概要

2. 1. 1 照射試験の概要

中性子照射がコンクリートに及ぼす影響を把握するために、図 2.1 に示す 2 種類の中性子照射試験を行う。図 2.2 にスケジュールの概要を示す。

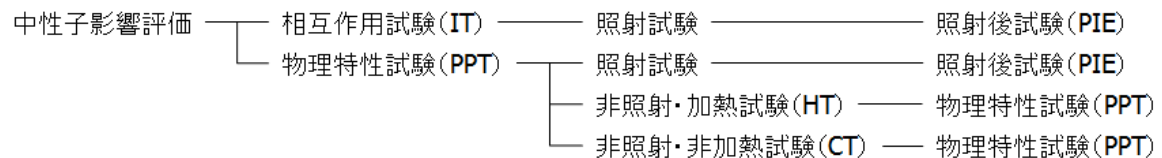


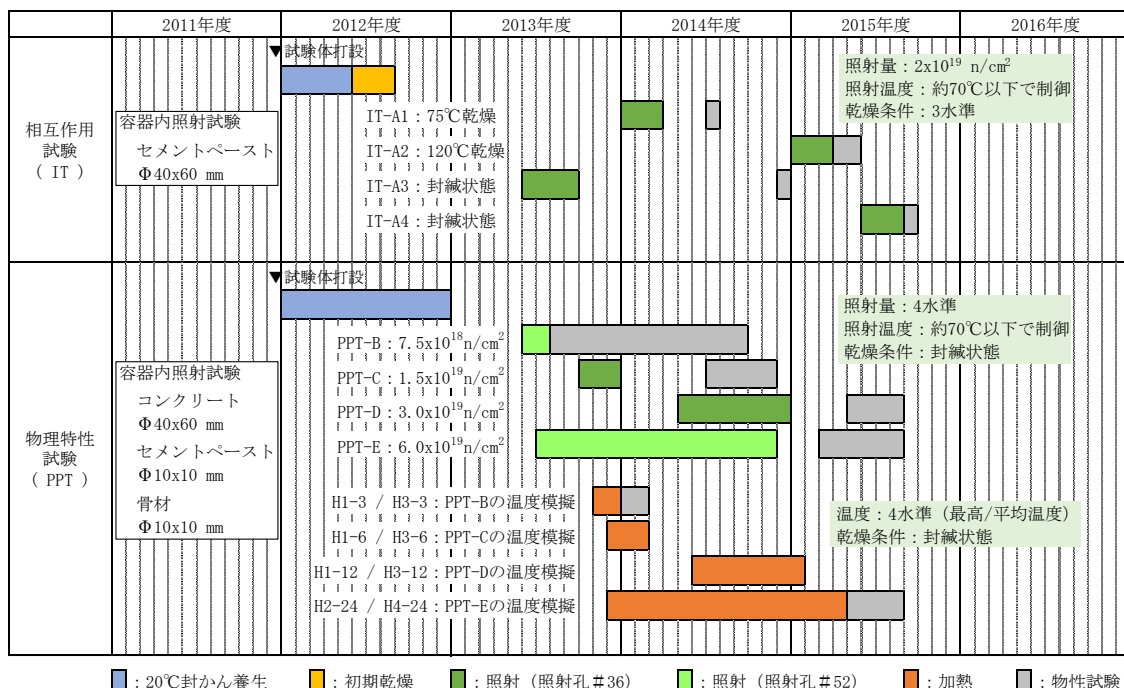
図 2.1 中性子影響評価の試験概要

・相互作用試験 (Interaction test : IT)

相互作用試験では、セメントペースト試験体を照射し、中性子とセメントペーストとの化学的・物理的反応（水の放射線分解、水和物の変化等）を把握する。

・物理特性試験 (Physical property test : PPT) :

物理特性試験では、中性子照射量をパラメータとして照射試験を行い、中性子がコンクリート、セメントペーストおよび骨材の物理特性（強度、剛性等）に及ぼす影響を把握する。あわせて、非照射で物理特性試験の温度履歴を考慮した非照射・加熱試験を行い、中性子照射のみの影響を把握する。



■ : 20℃封かん養生 ■ : 初期乾燥 ■ : 照射 (照射孔 #36) ■ : 照射 (照射孔 #52) ■ : 加熱 ■ : 物性試験

図 2.2 中性子影響評価試験のスケジュール概要

表 2.1 に相互作用試験の試験ケースを示す。図 2.3 にキャプセル内部の試験体の設置状況を示す。水分条件を試験パラメータとしている。75℃乾燥条件は、中性子照射試験におけるキャプセル内部のコンクリートの最高温度（試験体中央部）に対応している。120℃乾燥条件は、すべての自由水（105℃での加熱で蒸発するセメントペースト中の水分）を除去した状態に対応している。封緘は、試験体を製作した段階から外部と水分のやり取りがなく、製作時の水分量が維持された状態を示している。なお、IT-A3 では照射中に発生する水蒸気の捕集が十分ではなかったため、IT-A4 では同じ水分条件である封緘として試験を実施する。

表 2.1 相互作用試験ケース

試験ケース	容器名	水分条件	中性子束 (n/cm ² /s)	温度	照射期間
IT-A1	IFA-758	75℃乾燥	約 3.6×10^{12}	一定	約 2 ヶ月
IT-A2	IFA-759	120℃乾燥			
IT-A3	IFA-760	封緘			
IT-A4	IFA-761	封緘			

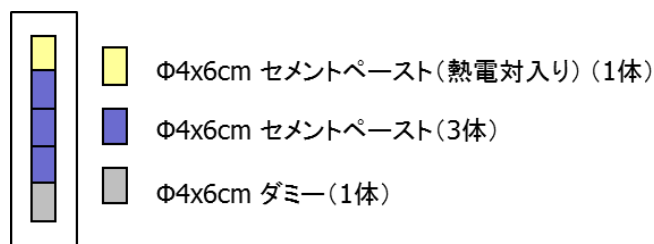


図 2.3 相互作用試験キャプセル内部の試験体の設置

表 2.2 に物理特性試験の試験ケースを示す。図 2.4 に物理特性試験キャプセル内部の試験体の設置状況を示す。中性子照射量を試験パラメータとしており、水分条件は封緘とし、温度は一定としている。

表 2.3 に非照射・加熱試験ケースを示す。水分条件は物理特性試験と同様に封緘とした。非照射・加熱試験では、キャプセルを水槽に浸漬し、対応する中性子照射試験における温度履歴（計画的な停止期間も含めて）により水槽の水温を管理している。その際に 2 種類の温度を考慮している。中央最高温度は、照射試験体中央部の温度を作用させるケースである。また、断面内平均温度は、照射試験体の断面内温度分布を面積で重み付けして算定した平均温度を作用させるケースである。

また、照射試験の間に強度増進が無いことを確認するために、照射期間中に 3 回に分けて非照射・非加熱の試験体に対して物理特性（強度、剛性等）の確認を実施する。

表 2.2 物理特性試験ケース

試験ケース	容器名	水分条件	中性子束 (n/cm ² /s)	中性子照射量 (n/cm ²)	温度
PPT-B	IFA-753	封緘	約 3.6×10 ¹²	0.75×10 ¹⁹	一定
PPT-C	IFA-752			1.5×10 ¹⁹	
PPT-D	IFA-751			3.0×10 ¹⁹	
PPT-E	IFA-750			6.0×10 ¹⁹	



図 2.4 物理特性試験キャプセル内部の試験体の設置状況

表 2.3 非照射・加熱試験ケース

試験ケース	容器名	水分条件	対応する 照射試験	温度	加熱期間
H1-3	IFA-757.1	封緘	PPT-B	照射試験での コンクリート 中央最高温度	約 1 ヶ月
H1-6	IFA-757.2		PPT-C		約 2 ヶ月
H1-12	IFA-757.3		PPT-D		約 7 ヶ月
H2-24	IFA-756		PPT-E		約 17 ヶ月
H3-3	IFA-755.1		PPT-B	照射試験での コンクリート 断面内平均温度	約 1 ヶ月
H3-6	IFA-755.2		PPT-C		約 2 ヶ月
H3-12	IFA-755.3		PPT-D		約 7 ヶ月
H4-24	IFA-754		PPT-E		約 17 ヶ月

2. 1. 2 試験条件

(1) 試験体製作

中性子照射試験に用いる試験体サイズは、試験体発熱や同一条件試験体数を考慮して、 $\Phi 4\text{cm} \times 6\text{cm}$ の円柱供試体とした。相互作用試験に用いるセメントペースト試験体は、水セメント比を 50% とし、セメントには照射試験中に追加水和が無い状態を確実にするため早強ポルトランドセメントを用いて製作した。物理特性試験に用いるコンクリート試験体は、水セメント比を 50% とし、セメントにはセメントペースト試験体と同様の理由により早強ポルトランドセメントを、細骨材には山砂 (SD2) を、粗骨材には砂岩砂利 (E) と凝灰岩碎石 (F) を用いた 2 種類の調合で、製作した。

表 2.4 に使用材料を示す。表 2.5 に最終調合を示す。

表 2.4 使用材料

使用材料	記号	材料の詳細	密度
水	W	水道水	—
セメント	C	早強ポルトランドセメント、太平洋セメント社製	$3.14\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	S	山砂、静岡県産	$2.61\text{g}/\text{cm}^3$
粗骨材	E	砂岩砂利、粒度 5~13mm、静岡県産	$2.64\text{g}/\text{cm}^3$
	F	凝灰岩碎石、粒度 5~13mm、愛知県産	$2.66\text{g}/\text{cm}^3$

表 2.5 最終調合

調合番号	骨材の種類		W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				
	細骨材	粗骨材			W	C	S	E	F
WC50-P	—	—	50	—	611	1222	—	—	—
WC50-No. 1	山砂 S	凝灰岩碎石 (F)	50	45	183	366	799	—	995
WC50-No. 2		砂岩砂利 (E)	50	42	177	354	757	1057	—

セメントペースト：単位容積質量 ($1842\text{kg}/\text{m}^3$)

コンクリート：調合上の空気量 (2%)、スランプ ($8 \pm 1.5\text{cm}$)

(2) 試験体の保管状況

表 2.6 に試験体の製作後、照射後試験までの試験体の保管状況を示す。

照射前の段階では、アルミバッグで封緘状態を維持するとともに、キャプセル収納後は He 環境で封入状態とした。

表 2.7 に示すように、照射後の試験体の含水状態に、キャプセル内での配置に応じたバラツキが見られた。試験体の含水状態の違いは強度に影響を与えるため、照射後の圧縮強度試験を実施する前に、試験体の含水状態を調整するための加熱を実施した。図 2.5 に照射後の加熱スケジュールを示す。

表 2.6 試験体の保管状況

Step	作業内容	温度	湿度	期間
1	試験体の養生	20℃	アルミバッグ封緘	1年間
2	試験体の輸送 (日本→ノルウェー)	5～30℃	アルミバッグ封緘	約1週間
3	試験体の初期重量・ 形状計測	23～25℃	33～51%RH	3～37分
4	照射キャプセルへの 試験体の設置	22℃(設置中) 20～25℃(設置後)	55～65%RH(設置中) He環境(設置後)	2.5時間(設置) 数週間(設置後)
5	キャプセルの移動・保管 (作業場→照射炉)	15～20℃(移動中) 20～25℃(保管中)	He環境	3時間(移動) 1か月(保管)
6	キャプセルの 照射前保管		He環境	1か月
7	照射試験	22～71℃	He環境→発生ガス	数か月
8	照射後冷却	20～30℃	He環境	5～6か月
9	キャプセルの移動・保管 (照射炉→実験場)	10℃(移動中) 20～25℃(保管中)	He環境	1時間(移動) 数週間(保管)
10	照射後加熱	Max76±1℃	N ₂ 環境	3週間
11	照射後物性試験(PIE)	23℃	30%RH	6時間

表 2.7 照射前後および乾燥後における質量変化 (PPT-B)

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化 (g)				
			①照射前	②照射後 乾燥前	② - ①	③照射後 乾燥後	③ - ①
PPT-B	砂岩砂利	B13	182.514	178.83	-3.684	176.399	-6.115
		B14	181.033	175.884	-5.149	174.391	-6.642
		B15	182.707	177.854	-4.853	176.252	-6.455
		B16	183.29	178.909	-4.381	177.127	-6.163
		平均			-4.51675		-6.34375
	凝灰岩 碎石	C13	182.116	177.55	-4.566	176.157	-5.959
		C14	183.419	178.87	-4.549	177.291	-6.128
		C15	180.42	176.344	-4.076	174.261	-6.159
		C16	183.895	180.624	-3.271	177.92	-5.975
		平均			-4.1155		-6.05525

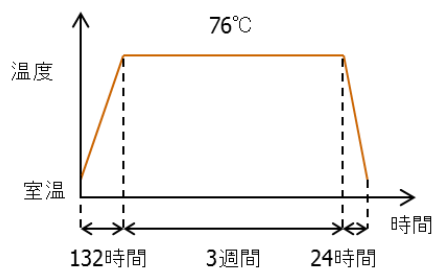


図 2.5 照射後加熱スケジュール

(3) 照射条件

図 2.6 に中性子照射試験用キャプセルの概要を示す。キャプセルはアルミニウム製の2重管で構成されている。セメントペーストあるいはコンクリート試験体は多少のクリアランスを考慮して内筒に封入され冷却水から隔離されている。また、冷却水は外筒の下部から流入し外筒の上部から流出する構造となっているので、内筒の外側、外筒の内側を流れ、試験体から発生する熱を除去する仕組みとなっている。照射により発生するガスや水蒸気を捕集するために内筒からチューブが炉外の計測システムに接続され、チューブの目詰まりを解消するために、ヘリウムによるフラッシングシステムを設置している。

キャプセルの材質としては、アルミニウムを用いている。アルミニウムとアルカリの腐食反応については、計画段階から議論していたが、下記の理由によりアルミニウムを採用した。

- ①高い熱伝導率：コンクリートは熱伝導率が小さく、試験体表面から熱を速やかに除去できないと中心部の温度が高くなり、表面と中央部の温度差により試験体にひび割れが発生する可能性がある。アルミニウムは熱伝導率がステンレスの10倍以上あるため、試験体の熱を速く除去することにより、試験体の中心温度の低減に寄与できる。
- ②柔らかいこと：コンクリート試験体の膨張を想定して多少の隙間を考慮していたが過去の実験結果ではさらに膨張しているケースもあった。そこでキャプセル内側の容器をアルミニウム製とすることにより、試験体の膨張に追従し、試験体の破壊を防止できる。

図 2.7 に研究炉 JEEP II の原子炉の水平断面を示す。燃料が全体に分布し、制御棒が周辺部に配置されている。照射孔は実験研究に用いられ、挿入されるキャプセルは冷却水で冷却される。炉の周辺部には冷却されない直径の大きな照射孔が配置されている。

本研究のために確保された照射孔は#36 と#52 の2カ所で、炉の周辺部に位置している。これは、本研究の照射試験計画に基づいて選定されており、炉の中央部では、中性子束やガンマ線発熱が大きいと考えられる。

図 2.8 に研究炉 JEEP II の原子炉の鉛直断面を示す。炉心の高さは 90cm となっているが、上下端では中性子束が小さくなり高さ方向で照射量に大きな差が発生するのを避けるために、中央の 60cm の領域で照射を行う計画としている。図 2.9 に JEEP II の中性子束分布を示す。図 2.9 (a) は、照射孔 52 での中性子束の鉛直方向分布の内、物理特性試験での試験体設置範囲 (60cm) における中性子束分布を示す。炉心中央高さ (高さ 75cm) での中性子束は $3.9 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 、外側高さ (高さ 45cm、105cm) では $3.1 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ となっており、炉心中央位置と外側との比率は 0.8 となっている。図 2.9 (b) は、照射孔 36 での中性子束の鉛直方向分布の内、相互作用試験での試験体設置範囲 (30cm) における中性子束分布を示す。炉心中央高さ (高さ 75cm) での中性子束は $3.7 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 、外側高さ (高さ 60cm、90cm) では $3.5 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ となっており、炉心中央位置と外側との比率は 0.95 となっている。どちらの照射孔についても、平均的な中性子束は $3.6 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ となっている。

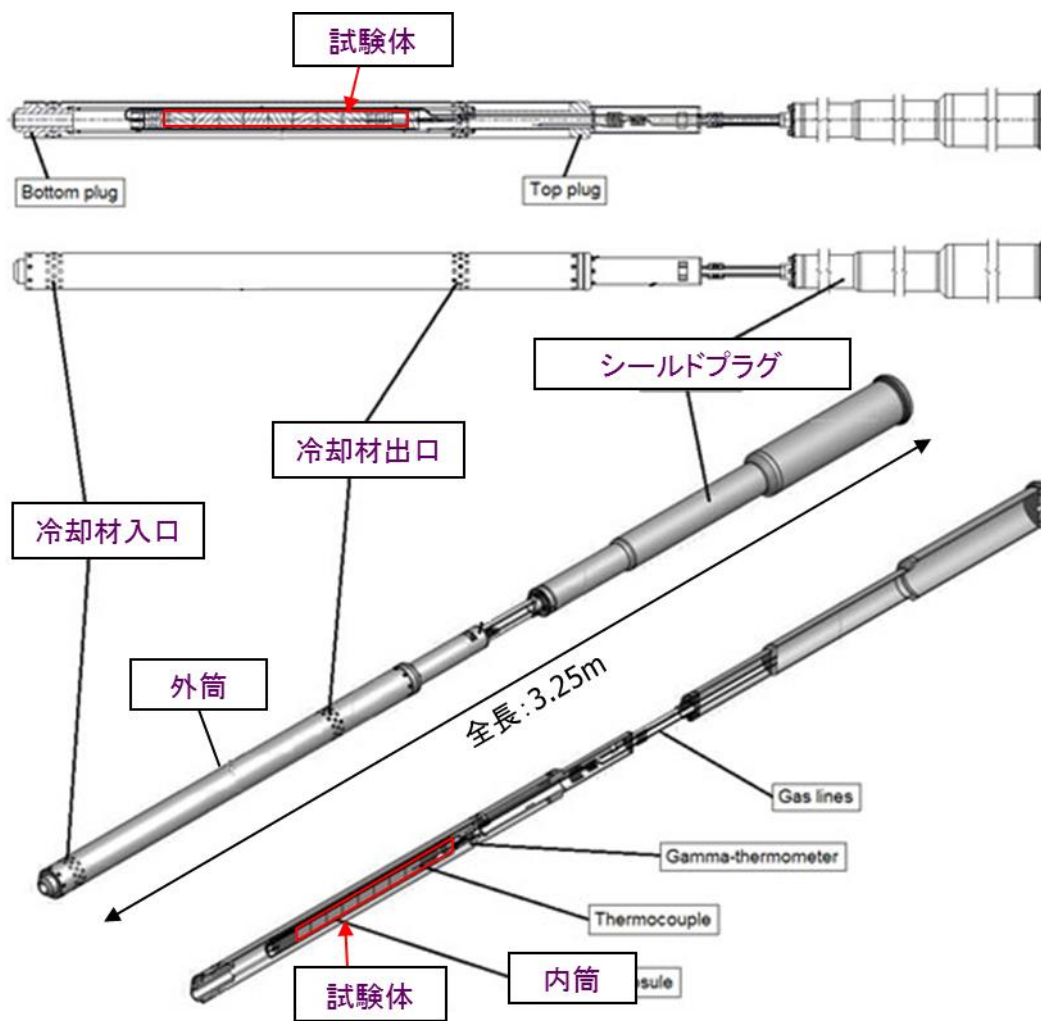


図 2.6 中性子照射試験用キャプセル

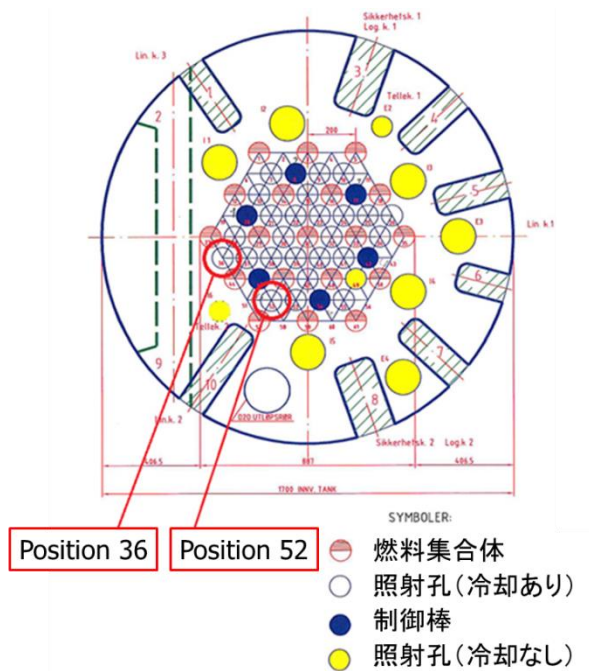


図 2.7 JEEP II 原子炉水平断面

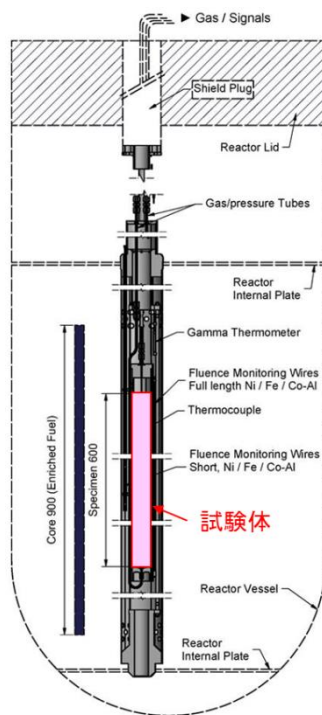


図 2.8 JEEP II 原子炉鉛直断面 (物理特性試験を想定)

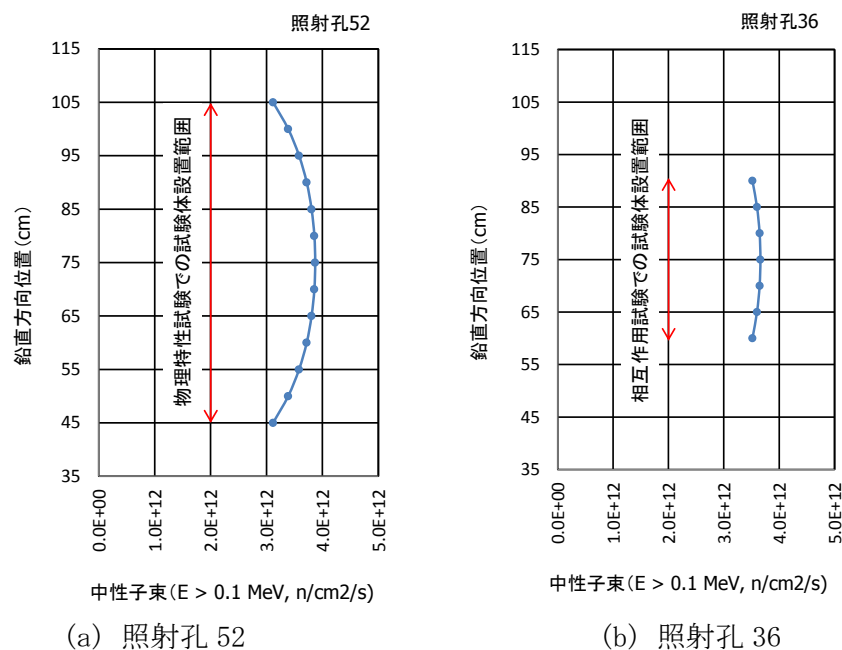


図 2.9 JEEP II の中性子分布

中性子照射試験における照射状況（中性子照射、ガンマ線照射、稼働率、試験体中心温度）を下記の通り図 2.10～図 2.17 に示す。

- 図 2.10 中性子照射の状況（IT-A1(IFA-758)：照射孔 36)
- 図 2.11 中性子照射の状況（IT-A2(IFA-759)：照射孔 36)
- 図 2.12 中性子照射の状況（IT-A3(IFA-760)：照射孔 36)
- 図 2.13 中性子照射の状況（IT-A4(IFA-761)：照射孔 36)
- 図 2.14 中性子照射の状況（PPT-B(IFA-753)：照射孔 52)
- 図 2.15 中性子照射の状況（PPT-C(IFA-752)：照射孔 36)
- 図 2.16 中性子照射の状況（PPT-D(IFA-751)：照射孔 36)
- 図 2.17 中性子照射の状況（PPT-E(IFA-750)：照射孔 52)

表 2.8 に照射試験状況をまとめて示す。表 2.9 に加熱試験状況をまとめて示す。

中性子束 ($E > 0.1\text{MeV}$) については、どの試験ケースでも $3.60 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 程度となっている。ガンマ線量率については、 $2.95 \sim 4.27 \times 10^2 \text{ kGy/h}$ と試験ケース毎に若干異なっている。これは、照射孔 36 と 52 以外の周囲に配置されている照射孔は、本試験以外の照射試験に使用されており、試験ケース毎に、各照射孔の周辺環境が異なっていることが原因と考えられる。なお、中性子照射では、中性子束が一定であることが重要であり、ガンマ線の影響については、ガンマ線照射量を計測できているため、評価の段階でその影響を考慮することができると考えられる。

JEEP II の稼働率は 0.8 程度となっている。JEEP II では、年 3 回（4 月に 1 か月、7-8 月にかけて 2 か月、12-1 月にかけて 1 か月、計 4 か月/年）の停止期間が設定されており、稼働率についてはこれらの停止期間を除いて算定しているため、稼働期間中の照射サンプルの入れ替えによる停止などを考慮しているといえる。

表 2.10 に実機条件と照射試験条件との比較を示す。

本試験における高速中性子照射量およびガンマ線照射量の目標値は、照射施設の能力および照射期間を考慮し設定した。高速中性子照射量（0.1MeV 以上）の目標値は、既存の軽水炉における 60 年間の照射量予測値に基づいて、また、ガンマ線照射量の目標値は、高経年化技術評価におけるガンマ線照射量の目安値を採用し、それぞれ、 $6.2 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ 、および $2.0 \times 10^5 \text{kGy}$ となっている。軽水炉の稼働率を 0.75 と仮定すると、実機の一次遮へい壁に作用する高速中性子束は $4.4 \times 10^{10} \text{n/cm}^2/\text{s}$ 、ガンマ線量率は 0.51kGy/h となる。

一方、本研究における高速中性子束は約 $3.6 \times 10^{12} \text{n/cm}^2/\text{s}$ で、実機条件の 82 倍となっている。中性子照射試験におけるガンマ線量率は $3.0 \sim 4.3 \times 10^2 \text{kGy/h}$ で、実機条件の 590～840 倍となっている。すなわち、本試験では、中性子照射では 82 倍の加速試験となっている。さらに、中性子照射に伴うガンマ線量率は、590～840 倍の加速試験となっている。

なお、JAEA 高崎研究所で実施しているガンマ線照射試験の最大線量率は 10kGy/h 程度なので、実際のガンマ線照射の 20 倍程度の加速試験となっている。

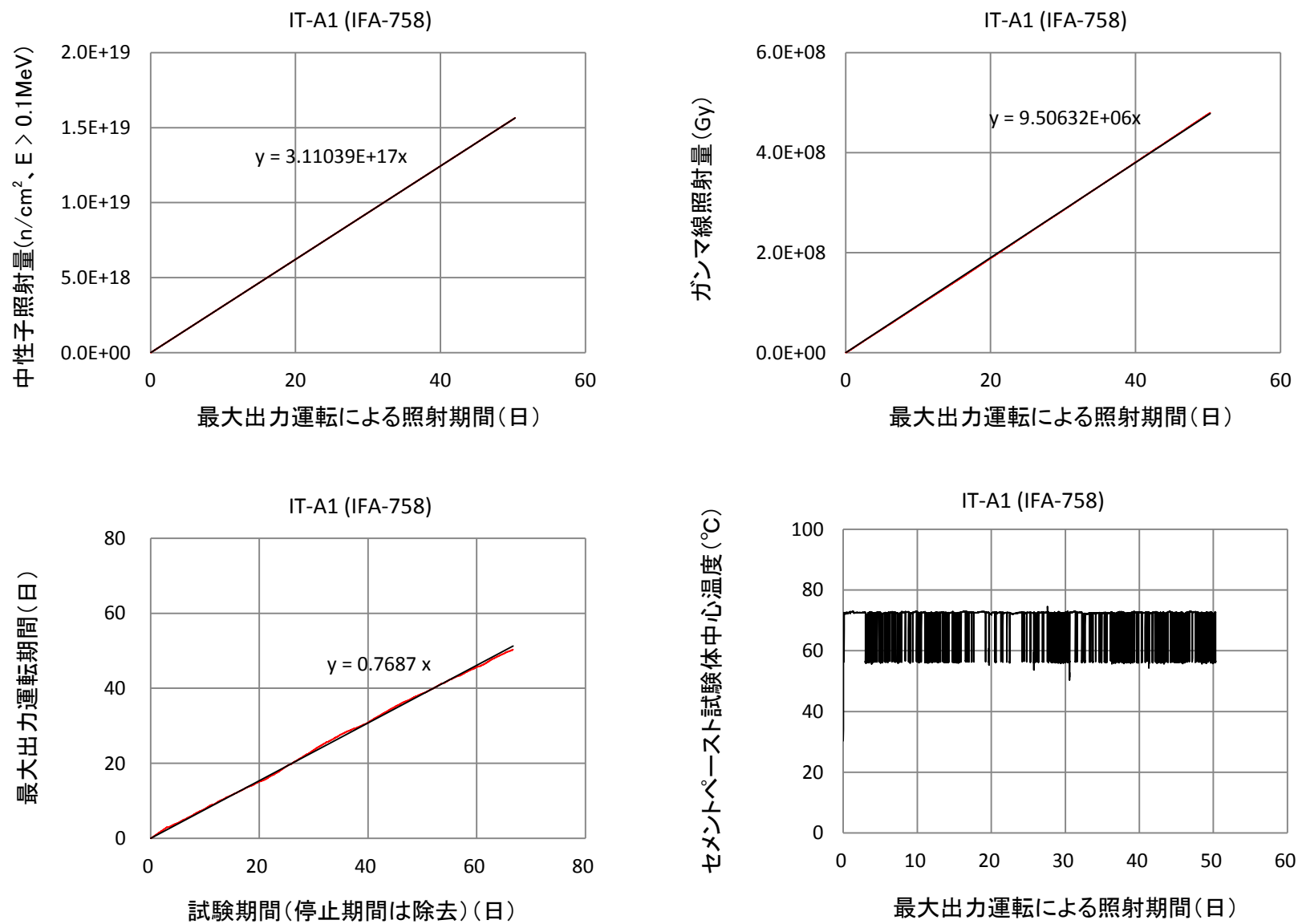


図 2.10 中性子照射の状況 (IT-A1 (IFA-758) : 照射孔 36)

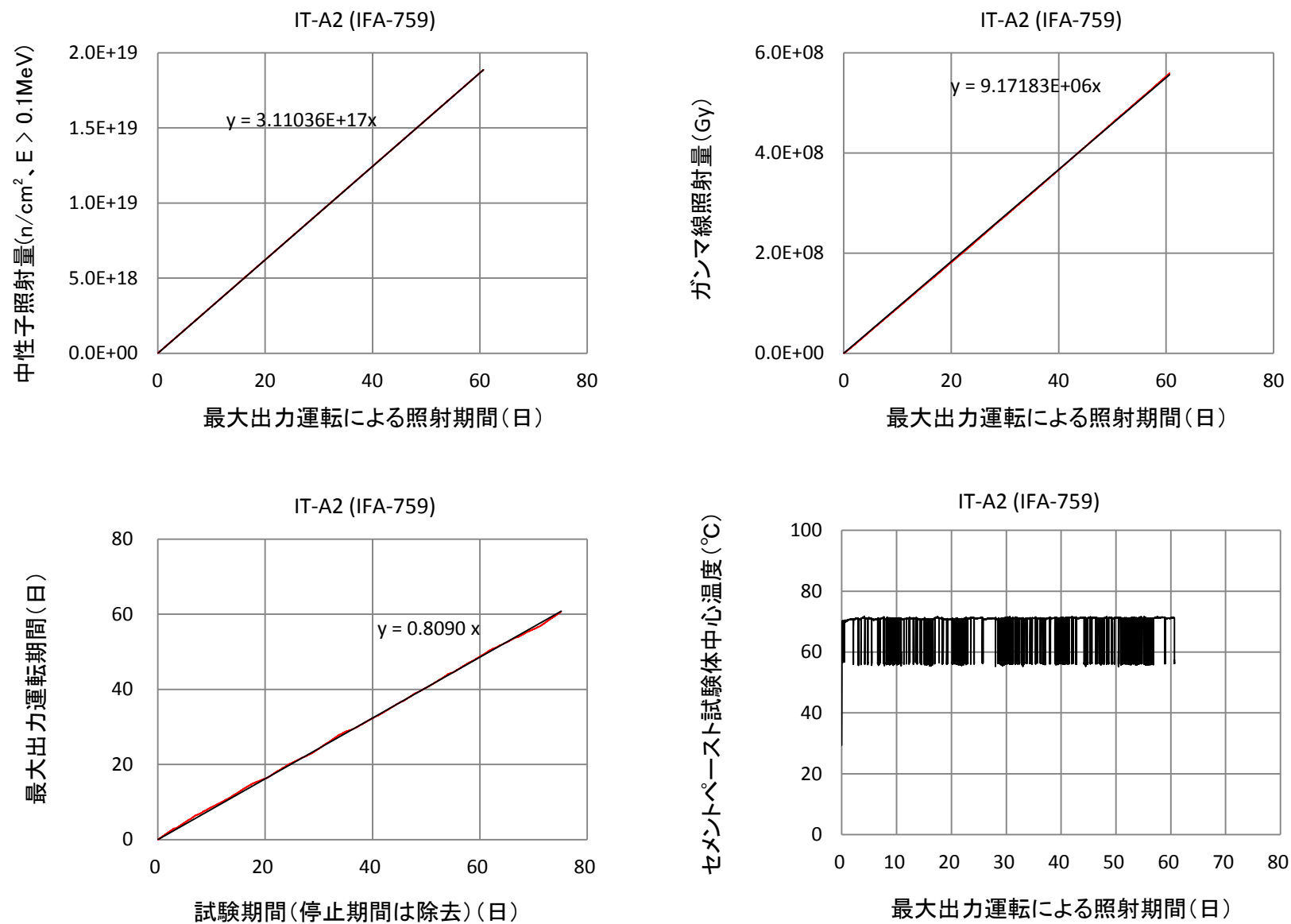


図 2.11 中性子照射の状況 (IT-A2 (IFA-759) : 照射孔 36)

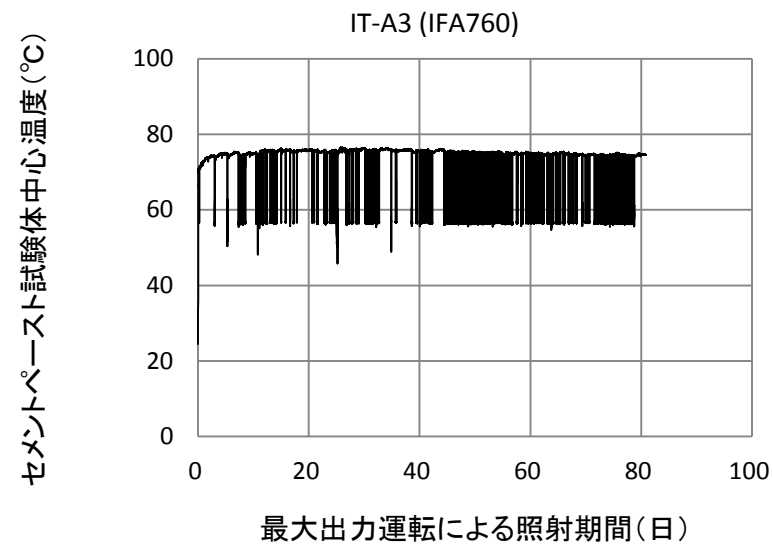
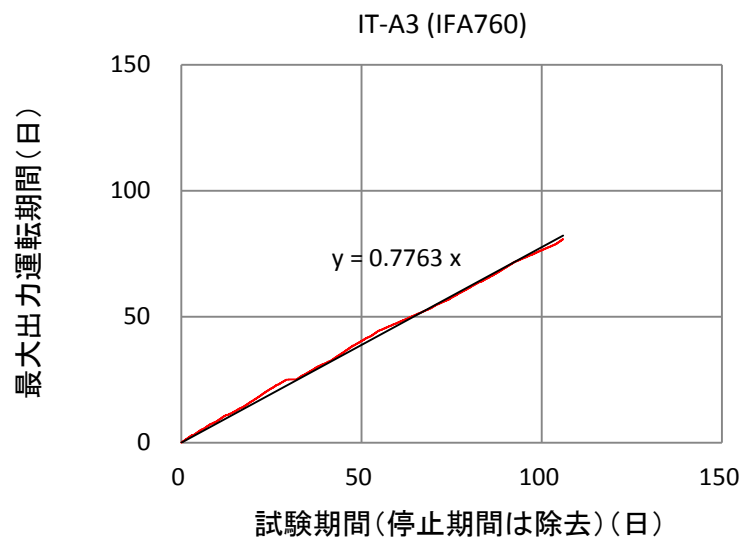
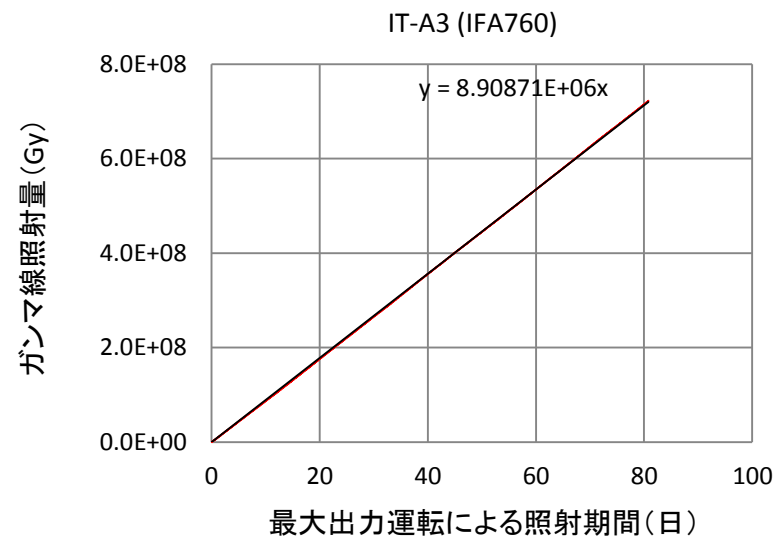
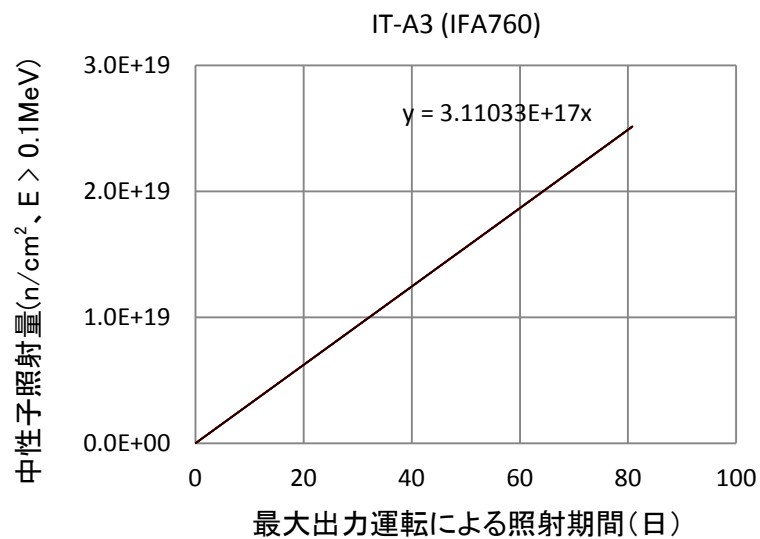


図 2.12 中性子照射の状況 (IT-A3(IFA-760) : 照射孔 36)

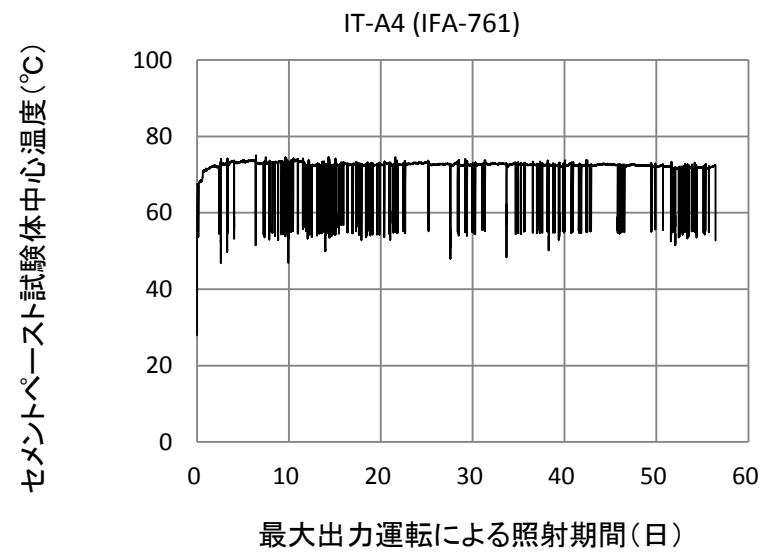
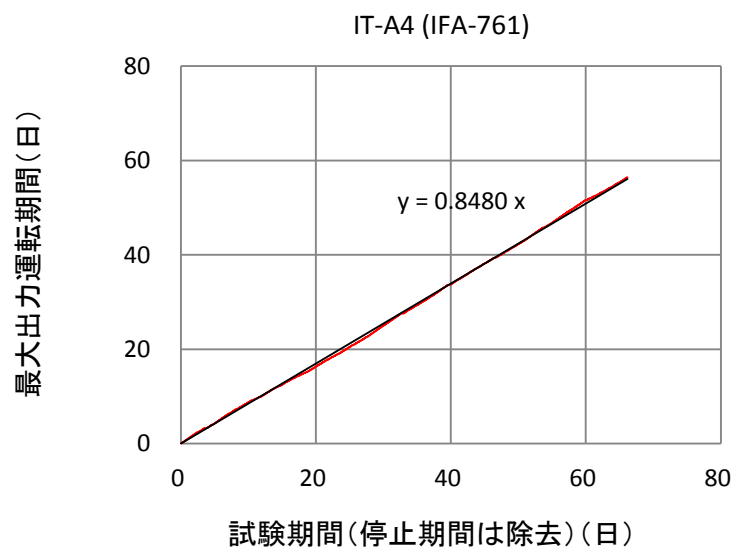
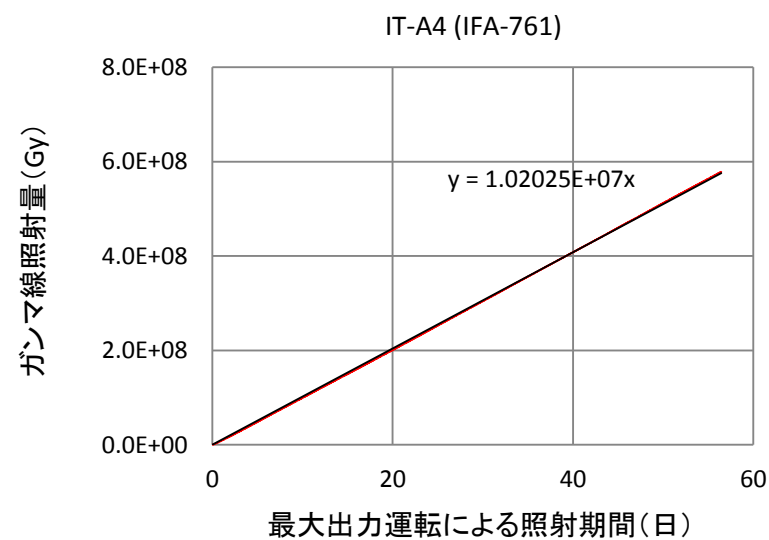
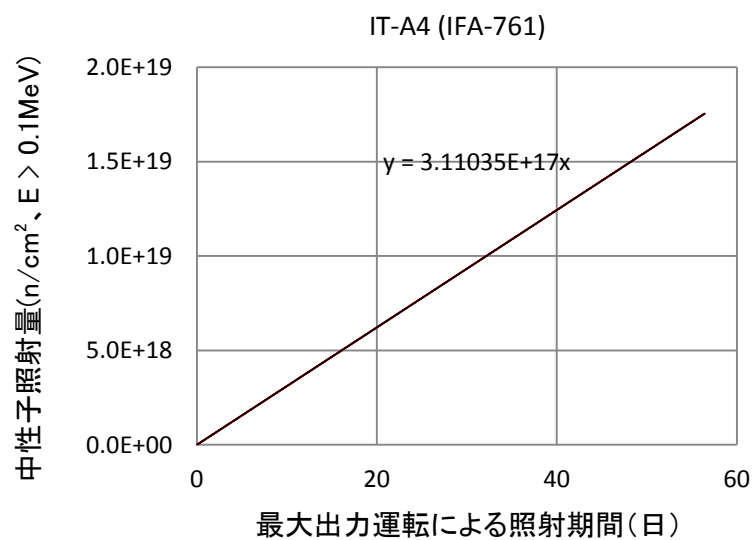


図 2.13 中性子照射の状況 (IT-A4(IFA-761) : 照射孔 36)

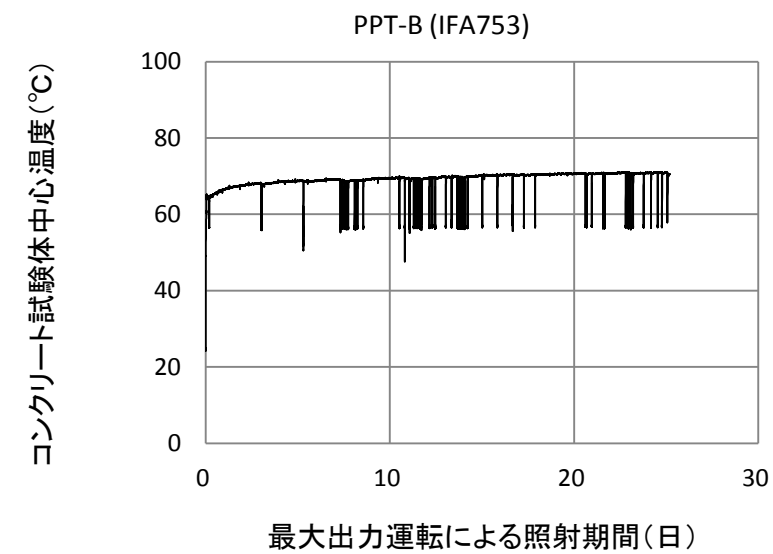
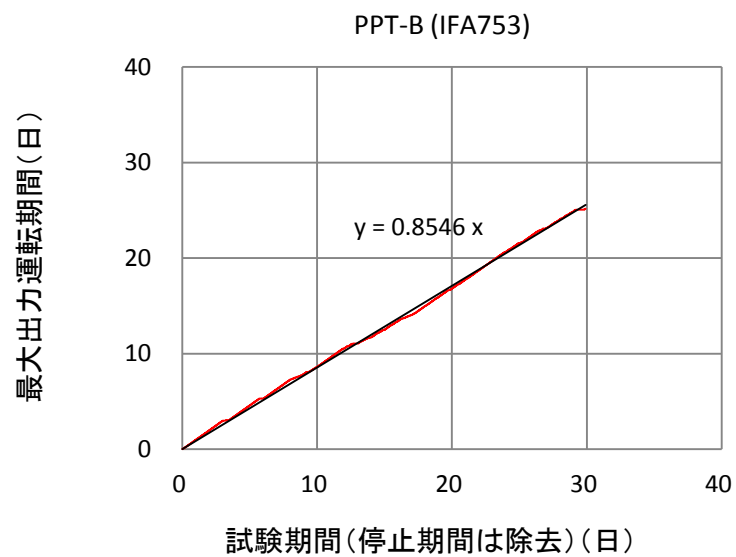
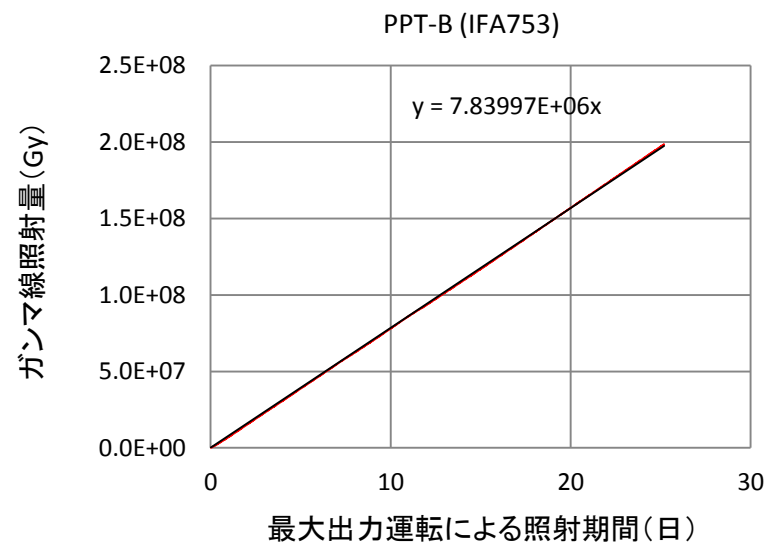
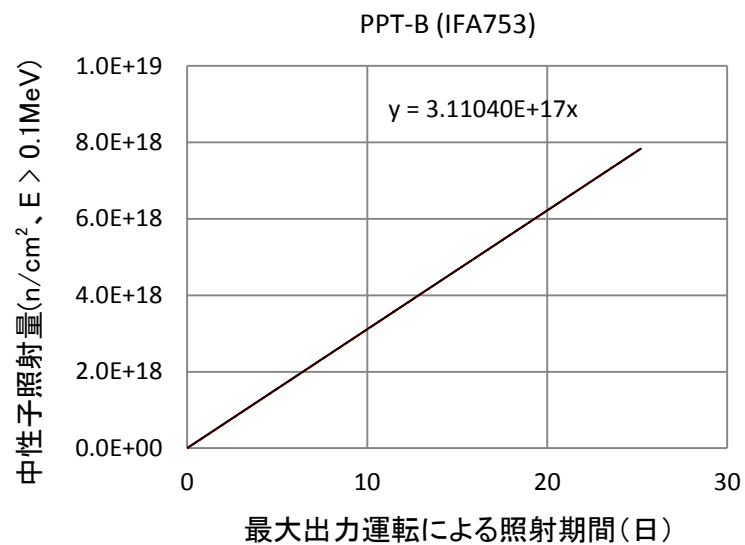


図 2.14 中性子照射の状況 (PPT-B(IFA-753) : 照射孔 52)

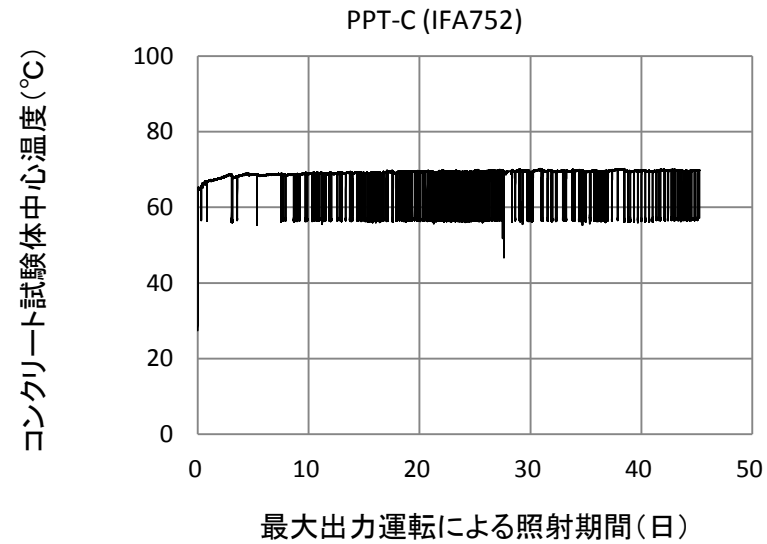
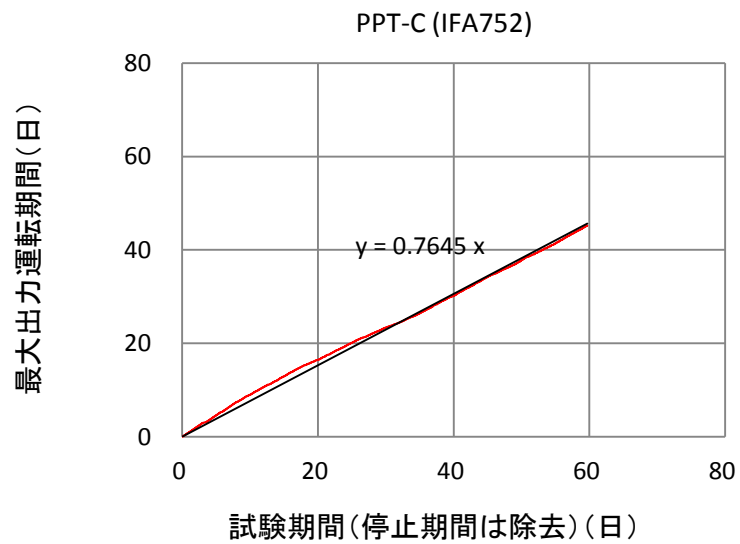
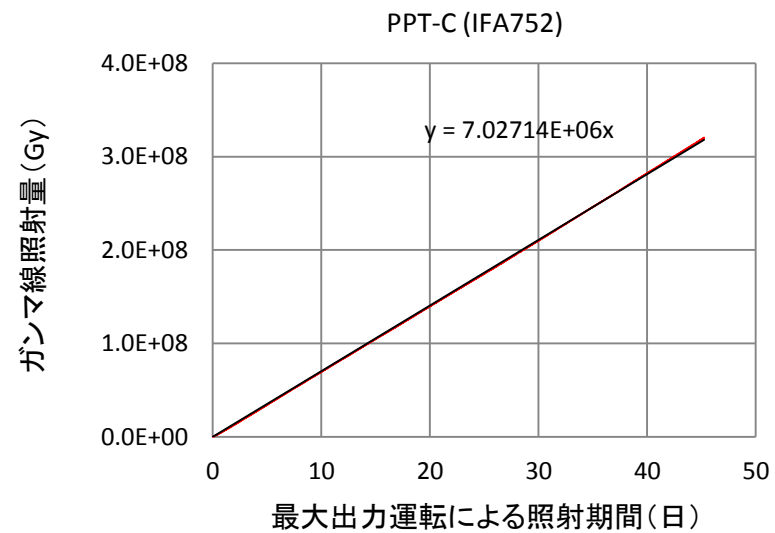
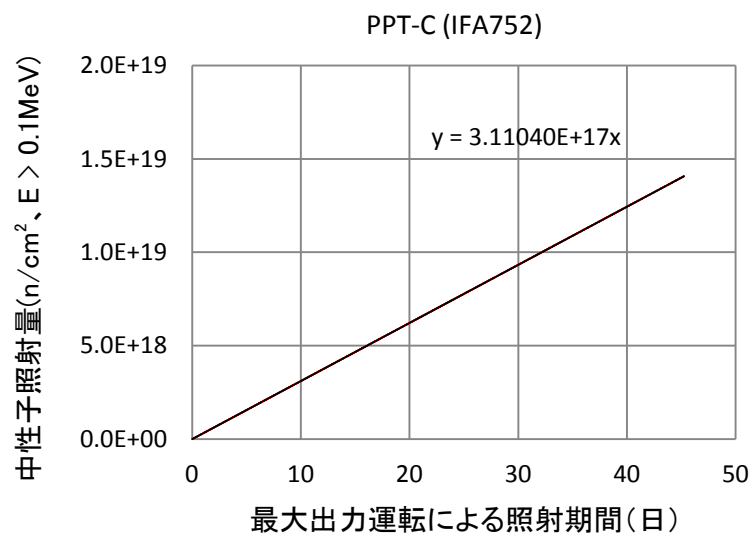


図 2.15 中性子照射の状況 (PPT-C(IFA-752) : 照射孔 36)

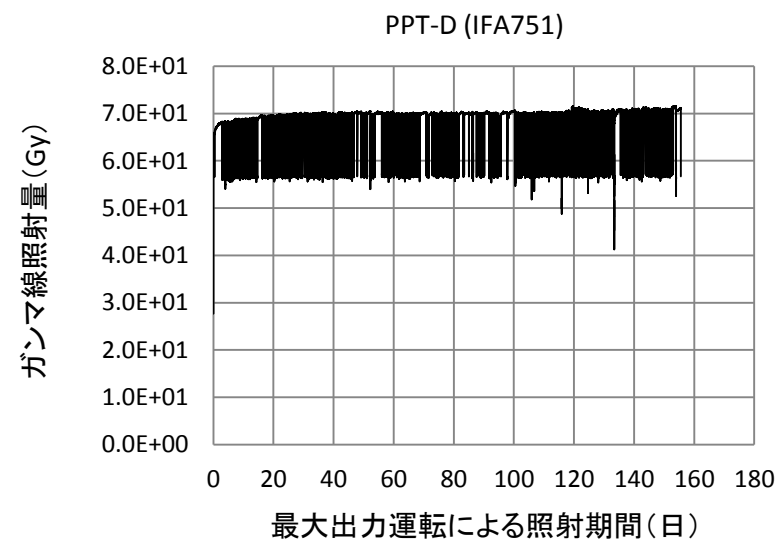
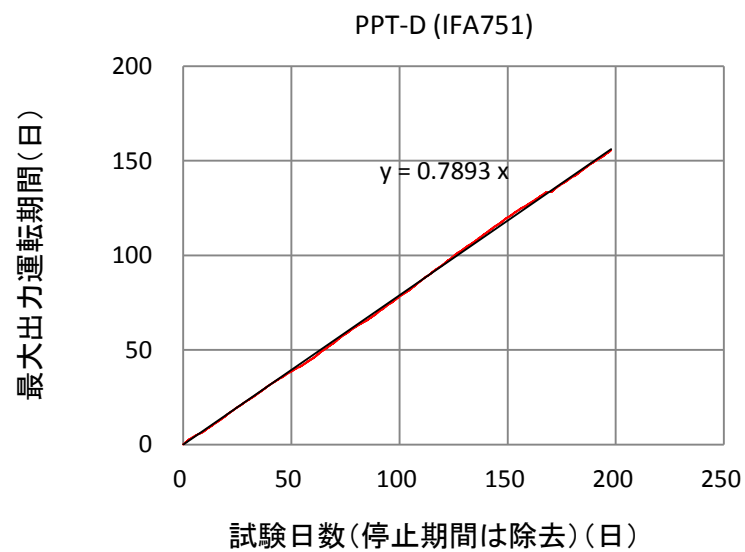
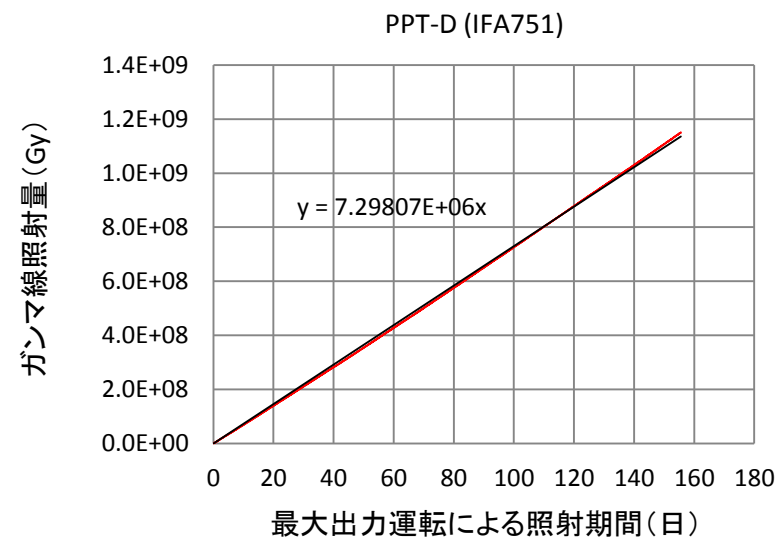
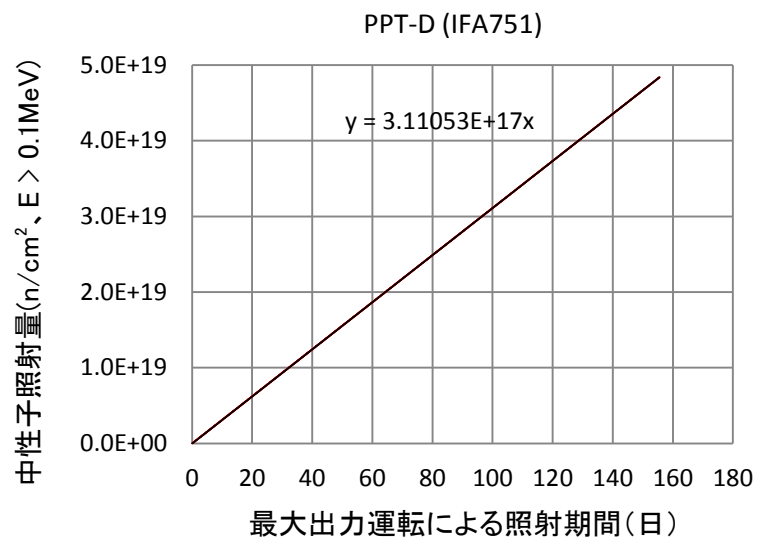


図 2.16 中性子照射の状況 (PPT-D(IFA-751) : 照射孔 36)

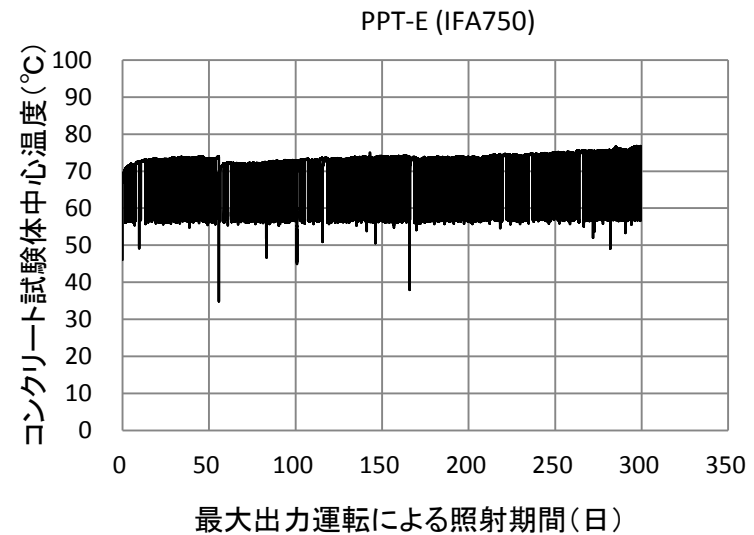
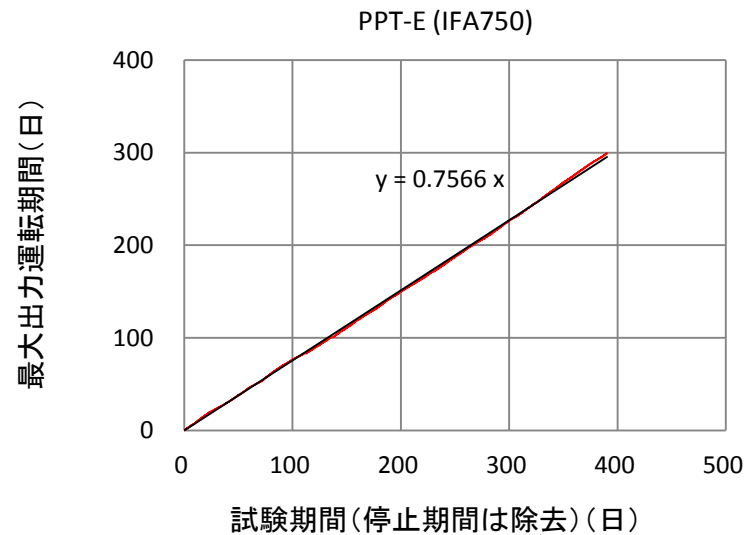
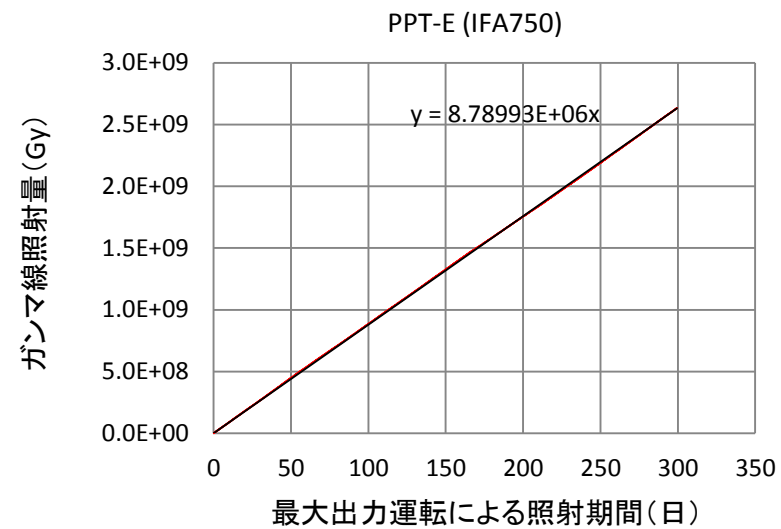
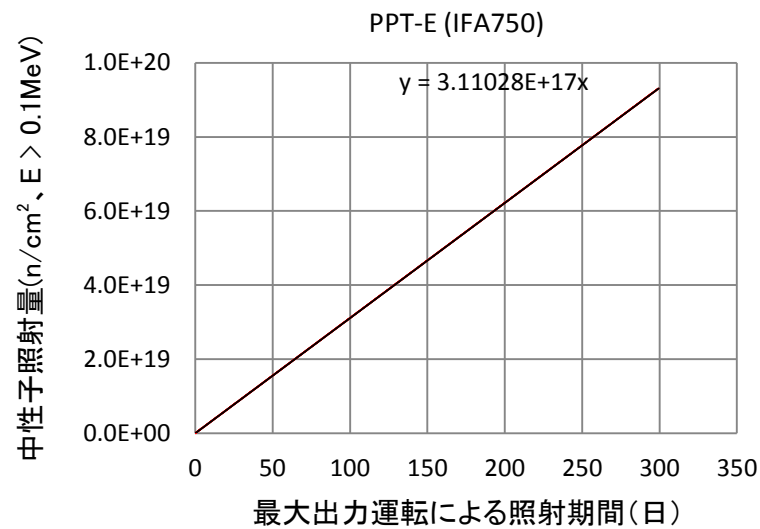


図 2.17 中性子照射の状況 (PPT-E(IFA-750) : 照射孔 52)

表 2.8 中性子照射状況のまとめ

試験 ケース	容器名	照射孔 位置	中性子(E>0.1MeV)			ガンマ線		JEEPⅡ 稼働率 (計画停止 期間を除く)	照射期間	水分条件	温度		
			中性子束	照射量 (目標値)	照射量		線量率					照射量	
					(n/cm ² /s)	(n/cm ²)			最小値		～ 最大値		(n/cm ²)
IT-A1	IFA-758	#36	3.73E+12		1.61E+19	～	1.62E+19	3.97E+02	4.80E+05	0.769	50.3	75℃乾燥	約70℃
IT-A2	IFA-759	#36	3.82E+12		1.75E+19	～	2.00E+19	3.84E+02	5.59E+05	0.809	60.7	120℃乾燥	
IT-A3	IFA-760	#36	3.73E+12		2.34E+19	～	2.60E+19	3.73E+02	7.23E+05	0.776	80.8	封緘養生	
IT-A4	IFA-761	#36	3.86E+12		1.83E+19	～	1.88E+19	4.27E+02	5.79E+05	0.848	56.4		
PPT-B	IFA-753	#52	3.72E+12	7.50E+18	7.09E+18	～	8.10E+18	3.29E+02	1.99E+05	0.855	25.2	封緘養生	
PPT-C	IFA-752	#36	3.79E+12	1.50E+19	1.27E+19	～	1.48E+19	2.95E+02	3.20E+05	0.765	45.3		
PPT-D	IFA-751	#36	3.56E+12	3.00E+19	4.09E+19	～	4.78E+19	3.08E+02	1.15E+06	0.789	155.6		
PPT-E	IFA-750	#52	3.72E+12	6.00E+19	8.17E+19	～	9.62E+19	3.67E+02	2.63E+06	0.757	299.4		

JEEP II 稼働率：定期的な停止期間を除いた稼働率（稼働期間中の照射サンプルの入れ替えによる停止などを考慮した稼働率）

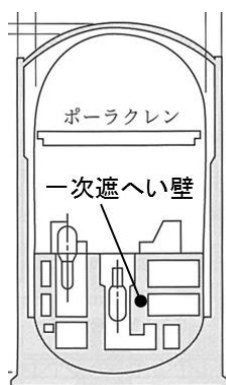
表 2.9 加熱試験状況のまとめ

試験ケース	容器名	対応する 照射試験	温度	試験状況
H1-3	IFA-757. 1	PPT-B	照射試験での コンクリート 中央最高温度	加熱完了
H1-6	IFA-757. 2	PPT-C		加熱完了
H1-12	IFA-757. 3	PPT-D		加熱完了
H2-24	IFA-756	PPT-E		加熱完了
H3-3	IFA-755. 1	PPT-B	照射試験での コンクリート 断面内平均温度	加熱完了
H3-6	IFA-755. 2	PPT-C		加熱完了
H3-12	IFA-755. 3	PPT-D		加熱完了
H4-24	IFA-754	PPT-E		加熱完了

表 2.10 実機条件と照射試験条件との比較

		実機条件* ¹	照射試験条件	
			JEEP II * ²	JAEA 高崎研究所* ³
高速中性子束	n/cm ² /s	4.4×10 ¹⁰	3.60×10 ¹² (82 倍)	
ガンマ線量率	kGy/h	0.51	3.0×10 ² ~4.3×10 ² (590~840 倍)	

() : 実機条件に対する試験条件の倍率



*1 : PWR の一次遮蔽壁での条件 (E > 0.11MeV)

稼働率を考慮し、60 年間の積算量より中性子束、ガンマ線線量率を評価 (稼働率 0.75 と仮定)

$$\text{中性子} : 6.2 \times 10^{19} / 60 / 365 / 24 / 3600 / 0.75 = 4.4 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2/\text{s}$$

$$\text{ガンマ線} : 2.0 \times 10^5 / 60 / 365 / 24 / 0.75 = 0.51 \text{ kGy/h}$$

*2 : JEEP II における照射試験での実測値 (E > 0.1MeV)

*3 : JAEA 高崎研究所でのガンマ線照射試験における実測値の最大値

2. 1. 3 試験・計測方法

(1) 照射試験中の計測

中性子束やガンマ発熱の計測は、図 2. 18 に示すように、照射キャプセルにあらかじめ設置してある装置により計測する。試験体の温度は、キャプセル最上部の試験体に設置した熱電対で計測する。

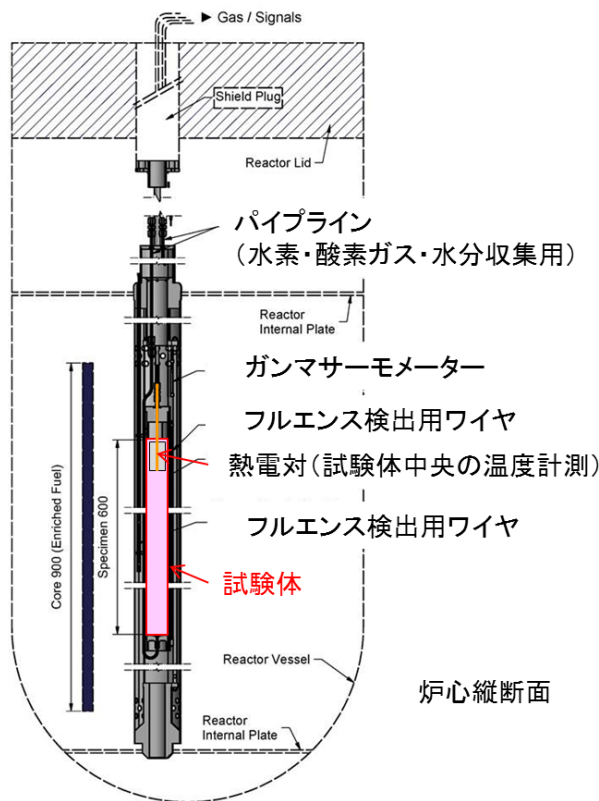


図 2. 18 照射試験中の計測位置

ガンマ線照射の場合は、流量計を用いてガス発生量を計測し、定期的なガスサンプルをガスクロマトグラフィーにより分析するとともに、水分吸収材を含む装置を系統に設置し、吸収材の質量差で水分量を計測した。発生する水蒸気、水素・酸素を容器から計測系へ移送するために Ar ガスを用いていたが、実機条件よりも乾燥の程度が厳しいとの指摘があったため、中性子照射試験では、キャリアガスを用いない計測系とした。

図 2. 19 に中性子照射試験における初期の水蒸気捕集システムを示す。中性子照射により発生するガス（水素および酸素）によって、キャプセルから放出バルブまでの閉鎖系統領域が加圧され、系統内部の圧力が上昇する。圧力が 1.25Bar まで上昇すると、放出バルブを開放し、圧力を開放する。発生ガス量は、流量計により計測するとともに、圧力と系統内部の体積より数値計算により評価する。

また、キャプセル内部で結露し、発生ガスの排出がスムーズでなくなった場合や系統内部の配管で水が凝縮して、発生ガスや水蒸気の流れが悪くなる場合等に対応するために、ヘリウムガスによるフラッシュラインを設置し、不測の場合に備えた。

水分量は、当初、湿度計を用いて、発生ガス量と同様の方法で評価する計画であったが、湿度計測タンク内の湿度が 100%となるとともに多くの水蒸気が結露し、水分量を正確に計測できないことが判明した。そこで、発生する多くの水蒸気を捕集するために新たに水蒸気凝縮捕集容器（以下、コンデンサという）を設置した。

図 2. 20 に改良後の水蒸気捕集システムを、図 2. 21 にコンデンサの外観を示す。コンデンサ上部は冷却効率を上げるためにアルミニウムブロックとし、吸気・排気管はこの部分に連結した。ブロックの下部には排水バルブ付きのガラス管を設置し、凝縮した水分量を計測できる構造とした。また、コンデンサでほとんどの水分が凝縮されるが、コンデンサの下流側の相対湿度は 30～40%程度となっていたので、コンデンサで凝縮できない水分を捕集するために水蒸気吸着容器を設置し、さらに、その下流ではガス捕集容器に湿度計を設置し、湿度と流量から放出される水分量を評価した。

発生したガスについては、定期的にサンプリングラインからサンプリングを行い、ガスクロマトグラフィーで、ガス組成を分析した。

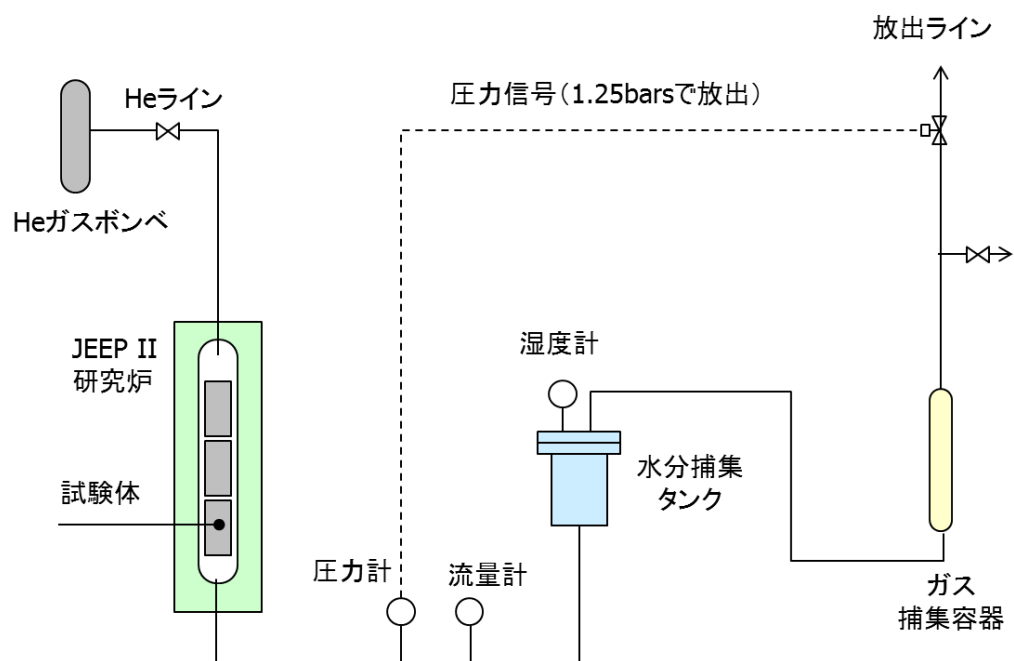


図 2.19 初期の水蒸気捕集システム

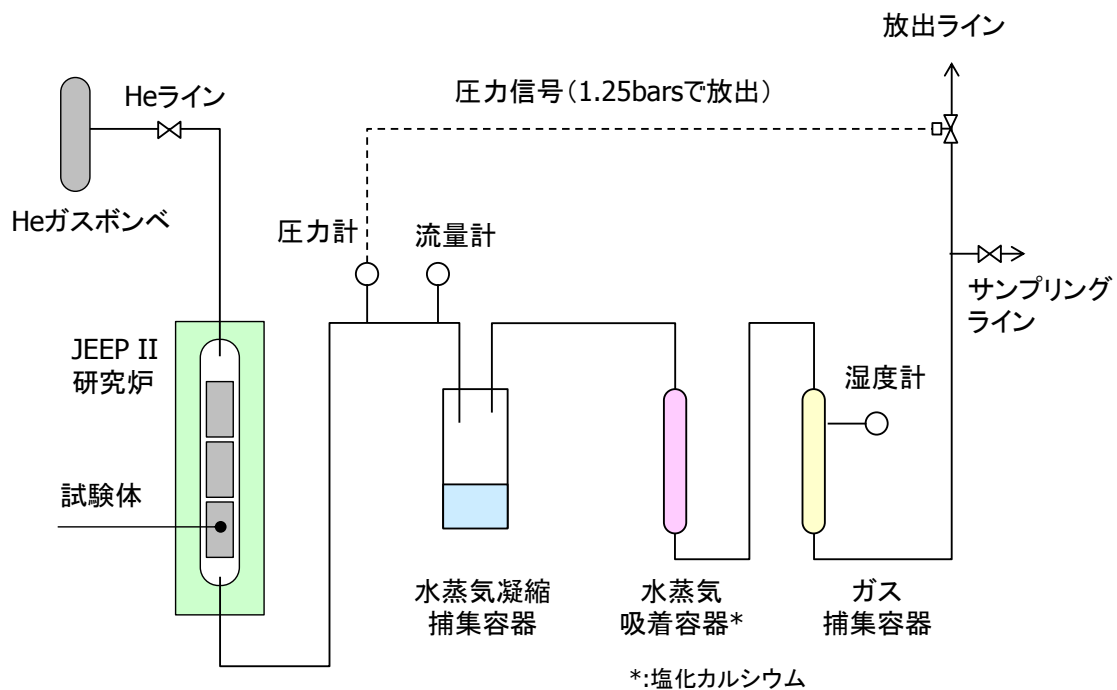


図 2.20 改良後の水蒸気捕集システム



図 2. 21 水蒸気凝縮捕集容器（コンデンサ）

(2) 寸法計測

試験体については、試験前後で寸法計測を行う。寸法計測位置を図 2. 22 に示す。
直径の計測は、試験体の高さ中央位置で、5 点の計測を行い、その平均値を取る。
高さの計測は、異なる位置で 3 回の計測を行い、その平均値を取る。

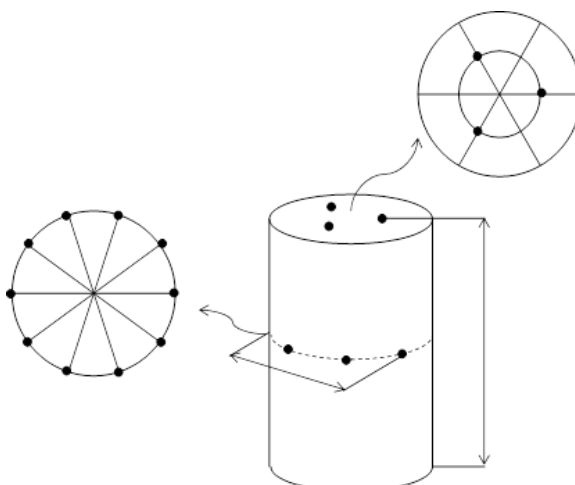


図 2. 22 寸法計測位置

2. 2 相互作用試験

2. 2. 1 試験概要

(1) 中性子照射

中性子照射による最終的な目的は、放射線がコンクリート特性に及ぼす影響の実験的な把握、劣化メカニズムの解明、さらに放射線に対する健全性評価手法の構築であるが、劣化メカニズムを解明するためには、中性子とセメントペースト/骨材/コンクリートとの相互作用について検討することが重要である。

ガンマ線照射試験においても、物理特性試験を実施する前に、相互作用試験を行いガンマ線がセメントペースト中の水分に及ぼす影響について重要な知見を取得した。

これまでまとめてきた中性子とセメントペースト/骨材との相互作用に関する検討（放射線化学、放射線物理、鉱物学などの専門家とのインタビューなど）により、中性子とセメントペーストおよび骨材の水分相と固体相との関係について、表 2. 11 に示す仮説を設定している。

表 2. 11 中性子照射に関する作業仮説

		中性子照射に関する作業仮説
セメントペースト	水	・電離作用により水を分解し、ペーストの乾燥を促進する。
	固体	・中性子による影響は、主としてエネルギー沈着による発熱によるものであり、収縮を生じさせるが、強度への影響は小さい。
骨材	水	
	固体	・中性子照射により、岩石鉱物がメタミクト化し、骨材が膨張する。 ・石英の感度が高く、骨材の膨張は石英含有量に大きな影響を受ける。 ・イオン結合性の石灰石などはメタミクト化が進行しにくい。
コンクリート		・コンクリート中でセメントペーストが収縮し、骨材が膨張することでひび割れが蓄積し、強度・剛性が低下する。

相互作用試験は、中性子とセメントペーストとの相互作用の把握（中性子による速度効果と水分の分解挙動の把握）を目的として、セメントペースト試験体を圧力容器に封入し、中性子照射を行い、発生する水蒸気や水素ガスの計測を行なう。相互作用試験のパラメータとしては、水分の分解挙動を把握するために、セメントペースト中の水分条件（3 水準）とし、中性子束と温度は一定とする。計画当初は、速度効果を把握するために高速中性子束をパラメータとしていたが、使用している照射孔では、十分な中性子束の違いを出す配置ができないことから、中性子束をパラメータとした試験は行わない。なお、IT-A3 については水蒸気の捕集が十分ではなかったため、IT-A4 では再度水分条件が封緘の試験体を用いて相互作用試験を行い、水分放出量と質量変化の関係を説明できるデータの取得を目指す。表 2. 12 に、相互作用試験における試験条件と試験体配置の一覧を示す。

照射容器には、5 体の $\phi 4 \times 6\text{cm}$ 試験体を収納することができるが、容器の中央部から端部に向かって、中性子束が低下するため、中央 3 体を本試験体とし、上部 1 体を温度計測用の試験体、下部 1 体をダミー試験体（アルミニウム製）とする。

(2) 照射後試験

中性子照射による影響を把握するために、照射後試験（PIE : Post Irradiation Examination）を行う。なお、中性子照射によりサンプルは放射化するため、放射線による被曝を低減するために、約 2 か月間放置し放射能レベルを低減させる。

中性子とセメントペーストの相互作用を把握するためには、下記の PIE を実施することが望ましい。

- | | |
|--------------------|---|
| ・ 質量変化、寸法変化 | : 密度および体積の変化 |
| ・ 強度 | : 機械的特性の変化 |
| ・ 細孔径分布 | : 空隙構造の変化 |
| ・ 自由水量、結合水量 | : 水の挙動の変化（中性子とガンマ線の影響の違い） |
| ・ XRD | : 水和物組成の変化 |
| ・ TG-TDA | : 水和生成物（ポルトランダイト）の変化 |
| ・ SEM | : 水和生成物（主に C-S-H）の変化 |
| ・ 水蒸気吸着等温線 | : 空隙構造の変化 |
| ・ NMR | : 水和生成物（C-S-H）のアトミックスケール（0.1nm スケール）の変化 |
| ・ 小角 X 線 or 中性子線散乱 | : 水和生成物（C-S-H）のナノスケール（1nm スケール）の変化 |

中性子照射は、ノルウェーエネルギー技術研究所（IFE）の JEEPⅡ で実施しているため、PIE も同研究所が保有している施設で実施できれば効率的であるが、同研究所はコンクリートを専門としている機関ではないため、実施できる PIE は限定的である。また、全ての PIE の実施は理想的であるが、限られたリソースの中では現実的ではない。そこで、ノルウェーで実施する PIE を以下に示す。

相互作用試験（Interaction test：IT）

- ・セメントペースト：質量変化、寸法変化

表 2.12 相互作用試験の試験条件と試験体配置

Type of test				Interaction test			
Container ID				A1	A2	A3	A4
Neutron Flux				F1 n/cm ² /s	F1 n/cm ² /s	F1 n/cm ² /s	F1 n/cm ² /s
Temperature				Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere
Period (M)				2	2	2	2
Moisture condition of specimens				dried at 120 dgree	dried at 75 dgree	Sealed	Sealed
Specimen Arrangement				1xΦ4x6cm Cement paste (Thermo couple installed) 3xΦ4x6cm Cement paste 1xΦ4x6cm Dummy	1xΦ4x6cm Cement paste (Thermo couple installed) 3xΦ4x6cm Cement paste 1xΦ4x6cm Dummy	1xΦ4x6cm Cement paste (Thermo couple installed) 3xΦ4x6cm Cement paste 1xΦ4x6cm Dummy	1xΦ4x6cm Cement paste (Thermo couple installed) 3xΦ4x6cm Cement paste 1xΦ4x6cm Dummy
Number of specimens	φ 4x6cm	Cement paste	TC	1	1	1	1
			CP	3	3	3	3
		Concrete	TC	0	0	0	0
			CCS	0	0	0	0
	CG		0	0	0	0	
	φ 1x1cm	White cement paste	WCP	0	0	0	0
		Aggregate	E	0	0	0	0
			F	0	0	0	0
			G	0	0	0	0
			H	0	0	0	0
			J	0	0	0	0
			K	0	0	0	0
Note							

*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,G,H,J,K aggregate

2. 2. 2 試験結果

(1) 照射試験結果

1) 試験ケース IT-A1 (IFA-758)

自由水量が水の放射線分解に及ぼす影響を把握するために、試験ケース IT-A1 (IFA-758) では、75℃で乾燥させ多くの自由水を放出した試験体を用いて中性子照射による相互作用試験を実施した。

図 2. 23 に示すように原子炉の出力は、約 1.9MW 程度となっている。また、炉は試料の交換等のために、比較的頻繁に ON/OFF を繰り返していることがわかる。図 2. 24 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。冷却水の温度は 52℃に制御され、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇し、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却され、炉に送り込まれる。図 2. 25 にセメントペースト試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 72℃程度となっている。図 2. 26 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.115W/g となっているが、時間経過に伴って若干上昇傾向が見られる。

図 2. 27 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1.25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めているという設定で計測システムを運用する計画としている。しかし、本試験ケースでは圧力上昇の速度が非常に遅く、1.25bar までの圧力上昇を待っていると発生ガスの成分分析の機会を失う危惧があったので、1.25bar に到達するまえにサンプリングを行った。そのために、照射期間全体を通して圧力は 1.25bar に達していない。図 2. 28 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 2. 29 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 2. 30 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.60×10^{12} n/cm²/s、ガンマ線量率は 397kGy/h であった。図 2. 31 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 2. 32 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。75℃乾燥のセメントペースト試験体を用いているので、水蒸気の放出は非常に少なく、相対湿度は 20～30%となっている。

図 2. 33 および図 2. 34 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 35 および図 2. 36 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 37 および図 2. 38 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 39 および図 2. 40 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 41 に、水分放出量の時間変化を示す。

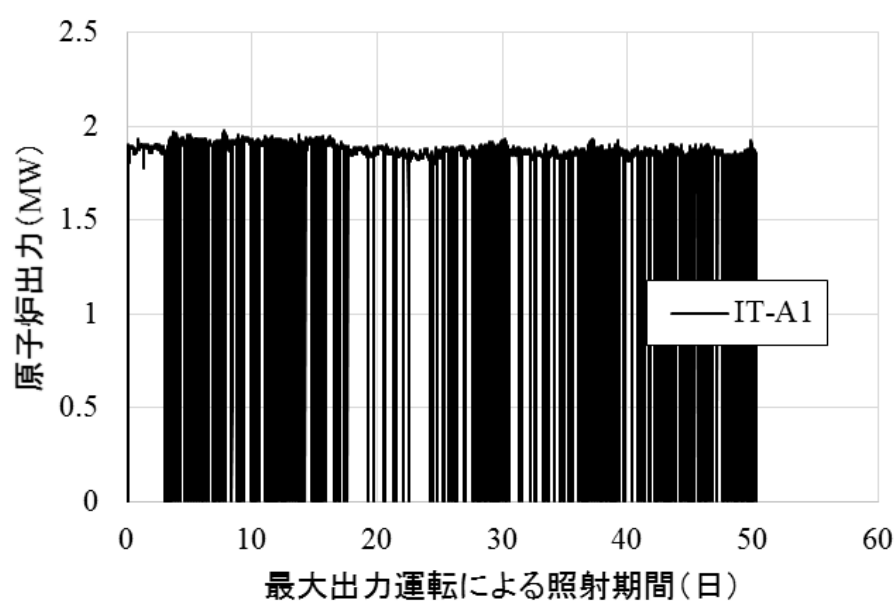


図 2.23 原子炉出力の変化

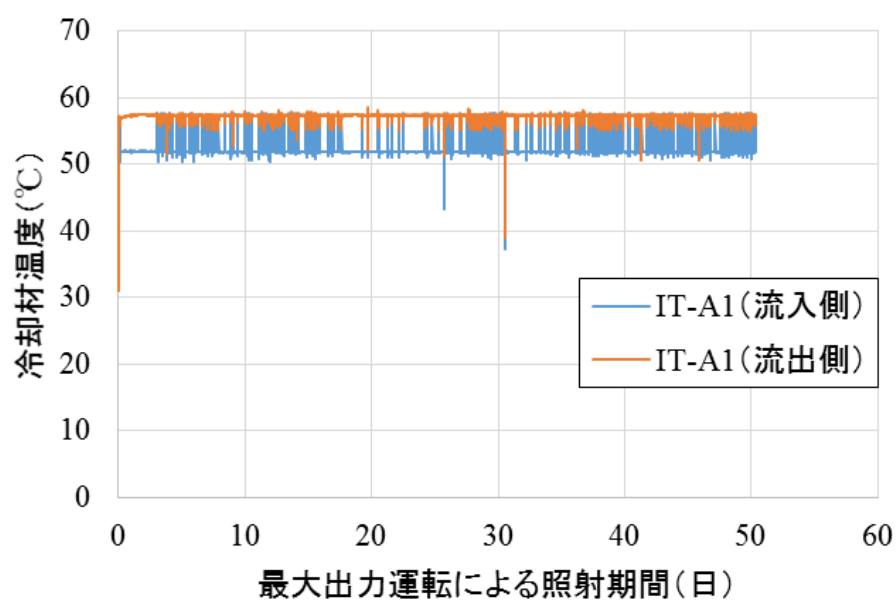


図 2.24 原子炉冷却材の温度変化

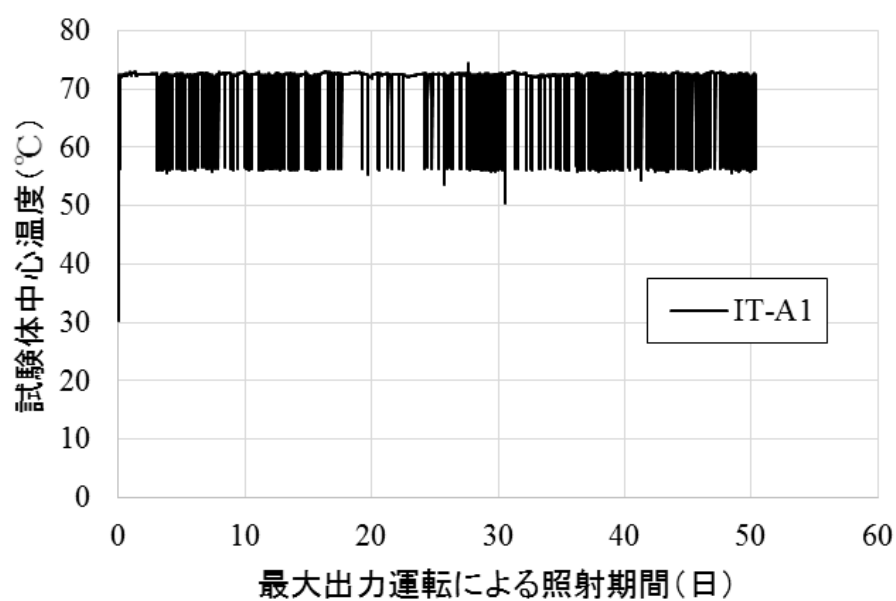


図 2.25 セメントペースト試験体の中心温度の時間変化

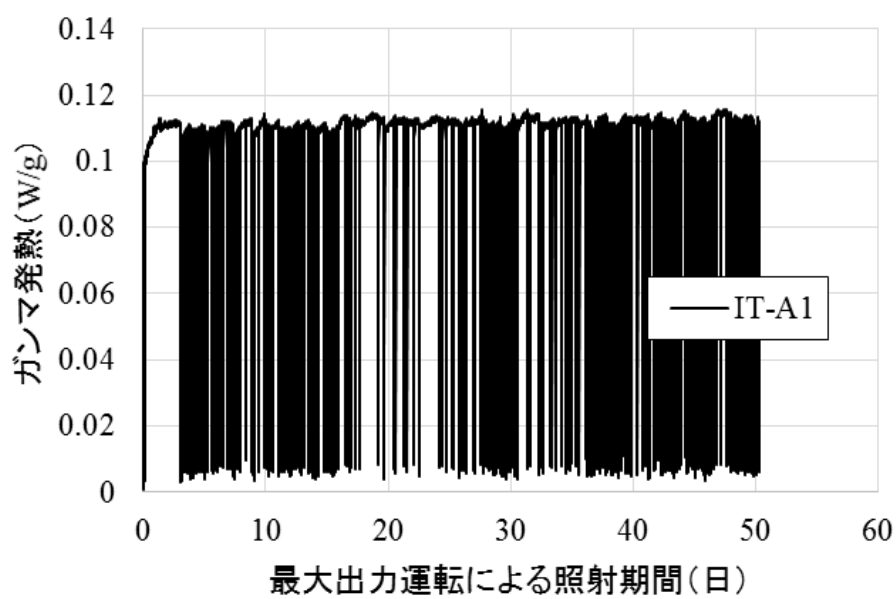


図 2.26 ガンマ発熱の時間変化

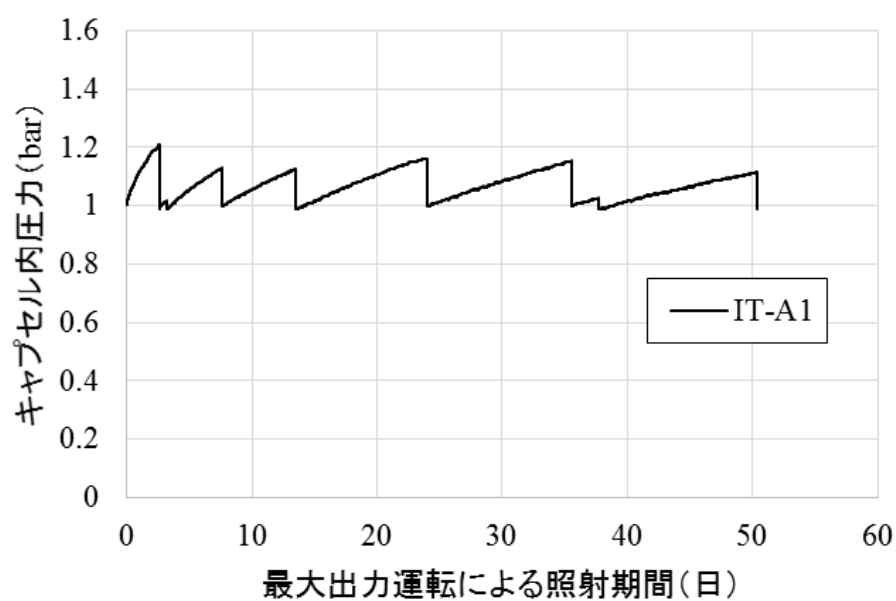


図 2.27 ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

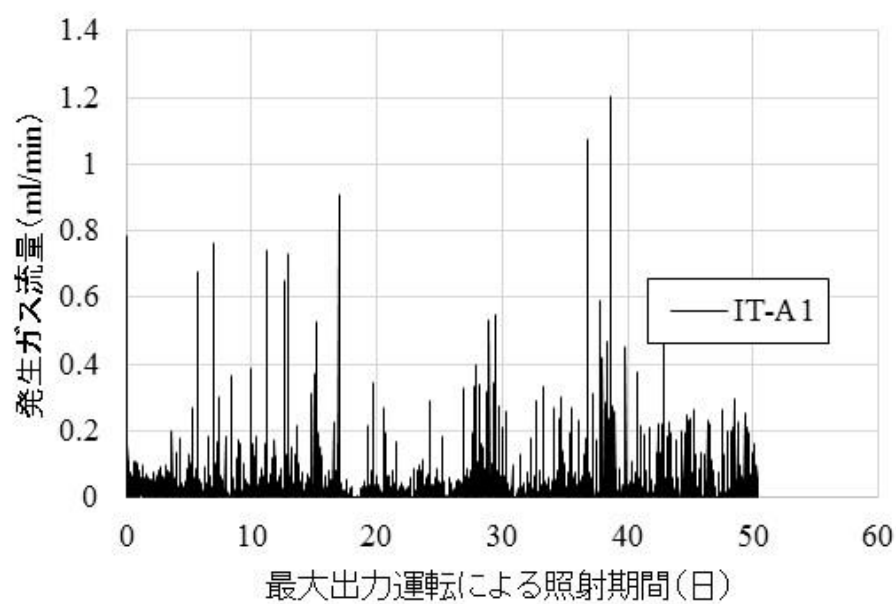


図 2.28 発生ガス流量の時間変化

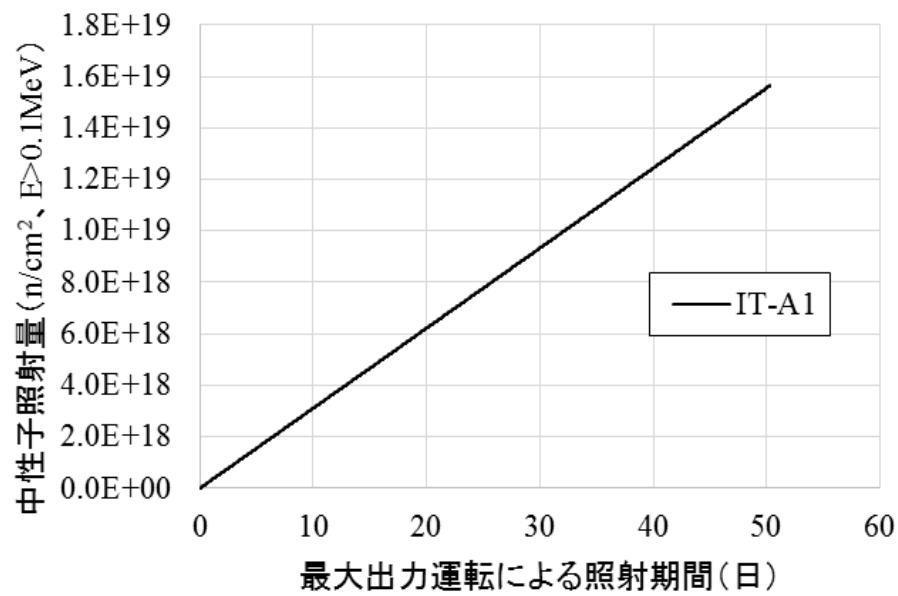


図 2. 29 中性子照射量の時間変化

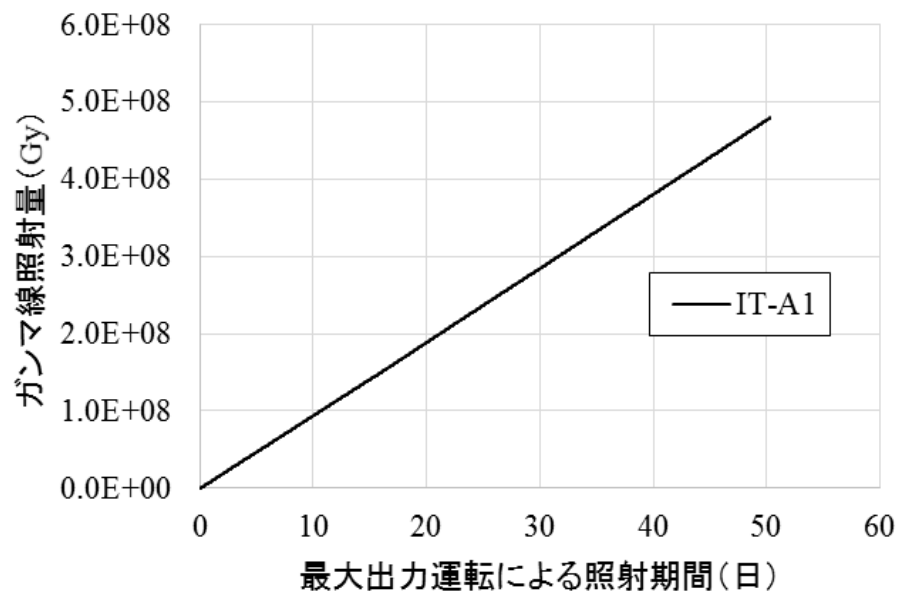


図 2. 30 ガンマ線照射量の時間変化

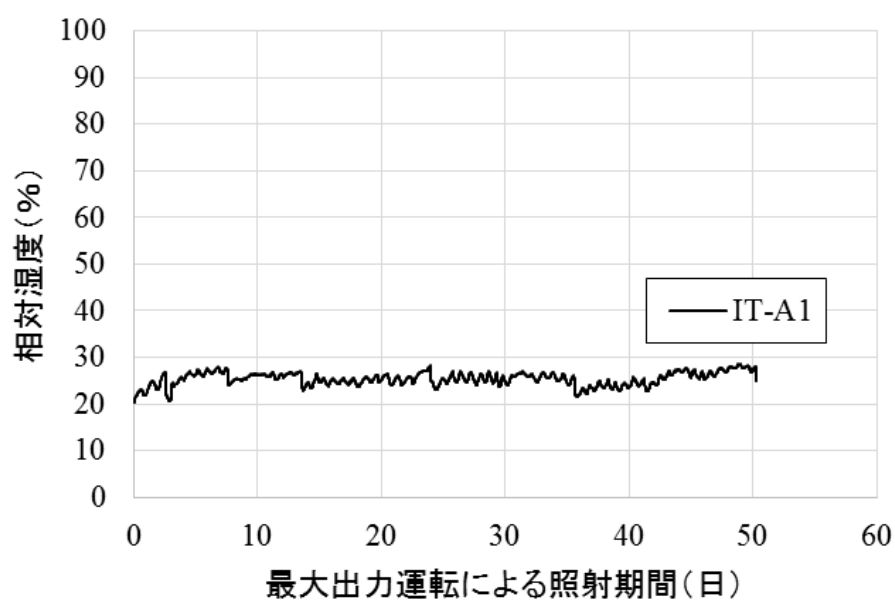


図 2.31 炉外の計測系内相対湿度の時間変化

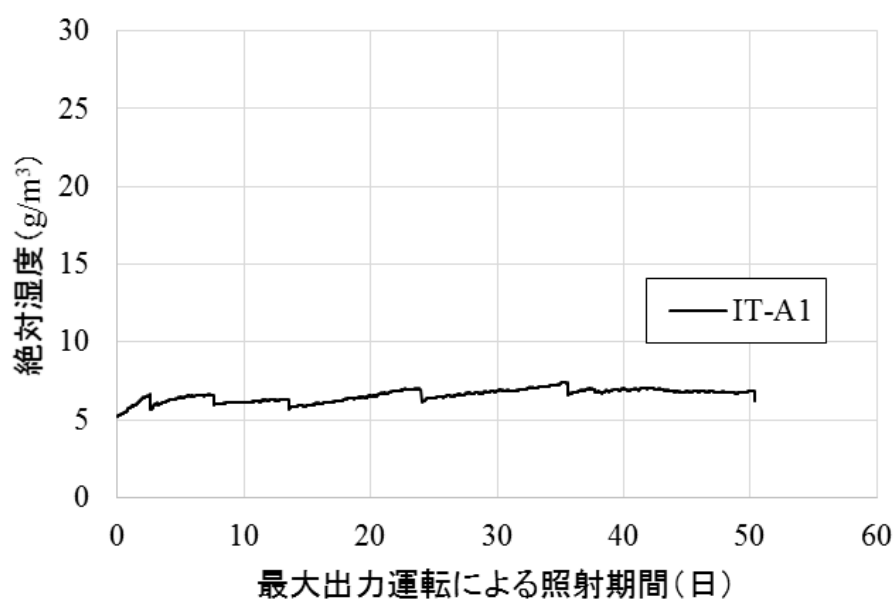


図 2.32 炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

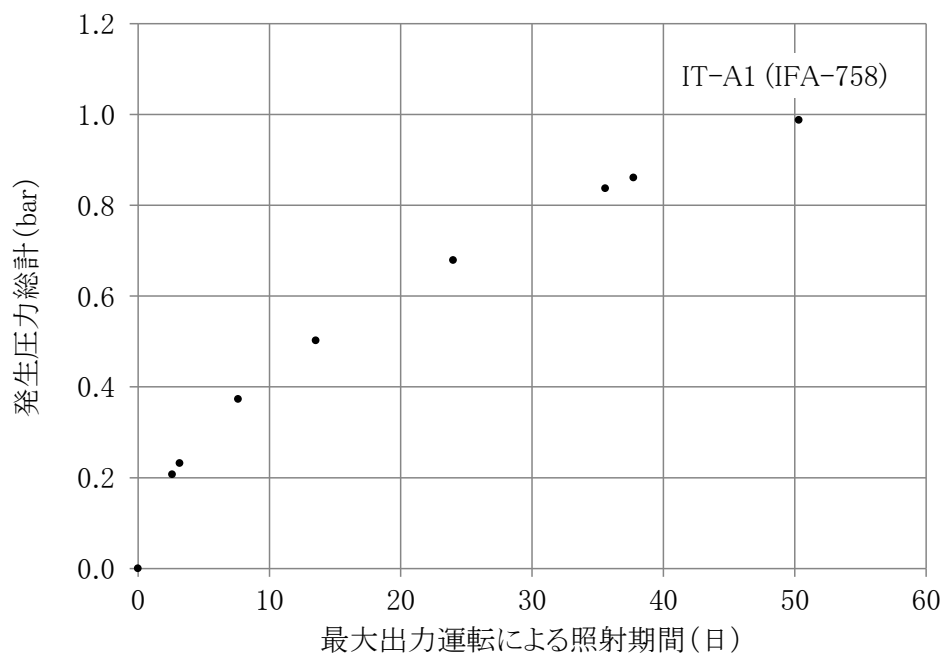


図 2. 33 発生圧力総計の時間変化

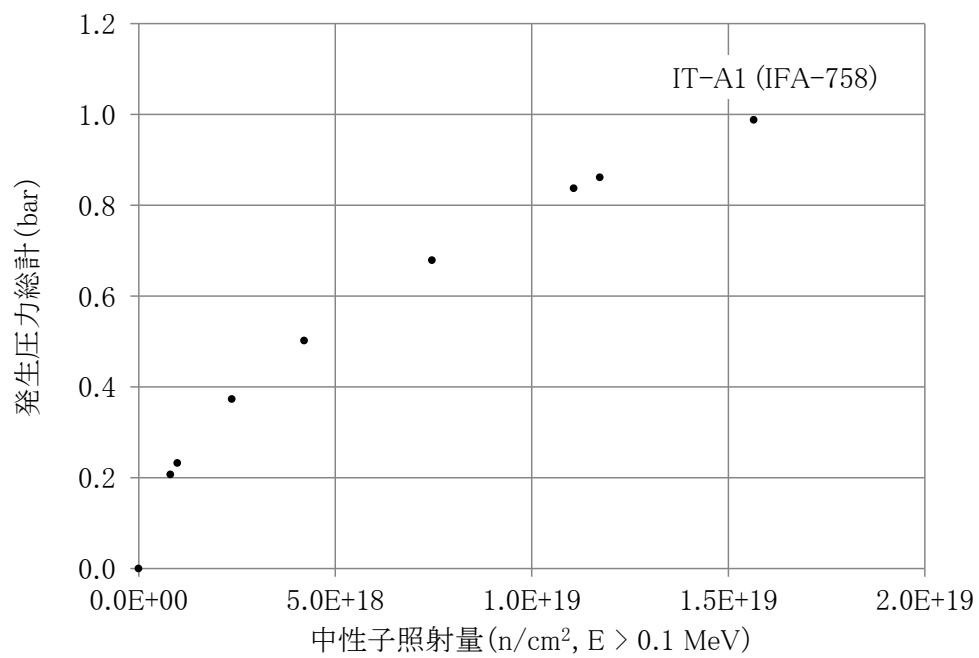


図 2. 34 発生圧力総計の照射量に対する変化

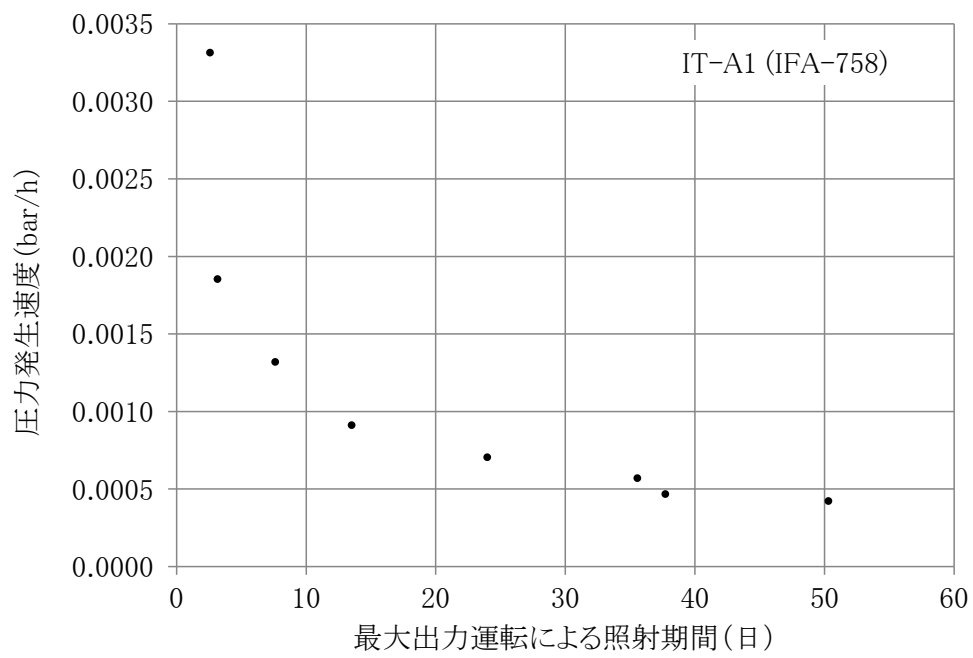


図 2.35 圧力発生速度の時間変化

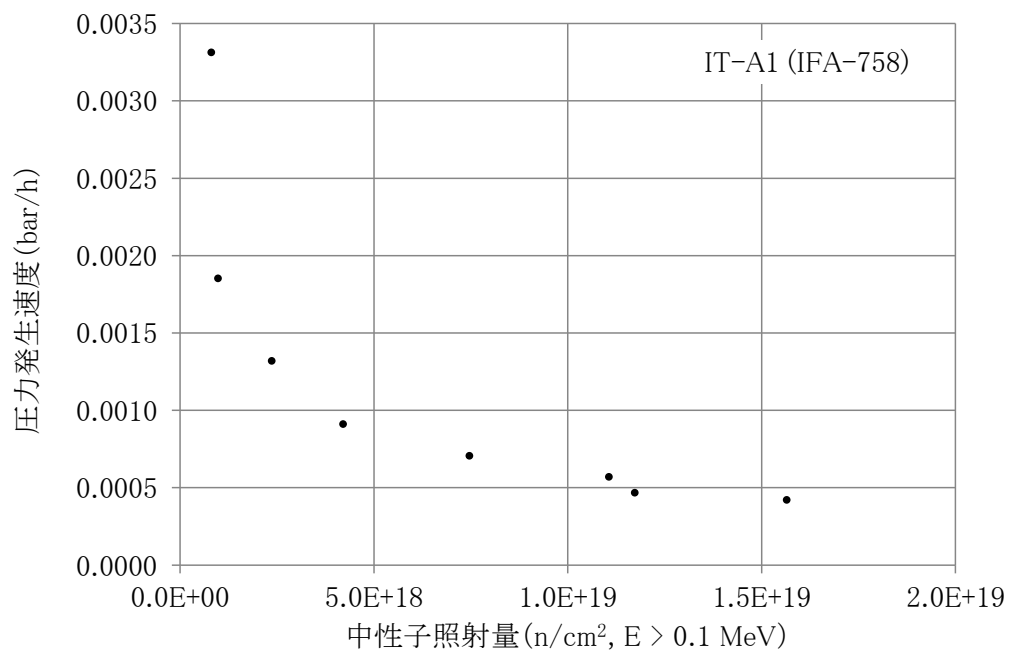


図 2.36 圧力発生速度の照射量に対する変化

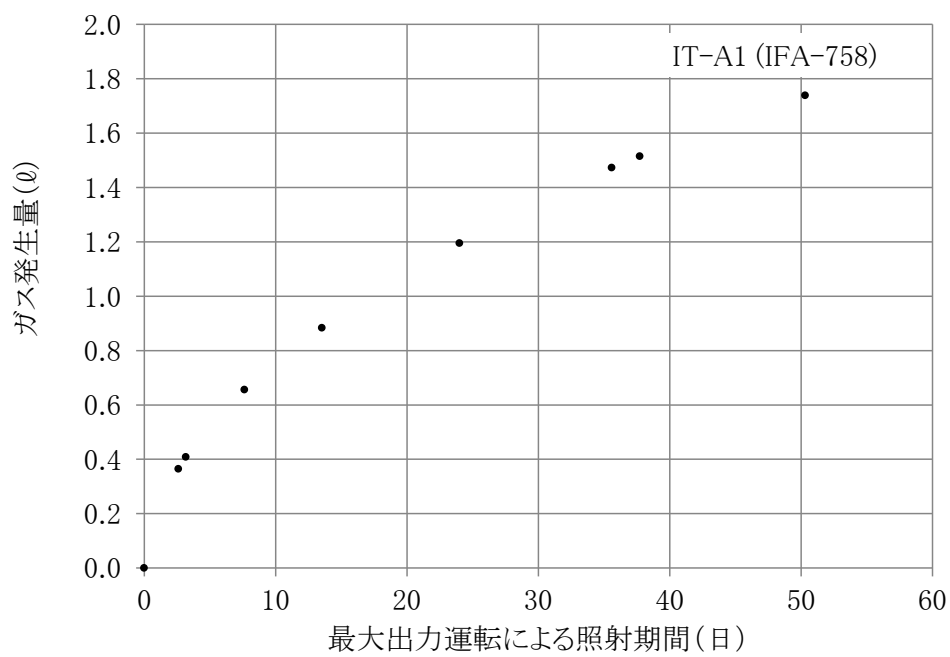


図 2.37 ガス発生量の時間変化 (0℃、1 気圧)

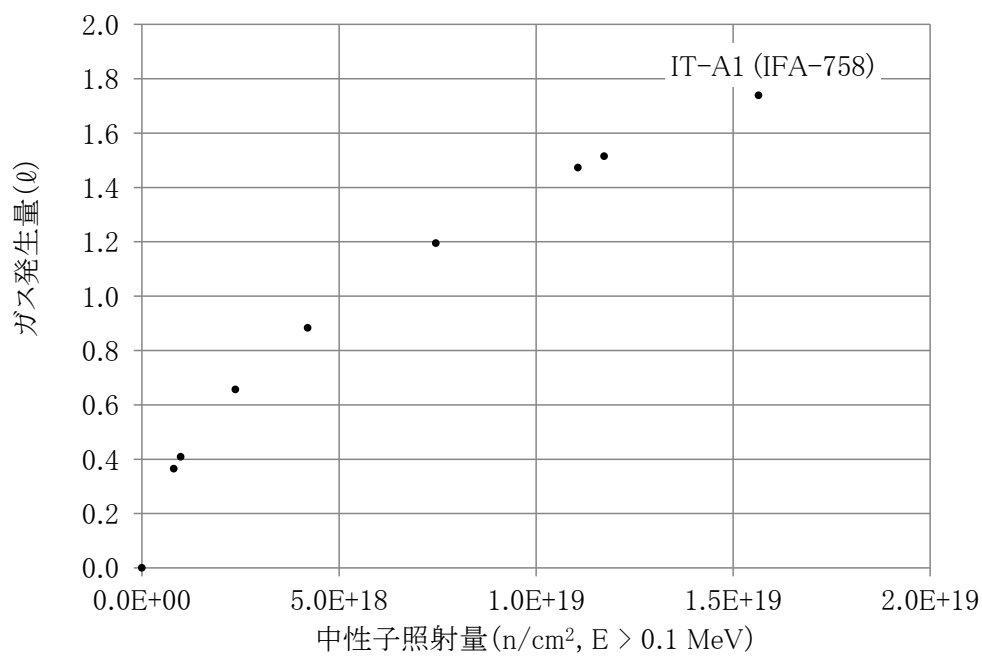


図 2.38 ガス発生量の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

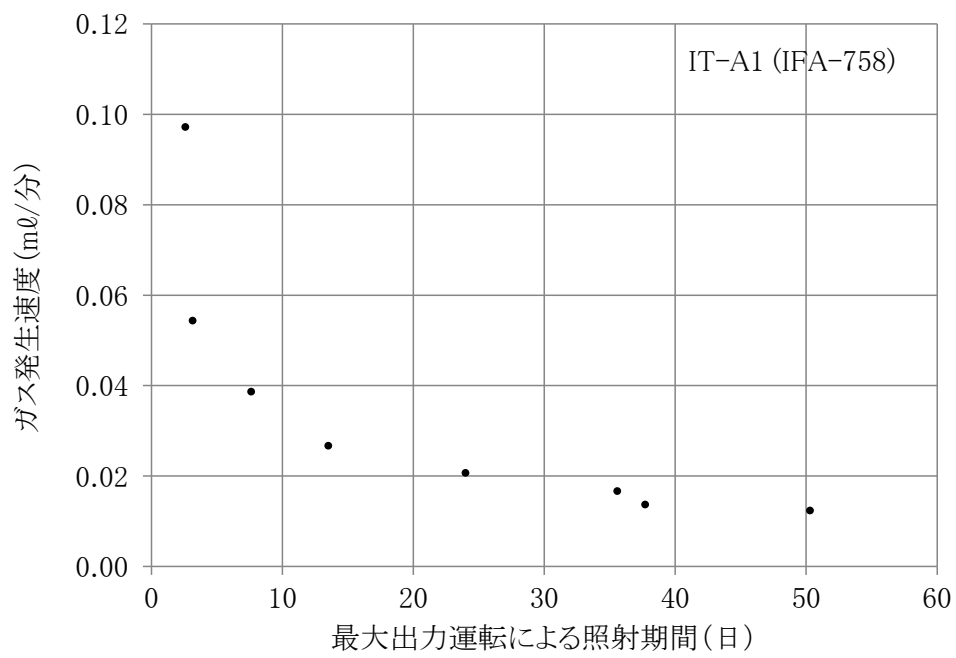


図 2.39 ガス発生速度の時間変化 (0℃、1 気圧)

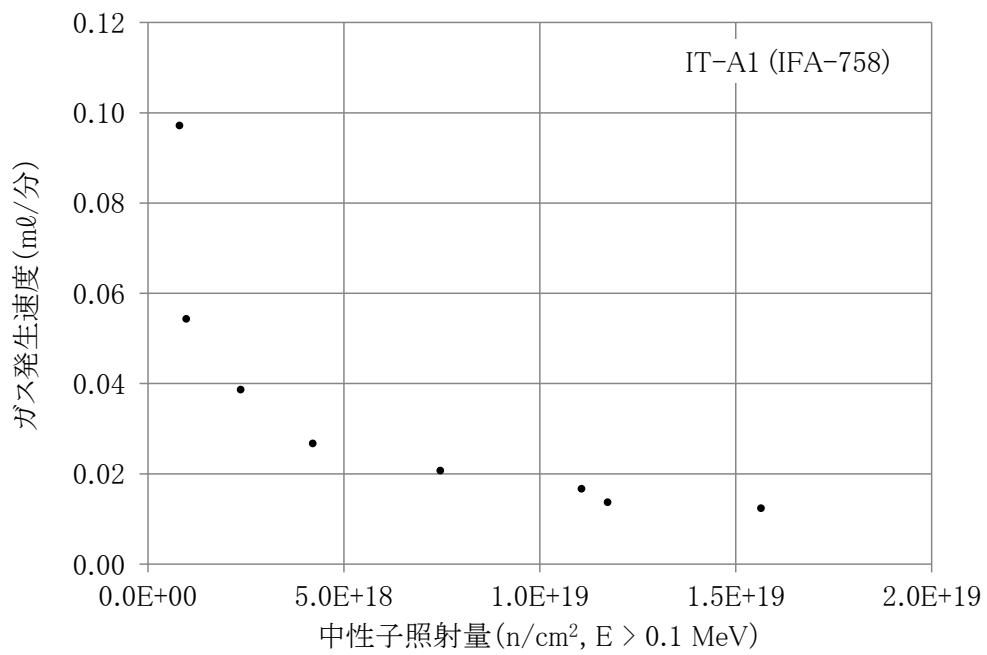


図 2.40 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

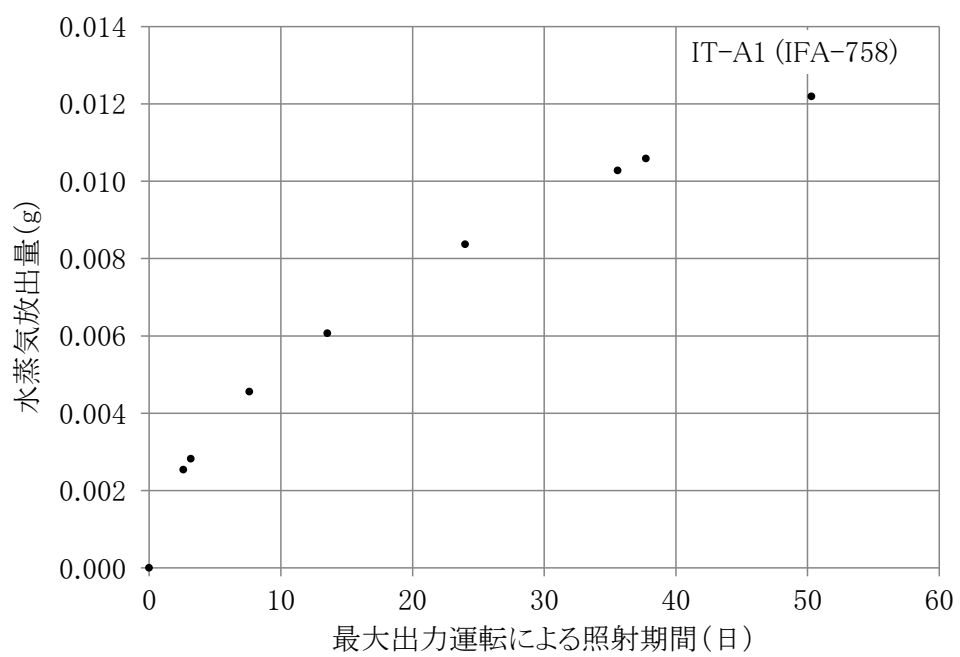


図 2. 41 水分放出量の時間変化

2) 試験ケース IT-A2 (IFA-759)

自由水量が水の放射線分解に及ぼす影響を把握するために、試験ケース IT-A2 (IFA-759) では、120℃で乾燥させ全ての自由水を放出した試験体を用いて中性子照射による相互作用試験を実施した。

図 2.42 に示すように原子炉の出力は、約 2.0MW 程度となっている。また、炉は試料の交換等のために、比較的頻繁に ON/OFF を繰り返していることがわかる。図 2.43 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。冷却水の温度は 52℃に制御され、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇し、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却され、炉に送り込まれる。図 2.44 にセメントペースト試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 72℃程度となっている。図 2.45 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.115W/g となっているが、時間経過に伴って若干上昇傾向が見られる。

図 2.46 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1.25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めているという設定で計測システムを運用する計画としている。しかし、本試験ケースでは圧力上昇の速度が非常に遅く、1.25bar までの圧力上昇を待っていると発生ガスの成分分析の機会を失う危惧があったので、1.25bar に到達するまえにサンプリングを行った。そのために、照射期間全体を通して圧力は 1.25bar に達していない。図 2.47 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 2.48 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 2.49 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.60×10^{12} n/cm²/s、ガンマ線量率は 384kGy/h であった。図 2.50 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 2.51 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。120℃乾燥のセメントペースト試験体を用いているので、水蒸気の放出は非常に少なく、相対湿度は 10%程度となっている。

図 2.52 および図 2.53 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.54 および図 2.55 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.56 および図 2.57 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.58 および図 2.59 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.60 に、水分放出量の時間変化を示す。

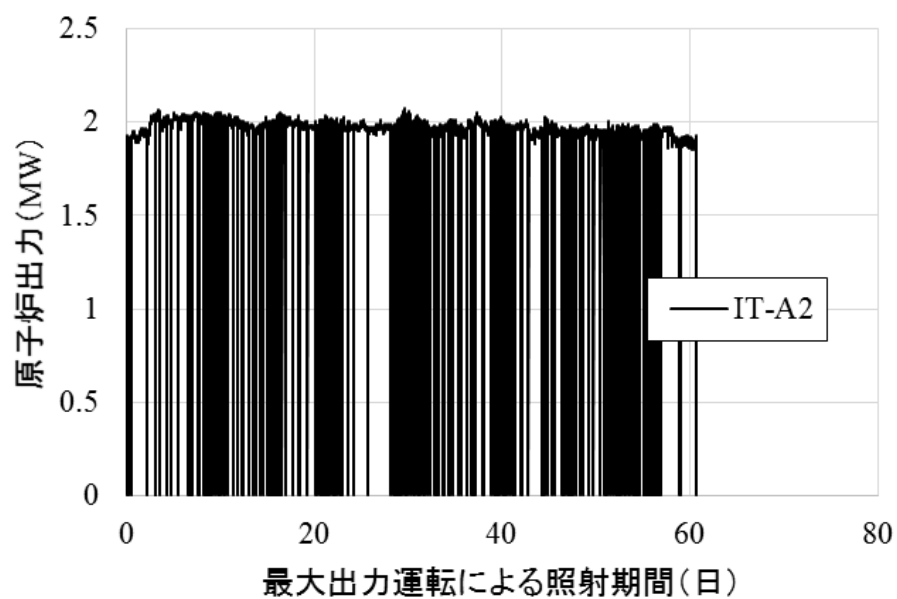


図 2.42 原子炉出力の変化

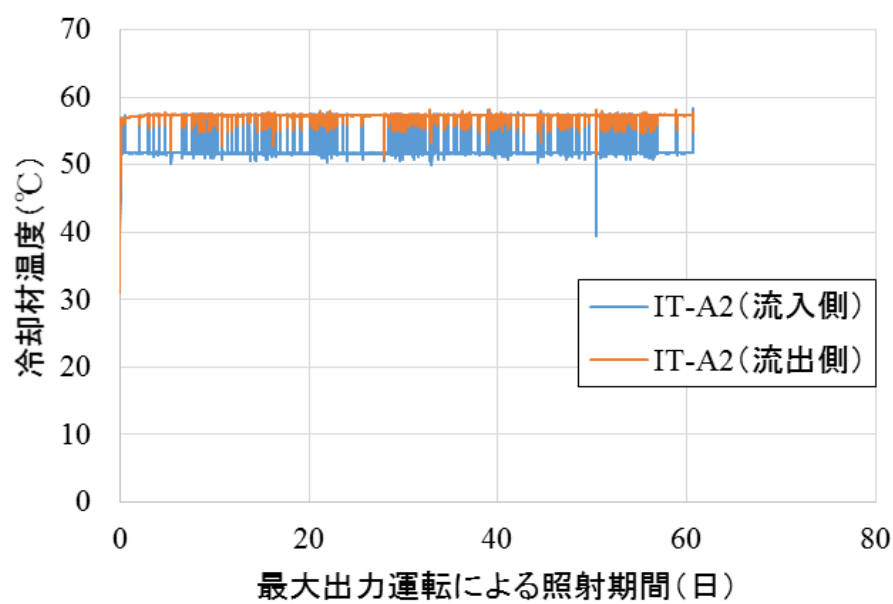


図 2.43 原子炉冷却材の温度変化

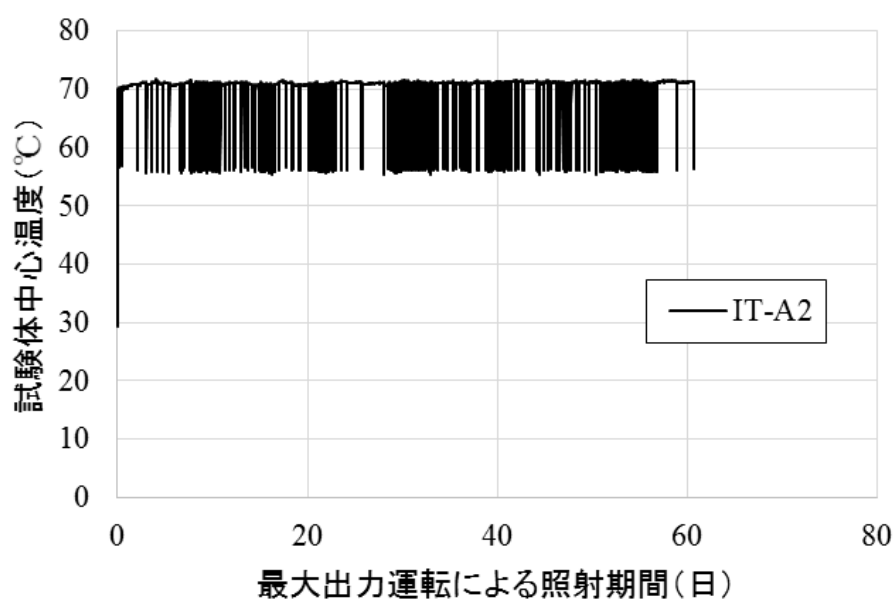


図 2.44 セメントペースト試験体の中心温度の時間変化

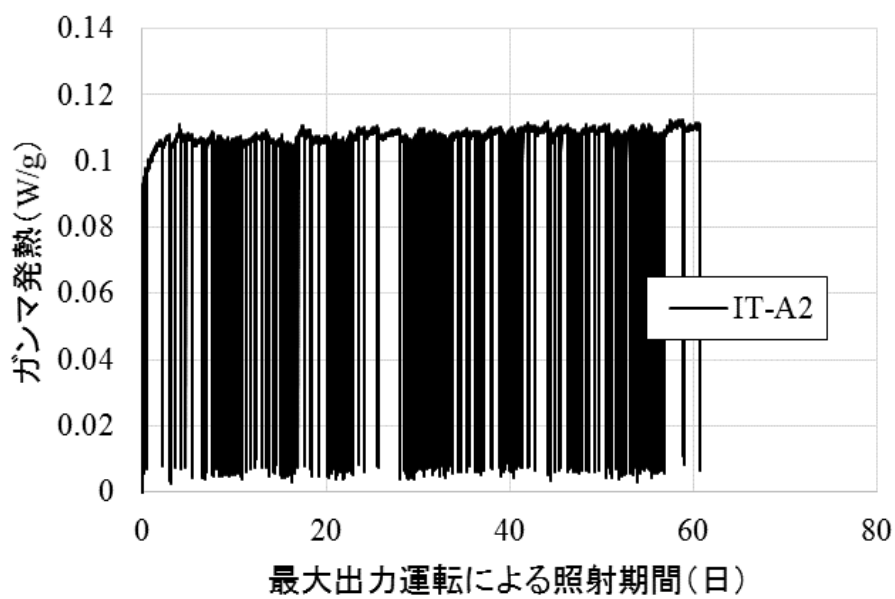


図 2.45 ガンマ発熱の時間変化

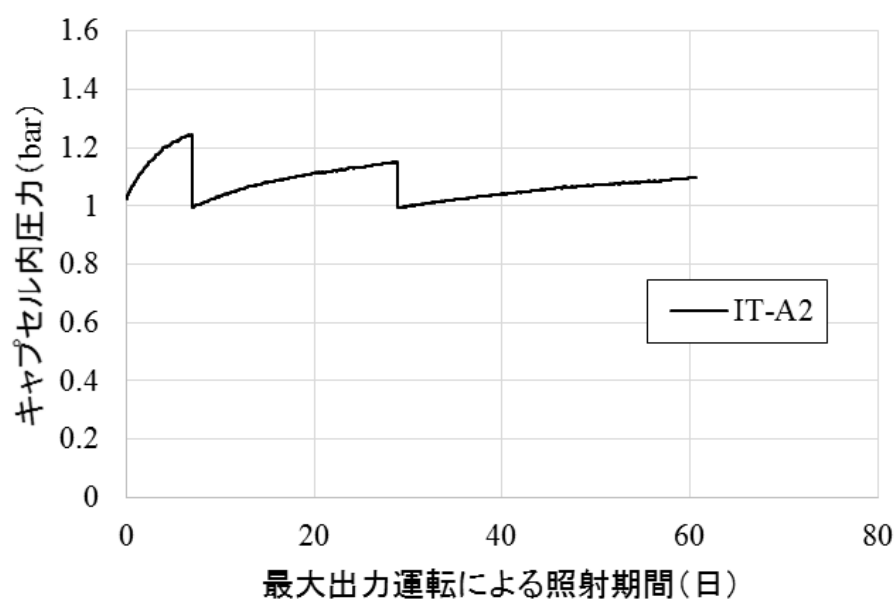


図 2.46 ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

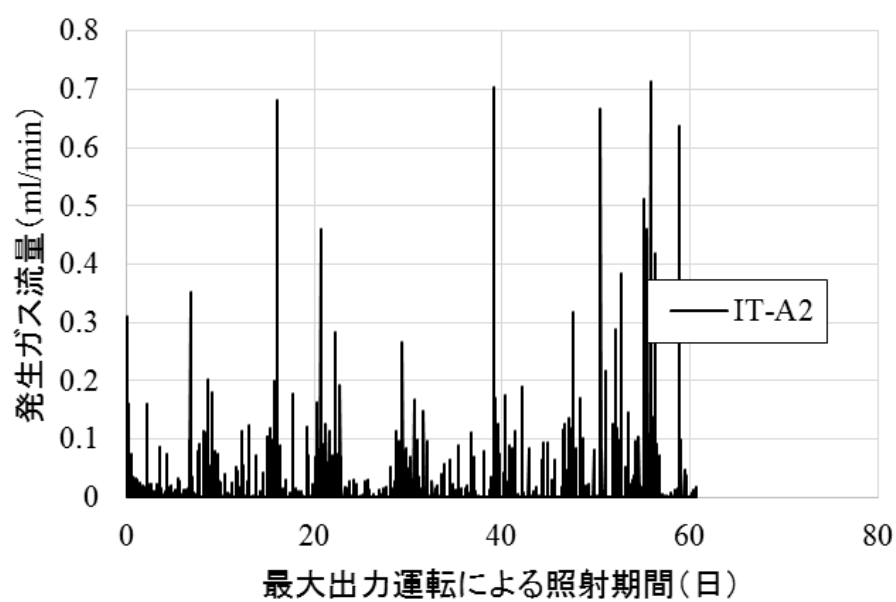


図 2.47 発生ガス流量の時間変化

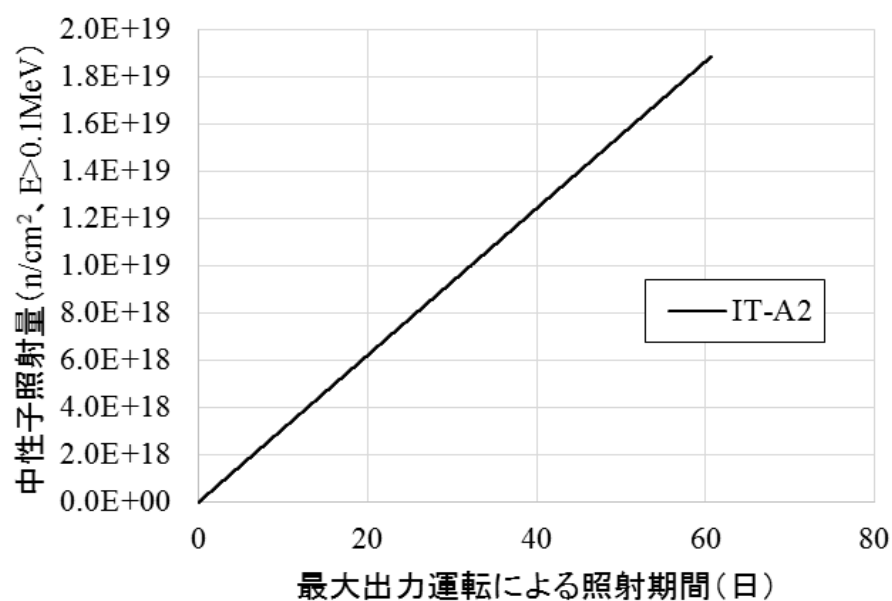


図 2.48 中性子照射量の時間変化

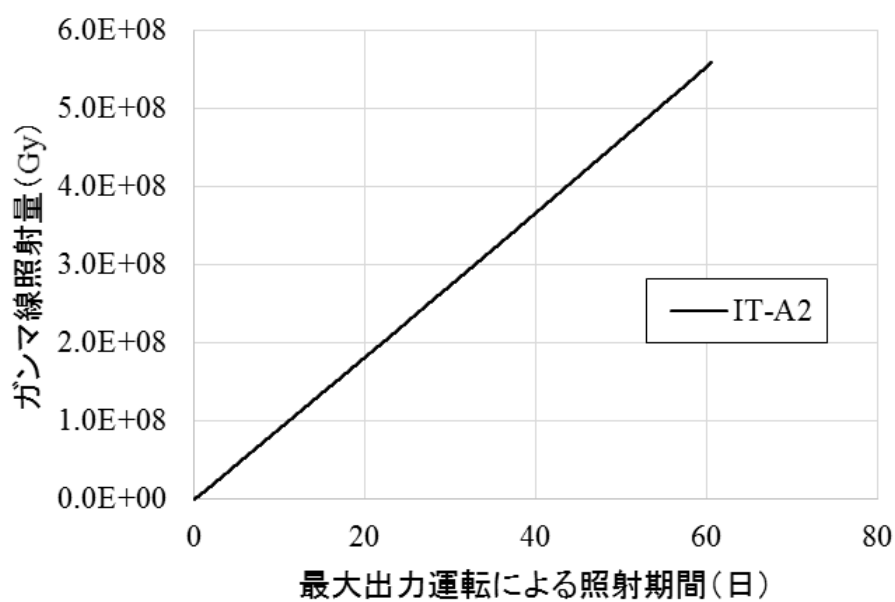


図 2.49 ガンマ線照射量の時間変化

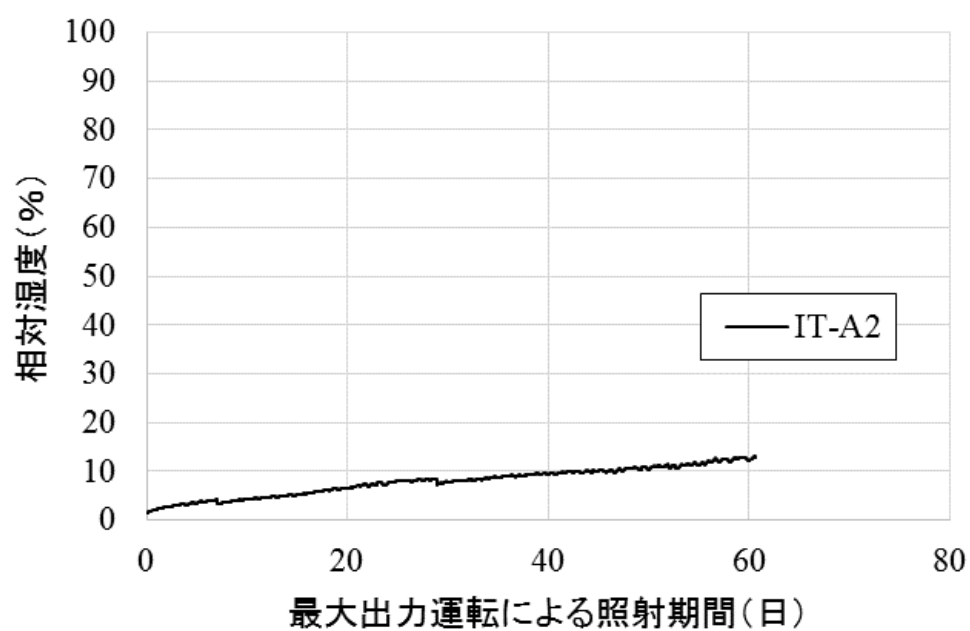


図 2. 50 炉外の計測系内相対湿度の時間変化

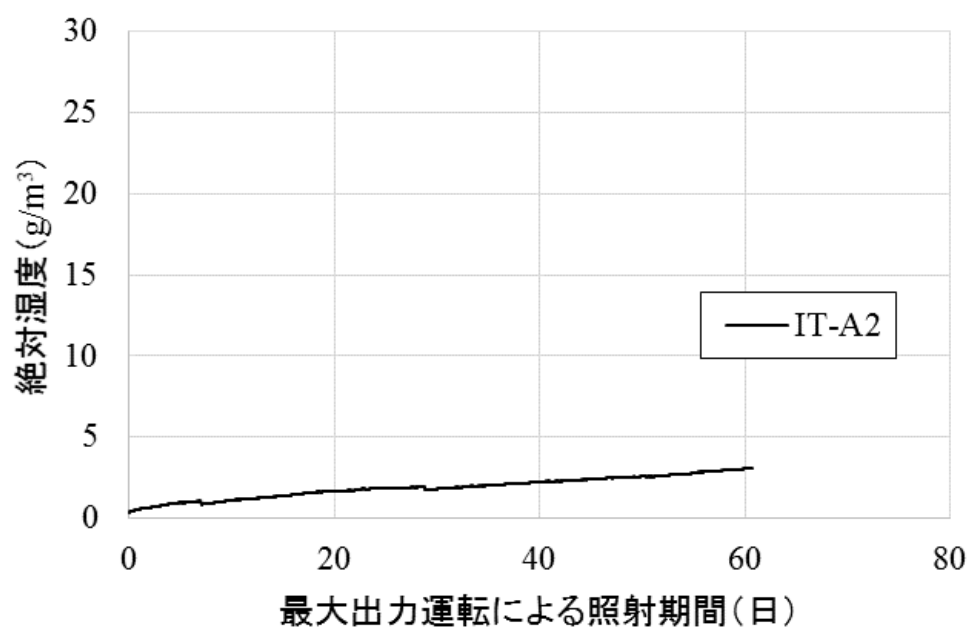


図 2. 51 炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

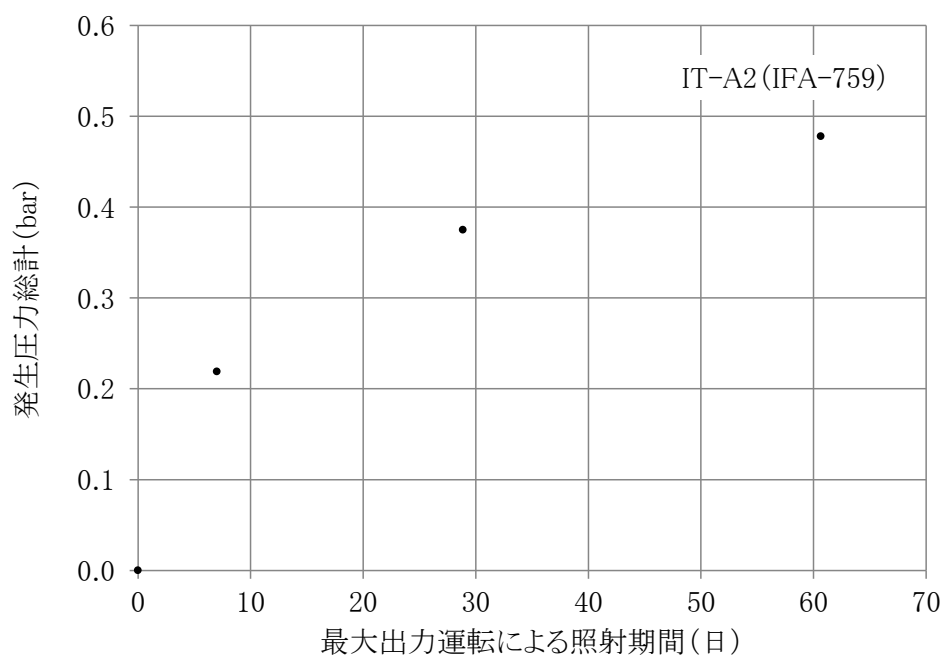


図 2. 52 発生圧力総計の時間変化

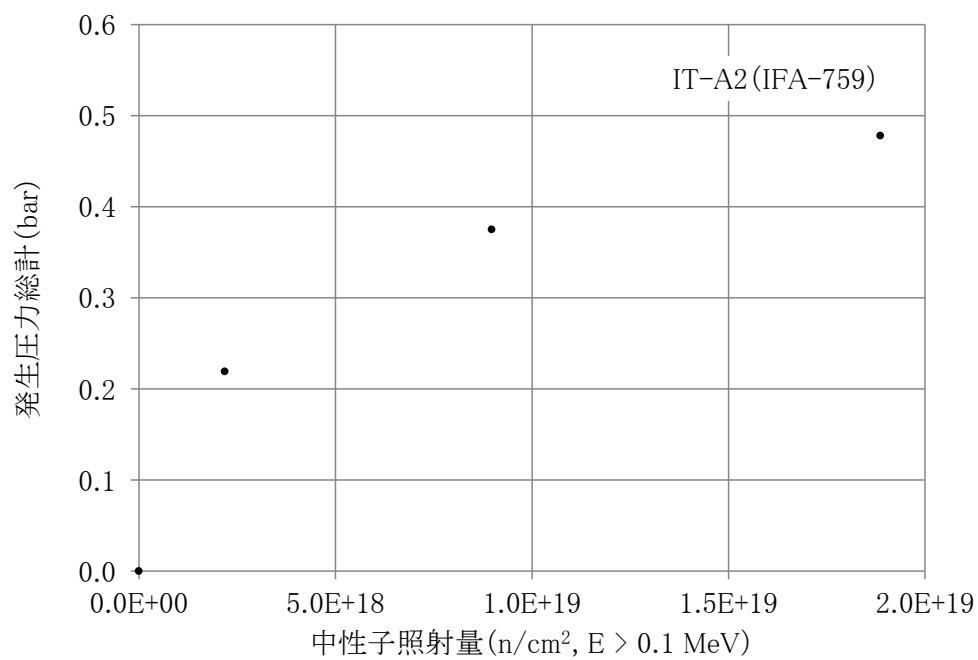


図 2. 53 発生圧力総計の照射量に対する変化

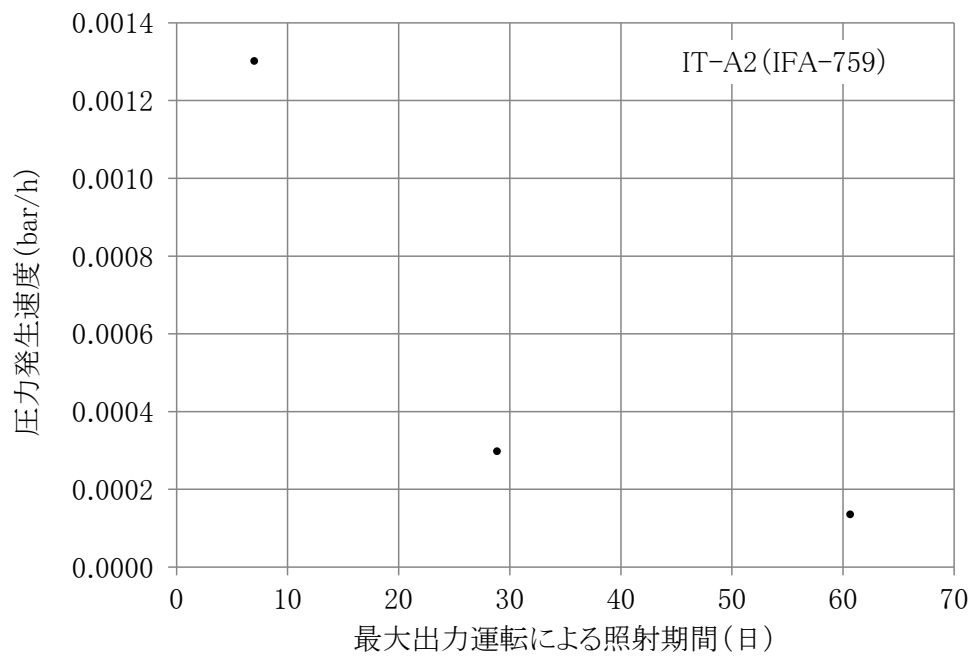


図 2.54 圧力発生速度の時間変化

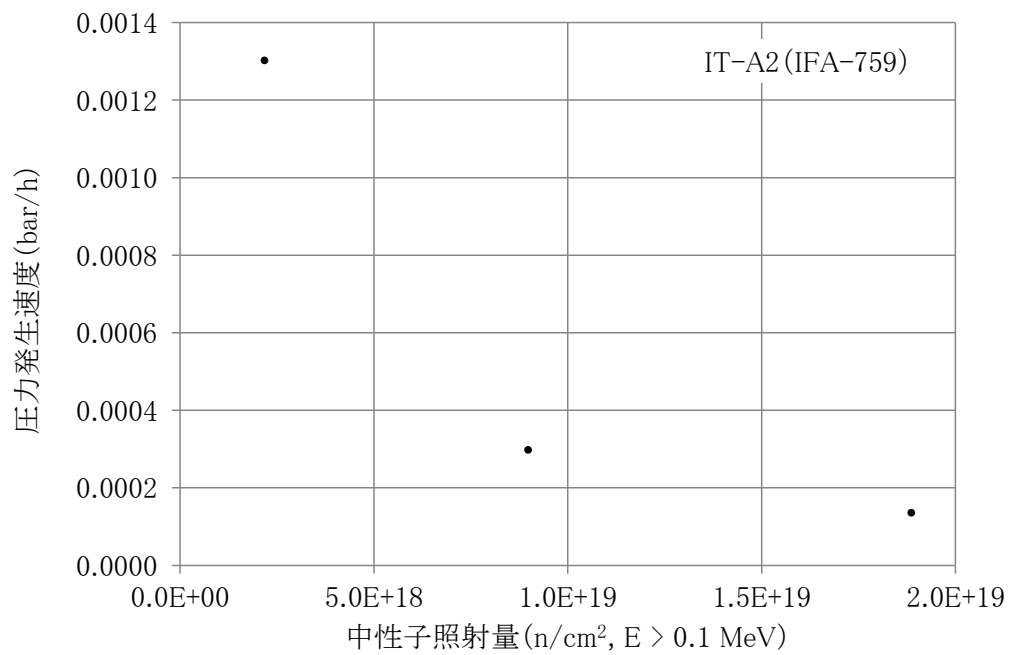


図 2.55 圧力発生速度の照射量に対する変化

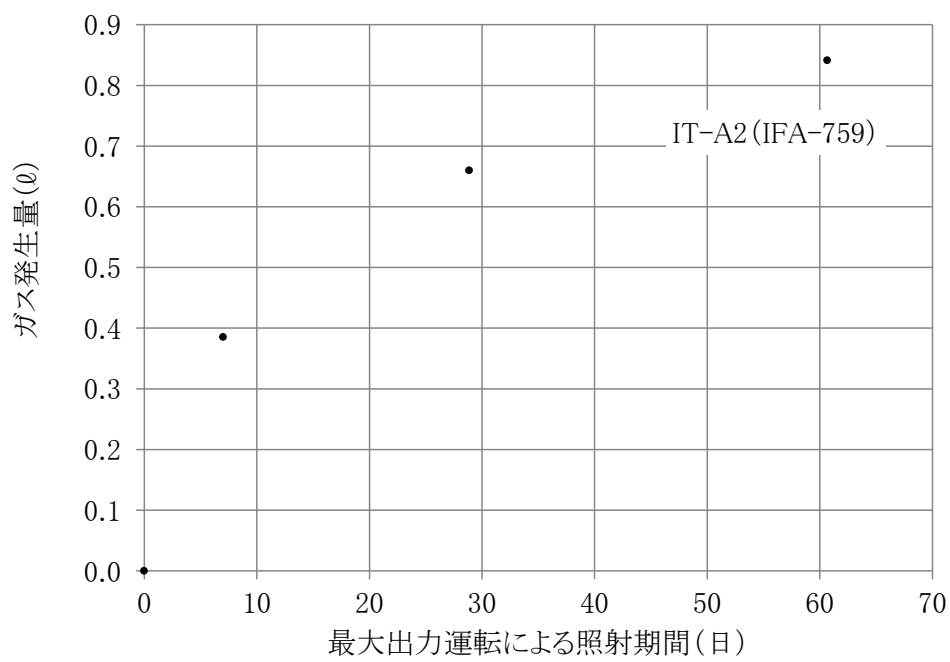


図 2.56 ガス発生量の時間変化 (0°C、1 気圧)

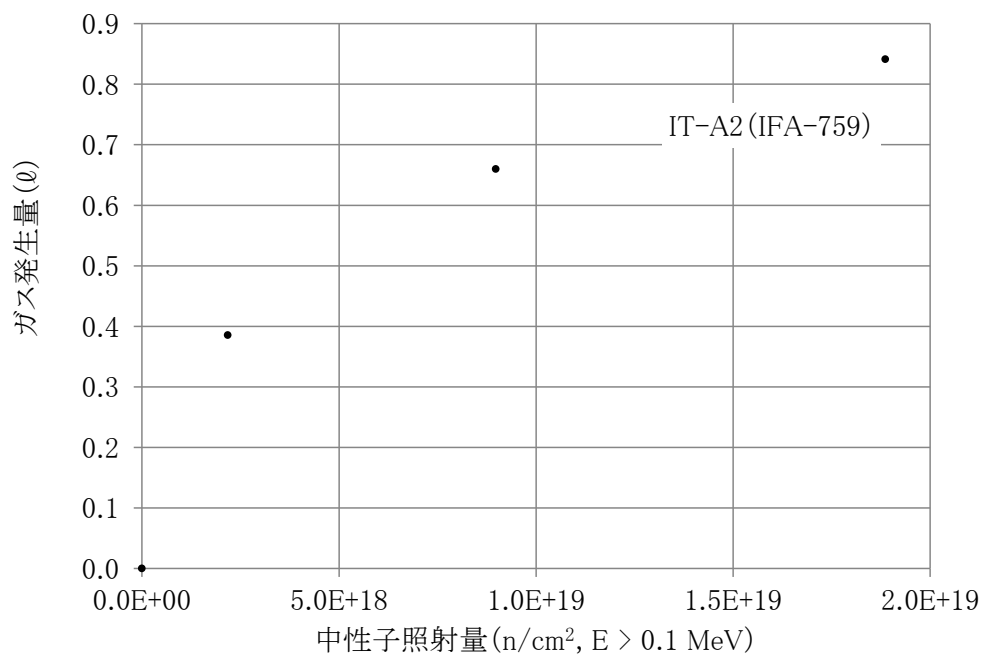


図 2.57 ガス発生量の照射量に対する変化 (0°C、1 気圧)

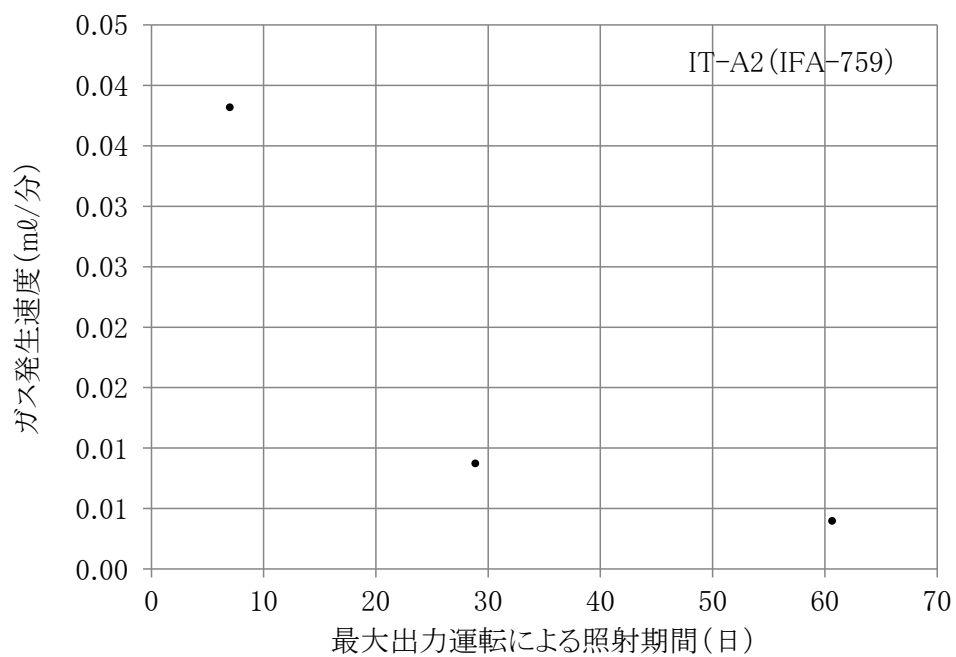


図 2.58 ガス発生速度の時間変化 (0℃、1 気圧)

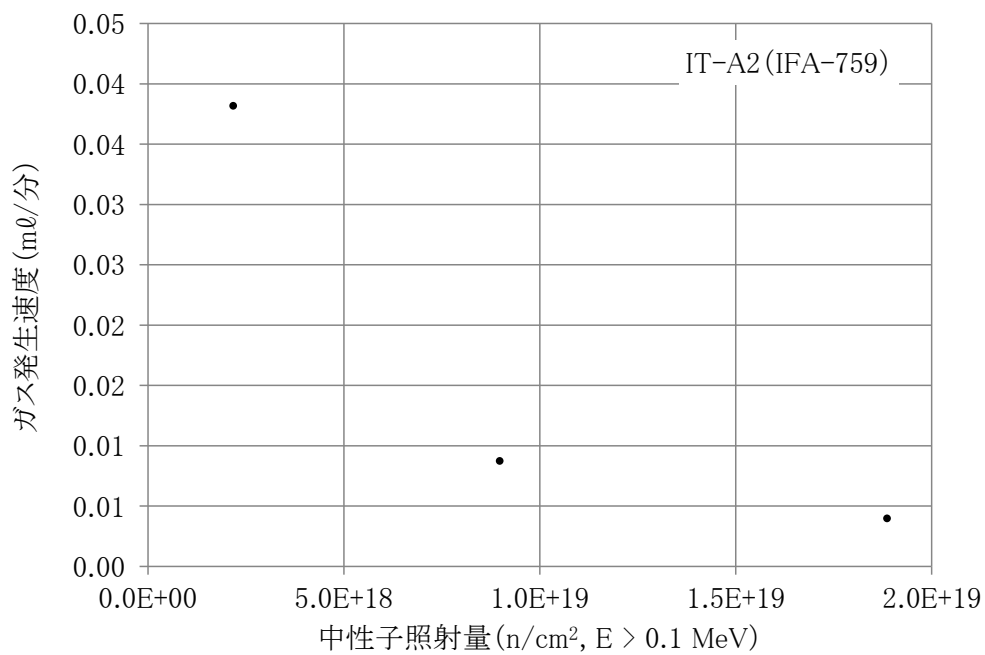


図 2.59 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

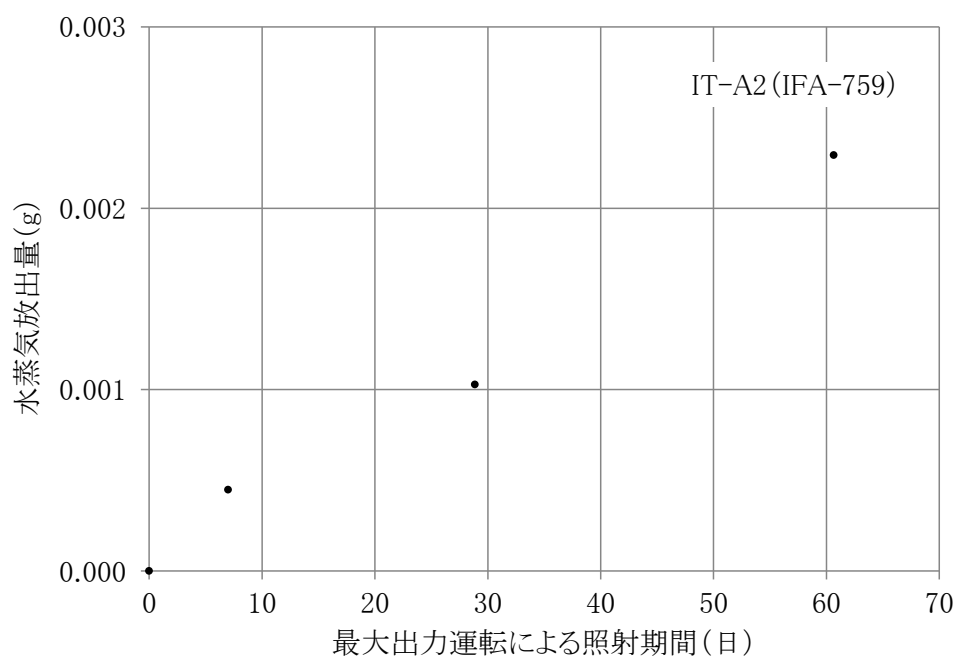


図 2.60 水分放出量の時間変化

3) 試験ケース IT-A3 (IFA-760)

自由水量が水の放射線分解に及ぼす影響を把握するために、試験ケース IT-A3 (IFA-760) では、試験体を製作した段階から封緘して外部と水分のやり取りがなく、製作時の水分が維持された試験体を用いて中性子照射による相互作用試験を実施した。

図 2.61 に示すように原子炉の出力は、約 2.0MW 程度となっている。また、炉は試料の交換等のために、比較的頻繁に ON/OFF を繰り返していることがわかる。図 2.62 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。冷却水の温度は 52℃に制御され、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇し、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却され、炉に送り込まれる。図 2.63 にセメントペースト試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 76℃程度となっている。図 2.64 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.11W/g となっているが、時間経過に伴って若干上昇傾向が見られる。

図 2.65 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1.25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。また、バルブ開放間隔は、時間経過に伴って長くなっており、これは時間経過に伴ってガスの発生速度が低下している試験結果と整合している。図 2.66 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 2.67 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 2.68 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.60×10^{12} n/cm²/s、ガンマ線量率は 373kGy/h であった。図 2.69 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 2.70 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。封緘状態の自由水を多く含むセメントペースト試験体を用いているので、水蒸気の放出は非常に多く、水蒸気捕集システム改良前でコンデンサも設置していないため、相対湿度は 100%となるとともに多くの水蒸気が結露しており、水蒸気を正確に把握できていないと思われる。

図 2.71 および図 2.72 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.73 および図 2.74 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.75 および図 2.76 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.77 および図 2.78 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.79 に、水分放出量の時間変化を示す。

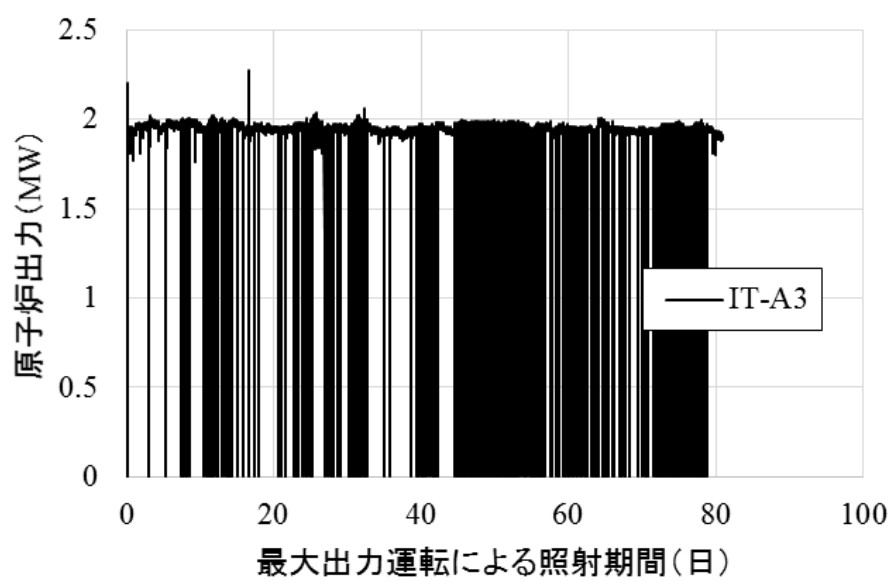


図 2. 61 原子炉出力の変化

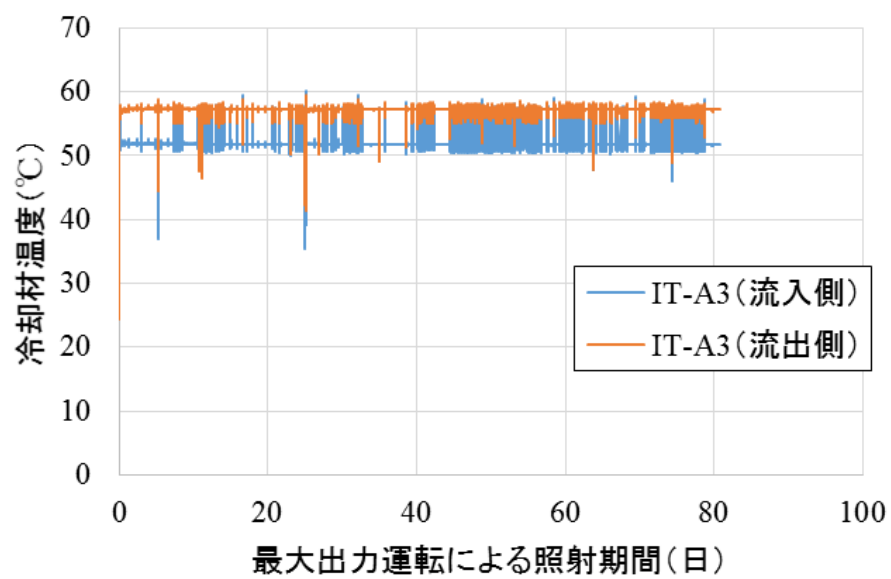


図 2. 62 原子炉冷却材の温度変化

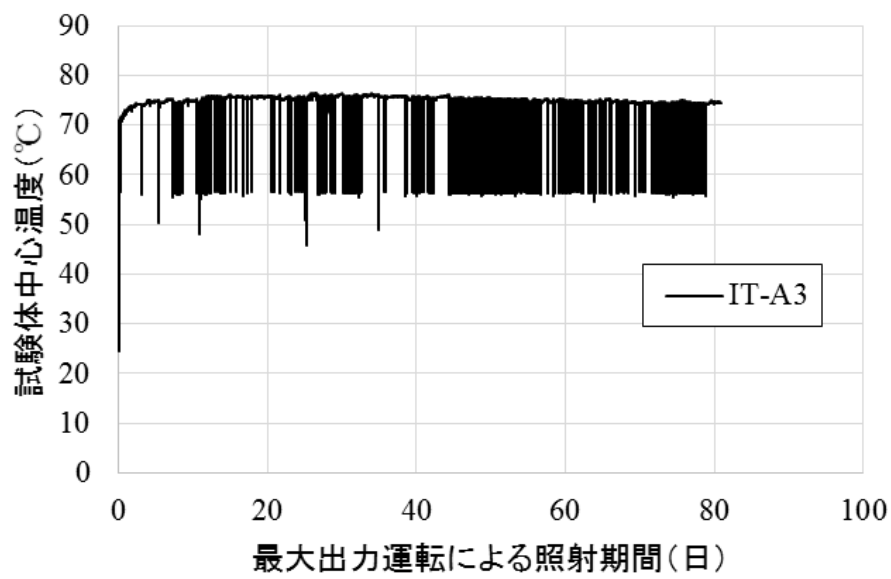


図 2.63 セメントペースト試験体の中心温度の時間変化

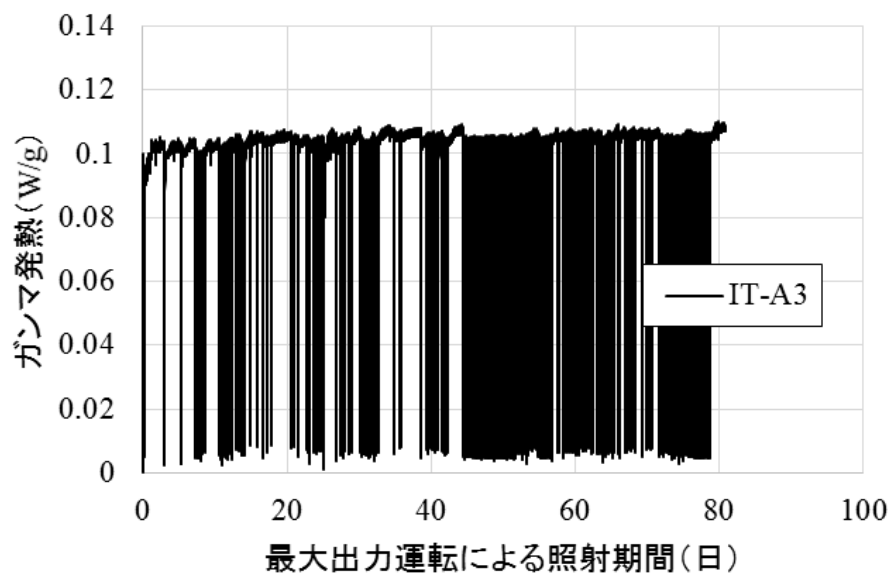


図 2.64 ガンマ発熱の時間変化

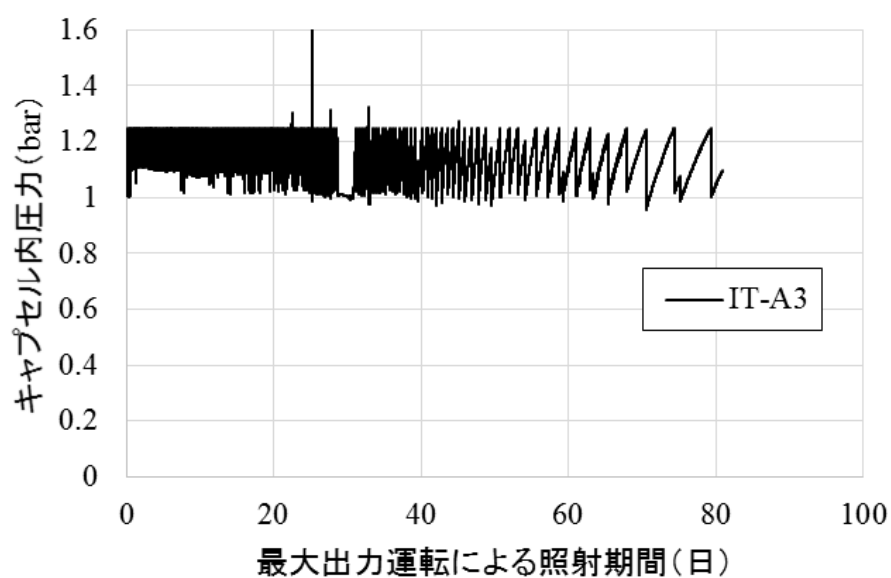


図 2.65 ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

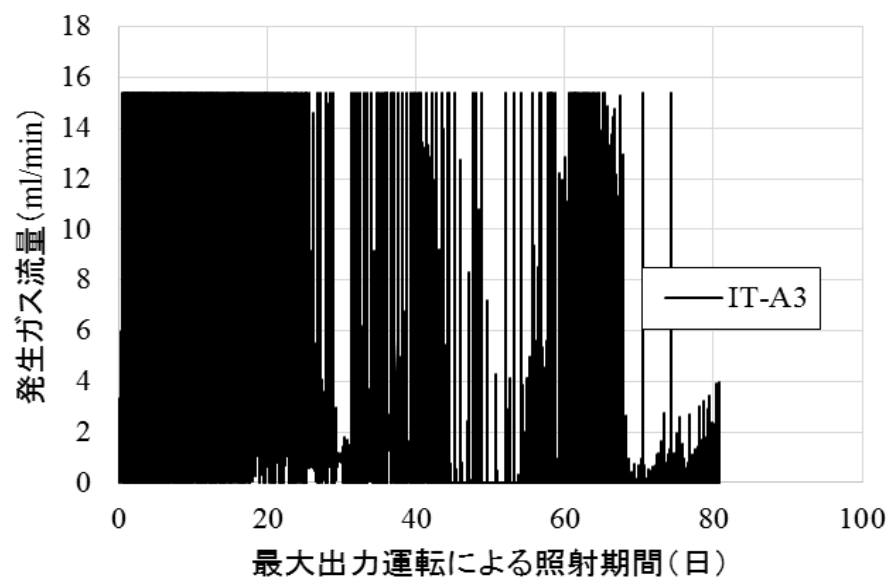


図 2.66 発生ガス流量の時間変化

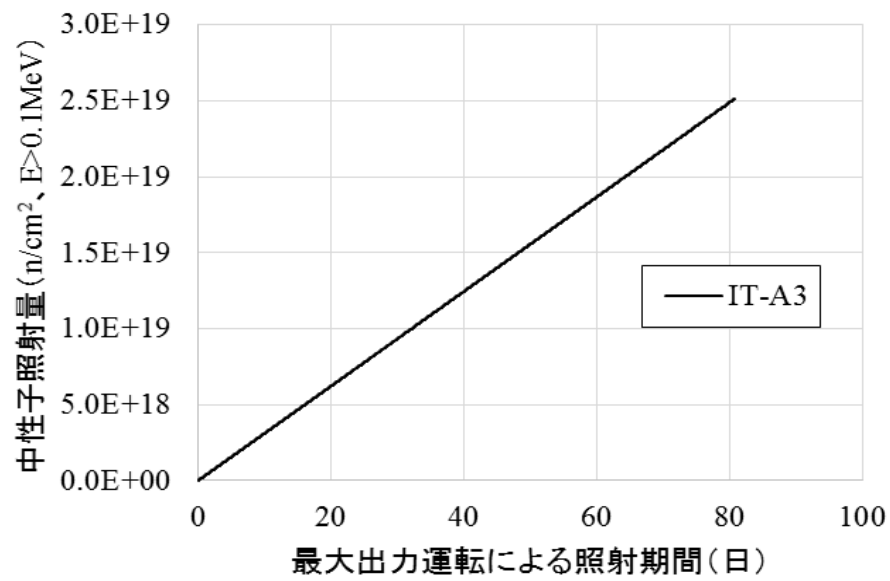


図 2.67 中性子照射量の時間変化

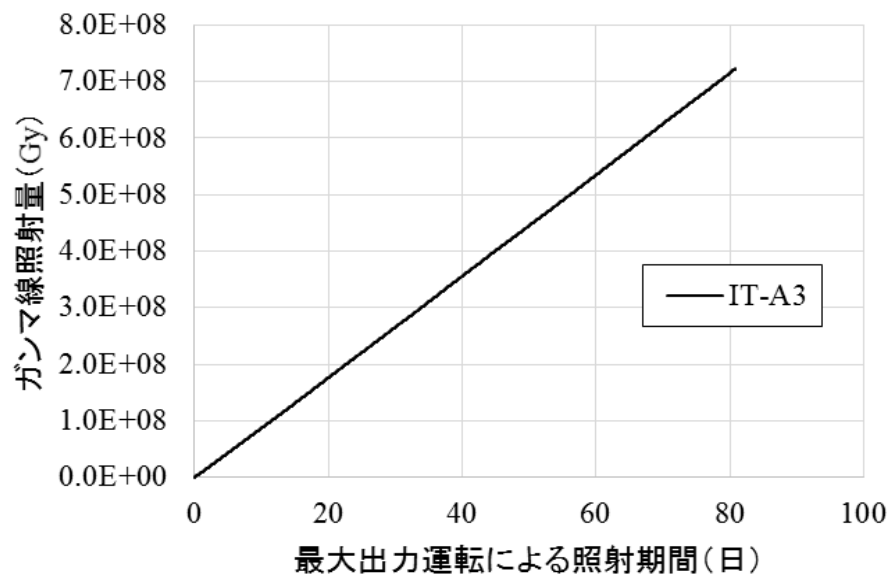


図 2.68 ガンマ線照射量の時間変化

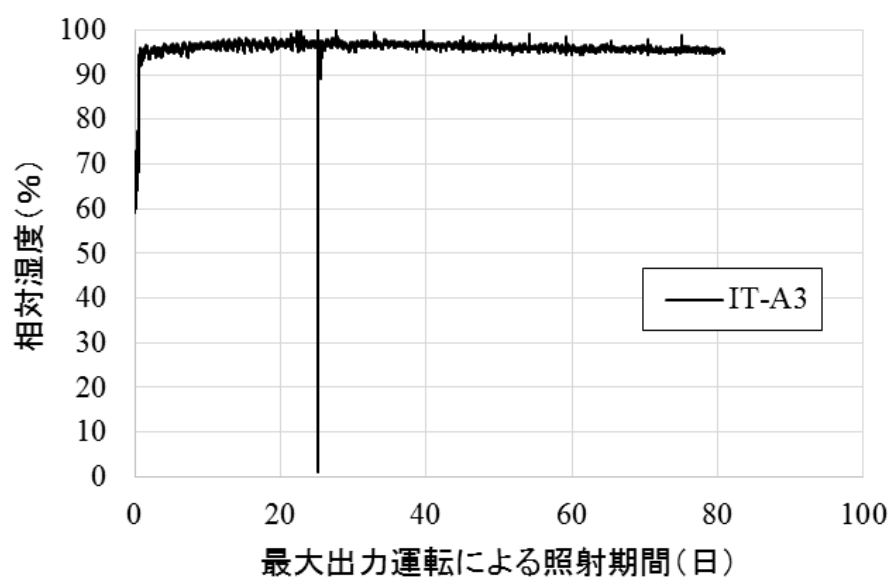


図 2.69 炉外の計測系内相対湿度の時間変化

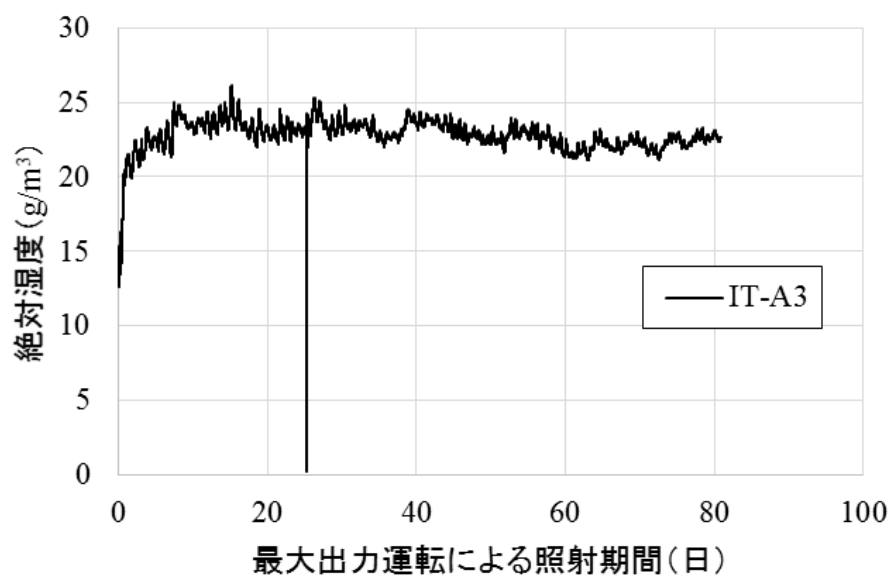


図 2.70 炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

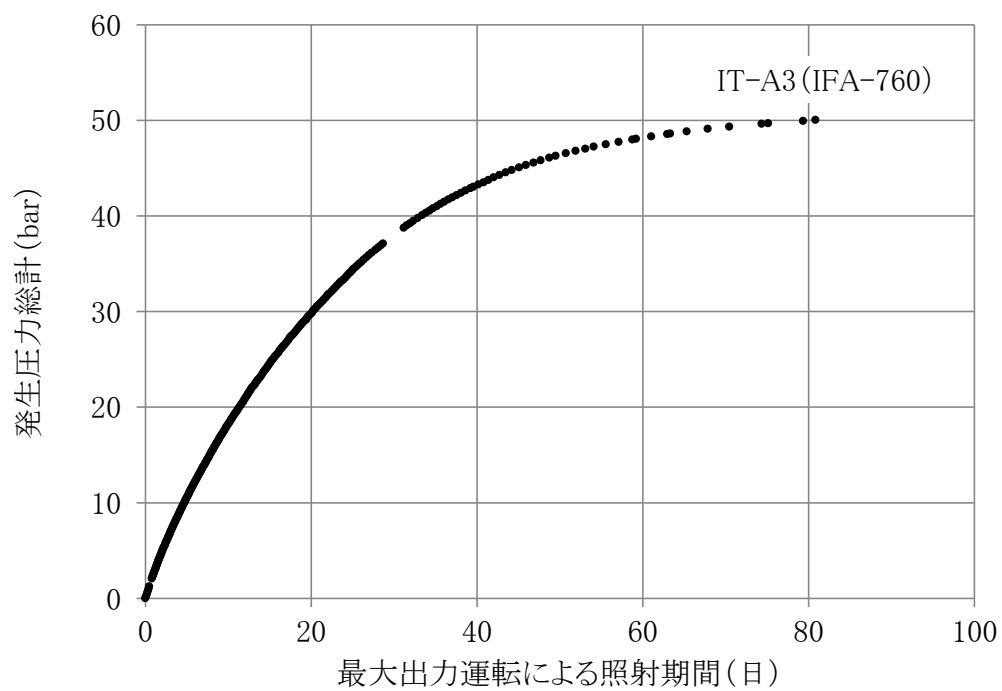


図 2.71 発生圧力総計の時間変化

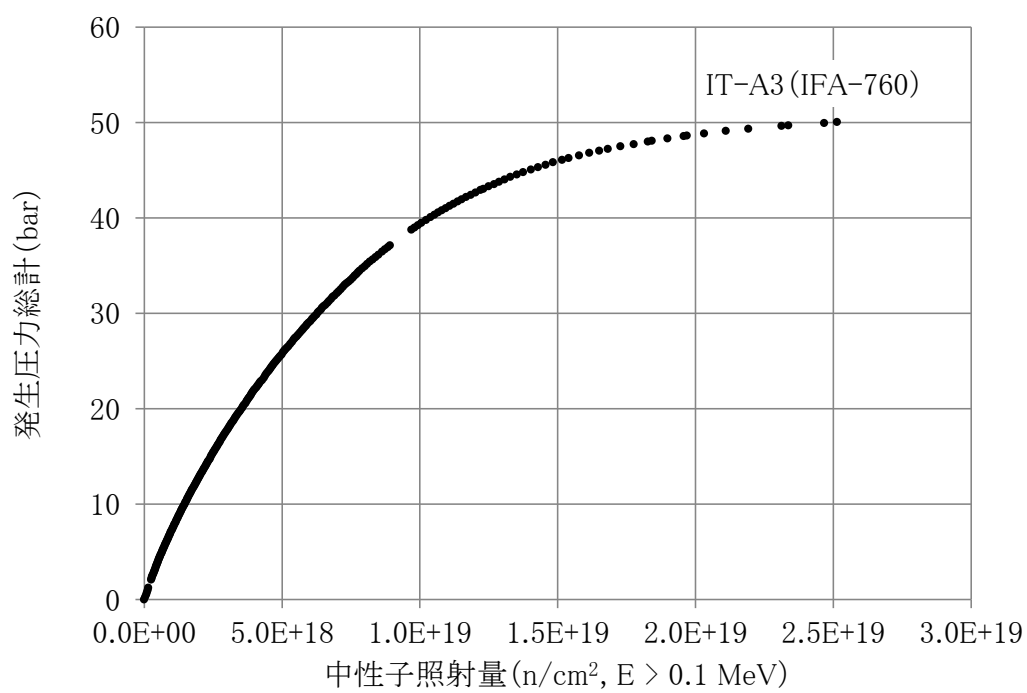


図 2.72 発生圧力総計の照射量に対する変化

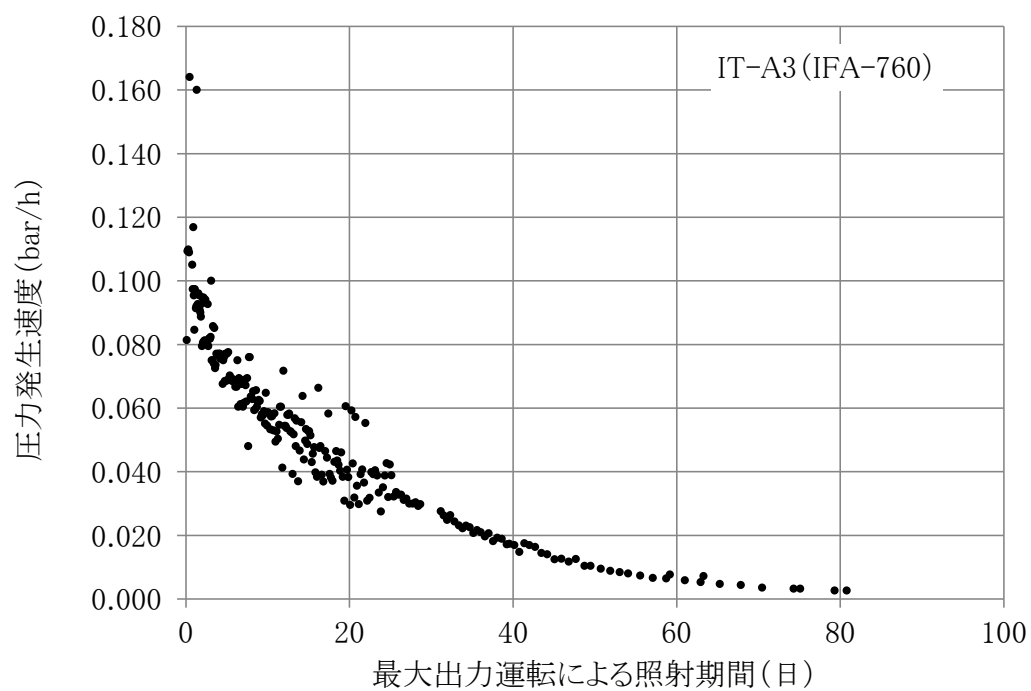


図 2.73 圧力発生速度の時間変化

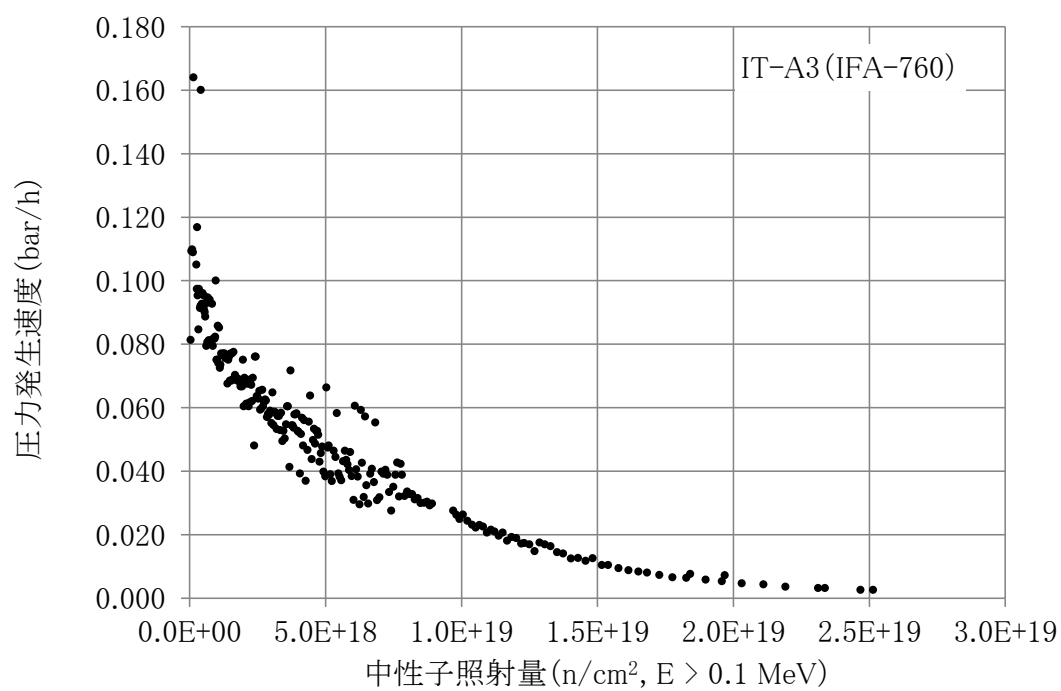


図 2.74 圧力発生速度の照射量に対する変化

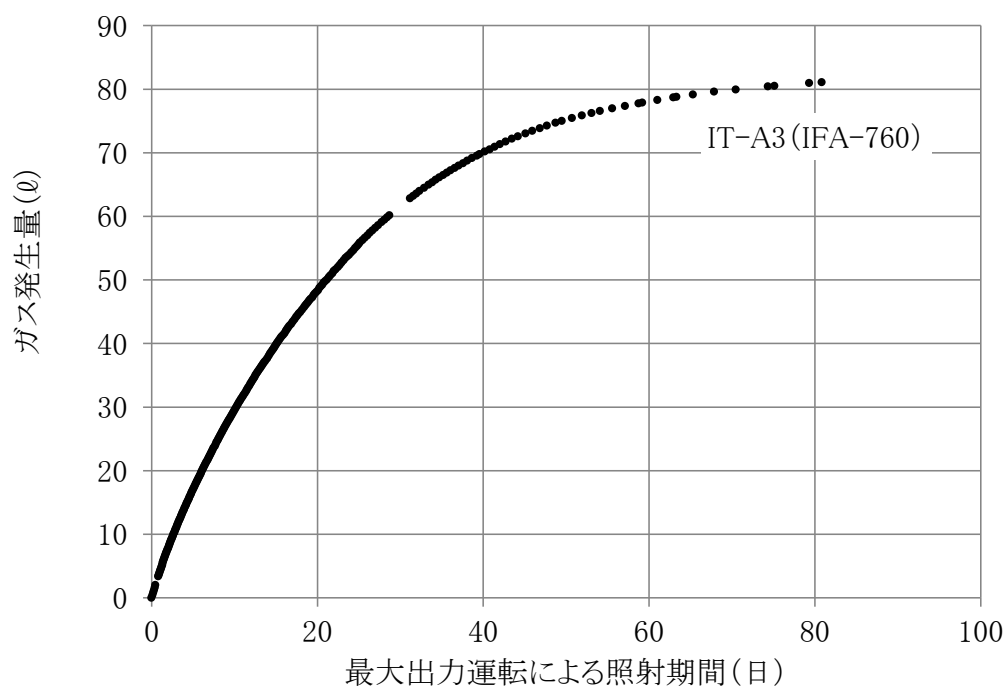


図 2.75 ガス発生量の時間変化 (0°C、1 気圧)

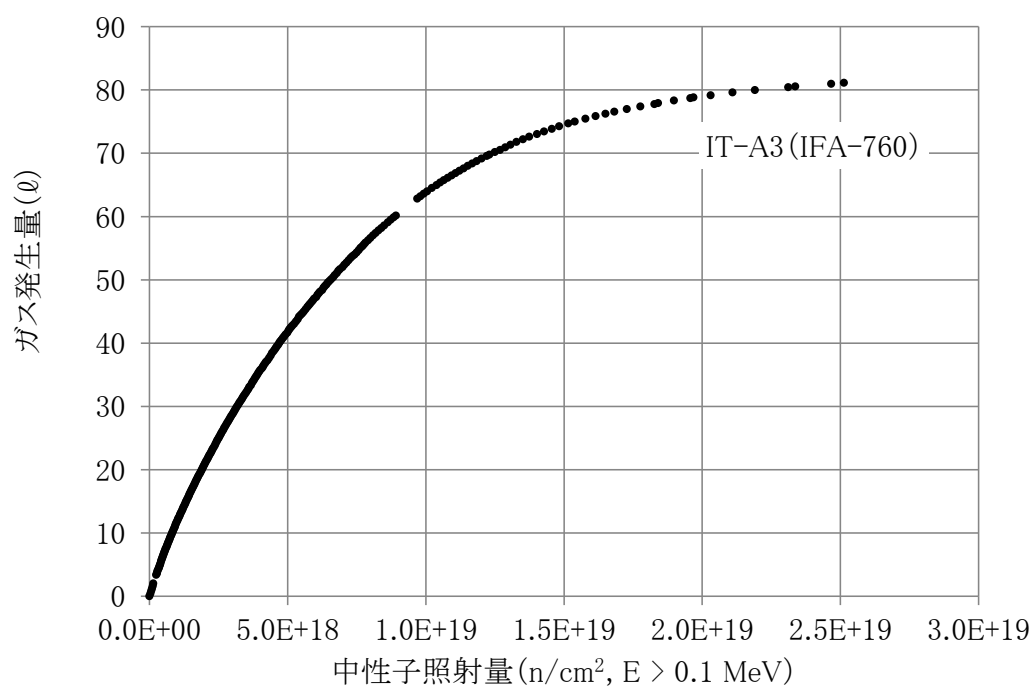


図 2.76 ガス発生量の照射量に対する変化 (0°C、1 気圧)

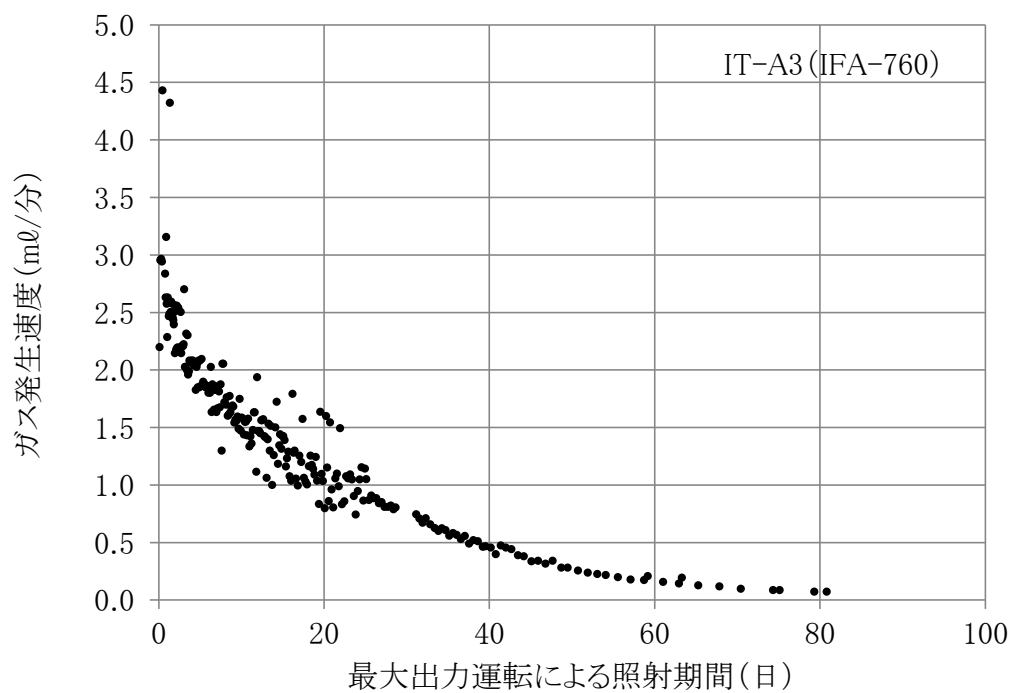


図 2.77 ガス発生速度の時間変化 (0℃、1 気圧)

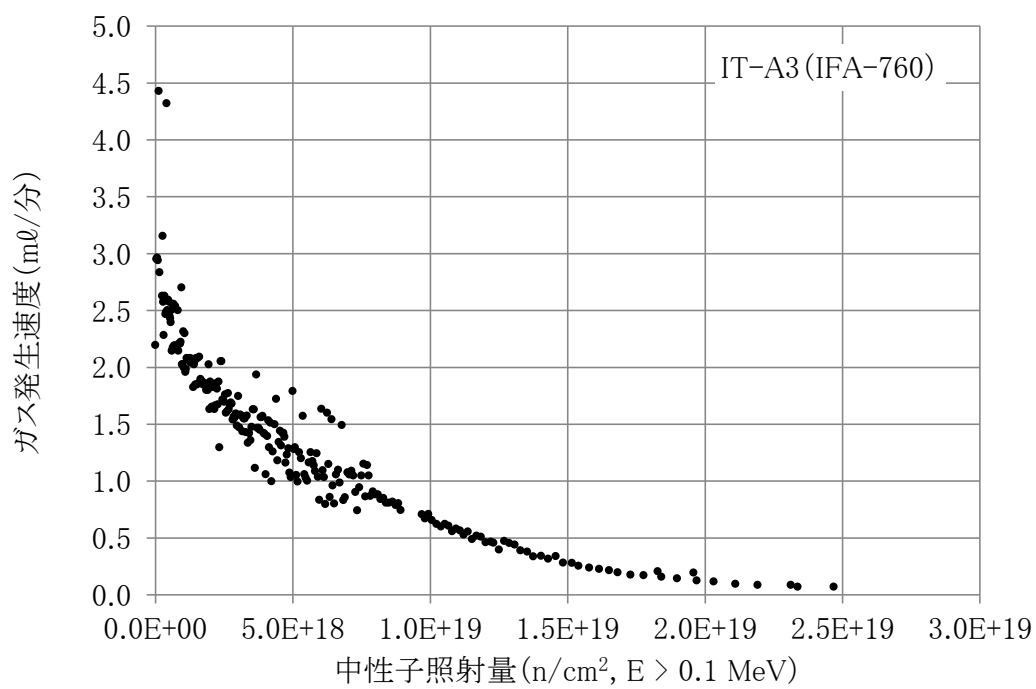


図 2.78 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

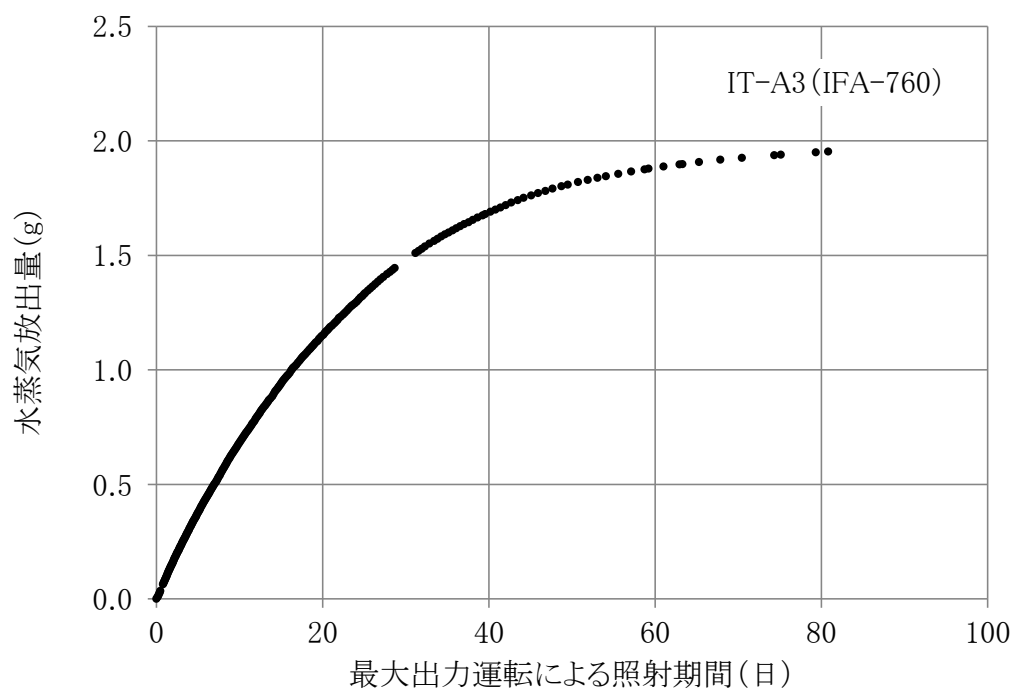


図 2.79 水分放出量の時間変化

4) 試験ケース IT-A4 (IFA-761)

自由水量が水の放射線分解に及ぼす影響を把握するために、試験ケース IT-A4 (IFA-761) では、試験体を製作した段階から封緘して外部と水分のやり取りがなく、製作時の水分が維持された試験体を用いて中性子照射による相互作用試験を実施した。

図 2.80 に示すように原子炉の出力は、約 2.2MW 程度となっている。また、炉は試料の交換等のために、比較的頻繁に ON/OFF を繰り返していることがわかる。図 2.81 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。冷却水の温度は 52℃に制御され、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇し、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却され、炉に送り込まれる。図 2.82 にセメントペースト試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 74℃程度となっている。図 2.83 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0.12W/g となっているが、時間経過に伴って若干上昇傾向が見られる。

図 2.84 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1.4bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1.0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。また、バルブ開放間隔は、時間経過に伴って長くなっており、これは時間経過に伴ってガスの発生速度が低下している試験結果と整合している。図 2.85 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 2.86 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 2.87 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.60×10^{12} n/cm²/s、ガンマ線量率は 427kGy/h であった。図 2.88 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 2.89 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。封緘状態の自由水を多く含むセメントペースト試験体を用いているので、水蒸気の放出は非常に多くなるが、水蒸気捕集システムを改良して水蒸気を凝縮して回収できるコンデンサを設置したので、その下流の相対湿度は 5%以下となっており、湿度と流量よりコンデンサを通過した湿分の評価が可能となっている。

図 2.90 および図 2.91 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.92 および図 2.93 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.94 および図 2.95 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.96 および図 2.97 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.98 に、水分放出量の時間変化を示す。

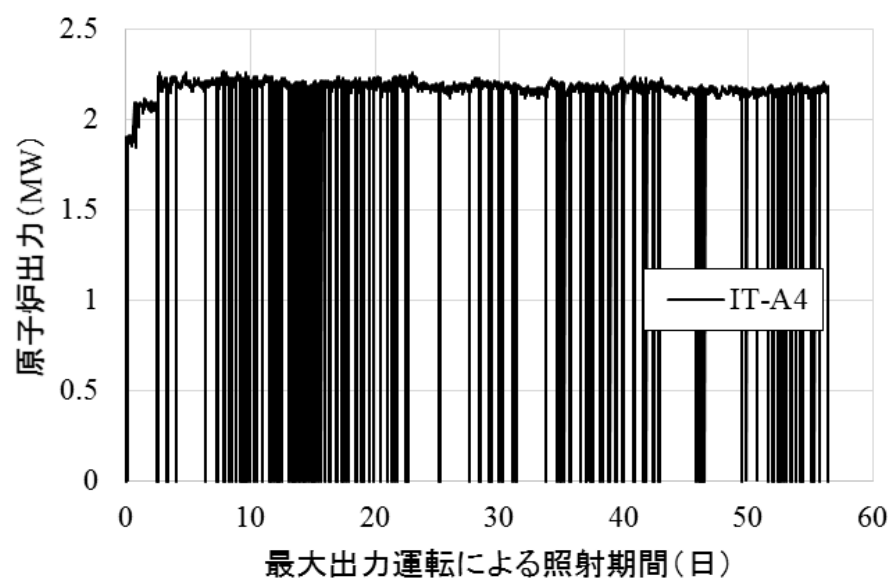


図 2.80 原子炉出力の変化

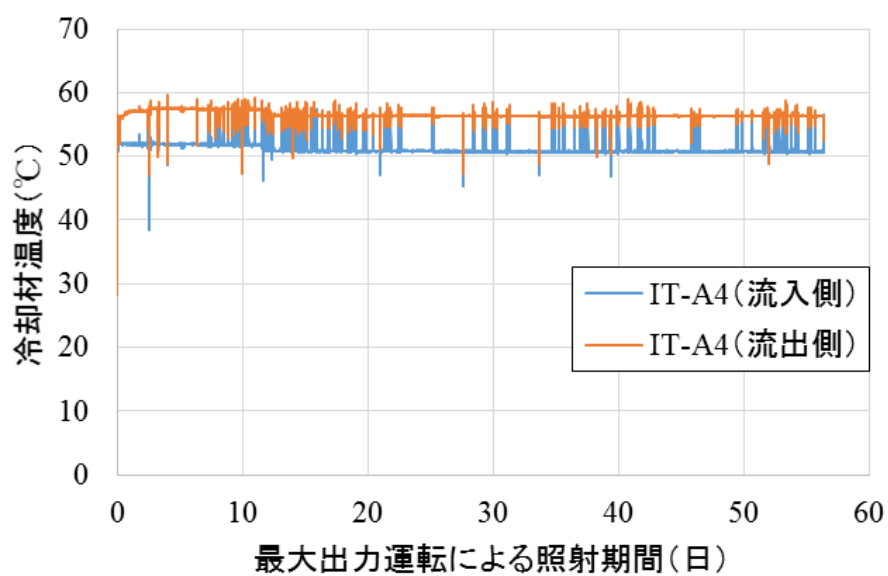


図 2.81 原子炉冷却材の温度変化

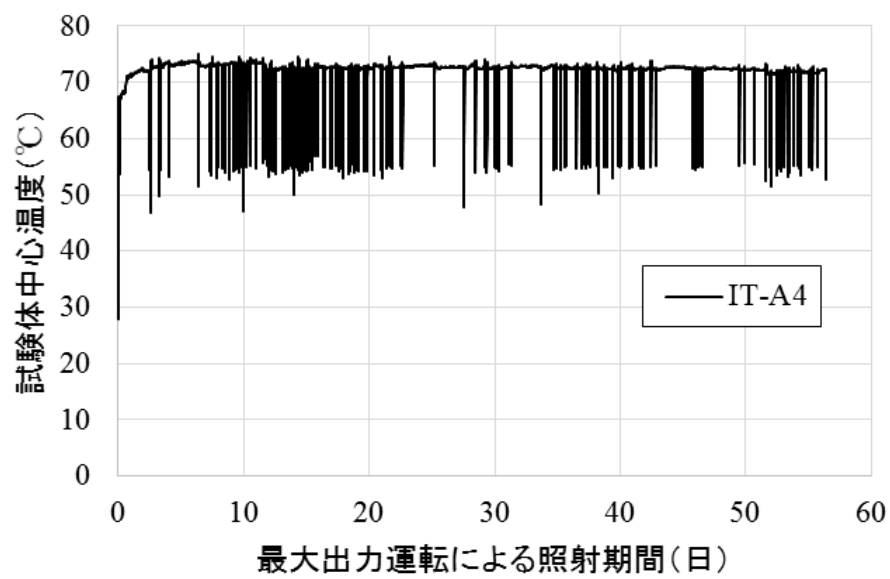


図 2.82 セメントペースト試験体の中心温度の時間変化

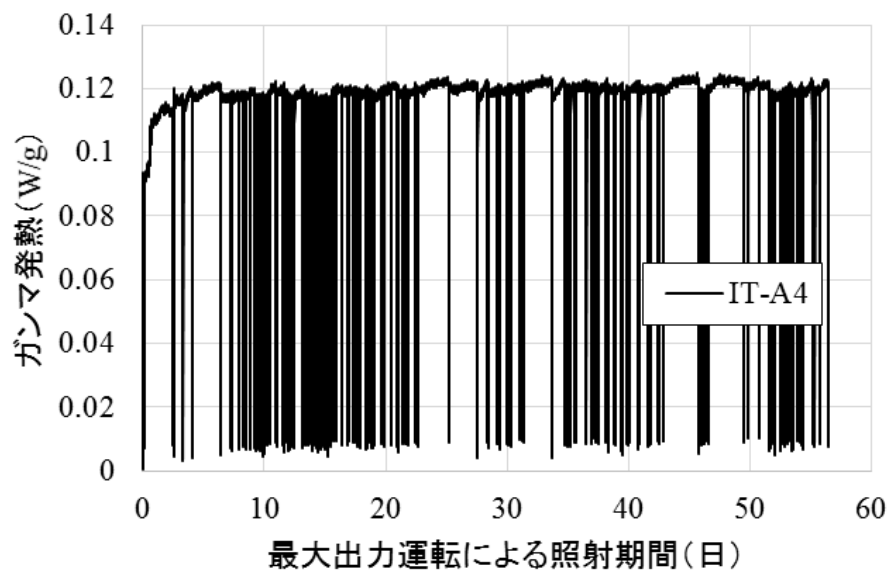


図 2.83 ガンマ発熱の時間変化

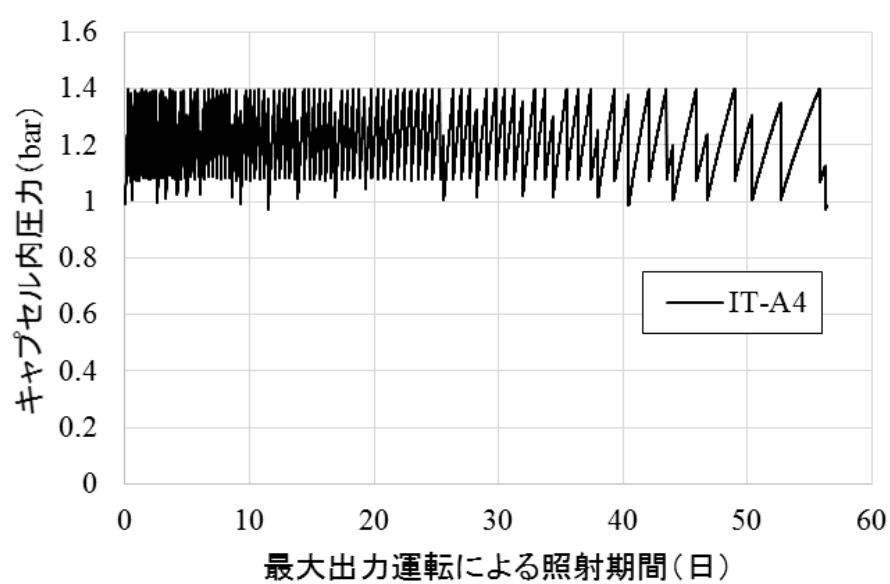


図 2.84 ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

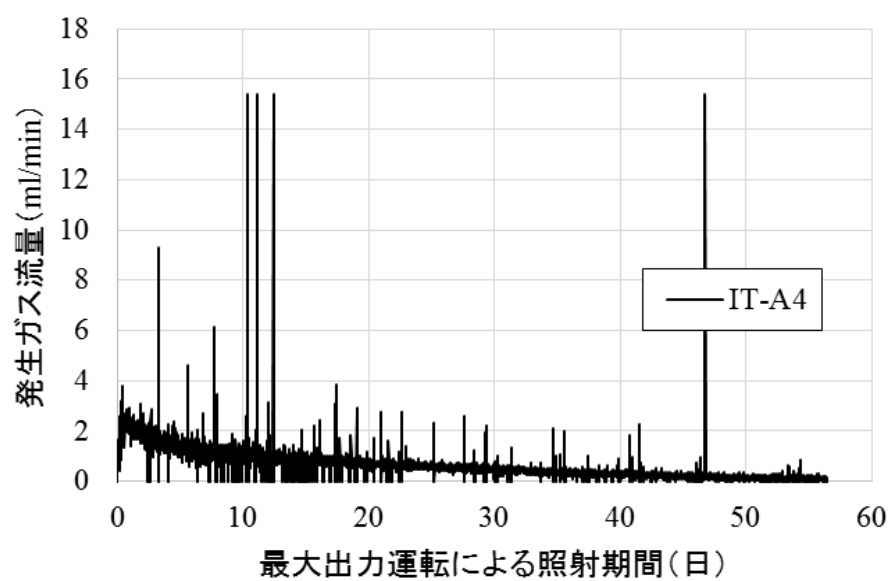


図 2.85 発生ガス流量の時間変化

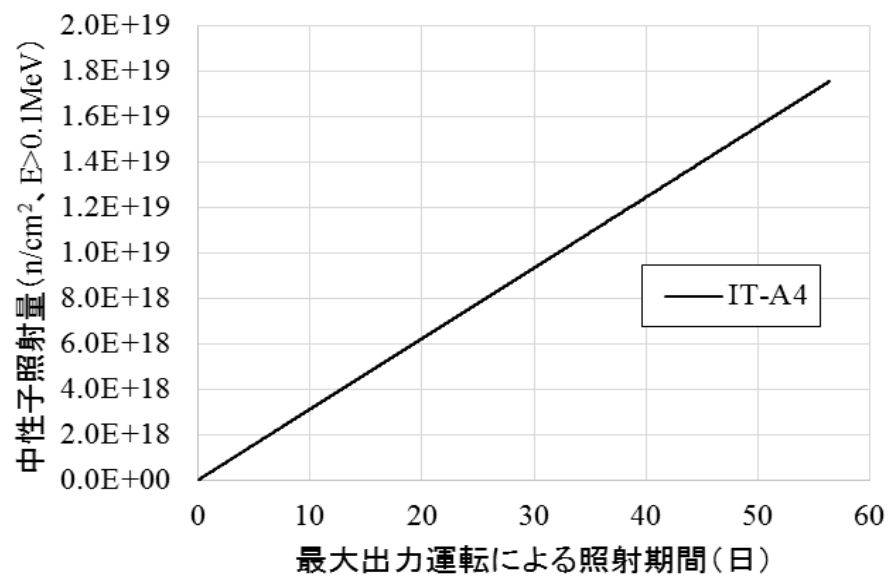


図 2.86 中性子照射量の時間変化

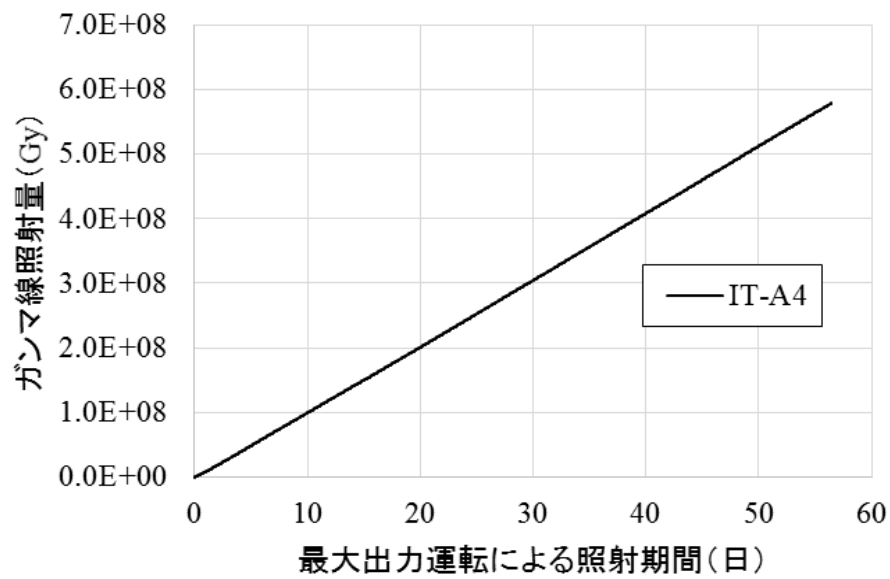


図 2.87 ガンマ線照射量の時間変化

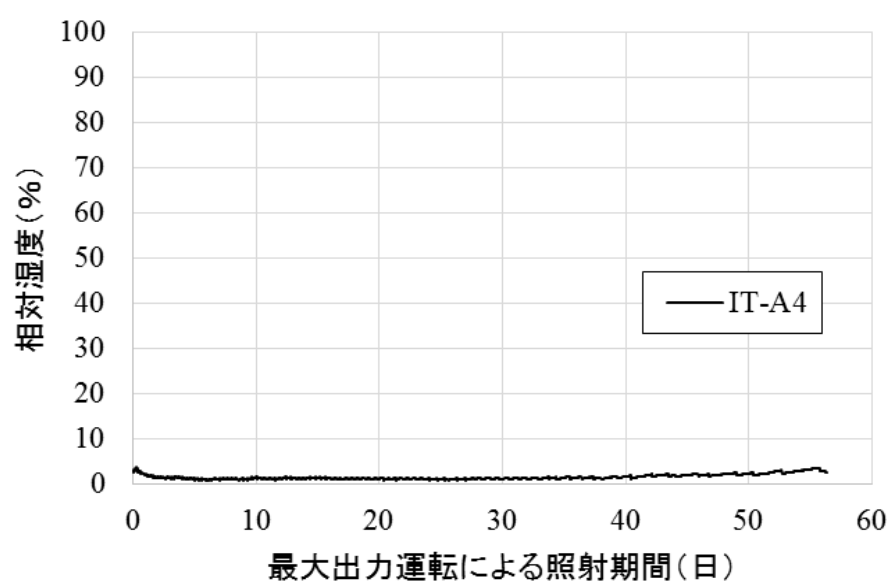


図 2.88 炉外の計測系内相対湿度の時間変化

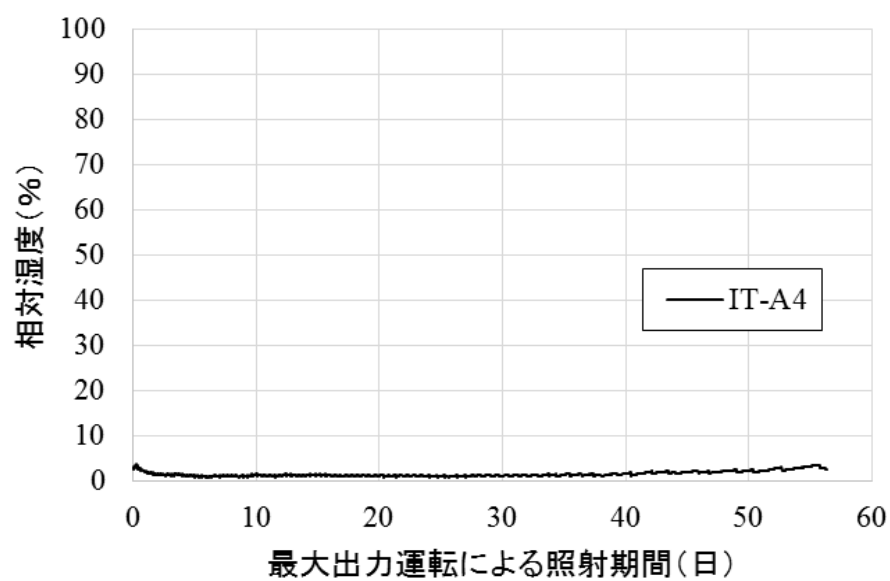


図 2.89 炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

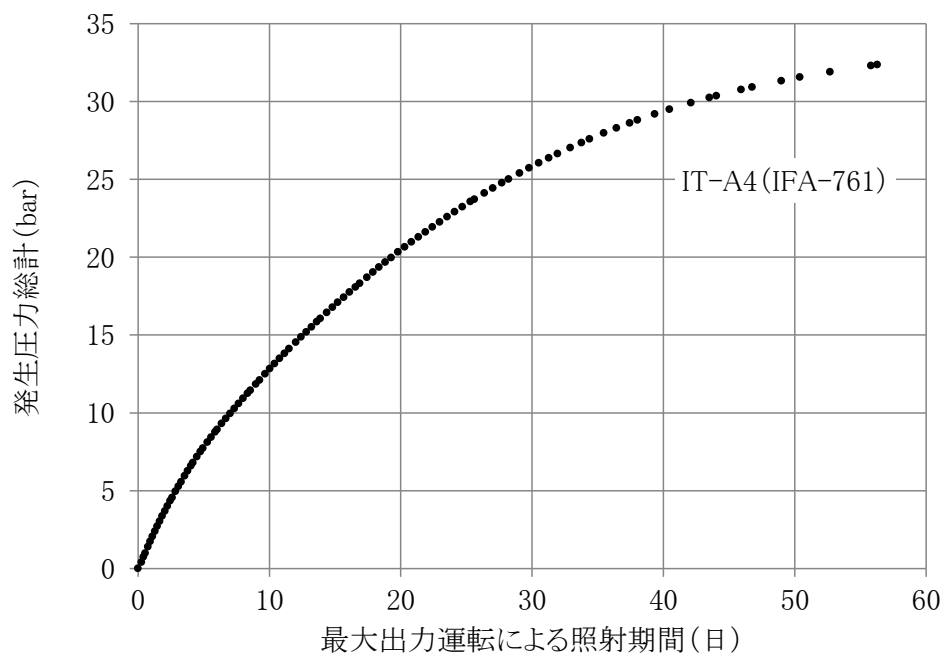


図 2.90 発生圧力総計の時間変化

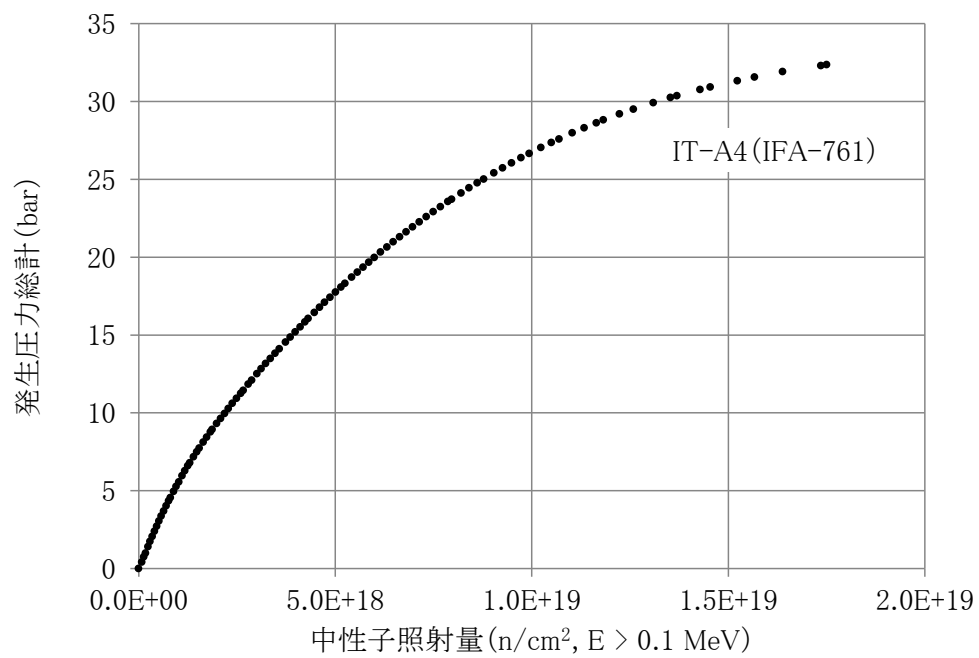


図 2.91 発生圧力総計の照射量に対する変化

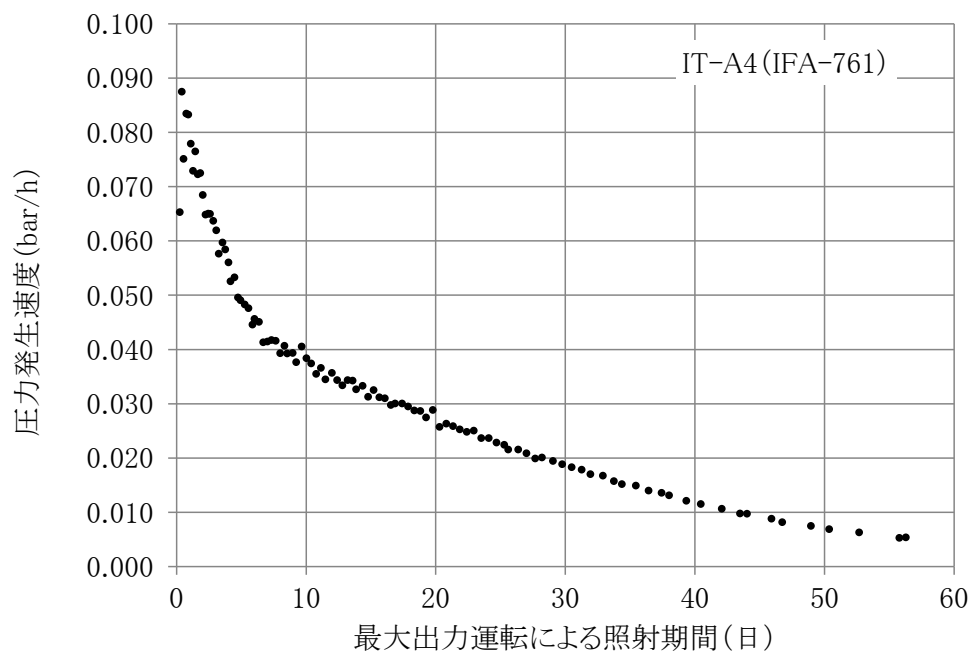


図 2.92 圧力発生速度の時間変化

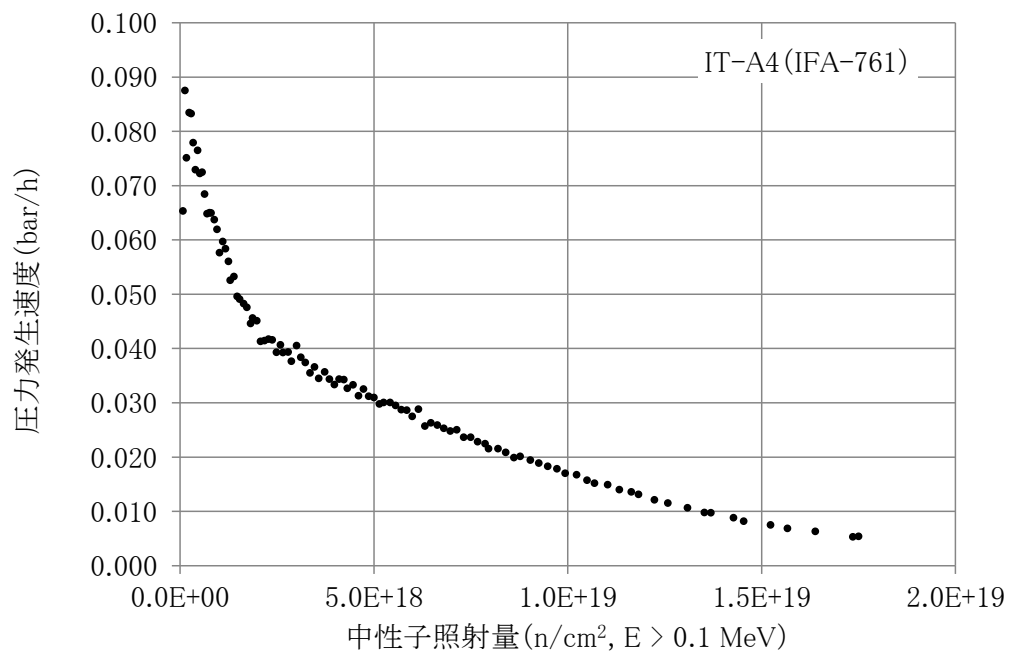


図 2.93 圧力発生速度の照射量に対する変化

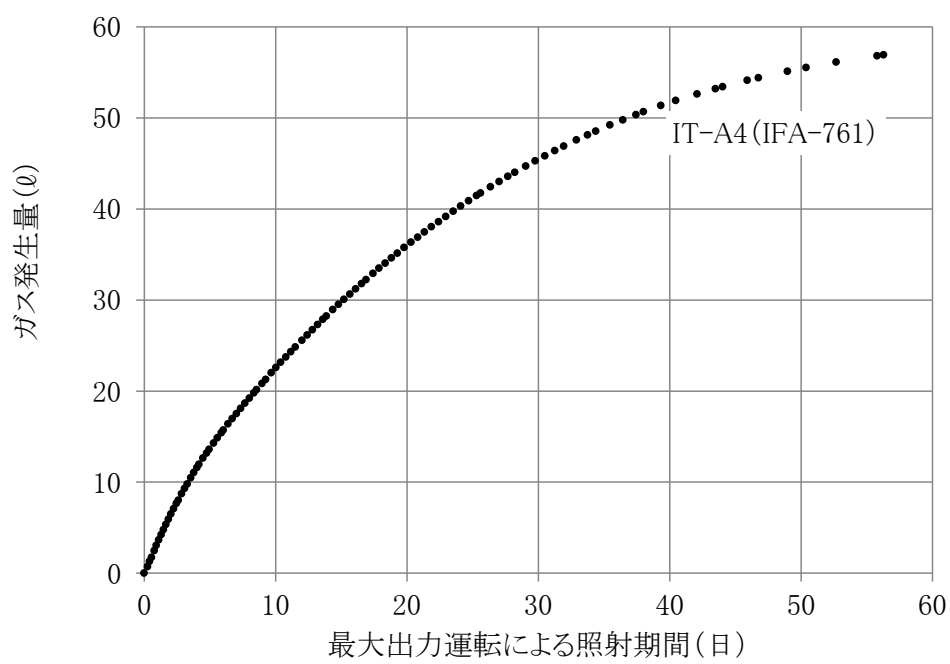


図 2.94 ガス発生量の時間変化 (0℃、1 気圧)

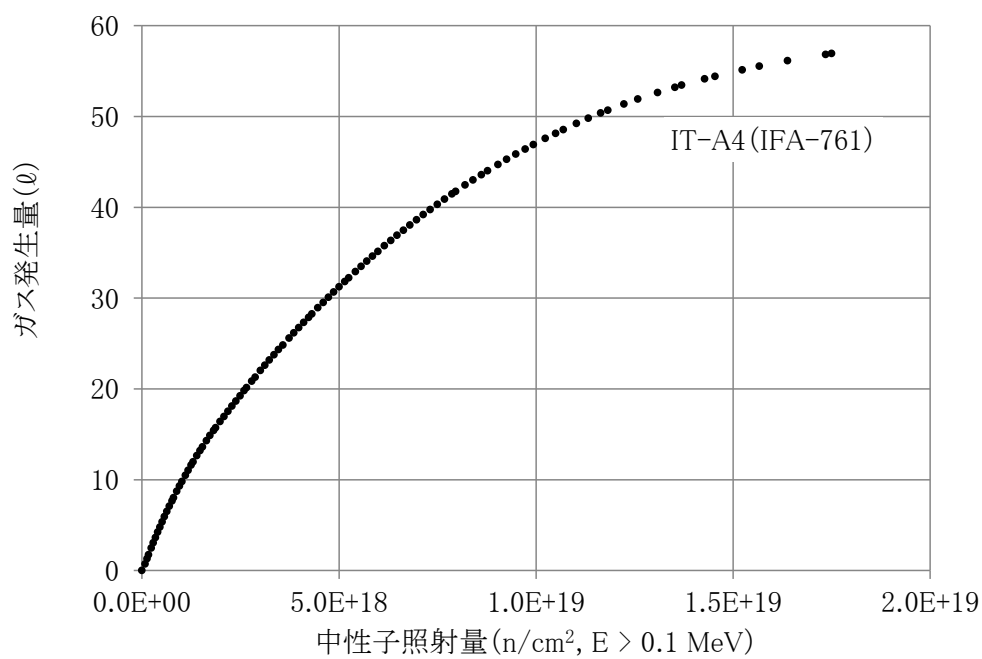


図 2.95 ガス発生量の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

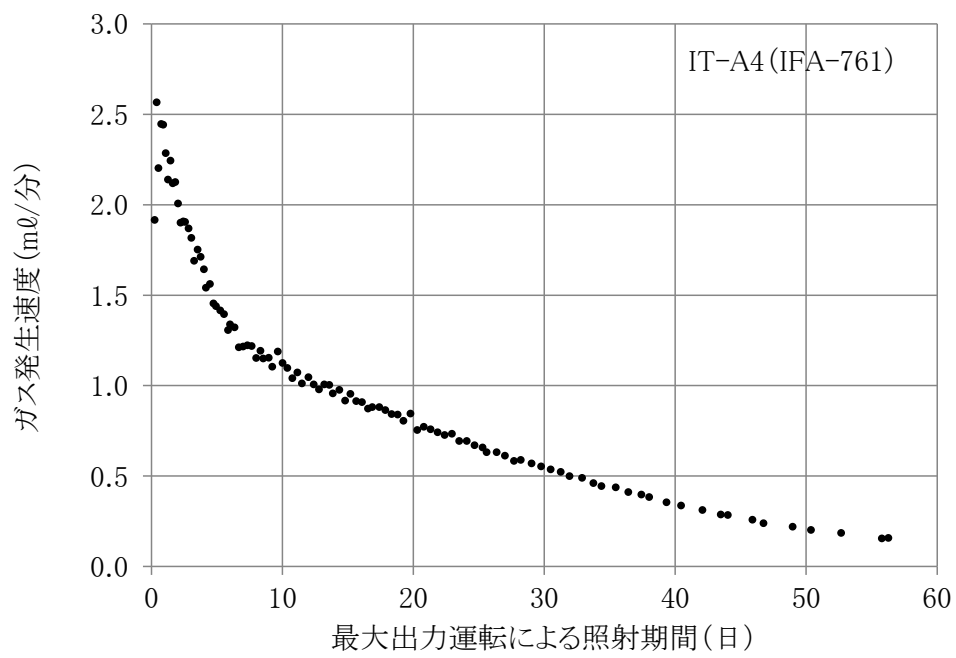


図 2.96 ガス発生速度の時間変化 (0℃、1 気圧)

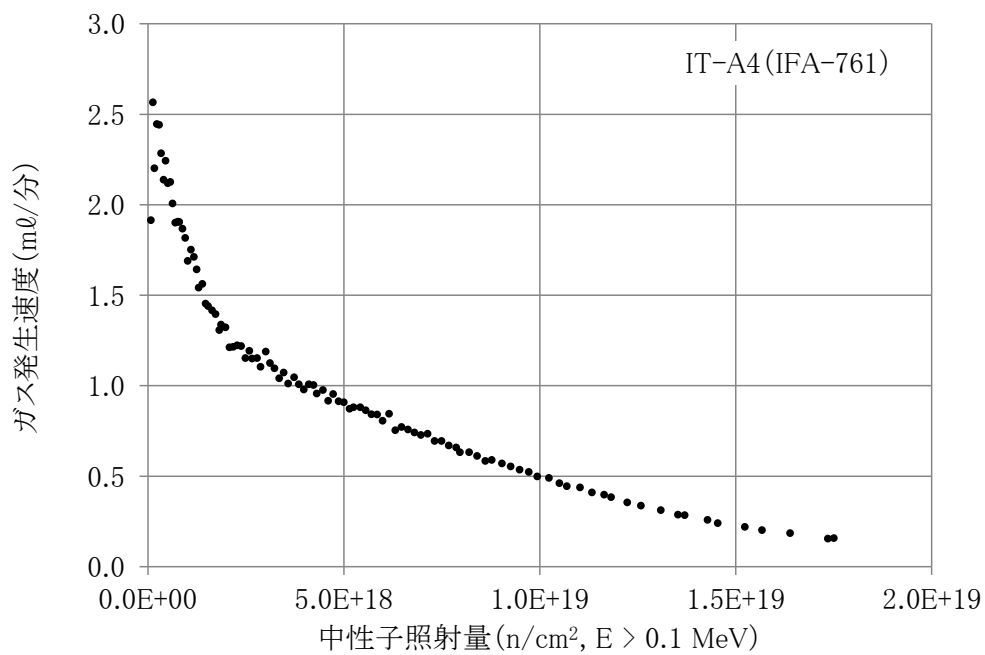


図 2.97 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

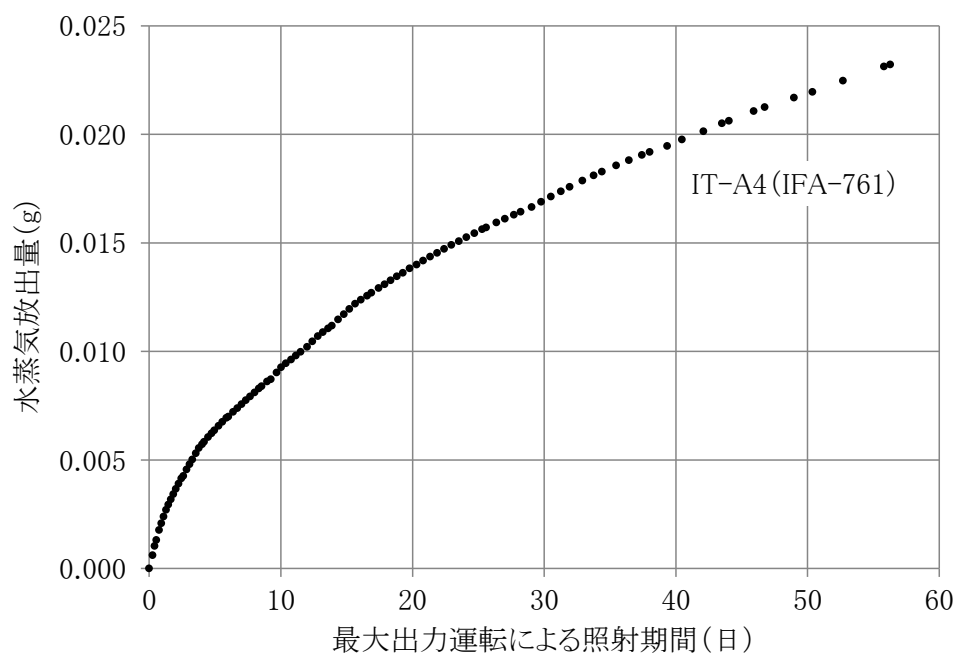


図 2.98 水分放出量の時間変化

(2) 照射後試験結果

表 2.13 から表 2.16 に、試験ケース IT-A1 (IFA-758)、IT-A2 (IFA-759)、IT-A3 (IFA-760)および IT-A4 (IFA-761)についての質量・寸法変化を示す。

表 2.13 試験ケース IT-A1 (IFA-758) の質量・寸法変化

試験 ケース	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)				
		試験前	試験後	変化					
IT-A1	A01	116.884	117.137	0.253	0.22				
	A02	116.440	116.856	0.416	0.36				
	A03	116.598	117.041	0.443	0.38				
	平均				0.32				
	試験体 ID	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)
		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
	A01	59.730	59.708	-0.022	-0.04	39.983	39.879	-0.104	-0.26
	A02	59.133	59.131	-0.002	0.00	40.083	39.997	-0.086	-0.21
	A03	59.558	59.545	-0.013	-0.02	39.992	39.909	-0.083	-0.21
	平均				-0.02				-0.23

表 2.14 試験ケース IT-A2 (IFA-759) の質量・寸法変化

試験 ケース	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)				
		試験前	試験後	変化					
IT-A2	A04	114.357	114.158	-0.20	-0.17				
	A05	113.857	114.654	0.80	0.70				
	A06	113.999	114.820	0.82	0.72				
	平均				0.42				
	試験体 ID	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)
		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
	A04	59.686	59.637	-0.049	-0.08	40.031	39.997	-0.034	-0.08
	A05	59.625	59.585	-0.040	-0.07	39.953	39.908	-0.045	-0.11
	A06	59.478	59.422	-0.056	-0.09	40.013	39.982	-0.031	-0.08
	平均				-0.08				-0.09

表 2.15 試験ケース IT-A3 (IFA-760) の質量・寸法変化

試験 ケース	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)				
		試験前	試験後	変化					
IT-A3	A07	140.596	118.468	-22.13	-15.74				
	A08	140.688	118.034	-22.65	-16.10				
	A09	141.063	118.723	-22.34	-15.84				
	平均				-15.89				
	試験体 ID	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)
		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
	A07	59.289	59.103	-0.186	-0.31	40.247	40.014	-0.233	-0.58
	A08	59.688	59.540	-0.148	-0.25	40.201	40.015	-0.186	-0.46
	A09	59.662	59.699	0.037	0.06	40.230	40.024	-0.206	-0.51
	平均				-0.17				-0.52

表 2.16 試験ケース IT-A4 (IFA-761) の質量・寸法変化

試験 ケース	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)				
		試験前	試験後	変化					
IT-A4	A10	141.307	119.530	-21.78	-15.41				
	A11	142.100	120.582	-21.52	-15.14				
	A12	141.005	119.046	-21.96	-15.57				
	平均				-15.38				
	試験体 ID	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)
		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
	A10	59.850	59.674	-0.176	-0.29	40.279	40.121	-0.158	-0.39
	A11	59.803	59.658	-0.145	-0.24	40.200	40.047	-0.153	-0.38
	A12	59.663	59.559	-0.104	-0.17	40.312	40.198	-0.114	-0.28
	平均				-0.24				-0.35

2. 3 物理特性試験

2. 3. 1 試験概要

(1) 中性子照射試験

試験体については、中性子照射の影響を把握できるように、長期間の養生により十分に水和反応が進んでいるコンクリート試験体を用いることとする。

JEEP II で照射試験を行う場合、キャプセル内で試験体を設置できる長さは 60cm となっているため、 $\phi 4 \times 6$ cm の試験体を用いると、キャプセルには 10 体の試験体を収納することが可能となる。2 種類の骨材（骨材 E：砂岩砂利、骨材 F：凝灰岩碎石）によるコンクリート試験体を中央に 4 体ずつ、上部 1 体を温度計測用の試験体、下部 1 体分のスペースに骨材とセメントペーストのサンプルを設置した。下部 1 体分は、さらに 6 層に分割し、1 層ごとに $\phi 1 \times 1$ cm のホワイトセメントペースト試験体 1 体と 6 種類の $\phi 1 \times 1$ cm の骨材試験体を 1 体ずつ配置した。表 2.17 に使用した骨材種類を、表 2.18 に物理特性試験の試験条件と試験体配置を示す。

表 2.17 選定した骨材種類

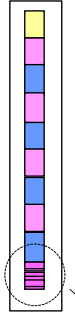
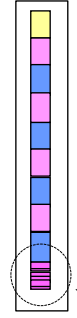
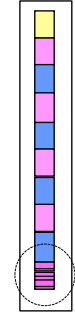
試料名	岩種	種類	産地
E	砂岩	砂利	静岡県
F	凝灰岩	碎石	愛知県
G	砂岩		東京都
H			静岡県
J			埼玉県
K	石灰岩		大分県

加熱試験（Heating Test）では、断面内部の温度を一定とし、照射試験による試験体内の最高温度と平均温度の 2 水準の加熱温度を設定した。4 つの容器で温度 2 水準の試験を行う必要があるため、試験体の種類に応じて以下のように配置することとした。表 2.19 および表 2.20 に非照射・加熱試験の試験条件と試験体配置を示す。

- ・コンクリート：照射中の温度勾配の影響を把握するために、最高温度と平均温度の 2 水準設定する。ただし、平均温度は 3 ヶ月と 24 ヶ月のみとする。
- ・ホワイトセメントペースト、骨材：試験体が小さく照射中に温度勾配が発生しないため、平均温度の 1 水準とする。

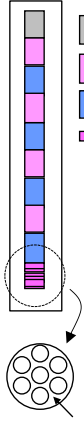
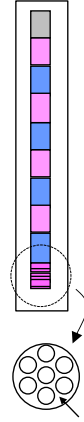
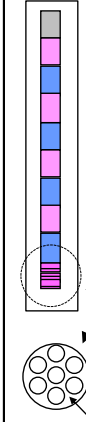
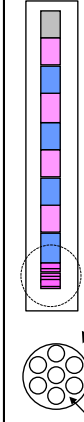
上記に加え、照射期間中の 20℃封緘養生試験体の特性を把握するために、非照射・非加熱試験（CT：Control test）を照射期間中の一定時期に実施する。表 2.21 に非照射・非加熱試験の試験条件と試験体配置を示す。

表 2.18 物理特性試験 (Physical property test :PPT) の試験条件と試験体配置

Type of test				Physical property test			
Container ID				B	C	D	E
Fluence				0.75x10 ¹⁹ n/cm ²	1.5x10 ¹⁹ n/cm ²	3.0x10 ¹⁹ n/cm ²	6.0x10 ¹⁹ n/cm ²
Temperature				Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere
Period (M)				3	6	12	24
Moisture condition of specimens				Sealed	Sealed	Sealed	Sealed
Specimen Arrangement				 1xΦ4x6cm Concrete (Thermo couple installed) 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder 1xΦ1x1cm White cement paste 6xΦ1x1cm Aggregate (E, F, G, H, J, K) Sample holder made with Aluminum	 1xΦ4x6cm Concrete (Thermo couple installed) 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder 1xΦ1x1cm White cement paste 6xΦ1x1cm Aggregate (E, F, G, H, J, K) Sample holder made with Aluminum	 1xΦ4x6cm Concrete (Thermo couple installed) 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder 1xΦ1x1cm White cement paste 6xΦ1x1cm Aggregate (E, F, G, H, J, K) Sample holder made with Aluminum	 1xΦ4x6cm Concrete (Thermo couple installed) 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder 1xΦ1x1cm White cement paste 6xΦ1x1cm Aggregate (E, F, G, H, J, K) Sample holder made with Aluminum
Number of specimens	φ 4x6cm	Cement paste	TC	0	0	0	0
			CP	0	0	0	0
		Concrete	TC	1	1	1	1
			CE	4	4	4	4
	CF		4	4	4	4	
	φ 1x1cm	White cement paste	WCP	6	6	6	6
		Aggregate	E	6	6	6	6
			F	6	6	6	6
			G	6	6	6	6
			H	6	6	6	6
			J	6	6	6	6
			K	6	6	6	6
Note							

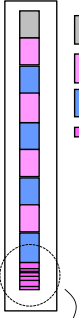
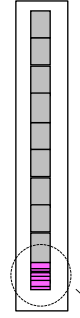
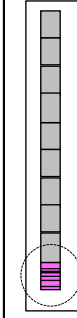
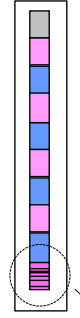
*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,G,H,J,K aggregate

表 2.19 非照射・加熱試験 (Heating test : HT) の試験条件と試験体配置 (1/2)

Type of test				Heating test			
Container ID				H1			H2
Fluence				-	-	-	-
Temperature				Maximum	Maximum	Maximum	Maximum
Period (M)				3	6	12	24
Moisture condition of specimens				Sealed	Sealed	Sealed	Sealed
Specimen Arrangement				 1xΦ4x6cm Dummy 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder Sample holder without specimens	 1xΦ4x6cm Dummy 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder Sample holder without specimens	 1xΦ4x6cm Dummy 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder Sample holder without specimens	 1xΦ4x6cm Dummy 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder Sample holder without specimens
Number of specimens	φ 4x6cm	Cement paste	TC	0	0	0	0
			CP	0	0	0	0
		Concrete	TC	0	0	0	0
			CE	4	4	4	4
			CF	4	4	4	4
	φ 1x1cm	White cement paste	WCP	0	0	0	0
			E	0	0	0	0
		Aggregate	F	0	0	0	0
			G	0	0	0	0
			H	0	0	0	0
			J	0	0	0	0
			K	0	0	0	0
Note							

*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,G,H,J,K aggregate

表 2.20 非照射・加熱試験 (Heating test : HT) の試験条件と試験体配置 (2/2)

Type of test				Heating test			
Container ID				H3			H4
Fluence				-	-	-	-
Temperature				Average	Average	Average	Average
Period (M)				3	6	12	24
Moisture condition of specimens				Sealed	Sealed	Sealed	Sealed
Specimen Arrangement				 1xΦ4x6cm Dummy 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete 6xΦ4x1cm Sample holder 1xΦ1x1cm White cement paste 6xΦ1x1cm Aggregate (E, F, G, H, J, K) Sample holder made with Aluminum	 9xΦ4x6cm Dummy 6xΦ4x1cm Sample holder 1xΦ1x1cm White cement paste 6xΦ1x1cm Aggregate (E, F, G, H, J, K) Sample holder made with Aluminum	 9xΦ4x6cm Dummy 6xΦ4x1cm Sample holder 1xΦ1x1cm White cement paste 6xΦ1x1cm Aggregate (E, F, G, H, J, K) Sample holder made with Aluminum	 1xΦ4x6cm Dummy 4xΦ4x6cm Concrete (E) 4xΦ4x6cm Concrete (F) 6xΦ4x1cm Sample holder 1xΦ1x1cm White cement paste 6xΦ1x1cm Aggregate (E, F, G, H, J, K) Sample holder made with Aluminum
Number of specimens	φ 4x6cm	Cement paste	TC	0	0	0	0
			CP	0	0	0	0
		Concrete	TC	0	0	0	0
			CE	4	0	0	4
			CF	4	0	0	4
	φ 1x1cm	White cement paste	WCP	6	6	6	6
		Aggregate	E	6	6	6	6
			F	6	6	6	6
			G	6	6	6	6
			H	6	6	6	6
			J	6	6	6	6
			K	6	6	6	6
Note							

*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,G,H,J,K aggregate

表 2.21 非照射・非加熱試験 (Control test : CT) の試験条件と試験体配置

Type of test				Control test		
ID				C1	C2	C3
Fluence				-	-	-
Temperature				20 dgree	20 dgree	20 dgree
Period (M)				7	15	29
Moisture condition of specimens				Sealed	Sealed	Sealed
Specimen Arrangement				3xΦ4x6cm Concrete (E) 3xΦ4x6cm Concrete (F) <td> 3xΦ4x6cm Concrete (E) 3xΦ4x6cm Concrete (F) <td> 3xΦ4x6cm Concrete (E) 3xΦ4x6cm Concrete (F) </td></td>	3xΦ4x6cm Concrete (E) 3xΦ4x6cm Concrete (F) <td> 3xΦ4x6cm Concrete (E) 3xΦ4x6cm Concrete (F) </td>	3xΦ4x6cm Concrete (E) 3xΦ4x6cm Concrete (F)
Number of specimens	φ 4x6cm	Cement paste	TC	0	0	0
			CP	0	0	0
		Concrete	TC	0	0	0
			CE	3	3	3
			CF	3	3	3
	φ 1x1cm	White cement paste	WCP	0	0	0
		Aggregate	E	0	0	0
			F	0	0	0
			G	0	0	0
			H	0	0	0
			J	0	0	0
			K	0	0	0
Note			without container	without container	without container	

*: TC=Thermo couple installed, CP=Cement paste, CE=Concrete with E aggregate, CF=Concrete with F aggregate, WCP=White cement paste, E,F,G,H,J,K=E,F,C

(2) 照射後試験

中性子照射による影響を把握するために、照射後試験（PIE：Post Irradiation Examination）を行う。なお、中性子照射によりサンプルは放射化するため、放射線による被曝を低減するために、約2か月間放置し放射能レベルを低減させる。

中性子がコンクリートの物理特性に及ぼす影響を把握するためには、下記のPIEを実施することが望ましい。

■コンクリート

- ・質量変化、寸法変化 : 密度および体積の変化
- ・圧縮強度、ヤング率 : 機械的特性の変化
- ・細孔径分布 : 空隙構造の変化
- ・自由水量、結合水量 : 水の挙動の変化（中性子とガンマ線の影響の違い）
- ・XRD : 水和物組成の変化
- ・TG-TDA : 水和生成物（ポルトランダイト*2）の変化
- ・SEM : 水和生成物（主にC-S-H*1）の変化
- ・水蒸気吸着等温線 : 空隙構造の変化

*1：セメントペーストでもっとも多くの体積を占める水和生成物。比表面積も大きく、強度を保持する主成分と考えられている。

*2：C-S-Hの次に体積を占める水和生成物。結晶質構造。

■セメントペースト

- ・質量変化、寸法変化 : 密度および体積の変化
- ・強度 : 機械的特性の変化
- ・細孔径分布 : 空隙構造の変化
- ・自由水量、結合水量 : 水の挙動の変化（中性子とガンマ線の影響の違い）
- ・XRD : 水和物組成の変化
- ・TG-TDA : 水和生成物（ポルトランダイト）の変化
- ・SEM : 水和生成物（主にC-S-H）の変化
- ・水蒸気吸着等温線 : 空隙構造の変化
- ・NMR : 水和生成物（C-S-H）のアトミックスケールの変化
- ・小角X線 or 中性子線散乱 : 水和生成物（C-S-H）のナノスケールの変化

■骨材

- ・質量変化、寸法変化 : 密度および体積の変化
- ・XRD : 鉱物組成の変化
- ・TG-TDA : 含水率や結晶水率の変化
- ・TEM : 膨張や損傷の把握

中性子照射は、ノルウェーにあるエネルギー技術研究所（IFE）の JEEP II で実施しているため、PIE も同研究所が保有している施設で実施できれば効率的であるが、同研究所はコンクリートを専門としている機関ではないため、実施できる PIE は限定的である。そこで、ノルウェーで実施する PIE を以下に示す。

①物理特性試験（Physical property test : PPT）

- ・コンクリート：質量変化、寸法変化、圧縮強度

②非照射・加熱試験（Heating test : HT）

- ・コンクリート：質量変化、寸法変化、圧縮強度

③非照射・非加熱試験（Control test : CT）

- ・コンクリート：質量変化、寸法変化、圧縮強度

また、日本で PIE を実施するために、表 2.22 に示すサンプルを日本へ輸送した。その際に用いた輸送容器を図 2.99 に、サンプルを入れる内容器（バスケット）を図 2.100 に示す。図 2.101 にサンプル（PPT-C）の外観を示す。

日本へ輸送後、NFD（日本核燃料開発）にて以下の PIE を実施した。

①物理特性試験（Physical property test : PPT）

- ・セメントペースト：質量変化、寸法変化、ビッカース硬さ
- ・骨材：寸法変化

その後計画を見直し、限られたリソースの中で必要なデータを取得するために、NFD での PIE 実施後、表 2.22 に示す全てのサンプルをノルウェーの IFE に日本への輸送と同じ輸送容器で輸送した。

①物理特性試験（Physical property test : PPT）

- ・セメントペースト：質量変化、寸法変化、ビッカース硬さ、XRD（X-ray diffraction）
- ・骨材：質量変化、寸法変化、XRD（X-ray diffraction）

なお、中性子線による照射試験に使用した試験体及び試験器具は、適切に処分した。

表 2.22 日本へ輸送するサンプル

輸送 キャプセル ID	試験ケース	サンプル種類	数量
C	PPT-C (IFA-752)	コンクリート試験体(φ4×6cm)*	1
		圧縮強度試験後のコンクリート試験体破片	1
		白色セメントサンプル(φ1×1cm)	6
		骨材サンプル(φ1×1cm)	36
B	PPT-B (IFA-753)	コンクリート試験体(φ4×6cm)*	1
		圧縮強度試験後のコンクリート試験体破片	1
		白色セメントサンプル(φ1×1cm)	6
		骨材サンプル(φ1×1cm)	36

*: 熱電対を設置していた試験体

表 2.23 中性子照射後試験の物性取得状況

試験体の種類	試験の種類	試験パラメータ		ID	質量変化	寸法変化	圧縮強度	ビッカース	XRD
セメントペースト (φ4x6cm)	相互作用試験 (IT)	水分量	75℃乾燥	A1	●	●			
			120℃乾燥	A2	●	●			
			未乾燥	A3	●	●			
			未乾燥	A4	●	●			
コンクリート (φ4x6cm)	物理特性試験 (PPT)	照射量	7.78×10^{18} n/cm ²	B	●	●	●		
			1.41×10^{19} n/cm ²	C	●	●	●		
			4.58×10^{19} n/cm ²	D	●	●	●		
			9.20×10^{19} n/cm ²	E	●	●	●		
	加熱試験 (HT)	温度	最高温度 3ヶ月	H1-3	●	●	●		
			最高温度 6ヶ月	H1-6	●	●	●		
			最高温度 12ヶ月	H1-12	●	●	●		
			最高温度 24ヶ月	H2-24	●	●	●		
			平均温度 3ヶ月	H3-3	●	●	●		
	平均温度 24ヶ月	H4-24	●	●	●				
ホワイトセメントペースト (φ1x1cm)	物理特性試験 (PPT)	照射量	7.01×10^{18} n/cm ²	B	●	●		●	○
			1.28×10^{19} n/cm ²	C	●	●		●	○
			4.12×10^{19} n/cm ²	D	○	○		○	○
			8.25×10^{19} n/cm ²	E	○	○		○	○
骨材 (φ1x1cm)	物理特性試験 (PPT)	照射量	7.01×10^{18} n/cm ²	B	○	●			○
			1.28×10^{19} n/cm ²	C	○	●			○
			4.12×10^{19} n/cm ²	D	○	○			○
			8.25×10^{19} n/cm ²	E	○	○			○

※ 高速中性子照射量 (E > 0.1MeV)

XRD(X-ray diffraction): X線回折装置(結晶構造の解析)

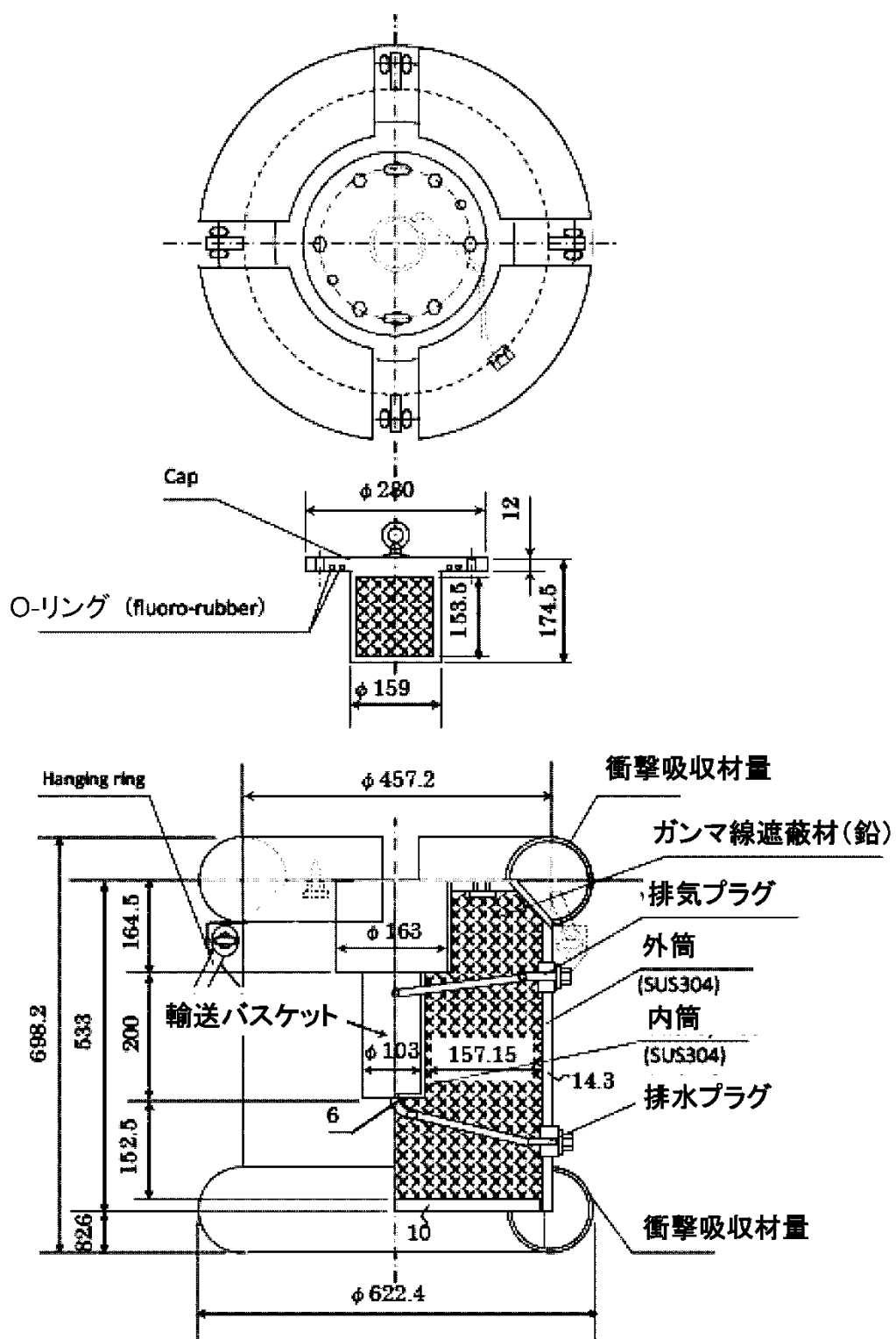


図 2.99 輸送容器 (NFD1 型)

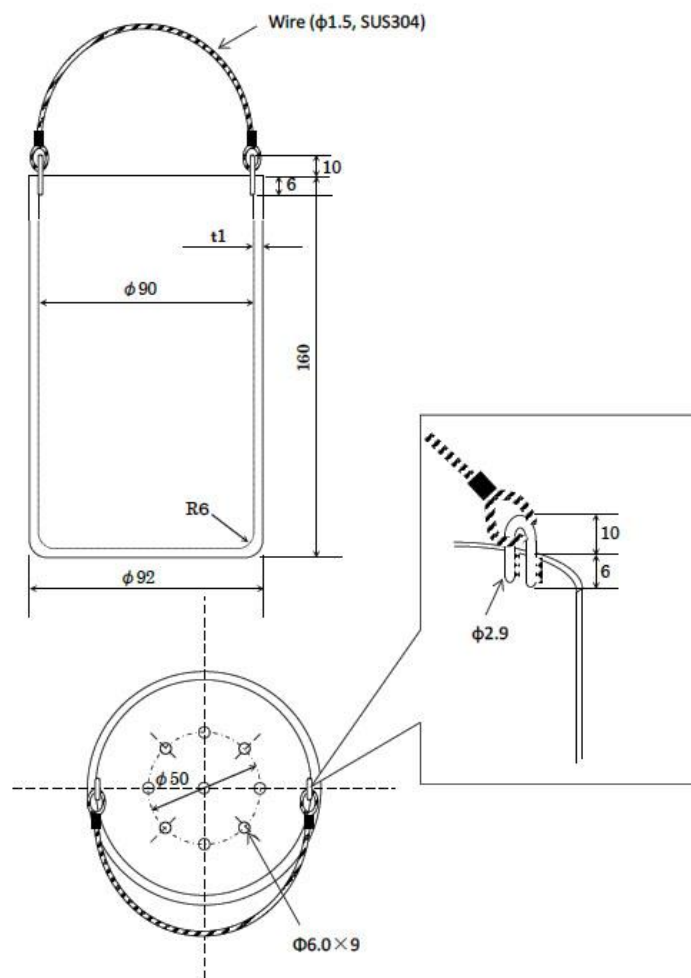
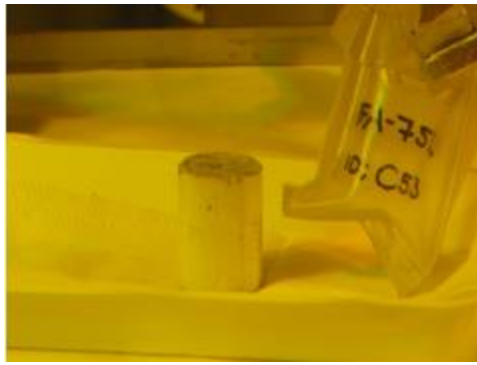
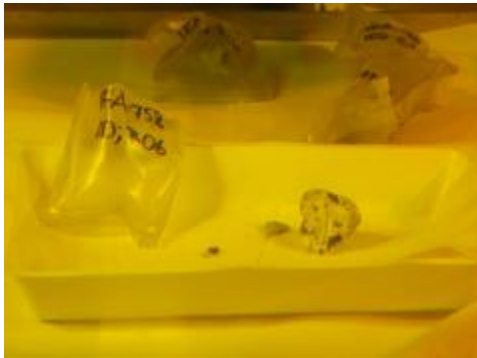


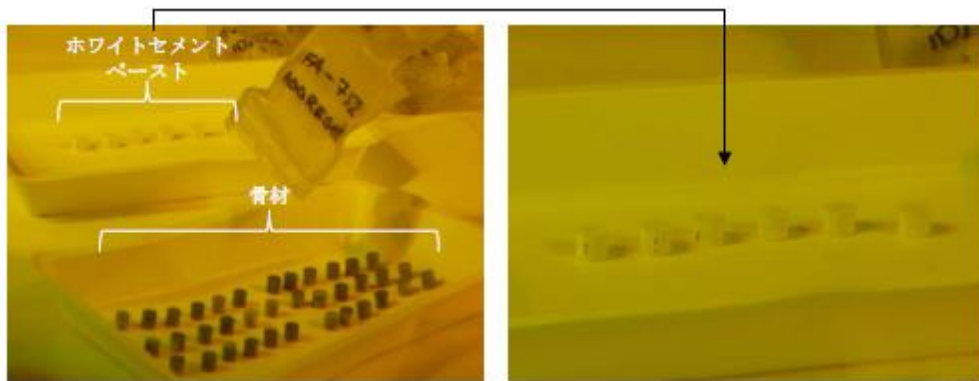
図 2.100 内容器 (バスケット)



(a) コンクリート試験体



(b) コンクリート試験体破片



(c) ホワイトセメントペーストと骨材

図 2.101 サンプル (PPT-C) の外観

2. 3. 2 試験結果

(1) 中性子照射試験

1) 試験ケース PPT-B (IFA-753)

図 2. 102 に示すように原子炉の出力は、約 2. 0MW 程度となっている。また、炉は試料の交換等のために、比較的頻繁に ON/OFF を繰り返していることがわかる。図 2. 103 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。炉外で 52℃に制御されている冷却水は炉内に送り込まれた後、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇して炉外に送り出され、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却される。図 2. 104 にコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 71℃程度であった。図 2. 105 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0. 09W/g となっている。

図 2. 106 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1. 25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1. 0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。また、バルブ開放間隔は、時間経過に伴って長くなっており、これは時間経過に伴ってガスの発生速度が低下している試験結果と整合している。図 2. 107 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 2. 108 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 2. 109 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は $3. 60 \times 10^{12}$ n/cm²/s、ガンマ線量率は 274kGy/h であった。図 2. 110 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 2. 111 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。封緘状態の自由水を多く含むコンクリート試験体を用いているので、水蒸気の放出は非常に多く、水蒸気捕集システム改良前でコンデンサも設置していないため、相対湿度は 100%となるとともに多くの水蒸気が結露しており、水蒸気を正確に把握できていないと思われる。図 2. 112 および図 2. 113 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 114 および図 2. 115 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 116 および図 2. 117 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 118 および図 2. 119 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 120 に、水分放出量の時間変化を示す。

図 2. 121 に照射後の試験体の目視観察結果の一例を示す。

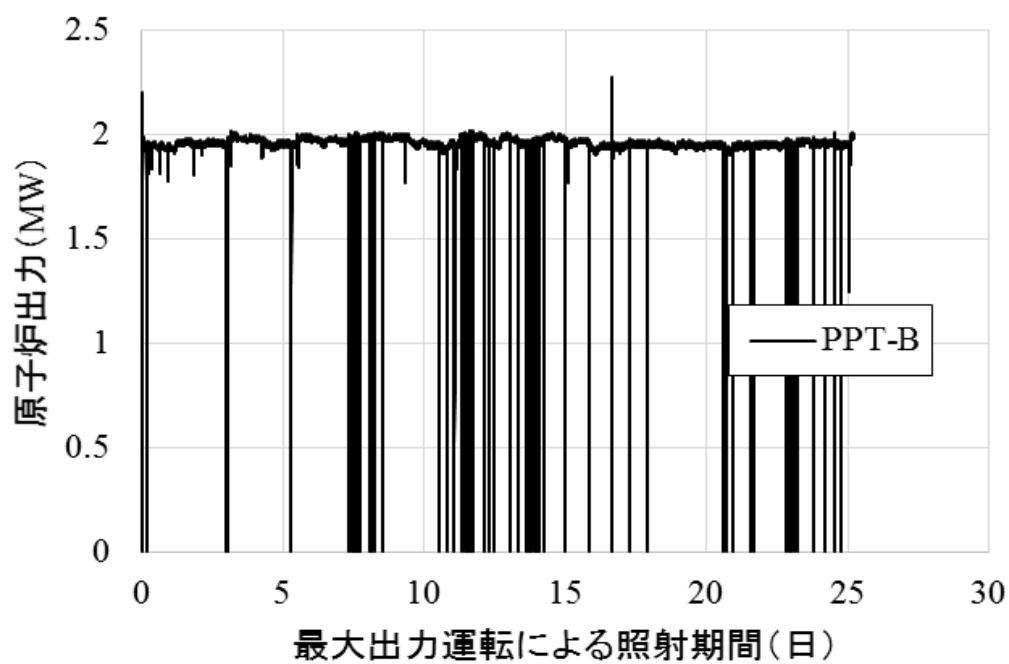


図 2.102 原子炉出力の変化

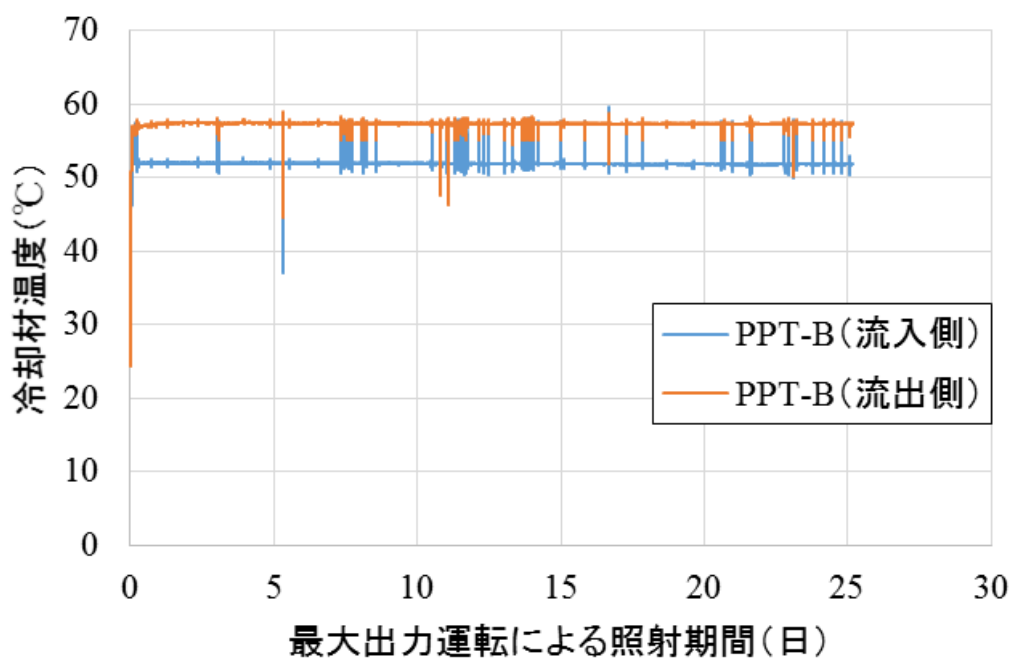


図 2.103 原子炉冷却材の温度変化

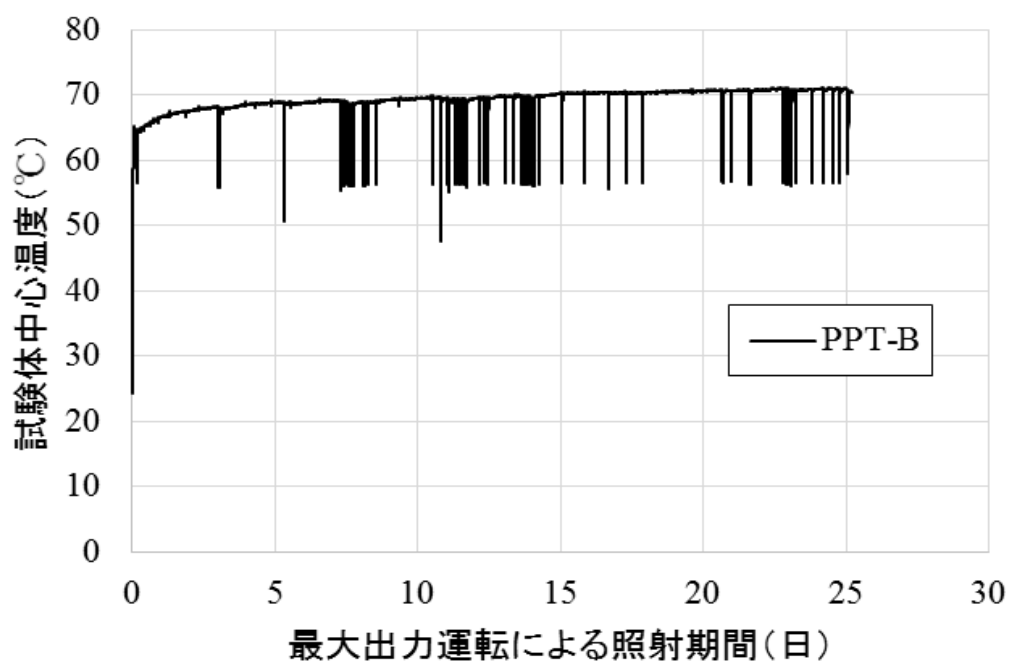


図 2. 104 コンクリート試験体の中心温度の時間変化

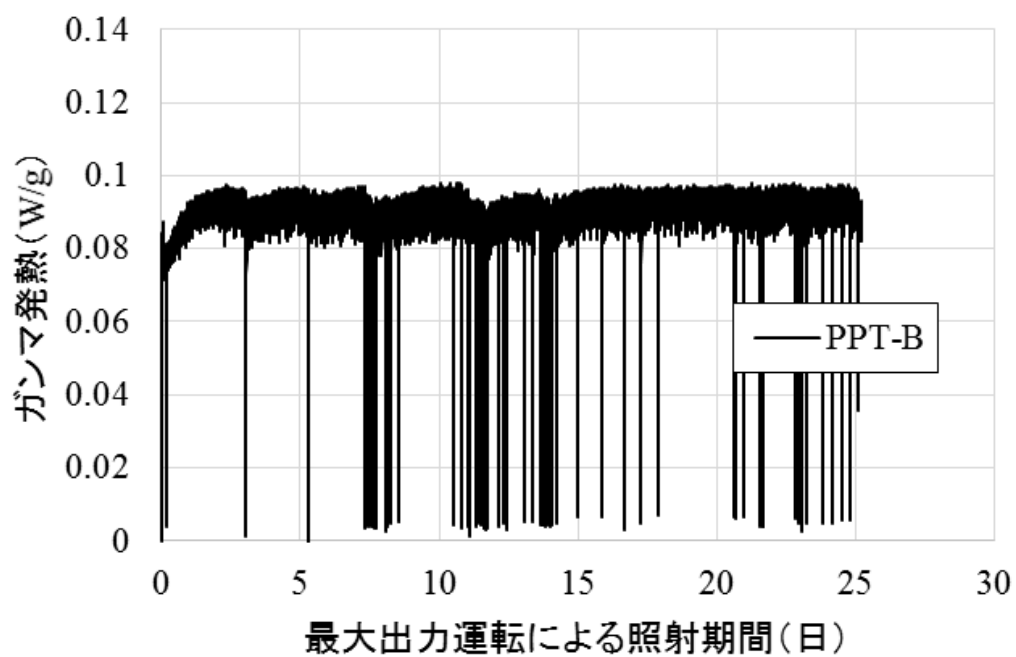


図 2. 105 ガンマ発熱の時間変化

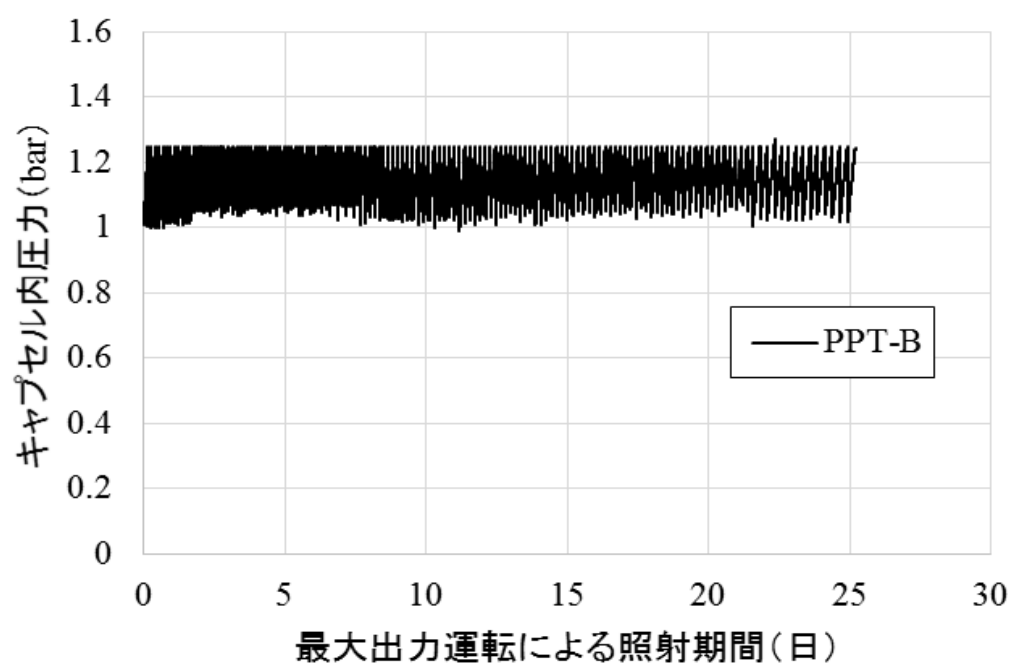


図 2.106 ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

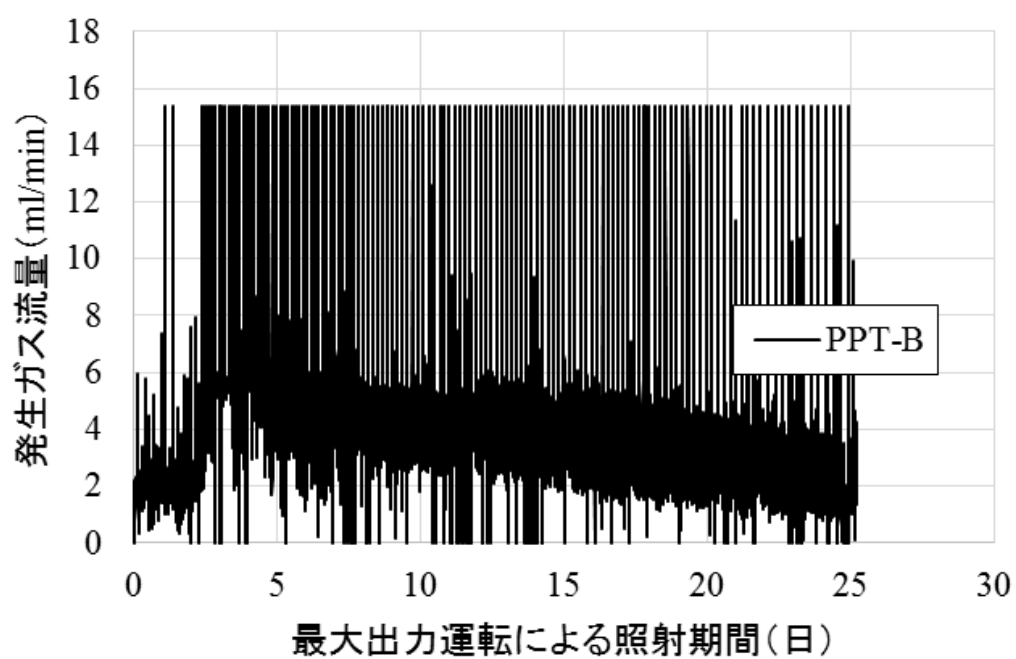


図 2.107 発生ガス流量の時間変化

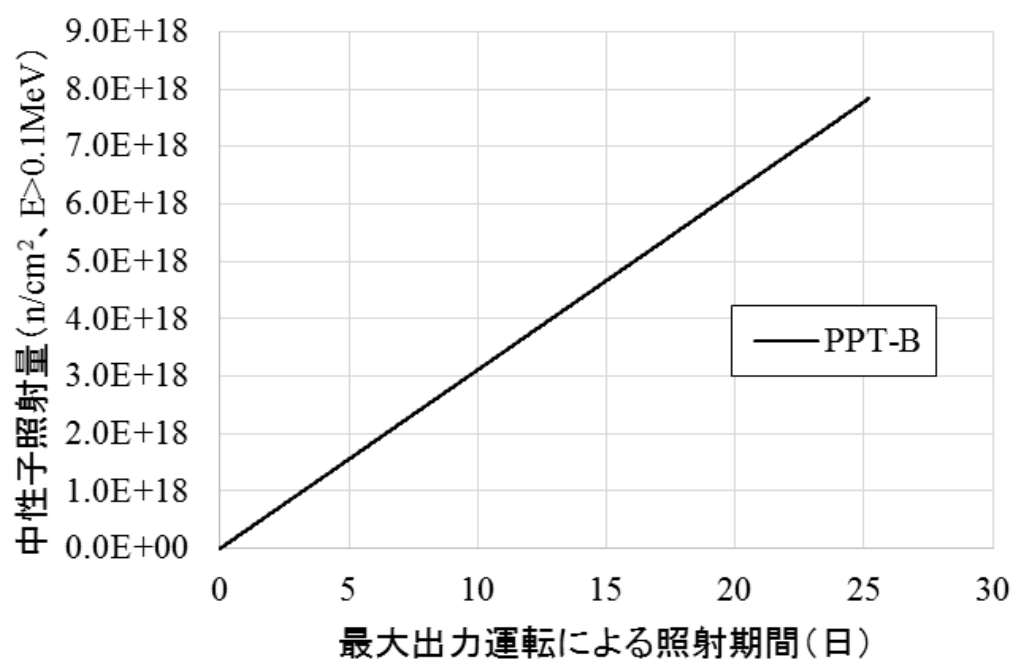


図 2.108 中性子照射量の時間変化

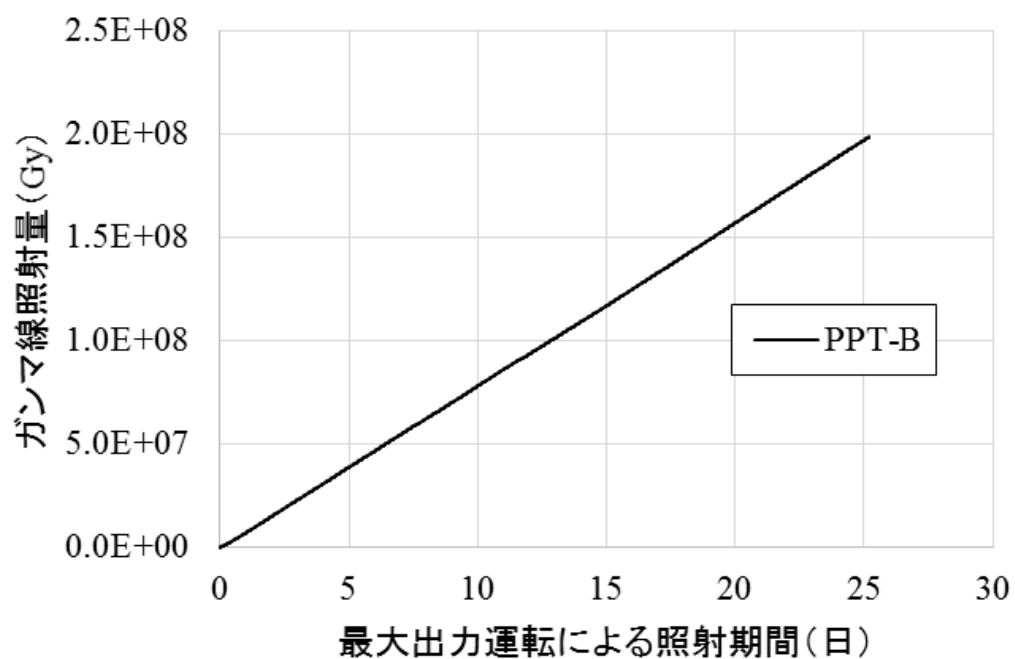


図 2.109 ガンマ線照射量の時間変化

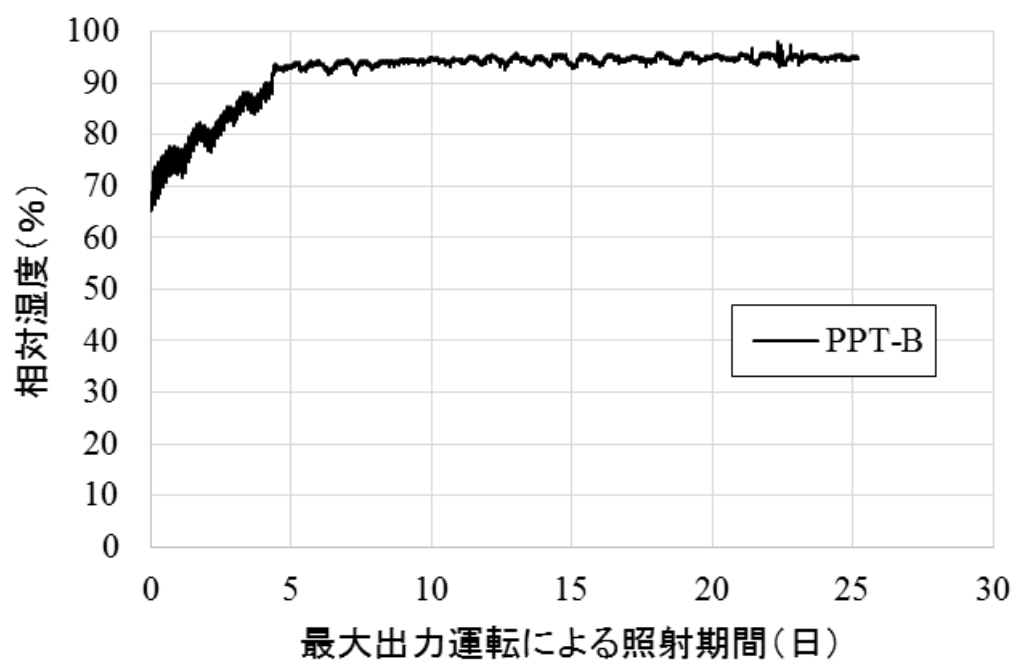


図 2.110 炉外の計測系内相対湿度の時間変化

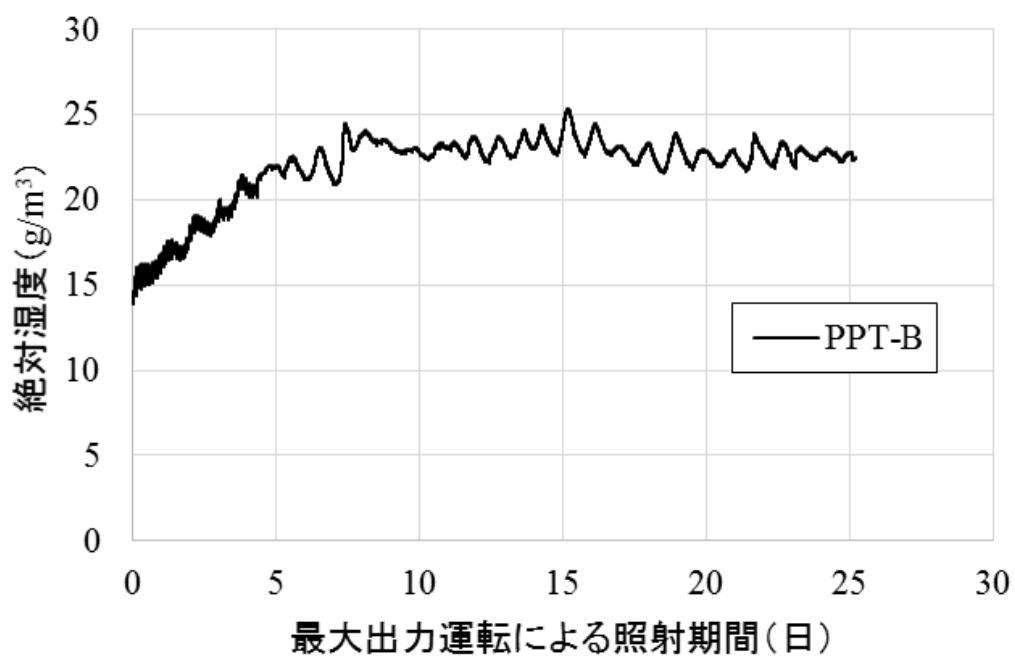


図 2.111 炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

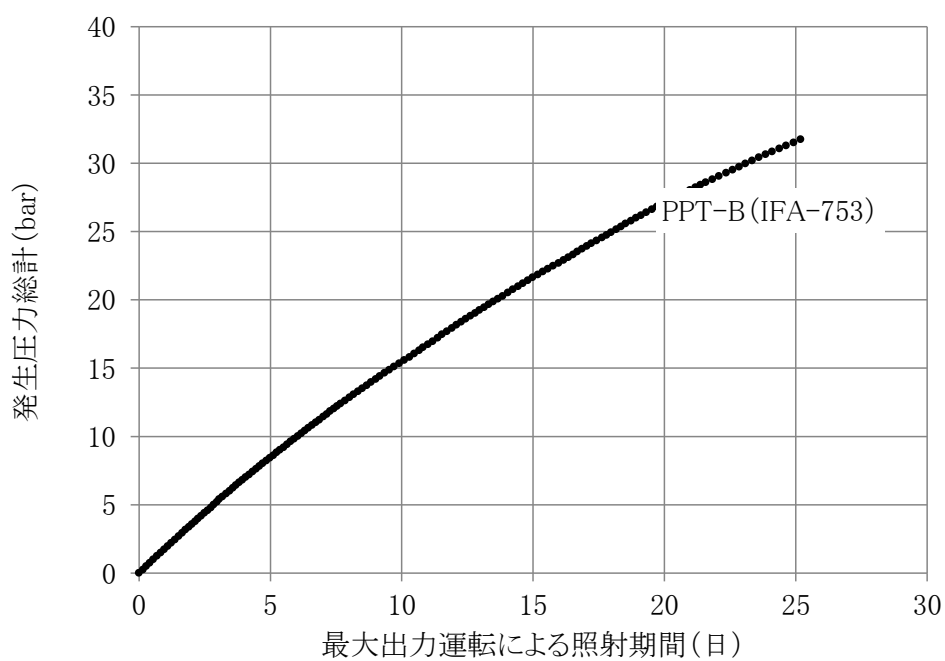


図 2.112 発生圧力総計の時間変化

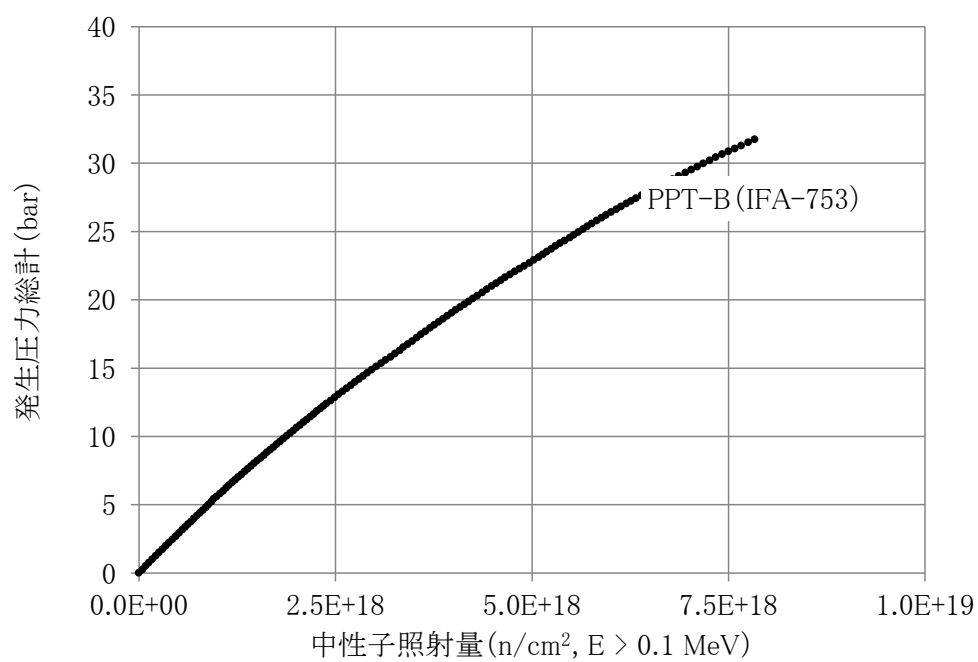


図 2.113 発生圧力総計の照射量に対する変化

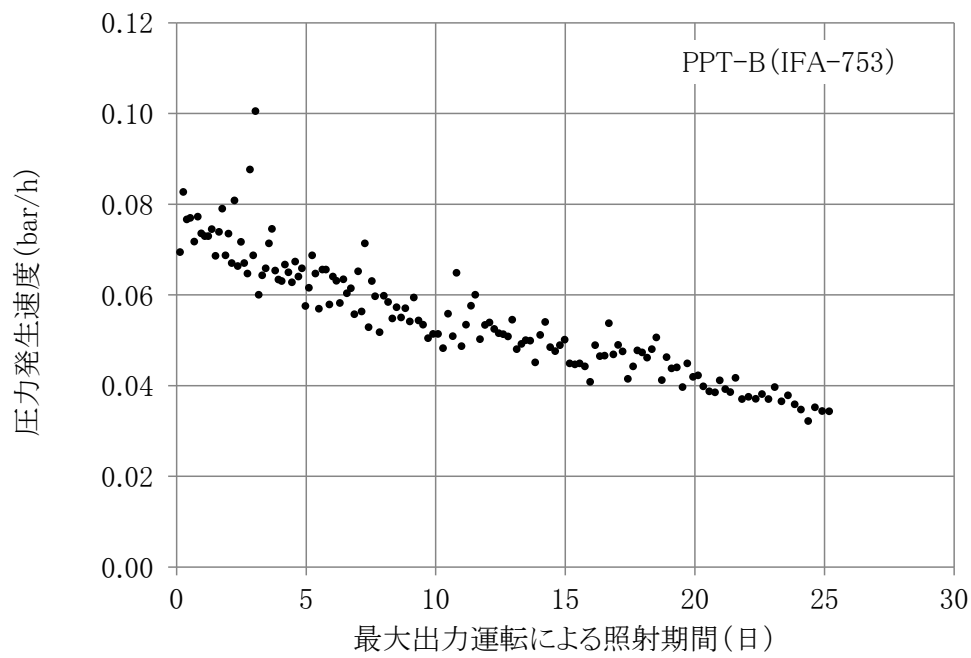


図 2.114 圧力発生速度の時間変化

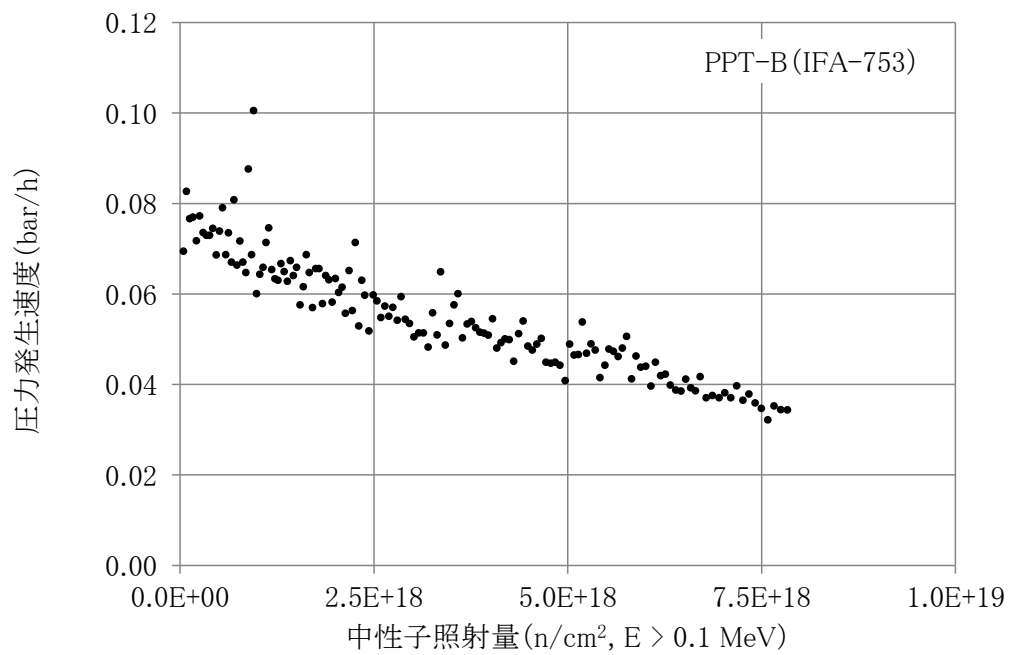


図 2.115 圧力発生速度の照射量に対する変化

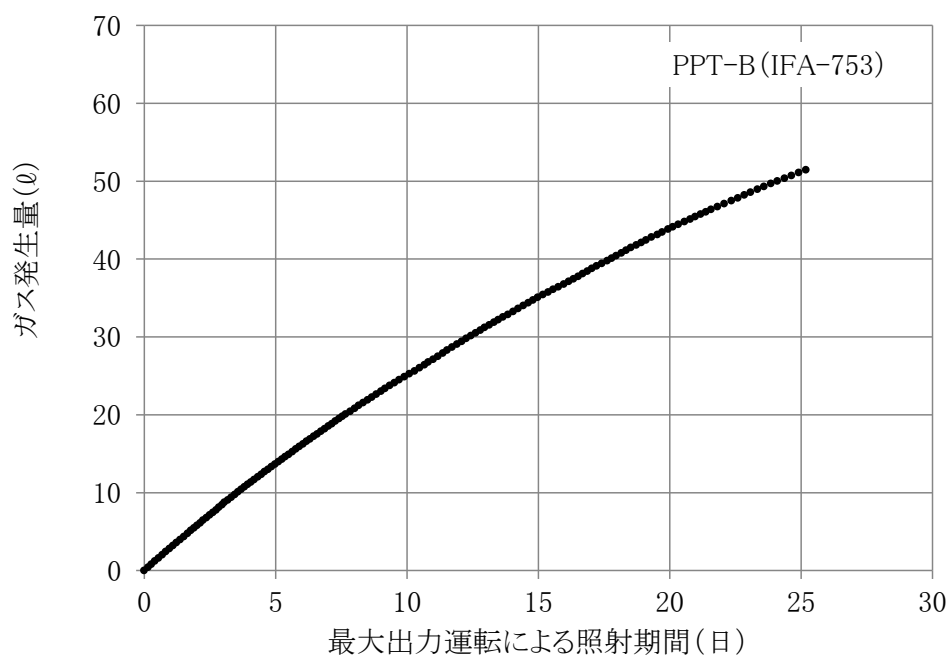


図 2. 116 ガス発生量の時間変化 (0℃、1 気圧)

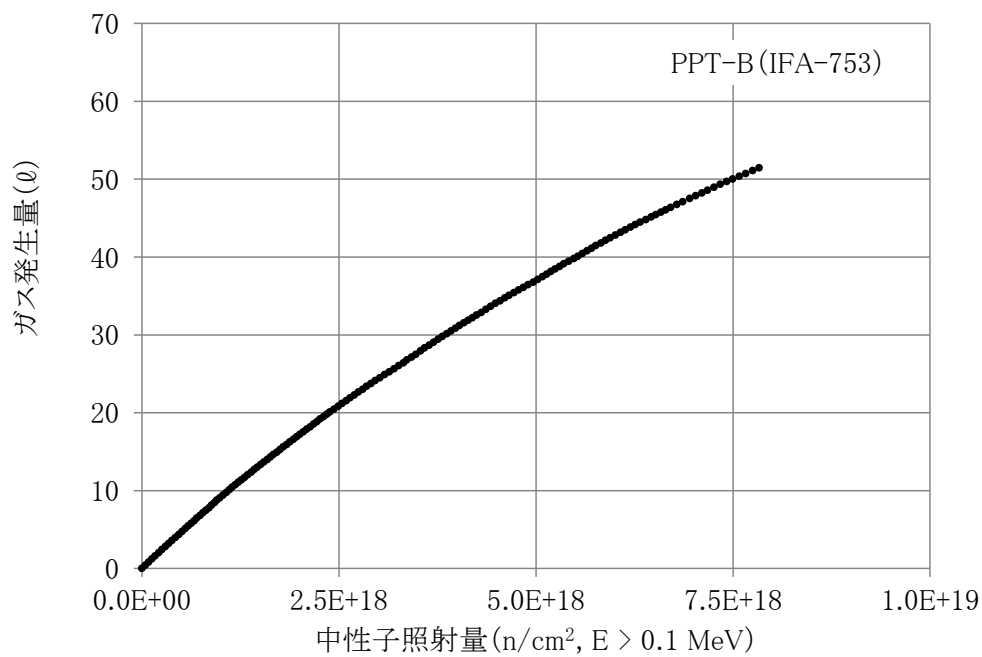


図 2. 117 ガス発生量の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

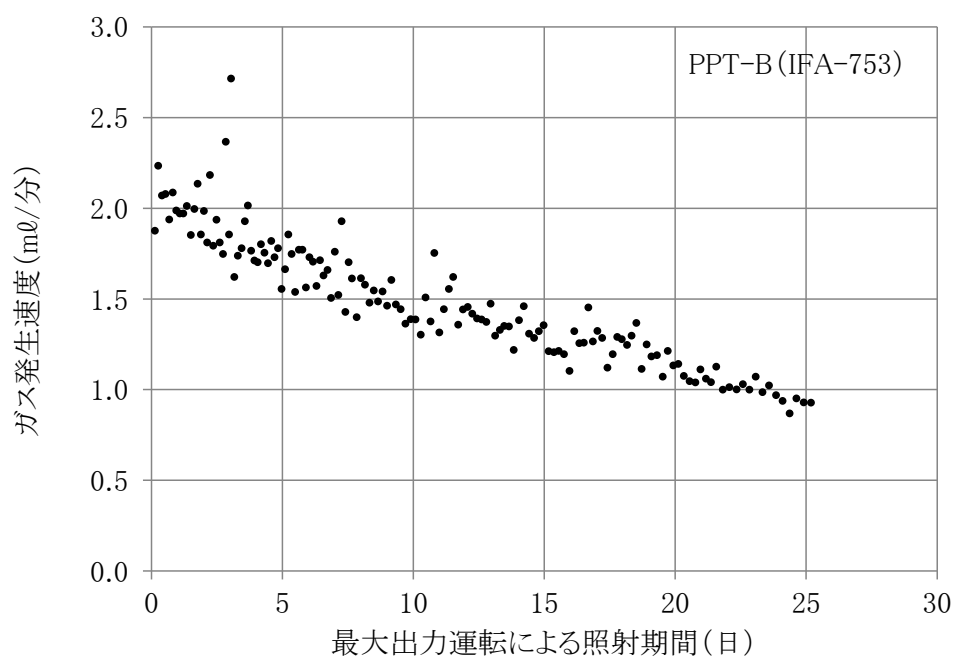


図 2.118 ガス発生速度の時間変化 (0℃、1 気圧)

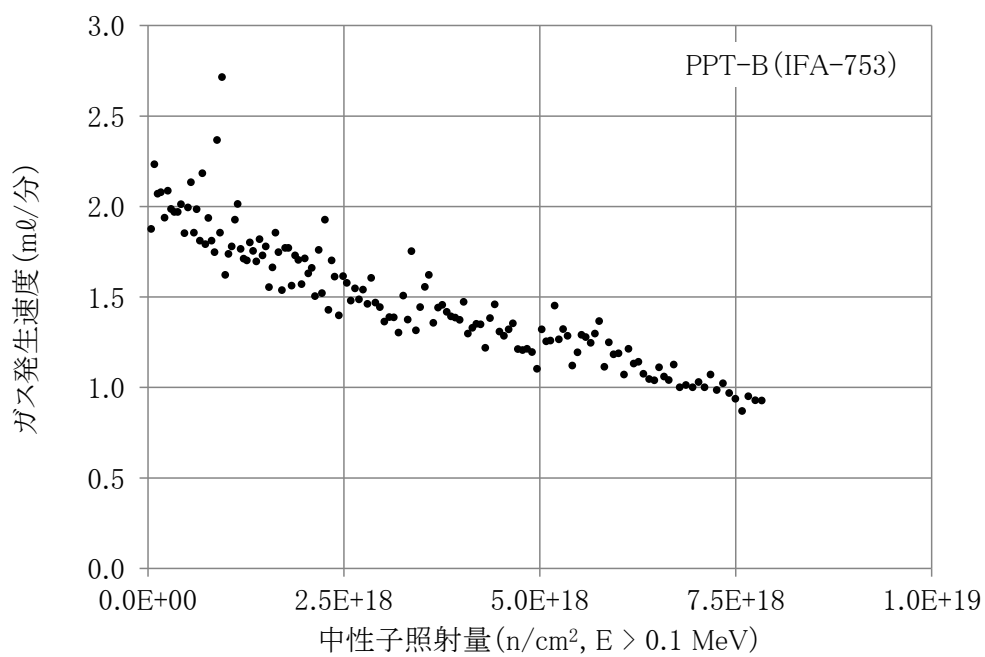


図 2.119 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

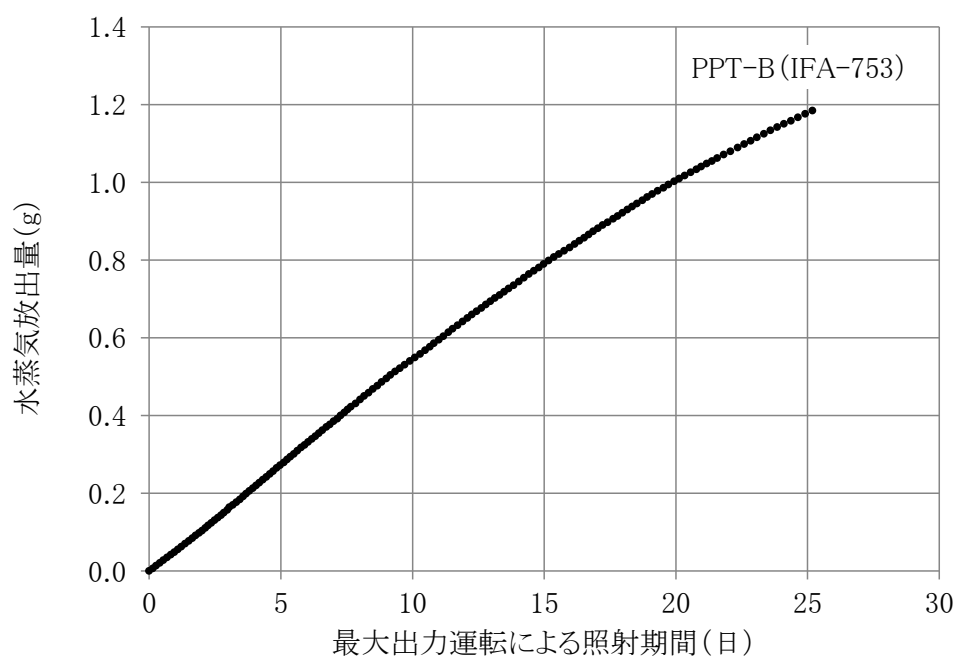


図 2. 120 水分放出量の時間変化

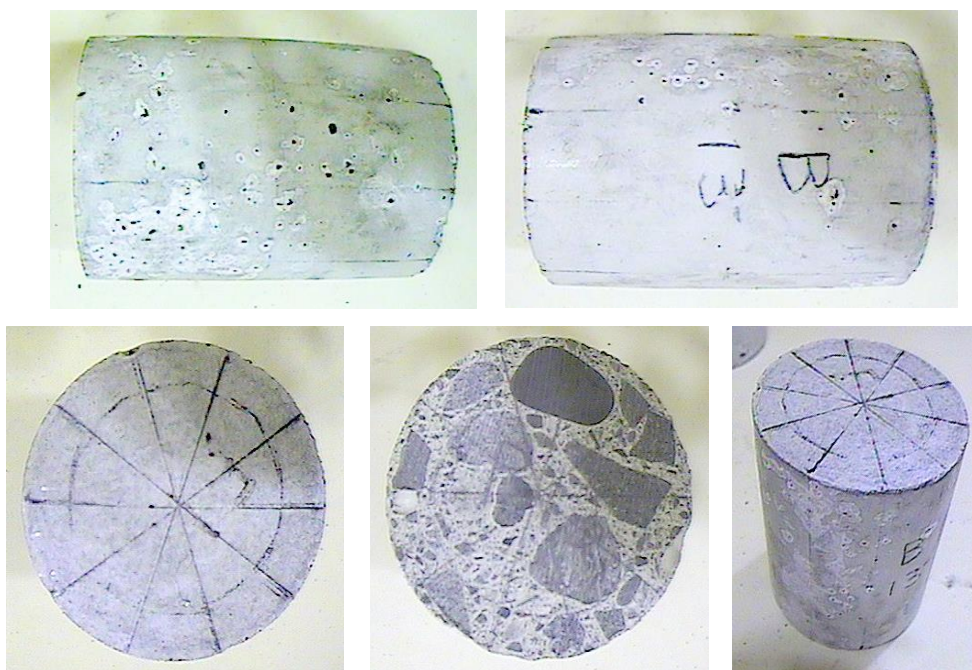


図 2. 121 照射後の試験体の目視観察結果の一例 (B13)

2) 試験ケース PPT-C (IFA-752)

図 2. 122 に示すように原子炉の出力は、約 2. 0MW 程度となっている。また、炉は試料の交換等のために、比較的頻繁に ON/OFF を繰り返していることがわかる。図 2. 123 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。炉外で 52℃に制御されている冷却水は炉内に送り込まれた後、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇して炉外に送り出され、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却される。図 2. 124 にコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 70℃程度であった。図 2. 125 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0. 09W/g となっている。

図 2. 126 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1. 25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1. 0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。また、バルブ開放間隔は、時間経過に伴って長くなっており、これは時間経過に伴ってガスの発生速度が低下している試験結果と整合している。図 2. 127 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 2. 128 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 2. 129 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は $3. 60 \times 10^{12}$ n/cm²/s、ガンマ線量率は 295kGy/h であった。図 2. 130 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 2. 131 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。封緘状態の自由水を多く含むコンクリート試験体を用いているので、水蒸気の放出は非常に多くなるが、水蒸気捕集システムを改良して水蒸気を凝縮して回収できるコンデンサを設置したので、その下流の相対湿度は 20～30%となっており、湿度と流量よりコンデンサを通過した湿分の評価が可能となっている。

図 2. 132 および図 2. 133 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 134 および図 2. 135 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 136 および図 2. 137 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 138 および図 2. 139 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 140 に、水分放出量の時間変化を示す。

図 2. 141 に照射後の試験体の目視観察結果の一例を示す。

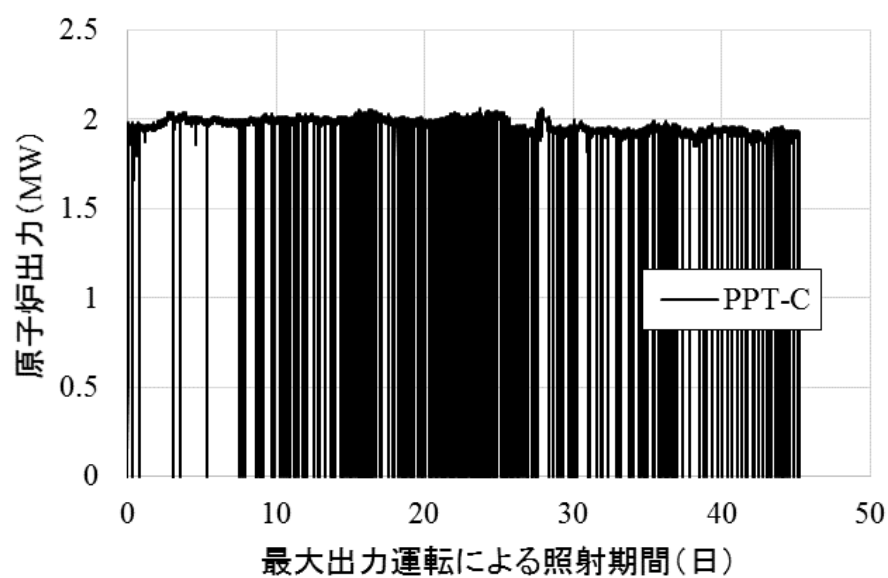


図 2.122 原子炉出力の変化

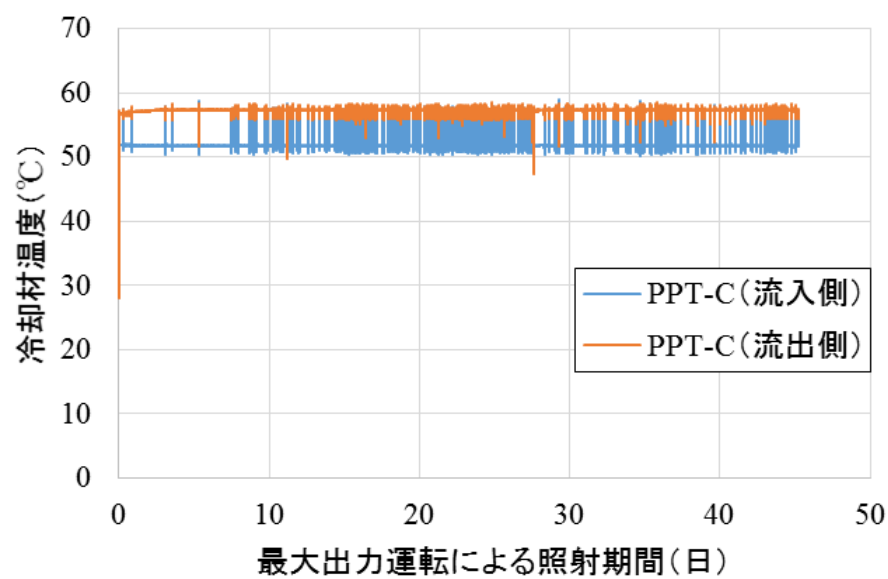


図 2.123 原子炉冷却材の温度変化

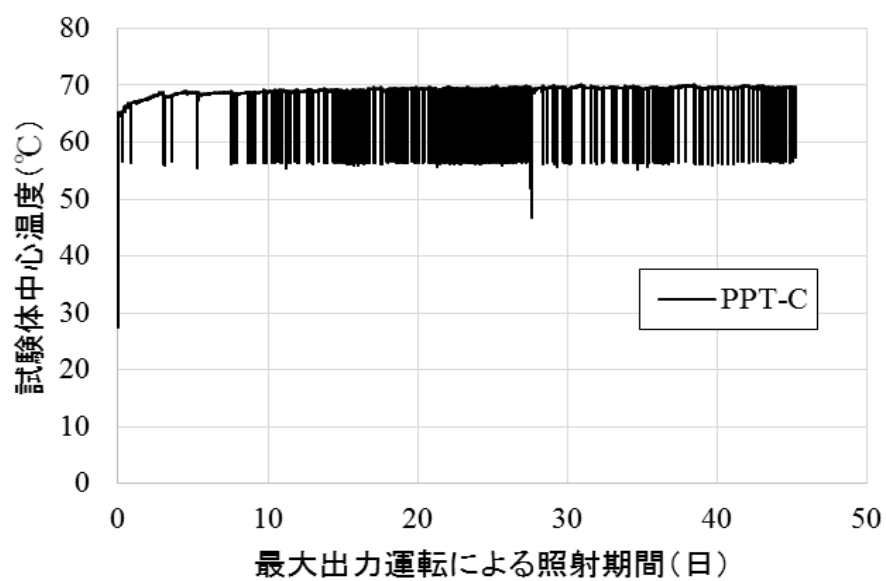


図 2. 124 コンクリート試験体の中心温度の時間変化

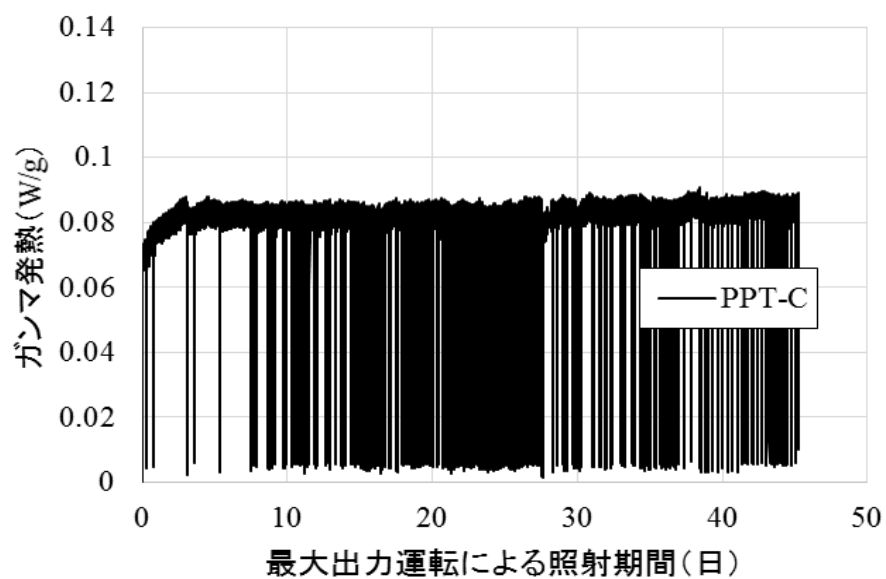


図 2. 125 ガンマ発熱の時間変化

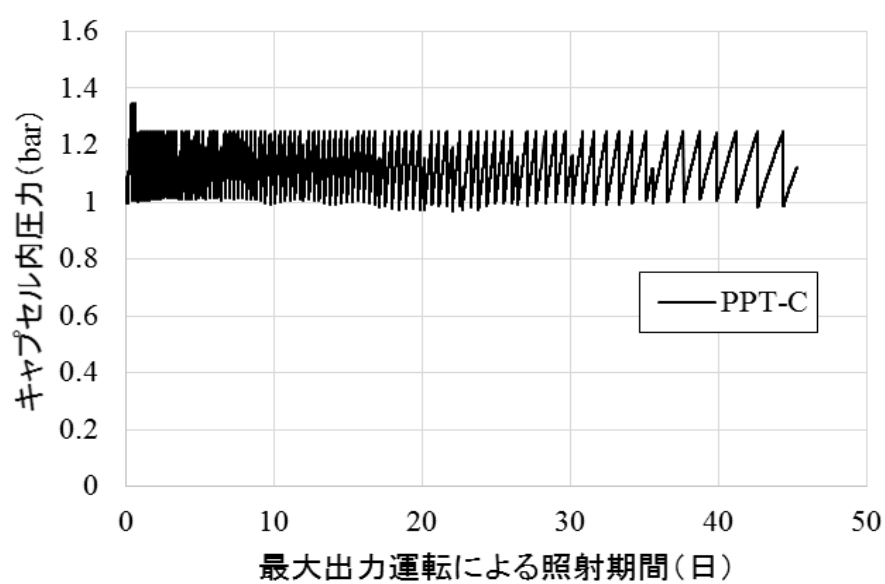


図 2.126 ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

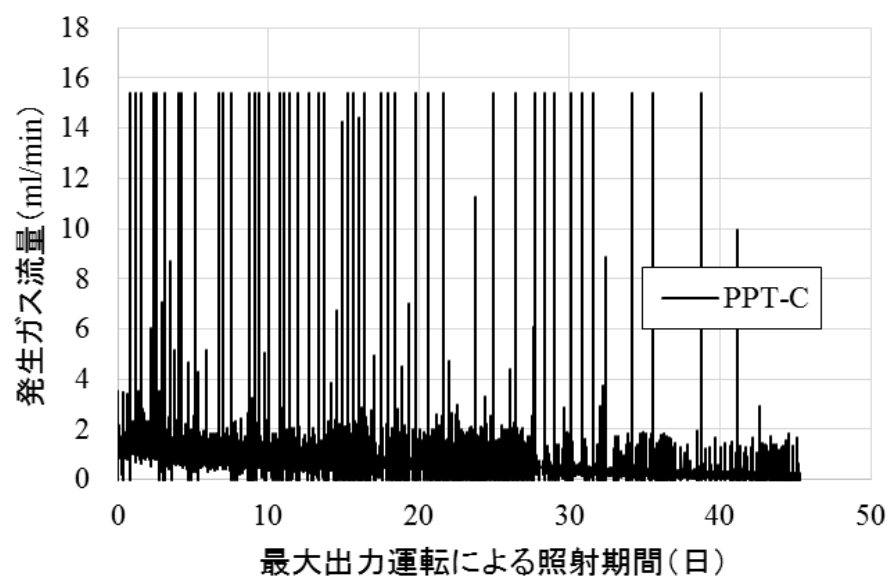


図 2.127 発生ガス流量の時間変化

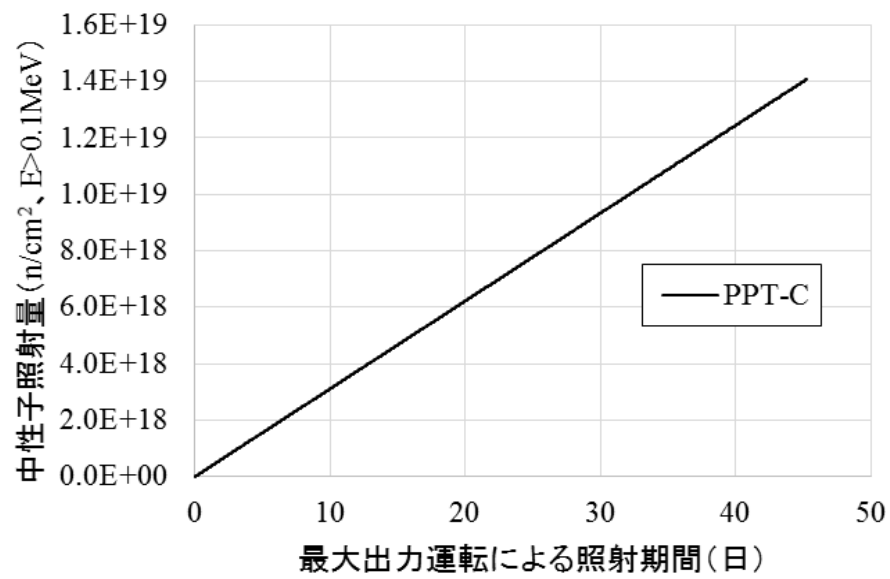


図 2. 128 中性子照射量の時間変化

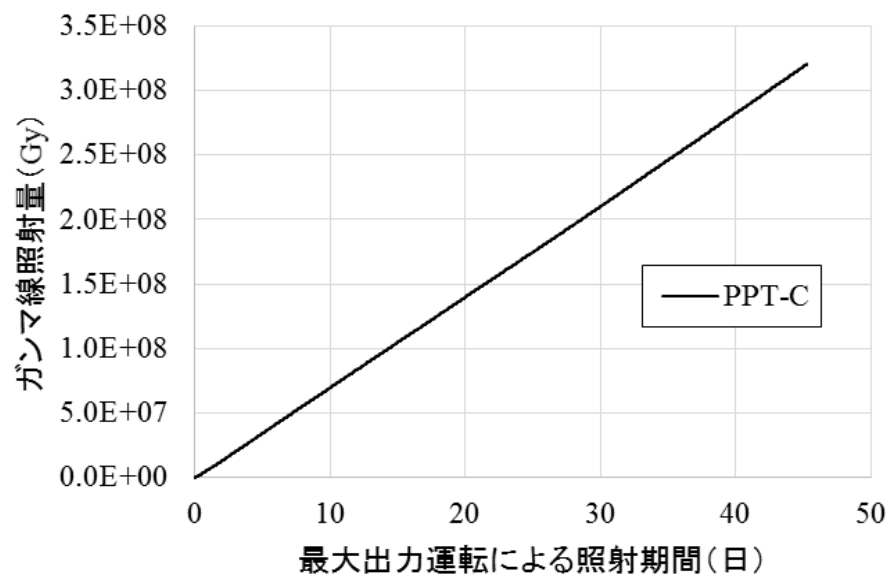


図 2. 129 ガンマ線照射量の時間変化

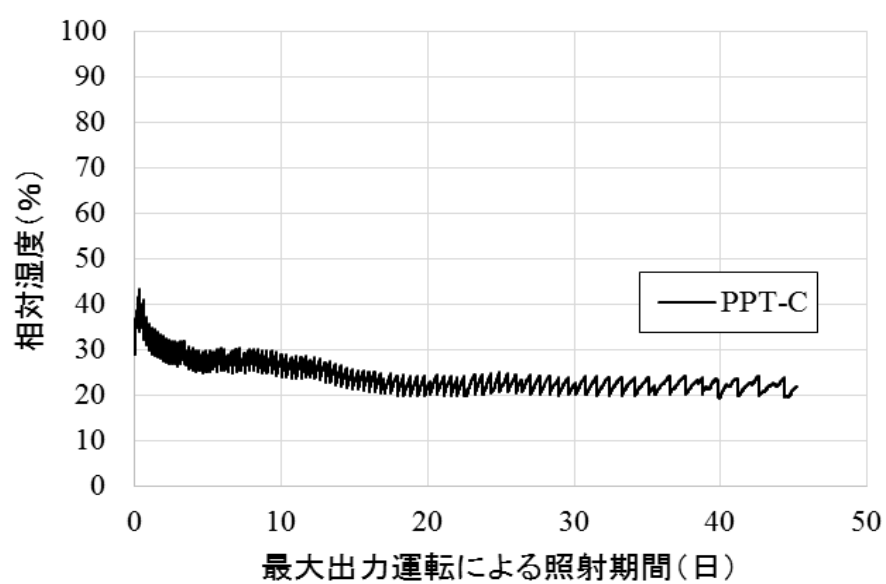


図 2. 130 炉外の計測系内相対湿度の時間変化

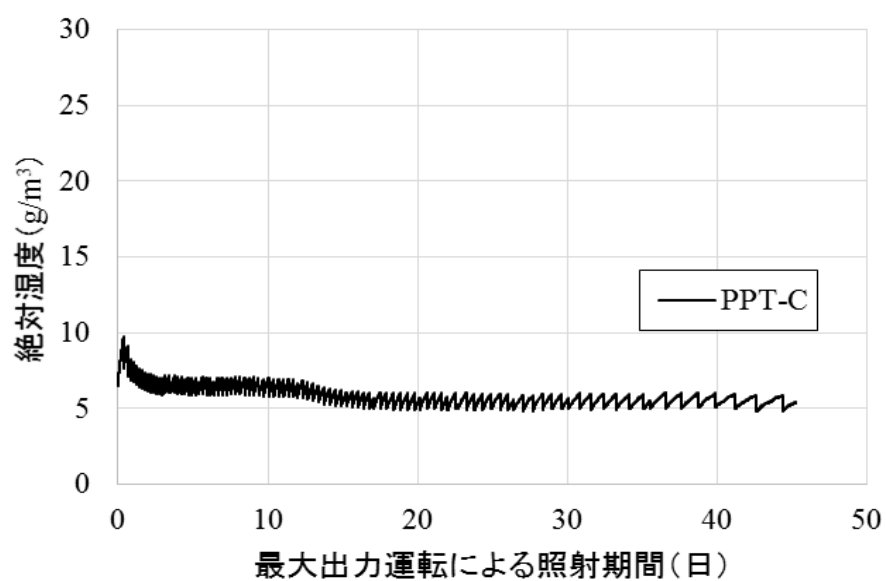


図 2. 131 炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

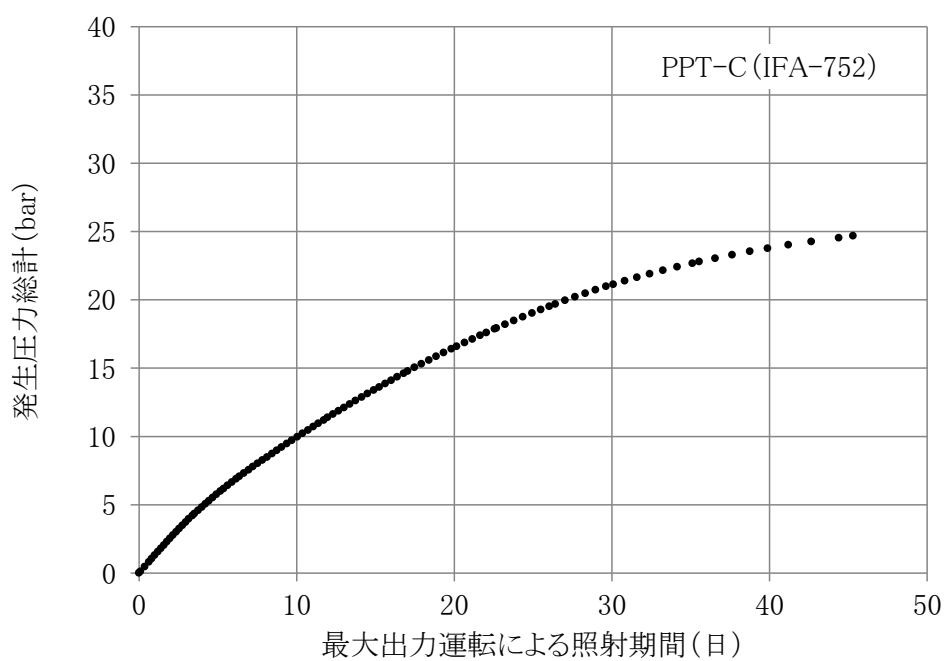


図 2. 132 発生圧力総計の時間変化

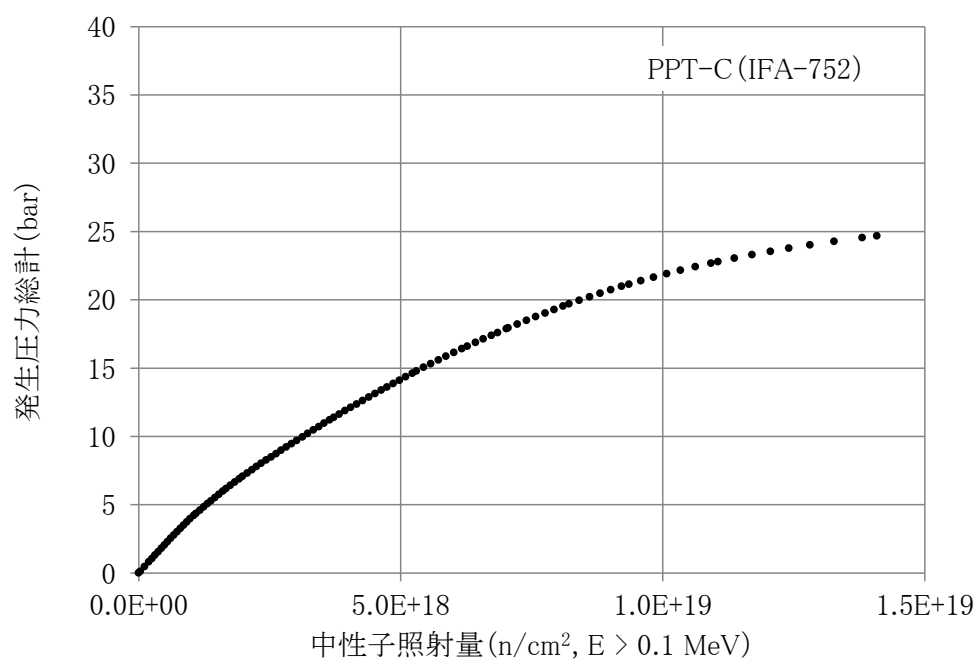


図 2. 133 発生圧力総計の照射量に対する変化

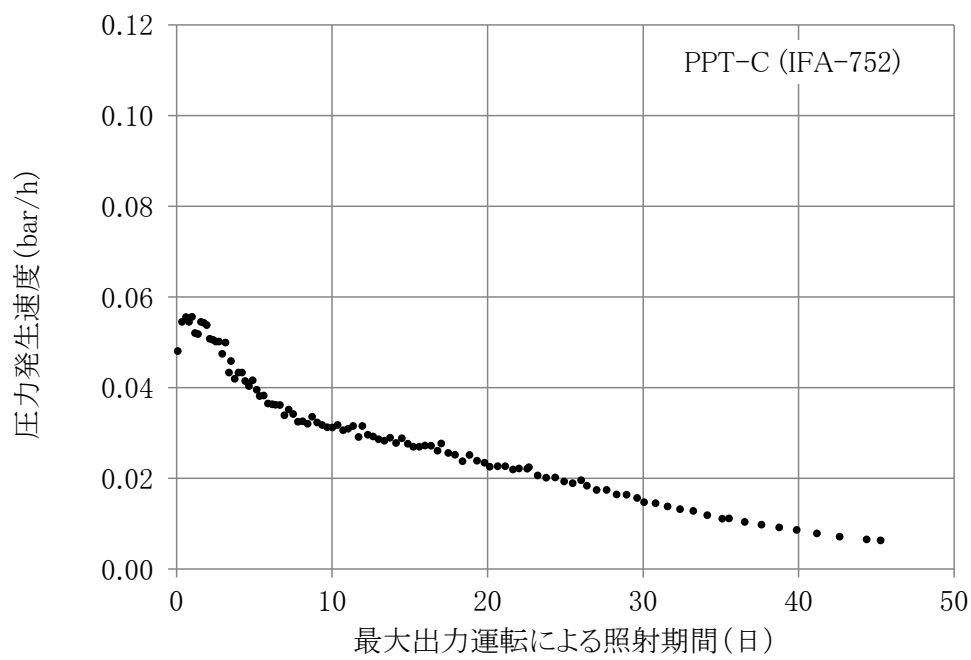


図 2.134 圧力発生速度の時間変化

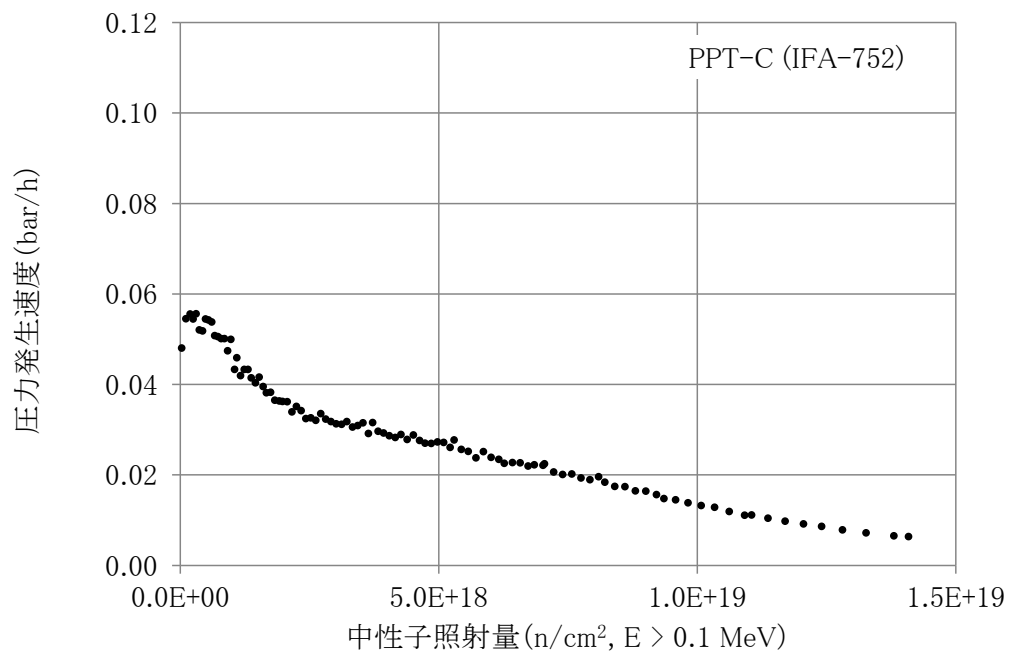


図 2.135 圧力発生速度の照射量に対する変化

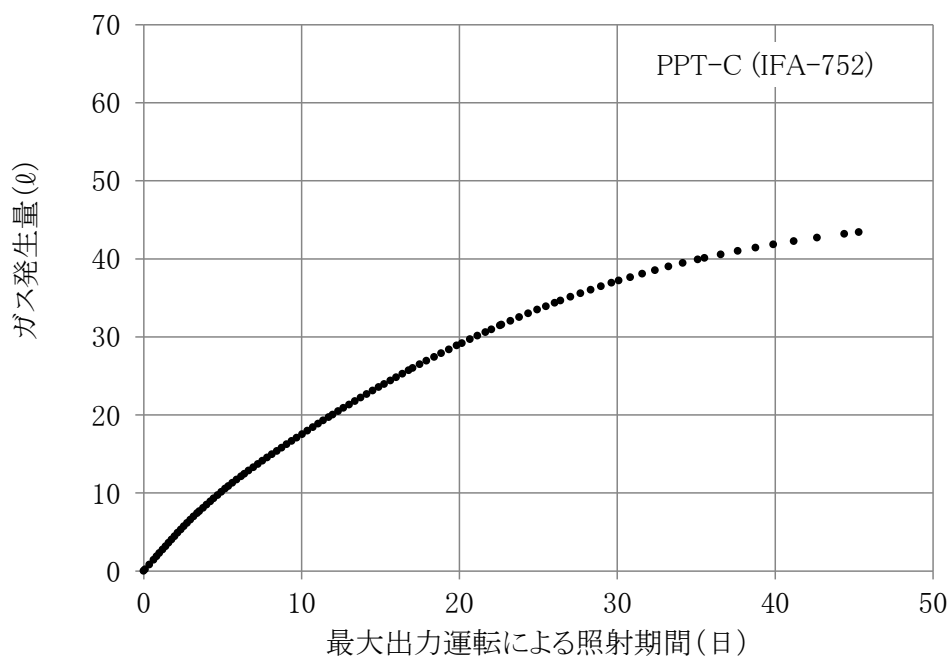


図 2.136 ガス発生量の時間変化 (0℃、1 気圧)

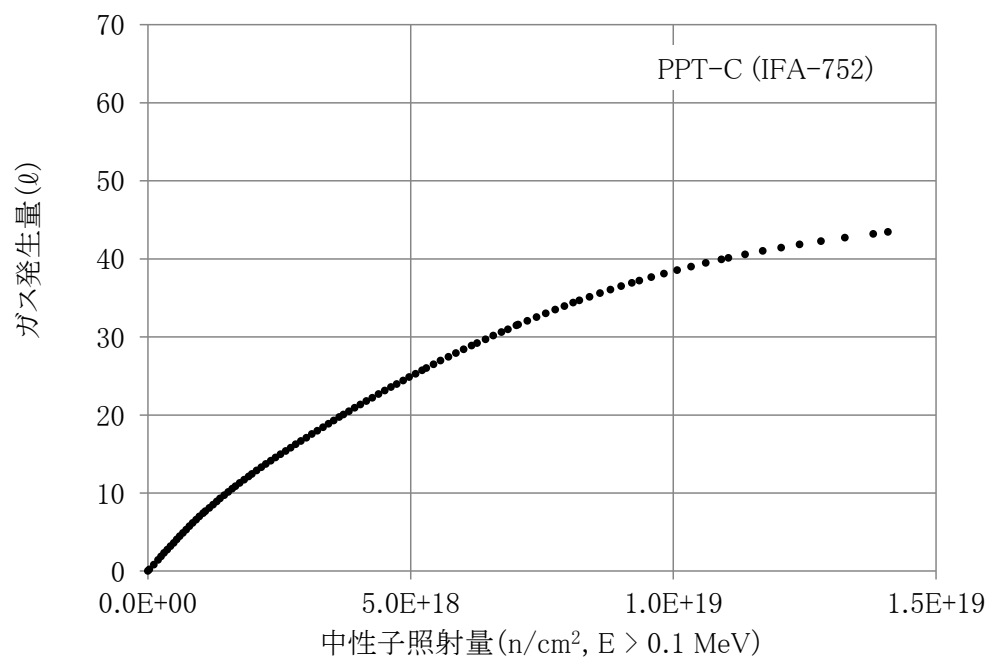


図 2.137 ガス発生量の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

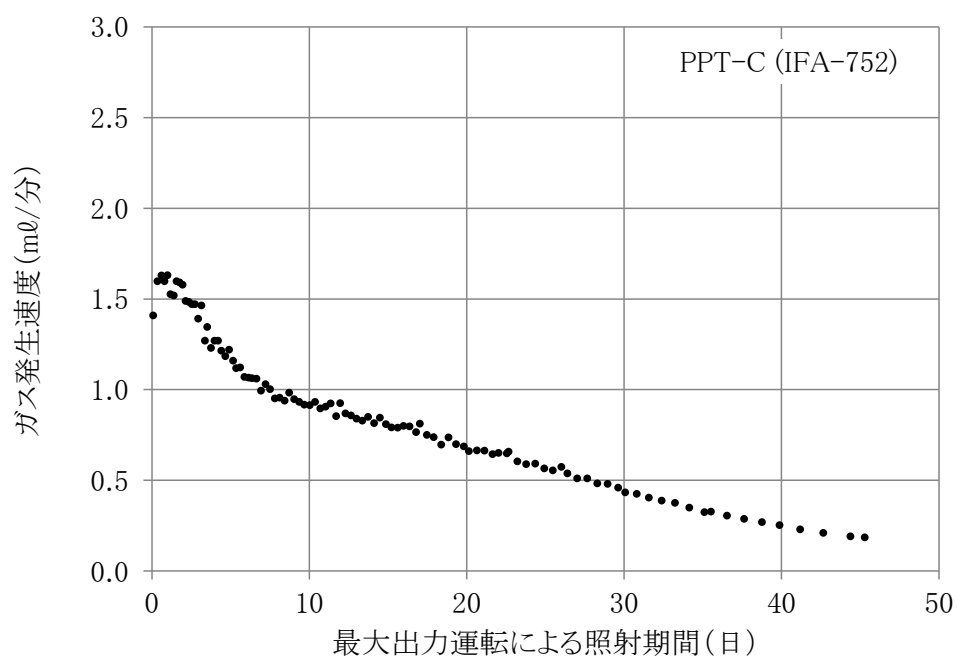


図 2.138 ガス発生速度の時間変化 (0℃、1 気圧)

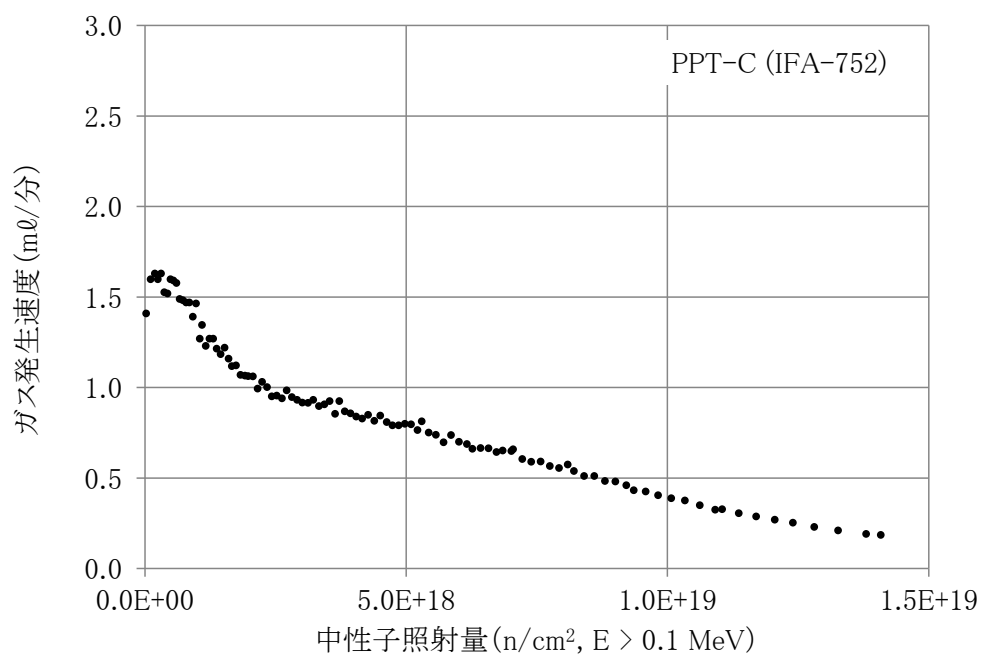


図 2.139 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

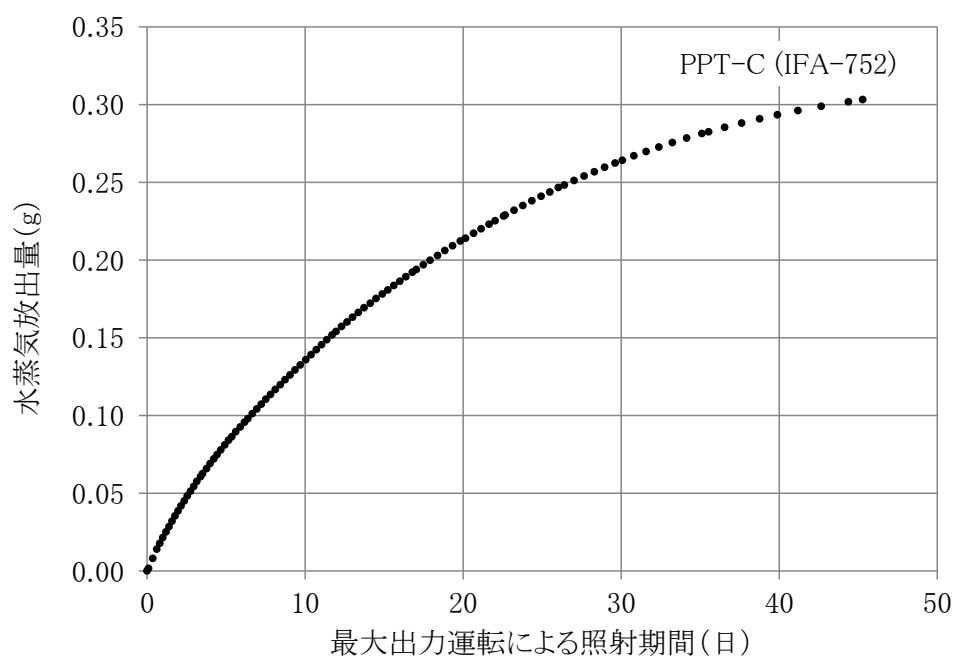


図 2. 140 水分放出量の時間変化

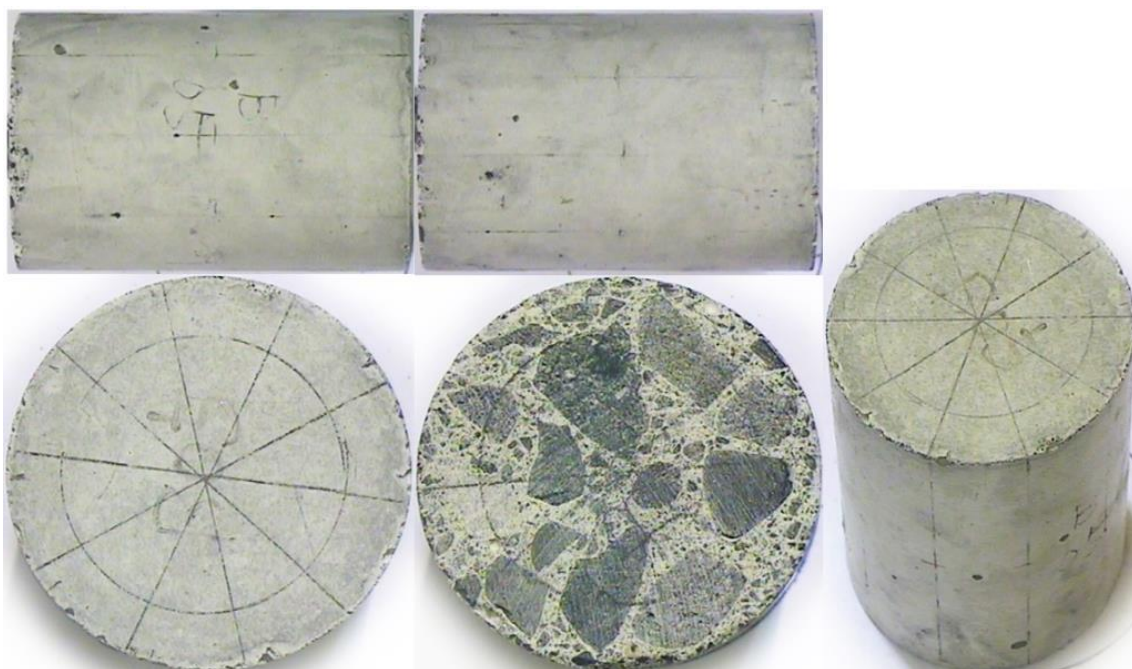


図 2. 141 照射後の試験体の目視観察結果の一例 (B05)

3) 試験ケース PPT-D (IFA-751)

図 2. 142 に示すように原子炉の出力は、約 2. 0MW 程度となっている。図 2. 143 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。炉外で 52℃に制御されている冷却水は炉内に送り込まれた後、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇して炉外に送り出され、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却される。図 2. 144 にコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は照射当初から徐々に上昇し、70. 5℃程度で安定している。図 2. 145 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0. 09W/g となっている。

図 2. 146 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1. 25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1. 0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。照射の進捗に伴い圧力上昇速度が小さくなっているため、発生ガスの成分分析の頻度を維持するために、キャプセルの開放圧力を 1. 15bar に落としている。図 2. 147 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 2. 148 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 2. 149 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は $3. 60 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 、ガンマ線量率は 308kGy/h であった。図 2. 150 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 2. 151 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。封緘状態の自由水を多く含むコンクリート試験体を用いているので、水蒸気の放出は非常に多くなるが、水蒸気捕集システムを改良して水蒸気を凝縮して回収できるコンデンサとその下流にコンデンサを通過する水蒸気を捕集する水蒸気吸収容器（塩化カルシウム）を設置したので、相対湿度は 10%以下となっており、湿度と流量よりコンデンサを通過した湿分の評価が可能となっている。

図 2. 152 および図 2. 153 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 154 および図 2. 155 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 156 および図 2. 157 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 158 および図 2. 159 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 160 に、水分放出量の時間変化を示す。

図 2. 161 に照射後の試験体の目視観察結果の一例を示す。

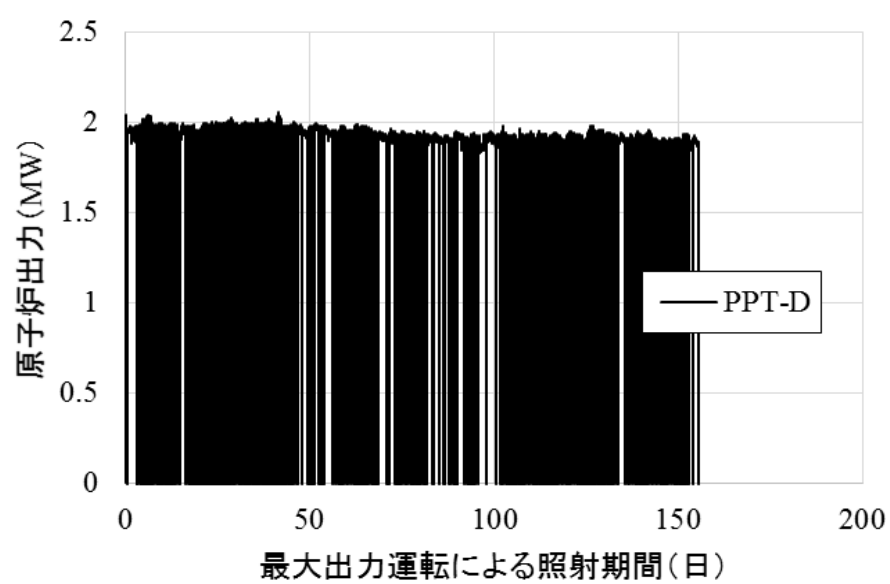


図 2. 142 原子炉出力の変化

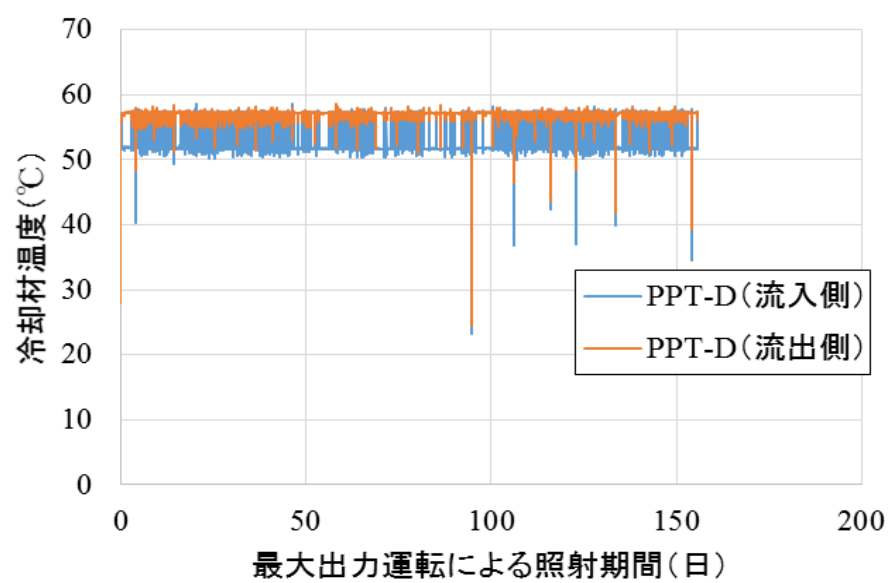


図 2. 143 原子炉冷却材の温度変化

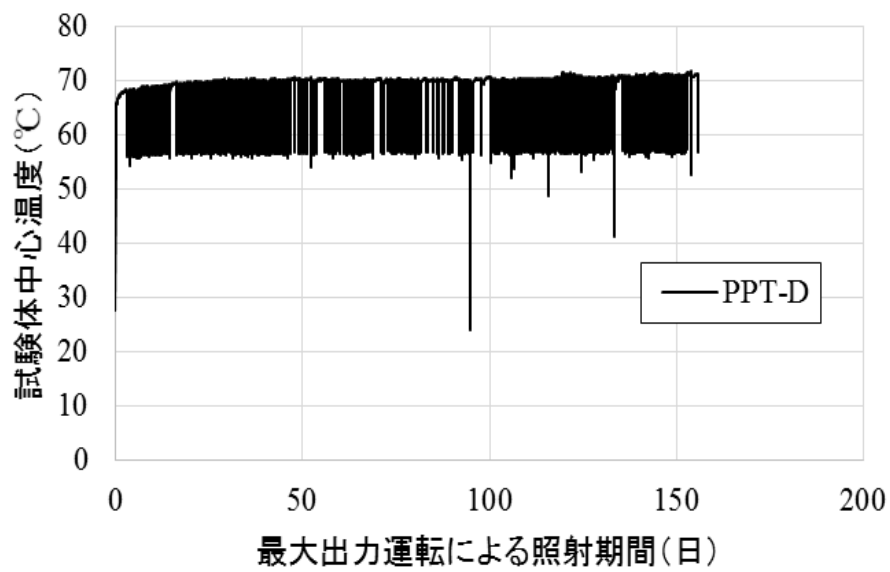


図 2. 144 コンクリート試験体の中心温度の時間変化

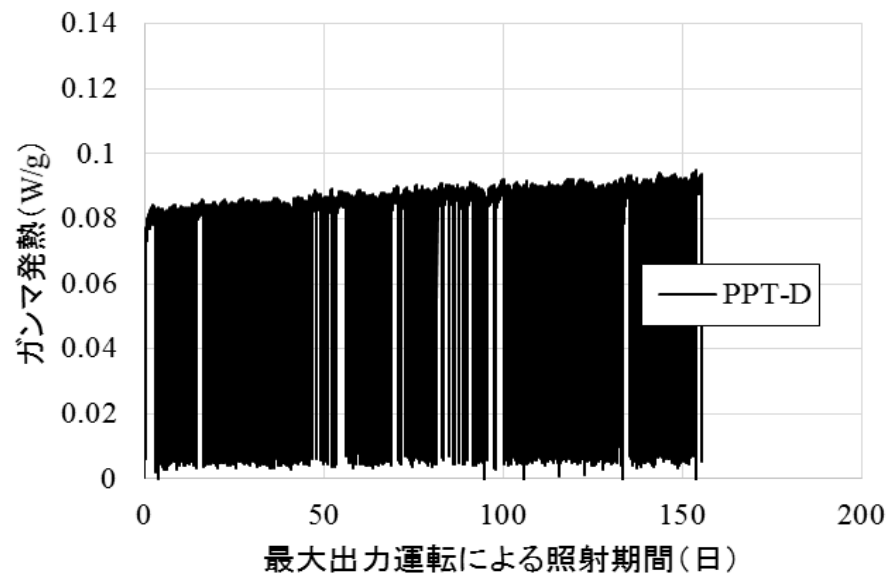


図 2. 145 ガンマ発熱の時間変化

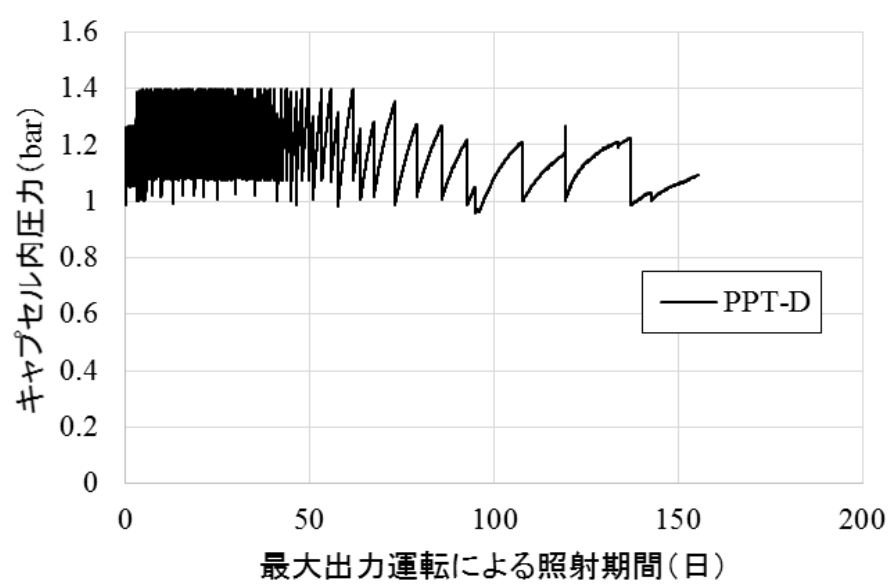


図 2.146 ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

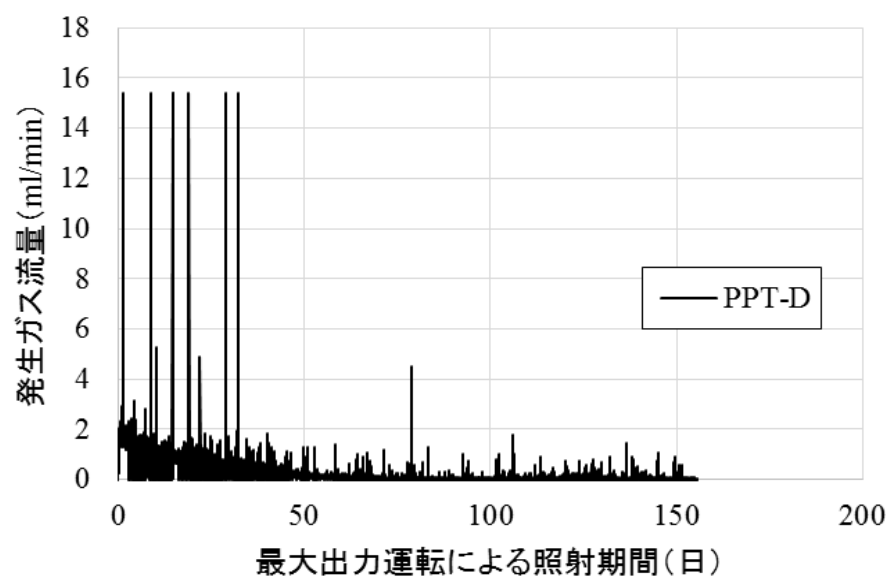


図 2.147 発生ガス流量の時間変化

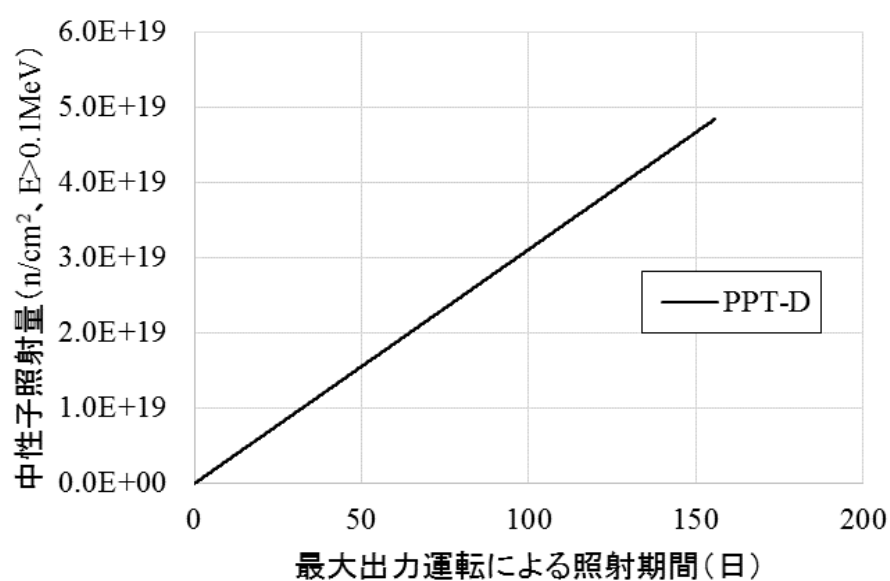


図 2. 148 中性子照射量の時間変化

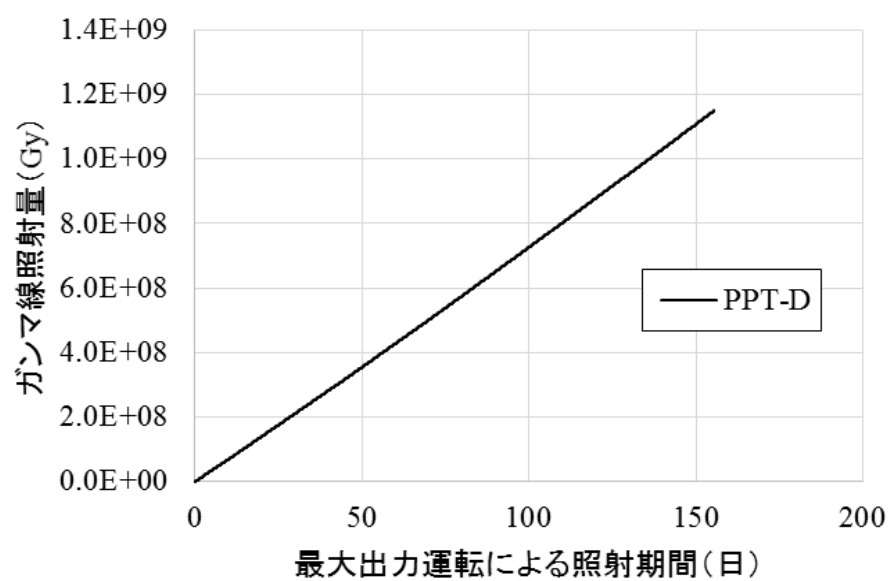


図 2. 149 ガンマ線照射量の時間変化

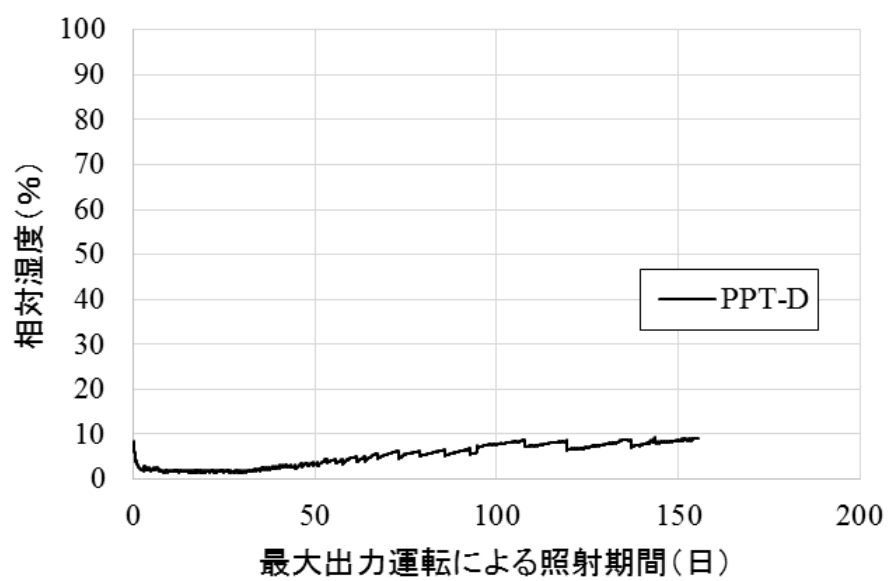


図 2.150 炉外の計測系内相対湿度の時間変化

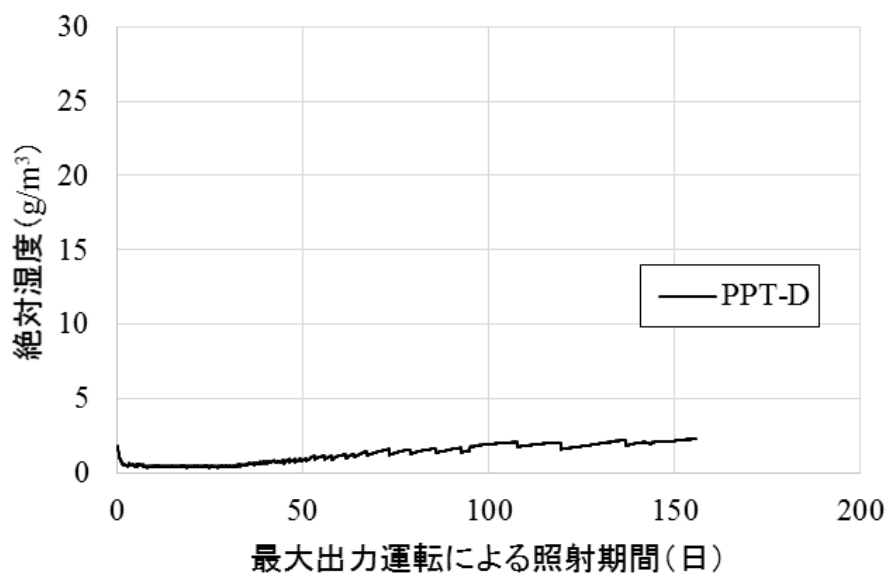


図 2.151 炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

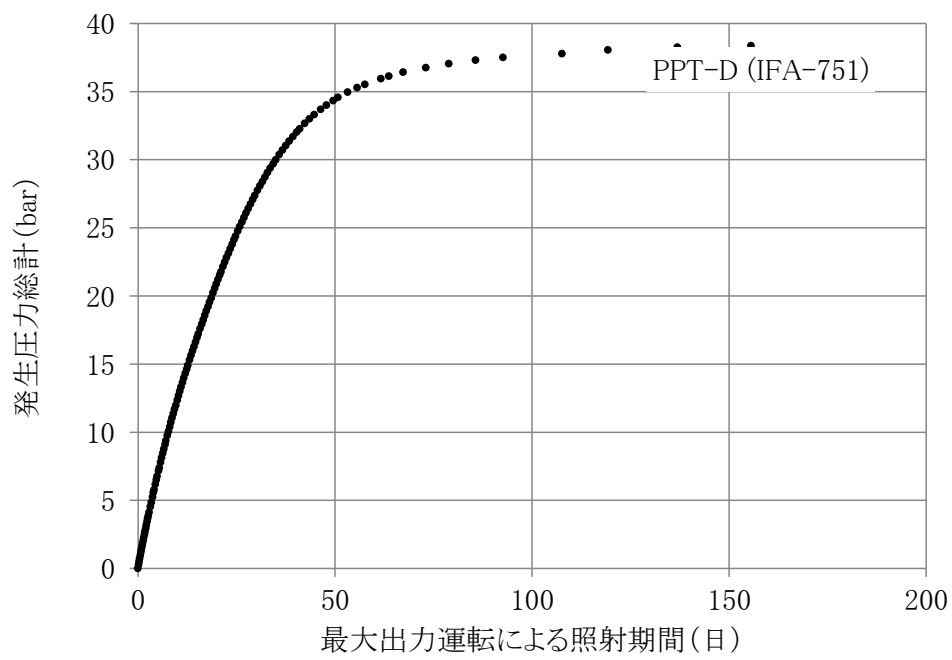


図 2.152 発生圧力総計の時間変化

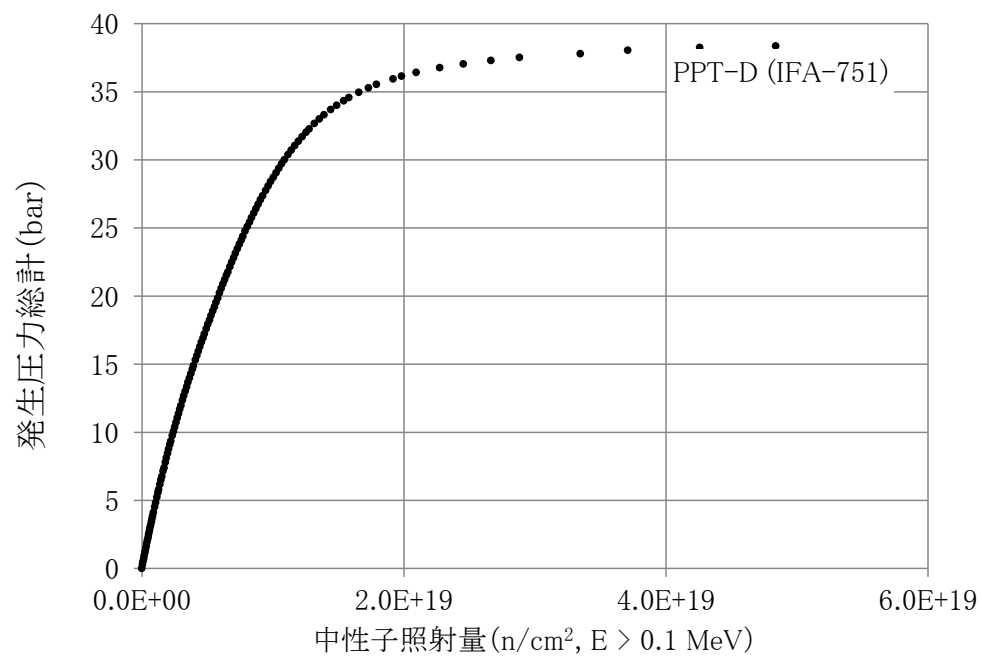


図 2.153 発生圧力総計の照射量に対する変化

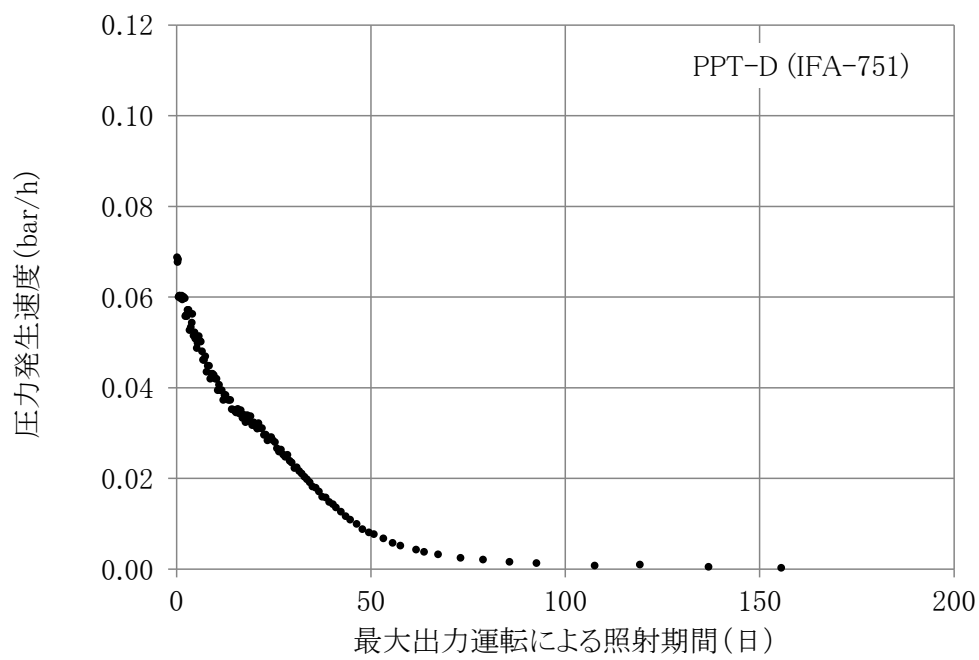


図 2.154 圧力発生速度の時間変化

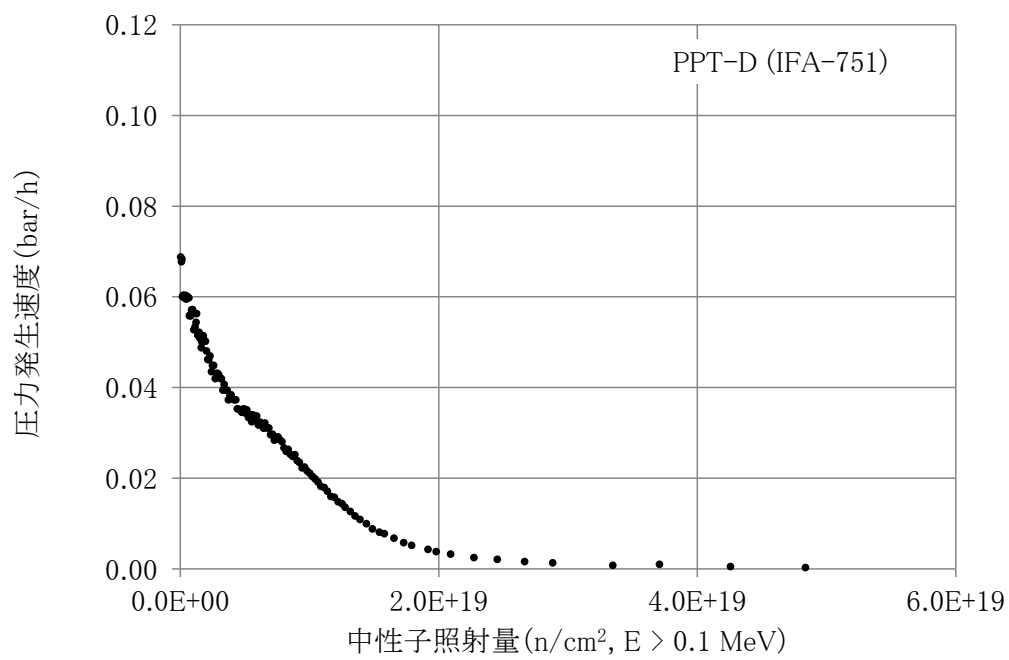


図 2.155 圧力発生速度の照射量に対する変化

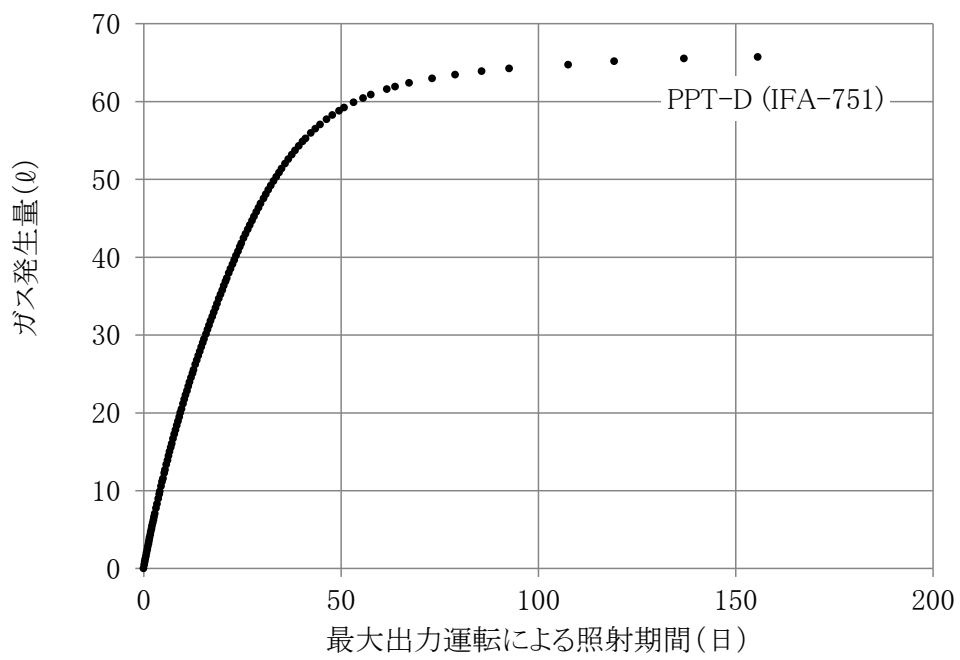


図 2.156 ガス発生量の時間変化 (0℃、1 気圧)

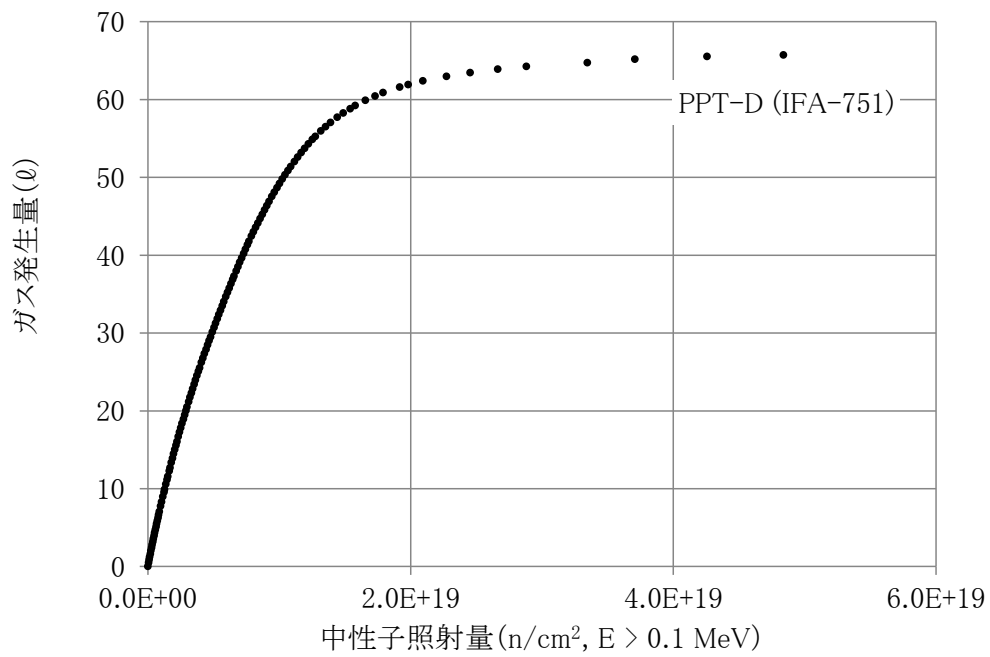


図 2.157 ガス発生量の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

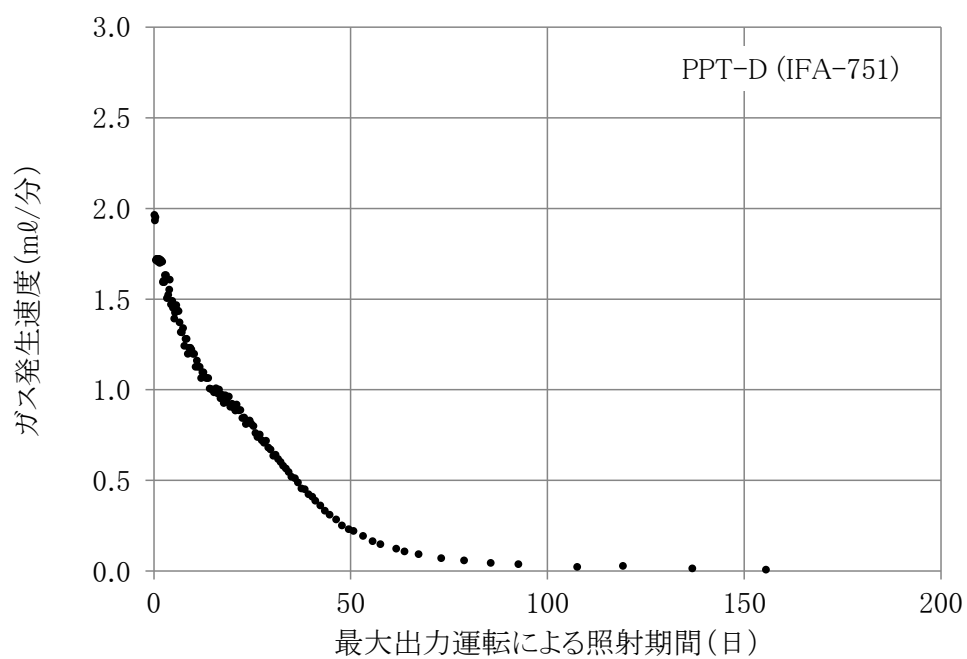


図 2.158 ガス発生速度の時間変化 (0℃、1 気圧)

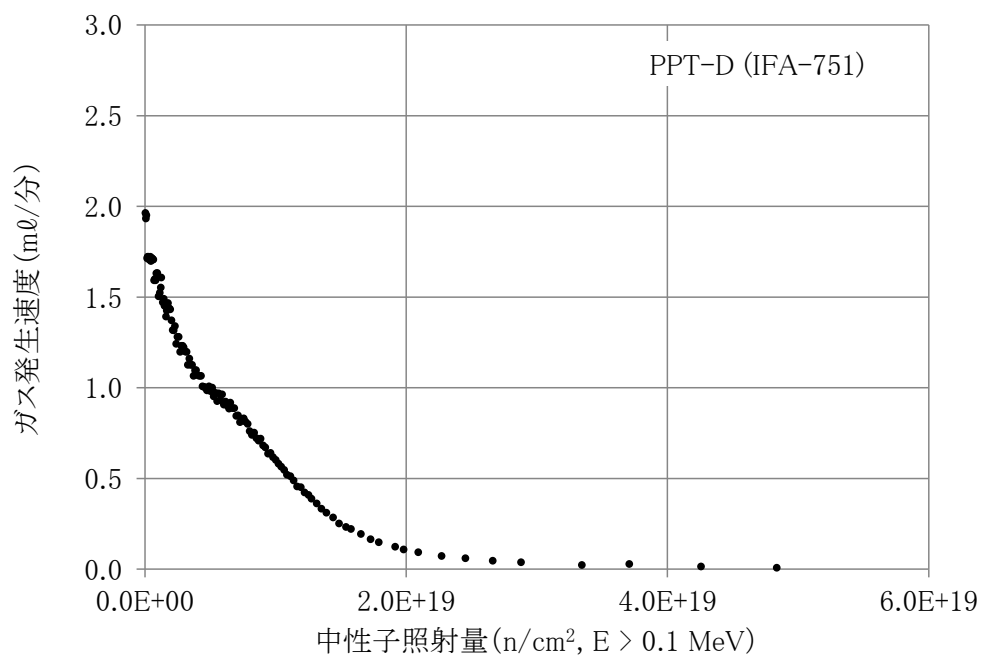


図 2.159 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

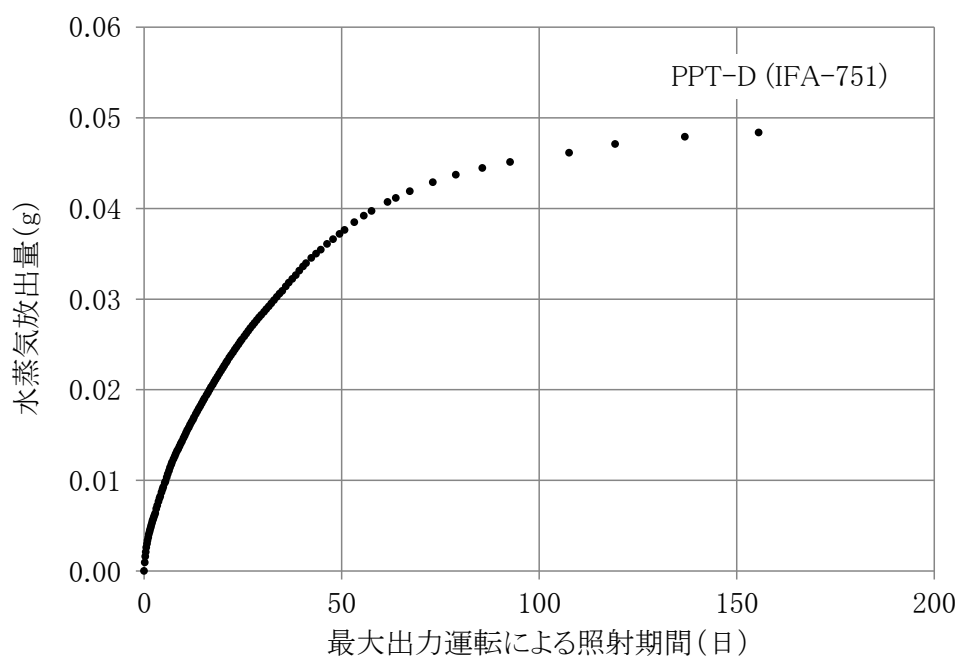


図 2. 160 水分放出量の時間変化

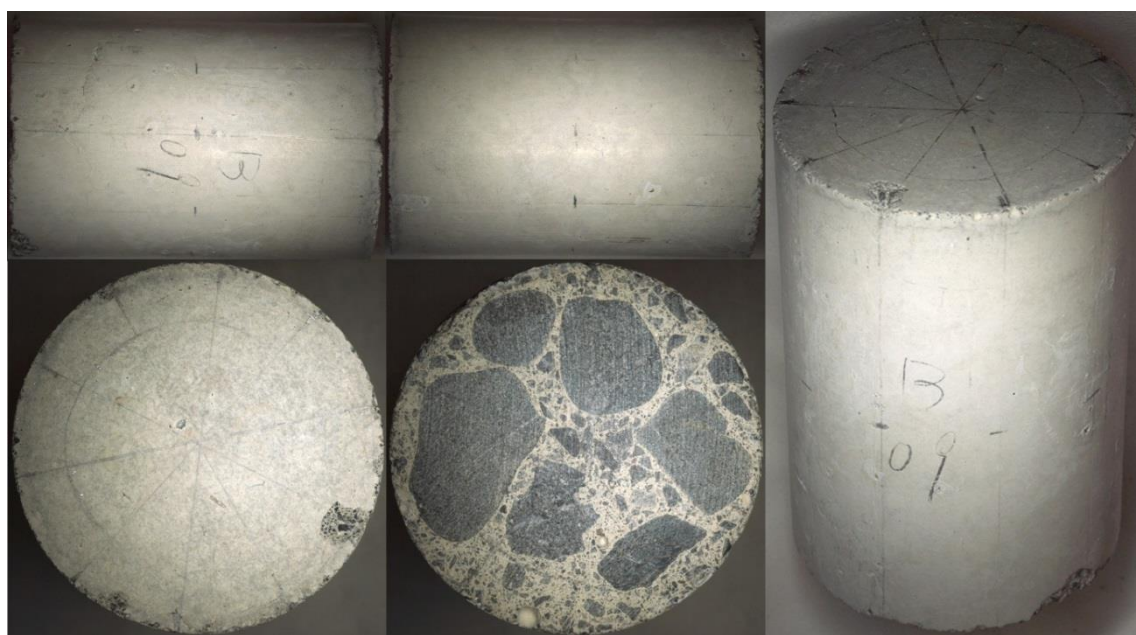


図 2. 161 照射後の試験体の目視観察結果の一例 (B09)

4) 試験ケース PPT-E (IFA-750)

図 2. 162 に示すように原子炉の出力は、約 2. 0MW 程度となっている。図 2. 163 に炉に流入する冷却水と炉から流出する冷却水の温度を示す。炉外で 52℃に制御されている冷却水は炉内に送り込まれた後、炉を冷却することにより 57℃程度まで上昇して炉外に送り出され、炉外の冷却装置で 52℃まで冷却される。図 2. 164 にコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。コンクリートの中心温度は 72℃から 75℃程度まで緩やかに上昇している。図 2. 165 にガンマ発熱の時間変化を示す。ガンマ発熱は 0. 10W/g 程度となっている。

図 2. 166 にキャプセル内圧力の時間変化を示す。キャプセル内圧力が 1. 25bar となると排気バルブを開放して圧力を放出し、1. 0bar 程度まで低下すると再びバルブを閉めている状況が見られる。照射の進捗に伴い圧力上昇速度が小さくなっているため、発生ガスの成分分析の頻度を維持するために、キャプセルの開放圧力を 1. 1bar に落としている。図 2. 167 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 2. 168 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 2. 169 にガンマ線照射量の時間変化を示す。中性子照射試験時の高速中性子束は 3.60×10^{12} n/cm²/s、ガンマ線量率は 367kGy/h であった。図 2. 170 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 2. 171 は同一位置での絶対湿度の時間変化を示す。試験ケース PPT-E (IFA-750) では、照射開始から 55 日後にコンデンサが設置されたので、その段階から相対湿度が 60% 程度まで低下し、その後さらに 20%程度まで徐々に低下している。

図 2. 172 および図 2. 173 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 174 および図 2. 175 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 176 および図 2. 177 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 178 および図 2. 179 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 180 に、水分放出量の時間変化を示す。

図 2. 181 に照射後の試験体の目視観察結果の一例を示す。ここに示されるようにいずれの面においても大小さまざまなひび割れが確認できた。後述するようにコンクリート自体も膨張しており、骨材の膨張に伴うひび割れが確認されたものと考えられる。

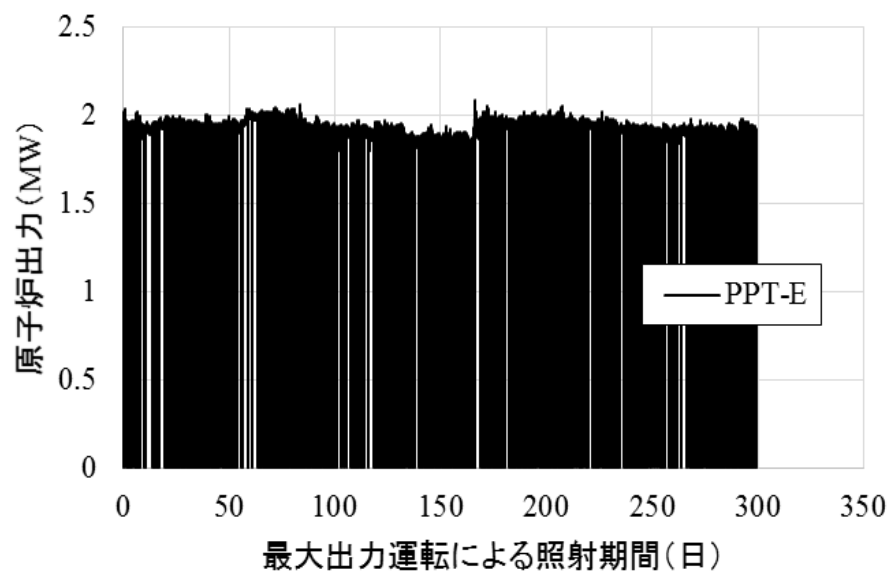


図 2.162 原子炉出力の変化

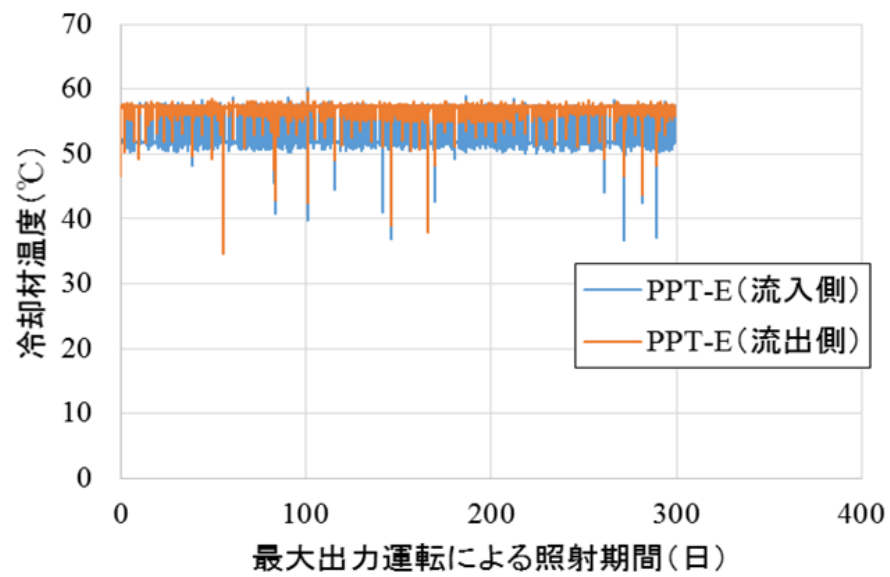


図 2.163 原子炉冷却材の温度変化

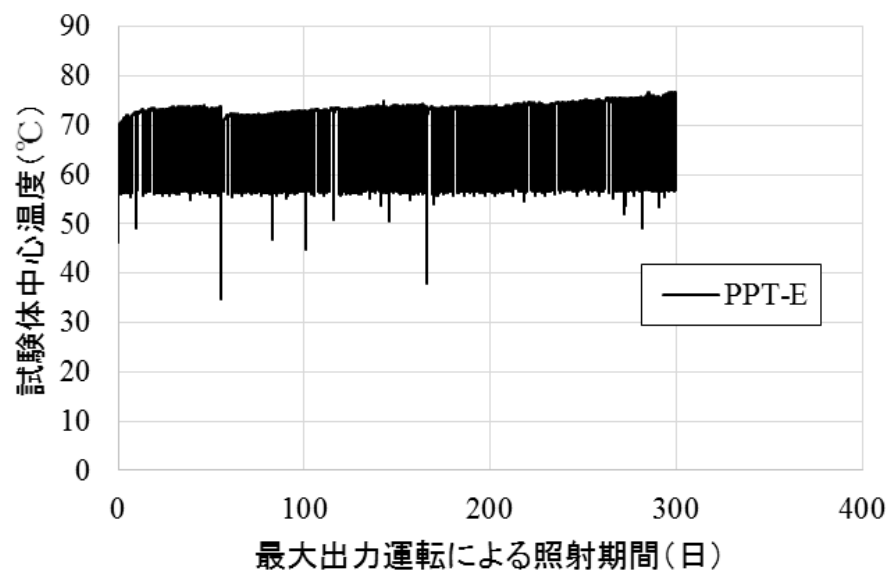


図 2. 164 コンクリート試験体の中心温度の時間変化

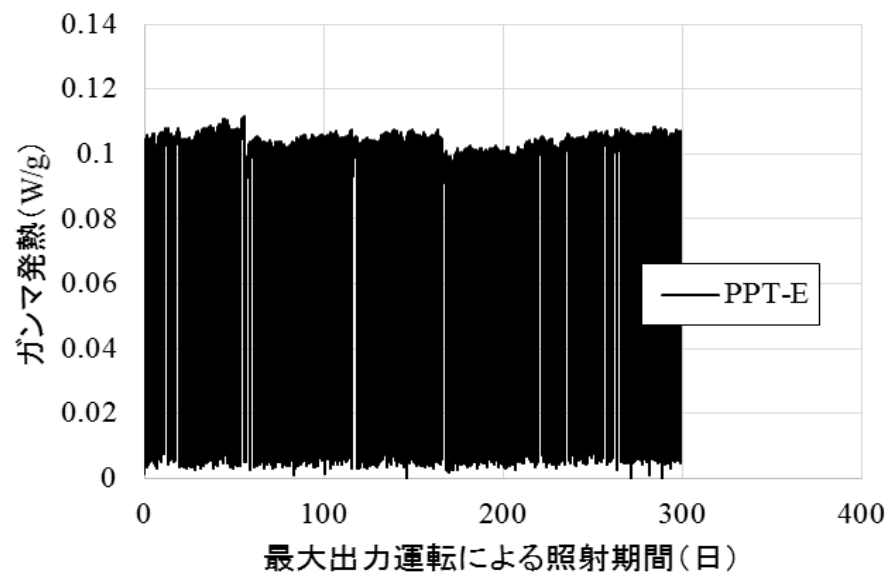


図 2. 165 ガンマ発熱の時間変化

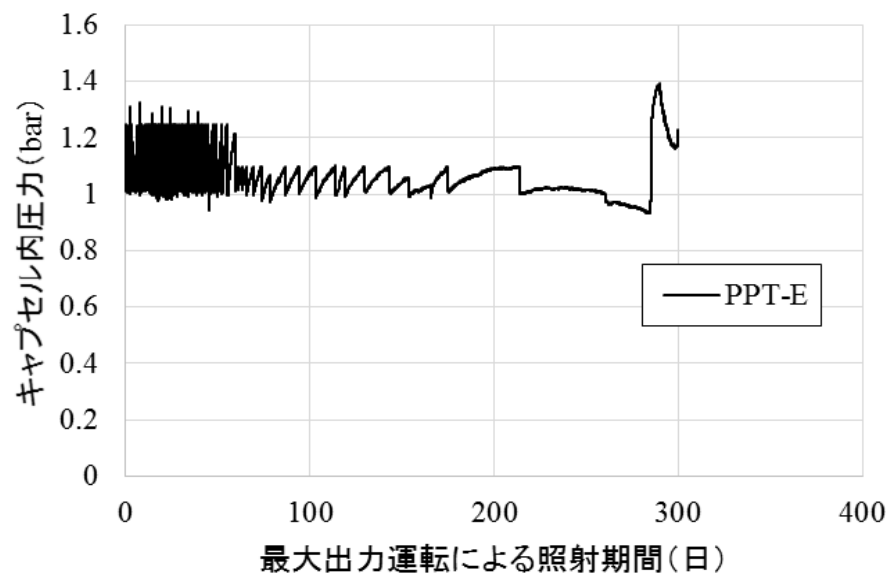


図 2.166 ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

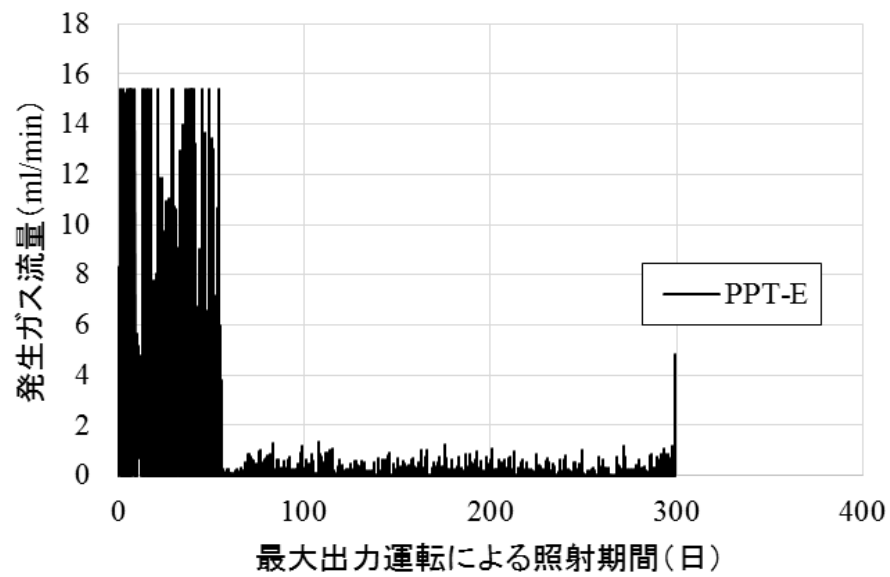


図 2.167 発生ガス流量の時間変化

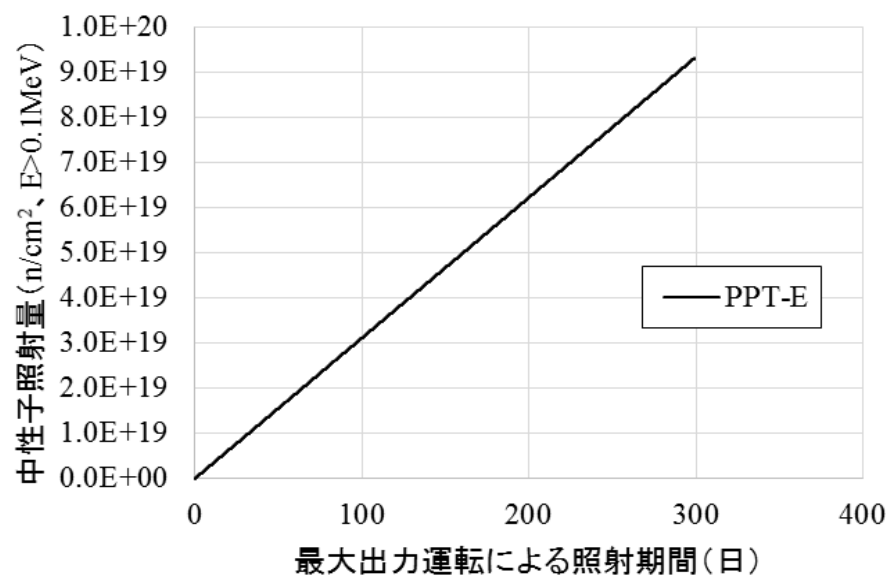


図 2. 168 中性子照射量の時間変化

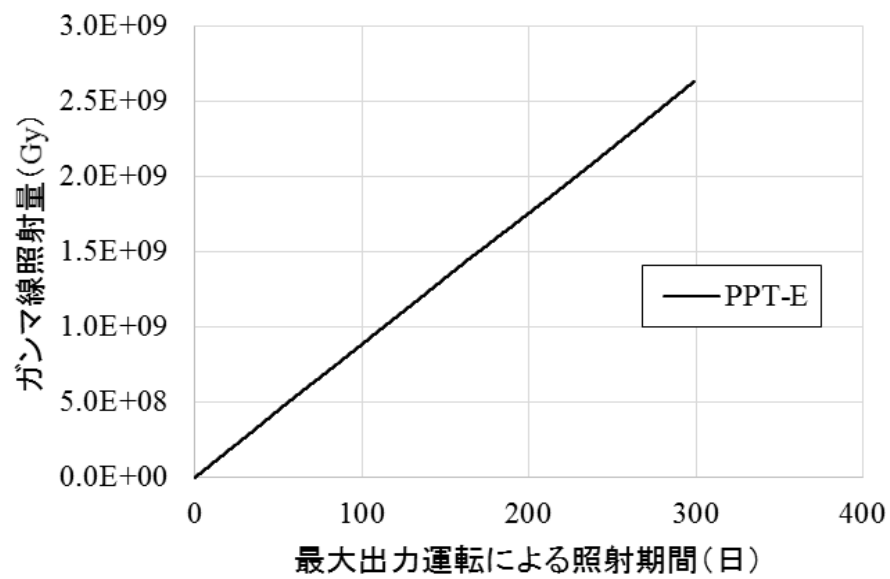


図 2. 169 ガンマ線照射量の時間変化



図 2.170 炉外の計測系内相対湿度の時間変化

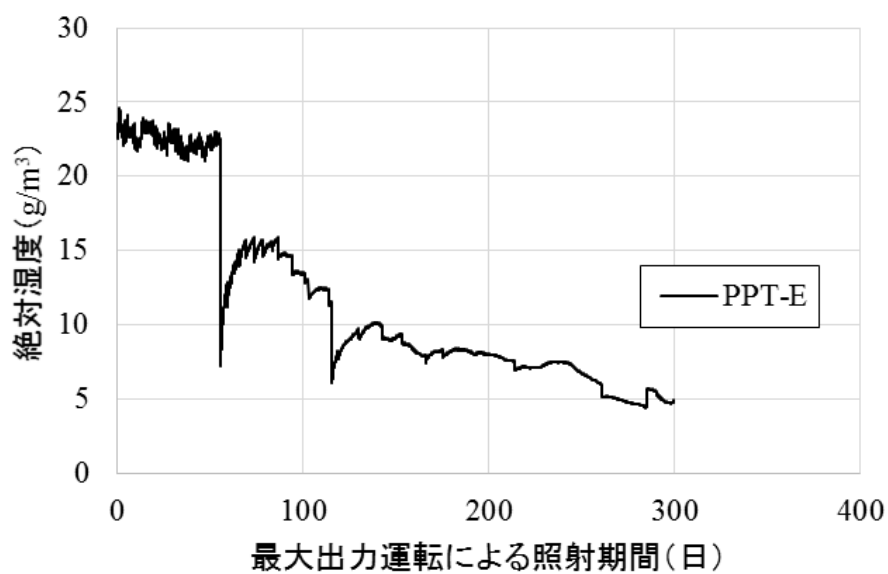


図 2.171 炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

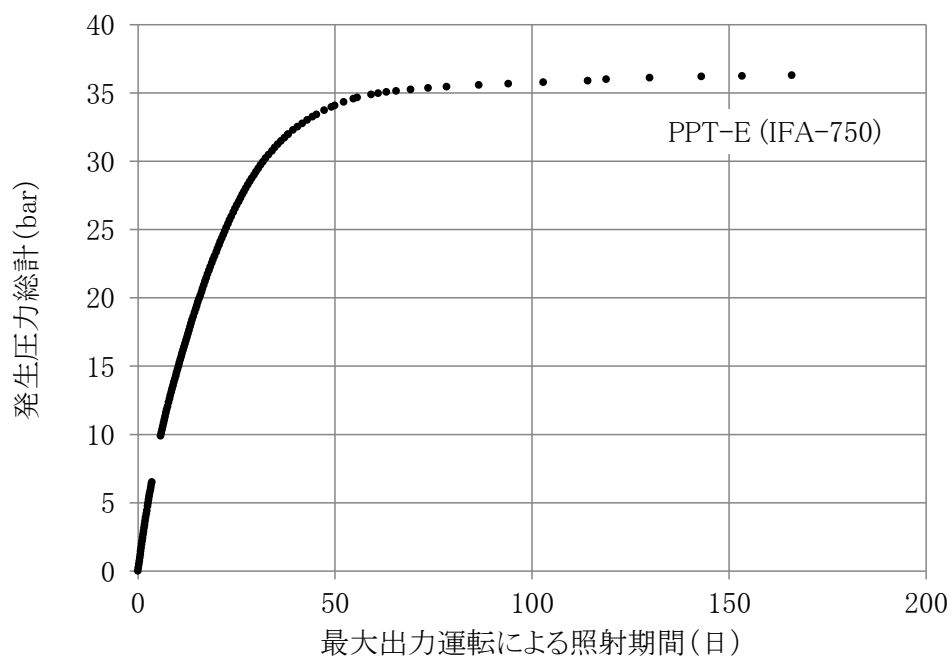


図 2.172 発生圧力総計の時間変化

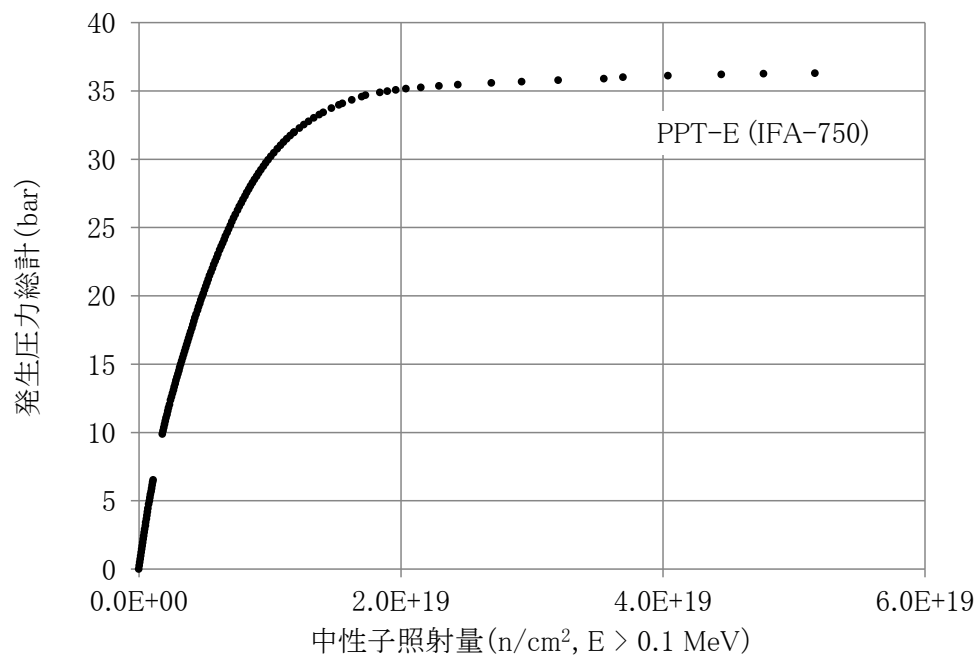


図 2.173 発生圧力総計の照射量に対する変化

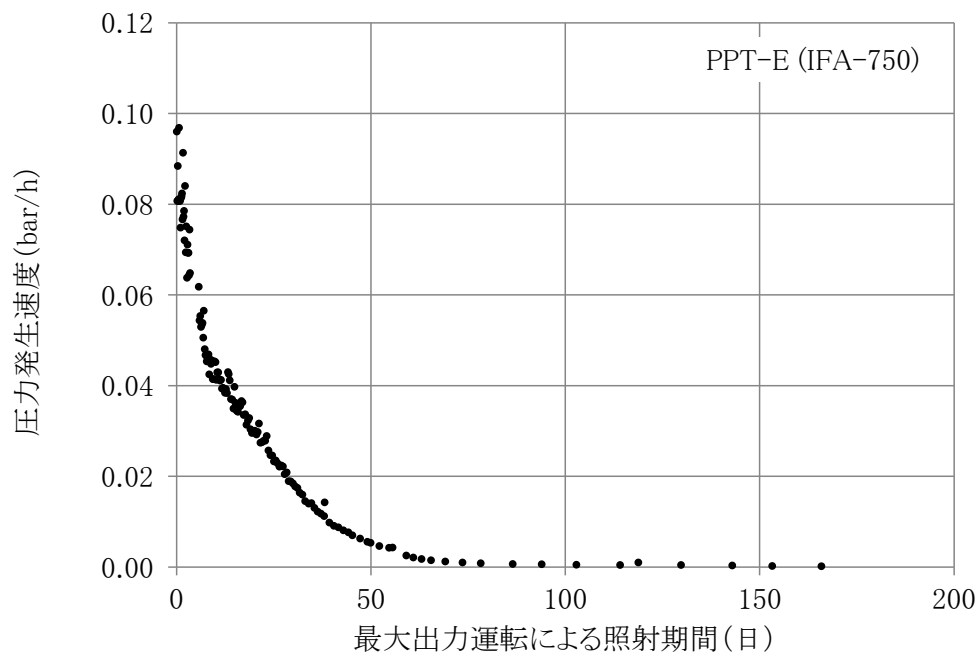


図 2.174 圧力発生速度の時間変化

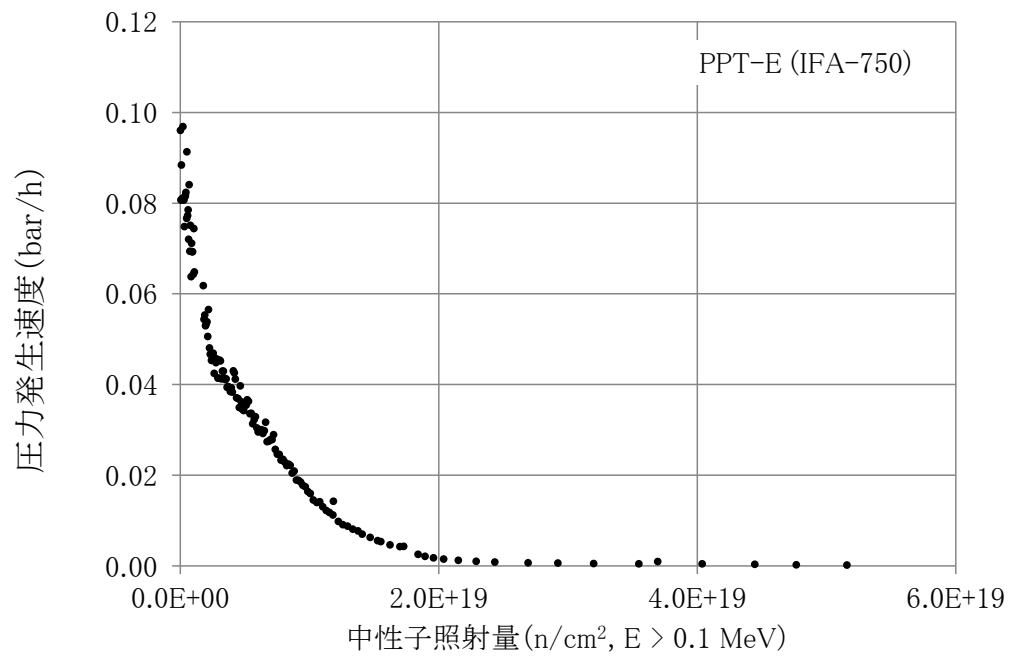


図 2.175 圧力発生速度の照射量に対する変化

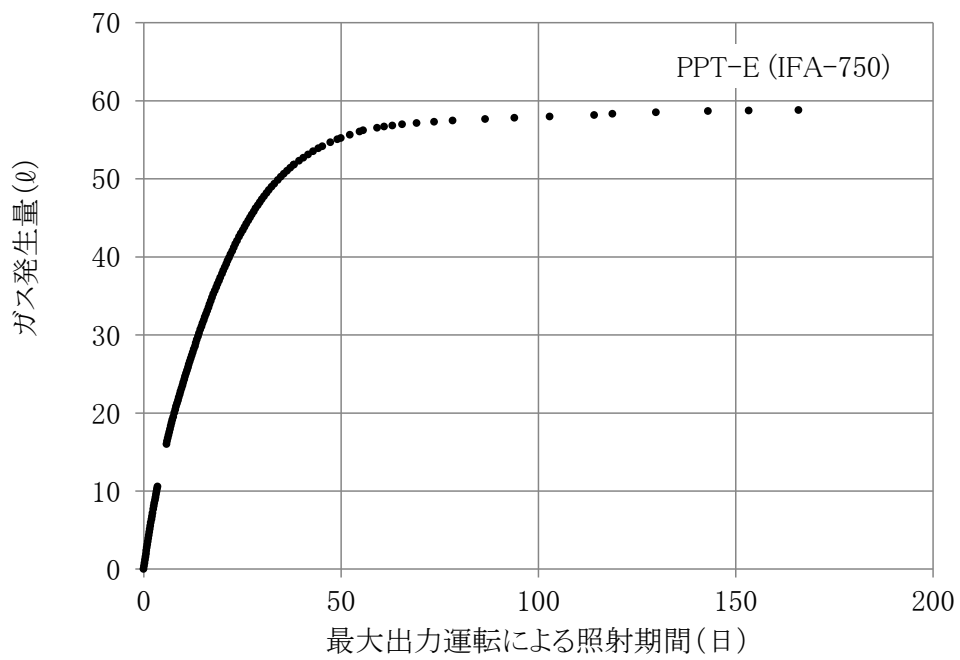


図 2.176 ガス発生量の時間変化 (0℃、1 気圧)

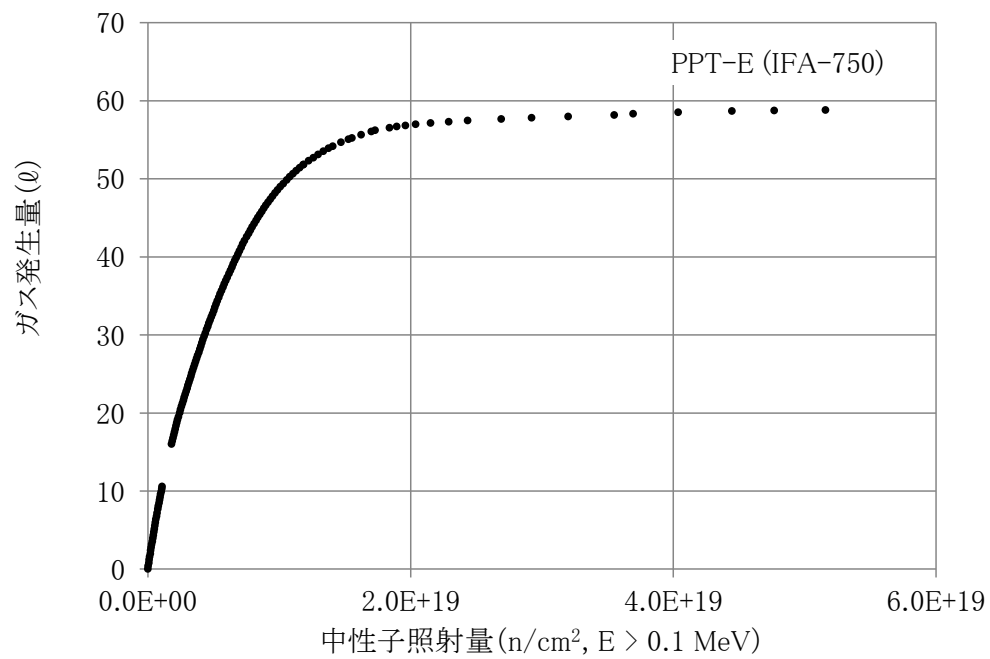


図 2.177 ガス発生量の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

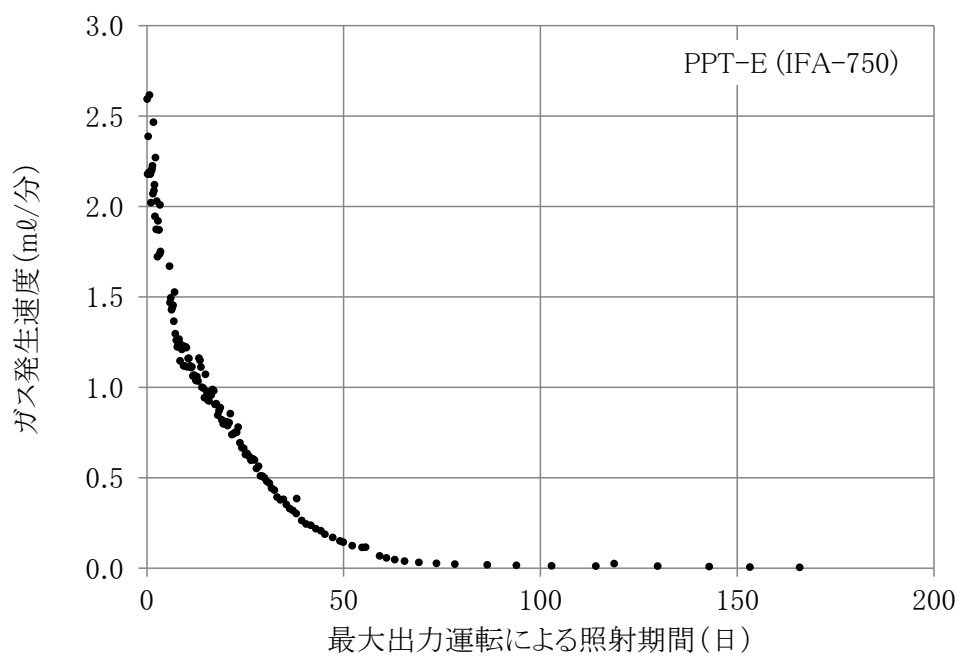


図 2.178 ガス発生速度の時間変化 (0℃、1 気圧)

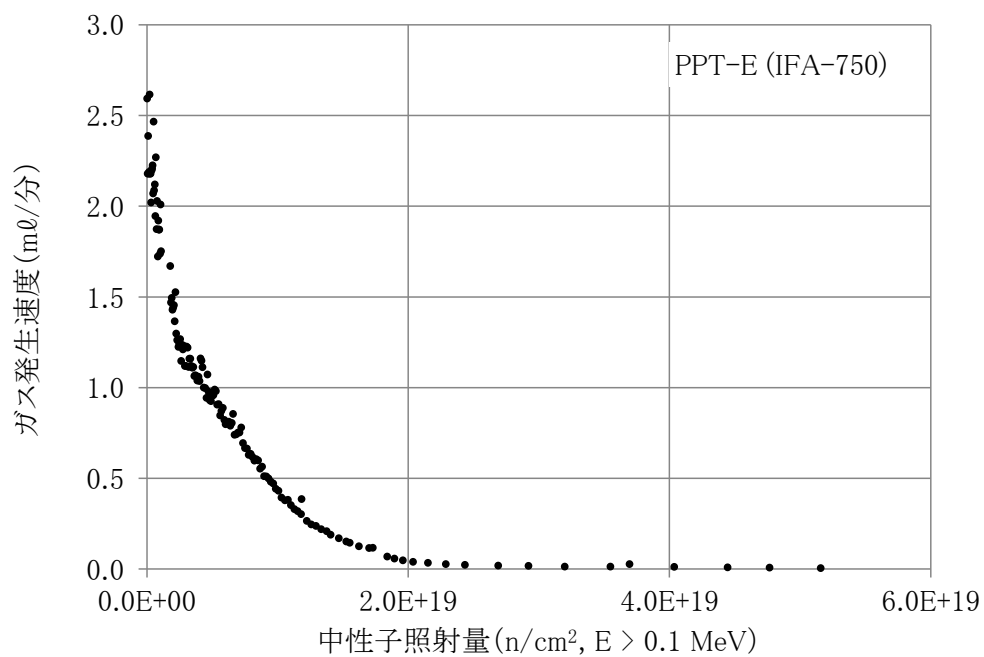


図 2.179 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

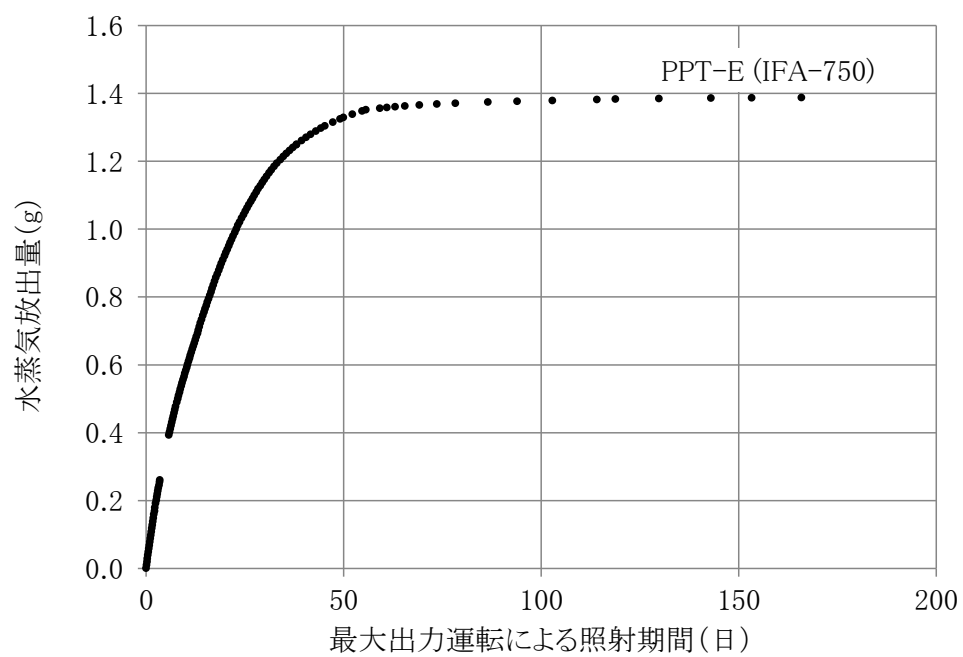


図 2.180 水分放出量の時間変化

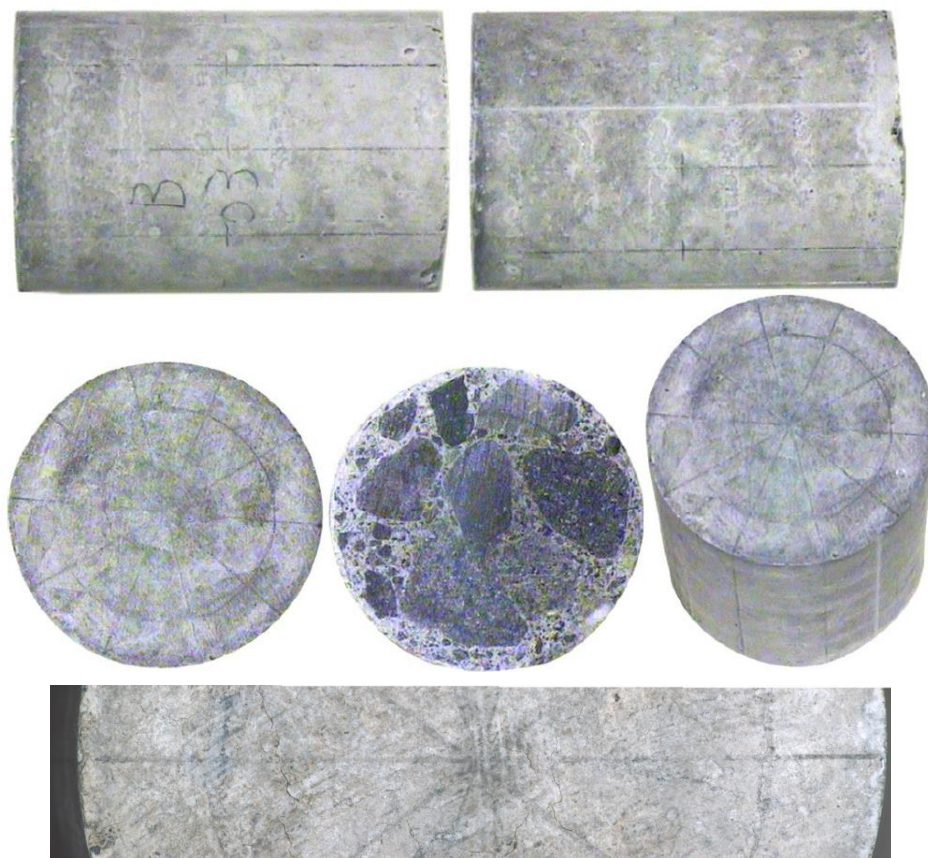


図 2.181 照射後の試験体の目視観察結果の一例 (B03)

次に PPT-E に関する試験体のトラブルについて示す。PPT-E は当初、 $6.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ の高速中性子照射量を目的としてキャプセルが設計された。試験体とキャプセル内面の距離は試験体の放熱特性に影響を与えるために極力小さい方がよいが、照射によるコンクリートの膨張が期待されたのでキャプセルと試験体のギャップは試験体直径の 1% を想定した。しかしながら、より高い範囲の照射量データを蓄積したうえで安全性評価を考えるべきという議論から、照射量を $1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ に増大させて試験を続けた。その結果、キャプセルは照射中に破断し、キャプセル内に浸水がおき、原子炉はスクラム停止した。

その後、キャプセルを取り出し、リグを長軸方向に削り出すことによって試験体を取り出し、PIE を行った。この時、設計図面とリグの強度から算出した試験体に生じた応力は周方向で 24.8 MPa、長軸方向では 35.1 MPa であった。各拘束力の算定について図 2.184 および図 2.185 に示す。破断時のキャプセルの様子を図 2.182 に、取り出した試験体の様子を図 2.183 に示す。結果として試験体は、通常の形状のまま取り出すことができたので、PIE を実施した。ただし、試験体は再度吸水しており、セメントペーストの質量変化で一部一貫性の無いデータとなった。



(a) 長軸方向のひび割れ

(b) 周方向のひび割れ

図 2.182 キャプセルに生じたひび割れ



図 2.183 取り出した後の試験体の様子

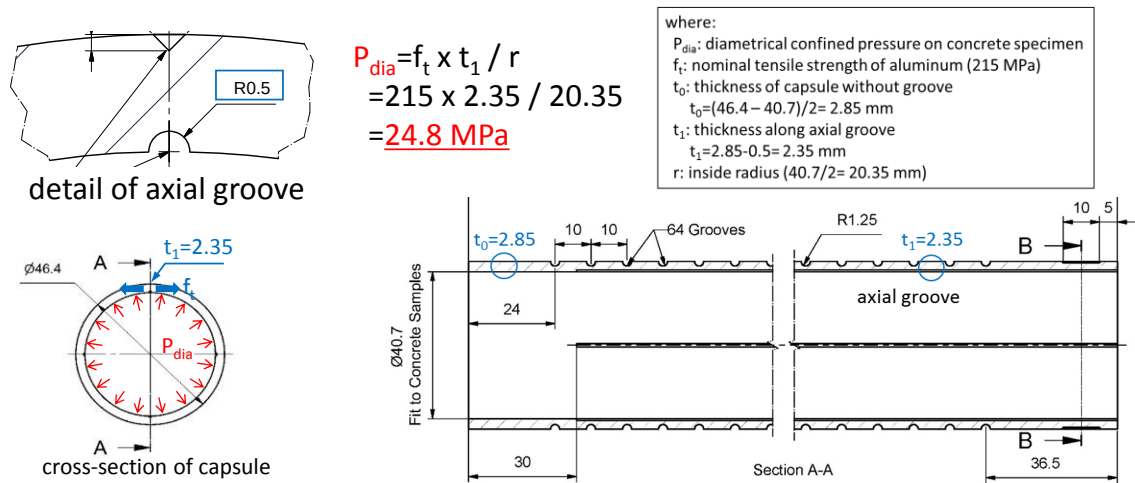


図 2.184 周方向の拘束力の算定

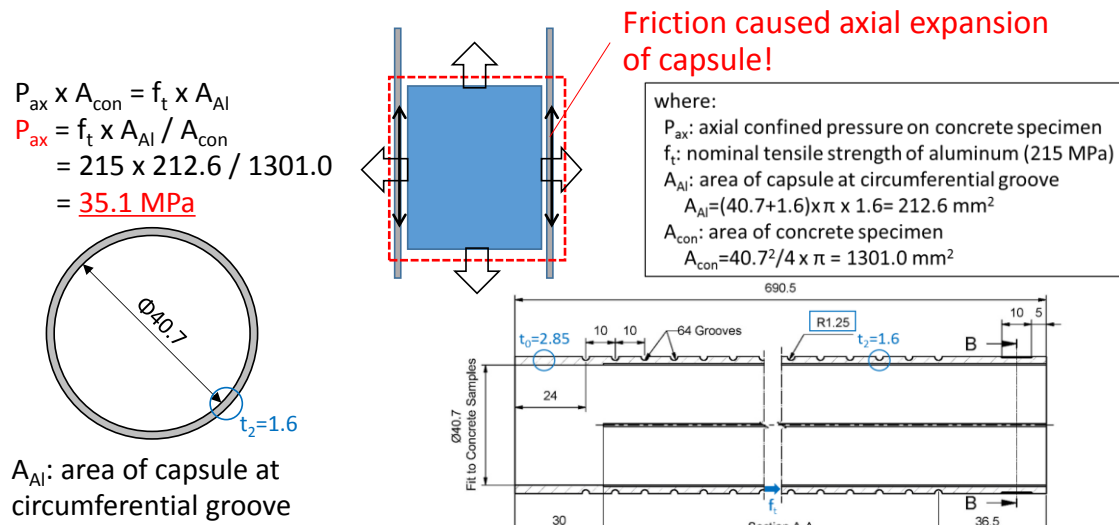


図 2.185 長軸方向の拘束力の算定

(2) 非照射・加熱試験

中性子照射の影響を把握するために、非照射・加熱試験を行う。試験は炉外で実施し、非照射以外の条件はすべて同一としている。しかし、照射時のコンクリート試験体内部の温度分布（中心が最高温度となる放物線分布）を再現することは難しかったため、加熱温度としては、コンクリート試験体断面内の最高温度と平均温度の2水準の温度で、断面内一定温度条件で非照射・加熱試験を行うこととした。

図 2.186 に、H1-3 (IFA-757.1) (PPT-B：中央最高温度) についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 2.187 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 2.188 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 2.189 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 2.190 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 2.191 に、H3-3 (IFA-755.1) (PPT-B：断面内平均温度) についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 2.192 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 2.193 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 2.194 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 2.195 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 2.196 に、H1-6 (IFA-757.2) (PPT-C：中央最高温度) についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 2.197 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 2.198 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 2.199 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 2.200 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 2.201 に、H3-6 (IFA-755.2) (PPT-C：断面内平均温度) についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 2.202 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 2.203 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 2.204 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 2.205 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 2.206 に、H1-12 (IFA-757.3) (PPT-D：中央最高温度) についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 2.207 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 2.208 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 2.209 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 2.210 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 2. 211 に、H3-12 (IFA-755. 3) (PPT-D : 断面内平均温度) についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 2. 212 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 2. 213 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 2. 214 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 2. 215 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 2. 216 に、H2-24 (IFA-756) (PPT-E : 中央最高温度) についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 2. 217 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 2. 218 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 2. 219 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 2. 220 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

図 2. 221 に、H4-24 (IFA-754) (PPT-E : 断面内平均温度) についてのコンクリート試験体の中心温度の時間変化を示す。図 2. 222 に、ヘリウムフラッシングによるキャプセル内圧力の時間変化を示す。図 2. 223 に、ヘリウムフラッシングによる発生ガス流量の時間変化を示す。図 2. 224 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける相対湿度の時間変化を示す。図 2. 225 に、ヘリウムフラッシングによる湿度計測タンクにおける絶対湿度の時間変化を示す。

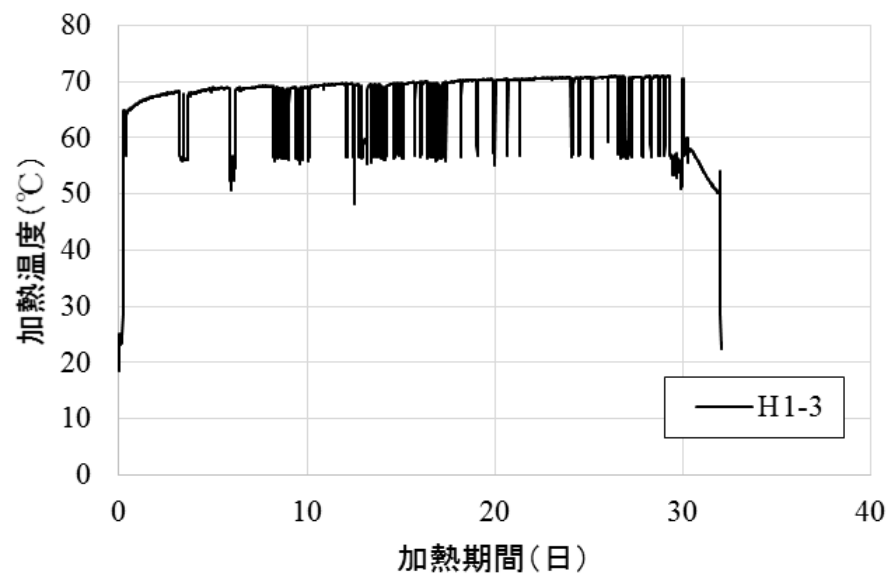


図 2. 186 コンクリート試験体の中心温度の時間変化 (H1-3 : IFA-757. 1)
(PPT-B : IFA-753 中央最高温度)

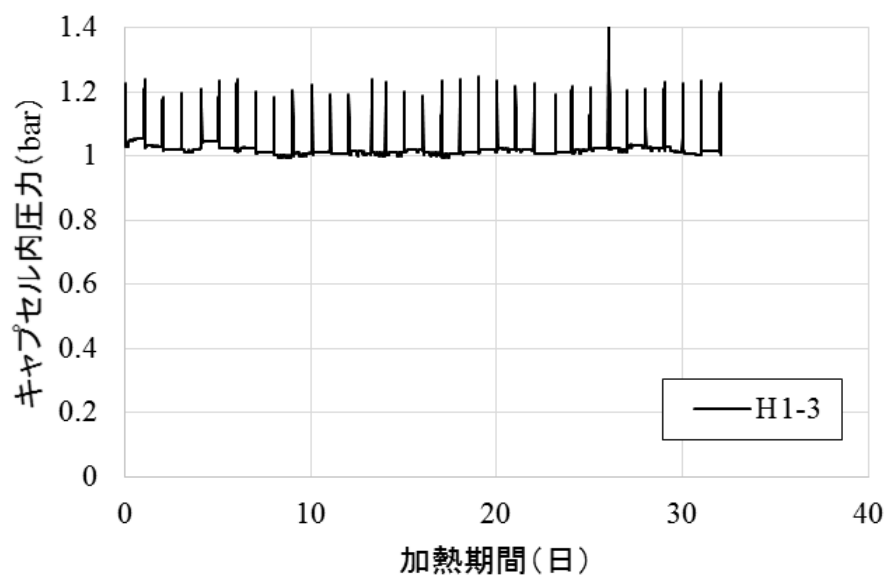


図 2. 187 キャプセル内圧力の時間変化 (H1-3 : IFA-757. 1)
(ヘリウムフラッシングによる圧力変化)

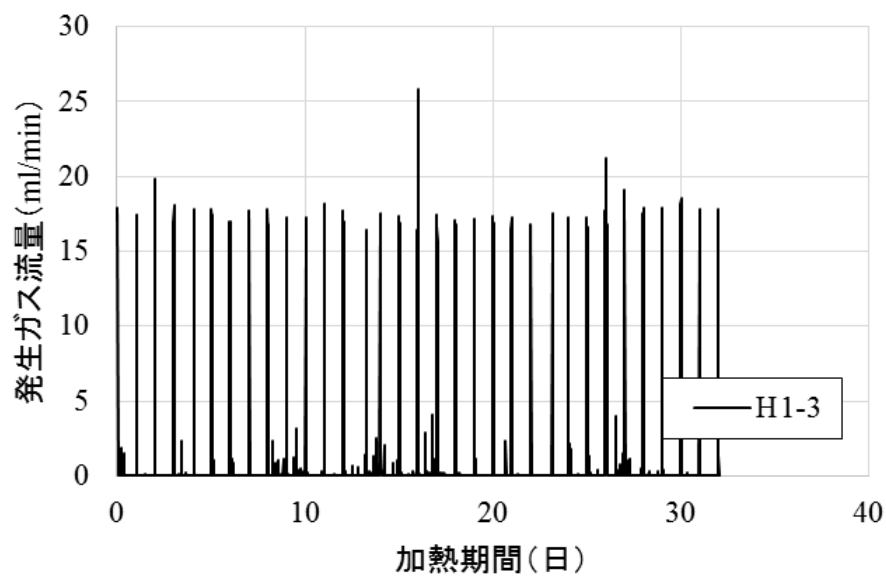


図 2. 188 発生ガス流量の時間変化 (H1-3 : IFA-757. 1)
(ヘリウムフラッシングによるガス流量変化)

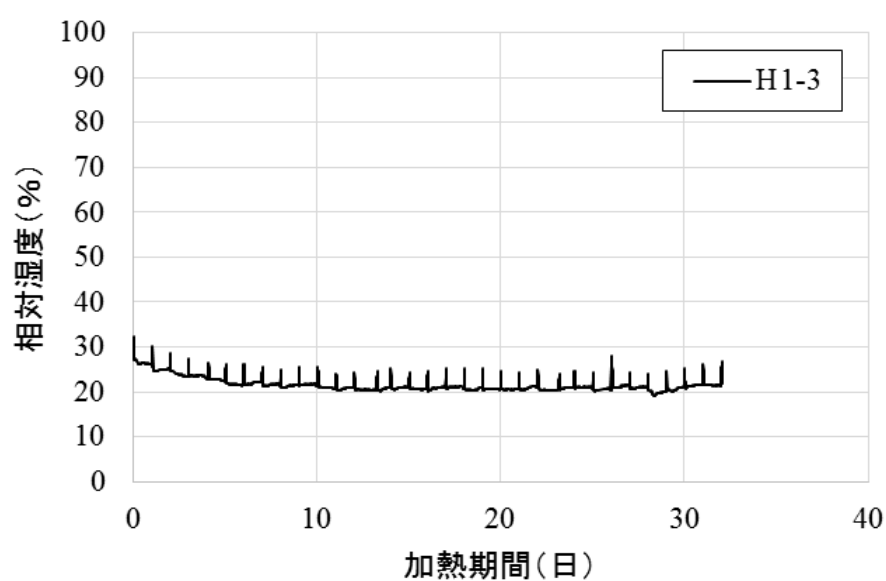


図 2.189 相対湿度の時間変化 (H1-3 : IFA-757.1)
(ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化)

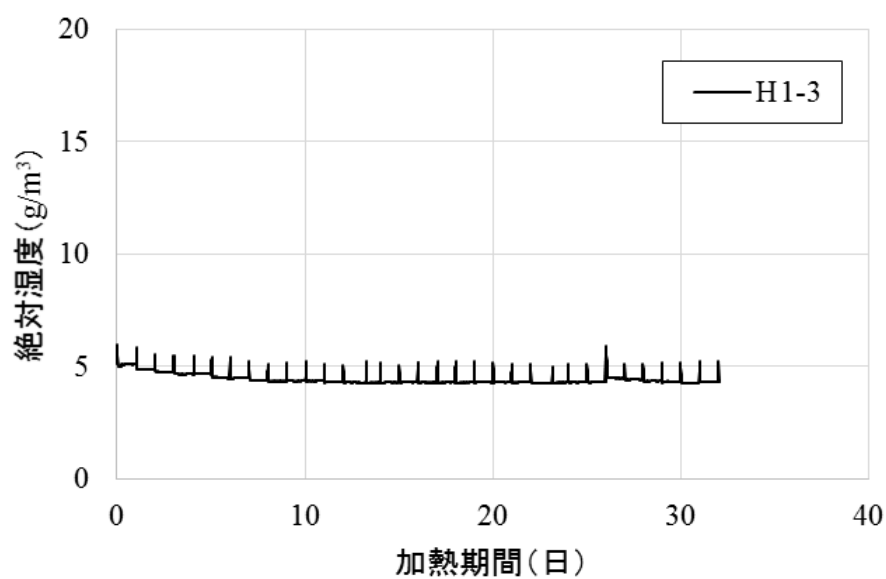


図 2.190 絶対湿度の時間変化 (H1-3 : IFA-757.1)
(ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化)

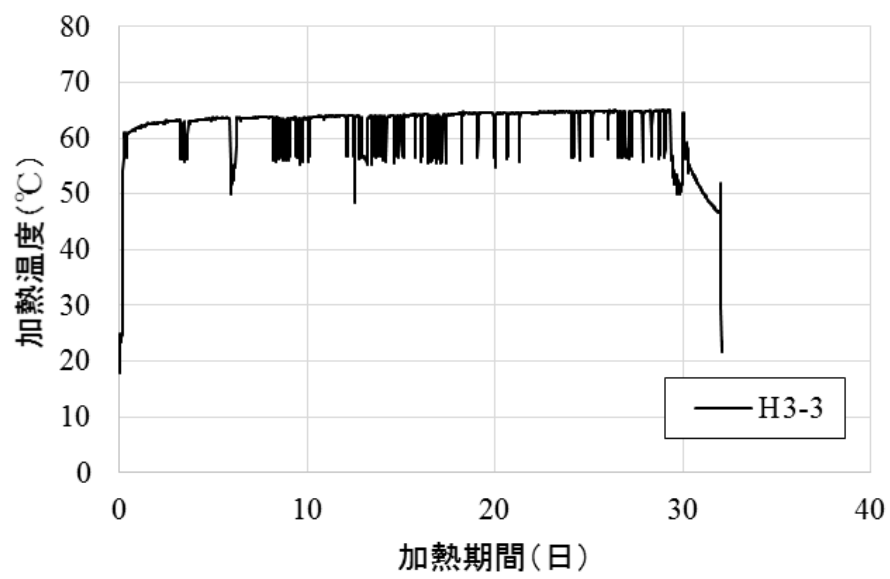


図 2. 191 コンクリート試験体の中心温度の時間変化 (H3-3 : IFA-755. 1)
(PPT-B : IFA-753 断面内平均温度)

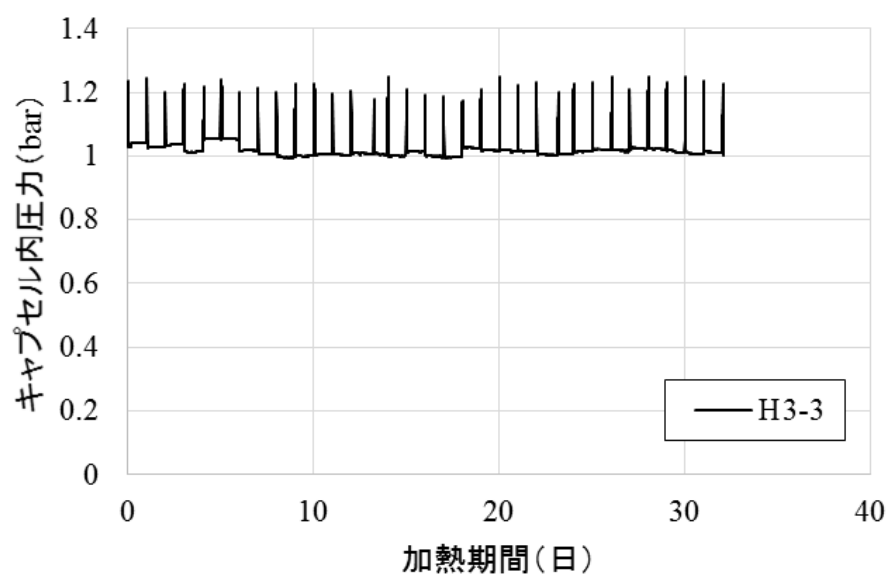


図 2. 192 キプセル内圧力の時間変化 (H3-3 : IFA-755. 1)
(ヘリウムフラッシングによる圧力変化)

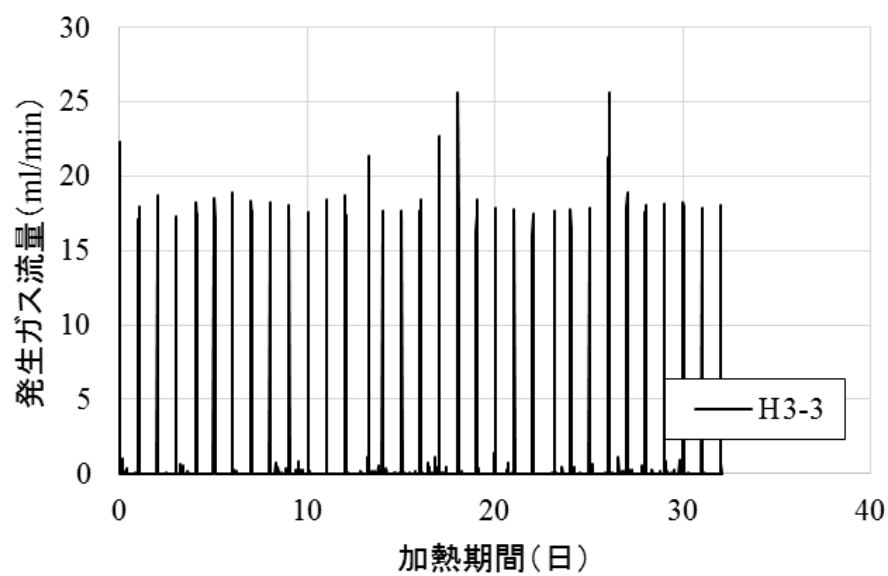


図 2. 193 発生ガス流量の時間変化 (H3-3 : IFA-755. 1)
(ヘリウムフラッシングによるガス流量変化)

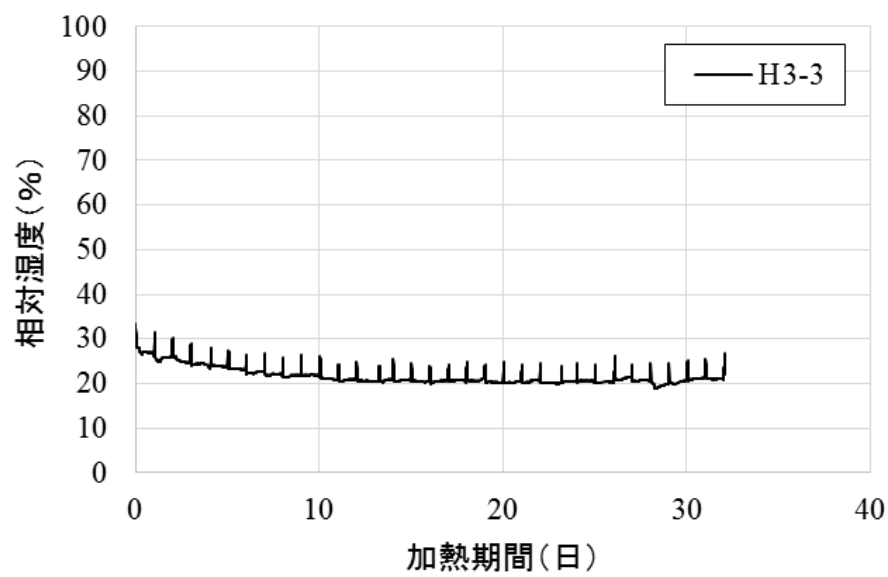


図 2.194 相対湿度の時間変化 (H3-3 : IFA-755.1)
(ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化)

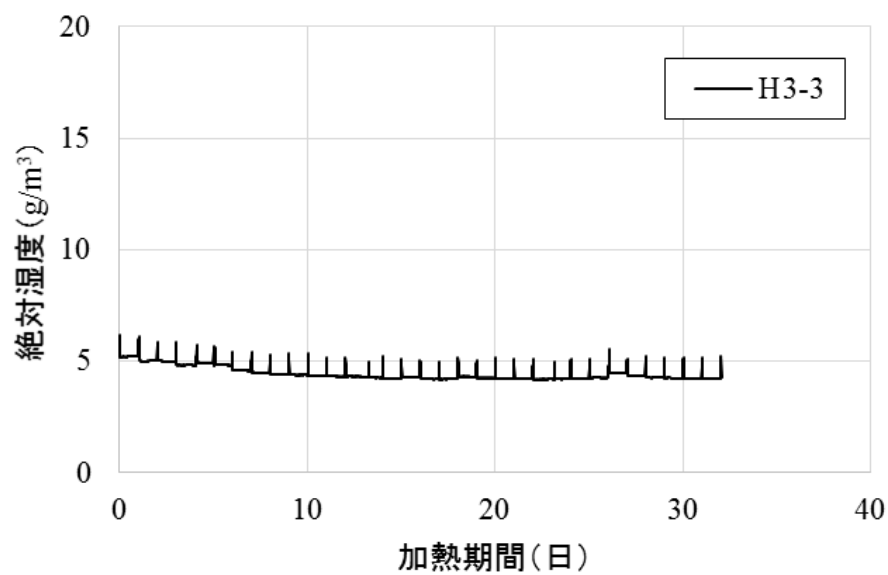


図 2.195 絶対湿度の時間変化 (H3-3 : IFA-755.1)
(ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化)

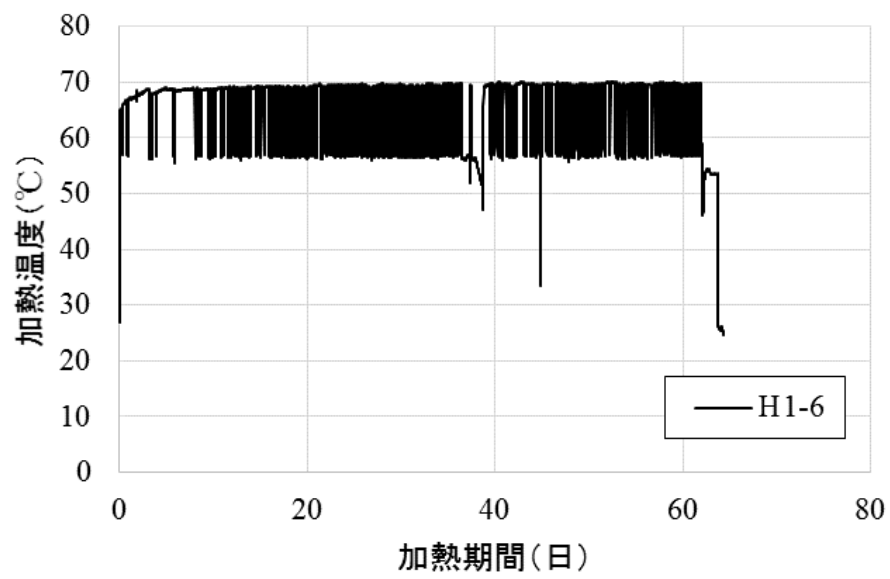


図 2.196 コンクリート試験体の中心温度の時間変化 (H1-6 : IFA-757.2)
(PPT-C : IFA-752 中央最高温度)

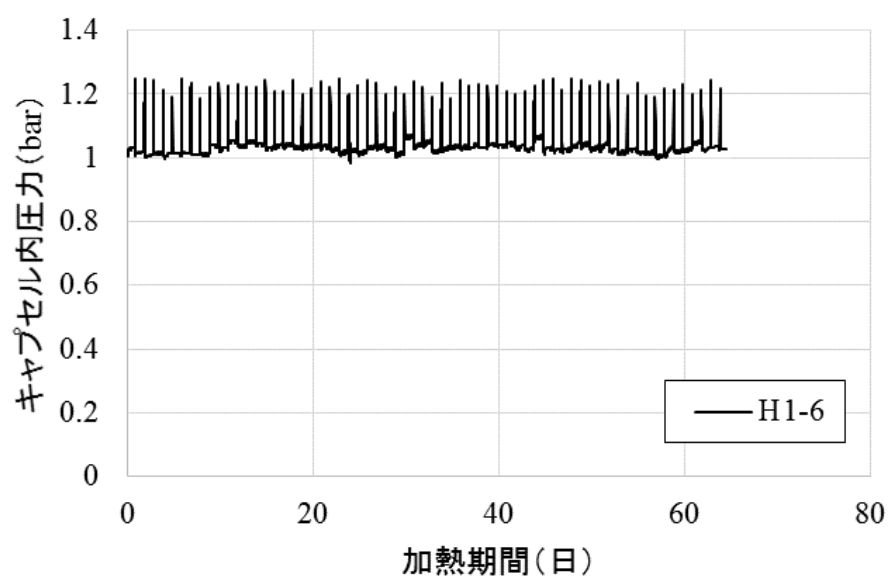


図 2.197 キャプセル内圧力の時間変化 (H1-6 : IFA-757.2)
(ヘリウムフラッシングによる圧力変化)

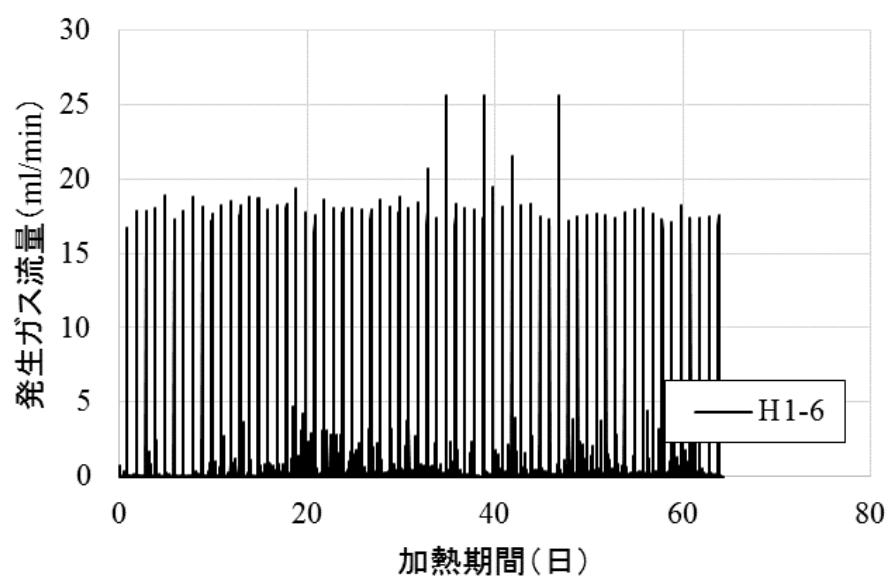


図 2.198 発生ガス流量の時間変化 (H1-6 : IFA-757.2)
(ヘリウムフラッシングによるガス流量変化)

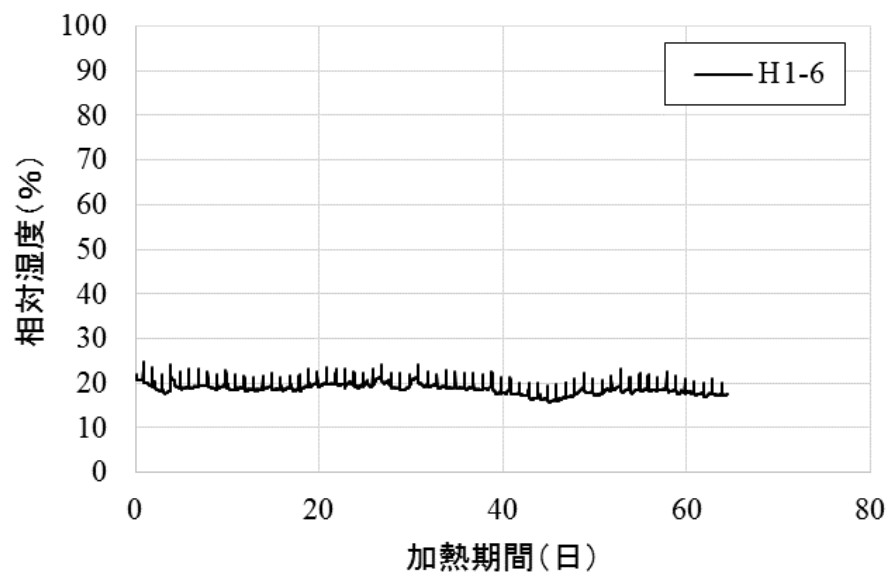


図 2.199 相対湿度の時間変化 (H1-6 : IFA-757.2)
(ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化)

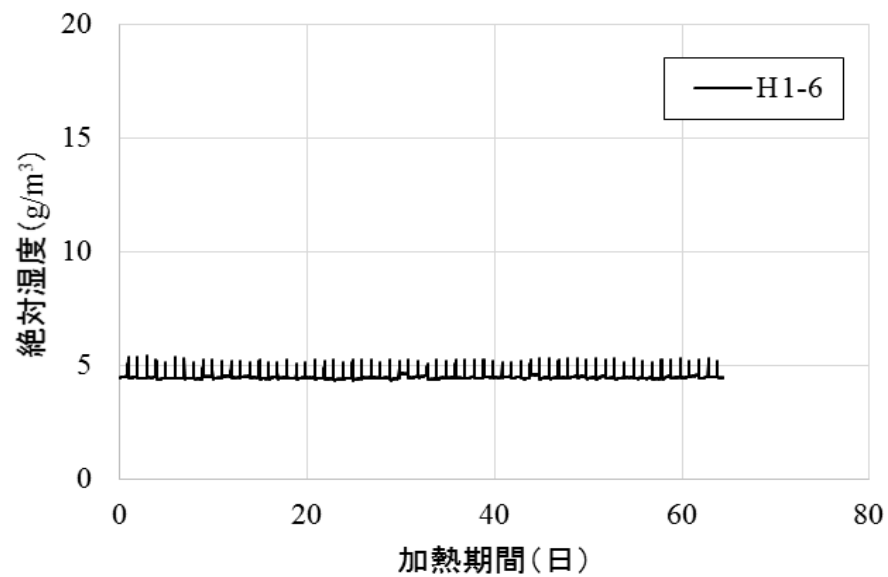


図 2.200 絶対湿度の時間変化 (H1-6 : IFA-757.2)
(ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化)

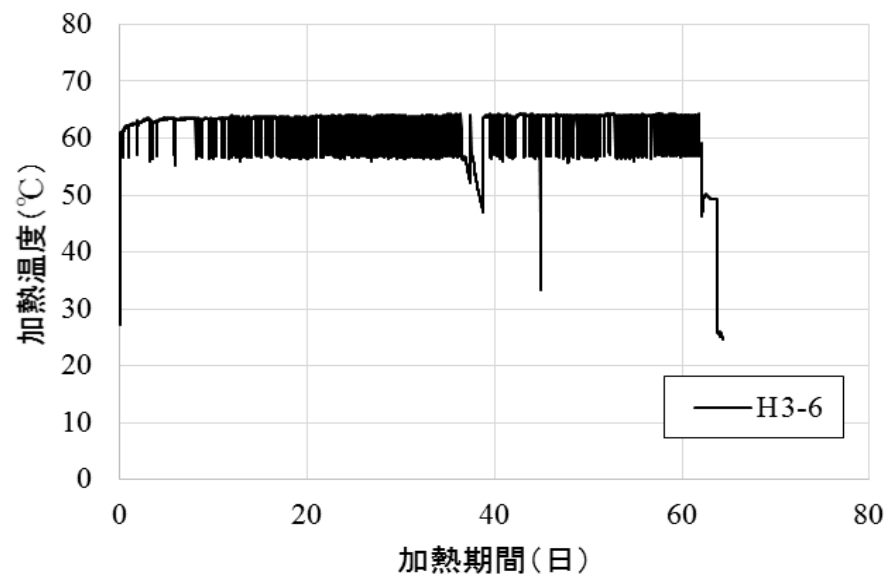


図 2.201 コンクリート試験体の中心温度の時間変化 (H3-6 : IFA-755.2)
(PPT-C : IFA-752 断面内平均温度)

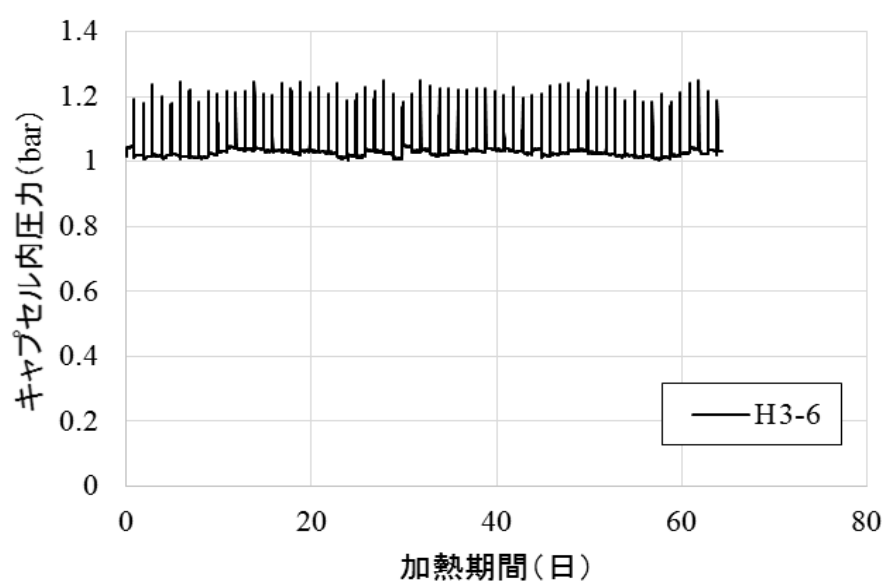


図 2.202 キャプセル内圧力の時間変化 (H3-6 : IFA-755. 2)
(ヘリウムフラッシングによる圧力変化)

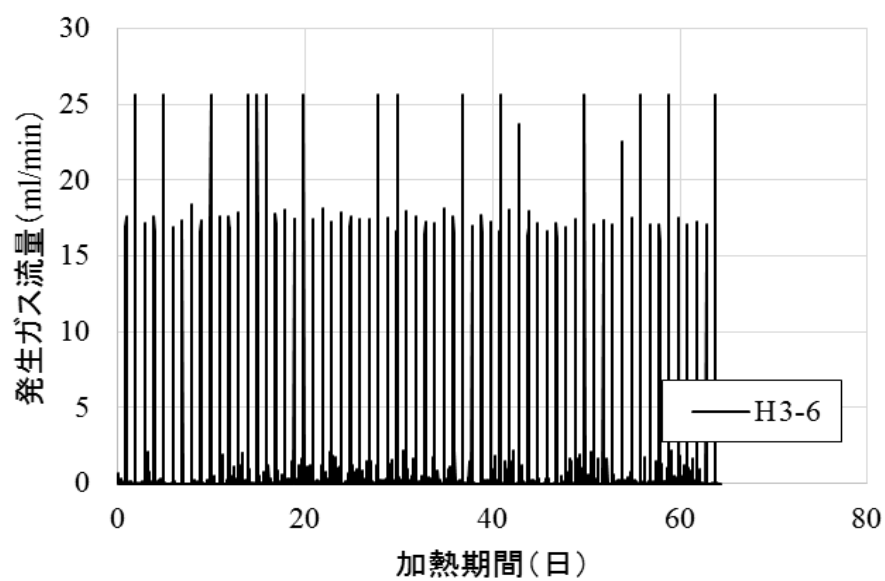


図 2.203 発生ガス流量の時間変化 (H3-6 : IFA-755. 2)
(ヘリウムフラッシングによるガス流量変化)

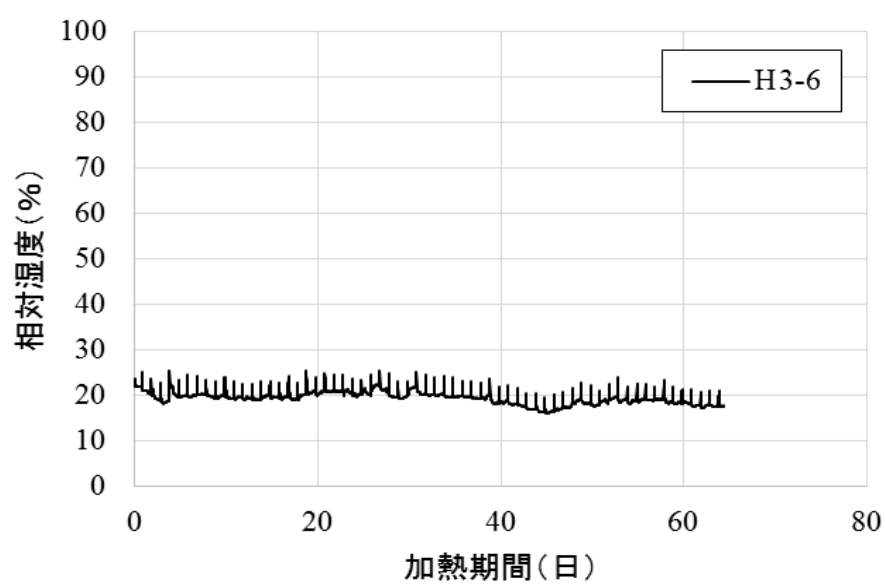


図 2.204 相対湿度の時間変化 (H3-6 : IFA-755.2)
(ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化)

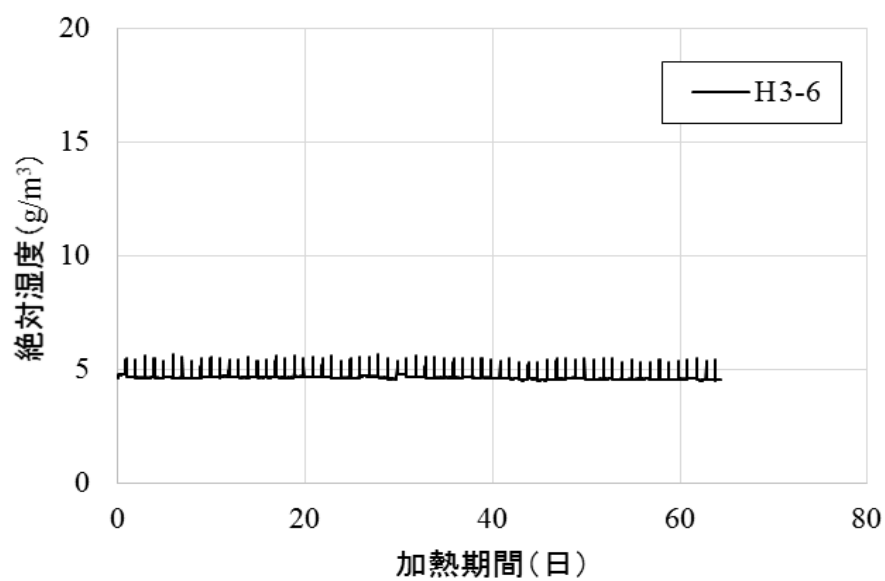


図 2.205 絶対湿度の時間変化 (H3-6 : IFA-755.2)
(ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化)

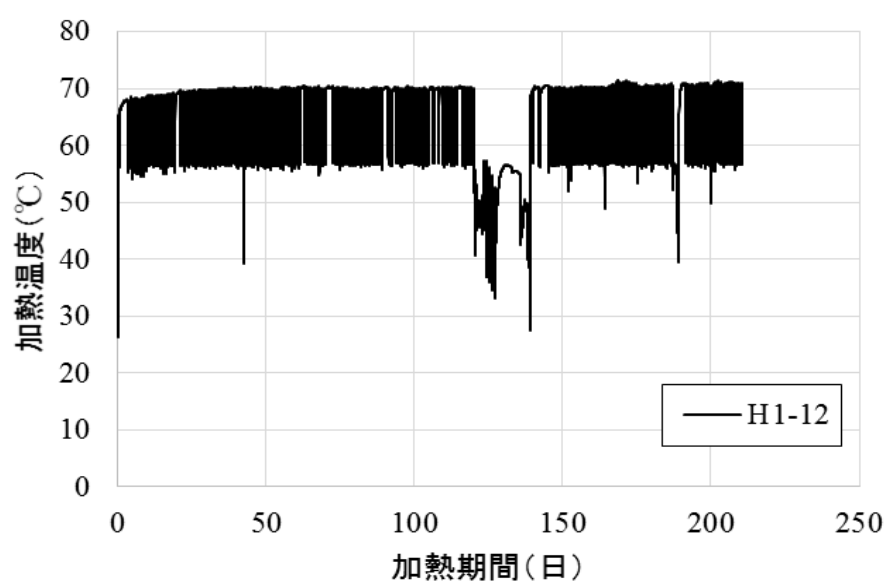


図 2.206 コンクリート試験体の中心温度の時間変化 (H1-12 : IFA-757.3)
(PPT-D : IFA-751) (中央最高温度)

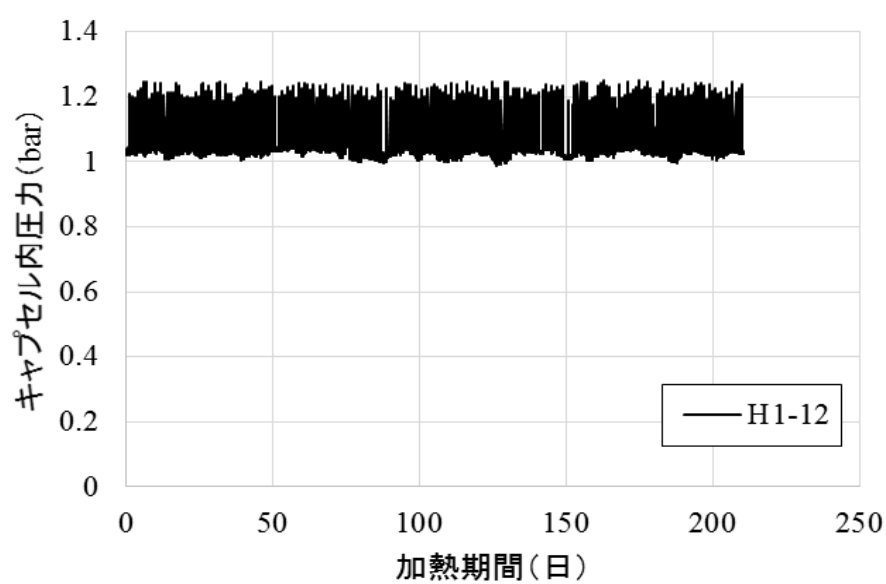


図 2.207 キャプセル内圧力の時間変化 (H1-12 : IFA-757.3)
(ヘリウムフラッシングによる圧力変化)

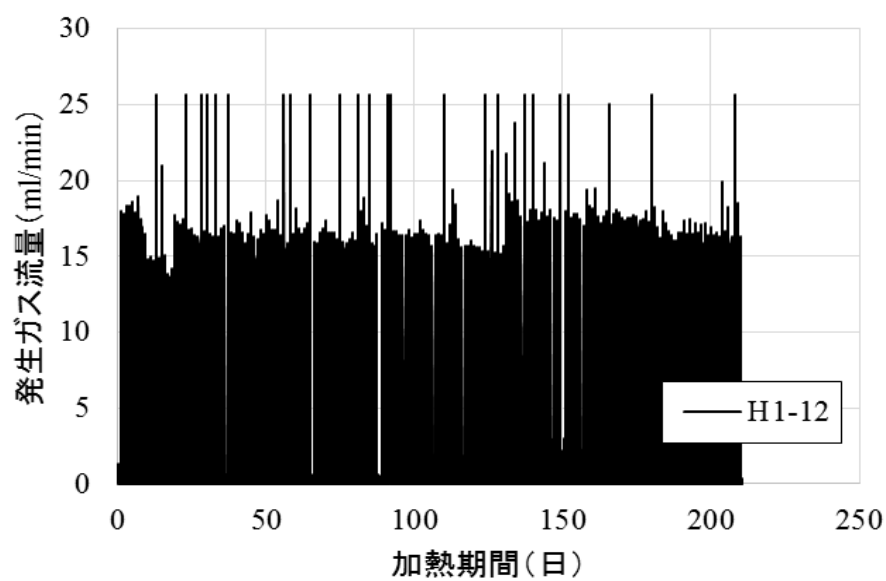


図 2.208 発生ガス流量の時間変化 (H1-12 : IFA-757.3)
(ヘリウムフラッシングによるガス流量変化)

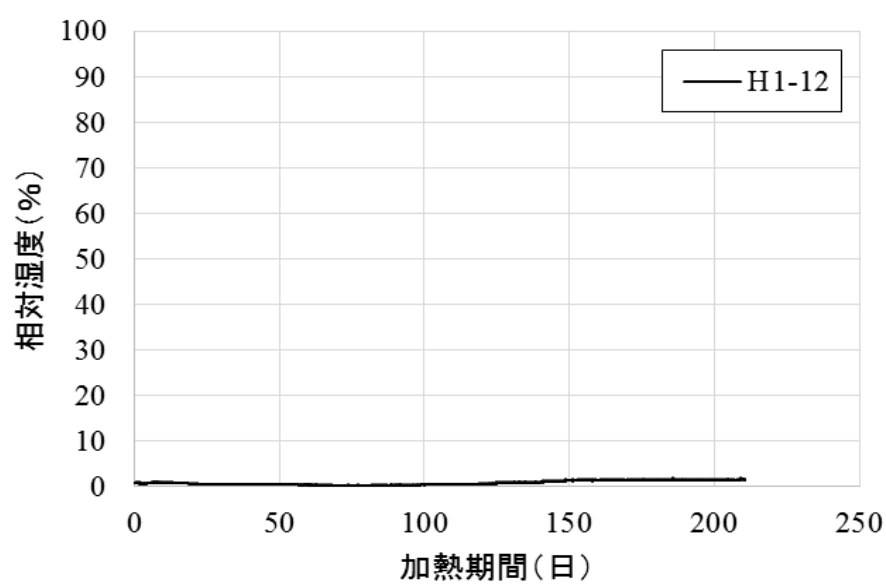


図 2. 209 相対湿度の時間変化 (H1-12 : IFA-757. 3)
(ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化)

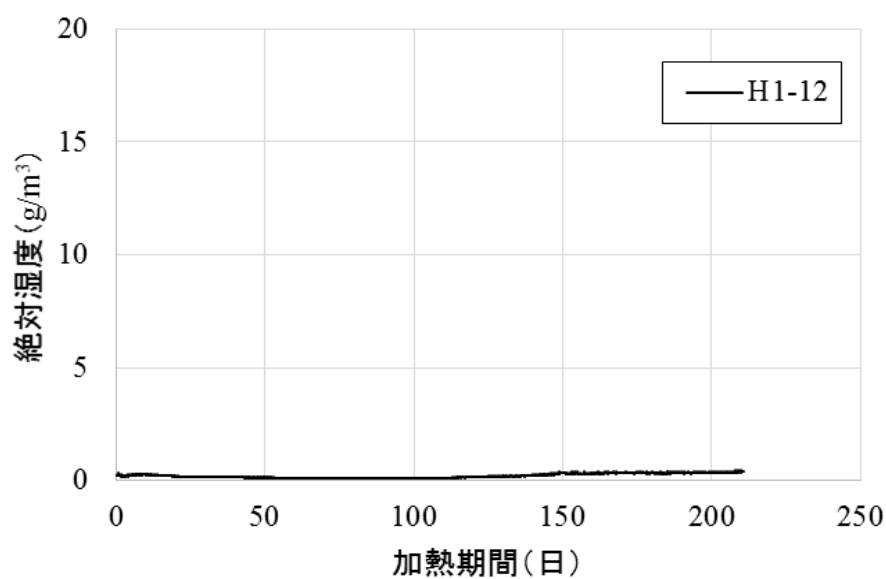


図 2. 210 絶対湿度の時間変化 (H1-12 : IFA-757. 3)
(ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化)

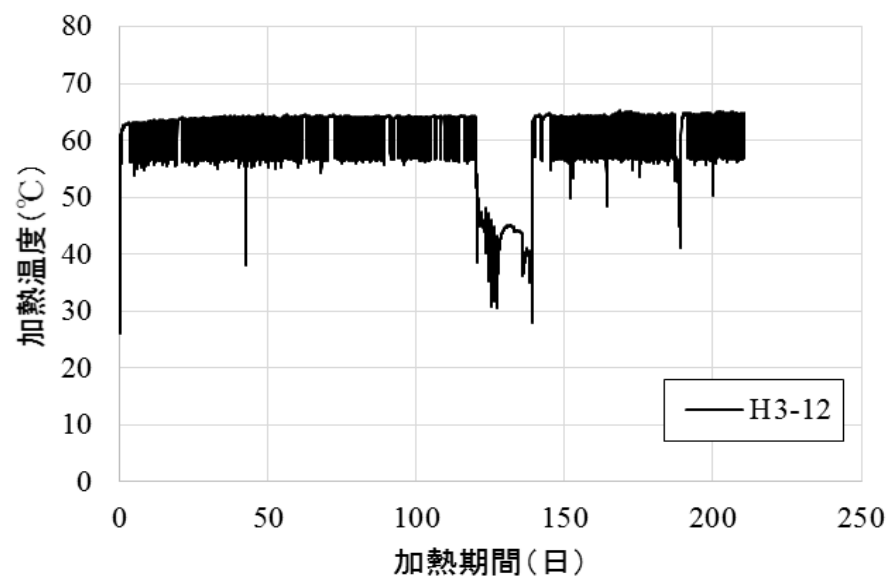


図 2.211 コンクリート試験体の中心温度の時間変化 (H3-12 : IFA-755.3)
(PPT-D : IFA-751 断面内平均温度)

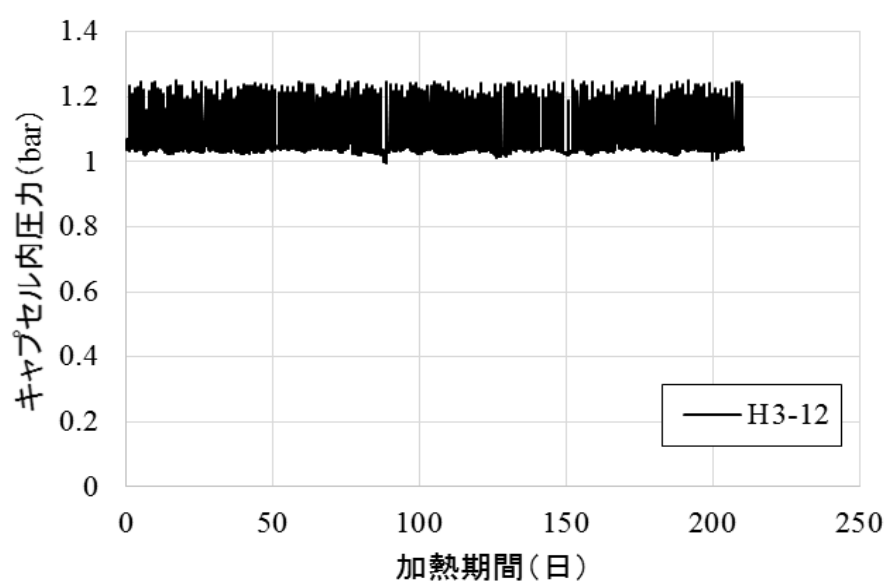


図 2. 212 キャプセル内圧力の時間変化 (H3-12 : IFA-755. 3)
(ヘリウムフラッシングによる圧力変化)

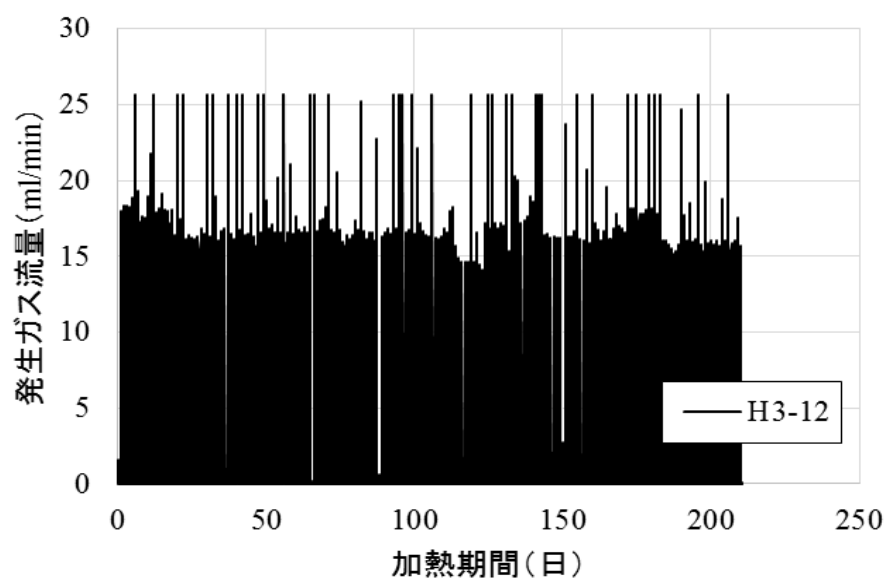


図 2. 213 発生ガス流量の時間変化 (H3-12 : IFA-755. 3)
(ヘリウムフラッシングによるガス流量変化)

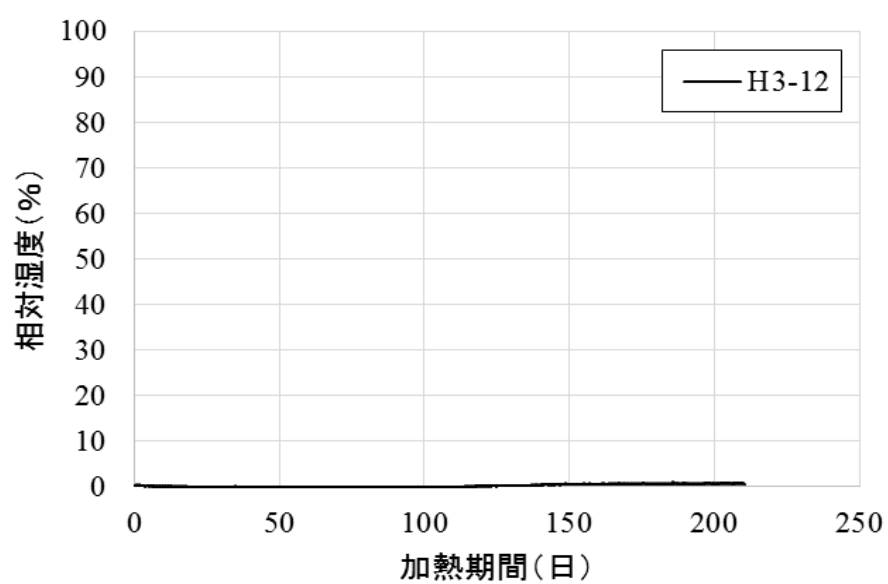


図 2. 214 相対湿度の時間変化 (H3-12 : IFA-755. 3)
(ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化)

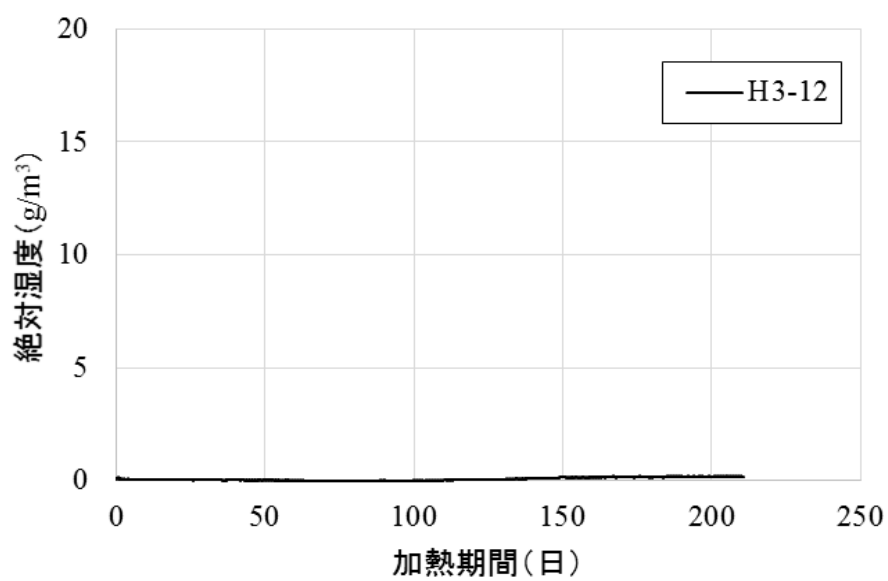


図 2. 215 絶対湿度の時間変化 (H3-12 : IFA-755. 3)
(ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化)

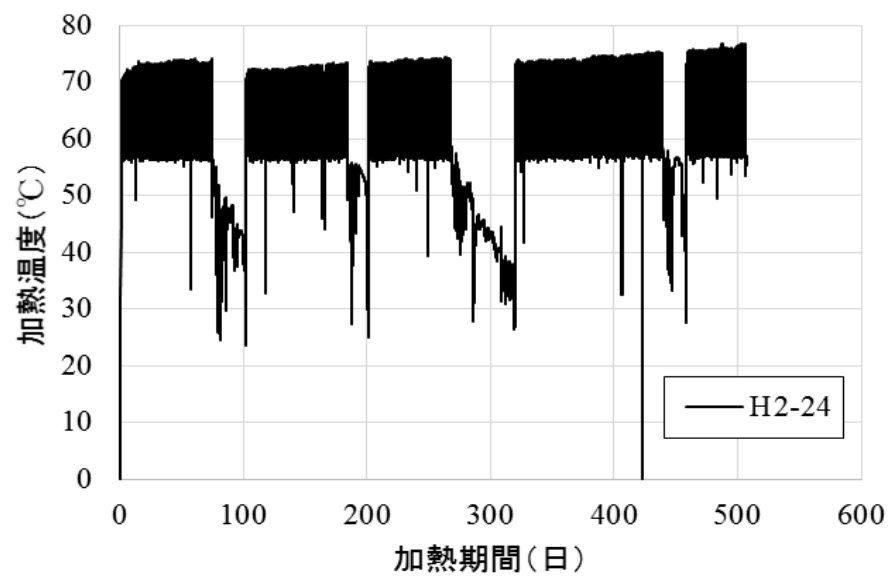


図 2. 216 コンクリート試験体の中心温度の時間変化 (H2-24 : IFA-756)
(PPT-E : IFA-750) (中央最高温度)

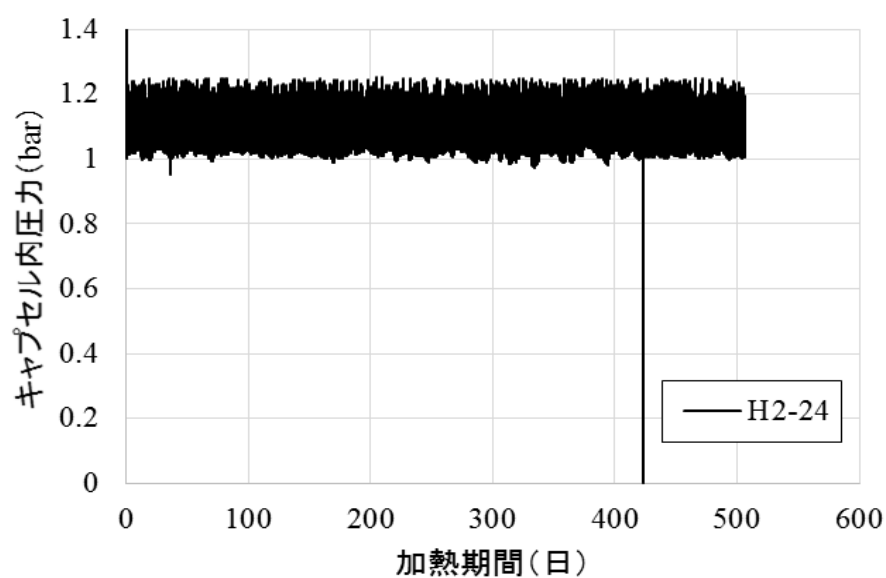


図 2.217 キャプセル内圧力の時間変化 (H2-24 : IFA-756)
(ヘリウムフラッシングによる圧力変化)

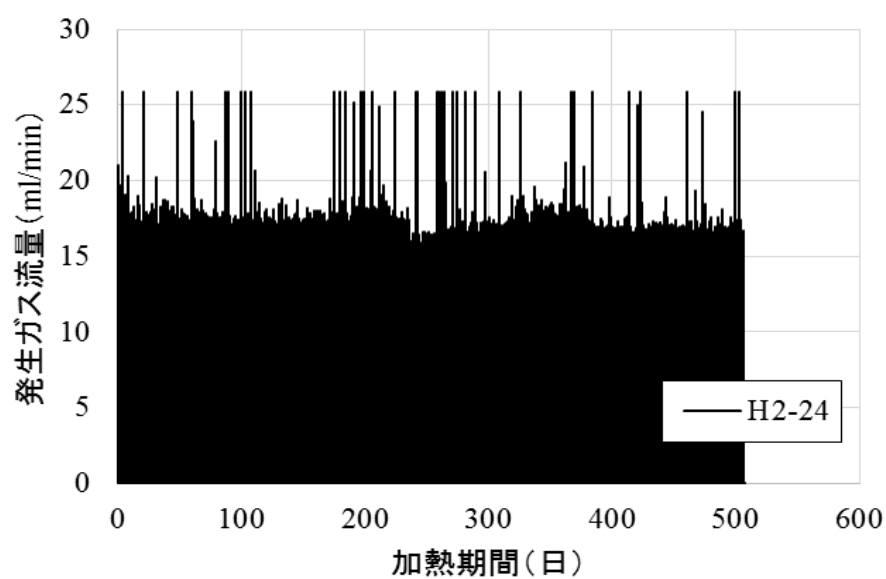


図 2.218 発生ガス流量の時間変化 (H2-24 : IFA-756)
(ヘリウムフラッシングによるガス流量変化)

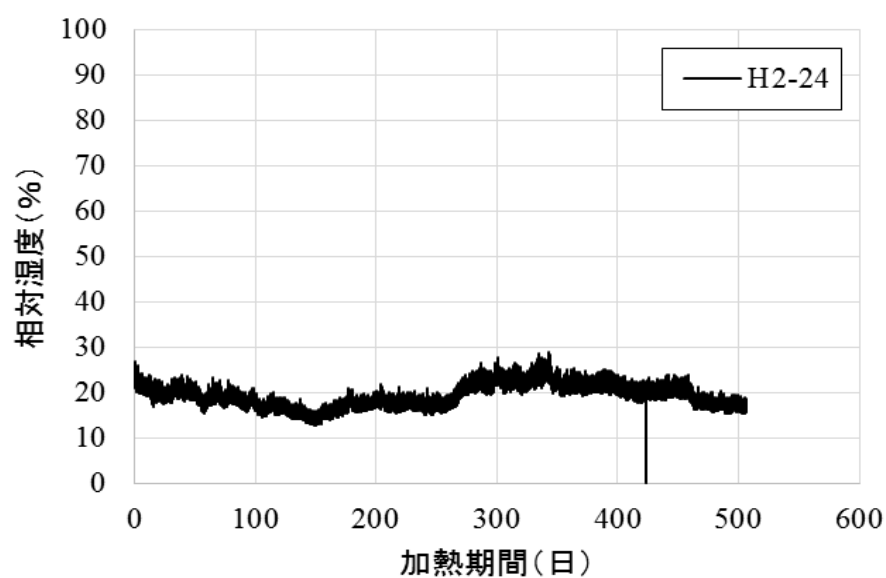


図 2.219 相対湿度の時間変化 (H2-24 : IFA-756)
(ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化)

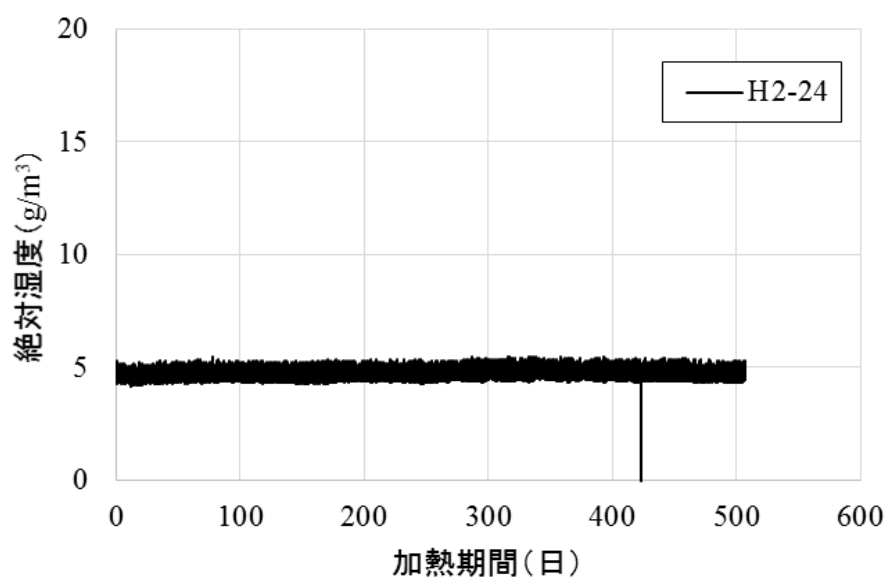


図 2.220 絶対湿度の時間変化 (H2-24 : IFA-756)
(ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化)

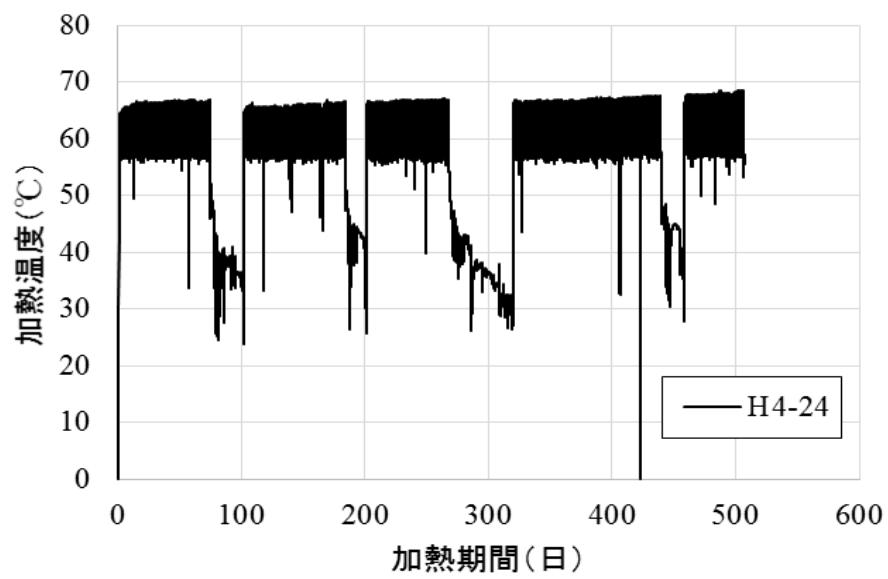


図 2. 221 コンクリート試験体の中心温度の時間変化 (H4-24 : IFA-754)
(PPT-E : IFA-750 断面内平均温度)

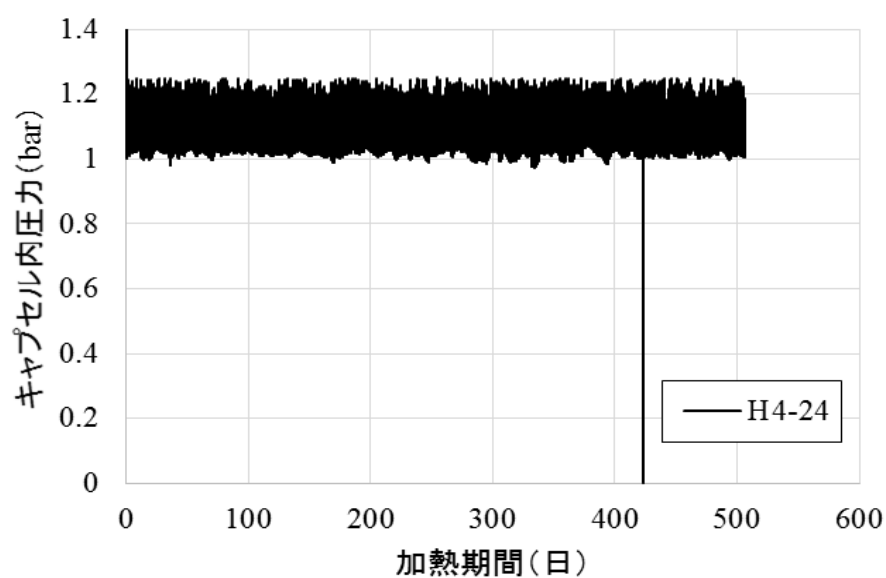


図 2.222 キャプセル内圧力の時間変化 (H4-24 : IFA-754)
(ヘリウムフラッシングによる圧力変化)

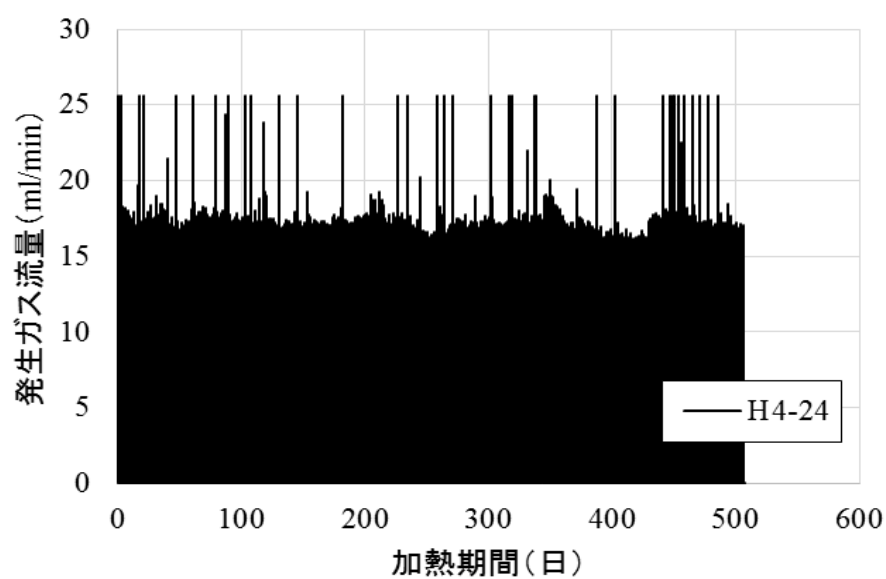


図 2.223 発生ガス流量の時間変化 (H4-24 : IFA-754)
(ヘリウムフラッシングによるガス流量変化)

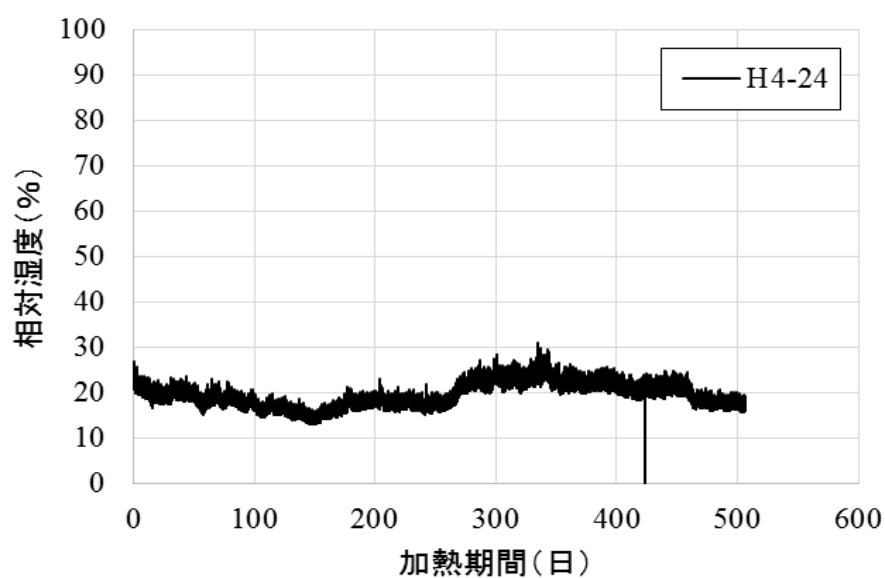


図 2.224 相対湿度の時間変化 (H4-24 : IFA-754)
(ヘリウムフラッシングによる相対湿度変化)

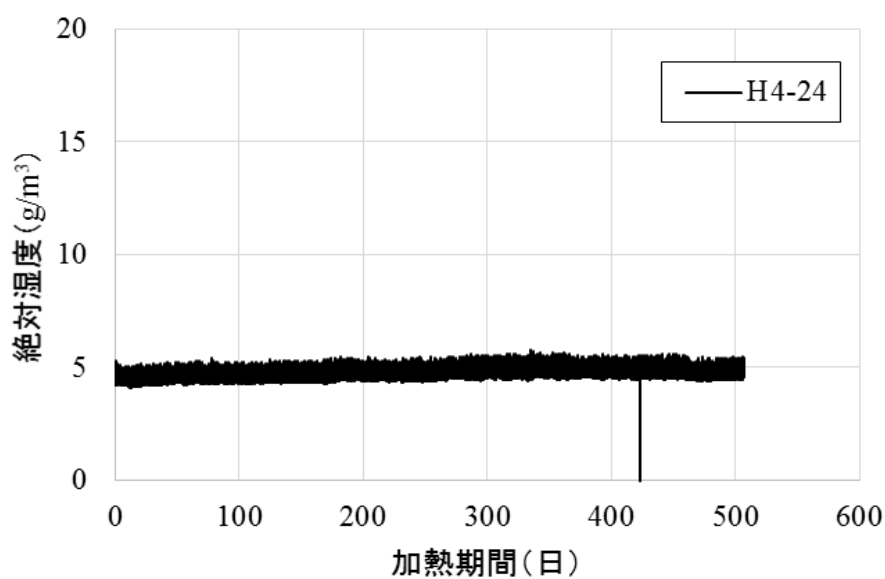


図 2.225 絶対湿度の時間変化 (H4-24 : IFA-754)
(ヘリウムフラッシングによる絶対湿度変化)

(3) 非照射・非加熱試験

照射期間中の 20℃封緘養生試験体の特性を把握するために、非照射・非加熱試験 (CT : Control test) を照射期間中の一定時期に 3 回に分けて実施した。

(4) 照射環境の定量評価

モニタリングワイヤの放射化程度から得られた中性子照射量とその他のモニタリングシステムから得られた照射条件に関する測定値を表 2.24 に示す。また、モニタリングワイヤによる高速中性子照射量の値とモンテカルロ法による放射線輸送計算コード MCNP で算定した 1 中性子あたり中性子フルエンスについて、各試験体の内最大となるものが一致するように中性子発生量を定め、規格化を行った結果について表 2.25 から表 2.28 に示す。なお、5) の照射後試験で用いる照射量については、表 2.25 から表 2.28 の照射量を用いた。

表 2. 24 中性子照射試験の照射結果（モニタリングワイヤとその他のモニタリングシステムによる測定値）

試験 ケース	容器 名	照 射 孔 位 置	照射 期間	中性子（E＞0. 1MeV）					中性子（E＜0. 625eV）				
				（全出 力換算 日数）	照射量 目標値 (n/cm ²)	照射量		中性子束 （平均值） (n/cm ² /s)	中性子 束比 —	照射量		中性子束 （平均值） (n/cm ² /s)	中性子 束比 —
						最小値～最大値 (n/cm ²)	平均值 (n/cm ²)			最小値～最大値 (n/cm ²)	平均值 (n/cm ²)		
IT-A1	IFA-758	#36	50. 32		1. 61E+19～1. 62E+19	1. 62E+19	3. 72E+12	1. 03	6. 00E+19～7. 20E+19	6. 83E+19	1. 57E+13	0. 98	
IT-A2	IFA-759	#36	60. 66		1. 75E+19～2. 00E+19	1. 90E+19	3. 63E+12	1. 01	7. 90E+19～8. 60E+19	8. 38E+19	1. 60E+13	1. 00	
IT-A3	IFA-760	#36	80. 83		2. 34E+19～2. 60E+19	2. 52E+19	3. 60E+12	1. 00	9. 60E+19～1. 12E+20	1. 06E+20	1. 52E+13	0. 95	
IT-A4	IFA-761	#36	56. 42		1. 83E+19～1. 88E+19	1. 85E+19	3. 80E+12	1. 05	7. 60E+19～8. 50E+19	8. 15E+19	1. 67E+13	1. 04	
PPT-B	IFA-753	#52	25. 19	7. 50E+18	7. 09E+18～8. 10E+18	7. 76E+18	3. 57E+12	0. 99	2. 80E+19～3. 40E+19	3. 20E+19	1. 47E+13	0. 92	
PPT-C	IFA-752	#36	45. 26	1. 50E+19	1. 27E+19～1. 48E+19	1. 41E+19	3. 61E+12	1. 00	5. 90E+19～7. 50E+19	6. 98E+19	1. 78E+13	1. 11	
PPT-D	IFA-751	#36	155. 59	3. 00E+19	4. 09E+19～4. 78E+19	4. 52E+19	3. 37E+12	0. 93	1. 92E+20～2. 41E+20	2. 24E+20	1. 67E+13	1. 04	
PPT-E	IFA-750	#52	299. 39	6. 00E+19	8. 17E+19～9. 62E+19	9. 11E+19	3. 52E+12	0. 98	3. 70E+20～4. 25E+20	4. 04E+20	1. 56E+13	0. 97	
平均値							3. 60E+12				1. 61E+13		

表 2.24 中性子照射試験の照射結果（モニタリングワイヤとその他のモニタリングシステムによる測定値）（つづき）

試験 ケース	容器名	照射 孔 位置	ガンマ線			ガンマ 発熱	温度	JEEP II 稼働 率 (計画停止 期間を除く)	水分条件
			照射量	線量率	線量率比		試験体中心		
			(kGy)	(kGy/h)	—		(℃)		
IT-A1	IFA-758	#36	4.80E+05	3.97E+02	1.10	0.11	72.5	0.769	75℃乾燥
IT-A2	IFA-759	#36	5.59E+05	3.84E+02	1.07	0.11	71.0	0.809	120℃乾燥
IT-A3	IFA-760	#36	7.23E+05	3.73E+02	1.03	0.11	75.0	0.776	封緘養生
IT-A4	IFA-761	#36	5.79E+05	4.27E+02	1.19	0.12	73.0	0.848	封緘養生
PPT-B	IFA-753	#52	1.99E+05	3.29E+02	0.91	0.09	71.0	0.855	封緘養生
PPT-C	IFA-752	#36	3.20E+05	2.95E+02	0.82	0.08	69.5	0.765	封緘養生
PPT-D	IFA-751	#36	1.15E+06	3.08E+02	0.86	0.09	70.0	0.789	封緘養生
PPT-E	IFA-750	#52	2.63E+06	3.67E+02	1.02	0.10	74.0	0.757	封緘養生
平均値				3.60E+02				0.796	

表 2.25 MCNP とモニタリングワイヤの結果から得られた各試験体の照射量 (PPT-B)

PPT-B						
軸レベル (mm)	説明	試験体名	中性子照射量 (n/cm ²)			
			高速中性子		熱中性子	
			E > 0.1 MeV		E < 0.625 eV	
			中央値	1 σ	中央値	1 σ
570	熱電対入りコンクリート試験体	C54	6.77E+18	2.67E+16	2.80E+19	4.27E+16
510	コンクリート試験体	B13	7.19E+18	2.77E+16	3.01E+19	4.44E+16
450	コンクリート試験体	C13	7.61E+18	2.85E+16	3.20E+19	4.57E+16
390	コンクリート試験体	B14	7.91E+18	2.90E+16	3.31E+19	4.65E+16
330	コンクリート試験体	C14	8.10E+18	2.94E+16	3.38E+19	4.67E+16
270	コンクリート試験体	B15	8.13E+18	2.95E+16	3.39E+19	4.71E+16
210	コンクリート試験体	C15	8.05E+18	2.93E+16	3.37E+19	4.68E+16
150	コンクリート試験体	B16	7.80E+18	2.88E+16	3.28E+19	4.63E+16
90	コンクリート試験体	C16	7.45E+18	2.82E+16	3.15E+19	4.54E+16
30	小型試験体 (骨材、セメントペースト)		7.01E+18	—	2.96E+19	—
平均値 (熱電対入りと小型試験体を除く 8 体)			7.78E+18	—	3.26E+19	—

表 2.26 MCNP とモニタリングワイヤの結果から得られた各試験体の照射量 (PPT-C)

PPT-C						
軸レベル (mm)	説明	試験体名	中性子照射量 (n/cm ²)			
			高速中性子		熱中性子	
			E > 0.1 MeV		E < 0.625 eV	
			中央値	1 σ	中央値	1 σ
570	熱電対入りコンクリート試験体	C53	1.23E+19	5.23E+16	5.51E+19	8.66E+16
510	コンクリート試験体	B05	1.31E+19	5.42E+16	5.96E+19	9.04E+16
450	コンクリート試験体	C05	1.38E+19	5.56E+16	6.31E+19	9.24E+16
390	コンクリート試験体	B06	1.44E+19	5.67E+16	6.54E+19	9.48E+16
330	コンクリート試験体	C06	1.47E+19	5.72E+16	6.67E+19	9.54E+16
270	コンクリート試験体	B07	1.48E+19	5.76E+16	6.72E+19	9.58E+16
210	コンクリート試験体	C07	1.46E+19	5.70E+16	6.62E+19	9.48E+16
150	コンクリート試験体	B08	1.42E+19	5.64E+16	6.47E+19	9.42E+16
90	コンクリート試験体	C08	1.36E+19	5.51E+16	6.23E+19	9.24E+16
30	小型試験体 (骨材、セメントペースト)		1.28E+19	—	5.85E+19	—
平均値 (熱電対入りと小型試験体を除く 8 体)			1.41E+19	—	6.44E+19	—

表 2.27 MCNP とモニタリングワイヤの結果から得られた各試験体の照射量 (PPT-D)

PPT-D						
軸レベル (mm)	説明	試験体名	中性子照射量 (n/cm ²)			
			高速中性子		熱中性子	
			E > 0.1 MeV		E < 0.625 eV	
			中央値	1 σ	中央値	1 σ
570	熱電対入りコンクリート試験体	B54	3.97E+19	1.69E+17	1.78E+20	2.81E+17
510	コンクリート試験体	B09	4.25E+19	1.75E+17	1.92E+20	2.92E+17
450	コンクリート試験体	C09	4.51E+19	1.80E+17	2.03E+20	2.99E+17
390	コンクリート試験体	B10	4.64E+19	1.83E+17	2.12E+20	3.06E+17
330	コンクリート試験体	C10	4.77E+19	1.86E+17	2.16E+20	3.07E+17
270	コンクリート試験体	B11	4.77E+19	1.85E+17	2.18E+20	3.11E+17
210	コンクリート試験体	C11	4.73E+19	1.85E+17	2.14E+20	3.06E+17
150	コンクリート試験体	B12	4.60E+19	1.82E+17	2.10E+20	3.05E+17
90	コンクリート試験体	C12	4.38E+19	1.77E+17	2.01E+20	2.97E+17
30	小型試験体 (骨材、セメントペースト)		4.12E+19	—	1.88E+20	—
平均値 (熱電対入りと小型試験体を除く 8 体)			4.58E+19		2.08E+20	—

表 2.28 MCNP とモニタリングワイヤの結果から得られた各試験体の照射 (PPT-E)

PPT-E						
軸レベル (mm)	説明	試験体名	中性子照射量 (n/cm ²)			
			高速中性子		熱中性子	
			E > 0.1 MeV		E < 0.625 eV	
			中央値	1 σ	中央値	1 σ
570	熱電対入りコンクリート試験体	B53	7.92E+19	3.16E+17	3.30E+20	5.05E+17
510	コンクリート試験体	B01	8.55E+19	3.28E+17	3.55E+20	5.24E+17
450	コンクリート試験体	C01	9.02E+19	3.38E+17	3.77E+20	5.39E+17
390	コンクリート試験体	B02	9.33E+19	3.43E+17	3.91E+20	5.50E+17
330	コンクリート試験体	C02	9.56E+19	3.48E+17	4.00E+20	5.54E+17
270	コンクリート試験体	B03	9.60E+19	3.48E+17	4.02E+20	5.58E+17
210	コンクリート試験体	C03	9.49E+19	3.46E+17	3.99E+20	5.53E+17
150	コンクリート試験体	B04	9.22E+19	3.41E+17	3.88E+20	5.49E+17
90	コンクリート試験体	C04	8.80E+19	3.32E+17	3.72E+20	5.37E+17
30	小型試験体 (骨材、セメントペースト)		8.25E+19	—	3.50E+20	—
平均値 (熱電対入りと小型試験体を除く 8 体)			9.20E+19	—	3.86E+20	—

(5) 照射後試験

表 2.29 から表 2.31 にコンクリート試験体のコントロール試験 C1、C2 および C3 の質量・寸法変化および強度・ヤング率を示す。

表 2.32 から表 2.37 にコンクリート試験体の加熱試験ケース H1-3 (IFA-757.1)、H3-3 (IFA-755.1)、H1-6 (IFA-757.2)、H1-12 (IFA-757.3)、H2-24 (IFA-756) および H4-24 (IFA-754) についての質量・寸法変化および強度・ヤング率を示す。

表 2.38 から表 2.41 にコンクリート試験体の照射試験ケース PPT-B (IFA-753)、PPT-C (IFA-752)、PPT-D (IFA-751) および PPT-E (IFA-750) についての質量・寸法変化および強度・ヤング率を示す。

表 2.42 にホワイトセメントペースト試験体の照射試験ケース PPT-B (IFA-753)、PPT-C (IFA-752)、PPT-D (IFA-751) および PPT-E (IFA-750) についての質量・寸法変化を示す。表 2.43 にホワイトセメントペースト試験体の非照射、照射試験ケース PPT-B (IFA-753)、PPT-C (IFA-752)、PPT-D (IFA-751) および PPT-E (IFA-750) についてのビッカース硬さを示す。

表 2.44 から表 2.51 に骨材試験体の照射試験ケース PPT-B (IFA-753)、PPT-C (IFA-752)、PPT-D (IFA-751) および PPT-E (IFA-750) についての質量・寸法変化を示す。照射試験後の測定結果が #N/A となっている試験体は、試験体 ID のマークが消

えて判別がつかなくなっている試験体である。なお、ケース PPT-C における G12 については、同一骨材の他の試験体と比べて、照射前後での変化の傾向が大きく異なったため、平均値の算出には含めていない。

図 2.226 から図 2.228 にコンクリート試験体のコントロール試験、加熱試験および照射試験での試験体の質量変化・長さ変化・直径変化を比較して示す。図 2.229 および図 2.230 にコンクリート試験体の圧縮強度・ヤング率の変化を比較して示す。

照射を行ったコンクリート試験体の質量・寸法変化および圧縮強度・ヤング率と照射量の関係について、個々の試験体の結果および骨材種ごとの平均値を図 2.231 および図 2.232 に示す。

非照射・加熱を行ったコンクリート試験体の質量・寸法変化および圧縮強度・ヤング率と加熱時間の関係について、個々の試験体の結果および骨材種ごとの平均値を図 2.233 および図 2.234 に示す。照射を行ったコンクリート試験体と非照射・加熱を行ったコンクリート試験体の質量・寸法変化および圧縮強度・ヤング率の比較を図 2.235 に示す。

照射試験の PIE 結果について述べる。PPT-B、PPT-C、PPT-D および PPT-E の平均高速中性子照射量は、 7.78×10^{18} 、 1.41×10^{19} 、 4.58×10^{19} 、および 9.20×10^{19} n/cm² であった。図 2.231 (a) に示されるように凝灰岩あるいは砂岩の骨材を用いたコンクリート試験体ともに質量変化は 3.5% の低下である。これは、すべての試験においてセメントペーストの乾燥状態を合わせるために物性試験前に 76 °C の乾燥を行ったからである。図 2.231 (b)、(c) では試験体の寸法変化を示す。直径方向の寸法変化は一部の試験体で表面に痘痕や析出があり適切に直径方向の変化が測定できなかったため、長さ方向の値を用いることとした。生成物量は試験体の質量と比較すると非常に少量であり、円柱供試体の端面では生成していないので質量変化と長さ変化については正確に計測できていると考えられる。照射量の増加に伴って長さおよび直径は増加し、高速中性子照射量 9.20×10^{19} n/cm² では凝灰岩を用いたコンクリート試験体の長さ変化は 2.5% を超えている。石英含有量の多い凝灰岩を用いたコンクリート試験体の膨張量は、石英含有量が半分程度の砂岩を用いたコンクリート試験体よりも大きかった。このことは、石英のメタミクト化がコンクリートの膨張と損傷を生じさせるという作業仮設と対応する。なお、PPT-E に対応する試験体では照射量と膨張量が逆相関を有している。これは、キャプセル破断の際に示したようにコンクリートがキャプセルに拘束されてコンクリートにコンパクションが生じたために生じたものと推察される。図 2.231 (c) ではコンクリートの圧縮強度と高速中性子照射量の関係を示す。ここに示されるように PPT-B、PPT-C、PPT-D では、照射量の増大とともに強度は低下する傾向が確認された。これは、図 2.231 (b) の結果や図 2.181 のひび割れと合わせて考えると、骨材の膨張に伴ってコンクリートが損傷して強度低下が生じたものと結論づけられる。PPT-E については、平均的に砂岩を用いたコンクリート試験体においては強

度低下が認められたが、凝灰岩を用いたコンクリート試験体では若干の強度増加が確認された。これは、先にも述べたようにコンパクションの影響であると推察される。すなわち、凝灰岩を用いたコンクリート試験体はより膨張したためにキャプセル内でより多くのコンパクションによる圧力を受け、その結果、セメントペースト部分が骨材とキャプセルからの圧力を受け、接着剤としてはたらくセメントペースト部分の圧密が強度の増大をもたらせたものと考えられる。また、本図から、同一のコンクリートであっても、同一の照射量であっても骨材の膨張量（コンクリートの膨張量から推察される）が異なれば強度低下が異なることを明らかにした。すなわち、コンクリートの強度低下は骨材の膨張によるものと同定した。なお、骨材自体の膨張も確認しており、その結果は後述する。また、中性子照射によって強度は非照射・非加熱のものに対して 50%程度になることを確認した。図 2. 231 (d) にヤング率と高速中性子照射量の関係を示す。ここに示されるように照射量の増加に伴ってヤング率は低下する。ただし、PPT-E については、PPT-D に対して若干のヤング率の増大が確認された。この傾向についてもセメントペーストのコンパクションによって説明できると考えられる。また、ヤング率の低減は著しく、非加熱・非照射のものに対して 30%程度になりうること、また骨材種によってその損傷とヤング率の低減量は異なることを確認した。

加熱試験の PIE 結果について述べる。図 2. 233 および図 2. 234 に HT 試験の結果を示しているが、ここでの横軸は加熱期間ではなく、キャプセル内の試験体のポジションに対応した照射試験での相当高速照射量の形で結果を示した。図 2. 233 (b) に示される長さ変化に示されるように試験体は若干の収縮が示された。これは通常の乾燥収縮ひずみの範囲である。図 2. 233 (d) に圧縮強度比の結果を示す。加熱によりコンクリートは若干の強度低下を示す。特に砂岩を用いたコンクリート試験体では 85%程度まで強度低下が生じており、凝灰岩を用いたコンクリート試験体では 90%程度となった。図 2. 233 (e) にヤング率の結果を示す。ここに示されるようにヤング率は、PPT-B 相当の乾燥期間でもっともヤング率の低下が生じ、その後若干の回復を示した。

図 2. 236 に照射を行ったホワイトセメントペースト試験体の質量・寸法変化およびビッカース硬さと照射量との関係を示す。PPT-B、PPT-C、PPT-D および PPT-E の平均高速中性子照射量は、 0.70×10^{19} 、 1.28×10^{19} 、 4.12×10^{19} 、および 8.25×10^{19} n/cm² であった。質量は PPT-B は、質量増が確認されている。これは、キャプセル内が結露によって下部が浸水していたこと、その後の 76℃乾燥時に治具ごと乾燥させているため、乾燥が十分でないことに起因する。PPT-C と PPT-D はキャプセル内の結露がなくなり乾燥が進行したために、質量減となっているが、PPT-E では再び質量増となっている。これは、キャプセル破断にともなう浸水の影響である。初期のキャプセル下部の浸水とそれによる溶解析出反応によって試験体の周囲には析出物が確認された（図 2. 237）。このため、直径方向のデータは信頼性に劣る。一方、高さ方向については析出物が確認されていないため、信頼性が高い。高さ変化で見ると材齢初期に吸水

の影響で PPT-B において膨潤挙動が認められるが乾燥にともなう PPT-C と PPT-D では収縮が確認されている。PPT-E の膨潤は、キャプセル破断の影響である。セメントペーストは、含水率が高い場合には C-S-H 等の水和物は空隙中の細孔溶液と溶解平衡にあるため、中性子照射による結晶構造のダメージは蓄積されない。その上、乾燥後であってもポルトランダイトなどのイオン結合性の結晶構造は照射に強く、C-S-H の CaO レイヤーも同じくイオン結合性であるために、耐性が高いと考えられた。ビッカース硬さ試験の結果にみられるように、セメントペーストの強度は照射に伴って増大している。このことからセメントペーストは中性子照射に高い耐性を有していると考えられた。これは、図 2. 238 の XRD 結果が示す通り、ピークがほとんど変化していないことから裏付けられる。XRD 結果に基づき評価した相組成では、セメントペースト中に炭酸カルシウムが存在しており、この多形の割合が変化していた。

図 2. 239 に照射を行った骨材試験体の寸法変化と照射量との関係を示す。骨材試験体の照射量は、ホワイトセメントペーストと同一であるため、PPT-B、PPT-C、PPT-D および PPT-E の平均高速中性子照射量は、 0.70×10^{19} 、 1.28×10^{19} 、 4.12×10^{19} 、および 8.25×10^{19} n/cm² であった。質量変化であるが、いずれの場合も若干の質量増となった。特に骨材 F の質量増は大きい。この結果は、骨材 A の中にメタミクト化した石英の多くがシリカゲル化し、水分を吸収した可能性を示唆するものである。同様に、直径および高さ変化においても骨材 A はもっとも膨張する傾向を示した。これは石英が最も中性子の照射耐性が低くメタミクト化して体積膨張しやすいことを示唆している。試験体の周方向には結露による水分で生じた析出物があるが（図 2. 240）、PPT-E における膨張量への影響は比較的小さく、等方的な膨張が確認された。一方、石英を有しておらず、イオン結合性の結晶構造を有する石灰岩（骨材 K）はほとんど膨張しなかった。図 2. 241 に XRD の結果を示す。石英含有量が 90% 以上で、最も膨張している骨材 F の結果を見ると、照射にともなうピークが小さくなるとともに、ピーク位置が小角側にシフトする。小角側へのシフトは構造の周期が大きくなっていることを示しており、原子間隔が大きくなることを示している。また、ピークの減少は、単位質量あたりの周期的な構造の数が少なくなることを意味しており、メタミクト化により構造が壊れていることを意味している。すなわち、中性子照射により骨材の周期性構造が壊れ、メタミクト化し、膨張した。なお、残っているピークは XRD 用に標準物質として混ぜた Si のピークである。骨材 F 以外の XRD 結果を見ても照射量が増えるとともにピークは減少しており、メタミクト化が進んでいることがわかる。石英を有しておらず、イオン結合性の結晶構造を有する石灰岩（骨材 K）はほとんどピークの変化が見られず、中性子照射に高い耐性を有していると考えられた。

表 2.29 コンクリート試験体のコントロール試験 C1 の質量・寸法変化および強度・ヤング率

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
C1	砂岩 砂利	B44	181.228	180.720	-0.508	-0.28	59.510	59.504	-0.006	-0.01	40.277	40.269	-0.008	-0.02	70.4	40.5
		B45	182.426	181.920	-0.506	-0.28	59.742	59.725	-0.017	-0.03	40.239	40.232	-0.007	-0.02	70.7	33.1
		B46	184.235	183.735	-0.500	-0.27	59.906	59.888	-0.018	-0.03	40.288	40.284	-0.004	-0.01	62.7	35.0
		平均				-0.28				-0.02				-0.02	67.9	36.2
	凝灰岩 碎石	C44	180.879	180.404	-0.475	-0.26	59.609	59.613	0.004	0.01	40.207	40.204	-0.003	-0.01	73.8	43.1
		C45	184.414	183.935	-0.479	-0.26	59.731	59.737	0.006	0.01	40.226	40.221	-0.005	-0.01	71.9	39.3
		C46	179.560	178.957	-0.603	-0.34	59.323	59.325	0.002	0.00	40.248	40.244	-0.004	-0.01	64.7	41.8
		平均				-0.29				0.01				-0.01	70.1	41.4

表 2.30 コンクリート試験体のコントロール試験 C2 の質量・寸法変化および強度・ヤング率

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
C2	砂岩 砂利	B47	182.026	181.260	-0.766	-0.42	59.129	59.128	-0.001	0.00	40.306	40.312	0.006	0.01	55.0	36.0
		B48	182.602	181.809	-0.793	-0.43	59.711	59.700	-0.011	-0.02	40.190	40.191	0.001	0.00	74.7	34.5
		B49	182.393	181.606	-0.787	-0.43	59.670	59.652	-0.018	-0.03	40.305	40.303	-0.002	0.00	58.3	35.0
		平均				-0.43				-0.02				0.00	62.7	35.2
	凝灰岩 碎石	C47	182.577	181.822	-0.755	-0.41	59.169	59.173	0.004	0.01	40.256	40.294	0.038	0.09	51.4	33.2
		C48	181.817	181.064	-0.753	-0.41	59.635	59.609	-0.026	-0.04	40.242	40.249	0.007	0.02	67.9	33.7
		C49	182.076	181.365	-0.711	-0.39	59.387	59.382	-0.005	-0.01	40.245	40.252	0.007	0.02	77.2	32.5
		平均				-0.41				-0.02				0.04	65.5	33.1

表 2.31 コンクリート試験体のコントロール試験 C3 の質量・寸法変化および強度・ヤング率

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
C3	砂岩 砂利	B50	181.704	180.535	-1.169	-0.64	59.446	59.433	-0.013	-0.02	40.283	40.271	-0.012	-0.03	65.4	34.7
		B51	182.988	181.889	-1.099	-0.60	59.628	59.618	-0.010	-0.02	40.238	40.229	-0.009	-0.02	68.5	33.8
		B52	183.112	182.042	-1.070	-0.58	59.684	59.654	-0.030	-0.05	40.267	40.255	-0.012	-0.03	65.7	33.4
		平均				-0.61				-0.03				-0.03	66.5	34.0
	凝灰岩 碎石	C50	183.154	182.049	-1.105	-0.60	59.870	59.845	-0.025	-0.04	40.265	40.253	-0.012	-0.03	71.8	38.7
		C51	181.989	180.810	-1.179	-0.65	59.828	59.814	-0.014	-0.02	40.244	40.231	-0.013	-0.03	67.5	35.9
		C52	183.650	182.627	-1.023	-0.56	59.371	59.351	-0.020	-0.03	40.304	40.307	0.003	0.01	72.3	36.4
		平均				-0.60				-0.03				-0.02	70.5	37.0

表 2.32 コンクリート試験体の加熱試験ケース H1-3 (IFA-757.1) の質量・寸法変化および強度・ヤング率

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
H1-3	砂岩 砂利	B29	181.318	174.684	-6.634	-3.66	59.355	59.321	-0.034	-0.06	40.270	40.239	-0.031	-0.08	62.6	26.8
		B30	183.518	177.254	-6.264	-3.41	59.951	59.921	-0.030	-0.05	40.222	40.196	-0.026	-0.06	61.6	22.5
		B31	183.104	176.448	-6.656	-3.64	59.680	59.650	-0.030	-0.05	40.312	40.288	-0.024	-0.06	68.8	25.8
		B32	181.800	175.356	-6.444	-3.54	59.294	59.243	-0.051	-0.09	40.281	40.274	-0.007	-0.02	68.8	29.5
		平均				-3.56				-0.06				-0.05	65.5	26.2
	凝灰岩 碎石	C29	181.066	174.388	-6.678	-3.69	59.392	59.363	-0.029	-0.05	40.232	40.216	-0.016	-0.04	72.4	27.1
		C30	183.351	176.712	-6.639	-3.62	59.561	59.533	-0.028	-0.05	40.313	40.293	-0.020	-0.05	80.2	27.2
		C31	182.371	175.797	-6.574	-3.60	59.701	59.662	-0.039	-0.07	40.241	40.216	-0.025	-0.06	66.0	27.1
		C32	184.270	177.921	-6.349	-3.45	59.615	59.603	-0.012	-0.02	40.276	40.273	-0.003	-0.01	72.1	26.8
		平均				-3.59				-0.05				-0.04	72.7	27.1

表 2.33 コンクリート試験体の加熱試験ケース H3-3 (IFA-755.1) の質量・寸法変化および強度・ヤング率

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
H3-3	砂岩 砂利	B37	183.381	176.797	-6.584	-3.59	59.913	59.873	-0.040	-0.07	40.248	40.218	-0.030	-0.07	68.8	23.0
		B38	182.537	175.724	-6.813	-3.73	59.908	59.869	-0.039	-0.07	40.235	40.207	-0.028	-0.07	59.6	28.0
		B39	181.467	175.034	-6.433	-3.54	59.286	59.239	-0.047	-0.08	40.267	40.237	-0.030	-0.07	64.3	25.8
		B40	183.292	176.769	-6.523	-3.56	59.734	59.695	-0.039	-0.07	40.253	40.229	-0.024	-0.06	66.2	26.1
		平均				-3.61				-0.07				-0.07	64.7	25.7
	凝灰岩 碎石	C37	181.637	175.216	-6.421	-3.54	58.935	58.908	-0.027	-0.05	40.244	40.228	-0.016	-0.04	73.7	31.6
		C38	183.517	176.907	-6.610	-3.60	59.675	59.643	-0.032	-0.05	40.224	40.201	-0.023	-0.06	65.6	24.5
		C39	183.867	177.531	-6.336	-3.45	59.428	59.394	-0.034	-0.06	40.259	40.238	-0.021	-0.05	72.2	28.6
		C40	181.599	175.262	-6.337	-3.49	59.363	59.350	-0.013	-0.02	40.241	40.217	-0.024	-0.06	65.4	26.8
		平均				-3.52				-0.04				-0.05	69.2	27.9

表 2.34 コンクリート試験体の加熱試験ケース H1-6 (IFA-757.2) の質量・寸法変化および強度・ヤング率

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
H1-6	砂岩 砂利	B21	183.755	176.954	-6.801	-3.70	59.875	59.841	-0.034	-0.06	40.262	40.221	-0.041	-0.10	65.8	28.5
		B22	181.215	174.046	-7.169	-3.96	59.469	59.451	-0.018	-0.03	40.302	40.269	-0.033	-0.08	67.4	27.5
		B23	182.864	175.917	-6.947	-3.80	59.593	59.562	-0.031	-0.05	40.289	40.238	-0.051	-0.13	65.8	28.4
		B24	182.520	175.314	-7.206	-3.95	59.808	59.763	-0.045	-0.08	40.315	40.234	-0.081	-0.20	67.1	24.8
		平均				-3.85				-0.05				-0.13	66.5	27.3
	凝灰岩 碎石	C21	183.899	177.308	-6.591	-3.58	59.658	59.640	-0.018	-0.03	40.252	40.221	-0.031	-0.08	67.3	27.0
		C22	181.915	174.986	-6.929	-3.81	59.423	59.413	-0.010	-0.02	40.332	40.284	-0.048	-0.12	70.4	27.8
		C23	182.961	176.782	-6.179	-3.38	59.029	59.022	-0.007	-0.01	40.247	40.215	-0.032	-0.08	69.3	23.9
		C24	181.269	174.343	-6.926	-3.82	59.434	59.434	0.000	0.00	40.282	40.251	-0.031	-0.08	76.3	24.9
		平均				-3.65				-0.01				-0.09	70.8	25.9

表 2.35 コンクリート試験体の加熱試験ケース H1-12 (IFA-757.3) の質量・寸法変化および強度・ヤング率

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
H1-12	砂岩 砂利	B25	183.287	176.460	-6.827	-3.72	59.674	59.632	-0.042	-0.07	40.306	40.274	-0.032	-0.08	59.0	32.7
		B26	182.744	175.560	-7.184	-3.93	59.837	59.816	-0.021	-0.04	40.271	40.231	-0.040	-0.10	58.3	30.8
		B27	182.388	175.474	-6.914	-3.79	59.534	59.502	-0.032	-0.05	40.247	40.216	-0.031	-0.08	64.6	33.1
		B28	182.274	175.433	-6.841	-3.75	59.488	59.498	0.010	0.02	40.244	40.219	-0.025	-0.06	56.2	27.8
		平均				-3.80				-0.04				-0.08	59.5	31.1
	凝灰岩 碎石	C25	183.416	176.678	-6.738	-3.67	59.719	59.713	-0.006	-0.01	40.218	40.192	-0.026	-0.06	62.3	31.5
		C26	183.112	176.486	-6.626	-3.62	59.564	59.524	-0.040	-0.07	40.242	40.224	-0.018	-0.04	67.4	33.3
		C27	182.467	175.566	-6.901	-3.78	59.674	59.666	-0.008	-0.01	40.238	40.205	-0.033	-0.08	62.2	29.3
		C28	183.725	177.074	-6.651	-3.62	59.644	59.631	-0.013	-0.02	40.274	40.261	-0.013	-0.03	60.6	27.9
		平均				-3.67				-0.03				-0.06	63.1	30.5

表 2.36 コンクリート試験体の加熱試験ケース H2-24 (IFA-756) の質量・寸法変化および強度・ヤング率

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
H2-24	砂岩 砂利	B17	183.545	176.233	-7.312	-3.98	59.805	59.772	-0.033	-0.06	40.232	40.203	-0.029	-0.07	62.1	29.8
		B18	181.406	174.193	-7.213	-3.98	59.065	58.998	-0.067	-0.11	40.295	40.262	-0.033	-0.08	59.9	31.5
		B19	182.454	175.032	-7.422	-4.07	59.579	59.556	-0.023	-0.04	40.312	40.271	-0.041	-0.10	53.3	26.7
		B20	183.266	176.174	-7.092	-3.87	59.832	59.804	-0.028	-0.05	40.241	40.212	-0.029	-0.07	50.1	22.7
		平均				-3.97				-0.06				-0.08	56.4	27.7
	凝灰岩 碎石	C17	184.806	178.327	-6.479	-3.51	59.596	59.563	-0.033	-0.06	40.318	40.300	-0.018	-0.04	62.7	31.7
		C18	179.526	172.291	-7.235	-4.03	58.928	58.903	-0.025	-0.04	40.225	40.192	-0.033	-0.08	63.4	29.5
		C19	182.025	175.280	-6.745	-3.71	59.259	59.227	-0.032	-0.05	40.236	40.202	-0.034	-0.08	64.6	29.1
		C20	180.640	173.538	-7.102	-3.93	59.152	59.159	0.007	0.01	40.214	40.199	-0.015	-0.04	63.6	27.5
		平均				-3.79				-0.03				-0.06	63.6	29.5

表 2.37 コンクリート試験体の加熱試験ケース H4-24 (IFA-754) の質量・寸法変化および強度・ヤング率

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
H4-24	砂岩 砂利	B33	184.592	177.638	-6.954	-3.77	59.755	59.707	-0.048	-0.08	40.313	40.281	-0.032	-0.08	61.3	33.0
		B34	182.998	175.931	-7.067	-3.86	59.791	59.745	-0.046	-0.08	40.232	40.204	-0.028	-0.07	58.7	27.2
		B35	183.503	176.517	-6.986	-3.81	59.604	59.538	-0.066	-0.11	40.272	40.234	-0.038	-0.09	55.1	27.5
		B36	182.752	175.894	-6.858	-3.75	59.408	59.358	-0.050	-0.08	40.239	40.199	-0.040	-0.10	56.0	25.8
		平均				-3.80				-0.09				-0.09	57.8	28.4
	凝灰岩 碎石	C33	183.330	176.580	-6.750	-3.68	59.679	59.659	-0.020	-0.03	40.236	40.209	-0.027	-0.07	65.1	34.4
		C34	183.459	176.372	-7.087	-3.86	59.795	59.755	-0.040	-0.07	40.213	40.180	-0.033	-0.08	65.1	32.7
		C35	182.305	175.170	-7.135	-3.91	59.478	59.450	-0.028	-0.05	40.256	40.248	-0.008	-0.02	66.8	29.0
		C36	184.202	177.126	-7.076	-3.84	59.793	59.766	-0.027	-0.05	40.288	40.254	-0.034	-0.08	64.1	30.6
		平均				-3.83				-0.05				-0.06	65.3	31.7

表 2.38 コンクリート試験体の照射試験ケース PPT-B (IFA-753) の質量・寸法変化および強度・ヤング率

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
PPT-B	砂岩 砂利	B13	182.514	176.399	-6.115	-3.35	59.626	59.571	-0.055	-0.09	40.286	40.340	0.054	0.13	64.2	28.5
		B14	181.033	174.391	-6.642	-3.67	59.910	59.831	-0.079	-0.13	40.268	40.337	0.069	0.17	66.6	26.7
		B15	182.707	176.252	-6.455	-3.53	59.965	59.878	-0.087	-0.15	40.224	40.274	0.050	0.12	66.6	31.7
		B16	183.290	177.127	-6.163	-3.36	59.960	59.982	0.022	0.04	40.288	40.370	0.082	0.20	56.9	23.8
		平均				-3.48				-0.08				0.16	63.6	27.7
	凝灰岩 碎石	C13	182.116	176.157	-5.959	-3.27	59.237	59.305	0.068	0.11	40.252	40.314	0.062	0.15	60.7	22.6
		C14	183.419	177.291	-6.128	-3.34	59.664	59.677	0.013	0.02	40.302	40.420	0.118	0.29	68.5	22.8
		C15	180.420	174.261	-6.159	-3.41	59.038	59.093	0.055	0.09	40.243	40.393	0.150	0.37	70.0	21.9
		C16	183.895	177.920	-5.975	-3.25	59.586	59.648	0.062	0.10	40.302	40.419	0.117	0.29	61.3	22.5
		平均				-3.32				0.08				0.28	65.1	22.5

表 2.39 コンクリート試験体の照射試験ケース PPT-C (IFA-752) の質量・寸法変化および強度・ヤング率

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
PPT-C	砂岩 砂利	B05	182.508	175.942	-6.566	-3.60	59.677	59.753	0.076	0.13	40.198	40.211	0.013	0.03	60.9	25.4
		B06	180.492	173.362	-7.130	-3.95	59.318	59.405	0.087	0.15	40.248	40.250	0.002	0.00	66.5	28.3
		B07	181.520	174.503	-7.017	-3.87	59.321	59.423	0.102	0.17	40.301	40.297	-0.004	-0.01	64.5	22.1
		B08	182.753	175.950	-6.803	-3.72	59.792	59.869	0.077	0.13	40.284	40.301	0.017	0.04	54.2	28.2
		平均				-3.78				0.14				0.02	61.5	26.0
	凝灰岩 碎石	C05	183.031	176.875	-6.156	-3.36	59.532	59.613	0.081	0.14	40.247	40.293	0.046	0.11	62.1	19.1
		C06	182.050	175.768	-6.282	-3.45	59.305	59.393	0.088	0.15	40.220	40.264	0.044	0.11	56.3	20.9
		C07	182.793	176.494	-6.299	-3.45	59.148	59.233	0.085	0.14	40.256	40.307	0.051	0.13	67.1	21.7
		C08	182.382	175.932	-6.450	-3.54	59.175	59.290	0.115	0.19	40.263	40.343	0.080	0.20	62.7	19.9
		平均				-3.45				0.16				0.14	62.1	20.4

表 2.40 コンクリート試験体の照射試験ケース PPT-D (IFA-751) の質量・寸法変化および強度・ヤング率

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
PPT-D	砂岩 砂利	B09	182.326	175.641	-6.685	-3.67	59.565	59.852	0.287	0.48	40.272	40.433	0.161	0.40	49.8	16.5
		B10	184.118	177.686	-6.432	-3.49	59.855	60.217	0.362	0.60	40.241	40.521	0.280	0.70	41.5	13.7
		B11	184.485	177.642	-6.843	-3.71	59.943	60.276	0.333	0.56	40.286	40.567	0.281	0.70	45.6	14.8
		B12	183.069	176.259	-6.810	-3.72	59.846	60.218	0.372	0.62	40.241	40.477	0.236	0.59	45.4	15.3
		平均				-3.65				0.57				0.59	45.6	15.1
	凝灰岩 碎石	C09	183.999	177.813	-6.186	-3.36	59.405	59.987	0.582	0.98	40.349	40.675	0.326	0.81	39.9	10.0
		C10	183.569	177.360	-6.209	-3.38	59.613	60.223	0.610	1.02	40.274	40.702	0.428	1.06	35.5	10.2
		C11	182.037	175.497	-6.540	-3.59	59.496	60.074	0.578	0.97	40.250	40.665	0.415	1.03	39.6	10.3
		C12	183.633	177.554	-6.079	-3.31	59.413	60.009	0.596	1.00	40.316	40.714	0.398	0.99	38.6	11.1
		平均				-3.41				0.99				0.97	38.4	10.4

表 2.41 コンクリート試験体の照射試験ケース PPT-E (IFA-750) の質量・寸法変化および強度・ヤング率

試験 ケース	骨材	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	長さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング 係数 (GPa)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化			
PPT-E	砂岩 砂利	B01	183.779	177.955	-5.824	-3.17	59.793	60.941	1.148	1.92	40.270	41.081	0.811	2.01	32.4	11.3
		B02	183.472	177.377	-6.095	-3.32	59.655	60.831	1.176	1.97	40.343	41.256	0.913	2.26	43.8	15.2
		B03	183.268	177.515	-5.753	-3.14	59.784	60.815	1.031	1.72	40.251	41.176	0.925	2.30	39.2	19.3
		B04	181.672	175.768	-5.904	-3.25	59.743	60.785	1.042	1.74	40.278	41.166	0.888	2.20	52.0	16.0
		平均				-3.22				1.84				2.19	41.9	15.5
	凝灰岩 碎石	C01	183.450	177.984	-5.466	-2.98	59.496	61.162	1.666	2.80	40.263	41.470	1.207	3.00	34.7	13.1
		C02	182.193	176.590	-5.603	-3.08	59.483	61.018	1.535	2.58	40.226	41.426	1.200	2.98	43.7	17.5
		C03	181.596	175.418	-6.178	-3.40	59.594	61.066	1.472	2.47	40.225	41.362	1.137	2.83	48.8	15.8
		C04	182.337	176.855	-5.482	-3.01	59.449	61.055	1.606	2.70	40.221	41.274	1.053	2.62	42.1	17.8
		平均				-3.12				2.64				2.86	42.3	16.1

表 2.42 ホワイトセメントペースト試験体の照射試験ケース PPT-B (IFA-753) および PPT-C (IFA-752) の質量・寸法変化

試験 ケース	試験体 ID	質量変化(g)			変化率 (%)	高さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)
		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-B	D19	1.579	1.671	0.092	5.83	9.670	9.602	-0.068	-0.71	11.721	11.632	-0.089	-0.76
	D20	1.582	1.671	0.089	5.61	9.633	-	-	-	11.673	-	-	-
	D21	1.594	1.639	0.045	2.84	9.879	9.808	-0.071	-0.72	11.591	11.547	-0.044	-0.38
	D22	1.590	1.594	0.004	0.28	9.847	-	-	-	11.598	-	-	-
	D23	1.562	1.619	0.057	3.64	9.499	-	-	-	11.713	-	-	-
	D24	1.528	1.553	0.025	1.66	9.411	9.383	-0.028	-0.30	11.678	11.665	-0.013	-0.11
	平均				3.31				-0.58				-0.42
PPT-C	D07	1.655	1.658	0.003	0.21	9.781	9.780	-0.001	-0.01	11.730	11.754	0.024	0.20
	D08	1.508	1.530	0.022	1.45	9.924	-	-	-	11.264	-	-	-
	D09	1.619	1.590	-0.029	-1.77	9.742	9.712	-0.030	-0.31	11.655	11.747	0.092	0.79
	D10	1.619	1.573	-0.046	-2.85	9.751	-	-	-	11.717	-	-	-
	D11	1.615	1.625	0.010	0.60	9.807	9.757	-0.050	-0.51	11.660	11.764	0.104	0.89
	D12	1.567	1.565	-0.002	-0.13	9.753	-	-	-	11.651	-	-	-
	平均				-0.42				-0.28				0.63
PPT-D	D13	1.554	1.578	0.024	1.53	9.778	9.757	-0.021	-0.22	11.437	11.407	-0.030	-0.26
	D14	1.568	1.588	0.020	1.29	9.849	9.812	-0.037	-0.37	11.553	11.542	-0.011	-0.10
	D15	1.612	1.634	0.022	1.36	9.619	9.593	-0.026	-0.27	11.693	11.695	0.002	0.02
	D16	1.597	1.629	0.032	2.01	9.832	9.819	-0.013	-0.14	11.613	11.782	0.169	1.45
	D17	1.602	1.606	0.004	0.27	9.703	9.686	-0.017	-0.17	11.716	11.790	0.074	0.64
	D18	1.552	1.531	-0.021	-1.36	9.385	9.407	0.022	0.23	11.703	11.730	0.027	0.23
	平均				0.85				-0.16				0.33
PPT-E	D01	1.642	1.719	0.077	4.69	9.847	9.910	0.063	0.64	11.703	11.835	0.132	1.12
	D02	1.558	1.655	0.097	6.20	9.700	9.740	0.040	0.42	11.608	11.825	0.217	1.87
	D03	1.629	1.708	0.079	4.82	9.819	9.905	0.086	0.87	11.639	11.809	0.170	1.46
	D04	1.547	1.609	0.062	4.00	9.863	9.926	0.063	0.64	11.382	11.558	0.176	1.55
	D05	1.621	1.724	0.103	6.35	9.909	10.002	0.093	0.93	11.629	11.784	0.155	1.33
	D06	1.507	1.617	0.110	7.27	9.295	9.361	0.066	0.71	11.629	11.699	0.069	0.60
	平均				5.55				0.70				1.32

表 2.43 ホワイトセメントペースト試験体のビッカース硬さ

非照射 (D50)		PPT-B (D19)		PPT-C (D07)		PPT-D (D13)		PPT-E (D01)	
測定 No.	ビッカース 硬さ	測定 No.	ビッカース 硬さ	測定 No.	ビッカース 硬さ	測定 No.	ビッカース 硬さ	測定 No.	ビッカース 硬さ
01	23	01	21	01	27	01	30	01	32
02	22	02	29	02	25	02	33	02	40
03	22	03	22	03	21	03	37	03	36
04	23	04	24	04	25	04	30	04	—
05	24	05	24	05	23	05	26	05	35
06	25	06	26	06	27	06	26	06	35
07	25	07	29	07	24	07	29	07	41
08	26	08	23	08	25	08	28	08	33
09	23	09	24	09	25	09	31	09	36
10	26	10	28	10	30	10	32	10	37
11	23	11	25	11	25	11	29	11	34
12	24	12	25	12	22	12	32	12	32
13	23	13	20	13	26	13	30	13	33
14	22	14	27	14	25	14	28	14	32
15	24	15	22	15	24	15	24	15	32
平均	23.7	平均	24.6	平均	24.9	平均	29.7	平均	34.9

表 2.44 骨材試験体の照射試験ケース PPT-B (IFA-753) の寸法変化 (1/2)

試験 ケース	試験体 ID		質量変化(g)			変化率 (%)	高さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-B	E	19	1.802	1.804	0.002	0.14	9.463	9.471	0.008	0.08	9.765	9.775	0.010	0.10
		20	2.015	2.016	0.001	0.03	9.986	9.993	0.007	0.07	9.891	9.900	0.009	0.09
		21	2.025	2.025	0.000	0.00	9.965	9.968	0.003	0.03	9.834	9.845	0.011	0.12
		22	1.923	1.922	-0.001	-0.05	9.766	9.773	0.007	0.08	9.913	9.953	0.040	0.41
		23	1.947	1.948	0.001	0.06	9.669	9.679	0.010	0.10	9.844	9.855	0.011	0.11
		24	2.010	2.013	0.003	0.13	9.962	-	-	-	9.837	-	-	-
	平均					0.05				0.07				0.16
	F	19	1.946	1.954	0.008	0.39	9.766	9.787	0.021	0.22	9.852	9.871	0.019	0.19
		20	1.973	1.975	0.002	0.08	9.839	9.853	0.014	0.14	9.852	9.872	0.020	0.21
		21	1.929	1.930	0.001	0.03	9.739	9.753	0.014	0.14	9.773	9.772	-0.001	-0.01
		22	1.957	1.960	0.003	0.15	9.990	10.008	0.018	0.18	9.681	9.711	0.030	0.31
		23	1.882	1.883	0.001	0.07	9.773	9.786	0.013	0.13	9.671	9.685	0.014	0.14
		24	1.950	1.955	0.005	0.27	9.937	9.966	0.029	0.29	9.690	9.712	0.022	0.22
	平均					0.17				0.18				0.18
	G	19	2.001	2.008	0.006	0.32	9.859	9.868	0.009	0.10	9.951	9.961	0.010	0.10
		20	1.955	1.958	0.003	0.16	9.912	9.919	0.007	0.07	9.817	9.818	0.001	0.01
		21	2.011	2.013	0.002	0.08	9.930	9.933	0.003	0.03	9.940	9.960	0.020	0.20
		22	1.950	1.950	0.000	0.01	9.809	9.804	-0.005	-0.05	9.872	9.886	0.014	0.14
		23	1.940	1.942	0.002	0.10	9.872	9.877	0.005	0.05	9.785	9.801	0.016	0.16
		24	1.930	1.930	0.000	-0.02	9.828	-	-	-	9.770	-	-	-
	平均					0.11				0.04				0.12

*照射試験後の測定結果が #N/A となっている試験体は、試験体 ID のマークが消えて判別がつかなくなっている試験体である。

表 2.45 骨材試験体の照射試験ケース PPT-B (IFA-753) の寸法変化 (2/2)

試験 ケース	試験体 ID		質量変化(g)			変化率 (%)	高さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-B	H	19	1.997	1.998	0.001	0.06	9.890	9.898	0.008	0.08	9.933	9.940	0.007	0.07
		20	1.954	1.954	0.000	0.01	9.883	9.888	0.005	0.05	9.839	9.844	0.005	0.05
		21	1.983	1.982	-0.001	-0.05	9.865	9.871	0.006	0.06	9.891	9.896	0.005	0.05
		22	2.045	2.046	0.000	0.02	9.962	9.966	0.004	0.04	9.907	9.916	0.009	0.09
		23	1.911	1.910	-0.001	-0.07	9.635	-	-	-	9.850	-	-	-
		24	1.998	1.996	-0.002	-0.10	9.951	-	-	-	9.920	-	-	-
	平均					-0.02				0.06				0.07
	J	19	1.929	1.929	0.000	0.01	9.563	9.556	-0.007	-0.07	9.832	9.846	0.014	0.14
		20	2.008	2.010	0.002	0.08	9.808	9.819	0.011	0.11	9.877	9.892	0.015	0.15
		21	1.849	1.850	0.001	0.05	9.424	9.423	-0.001	-0.01	9.655	9.669	0.014	0.15
		22	2.029	2.029	0.000	0.00	9.873	9.878	0.005	0.05	9.870	9.880	0.010	0.10
		23	1.926	1.926	0.000	-0.01	9.526	9.527	0.001	0.01	9.817	9.833	0.016	0.16
		24	1.973	1.972	-0.002	-0.08	9.661	-	-	-	9.847	-	-	-
	平均					0.01				0.02				0.14
	K	19	1.900	1.901	0.001	0.04	9.970	9.968	-0.002	-0.02	9.523	9.531	0.008	0.08
		20	1.968	1.971	0.002	0.13	9.964	9.963	-0.001	-0.01	9.694	9.698	0.004	0.04
		21	1.910	1.910	0.000	0.01	9.751	9.738	-0.013	-0.13	9.674	9.695	0.021	0.22
		22	1.832	1.833	0.001	0.06	9.696	9.694	-0.002	-0.02	9.509	9.520	0.011	0.11
		23	1.762	1.764	0.002	0.09	9.361	9.357	-0.004	-0.04	9.508	9.524	0.016	0.17
		24	1.880	1.881	0.001	0.06	9.885	-	-	-	9.533	-	-	-
	平均					0.06				-0.04				0.12

*照射試験後の測定結果が #N/A となっている試験体は、試験体 ID のマークが消えて判別がつかなくなっている試験体である。

表 2.46 骨材試験体の照射試験ケース PPT-C (IFA-752) の寸法変化 (1/2)

試験 ケース	試験体 ID		質量変化(g)			変化率 (%)	高さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-C	E	07	1.923	1.920	-0.003	-0.15	9.806	9.819	0.013	0.13	9.846	9.857	0.011	0.11
		08	1.962	1.960	-0.002	-0.08	9.848	9.860	0.012	0.13	9.796	9.810	0.014	0.14
		09	2.003	2.002	-0.001	-0.07	9.797	9.809	0.012	0.12	9.895	9.911	0.016	0.16
		10	2.002	2.001	-0.001	-0.06	9.919	9.929	0.010	0.10	9.850	9.869	0.019	0.19
		11	1.892	1.894	0.002	0.10	9.995	10.012	0.017	0.17	9.698	9.721	0.023	0.24
		12	1.972	1.972	0.000	-0.01	9.659	9.668	0.009	0.10	9.864	9.875	0.011	0.11
	平均					-0.04				0.12				0.16
	F	07	1.957	1.959	0.002	0.11	9.967	9.990	0.023	0.23	9.678	9.710	0.032	0.33
		08	1.949	1.953	0.004	0.19	9.868	9.898	0.030	0.30	9.735	9.764	0.029	0.30
		09	1.952	1.953	0.001	0.04	9.932	9.951	0.019	0.20	9.761	9.782	0.021	0.21
		10	1.954	1.956	0.002	0.09	9.798	9.829	0.031	0.31	9.785	9.809	0.024	0.25
		11	1.935	1.937	0.002	0.13	9.961	9.984	0.023	0.23	9.680	9.720	0.040	0.41
		12	1.944	1.949	0.005	0.28	9.893	-	-	-	9.689	-	-	-
	平均					0.14				0.25				0.30
	G	07	1.974	1.976	0.002	0.11	9.749	-	-	-	9.927	-	-	-
		08	2.004	2.006	0.002	0.09	9.915	9.925	0.010	0.10	9.924	9.952	0.028	0.28
		09	1.931	1.931	0.000	0.02	9.864	9.879	0.015	0.15	9.805	9.828	0.023	0.24
		10	1.982	1.983	0.000	0.03	9.973	9.983	0.010	0.10	9.870	9.893	0.023	0.23
		11	1.974	1.973	-0.001	-0.03	9.867	9.880	0.013	0.13	9.852	9.881	0.029	0.30
		12	1.987	1.986	-0.001	-0.05	9.974	9.767	-0.207	-2.08	9.857	9.952	0.095	0.96
	平均					0.03				0.12				0.26

*照射試験後の測定結果が #N/A となっている試験体は、試験体 ID のマークが消えて判別がつかなくなっている試験体である。

*G12 については、同一骨材の他の試験体と比べて、照射前後での変化の傾向が大きく異なったため、平均値の算出には含めていない。

表 2.47 骨材試験体の照射試験ケース PPT-C (IFA-752) の寸法変化 (2/2)

試験 ケース	試験体 ID		質量変化(g)			変化率 (%)	高さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-C	H	07	2.009	2.008	-0.001	-0.03	9.959	9.960	0.001	0.01	9.886	9.902	0.016	0.17
		08	2.025	2.024	-0.001	-0.04	9.896	9.906	0.010	0.10	9.899	9.914	0.015	0.15
		09	1.977	1.976	-0.001	-0.06	9.922	9.927	0.005	0.05	9.859	9.872	0.013	0.14
		10	1.951	1.949	-0.002	-0.12	9.849	9.849	0.000	0.00	9.846	9.864	0.018	0.18
		11	2.000	2.001	0.001	0.06	9.792	9.802	0.010	0.10	9.905	9.929	0.024	0.24
		12	1.950	1.948	-0.002	-0.09	9.732	9.733	0.001	0.01	9.850	9.866	0.016	0.16
	平均					-0.05				0.05				0.17
	J	07	1.964	1.962	-0.002	-0.13	9.967	9.973	0.006	0.06	9.675	9.688	0.013	0.13
		08	1.791	1.790	-0.001	-0.08	9.184	9.202	0.018	0.20	9.601	9.617	0.016	0.16
		09	1.945	1.944	-0.001	-0.04	9.713	9.728	0.015	0.15	9.700	9.715	0.015	0.15
		10	1.964	1.963	-0.001	-0.05	9.786	9.794	0.008	0.08	9.747	9.754	0.007	0.07
		11	1.974	1.974	0.000	-0.02	9.559	9.563	0.004	0.05	9.928	9.946	0.018	0.18
		12	1.972	1.970	-0.002	-0.09	9.796	9.821	0.025	0.25	9.679	9.693	0.014	0.15
	平均					-0.07				0.13				0.14
	K	07	1.960	1.960	0.000	0.00	9.933	9.933	0.000	0.00	9.668	9.676	0.008	0.08
		08	1.890	1.891	0.001	0.05	9.934	9.934	0.000	0.00	9.504	9.506	0.002	0.02
		09	1.810	1.809	-0.001	-0.07	9.530	9.524	-0.006	-0.07	9.518	9.517	-0.001	-0.01
		10	1.848	1.848	0.000	-0.02	9.731	9.722	-0.009	-0.09	9.511	9.520	0.009	0.09
		11	1.915	1.917	0.002	0.12	9.409	9.410	0.001	0.01	9.839	9.857	0.018	0.18
		12	1.886	1.886	0.000	0.02	9.882	9.889	0.007	0.07	9.521	9.536	0.015	0.15
	平均					0.02				-0.01				0.09

*照射試験後の測定結果が #N/A となっている試験体は、試験体 ID のマークが消えて判別がつかなくなっている試験体である。

表 2.48 骨材試験体の照射試験ケース PPT-D (IFA-751) の寸法変化 (1/2)

試験 ケース	試験体 ID		質量変化(g)			変化率 (%)	高さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-D	E	13	2.066	2.069	0.003	0.16	9.930	9.933	0.003	0.03	9.926	10.066	0.140	1.41
		14	2.021	2.026	0.005	0.22	9.878	9.909	0.031	0.31	9.932	10.057	0.125	1.26
		15	1.885	1.889	0.004	0.22	9.676	9.759	0.083	0.86	9.747	9.929	0.182	1.87
		16	2.030	2.032	0.002	0.11	9.914	9.986	0.072	0.73	9.865	10.001	0.136	1.38
		17	1.999	2.000	0.001	0.07	9.965	10.001	0.036	0.36	9.853	9.969	0.116	1.17
		18	2.020	2.022	0.002	0.08	9.989	10.100	0.111	1.11	9.866	9.958	0.092	0.93
	平均					0.14				0.57				1.34
	F	13	1.960	1.969	0.009	0.44	9.970	10.108	0.137	1.38	9.735	9.921	0.186	1.91
		14	1.933	1.940	0.007	0.36	9.962	10.042	0.080	0.80	9.700	9.906	0.206	2.12
		15	1.984	1.993	0.009	0.46	9.890	10.009	0.119	1.20	9.845	10.060	0.215	2.19
		16	1.957	1.965	0.008	0.39	9.958	10.047	0.089	0.89	9.758	9.927	0.169	1.73
		17	1.905	1.913	0.008	0.44	9.859	9.977	0.118	1.19	9.660	9.873	0.213	2.21
		18	1.938	1.949	0.011	0.56	9.986	10.102	0.116	1.17	9.667	9.811	0.144	1.49
	平均					0.44				1.11				1.94
	G	13	2.027	2.028	0.001	0.03	9.960	10.048	0.088	0.88	9.937	10.036	0.099	1.00
		14	1.969	1.972	0.003	0.15	9.958	9.979	0.021	0.21	9.824	9.943	0.119	1.21
		15	1.945	1.947	0.002	0.11	9.888	10.054	0.166	1.68	9.792	9.932	0.140	1.43
		16	1.908	1.912	0.004	0.19	9.894	9.937	0.043	0.43	9.704	9.870	0.166	1.71
		17	1.903	1.905	0.002	0.10	9.753	9.808	0.055	0.57	9.767	9.930	0.163	1.67
		18	1.950	1.950	0.000	-0.01	9.743	9.807	0.064	0.66	9.867	9.938	0.071	0.72
	平均					0.10				0.74				1.29

表 2.49 骨材試験体の照射試験ケース PPT-D (IFA-751) の寸法変化 (2/2)

試験 ケース	試験体 ID		質量変化(g)			変化率 (%)	高さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-D	H	13	2.010	2.010	0.000	-0.02	9.942	10.065	0.123	1.23	9.869	9.960	0.091	0.92
		14	2.031	2.032	0.001	0.03	9.931	9.991	0.060	0.60	9.903	10.007	0.103	1.05
		15	2.004	2.006	0.002	0.11	9.928	10.048	0.120	1.21	9.842	9.962	0.120	1.22
		16	1.982	1.984	0.002	0.08	9.966	10.050	0.084	0.85	9.871	10.007	0.136	1.38
		17	2.018	2.021	0.003	0.13	9.889	9.922	0.033	0.33	9.888	10.003	0.115	1.17
		18	1.908	1.907	-0.001	-0.08	9.754	9.847	0.093	0.96	9.910	9.987	0.077	0.77
	平均					0.04				0.86				1.08
	J	13	1.949	1.948	-0.001	-0.03	9.727	9.773	0.046	0.47	9.727	9.800	0.072	0.75
		14	2.015	2.013	-0.002	-0.08	9.771	9.834	0.062	0.64	9.900	9.988	0.088	0.89
		15	1.862	1.862	0.000	-0.02	9.367	9.395	0.027	0.29	9.698	9.780	0.082	0.85
		16	2.026	2.028	0.002	0.09	9.824	9.873	0.049	0.49	9.890	9.999	0.109	1.10
		17	1.958	1.957	-0.001	-0.03	9.504	9.553	0.049	0.51	9.884	9.949	0.065	0.66
		18	1.962	1.961	-0.001	-0.04	9.787	9.848	0.061	0.63	9.720	9.782	0.062	0.64
	平均					-0.02				0.51				0.81
	K	13	1.882	1.882	0.000	-0.01	9.863	9.870	0.007	0.07	9.525	9.538	0.013	0.14
		14	1.827	1.829	0.002	0.10	9.734	9.706	-0.028	-0.28	9.505	9.511	0.006	0.07
		15	1.923	1.924	0.001	0.07	9.787	9.780	-0.007	-0.07	9.683	9.716	0.033	0.34
		16	1.830	1.833	0.003	0.16	9.655	9.649	-0.006	-0.06	9.507	9.565	0.058	0.61
		17	1.896	1.900	0.004	0.18	9.992	10.004	0.012	0.12	9.496	9.568	0.071	0.75
		18	1.900	1.904	0.004	0.19	9.982	9.983	0.001	0.01	9.523	9.559	0.036	0.38
	平均					0.12				-0.04				0.38

表 2.50 骨材試験体の照射試験ケース PPT-E (IFA-750) の寸法変化 (1/2)

試験 ケース	試験体 ID		質量変化(g)			変化率 (%)	高さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-E	E	01	2.016	2.017	0.001	0.06	9.940	10.280	0.340	3.42	9.924	10.253	0.329	3.32
		02	1.868	1.869	0.001	0.08	9.654	9.936	0.282	2.92	9.697	9.985	0.288	2.97
		03	1.885	1.889	0.004	0.23	9.791	10.045	0.254	2.59	9.718	9.993	0.274	2.82
		04	1.861	1.860	-0.001	-0.03	9.922	10.213	0.291	2.93	9.604	9.888	0.284	2.96
		05	1.946	1.946	0.000	0.02	9.730	9.989	0.259	2.66	9.901	10.200	0.299	3.02
		06	1.963	1.965	0.002	0.09	9.751	10.016	0.265	2.72	9.820	10.089	0.269	2.74
	平均					0.07				2.87				2.97
	F	01	1.858	1.866	0.008	0.42	9.877	10.355	0.478	4.84	9.509	9.944	0.435	4.57
		02	1.919	1.921	0.002	0.12	9.885	10.327	0.442	4.47	9.705	10.162	0.457	4.71
		03	1.907	1.908	0.001	0.04	9.799	10.222	0.422	4.31	9.733	10.178	0.445	4.57
		04	1.831	1.836	0.005	0.27	9.753	10.174	0.421	4.32	9.508	9.935	0.427	4.49
		05	1.916	1.923	0.007	0.35	9.861	10.272	0.410	4.16	9.684	10.090	0.406	4.19
		06	1.820	1.824	0.004	0.23	9.404	9.787	0.383	4.07	9.665	10.047	0.382	3.95
	平均					0.24				4.36				4.42
	G	01	2.021	2.020	-0.001	-0.04	9.944	10.266	0.322	3.24	9.955	10.292	0.337	3.39
		02	2.001	2.002	0.001	0.03	9.970	10.281	0.311	3.12	9.879	10.192	0.313	3.17
		03	2.022	2.023	0.001	0.02	9.957	10.264	0.307	3.08	9.941	10.282	0.341	3.43
		04	2.014	2.016	0.002	0.11	9.935	10.229	0.294	2.96	9.917	10.241	0.324	3.26
		05	2.001	2.002	0.001	0.06	9.841	10.122	0.281	2.85	9.942	10.258	0.316	3.18
		06	2.022	2.022	0.000	0.01	9.915	10.185	0.270	2.73	9.967	10.253	0.286	2.87
	平均					0.03				3.00				3.22

表 2.51 骨材試験体の照射試験ケース PPT-E (IFA-750) の寸法変化 (2/2)

試験 ケース	試験体 ID		質量変化(g)			変化率 (%)	高さ変化(mm)			変化率 (%)	直径変化(mm)			変化率 (%)
			試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化		試験前	試験後	変化	
PPT-E	H	01	1.972	1.971	-0.001	-0.03	9.988	10.416	0.428	4.29	9.911	10.337	0.426	4.30
		02	1.938	1.937	-0.001	-0.04	9.731	9.988	0.257	2.64	9.857	10.133	0.276	2.80
		03	1.972	1.972	0.000	-0.01	9.954	10.185	0.231	2.32	9.839	10.088	0.249	2.53
		04	1.971	1.974	0.003	0.16	9.749	10.101	0.352	3.61	9.927	10.284	0.357	3.60
		05	1.971	1.973	0.002	0.11	9.931	10.287	0.356	3.59	9.894	10.258	0.364	3.68
		06	1.999	2.003	0.004	0.21	9.919	10.200	0.281	2.83	9.866	10.181	0.315	3.19
	平均					0.07				3.21				3.35
	J	01	1.814	1.818	0.004	0.22	9.526	9.791	0.265	2.78	9.496	9.793	0.297	3.12
		02	2.040	2.042	0.002	0.12	9.900	10.220	0.320	3.23	9.876	10.206	0.330	3.34
		03	2.014	2.016	0.002	0.10	9.979	10.232	0.253	2.54	9.760	10.063	0.303	3.11
		04	2.003	2.003	0.000	0.01	9.991	10.233	0.242	2.43	9.722	10.009	0.287	2.95
		05	1.913	1.915	0.002	0.08	9.600	9.830	0.230	2.40	9.713	10.024	0.311	3.20
		06	2.019	2.022	0.003	0.15	9.995	10.243	0.248	2.48	9.762	10.025	0.263	2.69
	平均					0.11				2.64				3.07
	K	01	1.890	1.891	0.001	0.07	9.966	9.938	-0.028	-0.28	9.505	9.521	0.016	0.17
		02	1.887	1.887	0.000	0.02	9.971	9.942	-0.029	-0.29	9.493	9.506	0.013	0.14
		03	1.868	1.870	0.002	0.12	9.861	9.860	-0.001	-0.01	9.493	9.509	0.016	0.17
		04	1.965	1.970	0.005	0.25	9.983	9.992	0.009	0.09	9.672	9.703	0.031	0.32
		05	1.831	1.833	0.002	0.11	9.625	9.613	-0.012	-0.13	9.521	9.540	0.019	0.20
		06	1.793	1.796	0.003	0.15	9.448	9.460	0.012	0.13	9.502	9.523	0.021	0.22
	平均					0.12				-0.08				0.20

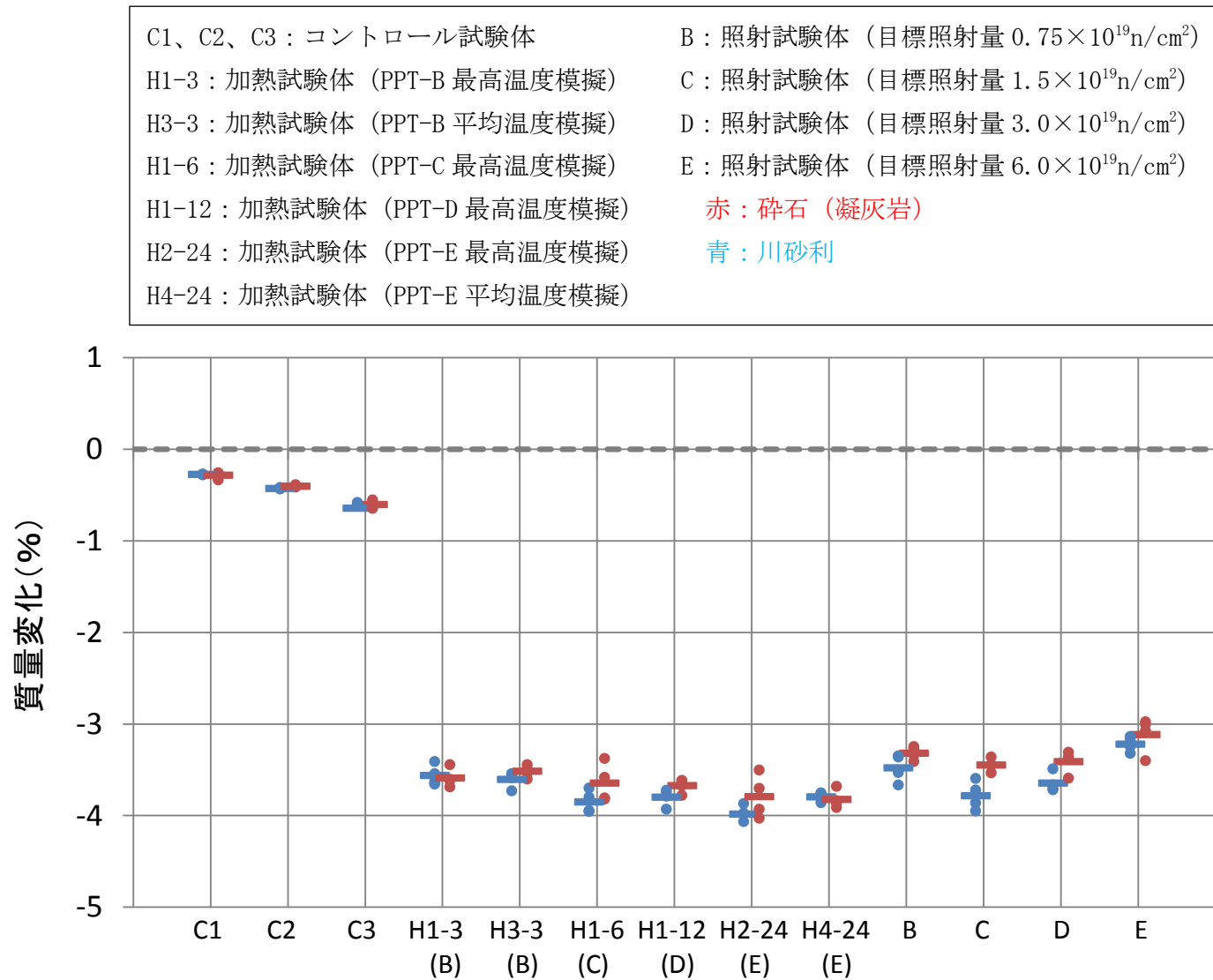


図 2.226 コンクリート試験体の質量変化

C1、C2、C3：コントロール試験体

H1-3：加熱試験体（PPT-B 最高温度模擬）

H3-3：加熱試験体（PPT-B 平均温度模擬）

H1-6：加熱試験体（PPT-C 最高温度模擬）

H1-12：加熱試験体（PPT-D 最高温度模擬）

H2-24：加熱試験体（PPT-E 最高温度模擬）

H4-24：加熱試験体（PPT-E 平均温度模擬）

B：照射試験体（目標照射量 $0.75 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ）

C：照射試験体（目標照射量 $1.5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ）

D：照射試験体（目標照射量 $3.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ）

E：照射試験体（目標照射量 $6.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ）

赤：碎石（凝灰岩）

青：川砂利

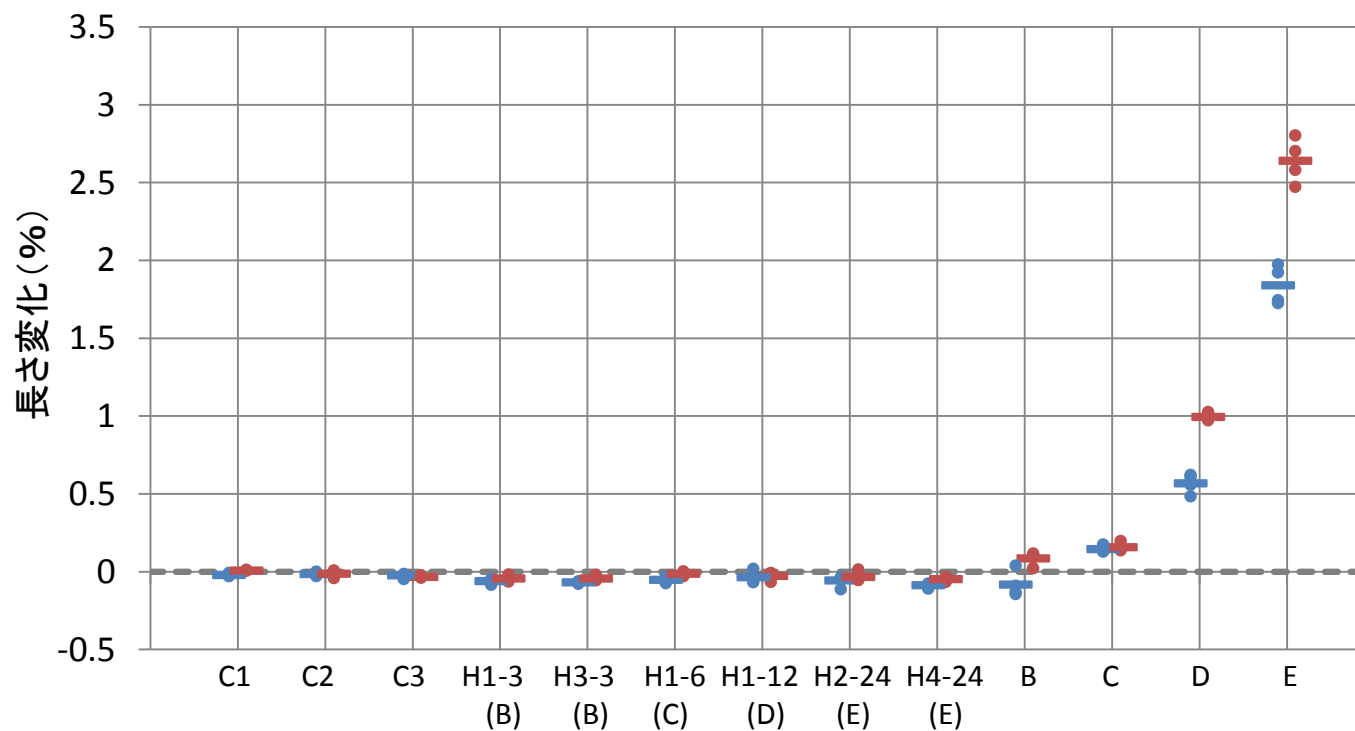


図 2.227 コンクリート試験体の長さ変化

C1、C2、C3：コントロール試験体

H1-3：加熱試験体（PPT-B 最高温度模擬）

H3-3：加熱試験体（PPT-B 平均温度模擬）

H1-6：加熱試験体（PPT-C 最高温度模擬）

H1-12：加熱試験体（PPT-D 最高温度模擬）

H2-24：加熱試験体（PPT-E 最高温度模擬）

H4-24：加熱試験体（PPT-E 平均温度模擬）

B：照射試験体（目標照射量 $0.75 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ）

C：照射試験体（目標照射量 $1.5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ）

D：照射試験体（目標照射量 $3.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ）

E：照射試験体（目標照射量 $6.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ）

赤：碎石（凝灰岩）

青：川砂利

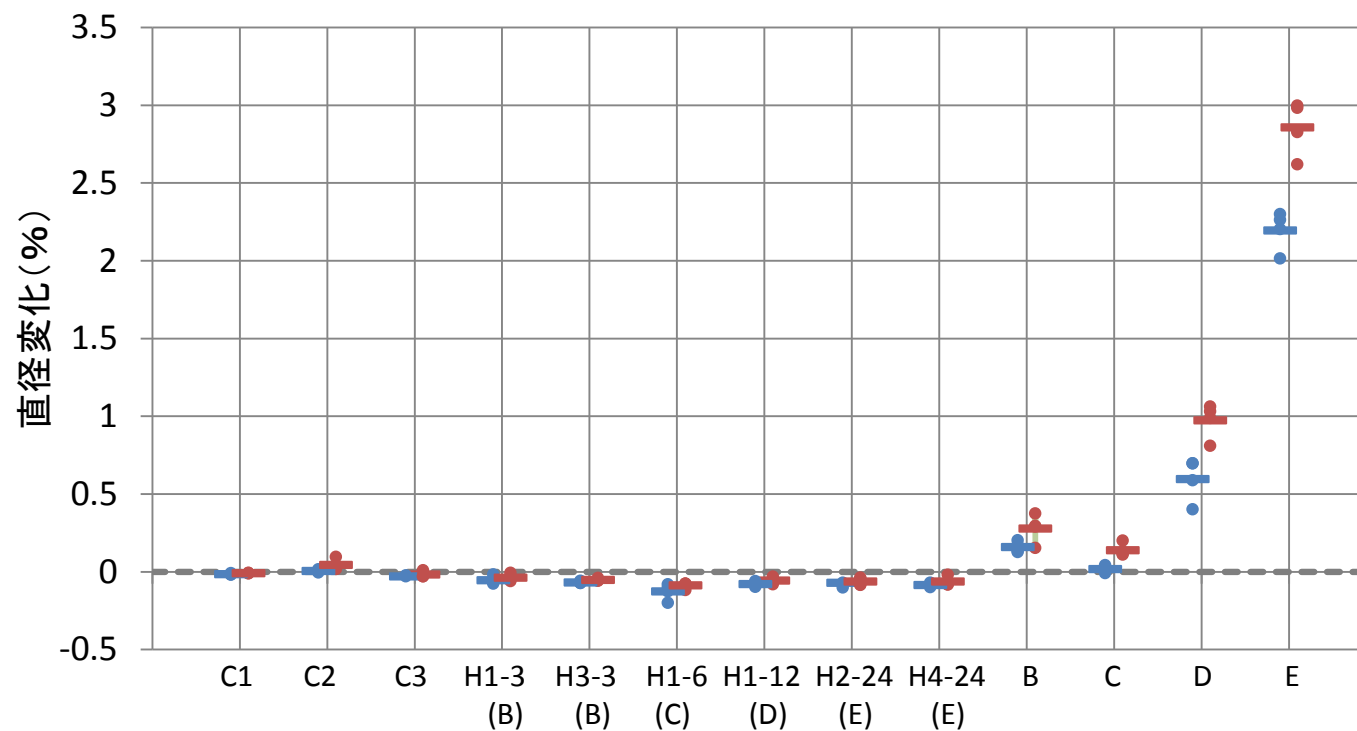


図 2.228 コンクリート試験体の直径変化

C1、C2、C3：コントロール試験体	B：照射試験体（目標照射量 $0.75 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ）
H1-3：加熱試験体（PPT-B 最高温度模擬）	C：照射試験体（目標照射量 $1.5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ）
H3-3：加熱試験体（PPT-B 平均温度模擬）	D：照射試験体（目標照射量 $3.0 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ）
H1-6：加熱試験体（PPT-C 最高温度模擬）	E：照射試験体（目標照射量 $6.0 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ）
H1-12：加熱試験体（PPT-D 最高温度模擬）	赤：碎石（凝灰岩）
H2-24：加熱試験体（PPT-E 最高温度模擬）	青：川砂利
H4-24：加熱試験体（PPT-E 平均温度模擬）	

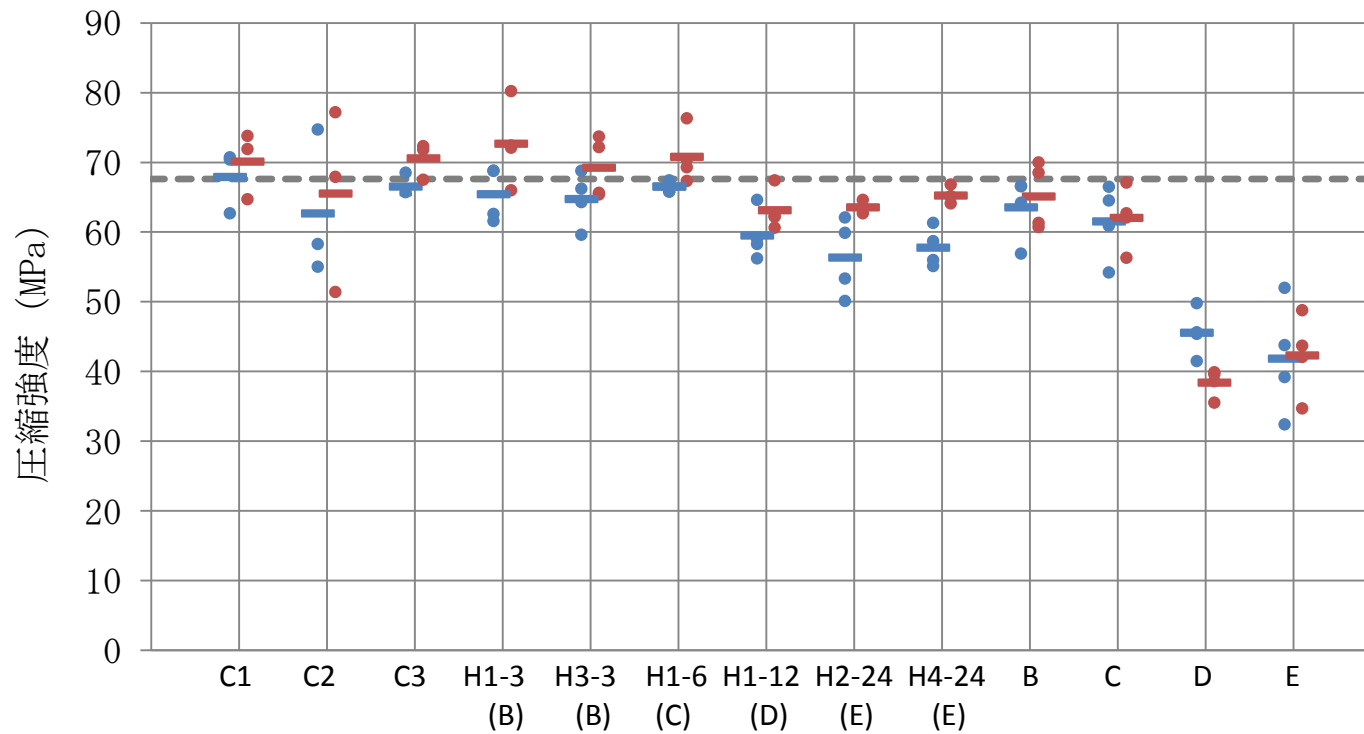


図 2.229 コンクリート試験体の圧縮強度の変化

C1、C2、C3：コントロール試験体

H1-3：加熱試験体（PPT-B 最高温度模擬）

H3-3：加熱試験体（PPT-B 平均温度模擬）

H1-6：加熱試験体（PPT-C 最高温度模擬）

H1-12：加熱試験体（PPT-D 最高温度模擬）

H2-24：加熱試験体（PPT-E 最高温度模擬）

H4-24：加熱試験体（PPT-E 平均温度模擬）

B：照射試験体（目標照射量 $0.75 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ）

C：照射試験体（目標照射量 $1.5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ）

D：照射試験体（目標照射量 $3.0 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ）

E：照射試験体（目標照射量 $6.0 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ）

赤：碎石（凝灰岩）

青：川砂利

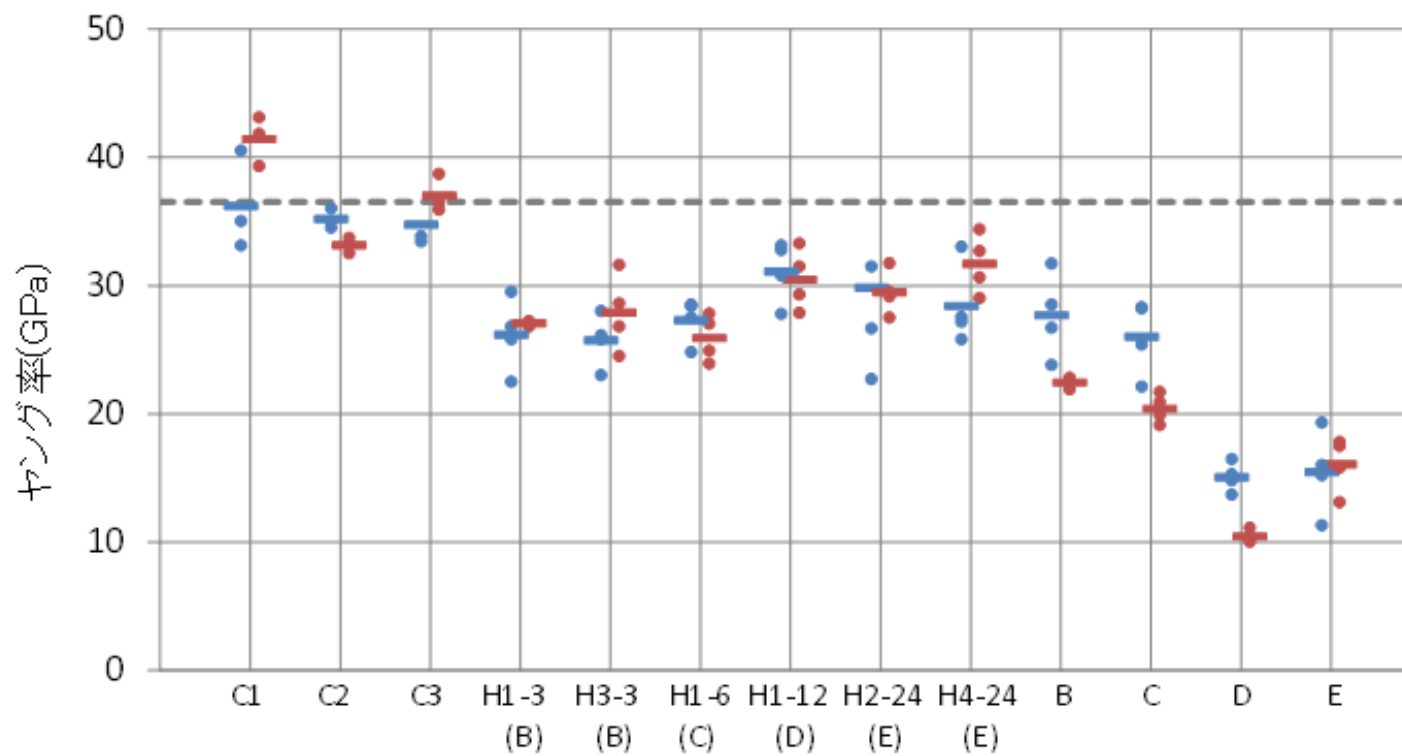
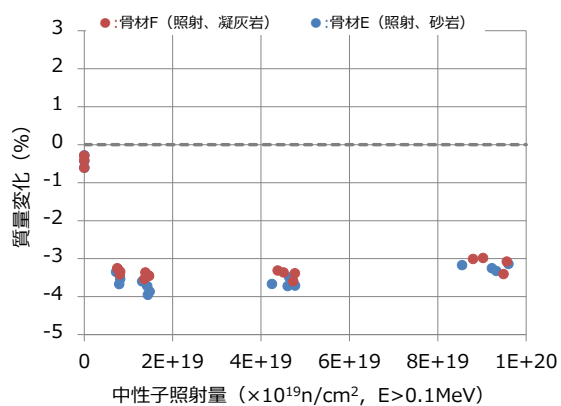
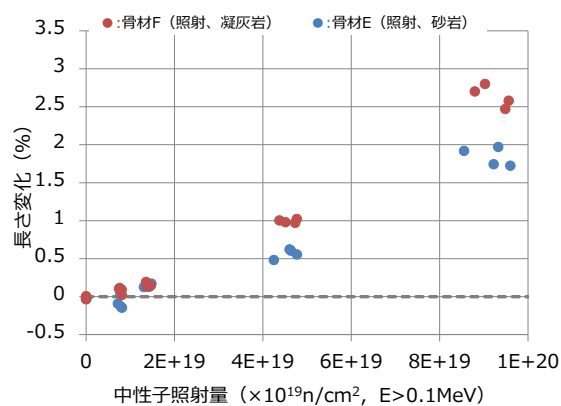


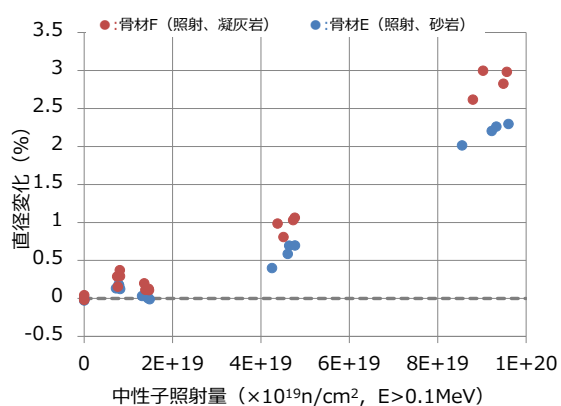
図 2. 230 コンクリート試験体のヤング率の変化



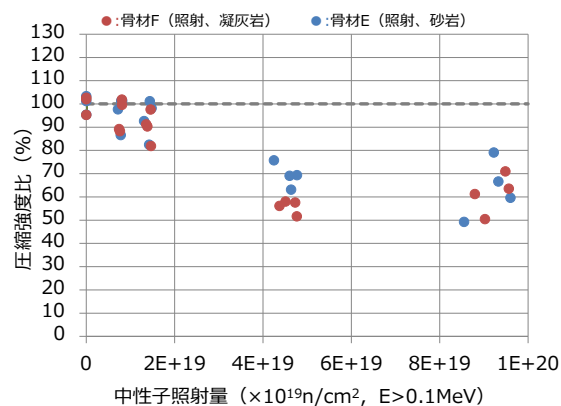
(a) 質量変化



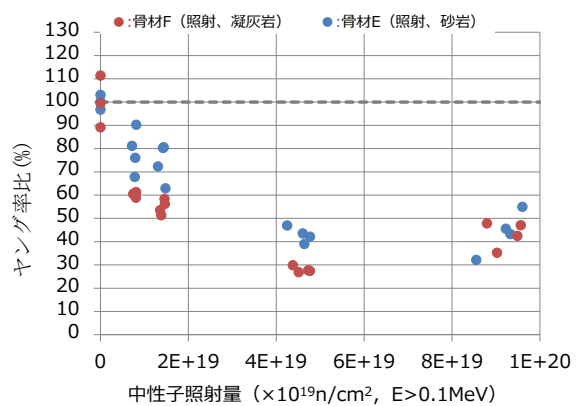
(b) 長さ変化



(c) 直径変化

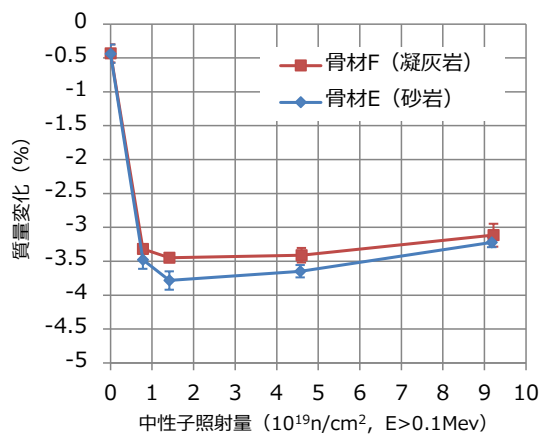


(d) 圧縮強度比

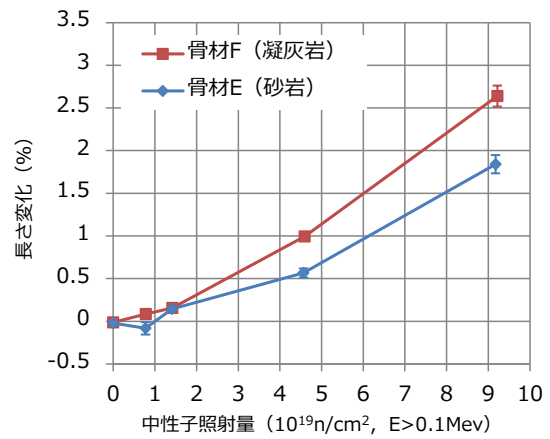


(e) ヤング率比

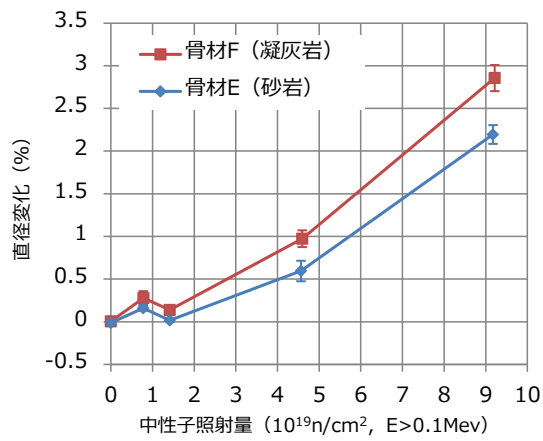
図 2. 231 コンクリート試験体の照射後試験の結果



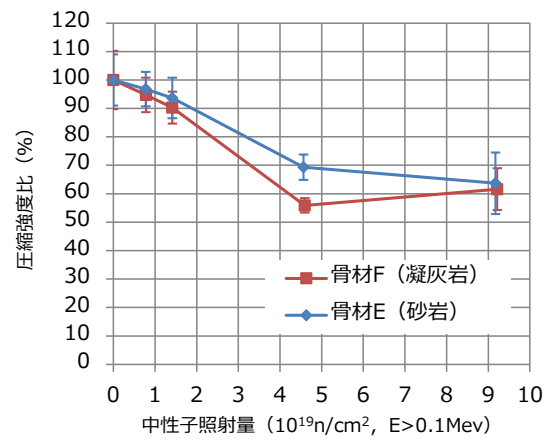
(a) 質量変化



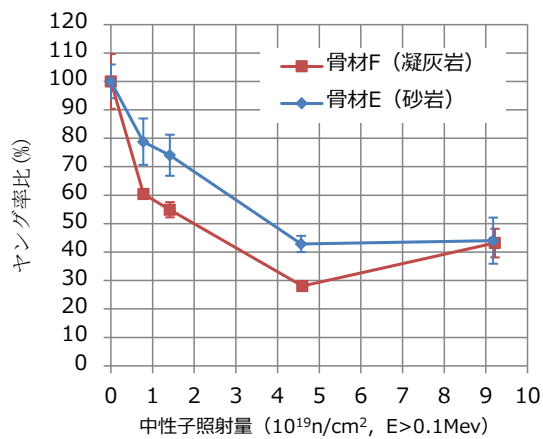
(b) 長さ変化



(c) 直径変化

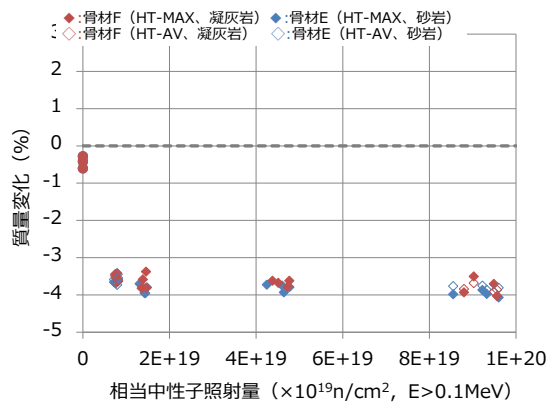


(d) 圧縮強度比

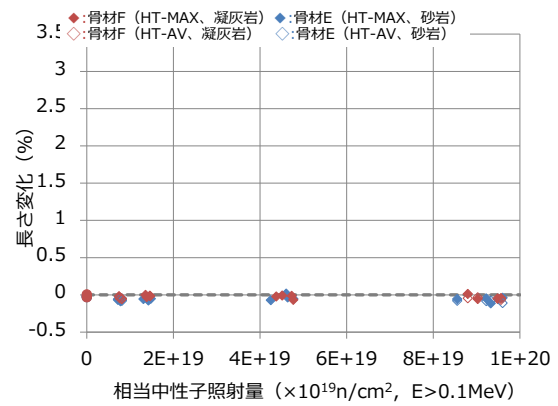


(e) ヤング率比

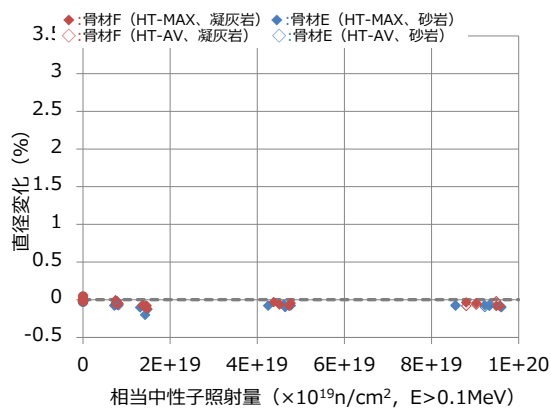
図 2.232 コンクリート試験体の照射後試験の結果 (平均値)



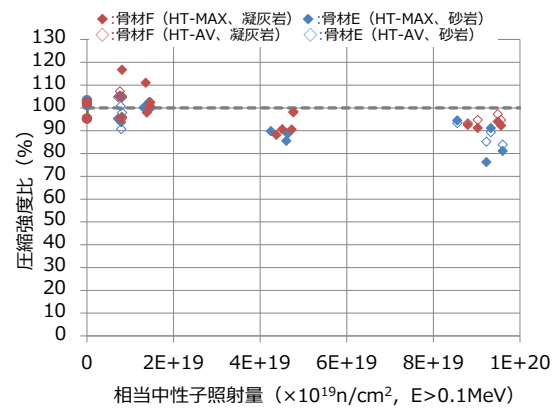
(a) 質量変化



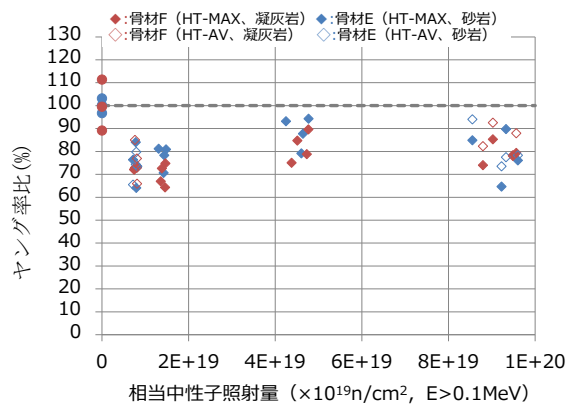
(b) 長さ変化



(c) 直径変化



(d) 圧縮強度比

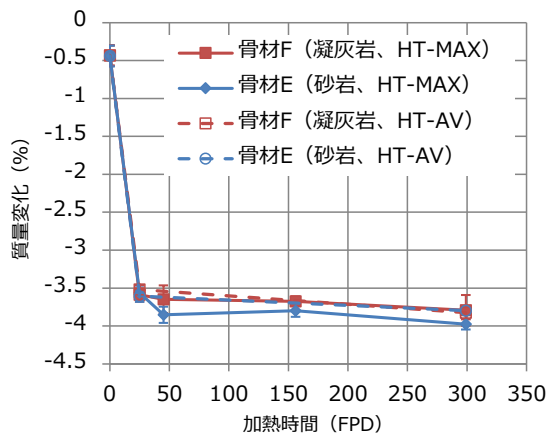


(e) ヤング率比

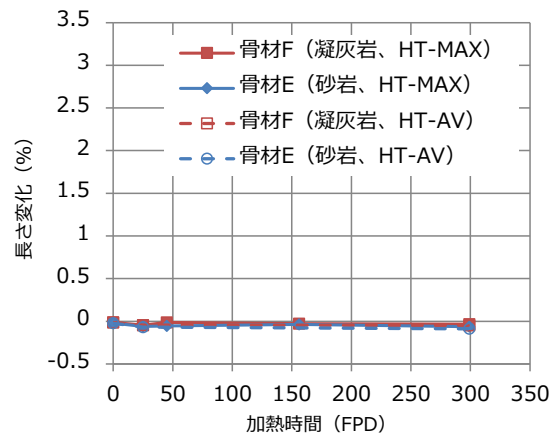
HT-MAX：試験体内最大温度履歴（70～76℃）

HT-AV：試験体内平均温度履歴（64～68℃）

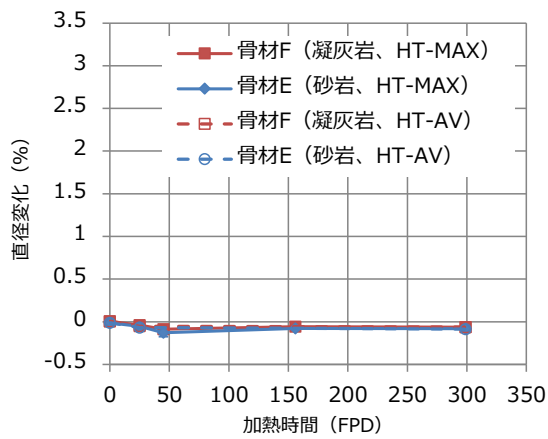
図 2.233 コンクリート試験体の非照射・加熱後試験の結果



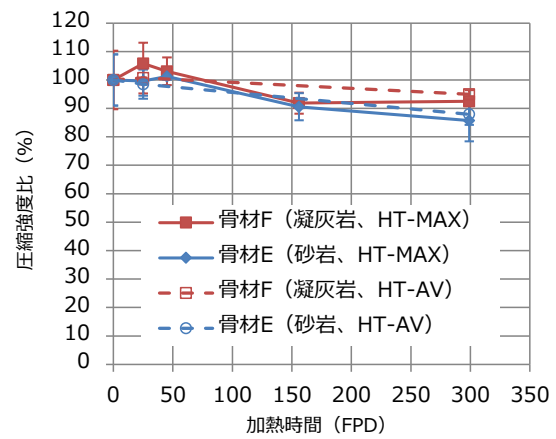
(a) 質量変化



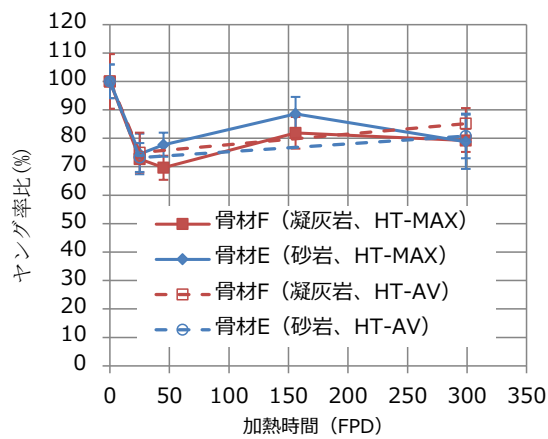
(b) 長さ変化



(c) 直径変化



(d) 圧縮強度比

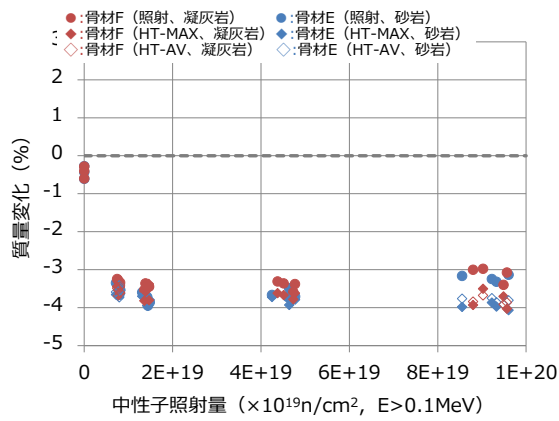


(e) ヤング率比

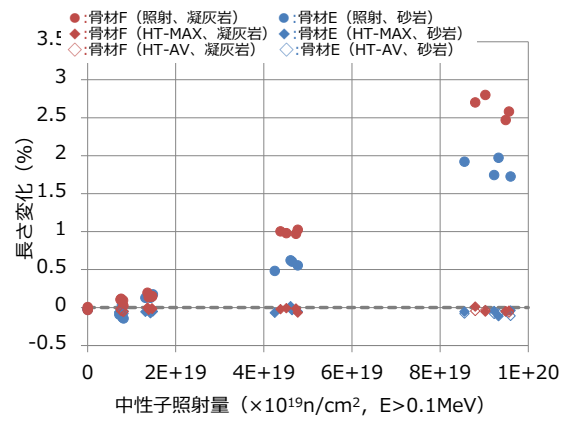
HT-MAX：試験体内最大温度履歴（70～76℃）

HT-AV：試験体内平均温度履歴（64～68℃）

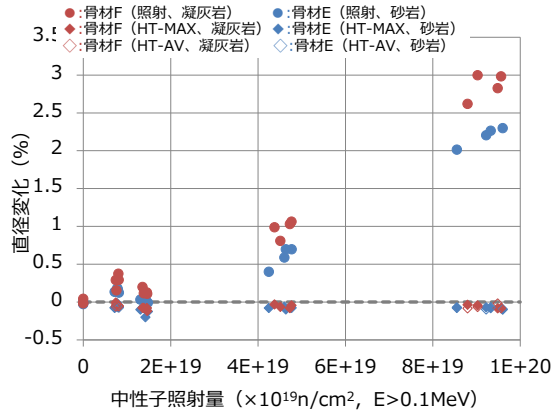
図 2.234 コンクリート試験体の非照射・加熱後試験の結果（平均値）



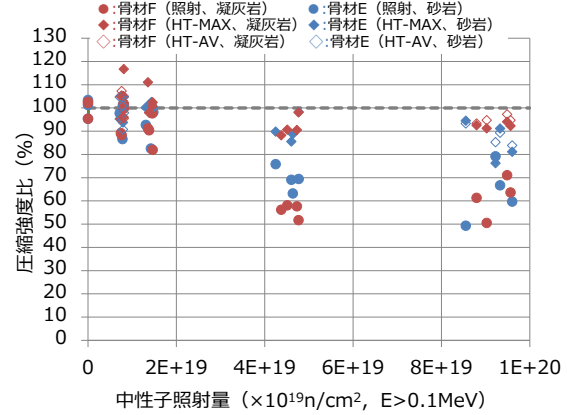
(f) 質量変化



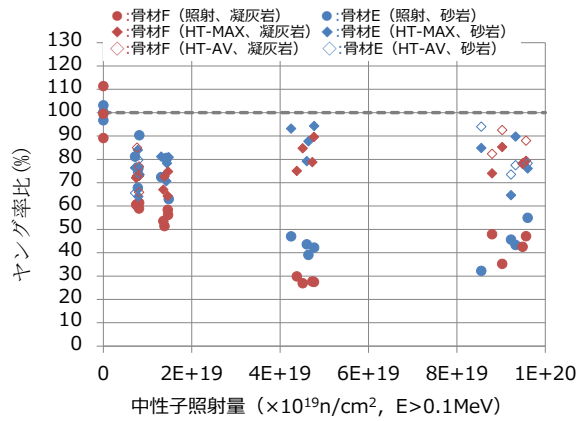
(g) 長さ変化



(h) 直径変化



(i) 圧縮強度比

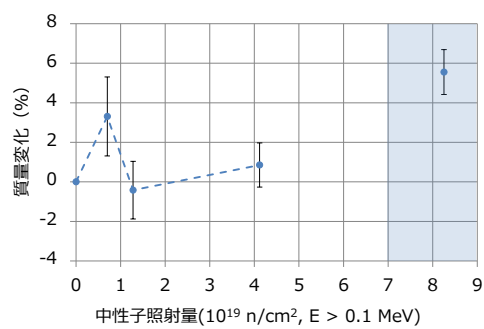


(j) ヤング率比

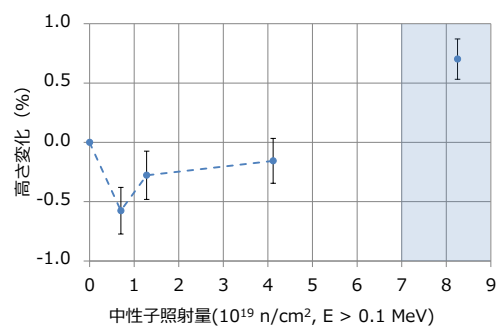
HT-MAX：試験体内最大温度履歴（70～76℃）

HT-AV：試験体内平均温度履歴（64～68℃）

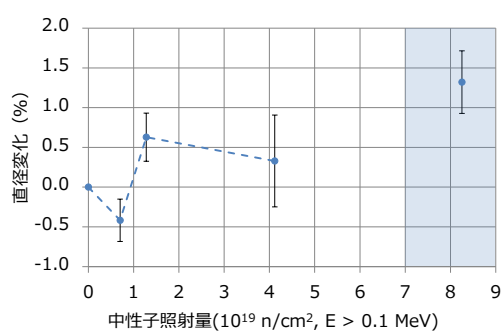
図 2. 235 コンクリート試験体の照射試験結果と非照射・加熱試験の比較



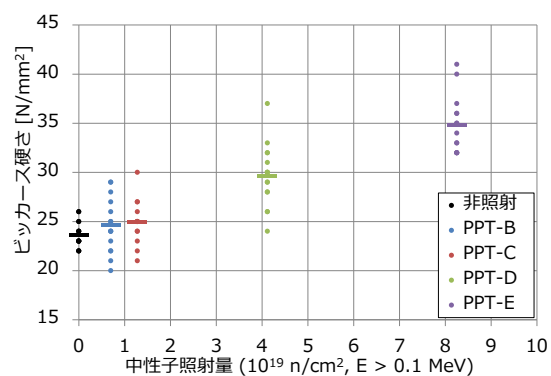
(a) 質量変化



(b) 高さ変化



(c) 直径変化



(d) ビッカース硬さ

図 2.236 ホワイトセメントペースト試験体の照射後試験の結果

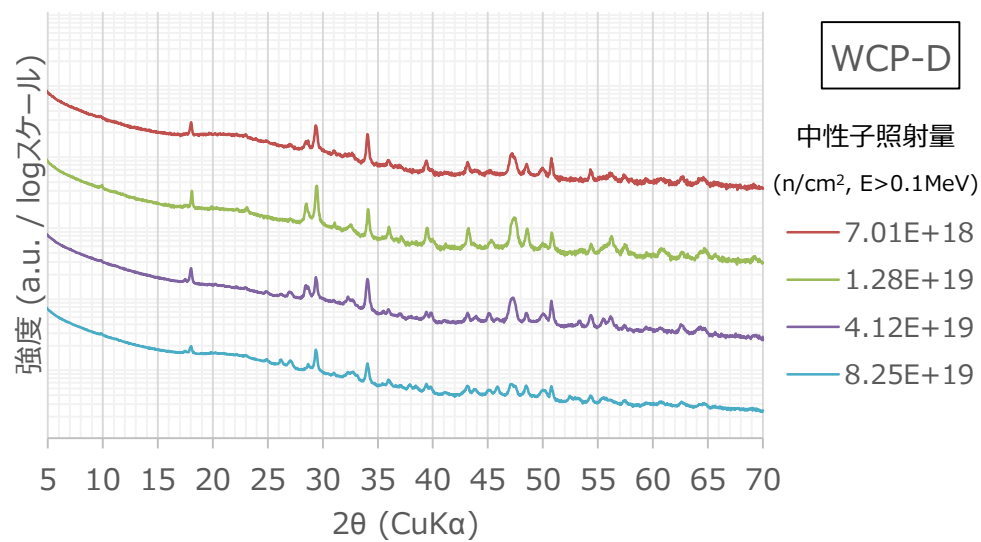


PPT-D

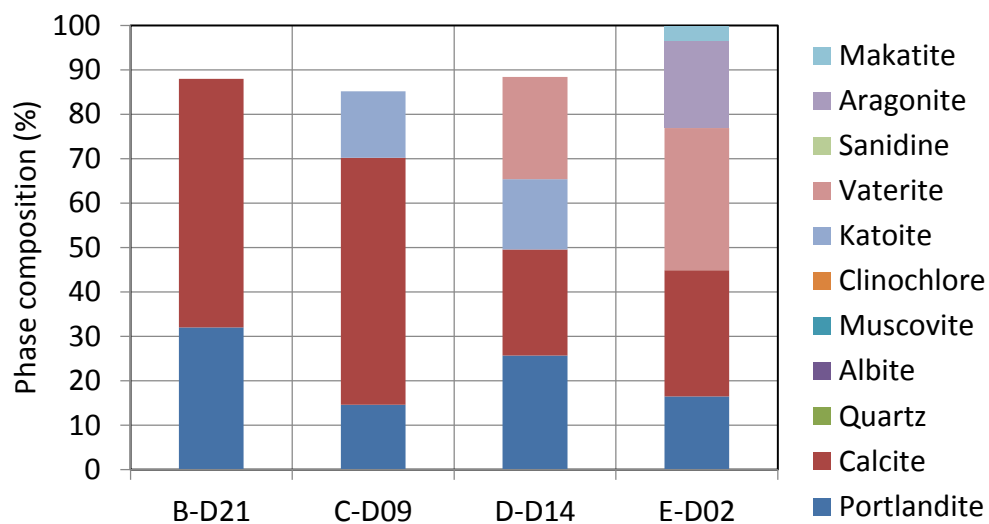


PPT-E

図 2.237 ホワイトセメントペースト試験体の PIE 実施前の状態

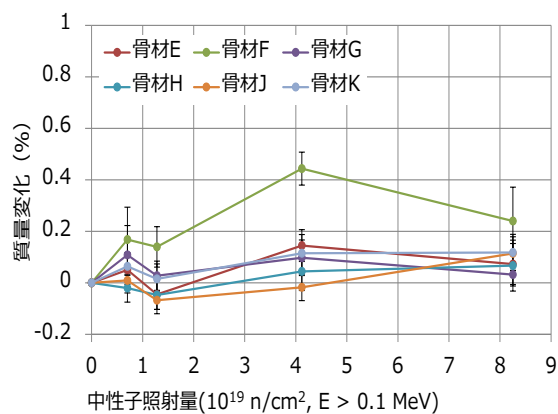


(a) チャート図

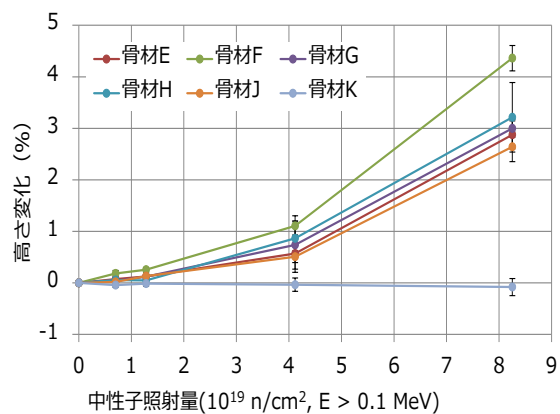


(b) 相組成

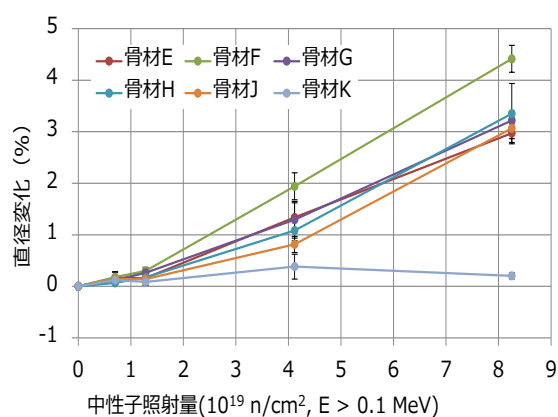
図 2.238 ホワイトセメントペースト試験体の XRD の結果



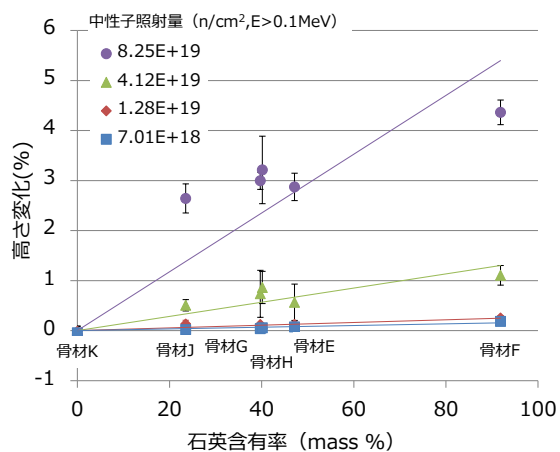
(a) 質量変化



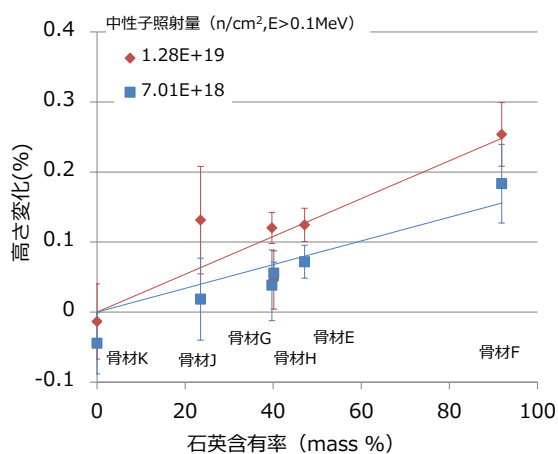
(b) 高さ変化



(c) 直径変化



(d) 高さ変化と石英含有率



(e) 高さ変化と石英含有率 (拡大)

図 2. 239 骨材試験体の照射後試験の結果

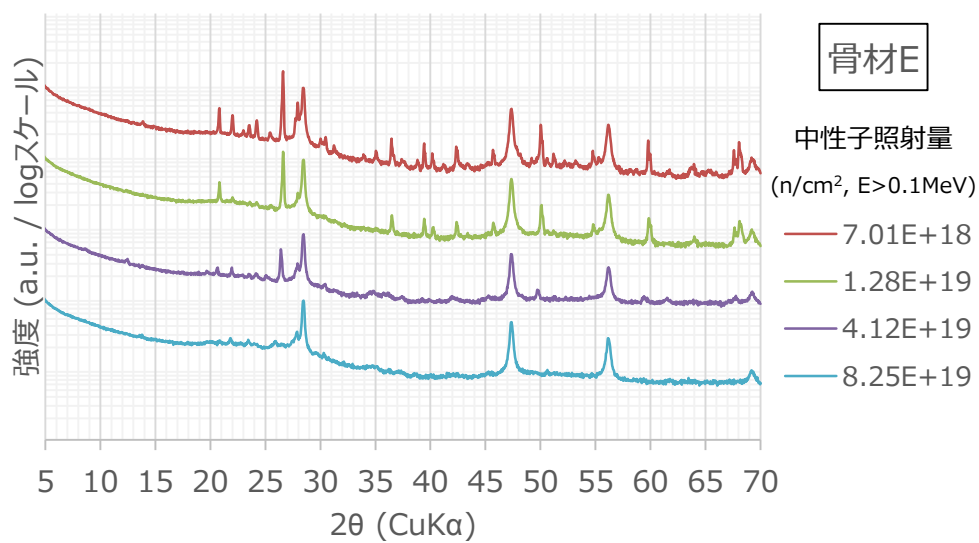


PPT-D

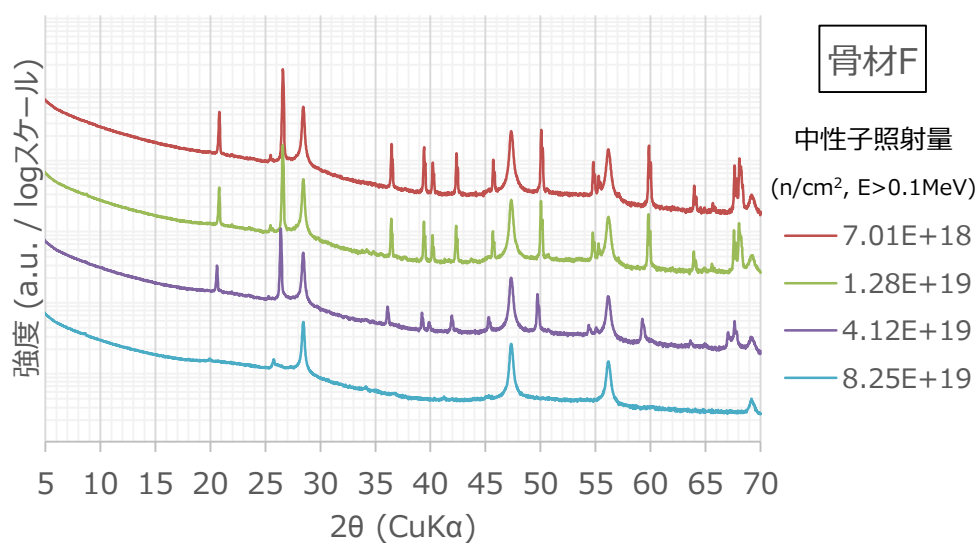


PPT-E

図 2. 240 骨材 F 試験体の PIE 実施前の状態

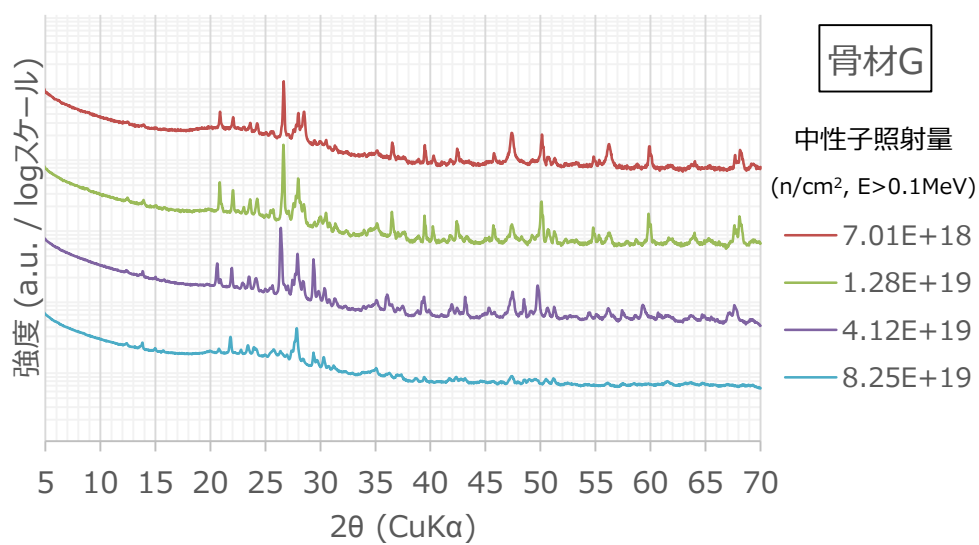


(a) 骨材 E

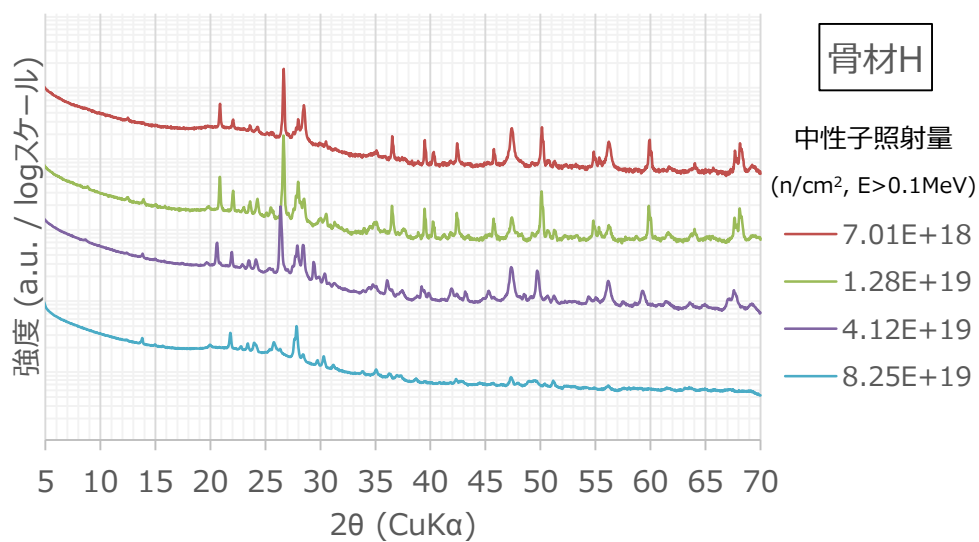


(b) 骨材 F

図 2. 241 骨材の XRD 結果

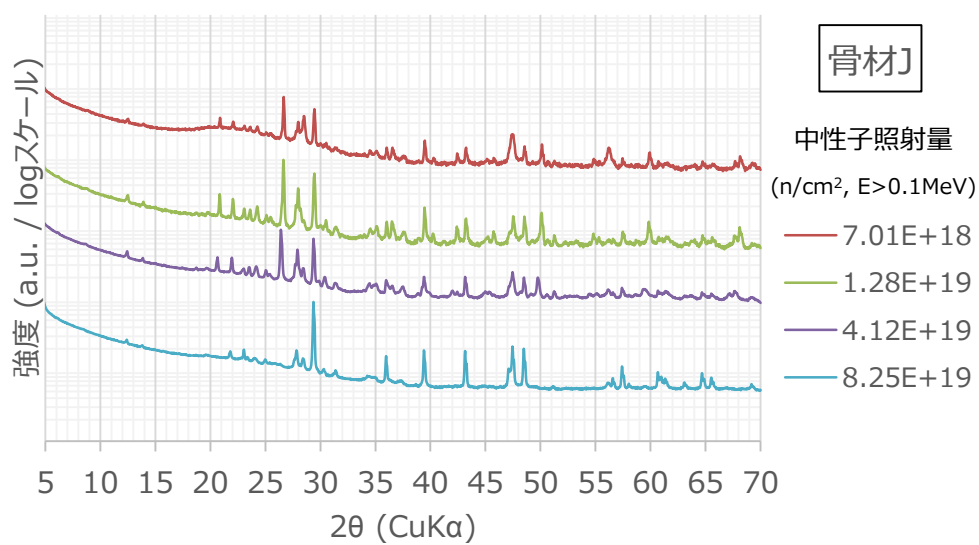


(c) 骨材 G

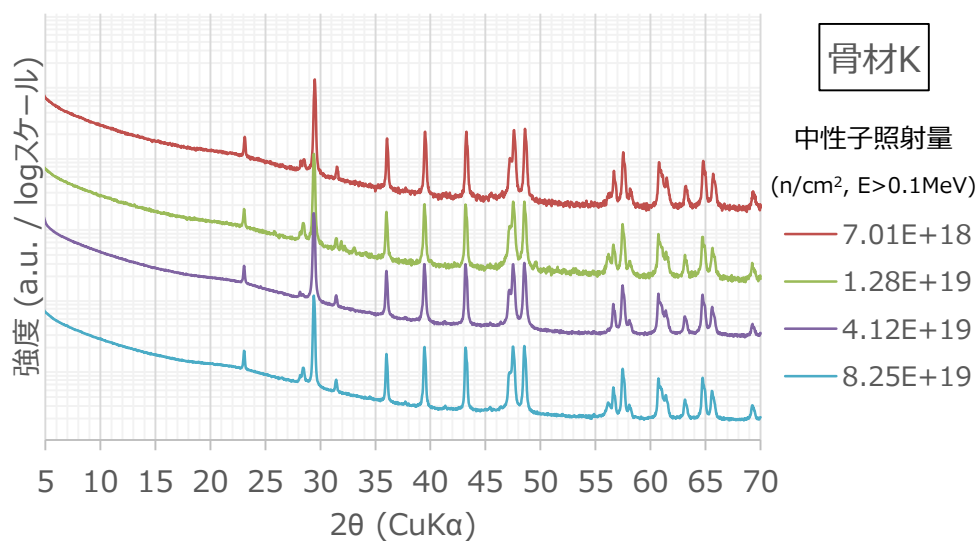


(d) 骨材 H

図 2.241 骨材の XRD 結果 (その 2)



(e) 骨材 J



(f) 骨材 K

図 2.241 骨材の XRD 結果 (その 3)

2. 4 試験結果の分析

2. 4. 1 水分放出量

表 2. 52 にキャプセルより放出された水分量をまとめて示す。

水蒸気を捕集するためのシステムとしては、当初は水分捕集タンクと湿度計で構成される単純なシステムを用い、湿度と流量により水分量を評価する計画であった。しかし、セメントペーストを用いた IT-A3 (IFA-760) では、多くの自由水が存在しており、水分捕集タンク内で水蒸気が凝縮し常に湿度が 100%程度となったため、湿度と流量で水分量を評価できなかった。なお、湿度を計測できる領域に低減するため、He フラッシュを行ったが湿度低下はなかった。

そこで、水蒸気を凝縮させる水蒸気凝縮捕集容器（コンデンサ）を設置するとともに、コンデンサを通過した湿分を捕集するために、下流側に水蒸気吸着容器（吸着材：塩化カルシウム）を設置した。

表 2. 52 では、それぞれの装置や評価方法毎に水分量を表示するとともに、放射線分解により水素・酸素ガスとして放出された水分量もあわせて示す。

ガンマ線照射試験では、放射線分解によりガスとして放出される水分量は非常に少なく、ほとんどの水分が熱により水蒸気として放出されていた。

一方、試験ケース PPT-C (IFA-752) および PPT-D (IFA-751) では、改良後水分捕集システムで水分量の計測を行っており、計測できずに失った水分量は少ないと考えられるが、どちらのケースにおいても、放射線分解によりガスとして放出された水分量が水蒸気として放出された水分量よりもかなり多くなっている。これは、ガンマ線照射試験と比較すると、中性子照射試験では、非常に大きな中性子束に加えて非常に強いガンマ線が作用しているので、放射線分解による水分の放出が大きくなったと考えられる。

また、75℃、あるいは 120℃で乾燥したセメントペースト試験体を用いている試験ケース IT-A1 (IFA-758) と IT-A2 (IFA-759) では、それぞれ 1 g と 0.5 g の水分が放射線で分解しただけであり、ガンマ線だけでなく中性子によっても化学的結合水は影響を受けにくいことがわかる。

参考のために、表 2. 52 の右端に、セメントペースト試験体およびコンクリート試験体に含まれている自由水量を示す。また、表 2. 53 および表 2. 54 にセメントペースト試験体およびコンクリート試験体の自由水量および化学的結合水量の計測・評価結果を示す。

セメントペースト試験体の自由水・結合水は、照射試験体の水分条件を設定するために 75℃および 120℃で加熱した際のデータを参考に、105℃での自由水を線形補間で評価したのもであり、化学結合水は調合より全水分量から自由水量を差し引いた値である。コンクリート試験体の自由水は、コントロール試験体の自由水の計測結果であり、化学的結合水は、調合より全水分量を評価し自由水量を差し引いた値である。

図 2. 242 と図 2. 243 に、コンデンサで捕集した水分量の時間変化と水分の放出速度の時間変化を示す。試験ケース PPT-C (IFA-752)、PPT-D (IFA-751) および IT-A4 (IFA761) については、照射試験当初から改良後の捕集システムで水分捕集を行っているので、照射期間の増大に伴い、水分量が増大している。しかし、PPT-C (IFA-752) と PPT-D (IFA-751) では、水分条件（封緘養生）や照射条件（照射孔#36、コンクリート温度はともに 70℃程度）はほとんど同一であるにも関わらず、水分放出速度や水分量には差が発生しており、その理由は明確になっていない。

試験ケース PPT-E (IFA-750) では、最初の約 2 か月間照射期間中はコンデンサを用いず、定期的な長期停止期間後の再起動時にコンデンサを設置した。従って、最初の 2 か月間に水分が放出されたため、コンデンサでは、水がほとんど捕集されていない。また、試験ケース IT-A1 (IFA-758) および IT-A2 (IFA-759) については、それぞれ 75℃および 120℃で乾燥した試験体を用いているので、水蒸気で放出される水分量は皆無となっている。

表 2.52 キャプセルより放出された水分量

試験 ID	キャプセル #	実施 状況	照射 日数	水分放出量 (g)								質量差 (g) *		コン trol試験 体の自由 水量 (g)
				熱によって水蒸気として放出された水分量						放射線 による水 分分解量	総水分 放出量	乾燥 前	乾燥 後	
				初期システム		改良後システム			水蒸気 放出量 合計					
				水分捕 集タン ク	湿度・流 量より評 価	凝縮 捕集容 器	水蒸気 吸着容 器	湿度・流 量より評 価						
IT-A1	IFA-758	終了	50	N/A	N/A	0.0	N/A	0.0	0.0	1.0	1.0	1.1		8.7
IT-A2	IFA-759	終了	61	N/A	N/A	0.0	0.1	0.0	0.1	0.5	0.6	1.4		0.0
IT-A3	IFA-760	終了	81	25	2.0	N/A	N/A	N/A	27.0	43.1	70.1	67.1		84.0
IT-A4	IFA-761	終了	56	N/A	N/A	50.0	0.2	0.0	50.2	30.1	80.3	65.3		84.0
PPT-B	IFA-753	終了	25	3	1.2	N/A	N/A	N/A	4.2	27.4	31.6	34.5	49.6	66.6
PPT-C	IFA-752	終了	45	N/A	N/A	15.5	N/A	0.3	15.8	23.1	38.9	46.4	52.7	66.6
PPT-D	IFA-751	終了	156	N/A	N/A	13.0	0.4	0.0	13.4	34.2	47.6	48.2	51.8	66.6
PPT-E	IFA-750	終了	299	5	1.4	0.0	0.0	0.0	6.4	31.3	37.7	11.7	46.3	66.6

□ : 初期システムによる水分捕集量

□ : 改良後システムによる水分捕集量

N/A : 各試験における計測で、適用されていない項目

* : 質量差について、相互作用試験 (IT) は照射前後の差を、物理特性試験 (PPT) は照射前後の差に加え、照射前と照射かつ乾燥後の差を示す。

水分捕集方法の解説 ・水分捕集タンク : 水分捕集システムの最初に設置 (冷却機能がないので、凝縮量が少なかった。)

・湿度・流量より評価 : 水分捕集容器の下流側の湿度と流量により評価

・凝縮捕集容器 : 冷却により水蒸気を凝縮させ水分として回収する容器

・水蒸気吸着容器 : 凝縮容器の下流側にある水蒸気吸着容器、塩化カルシウムによる吸着

・湿度・流量より評価 : 水分捕集容器の下流側の湿度と流量により評価

表 2. 53 セメントペースト試験体の自由水量および化学的結合水量

No.	乾燥温度 (°C)	試験体質量(g)		自由水(g)	
		乾燥前	乾燥後		平均
1	75	138.89	115.74	23.2	23.1
2		138.54	115.52	23.0	
3		138.6	115.64	23.0	
4		138.73	115.78	23.0	
5		139.6	116.29	23.3	
6	120	139.82	113.2	26.6	26.3
7		139.08	112.72	26.4	
8		139.15	112.84	26.3	
9		139.53	113.24	26.3	
10		137.96	111.88	26.1	
推定値	105	(75°Cと120°Cの線形補間より推定)			25.2
Φ4×6cmセメントペースト試験体質量		139.0 g			
全水分量		46.3 g		(w/c=0.5)	
化学的結合水量		21.1 g			

表 2.54 コンクリート試験体の自由水量および化学的結合水量

No.	骨材種類	管理試験体 (月)	試験体質量(g)		自由水(g)	
			乾燥前	乾燥後		平均値
1	砂利	4	181.29	173.55	7.74	7.56
2			181.02	174.04	6.98	
3		8	182.59	174.8	7.79	
4			182.69	174.88	7.81	
5		16	179.14	171.54	7.60	
6			178.63	171.15	7.48	
7			179.95	172.44	7.51	
Φ4×6cmコンクリート試験体質量			180.8 g			
全水分量			13.6 g	(調合より)		
化学的結合水量			6.1 g			

No.	骨材種類	管理試験体 (月)	試験体質量(g)		自由水(g)	
			乾燥前	乾燥後		平均値
1	碎石	4	181.65	174.48	7.17	7.31
2			180.00	172.85	7.15	
3		8	183.15	175.46	7.69	
4			182.77	175.08	7.69	
5		16	182.38	175.03	7.35	
6			182.04	174.87	7.17	
7			182.36	175.38	6.98	
Φ4×6cmコンクリート試験体質量			182.1 g			
全水分量			14.2 g	(調合より)		
化学的結合水量			6.9 g			

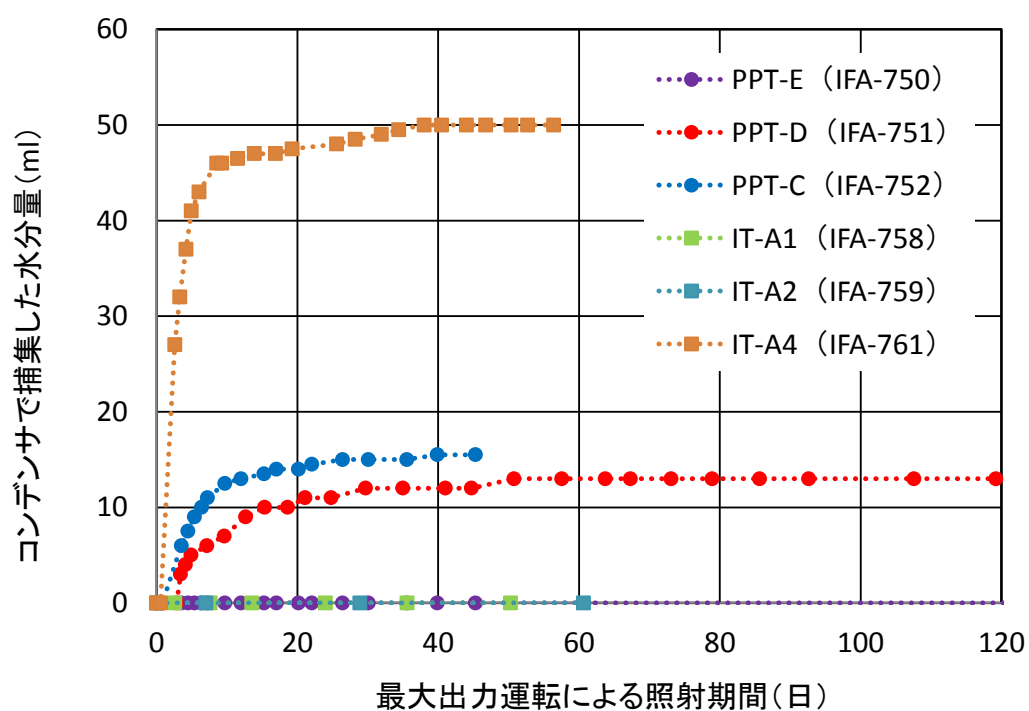


図 2.242 コンデンサで捕集した水分量の時間変化

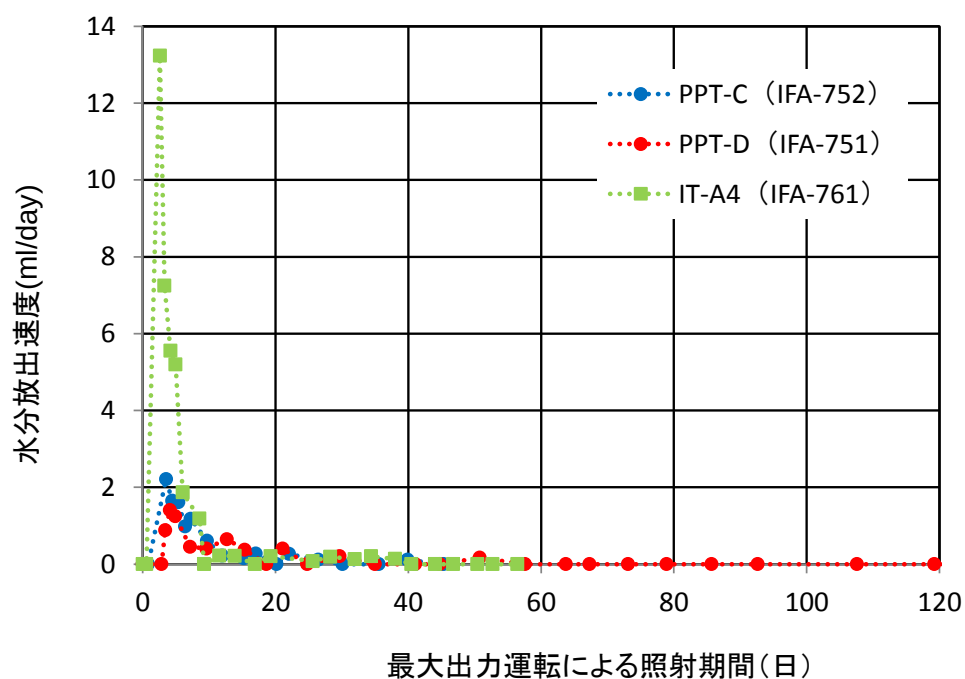


図 2.243 コンデンサで捕集した水分の放出速度の時間変化

2. 4. 2 ガス発生速度と成分分析

(1) 相互作用試験における比較検討

試験ケース IT-A1 (IFA-758)、IT-A2 (IFA-759)、IT-A3 (IFA-760) および IT-A4 (IFA-761) について、計測結果を比較検討する。図 2.244 から図 2.247 に IT-A1、IT-A2、IT-A3 および IT-A4 のキャプセル内圧の時間変化を示す。図 2.248 および図 2.249 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.250 および図 2.251 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.252 および図 2.253 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2.254 および図 2.255 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。

IT-A3 (IFA-760) および IT-A4 (IFA-761) では、封緘状態のセメントペースト試験体を用いて照射試験を行っており、試験体には非常に多くの自由水（試験体 4 体で 84g 程度）が存在していたと考えられる。一方、IT-A1 (IFA-758) では、75℃乾燥のセメントペースト試験体を用いて照射試験を行っており、試験体には自由水（試験体 4 体で 8.7g 程度）がほとんど存在していない状態であり、IT-A2 (IFA-759) では、120℃乾燥のセメントペースト試験体を用いて照射試験を行っており、試験体には自由水が全く存在していない状態であったと考えられる。

その結果、発生圧力総計やガス発生量には顕著な差が見られ、50 日間の照射により発生圧力は約 50 倍となっている。すなわち、非常に強い中性子照射条件にもかかわらず、化学的結合水は非常に安定した状態にあると考えられる。なお、IT-A1 (IFA-758) で、圧力が 1.25bar に到達する前に圧力が放出されているが、これは、定期的な発生ガスの成分分析を行うために、圧力が 1.25bar に到達する前に圧力を放出したためである。

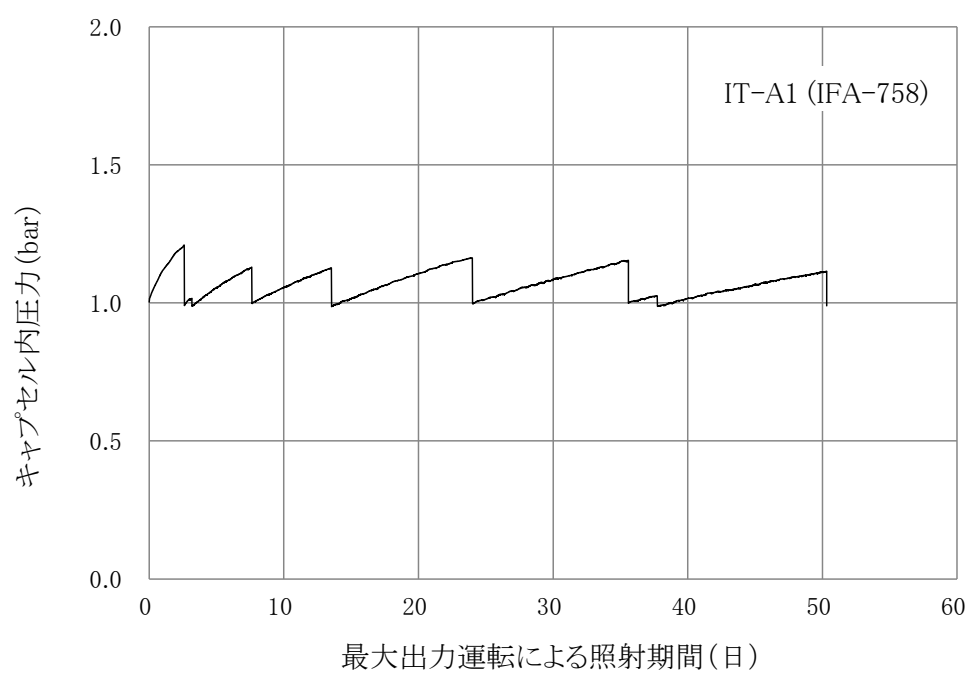


図 2. 244 キャプセル内圧力の時間変化 (試験ケース IT-A1)

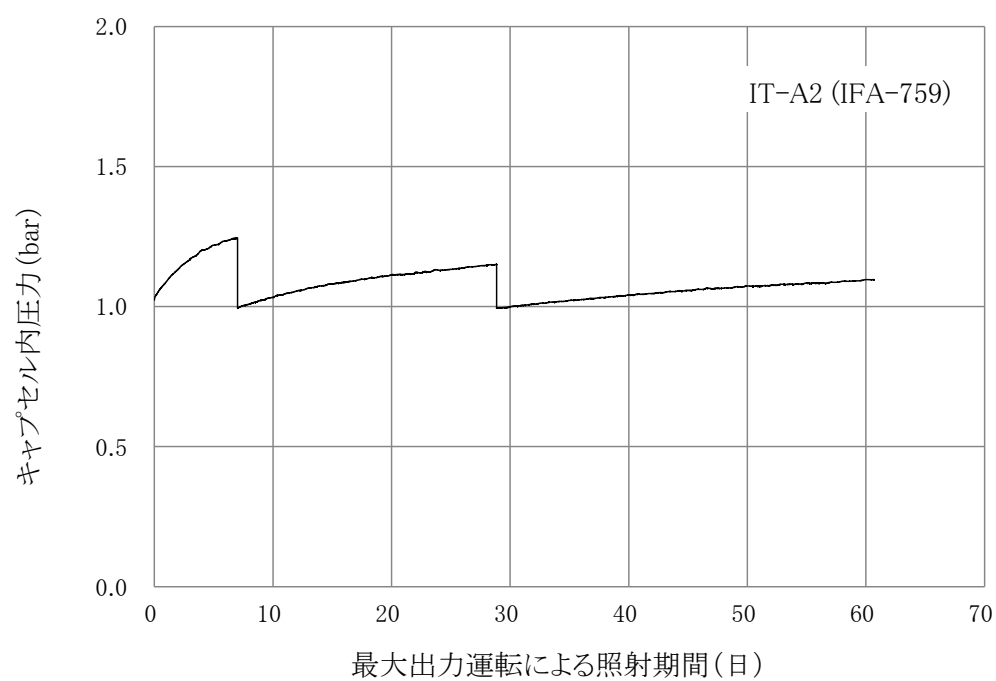


図 2. 245 キャプセル内圧力の時間変化 (試験ケース IT-A2)

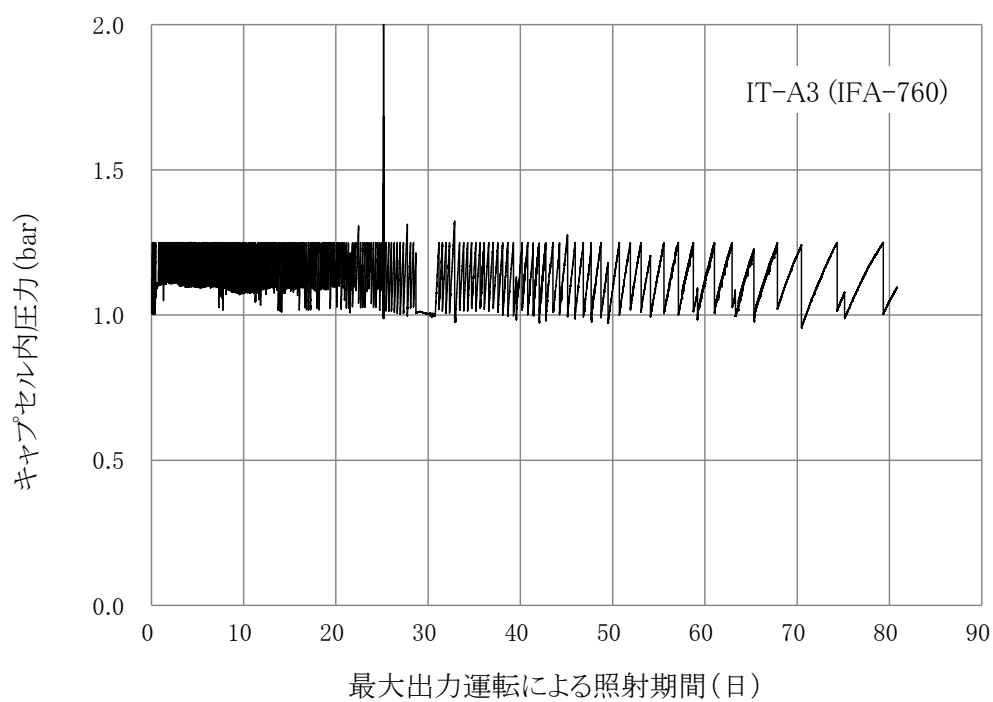


図 2.246 キャプセル内圧力の時間変化 (試験ケース IT-A3)

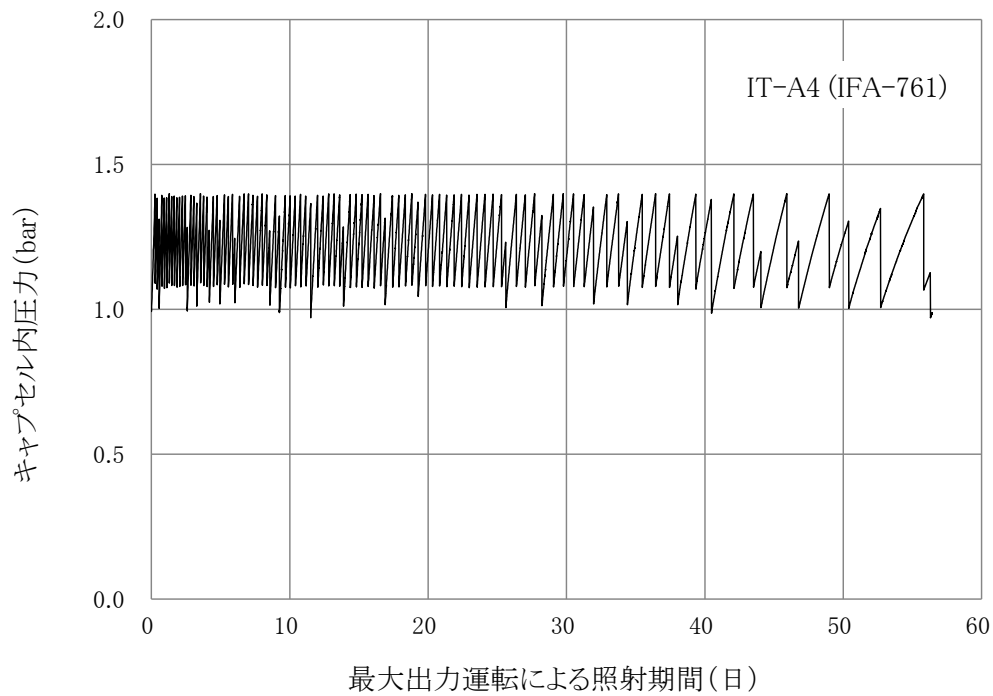


図 2.247 キャプセル内圧力の時間変化 (試験ケース IT-A4)

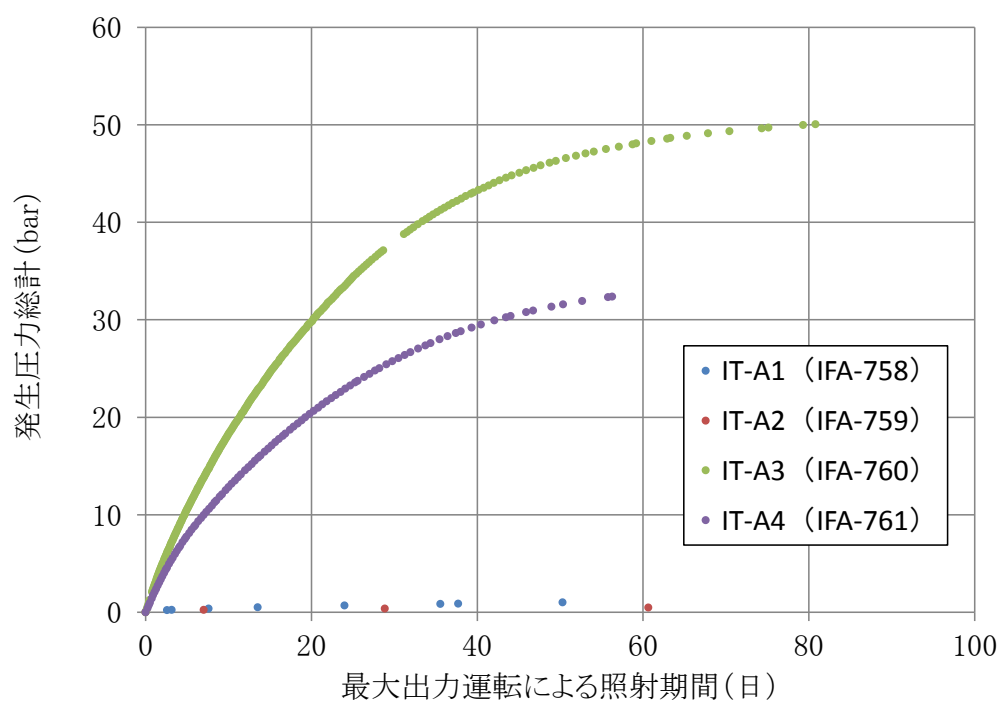


図 2. 248 発生圧力総計の時間変化

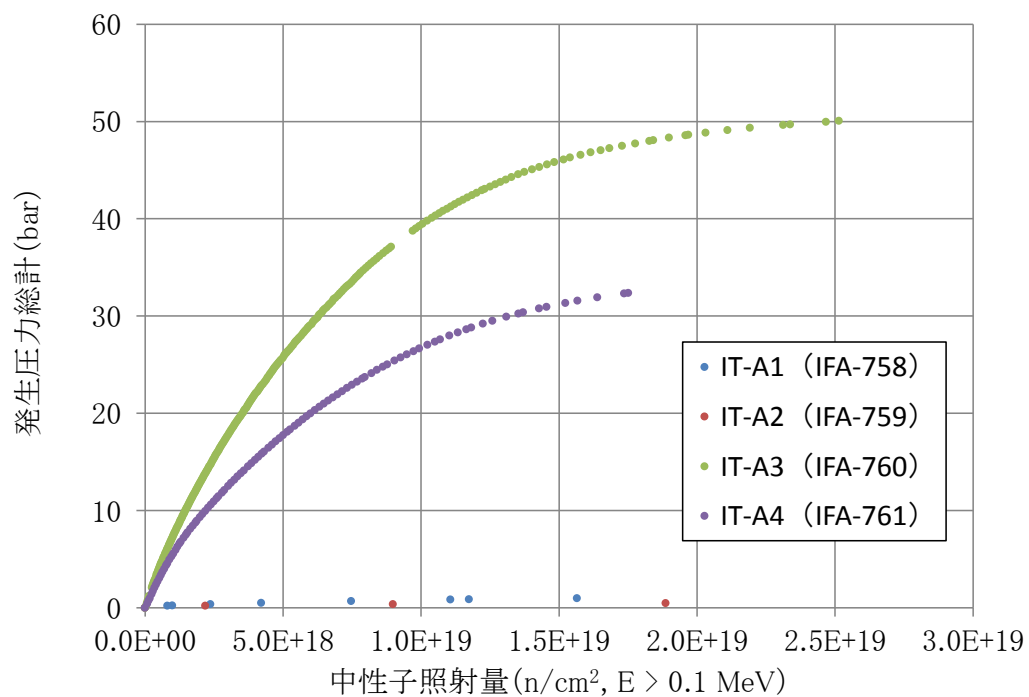


図 2. 249 発生圧力総計の照射量に対する変化

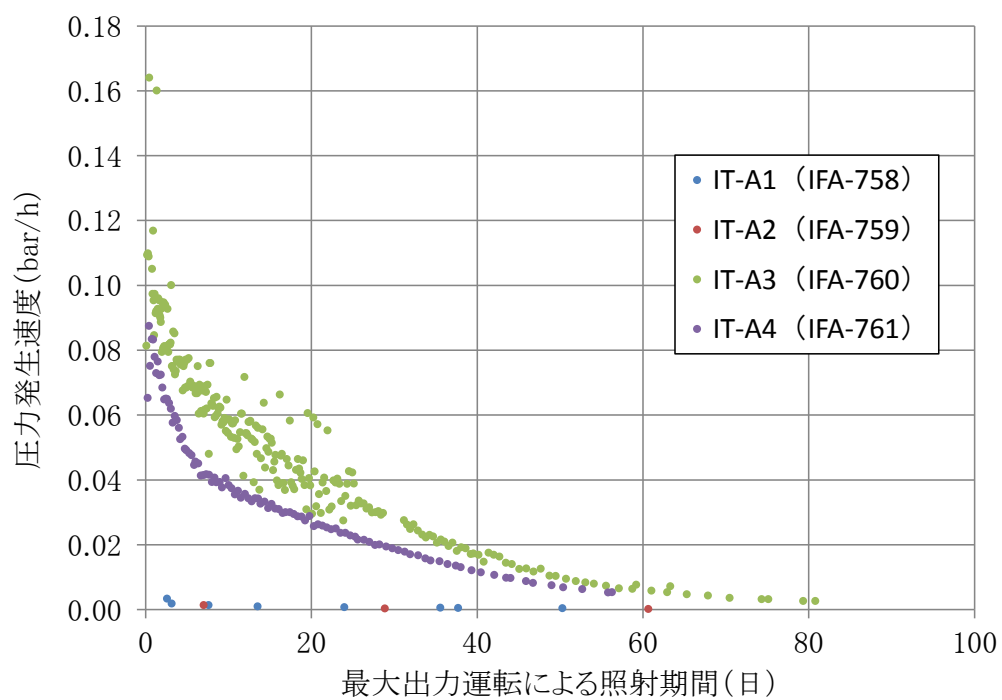


図 2.250 圧力発生速度の時間変化

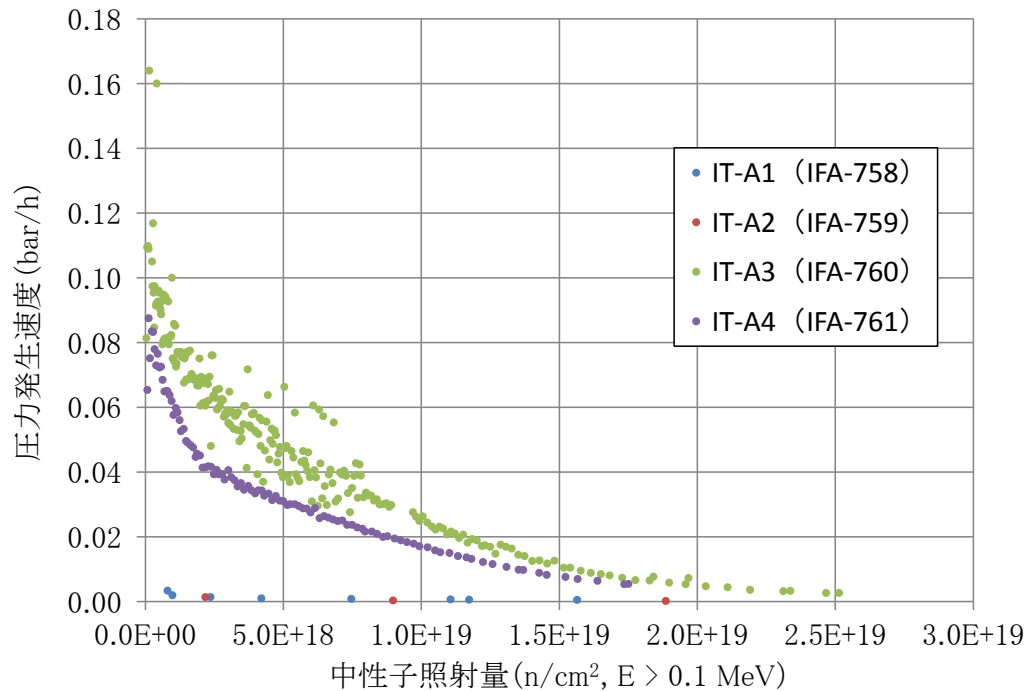


図 2.251 圧力発生速度の照射量に対する変化

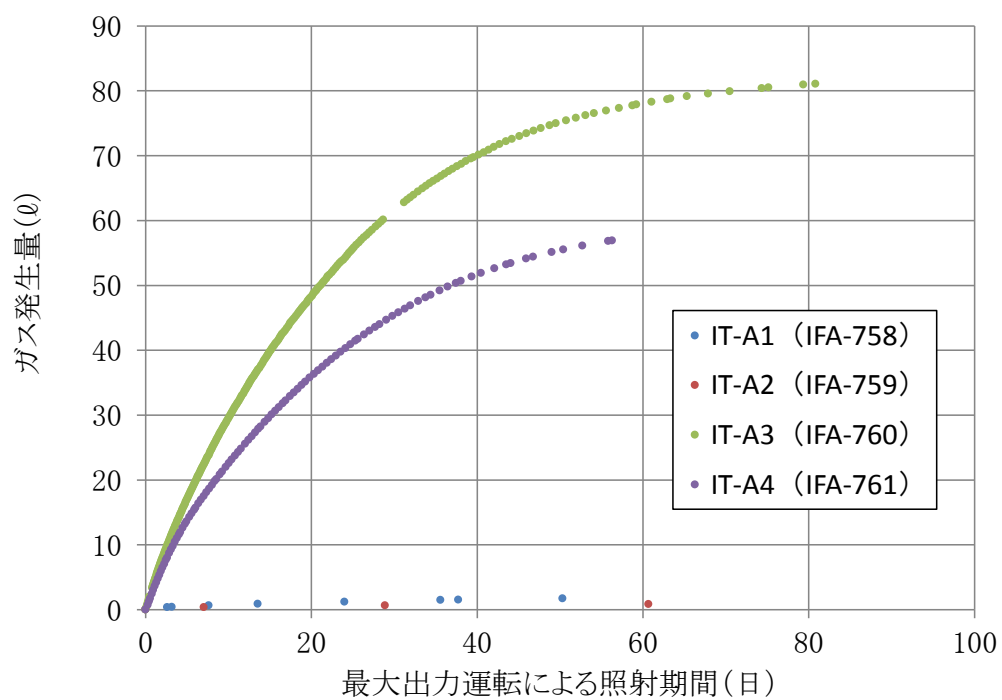


図 2.252 ガス発生量の時間変化 (0℃、1 気圧)

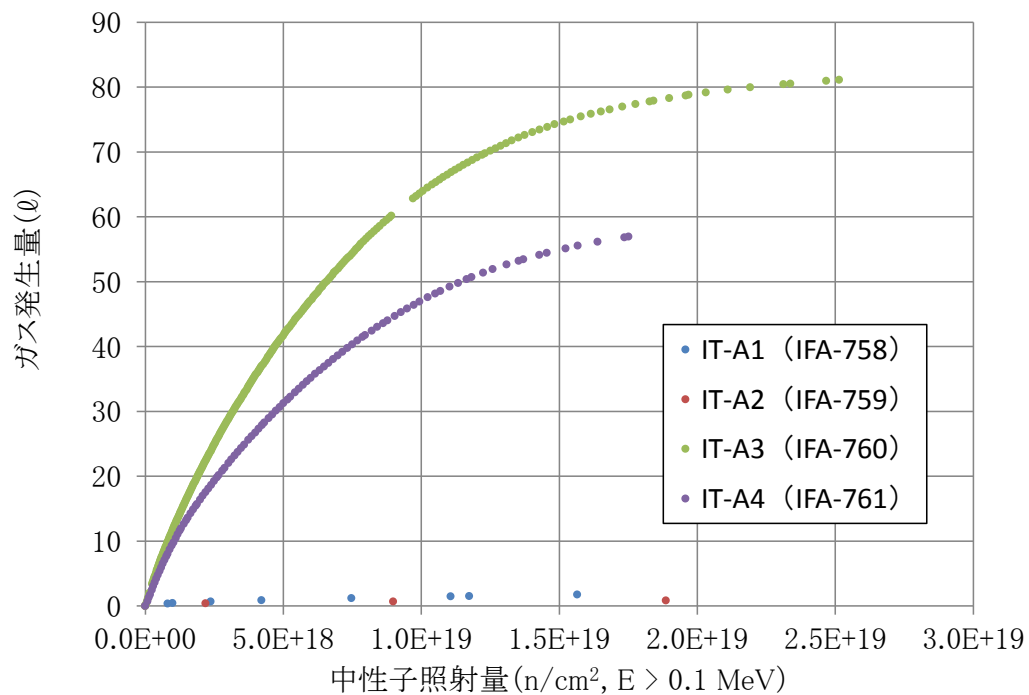


図 2.253 ガス発生量の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

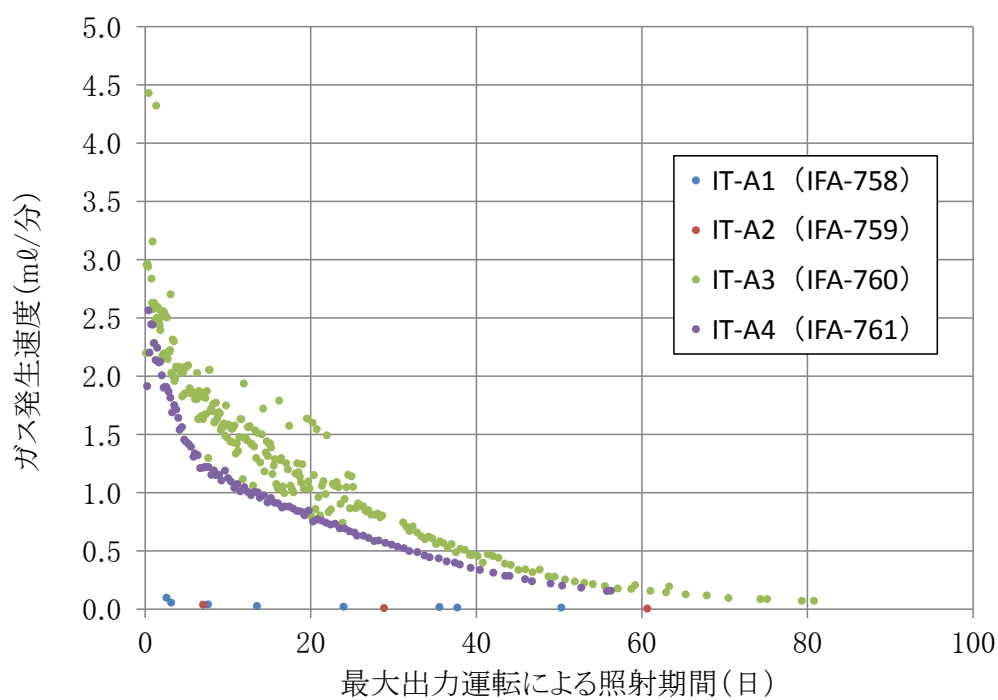


図 2.254 ガス発生速度の時間変化 (0℃、1 気圧)

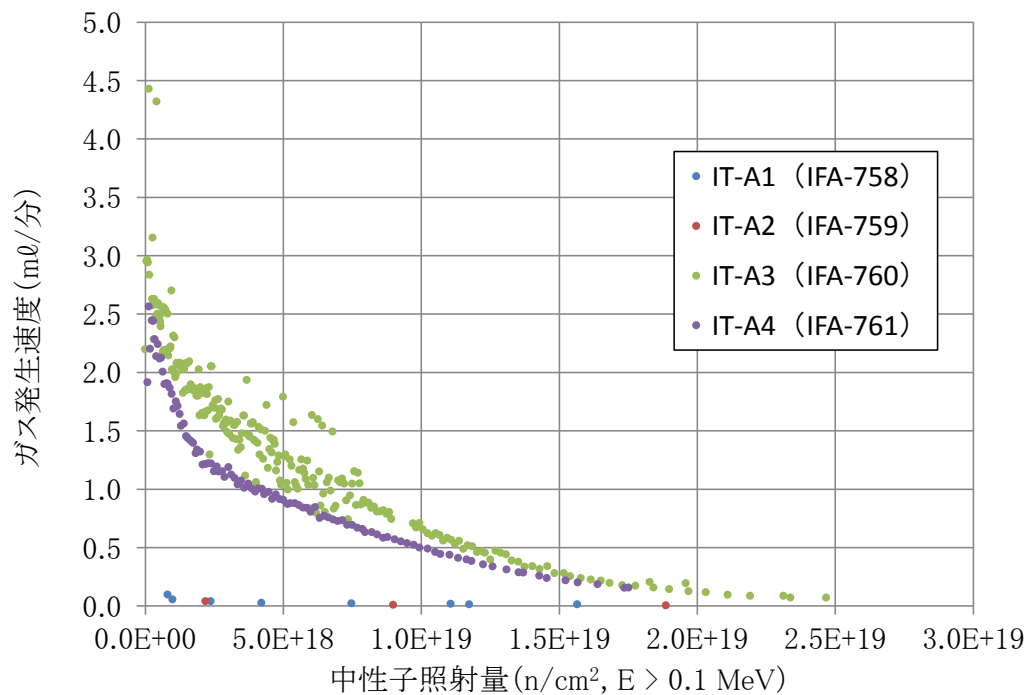


図 2.255 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

(2) 物理試験における比較検討

試験ケース PPT-B(IFA-753)、PPT-C(IFA-752)、PPT-D(IFA-751)および PPT-E(IFA-750)について、ガス発生速度を比較検討する。

図 2. 256 および図 2. 257 に、発生圧力総計の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 258 および図 2. 259 に、圧力発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 260 および図 2. 261 に、ガス発生量の時間変化および照射量に対する変化を示す。図 2. 262 および図 2. 263 に、ガス発生速度の時間変化および照射量に対する変化を示す。

発生圧力総計やガス発生量については、どの試験ケースでも時間経過に伴って発生速度が低下し、80 日間の照射により、発生量はほぼ一定値に収束し、発生速度はほぼゼロとなっている。

また、これらの試験条件はほぼ同一となっているが、発生圧力総計やガス発生量については、20 日間の照射により PPT-B (IFA-753) は PPT-C (IFA-752) の倍となっている。そこで、表 2. 55 に各試験ケースの照射状況を比較して示す。中性子束は $3.60 \times 10^{12} \text{n/cm}^2/\text{s}$ と各試験ケースで共通となっているが、PPT-B (IFA-753) では稼働率が 85%と他の試験ケースよりも 10%程度高くなっており、また、PPT-E (IFA-750) では、ガンマ線線量率が高くガンマ発熱が大きいのでコンクリート温度が高くなっている。このような理由により、PPT-B (IFA-753) および PPT-E (IFA-750) では照射の初期の段階で発生圧力総計やガス発生量が大きめの数値となっていると考えられる。

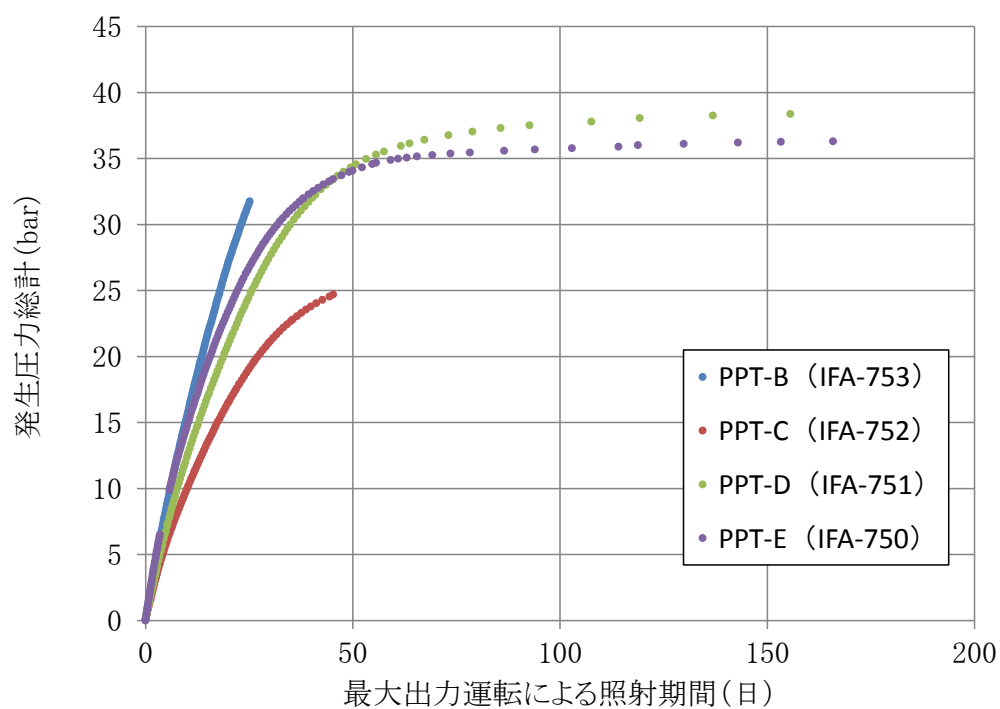


図 2.256 発生圧力総計の時間変化

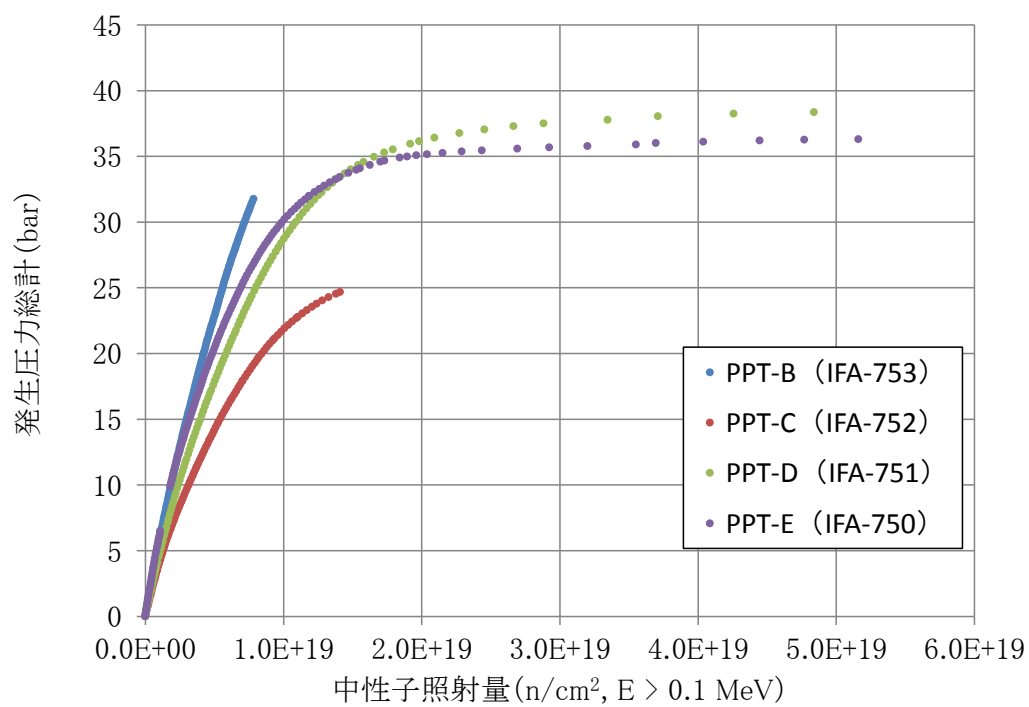


図 2.257 発生圧力総計の照射量に対する変化

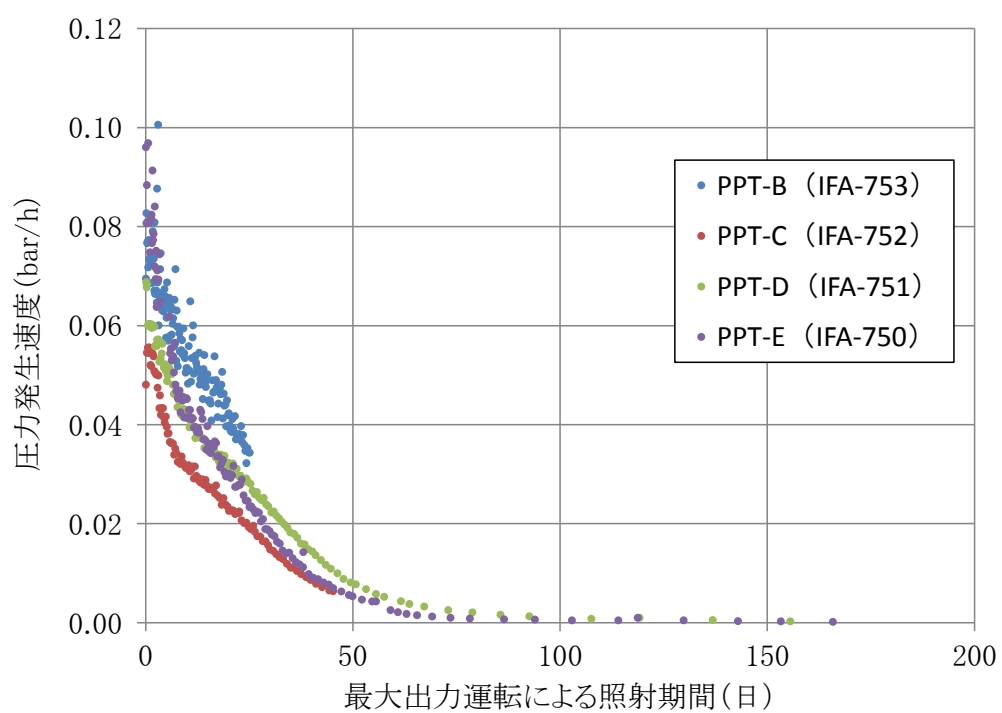


図 2. 258 圧力発生速度の時間変化

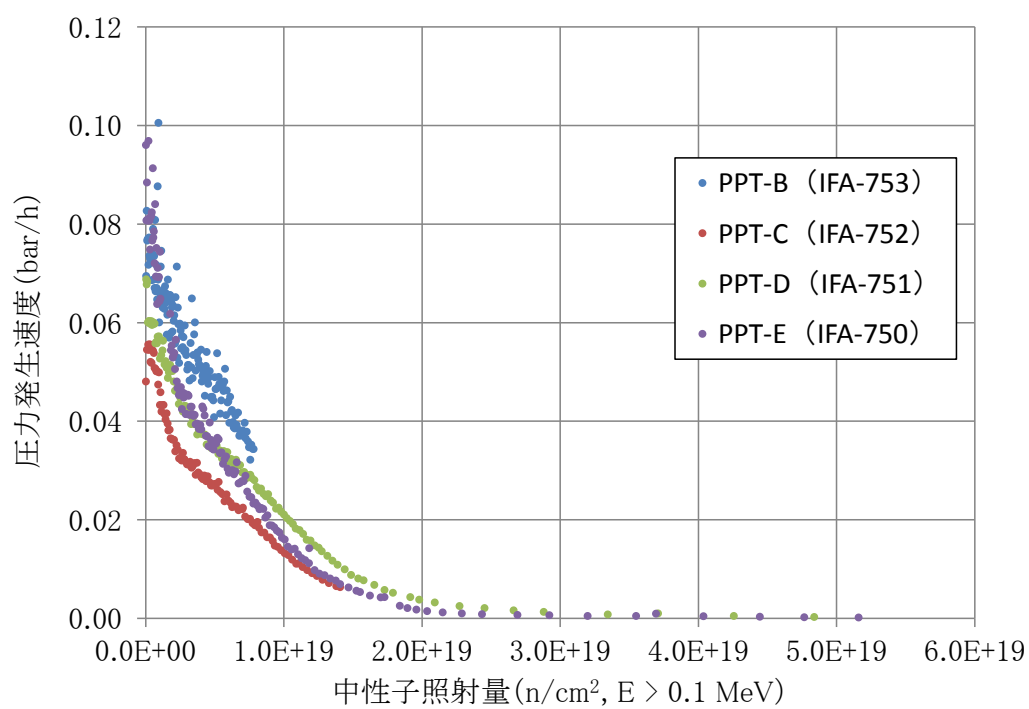


図 2. 259 圧力発生速度の照射量に対する変化

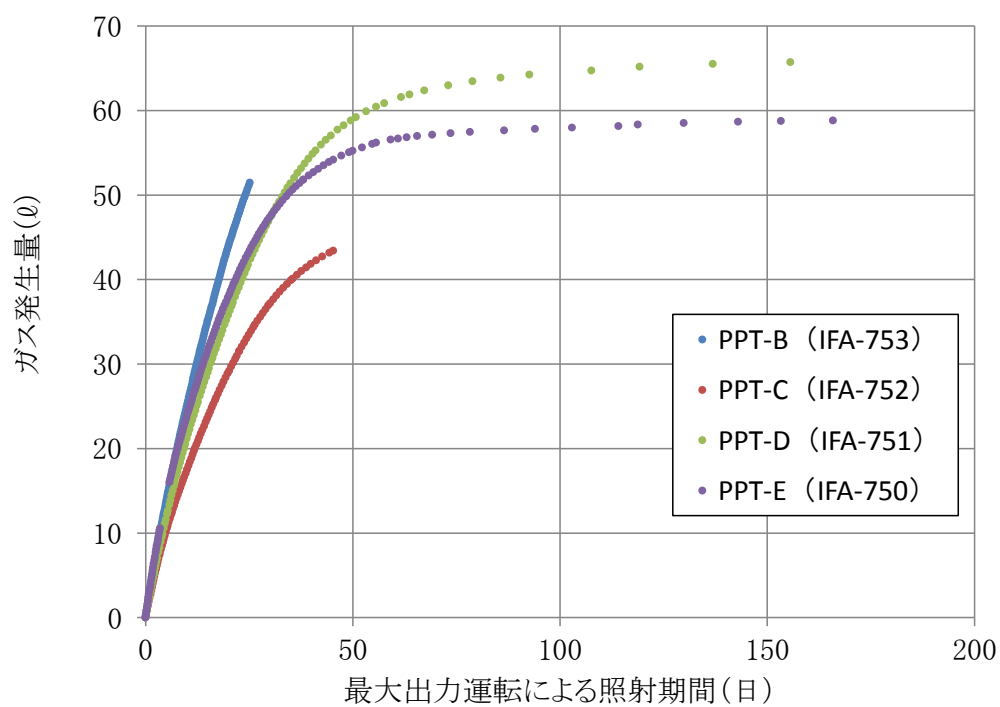


図 2.260 ガス発生量の時間変化 (0℃、1 気圧)

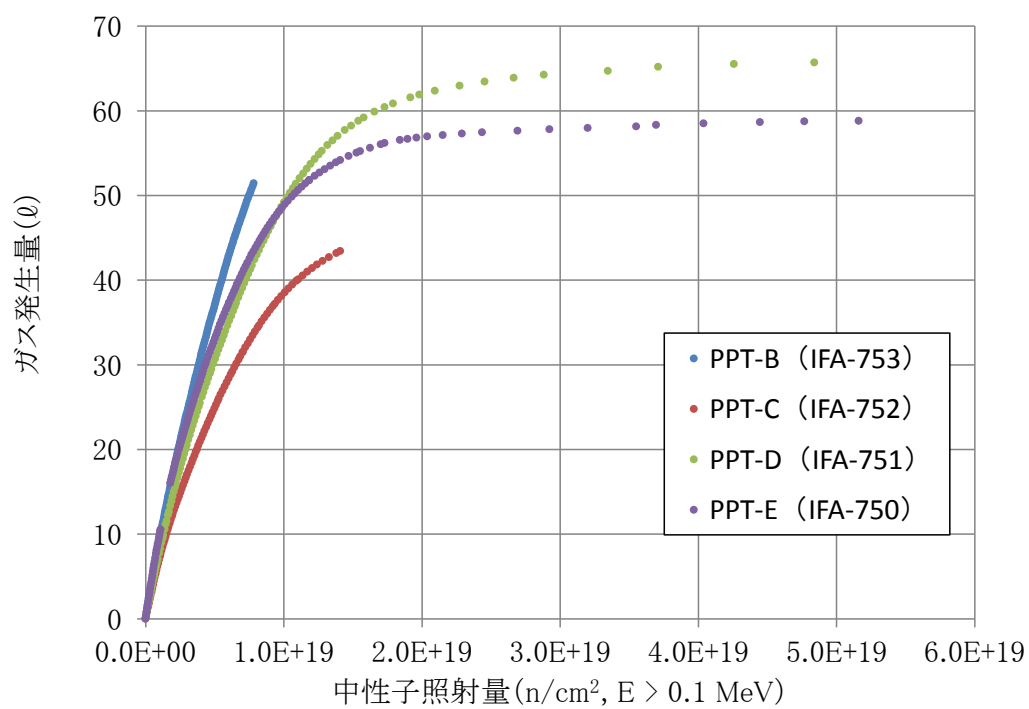


図 2.261 ガス発生量の照射量に対する変化 (0℃、1 気圧)

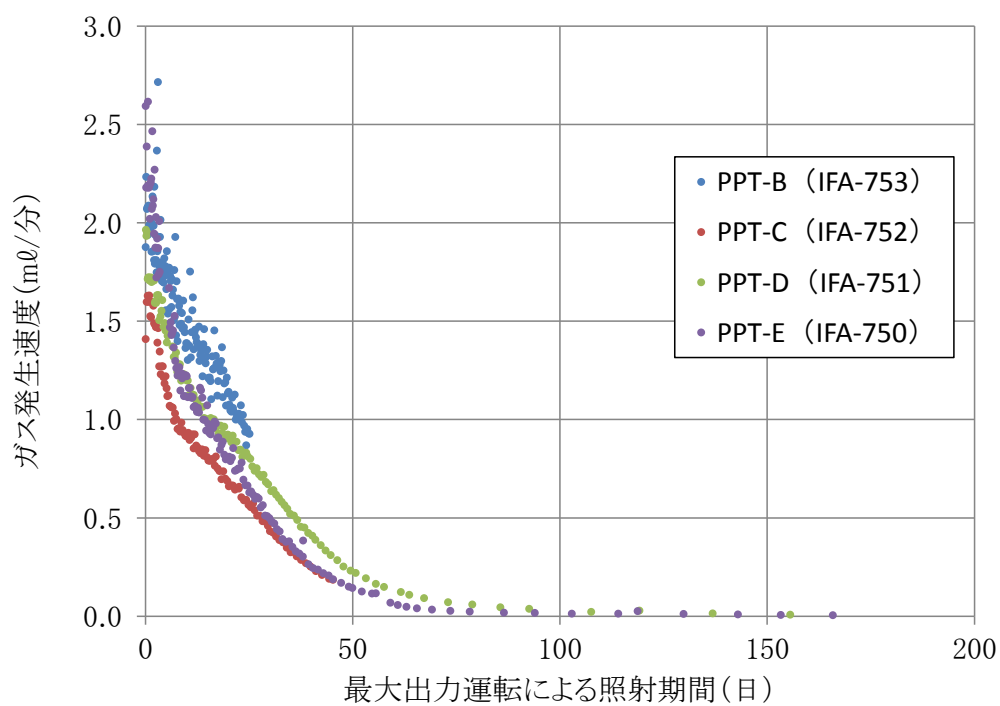


図 2.262 ガス発生速度の時間変化 (0°C、1 気圧)

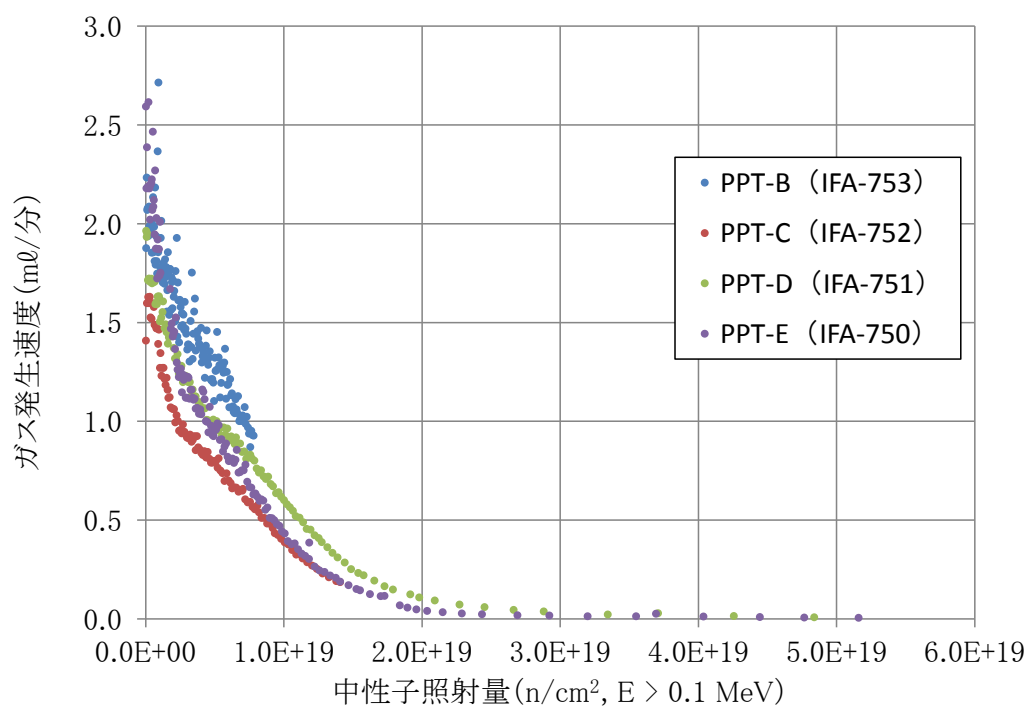


図 2.263 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0°C、1 気圧)

表 2.55 各試験ケースの照射条件

試験名称	照射孔 位置	試験 状況	中性子束 ($E \geq 0.1 \text{ MeV}$)	ガンマ線 線量率	コンクリート 温度	JEEP II 稼働率	最大出力 運転による 照射日数
			($\text{n}/\text{cm}^2/\text{s}$)	(kGy/h)	($^{\circ}\text{C}$)		
PPT-B (IFA-753)	#52	完了	3.60×10^{12}	3.29×10^2	71	0.855	25.2
PPT-C (IFA-752)	#36	完了	3.60×10^{12}	2.95×10^2	70	0.765	45.3
PPT-D (IFA-751)	#36	完了	3.60×10^{12}	3.08×10^2	70	0.789	155.6
PPT-E (IFA-750)	#52	完了	3.60×10^{12}	3.67×10^2	75	0.757	299.4

JEEP II 稼働率：定期的な停止期間を除いた稼働率（稼働期間中の照射サンプルの入れ替えによる停止などを考慮した稼働率）

(3) 発生ガスの組成分析

中性子照射試験により水素ガスおよび酸素ガスが放出されるが、水の放射線分解により発生するため、水素と酸素の体積比は2:1となると考えられる。この状況や他のガスの発生について把握するために、発生ガスのサンプリングを行い、ガスクロマトグラフィーで成分分析を行った。

図 2. 264 に、補正前の試験ケース PPT-D (IFA-751) の分析結果を例として示す。水の放射線分解を基本とすると、水素ガスと酸素ガスが発生しているだけでなく、少量ではあるものの窒素ガスが存在していることがわかる。これは、計測システムから発生ガスをバックでサンプリングする際に空気が混入していることが原因であること推定されたので、空気における窒素と酸素の構成比に基づき、各試験ケースの酸素量を補正することとした。空気の窒素と酸素の含有率については、JIS W0201-1990 (ISO 2533-1975) 標準空気に基づいて、窒素:酸素=0.788:0.212 と設定した。なお、試験ケース PPT-D については、代表例として酸素量補正前の分析結果を示したが、他の試験ケースについては酸素量補正後の結果のみ示す。

表 2. 56 に、試験ケース PPT-D (IFA-751) の窒素を除去し酸素量を補正したガスサンプルの組成分析結果を示す。図 2. 265 に、水素ガスと酸素ガスの組成の時間変化および水素/酸素の比率の時間変化を示す。試験ケース PPT-D (IFA-751) では、封緘状態で保管したコンクリート試験体の照射試験を行っており、最初の 40 日間は水素と酸素の発生体積比が 2 程度となっているが、40 日を過ぎると水素の比率がかなり多くなっており、試験の最終段階では体積比が 8 以上となっている。

表 2. 57 に、試験ケース PPT-C (IFA-752) のガスサンプルの組成分析結果を示す。図 2. 266 に、水素ガスと酸素ガスの組成の時間変化および水素/酸素の比率の時間変化を示す。試験体の水分条件は PPT-D (IFA-751) と同一で、封緘状態で保管したコンクリート試験体の照射試験を行っており、水素ガスと酸素ガスの体積比は 40 日間の照射期間を通じて、ほぼ 2:1 となっている。

表 2. 58 に、試験ケース PPT-E (IFA-750) のガスサンプルの組成分析結果を示す。図 2. 267 に、水素ガスと酸素ガスの組成の時間変化および水素/酸素の比率の時間変化を示す。試験体の水分条件は PPT-D (IFA-751) と同一で、封緘状態で保管したコンクリート試験体の照射試験を行っており、最初の 40 日間は水素と酸素の発生体積比が 2 程度となっているが、40 日を過ぎると水素の比率が多くなっており、50 日の段階で体積比が 3.5 程度となっている。また、E については、発生ガスの成分分析の頻度を維持するために、キャプセルの開放圧力を 1.1bar に落としたが、それでもガス分析量が十分でなく PPT-E については 50 日までのデータしか取得できなかった。

表 2. 59 に、試験ケース IT-A1 (IFA-758) のガスサンプルの組成分析結果を示す。図 2. 268 に、水素ガスと酸素ガスの組成の時間変化を示す。IT-A1 (IFA-758) では、75℃で乾燥させたセメントペースト試験体を用いた照射試験を行っており、照射の初

期の段階から発生ガス量は非常に小さく、依然として、照射開始時のフラッシングに用いたヘリウムが残っていることがわかる。また、発生しているガスの大半が水素であり、酸素はほとんど発生していない。

表 2.60 に、試験ケース IT-A2 (IFA-759) のガスサンプルの組成分析結果を示す。図 2.269 に、水素ガスと酸素ガスの組成の時間変化および水素/酸素の比率の時間変化を示す。試験ケース IT-A2 (IFA-759) では、120°Cで乾燥させたセメントペースト試験体の照射試験を行っており、ガス発生量が非常に少なくガスサンプルの組成分析は2回のみとなった。IT-A1 (IFA-758) と同様で、発生しているガスの大半が水素であり、酸素はほとんど発生していない。

表 2.61 に、試験ケース IT-A3 (IFA-760) のガスサンプルの組成分析結果を示す。図 2.270 に、水素ガスと酸素ガスの組成の時間変化および水素/酸素の比率の時間変化を示す。試験ケース IT-A3 (IFA-760) では、封緘状態で保管したセメントペースト試験体の照射試験を行っており、水素ガスと酸素ガスの体積比は20日目まではほぼ2:1となっているが、その後は水素の割合が増え、70日時点で4.7:1程度となっている。

表 2.62 に、試験ケース IT-A4 (IFA-761) のガスサンプルの組成分析結果を示す。図 2.271 に、水素ガスと酸素ガスの組成の時間変化および水素/酸素の比率の時間変化を示す。試験ケース IT-A4 (IFA-761) では、封緘状態で保管したセメントペースト試験体の照射試験を行っており、水素ガスと酸素ガスの体積比は20日間の照射期間を通じて、ほぼ2:1となっている。

封緘状態で保管していたコンクリート試験体を用いた試験ケース PPT-C (IFA-752)、PPT-D (IFA-751) および PPT-E (IFA-750) の結果から、照射開始より40日間は水素ガスと酸素ガスの組成比率は2:1となっているが、40日を超えると水素の割合が大きくなり、130日を過ぎると8:1となっている。

封緘状態で保管していたセメントペースト試験体を用いた試験ケース IT-A3 (IFA-760) および IT-A4 (IFA-761) の結果から、照射開始より20日間は水素ガスと酸素ガスの組成比率は2:1となっているが、20日を超えると水素の割合が大きくなっている。

自由水が非常に少ないセメントペースト試験体を用いた試験ケース IT-A1 (IFA-758) および IT-A2 (IFA-759) の結果から、発生ガスの大半は水素ガスであり、酸素発生量は非常に低いレベルで推移している。したがって、水分の放射線分解により水素が発生しているとは考えにくく、これは、水ではなくシラノール基などが分解の主体となるものと推察された。水素の組成が多くなる理由は、照射時間の経過にともない自由水が減少するので水分の放射線分解量が低減すると、セメントペースト中のシラノール基から発生する水素の組成比に及ぼす影響が大きくなり、水素の構成比が大きくなると考えられる。

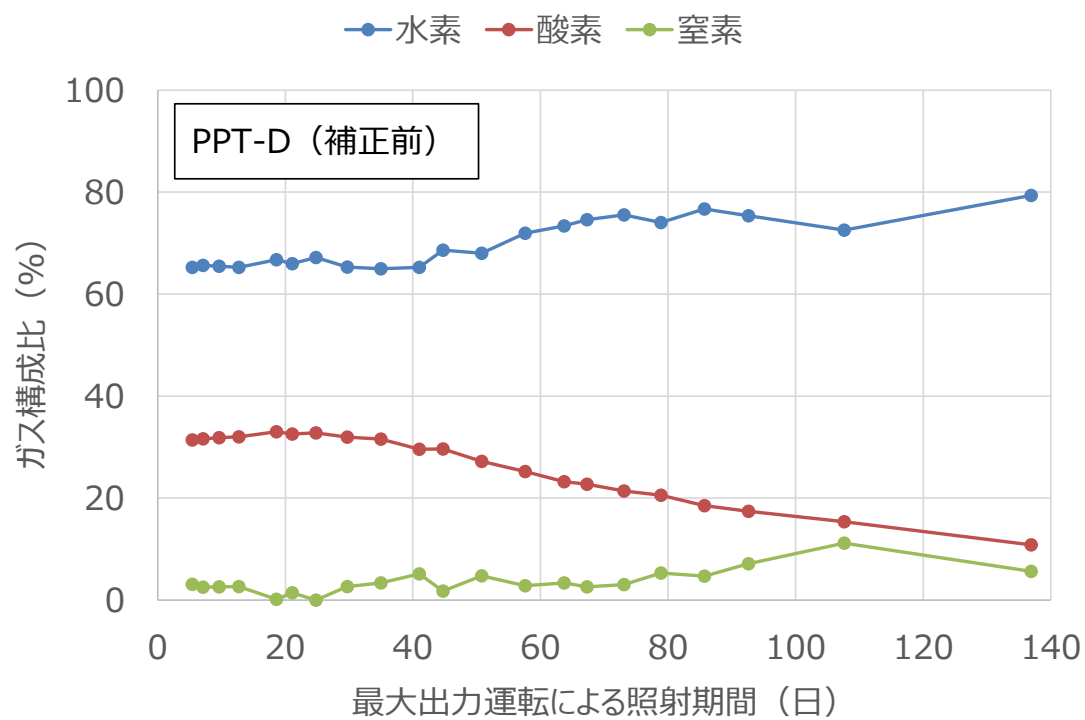


図 2.264 試験ケース PPT-D (IFA-751) の分析結果 (補正前)

表 2.56 ガスサンプルの組成分析結果（補正後、PPT-D：IFA-751）

サンプル #	最大出力 運転日数 FPD	水素	酸素	ヘリウム	アルゴン	一酸化 炭素	二酸化 炭素	合計 (%)	水素-酸素 体積比
5	5.4	67.9	31.9	0.2	0.0	0.0	0.0	100.0	2.13
6	7.1	67.8	32.0	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.12
7	9.6	67.7	32.2	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.10
8	12.7	67.5	32.4	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.09
9	18.6	66.9	33.1	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.02
10	21.1	67.2	32.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.05
11	24.8	67.2	32.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.05
12	29.7	67.6	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.09
13	35	67.9	32.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.12
14	41	69.8	30.2	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.31
15	44.7	70.2	29.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.35
16	50.8	72.4	27.6	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.62
17	57.6	74.6	25.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.94
18	63.7	76.7	23.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	3.29
19	67.3	77.1	22.8	0.0	0.0	0.0	0.1	100.0	3.39
20	73.1	78.5	21.4	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	3.67
21	78.9	79.4	20.5	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	3.87
22	85.7	81.6	18.3	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	4.45
23	92.6	82.9	17.0	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	4.87
24	107.6	84.5	14.4	1.1	0.0	0.0	0.0	100.0	5.87
25	136.9	85.5	10.0	4.5	0.0	0.0	0.0	100.0	8.53

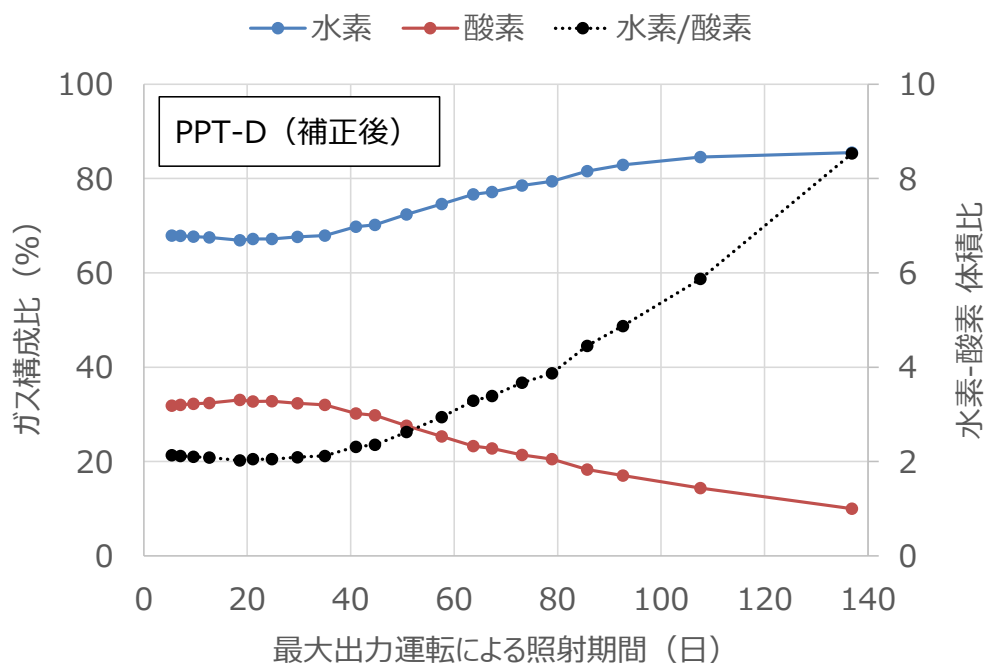


図 2.265 試験ケース PPT-D (IFA-751) の分析結果（補正後）

表 2.57 ガスサンプルの組成分析結果（補正後、PPT-C：IFA-752）

サンプル #	最大出力 運転日数 FPD	水素	酸素	ヘリウム	アルゴン	一酸化 炭素	二酸化 炭素	合計 (%)	水素-酸素 体積比
3	3.5	70.4	29.1	0.4	0.0	0.0	0.1	100.0	2.42
4	4.4	69.5	30.2	0.2	0.0	0.0	0.1	100.0	2.30
5	5.4	69.0	30.8	0.1	0.0	0.0	0.1	100.0	2.24
6	6.4	68.8	31.0	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.22
7	7.2	68.7	31.1	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.21
8	9.7	68.5	31.4	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.18
9	12	68.6	31.3	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.19
10	15.2	68.7	31.2	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.20
11	17	68.8	31.2	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.21
12	20.2	65.5	34.4	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.90
13	22	69.2	30.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.25
14	26.4	69.7	30.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.30
15	30.1	63.7	36.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.75
16	35.5	62.4	37.6	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.66
17	39.9	72.7	27.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.66

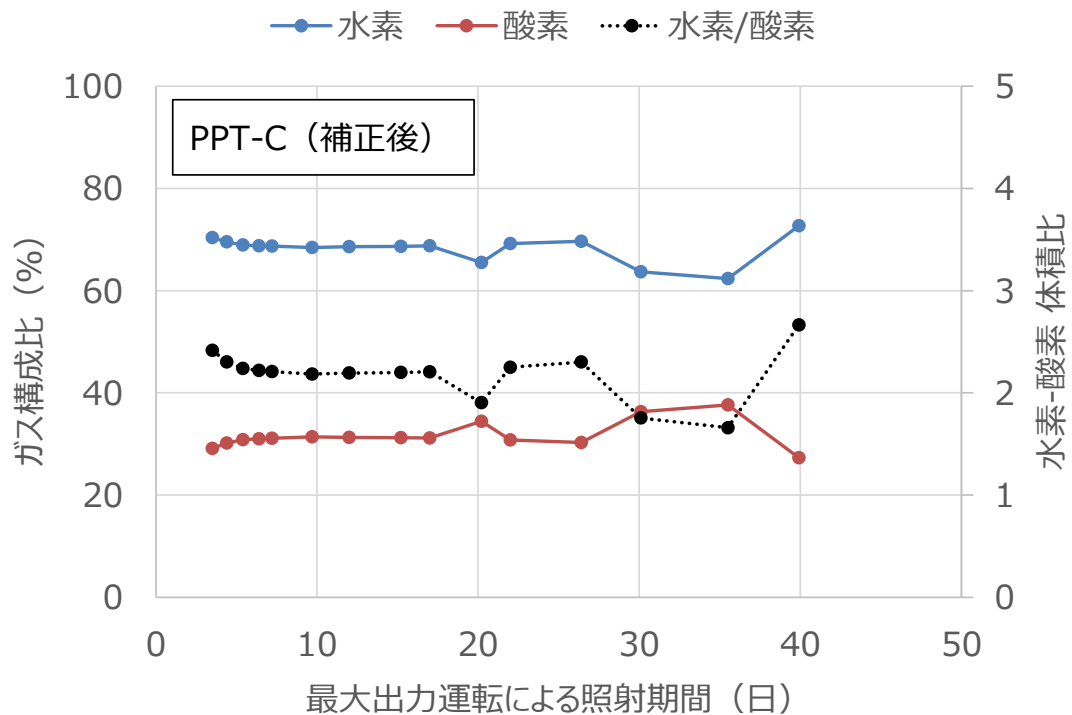


図 2.266 試験ケース PPT-C（IFA-752）の分析結果（補正後）

表 2.58 ガスサンプルの組成分析結果（補正後、PPT-E：IFA-750）

サンプル #	最大出力 運転日数 FPD	水素	酸素	ヘリウム	アルゴン	一酸化 炭素	二酸化 炭素	合計 (%)	水素-酸素 体積比
1	2.4	55.4	44.1	0.3	0.0	0.1	0.1	100.0	1.26
2	7.8	57.7	42.1	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	1.37
4	19.9	68.3	31.6	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.16
5	24.2	69.2	30.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.25
6	28.9	70.4	29.5	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.38
7	34	71.8	28.2	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.55
8	39.4	69.1	30.9	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.24
9	45.3	75.8	24.1	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	3.14
10	49.9	77.6	22.4	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	3.46

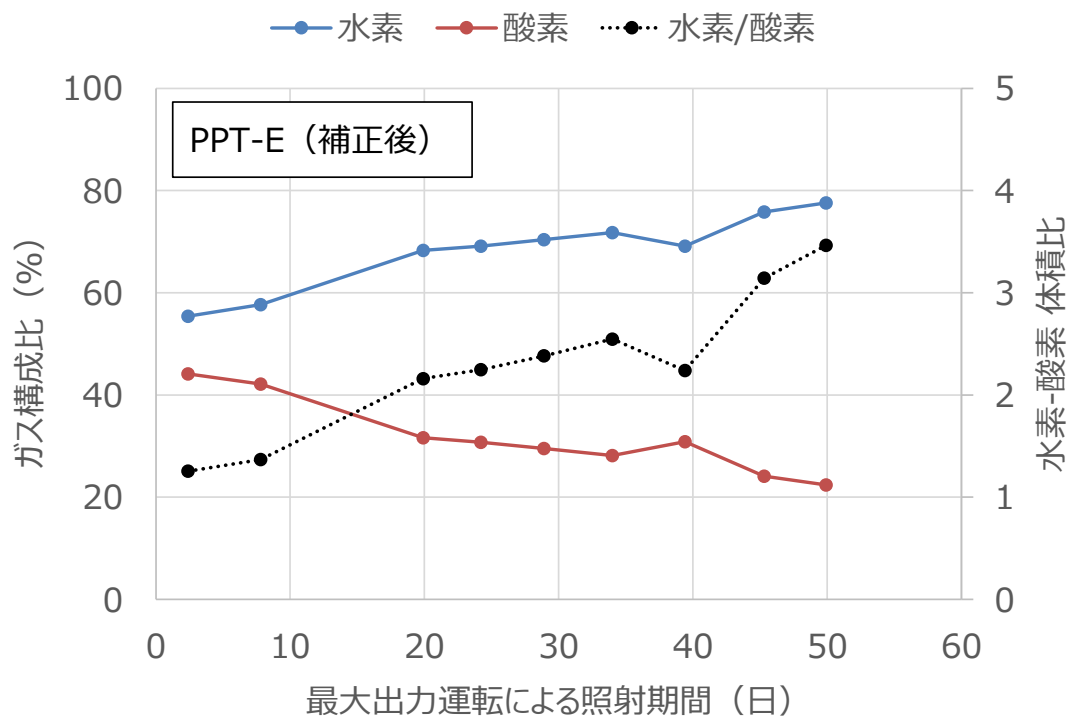


図 2.267 試験ケース PPT-E (IFA-750) の分析結果（補正後）

表 2.59 ガスサンプルの組成分析結果（補正後、IT-A1: IFA-758）

サンプル #	最大出力 運転日数 FPD	水素	酸素	ヘリウム	アルゴン	一酸化 炭素	二酸化 炭素	合計 (%)	水素-酸素 体積比
1	2.6	0.4	0.4	99.3	0.0	0.0	0.0	100.0	1.05
2	7.6	9.1	0.4	90.5	0.0	0.0	0.0	100.0	20.93
3	13.5	22.9	0.4	76.7	0.0	0.0	0.0	100.0	63.39
4	24	36.4	0.4	63.1	0.0	0.0	0.0	100.0	96.65
5	35.6	45.9	0.7	53.3	0.0	0.0	0.0	100.0	66.90
6	50.3	58.3	1.2	40.5	0.0	0.0	0.0	100.0	50.64

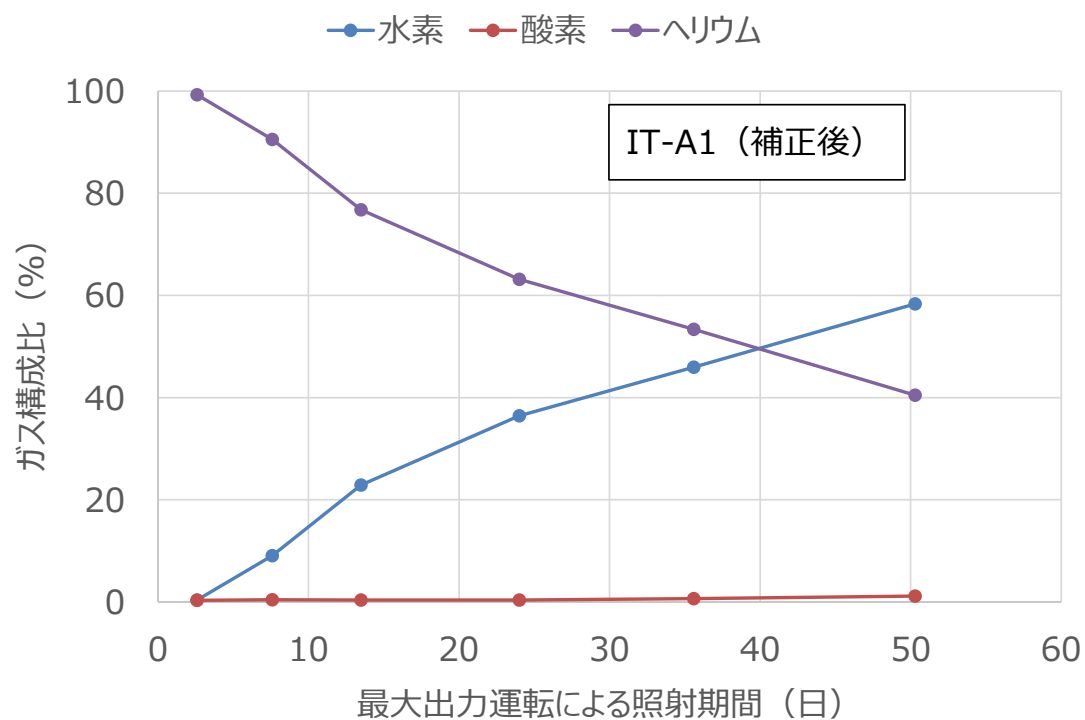


図 2.268 試験ケース IT-A1 (IFA-758) の分析結果（補正後）

表 2.60 ガスサンプルの組成分析結果（補正後、IT-A2: IFA-759）

サンプル #	最大出力 運転日数 FPD	水素	酸素	ヘリウム	アルゴン	一酸化 炭素	二酸化 炭素	合計 (%)	水素-酸素 体積比
1	7	1.2	0.2	98.6	0.0	0.0	0.0	100.0	6.48
2	28.9	97.2	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	34.15

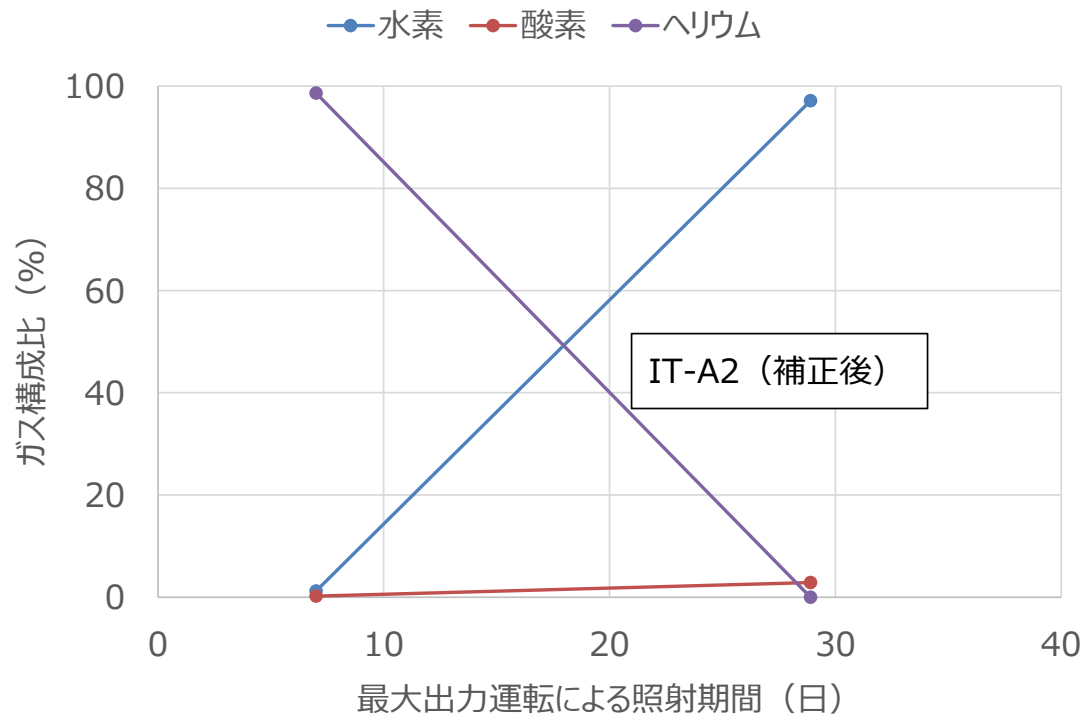


図 2.269 試験ケース IT-A2 (IFA-759) の分析結果（補正後）

表 2.61 ガスサンプルの組成分析結果（補正後、IT-A3: IFA-760）

サンプル #	最大出力 運転日数 FPD	水素	酸素	ヘリウム	アルゴン	一酸化 炭素	二酸化 炭素	合計 (%)	水素-酸素 体積比
1	22.5	62.5	37.4	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.67
3	32.9	69.8	30.0	0.2	0.0	0.0	0.0	100.0	2.33
5	45.1	71.3	28.6	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.49
6	49.5	74.3	25.6	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.90
7	54.1	73.1	26.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.73
9	70.5	82.4	17.6	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	4.68

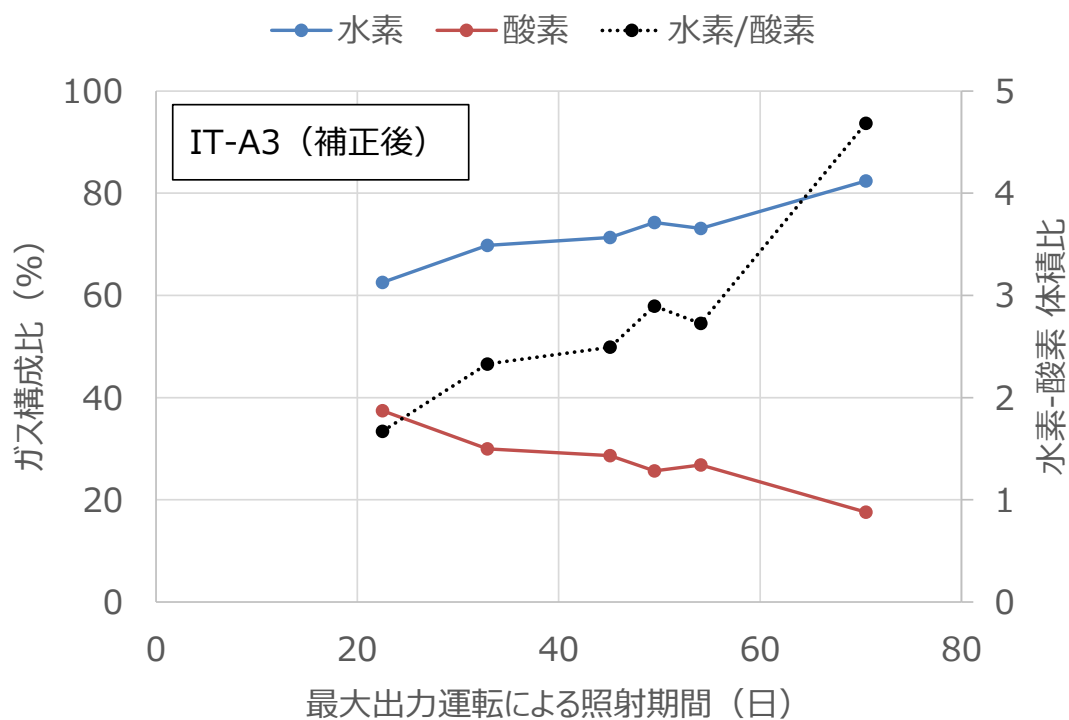


図 2.270 試験ケース IT-A3 (IFA-760) の分析結果（補正後）

表 2.62 ガスサンプルの組成分析結果（補正後、IT-A4: IFA-761）

サンプル #	最大出力 運転日数 FPD	水素	酸素	ヘリウム	アルゴン	一酸化 炭素	二酸化 炭素	合計 (%)	水素-酸素 体積比
1	0.6	41.2	7.6	51.2	0.0	0.0	0.0	100.0	5.45
2	2.6	68.4	31.2	0.3	0.0	0.0	0.1	100.0	2.19
3	3.3	66.8	32.9	0.2	0.0	0.0	0.1	100.0	2.03
4	4.2	66.7	33.1	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.02
5	5	66.7	33.1	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.01
6	6	66.6	33.3	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.00
7	8.6	63.7	36.2	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	1.76
8	9.3	65.8	34.1	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	1.93
9	13.9	67.9	32.1	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.11
10	16.9	68.0	32.0	0.1	0.0	0.0	0.0	100.0	2.12
11	19.3	68.1	31.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	2.14

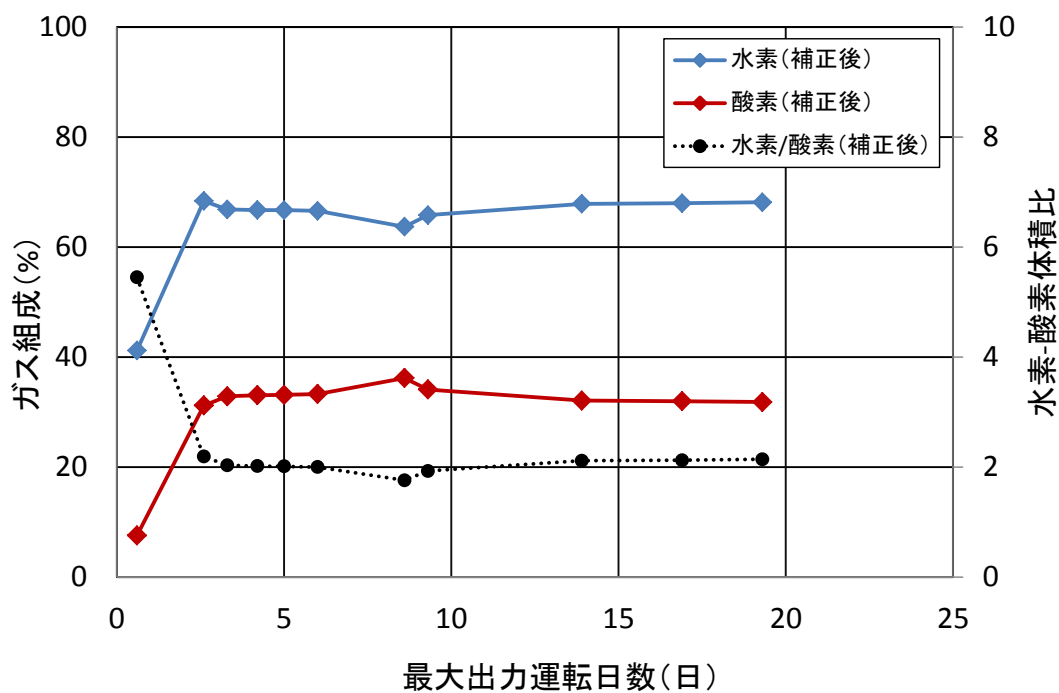


図 2.271 試験ケース IT-A4 (IFA-761) の分析結果（補正後）

2. 4. 3 放射線分解による水素発生 G 値の検討

放射線照射中のセメントペーストの放射線との相互作用について明らかにすることは健全性評価の基盤的根拠を与える。本検討では、中性子およびガンマ線によるエネルギー付与率の観点から、水素発生 G 値についてとりまとめた。G 値の算定にあたり、中性子線量率およびガンマ線量率は MCNP の解析結果を用いた。

セメントペーストは中性子とガンマ線の両方が照射され、それらから同時にエネルギーが与えられる。まずは、中性子とガンマ線の合計のエネルギー吸収に対して水素発生 G 値 (100eV の放射線エネルギー吸収に対する水素分子の発生数) を算定する。算定式を以下に、計算過程を表 2. 63 に示す。

$$G = 9.648 \times \frac{n}{m \times D}$$

ここで、 n : 水素発生速度 ($\mu \text{ mol/h}$)

m : 質量 (g)

D : 線量率 (kGy/h)

エネルギー吸収の対象はセメントペースト中の全水分 (化学的結合水および自由水) とし、調合条件に基づき求まるセメント分質量 (試験体 1 体あたり 92.7g、表 2. 64 参照) を試験体質量から差し引くことで算定した。全水分量 (表 2. 63 中の⑧) に中性子とガンマ線の線量率の和 (表 2. 63 中の③) を乗じてエネルギー吸収量を算定し、実験で測定された水素ガス発生速度 (表 2. 63 中の⑪) を除することで水素発生 G 値を求めた。水素ガス発生速度は表 2. 65 に示す通り、全ガス発生速度とガスクロマトグラフによる組成分析結果の水素含有率から算定した。

算定した水素発生 G 値の結果を図 2. 272 に示す。封かん状態で保管していた試験体 IT-A3 および IT-A4 の照射開始時では、G 値は 1.2 程度となった。ガンマ線単体のバルク水からの水素発生 G 値 0.45 よりも 2~3 倍と大きい値であり、同じエネルギー吸収とした場合、ガンマ線に比べ中性子による水素発生が多いことが伺える。照射試験が進み試験体中の水分量が減少するとともに G 値も減少していき、ほぼ結合水のみ状態では G 値は 0.01~0.02 程度と非常に小さい値となった。これは、実機プラントでの 60 年時点での中性子とガンマ線の吸収線量に対して、結合水は 1~2% 程度しか分解しないこととなり、セメントペーストの乾燥後の中性子照射は、コンクリートの強度の母体であるセメントペーストの分解に対して大きな影響が無いと言える。なお、ここで 60 年時点での中性子吸収線量については、MCNP 解析結果での高速中性子照射量と中性子吸収線量の比を、60 年時点の高速中性子照射量に乗じることで算出している。

次に、中性子単体に対する水素発生 G 値について検討する。ここで、中性子照射による水素発生量を評価するため、水素ガスの全発生量からガンマ線による発生量を差

し引くこととした。ガンマ線による発生量については、ガンマ線照射試験で得られたガンマ線による水素発生 G 値（図 2.273）に基づきガンマ線による水素発生量を評価した。計算過程を表 2.66 に、G 値の算定結果を図 2.274 に示す。含水率がほぼ 0 のときに G 値が負となっており、ガンマ線照射試験に基づくガンマ線 G 値を高く評価していたことになる。これは、中性子照射試験におけるガンマ線線量率は、ガンマ線照射試験での線量率の 10～100 倍程度と非常に高く、この高線量率下ではガンマ線に対する G 値は低くなっているためと考えられる。そこで図 2.274 では、ガンマ線 G 値を 0 とした場合の中性子 G 値（考えられる最大値）についても示している。水分を多く含むときでは中性子 G 値は 1.7～2.3 程度、自由水がない時で 0.04 程度となり、これは 60 年時点での中性子の吸収線量に対して、結合水は 1～2% 程度しか分解しないこととなる。

また、図 2.274 では、含水率 0 での G 値を 0.05 としていたが、全ての水素ガスがガンマ線のみにより生じるとして算定したところ、G 値は最大でも 0.01～0.03 程度となり、セメントペーストの分解に対して大きな影響が無いと言える。

表 2.63 中性子とガンマ線に対する水素発生 G 値の算出

試験ケース			IT-A1		IT-A2		IT-A3		IT-A4		備考
			照射 開始 時	照射 終了 時	照射 開始 時	照射 終了 時	照射 開始 時	照射 終了 時	照射 開始 時	照射 終了 時	
試験体形状			セメントペーストφ4×6cm								
水分条件			75℃乾燥		120℃乾燥		封緘		封緘		
①	中性子線量率 (kGy/h)		69.4	69.4	64.8	64.8	107	107	109	109	MCNP 解析結果
②	ガンマ線量率 (kGy/h)		88.4	88.4	91.2	91.2	94.2	94.2	96.1	96.1	
③	中性子線量率 + ガンマ線量率 (kGy/h)		157.8	157.8	156.0	156.0	201.2	201.2	205.1	205.1	①+②
④	試験体 質量 (g)	No. 1	116.9	117.1	114.4	114.2	140.6	118.5	141.3	119.5	照射前後測定結果
⑤		No. 2	116.4	116.9	113.9	114.7	140.7	118.0	142.1	120.6	
⑥		No. 3	116.6	117.0	114.0	114.8	141.1	118.7	141.0	119.0	
⑦		4 体分	466.6	468.0	456.3	458.2	563.1	473.6	565.9	478.9	(①+②+③)×4/3
⑧	全水分量 (g)		95.8	97.2	85.5	87.4	192.3	102.8	195.1	108.1	⑦-セメント 質量(4×92.7g)
⑨	含水量 (g)		15.4	16.8	5.1	7.0	111.9	22.4	114.7	27.7	⑧-結合水量 (4×20.1g)
⑩	含水率 (g/g-dried hcp)		0.03	0.04	0.01	0.02	0.25	0.05	0.25	0.06	⑨/120℃乾燥後 HCP 質量(4× 112.8g)
⑪	水素ガス 発生速度 (μmol/h)		150	30	120	10	4490	240	4920	450	表 2.65 参照
⑫	中性子と ガンマ線の 合計に対する 水素発生の G 値		0.10	0.02	0.09	0.01	1.12	0.11	1.19	0.20	9.648×⑪/ (⑧×③)

表 2.64 試験体中の水分量およびセメント量

乾燥温度 (°C)	試験体 No.	試験体質量 (g)		乾燥減少量 (g)
		乾燥前	乾燥後	
120	1	139.82	113.20	26.62
	2	139.08	112.72	26.36
	3	139.15	112.84	26.31
	4	139.53	113.24	26.29
	5	137.96	111.88	26.08
	平均値	139.1	112.8	26.3
①120°C乾燥により蒸発した水分量 (g)				26.3
②調合条件 W/C=0.5 より求まる全水分量 (g)				46.4
③調合条件 W/C=0.5 より求まるセメント分質量 (g)				92.7
④化学的結合水量 (②－①) (g)				20.1

表 2.65 水素ガス発生速度の算出

試験ケース		IT-A1		IT-A2		IT-A3		IT-A4		備考
		照射 開始 時	照射 終了 時	照射 開始 時	照射 終了 時	照射 開始 時	照射 終了 時	照射 開始 時	照射 終了 時	
全ガス発生速度 (ml/min.)		0.1	0.01	0.05	0.005	2.5	0.1	2.5	0.2	at 0°C + 1 気圧
水素含有率 (%)		51.2	98.1	86.6	97.2	62.5	82.4	68.4	77.9	ガスクロマトグラフによる組成分析
水素 ガス 発生 速度	(ml/min.)	0.051	0.010	0.043	0.005	1.56	0.08	1.71	0.16	at 0°C + 1 気圧
	(ml/h)	3.3	0.6	2.8	0.3	101	5.3	110	10.0	at 20°C + 1 気圧
	(μmol/h)	150	30	120	10	4490	240	4920	450	1 mol=22.4 リットル

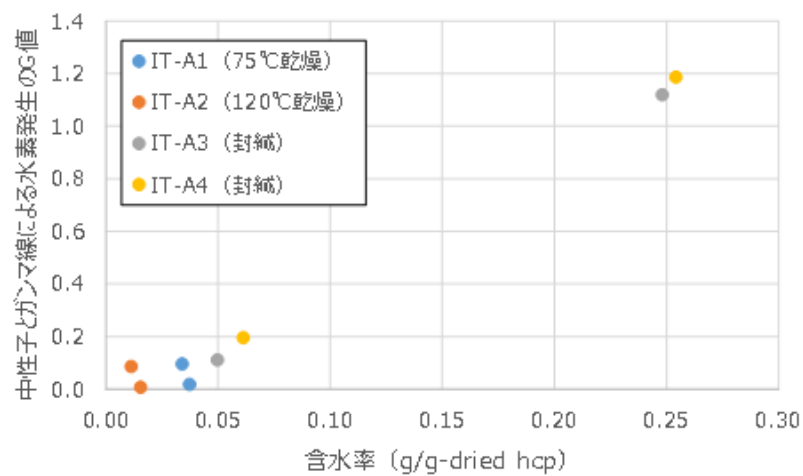


図 2.272 中性子とガンマ線による水素発生 G 値

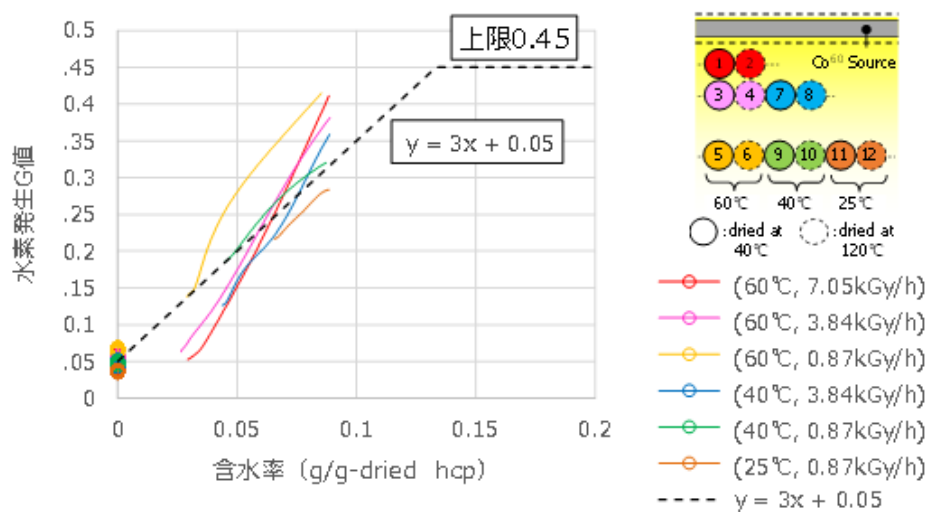


図 2.273 ガンマ線による水素発生 G 値

表 2.66 中性子に対する水素発生 G 値の算出

試験ケース			IT-A1		IT-A2		IT-A3		IT-A4		備考
			照射 開始 時	照射 終了 時	照射 開始 時	照射 終了 時	照射 開始 時	照射 終了 時	照射 開始 時	照射 終了 時	
試験体形状			セメントペーストφ4×6cm								
水分条件			75℃乾燥		120℃乾燥		封緘		封緘		
①	中性子線量率 (kGy/h)		69.4	69.4	64.8	64.8	107	107	109	109	MCNP 解析結果
②	ガンマ線量率 (kGy/h)		88.4	88.4	91.2	91.2	94.2	94.2	96.1	96.1	
③	試験体 質量 (g)	No. 1	116.9	117.1	114.4	114.2	140.6	118.5	141.3	119.5	照射前後測定結果
④		No. 2	116.4	116.9	113.9	114.7	140.7	118.0	142.1	120.6	
⑤		No. 3	116.6	117.0	114.0	114.8	141.1	118.7	141.0	119.0	
⑥		4 体分	466.6	468.0	456.3	458.2	563.1	473.6	565.9	478.9	
⑦	全水分量 (g)		95.8	97.2	85.5	87.4	192.3	102.8	195.1	108.1	⑥-セメント 質量(4×92.7g)
⑧	含水量 (g)		15.4	16.8	5.1	7.0	111.9	22.4	114.7	27.7	⑦-結合水量 (4×20.1g)
⑨	含水率 (g/g-dried hcp)		0.03	0.04	0.01	0.02	0.25	0.05	0.25	0.06	⑧/120℃乾燥後 HCP 質量(4×112.8g)
⑩	ガンマ線による 水素発生 G 値		0.15	0.16	0.08	0.1	0.45	0.2	0.45	0.23	図 2.273 に基づき 含水率より算定
⑪	ガンマ線による 水素ガス発生 速度(μmol/h)		132	143	65	83	845	201	874	248	②×⑦×⑩/9.648
⑫	水素ガス 発生速度 (μmol/h)		150	30	120	10	4490	240	4920	450	表 2.65 参照
⑬	中性子による 水素ガス発生 速度(μmol/h)		18	-113	55	-73	3645	39	4046	202	⑫-⑪
⑭	中性子に対する 水素発生 G 値		0.03	-0.16	0.10	-0.12	1.71	0.03	1.84	0.17	9.648×⑬/(⑦×①)

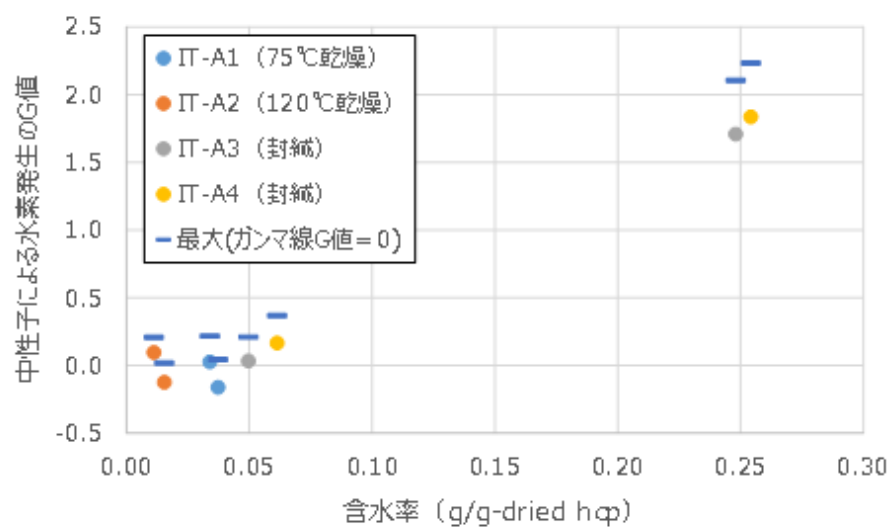


図 2.274 中性子による水素発生 G 値

2. 4. 4 中性子によるコンクリート膨張評価と強度低下メカニズムの考察

(1) はじめに

すでに既往文献からも、コンクリートの膨張は中性子照射による骨材の膨張に起因することが指摘されている^{22, 23}。本実験でもコンクリートは膨張し、図 2.275 に示す通り、試験体表面にひび割れが確認された。本節では、コンクリートの膨張が骨材膨張要因であることを、骨材の膨張ひずみに基づきコンクリートひずみを概算し、その値と実験値を比較することで、骨材膨張要因であることを示す。加えて、コンクリートの強度低下要因が骨材の膨張による内部ひび割れによって生じているものであることを既往研究や他の骨材膨張が生ずる現象（骨材のアルカリシリカ反応）を有するコンクリートのコンクリート強度との比較によって示す。

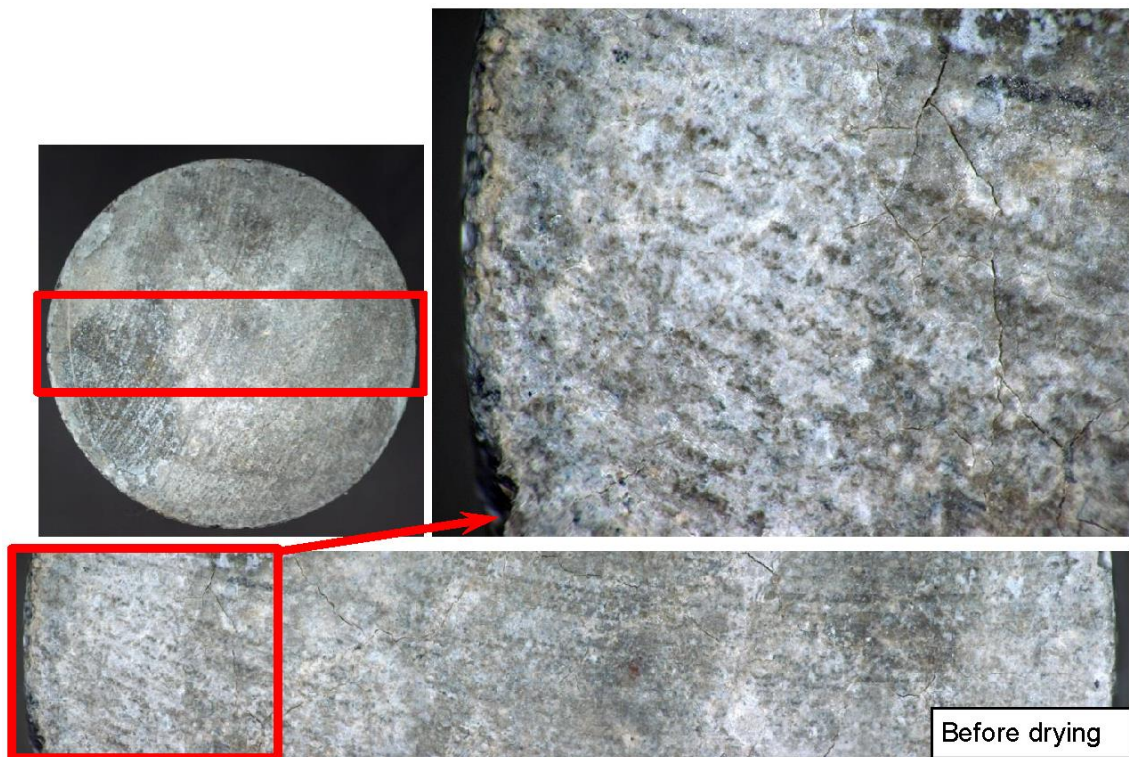


図 2.275 照射後のコンクリート試験体のひび割れ状況（PPT-E の研磨面）

²² Hilsdorf, H., J. Kropp and H. Koch (1978). "The effects of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete." ACI SP-55 55.

²³ Dubrovskii, V. B., S. S. Ibragimov, M. Y. Kulakovskii, A. Y. Ladygin and B. K. Pergamenschik (1967). "Radiation damage in ordinary concrete." Soviet Atomic Energy 23 4 1053-1058.

(2) 骨材中の石英膨張

既往の研究により、石英が膨張することが知られている^{24, 25, 26, 27}。石英は、体積で15～18%、線ひずみで5～6%の膨張を示す。この傾向は、ガンマ線の電離作用による電子線による照射でも、中性子による直接的な原子のはじき出しでも生ずる。その結果、結晶構造が配列を乱して非晶質（アモルファス）化する。多くの場合、速中性子で 10^{19} n/cm²程度の照射でアモルファス化が生じ、 10^{20} n/cm²程度で完全にアモルファス化が生じてもとに戻らなくなる。少しの欠陥は数百度の温度履歴でもとにもどるが照射量を増加させるともとに戻らなくなるのである。

このことは、温度、すなわち構成原子の熱的振動の一部は、構造欠陥を直す効果があることを意味し、すなわち、照射によるアモルファス化の過程は温度依存性を有することを意味する。

この観点から、初めて体系だった実験を行ったのは、Bykov らであり⁷、彼らの実験によって石英の膨張過程を理解することができる。彼らの実験を図 2.276 に示す。ここに示されるように、石英の膨張は、例えば 25-30℃環境と 80℃環境では、10%の体積膨張に必要な照射量は 5 倍程度も異なる。

²⁴ Primak, W., L. Fuchs and P. Day (1955). "Effects of nuclear reactor exposure on some properties of vitreous silica and quartz." *Journal of the American Ceramic Society* 38 4 135-139.

²⁵ Primak, W. (1958). "Fast-neutron-induced changes in quartz and vitreous silica." *Physical Review* 110 6 1240-1254.

²⁶ Bykov, V. N., A. V. Denisov, V. B. Dubrovskii, V. V. Korenevskii, G. K. Krivokoneva and L. P. Muzalevskii (1981). "Effect of irradiation temperature on the radiation expansion of quartz." *Soviet Atomic Energy* 51 3 593-595.

²⁷ Douillard, L. and J. P. Duraud (1996). "Amorphization of α -quartz under irradiation." *Journal de Physique III* 6 12 1677-1687.

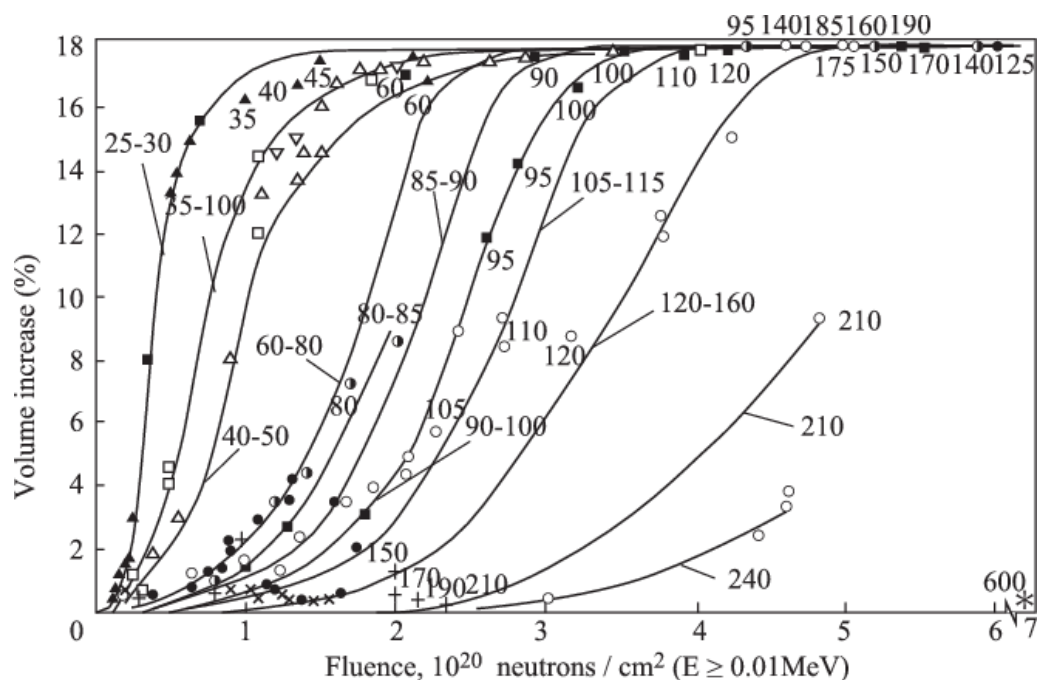


図 2.276 Bykov らの実験結果

このため、照射環境温度は、実験を理解するために重要である。図 2.276 は 0.01MeV 以上の中性子フラックスを考慮している。原理的には Si-O 結合中の O のはじき出しの程度は数十 KeV でも十分起こりうるが、その現象は表層でしか生じず物質内部に侵入しない。そのため、結晶構造全体のアモルファス化を生じるためには、やはり数百 KeV のエネルギーは必要になると考えられるので、金属分野に順じて 0.1MeV 以上の値に変換して現象を評価することとした。Bykov らの実験は、BR-5 炉 (Breeder Reactor : ソビエト増殖炉) のフラックス分布を考慮して 0.1MeV 以上の中性子に変換して評価を行うこととした。

また、図 2.276 の結果に示される温度依存性を適切に評価するためには、数式的に表現する必要がある。過去、石英膨張は、Nucleation and growth モデル^{28, 29}によって表現されてきた。このモデルの適合妥当性は Bolse の論文で議論されており、よい精度で表現できているので²⁹、この形の式を用いることとした。この式において必要となる膨張量の半分時点の照射量と温度の関係について、アレニウスプロット³⁰してみると、図 2.277 に示されるようにきれいに活性化エネルギーの概念で評価できることがわかった。

²⁸ Avrami, M. (1941). "Granulation, phase change, and microstructure kinetics of phase change. Iii." The Journal of Chemical Physics 9 2 177-184.

²⁹ Bolse, W. (1998). "Formation and development of disordered networks in si-based ceramics under ion bombardment." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 141, 1-4, pp. 133-139.

³⁰ 実測された反応速度とそのときの温度の逆数を片対数グラフにプロットして、右下がりの直線回帰により活性化エネルギーなどを実験的に求める手法

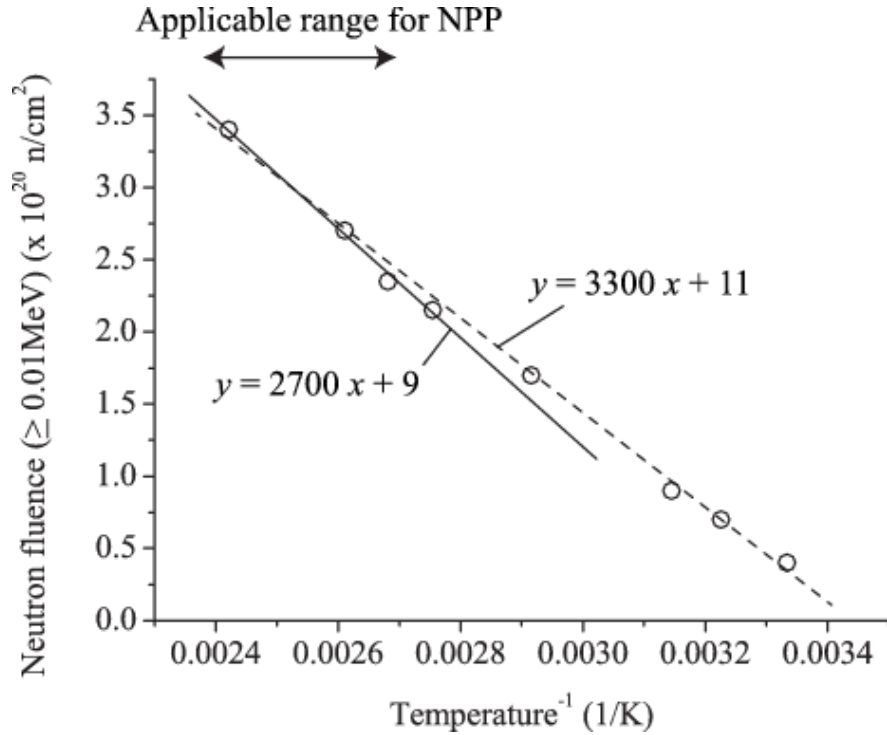


図 2.277 Bykov らの実験結果をアレニウスプロットした結果

$$\varepsilon_{n, \text{quartz}}(n) = \varepsilon_{n, \text{quartz}, \infty} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-n}{K(T)}\right)^d \right) \quad (1) \quad ^{29}$$

ここに、 $\varepsilon_{n, \text{quartz}, \infty}$: α 石英の最大膨張量（体積変化で 18%、長さ変化で 6%）、 n : 中性子フルエンス (n/cm^2) ここでは速中性子として 0.1MeV 以上を想定している、 $K(T)$: 温度影響因子で (n/cm^2) の単位を持つ。 T : 照射環状の絶対温度 (K)、 d : ダメージが体積的に累積して膨張に寄与するパラメータで理論的には 2 ~ 5 の値をもち、本研究では Field らの研究に従い 2.38 の値を用いた³¹。

$$K(T) = 3.3 \times 10^{23} \cdot \exp\left(\frac{-E_{a, \text{quartz}}}{RT}\right) \quad (2) \quad ^{32}$$

³¹ Field, K. G., I. Remec and Y. L. Pape (2015). "Radiation effects in concrete for nuclear power plants - part i: Quantification of radiation exposure and radiation effects." Nuclear Engineering and Design 282 0 126-143.

³² Arrhenius, S. A. (1889). "Über die Dissociationswärme und den Einfluß der Temperatur auf den Dissociationsgrad der Elektrolyte". Z. Phys. Chem. 4: 96-116.

ここで、 $E_{a, quartz}$: 中性子照射にかかわる活性化エネルギー 22500 (J/mol)、 R : ガス定数 ($J \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) である。

以上の結果から、本実験の 75℃環境にある石英の膨張量を予測したものが、図 2.3.4- 1 である。本図には合わせて、コンクリートの膨張ひずみについても示した。コンクリートは石英の多い碎石のものが骨材中の含有量として 92%、川砂利が 47%である。このように実験結果は、膨張ひずみとして大きな矛盾はない。

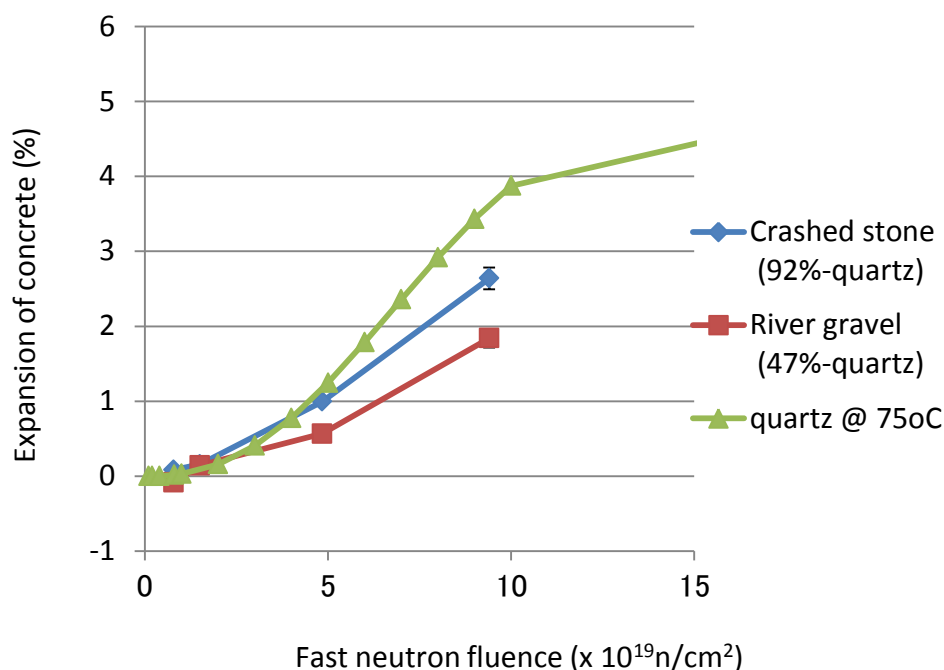


図 2.3.4- 1 75℃環境における石英の膨張量と本実験でのコンクリート膨張量の比較

ついで、骨材中に石英以外ば膨張しないと考え、骨材中の石英割合で骨材膨張ひずみが決定するとし、さらに粗骨材の膨張ひずみに基づきコンクリート全体の平均化ひずみについて、複合則を用いて予測することとした。

Hobbs のモデルに ITZ (Interfacial Transition Zone : 遷移帯) の影響をひずみに換算した以下のモデルを採用した³³。ここで、Hobbs モデルとは、骨材の収縮、骨材のヤング率、モルタルの収縮、モルタルのヤング率とコンクリートの構成体積比から、コンクリートの収縮を予測するために開発された予測式であるが、本検討では、ここに骨材の膨張を考慮してコンクリートの膨張を予測するモデルとして援用することとした。また、近年の研究では、コンクリートの体積変化において骨材周囲に生ずる粗な

³³ Hobbs, D. W. (1974). "Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete." ACI Journal 71 9 445-450.

領域である遷移帯³⁴によってコンクリートの収縮における骨材寸法依存性が説明できることから、収縮において考慮することの重要性が指摘されている³⁵。そのため、本検討ではその点を拡張して評価することとした。

$$\frac{e_c}{e_m} = \frac{n+1+(2mn-n-1)V_{Agg,c}}{n+1+(n-1)V_{Agg,c}}$$

$$n = E_{Agg} / E_m$$

$$m = \varepsilon_{Agg} / \varepsilon_m$$

$$\varepsilon_{Agg} = \varepsilon_{agg,irr}$$

ここで、 ε_c : コンクリートのひずみ、 ε_m : モルタルのひずみ、 n : ヤング率比、骨材のヤング率(E_{Agg}) とモルタルのヤング率(E_m) の比、 m : ひずみ比、骨材のひずみ(ε_{Agg}) とモルタルのひずみ(ε_m) の比、 $\varepsilon_{Agg, irr}$: 骨材の照射によるひずみ $V_{Agg, c}$: 粗骨材のコンクリートにおける体積比である。本検討では、実際の推定されるモルタルのヤング率の 1/3 の値を用いることとした。この値は、Hansen らの研究に従った³⁶。

この複合則を用いて算出したコンクリートのひずみと実際の測定されたひずみの結果を図 2.3.4-2 に示す。ここに示されるように、予測値は若干実験値を下回るが、石英量の感度などを含めておおむねコンクリートの膨張挙動を評価できている。すなわち、コンクリートの膨張は骨材中の岩石鉱物、特に石英を中心とした鉱物が膨張したことによるものと判断できる。加えて、骨材膨張試験でも確認されているように、石英量と膨張量はおおむね線形関係が確認できているので、このことから骨材の膨張がコンクリートの劣化の主要因であると確認できる。

³⁴ 遷移帯は粉体の壁効果によって形成されるとされている。すなわちセメント粒子は、骨材表面近傍では、壁によって充填が阻害されるために、水が多い粗な状態になる。そのため、強度やヤング率が小さく、コンクリート内の弱点部となると考えられている。

³⁵ Maruyama, I. and A. Sugie (2014). "Numerical study on drying shrinkage of concrete affected by aggregate size." Journal of Advanced Concrete Technology, 12, 8, pp. 279-288.

³⁶ Hansen, T. C. and K. E. C. Nielsen (1965). "Influence of aggregate properties on concrete shrinkage." ACI Journal 62 7 789-794.

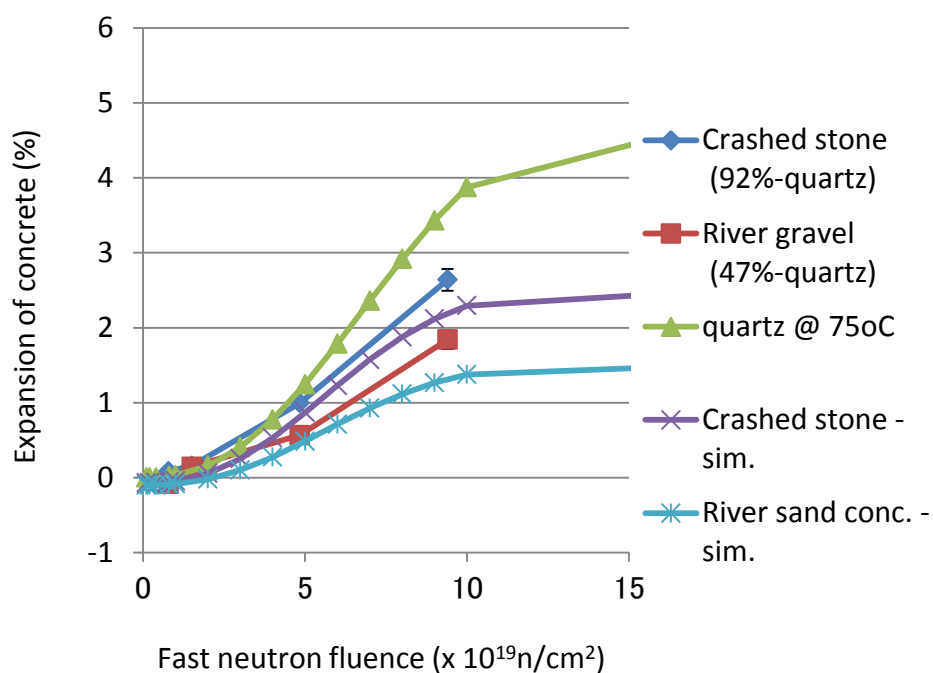


図 2.3.4- 2 75℃環境における石英の膨張量を考慮したコンクリートひずみの予測値と実験値の比較

なお、図 2.3.4- 2 に示される予測値が実験値を下回る理由には以下が考えられる。

- ① 膨張ひずみが非常に大きく、線形化則・平均化則を適用する複合則の精度に限界がある。
- ② 石英以外の岩石鉱物（長石など）にも膨張挙動がみられる。
- ③ 細骨材も膨張するので、それがコンクリートの膨張に寄与している。

本検討の範囲ではおおむね膨張挙動が評価できているので主となる要因は②および③であると考えられる。今後は、他の鉱物の影響度も含めた検討が必要である。

次にコンクリートの強度低下要因について考察する。コンクリート中の骨材が膨張した場合、モルタル部にはひび割れが生ずると考えられる。モルタルの強度は数 MPa であり、数百 μ 程度の膨張でもひび割れが生ずるからである。実際、本検討の照射後のコンクリート表面にも微細なひび割れが多く確認できた。

このひび割れの体積はおおむね、コンクリートの膨張ひずみと比例関係にあるはずなので、コンクリートの膨張ひずみはコンクリート内部の損傷の程度を示す指標と考えることができる。

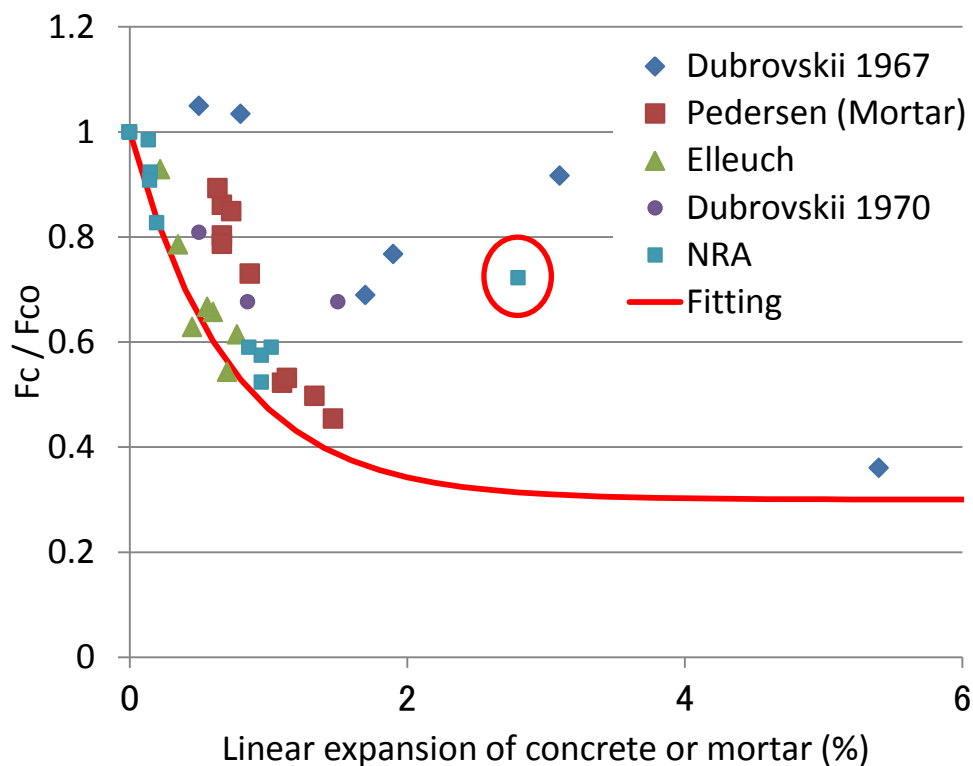


図 2.3.4-3 コンクリートの膨張ひずみと圧縮強度比 (F_c/F_{co}) の関係
(■ NRA は、本事業の中性子照射試験で得られた結果)

図 2.3.4-3 に示されるように、 $9.3 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ のフルエンスで石英含有量 92% の骨材（碎石）の試験体の結果（赤丸で囲った■：キャプセル E のサンプル C）のみ、膨張量と強度の関係がはずれることになったが、その他については図の赤線（特に Elleuch³⁷ のデータ）で示された下限線上にあり、対応関係がよく取れている。この傾向は、Pederson³⁸をはじめ、他の文献値ともおおむね整合している。ただし、上記の石英含有量 92% の骨材（碎石）の試験体の結果のように、キャプセル内で試験体が膨張し、拘束を受けた場合には、図 2.278 に示すように、モルタル部のコンパクション（空隙が押しつぶされる）が生ずるために強度増大が起きうる。

³⁷ Elleuch, L. F., Dubois, F., & Rappeneau, J. (1972). Effects of neutron radiation on special concretes and their components. Special Publication, 34, 1071-1108.

³⁸ Pedersen, A. (1971). "Radiation damage in concrete - measurements on miniature specimens of cement mortar." Proceedings of An Information Exchange Meeting on 'Results of Concrete Irradiation Programmes.'

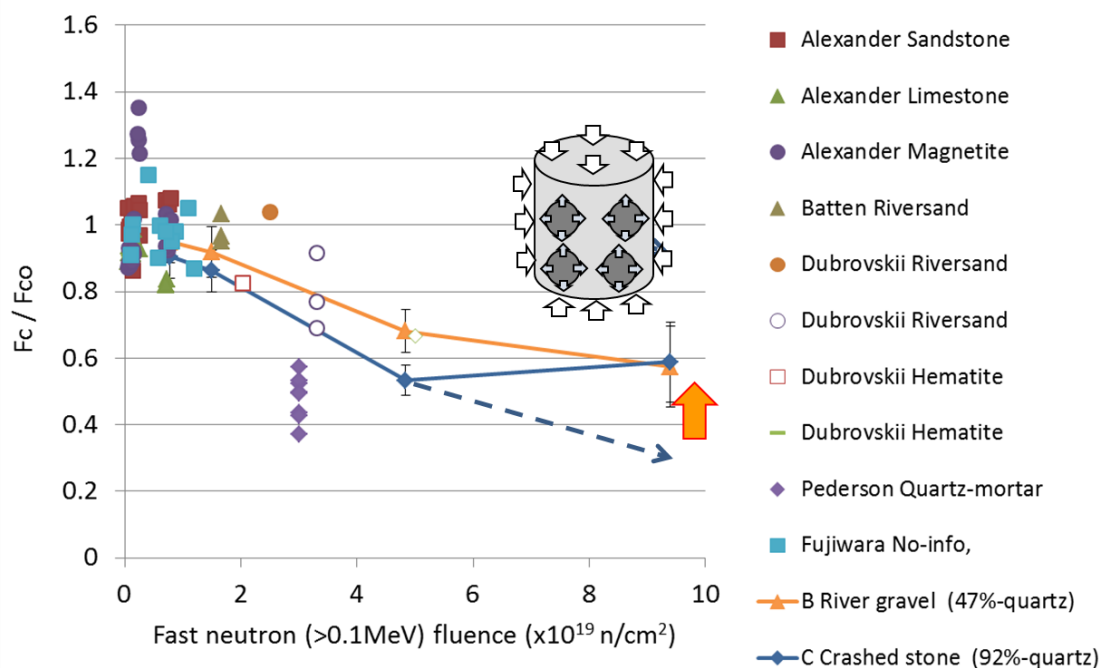


図 2.278 中性子照射量とコンクリートの圧縮強度の関係
(既往のデータを再評価³⁹し、プロットした比較結果)

また、アルカリシリカ反応を生じたコンクリートの試験結果と比較した結果を図 2.279 に示すがここでも下限線はおおむね同じ線で表すことができ、骨材の膨張による強度低下については、損傷の程度を膨張ひずみを指標として評価することができることを意味している。

³⁹ 照射量を Fast neutron (>0.1MeV) に変換した。また、照射環境の温度を Bykov データで補正した。たとえば、200℃環境での照射量は、温度で換算すると 75℃で照射量は 1/5 程度の影響になる。

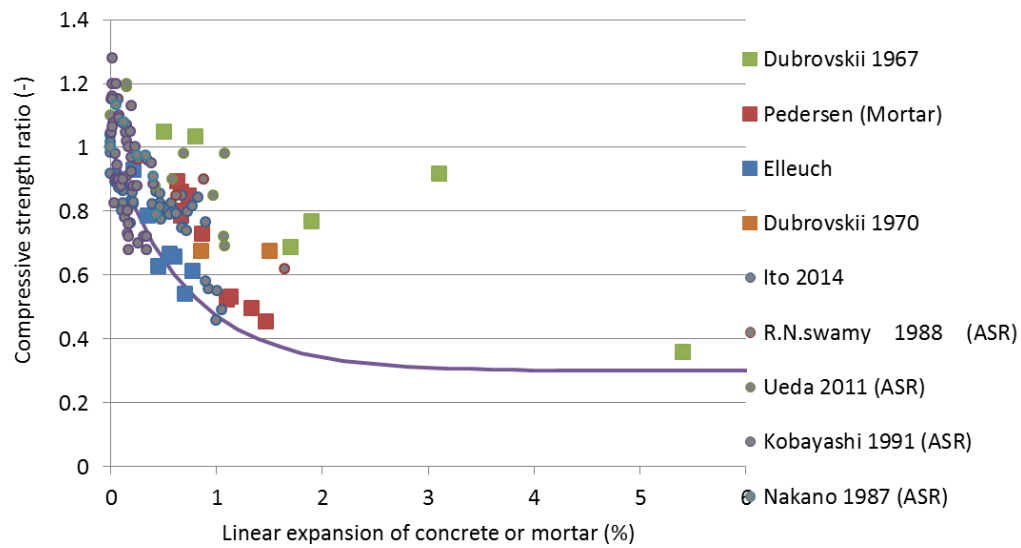


図 2. 279 拘束の無い ASR を生じたコンクリートの膨張ひずみと強度比の関係および照射を受けたコンクリートの膨張ひずみと強度の関係

以上のことから、本実験結果に関する考察では以下のことが明らかになった。

- コンクリートの膨張は主として骨材中の岩石鉱物の照射による膨張が主要因である。特に石英の膨張影響は大きい、その他の鉱物の膨張も影響していると推察される。そのため、コンクリートに用いる粗骨材の鉱物組成がコンクリートの膨張に重要な役割を果たす。今後、岩石鉱物の中性子照射膨張鋭敏性やそれによる体積膨張率の取得が重要である。
- コンクリートの強度低下は、骨材膨張によって生ずるモルタル部の損傷に起因する。コンクリートの膨張量はおおむね、このモルタル部の損傷の程度と比例関係にあるため、膨張量とコンクリート強度比 (F_c/F_{co}) は、コンクリートの種類や骨材の膨張要因にかかわらずよい一致を示す。
- 試験体の膨張が拘束された場合には、モルタル部にコンパクションが生じて強度増加が生じる。この影響は応力依存性を有する問題であり、簡単に紐解けるとは思えないが、実験データは現実の値を保守的に見積もることができる。

2. 4. 5 コンクリート試験体の表面変状について

試験ケース PPT-B (IFA-753) において、中性子照射試験後、コンクリート試験体を取り出したところ、側面に何らかの反応生成物が発生していることを確認した。図 2. 280 にコンクリート試験体の表面状況を示す。詳細に観察すると、中央部に黒い点があり、その周り白色の生成物を取り囲んでいることが分かった。キャプセル IFA-753 には、8 体 (B13～B16、 C13～C16) の試験体が設置されていたが、すべての試験体で反応生成物を確認した。

そこで、このような現象の原因を究明するために、下記に示す SEM-EDS 分析を行った。

SEM : (走査型電子顕微鏡 : Scanning Electron Microscope)

EDS : (エネルギー分散型 X 線分析装置 : Energy Dispersion Spectroscopy) : EDS は二次電子や反射電子と同時に放出される特性 X 線のスペクトルを得て、各ピークのエネルギー (横軸) から元素を同定し、ピークの高さ (縦軸) から定量分析を行う。

この反応生成物は側面で発生し端面には発生していないので、直径の計測には支障があるが、長さ計測には問題がないと考えられる。また、反応生成物は微量なので、質量変化の計測結果に及ぼす影響は小さいと考えられる。但し、アルミニウムのアルカリ腐食だとすれば、水素が発生するので、照射中の発生ガス測定への影響を把握する必要がある。

図 2. 281 に示すように、圧縮試験後の破片から黒い点とその周り白色生成物をサンプリングし、SEM-EDS により分析を行った。図 2. 282 にサンプルの SEM イメージを示す。下段のイメージの中央が黒くへこんだ部分で、その周囲が白色生成物となっている。図 2. 283 に EDS によるイメージを示す。黒くへこんだ部分やそのまわりの白色生成物で、特に高いアルミニウムが検出されることもなく、アルミニウムのアルカリ腐食という仮説は否定されたと考えられる。しかし、まわりの白色生成物では、マグネシウムの濃度が高くなっていることが確認された。マグネシウムのソースとしては、セメントと骨材の両方があげられる。

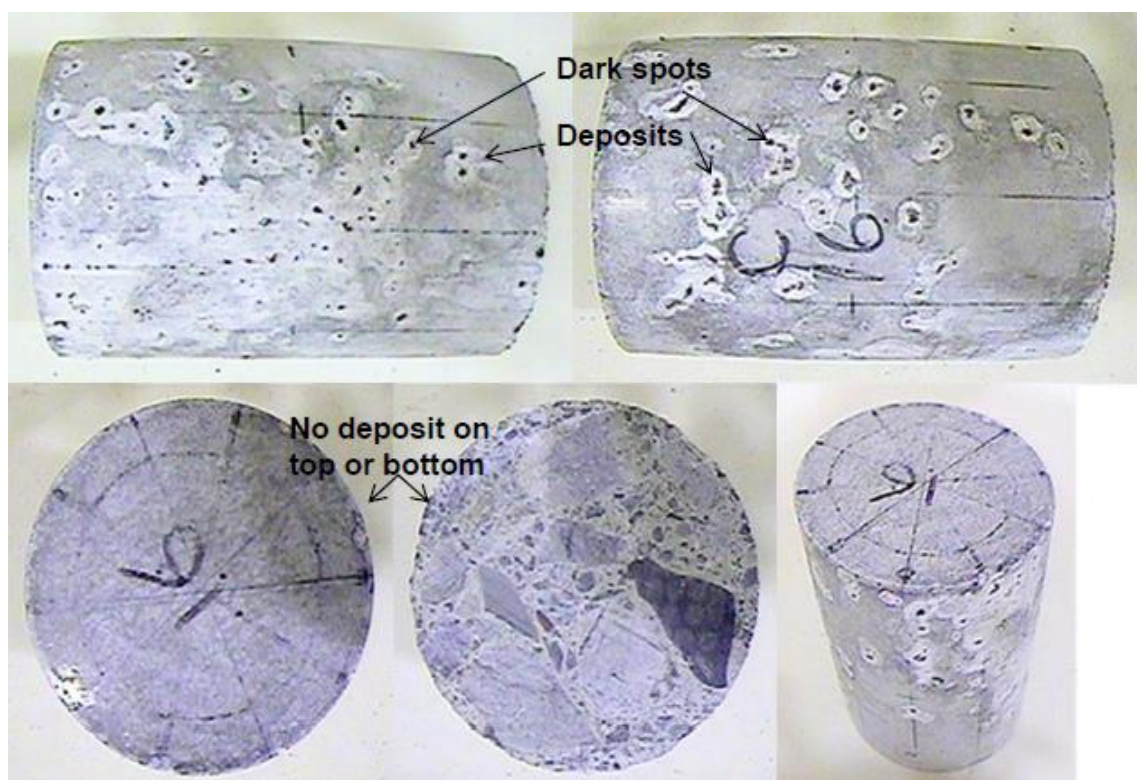


図 2. 280 コンクリート試験体の表面状況

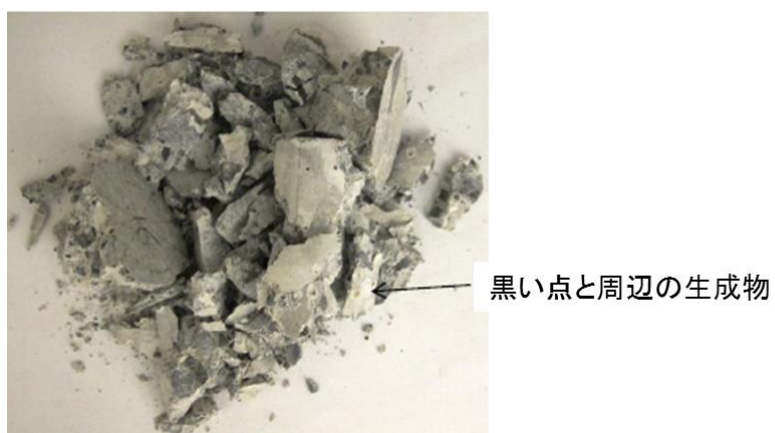


図 2. 281 圧縮試験後の破片からのサンプリング

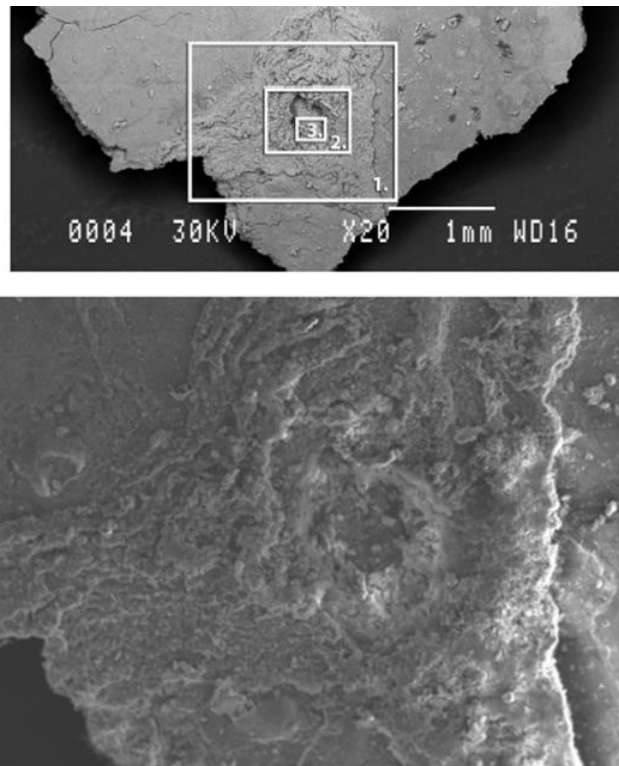


図 2.282 SEM イメージ

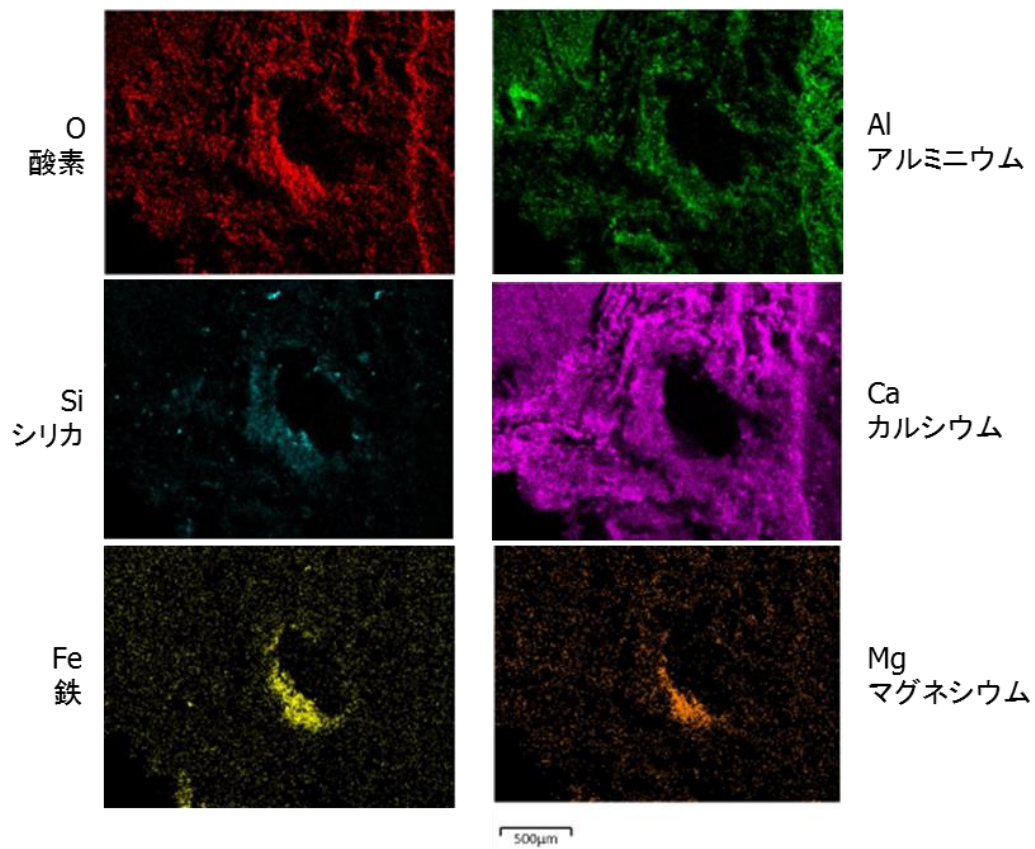


図 2.283 EDS によるイメージ 2.3 JEEP II 炉内の照射に係る解析的検討 2-74

2. 5 JEEP II 炉内の照射に係る解析的検討

2. 5. 1 解析的検討の位置付けと目的

ノルウェー国の IFE(Institute for Energy Technology)が管理・運営を行っている JEEP II 炉での中性子照射試験の目的は、放射線に起因する様々な事象（発熱による温度上昇、脱水、水分の放射線分解、骨材の膨張など）を定量的に評価することにある。しかし実機と同じ条件で照射を行うことは難しいため、解析的検討では、実機条件への外挿性を評価するための放射線影響メカニズムの解明に資する評価を行う。

JEEP II 炉照射孔における鉛直方向の中性子線束分布や、ガンマ線の線量分布について、数値解析的検討を行うことで、実際の試験からは分かり得ない放射線のエネルギー毎の評価や、キャプセルに収納されている各試験体に対する影響を見積もる。具体的には、炉内の 3 次元空間における照射状況をモンテカルロシミュレーションコード MCNP5⁴⁰により模擬し、コンクリート試験体の放射線照射条件である中性子線束とガンマ線束及び吸収線量を評価する。また、コンクリートに対する放射線影響のメカニズム解明のために、中性子線とガンマ線による影響を分離する。

本検討では放射線の影響を評価する上で重要な累積照射量および吸収線量を照射解析として実施する。また、原子炉内では炉心高さ付近で最も照射量が大きく、頂部あるいは底部に向かうほど小さくなることが予想される。すなわち、各試験体に対する照射量は異なり、放射線に起因する発熱も鉛直方向に分布を持つことが予想される。更に、キャプセルの外側には冷却水が流れているため、試験体の中心と表面でも温度が異なる。照射解析によって算定された沈着エネルギーから、各試験体への発熱を求め、有限要素法構造解析コード Nastran による試験環境を模擬した伝熱解析を実施することにより、試験体毎に中心温度と表面温度を求める。

2. 5. 2 照射解析の検討手順

前項の目的を達成するために、JEEP II 炉内の照射に係る解析的検討は次の手順で行う。

(1) 手順 1 MCNP5 による試験体系の構築

中性子照射試験を数値的に模擬するために、MCNP5 を用いて JEEP-II 炉での試験体系を構築する。

(2) 手順 2 MCNP5 による物理量の計算

手順 1 で構築された体系の中でモンテカルロ法による放射線輸送計算を行い、放射線の挙動を解析する。まず構築した体系が適正であったかどうかを実効増倍率の計算によって確認する。同時に MCNP5 によって 1 中性子あたりの線束および沈着エネルギーを計算する。

⁴⁰ X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - Version 5, Vol. I: Overview and Theory", LA-UR-03-1987 (2003).

(3) 手順3 累積照射量および吸収線量への換算

手順2によって得られた1中性子あたりの物理量に照射日数を乗じることで1中性子あたりの累積照射量と吸収線量を算出する。更に、モニタリングワイヤの結果を用いて規格化を行う。過年度までは JEEP II 炉の出力から、中性子発生量を理論的に算出し規格化を実施していたが、今年度は実際に測定された中性子フルエンスを規格化に用いることで、より現実 に即した評価を実施する。

2. 5. 3 照射解析の検討の詳細

前節の手順に従い、具体的な検討の内容とその結果を示す。

(1) MCNP5 による試験体系の構築

1) JEEP II 炉および中性子照射試験の概要

本項では中性子照射試験の行われた JEEP II 炉の概要を述べる。ただし解析を念頭に置き、内容は形状や出力等を中心とする。

JEEP II 炉は IFE 開発の研究炉であり、出力 2 MW の重水炉である。図 2.284 は JEEP II 炉建屋の断面図である。MCNP5 で試験体系を構築する際には図中の「Reactor」と記載のある炉心を中心に側面および底面のコンクリート壁までをモデル化する。

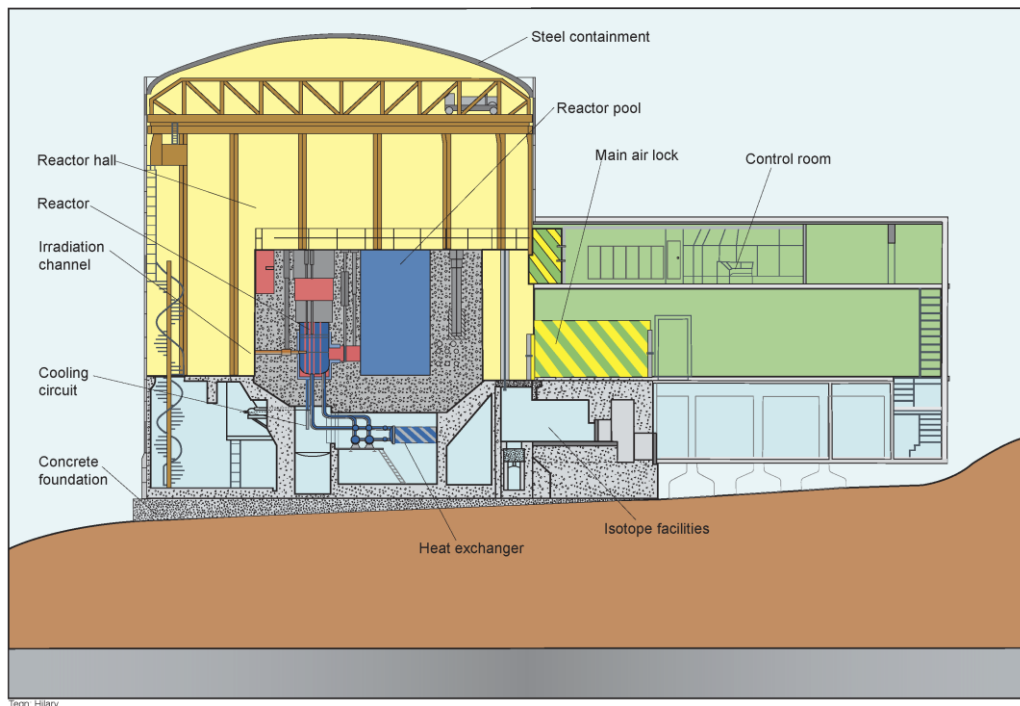


図 2.284 JEEP II 炉建屋の断面図

出典) IFE ホームページ (URL: <http://www.ife.no/en/ife/laboratories/jeep-ii>)

図 2.285 は JEEP II 炉の炉心を鉛直下向きに眺めたときの模式図である。図中にある「IFA-760(pos. 36)」と「IFA-753(pos. 52)」は中性子照射試験の際にコンクリート試験体を含むリグを挿入した照射孔であるが、以後はそれぞれの照射孔を「照射孔#36」および「照射孔#52」と呼ぶこととする。

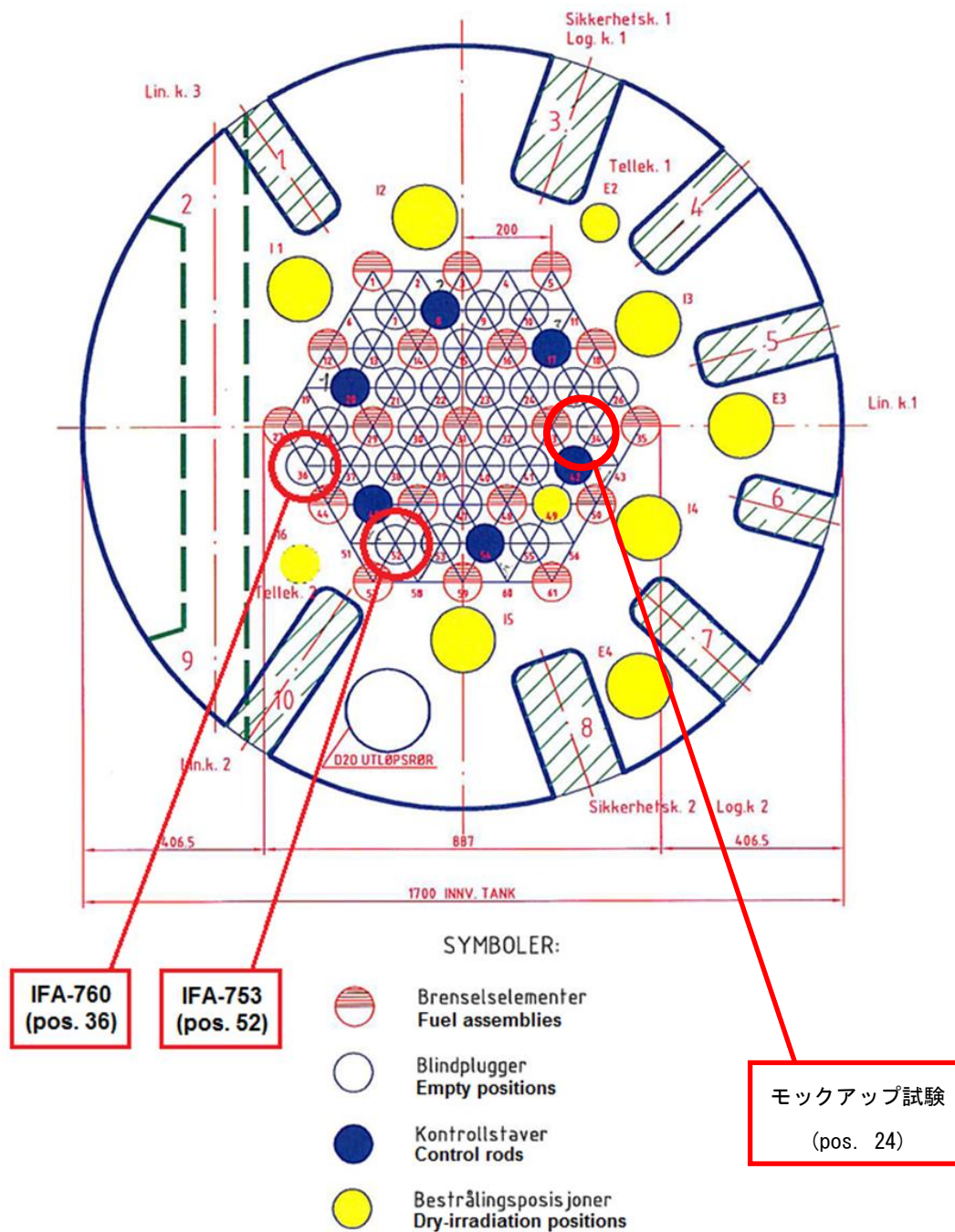


図 2.285 JEEP II 炉の炉心模式図
(IFE 提供の図を編集)

以下に JEEP II 炉の特徴を挙げる。

- ✓ 炉心は 19 本の燃料集合体からなり、燃料集合体の相対位置は六方格子構造を描くように配列されている。
- ✓ 19 本の燃料集合体は中心に 1 本配置されており、これを軸として最も外側に 12 本、その内側に 6 本配置されている。
- ✓ 減速材には重水 (D_2O) が用いられている。平均温度は $55^{\circ}C$ であり、圧力は 1 気圧である。
- ✓ 隣接する照射孔の中心どうしの相対位置 (照射孔ピッチ) は 100 mm 間隔である。
- ✓ 隣接する燃料集合体の中心どうしの相対位置 (燃料集合体ピッチ) は 200 mm 間隔である。
- ✓ 有効燃料長は 900 mm である。
- ✓ 燃料集合体は 11 本の燃料棒から構成されている。すなわち、炉心にある燃料棒は合計で 209 本使用される。
- ✓ 熱出力は 2 MW であり、燃料棒平均線出力密度は 10.6 kW/m である。
- ✓ 平均燃焼度は 6000-7000 MWd/tU である。
- ✓ 燃料には濃縮度 3.5% の二酸化ウラン (UO_2) が用いられている。
- ✓ 燃料被覆管やシュラウド、センターチューブ、キャプセル等の炉内構造物の組成はアルミニウムである。
- ✓ 燃料棒の外径は 15 mm、内径は 13 mm である。燃料被覆管の厚みは 1 mm である。
- ✓ 燃料集合体の外径は 88 mm、内径は 86 mm である。燃料集合体のシュラウドの厚みは 1 mm である。
- ✓ 燃料集合体の中心に位置するセンターチューブは外径が 48 mm、内径が 41 mm である。

燃料に関する位置情報や構造について図 2.286 から図 2.288 に図化した。

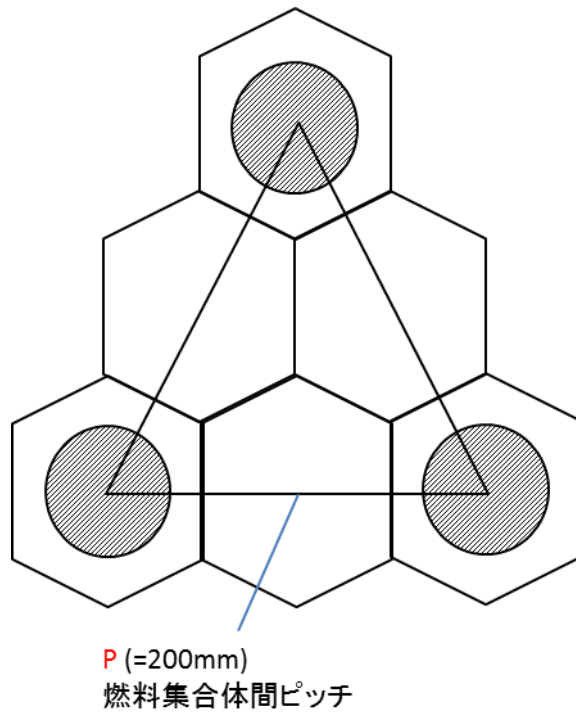


図 2.286 六方格子構造における燃料集合体の位置関係

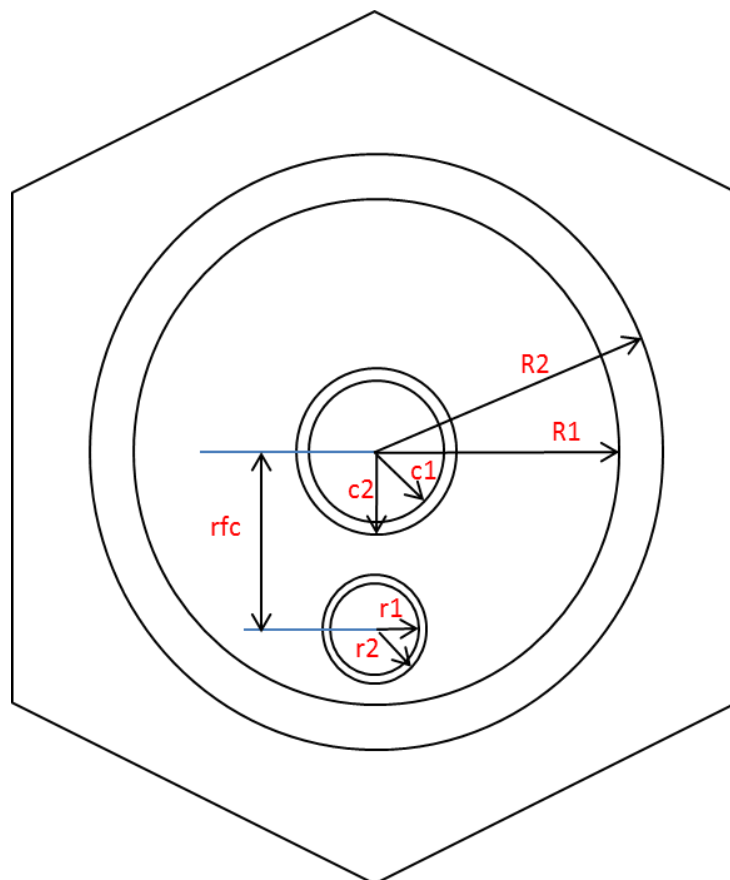


図 2.287 燃料集合体、センターチューブ、および燃料の位置関係

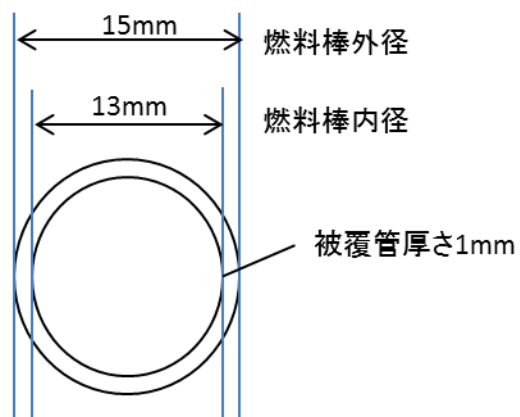


図 2. 288 燃料寸法

また、コンクリート試験体およびセメントペースト試験体を収納するキャプセルおよびキャプセルを挿入するリグについては下記の図 2. 289 から図 2. 292 のとおりである。

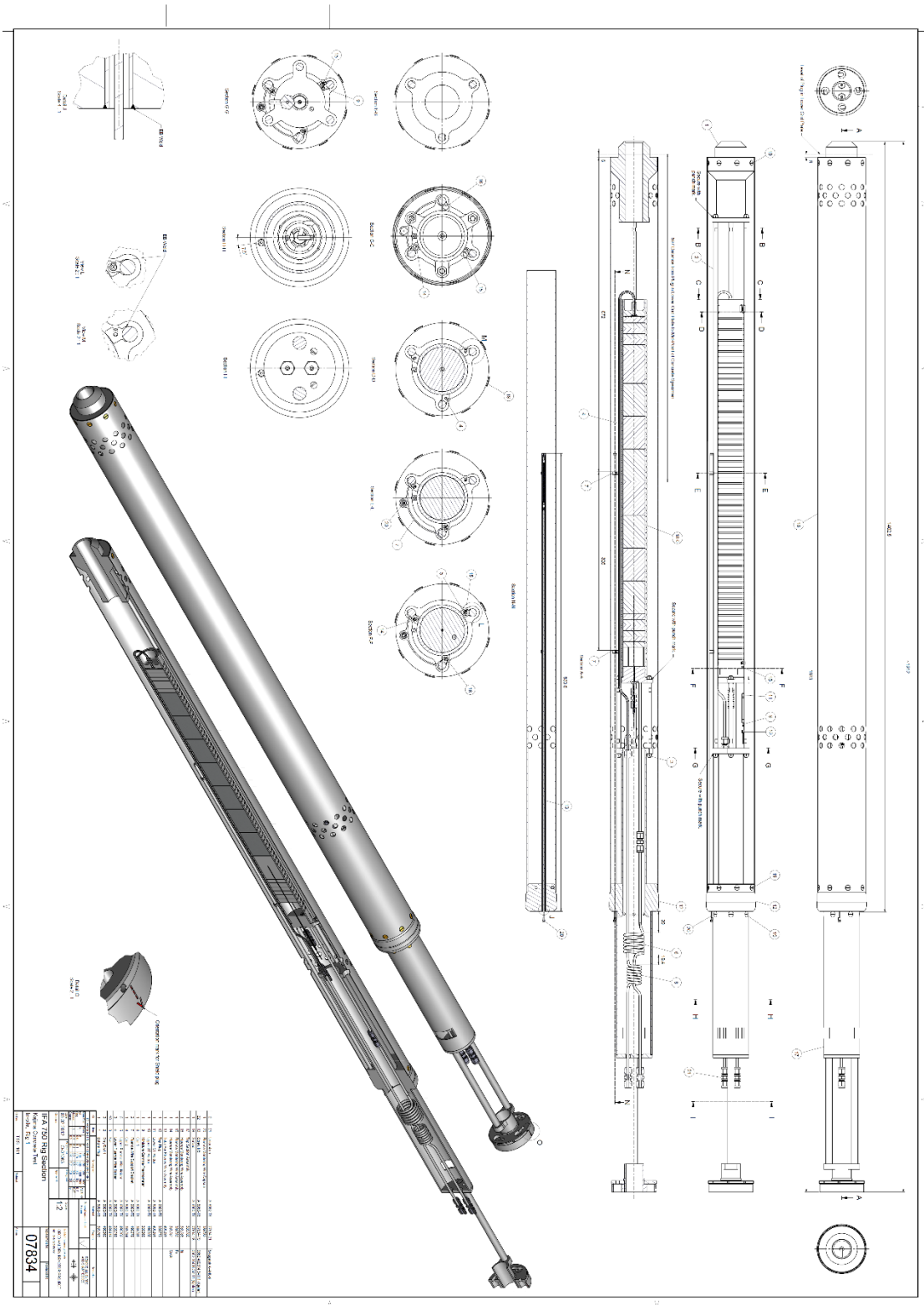


図 2.289 PPT 試験に用いられたリグの形状
(IFE 提供)

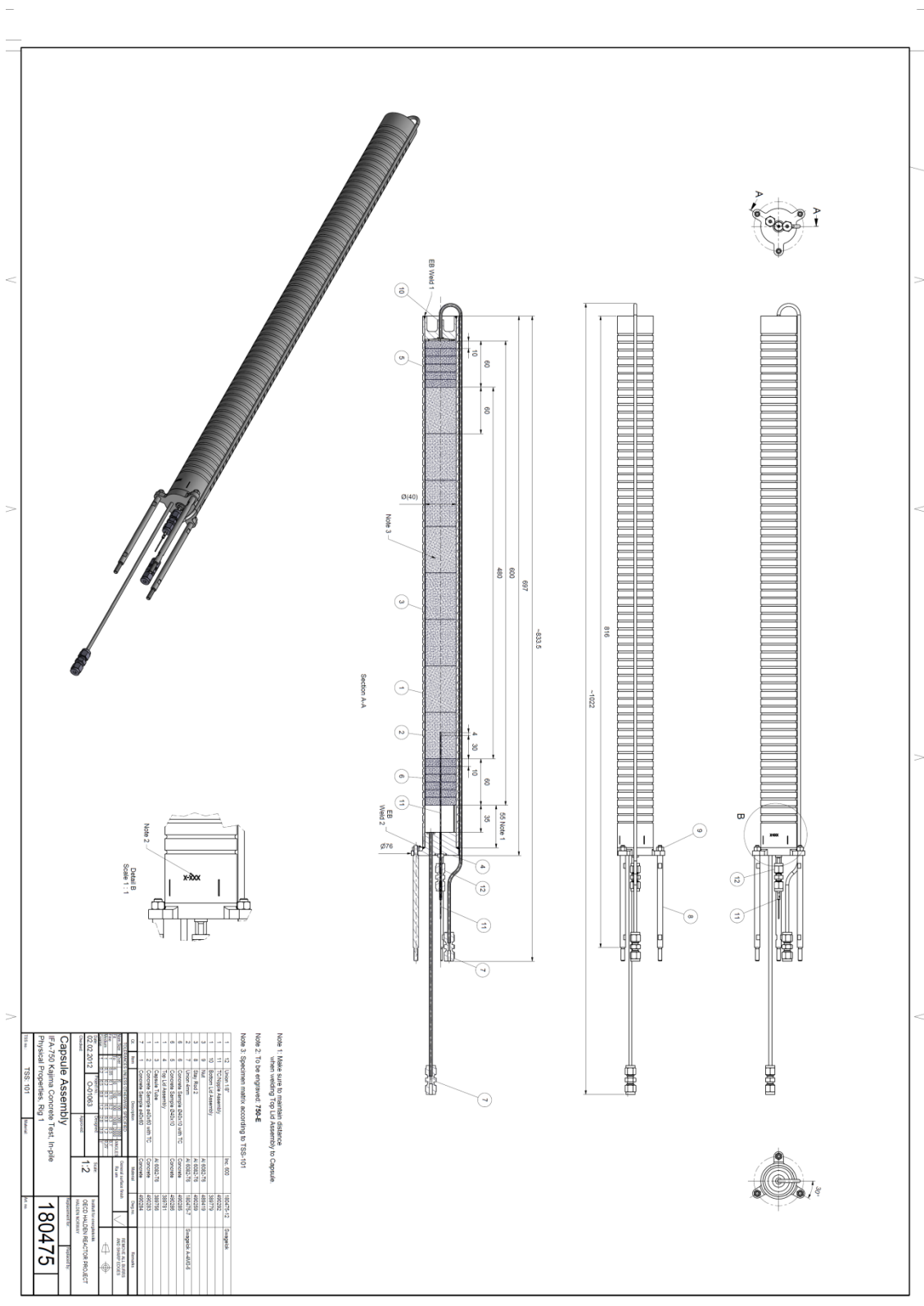


図 2.290 PPT 試験に用いられたキャプセルの形状
(IFE 提供)

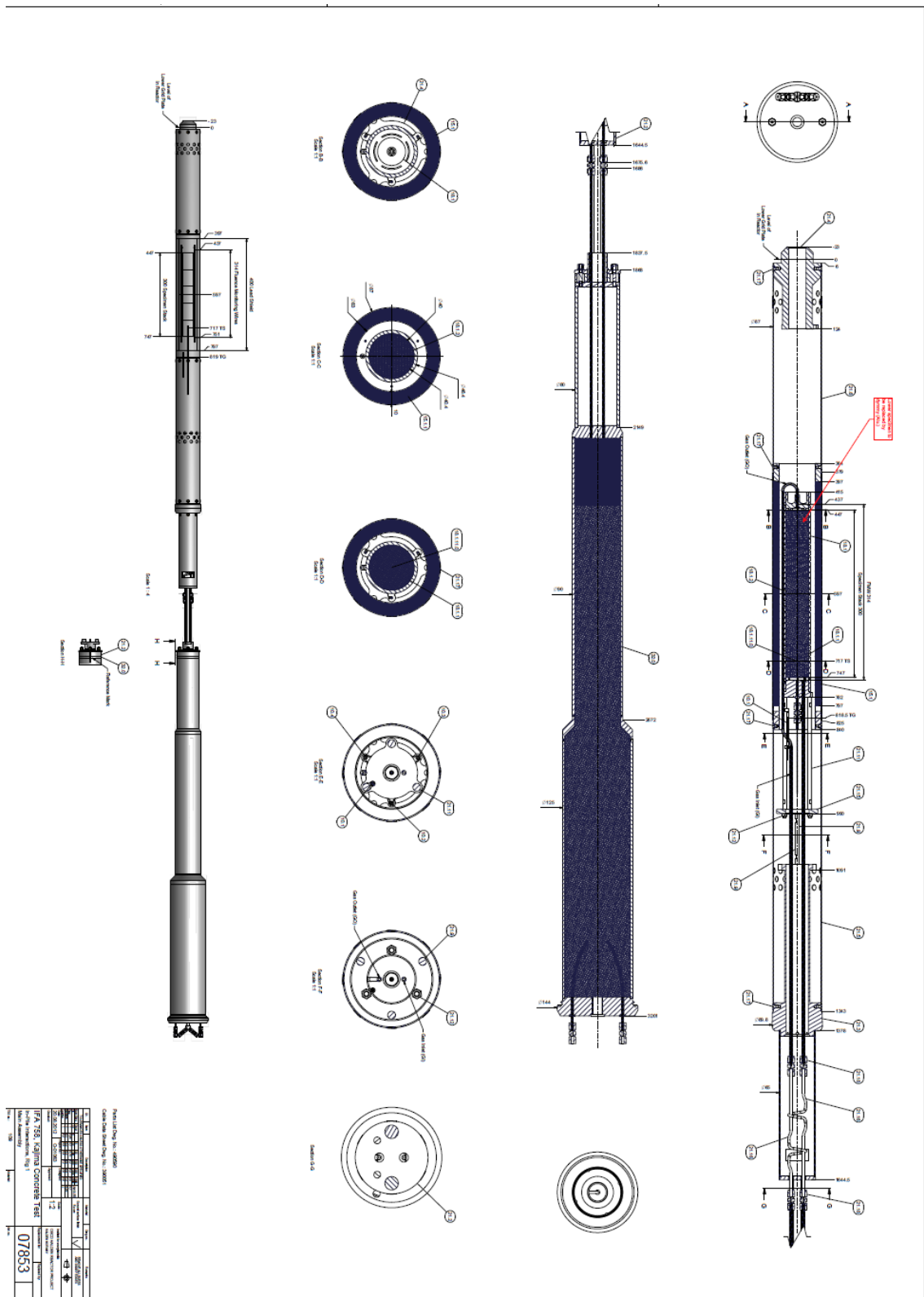


図 2.291 IT 試験に用いられたリグの形状
(IFE 提供)

(2) MCNP5 による試験体系の構築

1) 幾何体系

前項の JEEP II 炉および中性子照射試験の体系情報を MCNP5 によりモデル化する。モデル化にあたり JEEP II 炉およびコンクリート試験に用いられる構造物の中でも、照射試験結果に大きく影響を与えるものを抽出し、モデル化の対象とした(表 2.67)。

表 2.67 試験体系のモデル化の対象とした構造物

分類	構造物
JEEP II 炉 構造物	燃料棒
	制御棒
	減速材
	照射孔
	コンクリート壁
PPT 試験	リグ
	キャプセル
	コンクリート試験体
IT 試験	リグ
	キャプセル
	遮蔽体
	セメントペースト試験体
	ダミー試験体

表 2.67 に記載のない他の配管等の構造物やリグ、キャプセル等にある細かな凹凸は中性子照射に大きく影響しないと考えられるため、試験体系の構築対象から除外した。また、リグの長さについても有効燃料長以上は中性子照射に大きく影響しないと考えられるため、実際のリグの寸法よりも短くしている。実際にモデル化した図面を図 2.293 と図 2.294 に示す。

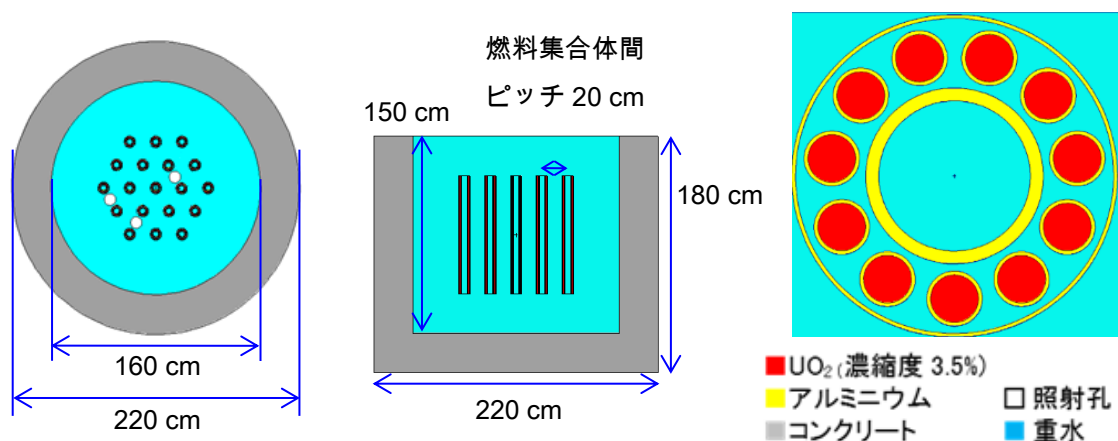


図 2.293 JEEP II 炉の MCNP5 モデル(左：平面図、中央：立面図、右：燃料集合体拡大図)

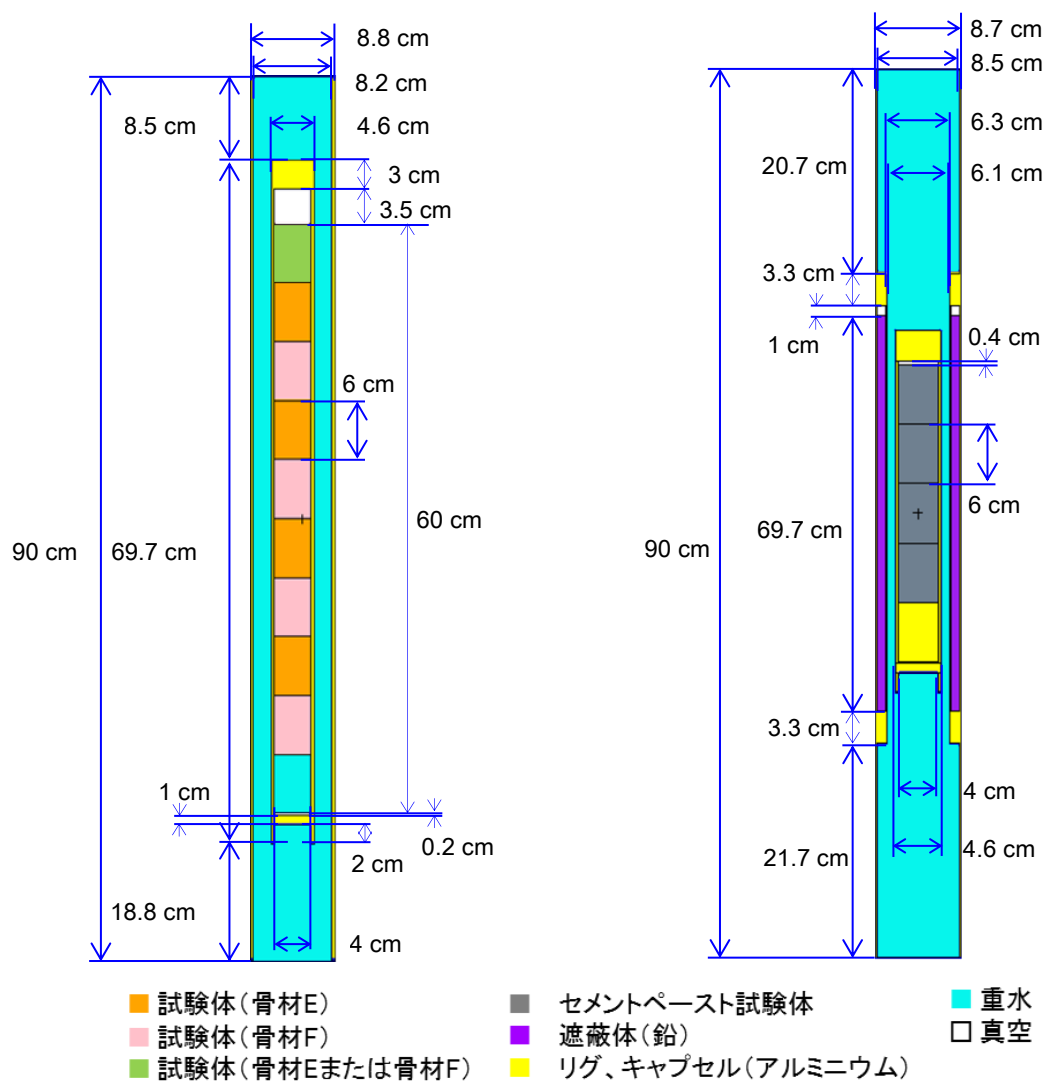


図 2.294 挿入リグの MCNP5 モデル (左：PPT 試験、右：IT 試験)

2) 組成

MCNP5 で構築した JEEP II 炉の組成の詳細は下記のとおりである。

表 2.68 中性子照射試験対象物の MCNP5 モデル組成

		構造物										
		燃料濃縮度 3.5%UO ₂	燃料集合体、 燃料構想物	重水	コンク リート壁	リグ キャプセル ダミー	遮蔽体	コンクリート試験体		セメントペースト試験体		
								骨材 E	骨材 F	封緘	乾燥 75℃	乾燥 120℃
核種	H-1				5.344E-03			1.184E-02	1.224E-02	8.334E-03	5.012E-03	4.442E-03
	H-2			6.64770E-02								
	O-16	4.64149E-02		3.32390E-02	4.106E-02			4.479E-02	4.474E-02	7.593E-03	6.614E-03	6.447E-03
	Na-23							4.649E-04	4.794E-04	1.015E-05	1.218E-05	1.252E-05
	Mg-nat				6.126E-05			1.768E-04	1.752E-04	2.985E-05	3.580E-05	3.682E-05
	Al-27		6.03070E-02		2.140E-04	6.0307E-02		2.894E-03	2.932E-03	2.404E-04	2.884E-04	2.965E-04
	Si-28				1.641E-02			1.346E-02	1.327E-02	4.631E-04	5.553E-04	5.712E-04
	Si-29				8.311E-04			6.838E-04	6.744E-04	2.352E-05	2.821E-05	2.902E-05
	Si-30				5.517E-04			4.512E-04	4.451E-04	1.552E-05	1.862E-05	1.915E-05
	P-31							2.546E-05	2.459E-05	1.546E-05	1.855E-05	1.908E-05
	S-nat				2.827E-05			1.149E-04	1.129E-04	7.346E-05	8.814E-05	9.059E-05
	Cl-nat							2.767E-08	2.860E-08			
	K-nat							2.703E-04	2.710E-04	1.353E-05	1.623E-05	1.669E-05
	Ca-nat				2.219E-03			2.645E-03	2.730E-03	1.581E-03	1.895E-03	1.950E-03
	Ti-nat							4.871E-05	4.870E-05	7.010E-06	8.407E-06	8.647E-06
	Mn-55							2.040E-05	1.960E-05	2.175E-06	2.608E-06	2.683E-06
	Fe-54				3.682E-05			5.909E-05	5.917E-05	6.934E-06	8.316E-06	8.554E-06
	Fe-56				5.822E-04			9.276E-04	9.291E-04	1.089E-04	1.306E-04	1.343E-04
	Fe-57				1.396E-05			2.142E-05	2.146E-05	2.514E-06	3.015E-06	3.102E-06
	Fe-58				1.777E-06			2.850E-06	2.855E-06	3.346E-07	4.011E-07	4.128E-07
	Pb-nat						3.2988E-02					
	U-234	8.49269E-06										
	U-235	1.05705E-03										
	U-238	2.21413E-02										

ここで図中の数値は原子個数密度（単位：10²⁴/cm³）を表す。

(3) MCNP5 による物理量の計算

1) 計算条件

MCNP5 を実行するにあたり、設定した MCNP5 における解析条件を表 2.69 に示す。試験体の放射線影響や発熱量を見積もるために出力は中性子及びガンマ線のフルエンスと沈着エネルギーとした。

表 2.69 解析条件

解析コード	MCNP5
断面積ライブラリ	ENDF/B、連続エネルギーACE 形式
ヒストリ数	PPT 試験：118000000/IT 試験：38000000
バッチ数	6000
スキップ数	100
解析領域	半径 110cm、高さ 180cm の円筒形状
境界条件	真空境界

2) 計算結果

■ MCNP 出力の規格化と全出力換算日数による換算

モニタリングワイヤによる PPT 試験及び IT 試験による中性子の照射量の測定結果を以下の表 2.70 に示す。なお、表中の値は炉心軸方向中心の照射量を示す。また表 2.70 には正味の照射期間を表すものとして、全出力に換算した場合の照射日数である全出力換算日数を示す。

表 2.70 モニタリングワイヤから得られた試験体への中性子累積照射量と全出力換算日数

試験 ID	熱中性子フルエンス [n/cm ²]	速中性子フルエンス [n/cm ²]	全出力換算日数 [日]
PPT-B	3.41×10^{19}	8.13×10^{18}	25.19
PPT-C	7.47×10^{19}	1.48×10^{19}	45.25
PPT-D	2.41×10^{20}	4.77×10^{19}	155.59
PPT-E	4.25×10^{20}	9.60×10^{19}	299.39
IT-A1	7.24×10^{19}	1.62×10^{19}	50.32
IT-A2	8.60×10^{19}	2.00×10^{19}	60.66
IT-A3	1.11×10^{20}	2.61×10^{19}	80.83
IT-A4	8.35×10^{19}	1.86×10^{19}	56.42

本解析では表 2.70 のモニタリングワイヤによる速中性子累積照射量の値と MCNP で算定した 1 中性子あたりの中性子フルエンスについて各試験体の内最大となるものが一致するように中性子発生量を決め、規格化を行った。熱中性子は速中性子に比べて

散乱の影響が大きく、その起源について不確かさが大きいため、モニタリングワイヤと MCNP による解析結果の整合を取る上で不適であると判断した。規格化した線束および沈着エネルギーに全出力換算日数を乗じることで、累積照射量と吸収線量を得る。

■ 解析結果

PPT 試験の中性子累積照射量、中性子吸収線量、ガンマ線累積照射量、ガンマ線吸収線量の計算結果を図 2. 295 から図 2. 310 に示す。ここでは、頂部から底部までのコンクリート試験体位置を上から順に vp1、vp2、…、vp9 と呼ぶことにする。

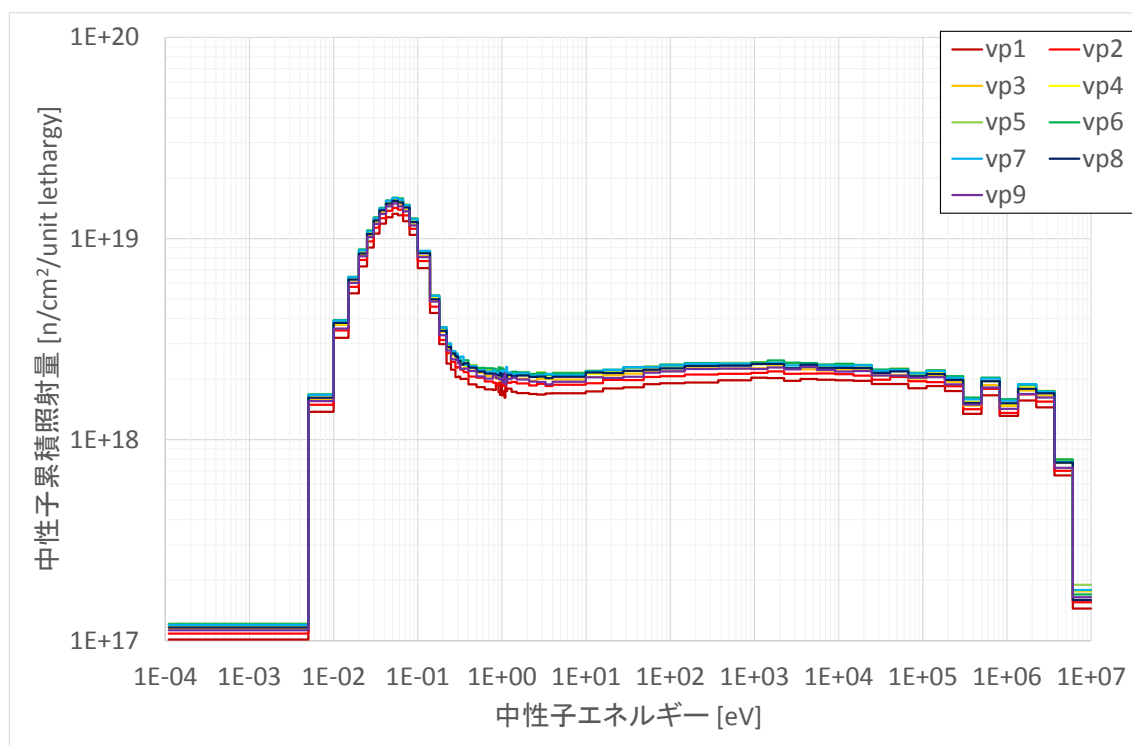


図 2. 295 PPT-B 試験における中性子エネルギーに対する中性子累積照射量

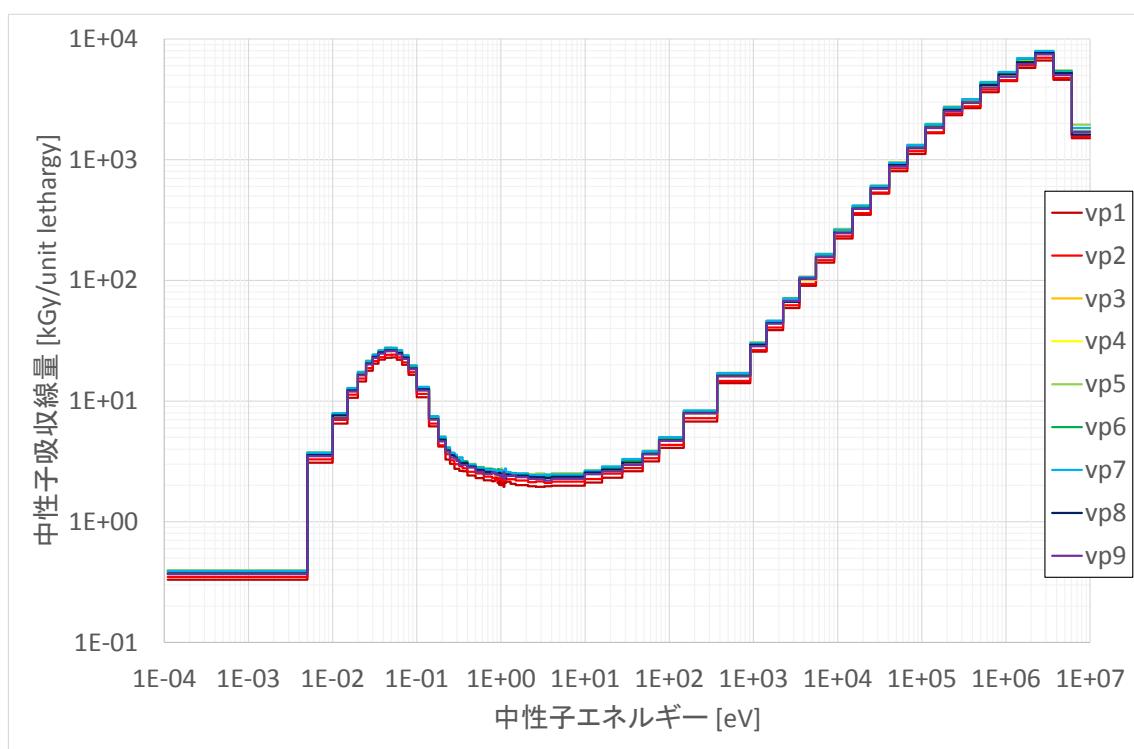


図 2.296 PPT-B 試験における中性子エネルギーに対する中性子吸収線量

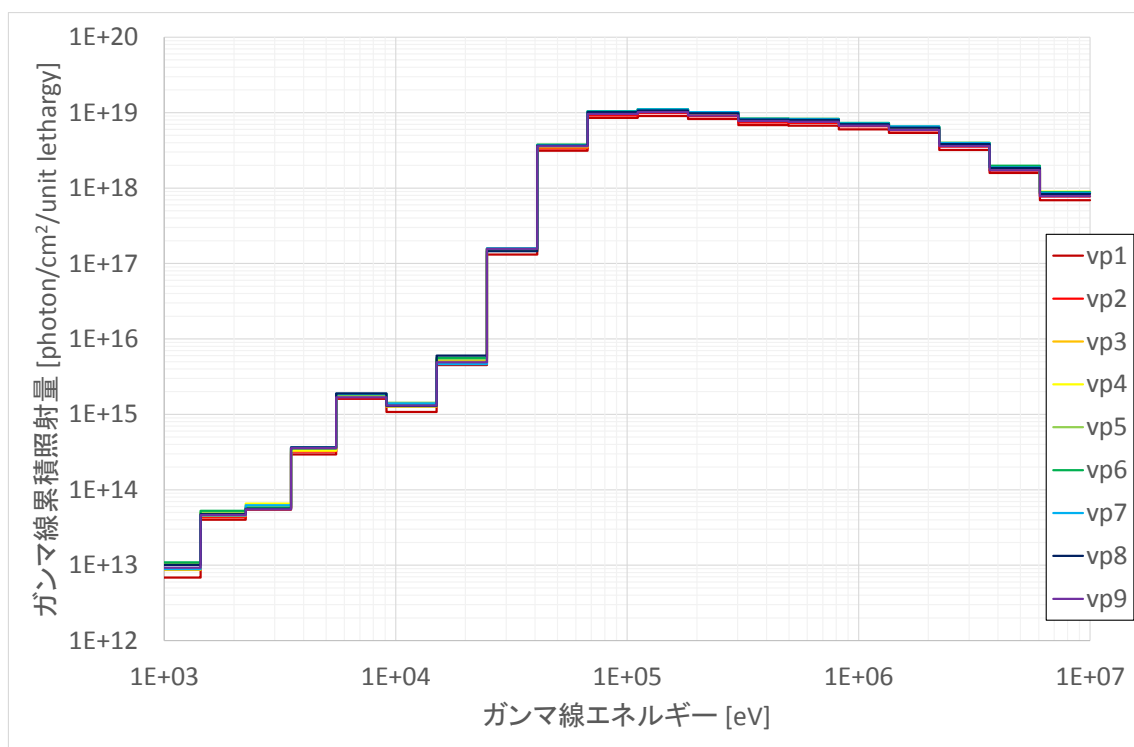


図 2.297 PPT-B 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線累積照射量

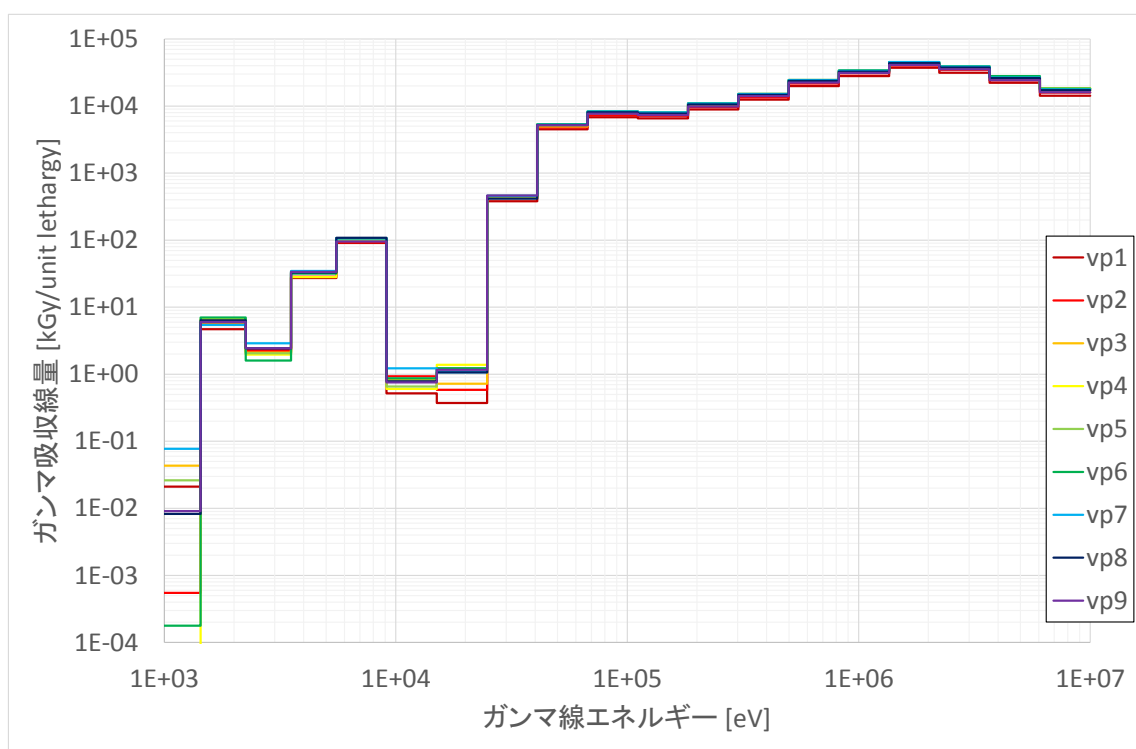


図 2.298 PPT-B 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線吸収線量

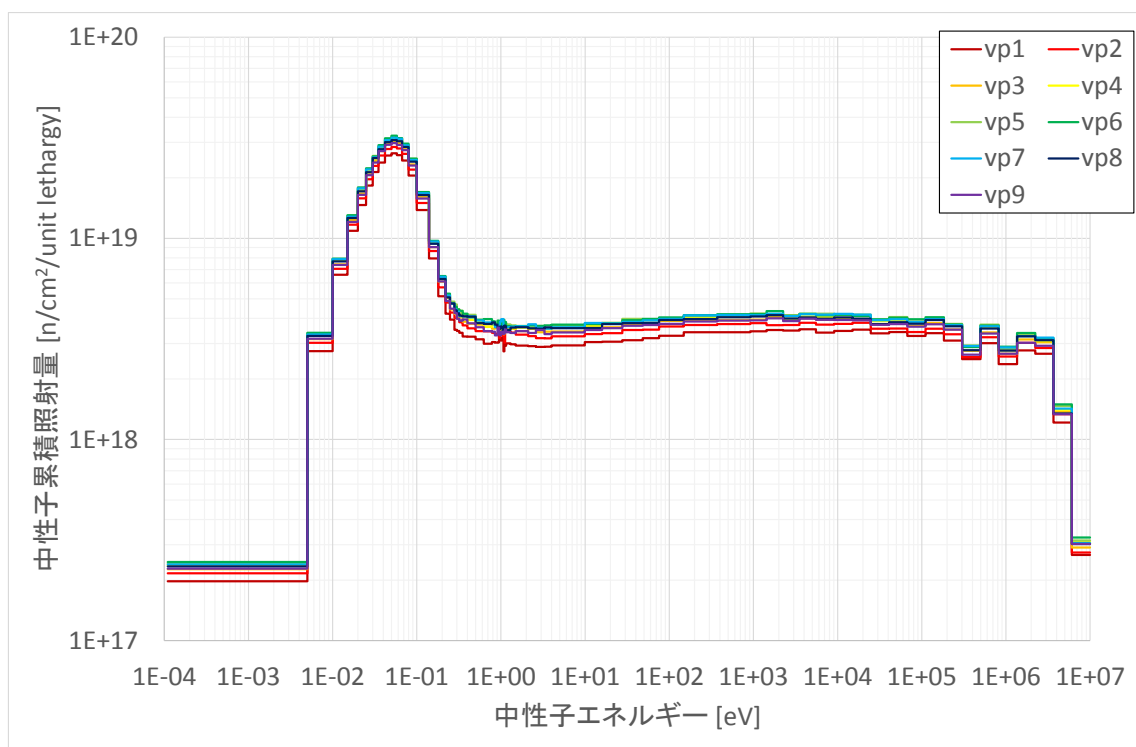


図 2.299 PPT-C 試験における中性子エネルギーに対する中性子累積照射量

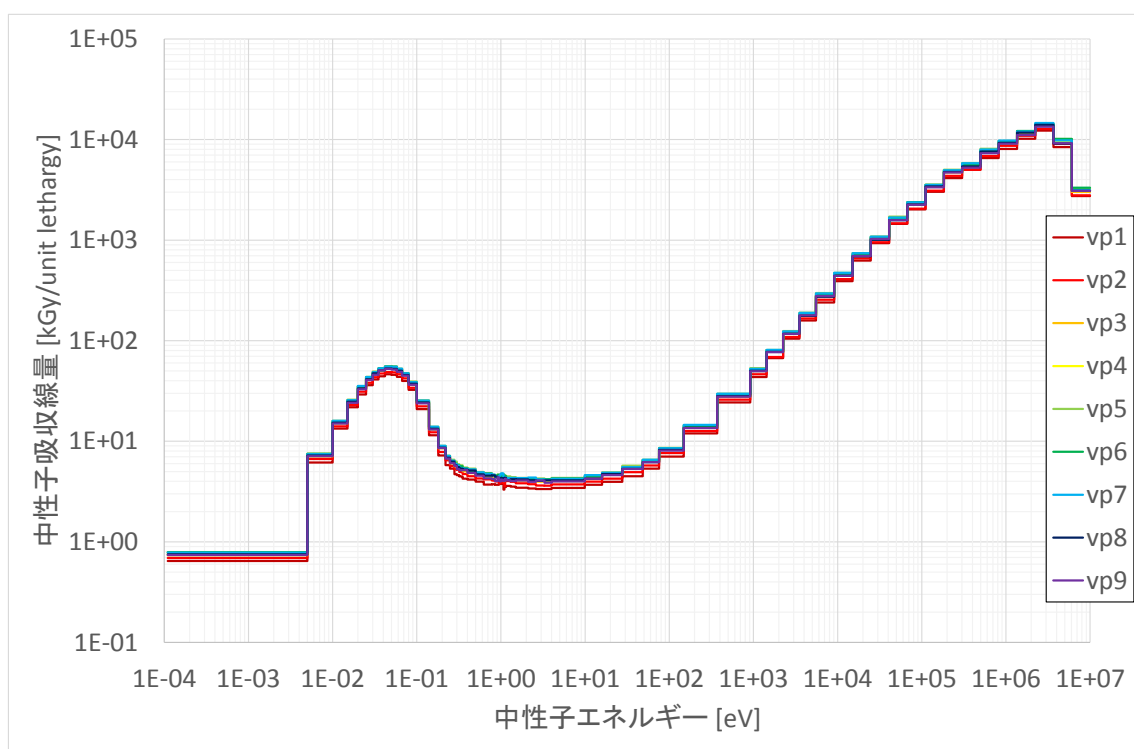


図 2.300 PPT-C 試験における中性子エネルギーに対する中性子吸収線量

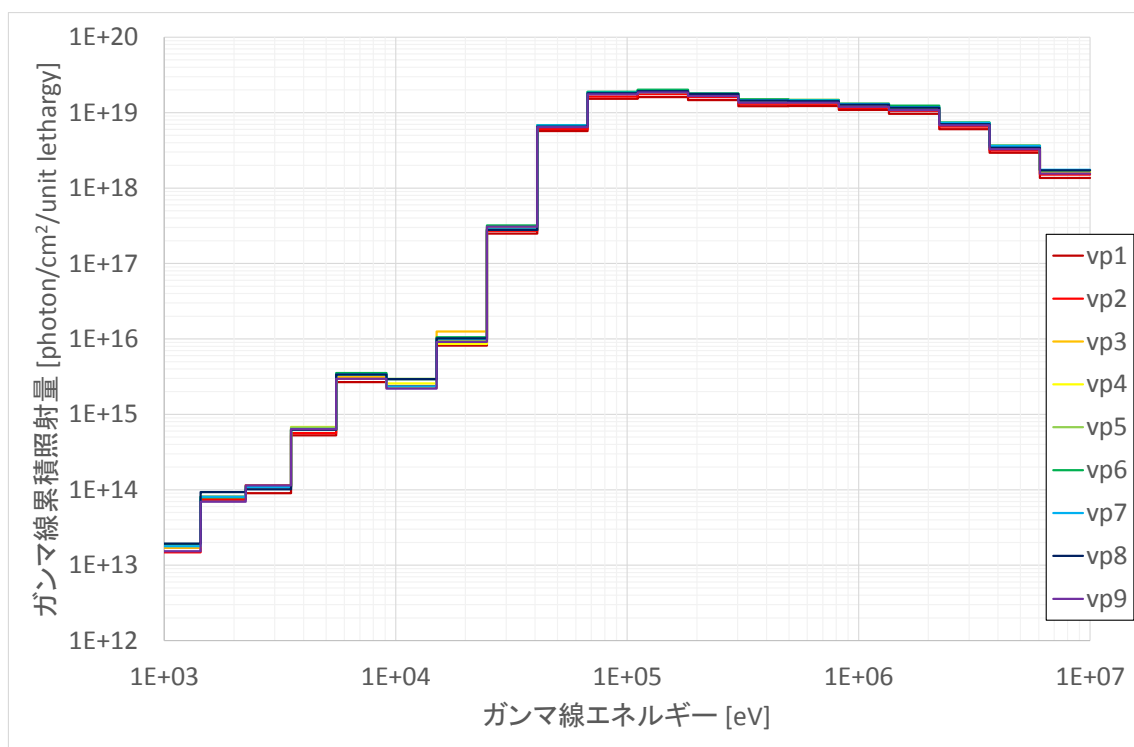


図 2.301 PPT-C 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線累積照射量

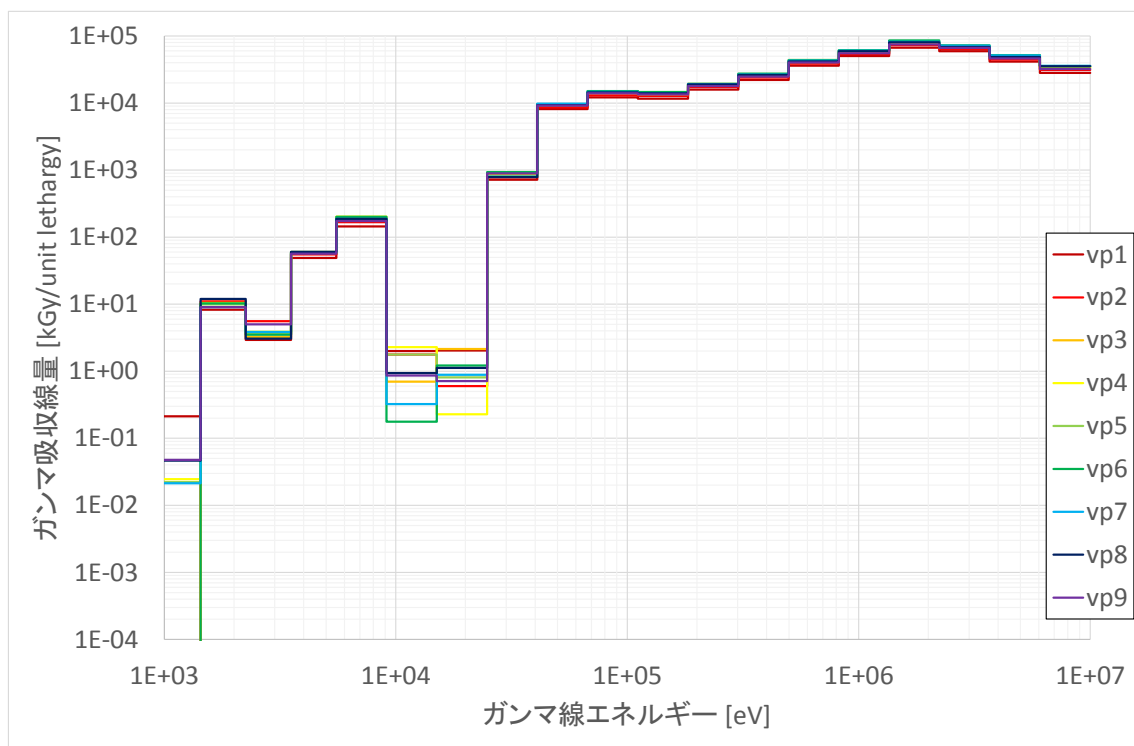


図 2.302 PPT-C 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線吸収線量

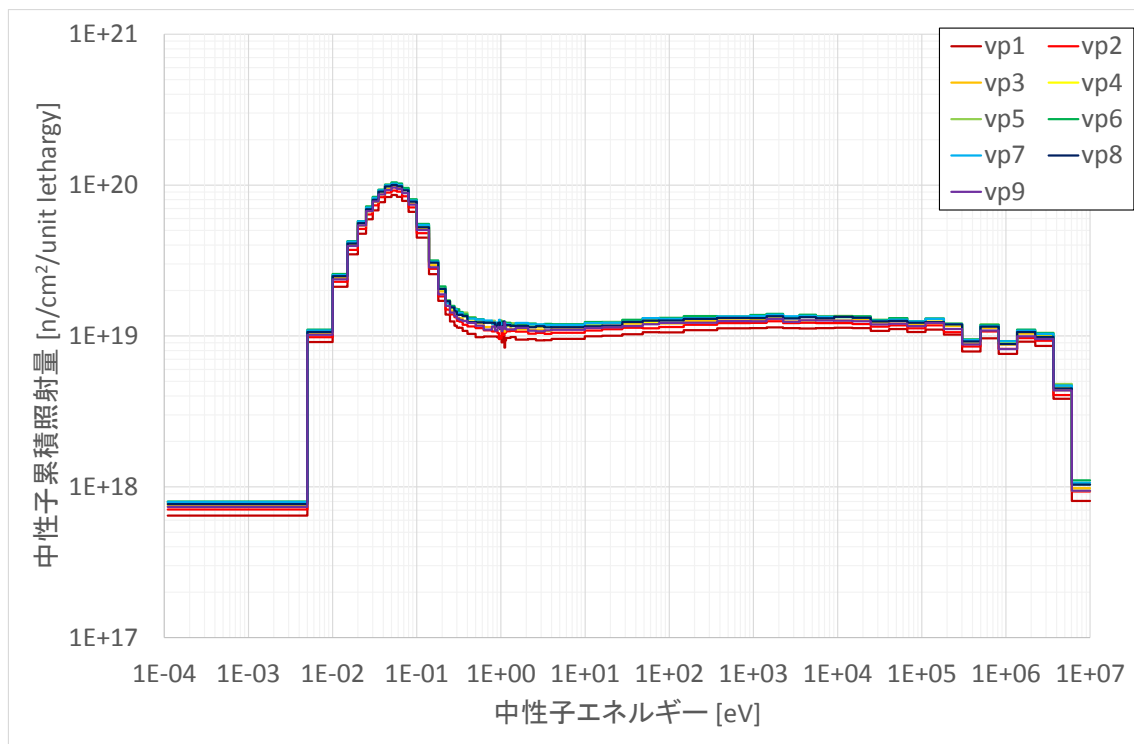


図 2.303 PPT-D 試験における中性子エネルギーに対する中性子累積照射量

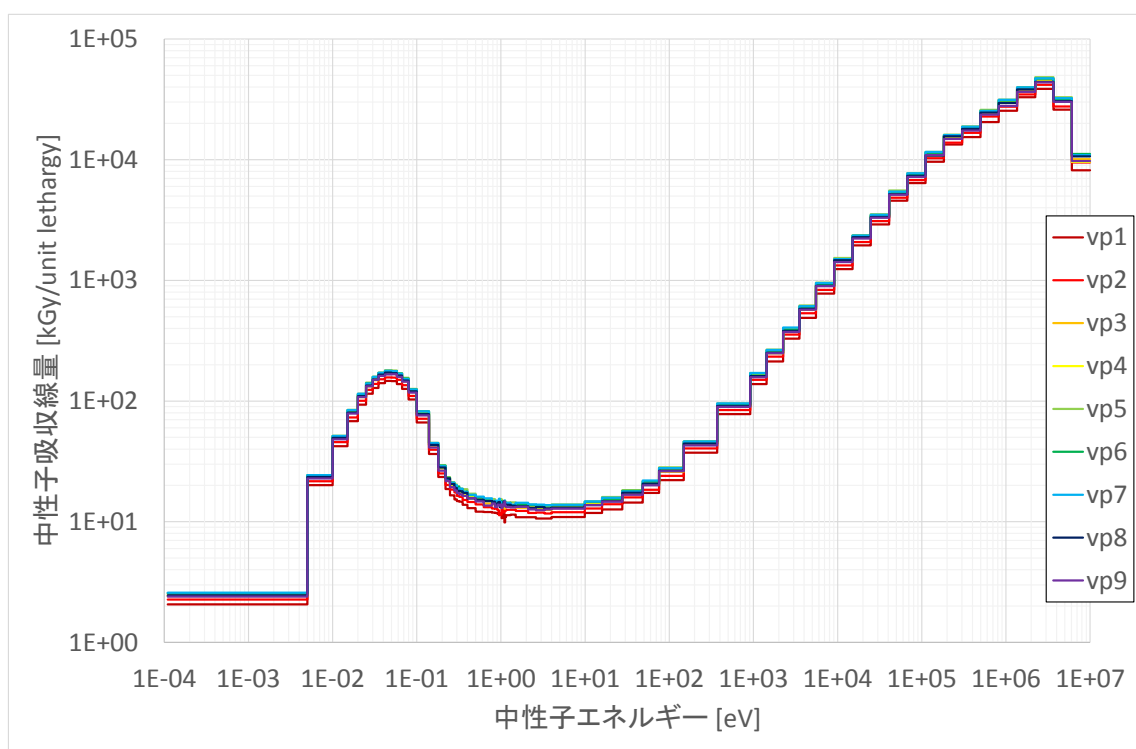


図 2.304 PPT-D 試験における中性子エネルギーに対する中性子吸収線量

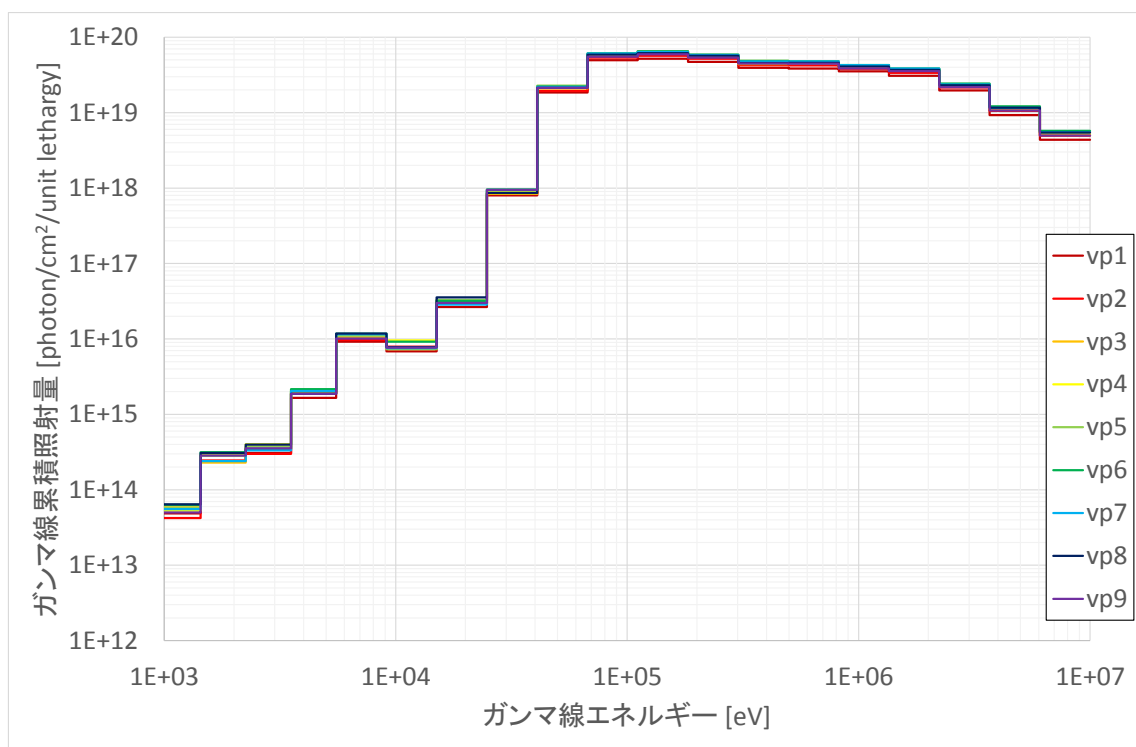


図 2.305 PPT-D 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線累積照射量

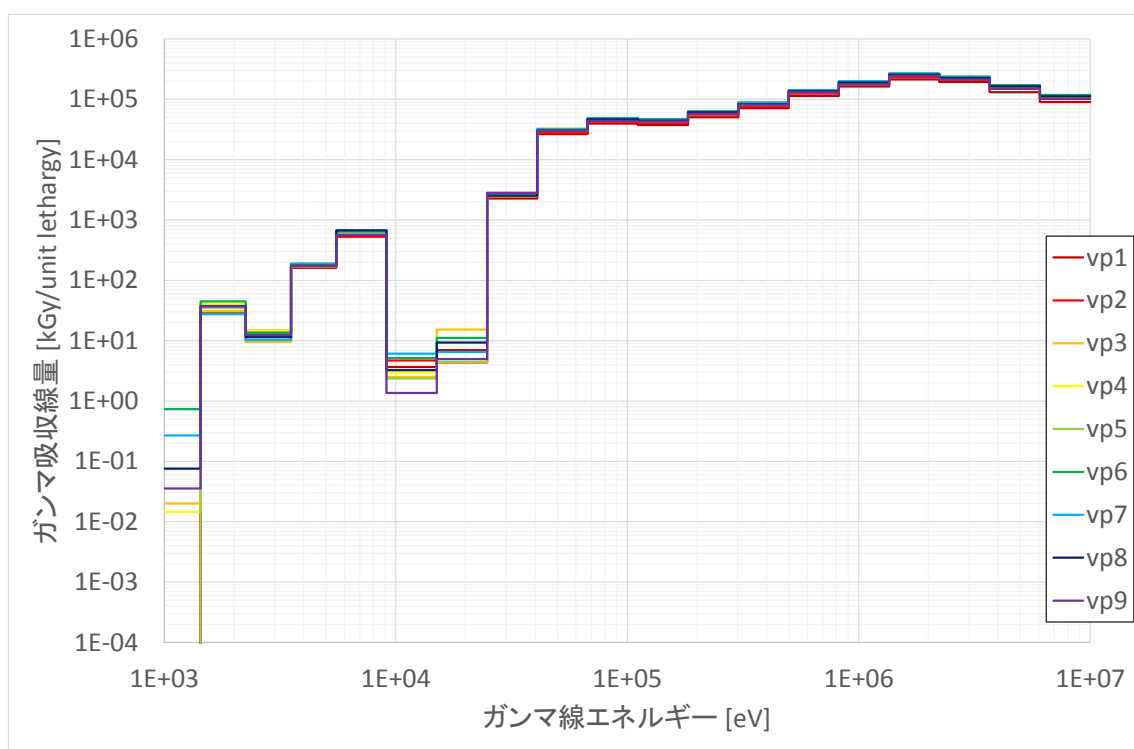


図 2.306 PPT-D 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線吸収線量

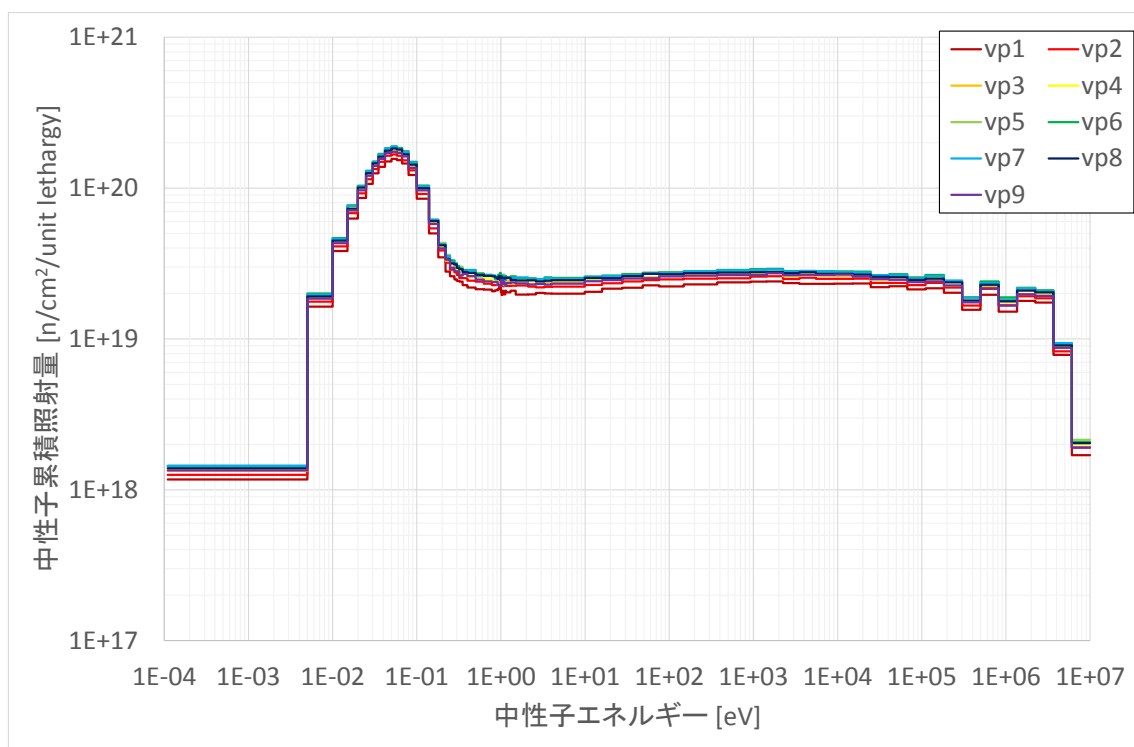


図 2.307 PPT-E 試験における中性子エネルギーに対する中性子累積照射量

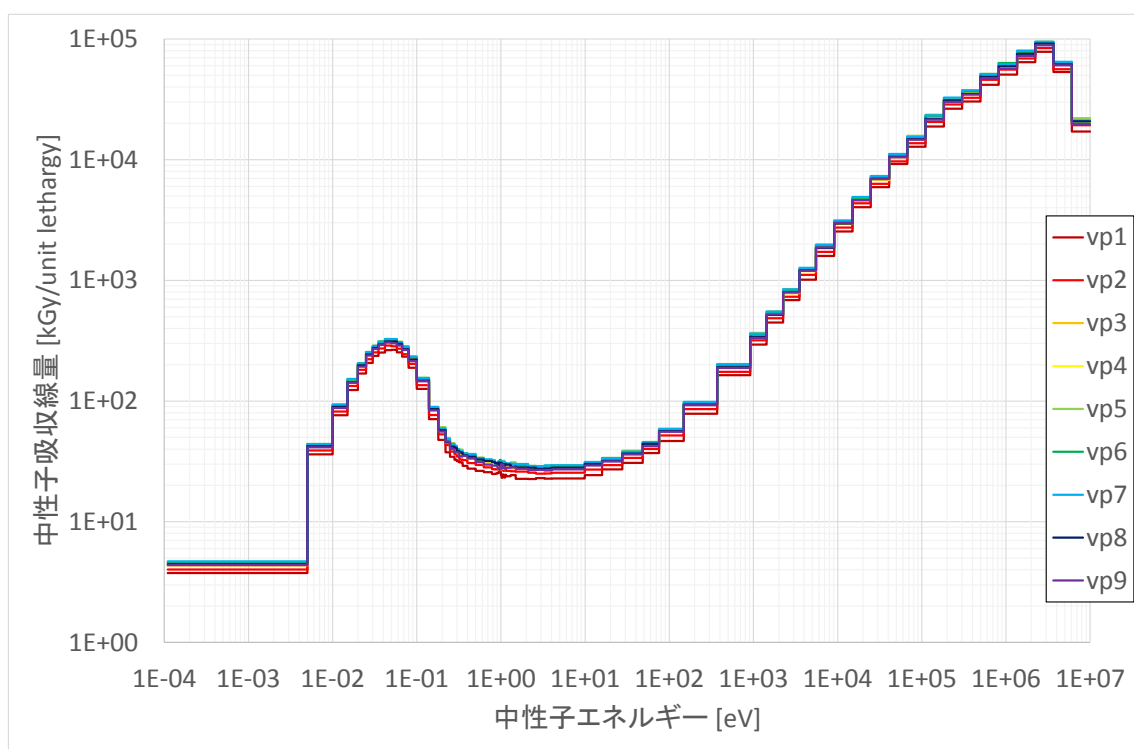


図 2.308 PPT-E 試験における中性子エネルギーに対する中性子吸収線量

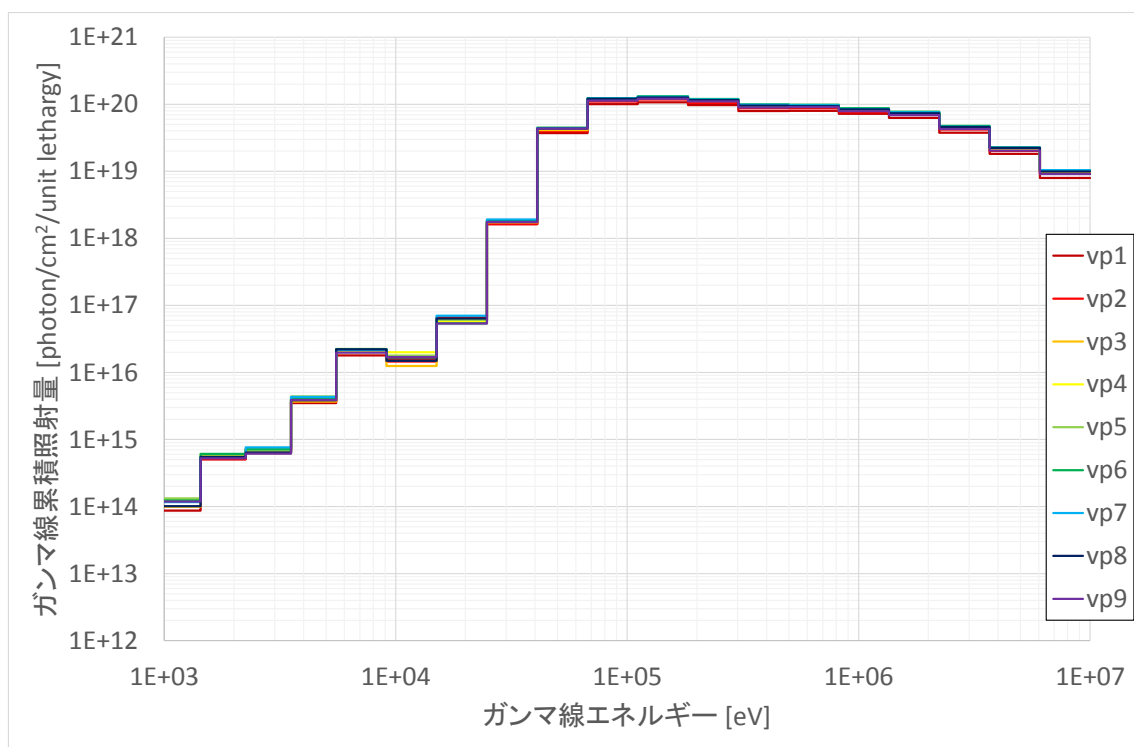


図 2.309 PPT-E 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線累積照射量

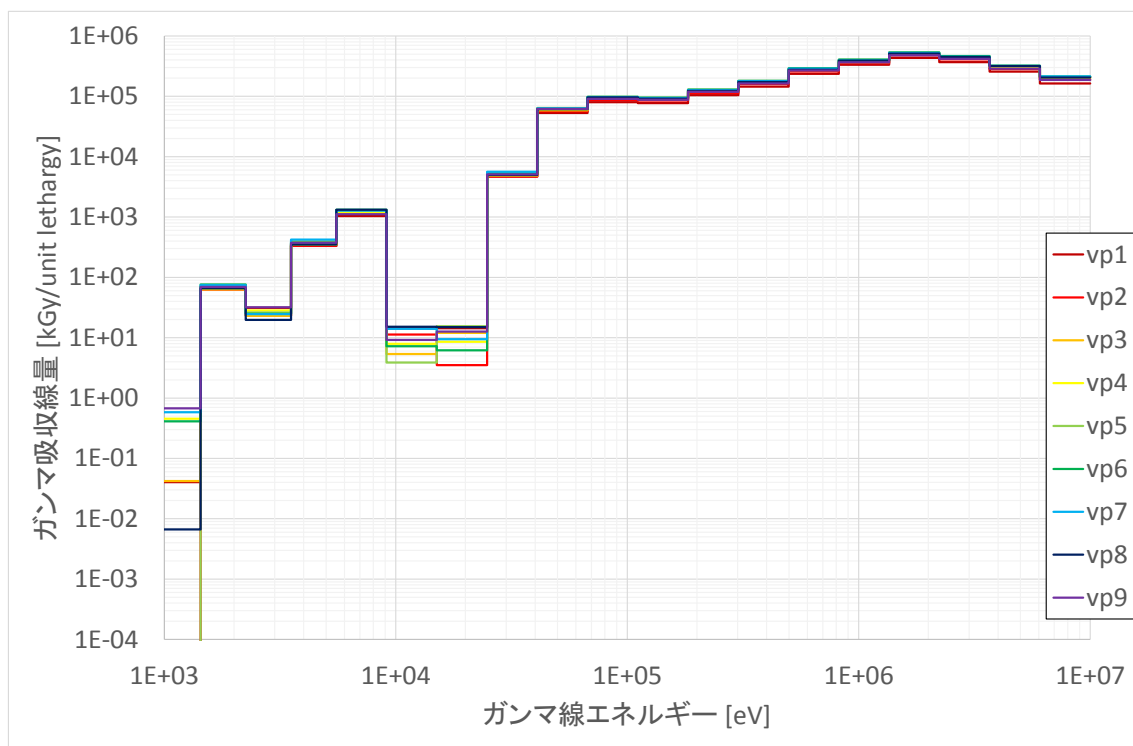


図 2.310 PPT-E 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線吸収線量

同様に IT 試験の中性子累積照射量、中性子吸収線量、ガンマ線累積照射量、ガンマ線吸収線量の計算結果を図 2.311 から図 2.326 に示す。ここでは、頂部から底部までのセメントペースト試験体位置を上から順に vp2.5、vp3.5、vp4.5、vp5.5 と呼ぶことにする。

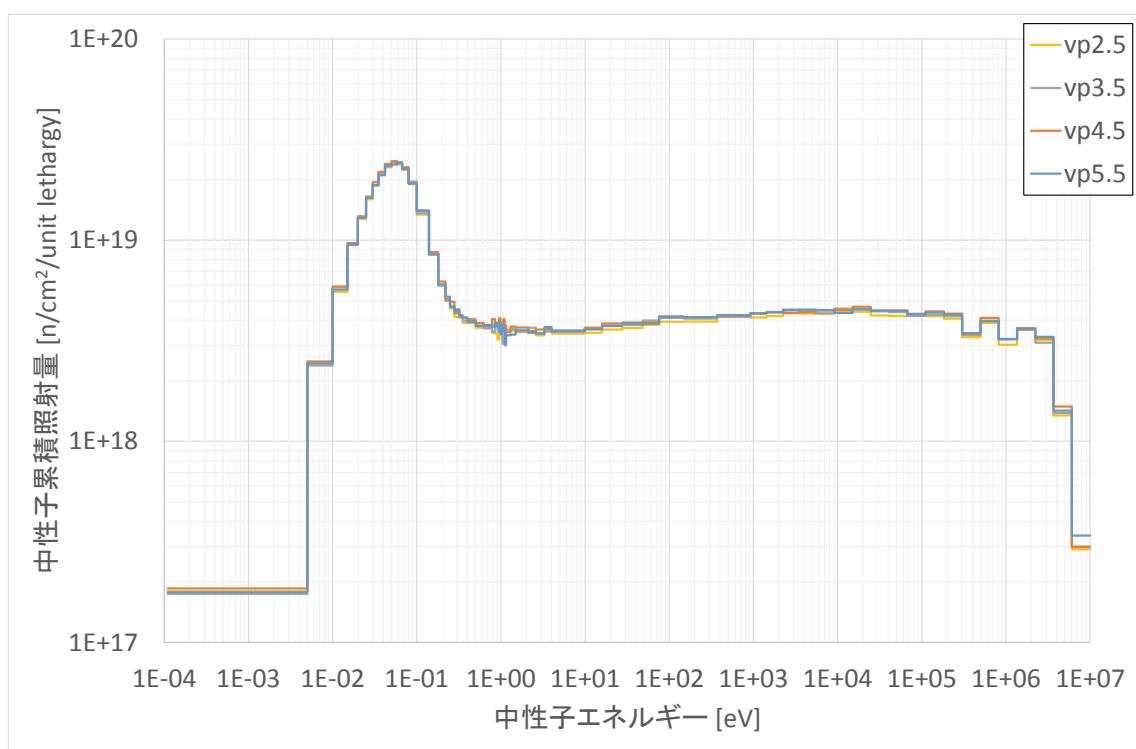


図 2.311 IT-A1 試験における中性子エネルギーに対する中性子累積照射量

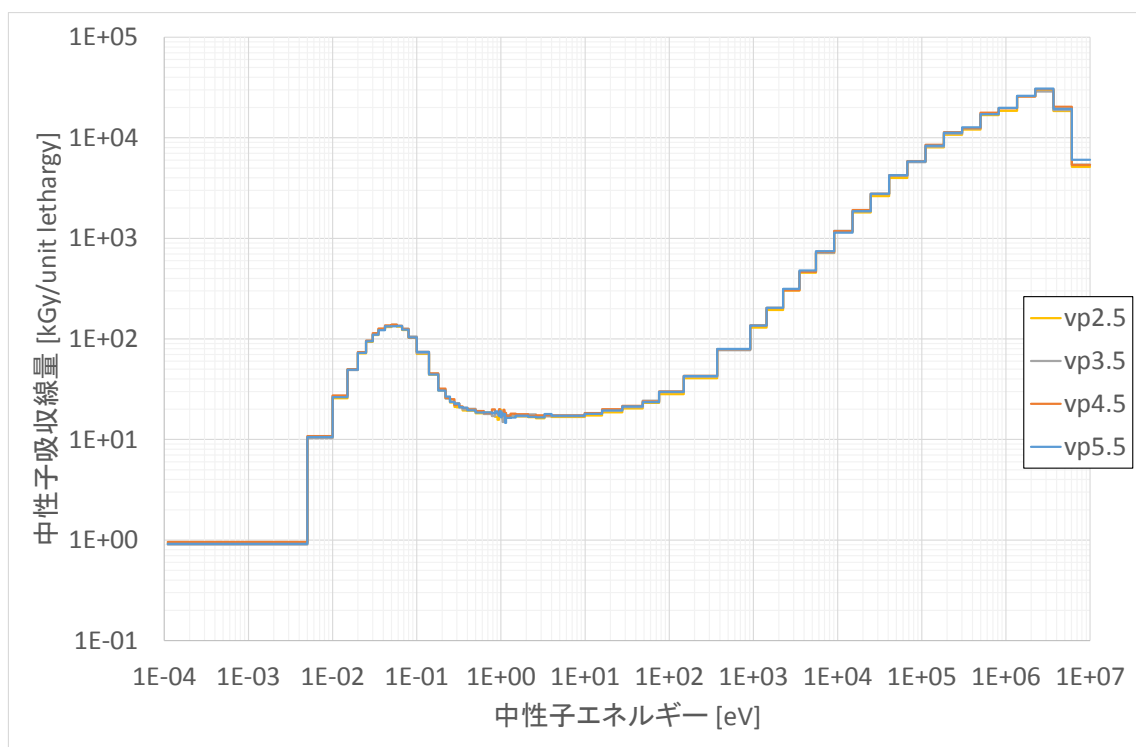


図 2.312 IT-A1 試験における中性子エネルギーに対する中性子吸収線量

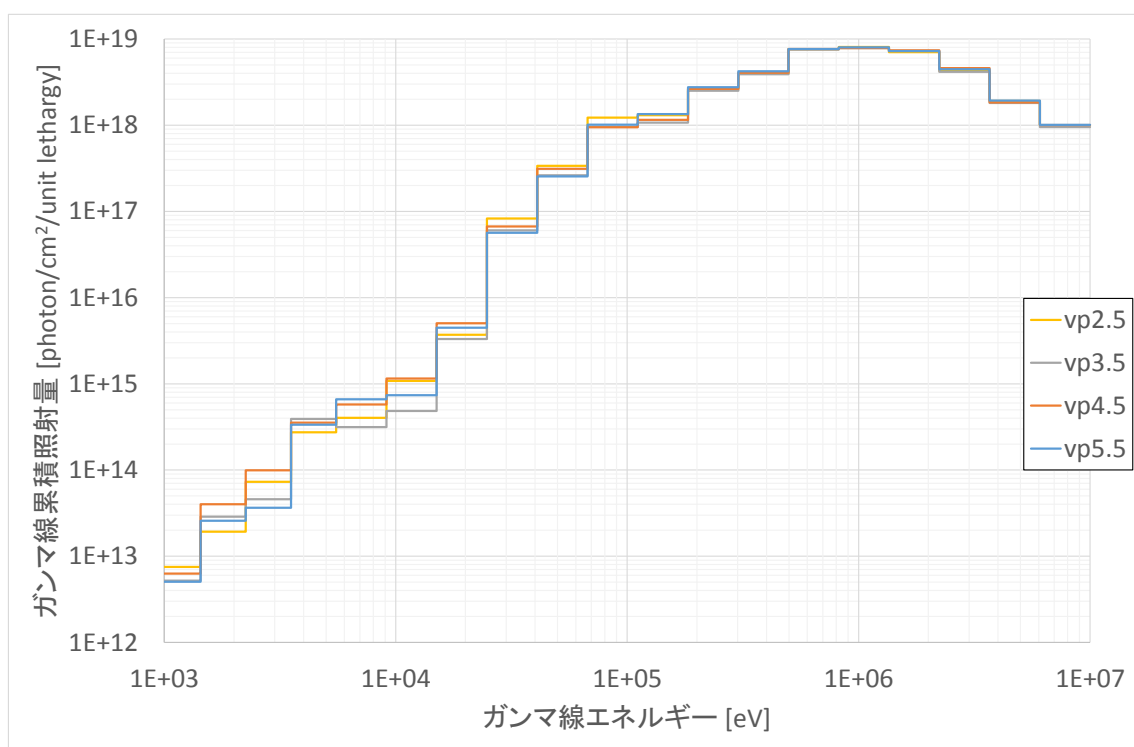


図 2.313 IT-A1 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線累積照射量

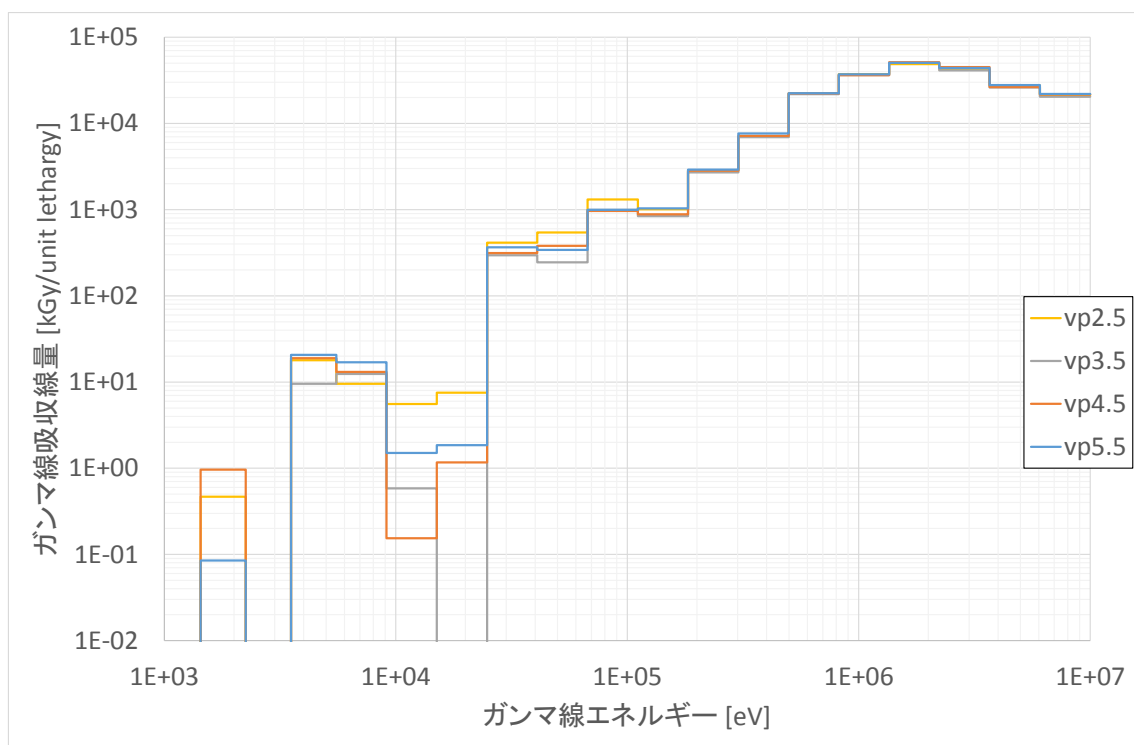


図 2.314 IT-A1 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線吸収線量

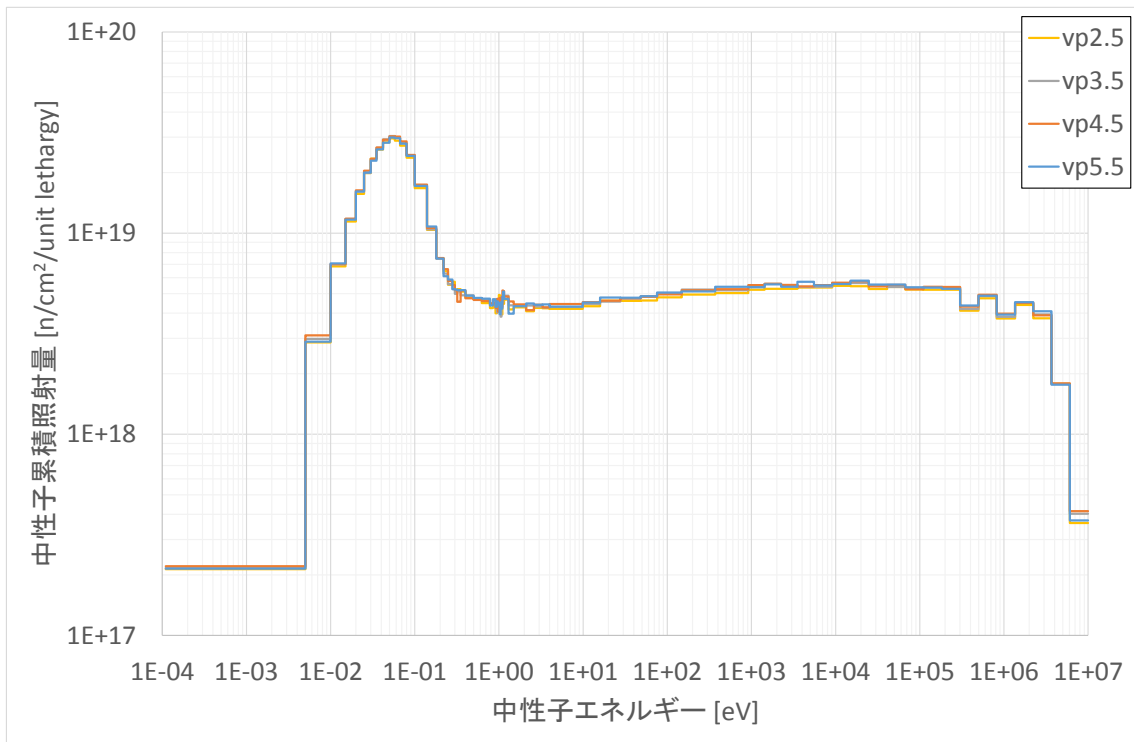


図 2.315 IT-A2 試験における中性子エネルギーに対する中性子累積照射量

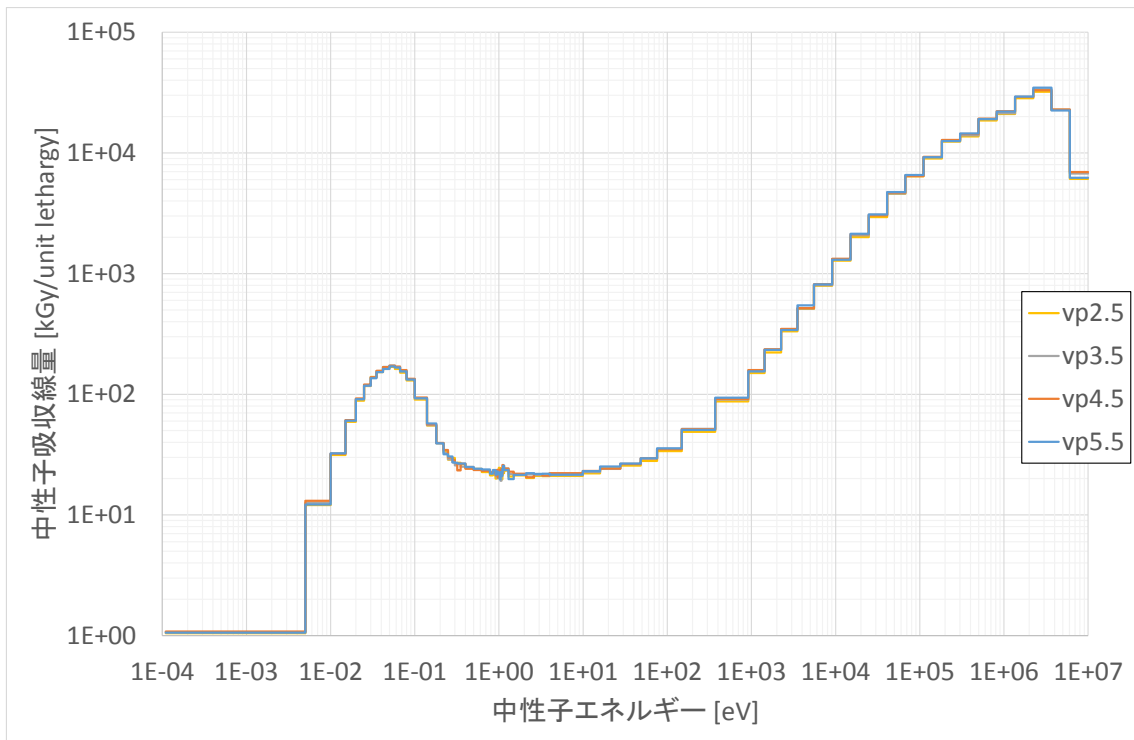


図 2.316 IT-A2 試験における中性子エネルギーに対する中性子吸収線量

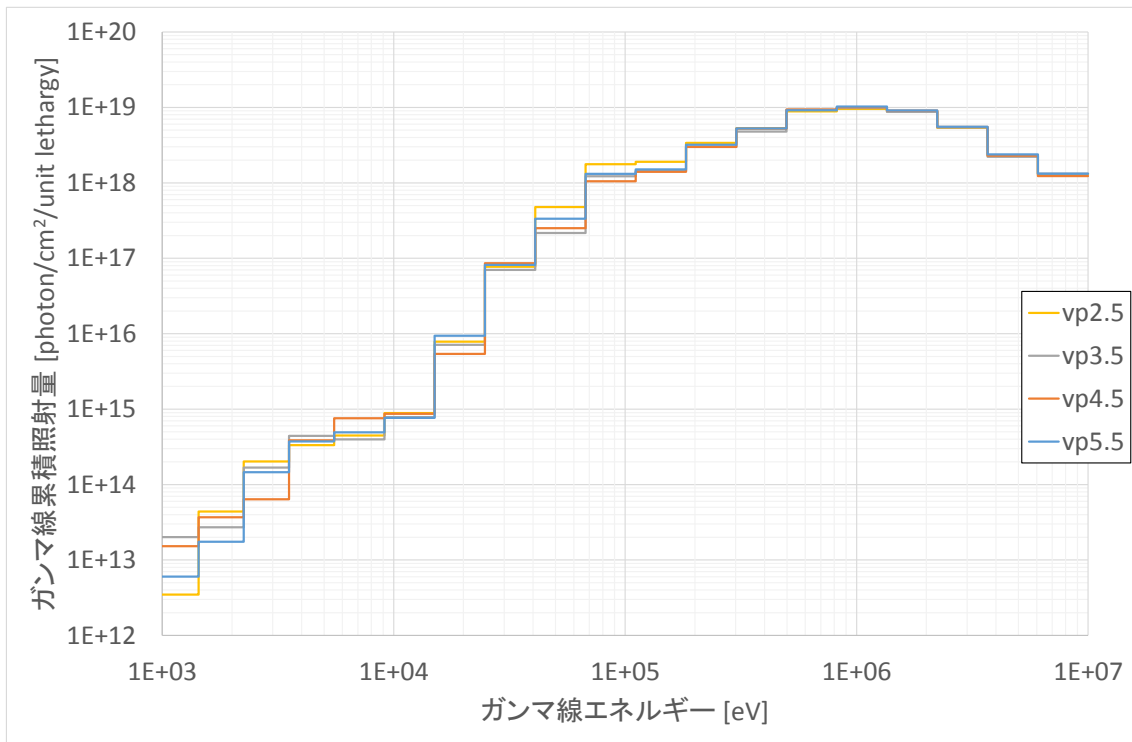


図 2.317 IT-A2 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線累積照射量

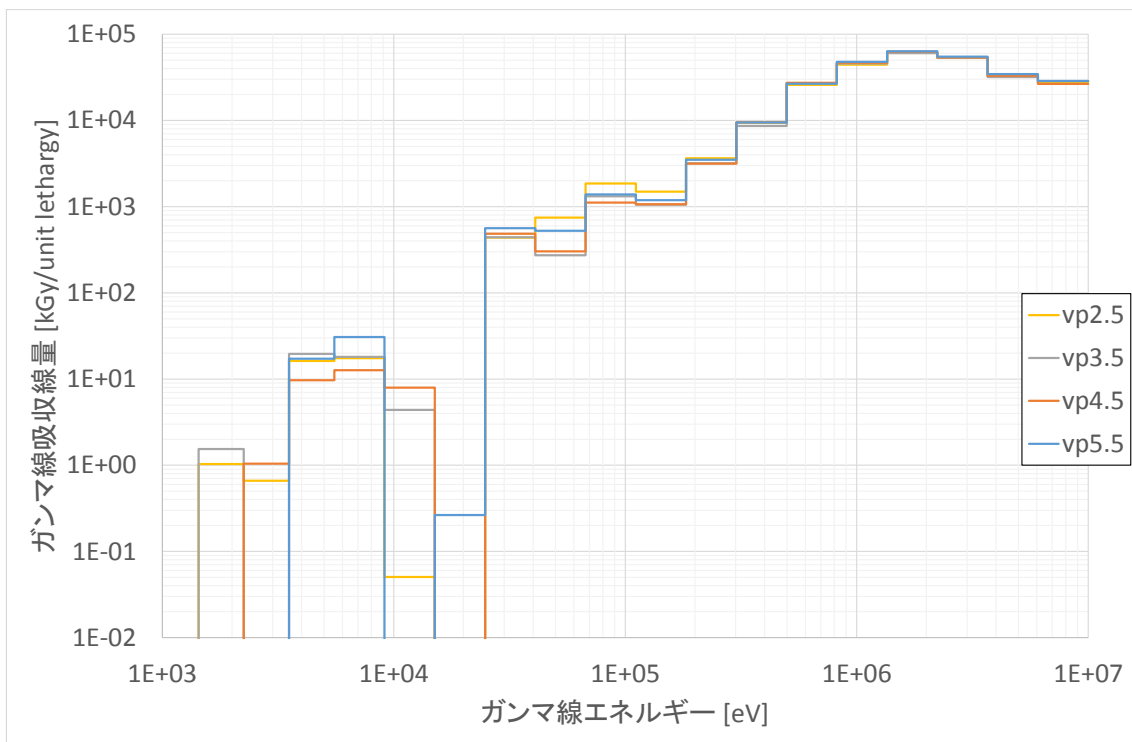


図 2.318 IT-A2 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線吸収線量

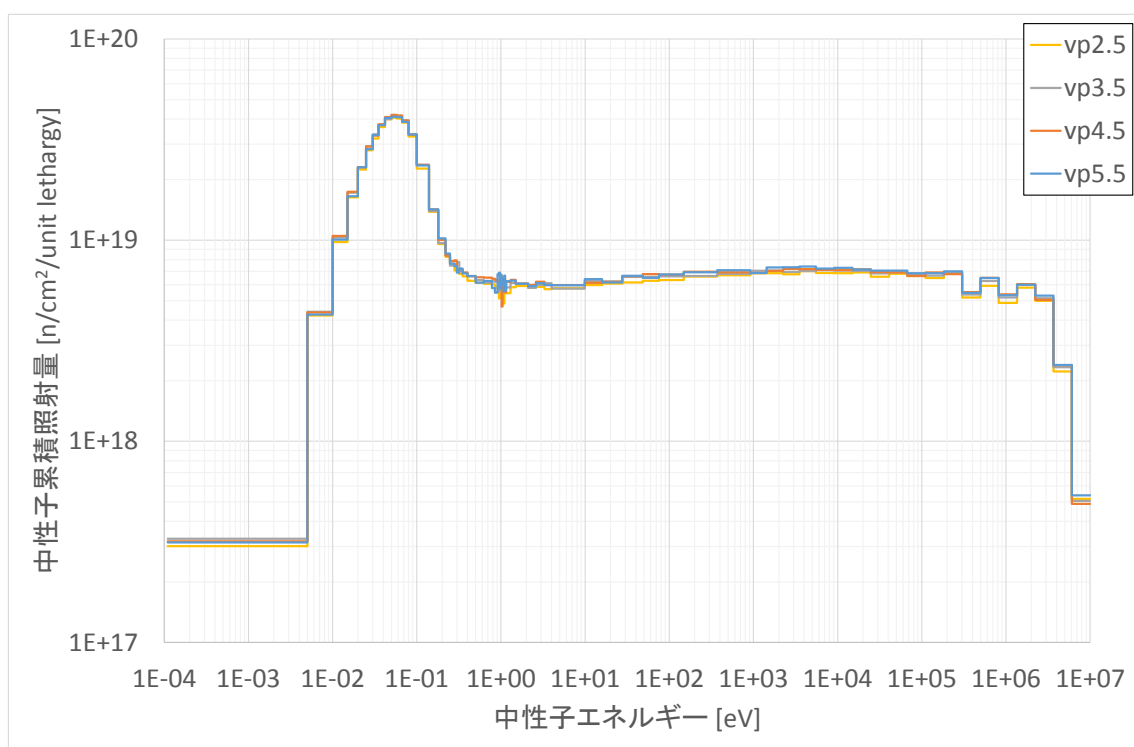


図 2.319 IT-A3 試験における中性子エネルギーに対する中性子累積照射量

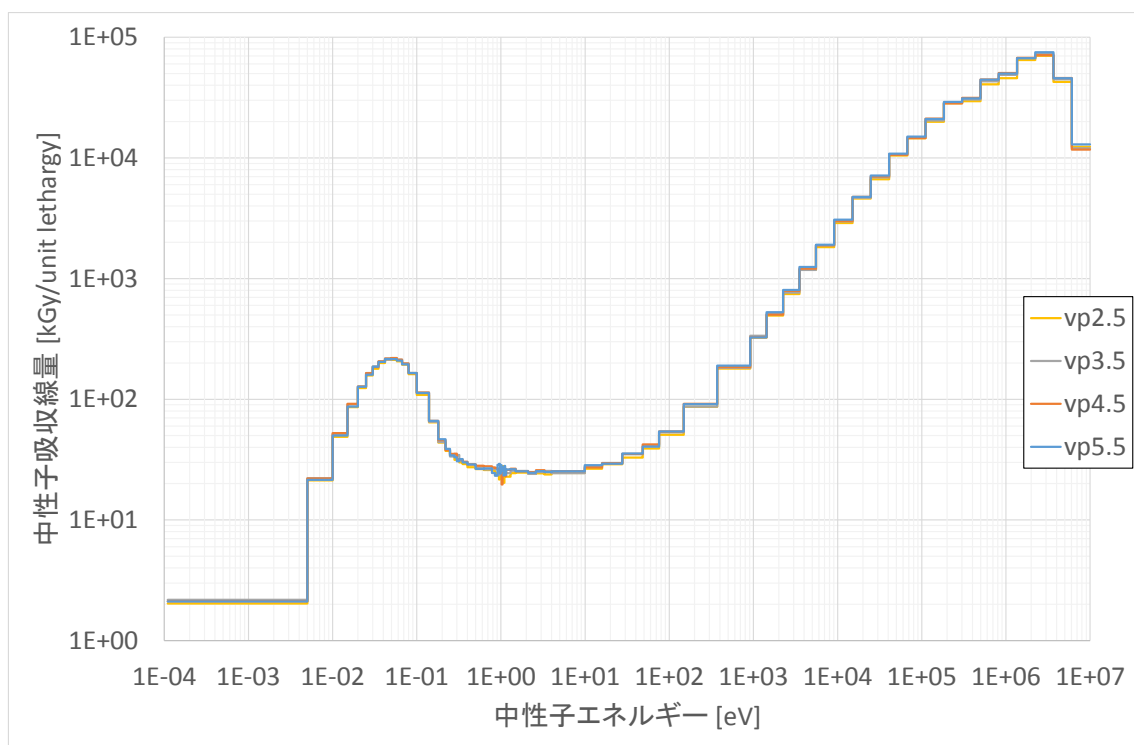


図 2.320 IT-A3 試験における中性子エネルギーに対する中性子吸収線量

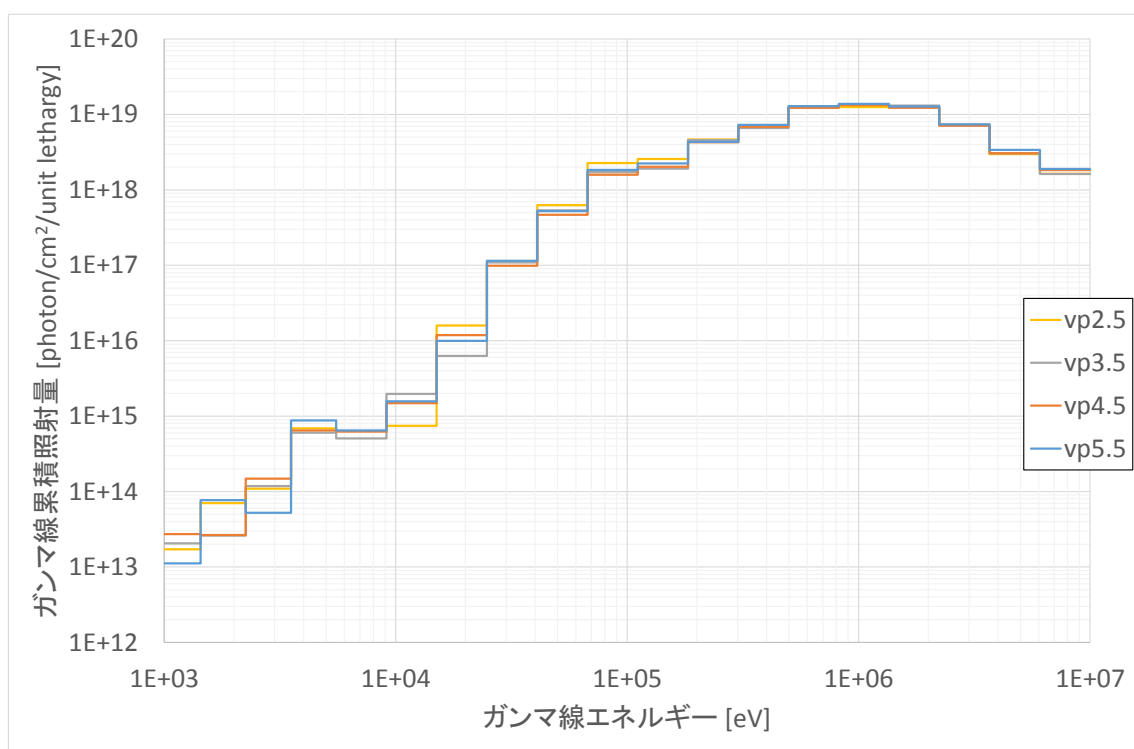


図 2.321 IT-A3 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線累積照射量

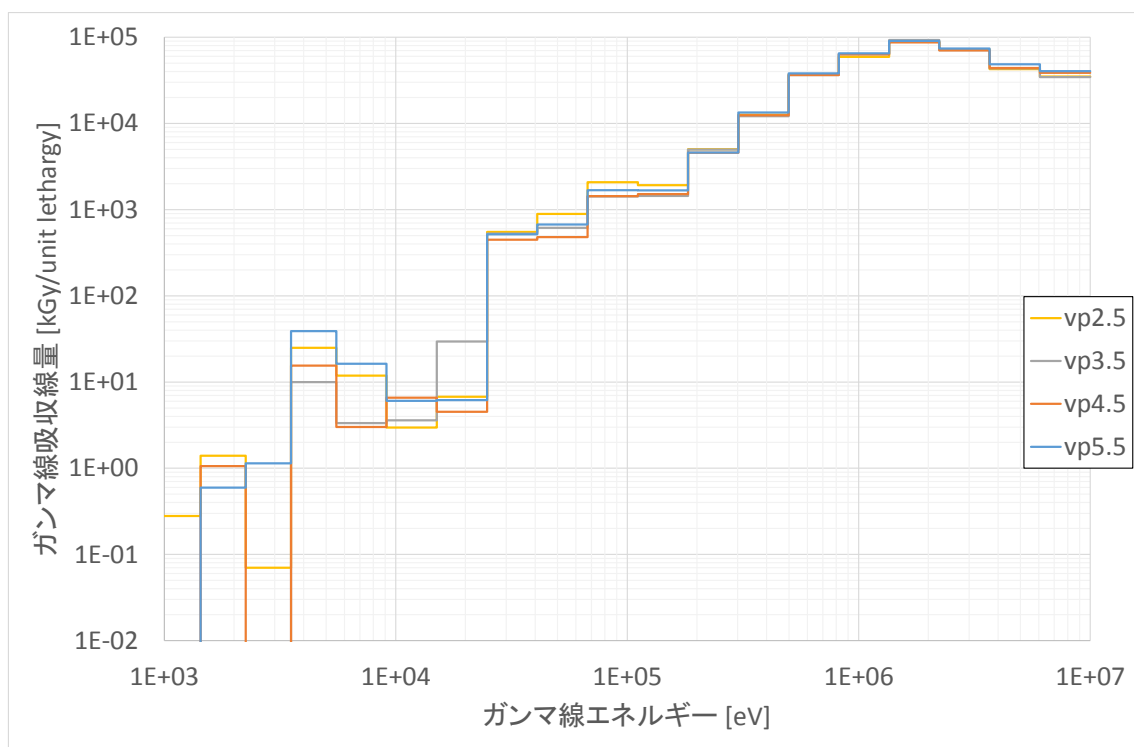


図 2.322 IT-A3 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線吸収線量

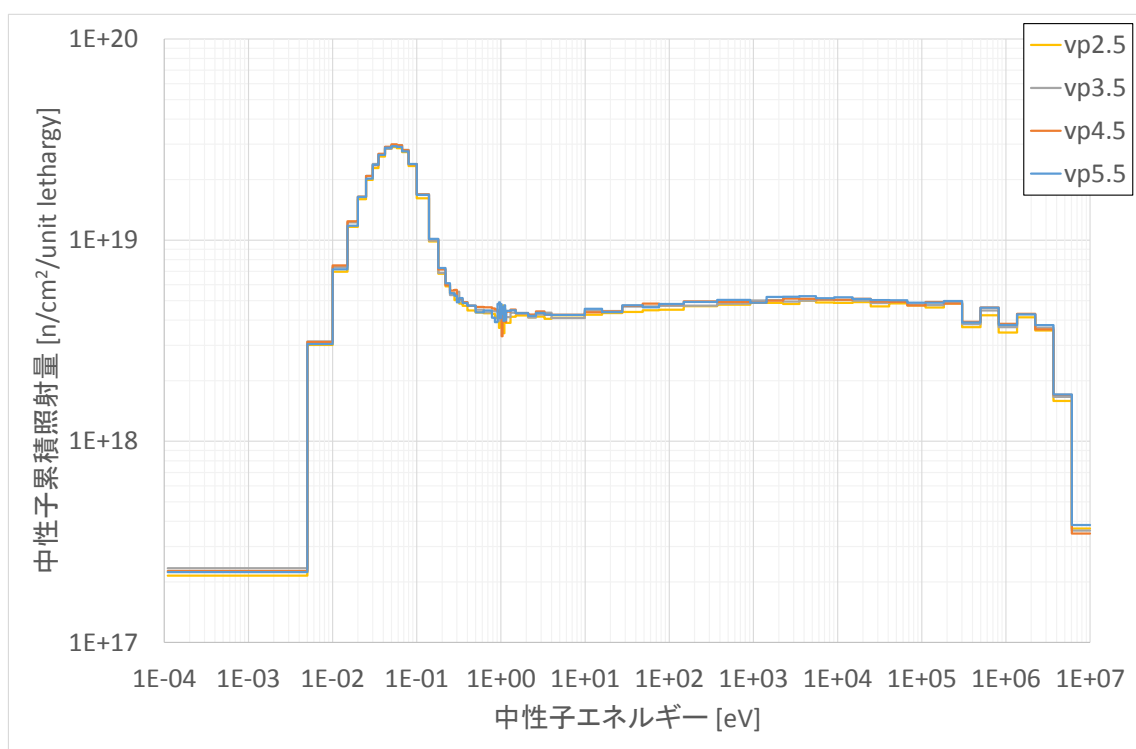


図 2.323 IT-A4 試験における中性子エネルギーに対する中性子累積照射量

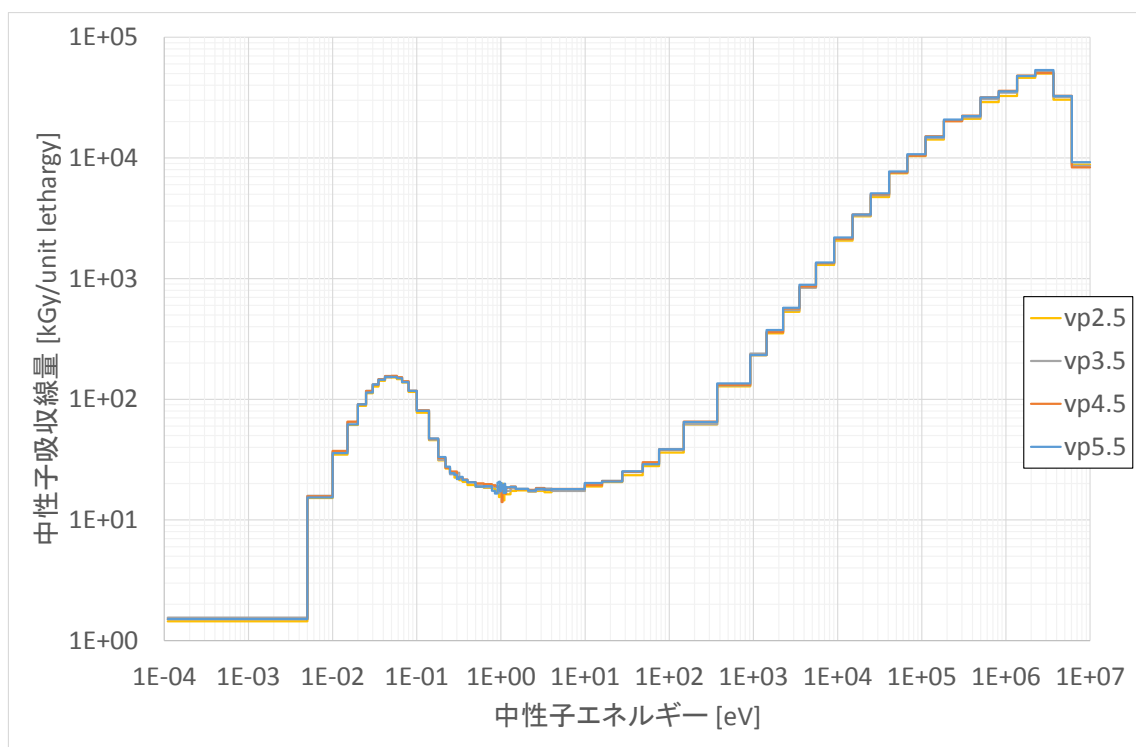


図 2.324 IT-A4 試験における中性子エネルギーに対する中性子吸収線量

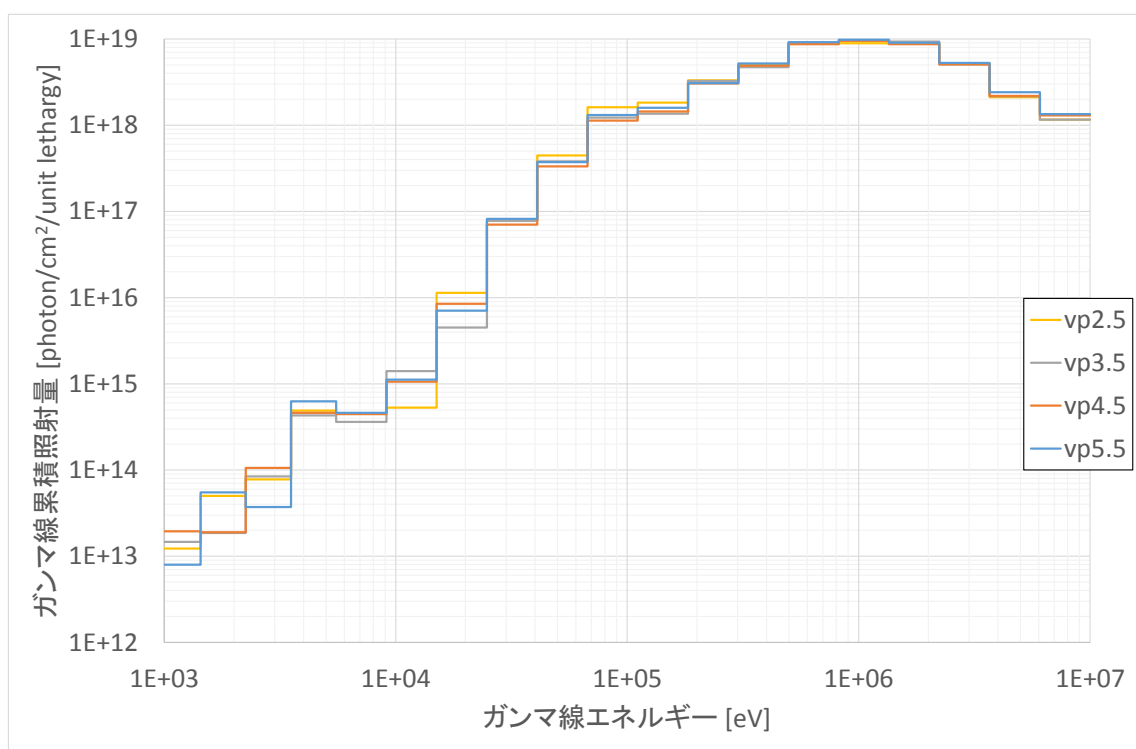


図 2.325 IT-A4 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線累積照射量

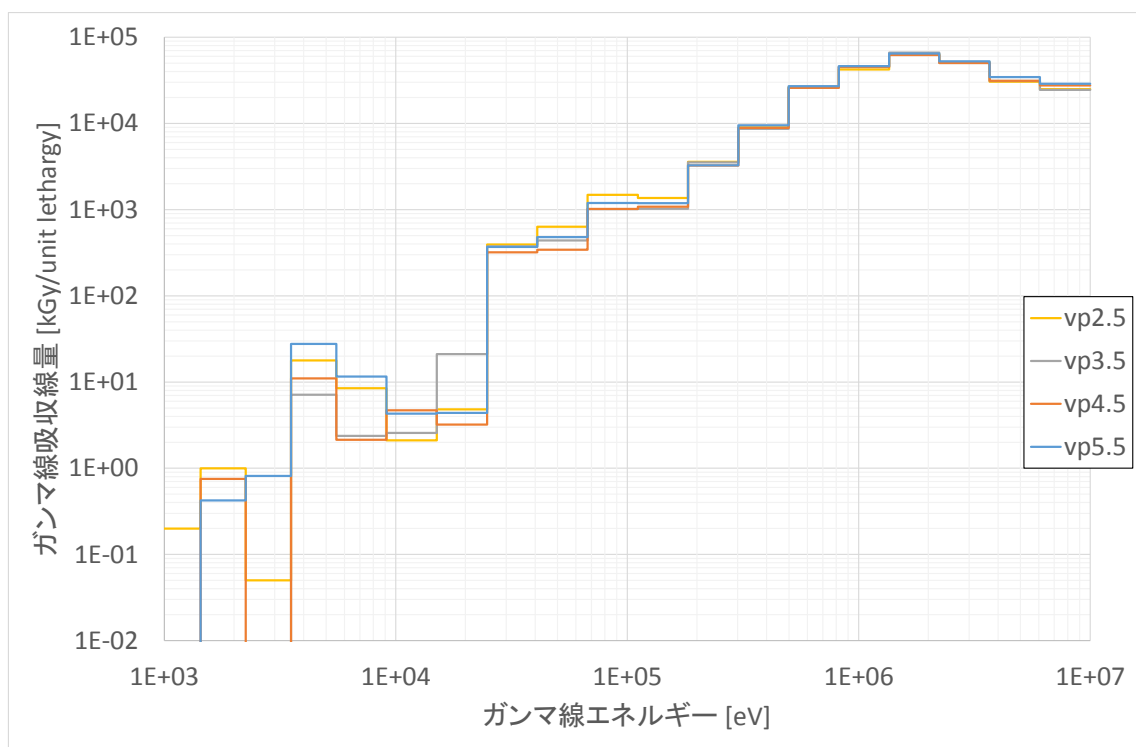


図 2.326 IT-A4 試験におけるガンマ線エネルギーに対するガンマ線吸収線量

2. 5. 4 伝熱解析の検討手順

中性子照射試験での温度分布を把握するために以下の手順で伝熱解析を実施する。

(1) 手順 1 NX Nastran による試験体系のモデル化

照射解析と同様に、中性子照射試験を数値的に模擬するために、NX Nastran を用いて JEEP-II 炉での試験体系を構築する。ただし、透過や散乱をする放射線を対象にしている照射解析では炉内全体を模擬する必要があるが、伝熱解析では熱を対象とするため、試験体近傍のキャプセルとその外側を流れる冷却水について模擬する。

(2) 手順 2 NX Nastran による温度の計算

手順 1 で構築された体系の中で伝熱解析を実施することにより、各試験体についての温度分布を計算する。

2. 5. 5 伝熱解析の検討の詳細

(1) NX Nastran による試験体系のモデル化

伝熱解析を実施する上で必要となるパラメータや解析条件は実際の測定値や文献を参考に表 2.73 の通り設定した。

解析モデルは試験体形状に合わせ円筒形とした。燃料集合体位置や冷却水の流れは試験体軸方向に対して平行であり、試験体への影響は径方向に対してほぼ等方とみなせるため、二次元軸対称モデルとした。

モデルは試験体のみを要素として設定した。精緻な解析を行うためには、試験体外側にあるアルミニウムのキャプセルを模擬し、キャプセルと冷却水の境界に熱伝達率を設定する必要がある。理想的な円筒形の外側に滞留する水の熱伝達率については文献値が存在するものの、実際のキャプセルには放熱のための細かな凹凸が施されており、文献値からは値が異なると予想される。試験環境の熱伝達率は測定されていないため、試験体の外側にあるアルミニウムは冷却水温度と同じ温度分布を持つという仮定の上で、解析に必要な冷却水との熱伝達率は実効的な値として要素の境界に設定することにした。より具体的には熱伝達率を $100[\text{W}/\text{m}^2/\text{K}]$ から $50[\text{W}/\text{m}^2/\text{K}]$ ずつ変化させた予備解析を実施し、測定されている頂部の試験体中心温度を最も再現するような値に決めた。また、コンクリート試験体の熱伝導率は文献³⁶を、セメントペースト試験体の熱伝導率は封緘養生、75℃乾燥、120℃乾燥試験体の含水率を勘案し、文献³⁷を参考に設定した。雰囲気温度については冷却水入口と冷却水出口での温度測定値から、軸方向に線形に分布していると仮定し設定した。冷却水入口と冷却水出口での温度差は 5℃程度と冷却水温度の 10%以下と小さいため、線形の温度分布でよい近似にな

³⁶ 日本機械学会, 伝熱工学資料

³⁷ I. Maruyama, G. Igarashi, Numerical approach towards aging management of concrete structures: Material strength evaluation in a massive concrete structure under one-sided heating, Journal of Advanced Concrete Technology, 13 (2015) 500-527.

ると判断した。

各試験体の発熱についてはMCNPによる計算を基に以下の表2.71および表2.72の値を設定した。

表 2.71 PPT 試験の伝熱解析で設定した発熱量 (W)

試験体位置	PPT-B	PPT-C	PPT-D	PPT-E
vp1	5.48E+00	9.36E+00	8.71E+00	9.16E+00
vp2	5.91E+00	1.04E+01	9.64E+00	9.97E+00
vp3	6.27E+00	1.10E+01	1.03E+01	1.06E+01
vp4	6.51E+00	1.11E+01	1.06E+01	1.10E+01
vp5	6.81E+00	1.15E+01	1.09E+01	1.13E+01
vp6	6.74E+00	1.15E+01	1.09E+01	1.13E+01
vp7	6.61E+00	1.14E+01	1.06E+01	1.11E+01
vp8	6.45E+00	1.10E+01	1.03E+01	1.07E+01
vp9	6.18E+00	1.04E+01	9.79E+00	1.02E+01

表 2.72 IT 試験の伝熱解析で設定した発熱量 (W)

試験体位置	IT-A1	IT-A2	IT-A3	IT-A4
vp2.5	6.41E+00	4.54E+00	3.83E+00	7.07E+00
vp3.5	6.38E+00	4.58E+00	3.92E+00	7.23E+00
vp4.5	6.56E+00	4.63E+00	3.93E+00	7.30E+00
vp5.5	6.60E+00	4.72E+00	4.06E+00	7.45E+00

(2) NX Nastran による温度の計算

1) 計算条件

発熱に係る照射や放熱に係る冷却水温度が時間的にほぼ変化しないと仮定し、解析タイプは定常伝熱解析として温度を計算した。実際に測定されている温度は照射直後にほぼ一定の温度となるため、定常解析で目的を十分に達成できる。

表 2.73 伝熱解析のパラメータと解析条件

解析コード			NX Nastran
解析タイプ			定常伝熱解析
解析モデル			円筒形状の対象を二次元軸対称でモデル化
			要素：CQUADX4（四角形、軸対称要素）、5mm ×5mm
熱伝達率			PPT 試験 200[W/m ² /K]、IT 試験 100[W/m ² /K]
熱伝導率	コンクリート試験体		1.5[W/m/K]
	セメント ペースト	封緘	1.4[W/m/K]
		乾燥 75℃	1.1[W/m/K]
		乾燥 120℃	1.1[W/m/K]
雰囲気温度			冷却水入口 52℃から冷却水出口 57℃まで線 形分布
発熱			照射量解析の沈着エネルギーから試験体毎に 設定

2) 計算結果

PPT 試験の試験体中心温度、試験体表面温度の計算結果を図 2.327 から図 2.334 に示す。照射解析と同様に、頂部から底部までのコンクリート試験体位置を上から順に vp1、vp2、…、vp9 と呼ぶことにする。

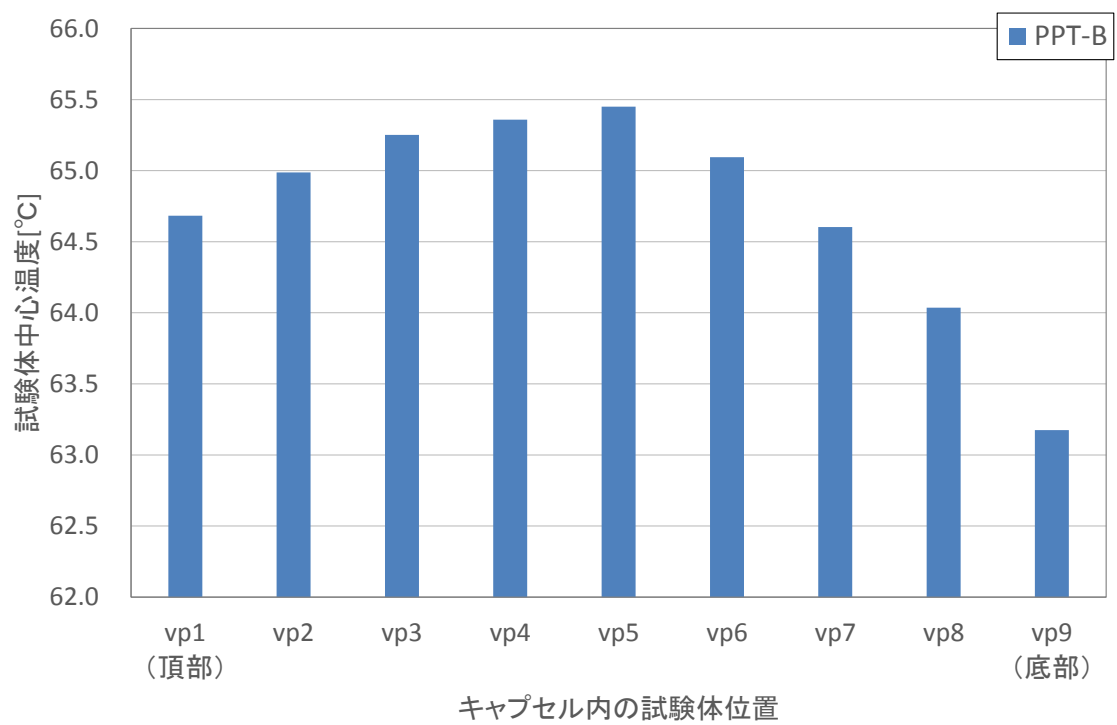


図 2. 327 PPT-B 試験の試験体中心温度

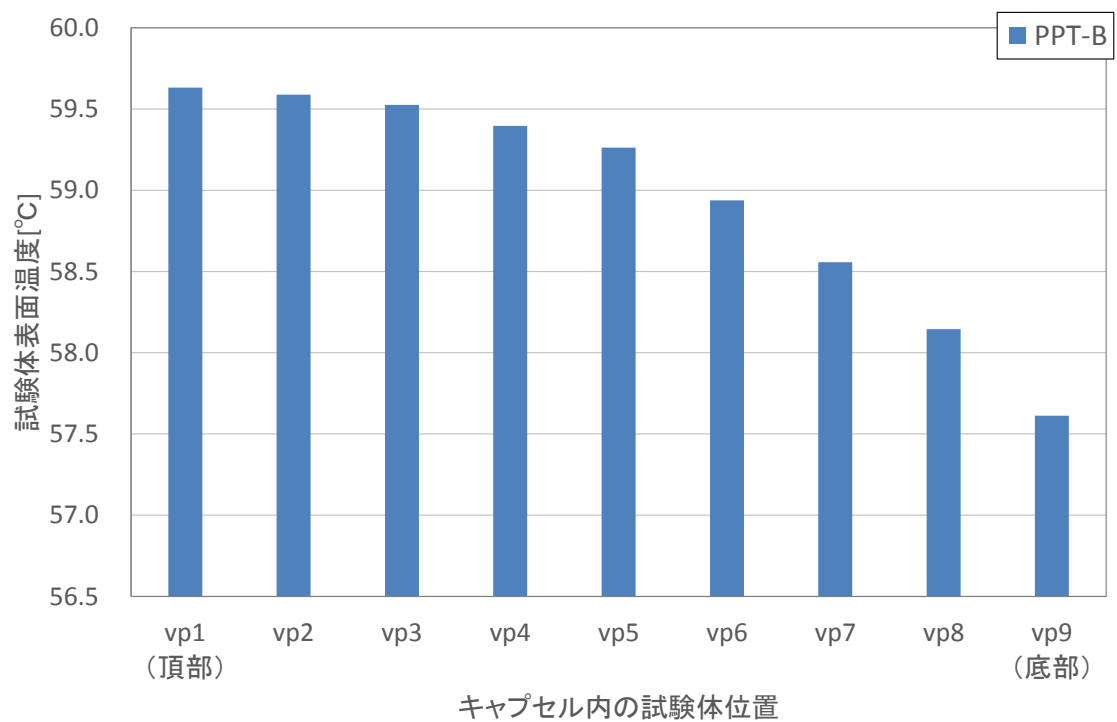


図 2. 328 PPT-B 試験の試験体表面温度

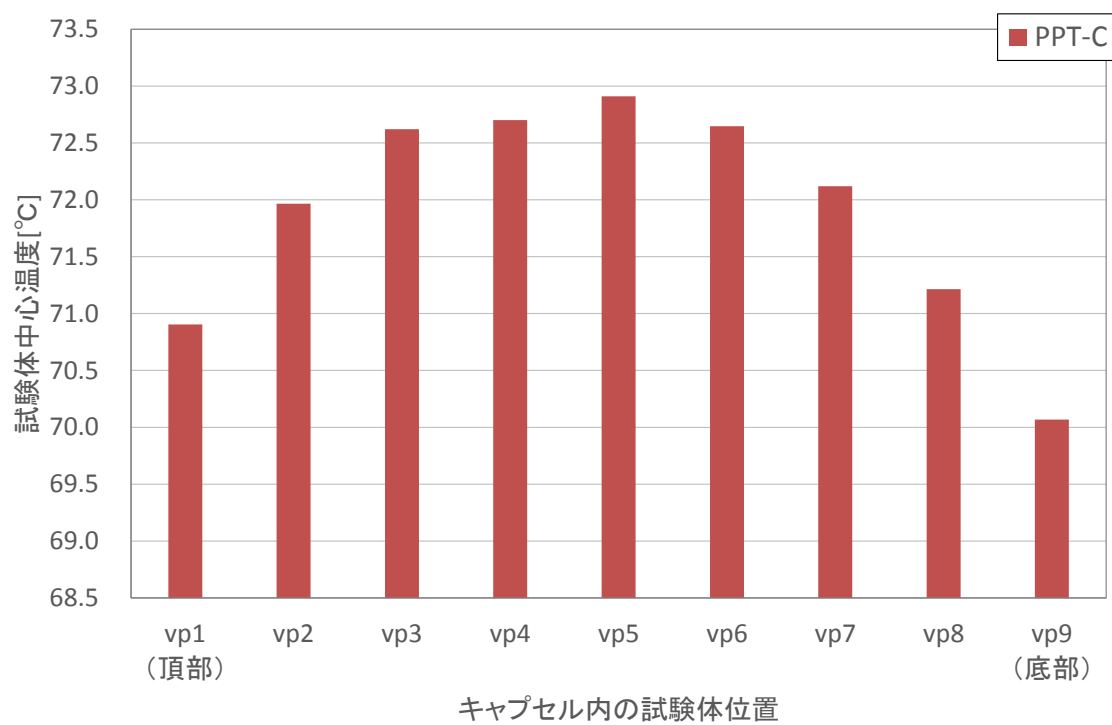


図 2. 329 PPT-C 試験の試験体中心温度

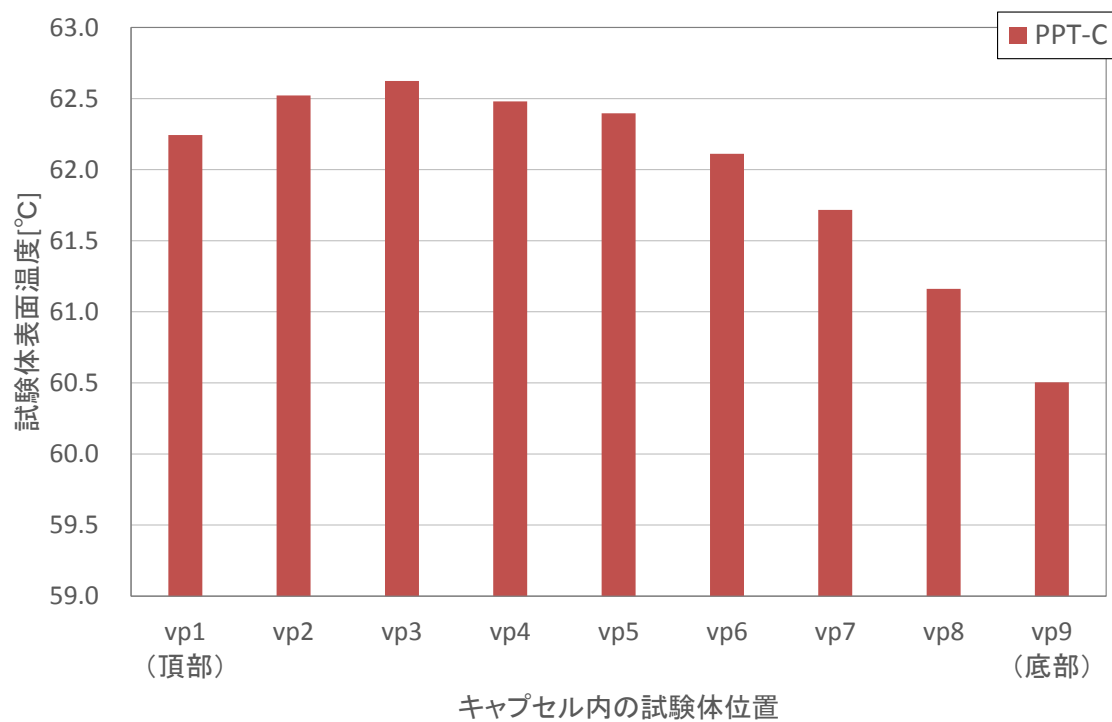


図 2. 330 PPT-C 試験の試験体表面温度

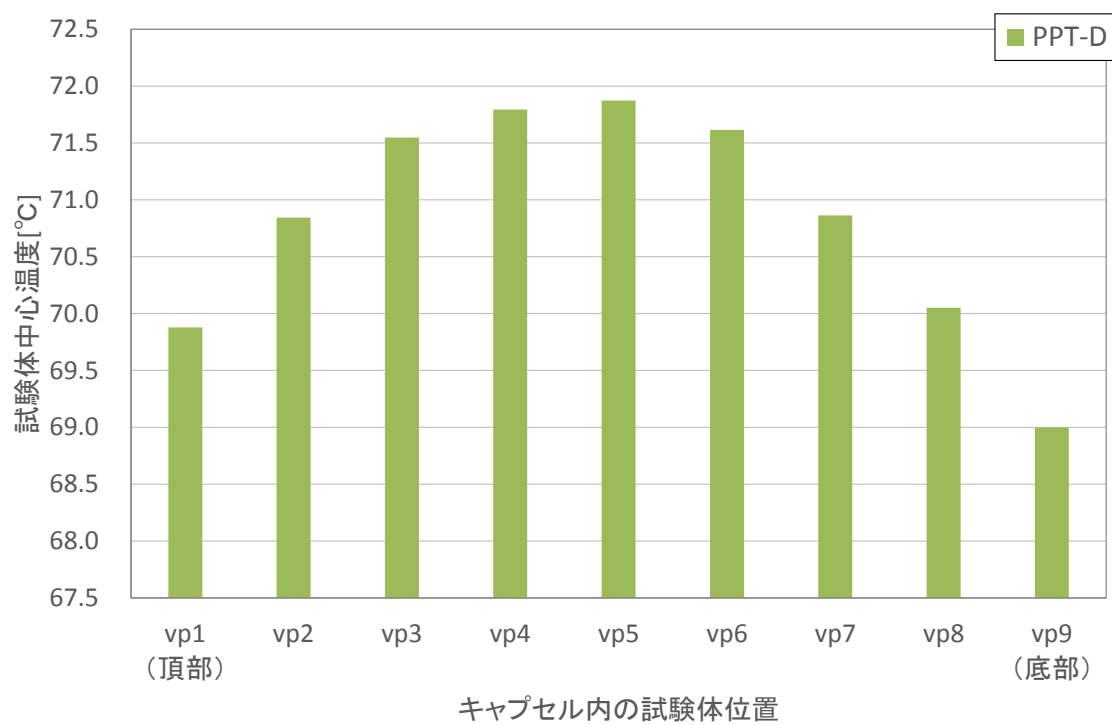


図 2. 331 PPT-D 試験の試験体中心温度

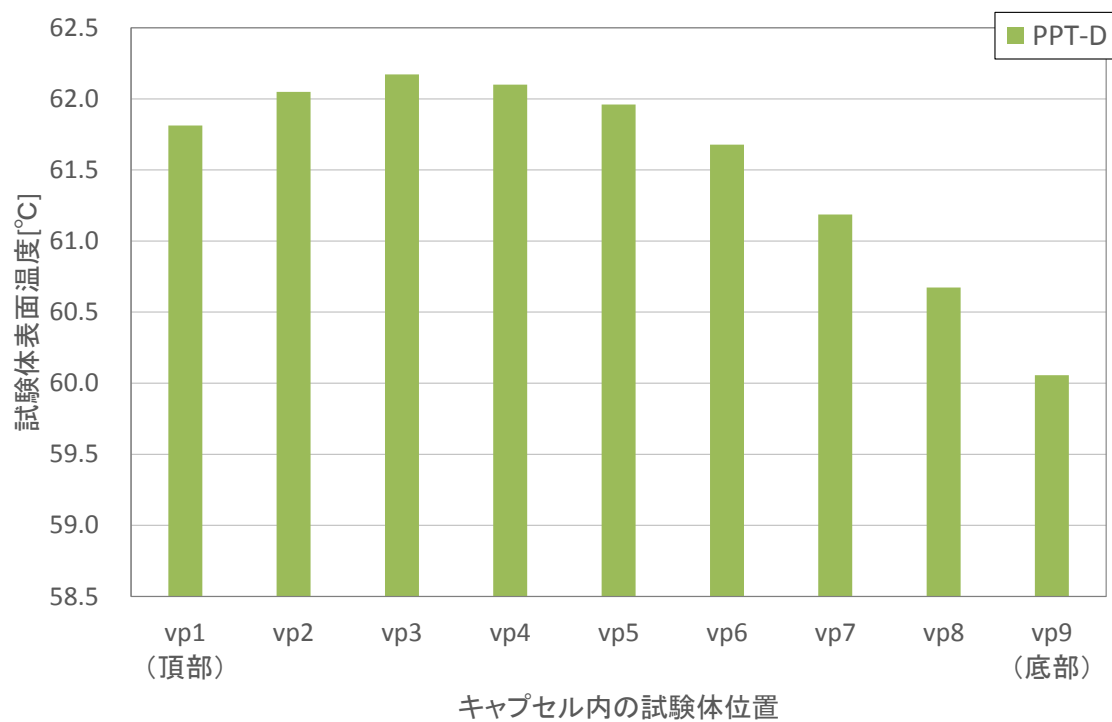


図 2. 332 PPT-D 試験の試験体表面温度

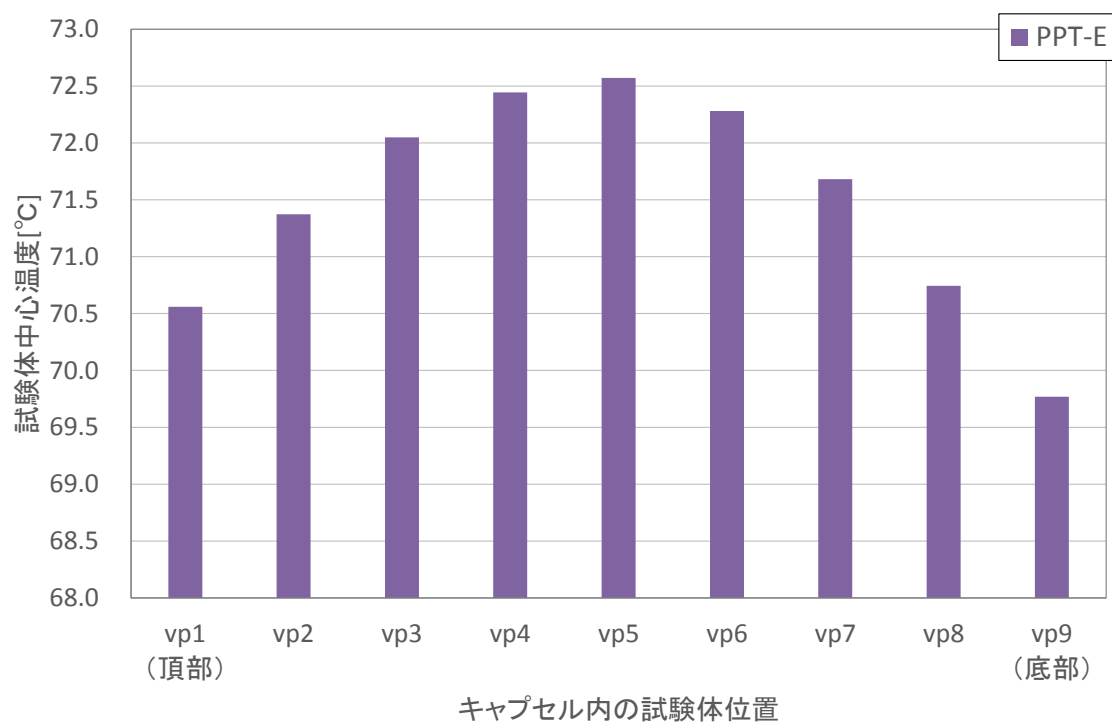


図 2. 333 PPT-E 試験の試験体中心温度

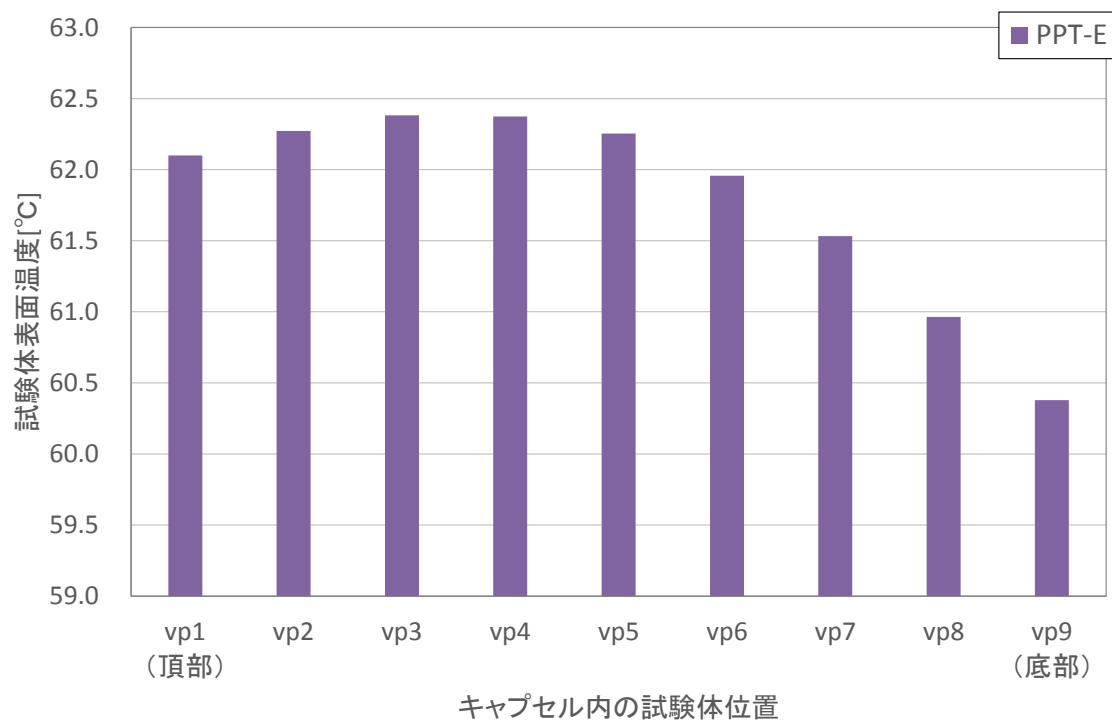


図 2. 334 PPT-E 試験の試験体表面温度

同様に IT 試験の試験体中心温度、試験体表面温度の計算結果を図 2. 335 から図 2. 342 に示す。ここでは、頂部から底部までのセメントペースト試験体位置を上から順に vp2. 5、vp3. 5、vp4. 5、vp5. 5 と呼ぶことにする。

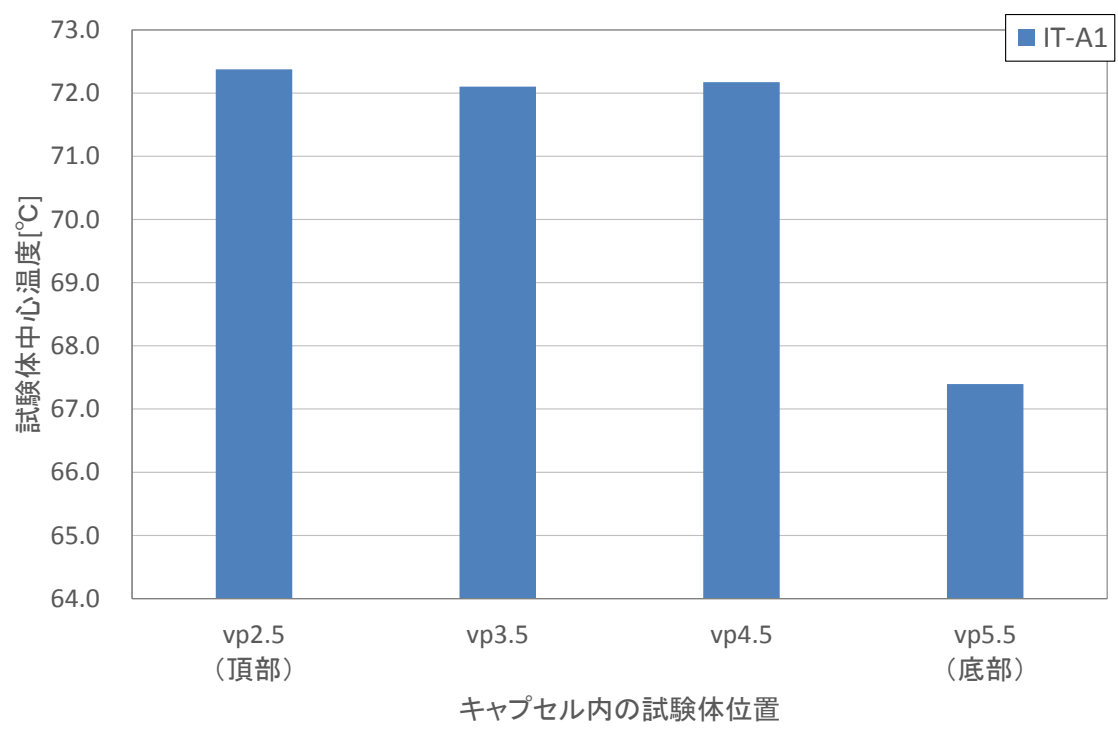


図 2. 335 IT-A1 試験の試験体中心温度

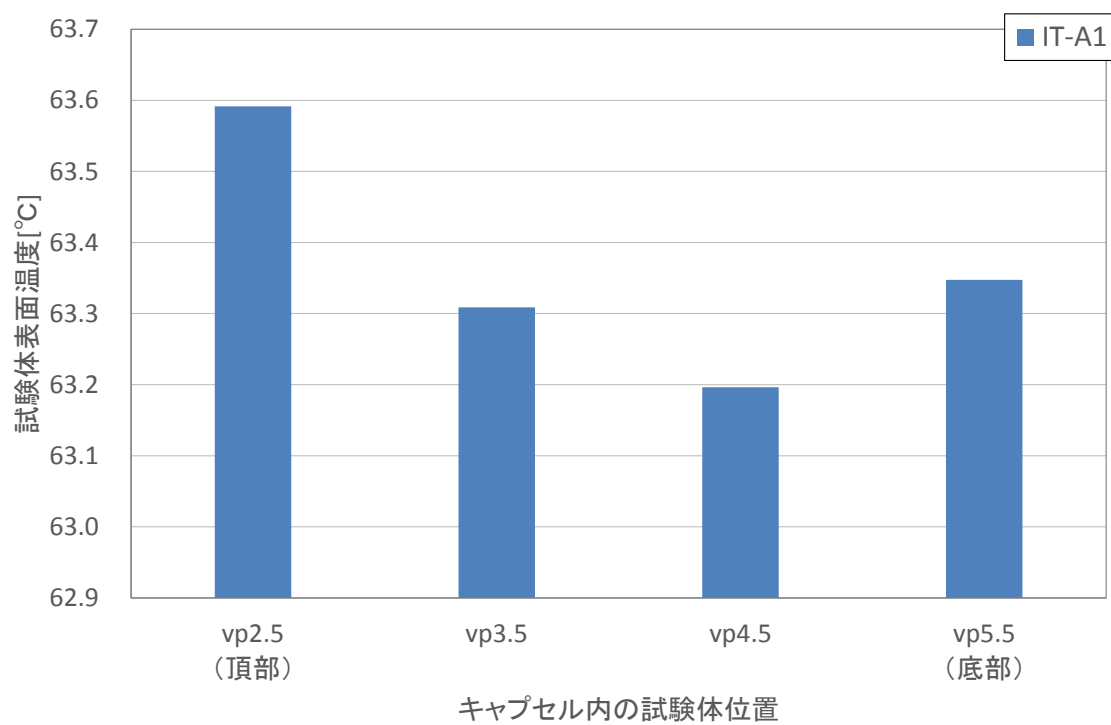


図 2. 336 IT-A1 試験の試験体表面温度

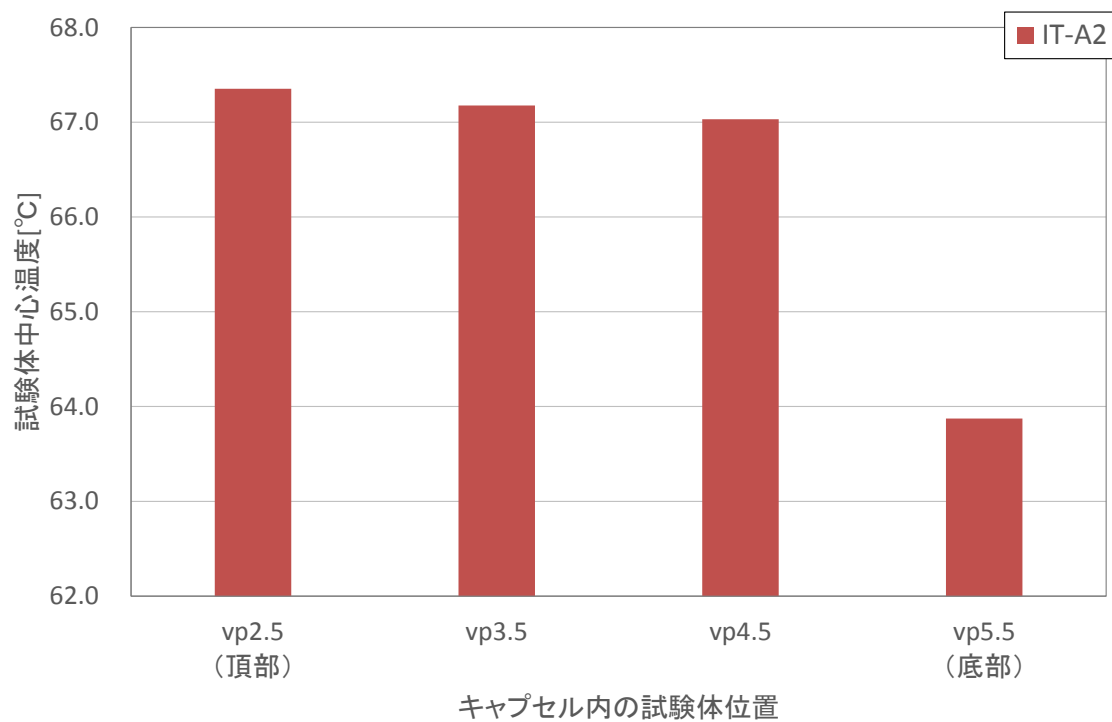


図 2. 337 IT-A2 試験の試験体中心温度

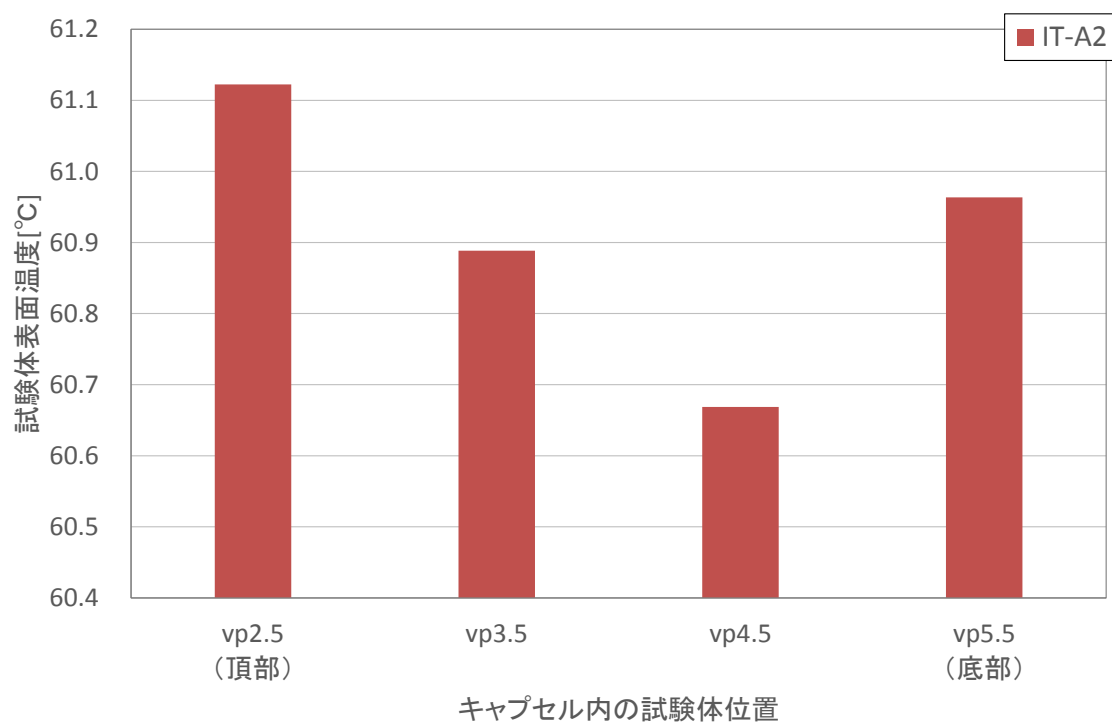


図 2. 338 IT-A2 試験の試験体表面温度

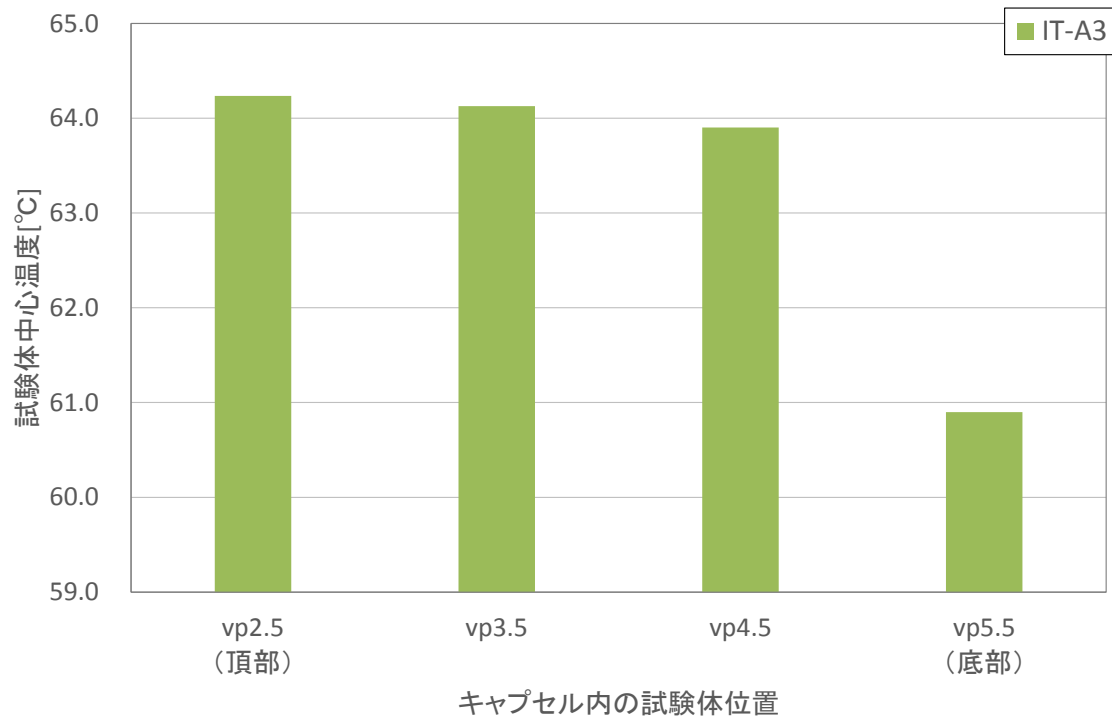


図 2. 339 IT-A3 試験の試験体中心温度

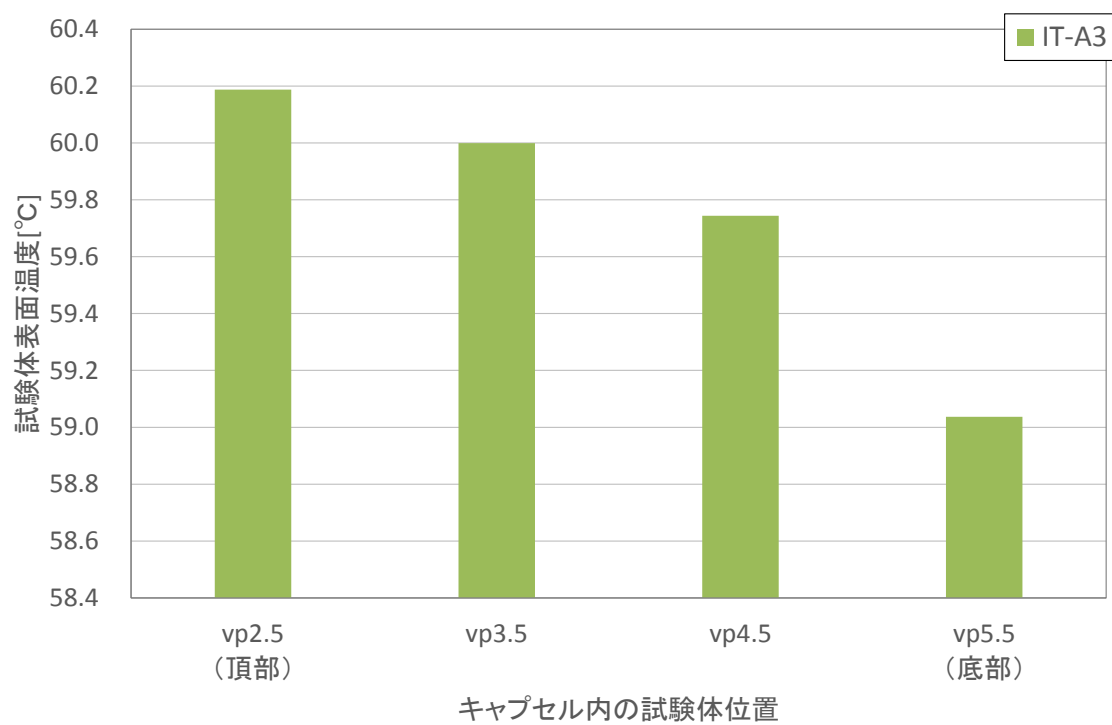


図 2. 340 IT-A3 試験の試験体表面温度

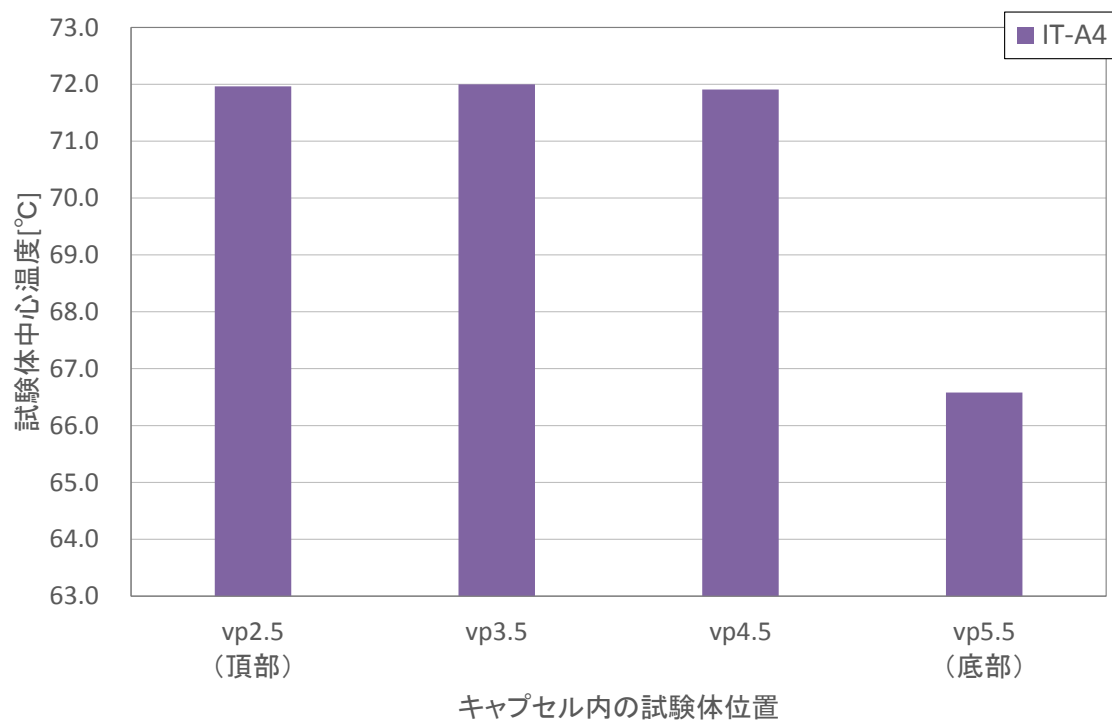


図 2. 341 IT-A4 試験の試験体中心温度

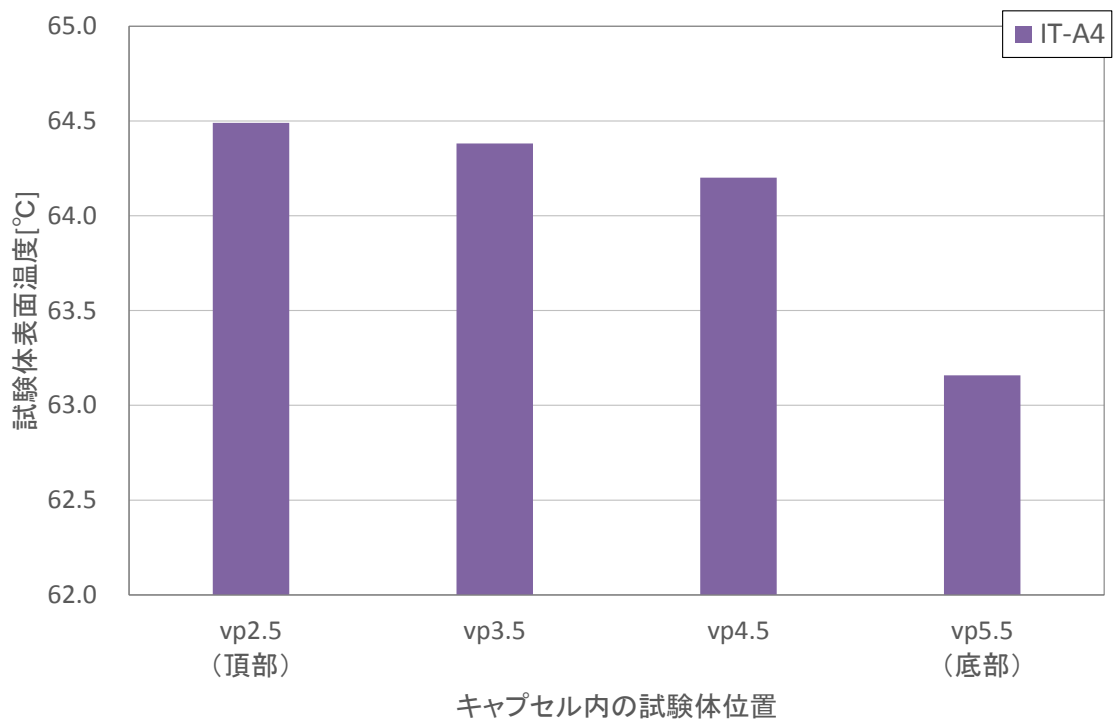


図 2. 342 IT-A4 試験の試験体表面温度

2. 5. 6 JEEP II 炉内の照射に係る解析的検討のまとめ

これまでに実施した照射解析および伝熱解析についてまとめる。

(1) PPT 試験における累積照射量

放射線照射環境にあるコンクリートの長期健全性評価には速中性子の累積照射量が重要な指標となる。

過年度までは理論的に算出した中性子発生量から累積照射量を計算していたが、より現実に即した評価として、モニタリングワイヤによる速中性子フルエンスの測定量から規格化を実施した。熱中性子フルエンスは散乱の影響があるために、規格化には用いなかったが、図 2. 343 に示す通り、速中性子フルエンスによる規格化でも熱中性子のフルエンスもよく再現することがわかった。

また試験体位置毎に速中性子の累積照射量を比較するとおよそ 10%程度の差があることがわかった。また、各試験での最大累積照射量はおよそ炉心高さ中心にあるが、分布は炉心高さで対称な分布となっておらず、底部側の試験体のほうが頂部側に比べて中性子累積照射量が大きくなる。これは試験体系が炉心軸方向中心について完全に対称な体系でないためであり、モニタリングワイヤの分布とも傾向が一致している。

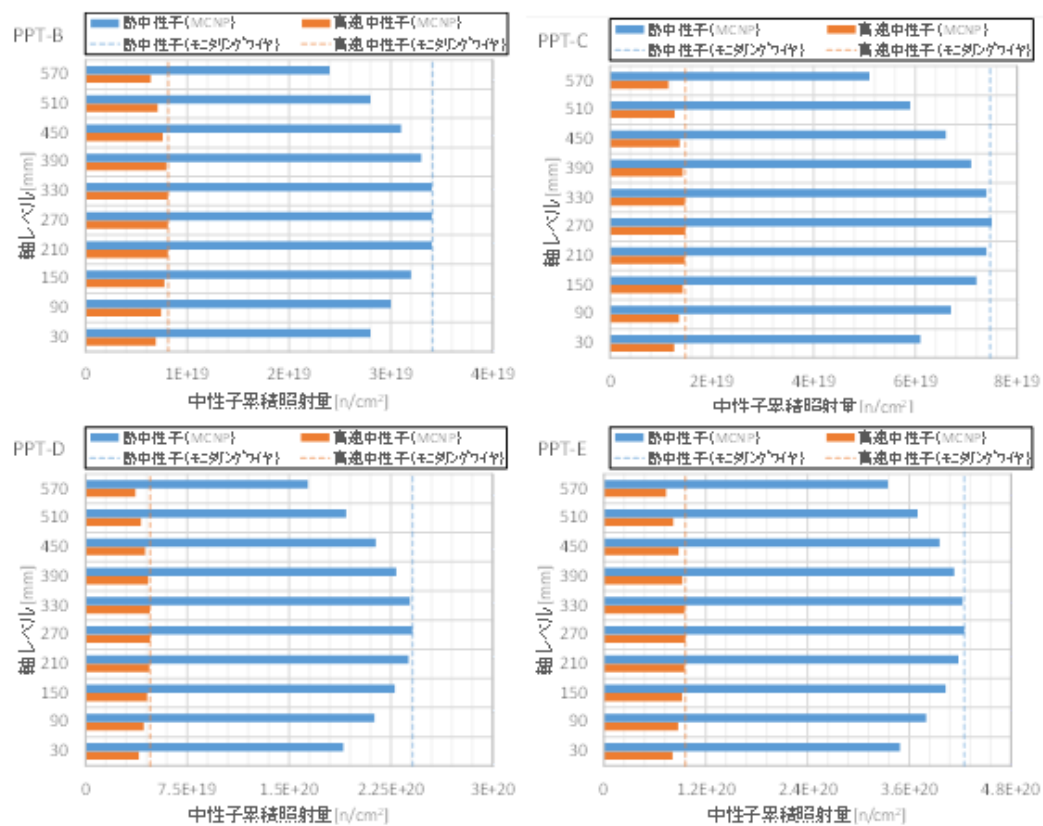


図 2.343 PPT 試験の中性子累積照射量の比較

(2) ガンマ線吸収線量に対する温度分布

本検討では中性子照射試験における温度分布を把握するための伝熱解析を実施した。PPT 試験において、発熱に支配的な要因であるガンマ線の吸収線量率と温度分布を比較した結果を図 2.344 に示す。

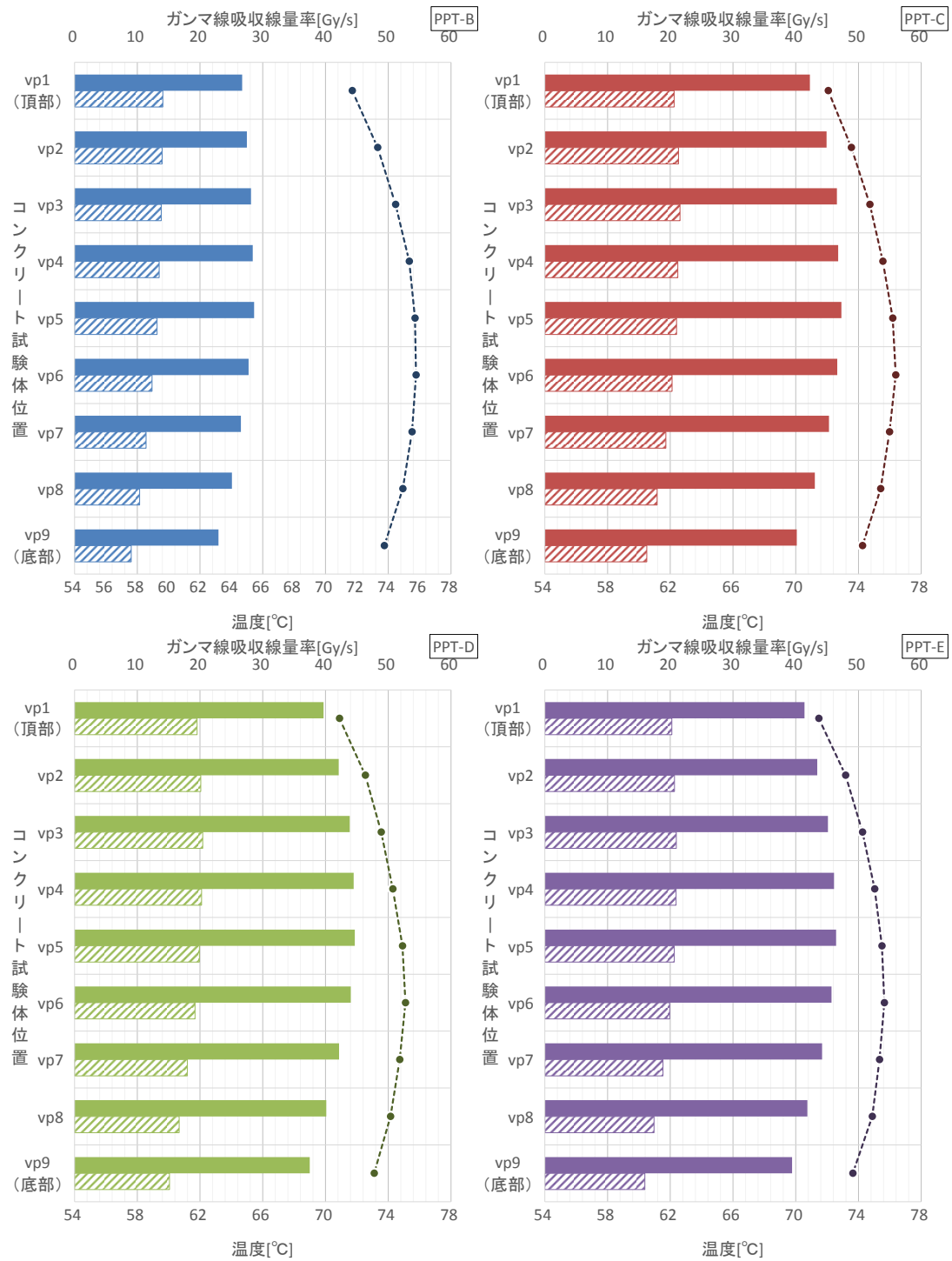


図 2.344 PPT 試験のガンマ線吸収線量率と温度の比較

ガンマ線吸収線量率は中性子の累積照射量と同様により炉心軸方向中心よりも底部側が大きくなる分布となる。一方で温度分布は底部側で低くなる傾向を示した。これはガンマ線発熱よりも、底部側でより温度の低い冷却水の影響がより温度分布に影響しているものと考えられる。

IT 試験におけるガンマ線吸収線量率と温度分布の比較は図 2.345 の通りである。

IT 試験は鉛直方向の長さが PPT 試験よりも短いため、ガンマ線吸収線量率の山なりの分布を見ることはできない。温度分布の傾向は頂部から 3 体はほぼ同じ温度であるのに対し、底部の試験体のみ温度が低くなるのは、その下に収められているアルミニウム製のダミー試験体の熱伝導率が高いために、冷却水の影響をより強く受けているためと考えられる。

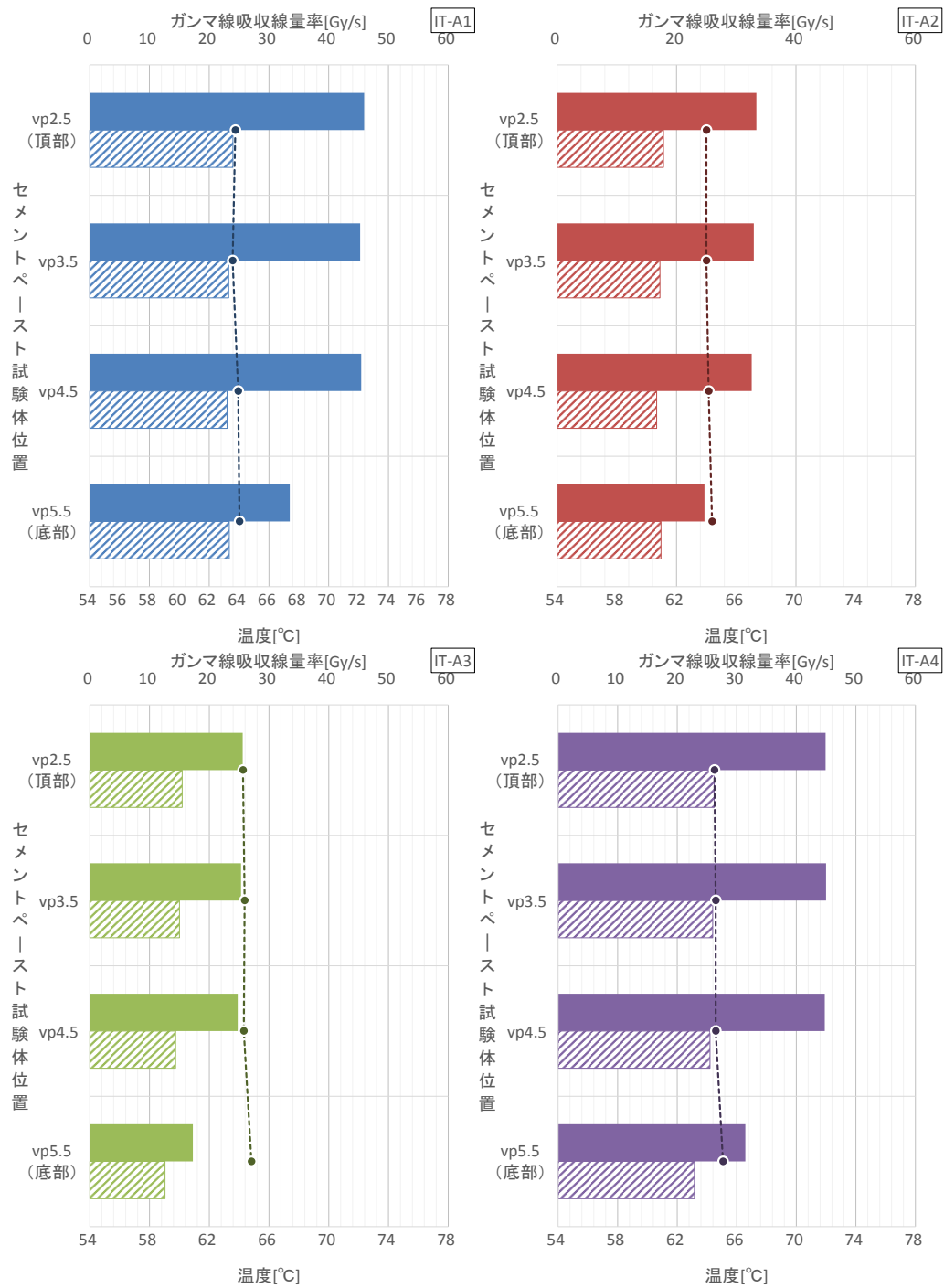


図 2. 345 PPT 試験の中性子累積照射量の比較

2. 6 まとめ

(1) セメントペースト

相互作用試験の結果に基づき中性子による水素発生の G 値について検討したところ、乾燥が進むと G 値は低下し、また、同じエネルギー量とした場合、ガンマ線より中性子の方がより水を分解する。中性子照射により、結合水はほとんど分解しないことを確認した。

物理特性試験の結果より、照射によってセメントペーストは乾燥し、収縮する傾向があること、ビッカース硬さ試験によりセメントペーストは照射環境下で強度が増大することを確認した。

(2) 骨材

中性子照射量 $8.25 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ までの範囲において、石灰岩以外の骨材（凝灰岩、砂岩）は膨張を示すこと、その膨張量は、おおむね石英含有量と比例関係にあることを明らかにした。また、 $8.25 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ では、石英の含有率が低い骨材でも膨張しており、石英以外の鉱物についても中性子照射により膨張することを示唆している。イオン結合性の石灰岩は膨張しないことを確認した。

(3) コンクリート

中性子照射によるコンクリート中の骨材の膨張によりコンクリートも膨張し、砂岩を用いたコンクリートよりも凝灰岩を用いたコンクリートの膨張率が高く、平均中性子照射量 $9.20 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ では 3%弱まで膨張した。また、骨材の膨張とペーストの乾燥による収縮によりペースト中にひび割れが生じ、結果、コンクリートの強度は大きく低下し（元の値の 57~69%）、ヤング率も低下（元の値の 28~43%）した。膨張率の高い凝灰岩を用いたコンクリートの方が強度およびヤング率の低下は大きい。

一方、熱・乾燥影響のみを取り出した、照射中の温度を模擬した加熱試験では、 $4.8 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 照射量相当以上のケースで強度が 10%程度低下し、ヤング率は、加熱後直後からおおよそ 25~30%の低下がみられた。寸法変化は通常のコンクリートの乾燥収縮程度の収縮が確認された。

検討の結果、コンクリート膨張量はおおむね骨材の膨張で説明でき、コンクリート中の中性子による性能低下は、内部の骨材の膨張を主要因とし、特に岩石鉱物（石英）の影響を受けることが明らかになった。

<補足>

高速中性子の平均照射量が 7.78×10^{18} 、 1.41×10^{19} n/cm²、 4.58×10^{19} n/cm² 及び 9.20×10^{19} n/cm² のコンクリート試験体（φ4×6cm）の物理特性について以下の結果が得られた。

1) 質量変化

非照射・加熱試験体および照射試験体について、試験後 75℃後の質量変化は 3.5%程度とほぼ一様となっている（図 2.226、表 2.32～表 2.41）。

2) 長さ変化

非照射・加熱試験体では、加熱中の水分逸散および試験後 75℃の乾燥により、若干の乾燥収縮が見られる。

照射試験では、照射量が 7.78×10^{18} n/cm² (PPT-B)、 1.41×10^{19} n/cm² (PPT-C)、 4.58×10^{19} n/cm² (PPT-D)、 9.20×10^{19} n/cm² (PPT-E) と増えるにつれ、凝灰岩、砂岩を用いたコンクリートはいずれも膨張しており、特に凝灰岩を用いたコンクリートの増大傾向が大きい。照射量 9.20×10^{19} n/cm² での膨張量は、凝灰岩を用いたコンクリートでは 2.6%程度、砂岩を用いたコンクリートでは 1.8%程度と非常に大きくなっている。これは、骨材が膨張していることが原因である。（図 2.227、表 2.38～表 2.41）。

3) 圧縮強度

非照射・加熱試験体では、加熱期間が長くなると若干の低下が見られ、乾燥による影響と考えられる。照射試験では、照射量が 7.78×10^{18} n/cm² (PPT-B) から 1.41×10^{19} n/cm² (PPT-C) に向けて若干の低下が見られ、 4.58×10^{19} n/cm² (PPT-D) および 9.20×10^{19} n/cm² (PPT-E) では大きく低下している。これは、乾燥による影響に加え、骨材が膨張したことが原因である。（図 2.229）。

4) ヤング率

非照射・加熱試験体では、ヤング率が 2 割程度低下している（図 2.230）。理由として、照射後試験前の 75℃加熱による乾燥の影響が考えられる。

照射試験では、圧縮強度と同様の傾向を示すが、ヤング率の方が照射量の増加に伴い、より低下する（図 2.231）。

5) 化学的結合水

中性子照射環境下では、自由水は分解しやすいが、セメントペースト中の化学的結合水は非常に分解しにくく、長期間暴露されてもコンクリート材料としての一体性を失うことがないことが確認できた（図 2.248～図 2.255、図 2.272、図 2.274）。

3. コンクリートおよび構成要素のガンマ線影響評価

3. 1 物理特性試験（コンクリート）

3. 1. 1 試験概要

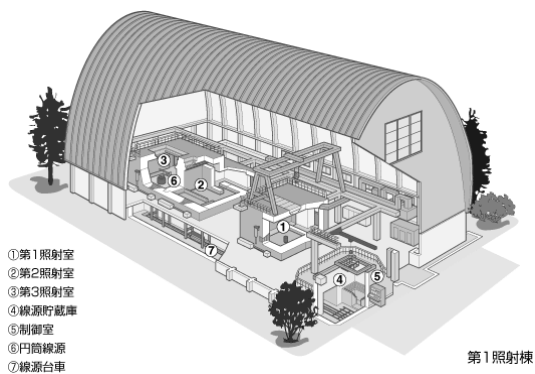
(1) 照射試験

1) 試験目的

ガンマ線照射量および骨材の違いがコンクリートの物理特性（強度、剛性等）に及ぼす影響を把握するためにガンマ線照射試験を実施する。コンクリート試験体を用い、容器等には封入せず、暴露状態で照射を行う。試験パラメータは、ガンマ線照射量 4 水準および骨材種類 2 水準とする。

2) 試験場所

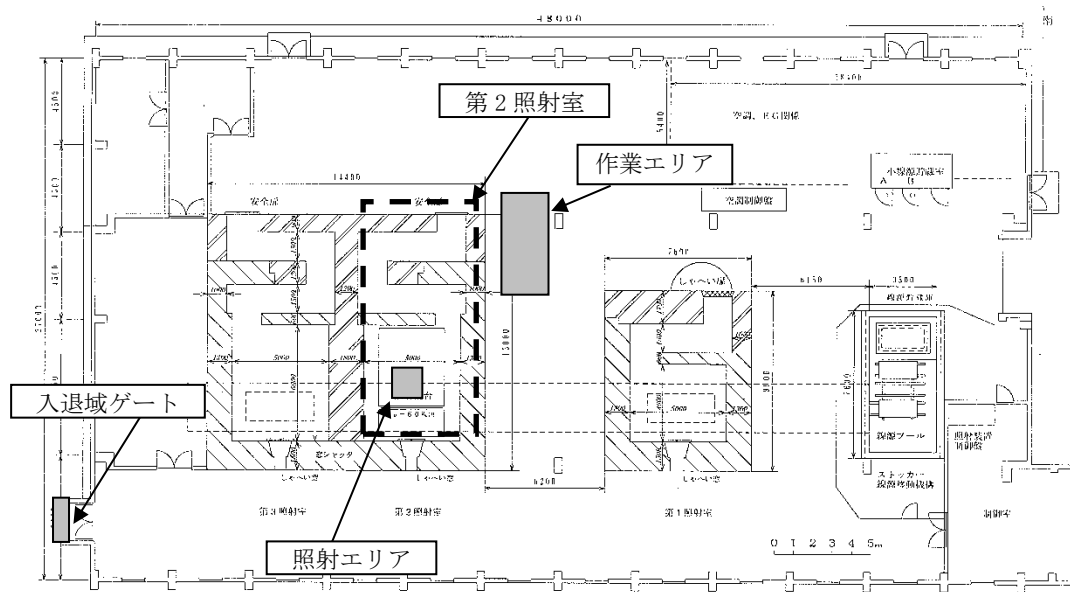
ガンマ線照射は、高崎量子応用研究所（群馬県高崎市綿貫町 1233）のコバルト第 1 照射棟の第 2 照射室で行ない、計測のための配管、配線を照射室外の計測システムに接続した。コバルト第 1 照射棟の概要を図 3.1 に示す。また照射室内における試験体配置状況、照射室内外での配線の経路および敷設状況、乾湿計の設置箇所を図 3.2～図 3.7 に、さらに照射室外の計測システムの外観を図 3.8～図 3.10 に示す。図 3.6 の風速計は照射開始前の時間帯のみに使用され照射開始前に室外に搬出した。



(a) イメージ図



(b) 正面写真



(c) 平面図

図 3.1 コバルト第1照射棟

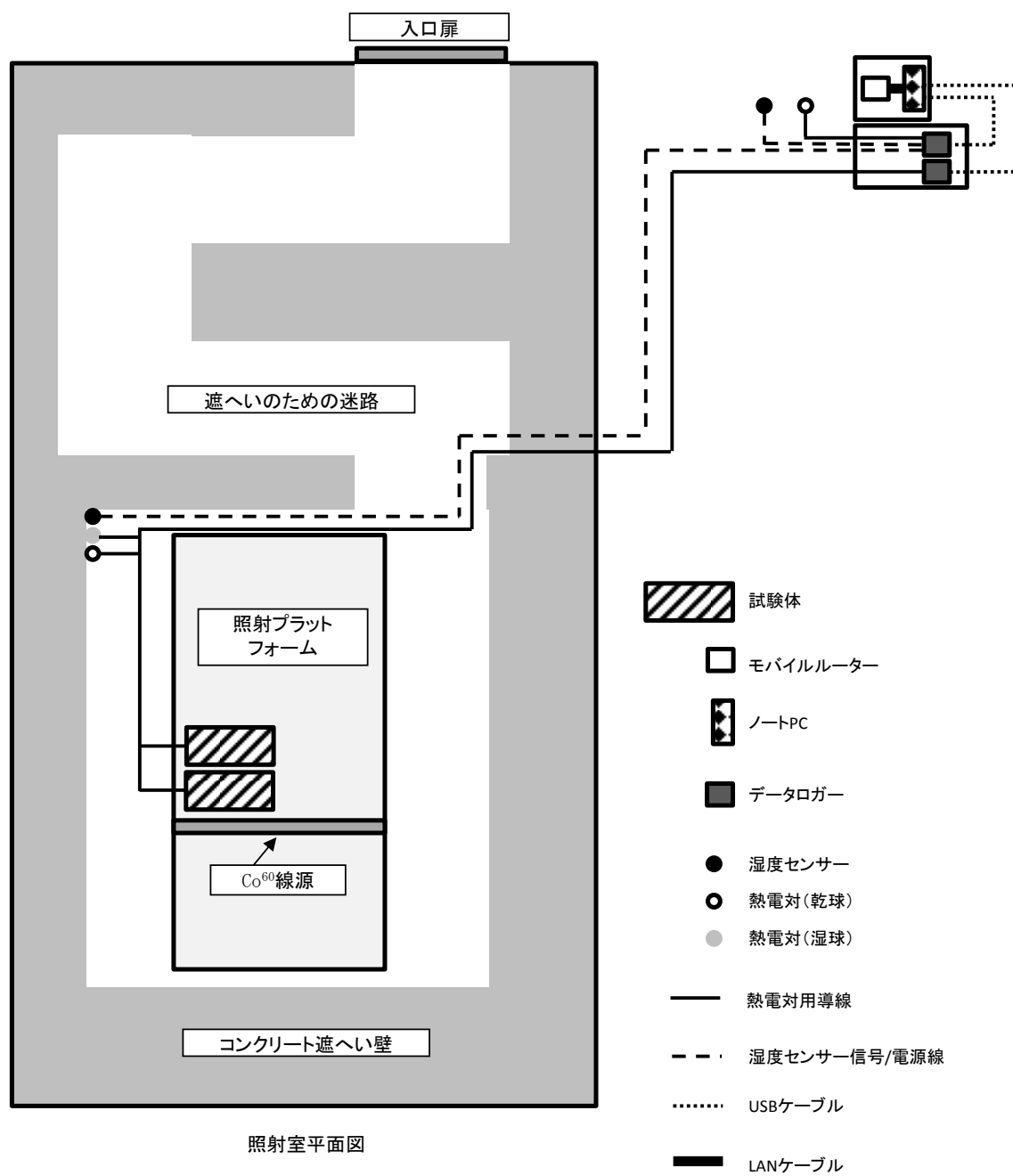


図 3.2 試験エリアにおける配線経路

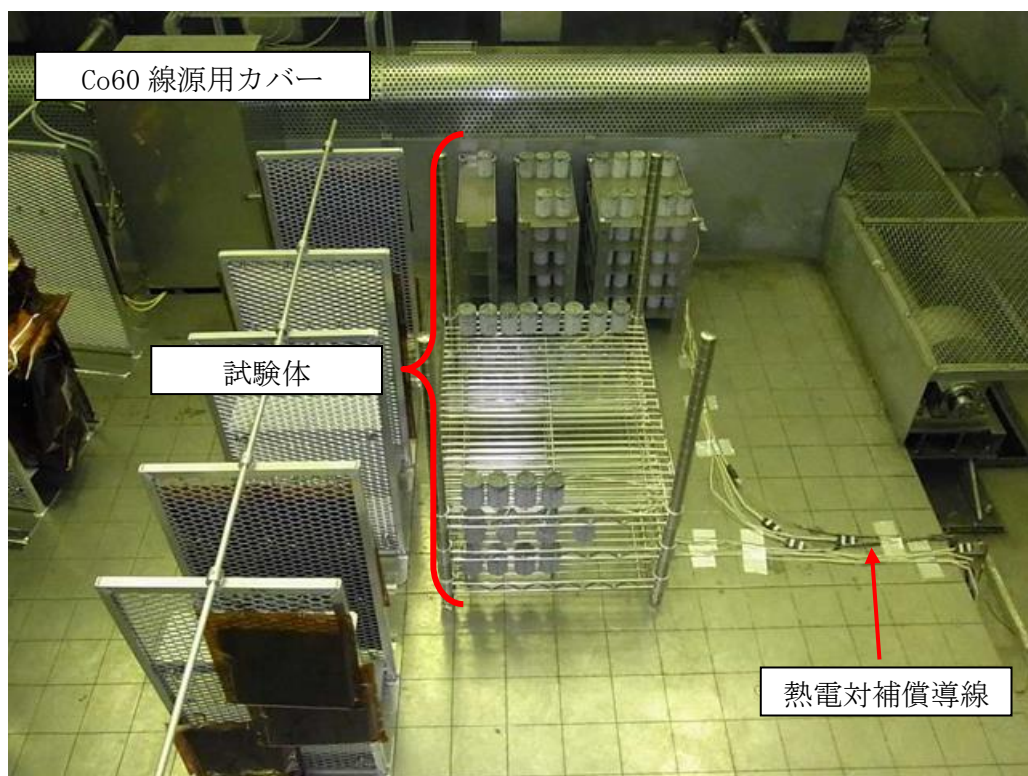


図 3.3 試験体配置写真（全体）



図 3.4 試験体配置写真（前列棚）



図 3.5 試験体配置写真（後列棚）



図 3.6 湿度計測ユニットおよび風速計測システム



図 3.7 湿度計測ユニット



図 3.8 照射室外計測システム外観



図 3.9 通信機内臓モバイルルーター外観



図 3.10 照射室外湿度センサーおよび熱電対設置箇所

3) 試験計画

a) 試験体

試験体は、2011 年度に製作した $\phi 40 \times 60 \text{mm}$ の円柱形コンクリート試験体とする。調合は、セメントには早強ポルトランドセメントを、細骨材には山砂を用いて、水セメント比を 50% として、粗骨材に砂岩砂利もしくは凝灰岩碎石を用いた 2 調合である。使用材料および調合を表 3.1 および表 3.2 に示す。打設後、 20°C で封緘養生していた試験体を、試験開始前に脱型し、研磨した後、以下に示す試験体 ID を油性マジックで記入した。

- ・コンクリート試験体 1 (粗骨材：砂岩) ($\phi 40 \times 60 \text{mm}$) : 1-001~1-060 (60 体)
- ・コンクリート試験体 2 (粗骨材：凝灰岩) ($\phi 40 \times 60 \text{mm}$) : 2-001~2-060 (60 体)

表 3.1 コンクリート使用材料

使用材料		記号	材料の詳細	密度
水		W	水道水	—
セメント		C	早強ポルトランドセメント、太平洋セメント社製	3.14g/cm^3
細骨材	SD2	S	山砂、静岡県産	2.61g/cm^3
粗骨材	SS6	GC	凝灰岩碎石、粒度 5~13mm、愛知県産	2.66g/cm^3
	GV2	GG	砂岩砂利、粒度 5~13mm、静岡県産	2.64g/cm^3

表 3.2 コンクリートの調合

調合番号	骨材の種類		W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				
	細骨材	粗骨材			W	C	S	GC	GG
WC50-No. 1	S(砂岩)	GC(凝灰岩)	50	45	183	366	799	995	—
WC50-No. 2		GG(砂岩)	50	42	177	354	757	—	1057

b) 試験条件

(i) 照射条件

試験環境は暴露環境下とし、ステンレス製試験体設置棚に試験体を配置し照射した。ステンレス製試験体設置棚を図 3.11 に示す。

目標の照射量は、 $2.0 \times 10^5 \text{kGy}$ 、 $1.0 \times 10^5 \text{kGy}$ 、 $5.0 \times 10^4 \text{kGy}$ 、 $2.5 \times 10^4 \text{kGy}$ の 4 水準とし、線量率が 10kGy/h (1 列目)、 5kGy/h (2 列目)、 2.5kGy/h (3 列目)、 1.25kGy/h (4 列目) となる位置に試験体を 4、8、16、32 ヶ月間配置することにより、照射速度の影響も考慮する。なお、この照射期間は目標の照射量を得るための目安の期間であり、照射期間中の線源の交換や減衰による線量率の変化を踏まえて適宜見直しすることとした。試験パラメーター一覧および試験体設置のイメージを表 3.3 および図 3.12 に示す。図 3.13~図 3.19 に照射試験配置図、図 3.20 に試験体管理番号、図 3.21 に照射エリアを示す。



図 3.11 ステンレス製試験体設置棚

表 3.3 試験パラメーター一覧

		線量率			
		10kGy/h	5kGy/h	2.5kGy/h	1.25kGy/h
照射期間	4 ヶ月	2.5×10^4 kGy 骨材 2 種類	—	—	—
	8 ヶ月	5.0×10^4 kGy 骨材 2 種類	2.5×10^4 kGy 骨材 2 種類	—	—
	16 ヶ月	1.0×10^5 kGy 骨材 2 種類	5.0×10^4 kGy 骨材 2 種類	2.5×10^4 kGy 骨材 2 種類	—
	32 ヶ月	2.0×10^5 kGy 骨材 2 種類	1.0×10^5 kGy 骨材 2 種類	5.0×10^4 kGy 骨材 2 種類	2.5×10^4 kGy 骨材 2 種類

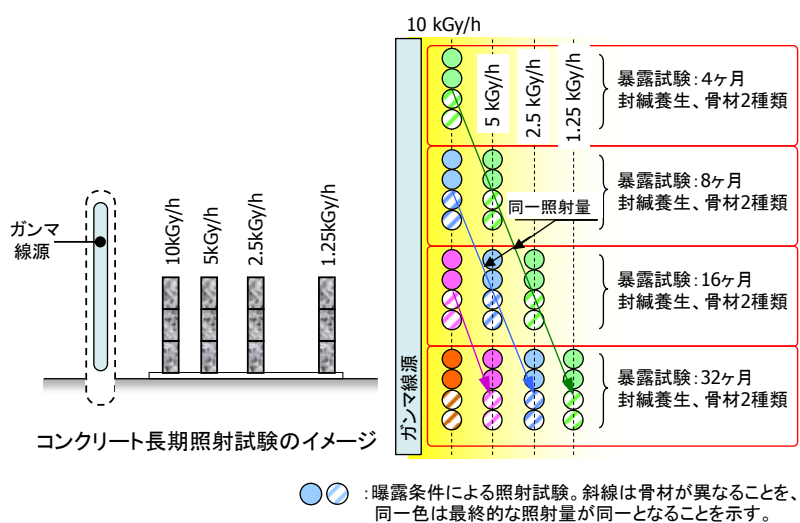


図 3.12 試験体設置のイメージ

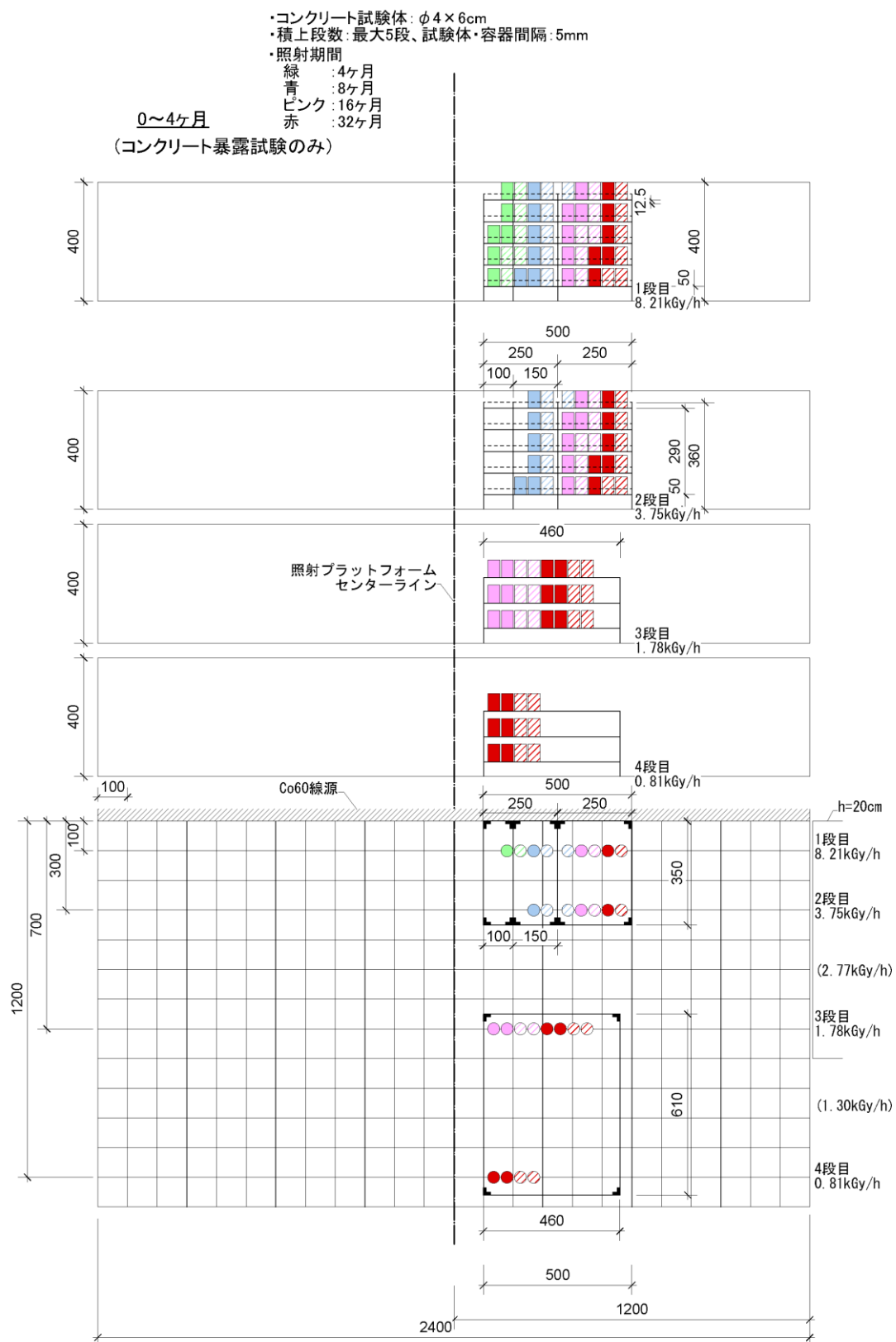
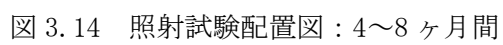


図 3.13 照射試験配置図: 0~4 ヶ月間

4～8ヶ月
(コンクリート暴露試験のみ)



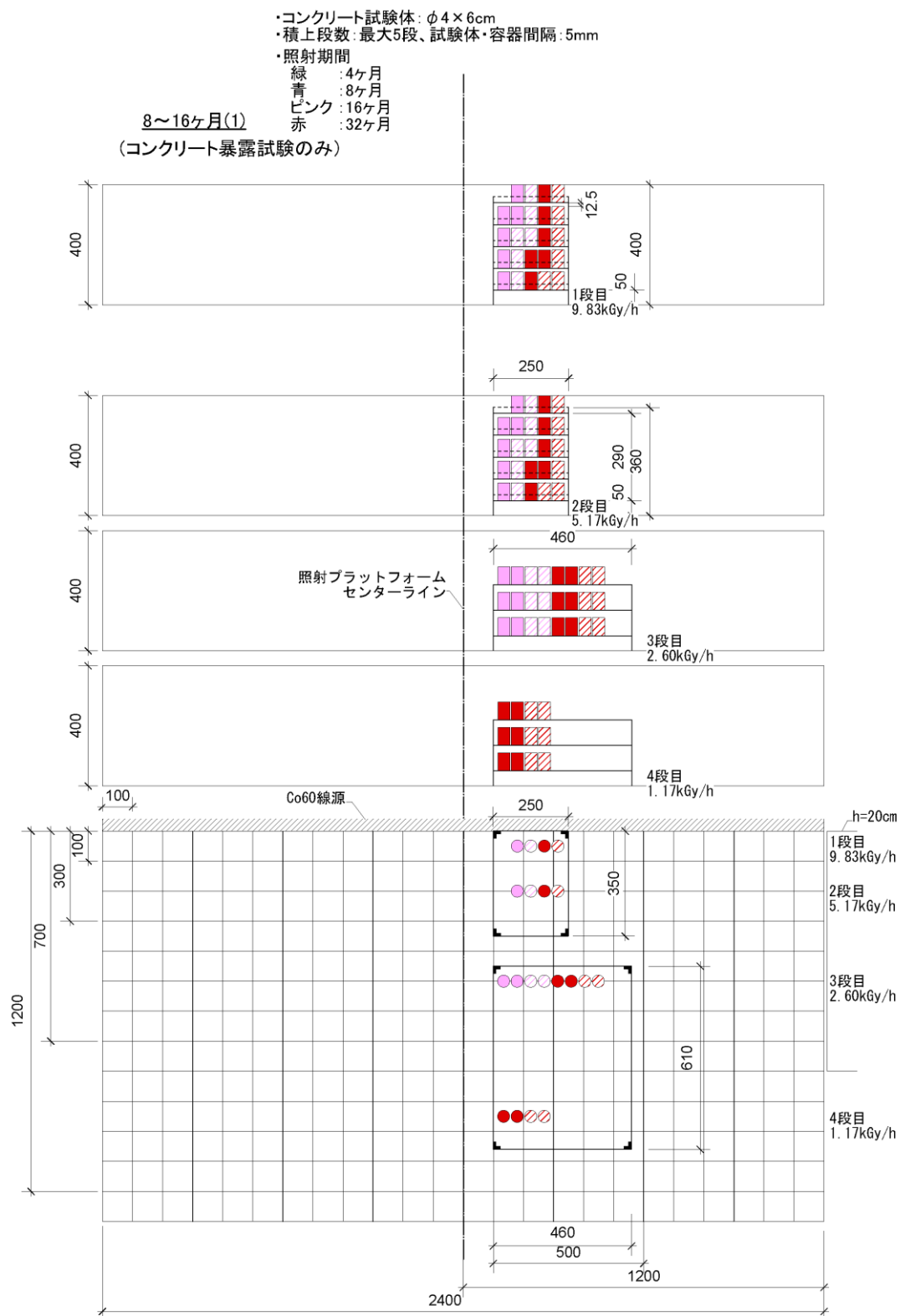


図 3.15 照射試験配置図 : 8～16 ヶ月間 (1)

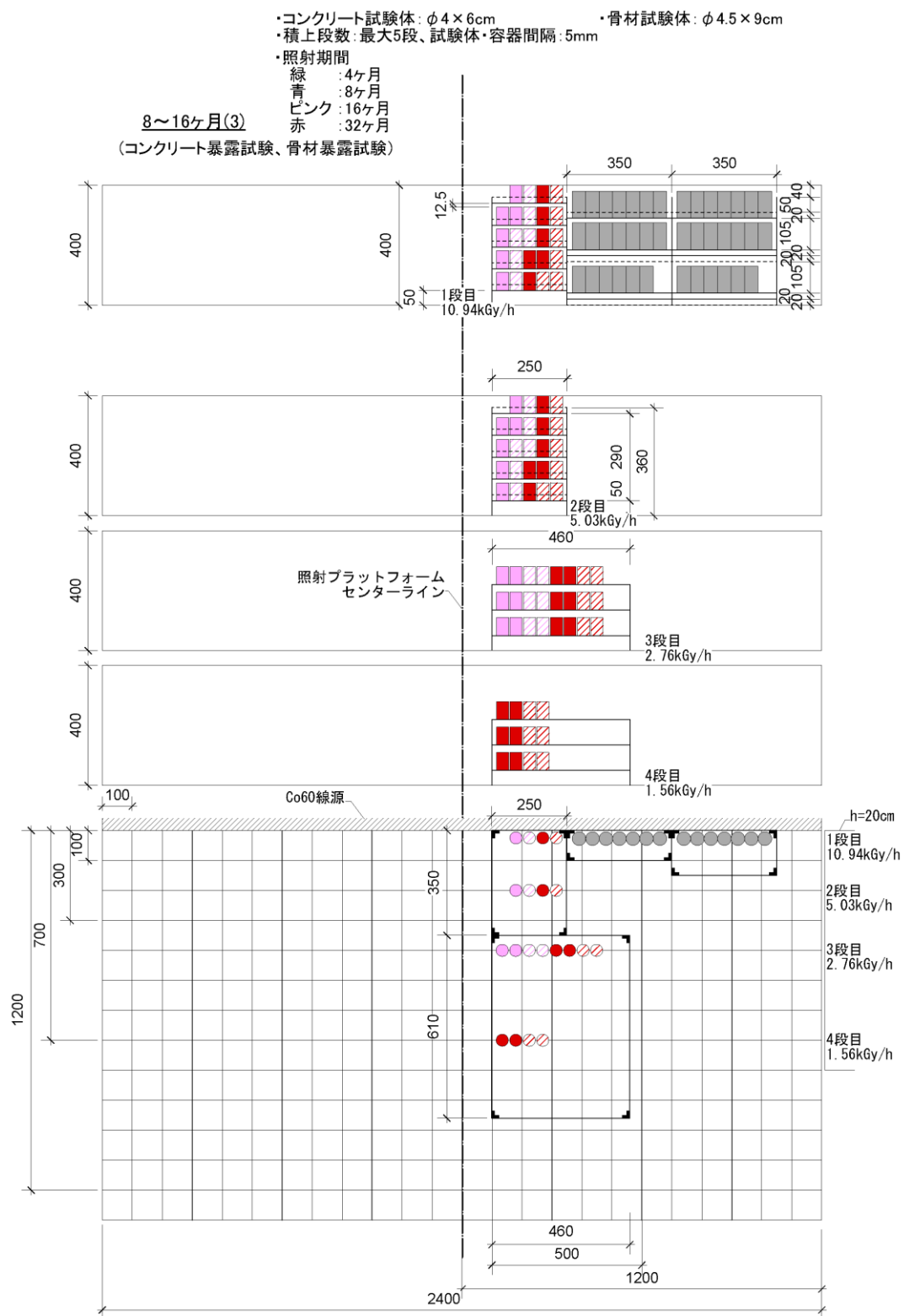


図 3.17 照射試験配置図: 8～16 ヶ月間 (3)

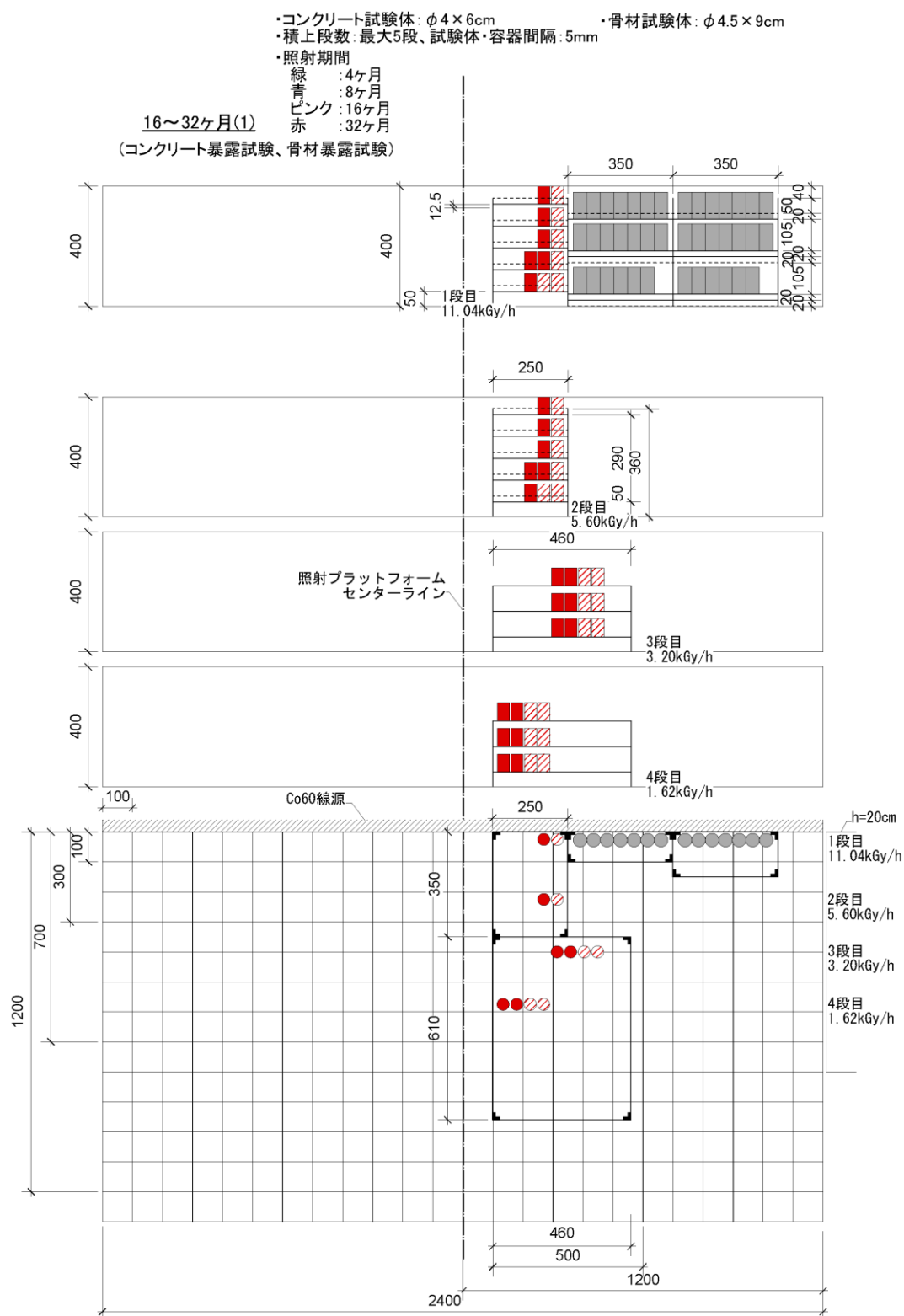


図 3.18 照射試験配置図：16～32 ヶ月間 (1)

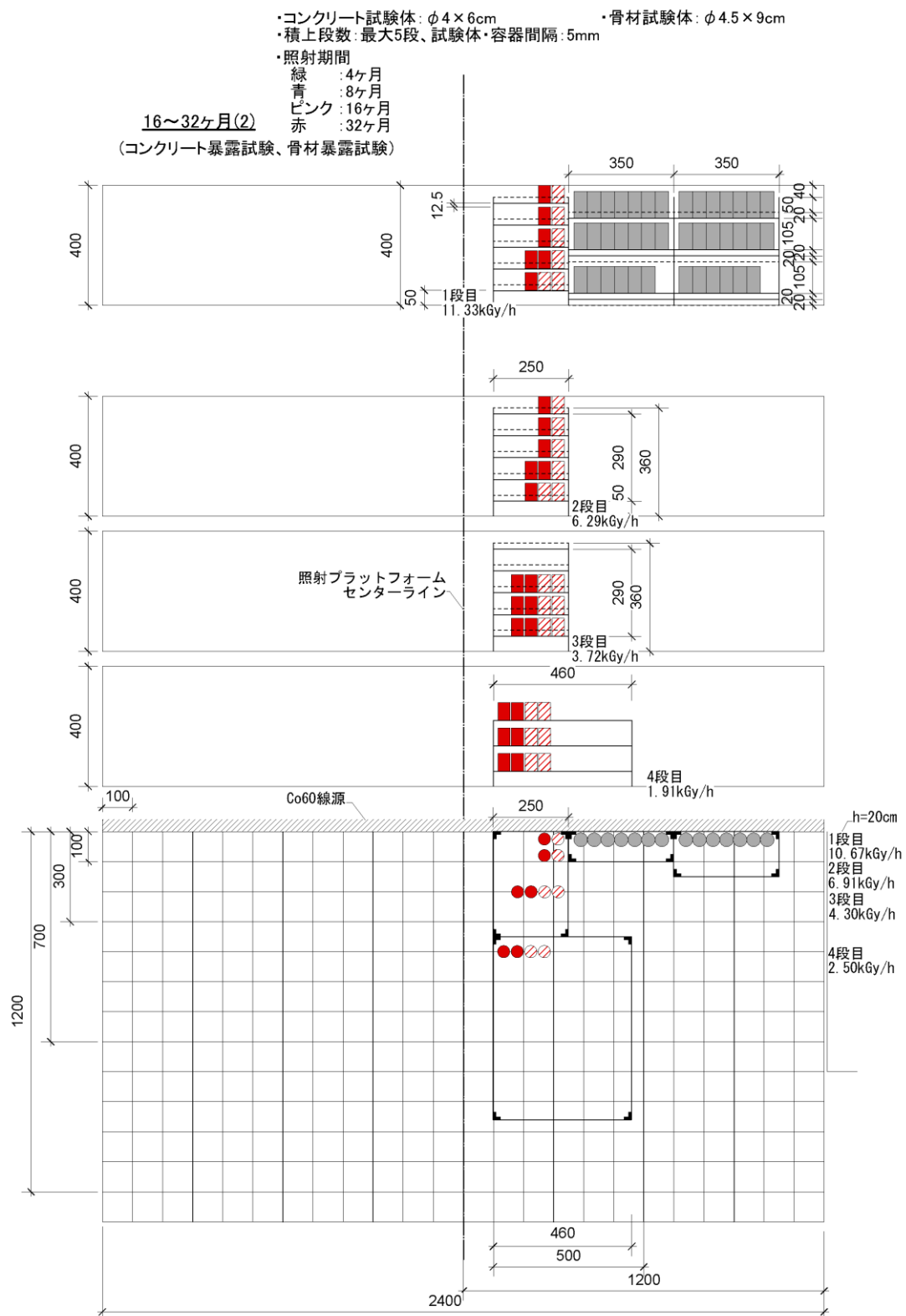


図 3.19 照射試験配置図：16～32 ヶ月間 (2)

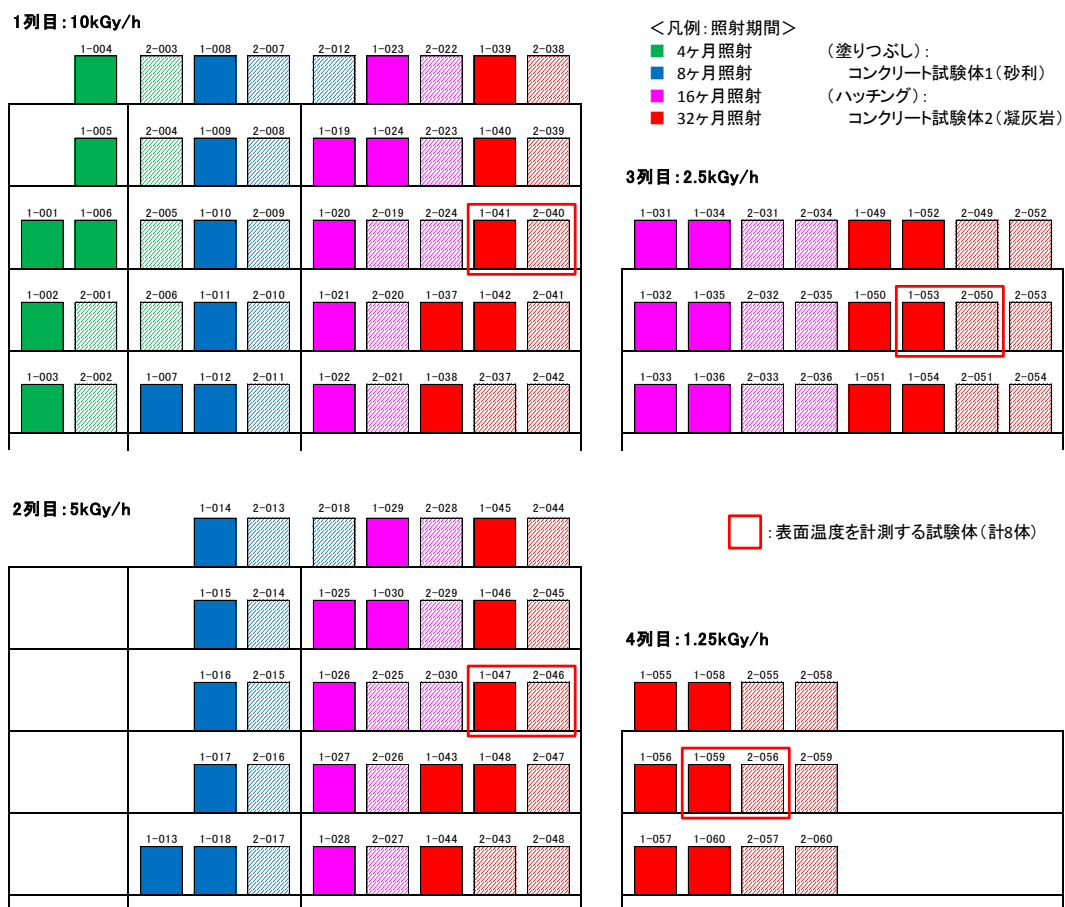


図 3. 20 試験体管理番号



図 3. 21 照射試験エリア

(ii) 測定項目

照射試験中の測定項目を以下に示す。

温度 : 照射試験中の室内および試験体表面の温度を測定する。計測する試験体は線量率4水準それぞれ2体ずつの計8体とした。選定した試験体を図 3.20 に示す。

湿度 : 照射試験中の室内の湿度を測定し、データロガーに取り込む。

ガンマ線量 : 照射試験開始時、完了時および試験体位置変更時にガンマ線量を測定する。測定は1回当たり1時間とする。

照射時間 : 照射時間を記録、管理する。

照射後物性試験の項目を以下に示す。

質量変化、寸法変化、圧縮強度、静弾性係数、自由水量、結合水量、TG

(2) 加熱試験

1) 試験目的

ガンマ線照射試験において、コンクリート試験体はガンマ線の影響のみならず、ガンマ線発熱の影響を受けることから、熱・乾燥の影響も受ける。コンクリートの変質を及ぼす要因として、ガンマ線の影響によるものと熱・乾燥の影響によるものを切り離して評価するために、照射試験の比較用として熱影響試験（非照射・加熱試験）を実施する。

2) 試験計画

a) 試験体

サイズ、調合、打設日および養生方法は、ガンマ線照射試験に用いる試験体と同じとする。

・コンクリート試験体1（粗骨材：砂岩）（ $\phi 40 \times 60\text{mm}$ ）：1-061～1-078（18体）

・コンクリート試験体2（粗骨材：凝灰岩）（ $\phi 40 \times 60\text{mm}$ ）：2-061～2-078（18体）

b) 試験条件

(i) 加熱条件

非照射・加熱試験は、ガンマ線照射中に試験体を受ける熱・乾燥の影響を再現するため、同等の温度および湿度を模擬できる恒温恒湿槽（IG400 および PR-2K）内で、試験体を暴露した状態で実施する。恒温恒湿槽および試験体設置状況を図 3.22～図 3.25 に示す。

試験パラメータは、試験期間をガンマ線照射試験4ヶ月、8ヶ月、16ヶ月、32ヶ月相当

の4水準とし、温湿度は、ガンマ線照射試験1列目および4列目に相当する温湿度条件の2水準とする。試験パラメーター一覧を表3.4に、試験体管理番号を図3.26に示す。

温湿度の条件は、照射試験で計測される温湿度に基づいて以下の通り設定する。なお、温湿度の履歴としては以下で設定した値をさらに1週間で平均化したものを用いる。

- ・温度：熱電対により計測した1列目および4列目それぞれ2体ずつの照射試験体の表面温度の平均値
- ・湿度：照射室内温度に対応する相対湿度（乾湿計換算）を照射試験体の表面温度に対応する相対湿度へ換算した値

ただし、このように設定した湿度は、本試験で使用する恒温恒湿槽の制御範囲を外れる場合があり、そのときは制御可能範囲で最も近い湿度で養生する。また、加熱試験中においては、定期的に試験体質量を計測し、それぞれの試験体と対応するガンマ線照射の試験体と質量減少量が大きく乖離することが無いように適宜湿度を調整する。なお、試験期間が完了する前に照射試験体の質量減少量を上回る場合には、アルミパックで封緘して水分逸散が無い状態で加熱養生するものとする。



図 3.22 恒温恒湿槽：IG400（照射試験 1列目模擬）



図 3.23 試験体設置状況（照射試験 1 列目模擬）



図 3.24 恒温恒湿槽：PR-2K（照射試験 4 列目模擬）



図 3.25 試験体設置状況（照射試験 4 列目模擬）

表 3.4 試験パラメーター一覧

		温湿度	
		恒温恒湿槽 (IG400)	恒温恒湿槽 (PR-2K)
加熱期間	4 ヶ月	照射 1 列目温湿度模擬 骨材 2 種類	—
	8 ヶ月	照射 1 列目温湿度模擬 骨材 2 種類	—
	16 ヶ月	照射 1 列目温湿度模擬 骨材 2 種類	照射 4 列目温湿度模擬 骨材 2 種類
	32 ヶ月	照射 1 列目温湿度模擬 骨材 2 種類	照射 4 列目温湿度模擬 骨材 2 種類

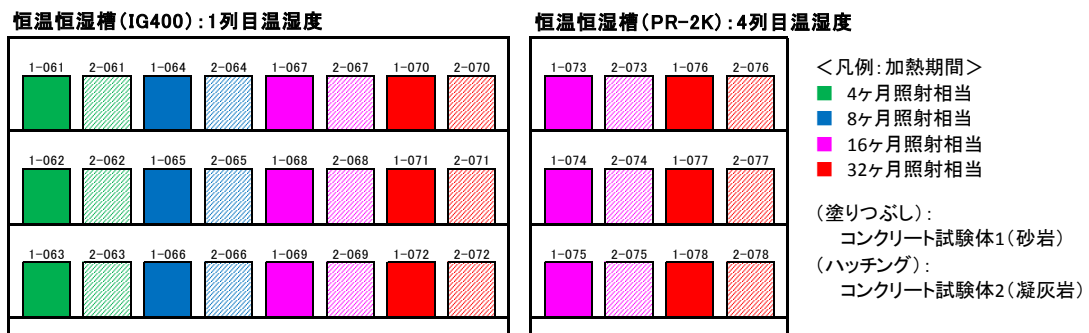


図 3.26 試験体管理番号

(ii) 測定項目

加熱後物性試験の項目を以下に示す。

質量変化、寸法変化、圧縮強度、静弾性係数、自由水量、結合水量、TG

(3) 乾燥試験

1) 試験目的

ガンマ線照射試験において、コンクリート試験体はガンマ線の影響のみならず、ガンマ線発熱の影響を受けることから、熱および乾燥の影響も受ける。コンクリートの変質を及ぼす要因として、ガンマ線の影響によるものと熱の影響によるものから、乾燥のみの影響によるものを切り離して評価するために、照射試験および加熱試験の比較用として乾燥試験を実施する。

2) 試験計画

a) 試験体

サイズ、調合、打設日および養生方法は、照射試験、加熱試験に用いる試験体と同じとする。

- ・コンクリート試験体 1 (粗骨材：砂岩) (φ 40×60mm) : 1-146～1-169 (24 体)
- ・コンクリート試験体 2 (粗骨材：凝灰岩) (φ 40×60mm) : 2-146～2-169 (24 体)

b) 試験条件

(i) 乾燥条件

乾燥試験は、ガンマ線照射あるいは加熱により試験体を受ける乾燥の影響を再現するため、所定の質量減少に到達するまで、一定の温度下で湿度を調整した環境に試験体を曝露させて乾燥させる。定期的にコンクリート試験体の質量を計測し、乾燥試験前のコンクリート試験体質量を基準として、所定期間保管後のコンクリート試験体の質量減少率を把握する。半数のコンクリート試験体は、所定の質量減少率に到達した時点で材料試験を実施し、残り半数のコンクリート試験体は、試験体内部の含水率が均質化されるように、試験体をアルミパックに入れて封緘状態として、所定の温度で 4～9 週間保管した後に材料試験を実施する。

コンクリート試験体の質量減少率は、以下の式で算出した。

$$A = (B - C) / B \times 100$$

ここに、A：コンクリート試験体の質量減少率 (%)

B：乾燥試験開始前のコンクリート試験体の質量 (g)

C：所定期間経過後の乾燥試験後のコンクリート試験体の質量 (g)

試験パラメータは、乾燥の温度を 20℃および 40℃の 2 水準とし、目標の質量減少率を 1% および 1.5% の 2 水準とし、また、乾燥後の材料試験の実施の時期を目標質量減少率到達直後と、試験体内部の含水率の均質化後の 2 水準とした。目標の質量減少率については、照射試験と加熱試験と比較することを考慮し設定した。試験パラメータ一覧を表 3.4 に、試験体

管理番号を図 3.26 に示す。

乾燥中の湿度については、乾燥開始時はいずれも 60%RH としていたが、1-149、1-152～1-157、2-146～2-157 の試験体は、温度 20℃、湿度 60%の乾燥条件では目標の質量減少率に到達しないと判断したため、温度 20℃の恒温室で炭酸カリウム飽和塩法（温度 20℃、湿度 42%程度）または塩化リチウム飽和塩法（温度 20℃、湿度 12%程度）による養生に切り替えて乾燥試験を継続した。

飽和塩法とは、炭酸カリウムなどの塩類の飽和水溶液と熱平衡状態にある空気との相対湿度が塩の種類と溶液の温度で定まるという原理を用いて塩の飽和水溶液を入れた容器を一定の温度に保って平衡状況を作り、その表面の空気湿度を既知の値にする方法である。飽和塩法による乾燥方法の概略図を図 3.27 に示す。

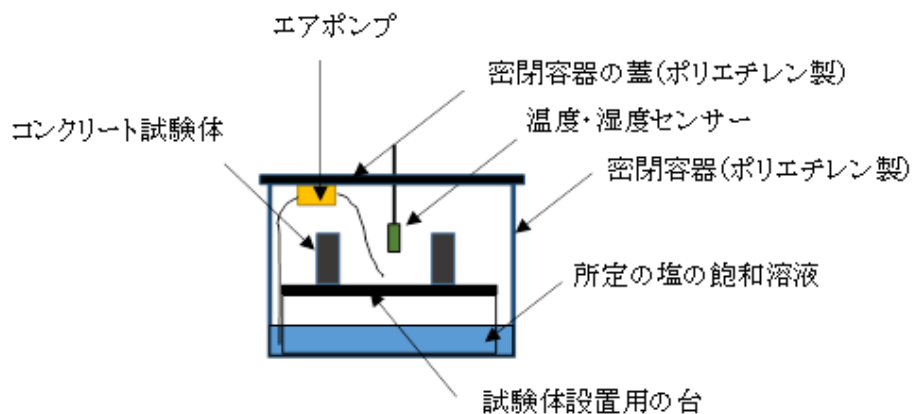


図 3.27 飽和塩法による乾燥方法

【炭酸カリウム飽和塩法方法】

炭酸カリウム飽和塩法の養生方法は、ポリエチレン製の容器に炭酸カリウムの飽和水溶液を深さ 20mm 程度投入し、下部に試験体設置用の台を設置し、事前に容器内の所定の高さ（試験体を配置する予定の高さ付近）に温度・湿度センサーが配置されるように、センサーを取り付けた蓋を設置し容器内部を密閉し、容器を温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温室に設置したものである。なお、容器蓋の内側にエアポンプを取り付けて、エアポンプの吸気側のホース先端を試験体付近に設置し、エアポンプより排出される空気をホースにより炭酸カリウム飽和水溶液中に放出することで、容器内部の空気を循環させた。なお、炭酸カリウム飽和塩法による養生条件は、温度 20℃、湿度 42%程度である。乾燥養生時の温度と湿度の計測結果を図 3.28 および図 3.29 に示す。質量変化の計測のために容器の蓋を開けたタイミングで温度と湿度が変動するが、蓋を閉じた後は一定の温度と湿度となっている。

炭酸カリウム飽和水溶液は、イオン交換水 100g に対して炭酸カリウム（特級：関東化学社製）を 111g 以上投入したものである。飽和水溶液を入れて密閉された容器内の温度およ

び湿度は、株式会社テイアンドデイ社製のデータロガー（TR-72wf-H）および高精度・温湿度センサ（HHA-3151）を用いて計測した。

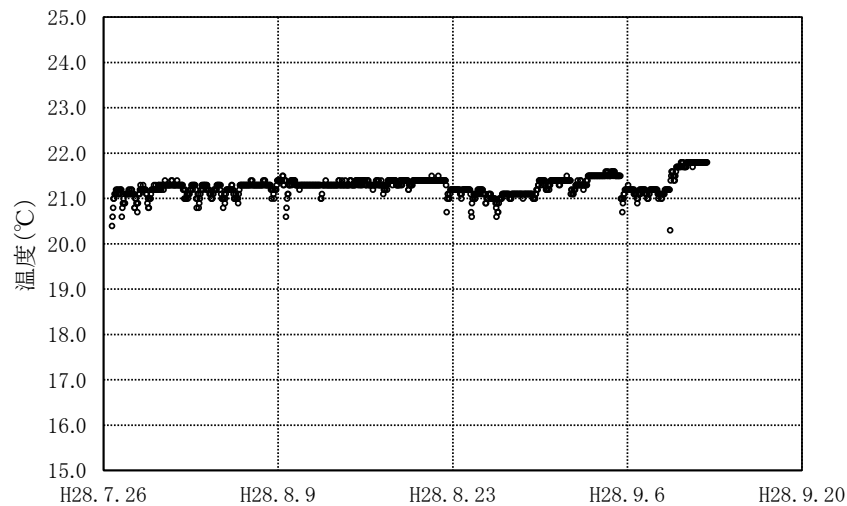


図 3.28 炭酸カリウム飽和塩法の乾燥養生時の温度

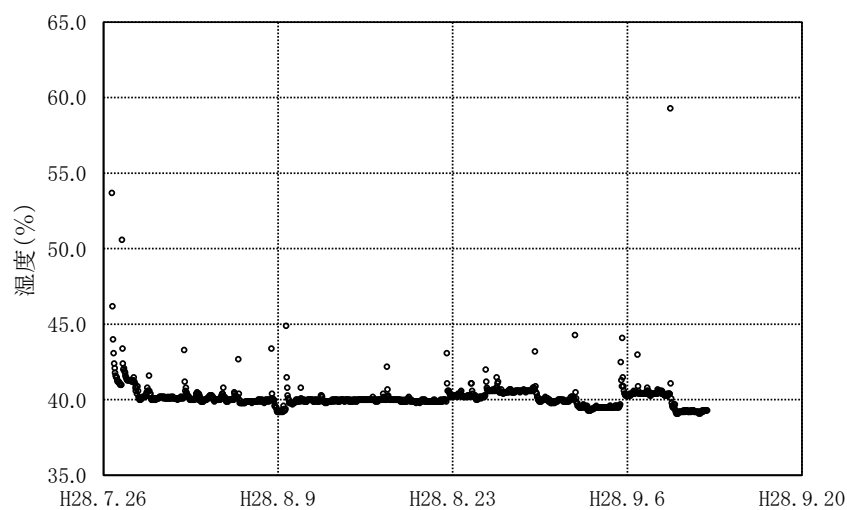


図 3.29 炭酸カリウム飽和塩法の乾燥養生時の湿度

【塩化リチウム飽和塩法方法】

塩化リチウム飽和塩法の養生方法は、ポリエチレン製の容器に塩化リチウムの飽和水溶液を深さ 20mm 程度投入し、下部に試験体設置用の台を設置し、事前に容器内の所定の高さ（試験体を配置する予定の高さ付近）に温度・湿度センサーが配置されるように、センサーを取り付けた蓋を設置し容器内部を密閉し、容器を温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温室に設置したものである。なお、容器蓋の内側にエアポンプを取り付けて、エアポンプの吸気側のホース先端を試

験体付近に設置し、エアポンプより排出される空気をホースにより塩化リチウム飽和水溶液中に放出することで、容器内部の空気を循環させた。なお、塩化リチウム飽和塩法による養生条件は、温度 20℃、湿度 12%程度である。乾燥養生時の温度と湿度の計測結果を図 3.30 および図 3.31 に示す。質量変化の計測のために容器の蓋を開けたタイミングで温度と湿度が変動するが、蓋を閉じた後は一定の温度と湿度となっている。

塩化リチウム飽和水溶液は、イオン交換水 100g に対して塩化リチウム（特級：関東化学社製）を 84g 以上投入したものである。飽和水溶液を入れて密閉された容器内の温度および湿度は、株式会社ティアンドデイ社製のデータロガー（TR-72wf-H）および高精度・温湿度センサ（HHA-3151）を用いて計測した。

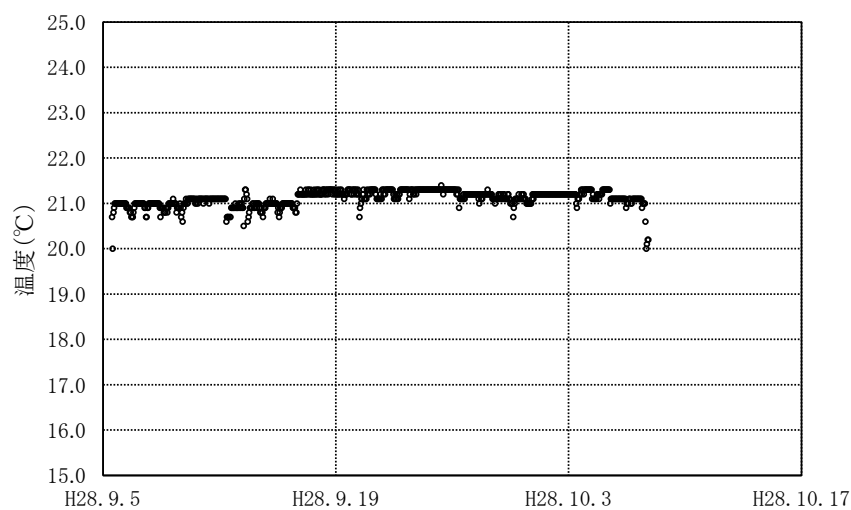


図 3.30 塩化リチウム飽和塩法の乾燥養生時の温度

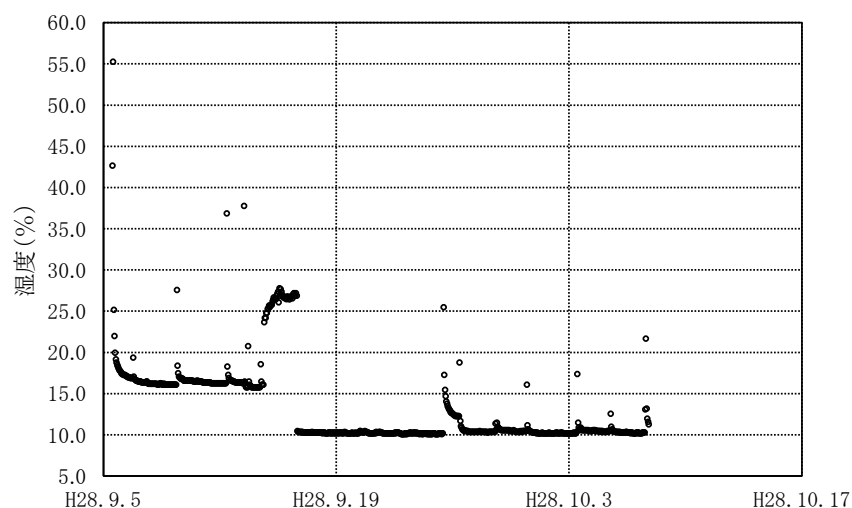


図 3.31 塩化リチウム飽和塩法の乾燥養生時の湿度

表 3.5 試験パラメーター一覧

乾燥温度	質量減少率	試験実施時期	骨材
20℃	1.0%	質量減少率到達直後	2 種類
		質量減少率到達後含水率均質化後	
	1.5%	質量減少率到達直後	
		質量減少率到達後含水率均質化後	
40℃	1.0%	質量減少率到達直後	
		質量減少率到達後含水率均質化後	
	1.5%	質量減少率到達直後	
		質量減少率到達後含水率均質化後	

<凡例: 質量減少率>

■ 質量減少率1%

■ 質量減少率1%+2ヶ月封かん

■ 質量減少率1.5%

■ 質量減少率1.5%+2ヶ月封かん

(塗りつぶし): コンクリート試験体1(砂岩)

(ハッチング): コンクリート試験体2(凝灰岩)

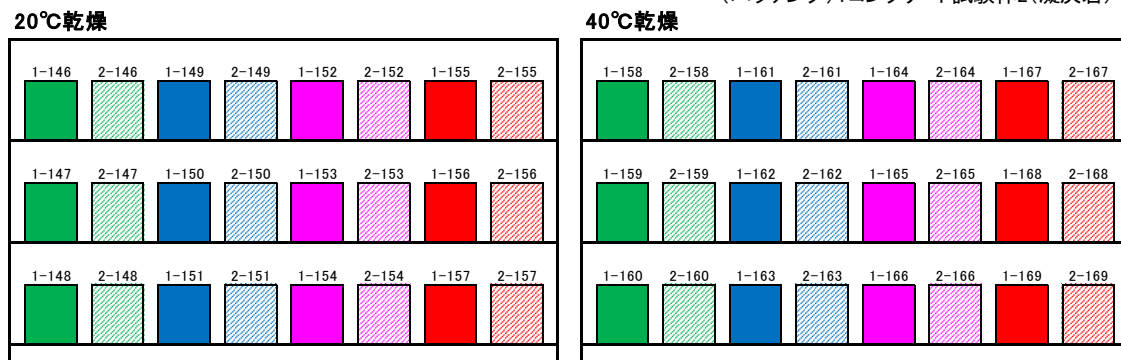


図 3.32 試験体管理番号

(ii) 測定項目

乾燥後物性試験の項目を以下に示す。

質量変化、寸法変化、圧縮強度、静弾性係数、TG

3. 1. 2 試験・計測方法

(1) 質量・寸法計測

照射試験前後の質量および寸法を測定し、それらの変化量を算定した。測定にあたっては、寸法はデジタルノギス使用し 0.01mm 単位まで、質量は電子天秤を使用し 0.01g 単位まで各試験体同じ条件のもと計測した。

(2) 温湿度計測

照射試験中の試験体温度計測用の熱電対（T 型）は、エポキシ樹脂系接着剤（クイックメソナダー）を用いて温度計測用試験体の側面に接着し、セラミック絶縁管に通したのちに補償導線に切り替えてデータロガー1（OMRON 製、ZR-RX20）に接続した。熱電対の取り付け状況を図 3.33 に示す。照射室内湿度計測ユニットの 2 本の熱電対（乾球および湿球）もデータロガー1に接続した。照射室内の温度は、湿度計測ユニットの熱電対（乾球）により計測を行った。

照射室内外の湿度センサー（立山科学製 SPF-54）および照射室外の室温計測用 T 型熱電対はデータロガー2（データロガー1 と同型式）に接続した。データロガー本体におけるデータ記録は 5 分間隔とし、データロガーから通信用 PC へのデータ転送は 30 分間隔とした。

乾湿計温度からの湿度計算は、以下の Tetens の飽和蒸気圧曲線の式および Pernter の式を用いた（いずれも経験式、(3.2.1-1)式～(3.2.1-4)式）。Pernter の式における定数 a、b、p はそれぞれ a=0.008、b=610、p=1013 とした（ESPEC 技術情報※ No.11(1997)P1-6）。

※エスペック（株）による技術情報誌

Tetens の飽和蒸気圧曲線の近似式による乾球温度における飽和水蒸気圧 $e(t)$

$$e(t)=6.1078 \times 10^{\wedge}(7.5t/(t+237.3)) \quad (3.2.1-1) \text{式}$$

t：乾球温度

Tetens の飽和蒸気圧曲線の近似式による湿球温度における飽和水蒸気圧 $esw(tw)$

$$esw(tw)=6.1078 \times 10^{\wedge}(7.5tw/(tw+237.3)) \quad (3.2.1-2) \text{式}$$

tw：湿球温度

Pernter の式

$$e=esw-ap(t-tw)*(1+tw/b) \quad (3.2.1-3) \text{式}$$

a、b：定数

p：計測環境下の気圧（hPa）

相対湿度（%）

$$\text{相対湿度（\%）} = e/e(t) \times 100 \quad (3.2.1-4) \text{式}$$



図 3.33 熱電対の取り付け状況

(3) リモートアクセスシステム

試験では計測データのリモートアクセスシステムを用いた。各々の計測結果はインターネット回線を通じてメールの添付ファイルで定時送付された。表 3.6 にリモートアクセスシステムの概要を示す。

リモートアクセスシステム伝送系の概略を図 3.34 に示す。PC に取り込まれた出力データは、LAN ケーブルを経由して無線通信機内臓のモバイルルーターに送られ、所定のアドレスに送信された。

表 3.6 リモートアクセスの概要

項目	温湿度計測用 PC
概要	温湿度計測に関連するデータを送信。データロガーに接続された PC を使用。データロガーから一定間隔で転送される CSV データを登録アドレス宛てに定時送信する。また、必要時には要求者に対する CSV データの送信も可能（リクエスト送信機能）。
PC 型式	DELL 製 INSPIRON2200
プログラム言語	VBScript 、Outlook2007 VBA
送信データ	①計測日時 ②Ch1～8 の試験体温度 ③照射室内温度(乾球、湿球) ④照射室内温度および湿度
送信頻度	1 回/日

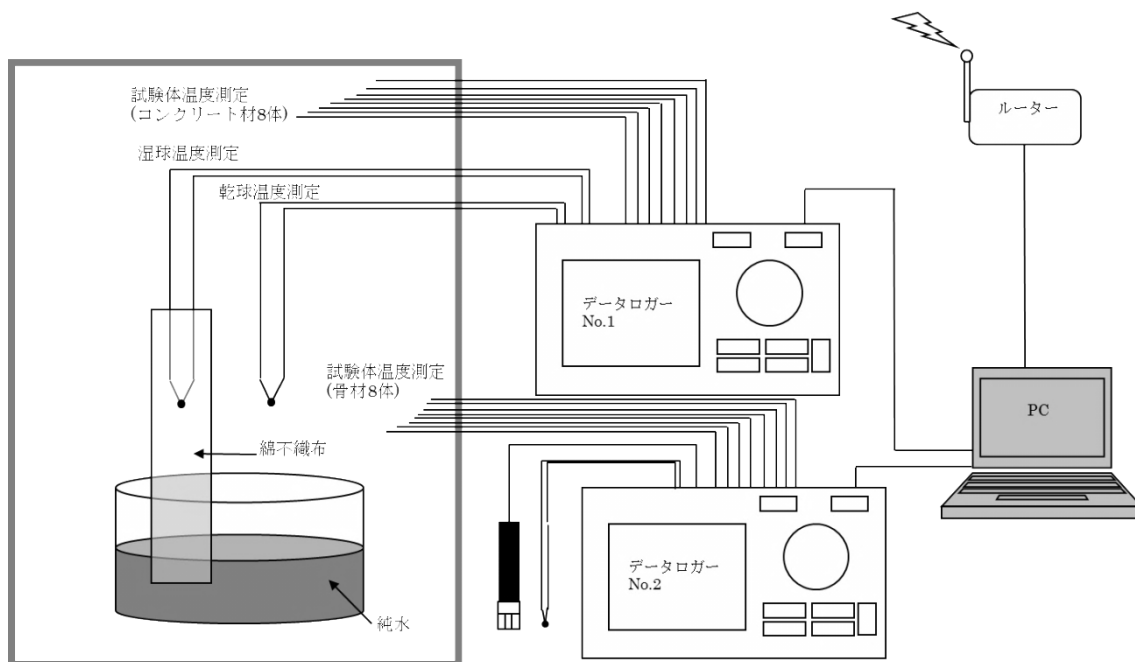


図 3.34 リモートアクセスシステム伝送系の概略

(4) ガンマ線量

ガンマ線量の測定は、アラニン線量計（日本原子力研究開発機構・日立電線開発アミノグレイ、直径 11mm、高さ 50mm）を試験体に取り付け、1 時間の照射後、取外して線量を計測する。試験体自体で遮へいされるため、照射版から見て試験体前後の 2 ヶ所に線量計を設置する。線量計を取り付ける試験体は、各列（各線量率）で 2 体ずつの計 8 体とする。各列の線量率については、それぞれ試験体 2 体の前後に取り付けた 4 ヶ所の線量計の計測結果の平均とする。図 3.35 および図 3.36 に線量計測状況を示す。



(a)線量計



(b)線量計取り付け状況

図 3.35 線量計測状況 (1)



(a)線量計配置状況 (1)



(b)線量計配置状況 (1)

図 3. 36 線量計測状況 (2)

(5) 物性試験

照射試験後の物性試験として、圧縮強度、静弾性係数、自由水率、結合水率、TG の 5 項目について計測を実施する。あわせて比較用の標準養生（20℃封緘）試験体および加熱試験体についても適宜計測を行う。各試験体の試験項目および実施時期を表 3.7 および表 3.8 に示す。

自由水率および結合水率試験は、圧縮強度試験後の所定の試験体について実施する。試験方法は、セメント協会法（F-18）を準用する。自由水率試験および結合水率試験フローを図 3.37 に示す。

【自由水率試験方法】

試験体の乾燥前の質量を測定し、試験体の質量が一定となるまで 105℃で乾燥させ、乾燥後の試験体質量を測定し、(3.2.1-5)式より算出する。

$$\text{自由水率 (\%)} = m' / m \times 100 \quad (3.2.1-5) \text{式}$$

ここに、 m' : 乾燥減量 (g)
 M : 乾燥後の試験体質量 (g)

【結合水率試験方法】

自由水率試験で用いた試験体をジョークラッシャーで全量粗粉碎（5mm 以下）し、試料が 100g 程度になるまで縮分した。縮分した試料（100g 程度）を振動ミルで微粉碎（105 μ m 以下）し、この中から 1g 程度試料を採取し、これを結合水率の試験用試料とした。結合水率の試験用試料（1g 程度）を 600℃の電気炉で 15 分間強熱し、放冷した後質量を測定した。15 分間ずつ強熱を繰返し、恒量になった時の減量（強熱減量）を求め、(3.2.1-6)式より算出した。

$$\text{結合水率 (\%)} = m' / m \times 100 \quad (3.2.1-6) \text{式}$$

ここに、 m' : 強熱減量 (g)
 M : 試料の質量 (g)

表 3.7 (1) 各試験体の試験項目および実施時期 コンクリート試験体 1 (砂岩)

目的	試験種類		照射期間 (月)	照射量 (kGy)	温度	雰囲気	骨材	試験 体数	試験体 ID	試験項目			
										圧縮 強度	静弾性 係数	自由水率 結合水率	TG
物理 特性	暴露	照射 試験	4	2.5x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気		GB 砂岩 砂利	6	1-001	○	○	○	
									1-002	○	○	○	
									1-003	○	○	○	
									1-004	○	○	○	
									1-005	○	○		
									1-006				
			8	5.0x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気			6	1-007	○	○	○	
									1-008	○	○	○	
									1-009	○	○	○	
									1-010	○	○	○	
									1-011	○	○		
									1-012				
			16	1.0x10 ⁵	照射室内 温度・雰囲気			6	1-013	○	○	○	
									1-014	○	○	○	
									1-015	○	○	○	
									1-016	○	○	○	
									1-017	○	○		
									1-018				
			16	5.0x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気			6	1-019	○	○	○	
									1-020	○	○	○	
									1-021	○	○	○	
									1-022	○	○	○	
									1-023	○	○		
									1-024				
			16	2.5x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気			6	1-025	○	○	○	
									1-026	○	○	○	
									1-027	○	○	○	
									1-028	○	○	○	
									1-029	○	○		
									1-030				
			32	2.0x10 ⁵ 1.0x10 ⁵ 5.0x10 ⁴ 2.5x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気			6	1-031	○	○	○	
									1-032	○	○	○	
									1-033	○	○	○	
									1-034	○	○	○	
									1-035	○	○		
									1-036				
								6	1-037	○	○	○	
									1-038	○	○	○	
									1-039	○	○	○	
									1-040	○	○	○	
									1-041	○	○		
									1-042				
			6	1-043	○	○		○					
				1-044	○	○		○					
				1-045	○	○		○					
				1-046	○	○		○					
				1-047	○	○							
				1-048									
		6	1-049	○	○	○							
			1-050	○	○	○							
			1-051	○	○	○							
			1-052	○	○	○							
			1-053	○	○								
			1-054										
		6	1-055	○	○	○							
			1-056	○	○	○							
			1-057	○	○	○							
			1-058	○	○	○							
			1-059	○	○								
			1-060										
		3	1-061	○	○	○							
			1-062	○	○	○							
			1-063	○	○								
			1-064	○	○	○							
			1-065	○	○	○							
			1-066	○	○								
		3	1-067	○	○	○							
			1-068	○	○	○							
			1-069	○	○								
		3	1-070	○	○	○							
			1-071	○	○	○							
			1-072	○	○								
		3	1-073	○	○	○							
			1-074	○	○	○							
			1-075	○	○								
		3	1-076	○	○	○							
			1-077	○	○	○							
			1-078	○	○								
加熱 試験	4	—	1段目 温度	照射室内 と同一の 雰囲気	3	1-067	○	○	○				
						1-068	○	○	○				
						1-069	○	○					
						1-070	○	○	○				
						1-071	○	○	○				
						1-072	○	○					
	16	—	4段目 温度		3	1-073	○	○	○				
						1-074	○	○	○				
						1-075	○	○					
						1-076	○	○	○				
						1-077	○	○	○				
						1-078	○	○					

表 3.7 (2) 各試験体の試験項目および実施時期 コンクリート試験体 1 (砂岩)

目的	試験種類	照射期間 (月)	照射量 (kGy)	温度	雰囲気	骨材	試験 体数	試験体 ID	試験項目			
									圧縮 強度	静弾性 係数	自由水率 結合水率	TG
物理 特性	20℃ 封緘	28日強度	—	20℃封緘	GB 砂岩 砂利	3	1-127	○				
		試験開始時強度	1-128				○					
			1-129				○					
			4ヶ月照射後			1-130	○	○				
		1-131				○	○					
		1-132				○	○					
		8ヶ月照射後	1-133			○	○	○				
			1-134			○	○	○				
			1-135			○	○					
		16ヶ月照射後	1-136			○	○	○				
			1-137			○	○	○				
			1-138			○	○					
	32ヶ月照射後	1-139	○	○		○						
		1-140	○	○		○						
		1-141	○	○								
	暴露 乾燥 試験	質量減少量1%到達時点	20℃ 60～11%RH	3		1-142	○	○	○			
						1-143	○	○	○			
						1-144	○	○				
				質量減少量1%到達後 含水率均質化後		3	1-146	○	○			
							1-147	○	○			
							1-148	○	○			
		質量減少量1.5%到達時点	40℃ 60%RH	3		1-149	○	○				
						1-150	○	○				
						1-151	○	○				
質量減少量1.5%到達後 含水率均質化後				3	1-152	○	○					
					1-153	○	○					
					1-154	○	○					
質量減少量1%到達時点	40℃ 60%RH	3	1-155	○	○							
			1-156	○	○							
			1-157	○	○							
		質量減少量1%到達後 含水率均質化後	3	1-158	○	○						
				1-159	○	○						
				1-160	○	○						
質量減少量1.5%到達時点	40℃ 60%RH	3	1-161	○	○							
			1-162	○	○							
			1-163	○	○							
		質量減少量1.5%到達後 含水率均質化後	3	1-164	○	○						
				1-165	○	○						
				1-166	○	○						
質量減少量1.5%到達後 含水率均質化後	40℃ 60%RH	3	1-167	○	○							
			1-168	○	○							
			1-169	○	○							

表 3.8 (1) 各試験体の試験項目および実施時期 コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

目的	試験種類	照射期間 (月)	照射量 (kGy)	温度	雰囲気	骨材	試験 体数	試験体 ID	試験項目			
									圧縮 強度	静弾性 係数	自由水率 結合水率	TG
物理 特性	暴露	照射 試験	4	2.5x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気	GA 凝灰岩 碎石	6	2-001	○	○	○	
								2-002	○	○	○	○
								2-003	○	○	○	
								2-004	○	○	○	
								2-005	○	○		
								2-006				
			8	5.0x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気		6	2-007	○	○	○	
								2-008	○	○	○	
								2-009	○	○	○	○
								2-010	○	○	○	
								2-011	○	○		
								2-012				
			2.5x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気	6		2-013	○	○	○		
							2-014	○	○	○		
							2-015	○	○	○		
							2-016	○	○	○		
							2-017	○	○			
							2-018					
			16	1.0x10 ⁵	照射室内 温度・雰囲気		6	2-019	○	○	○	○
								2-020	○	○	○	
								2-021	○	○	○	
								2-022	○	○	○	
								2-023	○	○		
								2-024				
			5.0x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気	6		2-025	○	○	○		
							2-026	○	○	○		
							2-027	○	○	○		
							2-028	○	○	○		
							2-029	○	○			
							2-030					
			2.5x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気	6		2-031	○	○	○		
							2-032	○	○	○		
							2-033	○	○	○		
							2-034	○	○	○		
							2-035	○	○			
							2-036					
			2.0x10 ⁵	照射室内 温度・雰囲気	6		2-037	○	○	○		
							2-038	○	○	○		
							2-039	○	○	○		
							2-040	○	○	○	○	
							2-041	○	○			
							2-042					
			1.0x10 ⁵	照射室内 温度・雰囲気	6		2-043	○	○	○		
							2-044	○	○	○		
							2-045	○	○	○		
							2-046	○	○	○		
							2-047	○	○			
							2-048					
		5.0x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気	6	2-049		○	○	○			
					2-050		○	○	○			
					2-051		○	○	○			
					2-052		○	○	○			
					2-053		○	○				
					2-054							
		2.5x10 ⁴	照射室内 温度・雰囲気	6	2-055		○	○	○			
					2-056		○	○	○			
					2-057		○	○	○			
					2-058		○	○	○			
					2-059		○	○				
					2-060							
		加熱 試験	—	1段目 温度	3		2-061	○	○	○		
							2-062	○	○	○		
							2-063	○	○			
							2-064	○	○	○		
							2-065	○	○	○		
							2-066	○	○			
				4段目 温度	3		2-067	○	○	○		
							2-068	○	○	○		
							2-069	○	○			
							2-070	○	○	○	○	
							2-071	○	○	○		
							2-072	○	○			
				3	2-073		○	○	○			
					2-074		○	○	○			
					2-075		○	○				
					2-076		○	○	○			
					2-077		○	○	○			
					2-078		○	○				

表 3.8 (2) 各試験体の試験項目および実施時期 コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

目的	試験種類	照射期間 (月)	照射量 (kGy)	温度	雰囲気	骨材	試験 体数	試験体 ID	試験項目			
									圧縮 強度	静弾性 係数	自由水率 結合水率	TG
物理 特性	20℃ 封緘	28日強度	—	20℃封緘	GA 凝灰岩 碎石	3	2-127	○				
		試験開始時強度	—				2-128	○				
							2-129	○				
		4ヶ月照射後	—			3	2-130	○	○			
							2-131	○	○			
							2-132	○	○			
		8ヶ月照射後	—			3	2-133	○	○	○		
							2-134	○	○	○		
							2-135	○	○			
		16ヶ月照射後	—			3	2-136	○	○	○		
							2-137	○	○	○		
							2-138	○	○			
	32ヶ月照射後	—	3	2-139		○	○	○				
				2-140		○	○	○				
				2-141		○	○					
	暴露 追加 乾燥 試験	質量減少量1%到達時点	20℃ 60%RH	3		2-142	○	○	○			
		質量減少量1%到達後 含水率均質化後				2-143	○	○	○			
						2-144	○	○				
		質量減少量1.5%到達時点		3		2-146	○	○				
						2-147	○	○				
						2-148	○	○				
		質量減少量1.5%到達後 含水率均質化後	40℃ 60%RH	3		2-149	○	○				
		質量減少量1%到達時点				2-150	○	○				
						2-151	○	○				
質量減少量1%到達後 含水率均質化後		3		2-152	○	○						
				2-153	○	○						
				2-154	○	○						
	質量減少量1.5%到達後 含水率均質化後	3	2-155	○	○							
			2-156	○	○		○					
			2-157	○	○							
	質量減少量1%到達時点	3	2-158	○	○							
			2-159	○	○							
			2-160	○	○							
	質量減少量1%到達後 含水率均質化後	3	2-161	○	○							
			2-162	○	○							
			2-163	○	○							
質量減少量1.5%到達時点	3	2-164	○	○								
		2-165	○	○								
		2-166	○	○								
	質量減少量1.5%到達後 含水率均質化後	3	2-167	○	○							
			2-168	○	○							
			2-169	○	○							

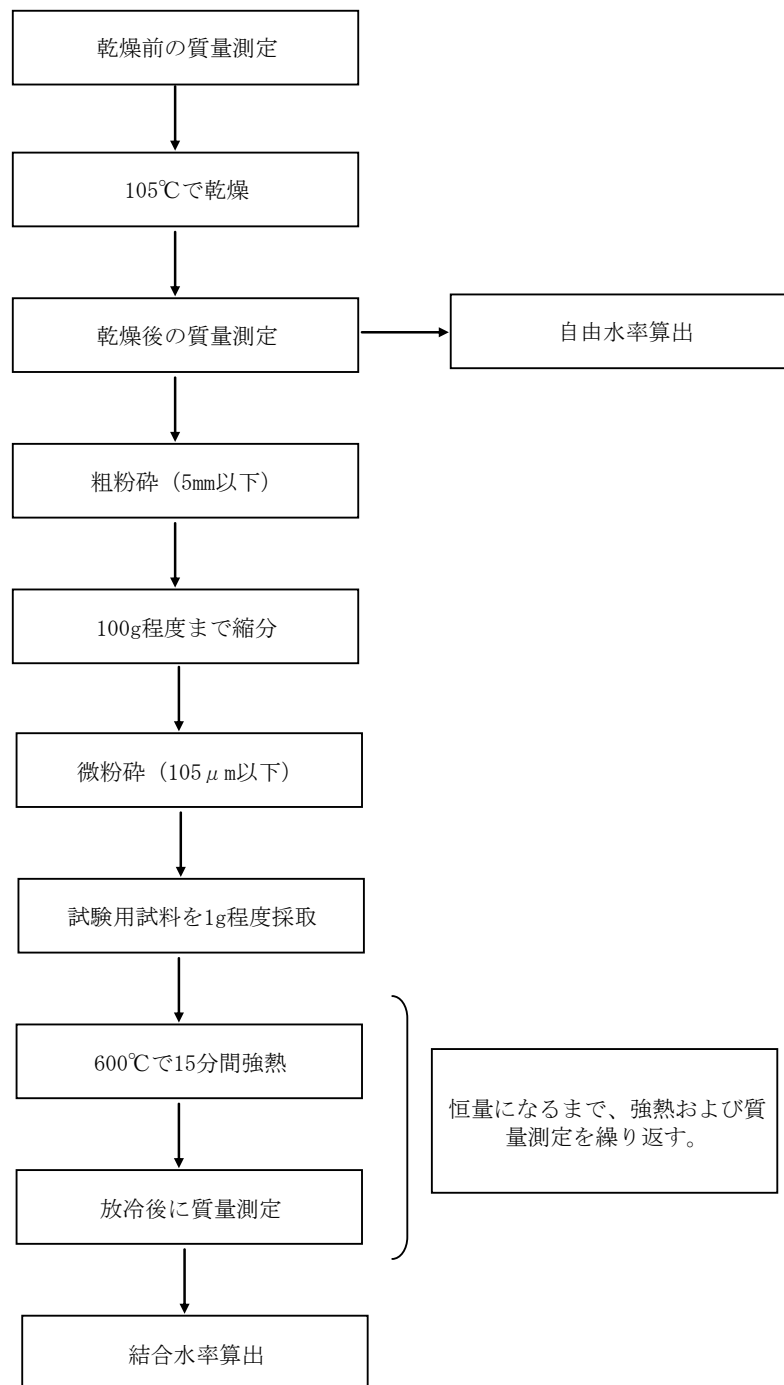


図 3.37 自由水率試験および結合水率試験フロー

3. 1. 3 試験結果

(1) 試験期間

照射試験は 2012 年度に開始した。試験期間中に施設の維持管理に関わる理由で照射停止することがあり、表 3.9 に主な照射停止期間を示す。また、加熱試験は 2014 年 1 月に開始した。図 3.38、図 3.39、表 3.10 および表 3.11 に加熱試験に用いる温湿度履歴を示す。なお、ここでの温湿度は後述の試験体温度計測結果（図 3.41）および照射室内外における湿度計測結果（図 3.42）に基づくものである。

以降のページでまとめた各試験結果は、2015 年度までに実施した結果も含めて示す。今年度得られた試験結果は以下の通りである。

- ・加熱試験の 3 2 ヶ月の水準
- ・乾燥試験の全ての水準
- ・照射試験、加熱試験、乾燥試験の TG

表 3.9 主な照射停止期間

照射停止期間	備考
2013/12/24-2014/01/10	線源交換に伴う照射施設・装置停止
2014/01/31-2014/02/02	計画停電に伴う照射施設・装置停止（温湿度計測も停止）
2014/02/14-2014/02/17	計画停電に伴う照射施設・装置停止（温湿度計測も停止）
2014/02/21-2014/02/24	計画停電に伴う照射施設・装置停止（温湿度計測も停止）
2014/02/25-2014/02/28	設備点検に伴う照射施設・装置停止
2014/02/28-2014/03/03	計画停電に伴う照射施設・装置停止（温湿度計測も停止）
2014/03/03-2014/03/14	設備点検に伴う照射施設・装置停止
2014/12/24-2015/01/06	計画停電に伴う照射施設・装置停止（温湿度計測も停止）
2015/08/17-2015/09/04	計画停電に伴う照射施設・装置停止（温湿度計測も停止）

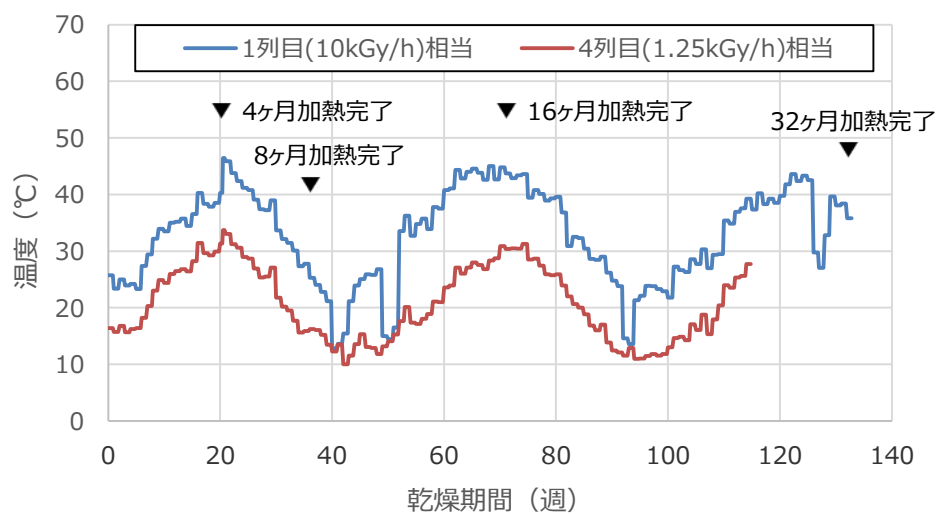


図 3.38 加熱試験温度履歴

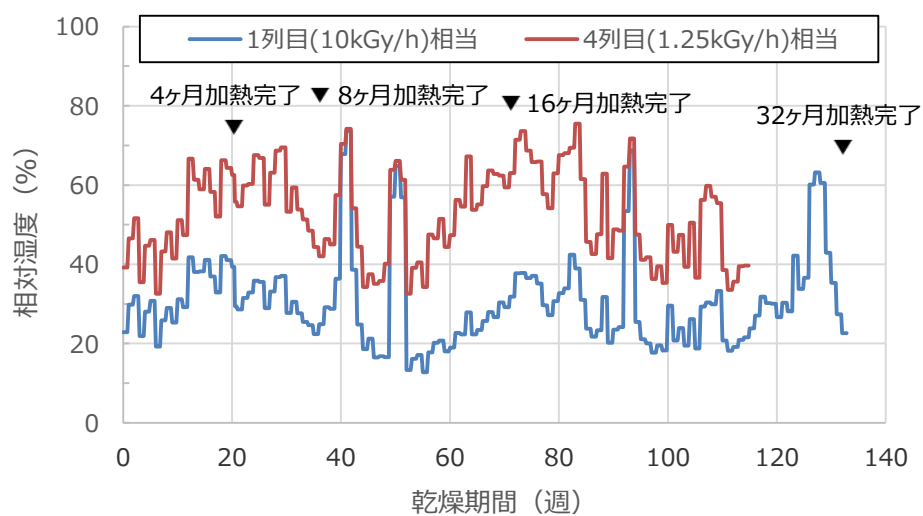


図 3.39 加熱試験湿度履歴

表 3.10 加熱試験温湿度履歴 (1)

経過時間	加熱条件(照射試験時の1段目の養生条件模擬：1-061～1-072、2-061～2-072適用)		加熱条件(照射試験時の4段目の養生条件模擬：1-073～1-078、2-073～2-078適用)	
	温度 (℃)	湿度 (%)	温度 (℃)	湿度 (%)
0日～1週	25.7	22.8	16.4	39.2
1週～2週	23.3	29.8	15.7	46.5
2週～3週	25.0	32.0	16.8	51.6
3週～4週	23.9	21.9	15.7	35.5
4週～5週	24.2	28.0	16.2	44.7
5週～6週	23.3	30.8	16.4	46.2
6週～7週	27.4	19.2	18.2	32.5
7週～8週	29.4	25.9	20.3	43.3
8週～9週	32.2	29.0	23.0	48.1
9週～10週	34.0	25.3	24.9	41.4
10週～11週	33.5	31.2	24.4	51.1
11週～12週	35.0	29.1	26.0	47.4
12週～13週	35.2	41.8	26.5	66.7
13週～14週	35.7	38.1	26.8	61.4
14週～15週	34.4	38.2	26.4	58.9
15週～16週	36.5	41.2	28.2	64.1
16週～17週	40.3	36.9	31.4	58.2
17週～18週	38.4	32.9	29.6	52.1
18週～19週	37.8	42.1	29.2	66.3
19週～20週	38.5	41.1	29.9	64.3
20週～20.5週	40.3	39.4	31.3	62.6
20.5週～21週	46.4	29.4	33.7	55.8
21週～22週	45.9	28.6	33.1	54.6
22週～23週	43.8	31.5	31.2	59.9
23週～24週	42.4	32.8	30.6	60.3
24週～25週	41.2	35.8	29.0	67.6
25週～26週	40.8	35.6	28.7	66.9
26週～27週	39.1	28.9	26.9	55.0
27週～28週	37.4	33.1	25.3	63.1
28週～29週	37.2	36.8	25.5	68.7
29週～30週	39.0	37.1	27.1	69.5
30週～31週	33.7	27.7	21.8	53.3
31週～32週	32.2	30.5	20.2	59.4
32週～33週	31.5	27.6	19.5	53.8
33週～34週	30.1	25.5	17.7	51.3
34週～35週	27.3	24.6	15.6	48.5
35週～36週	27.8	22.4	15.9	44.4
36週～37週	25.3	24.9	16.2	42.0
37週～38週	24.0	29.1	16.1	46.4
38週～39週	22.8	28.8	15.2	45.0
39週～40週	21.2	36.3	13.5	57.5
40週～41週	12.8	67.8	12.3	70.4
41週～42週	13.6	73.7	13.5	74.2
42週～43週	15.4	38.6	10.0	54.1
43週～44週	21.2	24.8	11.5	44.4
44週～45週	23.9	18.6	13.6	34.2
45週～46週	25.1	21.2	15.3	37.5
46週～47週	25.9	16.4	13.1	35.0
47週～48週	25.8	16.8	12.9	35.8
48週～49週	26.8	16.6	11.8	40.1
49週～50週	15.0	57.1	13.2	63.9
50週～51週	14.4	64.8	14.1	66.1
51週～52週	16.5	56.9	15.2	61.4
52週～53週	33.5	13.4	17.6	32.5
53週～54週	36.2	16.2	20.1	39.1
54週～55週	32.7	17.1	17.4	40.5
55週～56週	34.8	12.8	17.1	34.3
56週～57週	35.8	17.8	18.0	47.5
57週～58週	33.9	20.2	18.9	46.5
58週～59週	37.8	20.7	21.1	51.4
59週～60週	37.5	18.0	21.0	44.3
60週～61週	40.8	19.0	23.6	47.3
61週～62週	41.0	22.7	23.9	56.2
62週～63週	44.3	22.3	27.1	54.5
63週～64週	42.8	27.9	26.0	67.2
64週～65週	44.0	22.3	27.1	53.7
65週～66週	44.6	23.4	28.0	55.1
66週～67週	43.9	25.7	27.6	59.7
67週～68週	42.6	28.0	26.8	63.7
68週～69週	45.0	26.6	28.3	62.8
69週～70週	42.6	30.3	28.7	62.4

表 3.11 加熱試験温湿度履歴 (2)

経過時間	加熱条件(照射試験時の1段目の養生条件模擬：1-061～1-072、2-061～2-072適用)		加熱条件(照射試験時の4段目の養生条件模擬：1-073～1-078、2-073～2-078適用)	
	温度(℃)	湿度(%)	温度(℃)	湿度(%)
70週-71週	44.8	29.2	30.9	59.4
71週-72週	43.7	31.8	30.3	63.1
72週-73週	42.9	37.7	30.5	71.4
73週-74週	43.4	37.8	30.4	73.6
74週-75週	43.6	36.5	31.3	68.7
75週-76週	39.4	37.1	28.5	65.8
76週-77週	40.8	35.1	28.7	66.0
77週-78週	40.1	29.7	27.4	57.7
78週-79週	38.9	27.1	25.9	54.2
79週-80週	39.3	30.7	25.7	63.0
80週-81週	39.6	32.7	25.9	67.5
81週-82週	36.8	34.0	23.9	68.0
82週-83週	30.9	42.5	22.0	69.4
83週-84週	32.5	38.9	20.6	75.4
84週-85週	32.3	31.0	20.0	61.5
85週-86週	30.4	23.7	18.8	45.6
86週-87週	28.6	21.7	16.9	42.6
87週-88週	28.4	23.3	16.0	47.6
88週-89週	29.0	31.7	17.0	62.9
89週-90週	26.2	20.1	13.8	41.5
90週-91週	24.8	23.5	12.4	48.8
91週-92週	23.8	24.2	12.1	48.5
92週-93週	14.6	53.4	11.5	64.6
93週-94週	13.6	68.8	12.9	71.8
94週-95週	21.3	25.4	11.0	47.5
95週-96週	22.1	21.1	11.0	41.1
96週-97週	23.9	20.0	11.5	41.8
97週-98週	23.8	17.7	11.8	36.3
98週-99週	23.3	19.5	11.5	39.5
99週-100週	22.9	18.2	11.8	35.3
100週-101週	21.8	29.5	13.0	49.9
101週-102週	27.3	20.7	14.6	43.1
102週-103週	26.7	23.9	14.9	47.4
103週-104週	26.3	19.5	14.3	39.3
104週-105週	28.6	26.1	17.1	50.5
105週-106週	27.7	18.7	16.1	36.6
106週-107週	30.3	29.3	18.8	56.2
107週-108週	27.0	30.4	15.3	59.8
108週-109週	29.3	29.9	17.9	57.1
109週-110週	29.5	33.3	20.4	55.4
110週-111週	35.4	20.7	24.0	38.5
111週-112週	34.9	18.1	23.5	33.6
112週-113週	36.9	19.1	25.3	35.6
113週-114週	37.6	20.9	25.6	39.5
114週-115週	39.2	21.6	27.7	39.7
115週-116週	37.3	23.8	-	-
116週-117週	40.2	27.0	-	-
117週-118週	38.3	31.8	-	-
118週-119週	39.3	30.2	-	-
119週-120週	38.5	30.0	-	-
120週-121週	39.8	26.7	-	-
121週-122週	41.8	30.3	-	-
122週-123週	43.6	28.1	-	-
123週-124週	42.3	42.1	-	-
124週-125週	43.3	33.8	-	-
125週-126週	42.5	36.6	-	-
126週-127週	29.7	60.2	-	-
127週-128週	27.0	63.2	-	-
128週-129週	32.8	60.5	-	-
129週-130週	39.7	42.9	-	-
130週-131週	38.0	35.3	-	-
131週-132週	38.4	27.4	-	-
132週-133週	35.8	22.6	-	-

(2) 照射試験における温度計測結果

照射試験を開始した 2012 年度からの照射室内外における温度計測結果を図 3. 40 に、試験体温度計測結果を図 3. 41 に示す。なお、表 3. 9 に示す停電期間はデータが採取されていない。

照射室内外における温度について、照射室は常時機械空調により換気が行われており、温度は室内外で同様な推移となった。ただし、冬季の 250～350 日目付近および 600～700 日目付近において照射室内外で温度差が生じている。これは、照射室内の温度計と比べて、照射室外温度計の設置位置が昼間は空調（暖房）による影響、夜間は外気による影響を受けやすい位置であったことによるものと推察され、照射室内外の温度計の値がともに異常値ではないと考えられる。これは室外温度計の最大温度が概ね 20℃程度で一定となっていることから確認できる。

試験体温度に関しては、いずれも照射室内の温度に対応した推移となっており、照射板までの距離が小さい順、つまりガンマ線の線量率が大きい順に温度が高くなった。照射板からの距離が遠い 3 列目および 4 列目については、照射室内と同程度の温度となった。なお、照射板からの距離が同一である時の骨材が異なるコンクリート試験体間での温度差は認められなかった。

試験期間中の照射停止により、各々停止時間に応じた温度低下が確認された。また、2013 年 8 月 9 日（143 日目）および 2014 年 1 月 22 日（309 日目）などに行った線量率調整のための試験体位置の変更および 2014 年 1 月 10 日（297 日目）の線源交換による線量率の変動により、試験体温度が変化している。

なお、熱電対を取り付けた試験体のうち 3、4 列目の試験体は 2015 年 6 月 1 日（804 日目）、2 列目は 2015 年 9 月 10 日（904 日目）、1 列目は 2015 年 10 月 2 日（927 日目）に照射を完了したため、温度計測も終了している。

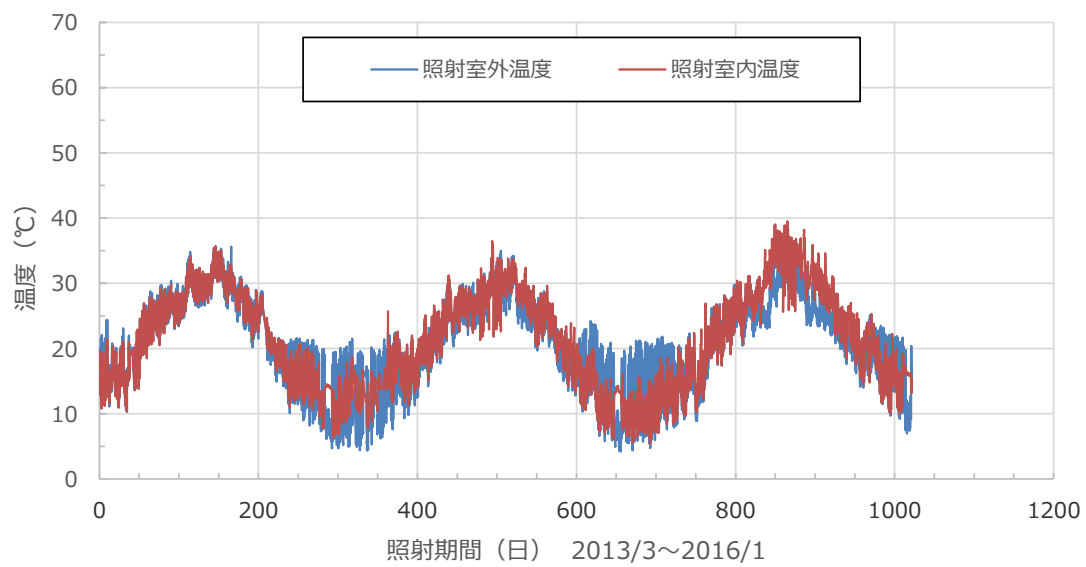


図 3. 40 照射室内外における温度計測結果

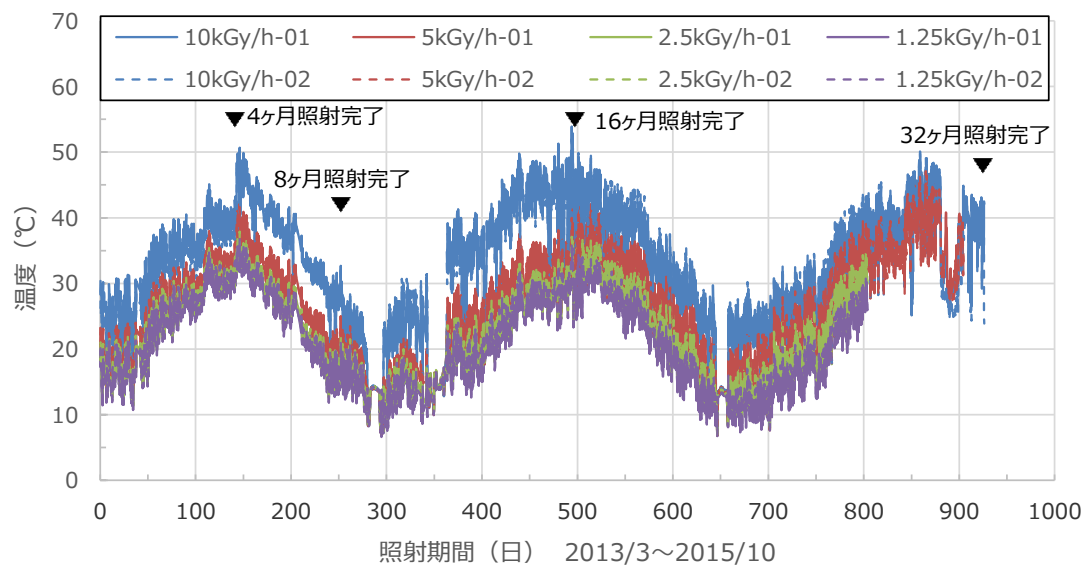


図 3. 41 試験体温度計測結果

実線：コンクリート試験体 1(砂岩)、点線：コンクリート試験体 2(凝灰岩)

(3) 照射試験における湿度計測結果

照射試験を開始した 2012 年度からの照射室内外における湿度計測結果を図 3.42 に示す。温度と同様に停電期間はデータが採取されていない。

なお、照射室内の湿度センサーがガンマ線による影響を受け、照射開始直後から異常値を示しており、2013 年 8 月 26 日（160 日目）以降、計測値が 0 のままとなり故障を確認したため、2014 年 1 月 22 日（309 日目）に湿度センサーを撤去した。

照射室内の乾湿計換算湿度は、照射室の空調換気により照射室外の湿度センサーとほぼ同等の値で推移しており、照射室内の湿度が概ね適切に計測されていると判断できる。

なお、比較的長期にわたって機械空調が停止した時期（線源交換時期：280～297 日目、空調設備交換時期：332～363 日目付近、880～899 日、年末年始停止時期：645～658 日、1010～1021 日）があり、その時期については照射室内外の湿度に乖離が見られる。

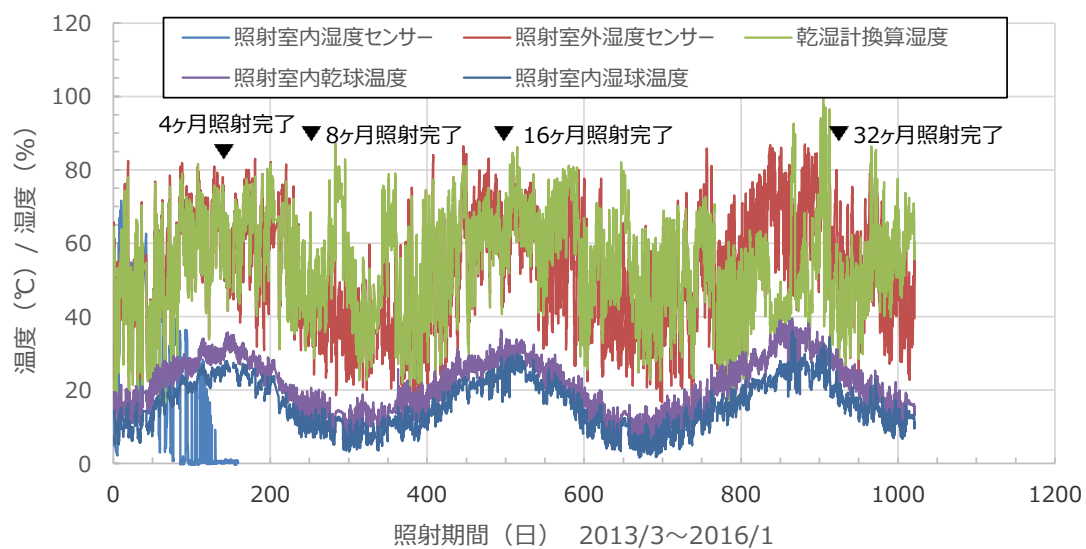


図 3.42 照射室内外における湿度計測結果

(4) 照射後物性試験

1) 質量・寸法計測結果

質量および寸法の計測状況を図 3. 43 および図 3. 44 に、質量・寸法計測結果一覧を表 3. 12 および表 3. 13 に示す。また、照射および加熱試験の影響を見るために試験前後での変化率を試験環境ごとに比較したものを図 3. 45～図 3. 47 に、試験環境ごとの変化率の推移を図 3. 48～図 3. 50 に示す。

なお、ここで示す変化率は、照射および加熱試験後の値には圧縮強度試験前時点での質量および寸法を用いるが、試験前の値については全ての試験体について計測を行っていないため、ガンマ線照射用と同様の条件で作成した中性子照射用コンクリート試験体（B：60 体、C：60 体）の成形時の平均値によるものとする。

質量については、ガンマ線発熱および加熱を受けた試験体については、乾燥が進むことにより質量減少が確認された。また、これは乾燥条件がより強い照射試験 1 列目相当の熱を受けたものほど大きく減少する傾向がみられる。

寸法（直径、高さ）についても、乾燥により概ね縮小される傾向にあるが、変化率としては質量ほど大きな変化は生じなかった。

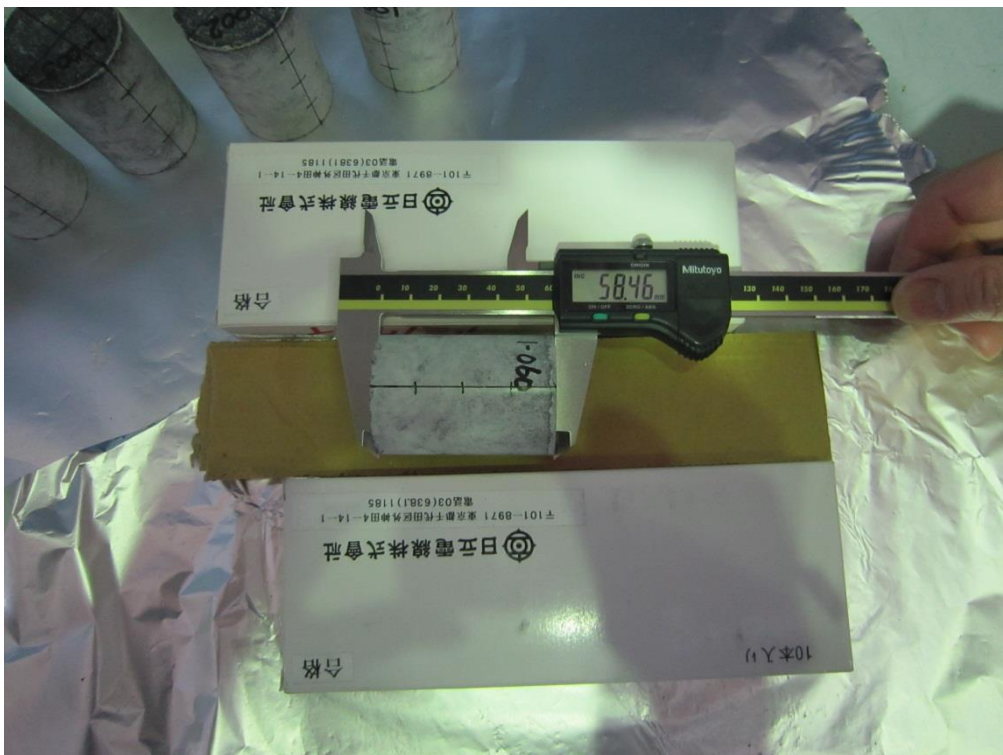
なお、骨材間における変化率に顕著な差はなかった。



図 3. 43 質量測定状況



(a) 直径



(b) 高さ

図 3.44 寸法測定状況

表 3.12 (1) 質量・寸法計測結果一覧 コンクリート試験体 1(砂岩)

コンクリート試験体1(砂岩)				照射・加熱試験前後						強度試験前		
試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	直径(mm)		高さ(mm)		質量(g)		直径 (mm)	高さ (mm)	質量 (g)
				試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後			
				平均	平均	平均	平均					
1-001	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 ⁴	40.23	40.22	59.52	59.47	181.72	177.87	40.20	59.50	177.90
1-002				40.31	40.32	59.53	59.51	183.14	179.38	40.30	59.40	179.50
1-003				40.34	40.33	59.96	59.92	184.16	180.68	40.30	59.90	180.70
1-004				40.30	40.24	59.82	59.79	181.54	177.64	40.20	59.70	177.80
1-005				40.24	40.20	59.94	59.90	183.78	180.50	40.20	59.80	180.60
1-006				40.32	40.34	59.28	59.22	182.26	178.88	-	-	-
1-007		照射開始 8ヶ月後	5.0×10 ⁴	40.31	40.28	59.47	59.49	184.84	181.43	40.30	59.50	181.40
1-008				40.34	40.33	58.83	58.87	180.11	176.24	40.30	58.80	176.30
1-009				40.34	40.33	59.06	59.14	182.66	179.25	40.30	59.10	179.30
1-010				40.27	40.24	59.27	59.46	181.06	177.23	40.20	59.30	177.20
1-011				40.38	40.34	60.05	59.99	183.95	180.03	40.30	59.90	180.00
1-012				40.28	40.25	59.73	59.66	182.59	178.71	-	-	-
1-013			2.5×10 ⁴	40.35	40.30	59.44	59.40	181.88	178.59	40.30	59.40	178.60
1-014				40.39	40.40	59.92	59.84	184.51	181.17	40.30	59.90	181.20
1-015				40.46	40.35	59.47	59.38	182.02	178.30	40.30	59.40	178.30
1-016				40.30	40.29	59.65	59.65	182.78	179.34	40.20	59.60	179.30
1-017				40.35	40.34	59.20	59.31	181.82	178.38	40.30	59.20	178.40
1-018				40.35	40.35	59.79	59.73	184.01	180.71	-	-	-
1-019		照射開始 16ヶ月後	1.0×10 ⁵	40.33	40.29	59.90	59.82	184.49	180.90	40.24	59.76	180.95
1-020				40.29	40.26	59.86	59.81	182.23	178.37	40.21	59.68	178.42
1-021				40.32	40.22	59.44	59.40	181.36	177.40	40.23	59.31	177.42
1-022				40.23	40.22	59.32	59.29	181.44	177.77	40.19	59.19	177.79
1-023				40.31	40.26	59.69	59.61	183.79	180.24	40.20	59.54	180.27
1-024				40.32	40.28	59.92	59.87	184.11	180.29	-	-	-
1-025			5.0×10 ⁴	40.37	40.34	59.94	59.85	183.60	180.51	40.29	59.73	180.44
1-026				40.29	40.26	59.90	59.79	182.50	179.16	40.18	59.70	179.12
1-027				40.24	40.25	59.77	59.68	182.46	179.05	40.14	59.68	179.00
1-028				40.33	40.33	59.87	59.82	183.58	180.41	40.23	59.67	180.36
1-029				40.34	40.37	59.32	59.28	181.26	177.95	40.24	59.16	177.91
1-030				40.32	40.42	60.01	59.97	183.76	180.71	-	-	-
1-031			2.5×10 ⁴	40.29	40.33	59.73	59.69	182.82	179.98	40.16	59.59	179.91
1-032				40.32	40.36	59.75	59.70	183.11	180.14	40.18	59.58	180.04
1-033				40.35	40.45	59.77	59.73	182.81	180.01	40.23	59.61	179.96
1-034				40.34	40.41	59.21	59.34	182.05	179.49	40.22	59.16	179.40
1-035				40.37	40.48	59.81	59.78	184.94	182.14	40.26	59.66	182.04
1-036				40.31	40.36	59.51	59.45	181.70	179.08	-	-	-
1-037		照射開始 32ヶ月後	2.0×10 ⁵	40.33	40.31	59.70	59.67	182.95	179.79	40.23	59.59	179.79
1-038				40.38	40.33	59.91	59.88	184.14	180.94	40.27	59.78	180.96
1-039				40.33	40.31	58.71	58.89	178.93	175.75	40.25	58.57	175.74
1-040				40.38	40.34	59.81	59.86	184.07	180.85	40.25	59.72	180.85
1-041				40.40	40.41	59.65	59.72	183.26	179.91	40.29	59.52	179.91
1-042				40.29	40.22	59.65	59.57	183.40	180.40	-	-	-
1-043			1.0×10 ⁵	40.25	40.27	59.91	59.92	182.66	180.10	40.18	59.82	180.10
1-044				40.30	40.40	59.85	59.80	183.65	181.25	40.23	59.76	181.24
1-045				40.36	40.40	59.82	59.91	183.19	180.69	40.27	59.74	180.67
1-046				40.29	40.36	59.90	59.78	183.06	180.53	40.19	59.76	180.53
1-047				40.40	40.39	59.58	59.47	182.25	179.31	40.28	59.46	179.30
1-048				40.31	40.31	60.20	60.10	183.47	181.87	-	-	-
1-049			5.0×10 ⁴	40.30	40.29	59.04	58.98	181.15	178.65	40.31	58.95	178.63
1-050				40.32	40.25	59.15	59.15	180.99	177.92	40.29	59.10	177.91
1-051				40.34	40.24	59.89	59.82	183.06	180.12	40.28	59.77	180.10
1-052				40.35	40.29	60.04	60.00	183.79	180.75	40.32	59.92	180.74
1-053				40.36	40.29	59.46	59.38	182.12	178.92	40.32	59.36	178.93
1-054				40.43	40.38	59.79	59.68	183.85	180.92	-	-	-
1-055			2.5×10 ⁴	40.26	40.23	59.33	59.30	180.38	177.44	40.27	59.25	177.42
1-056				40.29	40.24	60.01	59.96	183.79	181.38	40.29	59.89	181.36
1-057				40.27	40.23	59.89	59.81	183.73	181.04	40.28	59.77	181.02
1-058				40.39	40.35	59.49	59.47	182.88	180.40	40.39	59.50	180.37
1-059				40.29	40.25	59.71	59.69	182.70	179.92	40.25	59.66	179.89
1-060				40.41	40.36	58.57	58.43	180.24	177.53	-	-	-

表 3.12 (2) 質量・寸法計測結果一覧 コンクリート試験体 1(砂岩)

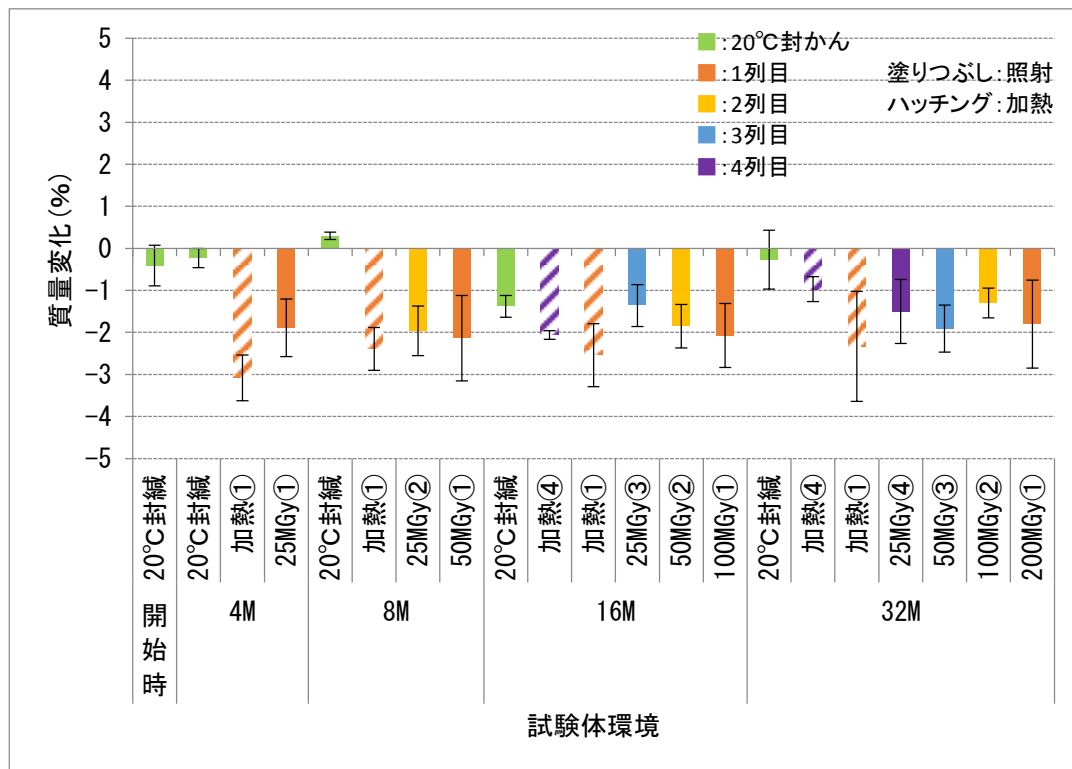
コンクリート試験体1(砂岩)				照射・加熱試験前後						強度試験前												
試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	直径(mm)		高さ(mm)		質量(g)		直径 (mm)	高さ (mm)	質量 (g)										
				試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後													
				平均	平均	平均	平均			平均	平均											
1-061	加熱試験	4ヶ月後	1段目温度 雰囲気湿度					182.95	178.48	40.30	60.00	178.44										
1-062								181.31	176.09	40.20	59.40	176.04										
1-063								181.31	176.91	40.30	59.50	176.87										
1-064		8ヶ月後						183.88	179.56	40.25	59.89	179.55										
1-065								182.20	177.27	40.29	59.22	177.27										
1-066								182.43	178.35	40.27	59.24	178.31										
1-067		16ヶ月後						183.23	178.63	40.26	59.97	178.58										
1-068								183.84	179.43	40.27	59.98	179.48										
1-069								180.95	176.20	40.29	59.54	176.24										
1-070		32ヶ月後						184.10	180.17	40.30	60.10	180.65										
1-071								183.16	179.22	40.21	59.87	179.68										
1-072								178.54	174.67	40.21	58.54	175.16										
1-073		16ヶ月後	4段目温度 雰囲気湿度					181.23	178.56	40.25	59.11	178.92										
1-074								180.45	178.85	40.27	59.03	179.23										
1-075								181.34	178.44	40.16	59.32	178.79										
1-076								32ヶ月後						183.84	181.34	40.27	59.74	181.50				
1-077														182.77	180.01	40.22	59.53	180.24				
1-078														183.73	180.89	40.28	59.76	181.21				
1-127	20℃封緘 養生	材齢28日	-							40.30	60.00	183.90										
1-128										40.30	60.00	184.20										
1-129										40.20	60.00	184.20										
1-130		照射試験 開始時	-							40.30	59.80	182.90										
1-131										40.20	59.70	180.80										
1-132										40.30	59.70	182.30										
1-133		4ヶ月後	-							40.30	59.30	181.80										
1-134										40.30	59.60	182.40										
1-135										40.30	59.80	182.80										
1-136		8ヶ月後	-							40.20	59.70	183.10										
1-137										40.30	59.70	183.30										
1-138										40.30	59.70	183.50										
1-139		16ヶ月後	-							40.20	59.07	180.26										
1-140										40.30	58.76	179.64										
1-141										40.30	59.28	180.79										
1-142		32ヶ月後	-							40.24	59.52	184.07										
1-143										40.23	59.26	181.39										
1-144										40.21	59.14	181.31										
1-145	予備																					
1-146	追加乾燥	1% 到達時	20℃ 60%					177.79	176.02	40.27	57.66	176.02										
1-147								181.58	179.77	40.17	59.14	179.77										
1-148								179.44	177.66	40.27	58.31	177.66										
1-149		1% 含水均質後						183.10	181.28	40.28	59.33	181.28										
1-150								180.67	178.86	40.26	58.91	178.86										
1-151								183.45	181.59	40.26	59.58	181.59										
1-152		1.5% 到達時						182.40	179.66	40.32	59.57	179.66										
1-153								181.36	178.60	40.32	58.72	178.60										
1-154								181.75	179.04	40.21	59.63	179.04										
1-155		1.5% 含水均質後						179.55	176.86	40.19	58.51	176.86										
1-156								182.36	179.61	40.28	59.19	179.61										
1-157								184.38	181.64	40.19	59.82	181.64										
1-158		1% 到達時	40℃ 60%					182.15	180.27	40.23	59.88	180.27										
1-159								181.22	179.46	40.27	58.75	179.46										
1-160								185.87	184.00	40.23	60.36	184.00										
1-161		1% 含水均質後						176.74	174.86	40.23	57.71	174.86										
1-162								183.89	181.77	40.22	60.31	181.77										
1-163								182.75	180.86	40.26	59.58	180.86										
1-164		1.5% 到達時						200.68	197.66	40.22	65.55	197.66										
1-165								179.86	177.13	40.09	59.28	177.13										
1-166								182.86	179.89	40.27	59.88	179.89										
1-167		1.5% 含水均質後						181.87	179.14	40.44	59.24	179.14										
1-168								181.67	178.94	40.25	59.61	178.94										
1-169								181.50	178.77	40.22	59.79	178.77										

表 3.13 (1) 質量・寸法計測結果一覧 コンクリート試験体 2(凝灰岩)

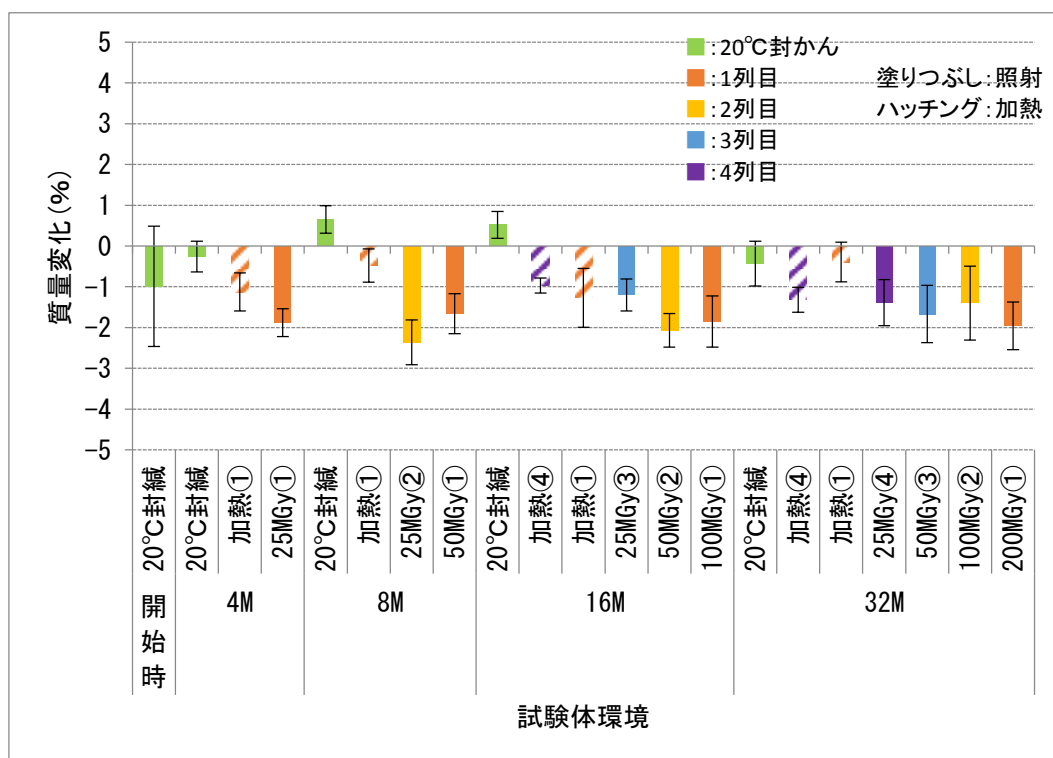
コンクリート試験体2(凝灰岩)				照射・加熱試験前後						強度試験前		
試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	直径(mm)		高さ(mm)		質量(g)		直径 (mm)	高さ (mm)	質量 (g)
				試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後			
				平均	平均	平均	平均					
2-001	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 ⁴	40.23	40.25	59.97	59.88	182.53	179.68	40.20	59.80	179.70
2-002				40.22	40.24	59.77	59.74	182.61	178.97	40.20	59.70	178.90
2-003				40.28	40.29	59.87	59.84	183.43	179.77	40.30	59.70	179.80
2-004				40.31	40.30	59.41	59.38	182.13	178.20	40.30	59.30	178.30
2-005				40.23	40.22	59.87	59.83	183.39	179.89	40.20	59.70	179.90
2-006				40.25	40.24	59.98	59.90	183.47	179.64	—	—	—
2-007		照射開始 8ヶ月後	5.0×10 ⁴	40.22	40.38	59.91	59.82	183.92	180.24	40.20	59.90	180.20
2-008				40.28	40.34	59.25	59.22	182.21	178.43	40.30	59.20	178.40
2-009				40.32	40.41	59.54	59.48	182.76	178.93	40.30	59.50	178.90
2-010				40.25	40.33	60.04	59.97	184.40	180.58	40.30	59.90	180.60
2-011				40.27	40.38	59.88	59.81	184.25	180.49	40.20	59.90	180.50
2-012				40.28	40.27	59.64	59.65	182.60	178.52	—	—	—
2-013			2.5×10 ⁴	40.32	40.38	59.07	59.04	182.77	179.77	40.30	59.10	179.80
2-014				40.34	40.46	59.05	59.06	180.36	176.77	40.30	59.00	176.80
2-015				40.33	40.42	59.68	59.68	182.67	179.07	40.30	59.60	179.10
2-016				40.28	40.33	59.32	59.35	181.72	178.25	40.20	59.30	178.20
2-017				40.27	40.35	59.46	59.36	181.74	178.31	40.30	59.40	178.30
2-018				40.25	40.40	59.36	59.34	183.06	179.80	—	—	—
2-019		照射開始 16ヶ月後	1.0×10 ⁵	40.28	40.29	59.74	59.75	184.68	181.07	40.25	59.65	181.19
2-020				40.29	40.38	59.51	59.40	182.67	178.85	40.23	59.38	178.92
2-021				40.28	40.34	59.39	59.45	181.44	177.81	40.28	59.26	177.84
2-022				40.26	40.35	59.36	59.45	182.47	178.76	40.20	59.22	178.86
2-023				40.24	40.38	59.50	59.49	183.59	179.94	40.20	59.36	180.06
2-024				40.28	40.44	59.84	59.81	183.32	179.28	—	—	—
2-025			5.0×10 ⁴	40.35	40.44	59.58	59.63	181.57	177.87	40.28	59.46	177.86
2-026				40.24	40.40	59.20	59.33	181.75	178.67	40.22	59.13	178.65
2-027				40.29	40.52	59.11	59.19	182.09	178.74	40.21	59.05	178.73
2-028				40.26	40.56	59.74	59.76	182.81	179.73	40.25	59.62	179.69
2-029				40.34	40.52	59.88	59.82	183.65	179.93	40.30	59.74	179.93
2-030				40.24	40.40	59.64	59.71	183.13	179.88	—	—	—
2-031			2.5×10 ⁴	40.32	40.44	59.87	59.81	183.84	180.93	40.25	59.75	180.87
2-032				40.27	40.48	60.09	59.96	183.88	180.96	40.21	59.94	180.90
2-033				40.31	40.47	60.02	59.95	183.63	180.66	40.25	59.92	180.61
2-034				40.29	40.46	59.77	59.74	182.11	179.28	40.21	59.67	179.18
2-035				40.27	40.46	59.37	59.41	183.94	181.31	40.22	59.29	181.24
2-036				40.25	40.38	59.20	59.40	181.91	179.18	—	—	—
2-037		照射開始 32ヶ月後	2.0×10 ⁵	40.29	40.27	59.68	59.71	181.11	177.77	40.33	59.55	177.77
2-038				40.26	40.27	59.42	59.44	181.88	178.26	40.26	59.29	178.26
2-039				40.28	40.24	59.70	59.72	183.35	180.26	40.24	59.58	180.26
2-040				40.33	40.28	59.85	59.81	183.77	180.47	40.25	59.71	180.49
2-041				40.29	40.30	59.87	59.78	182.26	179.05	40.26	59.72	179.07
2-042				40.25	40.27	58.96	59.50	182.61	179.85	—	—	—
2-043			1.0×10 ⁵	40.34	40.33	59.77	59.79	183.67	181.03	40.23	59.70	181.01
2-044				40.29	40.35	59.22	59.21	181.25	178.64	40.23	59.22	178.61
2-045				40.28	40.41	59.95	59.88	184.78	182.49	40.23	59.78	182.50
2-046				40.32	40.40	59.93	59.89	183.80	180.86	40.26	59.79	180.84
2-047				40.34	40.41	59.63	59.61	180.84	178.00	40.26	59.66	177.99
2-048				40.29	40.35	59.65	59.56	181.92	179.27	—	—	—
2-049			5.0×10 ⁴	40.27	40.26	59.47	59.40	182.92	180.25	40.30	59.33	180.23
2-050				40.28	40.28	59.64	59.73	182.77	179.91	40.34	59.51	179.90
2-051				40.29	40.26	59.64	59.58	181.34	178.22	40.32	59.53	178.21
2-052				40.31	40.31	59.96	59.95	184.57	181.73	40.34	59.92	181.72
2-053				40.34	40.32	59.73	59.87	181.41	178.43	40.30	59.62	178.42
2-054				40.29	40.26	59.56	59.65	181.71	178.84	—	—	—
2-055			2.5×10 ⁴	40.28	40.27	59.66	59.62	182.47	179.90	40.27	59.59	179.90
2-056				40.22	40.23	59.72	59.74	182.32	179.88	40.25	59.68	179.86
2-057				40.40	40.36	59.82	59.70	183.76	181.03	40.33	59.60	181.02
2-058				40.39	40.35	59.91	59.85	184.14	181.62	40.32	59.77	181.60
2-059				40.36	40.32	59.32	59.33	181.44	178.64	40.27	59.23	178.62
2-060				40.29	40.28	59.74	59.68	183.66	181.15	—	—	—

表 3.13 (2) 質量・寸法計測結果一覧 コンクリート試験体2(凝灰岩)

コンクリート試験体2(凝灰岩)				照射・加熱試験前後						強度試験前				
試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	直径(mm)		高さ(mm)		質量(g)		直径 (mm)	高さ (mm)	質量 (g)		
				試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後					
				平均	平均	平均	平均			平均	平均			
2-061	加熱試験	4ヶ月後	1段目温度 雰囲気湿度							184.42	180.53	40.20	59.80	180.52
2-062										183.85	179.76	40.30	59.60	179.74
2-063										185.85	181.83	40.30	60.50	181.81
2-064										186.47	182.66	40.26	60.00	182.65
2-065		8ヶ月後								184.95	180.86	40.27	59.99	180.86
2-066										185.76	182.07	40.20	59.83	182.09
2-067										185.55	181.28	40.19	60.34	181.26
2-068										182.90	178.58	40.14	59.78	178.56
2-069		16ヶ月後								185.42	181.45	40.28	60.07	181.45
2-070										184.07	180.50	40.26	59.59	181.00
2-071										184.84	181.60	40.25	59.72	181.95
2-072										185.97	182.56	40.21	60.37	183.17
2-073		16ヶ月後								183.43	180.87	40.22	59.69	181.17
2-074										183.52	180.92	40.23	59.91	181.25
2-075										182.72	180.19	40.21	59.52	180.51
2-076										182.49	179.88	40.24	59.43	180.04
2-077		32ヶ月後								182.11	179.65	40.23	59.49	179.84
2-078										183.32	180.84	40.20	59.74	181.11
2-127	20℃封緘 養生	材齢28日	-							40.20	60.00	184.80		
2-128										40.20	59.00	183.70		
2-129										40.00	59.00	183.50		
2-130										40.40	58.83	181.20		
2-131		照射試験 開始時								40.30	58.00	177.50		
2-132										40.30	59.83	184.10		
2-133										40.30	59.70	182.60		
2-134										40.20	59.13	181.30		
2-135		4ヶ月後								40.30	59.65	182.90		
2-136										40.20	59.70	183.60		
2-137										40.30	59.73	183.40		
2-138										40.30	59.98	184.80		
2-139		8ヶ月後								40.30	59.69	182.93		
2-140										40.30	59.78	183.74		
2-141										40.20	59.70	184.40		
2-142										40.23	59.47	181.37		
2-143		32ヶ月後								40.30	60.00	183.37		
2-144										40.28	59.23	181.12		
2-145	予備													
2-146	追加乾燥	1% 到達時	20℃ 60%							185.59	183.83	40.31	60.12	183.83
2-147										179.60	177.80	40.27	58.09	177.80
2-148										180.81	179.03	40.31	58.94	179.03
2-149										182.50	180.75	40.23	59.23	180.75
2-150		1% 含水均質後								177.41	175.67	40.17	57.99	175.67
2-151										180.84	179.08	40.18	58.66	179.08
2-152										182.80	180.17	40.25	59.35	180.17
2-153										179.50	176.68	40.27	58.66	176.68
2-154		1.5% 到達時								181.72	179.01	40.20	59.20	179.01
2-155										186.09	183.49	40.14	60.41	183.49
2-156										182.81	180.16	40.12	59.55	180.16
2-157										182.10	179.27	40.14	59.08	179.27
2-158		1.5% 含水均質後								182.50	180.66	40.25	59.63	180.66
2-159										181.56	179.79	40.18	59.42	179.79
2-160										179.80	177.99	40.24	58.70	177.99
2-161										186.71	184.76	40.19	60.75	184.76
2-162		1% 含水均質後	179.58							177.73	40.28	58.47	177.73	
2-163			183.00							181.09	40.24	59.38	181.09	
2-164			181.82							179.07	40.20	58.96	179.07	
2-165			185.69							182.90	40.30	60.39	182.90	
2-166		1.5% 到達時	179.63							176.90	40.23	58.51	176.90	
2-167			182.07							179.24	40.19	59.62	179.24	
2-168			180.50							177.72	40.25	58.91	177.72	
2-169			181.25							178.53	40.19	59.08	178.53	

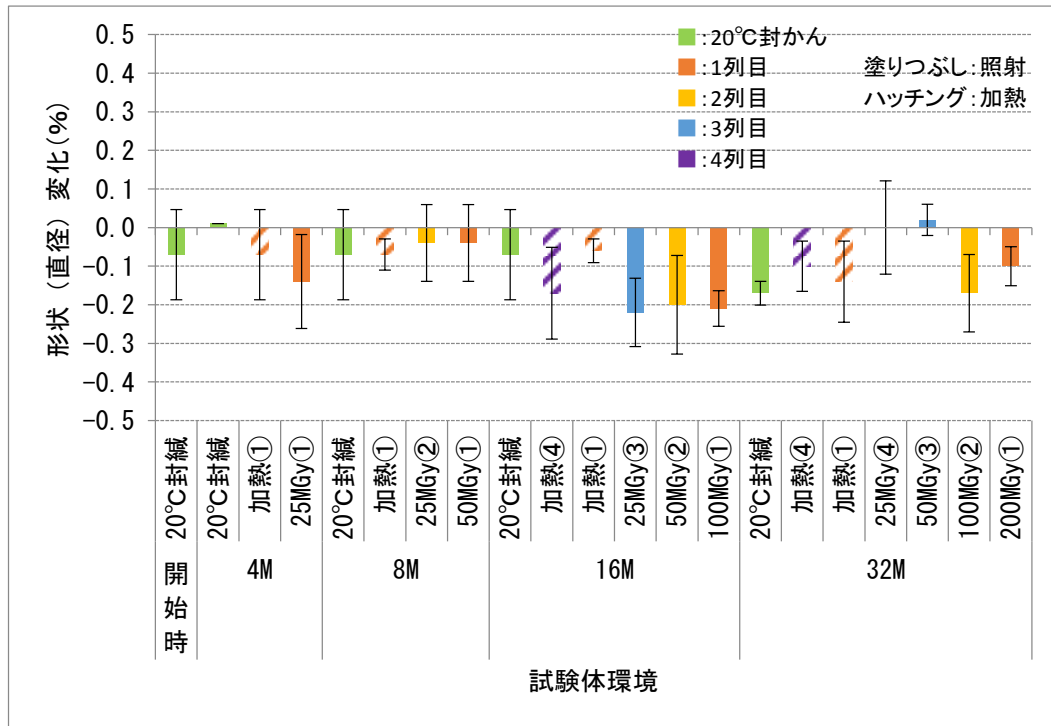


(a) コンクリート試験体 1(砂岩)

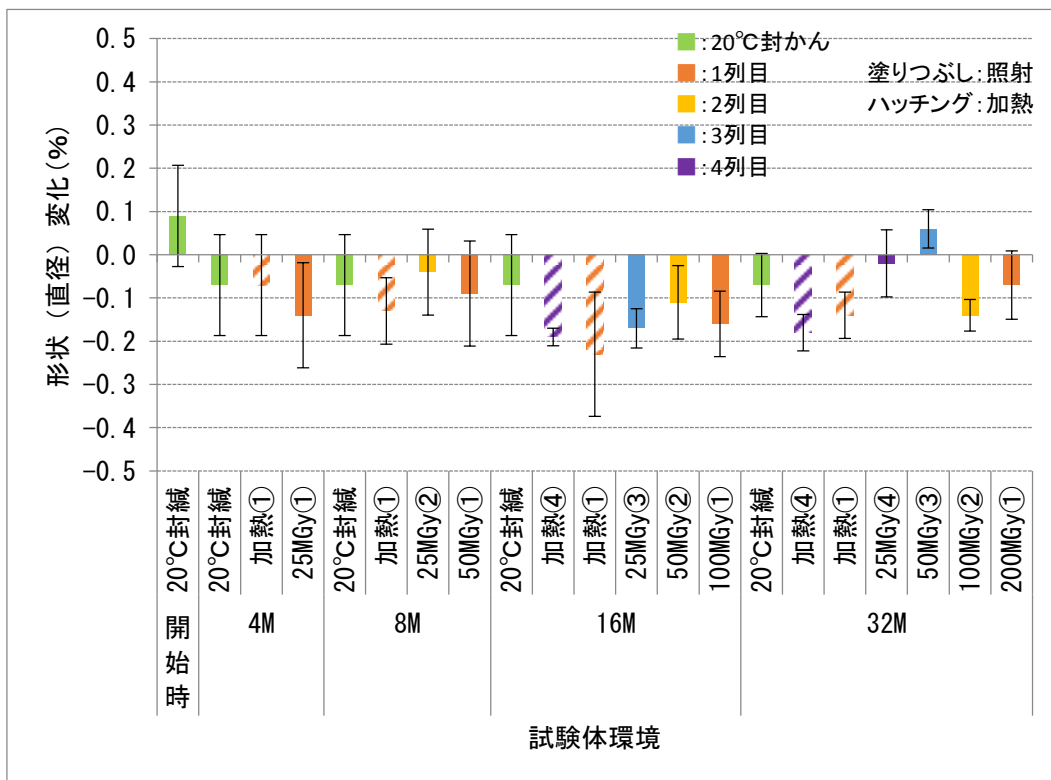


(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.45 質量変化の比較

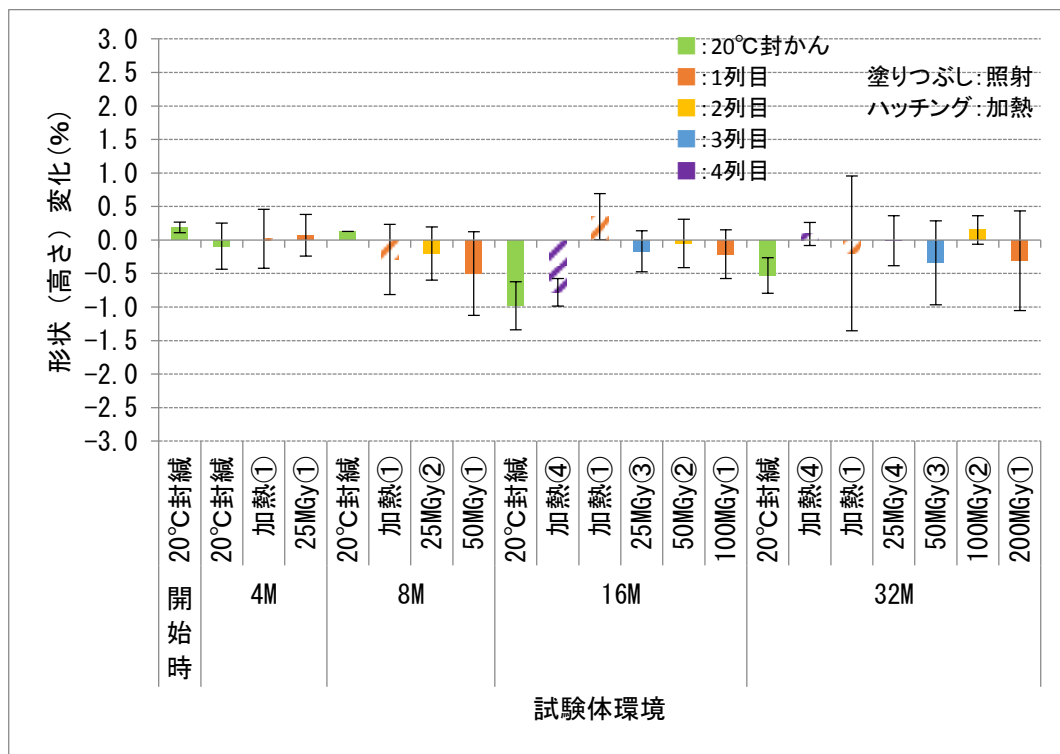


(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)

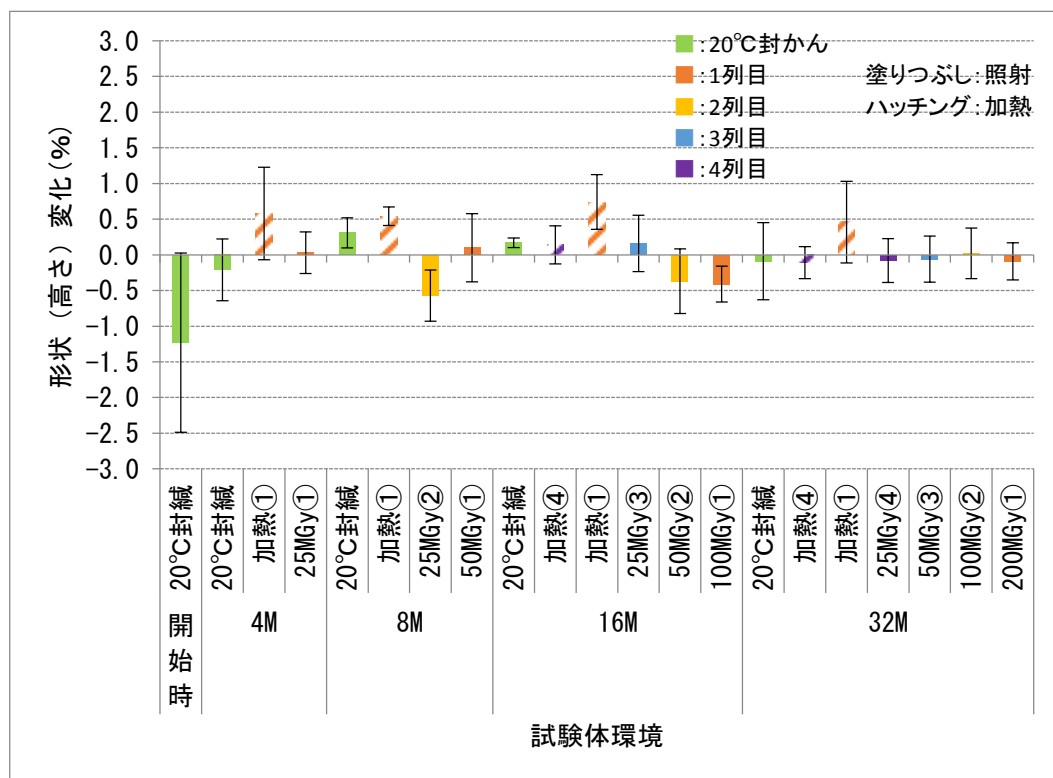


(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3.46 形状 (直径) 変化の比較

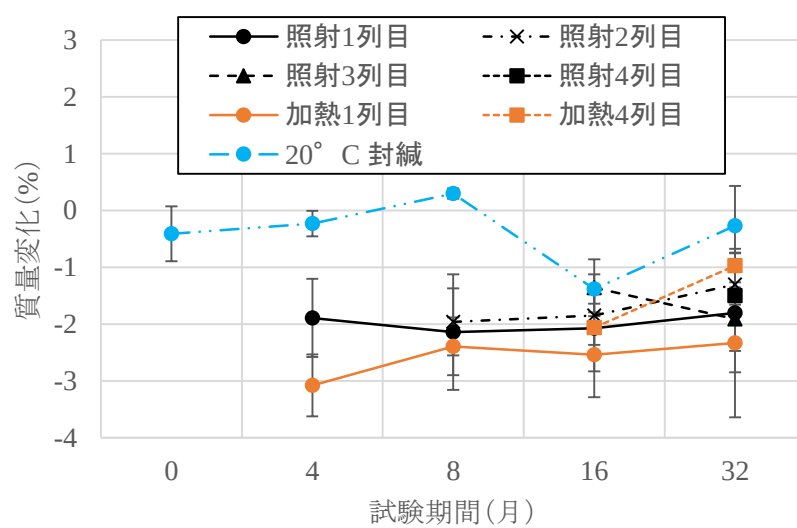


(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)

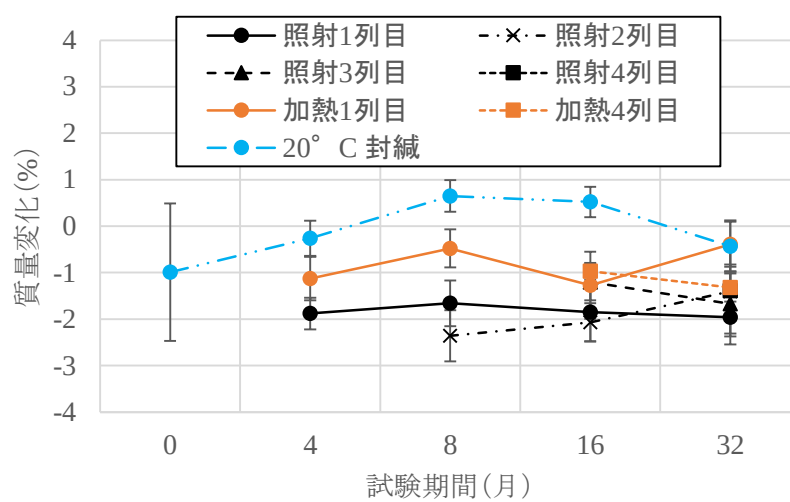


(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3.47 形状 (高さ) 変化の比較

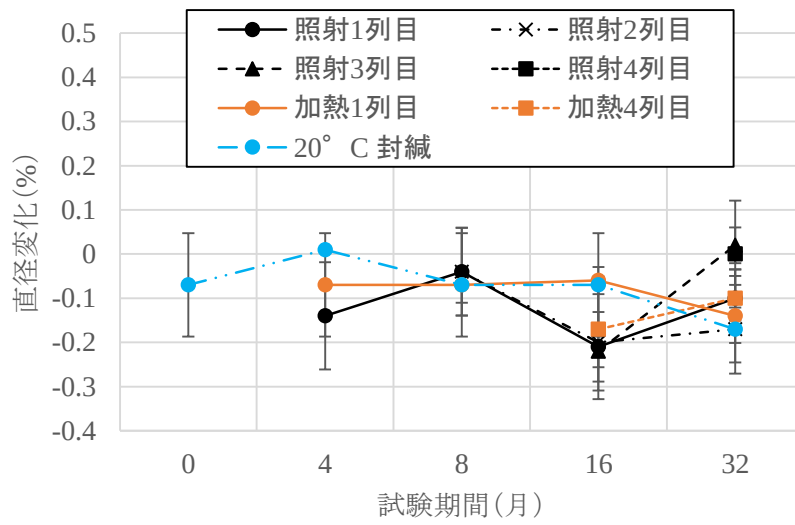


(a) コンクリート試験体 1(砂岩)

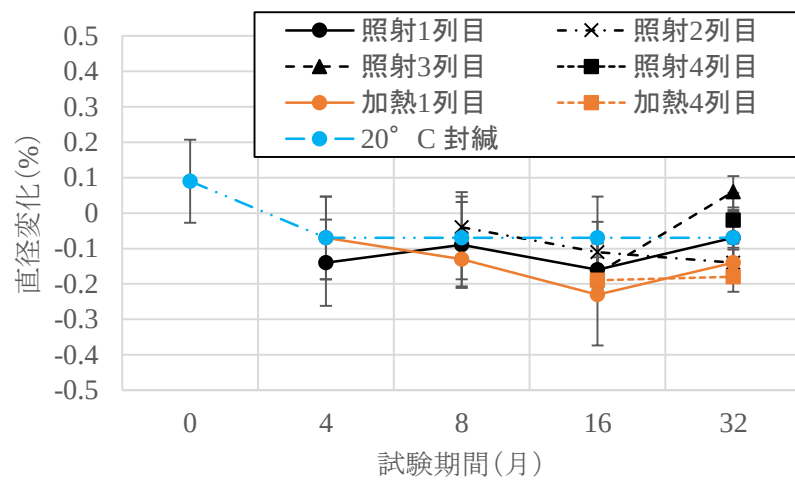


(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.48 質量変化の推移

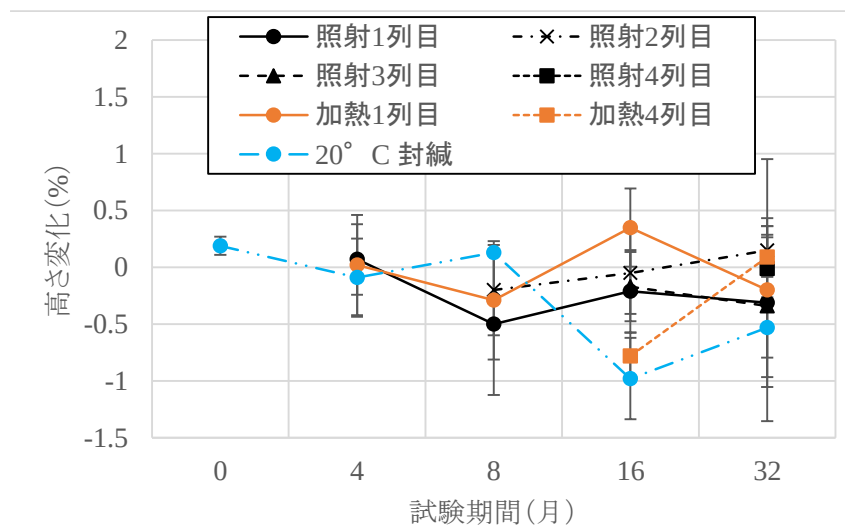


(a) コンクリート試験体 1(砂岩)

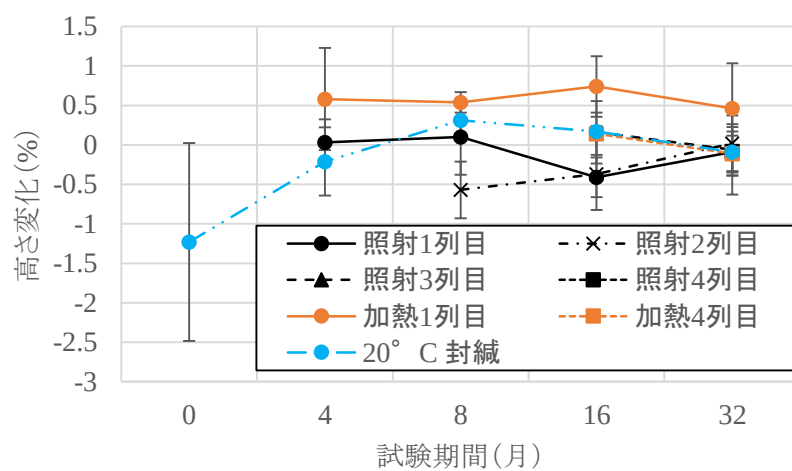


(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.49 直径変化の推移



(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.50 高さ量変化の推移

2) 物性試験結果

物性試験（圧縮強度、静弾性係数、自由水率、結合水率）について、試験結果の一覧を表 3.14～表 3.15 および図 3.51～図 3.54 に示す。また、試験環境ごとの物性の推移を図 3.55～図 3.58 に示す。

封緘試験体は、32 か月の試験期間において凝灰岩を用いたコンクリート試験体はほとんど同一の値を示したが、砂岩を用いたコンクリート試験体は若干の強度増大を示した。ガンマ線照射サンプルについては、照射期間が長いほど強度が増大する傾向が凝灰岩、砂岩のそれぞれを用いたコンクリート試験体の両方で確認された。加熱試験の場合についても同様に加熱期間が長いほど強度が増大する傾向が確認された。

ヤング率についてはガンマ線照射の場合には変化がなく、また、加熱試験では凝灰岩を用いたコンクリート試験体の場合に緩やかに増加が、砂岩を用いたコンクリート試験体の場合にほとんど変化が無いことが確認された。

試験体の含水率は材齢 4 か月の間に 4%程度から 1%に乾燥し、その後は緩やかに減少する傾向が確認された。

結合水率については、より熱影響度や照射の有無、照射量および線量率による明らかな差は確認できなかった。なお、ガンマ線照射および加熱を 16 ヶ月以上受けた試験体で結合水率が比較的大きくなっているが、これは中性化によるものと考えられた。

照射量による圧縮強度への影響をより明確に評価するために、封緘の試験体に対する照射後あるいは加熱後の試験体の圧縮強度比と照射量の関係を図 3.59 に示す。照射あるいは加熱により封緘状態の試験体よりも強度が若干増加する傾向にある。また、横軸を質量減少量とした、乾燥程度と圧縮強度比の関係を図 3.60 に示す。このグラフについては、本研究の一環として別途実施している熱・乾燥試験の結果についても参考として示すとともに、既往の同様の研究における質量減少量－圧縮強度比のグラフを並べて示す。このグラフから、乾燥の程度による強度増減の傾向が既往の研究とも概ね対応していることが分かった。試験ごとの圧縮強度比を比較すると、乾燥試験に対して加熱試験や照射試験は高めとなっているが、これはセメントペーストの中性化によって生じたものと考えられたので、各試験体のコンクリートサンプル全体を粉末にして TG を測定した。測定した水準は、照射試験については 1 列目で照射した 2.5×10^4 kGy（4 ヶ月）、 5.0×10^4 kGy（8 ヶ月）、 1.0×10^5 kGy（16 ヶ月）、 2.0×10^5 kGy（32 ヶ月）の 4 水準、加熱試験については照射試験の 1 列目の温度を模擬して 32 ヶ月の加熱を実施した水準、さらに乾燥試験については 20℃60%RH で質量減少率 1.5%まで乾燥させた 1 水準の計 6 水準である。その結果を図 3.61 に示す。DTG カーブ上で、600℃近傍でのカーボネート量が、照射期間の増大に従って大きくなることを確認した。併せて、420℃近傍の水酸化カルシウムのピークの現象が小さくなることも確認した。このことはコンクリート試験体が中性化していることを意味する。

表 3.14 (1) 物性試験結果一覧 コンクリート試験体 1 (砂岩)

試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)			自由水率 (%)			結合水率 (%)						
					平均	σ		平均	σ		平均	σ		平均	σ				
1-001	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 ⁴	66.7	65.5	1.3	35.2	34.5	2.7	1.5	1.5	0.1	3.8	3.9	0.1				
1-002				65.8			32.8			1.4			3.8						
1-003				63.9			36.8			1.4			3.9						
1-004				67.0			37.6			1.5			3.9						
1-005				64.1			30.3			-			-			-	-		
1-007				79.9			32.6			1.4			3.5						
1-008		照射開始 8ヶ月後	5.0×10 ⁴	72.9	75.2	2.5	36.8	34.2	1.8	1.4	1.4	0.0	3.6	3.5	0.1				
1-009				73.7			31.7			1.3			3.4						
1-010				74.4			35.3			1.3			3.5						
1-011				75.1			34.6			-			-			-	-		
1-013			2.5×10 ⁴	76.3	73.4	3.3	36.3	35.9	1.4	1.6	1.6	0.0	3.4	3.4	0.1				
1-014				77.7			35.5			1.7			3.3						
1-015		73.8		37.1			1.6			3.6									
1-016		70.3		37.3			1.6			3.3									
1-017		69.1	33.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
1-019		照射開始 16ヶ月後	1.0×10 ⁵	73.0	74.4	6.9	37.1	36.5	1.3	0.9	1.0	0.1	3.8	4.1	0.2				
1-020				76.1			38.7			1.0			4.1						
1-021				86.5			35.6			1.1			4.2						
1-022				70.9			35.4			1.1			4.1						
1-023				65.7			35.7			-			-			-	-	-	-
1-025			5.0×10 ⁴	64.8	66.4	2.8	32.8	33.8	2.9	1.3	1.3	0.0	4.3	4.4	0.2				
1-026				67.7			37.3			1.3			4.2						
1-027				61.7			29.4			1.4			4.4						
1-028				68.8			32.8			1.3			4.7						
1-029				68.9			36.9			-			-			-	-	-	-
1-031			2.5×10 ⁴	75.6	71.6	3.7	32.0	34.5	1.8	1.5	1.5	0.1	4.4	4.2	0.2				
1-032				72.2			33.8			1.5			4.0						
1-033				71.0			37.0			1.6			4.1						
1-034				64.8			33.5			1.4			4.4						
1-035			74.3	36.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
1-037		照射開始 32ヶ月後	2.0×10 ⁵	81.8	79.0	4.0	32.3	33.8	3.1	1.0	1.0	0.0	6.0	6.1	0.4				
1-038				71.0			29.2			1.0			6.0						
1-039				81.0			35.2			1.0			6.7						
1-040				81.0			33.7			0.9			5.6						
1-041				80.0			38.4			-			-			-	-	-	-
1-043				80.4			36.6			1.5			4.7						
1-044			1.0×10 ⁵	80.3	74.7	5.4	35.1	33.1	4.5	1.4	1.4	0.1	4.6	4.2	0.5				
1-045				66.3			25.2			1.4			4.0						
1-046				75.0			37.4			1.3			3.5						
1-047				71.4			31			-			-			-	-	-	-
1-049			5.0×10 ⁴	72.3	76.5	3.7	31.0	36.0	2.5	1.2	1.4	0.1	3.9	4.2	0.2				
1-050				81.6			38.3			1.4			4.3						
1-051				80.1			36.6			1.4			4.1						
1-052				74.6			37.1			1.4			4.4						
1-053				73.8			36.8			-			-			-	-	-	-
1-055			2.5×10 ⁴	74.1	75.1	2.3	37.8	36.4	4.0	1.6	1.5	0.0	4.4	4.2	0.1				
1-056				74.0			28.4			1.5			4.2						
1-057				75.3			38.8			1.5			4.1						
1-058				72.6			37.6			1.5			4.2						
1-059				79.4			39.3			-			-			-	-	-	-

表 3.14 (2) 物性試験結果一覧 コンクリート試験体 1 (砂岩)

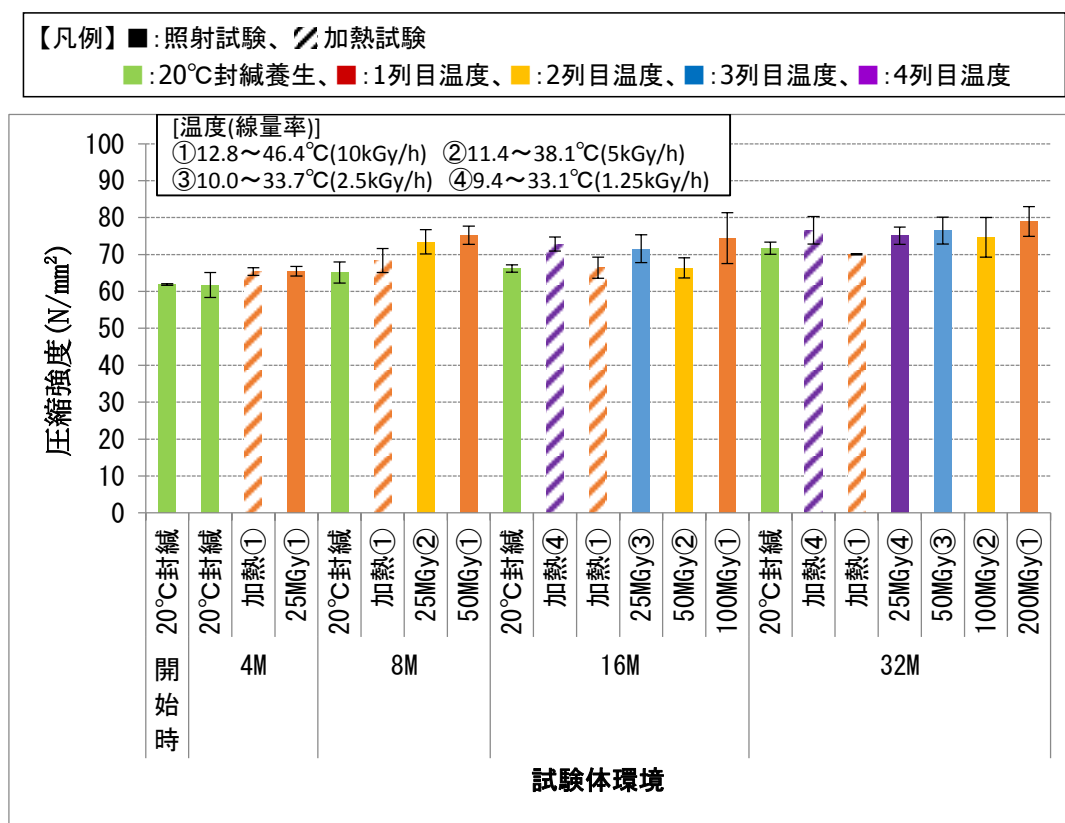
試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)			自由水率 (%)			結合水率 (%)				
					平均	σ		平均	σ		平均	σ		平均	σ		
1-061	加熱試験	4ヶ月後	1段目温度 雰囲気湿度	66.8	65.4	1.0	36.6	32.9	2.6	1.5	1.5	0.0	3.3	3.4	0.1		
1-062				64.5			30.7			1.5			3.4				
1-063				64.8			31.5			-			-			-	-
1-064		8ヶ月後		65.0	68.4	3.3	29.5	30.9	1.1	1.4	1.4	0.0	3.8	3.8	0.0		
1-065				72.8			32.2			1.4			3.7				
1-066				67.3			30.9			-			-			-	-
1-067		16ヶ月後		70.1	66.4	2.9	34.6	32.4	1.8	1.3	1.3	0.0	4.2	4.2	0.0		
1-068				66.1			32.5			1.3			4.2				
1-069				63.1			30.1			-			-			-	-
1-070		32ヶ月後		70.1	70.0	0.2	36.1	34.5	1.4	1.2	1.2	0.0	4.6	4.4	0.3		
1-071				69.8			34.8			1.1			4.1				
1-072				70.2			32.7			-			-			-	-
1-073		16ヶ月後		75.3	72.9	1.9	33.1	32.7	0.8	1.8	1.8	0.0	4.7	4.7	0.1		
1-074				72.7			33.4			1.8			4.6				
1-075				70.6			31.5			-			-			-	-
1-076		32ヶ月後		74.1	76.5	3.7	34.7	34.9	0.9	1.4	1.5	0.1	4.6	4.7	0.1		
1-077				81.8			33.8			1.6			4.8				
1-078				73.7			36.1			-			-			-	-
1-127	20℃封緘 養生	材齢28日	-	46.8	46.1	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
1-128				45.1			-			-			-			-	-
1-129				46.5			-			-			-			-	-
1-130		照射試験 開始時		-	62.0	61.9	0.2	31.9	34.1	2.7	-	-	-	-	-	-	
1-131					61.6			37.9			-			-			
1-132					62.1			32.5			-			-			-
1-133		4ヶ月後		-	66.1	61.8	3.4	37.1	35.2	1.8	4.5	4.3	0.3	3.8	3.6	0.2	
1-134					57.9			35.8			4.0			3.4			
1-135					61.3			32.7			-			-			-
1-136		8ヶ月後		-	64.8	65.1	2.9	47.1	42.6	3.2	4.5	4.5	0.0	3.4	3.4	0.0	
1-137					61.8			40.2			4.5			3.4			
1-138					68.8			40.6			-			-			-
1-139		16ヶ月後		-	65.6	66.2	1.0	28.7	34.3	4.4	4.4	4.4	0.0	3.5	3.5	0.0	
1-140					67.6			35.0			4.4			3.5			
1-141					65.4			39.3			-			-			-
1-142		32ヶ月後		-	73.3	71.7	1.7	40.2	38.1	2.9	3.8	4.0	0.2	3.9	4.1	0.2	
1-143					69.4			33.9			4.2			4.3			
1-144					72.4			40.1			-			-			-
1-145	予備																
1-146	追加乾燥	1% 到達時	20℃ 60%	72.8	75.0	2.5	41.6	37.0	3.4	-	-	-	-	-	-		
1-147				73.6			33.6			-			-				
1-148				78.5			35.8			-			-			-	-
1-149		1% 含水均質後		75.9	2.9	42.3	38.1	4.0	-	-	-	-	-	-	-		
1-150						76.2			39.3			-				-	
1-151						72.2			32.7			-				-	-
1-152		1.5% 到達時		68.3	0.7	32.0	34.7	1.9	-	-	-	-	-	-	-		
1-153						67.5			36.4			-				-	
1-154						68.2			35.6			-				-	-
1-155		1.5% 含水均質後		74.2	4.9	36.6	36.6	1.2	-	-	-	-	-	-	-		
1-156						73.8			38.0			-				-	
1-157						68.4			35.1			-				-	-
1-158		1% 到達時		69.0	3.3	32.2	35.8	2.9	-	-	-	-	-	-	-		
1-159						72.2			39.2			-				-	
1-160						70.2			35.9			-				-	-
1-161		1% 含水均質後		69.2	2.7	35.0	37.7	3.1	-	-	-	-	-	-	-		
1-162						70.6			42.0			-				-	
1-163						71.6			36.1			-				-	-
1-164		1.5% 到達時		68.0	4.2	36.7	36.8	1.0	-	-	-	-	-	-	-		
1-165						73.9			38.1			-				-	
1-166						64.2			35.6			-				-	-
1-167		1.5% 含水均質後		68.1	2.9	37.0	35.7	1.8	-	-	-	-	-	-	-		
1-168						66.4			33.2			-				-	
1-169						72.2			37.0			-				-	-

表 3.15 (1) 物性試験結果一覧 コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

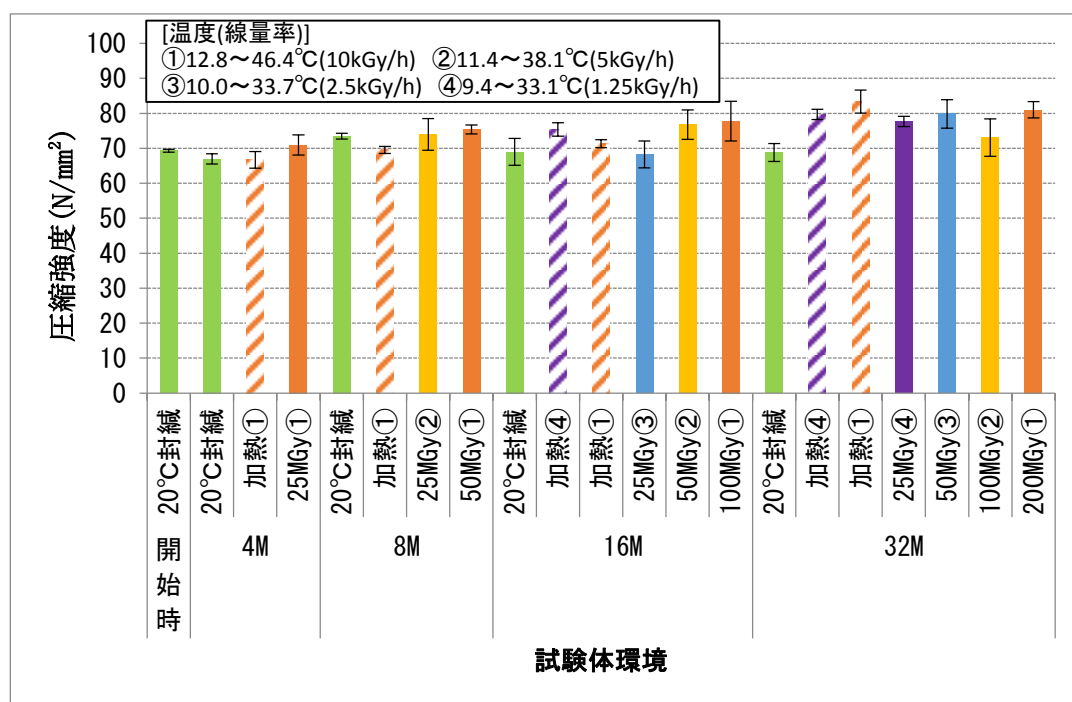
試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy)	温湿度	圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)			自由水率 (%)			結合水率 (%)			
						平均	σ		平均	σ		平均	σ		平均	σ	
2-001	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 ⁴	76.4	70.9	2.9	37.0	36.0	1.8	1.3	1.4	0.1	3.4	3.5	0.1		
2-002				70.0			34.5			1.5			3.5				
2-003				68.7			36.4			1.4			3.5				
2-004				68.5			33.5			1.5			3.6				
2-005				70.9			38.4			-			-			-	-
2-007		照射開始 8ヶ月後	5.0×10 ⁴	77.5	75.4	1.3	33.3	36.5	2.5	1.4	1.4	0.0	3.2	3.2	0.2		
2-008				73.4			34.5			1.3			2.9				
2-009				75.5			37.9			1.3			3.2				
2-010				75.2			36.1			1.4			3.3				
2-011				75.3			40.5			-			-			-	-
2-013			2.5×10 ⁴	69.0	74.0	4.5	35.4	36.5	1.5	1.5	1.6	0.1	3.0	3.1	0.0		
2-014				79.2			34.2			1.7			3.1				
2-015				68.8			38.5			1.6			3.1				
2-016				78.8			36.9			1.5			3.1				
2-017				74.0			37.4			-			-			-	-
2-019				-			-			-			-			-	-
2-020		照射開始 16ヶ月後	1.0×10 ⁵	75.9	77.8	5.7	34.6	36.3	1.9	1.0	1.1	0.1	3.2	3.5	0.2		
2-021				83.4			37.6			1.1			3.8				
2-022				69.9			34.8			1.2			3.5				
2-023				74.5			39.5			1.0			3.6				
2-025				85.1			35.1			-			-			-	-
2-026			5.0×10 ⁴	81.6	76.8	4.2	33.7	35.4	2.9	1.4	1.4	0.0	4.1	4.0	0.3		
2-027				74.5			30.5			1.3			4.3				
2-028				81.1			37.4			1.4			3.6				
2-029				70.4			38.2			1.4			3.9				
2-031				76.2			37.2			-			-			-	-
2-032			2.5×10 ⁴	73.1	68.3	3.9	34.8	35.0	0.8	1.5	1.5	0.0	4.2	3.6	0.4		
2-033				71.2			33.8			1.5			3.7				
2-034				61.9			35.8			1.6			3.6				
2-035				66.8			36.0			1.5			3.0				
2-037				68.3			34.8			-			-			-	-
2-038		照射開始 32ヶ月後	2.0×10 ⁵	80.7	81.0	2.3	31.8	36.2	2.5	1.1	1.1	0.1	6.1	5.9	0.2		
2-039				76.7			37.3			1.1			5.9				
2-040				83.3			35.7			1.0			5.6				
2-041				81.8			39.4			1.0			5.8				
2-043				82.5			36.8			-			-			-	-
2-044			1.0×10 ⁵	72.3	73.0	5.4	35.7	37.3	1.6	1.6	1.4	0.1	4.2	3.7	0.3		
2-045				64.8			36.4			1.5			3.5				
2-046				72.7			40.2			1.2			3.4				
2-047				73.6			37.6			1.4			3.7				
2-049				81.7			36.5			-			-			-	-
2-050			5.0×10 ⁴	75.6	79.8	4.1	40.0	36.6	2.5	1.3	1.4	0.0	4.2	4.4	0.2		
2-051				79.0			36.9			1.3			4.2				
2-052				85.4			34.8			1.4			4.8				
2-053				83.7			38.3			1.4			4.4				
2-055				75.5			33.1			-			-			-	-
2-056			2.5×10 ⁴	77.6	77.7	1.5	38.7	34.9	2.6	1.5	1.5	0.0	4.5	4.6	0.0		
2-057				75.5			33.0			1.5			4.6				
2-058				77.8			33.9			1.6			4.6				
2-059				77.4			31.9			1.5			4.5				
2-059				80.1			37.1			-			-			-	-

表 3.15 (2) 物性試験結果一覧 コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)			自由水率 (%)			結合水率 (%)					
					平均	σ		平均	σ		平均	σ		平均	σ			
2-061	加熱試験	4ヶ月後	1段目温度 雰囲気湿度	63.4	66.7	2.4	29.9	32.3	3.0	1.3	1.4	0.0	3.2	3.3	0.1			
2-062				68.0			36.6			1.4			3.4					
2-063				68.7			30.5			-			-			-	-	
2-064				68.7			33.7			1.3			3.2					
2-065		8ヶ月後		69.0	69.5	1.0	31.8	33.0	0.9	1.4	1.4	0.0	3.4	3.3	0.1			
2-066				70.9			33.6			-			-			-	-	
2-067				71.2			36.2			1.3			4.0					
2-068				70.0			33.3			1.2			3.9					
2-069		16ヶ月後		72.8	71.3	1.1	36.7	35.4	1.5	-	-	-	-			-	-	
2-070				85.6			38.6			1.1			3.9					
2-071				85.7			39.2			1			3.7					
2-072				78.7			39.7			-			-					-
2-073		16ヶ月後	4段目温度 雰囲気湿度	72.7	75.4	1.9	35.6	37.3	1.2	1.7	1.8	0.1	4.2	4.3	0.1			
2-074				77.3			37.9			1.8			4.4					
2-075				76.1			38.3			-			-			-	-	
2-076				77.6			37.5			1.5			4.6					
2-077		32ヶ月後		81.0	79.7	1.5	37.5	37.5	0.0	1.6	1.6	0.1	4.4	4.5	0.1			
2-078				80.4			37.4			-			-			-	-	
2-127	20℃封滅 養生	材齢28日	-	50.4	54.1	3.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
2-128				58.3			-			-			-					
2-129				53.5			-			-			-					
2-130				69.5			34.3			-			-					
2-131		照射試験 開始時	-	68.7	69.3	0.4	36.5	36.2	1.5	-	-	-	-	-	-			
2-132				69.7			37.9			-			-					
2-133		4ヶ月後	-	68.8	67.0	1.5	40.9	39.3	2.0	4.1	4.1	0.0	3.1	3.2	0.1			
2-134				66.9			36.4			4.1			3.2					
2-135				65.2			40.5			-			-			-	-	
2-136		8ヶ月後	-	74.0	73.4	0.8	38.9	38.6	0.6	4.4	4.4	0.0	3.0	3.1	0.1			
2-137				72.3			37.8			4.4			3.1					
2-138				74.0			39.1			-			-			-	-	
2-139				73.8			41.2			4.2			3.0					
2-140		16ヶ月後	-	64.5	69.0	3.8	38.4	39.5	1.2	4.1	4.2	0.1	3.2	3.1	0.1			
2-141				68.6			38.9			-			-			-	-	
2-142		32ヶ月後	-	66.9			37.1			4.7	4.8	0.0	4.5	4.6	0.0			
2-143				72.4			39.8			4.8			4.6					
2-144				67.0			37.0			-			-			-	-	
2-145										-			-			-	-	
2-146	追加乾燥	1% 到達時	20℃ 60%	79.2	76.6	2.7	39.6	37.9	1.3	-	-	-	-	-	-			
2-147				72.8			37.6			-			-					
2-148				77.8			36.4			-			-					
2-149		1% 含水均質後		75.5	72.4	3.1	41.5	40.0	1.9	-	-	-	-	-	-			
2-150				73.4			37.3			-			-					
2-151				68.2			41.1			-			-					
2-152		1.5% 到達時		82.5	78.5	3.1	32.8	36.8	2.8	-	-	-	-	-	-			
2-153				78.1			39.1			-			-					
2-154				75.0			38.5			-			-					
2-155		1.5% 含水均質後		78.3	75.5	2.1	35.4	36.1	0.7	-	-	-	-	-	-			
2-156				75.0			37.0			-			-					
2-157				73.3			35.8			-			-					
2-158		1% 到達時	40℃ 60%	77.6	73.7	2.9	36.7	36.0	0.8	-	-	-	-	-	-			
2-159				70.8			36.4			-			-					
2-160				72.7			34.8			-			-					
2-161		1% 含水均質後		72.7	74.6	2.6	45.0	41.5	2.5	-	-	-	-	-	-			
2-162				78.3			39.9			-			-					
2-163				72.7			39.6			-			-					
2-164		1.5% 到達時		72.6	72.2	2.3	37.5	40.4	2.7	-	-	-	-	-	-			
2-165				74.7			39.6			-			-					
2-166				69.2			44.0			-			-					
2-167		1.5% 含水均質後		68.1	69.8	2.6	41.9	37.5	3.2	-	-	-	-	-	-			
2-168				73.5			35.8			-			-					
2-169				67.8			34.7			-			-					

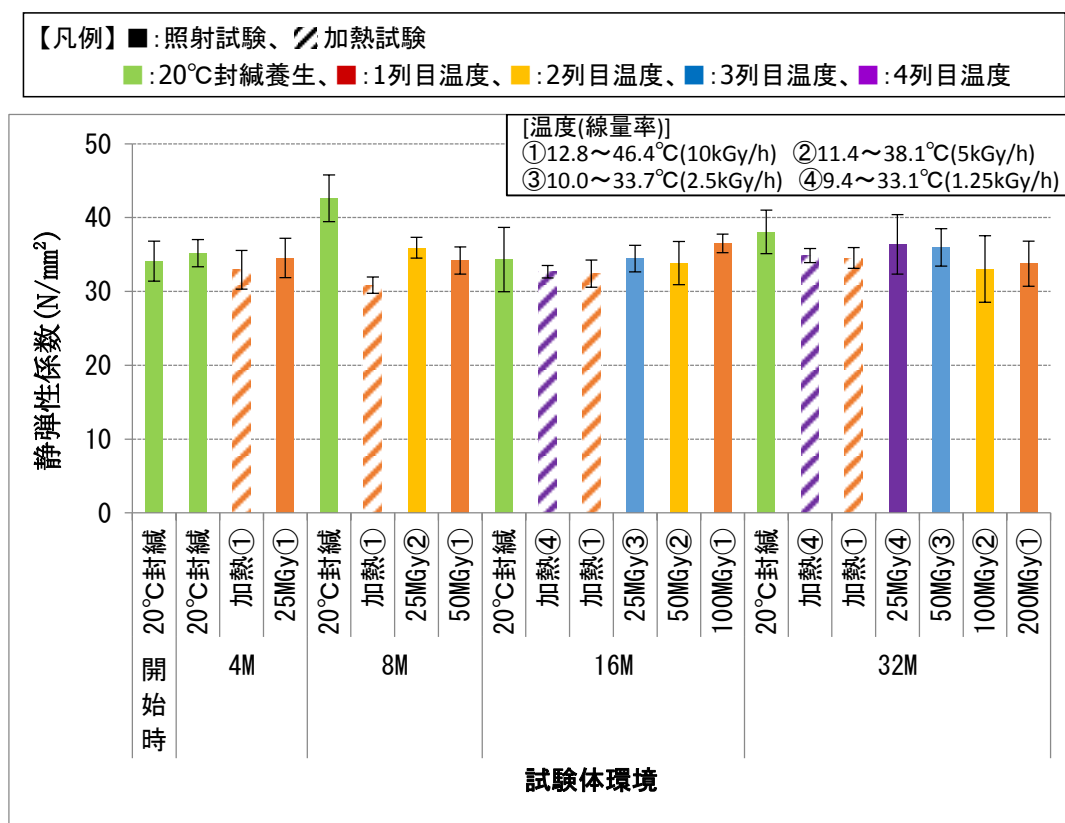


(a) コンクリート試験体 1(砂岩)

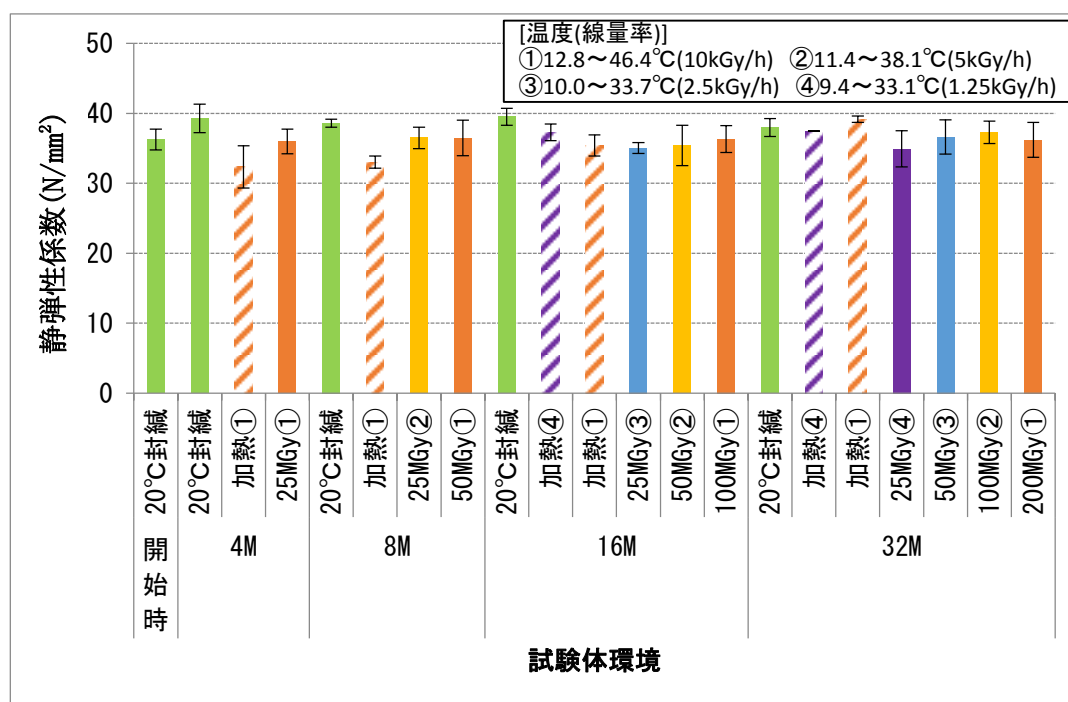


(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.51 圧縮強度の比較

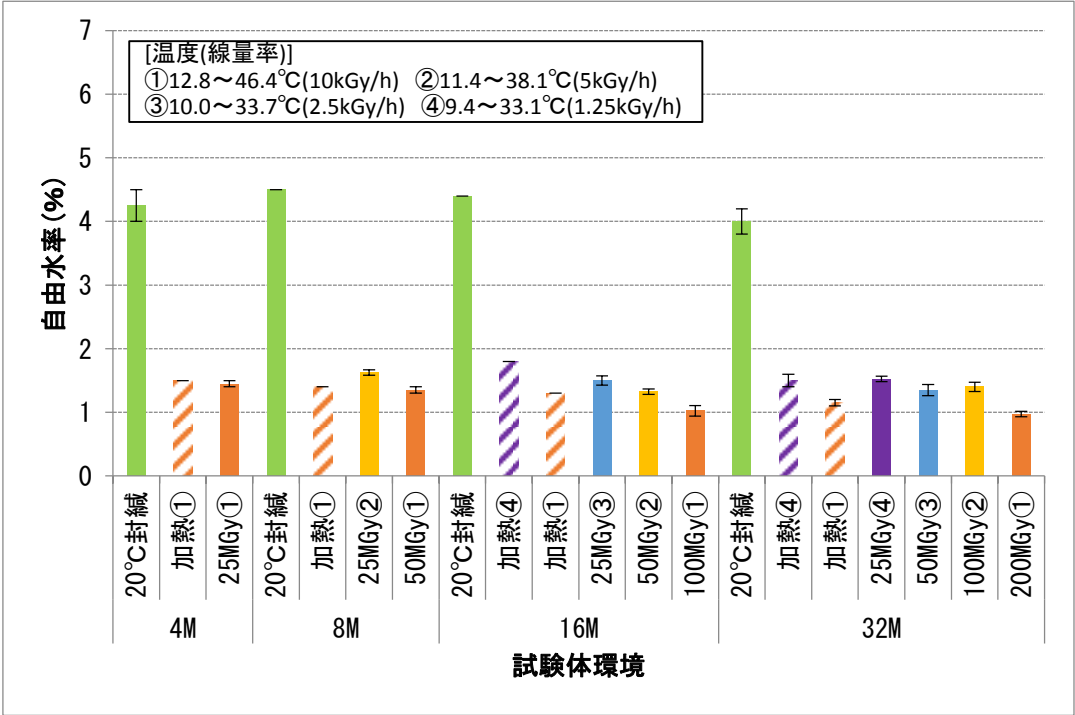


(a) コンクリート試験体 1(砂岩)

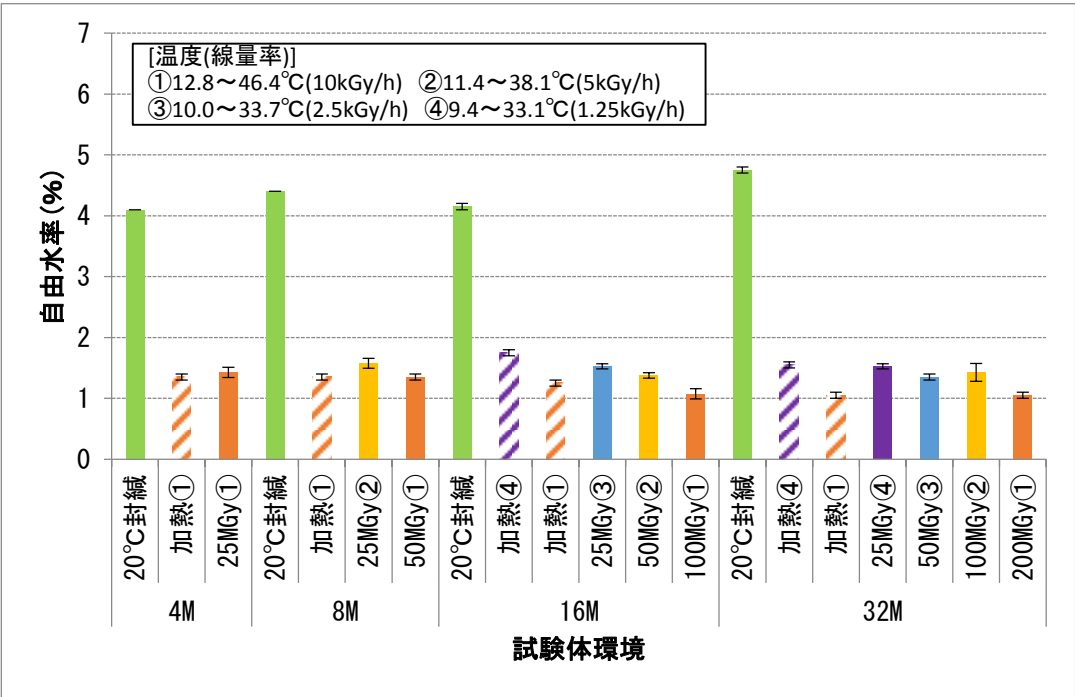


(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3. 52 静弾性係数の比較

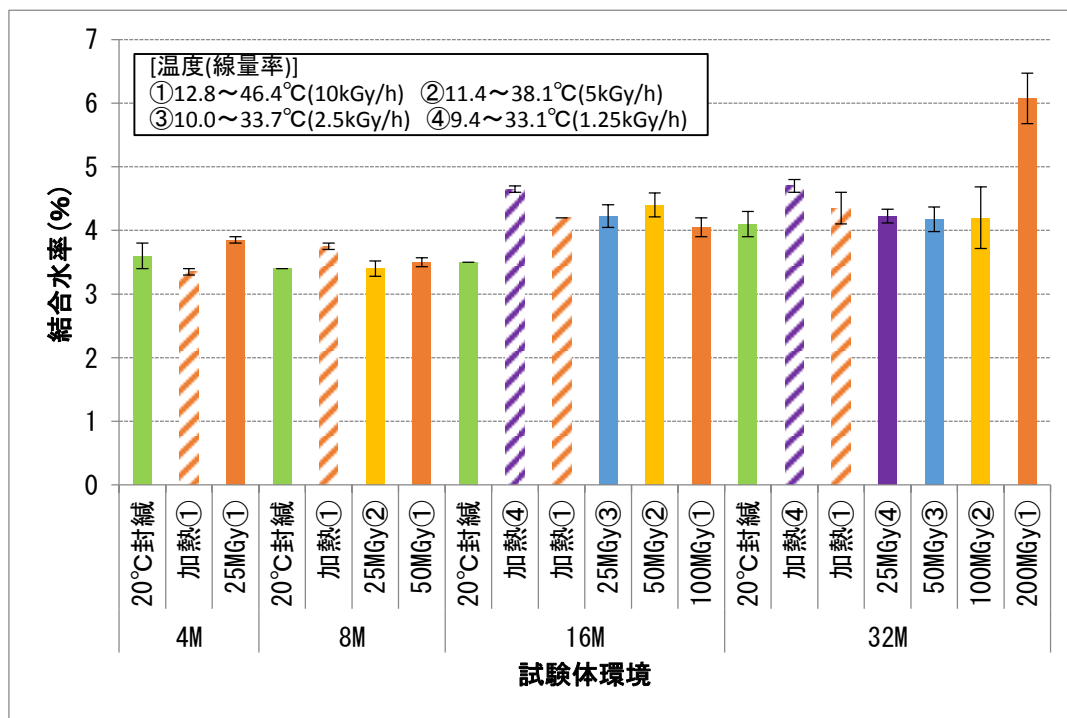


(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)

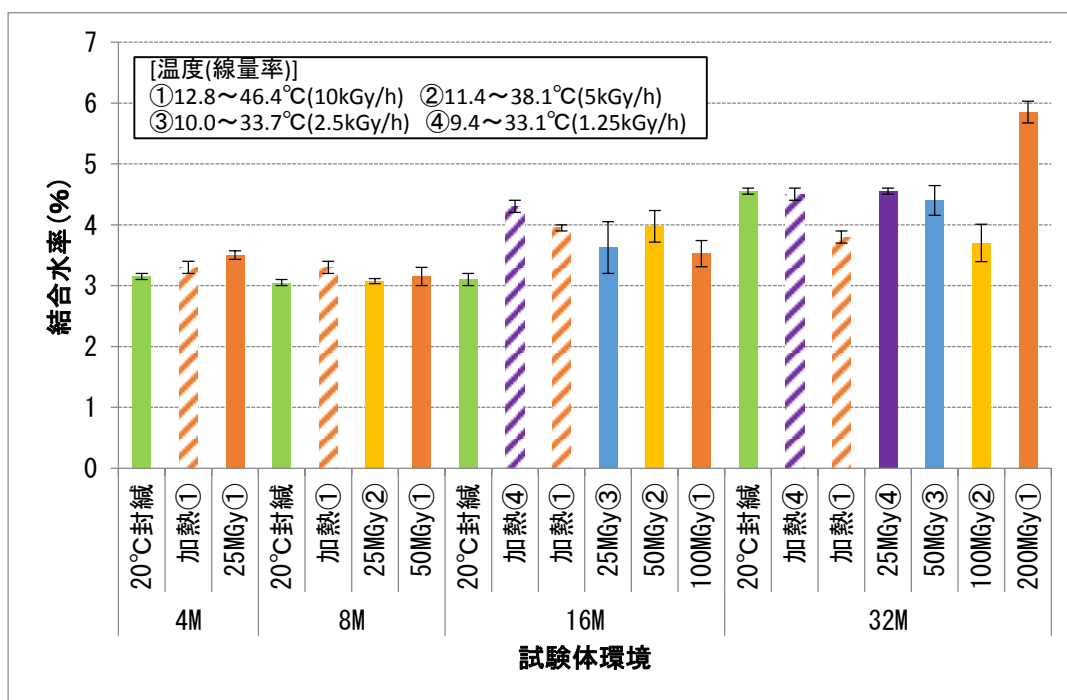


(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3. 53 自由水率の比較

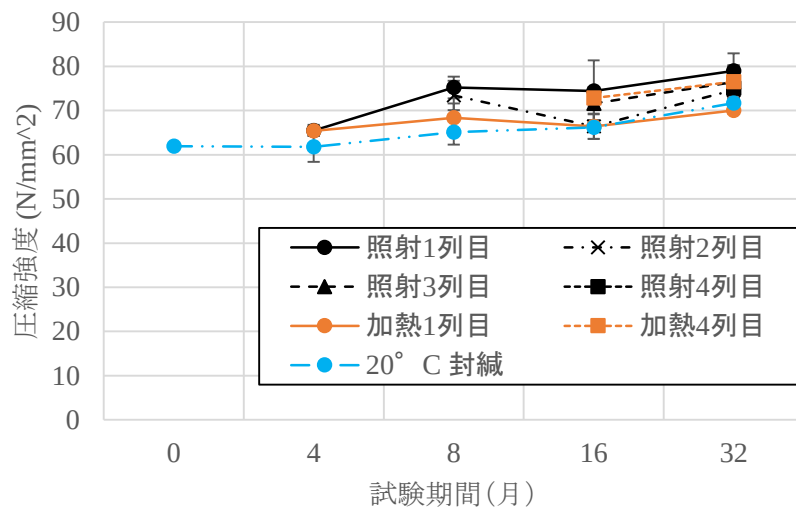


(a) コンクリート試験体 1(砂岩)

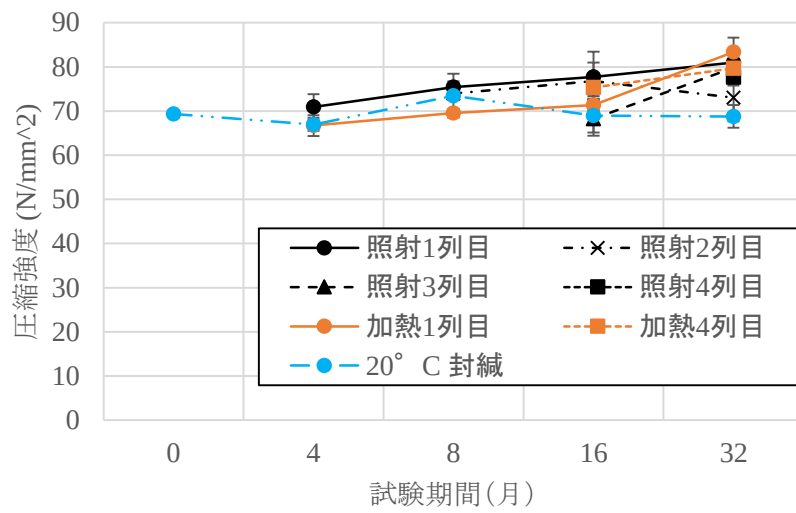


(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.54 結合水率の比較

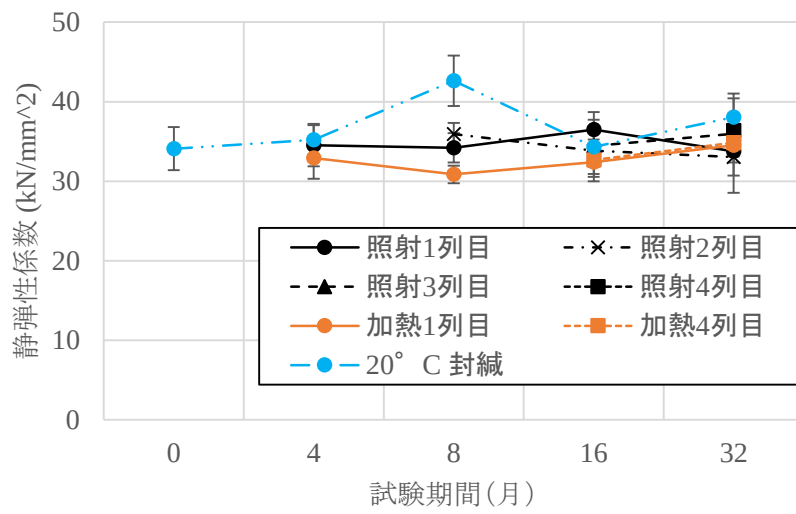


(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)

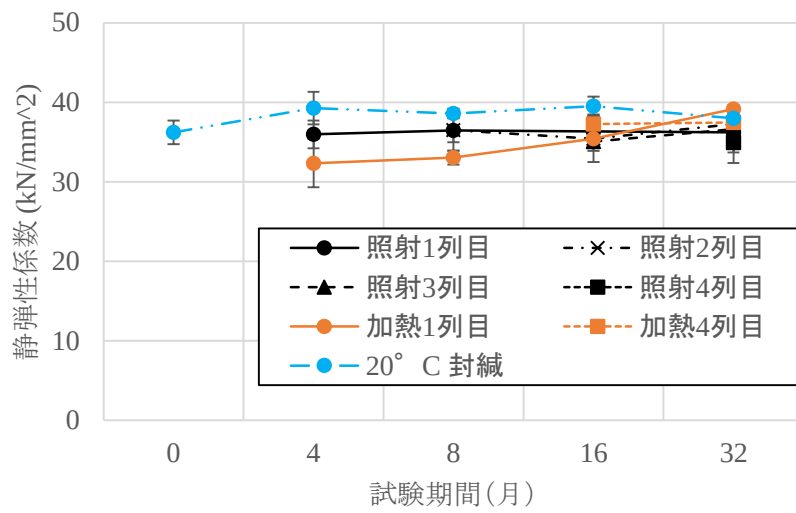


(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3.55 圧縮強度の推移

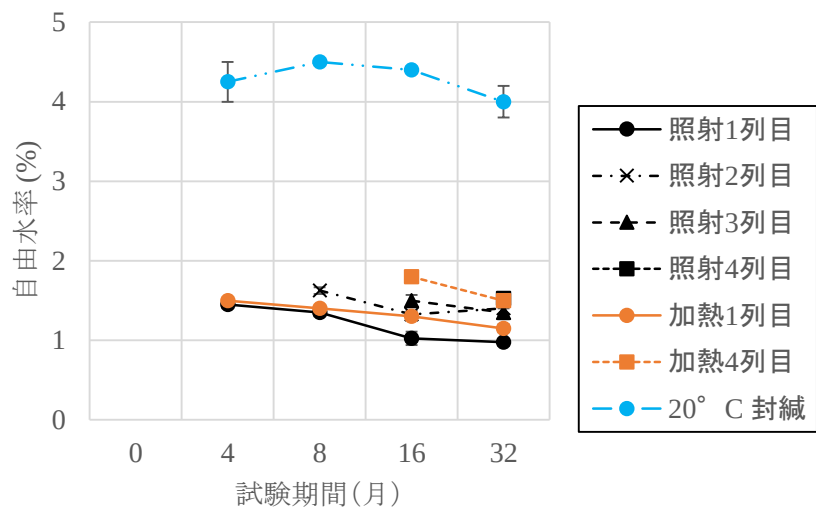


(a) コンクリート試験体 1(砂岩)

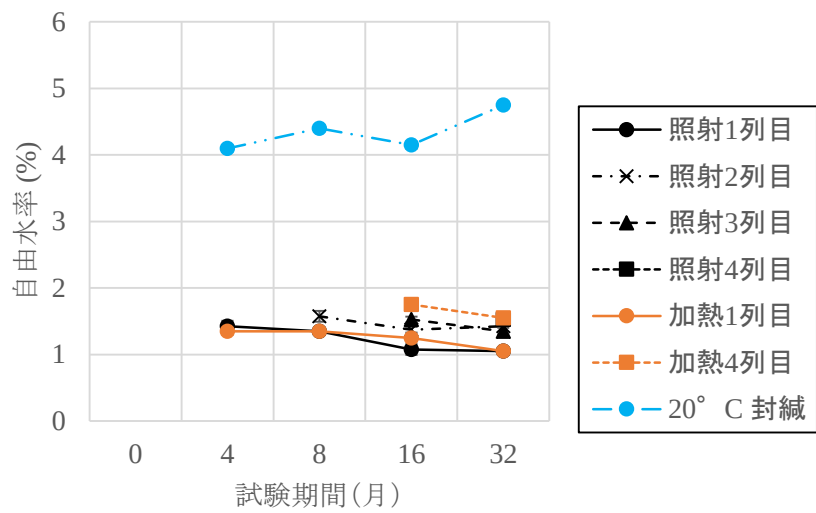


(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3. 56 静弾性係数の推移

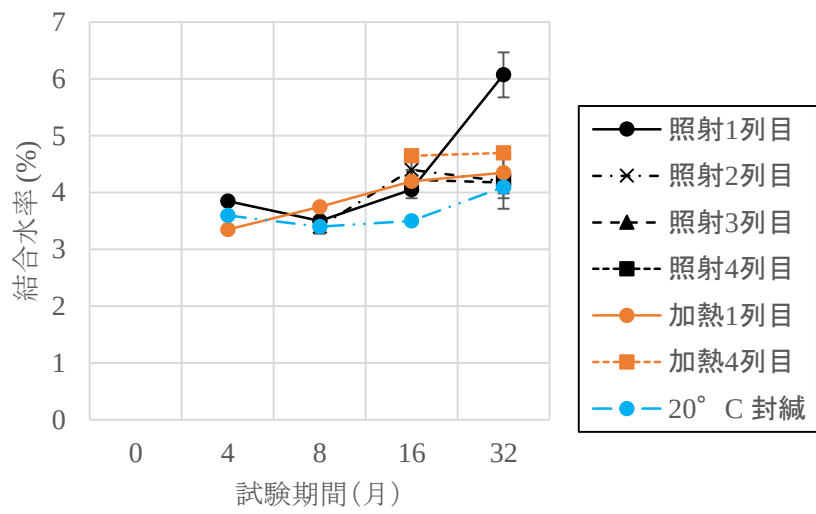


(a) コンクリート試験体 1(砂岩)

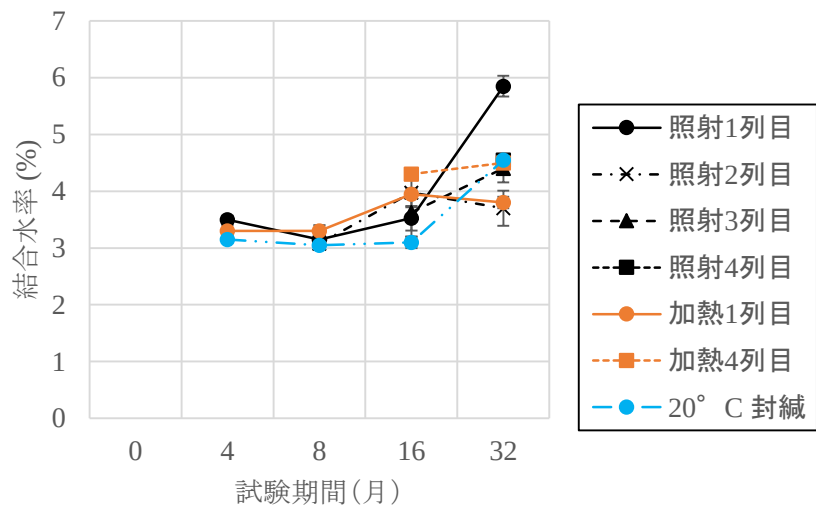


(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3. 57 自由水率の推移



(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)



(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3. 58 結合水率の推移

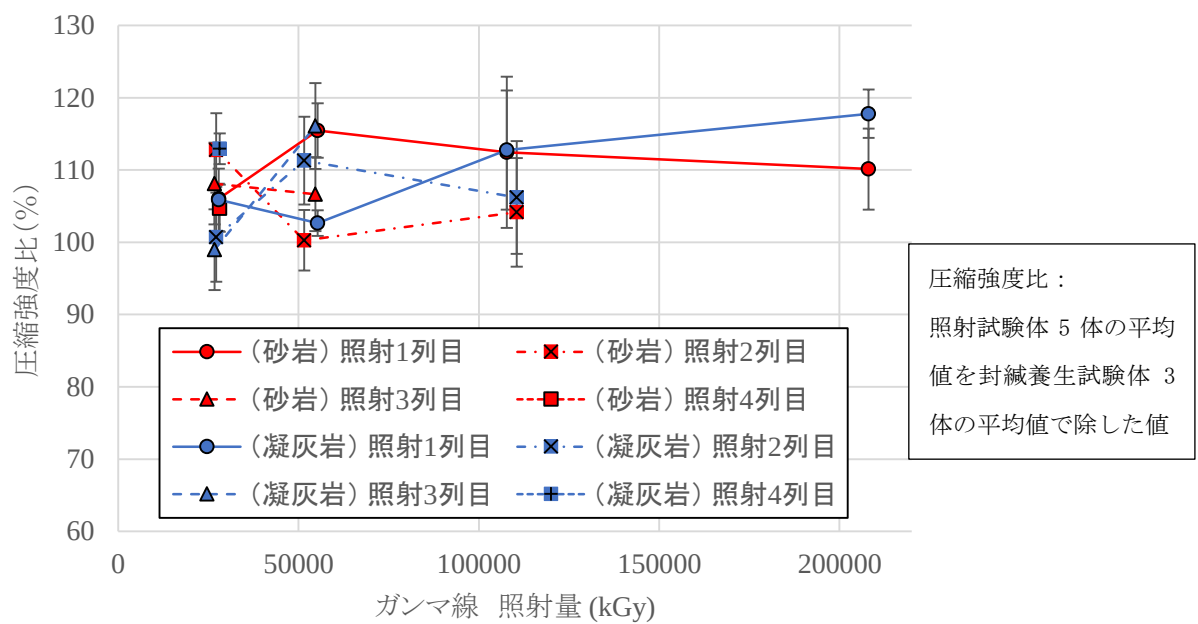
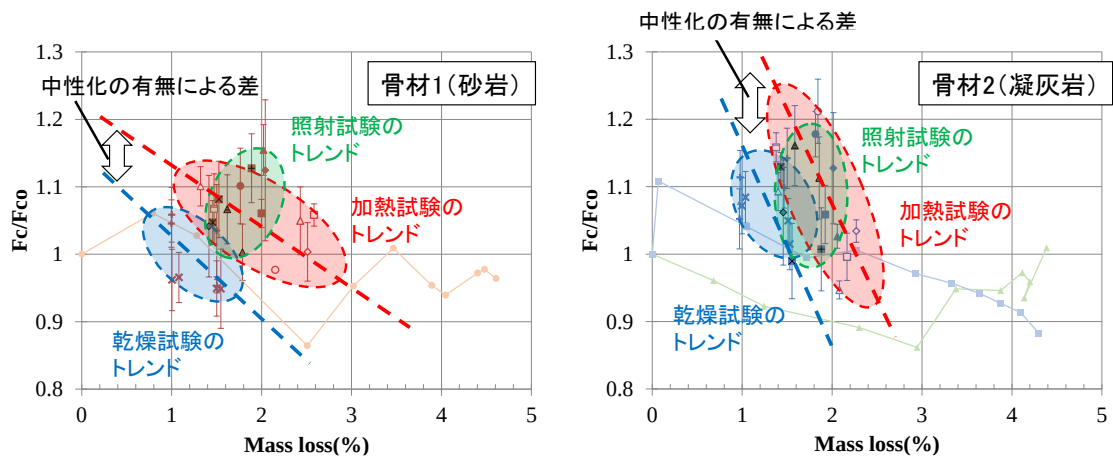


図 3.59 照射量と圧縮強度比（照射・加熱試験体／同材齢 20℃封緘試験体）の関係

【凡例】

- | | | | |
|--------------|---------------|-------------|---------------------|
| ■ 4M 25MGy① | ▲ 8M 50MGy① | □ 4M Heat① | + 1%, 1.5%loss @20℃ |
| # 8M 25MGy② | △ 16M 50MGy② | △ 8M Heat① | × 1%, 1.5%loss @40℃ |
| × 16M 25MGy③ | ▲ 32M 50MGy③ | △ 16M Heat④ | — 静岡・川砂利 W/C-0.55 |
| × 32M 25MGy④ | ◆ 16M 100MGy① | ◇ 16M Heat① | — 春日井骨材 W/C-0.55 |
| | ◇ 32M 100MGy② | □ 32M Heat④ | — 春日井 W/C-0.40 |
| | ● 32M 200MGy① | ○ 32M Heat① | |



(b)横軸：質量減少率

図 3.60 乾燥と圧縮強度比（照射・加熱試験体／同材齢 20℃封緘試験体）の関係

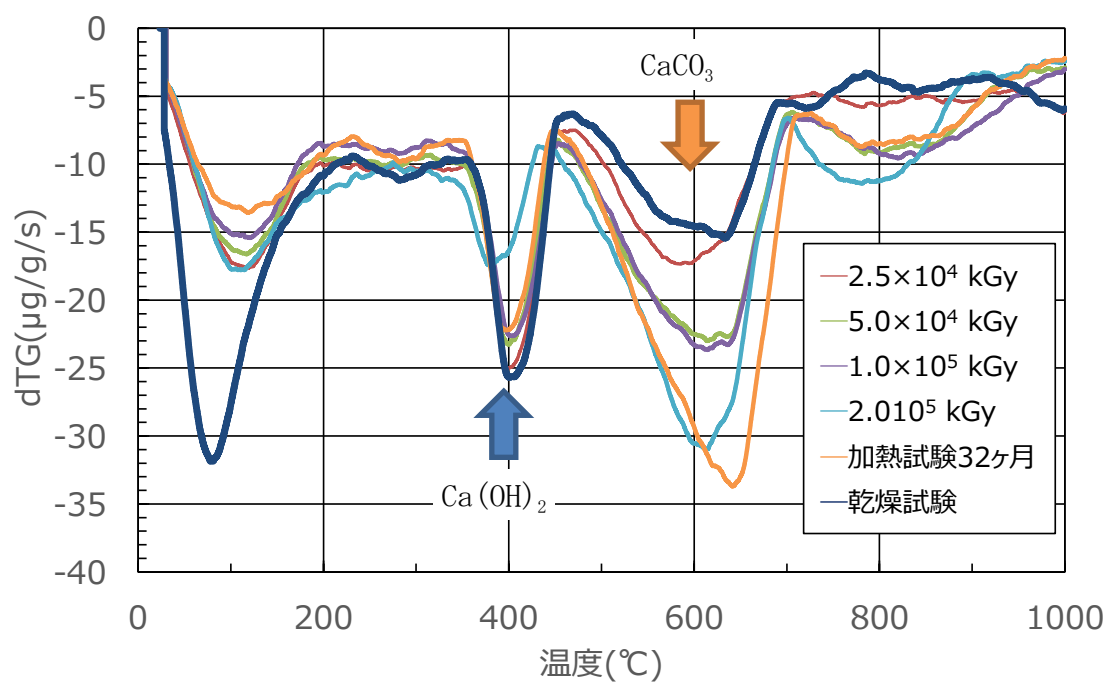


図 3.61 TG の分析結果

3) 線量計測結果

線量計測結果を表 3. 16 に、照射試験完了時点の照射量および平均線量率を表 3. 17 に示す。
また、線量計測状況を図 3. 35 および図 3. 36 に示す。

表 3. 16 線量計測結果

線量計測				計測位置			
年	月	備考		1 列目	2 列目	3 列目	4 列目
2013	3	コンクリート試験体照射開始	－	8. 21	3. 75	1. 78	0. 81
	8	コンクリート 4 ヶ月試験体回収	位置調整前	8. 14	3. 93	1. 89	0. 86
			位置調整後	10. 57	5. 32	2. 48	1. 20
	11	コンクリート 8 ヶ月試験体回収	－	9. 83	5. 17	2. 60	1. 17
2014	1	骨材 4 ヶ月、16 ヶ月試験体照射開始（線源交換後）	－	11. 03	5. 32	3. 25	1. 80
			位置調整	位置調整後	11. 04	5. 60	3. 20
	5	位置調整	位置調整前	11. 47	4. 84	2. 75	1. 43
			位置調整後	10. 91	4. 93	2. 70	1. 55
		骨材 4 ヶ月試験体回収 骨材 8 ヶ月試験体照射開始	－	10. 94	5. 03	2. 76	1. 56
	7	コンクリート 16 ヶ月試験体回収	位置調整前	11. 46	5. 03	2. 91	1. 64
			位置調整後	11. 33	6. 29	3. 72	1. 91
2015	1	骨材 8 ヶ月試験体回収	－	10. 27	5. 64	3. 36	1. 54
	2	位置調整	位置調整前	9. 98	5. 68	3. 38	1. 68
			位置調整後	10. 67	6. 91	4. 30	2. 50
	4	骨材 16 ヶ月試験体回収	－	10. 75	7. 41	5. 13	3. 01
	6	コンクリート 32 ヶ月試験体回収	－	10. 95	7. 48	4. 94	2. 78
	9	コンクリート 32 ヶ月試験体回収	－	10. 29	6. 96	－	－
2016	1	セメントペースト 8 ヶ月試験体回収	－	9. 91	－	－	－
			－	10. 10	－	－	－

表 3.17 照射量および平均線量率

目標照射量 (kGy)	目安期間	試験体位置	照射日数 (日)	照射量 (kGy)	平均線量率 (kGy/h)
25000	4 ヶ月	1 列目	142	27860	8.18
	8 ヶ月	2 列目	254	27185	4.46
	16 ヶ月	3 列目	453	26717	2.46
	32 ヶ月	4 列目	742	28136	1.58
50000	8 ヶ月	1 列目	254	55278	9.07
	16 ヶ月	2 列目	453	51592	4.75
	32 ヶ月	3 列目	742	54674	3.07
100000	16 ヶ月	1 列目	453	107733	9.91
	32 ヶ月	2 列目	824	110513	5.59
200000	32 ヶ月	1 列目	845	208080	10.26

3. 2 物理特性試験（セメントペースト）

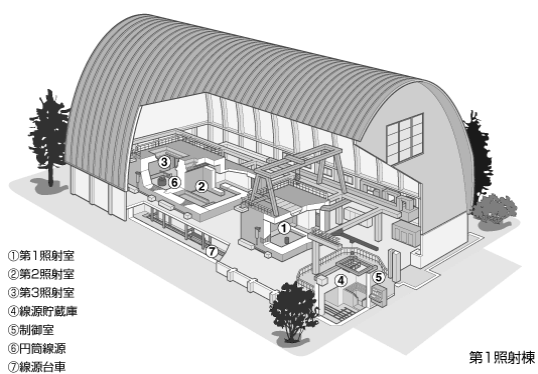
3. 2. 1 照射試験

(1) 試験目的

ガンマ線照射によってコンクリートの強度が増加した。この現象は従来からも報告されておらず、未知の現象である。本研究は、このメカニズムがセメントペーストの変質によるものであるとの仮説より、セメントペーストの照射試験を実施し、その曲げ強度を取得するとともに、詳細な化学分析を行って変質の状況を明らかにする。対象としたセメントペーストは、過去の熱・乾燥影響試験で実施したホワイトセメントペーストサンプルである。

(2) 試験場所

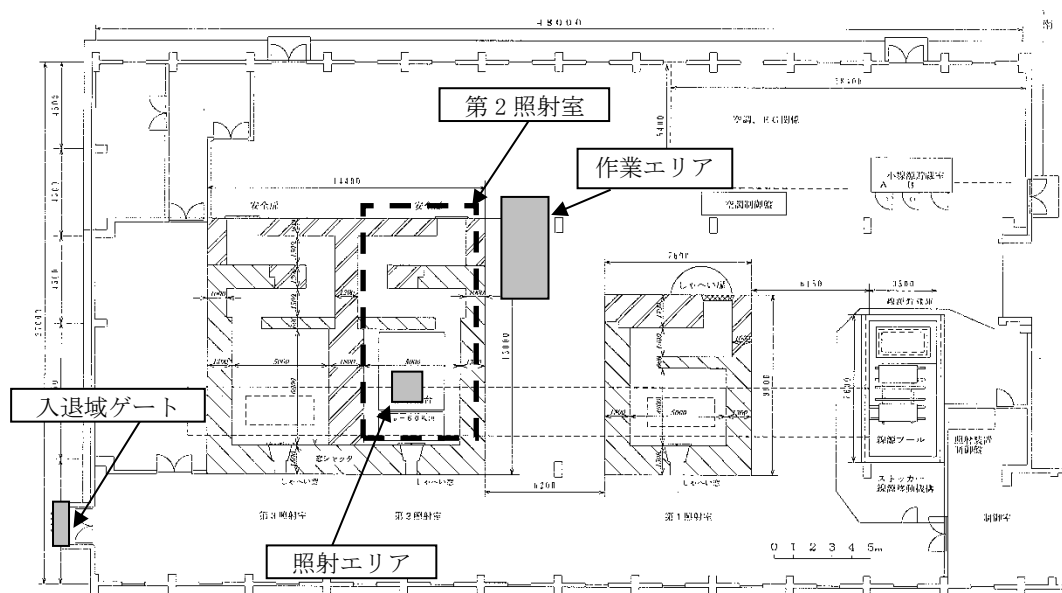
ガンマ線照射は、高崎量子応用研究所（群馬県高崎市綿貫町 1233）のコバルト第 1 照射棟の第 2 照射室で行ない、計測のための配管、配線を照射室外の計測システムに接続した。コバルト第 1 照射棟の概要を図 3. 62 に示す。また照射室内における試験体配置状況、照射室内外での配線の経路および敷設状況、乾湿計の設置箇所を図 3. 63～図 3. 67 に、さらに照射室外の計測システムの外観を図 3. 68～図 3. 69 に示す。図 3. 69 の風速計は照射開始前の時間帯のみに使用され照射開始前に室外に搬出した。



(a) イメージ図

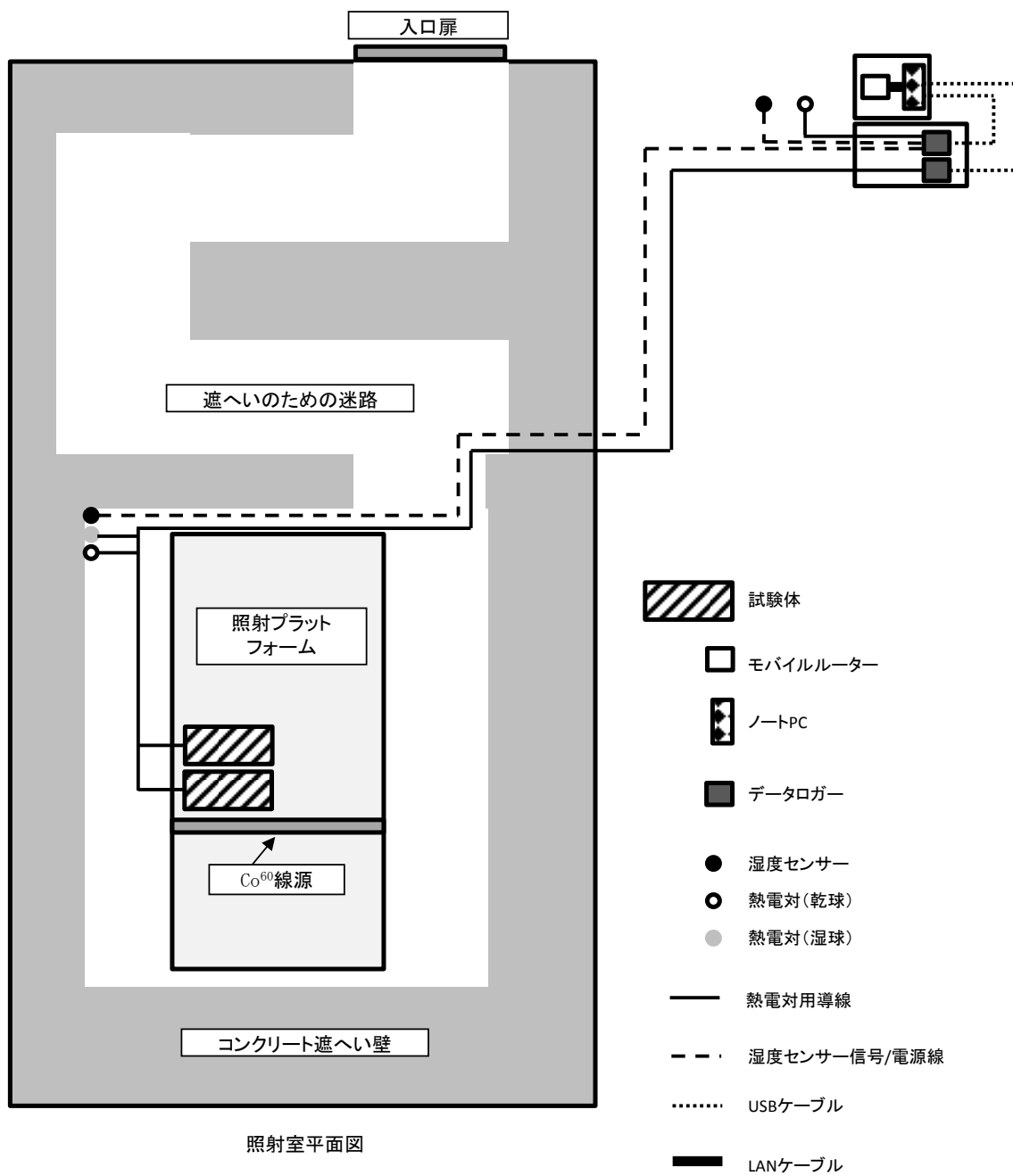


(b) 正面写真



(c) 平面図

図 3.62 照射室の概要



照射室平面図

図 3.63 試験エリアにおける配線経路

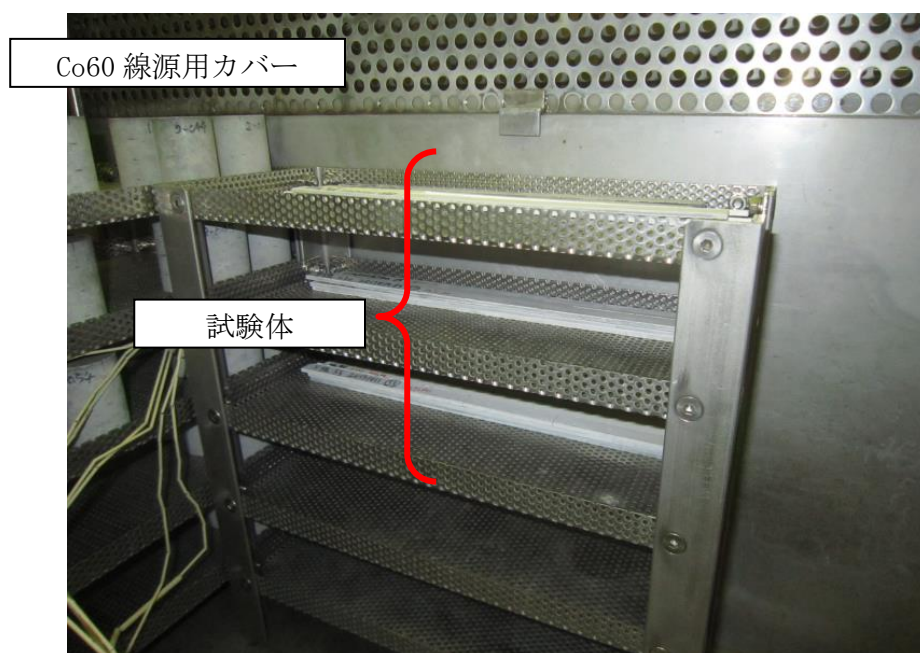


図 3. 64 試験体配置写真（全体）



図 3. 65 湿度計測ユニットおよび風速計測システム



図 3. 66 湿度計測ユニット



図 3. 67 照射室外計測システム外観



図 3.68 通信機内臓モバイルルーター外観



図 3.69 照射室外湿度センサおよび熱電対設置箇所

(3) 試験計画

1) 試験体

本実験には市販のホワイトセメントを用いた。使用したホワイトセメントの化学組成について、表 3.18 に示す。ホワイトセメントを用いた理由は、核磁気共鳴法を利用する予定であったためである。普通ポルトランドセメントに比べ、 Fe_2O_3 と MgO の含有量が少ないものの、その他の成分に大きな違いはなく、空隙構造については、普通ポルトランドセメントを用いた際と、大きな相違はないと考えられる。

セメントは水セメント比 0.55 として、ホバートミキサにより 3 分間の練混ぜを行った。練混ぜ後、ブリージングが収まるまで練返しを行い、その後、 $3 \times 13 \times 300\text{mm}$ の鋼製型枠に打込みを行い、打込み後 4 日で脱型を行った。その後は恒温室 ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) において、あらかじめ同一のセメントで作成した水酸化カルシウム飽和水溶液を用い、材齢 180 日まで水中養生をおこなった。その後、水酸化ナトリウム濃度を制御し、RH11%、RH20%、RH30%、RH40%、RH50%、RH60%、RH70%、RH80%、RH90%、RH95% に調湿したデシケータ内でおよそ 4 年間乾燥／調湿を行った。調湿は、湿度センサ（精度 $\pm 1.8\%$ ）を用いて、湿度 $\pm 2\%$ 内に収まるように所定の濃度の水酸化ナトリウム溶液を交換して行った。

表 3.18 セメントの化学組成

化学成分 (mass%)											
LOI	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	合計
2.93	22.43	4.67	0.16	65.69	0.98	2.51	0.07	0.17	0.03	0.00	99.64

その後、約 10 ヶ月かけて、 5×10^4 kGy のエネルギー付与となるよう、 ^{60}Co の線源から一様に放射線を照射した。その後、名古屋大学にてサンプルにアルミニウムを蒸着させたポリエチレンバッグで密封の上、各種分析を行った。照射時の温湿度環境を図 3.70 に示す。試験は、照射サンプル (Irr) とリファレンスで同室の放射線の当たらない場所に静置したもの (Ref)、および、照射試験前のもの (Ini) を対象とした。サンプルは、試験開始時に飽和状態だったもの (SMS100) および、50%RH に調湿したもの (SMS50) となっており、全部で 6 つの試験体がある。

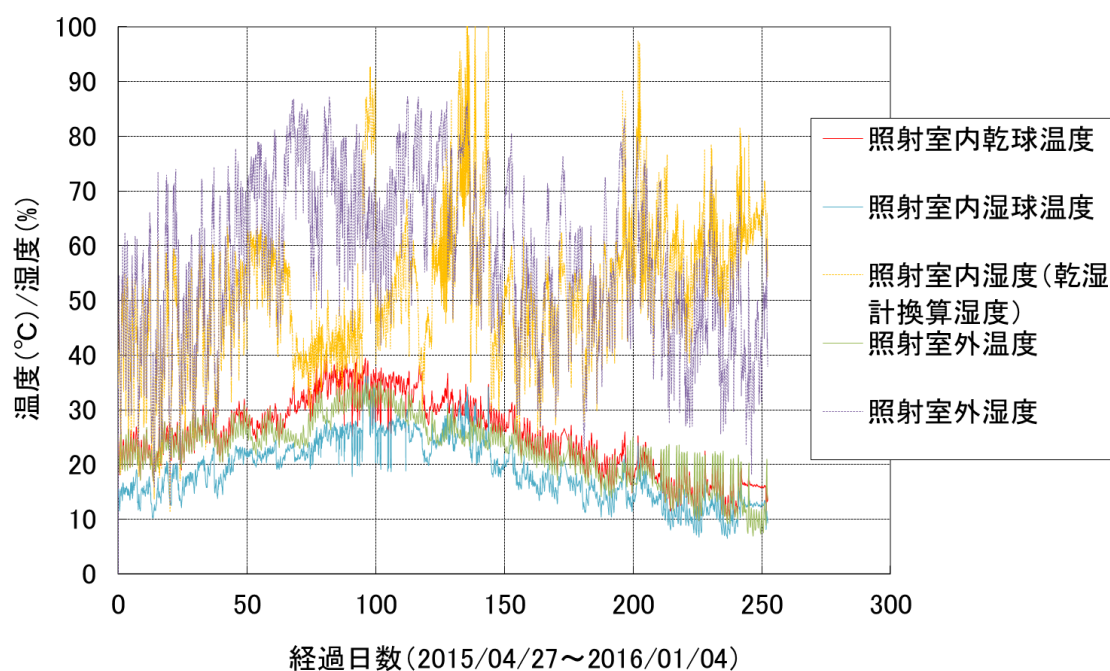


図 3.70 照射時の温湿度環境

2) 照射後試験の概要

照射後試験に際しては、曲げ試験、平衡湿度測定試験、熱重量分析 (TG)・差分熱重量分析 (DTG)、X 線粉末回折 (XRD) / リートベルト解析、熱重量-熱容量-ガス質量分析 (TG-DSC-MS)、核磁気共鳴 (NMR) (^{27}Al , ^{29}Si)、水蒸気吸着、窒素吸着、フーリエ変換赤外分光法 (FT-IR)、フィールドエミッション走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) 観察、 ^1H -NMR 分析、X 線小核散乱、走査型プローブ顕微鏡 (SPM) 観察を実施した。

曲げ試験：3x13x300 mm 試験体は照射により一部破断したが、それらの残りのサンプルを用いて 3 点荷重により曲げ強度を測定した。スパンは 60mm とし、一つの試験体から 8 点以上の測定を実施することができた。曲げ強度は式(2.2.3-1)により評価した。

$$f_b = P \cdot l / 4 \cdot (I / (h/2))$$

(2.2.3-1)

ここに、P：最大荷重、l：荷重スパン、I：試験体の断面二次モーメント、h：試験体厚さ、である。

平衡湿度測定：平衡湿度は水分活性測定装置（AquaLab Series4TE, Decagon device 社製）により、鏡面露点計の原理を用いて測定した。サンプルをアルミバッグ内でハンマーで粉砕し、資料室に均一に並べ、表面積を多くして測定した。3 回の平均値を用いた。

熱重量分析(TG)・差分熱重量分析(DTG)：TG および DTG は、熱重量分析装置(TG-DTA 2000SA, Bruker AXS) を用い、10°C/min の昇温速度で窒素フロー下で測定を行った。サンプルは、窒素環境下でメノウ乳鉢で粉砕し、25~75 μm の粒度のものを測定に用いた。サンプル質量は概ね 20 mmg である。昇温は 1000°C まで実施した。

TG-DSC-MS：TG-DSC-MS 測定は、NETZSCH 社の協力のもと実施した。TG 測定については STA 449F1 (NETZSCH 社)，ガスクロマトグラフィ分析には JMS-Q1050GC (JEOL 社) を用いた。昇温は 40°C から 1000°C まで実施し、昇温速度は 10°C/min とした。He ガスをキャリーガスとして用い、ガスクロマトグラフィにおける走査レンジは 2~1000 Da とし、その際の SEM の電圧は 1000 V，キャピラリーのサイズは $\phi 0.32 \times 5 \text{ mm}$ であった。この測定は、SMS100-Irr および SMS100-Ref に対してのみ行った。

XRD/Rietveld 分析：本分析は、メノウ乳鉢で粉砕し、指で粒状感のなくなったものを用いて行った。試料は 11%RH で調湿したのち、サンプル質量の 10%をコランダムに置換し内部標準試料とした。調湿には 2 週間かけた。X 線粉末回折は、D8 Advance (Bruker AXS 社) を用い X 線源 Cu-K，管電圧 40kV，管電流 40mA，走査範囲 $2\theta = 5 \sim 65^\circ$ ，ステップ幅：0.02°，スキャンスピード：0.5°/min. の条件で行った。リートベルト解析は、測定した全走査範囲を用いて、ソフトウェア TOPAS ver. 4.2 (BrukerAXS 社製)により行った。定量に際しては、セメント鉱物として、 C_3S ， C_2S ， C_3A ， C_4AF ，ペリクレース（化学式： MgO ，略記：M），フリーライム（化学式： CaO ，略記：C），ジブサム（化学式： $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，略記： $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ ），バサナイト（化学式： $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ，略記： $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_{0.5}$ ）の 8 種を、水和生成物として、ポルトランダイト（化学式： $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，略記：CH），カルサイト（化学式： CaCO_3 ，略記： $\text{C}\bar{\text{C}}$ ），エトリンガイト（化学式： $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ，略記：AFt），モノサルフェート（化学式： $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ，略記：AFm）の 4 種を、内部標準試料としてセメントペースト試料に混合した $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (10wt%混合)を定量対象とした。定量に用いた各鉱物の結晶系 C_3S ， C_2S ， C_3A ， C_4AF の結晶構造に関するパラメータは NIST Technical Report と同様とし³⁸，M，C， $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ ， $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_{0.5}$ ，CH， $\text{C}\bar{\text{C}}$ ，AFt，AFm， $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ に関しては ICSD Database と同様とした³⁹。非晶質物質質量は内部標準 α

³⁸ P. Stutzman, S. Leigh: NIST Technical Note 1441-Phase Composition Analysis of the NIST Reference Clinkers by Optical Microscopy and X-ray Powder Diffraction, pp.34-43, 2002

³⁹ Fachinformationzentrum Karlsruhe and National Institute of Standards and Technology, Inorganic Crystal Structure Database, ICSD., 2006,

-Al₂O₃ の定量値から (2. 2. 3-2) 式に従い算出した⁴⁰。

$$A = \{100 \times (S_R - S)\} / \{S_R \times (100 - S) / 100\} \quad (2. 2. 3-2)$$

ここに A : 非晶質量 (%), S : α -Al₂O₃ の混合率 (%), S_R : α -Al₂O₃ の定量値 (%) である。

測定は 3 度行い, その平均値を用いた。

フーリエ変換赤外分光法 (FT-IR) : FT-IR の測定は, ALPHA (Bruker Biospin 社製) を用いて, ATR 法により測定した。積分回数は 128 回であり, 空気中の二酸化炭素のピークはキャリブレーションにより除去した。バックグラウンド処理は行っておらず, 波長による染み込み深さの影響は, 装置に付属したアプリケーションにより補正した。測定範囲は 450~3800 cm⁻¹ である。

水蒸気吸着等温線試験 : 試料を, 25 μ m 以上 75 μ m 以下に分級したものに, マントルヒーターによって 105 °C 条件で加熱した条件下で 30 分間真空脱気を行ったもの (真空ポンプの性能 : 6.7 $\times 10^2$ Pa) について, 吸着等温線の測定を 293.3K において行った。吸着等温線は定容水蒸気吸着法により, Quantachrome 社製 Hydrosorb1000 を用いて測定した。測定点は, 許容圧力較差 0.05mmHg, 平衡時間 120sec. とし, 5%RH から 95%RH まで 5%刻みとして, 最大値 98%RH を折り返し点とした。脱着は, 吸着と同一点を 5%RH まで測定した。水蒸気吸着による比表面積については, BET 理論を用いて算出した。その際, 水分子の占有面積は 0.114nm² の値を用いた。

本検討で採用した定容法による水蒸気吸着等温線試験は, 質量式の測定方法よりも平衡判定をとりやすく, 迅速に吸着等温線の測定を行うことができる。

一般に多孔体中の比表面積を算定する場合に, 水分子による吸着等温線を用いることは必ずしも適切ではない。それは, 水素結合性の表面がある場合などには, London 分散力や電氣的な相互作用によって生じる吸着量よりも多くの吸着が生じることがあるからである。本研究ではセメント硬化体中の水の挙動を評価する目的で検討を行っているので, 水分子が表面に吸着するサイト数という意味合いも含めて比表面積という用語を用いることとした。

<http://icsd.ill.fr/icsd/index.html>, (accessed 2010-06-09)

⁴⁰ R. C. Jones, C. J. Babcock, W. B. Knowlton: Estimation of the Total amorphous content of Hawaii soils by Rietveld method, Soil Science Society of America Journal, Vol. 64, pp. 1100-1108, 2000

窒素吸着：試料を、 $25\mu\text{m}$ 以上 $75\mu\text{m}$ 以下に分級したものに、マントルヒーターによって 105°C 条件で加熱した条件下で 30 分間真空脱気を行ったもの（真空ポンプの性能： $6.7\times 10^2\text{Pa}$ ）について、吸着等温線の測定を 77.3K にて行った。吸着等温線は定容法により、MicrotrackBEL 社製 BELSORP mini-II を用いて測定した。測定点は、許容圧力較差 0.05mmHg 、平衡時間 180sec. とし、吸着、脱着それぞれ 20 点以上を 98% 点まで取得した。水蒸気吸着による比表面積については、BET 理論を用いて算出した。

核磁気共鳴 (NMR) (^{27}Al , ^{29}Si) : ^{29}Si DD (Dipolar Decoupling) MAS NMR スペクトルを Bruker Avance 300 MHz Spectrometer によって測定した。磁場は 9.4T であり、資料は 7mm の直径の ZrO₂ 製のセルに入れ、 5kHz でマジックアングルにおいて回転させた。リサイクルディレーは 60秒 とし、積分回数は 5000 回とした。すべての測定は室温において実施し、外部標準として、Hexacyclotrisiloxane を用いた。

^{27}Al MAS NMR スペクトルを ECA700 spectrometer (JEOL 社製) を用いて測定した。磁場は、 16.4T である。ZrO₂ 製の $\Phi 4.0\text{mm}$ 管を用い、 15kHz で回転させて測定した。繰り返し遅延時間は 0.5s とし、積分回数は 12800 である。AlK(SO₄)₂ · 12H₂O を標準資料とし、ピークをゼロ点として評価した。

フィールドエミッション走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) 観察：観察には JSM-7500FA (JEOL 社製) を用いた。サンプルは 105°C で 30 分間加熱しながら真空引きしたものを、破断面の観察を行った。測定にあたり、サンプルは金属のサンプルホルダに導電性テープを用い、その上に接着した。オスミウムコーティングを施し、チャージが生じないように配慮した。測定倍率は 5000 倍から 100000 倍である。

X 線小角散乱：測定にあたり、Spring-8 を用いた。試料サイズは $500\mu\text{m}\times 5\text{mm}\times 5\text{mm}$ であり、ダイヤモンドソーを用いて切断した上、 1200 番の研磨して研磨して所定の厚さとし、その後、試料のもとの湿度に調湿した。測定ビームラインは、BL03XU であり、X 線波長 λ は USAXS 測定で 0.15nm 、SAXS および WAXS 測定で 0.1nm である。検出器は、USAXS と SAXS で PILATUS1M を、WAXS で FPD を用いた。カメラ長は UAXS で、 4214mm 、SAXS で 2179mm 、WAXS で 77.8mm である。2 次元検出器により測定された散乱パターン $I_{\text{obs}}(2\theta, \phi)$ に対し、式 (2.2.3-3) のように円環平均することで 1 次元散乱プロファイル $I_{\text{obs}}(2\theta)$ を得た。

$$I_{obs}(2\theta) = \frac{1}{2\pi P} \int_0^{2\pi} \frac{I_{obs}(2\theta, \phi) - I_{BG}}{\cos^3 2\theta} d\phi \quad (2.2.3-3)$$

θ : ブラッグ角

P : 偏光因子

ϕ : 方位角

I_{BG} : 検出器バックグラウンド値

円環平均した 1 次元プロフィールに対し、空セル散乱補正、絶対強度補正を行った (2.2.3-4)。絶対強度補正では以下の補正が行われる。

- ・測定時間
- ・試料厚み (X 線照射体積) 補正
- ・透過率 (吸収) 補正
- ・装置定数補正

従って、異なる試料間での強度比較が可能である。上記補正は式 (2.2.3-4) のように行った。なお、装置定数は 10% 程度の誤差を含む可能性がある。

$$I(2\theta) = \frac{C}{t} \left[\frac{I_{obs, sample}(2\theta)}{time_{sample} T} - \frac{I_{obs, empty}(2\theta)}{time_{empty}} \right] \quad (2.2.3-4)$$

$I(2\theta)$: 空セル散乱、絶対強度補正済みの散乱強度

$I_{obs}(2\theta)$: 補正前散乱強度 (式 (2.2.3-3) により求めた 1 次元散乱プロフィール)

$time$: 各測定の測定時間

t : 試料厚み

T : 試料の X 線透過率

C : 装置定数

添え字: sample, empty はそれぞれ試料、空セル測定により得られたものを示している。

解析モデルには、文献⁴¹に準拠した 2 構造のモデルを用いた。すなわち、ディスク状の C-S-H の凝集構造を表すフラクタルモデルと、凝集構造の内部にあるさらに小さい 1nm 程度以下の回転半径 R_g を持つ構造が混在しているとするモデルの組み合わせである。

走査型プローブ顕微鏡 (SPM) 観察では、SHIMADZU SPM-9700 (X-Y 捜査範囲 30 μ m, Z

⁴¹ I. Maruyama, N. Sakamoto, K. Matsui, G. Igarashi, Microstructural changes in white Portland cement paste under the first drying process evaluated by WAXS, SAXS, and USAXS, Cement and Concrete Research. 2016

範囲 5 μ m) を用い、測定条件は、走査速度 1.0Hz, オペレーティングポイント 1.0V, P ゲイン 0.01, I ゲイン 1000.0 で行った。走査モードは力一定によるコンタクトモードで実施した。測定試料は、SDS100 の Initial, Irradiation, Reference について行った。曲げ試験後の欠片 (厚さ 3mm, 幅およそ 2.4 $\times$ 2.4cm) をスライドガラスにエポキシ樹脂で貼り付け、イソプロパノールを用いて研磨をダイヤモンドペースト仕上げまで行った。研磨粒度を変える際、3 分程イソプロパノールに浸した状態で超音波洗浄を行った。また、試料の加工および観察までの試料は、20 度における飽和塩化リチウム塩溶液との平衡湿度下で調湿し、二酸化炭素吸着材を入れたデシケータ内で保管した。

^1H -NMR の緩和シグナルの測定を行った。装置は、Bruker 社製 Minispec で実施した。測定にあたり、飽和サンプルにおいて T_1 緩和時間と 90 度パルス長さを確認し、適切な測定ができることを確認した。測定は CPMG シーケンスにより、 10^{-4}s の一定エコー間隔で T_2 緩和時間を測定した。遅延緩和時間は、 T_1 時間の 5 倍以上とした。また、緩和時間の頻度分布の確認で、BRD アルゴリズム⁴²により解析を行い、水の緩和状態から細孔構造について考察した。

3) 試験結果

図 3.71 に、曲げ強度の結果を示す。ここでは、試験後の試験体の平衡湿度も別途測定したので、試験体の湿度と強度の関係を明確にすべく、結果を図示した。すでに報告した曲げ強度と相対湿度の関係⁴³から、照射後の挙動を確認すると、リファレンスサンプルでは、強度は大きく増大していないにもかかわらず、ガンマ線照射を行った場合には湿度は若干低い傾向にあるものの強度が高い傾向が明らかである。すなわち、ガンマ線照射サンプルは、試験前および試験後のリファレンスサンプルのいずれに対しても同一の湿度域において強度が高い傾向が確認できた。このことから、ガンマ線照射後のコンクリート強度が増大した理由は、セメントペーストの強度増大によって説明ができる。

なお、照射後サンプルの湿度がリファレンスサンプルの湿度よりも低いのは、照射中にペーストの温度がガンマ線発熱によって上昇したため、平衡相対湿度が低くなったことに起因すると考えられる。

⁴² J. P. Butler, J. A. Reeds and S. V. Dawson, Estimating Solutions of First Kind Integral Equations with Nonnegative Constraints and Optimal Smoothing SIAM Journal on Numerical Analysis, Vol. 18, No. 3 (Jun., 1981), pp. 381-397

⁴³ I. Maruyama, Y. Nishioka, G. Igarashi, K. Matsui, Microstructural and bulk property changes in hardened cement paste during the first drying process, Cement and Concrete Research, 58, (2014) 20-34.

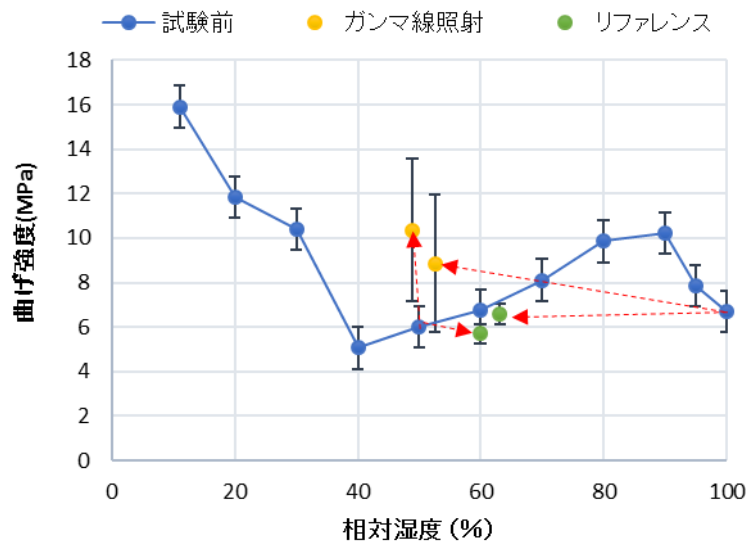
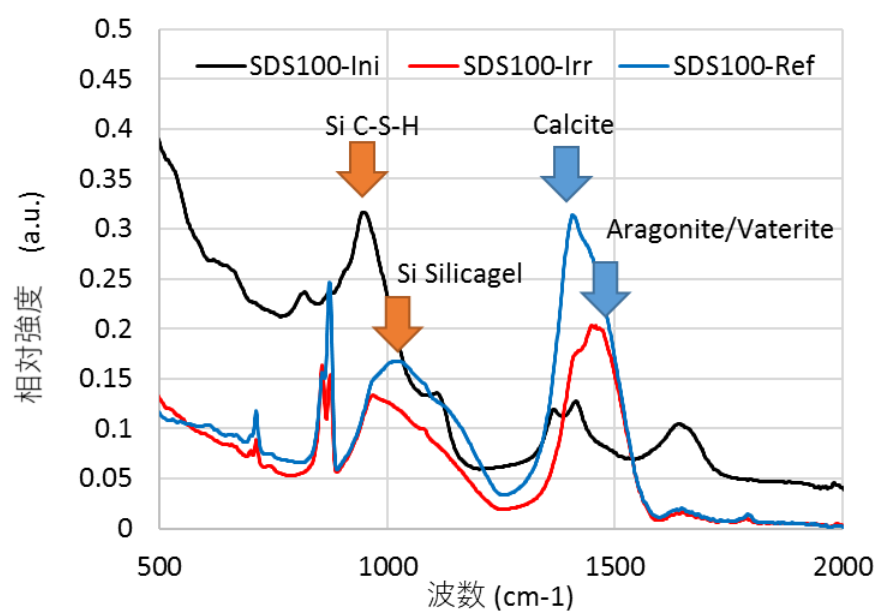
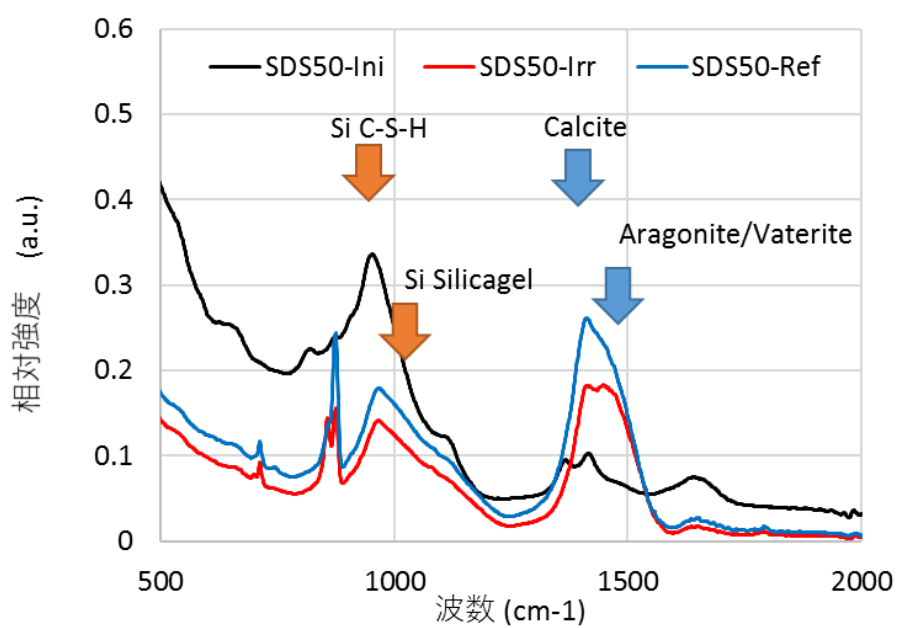


図 3.71 ガンマ線照射試験体、リファレンス試験体、および試験前の試験体の曲げ強度

この強度増大現象の要因をさぐるべく、セメントペースト中の水和物等の評価を行った。FT-IR の測定結果を図 3.72 に示す。ここでは、主として Si と C の振動に着目する。SDS100-Ini および SDS50-Ini においては、Si-O 結合の振動は 980cm^{-1} 程度に確認できる。これは、Ca が近隣に存在する C-S-H 特有のシグナルである。SDS100-Irr, SDS100-Ref, いずれもこのピークは確認できなくなり、 1000 cm^{-1} より大きい波数に確認できるようになる。この傾向はシリカゲルのように近隣に Si-O 結合が多い場合に確認されるものである。後述するようにこの傾向は C-S-H が炭酸化し、層間の Ca イオンがなくなった場合などにも確認できるため、これらのサンプルは中性化が進んでいると推察される。実際に、SDS100-Ini における 1400cm^{-1} の部分には C-O 振動が確認できるが、この振動ピークは、大きくなり、それぞれ SDS100-Ref の場合は Calcite のピークとして、SDS100-Irr の場合は Aragonite あるいは Vaterite の炭酸カルシウムピークに発展していることが確認できる。どのような傾向は、SDS50 のサンプルについても確認できるため、今回の照射環境では中性化が進んだものと考えられる。



(I) SDS100 サンプル



(II) SDS50 サンプル

図 3.72 FT-IR の測定結果

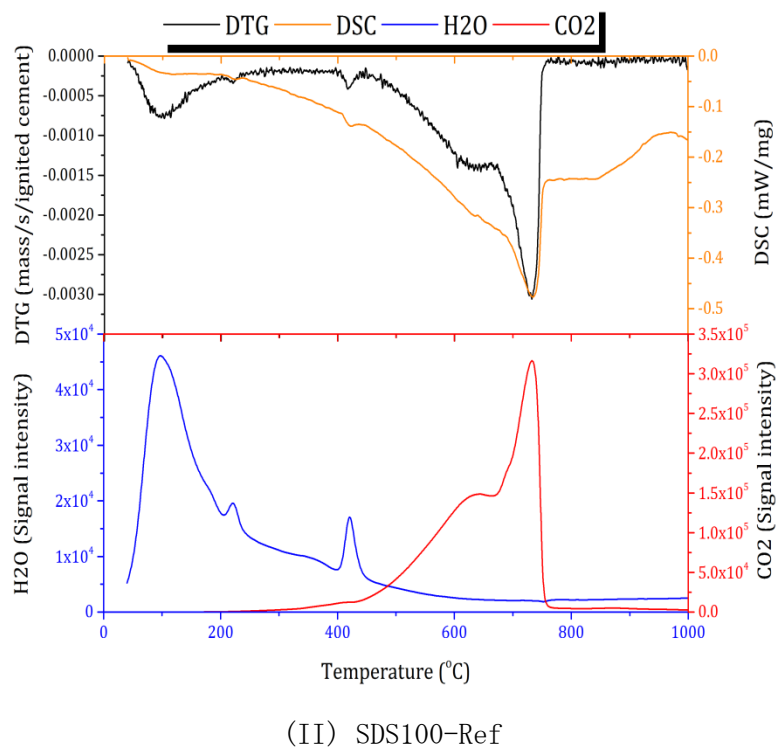
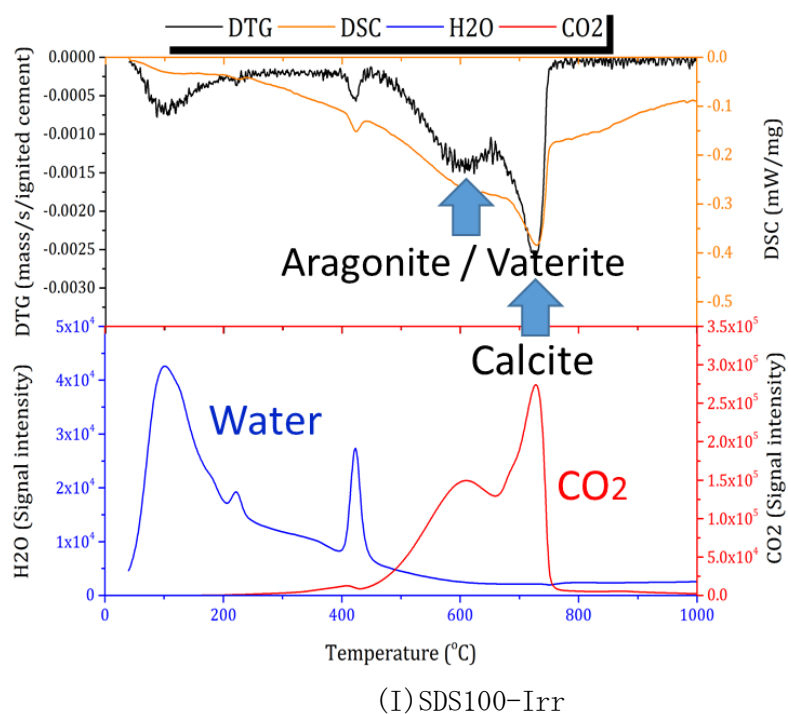


図 3.73 SDS100-Irr および SDS100-Ref の TG-DSC-MS 測定結果

裏付けを考慮するために、TG-DSC-MS および、DTG 分析を行った。図 3.73 に示されるように SDS100-Irr, SDS100-Ref 両者において、DTG カーブ状で 400°C 付近、600°C 付近、および 750°C 付近に減量ピークが確認されている。このピークはそれぞれの図の

下段の MS データで確認できるように、400°C 近傍が水、600°C と 750°C 近傍が CO₂ による減量となっている。すなわち、前者は水酸化カルシウムであり、後者は炭酸カルシウムとなっている。既往治験から 750°C ピークはカルサイトとわかっているため⁴⁴、600°C 近傍は Aragonite あるいは Vaterite による減量であると考えられる。Aragonite あるいは Vaterite は、C-S-H の中性化にともなって生成するといわれており⁴⁵、今回の結果では、ガンマ線照射サンプルの方が Aragonite/Vaterite が多く生成しているという結果になった。

図 3.74 にすべての試料の XRD 回折プロファイルを示す。回折プロファイルには、水酸化カルシウム、アルミネート系水和物、およびカルサイト、バテライト、アラゴナイト等の炭酸カルシウム系のピークが確認できる。これらの相の定量を行う目的で、Rietveld 分析を行い、アモルファス量とともに各相を同定することとした。

図 3.75 は、セメントの未反応鉱物量の同定結果と前述の TG による LOI の結果を用いてセメント量をそろえて鉱物の反応率を求めたものである。SDS100 では長い養生期間にともなって若干水和が継続した傾向が確認できるものの、概ねすべてのサンプルの反応率は同定度であると言える。

図 3.76 は水酸化カルシウム量を比較したものである。各種の炭酸カルシウムが析出しているが、その反応に多く寄与したと考えられるのは、水酸化カルシウムと C-S-H (XRD 分析上ではアモルファス相) であるので、ここで示す必要がある。ここに示されるように Irr, Ref のいずれの場合にも水酸化カルシウム量は少なくなっており、大部分が炭酸カルシウムに変化したものと想定される。また、Irr と Ref の水酸化カルシウム量は概ね同程度であり、ガンマ線照射の影響があったとは考えにくい。

図 3.77 にアモルファス相の定量値を示す。上述したようにこのアモルファス相の大部分は C-S-H とかんがえられる。ここに示されるように Irr, Ref のいずれの場合でもアモルファス量が小さくなっており、炭酸化の影響で C-S-H 量も小さくなったものと考えられる。

図 3.78 にはカルサイト、アラゴナイト、バテライトの各種の炭酸カルシウムの析出量について、未反応セメント、試験前試験体、照射後およびリファレンス試験体について比較した結果である。ここであきらかになったのは、ガンマ線照射によって析出するカルサイトの量は小さくなり、アラゴナイトおよびバテライトの生成量が増えた、ということである。この傾向は SDS100 および SDS50 の両方で確認できており、ガンマ線照射によって炭酸カルシウムの相が変化することが明らかとなった。

図 3.79 はアルミネート系水和物の同定結果である。既往の研究から、長期間の乾燥によってエトリングイト量は減少することが明らかとなっている⁴⁶。また、Monocarbo

⁴⁴ DTG ピーク

⁴⁵ C-S-H の炭酸化

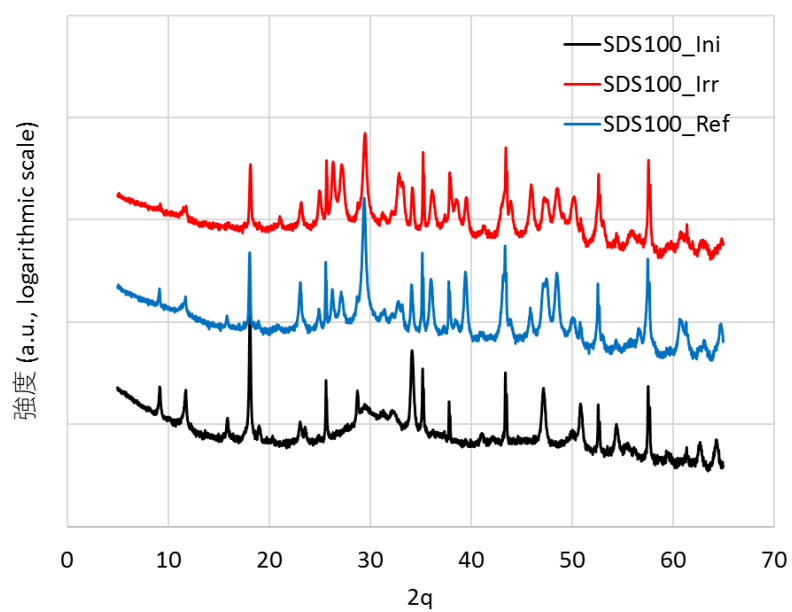
⁴⁶ I. Maruyama, Y. Nishioka, G. Igarashi, K. Matsui, Microstructural and bulk

aluminate は、PH が低下すると不安定になる⁴⁷。ハイドロガーネットは乾燥・PH 変化の両者に比較的鈍感であるので⁴⁸、今回得られた実験は既往知見と整合性のある結果となっている。

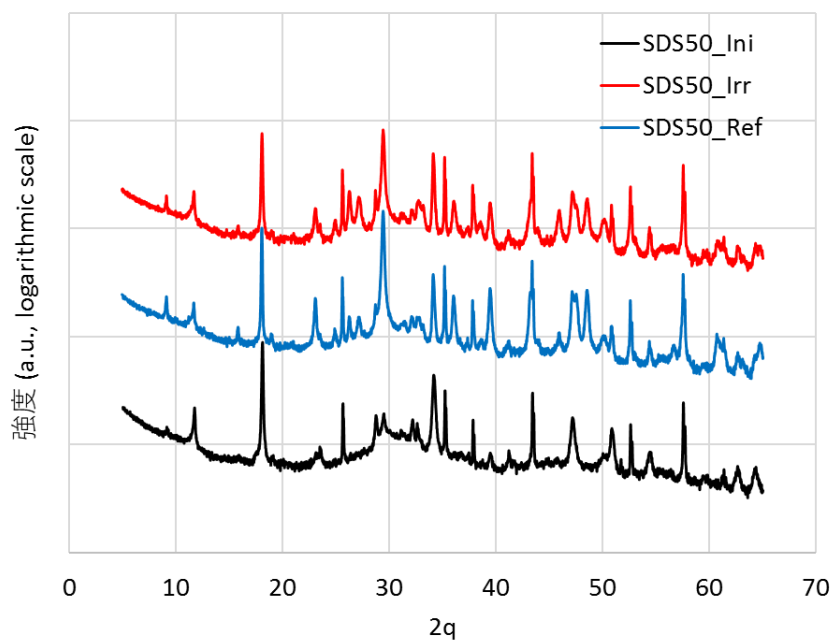
property changes in hardened cement paste during the first drying process, Cement and Concrete Research, 58, (2014) 20-34.

⁴⁷ Matschei, T., B. Lothenbach and F. P. Glasser (2007). "The role of calcium carbonate in cement hydration." Cement and Concrete Research 37 4 551-558.

⁴⁸ Matschei, T., B. Lothenbach and F. P. Glasser (2007). "The AFm phase in Portland cement." Cement and Concrete Research 37 2 118-130.

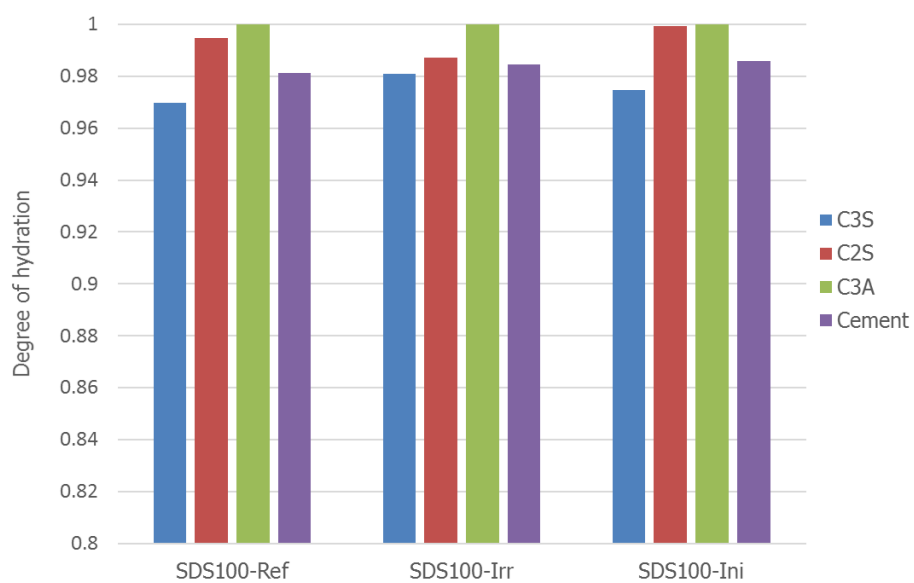


(I) SDS100

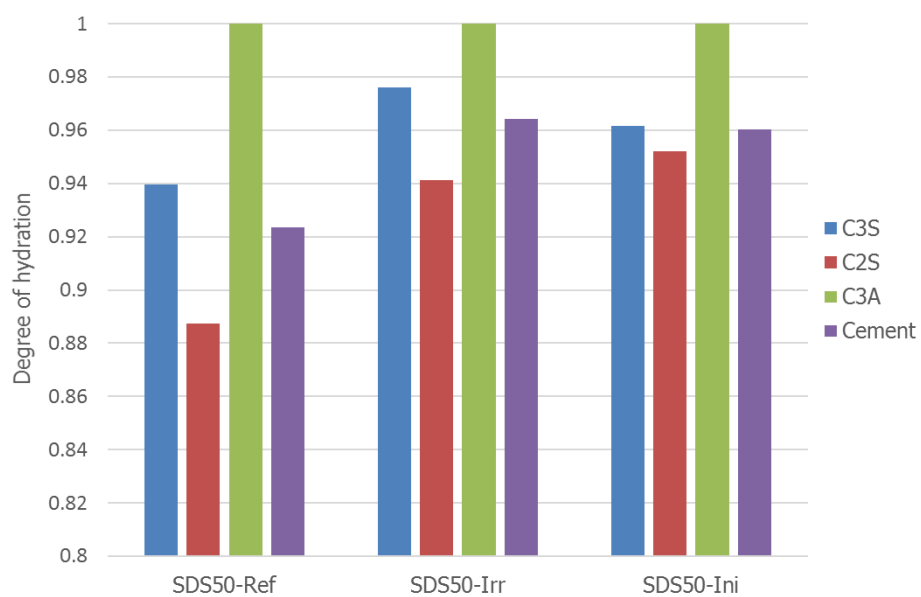


(II) SDS50

図 3.74 X線回折チャート

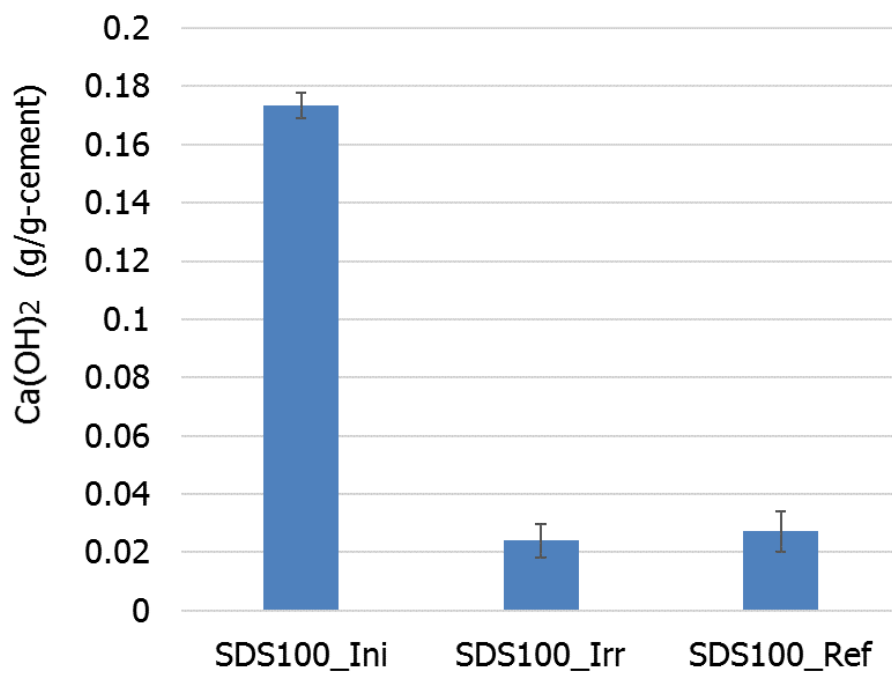


(I) SDS100

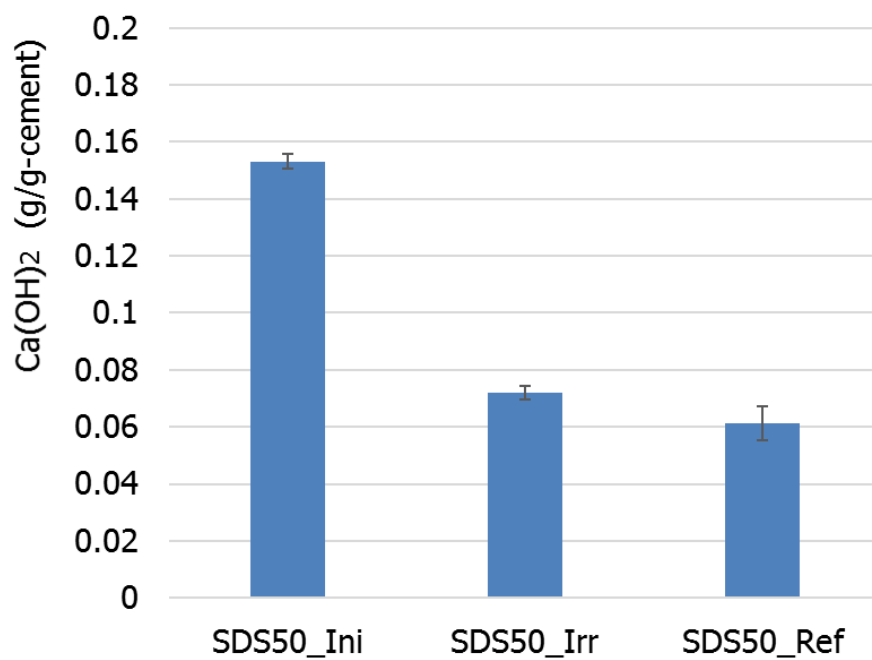


(II) SDS50

図 3.75 各試験体におけるセメント鉱物の水和率



(I) SDS100



(II) SDS50

図 3.76 各試験体における水酸化カルシウム量

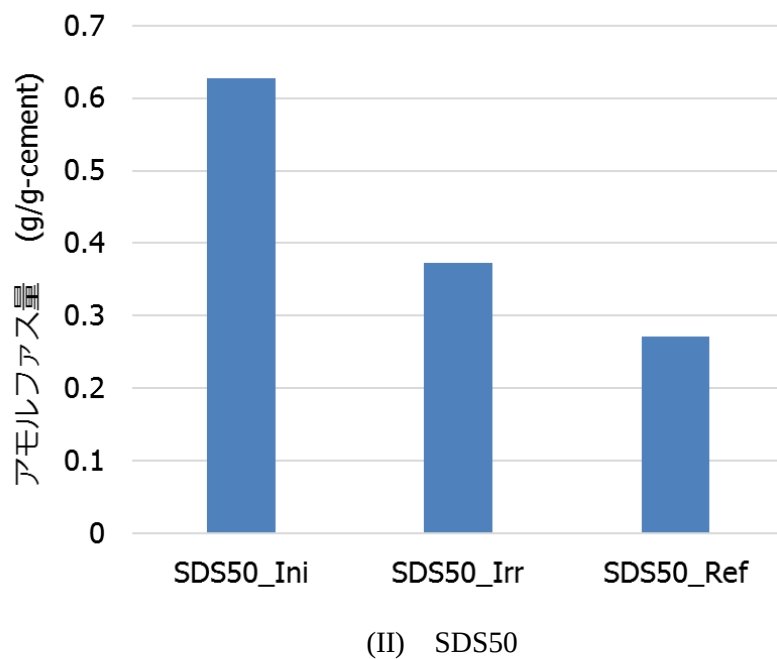
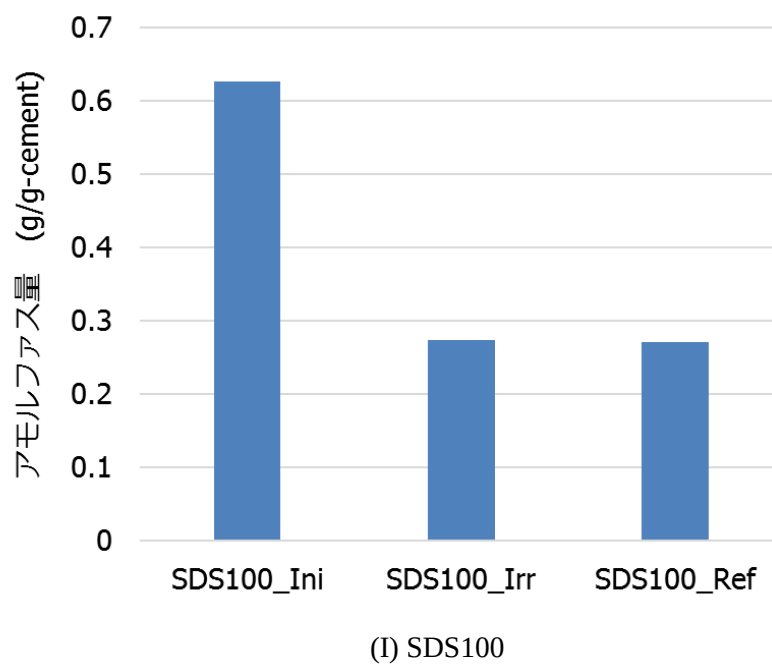
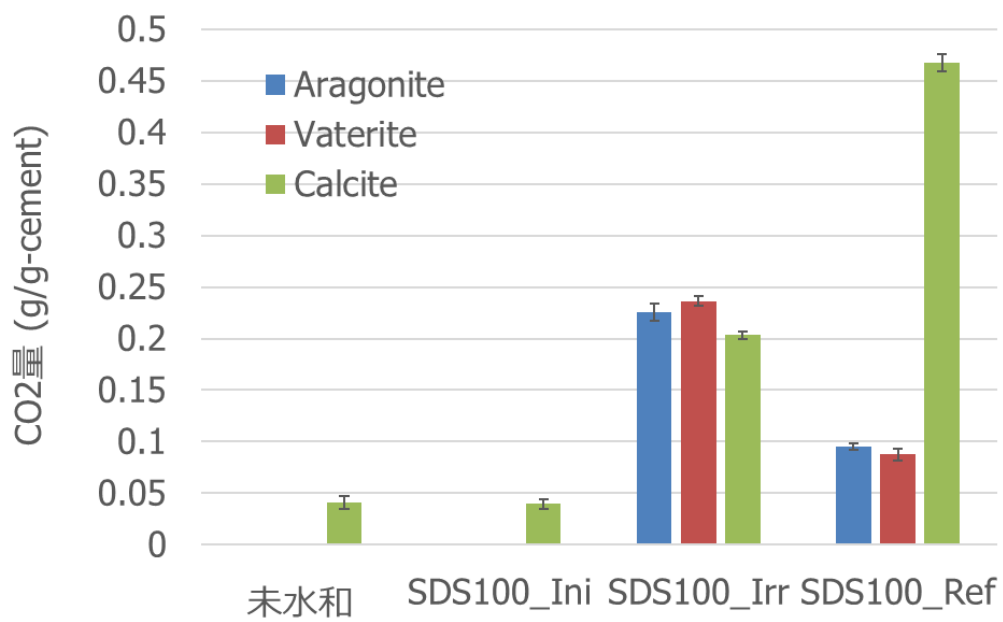
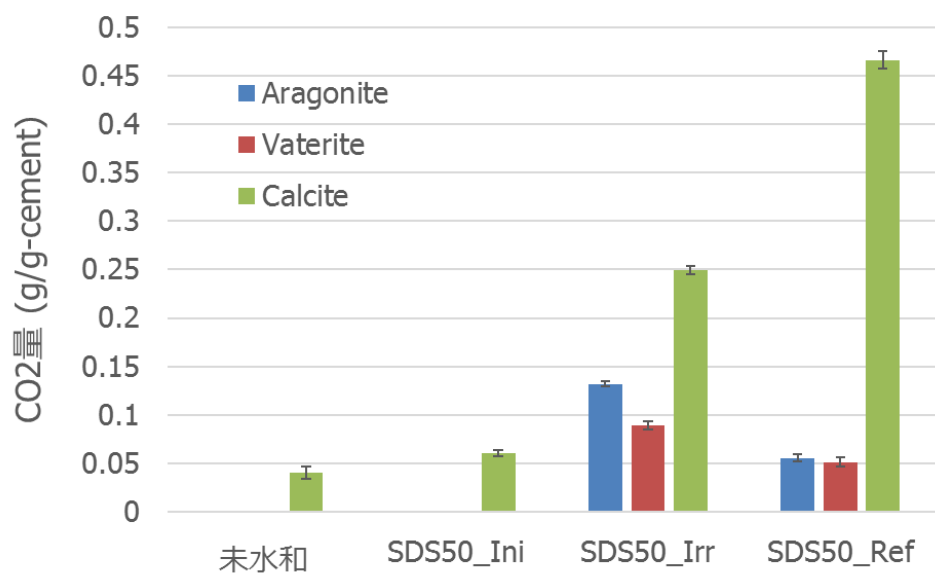


図 3.77 各試験体におけるアモルファス量

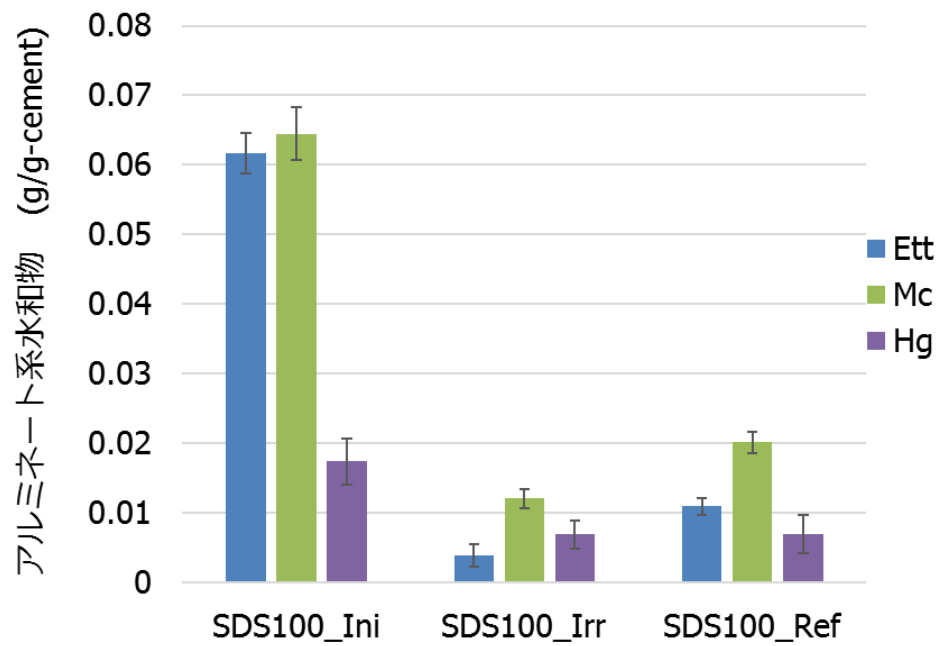


(I) SDS100

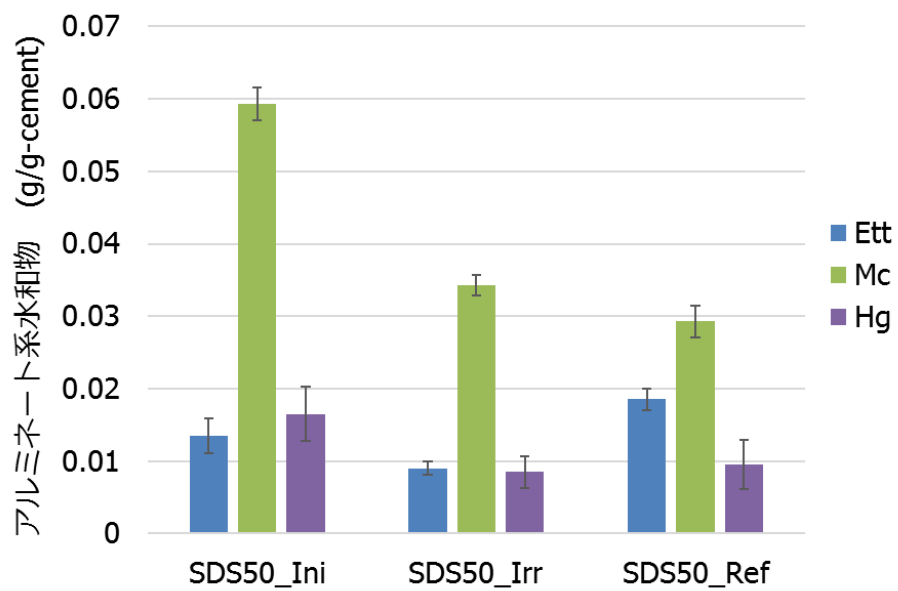


(II) SDS50

図 3.78 各炭酸カルシウムの量の比較



(I) SDS100

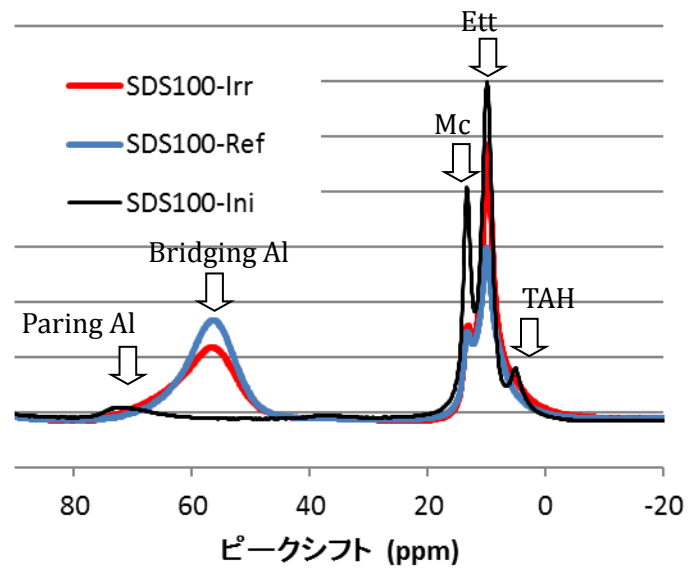


(II) SDS50

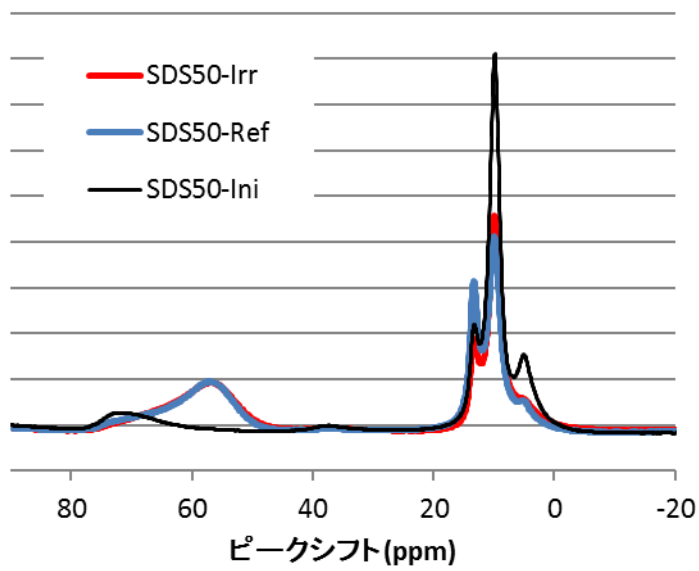
図 3.79 各試験体におけるアルミネート系水和物量

図 3.80 に ^{27}Al -NMR の測定結果を示す。70ppm 程度に確認できるピークは、C-S-H 中の Al の 6 配位のピークである。照射後これらのピークはなくなり、58ppm 程度のピークに変化する。これは、C-S-H 中の Si をブリッジング位置のものであり、乾燥や Ph の低下によって分解したアルミネート系水和物からの Al がこの位置に移動したものと推察される。乾燥と中性化によってエトリンガイト (Ett) とモノカーボネートアルミネート (Mc) は XRD の結果でわかるように量が減少するので NMR シグナルでも同様の傾向が確認された。また、サードアルミネート (TAH) は、いまだ帰属のわかっていないアルミに帰属するピークではあるが、乾燥と中性化によってピークがなくなる (あるいは減少する) ことが明らかになった。

図 3.81 に ^{29}Si -NMR の測定結果を示す。図に示される Q0 は未反応鉱物に対応するものであり、SDS100 ではほぼ同一、SDS50 の場合、若干、試験期間中に反応が進行したと考えられる。Q1 は、シリケートチェーンの端部の Si を示しており、Q2 は、シリケート 2 つと手を結ぶ Si を示している。Irr, Ref 両者において Q3~Q4 (Si が 3 つ、あるいは 4 つと結合した状態) の数が増えていることからわかるように、C-S-H 中の Si は、中性化にともなって、お互いの結合を立体的にし、シリカゲルを含むシリカネットワークを増大させている。そのため、Q1 および Q2 は著しく試験期間中に低下したと考えられ、その要因は中性化による。図 3.77 に示されたように C-S-H も中性化して、炭酸カルシウムの析出を生じたと考えられ、それにともないシリカゲル化が進んだものと考えられる。Q3, Q4 の生成量は圧倒的に SDS100 の方が多く、SDS50 の生成量は少なかった。

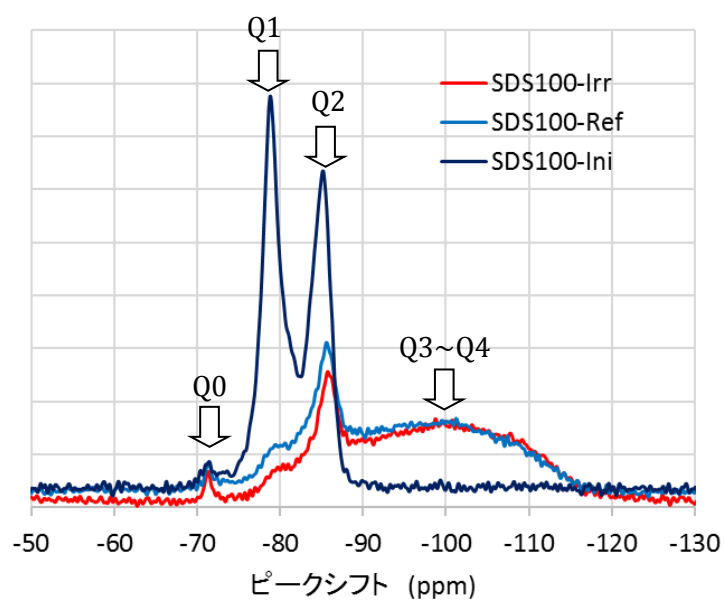


(I) SDS100

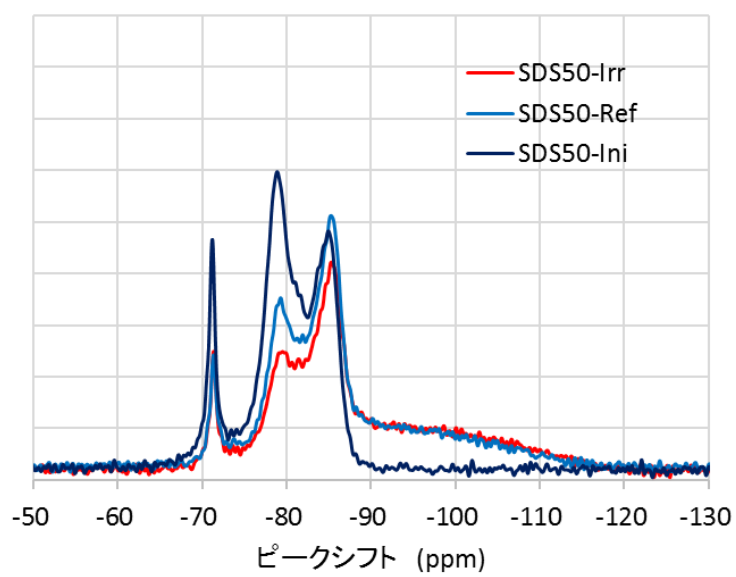


(II) SDS50

図 3.80 ^{27}Al -NMR 測定結果



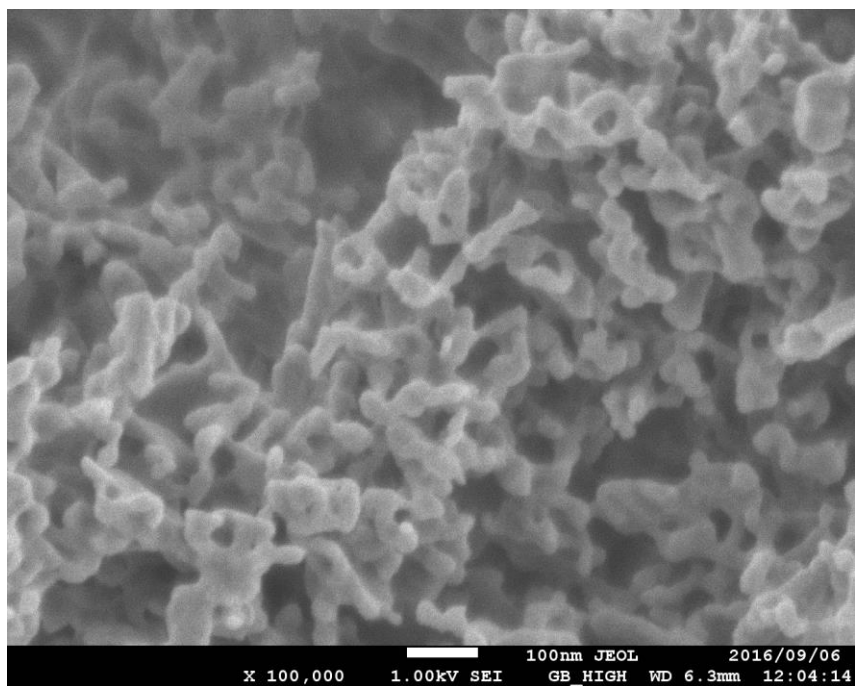
(I) SDS100



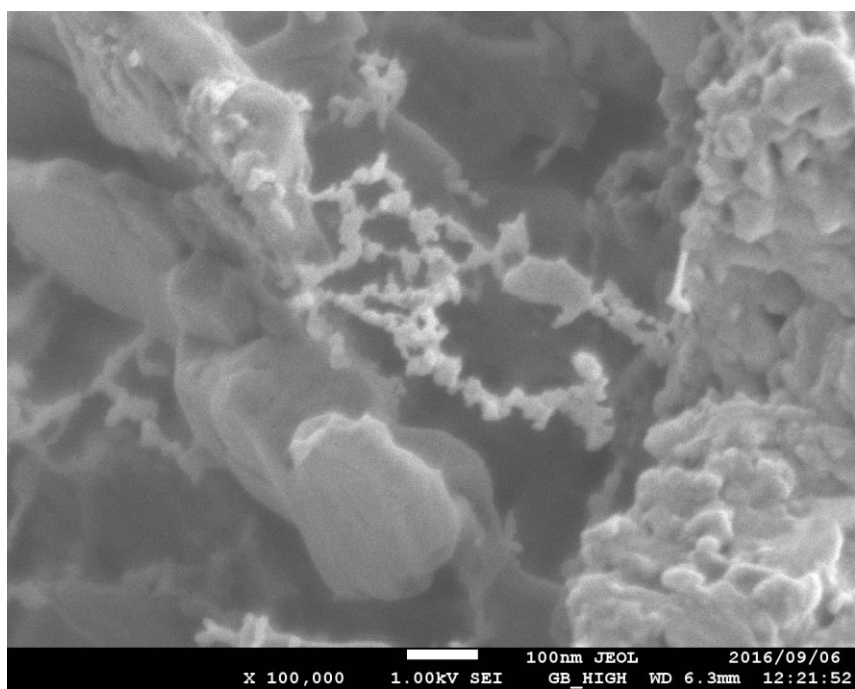
(II) SDS50

図 3.81 ^{29}Si -NMR 測定結果

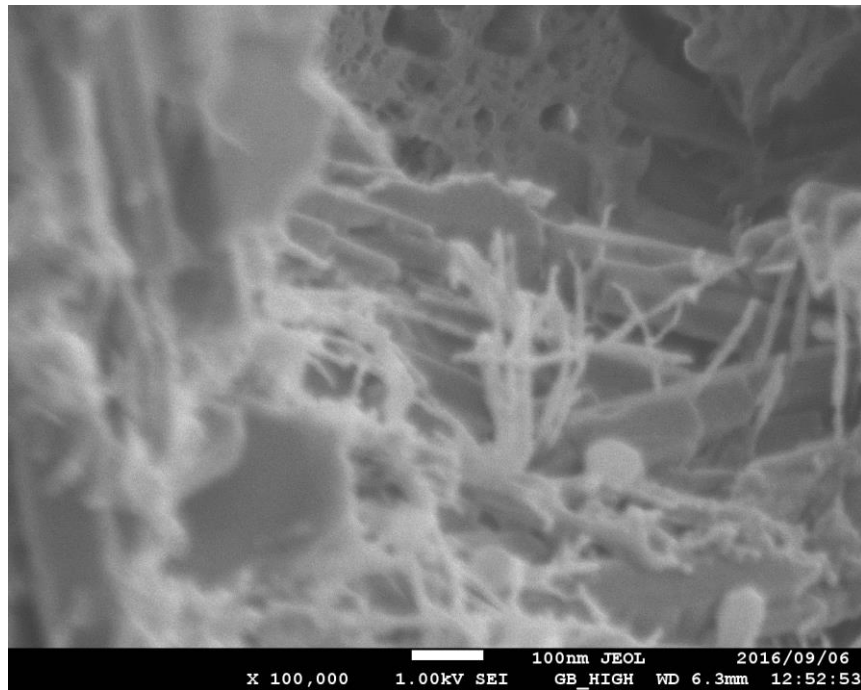
図 3.82, 図 3.83 に FE-SEM 観察結果を示す。SDS100-Irr と SDS100-Ref について確認したが, 特徴的な差異を定量的に評価することはできなかった。いずれについても, C-S-H の周囲に析出した炭酸カルシウム (比較的ゲル状), 水酸化カルシウム周囲に析出した炭酸カルシウム, および多孔な空間で成長した針状の炭酸カルシウムが確認できた。これらは, バテライト, カルサイト, アラゴナイトの特徴と類似している。バテライトは, 炭酸カルシウムとしての密度が低いことから, C-S-H の凝集構造の中でバテライトが析出すると, C-S-H の凝集構造間の空隙を埋める役割を果たすと考えられる。この観点で, もし, C-S-H の凝集構造 (空隙を保持した構造) から, 一部の C-S-H に応力集中が生じて破断の支配的要因となると考えた場合には, バテライトの析出によって応力集中が一部緩和すると考えられる。特に SDS100-Irr の C-S-H 周囲の炭酸カルシウムの析出は, C-S-H 周囲に団粒状に析出しおり, 特徴的な析出傾向が確認できた。バテライトの析出が強度増大に大きな影響がある可能性が高い。



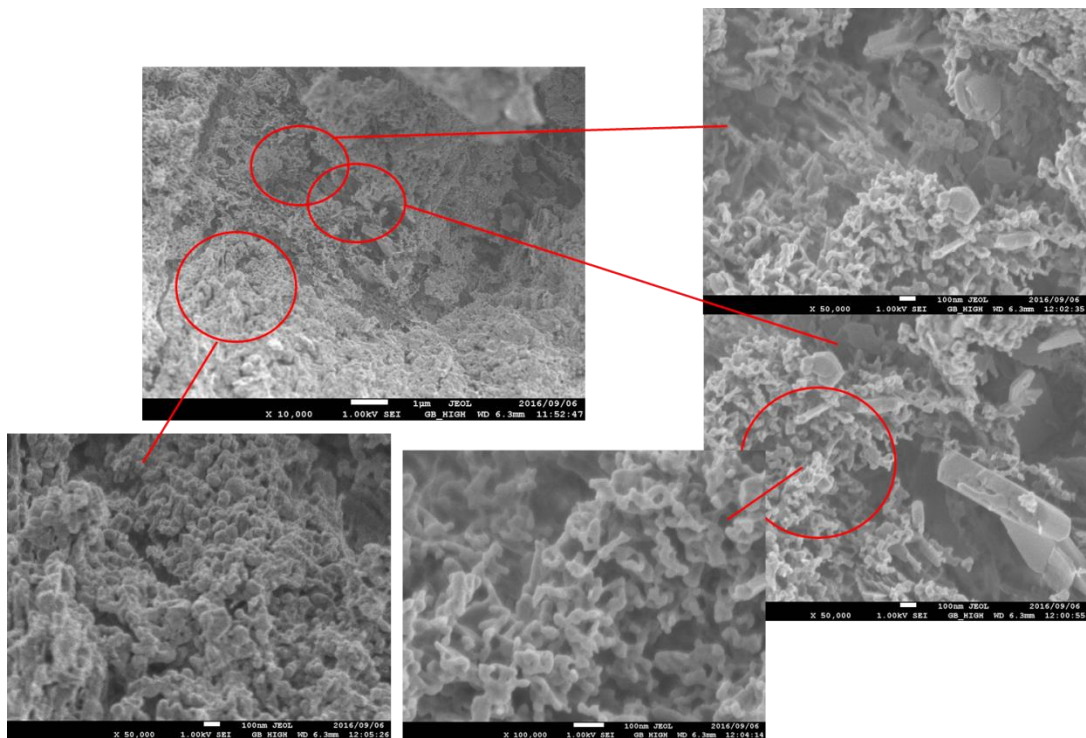
(a) C-S-H 周囲に析出した炭酸カルシウム



(b) 水酸化カルシウム周囲に析出した炭酸カルシウム

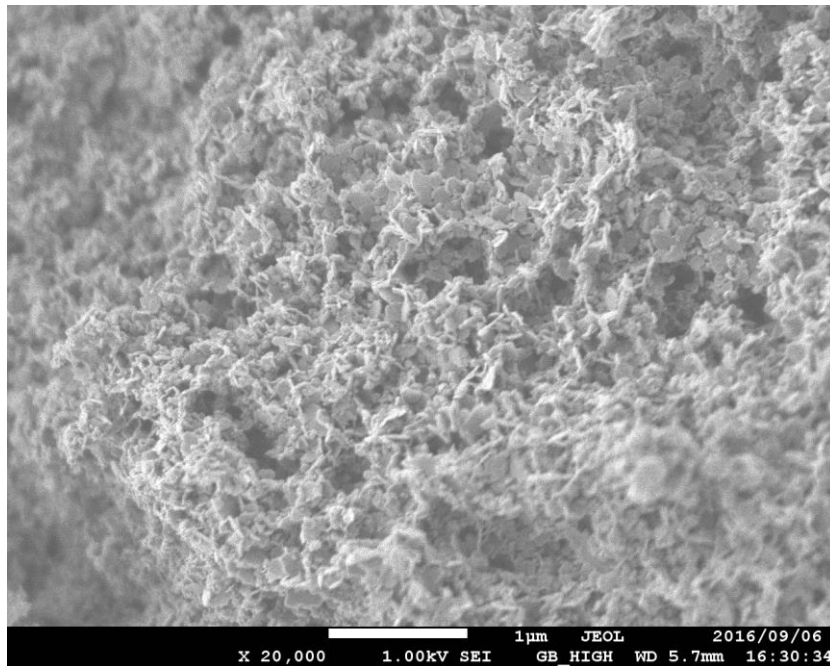


(c) 針状に発達した炭酸カルシウム（アラゴナイトと考えられる）

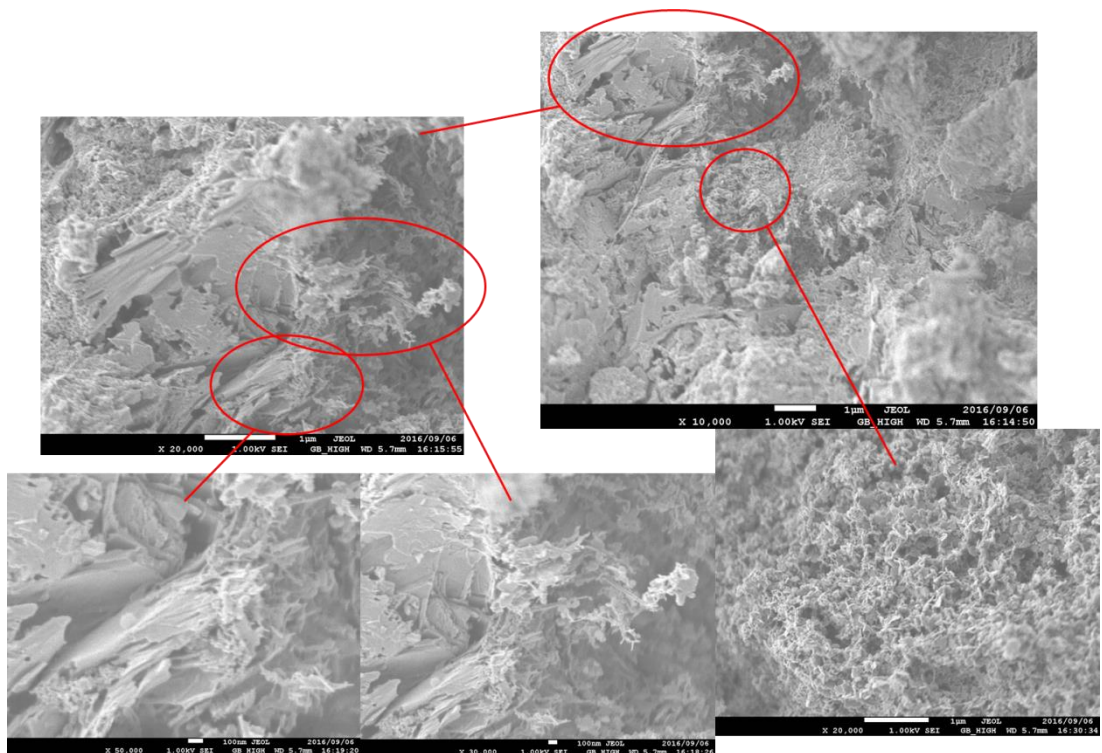


(d) 空隙構造とそこから確認できる特徴的な炭酸カルシウム

図 3.82 FE-SEM 観察結果 (SDS100-Irr)



(a) C-S-H および水酸化カルシウム周囲に析出した炭酸カルシウムの状況



(b) 空隙構造と析出物の関係

図 3.83 FE-SEM 観察結果 (SDS100-Ref)

図 3.84 に SAXS の測定結果および Disc Fractal モデルによるフィッティング結果を示した。ここで、Disc とは C-S-H の凝集構造がディスク状になっているとの指摘^{49,50,51,52}から検討を行ったものである。SDS100-Ini は、水-固体界面の影響を適切に考慮できないため、Disc Fractal モデルによるフィッティングはできなかった。その他は、非常に広い範囲でフィッティングができていることがわかる。フィッティングで得られたパラメータについて図 3.85 に取りまとめた。

ガンマ線照射および乾燥により C-S-H の凝集構造は微細化する傾向が確認された。SDS100 の場合、SDS100-Irr と SDS100-Ref に大きな違いはない。乾燥により凝集構造は C-S-H の層間方向に平均積層数が増えている。なお、現在信じられている C-S-H 層間の平均距離は 1.1~2.0 nm 程度である。SDS50 の場合、積層数は大きくことなり、乾燥を継続したものは変化していないのにたいして、ガンマ線を当てたものは小さくなっている。これは照射中にガンマ発熱により温度が増大し、平衡相対湿度が低下したため、乾燥が厳しくなった結果であると考えられる。SDS50-Irr の値は SDS100-Irr とほぼ同様であることが確認できる。

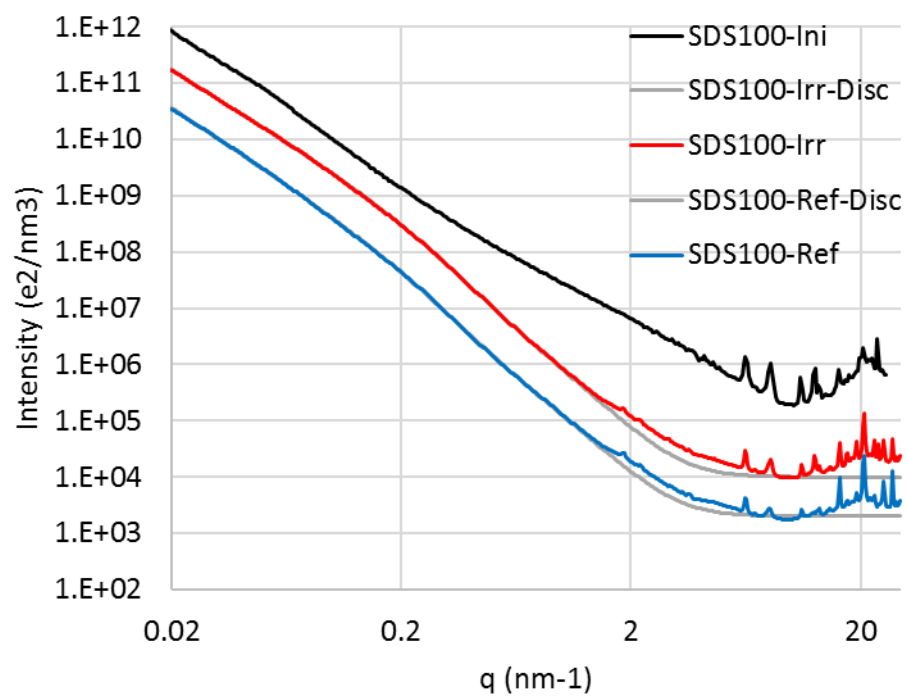
図 3.85(b)にはフラクタル次元を示した。ここに示されるようにフラクタル次元は、Ref のケースでもっとも大きくなる。フラクタル次元が大きいということは、構造がより 3 次元的に充填されていることを意味するが、カルサイトが析出する系においてはフラクタル次元が大きくなるといえる。逆にバテライト等が析出する系では、C-S-H の凝集構造を保持しながら、バテライトの析出が生じていると考えられ、C-S-H の凝集構造を保持するかどうか、Irr と Ref の違いとなっていると言える。

⁴⁹ H. M. Jennings, Refinements to colloid model of C-S-H in cement: CM-II, Cement and Concrete Research, 38 (2008) 275-289.

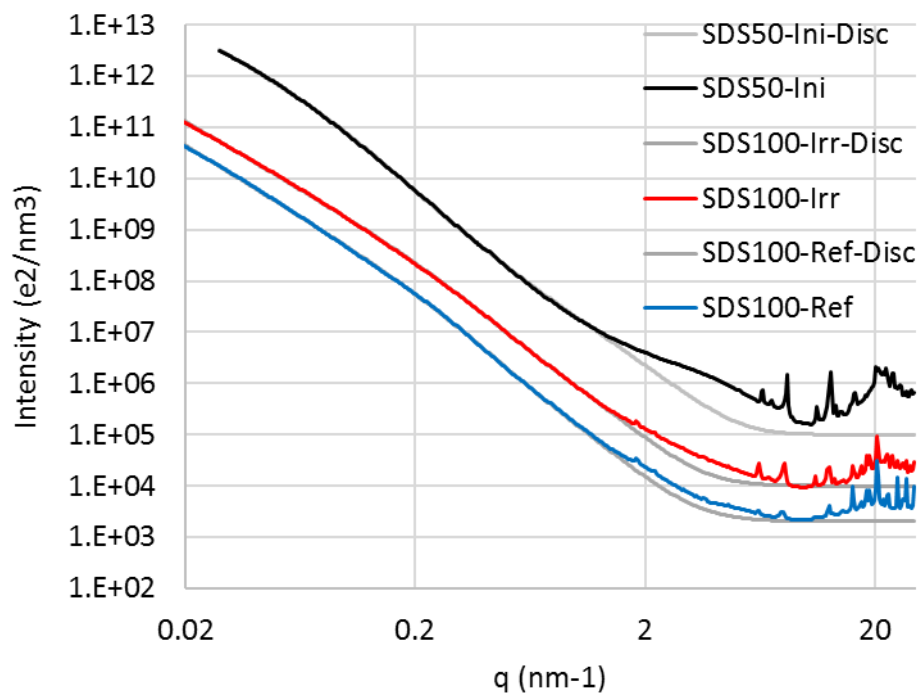
⁵⁰ A. Nonat, The structure and stoichiometry of C-S-H, Cement and Concrete Research, 34 (2004) 1521-1528.

⁵¹ W.-S. Chiang, E. Fratini, P. Baglioni, D. Liu, S.-H. Chen, Microstructure Determination of Calcium-Silicate-Hydrate Globules by Small-Angle Neutron Scattering, The Journal of Physical Chemistry C, 116 (2012) 5055-5061.

⁵² I. Maruyama, N. Sakamoto, K. Matsui, G. Igarashi, Microstructural changes in white Portland cement paste under the first drying process evaluated by WAXS, SAXS, and USAXS, Cement and Concrete Research, (2016).

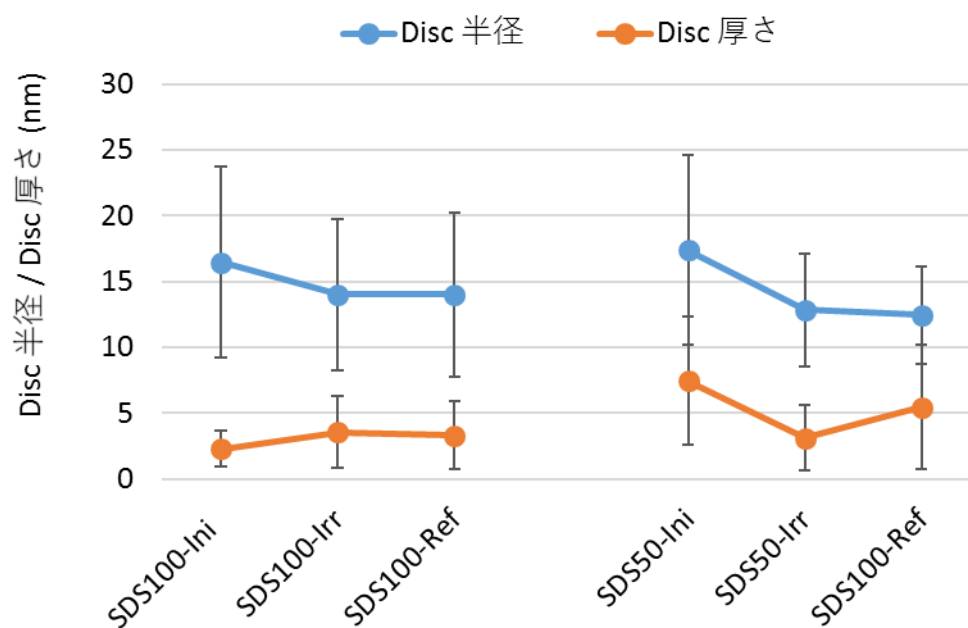


(I) SDS100

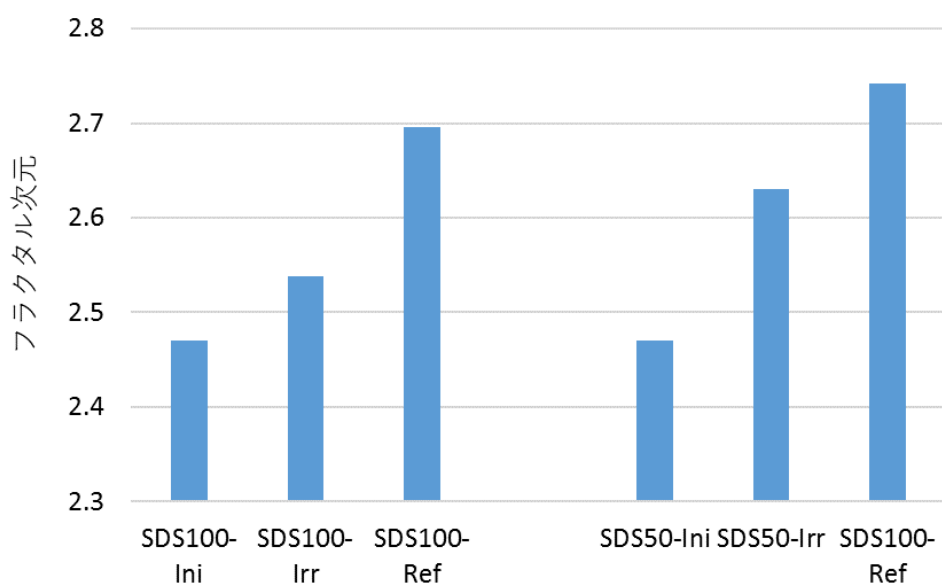


(II) SDS50

図 3.84 SAXS の測定結果および Disc モデルによるフィッティング



(a) ディスクの厚さと直径についてのフィッティング結果



(b) フラクタル次元

図 3.85 Disc モデルによるフィッティングで得られた特徴量

水蒸気吸着試験の結果を図 3.86 に示す。ここでは、曲げ試験時の含水率と平衡含水率の関係も示す。乾燥にともなって、水蒸気吸着の最大吸着量は概ね低下傾向を示す。（ただし、40%RH 以下の場合、極高湿度域の吸着量が粗大空隙の増大によって上昇する場合もままある。この傾向は W/C や水和率によっても異なるので厳密には定性的にも表現が難しい。）

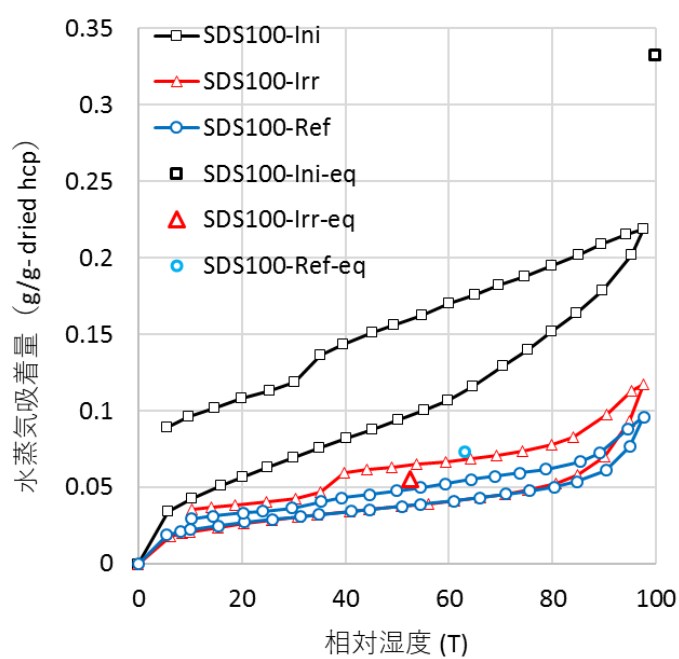
SDS100 の場合、SDS100-Irr と SDS100-Ref の吸着傾向はほとんど同時であるものの、SDS100-Irr の最大吸着量が大きく、また、40%RH 近傍の脱着線上でキंकが確認できる。SDS100-Ref では確認できない。すなわち、おなじ炭酸化で表面積もほぼ同じような状態であるが、この 40%RH 近傍、すなわち C-S-H 層間に由来すると考えられるキंक⁵³が炭酸化によって消失している。

この傾向は、SDS50 でも再現されており、バテライトが析出する系では、C-S-H の微細構造が保存されていると考えられる。

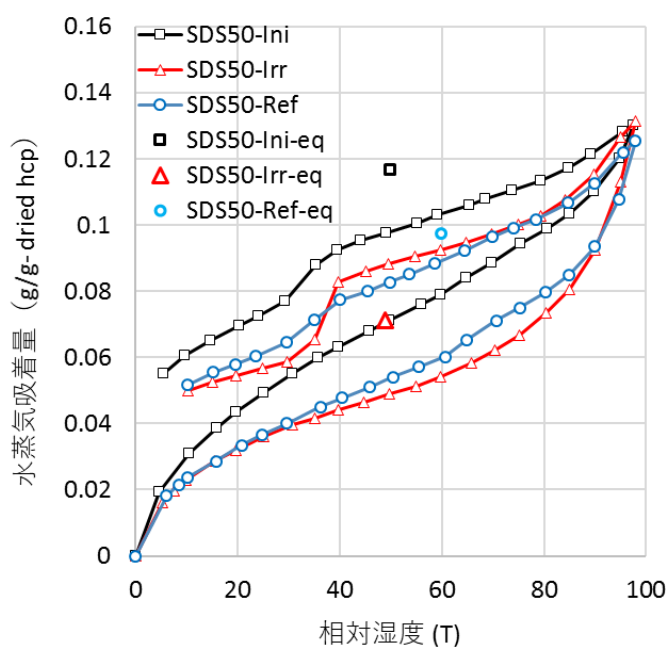
C-S-H が炭酸化しながら、微細構造を保存する（あるいはもとの結晶構造を保存する）現象を Psudomorph と呼び、ALC などのトバモライトでも同様な現象が確認されている。今回、バテライトを生成しつつ、セメントペーストの強度が増大した原因は、

- 1) ガンマ発熱により温度が増大し厳しい乾燥条件にさらされ、C-S-H 層間が小さくなり、Si-O-Ca-O-Si 結合が生成された強度が増大した。
- 2) ガンマ線照射環境下では、この状態の C-S-H 構造が一部保持されながら、炭酸化がすすんだが、その際にバテライトが生成され、C-S-H の凝集構造を保持しつつバテライトに置き換わった。その為、常温に戻った際も照射中の状態が保持されたまま（層間が吸湿によってもとにもどらずに）強度が増加したまま保存された、と推察された。

⁵³ I. Maruyama, G. Igarashi, Y. Nishioka, Bimodal behavior of C-S-H interpreted from short-term length change and water vapor sorption isotherms of hardened cement paste, Cement and Concrete Research, 73 (2015) 158-168.



(I) SDS100

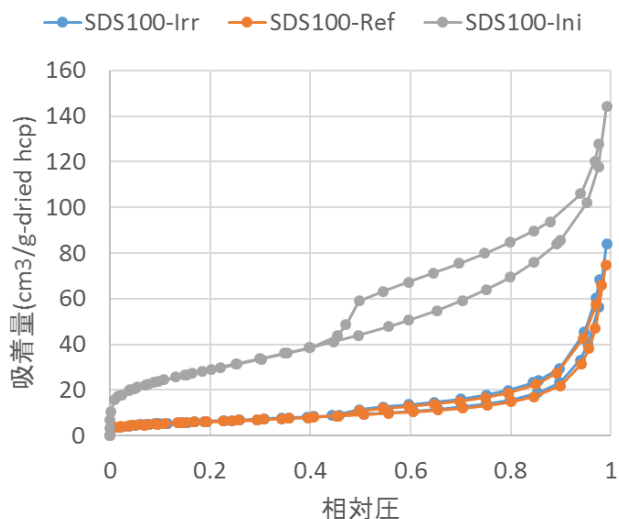


(II) SDS50

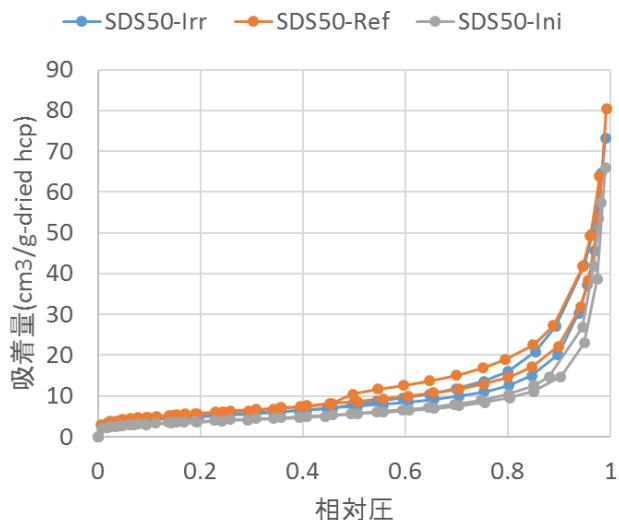
図 3.86 水蒸気吸着試験結果および曲げ試験時の平衡湿度と含水率(-eq)

図 3.87 に窒素吸着試験結果について示す。ここに示されるように SDS100-Ini のサン

プル以外は、吸着量が著しく小さくなった。この傾向は、乾燥によって外部 C-S-H が凝集・圧密変化を示すときに生ずる。照射と非照射サンプルの違いには大きな差異は生じなかった。SDS100-Ini と SDS50-Ref では、脱着線の 50%RH 近傍にキックが確認された。このキックは 5nm 以下のネック径が存在するときに生ずるキャビテーションによるものと考えられている。乾燥によってこの 5nm 以下のネック径に閉じられる空隙が小さくなってキックが潰れるが、SDS50-Ref については、中性化の過程でキックが生成されることとなったようであるが、そのメカニズムはまだ不明点が多い。



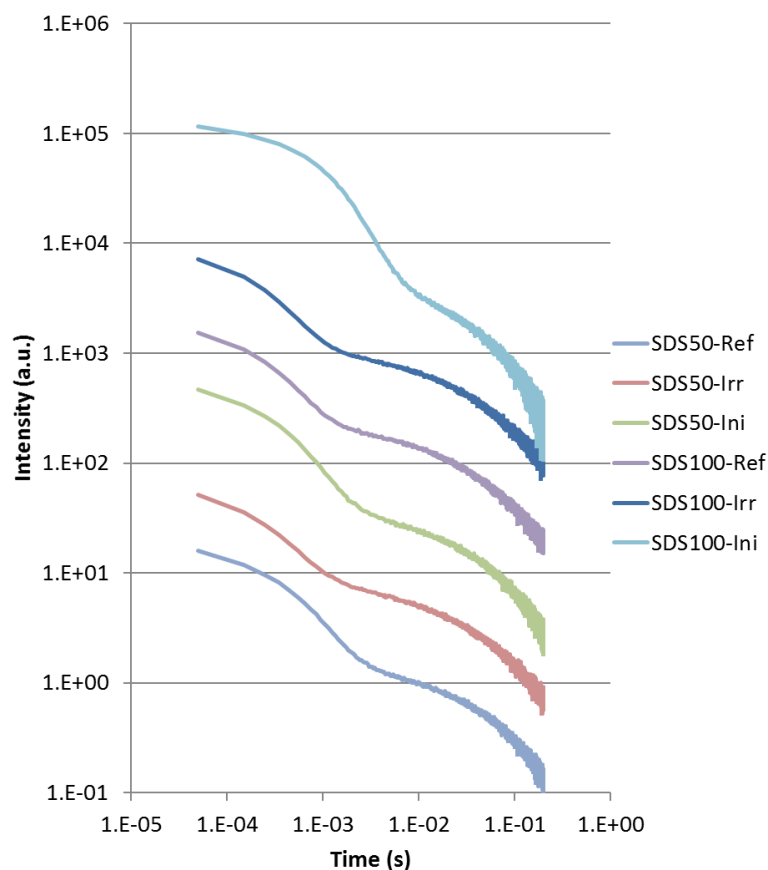
(I) SDS100



(II) SDS50

図 3.87 窒素吸着試験結果

図 3.88 に T2 緩和時間の測定結果を示す。試験体の多くはほぼノイズだけの領域まで測定が進んでいる。ここで示されるように SDS100-Ini では大きな減衰が確認されたが、他のサンプルでは同様な傾向が見られた。これらの傾向をより視認しやすくするため、各 T2 成分の頻度分布を BRD アルゴリズムによって計算した結果が、図 3.89 である。ここに示されるように、照射、非照射サンプルもいずれも 10^{-4} s に一番多くの頻度が確認できる。既往の研究から⁵⁴、この緩和時間に存在する水は C-S-H の層間水と考えられている。SDS100 の場合、この領域が非照射、照射の両者にわたってピーク幅が狭まっており、C-S-H が乾燥によって、同様な層間距離になったものと推察された。一方、SDS50 の場合、この領域の水は 2 つに別れる挙動が確認され、特に SDS-Ref の方では、緩和時間が大きい側にシフトする傾向が見られた。このことは C-S-H 周辺の空隙が粗大化傾向にあることを示す。乾燥時に生ずる C-S-H の中性化は、このように空隙構造が粗大化する傾向を示すが、一方で、ガンマ線照射下にある中性化では、その傾向は小さい。このことは、C-S-H の層間が保持され、強度が高いまま維持されている実験データと整合的な結果であると考えられる。



⁵⁴ Muller, A. C. A., K. L. Scrivener, A. M. Gajewicz and P. J. McDonald (2013). "Densification of C-S-H Measured by 1H NMR Relaxometry." The Journal of Physical Chemistry C 117 1 403-412.

図 3.88 各試験体の T_2 緩和挙動 (オフセット 5 倍)

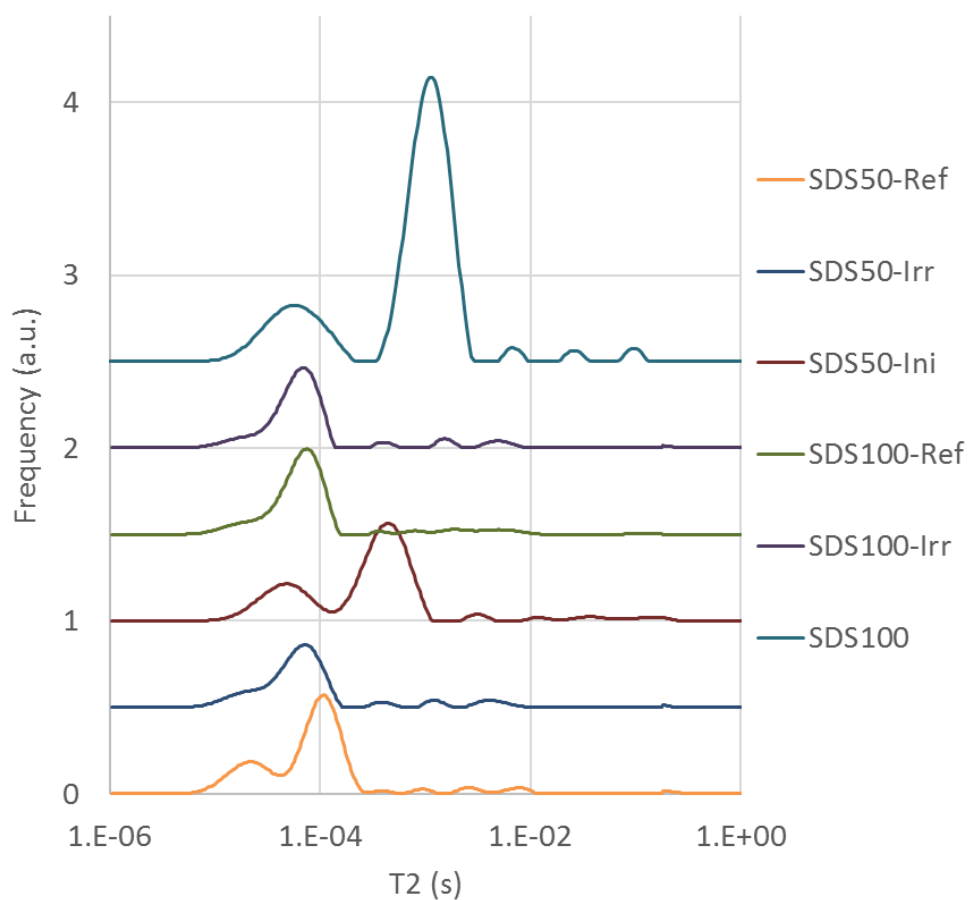


図 3.89 T_2 緩和時間の頻度分布 (オフセット 0.5)

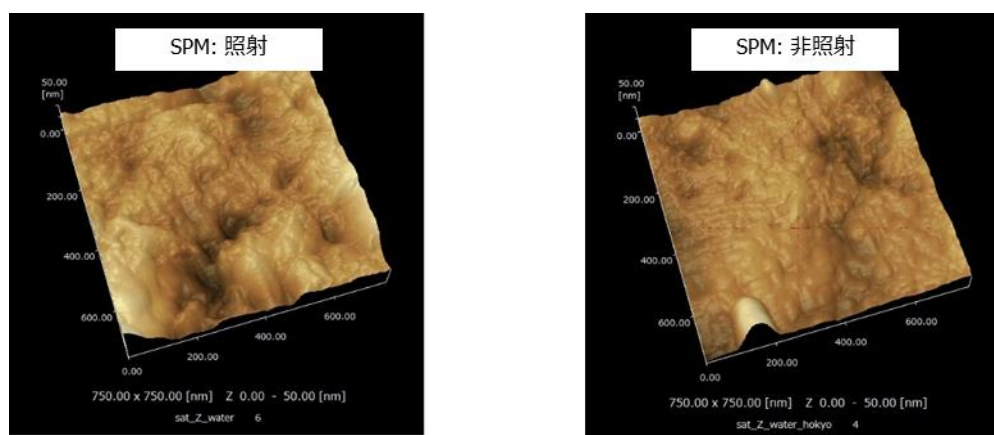


図 3.90 SPM による SDS100-Irr と SDS100-Ref の形状評価

図 3.90 に SPM による外部 C-S-H の形状評価結果について示す。当初, SAXS 等で見られるようなナノスケールオーダーの凝集構造の違いが測定されると推察され, 直接的評価により実証する予定であった。しかしながら, ここに示されるように測定結果では特徴量の評価は実施できなかった。SAXS であれば, 材料の平均的寸法変化をマルチスケールに捉えることができるが, SPM では視野の選定の問題もあり, 局所構造の把握に最適である。バテライトで覆われた C-S-H の形状は, 内部の C-S-H 構造を反映していると考えられるが, その差は本測定の範囲では見出すことができなかった。

3. 3 物理特性試験（骨材）

3. 3. 1 試験概要

ガンマ線照射試験では、セメントペースト試験体を用いてガンマ線との相互作用について分析するとともに、コンクリート試験体を用いてガンマ線がコンクリートの物理特性に及ぼす影響について検討している。これらの試験結果の分析より、ガンマ線がセメントペーストおよびコンクリートに及ぼす影響については、かなり明確になってきている。

一方、「平成 22 年度高経年化対策強化基盤整備事業」（成果報告書 H23. 6）では、骨材単体のガンマ線照射試験を実施した。その際の結果の一部を図 3. 91 および図 3. 92 に示す。砂岩と石灰石ともに、圧縮強度については、ガンマ線照射による強度上昇の傾向が見られ、特に、砂岩での上昇が著しい。また、静弾性係数については明確な傾向は見られなかった。

また、「平成 23 年度高経年化技術評価高度化事業」（成果報告書 H24. 3）では、中性子照射による主な劣化要因は骨材の膨張であるとの仮説を証明するために、中性子照射試験に用いる骨材を選定するための検討を行った。この段階で乾燥により収縮する骨材が比較的多く存在することが明らかとなっており、中性子照射で膨張しても乾燥で収縮すると中性子照射の影響を捉えられない。そこで、当時の研究では、中性子照射で膨張しやすいと考えられる石英の含有量が大きく、ガンマ線照射による乾燥でも骨材が収縮しないという特性の骨材を選定するために、全国から骨材サンプルを収集し分析を行った。乾燥収縮の小さい骨材に共通の特性としては、粘土鉱物の含有量が少ないことがわかっていたので、石英と粘土鉱物の含有量について分析し、これらをパラメータとして骨材を選定した。

そこで、今年度は、ガンマ線照射による骨材の強度変化について検討するために、骨材単体の照射試験を行った。強度変化の原因としては、骨材の乾燥収縮により骨材の密度が増大し、骨材強度が上昇することが考えられるので、この仮説を検証するための実験を計画した。

ガンマ線照射試験用に選定した骨材を表 3. 19 に示す。また、図 3. 93、図 3. 94 および図 3. 95 に、ガンマ線照射試験用に選定した骨材について、XRD による分析結果を示す。なお、石灰石については、産地による差異がほとんど無いと考えられるため、選定のために XRD による分析は実施していない。ただし、今後、データ整備の一環として XRD による分析を実施する予定である。以下に各骨材の特徴を示す。

SS4（硬質砂岩）：砂岩として典型的なプロファイルである。緑泥石と雲母粘土鉱物は粘土鉱物ではあるが、一般には吸水/脱水に伴い、膨張/収縮するものではない。緑泥石や雲母粘土鉱物の幅広い(シャープでない)ピークや左右非対象なピークは、吸水/脱水に伴い、膨張/収縮する粘土鉱物であるスメクタイトとの混合層鉱物である可能性

もある。ただし、その特定にはさらなる検討が必要である。

SS6 (凝灰岩)：産地と石英の卓越した粉末X線回折のプロファイルなどから、チャートが周辺に貫入した花崗岩により焼かれた変成岩（チャートホルンフェルス）である可能性が強い。もともとチャートは主に石英からなり粘土鉱物は少量、さらに含まれていた粘土鉱物の大部分も熱変成により結晶性の高い雲母に再結晶している。

GV2 (砂利)：緑泥石と雲母粘土鉱物は粘土鉱物ではあるが、一般には吸水/脱水に伴い、膨張/収縮するものではない。緑泥石や雲母粘土鉱物の幅広い(シャープでない)ピークや左右非対象なピークは、吸水/脱水に伴い、膨張/収縮する粘土鉱物であるスメクタイトとの混合層鉱物である可能性もある。ただし、その特定にはさらなる検討が必要である。

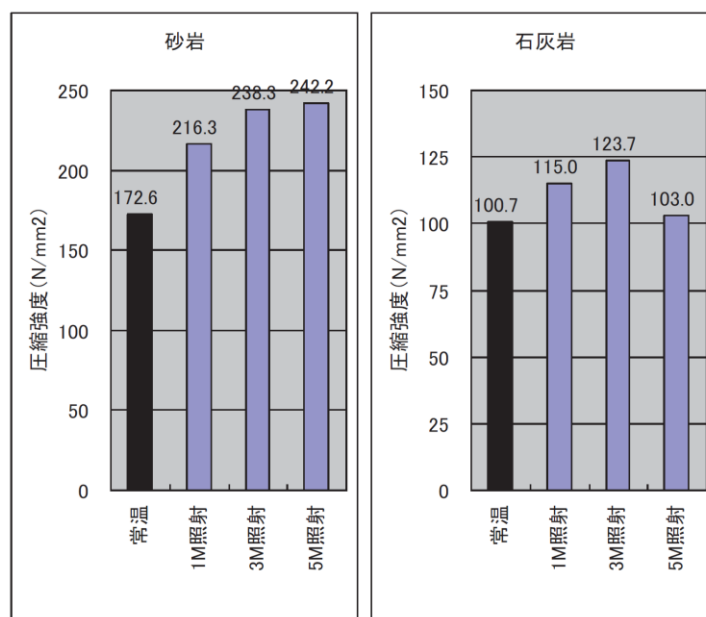


図 3.91 骨材の圧縮強度変化

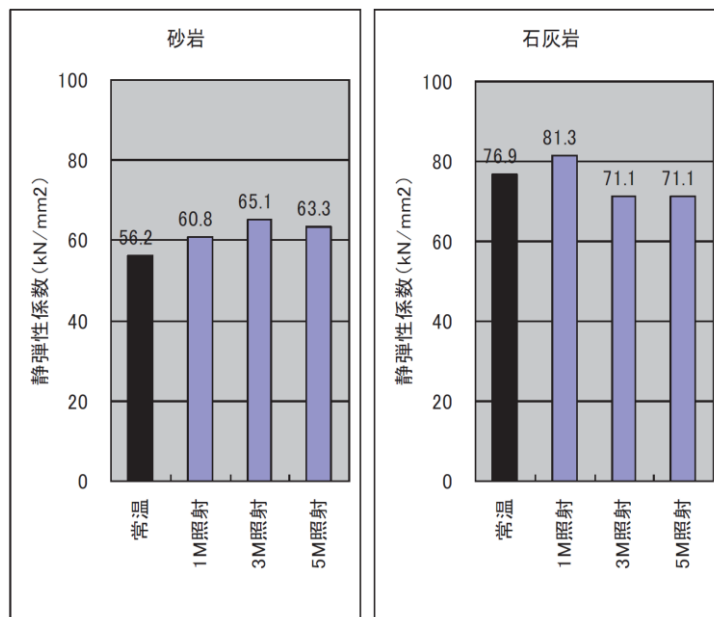


図 3.92 骨材の静弾性係数変化

表 3.19 ガンマ線照射試験における骨材選定

骨材の種類		試料名	産 地	特 徴	ガンマ線照射	中性子照射
粗骨材	硬質砂岩	SS1	埼玉県	典型的な砂岩 石灰石含有量が多い		○
		SS2	静岡県	典型的な砂岩 SiO_2 と Al_2O_3 が SS5 と同等		○
		SS3	岐阜県	砂岩ではなくチャート SiO_2 の含有率 90%以上 石英が SS6 と同等に卓越		
		SS4	東京都	典型的な砂岩 SiO_2 と Al_2O_3 が SS2 と同等	○	○
		SS5	—	Al_2O_3 の含有率が高い 雲母のピークが特徴的		
	凝灰岩	SS6	愛知県	砂岩ではなくチャート 石英が SS3 と同等に卓越	○	○
	石灰石	—	大分県	—	○	○
	砂利	GV1	神奈川県	SiO_2 の含有率が少なめで 石英、長石類、角閃石の ピークが GV4 と類似		
		GV2	静岡県	砂岩起源と考えられる SiO_2 の含有率が 75%程度 石英が GV3 と同等に卓越	○	○
		GV3	埼玉県	砂岩起源と考えられる SiO_2 の含有率が 77%程度 石英が GV2 と同等に卓越		
		GV4	富山県	SiO_2 の含有率が少なめで 石英、長石類、角閃石の ピークが GV1 と類似		
細骨材	山砂	SD1	静岡県	SiO_2 の含有率が 78%程度 石英が SD2 と同等に卓越		
		SD2	静岡県	SiO_2 の含有率が 76%程度 石英が SD1 と同等に卓越		○

ハッチングは、骨材単体のガンマ線照射試験のために選定した骨材に対応している。
あわせて、中性子照射のためのコンクリート試験体作成で用いた骨材を示す。

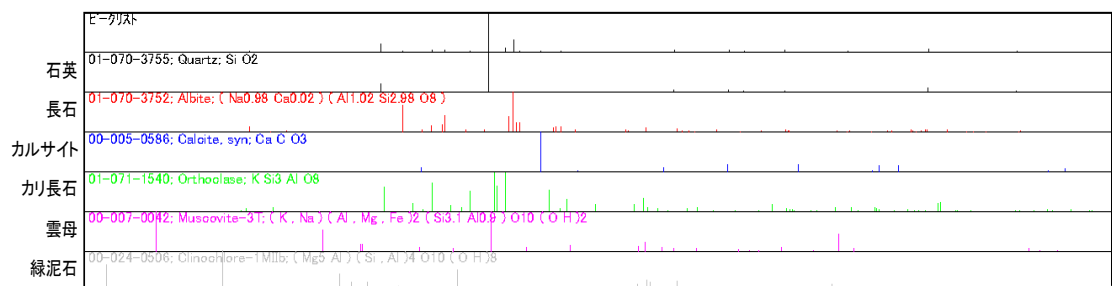
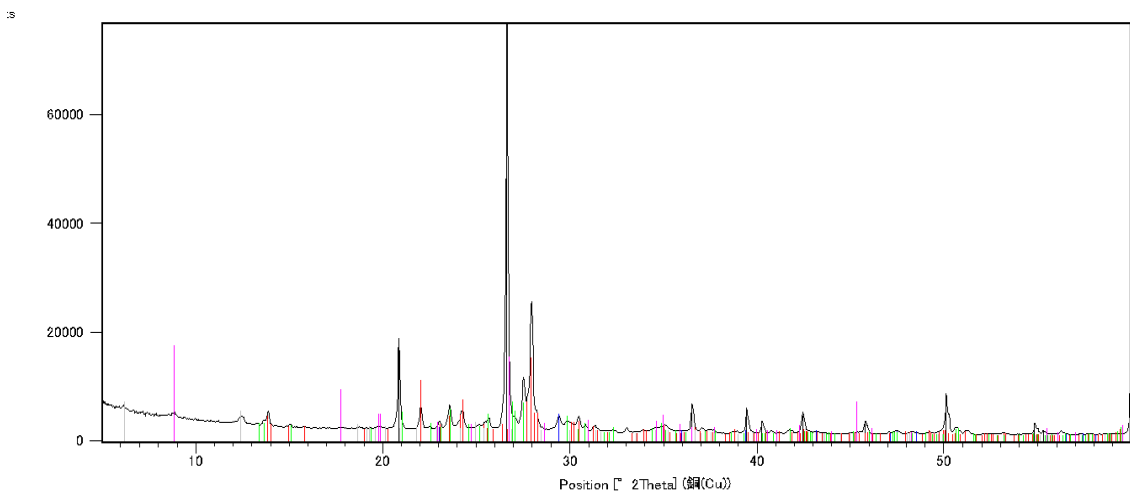
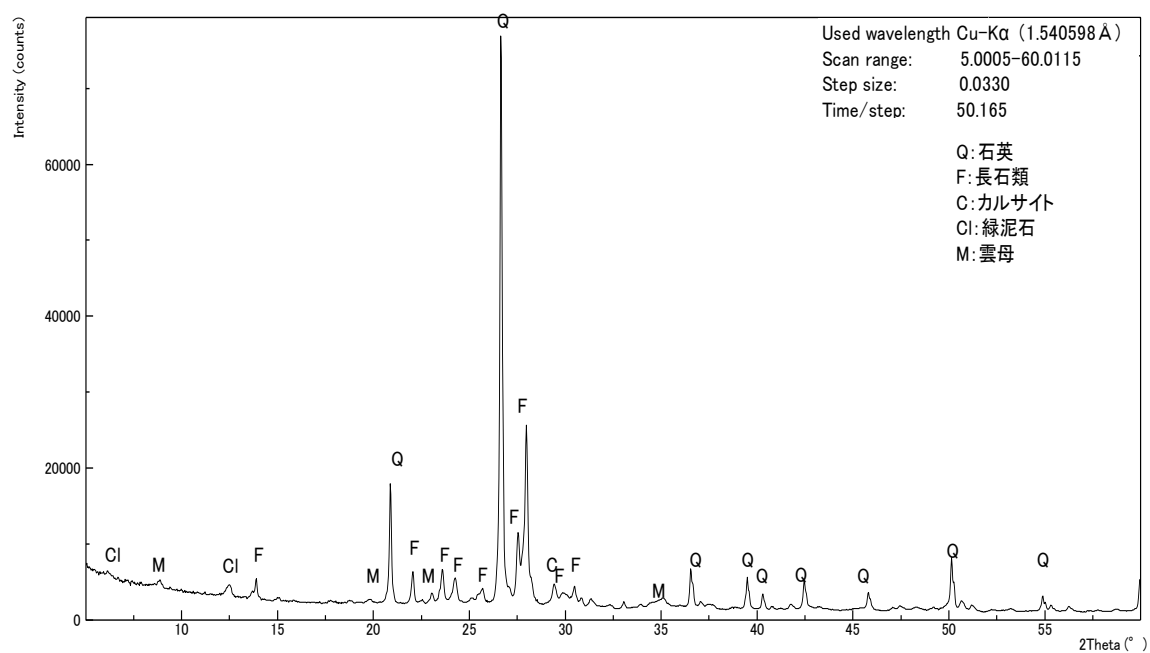


図 3.93 XRD 試験結果 (SS4)

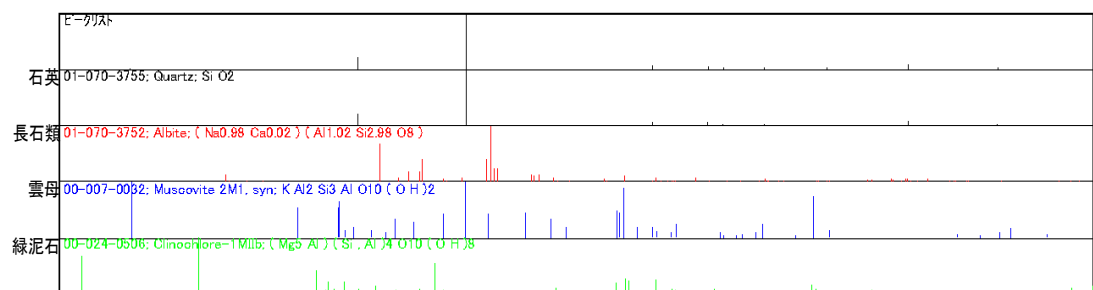
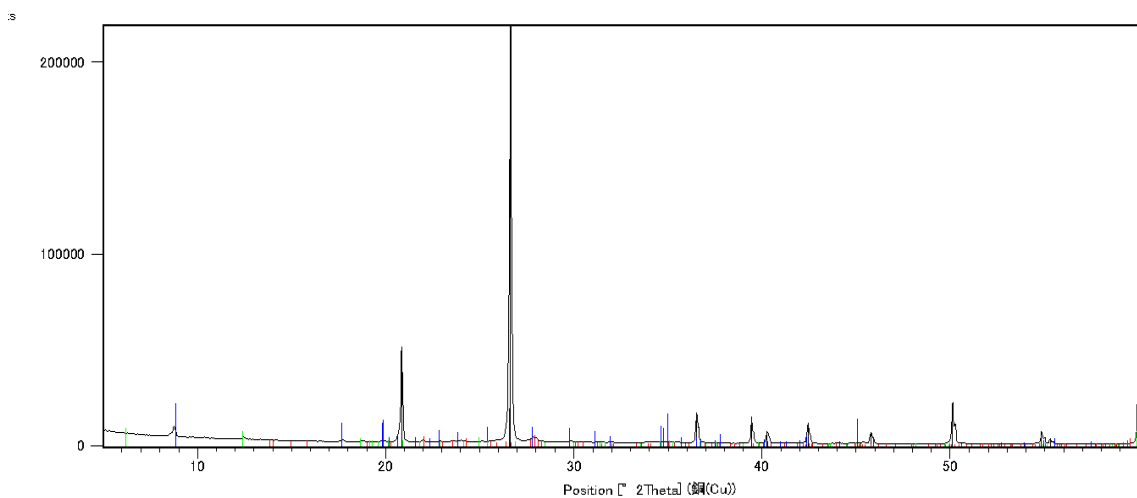
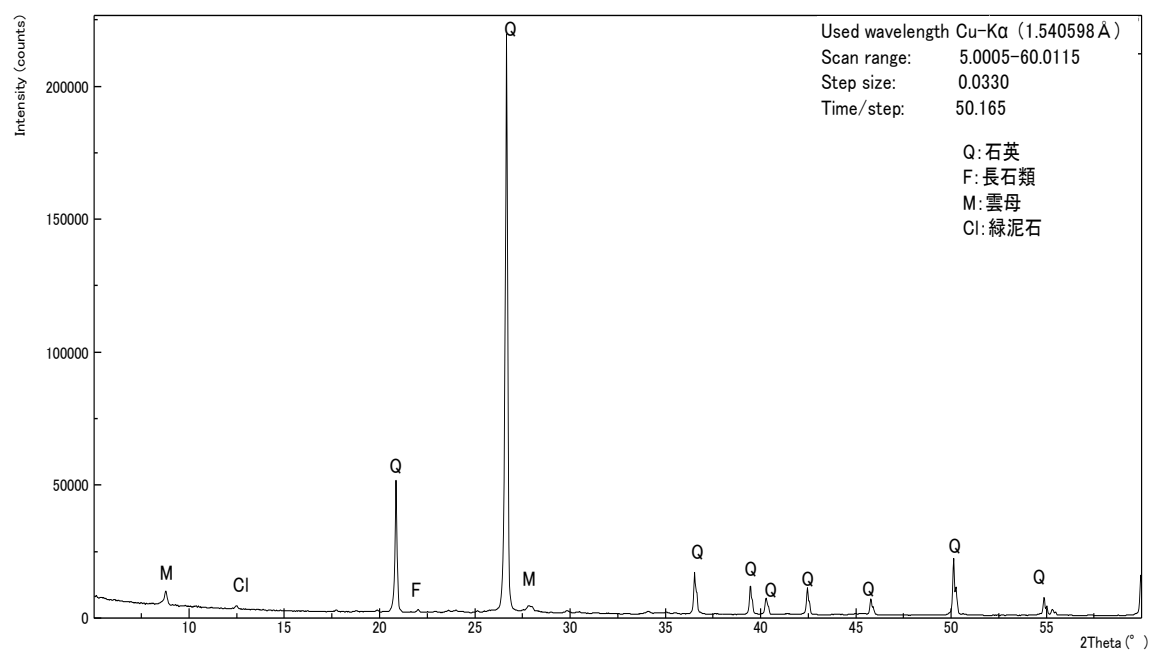


図 3.94 XRD 試験結果 (SS6)

3. 3. 2 試験・計測方法

本研究では、ガンマ線照射が骨材単体に及ぼす影響について把握するために、4種類の骨材から試験体を取得して、ガンマ線による照射試験を実施する。選定した骨材を以下に示す。

A：凝灰岩（碎石）	[凝灰岩(SS6)]
B：砂岩（砂利（砂岩起源））	[砂利(GV2)]
C：砂岩（碎石）	[硬質砂岩(SS4)]
D：石灰岩（碎石）	[石灰石(－)]

骨材の試験体サイズは直径4～5cm、長さ径比2の円柱試験体とする。なお、所定の試験体サイズの取得が困難な場合は、直径4～5cm、長さ径比2より小さめのサイズでもよい。Bの骨材については砂利なので、大きめの砂利を採取し、円柱試験体を取得する。岩石試料の状況を図3.96に示す。

骨材試験体による試験ケースを表3.20に示す。同一条件での試験体数を、ばらつきが大きい場合を想定して、5体とする。ガンマ線照射期間は、4ヵ月、8ヵ月、16ヵ月の3水準とし、JAEA高崎研究所の照射施設で実施する。コンクリートと同様に非照射・加熱試験を行うこととし、ガンマ線照射試験における温度計測結果を1週間毎に平均化し加熱する。

また、ガンマ線の照射影響評価では、コンクリートとは異なり、照射期間の変化に伴う強度変化を考慮する必要がないので、管理試験は照射開始時のみとする。試験体は、各骨材について35体となる。

また、表3.20に65℃加熱による試験ケースを示す。これは、照射効果研究会での指摘に対応するもので、65℃での急速な乾燥が骨材の物理特性に及ぼす影響を把握するために実施する。加熱影響評価では、管理試験を加熱開始時に実施する。

表 3.20 骨材試験体による試験ケース数

	照射影響評価				加熱影響評価	
	4ヵ月 (2.5×10^4)	8ヵ月 (5.0×10^4)	16ヵ月 (1.0×10^5)	照射 開始時	恒量 達成時	加熱 開始時
ガンマ線 照射試験	5体	5体	5体	—	—	—
非照射 加熱試験	5体	5体	5体	—	—	—
65℃加熱	—	—	—	—	5体	—
管理試験	—	—	—	5体		5体

()：目標照射量 (kGy)



A：凝灰岩（碎石）



B：砂岩（砂利（砂岩起源））



C：砂岩（碎石）



D：石灰岩（碎石）

図 3.96 岩石試料の状況

骨材試験体製作後、寸法・質量計測を行う。計測後水分の変化を防ぐために、アルミパック等で密閉保管する。

管理試験（10 体）については、照射試験および加熱試験を実施する前の段階で、圧縮強度試験および XRD を実施する。

照射試験および非照射・加熱試験の試験体については、試験期間終了後、速やかに、寸法・質量計測、圧縮強度試験、XRD の試験を実施する。

XRD については、強度試験を実施した 5 体の試験体の内、1 体を用いてサンプリングを行い、計測を行うものとする。

試験後の材料実験において、試験体を移送する必要がある場合には、アルミパック等で密閉保管する。

圧縮強度試験では、強度と剛性を計測する。

表 3. 21 に各骨材についての照射影響評価のための試験ケースを示す。表 3. 22 に加熱影響評価のための試験ケースを示す。また、試験体番号を表 3. 23 に示す。

骨材試験体のガンマ線照射は、コンクリート試験体と同様に、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所のコバルト第 1 照射棟の第 2 照射室で実施した。第 2 照射室の照射スペースを有効に使用するために、3 水準の照射試験を同時に行うのではなく、4 ヶ月照射と 8 ヶ月照射は同一スペースを用いて連続して実施することとした。

照射室での試験体設置のイメージ（平面）および（立面）を図 3. 97 および図 3. 98 に示す。骨材試験体、熱電対の取り付け状況、および骨材試験体の照射状況を図 3. 99～図 3. 101 に示す。

表 3.21 照射影響評価試験ケース

実施項目	ガンマ線照射試験			非照射・加熱試験			管理試験
	4 ヲ月	8 ヲ月	16 ヲ月	4 ヲ月	8 ヲ月	16 ヲ月	
寸法・質量計測 (試験実施前)	5 体	5 体	5 体	5 体	5 体	5 体	5 体
ガンマ線照射試験	5 体	5 体	5 体	—	—	—	—
非照射・加熱試験	—	—	—	5 体	5 体	5 体	—
寸法・質量計測 (試験実施後)	5 体	5 体	5 体	5 体	5 体	5 体	—
圧縮強度試験	5 体	5 体	5 体	5 体	5 体	5 体	5 体
XRD	1 体	1 体	1 体	1 体	1 体	1 体	1 体

表 3.22 熱影響評価試験ケース

実施項目	65℃加熱	管理試験
寸法・質量計測 (加熱前)	5 体	5 体
恒量達成時	5 体	—
寸法・質量計測 (加熱後)	5 体	—
圧縮強度試験	5 体	5 体
XRD	1 体	—

表 3.23 骨材試験体番号

試験種類			A 凝灰岩 (碎石)	B 砂岩 (砂利)	C 砂岩 (碎石)	D 石灰岩 (碎石)
照射 影響 評価	照射試験	4 ヶ月	A-01	B-01	C-01	D-01
			A-02	B-02	C-02	D-02
			A-03	B-03	C-03	D-03
			A-04	B-04	C-04	D-04
			A-05	B-05	C-05	D-05
		8 ヶ月	A-06	B-06	C-06	D-06
			A-07	B-07	C-07	D-07
			A-08	B-08	C-08	D-08
			A-09	B-09	C-09	D-09
			A-10	B-10	C-10	D-10
		1 6 ヶ月	A-11	B-11	C-11	D-11
			A-12	B-12	C-12	D-12
			A-13	B-13	C-13	D-13
			A-14	B-14	C-14	D-14
			A-15	B-15	C-15	D-15
	非照射 加熱試験	4 ヶ月	A-16	B-16	C-16	D-16
			A-17	B-17	C-17	D-17
			A-18	B-18	C-18	D-18
			A-19	B-19	C-19	D-19
			A-20	B-20	C-20	D-20
		8 ヶ月	A-21	B-21	C-21	D-21
			A-22	B-22	C-22	D-22
			A-23	B-23	C-23	D-23
			A-24	B-24	C-24	D-24
			A-25	B-25	C-25	D-25
		1 6 ヶ月	A-26	B-26	C-26	D-26
			A-27	B-27	C-27	D-27
			A-28	B-28	C-28	D-28
			A-29	B-29	C-29	D-29
			A-30	B-30	C-30	D-30
	管理試験		A-31	B-31	C-31	D-31
			A-32	B-32	C-32	D-32
			A-33	B-33	C-33	D-33
			A-34	B-34	C-34	D-34
			A-35	B-35	C-35	D-35
加熱 影響 評価	6 5℃ 加熱試験		A-36	B-36	C-36	D-36
			A-37	B-37	C-37	D-37
			A-38	B-38	C-38	D-38
			A-39	B-39	C-39	D-39
			A-40	B-40	C-40	D-40
	管理試験		A-41	B-41	C-41	D-41
			A-42	B-42	C-42	D-42
			A-43	B-43	C-43	D-43
			A-44	B-44	C-44	D-44
			A-45	B-45	C-45	D-45

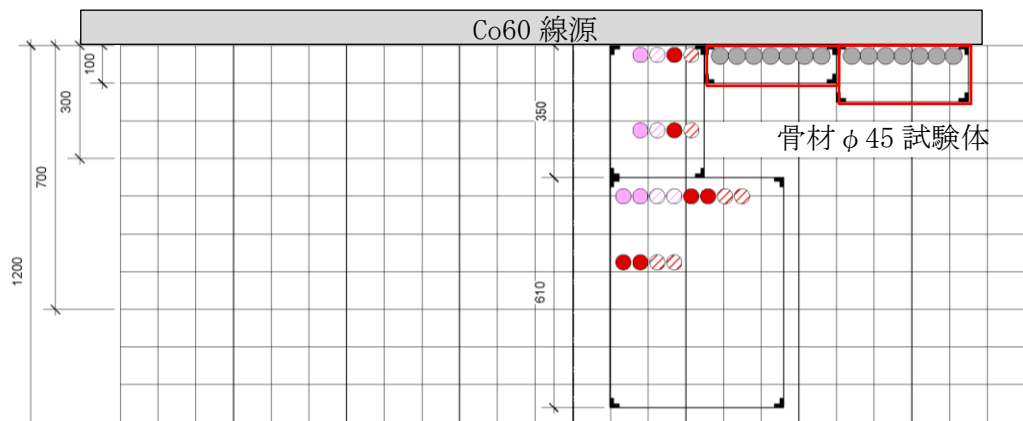
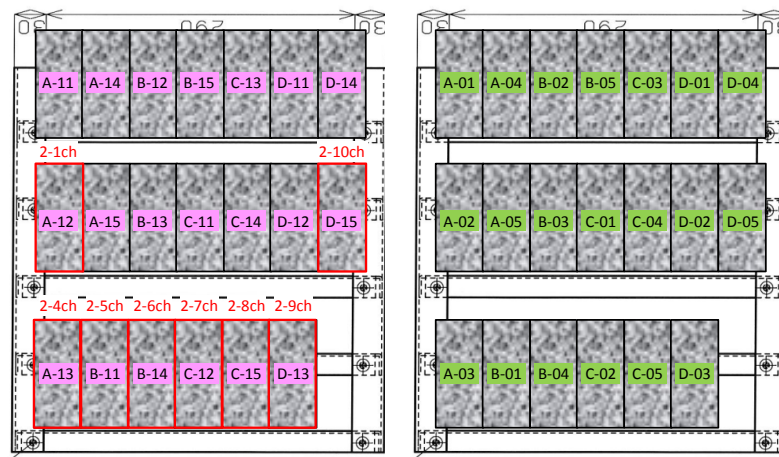
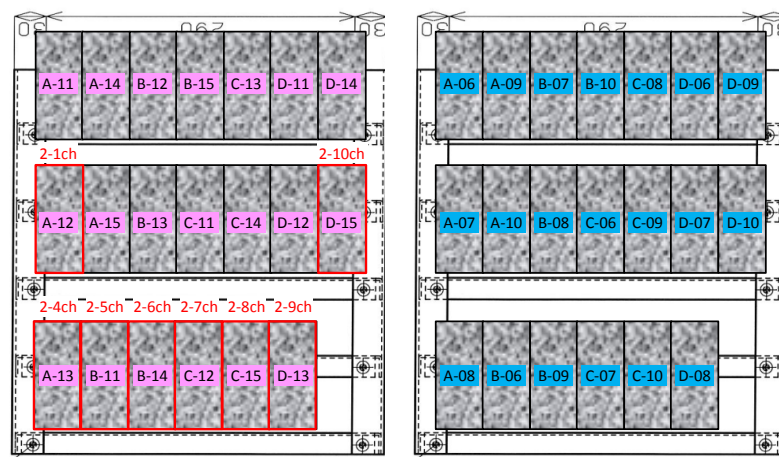


図 3.97 照射室での試験体設置のイメージ (平面)



(a) 照射開始から 4 ヶ月間の状況



(b) 照射開始 4 ヶ月以降の状況

図 3.98 照射室での試験体設置のイメージ (立面)



図 3.99 骨材試験体



図 3.100 熱電対の取り付け状況

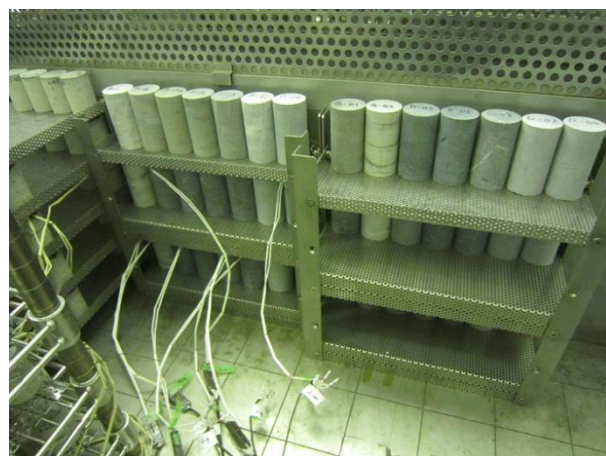


図 3.101 骨材試験体の照射状況

3. 3. 3 試験結果

(1) 試験期間

照射試験は2014年1月に開始した。表3.9で既に述べたように試験期間中に維持管理等による照射停止があった。

加熱試験については、2014年7月に開始した。図3.102、図3.103および表3.24に加熱試験に用いる温湿度履歴を示す。なお、ここでの温湿度は後述の試験体温度計測結果（図3.104）および照射室内外における湿度計測結果（図3.42）に基づくものである。

(2) 温度計測結果

照射中は、各骨材の代表サンプル2体について温度計測を行った。また、あわせて、室温および湿度の計測も行っている。図3.104に骨材試験体の温度測定結果を示す。

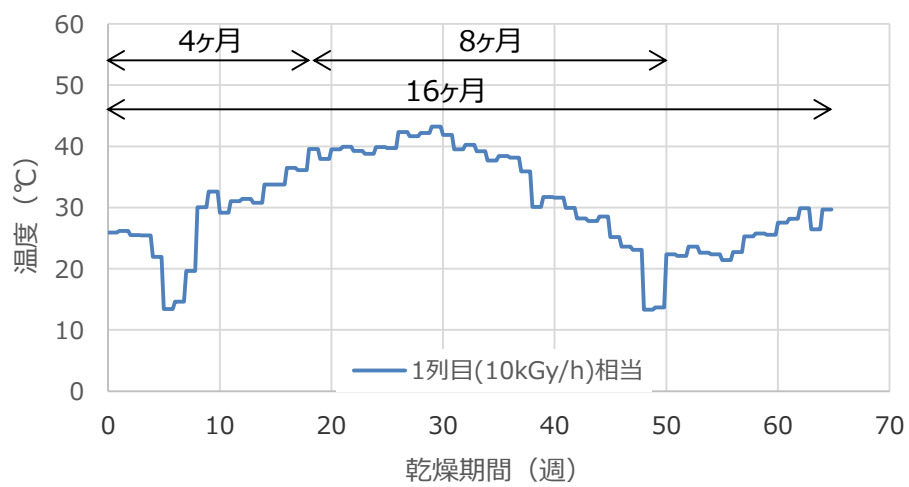


図 3.102 加熱試験温度履歴

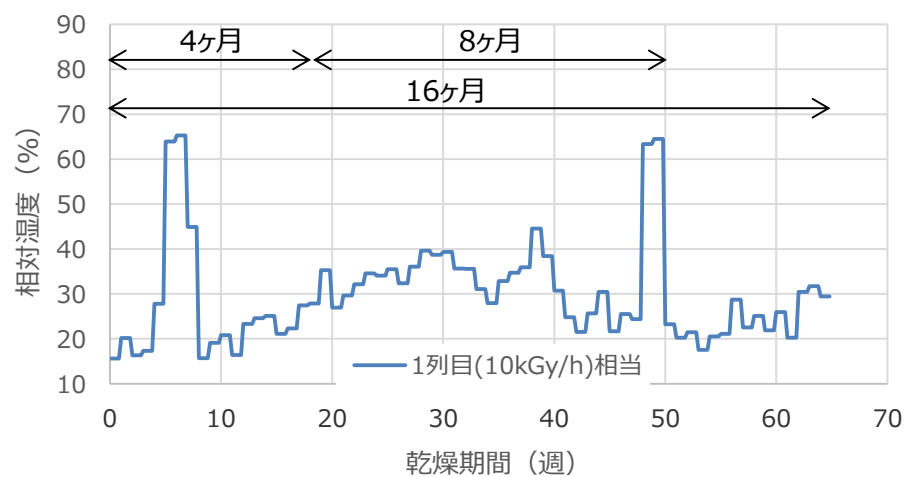


図 3.103 加熱試験湿度履歴

表 3. 24 加熱試験温湿度履歴

経過時間	非照射・加熱試験4ヶ月および16ヶ月試験体 (A16-A20、B16-B20、C16-C20、D16-D20、A26-A30、 B26-B30、C26-C30およびD26-D30)		非照射・加熱試験8ヶ月試験体 (A21-A25、B21-B25、C21-C25およびD21-D25)		備考
	温度 (℃)	湿度(%)	温度 (℃)	湿度(%)	
0日～1週	25.9	15.6	-	-	
1週～2週	26.2	20.2	-	-	
2週～3週	25.5	16.3	-	-	
3週～4週	25.5	17.3	-	-	
4週～5週	21.9	27.8	-	-	
5週～6週	13.4	63.9	-	-	
6週～7週	14.6	65.3	-	-	
7週～8週	19.6	44.9	-	-	
8週～9週	30.1	15.7	-	-	
9週～10週	32.6	19.1	-	-	
10週～11週	29.1	20.8	-	-	
11週～12週	31.1	16.4	-	-	
12週～13週	31.4	23.3	-	-	
13週～14週	30.8	24.6	-	-	
14週～15週	33.8	25.1	-	-	
15週～16週	33.8	21.1	-	-	
16週～17週	36.5	22.3	-	-	
17週～18週	36.1	27.4	-	-	
18週～19週	39.5	27.9	39.5	27.9	18週+3日に4ヶ月試験体と8ヶ月試験体を入替えた。
19週～20週	37.9	35.3	37.9	35.3	
20週～21週	39.5	26.9	39.5	26.9	
21週～22週	39.9	29.6	39.9	29.6	
22週～23週	39.2	32.2	39.2	32.2	
23週～24週	38.8	34.6	38.8	34.6	
24週～25週	39.9	34.1	39.9	34.1	
25週～26週	39.7	35.5	39.7	35.5	
26週～27週	42.3	32.4	42.3	32.4	
27週～28週	41.7	36.1	41.7	36.1	
28週～29週	42.2	39.7	42.2	39.7	
29週～30週	43.2	38.7	43.2	38.7	
30週～31週	41.9	39.3	41.9	39.3	
31週～32週	39.5	35.6	39.5	35.6	
32週～33週	40.2	35.6	40.2	35.6	
33週～34週	39.2	31.1	39.2	31.1	
34週～35週	37.7	28.0	37.7	28.0	
35週～36週	38.4	32.9	38.4	32.9	
36週～37週	38.2	34.7	38.2	34.7	
37週～38週	35.9	35.9	35.9	35.9	
38週～39週	30.1	44.6	30.1	44.6	
39週～40週	31.7	38.4	31.7	38.4	
40週～41週	31.6	30.7	31.6	30.7	
41週～42週	29.9	24.8	29.9	24.8	
42週～43週	28.2	21.5	28.2	21.5	
43週～44週	27.8	25.6	27.8	25.6	
44週～45週	28.6	30.4	28.6	30.4	
45週～46週	25.2	21.7	25.2	21.7	
46週～47週	23.6	25.5	23.6	25.5	
47週～48週	23.1	24.3	23.1	24.3	
48週～49週	13.3	63.4	13.3	63.4	
49週～50週	13.7	64.5	13.7	64.5	
50週～51週	22.4	23.2	22.4	23.2	50週+3日で8ヶ月試験体回収、材料試験実施
51週～52週	22.1	20.3	22.1	20.3	
52週～53週	23.6	21.4	23.6	21.4	
53週～54週	22.6	17.5	22.6	17.5	
54週～55週	22.4	20.5	22.4	20.5	
55週～56週	21.4	21.1	21.4	21.1	
56週～57週	22.7	28.8	22.7	28.8	
57週～58週	25.3	22.5	25.3	22.5	
58週～59週	25.8	25.1	25.8	25.1	
59週～60週	25.5	21.9	25.5	21.9	
60週～61週	27.5	25.9	27.5	25.9	
61週～62週	28.2	20.2	28.2	20.2	
62週～63週	29.9	30.4	29.9	30.4	
63週～64週	26.4	31.7	26.4	31.7	
64週～65週	29.7	29.4	29.7	29.4	64週+7日で16ヶ月試験体回収、材料試験実施

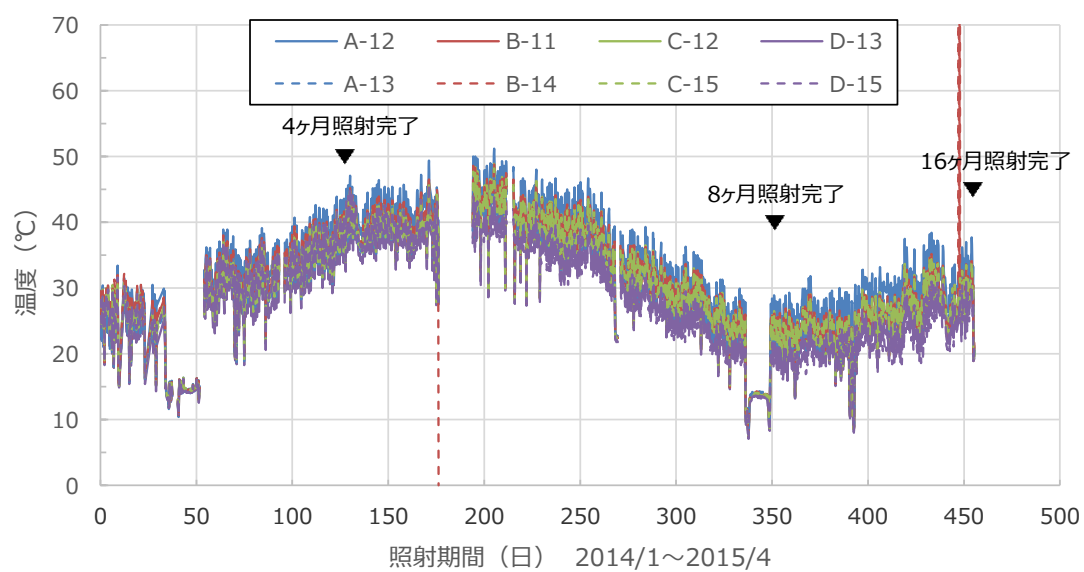


図 3. 104 骨材試験体の温度計測結果

(3) 物性試験結果

1) 質量・寸法計測結果

各骨材試験体の質量・寸法計測結果一覧を表 3. 25～表 3. 28 に示す。また、ガンマ線照射および加熱試験の影響を見るために試験前後での変化率を試験環境ごとに比較したものを図 3. 105～図 3. 105 に示す。なお、ここで示す変化率は、ガンマ線照射および加熱試験後の値は圧縮強度試験前時点での各骨材試験体 5 体の平均値、試験前の値については各骨材試験体成形時点での 5 体の平均値によるものである。

図 3. 106 より試験前後での質量を比較すると、ガンマ線照射および加熱試験により、石灰岩以外で質量減少量が確認された。

寸法については、ガンマ線照射および加熱試験により、直径、高さともに若干増加しているものの比率としては小さく、殆ど体積膨張が無いことが確認された。

表 3.25 質量・寸法計測結果一覧（A：凝灰岩）

管理 番号	岩石名	試験	期間	試験体成形後			照射・加熱試験前後						圧縮強度試験前		
				直径(mm)	高さ(mm)	質量	直径(mm)		高さ(mm)		質量(g)		直径(mm)	高さ(mm)	質量
				平均	平均	(g)	試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後	平均	平均	(g)
A01	凝灰岩 (春日井)	照射	4M	45.33	89.44	408.76	45.37	45.42	89.70	89.58	408.82	408.29	45.37	89.50	408.24
A02				45.14	90.06	406.09	45.17	45.23	90.21	90.21	406.13	405.27	45.19	90.13	405.24
A03				45.09	90.00	406.00	45.12	45.17	90.17	90.13	406.04	405.35	45.17	90.11	405.28
A04				45.36	90.00	389.79	45.39	45.41	90.19	90.16	389.82	389.44	45.43	90.07	389.43
A05				45.29	89.61	382.33	45.34	45.36	89.81	89.80	382.34	381.94	45.36	89.69	381.91
A06			8M	45.32	90.43	411.51	45.38	45.38	90.73	90.55	411.57	410.92	45.36	90.53	410.94
A07				45.31	89.56	383.20	45.40	45.40	89.83	89.74	383.11	382.81	45.36	89.68	382.83
A08				45.45	90.16	391.26	45.51	45.53	90.36	90.42	391.28	390.88	45.51	90.31	390.86
A09				45.35	90.51	387.75	45.41	45.46	90.64	90.84	387.65	387.26	45.39	90.63	387.24
A10				45.41	90.49	391.40	45.48	45.53	90.63	90.76	391.34	391.00	45.39	90.78	390.29
A11			16M	45.34	89.91	383.81	45.39	45.40	90.26	90.14	383.78	383.41	45.40	90.05	383.41
A12				45.31	89.97	384.02	45.37	45.38	90.27	90.18	384.00	383.24	45.36	90.02	383.24
A13				45.35	89.42	385.05	45.35	45.41	90.05	89.63	385.07	384.48	45.39	89.52	384.48
A14				45.46	90.75	394.00	45.52	45.53	90.93	90.96	394.03	393.54	45.51	90.71	393.54
A15				45.21	89.92	411.67	45.21	45.20	90.10	90.04	411.72	410.85	45.21	89.89	410.86
A16		加熱	4M	45.29	90.15	385.00	-	-	-	-	384.97	384.60	45.34	90.12	384.62
A17				45.36	90.75	391.27	-	-	-	-	391.21	390.83	45.43	90.65	390.85
A18				45.47	90.32	392.10	-	-	-	-	392.13	391.68	45.50	90.26	391.70
A19				45.21	90.22	413.18	-	-	-	-	413.29	412.61	45.23	90.32	412.62
A20				45.40	90.51	391.84	-	-	-	-	391.87	391.48	45.42	90.52	391.49
A21			8M	45.41	90.58	393.22	-	-	-	-	393.08	392.96	45.48	90.67	392.96
A22				45.44	90.47	392.29	-	-	-	-	392.27	392.08	45.52	90.55	392.08
A23				45.42	90.57	394.41	-	-	-	-	394.22	394.09	45.47	90.63	394.09
A24				45.34	90.56	393.62	-	-	-	-	393.54	393.18	45.41	90.64	393.18
A25				45.26	89.88	382.68	-	-	-	-	382.54	382.45	45.34	89.95	382.45
A26			16M	45.20	90.26	412.49	-	-	-	-	412.56	411.75	45.25	90.33	411.75
A27				45.34	90.24	394.19	-	-	-	-	394.15	393.78	45.41	90.29	393.78
A28				45.32	90.29	412.00	-	-	-	-	412.06	411.44	45.39	90.37	411.44
A29				45.36	89.95	388.23	-	-	-	-	388.22	387.79	45.43	90.01	387.80
A30				45.28	89.85	383.65	-	-	-	-	383.67	383.31	45.36	89.96	383.31
A31		20℃ 封緘	—	45.19	89.74	411.19							-	-	411.19
A32				45.35	89.43	382.05							-	-	382.05
A33				45.16	88.88	403.86							-	-	403.86
A34				45.31	89.23	383.55							-	-	383.55
A35				45.48	89.39	387.65							-	-	387.65
A36		65℃ 乾燥 後	—	45.18	68.35	313.86							-	-	313.09
A37				45.30	67.25	290.54							-	-	290.17
A38				45.31	67.92	290.62							-	-	290.30
A39				45.26	69.18	295.41							-	-	295.16
A40				45.32	68.10	299.45							-	-	298.96
A41		65℃ 乾燥 前	—	45.35	70.61	301.67							-	-	301.67
A42				45.33	68.67	294.73							-	-	294.73
A43				45.35	68.56	297.05							-	-	297.05
A44				45.32	69.74	299.66							-	-	299.66
A45				45.29	69.88	299.90							-	-	299.90

表 3.26 質量・寸法計測結果一覧（B：凝灰岩）

管理 番号	岩石名	試験	期間	試験体成形後			照射・加熱試験前後						圧縮強度試験前		
				直径(mm)	高さ(mm)	質量	直径(mm)		高さ(mm)		質量(g)		直径(mm)	高さ(mm)	質量
				平均	平均	(g)	試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後	平均	平均	(g)
B01	砂岩 (御前崎)	照射	4M	45.48	89.30	391.91	45.53	45.56	89.44	89.43	391.96	391.52	45.56	89.38	391.49
B02				45.47	89.66	395.08	45.53	45.53	89.81	89.76	395.13	394.88	45.52	89.76	394.84
B03				45.47	89.30	379.50	45.55	45.54	89.44	89.42	379.53	378.90	45.52	89.40	378.87
B04				45.48	89.49	393.47	45.56	45.54	89.64	89.60	393.53	393.31	45.53	89.62	393.26
B05				45.46	89.82	391.36	45.51	45.55	89.97	89.94	391.43	391.31	45.52	89.97	391.27
B06			8M	45.36	89.75	383.31	45.47	45.43	89.86	90.15	383.44	382.88	45.38	89.83	382.88
B07				45.47	89.86	393.00	45.57	45.55	89.98	90.04	393.12	392.84	45.51	89.90	392.83
B08				45.48	88.55	380.61	45.61	45.57	88.65	88.68	380.71	380.10	45.52	88.61	380.11
B09				45.48	89.82	391.66	45.64	45.61	90.03	89.95	391.78	391.56	45.55	90.03	391.55
B10				45.49	88.43	384.99	45.58	45.58	88.57	88.53	385.12	384.57	45.55	88.57	384.58
B11			16M	45.46	89.67	393.53	45.49	45.50	89.85	89.86	393.57	393.31	45.50	89.72	393.30
B12				45.37	89.30	378.99	45.40	45.41	89.46	89.48	379.01	378.07	45.40	89.38	378.10
B13				45.48	88.88	387.78	45.52	45.56	89.01	89.19	387.85	387.72	45.52	88.95	387.74
B14				45.45	89.50	387.68	45.52	45.50	89.64	89.62	387.72	387.07	45.48	89.57	387.07
B15				45.35	89.65	385.36	45.42	45.42	89.81	89.87	385.43	385.00	45.39	89.72	385.00
B16		加熱	4M	45.36	89.65	391.43	-	-	-	-	391.53	391.25	45.43	89.65	391.27
B17				45.48	89.23	391.87	-	-	-	-	391.94	391.70	45.51	89.25	391.71
B18				45.46	89.39	386.00	-	-	-	-	386.13	385.60	45.51	89.42	385.59
B19				45.46	89.58	389.25	-	-	-	-	389.34	388.99	45.52	89.55	388.99
B20				45.34	89.62	385.57	-	-	-	-	385.66	384.94	45.41	89.62	384.94
B21			8M	45.46	89.14	388.30	-	-	-	-	388.37	388.10	45.51	89.23	388.10
B22				45.34	89.14	380.97	-	-	-	-	380.95	380.04	45.40	89.27	380.04
B23				45.47	89.55	386.72	-	-	-	-	386.79	386.46	45.51	89.61	386.46
B24				45.48	89.71	383.33	-	-	-	-	383.40	382.68	45.52	89.79	382.68
B25				45.44	88.85	391.52	-	-	-	-	391.58	391.35	45.50	88.97	391.35
B26			16M	45.32	89.82	389.34	-	-	-	-	389.43	389.13	45.45	89.86	389.12
B27				45.47	89.85	384.84	-	-	-	-	384.95	384.38	45.53	89.90	384.39
B28				45.46	89.57	392.79	-	-	-	-	392.86	392.58	45.54	89.62	392.57
B29				45.34	89.24	387.03	-	-	-	-	387.10	386.80	45.40	89.27	386.79
B30				45.48	89.85	383.04	-	-	-	-	383.17	382.27	45.53	89.93	382.28
B31		20℃ 封緘	—	45.36	89.79	377.15							-	-	377.15
B32				45.36	89.68	383.66							-	-	383.66
B33				45.48	89.70	381.41							-	-	381.41
B34				45.35	89.75	381.69							-	-	381.69
B35				45.34	89.43	386.41							-	-	386.41
B36		65℃ 乾燥 後	—	45.47	69.96	306.21							-	-	305.76
B37				45.49	68.97	303.98							-	-	303.69
B38				45.49	69.17	300.69							-	-	300.47
B39				45.34	68.36	295.63							-	-	295.37
B40				45.48	68.20	292.19							-	-	291.37
B41		65℃ 乾燥 前	—	45.34	69.38	301.94							-	-	301.94
B42				45.49	69.41	302.74							-	-	302.74
B43				45.49	69.02	296.47							-	-	296.47
B44				45.49	68.92	295.76							-	-	295.76
B45				45.46	67.50	286.23							-	-	286.23

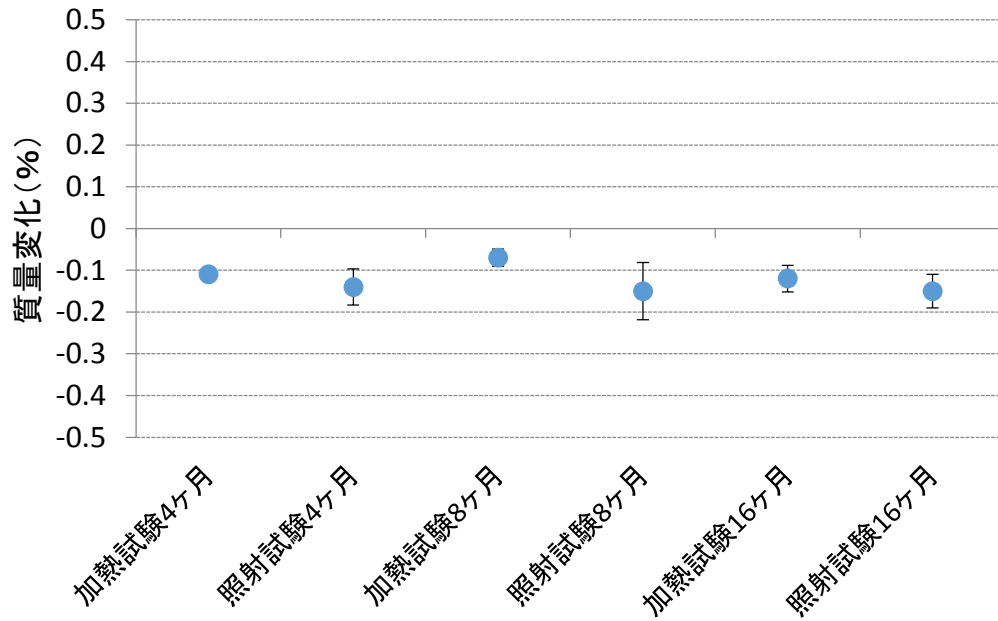
表 3.27 質量・寸法計測結果一覧（C：砂岩）

管理 番号	岩石名	試験	期間	試験体成形後			照射・加熱試験前後						圧縮強度試験前		
				直径(mm)	高さ(mm)	質量	直径(mm)		高さ(mm)		質量(g)		直径(mm)	高さ(mm)	質量
				平均	平均	(g)	試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後	平均	平均	(g)
C01	砂岩 (青梅)	照射	4M	45.47	89.43	388.79	45.56	45.54	89.56	89.51	388.83	388.31	45.51	89.48	388.28
C02				45.48	88.93	385.51	45.58	45.57	89.08	89.01	385.56	385.22	45.53	89.03	385.18
C03				45.51	89.83	388.21	45.59	45.61	89.98	89.93	388.25	387.74	45.60	89.92	387.71
C04				45.49	89.00	385.91	45.56	45.56	89.21	89.11	385.95	385.67	45.55	89.06	385.64
C05				45.47	89.07	386.66	45.56	45.54	89.22	89.19	386.72	386.33	45.52	89.13	386.29
C06			8M	45.48	88.90	385.65	45.58	45.60	89.05	89.05	385.81	385.33	45.53	88.98	385.36
C07				45.22	90.02	386.23	45.33	45.32	90.25	90.13	386.36	385.92	45.29	90.16	385.91
C08				45.21	89.73	384.69	45.31	45.30	90.02	89.98	384.84	384.32	45.27	89.82	384.31
C09				45.27	87.30	374.65	45.34	45.35	87.44	87.48	374.75	374.24	45.32	87.38	374.25
C10			16M	45.22	89.42	383.85	45.34	45.34	89.57	89.56	383.95	383.51	45.31	89.54	383.52
C11				45.15	89.90	384.58	45.22	45.22	89.98	90.03	384.63	384.14	45.22	89.97	384.16
C12				45.17	89.94	384.84	45.23	45.23	90.07	90.08	384.88	384.46	45.22	90.02	384.45
C13				45.23	89.46	381.00	45.29	45.29	89.72	89.56	381.04	380.63	45.27	89.54	380.63
C14				45.27	89.90	382.69	45.40	45.36	90.26	90.23	382.74	382.20	45.32	90.01	382.21
C15				45.21	89.42	383.03	45.26	45.28	89.60	89.51	383.09	382.67	45.26	89.49	382.69
C16		加熱	4M	45.21	89.68	381.89	-	-	-	-	381.99	381.57	45.22	89.71	381.57
C17				45.15	90.04	384.48	-	-	-	-	384.60	384.11	45.20	90.09	384.10
C18				45.47	89.86	390.25	-	-	-	-	390.38	389.82	45.49	89.85	389.83
C19				45.48	88.88	385.15	-	-	-	-	385.27	384.87	45.49	88.91	384.87
C20				45.32	89.74	384.63	-	-	-	-	384.68	384.32	45.33	89.83	384.31
C21			8M	45.29	89.46	385.34	-	-	-	-	385.31	384.68	45.37	89.50	384.68
C22				45.29	89.87	384.63	-	-	-	-	384.64	384.31	45.40	89.94	384.31
C23				45.21	89.97	386.62	-	-	-	-	386.64	386.14	45.35	90.02	386.14
C24				45.32	89.25	384.61	-	-	-	-	384.55	383.97	45.47	89.31	383.97
C25				45.25	90.12	384.78	-	-	-	-	384.80	384.48	45.34	90.20	384.48
C26			16M	45.25	89.86	383.31	-	-	-	-	383.29	382.80	45.29	89.90	382.78
C27				45.31	89.53	385.63	-	-	-	-	385.65	385.13	45.32	89.55	385.17
C28				45.35	89.45	383.48	-	-	-	-	383.50	383.04	45.37	89.47	383.05
C29				45.36	89.10	382.47	-	-	-	-	382.50	382.02	45.35	89.12	382.04
C30				45.33	89.65	384.17	-	-	-	-	384.18	383.65	45.32	89.78	383.67
C31		20℃ 封緘	—	45.26	89.76	382.25							-	-	382.25
C32				45.31	89.75	384.82							-	-	384.82
C33				45.38	89.26	382.48							-	-	382.48
C34				45.36	89.96	386.13							-	-	386.13
C35				45.57	88.48	382.56							-	-	382.56
C36		65℃ 乾燥 後	—	45.21	70.37	300.03							-	-	299.44
C37				45.24	69.67	299.03							-	-	298.20
C38				45.20	69.27	295.23							-	-	294.60
C39				45.26	69.61	297.74							-	-	297.14
C40				45.14	68.34	290.03							-	-	289.55
C41		65℃ 乾燥 前	—	45.26	69.94	299.94							-	-	299.94
C42				45.22	70.39	302.56							-	-	302.56
C43				45.23	69.74	299.68							-	-	299.68
C44				45.48	70.25	302.84							-	-	302.84
C45				45.25	69.11	295.20							-	-	295.20

表 3.28 質量・寸法計測結果一覧（D：凝灰岩）

管理 番号	岩石名	試験	期間	試験体成形後			照射・加熱試験前後						圧縮強度試験前		
				直径(mm)	高さ(mm)	質量	直径(mm)		高さ(mm)		質量(g)		直径(mm)	高さ(mm)	質量
				平均	平均	(g)	試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後	平均	平均	(g)
D01	石灰石 (津久見)	照射	4M	45.24	88.92	386.81	45.26	45.33	89.06	89.03	386.85	386.78	45.26	89.00	386.72
D02				45.24	89.99	392.11	45.26	45.29	90.13	90.11	392.18	392.11	45.26	90.21	392.06
D03				45.24	89.40	389.36	45.28	45.29	89.56	89.51	389.42	389.33	45.28	89.52	389.28
D04				45.23	89.93	391.27	45.27	45.28	90.08	90.03	391.34	391.24	45.28	90.13	391.19
D05				45.22	89.69	390.72	45.27	45.29	89.83	89.78	390.80	390.78	45.28	89.86	390.74
D06				45.21	89.88	391.56	45.30	45.29	90.04	90.28	391.64	391.59	45.28	90.02	391.59
D07			8M	45.23	89.87	391.16	45.30	45.30	90.00	90.16	391.28	391.24	45.27	90.01	391.22
D08				45.18	89.76	389.92	45.25	45.25	89.88	90.17	389.98	390.00	45.25	89.87	390.01
D09				45.22	89.41	389.46	45.30	45.28	89.55	89.62	389.53	389.48	45.32	89.55	389.47
D10				45.24	89.28	389.11	45.32	45.32	89.42	89.43	389.17	389.09	45.31	89.41	389.06
D11				45.23	89.03	387.47	45.29	45.32	89.32	89.31	387.53	387.57	45.26	89.11	387.56
D12				45.23	88.82	386.62	45.25	45.29	89.26	89.13	386.66	386.73	45.26	88.90	386.74
D13			16M	45.24	87.83	382.36	45.28	45.30	87.97	88.07	382.42	382.50	45.27	87.89	382.50
D14				45.22	89.73	391.05	45.29	45.31	89.90	90.01	391.12	391.20	45.27	89.85	391.19
D15				45.24	88.84	387.06	45.26	45.31	88.99	89.25	387.11	387.09	45.27	88.95	387.08
D16				45.23	89.15	387.69	-	-	-	-	387.75	387.52	45.23	89.09	387.53
D17				45.17	89.41	388.19	-	-	-	-	388.28	388.16	45.20	89.32	388.18
D18				45.21	88.93	386.84	-	-	-	-	386.89	386.68	45.23	88.96	386.68
D19		加熱	4M	45.36	89.43	391.42	-	-	-	-	391.50	391.39	45.37	89.38	391.38
D20				45.23	88.20	384.03	-	-	-	-	384.11	383.94	45.23	88.14	383.95
D21				45.35	88.16	385.81	-	-	-	-	385.86	385.73	45.50	88.19	385.73
D22				45.17	89.46	388.57	-	-	-	-	388.59	388.47	45.35	89.55	388.47
D23			8M	45.21	88.17	383.50	-	-	-	-	383.56	383.42	45.33	88.22	383.42
D24				45.23	88.51	385.47	-	-	-	-	385.45	385.29	45.28	88.54	385.29
D25				45.24	87.99	383.70	-	-	-	-	383.70	383.55	45.35	88.02	383.55
D26				45.21	88.28	383.85	-	-	-	-	383.90	383.65	45.21	88.31	383.66
D27				45.22	88.02	382.67	-	-	-	-	382.72	382.54	45.22	88.09	382.55
D28			16M	45.16	87.28	378.65	-	-	-	-	378.72	378.48	45.17	88.04	378.48
D29				45.17	89.23	387.63	-	-	-	-	387.70	387.54	45.17	88.49	387.54
D30				45.35	89.48	391.45	-	-	-	-	391.53	391.39	45.35	88.74	391.39
D31		20℃ 封緘	—	45.22	89.82	391.39							-	-	391.39
D32				45.23	89.30	388.38							-	-	388.38
D33				45.23	89.81	391.19							-	-	391.19
D34				45.23	89.20	388.53							-	-	388.53
D35				45.22	89.64	390.60							-	-	390.60
D36				45.20	67.72	293.98							-	-	293.81
D37		65℃ 乾燥 後	—	45.24	67.39	293.23							-	-	293.13
D38				45.20	67.73	294.49							-	-	294.35
D39				45.21	68.15	296.32							-	-	296.15
D40				45.22	69.18	301.14							-	-	300.98
D41				45.22	70.63	307.19							-	-	307.19
D42		65℃ 乾燥 前	—	45.22	68.75	299.42							-	-	299.42
D43				45.22	68.06	296.78							-	-	296.78
D44				45.22	68.86	299.96							-	-	299.96
D45				45.22	67.62	294.26							-	-	294.26

骨材試驗體GA:凝灰岩(碎石)



骨材試驗體GB:砂岩(砂利)

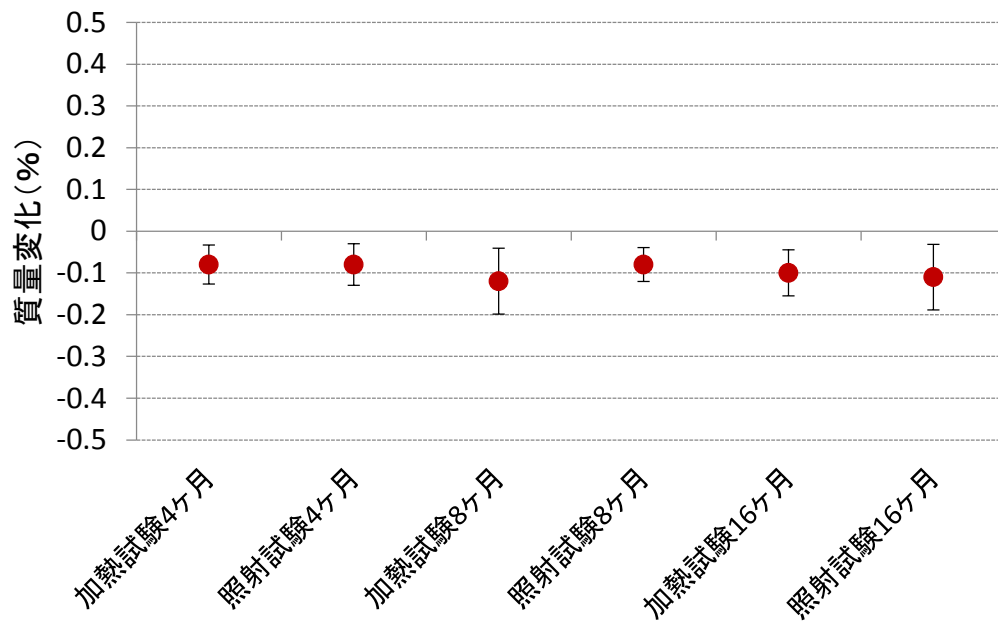
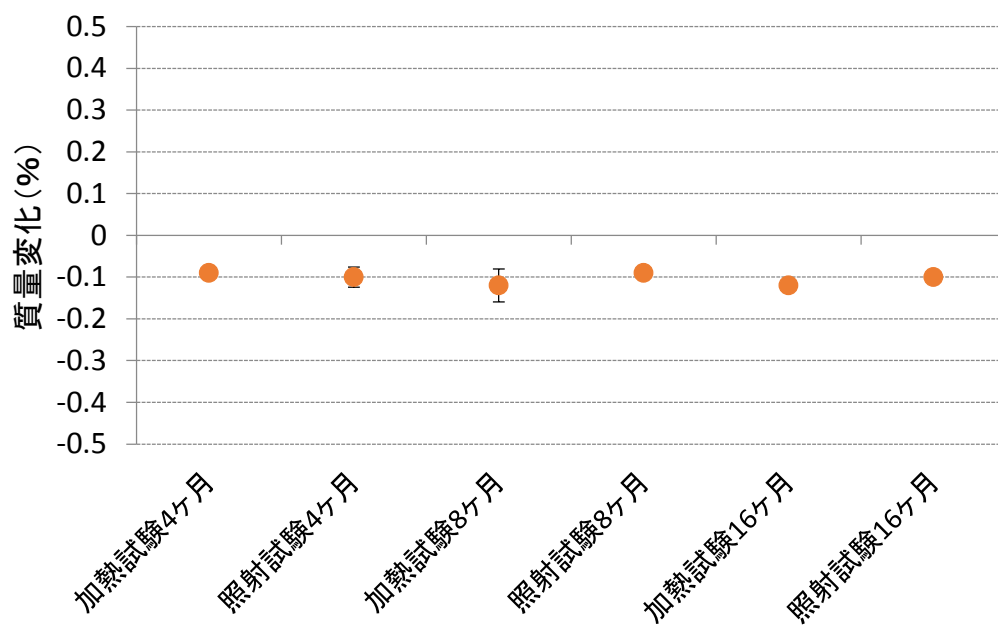


図 3.105 質量変化比較 (1)

骨材試驗体GC: 砂岩(碎石)



骨材試験体GD: 石灰岩(碎石)

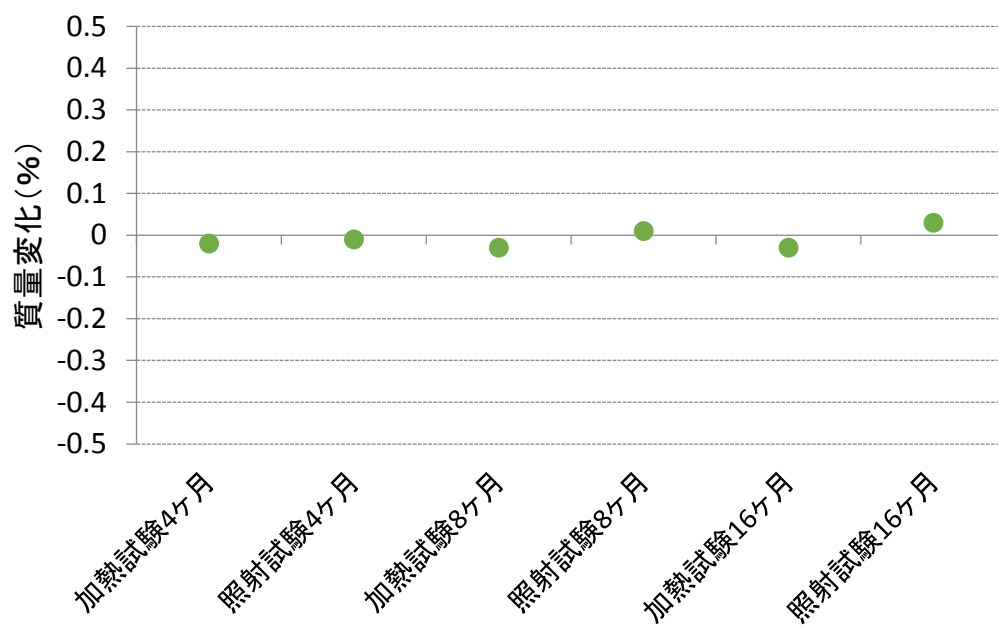
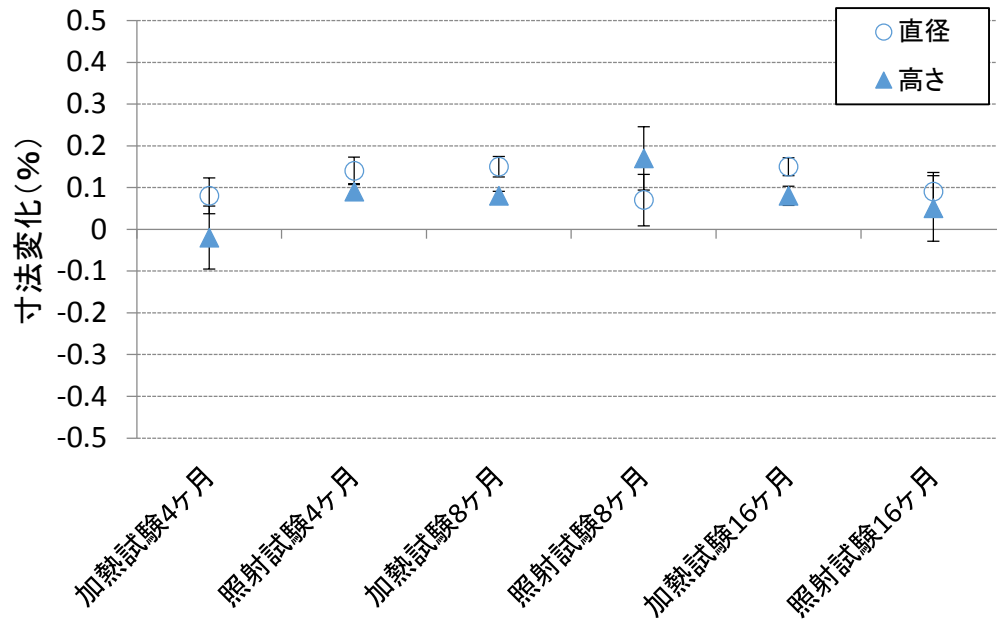


図 3.106 質量変化比較 (2)

骨材試験体GA:凝灰岩(碎石)



骨材試験体GB:砂岩(砂利)

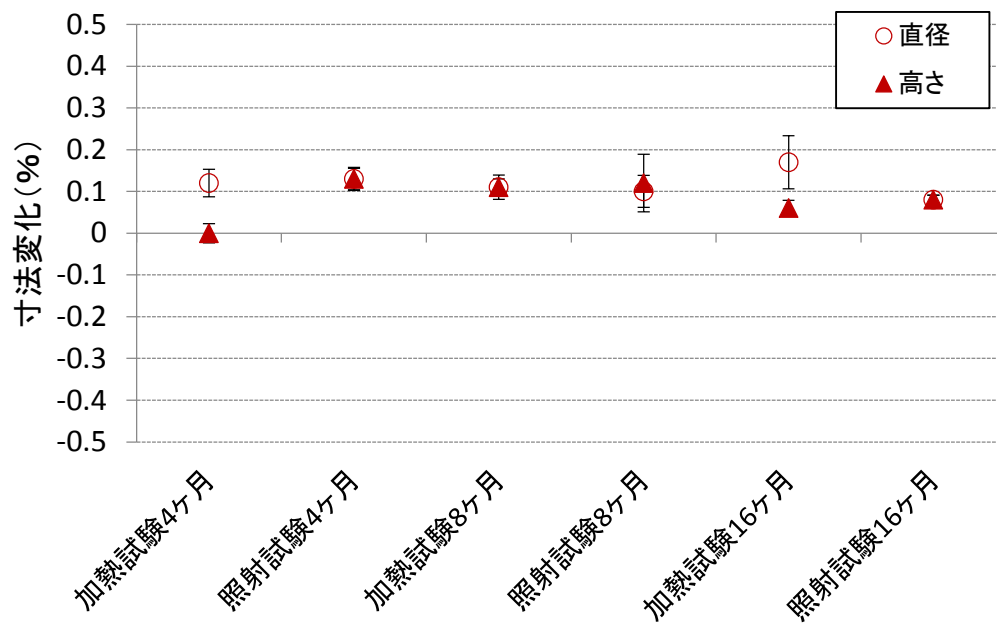
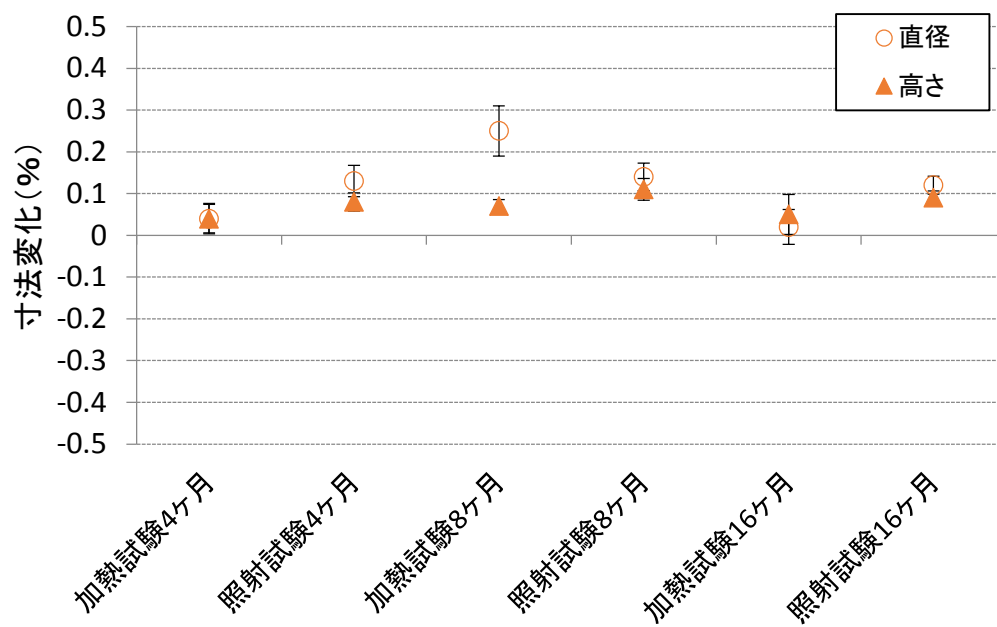


図 3.107 形状（直径・高さ）変化比較（1）

骨材試験体GC: 砂岩(碎石)



骨材試験体GD: 石灰岩(碎石)

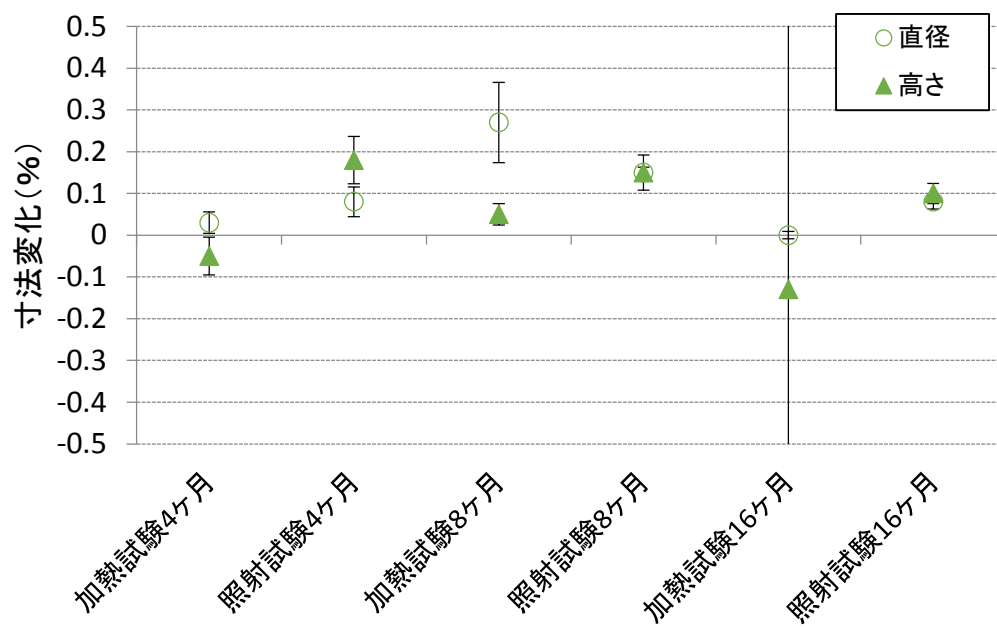


図 3.108 形状（直径・高さ）変化比較（2）

2) 物性試験結果

a) 圧縮強度および静弾性係数

物性試験（圧縮強度、静弾性係数）について、試験結果の一覧を表 3.29 に示す。また、圧縮強度試験に関して、各試験体におけるパラメータごとの比較を図 3.109 および図 3.110 に示す。なお、照射影響評価試験および加熱影響評価試験における管理試験体については、養生状況が同じであるため非照射試験体として 1 つにまとめている。

また、各骨材とも強度試験結果の値に大きなばらつきがみられたため、ここで示す値は、各試験体 5 体のうち圧縮強度が最大・最小の試験体 2 体を除外した 3 体の平均値を示す。

ガンマ線照射による圧縮強度や線弾性係数への影響を確認したが、本試験の範囲ではガンマ線により骨材の物性に大きな影響が生じないことが明らかとなった。

ただし、依然ばらつきが大きく、ばらつきがより小さい範囲での分析を行うため、ビッカース硬さ試験を追加で実施した。詳細については後述する。

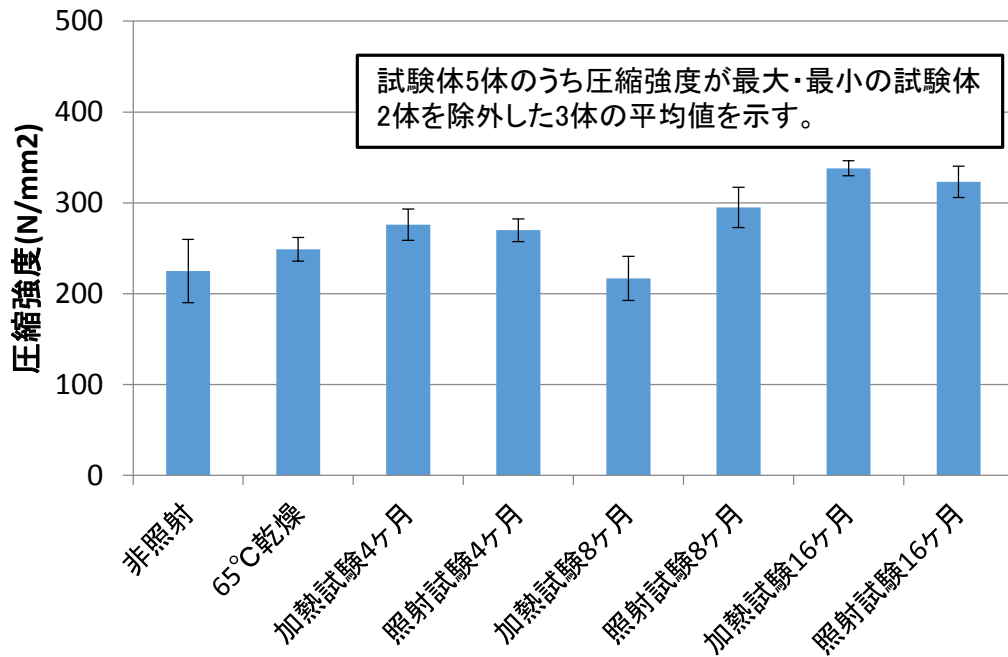
表 3.29 強度・剛性計測結果（A：凝灰岩（碎石）、B：砂岩（砂利））

試験体ID	試験内容	材齢情報	照射量 (kGy) 温湿度	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)		試験体ID	試験内容	材齢情報	照射量 (kGy) 温湿度	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)	
					平均		平均						平均		平均
A-01	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 ⁴	318	261	90.7	79.8	B-01		照射開始 4ヶ月後	2.5×10 ⁴	310	301	71.6	71.4
A-02				178		82.2		B-02				244		75.4	
A-03				278		84.3		B-03				294		49.0	
A-04				279		69.4		B-04				365		79.4	
A-05				252		72.3		B-05				291		81.6	
A-06		照射開始 8ヶ月後	5.0×10 ⁴	358	296	85.7	77.8	B-06	照射開始 8ヶ月後	5.0×10 ⁴	401	359	68.2	73.4	
A-07				320		69.1		B-07			266		75.2		
A-08				299		77.2		B-08			387		67.5		
A-09				239		84.9		B-09			417		80.8		
A-10				266		72.1		B-10			324		75.1		
A-11		照射開始 16ヶ月後	1.0×10 ⁵	374	317	66.2	104.0	B-11	照射開始 16ヶ月後	1.0×10 ⁵	274	286	80.4	93.7	
A-12				347		136.0		B-12			235		44.6		
A-13				243		119.0		B-13			218		80.4		
A-14				309		85.8		B-14			351		149.0		
A-15				312		113.0		B-15			354		114.0		
A-16	加熱試験	4ヶ月後	1列目 温度 雰囲気 湿度	279	256	72.4	74.0	B-16	4ヶ月後	1列目 温度 雰囲気 湿度	453	368	80.1	76.1	
A-17				253		61.8		B-17			433		78.2		
A-18				341		78.4		B-18			207		68.0		
A-19				111		84.8		B-19			385		78.6		
A-20				295		72.4		B-20			360		75.6		
A-21		8ヶ月後		206	210	70.7	77.7	B-21	8ヶ月後		358	286	71.8	68.4	
A-22				255		82.8		B-22			359		63.4		
A-23				195		77.5		B-23			195		63.1		
A-24				251		75.7		B-24			364		62.3		
A-25				141		81.7		B-25			153		81.6		
A-26		16ヶ月後		333	324	84.9	76.9	B-26	16ヶ月後		268	288	75.2	68.8	
A-27				332		68.8		B-27			383		67.2		
A-28				405		86.3		B-28			312		71.2		
A-29				200		72.8		B-29			262		70.2		
A-30				350		71.5		B-30			214		60.4		
A-31	標準養生	管理試験	20℃封緘	262	246	85.0	73.5	B-31	標準養生	管理試験	20℃封緘	198	275	68.2	60.3
A-32				250		52.0		B-32				300		61.6	
A-33				258		84.1		B-33				236		46.1	
A-34				148		71.5		B-34				292		56.3	
A-35				313		74.8		B-35				351		69.4	
A-36	加熱影響 確認試験	加熱後	65℃	267	245	87.0	76.5	B-36	加熱後	65℃	205	316	69.0	71.4	
A-37				207		72.8		B-37			235		81.2		
A-38				241		75.6		B-38			411		76.2		
A-39				271		74.2		B-39			422		78.1		
A-40				238		72.9		B-40			306		52.6		
A-41		管理試験	20℃封緘	142	199	82.3	71.1	B-41	管理試験	20℃封緘	249	284	70.3	62.9	
A-42				187		73.1		B-42			303		65.7		
A-43				174		62.7		B-43			381		70.3		
A-44				276		67.5		B-44			319		63.8		
A-45				216		69.9		B-45			169		44.5		

表 3.30 強度・剛性計測結果（C：砂岩（碎石）、D：石灰岩（碎石））

試験体ID	試験内容	材齢情報	照射量 (kGy) 温湿度	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)	
					平均		平均
C-01	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 ⁴	124	184	58.7	64.5
C-02				260		69.3	
C-03				198		53.5	
C-04				177		71.3	
C-05				159		69.8	
C-06		照射開始 8ヶ月後	5.0×10 ⁴	187	160	66.6	66.3
C-07				221		75.0	
C-08				96		58.7	
C-09				129		65.3	
C-10				169		65.8	
C-11		照射開始 16ヶ月後	1.0×10 ⁵	221	198	72.3	62.0
C-12				215		67.4	
C-13				150		48.5	
C-14				184		55.4	
C-15				222		66.5	
C-16	加熱試験	4ヶ月後	1列目 温度 雰囲気 湿度	208	189	63.6	65.3
C-17				240		67.8	
C-18				134		64.6	
C-19				207		68.9	
C-20				154		61.7	
C-21		8ヶ月後		80	144	39.0	51.3
C-22				162		52.5	
C-23				230		62.6	
C-24				91		39.7	
C-25				159		62.6	
C-26		16ヶ月後		228	215	61.7	60.2
C-27				196		56.9	
C-28				256		63.0	
C-29				189		57.6	
C-30				207		61.9	
C-31	標準養生	管理試験	20℃封緘	129	153	60.6	52.7
C-32				167		48.6	
C-33				145		45.1	
C-34				170		63.0	
C-35				156		46.2	
C-36	加熱影響 確認試験	加熱後	65℃	373	292	70.0	65.8
C-37				210		64.0	
C-38				373		63.7	
C-39				261		69.5	
C-40				243		61.6	
C-41		管理試験	20℃封緘	150	166	65.9	60.9
C-42				131		64.5	
C-43				139		51.3	
C-44				287		61.7	
C-45				124		61.1	
D-01	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 ⁴	129	131	78.3	77.6
D-02				203		78.5	
D-03				75		69.4	
D-04				114		83.7	
D-05				134		78.0	
D-06		照射開始 8ヶ月後	5.0×10 ⁴	176	112	66.6	62.7
D-07				53		49.2	
D-08				52		65.0	
D-09				134		64.1	
D-10				145		68.5	
D-11		照射開始 16ヶ月後	1.0×10 ⁵	49	82	52.1	55.2
D-12				69		56.1	
D-13				85		57.8	
D-14				148		62.8	
D-15				61		47.0	
D-16	加熱試験	4ヶ月後	1列目 温度 雰囲気 湿度	151	93	79.1	73.8
D-17				81		68.0	
D-18				77		67.0	
D-19				95		75.0	
D-20				61		79.7	
D-21		8ヶ月後		110	111	69.6	74.2
D-22				83		63.9	
D-23				110		70.4	
D-24				119		84.2	
D-25				134		82.9	
D-26		16ヶ月後		138	97	79.3	70.4
D-27				97		53.3	
D-28				54		66.1	
D-29				95		79.2	
D-30				102		73.9	
D-31	標準養生	管理試験	20℃封緘	135	119	82.5	77.1
D-32				151		69.0	
D-33				130		81.6	
D-34				92		81.6	
D-35				85		70.7	
D-36	加熱影響 確認試験	加熱後	65℃	117	119	70.0	69.6
D-37				111		73.9	
D-38				88		72.2	
D-39				102		61.8	
D-40				177		70.3	
D-41		管理試験	20℃封緘	114	164	73.8	78.3
D-42				176		80.9	
D-43				179		85.2	
D-44				176		79.2	
D-45				174		72.6	

骨材試験体GA:凝灰岩(碎石)



骨材試験体GB:砂岩(砂利)

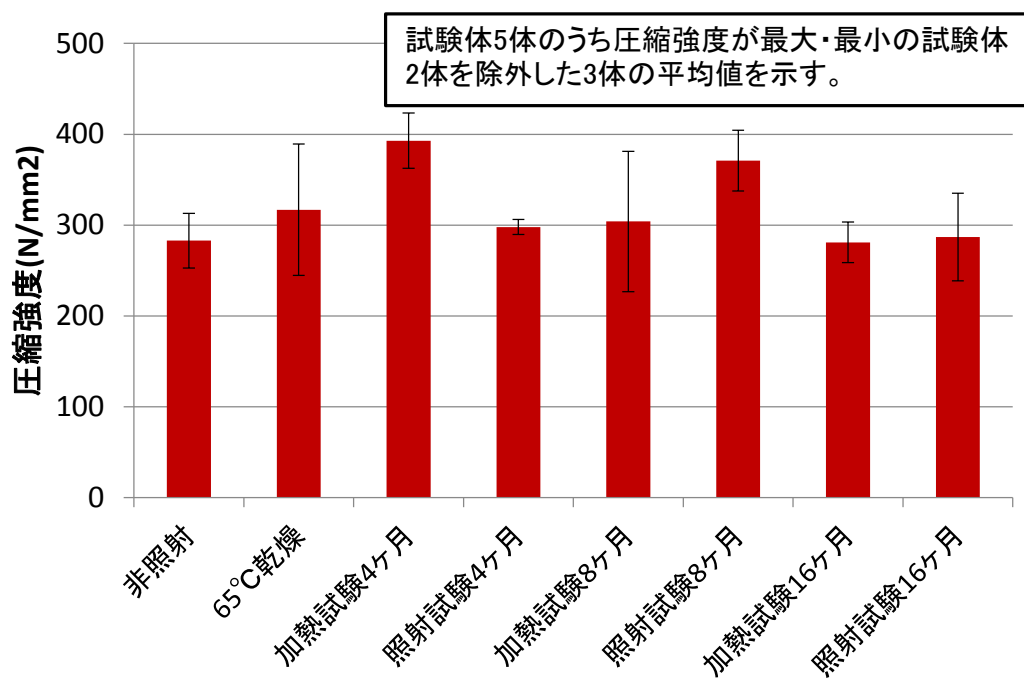
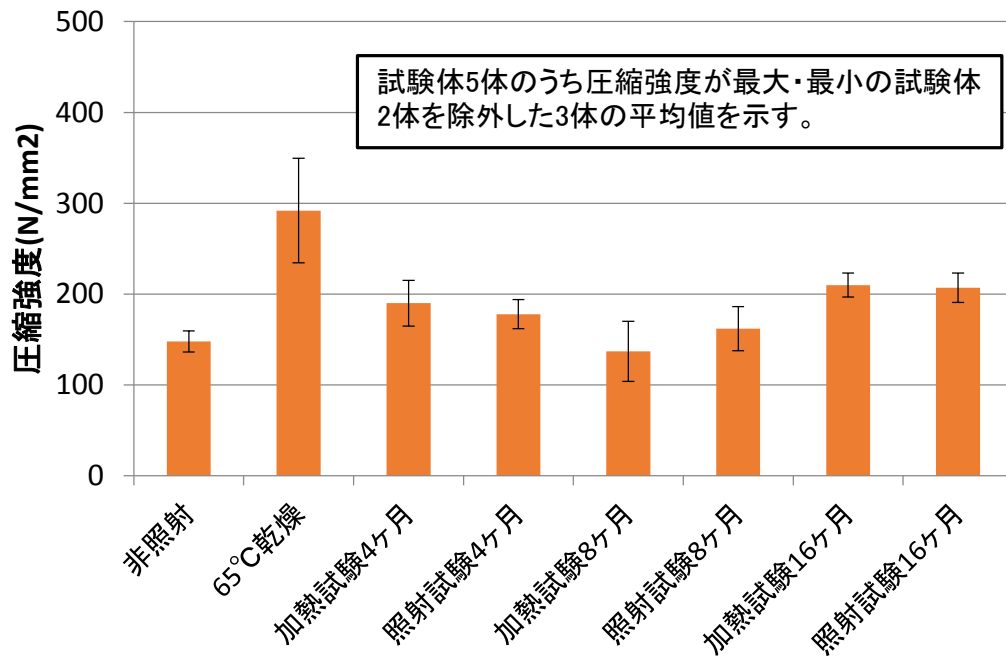


図 3.109 骨材圧縮強度比較 (1)

骨材試験体GC: 砂岩(碎石)



骨材試験体GD: 石灰岩(碎石)

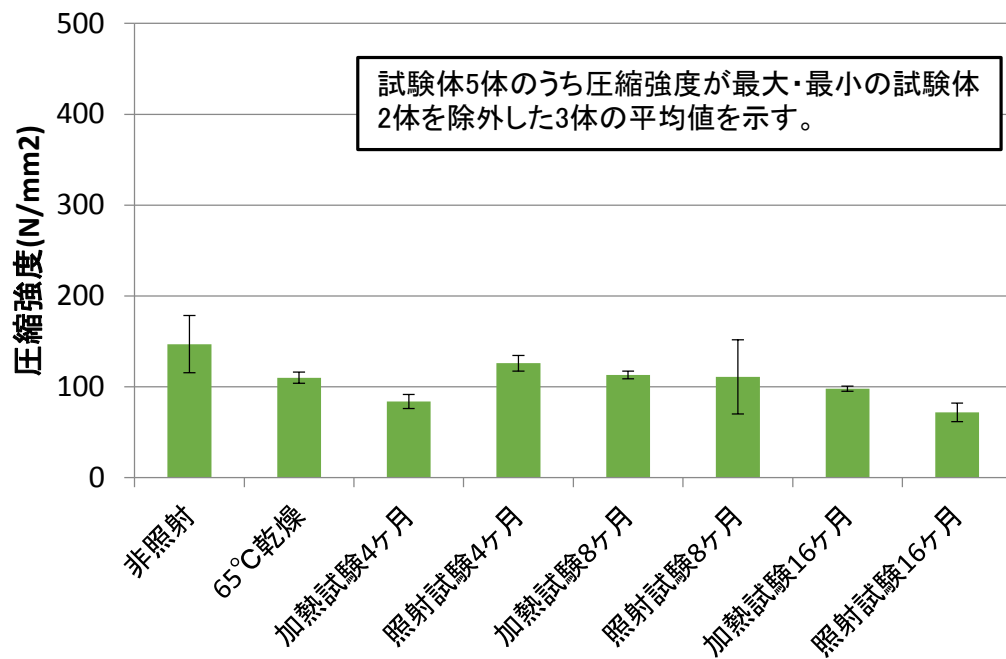
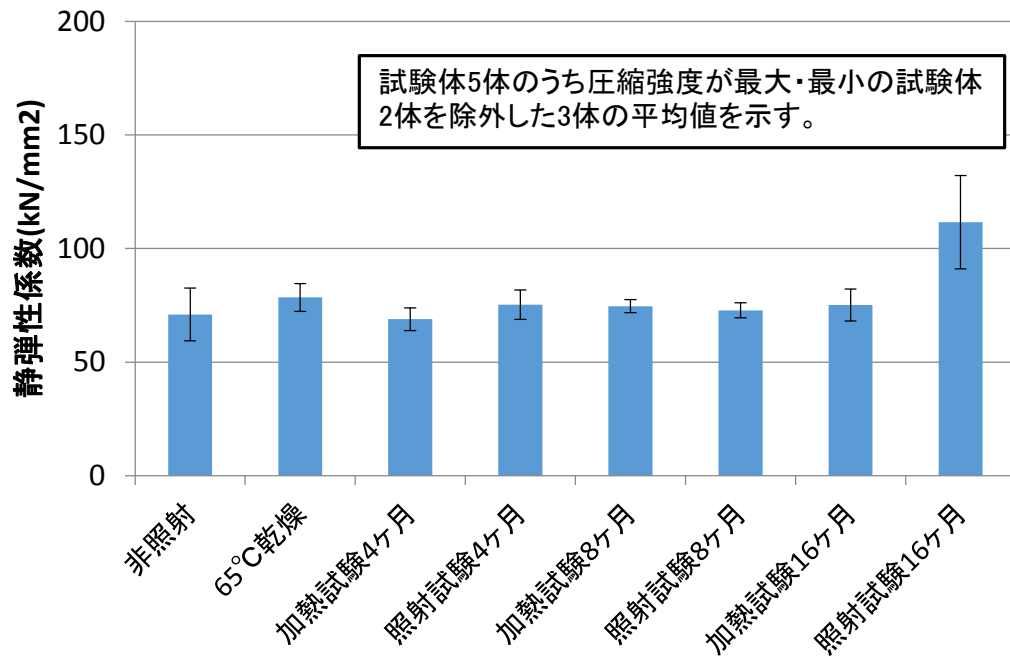


図 3.110 骨材圧縮強度比較 (2)

骨材試験体GA:凝灰岩(碎石)



骨材試験体GB:砂岩(砂利)

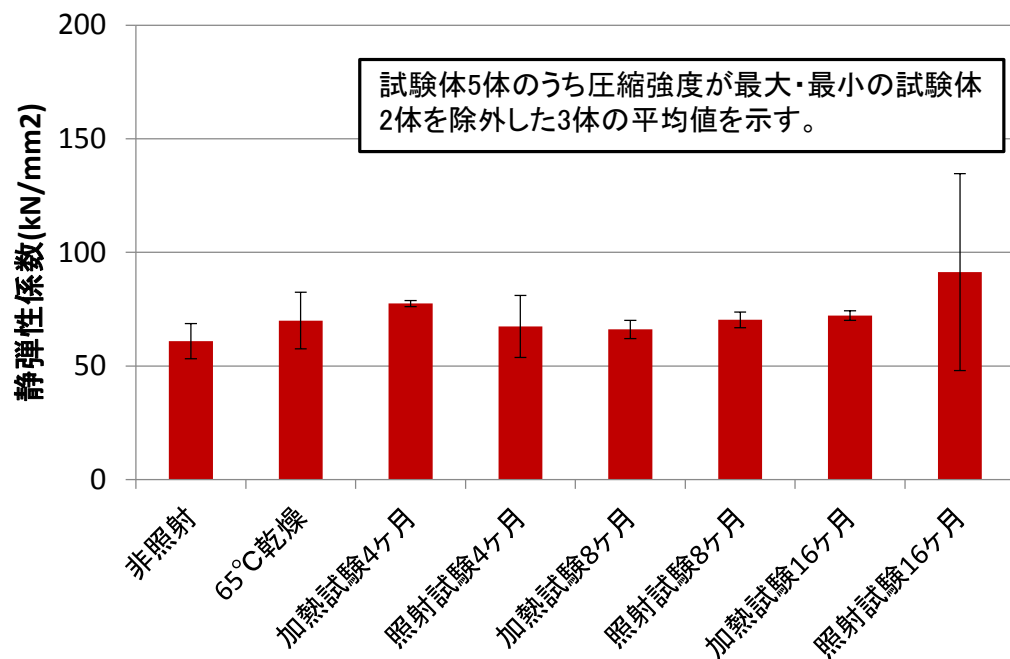
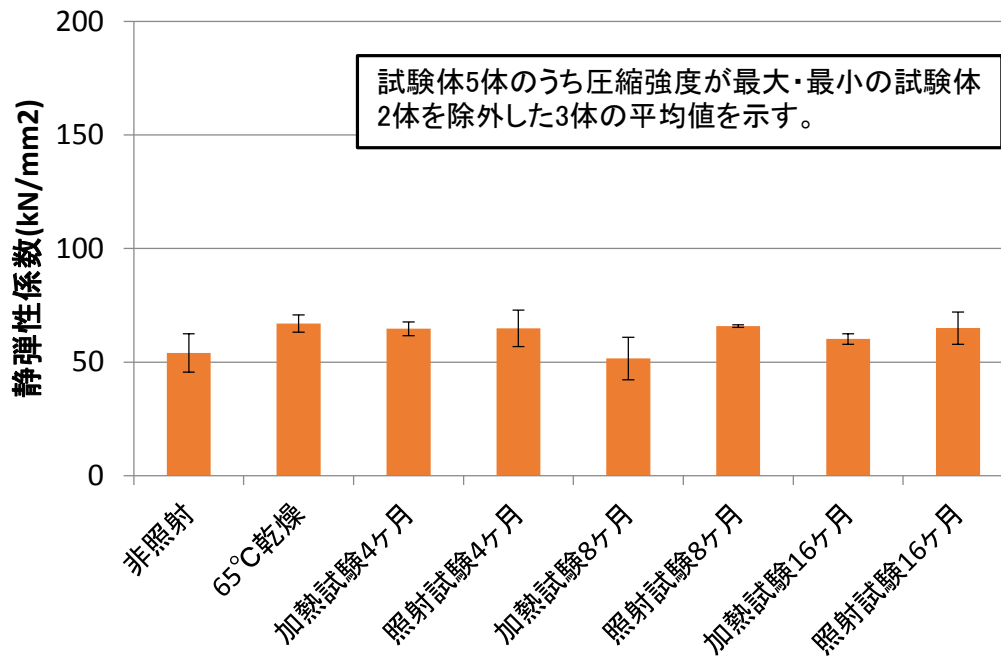


図 3.111 骨材静弾性係数比較 (1)

骨材試験体GC: 砂岩(碎石)



骨材試験体GD: 石灰岩(碎石)

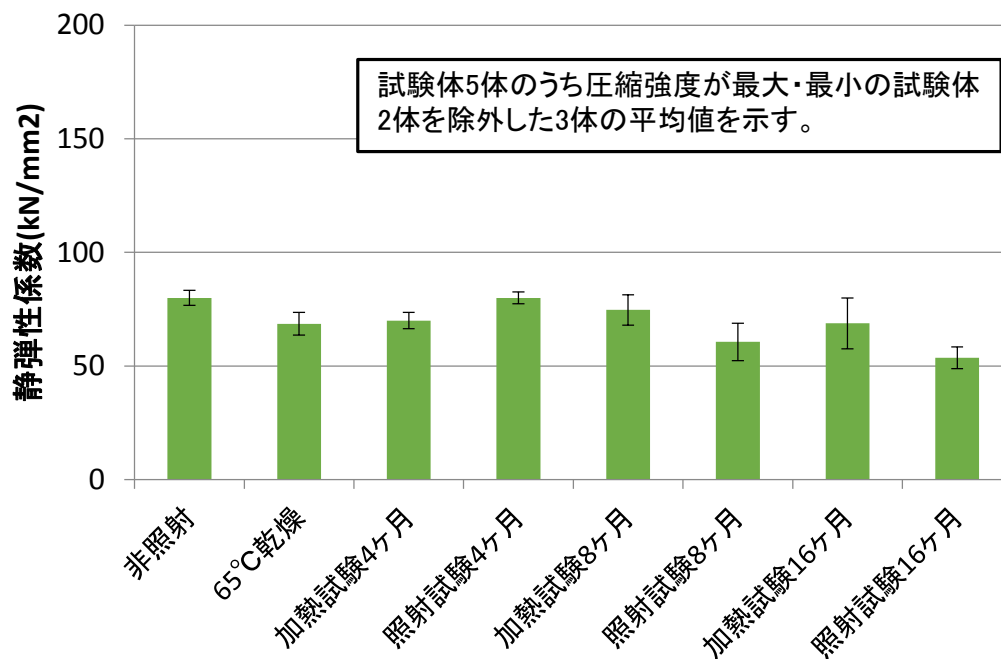


図 3.112 骨材静弾性係数比較 (2)

b) ビッカース硬さ

(i) 試験概要

前述のとおり圧縮強度試験を実施したところ、ばらつきが大きく、ガンマ線照射や加熱による乾燥影響は明確に分からなかったため、圧縮強度とは別の指標の試験としてビッカース硬さ試験を実施した。

(ii) 試験方法

試験体管理番号、骨材種類および試験体の情報を表 3.31 に示す。ビッカース硬さ試験用骨材試験体は、圧縮強度試験を実施した骨材試験体の破片を試料調整したものである。

ビッカース硬さ試験用試験体の試料調整方法の概要を図 3.116 に示す。

図 3.116 に示すように、ビッカース硬さ試験用試料は、骨材試験体の破片を直径 50mm、高さ 100mm の型枠内に、ビッカース硬さ試験面を下にして設置し、その上に超厚膜形エポキシ樹脂被覆材料（ナブコバリヤー5M：関西ペイント株式会社製）を充填した。その後、エポキシ樹脂が硬化後に脱型し、湿式のダイヤモンドカッターにより、底面から 2cm 程度の位置を切断し、直径 50mm×高さ 20mm 程度の試験体に成形した。その後、図 3.113 に示す試験体の底面が平滑になるように研磨盤にて研磨し、その面をビッカース硬さ試験の測定面とした。

表 3.31 に示す骨材試験体の試料について、ビッカース硬さ試験を実施した。なお、C31、C32、C33 を使用して事前試験を実施した。

ビッカース硬さの測定には、マイクロビッカース硬さ試験機（ミットヨ製 HM-221）を用いて、測定面にビッカース圧子を押し当て、圧子を取り除いたあとに観察されるくぼみの大きさを測定し、硬さの評価を行った。なお、ビッカース硬さの測定点数は、事前試験にて使用した C31、C32 および C33 が各試料 10 点、それ以外は、各試料 20 点とした。

(iii) 試験結果

ビッカース硬さ試験結果を表 3.32～表 3.35 および図 3.115 に示す。

本試験においても、ばらつきが大きい結果となっており、ガンマ線照射や加熱による乾燥影響は明確に分析するための試験方法に関しては今後の課題である。

表 3.31 試験体管理番号、骨材種類および試験体の情報

試験体管理番号	骨材種類	試験体の情報
A05	凝灰岩(春日井)	ガンマ線照射試験体4ヶ月
A10		ガンマ線照射試験体8ヶ月
A13		ガンマ線照射試験体16ヶ月
A17		加熱(非照射)試験体4ヶ月
A21		加熱(非照射)試験体8ヶ月
A29		加熱(非照射)試験体16ヶ月
A34		試験体成形直後(非照射)
B03	砂岩(御前崎)	ガンマ線照射試験体4ヶ月
B07		ガンマ線照射試験体8ヶ月
B15		ガンマ線照射試験体16ヶ月
B17		加熱(非照射)試験体4ヶ月
B22		加熱(非照射)試験体8ヶ月
B30		加熱(非照射)試験体16ヶ月
B34		試験体成形直後(非照射)
C05	砂岩(青梅)	ガンマ線照射試験体4ヶ月
C10		ガンマ線照射試験体8ヶ月
C11		ガンマ線照射試験体16ヶ月
C16		加熱(非照射)試験体4ヶ月
C22		加熱(非照射)試験体8ヶ月
C30		加熱(非照射)試験体16ヶ月
C31		試験体成形直後(非照射)
C32		
C33		
C34		
D05	石灰石(津久見)	ガンマ線照射試験体4ヶ月
D07		ガンマ線照射試験体8ヶ月
D11		ガンマ線照射試験体16ヶ月
D17		加熱(非照射)試験体4ヶ月
D22		加熱(非照射)試験体8ヶ月
D30		加熱(非照射)試験体16ヶ月
D35		試験体成形直後(非照射)

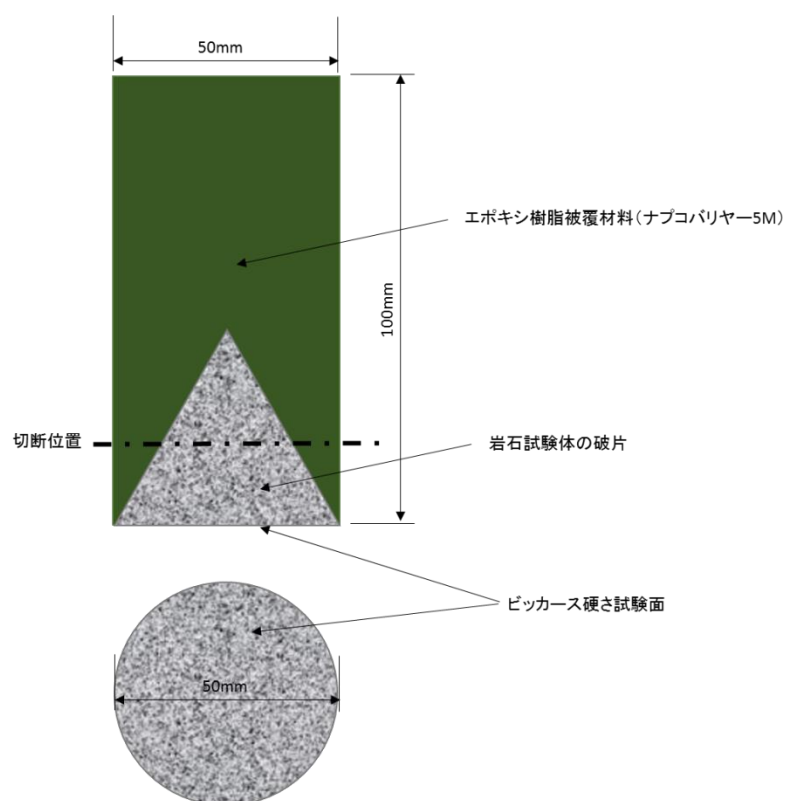


図 3.113 ビッカース硬さ試験用試験体の試料調整方法の概略



(a) 試験前試料



(b) マイクロビッカース試験機

図 3.114 ビッカース硬さ試験状況

表 3.32 ビッカース硬さ試験結果（A：凝灰岩（春日井））

試験体管理番号		計測点数																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	平均
A05	試験力 (N)	1.0	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5	-
	ビッカース硬さ(HV)	428.0	315.1	554.2	389.2	841.6	659.4	301.4	462.6	239.7	193.3	175.0	313.3	509.3	685.4	650.7	798.9	617.4	449.6	615.4	283.9	474.2
A10	試験力 (N)	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	0.5	-	-
	ビッカース硬さ(HV)	359.0	244.9	372.2	250.9	168.1	261.7	157.3	122.7	289.1	143.2	239.4	163.8	173.4	208.6	227.6	154.3	299.7	263.8	243.7	228.0	228.6
A13	試験力 (N)	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	5.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	-
	ビッカース硬さ(HV)	298.3	324.3	263.0	347.6	537.7	328.1	454.2	261.6	235.4	233.4	164.3	299.8	166.5	173.7	247.2	204.5	271.4	151.8	452.0	290.7	285.3
A17	試験力 (N)	0.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	2.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	-
	ビッカース硬さ(HV)	151.8	319.7	335.9	179.1	174.5	180.3	230.4	258.6	472.4	388.7	201.9	236.0	319.2	198.4	146.8	112.1	272.3	215.8	144.2	147.6	234.3
A21	試験力 (N)	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	419.1	303.5	424.9	214.4	436.2	466.6	470.3	555.3	445.4	780.4	401.9	530.5	372.9	413.9	116.4	153.1	155.2	364.7	141.9	334.8	375.1
A29	試験力 (N)	1.0	0.5	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	352.8	184.8	221.5	413.0	465.7	453.0	274.1	244.4	297.1	304.8	331.7	351.3	324.9	450.7	267.4	209.6	312.6	236.6	274.6	389.9	318.0
A34	試験力 (N)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	-
	ビッカース硬さ(HV)	229.8	131.5	175.5	135.6	154.1	121.5	124.2	248.2	219.0	150.7	167.1	227.4	129.2	102.1	136.2	255.4	322.3	240.5	184.1	138.8	179.7

表 3.33 ビッカース硬さ試験結果（B：砂岩（御前崎））

試験体管理番号		計測点数																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	平均
B03	試験力 (N)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	547.0	302.7	400.8	363.0	549.3	688.5	430.8	351.8	861.6	697.4	610.8	502.5	423.6	493.4	652.7	561.1	487.6	364.9	541.5	705.4	526.8
B07	試験力 (N)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	262.7	429.7	426.5	437.6	307.9	715.0	475.4	300.1	254.8	296.9	476.0	227.6	245.0	228.5	282.6	251.5	332.8	421.5	491.0	320.4	359.2
B15	試験力 (N)	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	446.0	321.1	424.3	236.8	397.2	526.2	498.8	281.0	428.4	379.3	315.9	275.7	344.6	561.2	537.8	419.4	658.8	635.7	457.8	314.0	423.0
B17	試験力 (N)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	423.0	436.4	556.5	549.5	285.1	585.7	662.6	230.2	381.1	588.9	585.6	465.2	642.9	492.3	640.7	570.5	573.8	515.6	583.3	441.9	510.5
B22	試験力 (N)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	264.5	474.7	181.3	240.3	272.6	426.6	345.1	221.6	198.1	255.5	224.1	392.6	251.7	258.1	182.0	452.8	383.2	363.4	501.6	458.2	317.4
B30	試験力 (N)	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	679.8	791.7	465.8	573.4	346.3	255.5	782.0	838.6	216.2	398.9	400.2	492.2	606.8	594.0	300.4	208.3	673.6	446.2	511.7	422.9	500.2
B34	試験力 (N)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	336.5	258.1	253.7	656.2	389.2	519.1	452.5	772.3	291.0	394.2	443.1	776.1	323.0	342.9	488.3	411.9	639.3	333.5	471.2	248.8	440.0

表 3.34 ビッカース硬さ試験結果（C：砂岩（青梅））

試験体管理番号		計測点数																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	平均
C05	試験力 (N)	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	729.8	566.6	379.4	293.5	247.6	403.5	268.9	267.0	376.8	340.5	339.8	752.0	792.3	344.9	596.7	564.5	347.3	732.1	230.9	322.2	444.8
C10	試験力 (N)	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	789.6	605.5	704.6	381.5	589.4	203.8	763.8	754.6	470.1	364.2	589.2	407.2	249.0	173.5	667.3	223.7	275.6	423.4	211.3	208.7	452.8
C11	試験力 (N)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	692.8	417.9	331.8	277.2	572.9	301.4	501.3	740.6	393.3	460.6	199.3	414.6	788.1	489.5	518.3	203.0	357.5	298.5	373.8	223.3	427.8
C16	試験力 (N)	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	337.8	405.4	752.3	898.7	680.8	431.1	564.9	284.3	353.4	591.6	560.2	536.6	796.9	320.3	410.1	580.0	527.3	587.4	790.6	323.1	536.6
C22	試験力 (N)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	267.0	674.0	390.2	419.4	479.7	333.4	558.8	575.4	656.4	532.0	331.6	554.0	580.4	231.9	617.6	349.5	456.1	502.4	487.0	500.9	474.9
C30	試験力 (N)	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	479.8	243.3	437.8	495.5	567.1	227.6	321.9	323.8	491.2	416.1	233.2	265.8	206.1	433.2	495.4	923.0	234.3	392.2	379.7	330.8	394.9
C31	試験力 (N)	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ビッカース硬さ(HV)	392.6	572.0	613.0	513.9	595.1	358.6	619.5	521.5	921.9	627.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	573.6
C32	試験力 (N)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ビッカース硬さ(HV)	653.4	335.3	526.4	576.8	219.0	301.8	212.0	228.5	181.0	601.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	383.5
C33	試験力 (N)	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ビッカース硬さ(HV)	376.3	729.9	496.1	779.1	699.1	454.2	628.6	522.7	458.2	443.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	558.8
C34	試験力 (N)	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	ビッカース硬さ(HV)	257.5	549.1	698.4	639.7	598.3	994.2	445.2	398.7	349.8	688.5	403.3	351.7	543.6	233.7	574.6	376.3	361.2	212.3	180.8	334.0	459.5

表 3.35 ビッカース硬さ試験結果（D：石灰石（津久見））

試験体管理番号		計測点数																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	平均
D05	試験力(N)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	－
	ビッカース硬さ(HV)	165.2	207.6	208.3	242.8	168.2	173.7	174.2	182.1	161.8	163.9	168.3	165.1	169.8	170.6	162.3	174.2	146.0	170.3	141.7	139.7	172.8
D07	試験力(N)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	－
	ビッカース硬さ(HV)	134.5	142.8	148.0	136.8	124.0	142.3	121.6	130.9	108.1	104.8	114.2	117.9	162.8	156.0	132.5	135.6	124.3	145.7	140.5	128.3	132.6
D11	試験力(N)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	－
	ビッカース硬さ(HV)	148.5	135.9	117.7	130.4	131.9	163.9	132.5	105.0	117.4	133.6	152.6	135.9	121.4	121.0	159.0	139.7	155.9	143.6	138.8	133.7	135.9
D17	試験力(N)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	－
	ビッカース硬さ(HV)	129.1	160.7	148.9	120.8	127.8	126.2	149.1	139.6	144.5	135.9	162.5	153.8	122.1	135.9	111.3	163.3	161.5	143.8	157.2	158.8	142.6
D22	試験力(N)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	－
	ビッカース硬さ(HV)	167.3	167.9	181.5	137.7	158.7	158.4	112.5	144.7	173.7	176.0	180.2	131.0	133.6	137.7	210.9	154.4	159.4	142.8	130.7	118.0	153.9
D30	試験力(N)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	－
	ビッカース硬さ(HV)	179.2	153.3	155.8	133.4	148.5	168.6	143.3	153.2	242.0	170.0	144.7	132.5	189.2	142.2	135.7	134.8	131.2	162.6	137.5	150.2	155.4
D35	試験力(N)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	－
	ビッカース硬さ(HV)	161.1	155.4	130.3	149.4	158.1	161.4	128.3	172.4	148.3	164.0	128.3	159.6	164.3	126.5	138.2	159.1	141.9	159.2	187.2	158.2	152.6

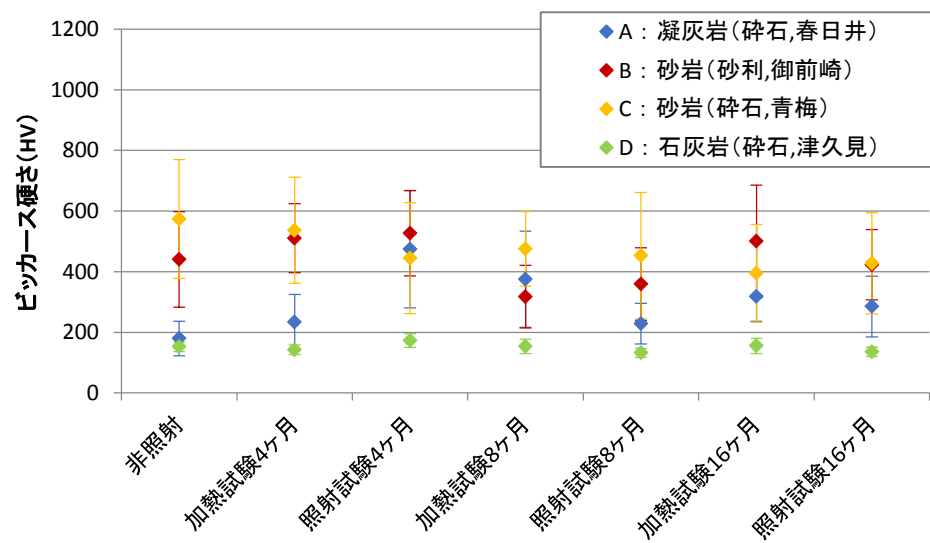


図 3.115 ビッカース硬さ試験結果

3) 線量計測結果

線量計測結果を表 3.36 に、照射試験完了時点の照射量および平均線量率を表 3.37 に示す。

表 3.36 線量計測結果

線量計測		計測位置	備考
年	月	1 列目	
2014	1	11.03	試験開始
		11.04	－
	5	11.47	－
		10.91	－
		10.94	骨材 4 ヶ月試験体回収
	7	11.46	－
		11.33	－
2015	1	10.27	骨材 8 ヶ月試験体回収
	2	9.98	－
		10.67	－
	4	10.75	骨材 16 ヶ月試験体回収

表 3.37 照射量および平均線量率

目標照射量 (kGy)	目安期間	試験体位置	照射日数 (日)	照射量 (kGy)	平均線量率 (kGy/h)
25000	4 ヶ月	1 列目	101	27034	11.15
50000	8 ヶ月	1 列目	210	55027	10.92
100000	16 ヶ月	1 列目	413	107900	10.89

4) XRD 試験結果

XRD（粉末X線回折）試験用試料は、圧縮強度および静弾性係数試験後試験体の一部を取り出し、鉄鉢および瑪瑙乳鉢で破碎・粉碎し、指頭に粒を感じない程度の微粉末に調製して測定を行なった。X線回折装置は、PANalytical 社製X線回折装置（X'Pert PRD MPD）を用い、試料に含有される物質の同定を行った。測定条件は、管球 Cu、入射側発散スリット1°、入射側散乱防止スリット2°、受光側散乱防止スリット5.5mm、管電流40mA、管電圧45kV、スキャン角度 $2\theta=5\sim60^\circ$ 、スキャンスピード $5^\circ/\text{min}$ 、サンプリング間隔 0.03° である。

XRD（粉末X線回折）試験結果を表 3.38 および図 3.116～図 3.139 に示す。

表 3.38 XRD 試験結果

骨材記号	骨材名	試験体管理番号	試験実施時期	鉱物名										
				石英	長石類		角閃石	緑泥石	雲母	方解石	苦灰石	黄鉄鉱	黄銅鉱	石墨
					斜長石	カリ長石								
A	凝灰岩 (春日井)	A01	ガンマ線照射試験4ヶ月後	○	○		△	△	○			△		
		A06	ガンマ線照射試験8ヶ月後	◎	◎		◎	△	◎			△	△	
		A11	ガンマ線照射試験16ヶ月後	◎										
		A16	非照射・加熱試験4ヶ月後	◎				△	△					
		A21	非照射・加熱試験8ヶ月後	◎	△			△	△					
		A26	非照射・加熱試験16ヶ月後	○	○		◎	△	◎					
		A34	試験体成形直後	◎	△	△		△	△					
B	砂岩 (御前崎)	B01	ガンマ線照射試験4ヶ月後	◎	△	△		△	△	△				
		B06	ガンマ線照射試験8ヶ月後	◎	◎	◎		△	△	△				
		B11	ガンマ線照射試験16ヶ月後	◎	◎	△		△	△	△				
		B16	非照射・加熱試験4ヶ月後	◎	◎	○			△					
		B21	非照射・加熱試験8ヶ月後	◎	○	△		△	△	△				
		B26	非照射・加熱試験16ヶ月後	◎	◎	△			○					
		B34	試験体成形直後	◎	◎	◎		△	△	△				
C	砂岩 (青梅)	C01	ガンマ線照射試験4ヶ月後	◎	○	△		△	△	△		△		
		C06	ガンマ線照射試験8ヶ月後	◎	◎	○		△	△	△		△		
		C11	ガンマ線照射試験16ヶ月後	◎	◎	△		△	△	◎		△		
		C16	非照射・加熱試験4ヶ月後	◎	◎	○		△	△	△		△		
		C21	非照射・加熱試験8ヶ月後	◎	○	△		△	△	○		△		
		C26	非照射・加熱試験16ヶ月後	◎	◎	○		△	△	○				
		C34	試験体成形直後	◎	◎	○		△	△	△		△		
D	石灰石 (津久見)	D01	ガンマ線照射試験4ヶ月後							◎	△			△
		D06	ガンマ線照射試験8ヶ月後							◎	△			△
		D11	ガンマ線照射試験16ヶ月後							◎				△
		D16	非照射・加熱試験4ヶ月後							◎	△			△
		D21	非照射・加熱試験8ヶ月後							◎	△			△
		D26	非照射・加熱試験16ヶ月後							◎	△			△
		D34	試験体成形直後							◎				

備考) 最強ピークの回折強度：◎：40,000Counts 以上 ○：40,000～20,000Counts △：20,000Counts 未満
空白：未検出最強ピークの回折強度は、バックグラウンドを差し引いた値を用いた。

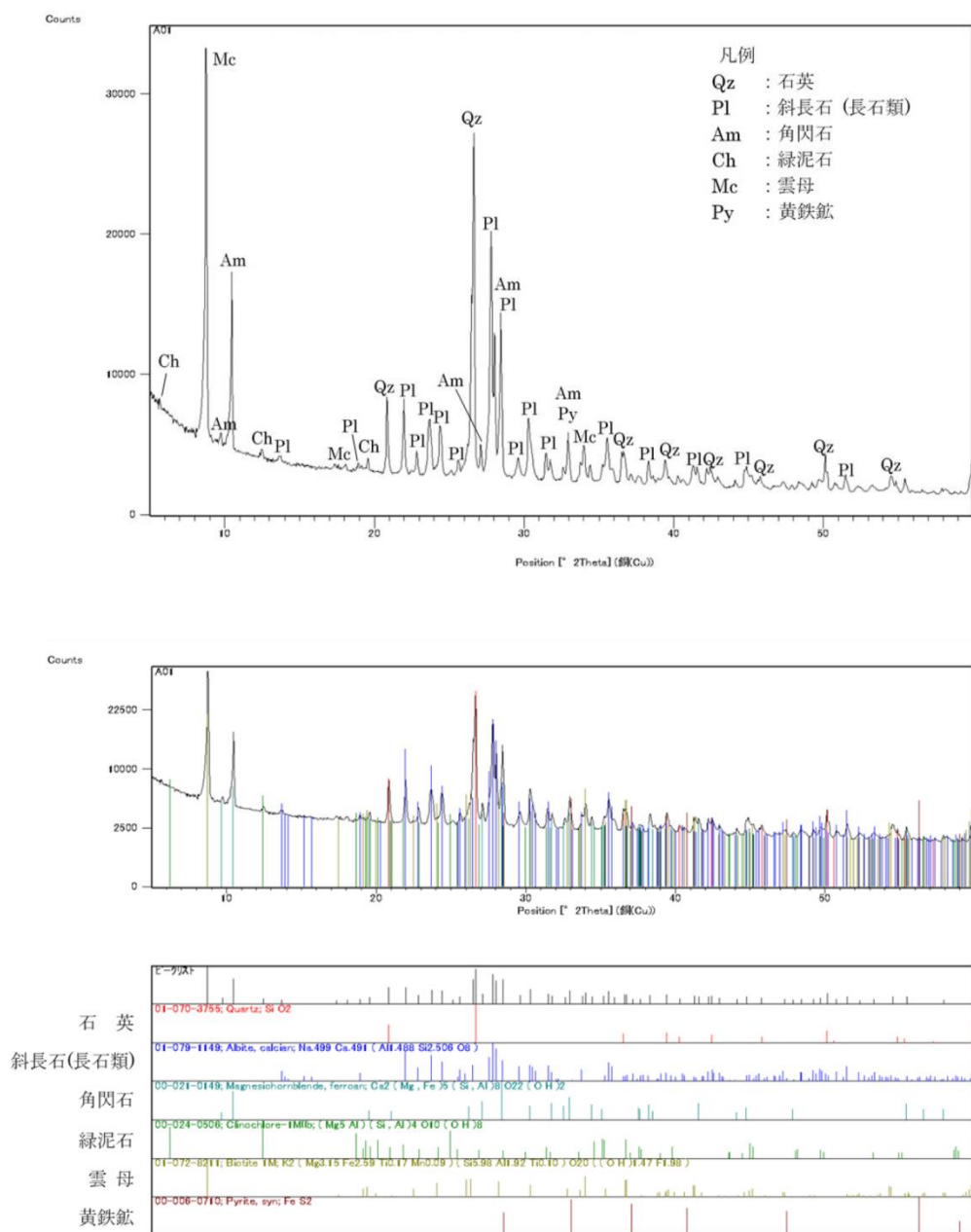


図 3.116 粉末X線回折試験結果 (A01 : 凝灰岩)

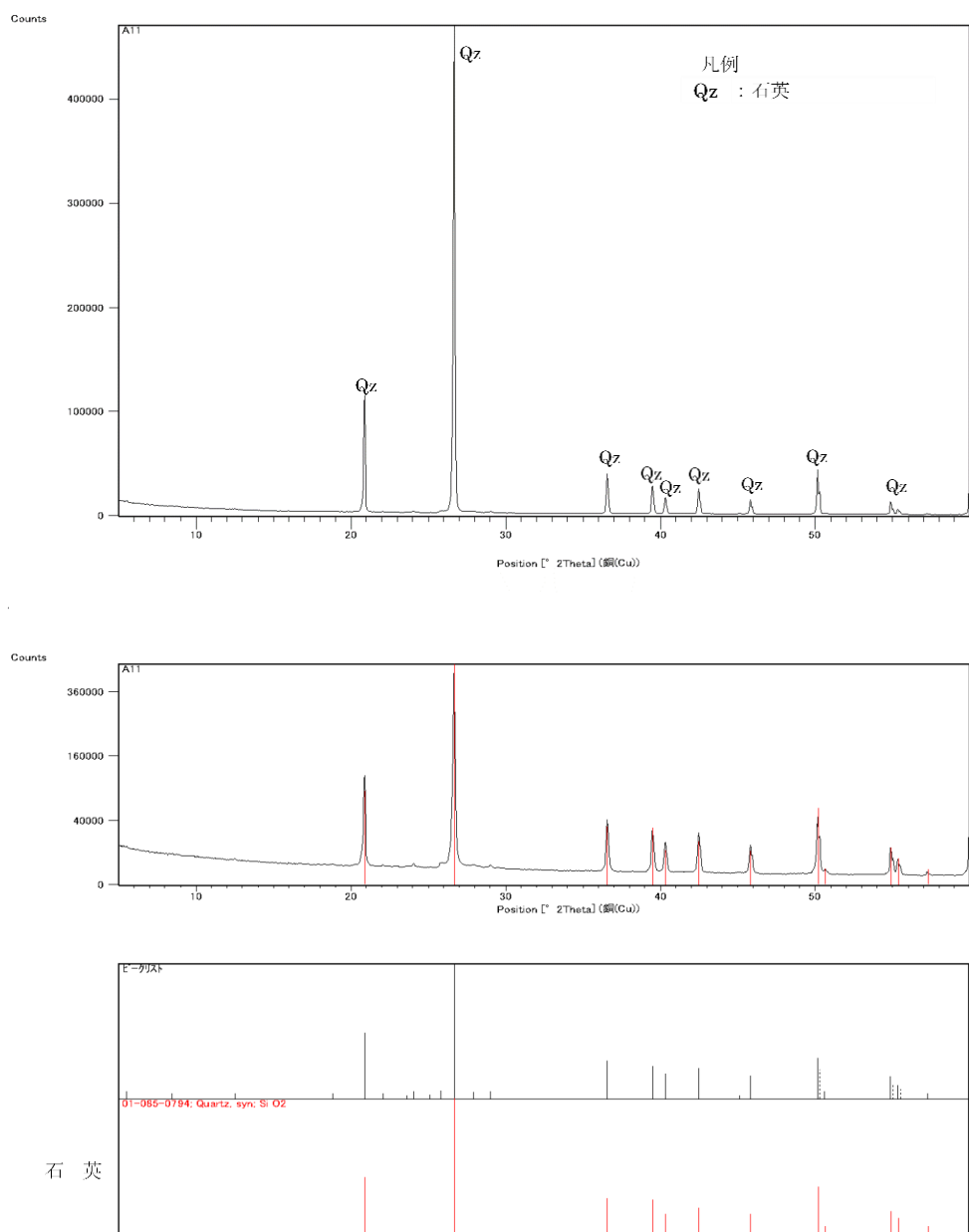


図 3.118 粉末X線回折試験結果 (A11 : 凝灰岩)

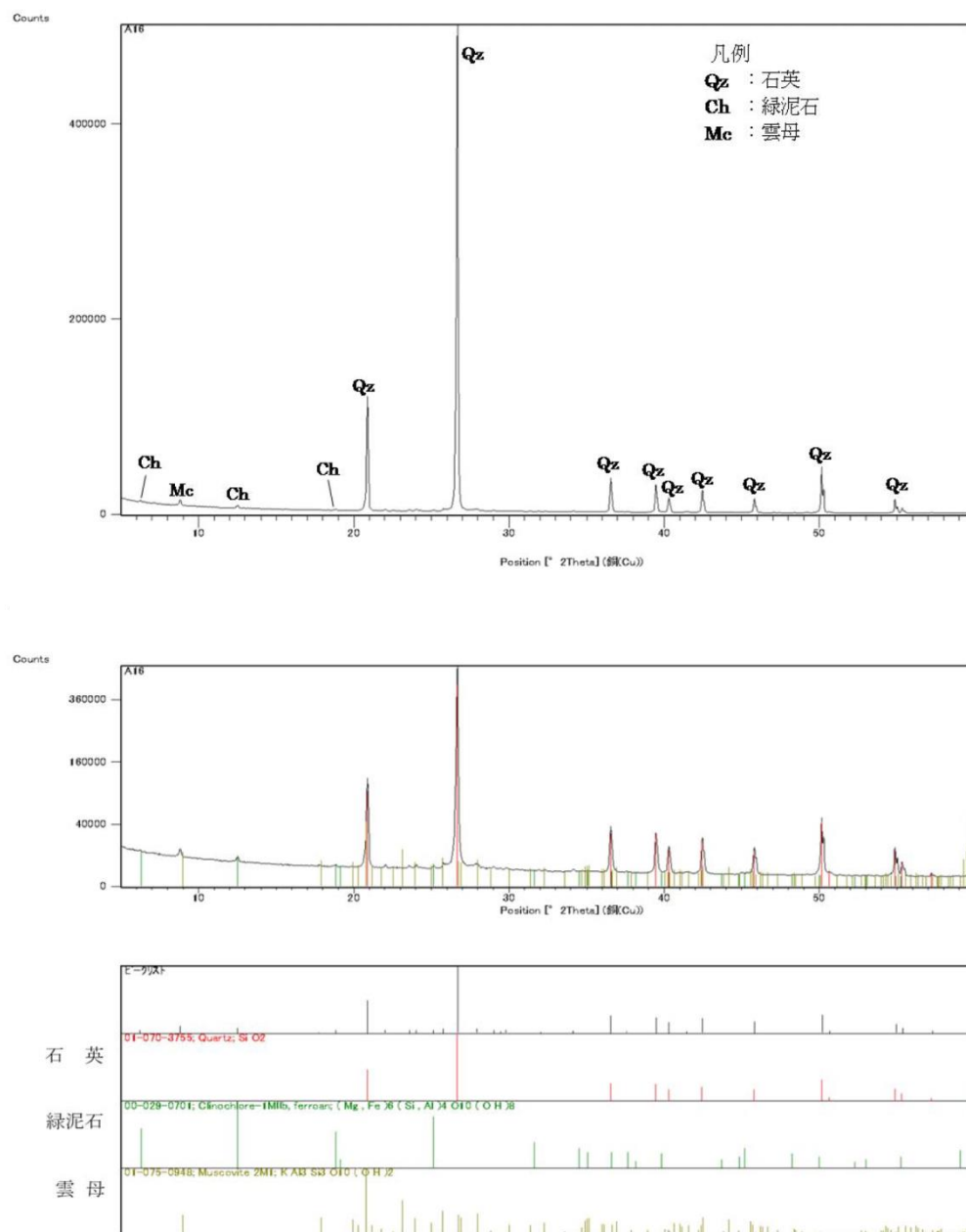


図 3.119 粉末X線回折試験結果 (A16 : 凝灰岩)

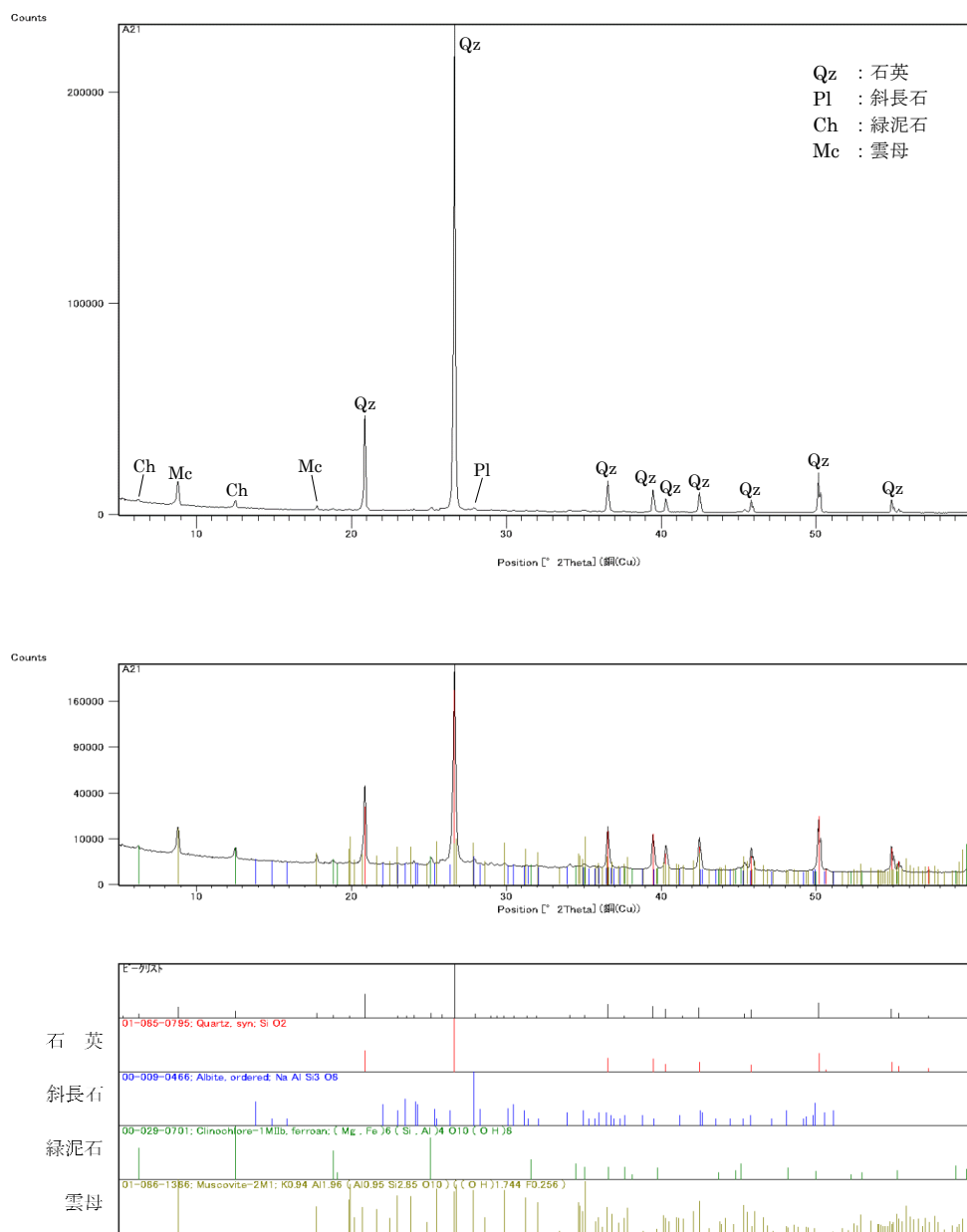


図 3.120 粉末X線回折試験結果 (A21: 凝灰岩)

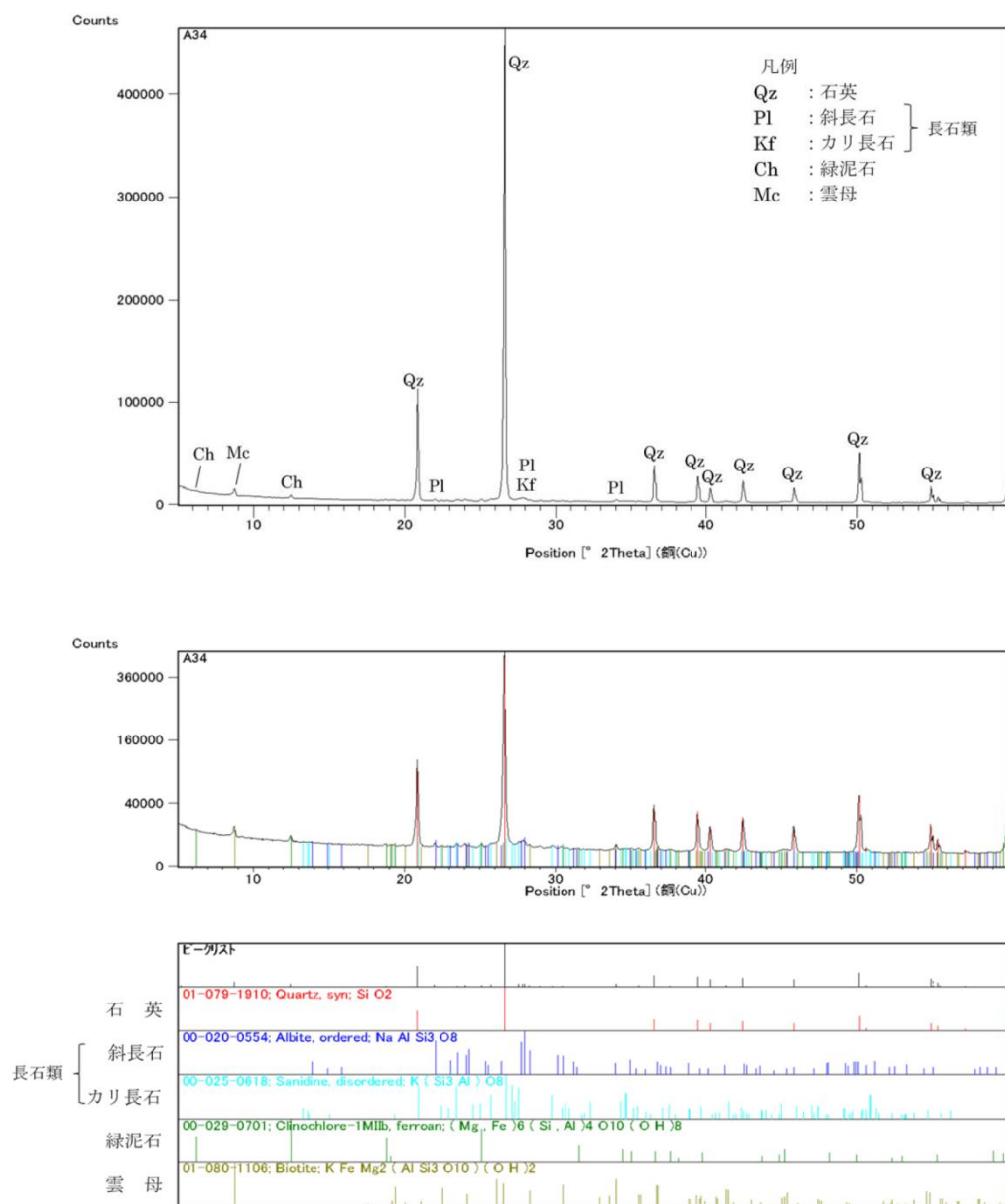


図 3.121 粉末X線回折試験結果 (A34: 凝灰岩)

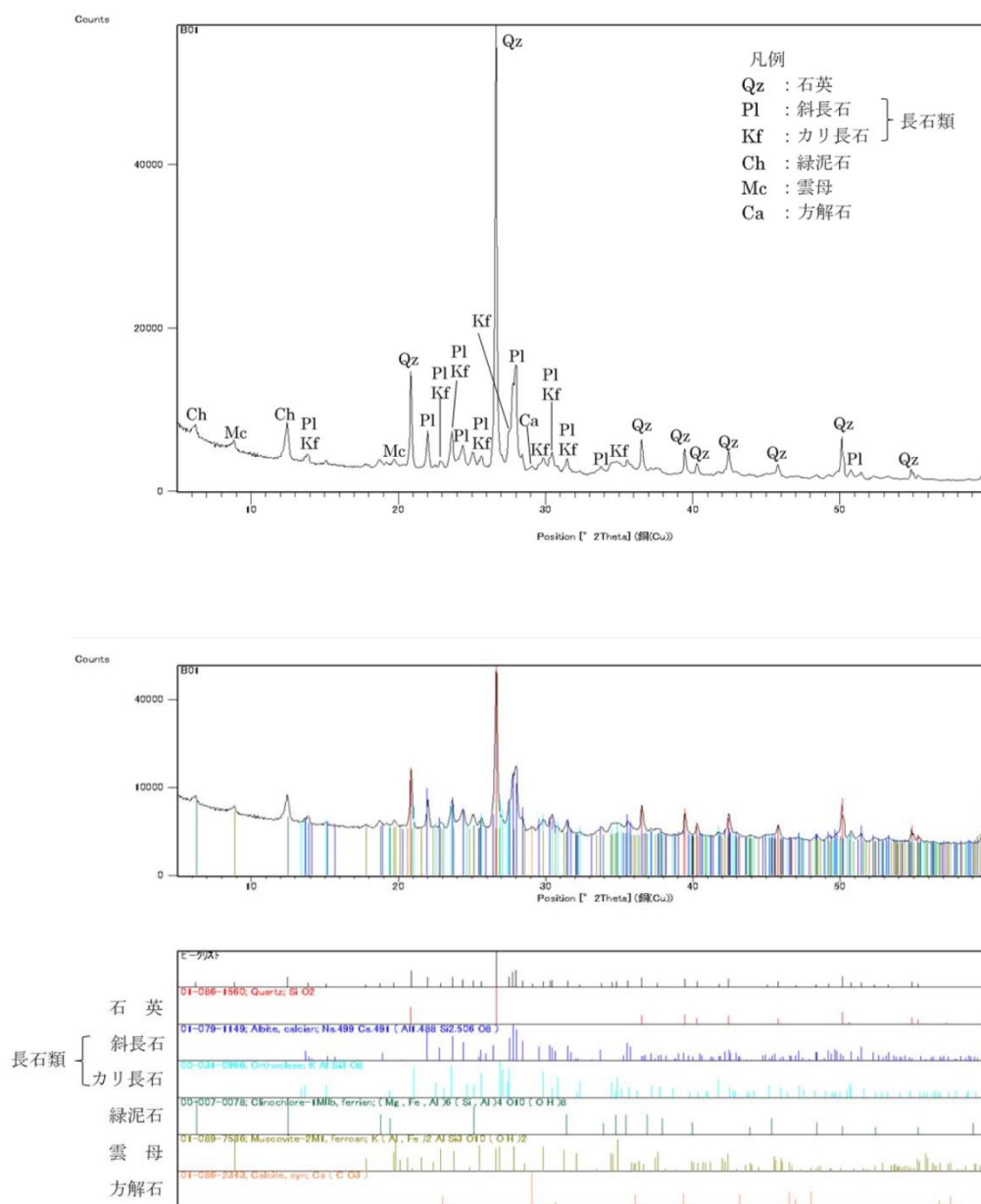


図 3.122 粉末X線回折試験結果 (B01 : 砂岩)

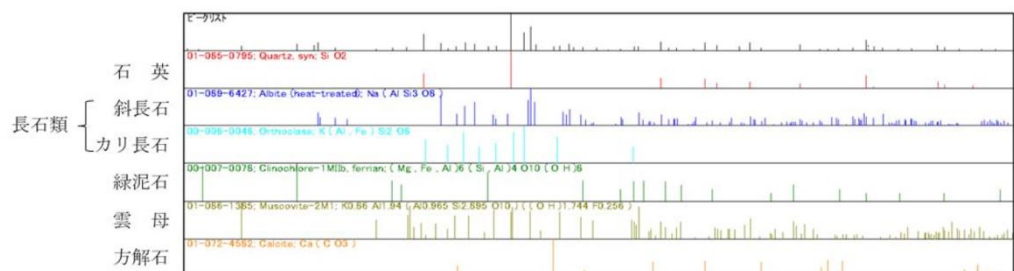
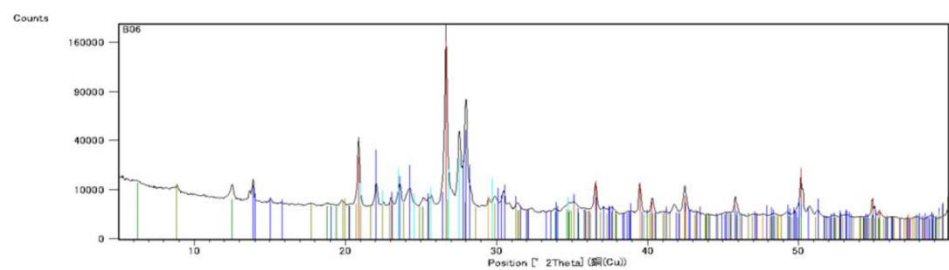
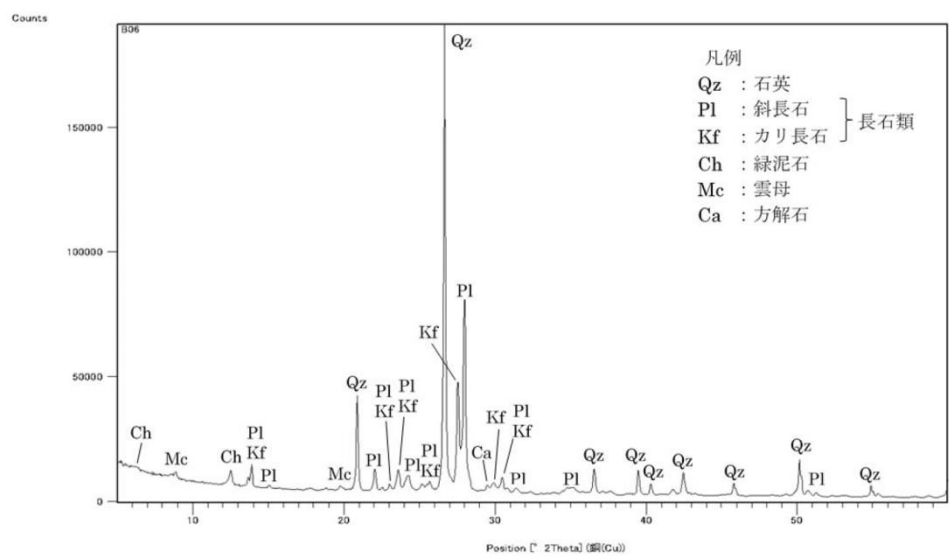


図 3. 123 粉末X線回折試験結果 (B06 : 砂岩)

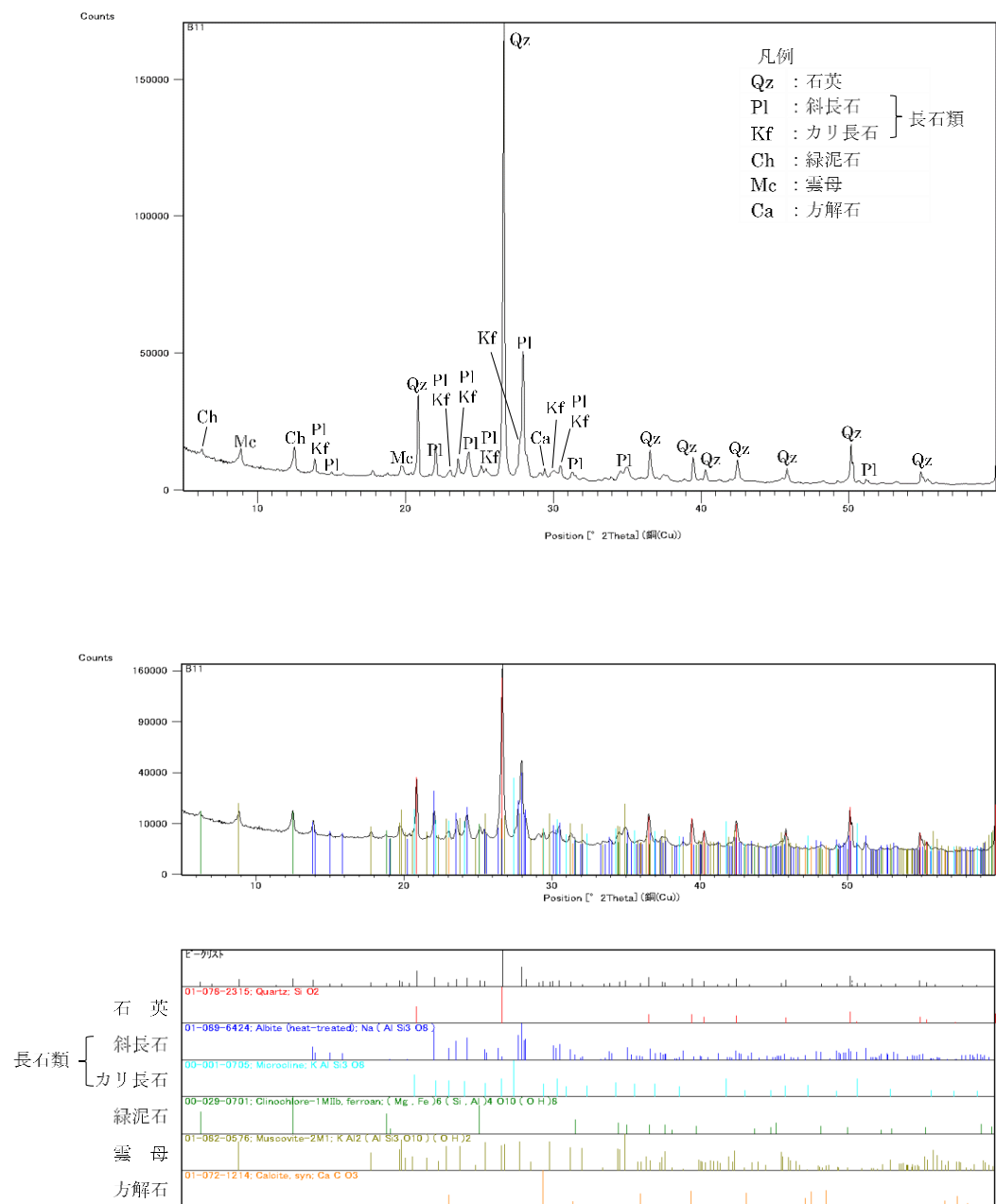


図 3.124 粉末X線回折試験結果 (B11 : 砂岩)

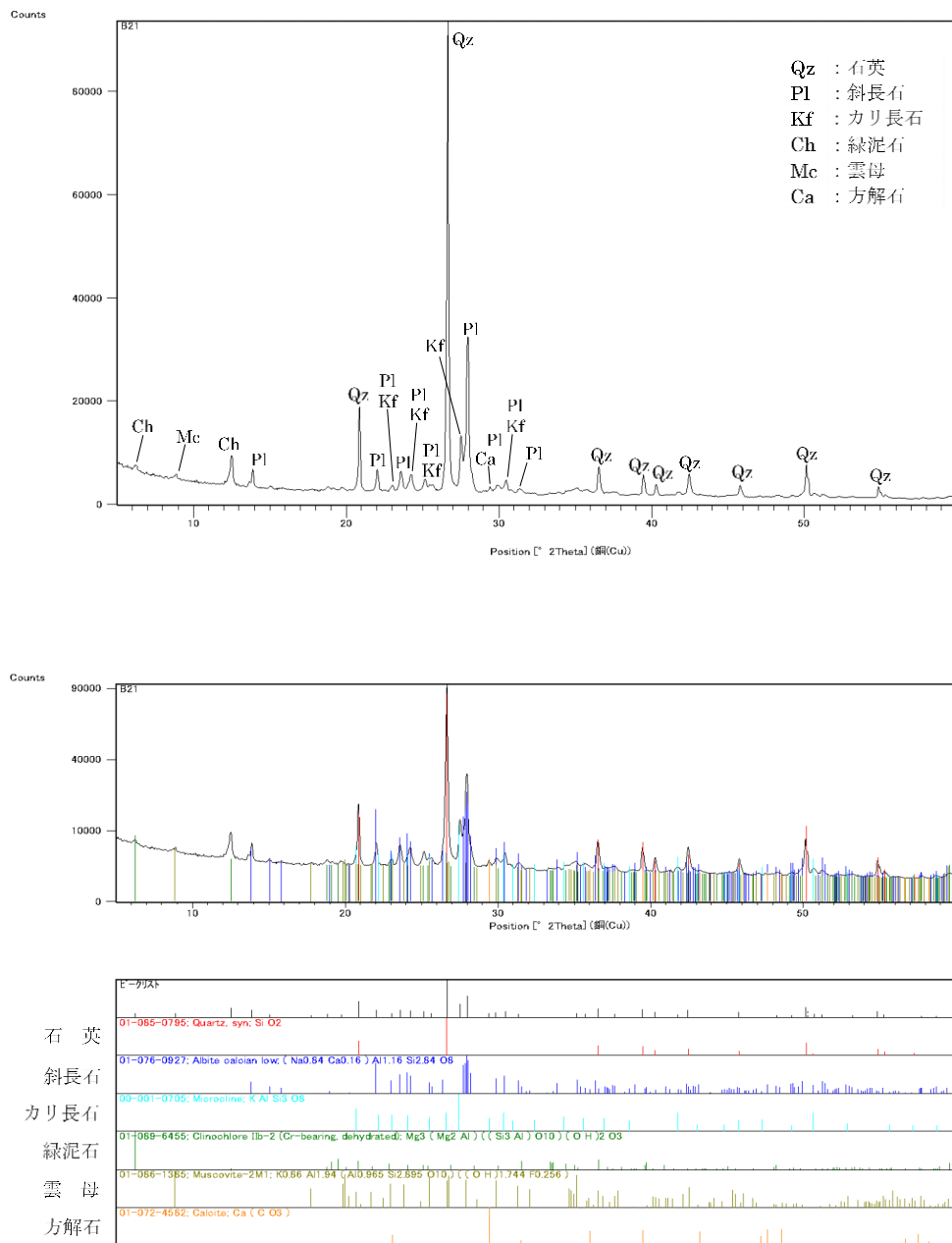


図 3.126 粉末X線回折試験結果 (B21 : 砂岩)

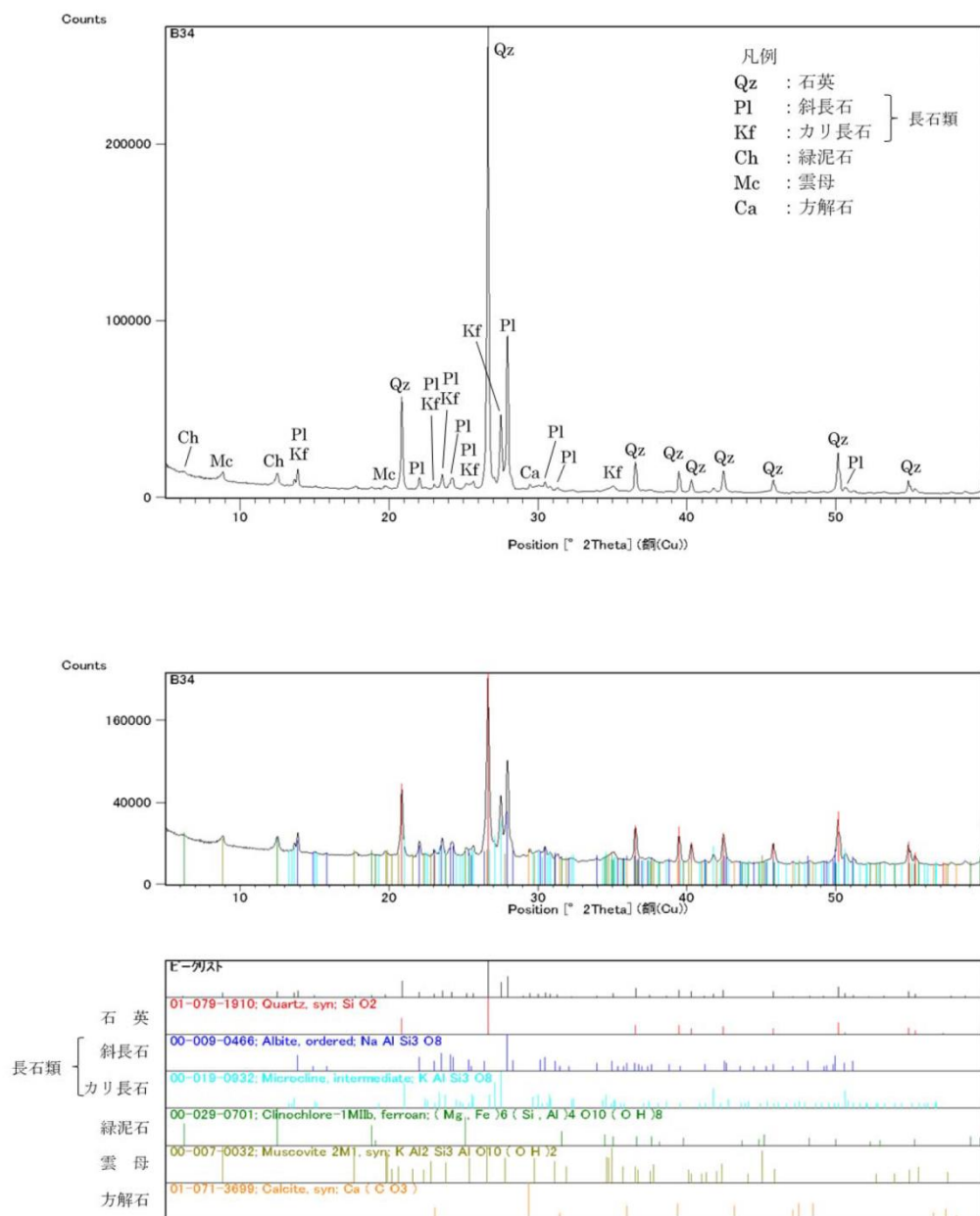


図 3.127 粉末X線回折試験結果 (B34 : 砂岩)

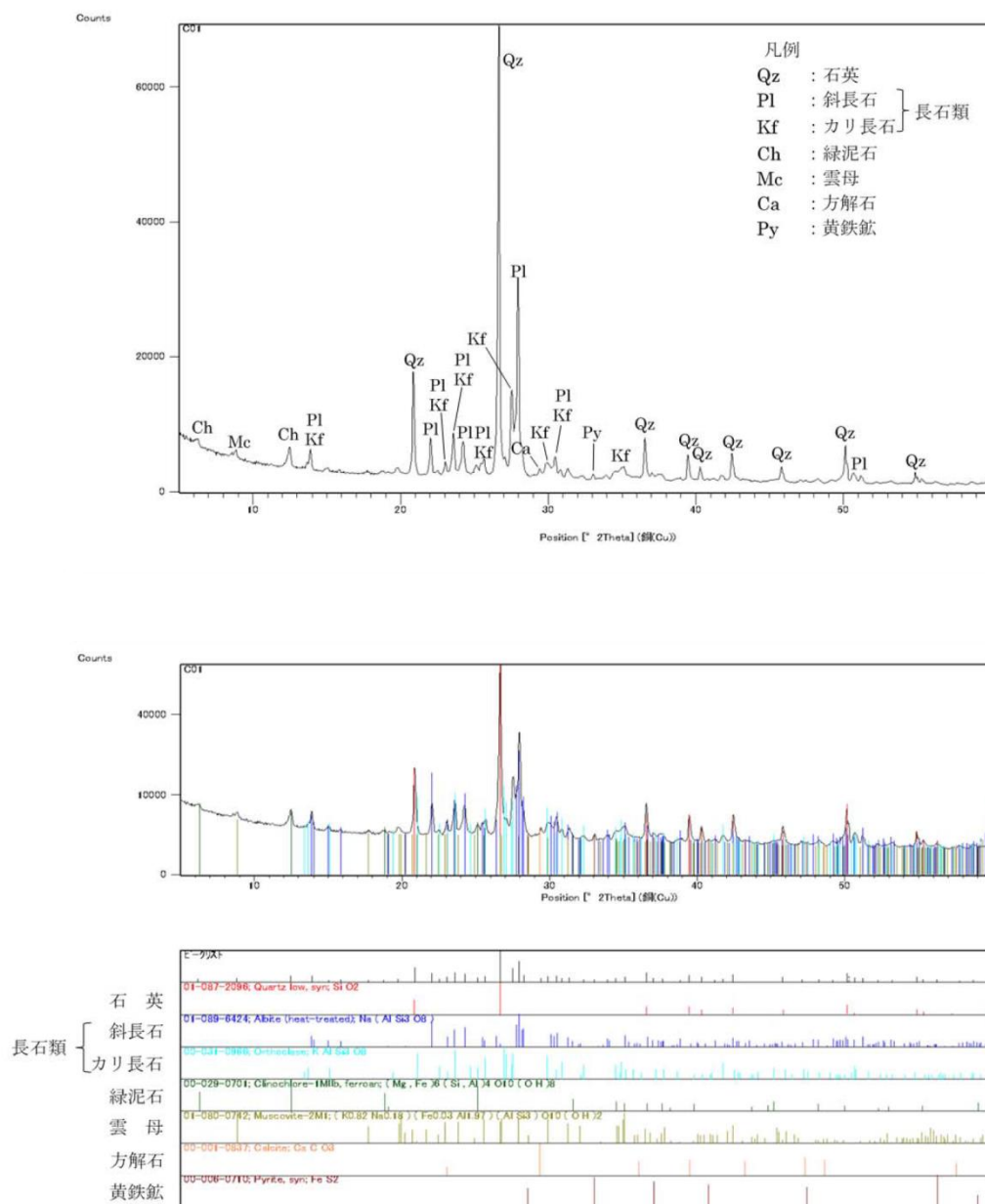


図 3.128 粉末X線回折試験結果 (C01 : 砂岩)

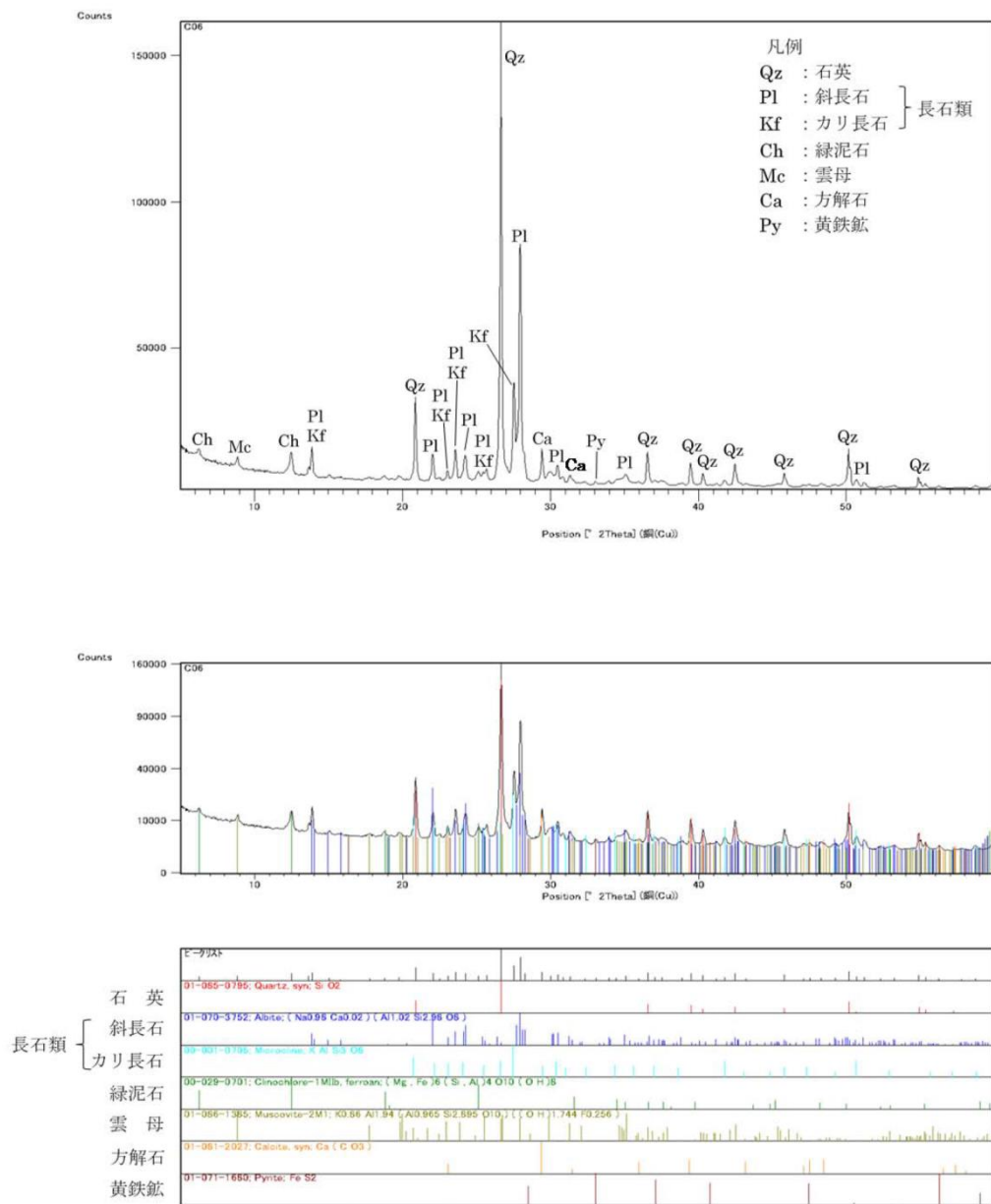


図 3.129 粉末X線回折試験結果 (C06 : 砂岩)

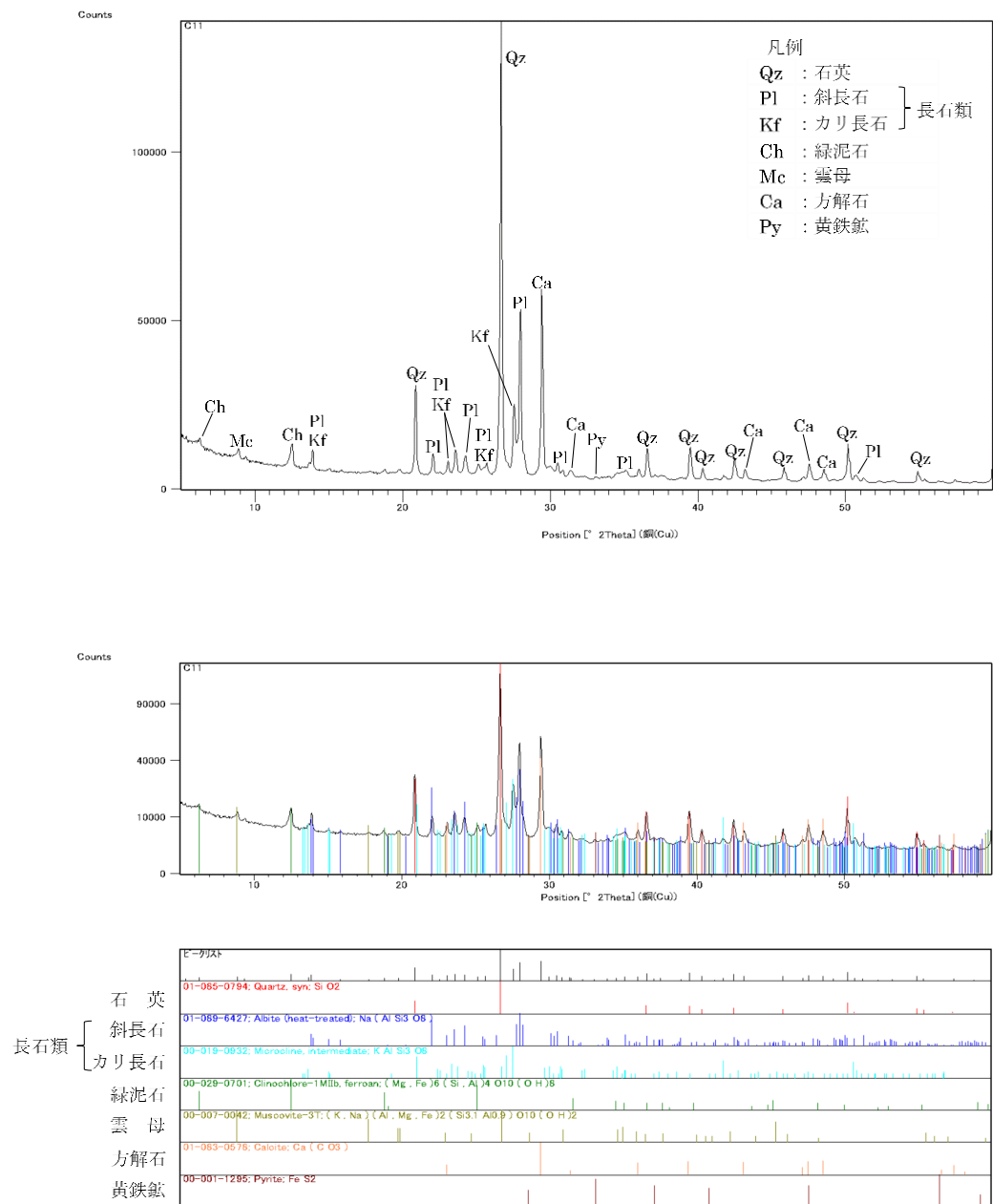


図 3.130 粉末X線回折試験結果 (C11 : 砂岩)

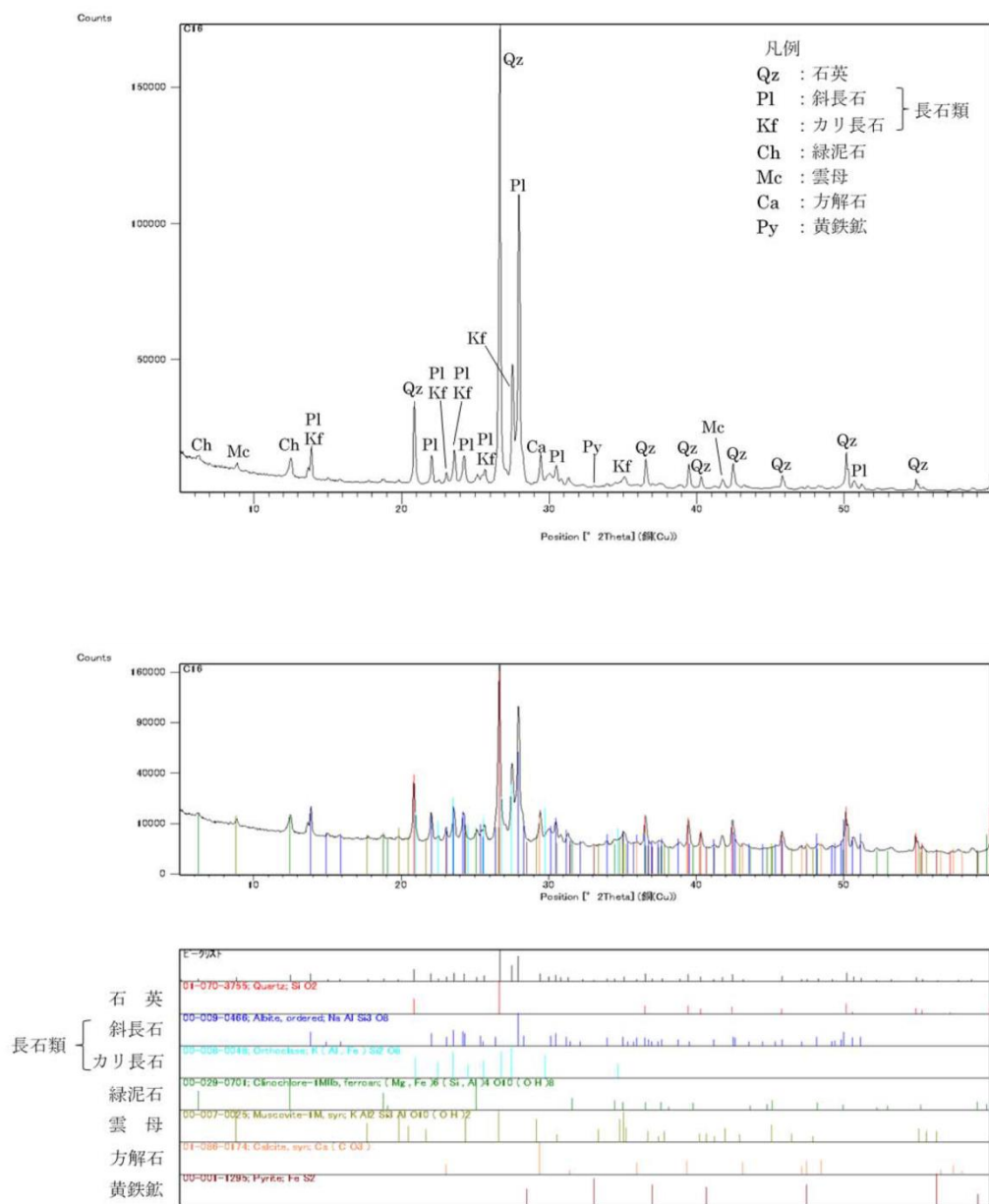


図 3.131 粉末X線回折試験結果 (C16 : 砂岩)

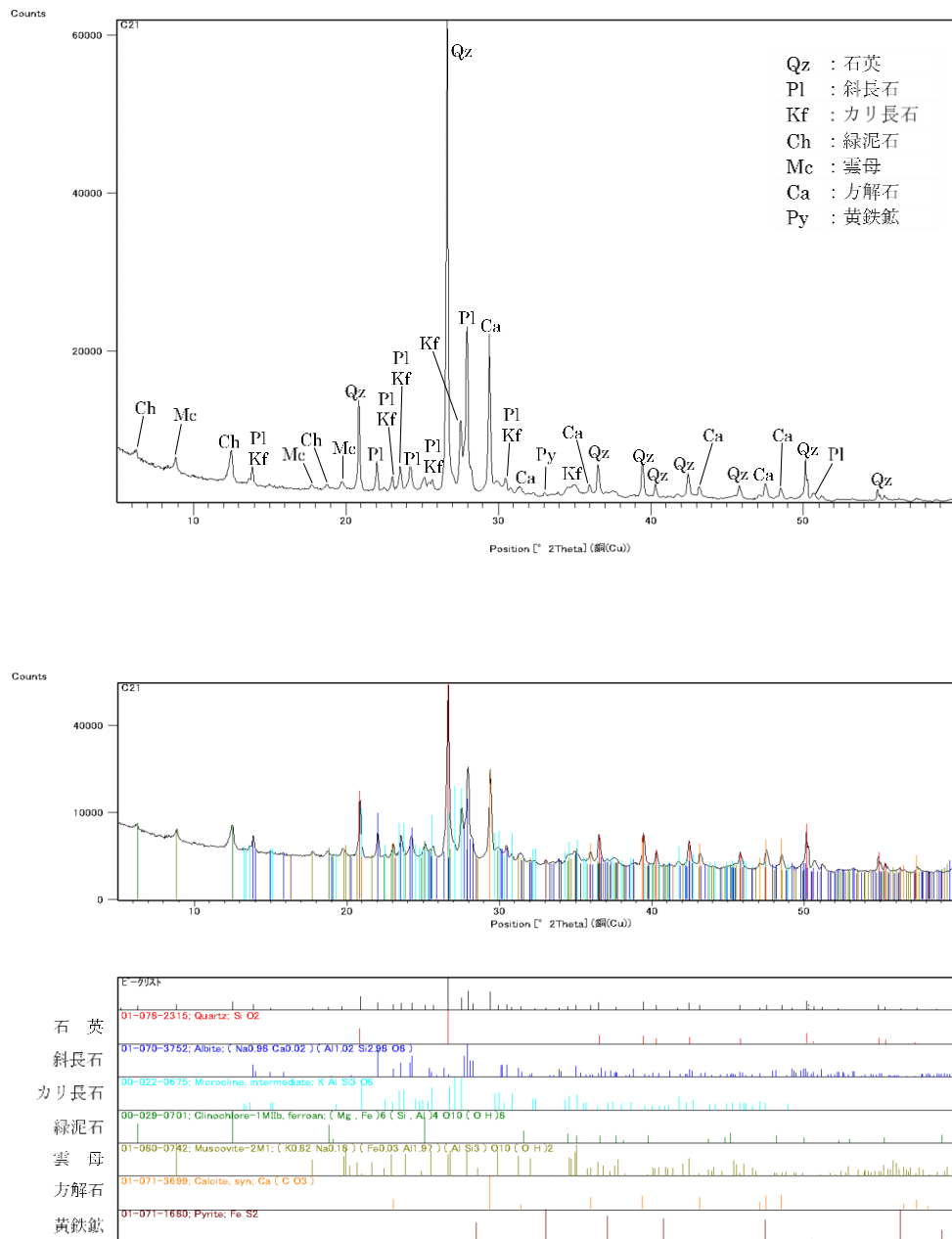


図 3.132 粉末X線回折試験結果 (C21 : 砂岩)

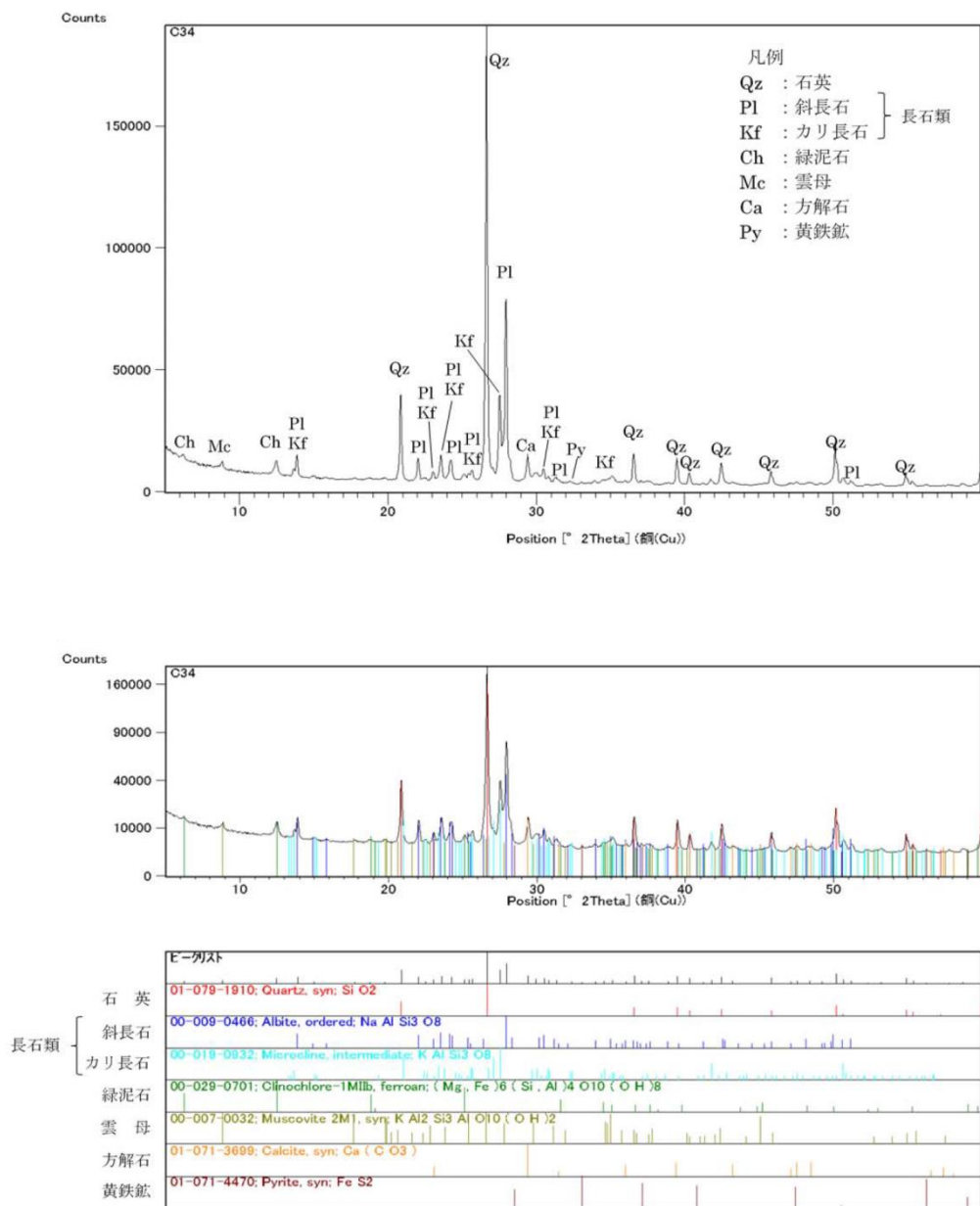


図 3.133 粉末X線回折試験結果 (C34 : 砂岩)

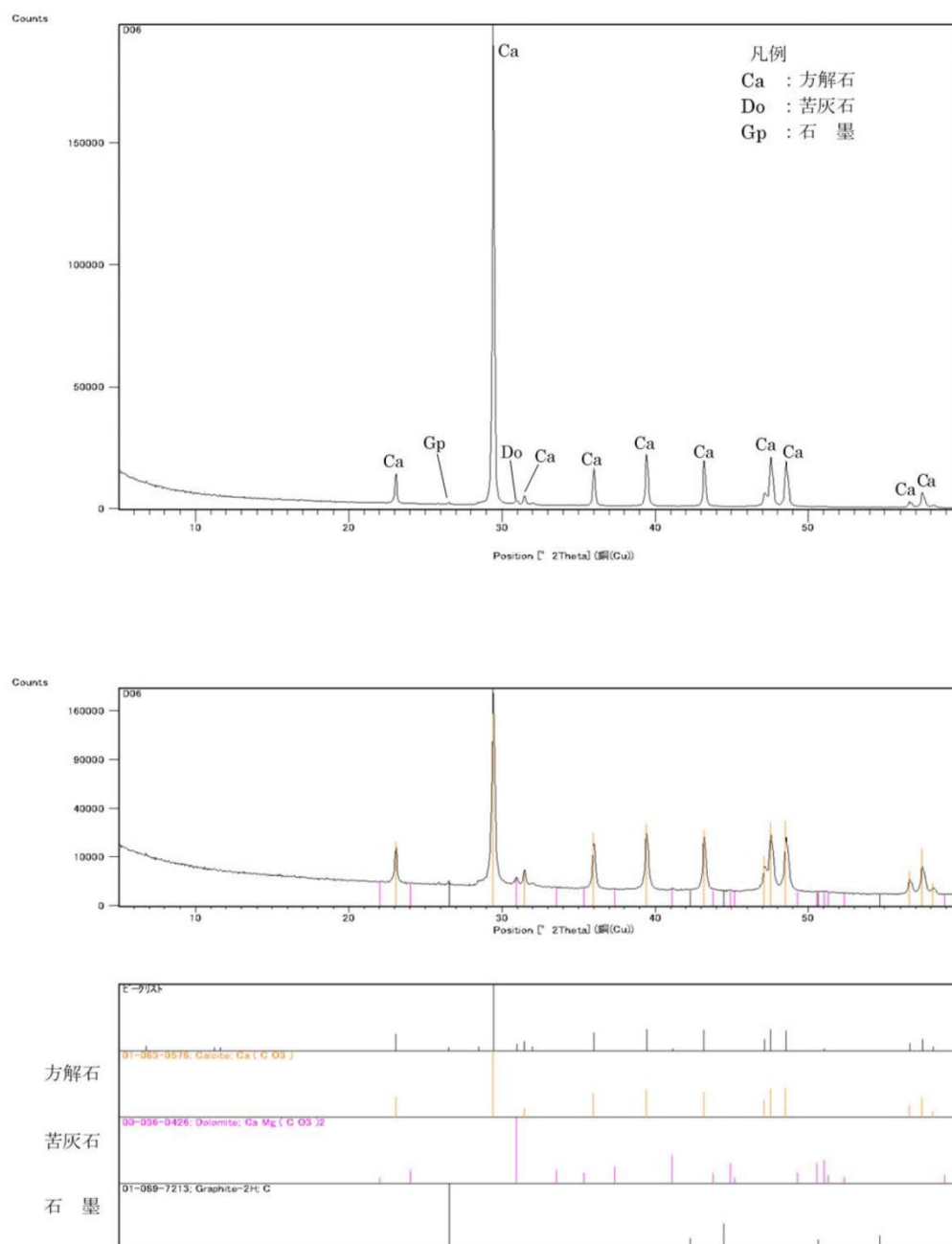


図 3. 135 粉末X線回折試験結果 (D06 : 石灰石)

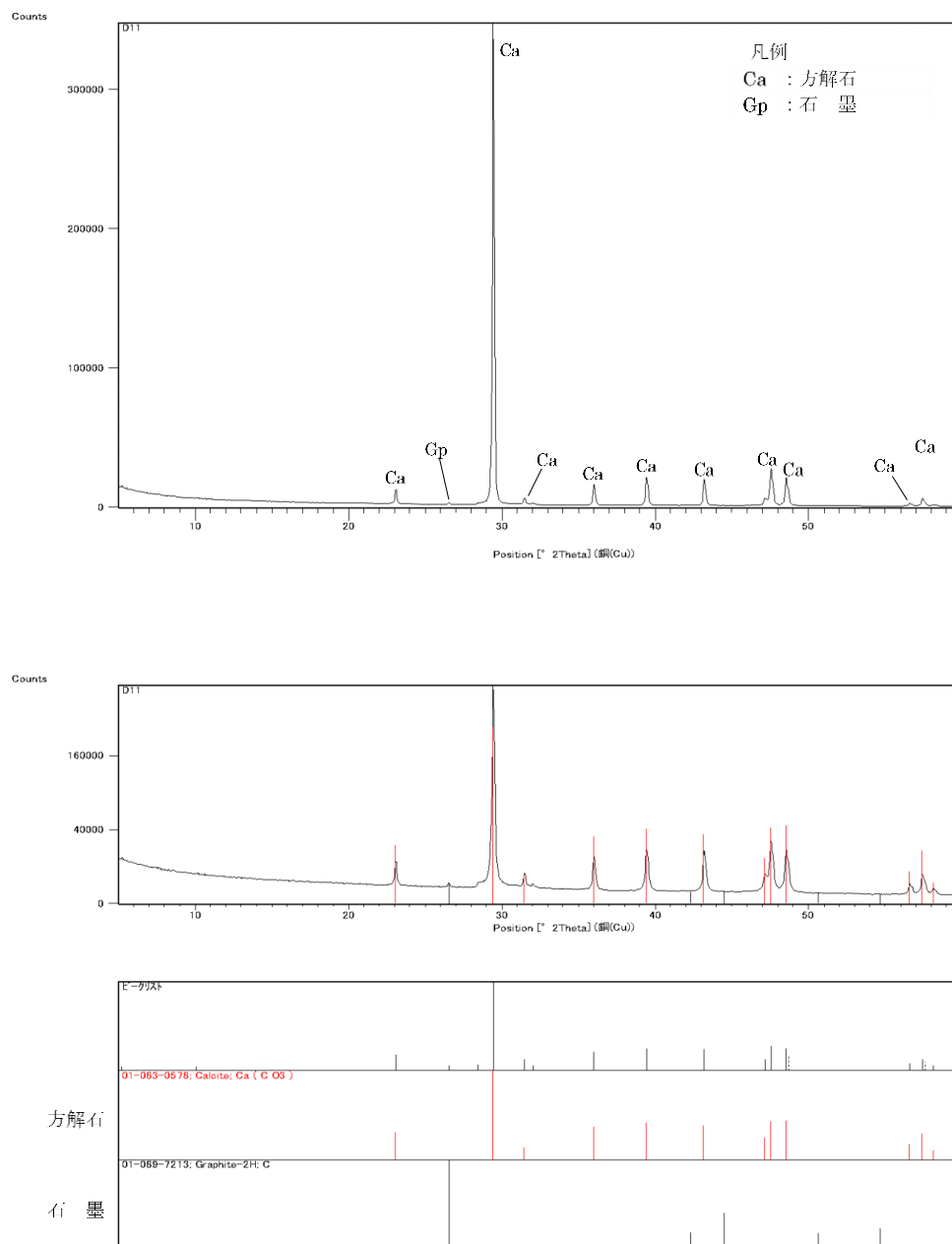


図 3.136 粉末X線回折試験結果 (D11 : 石灰石)

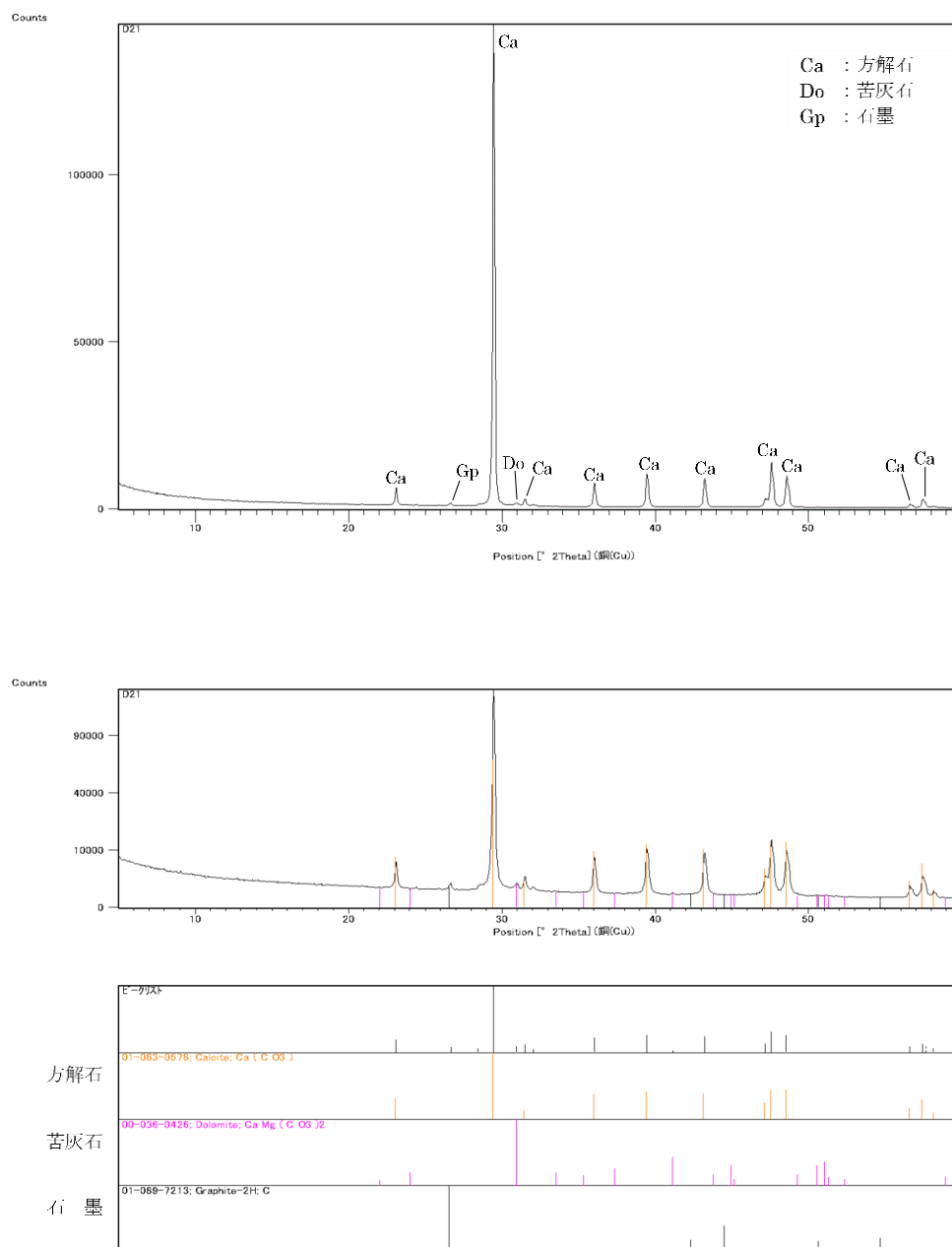


図 3. 138 粉末X線回折試験結果 (D21 : 石灰石)

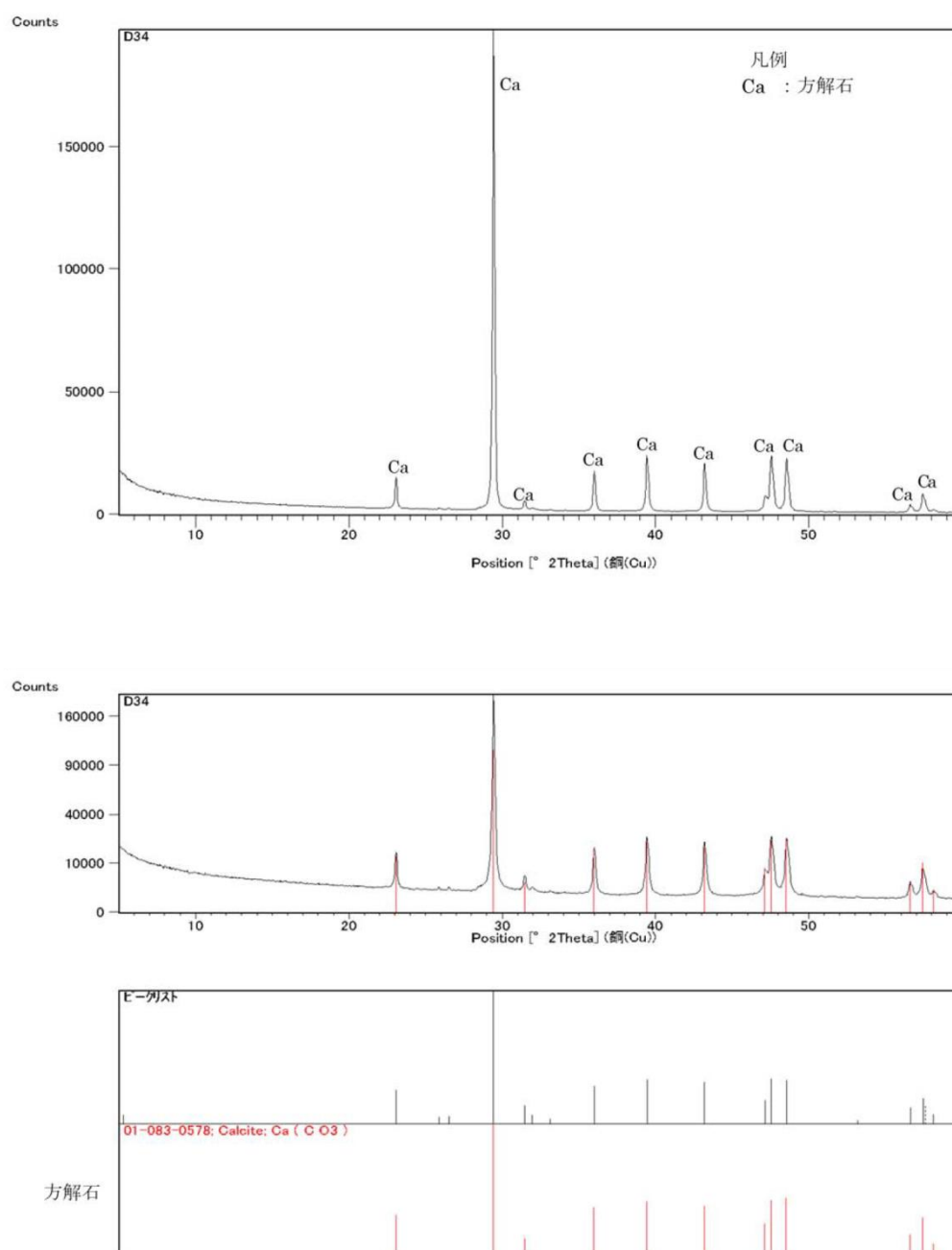


図 3. 139 粉末X線回折試験結果 (D34 : 石灰石)

3. 4 まとめ

(1) コンクリート

ガンマ線照射後のコンクリートの強度は、増大した。これは中性化によるセメントペーストの強度増大がコンクリートの強度増大につながったものと考えられる。

本研究のコンクリート試験体へのガンマ線照射試験と加熱試験、乾燥試験から、 2.0×10^5 kGy の範囲でガンマ線によるコンクリート強度への影響は、熱・乾燥影響と同等か、強度低下への影響は小さいことを確認した。

(2) セメントペースト

ガンマ線発熱による影響は乾燥によるものであり、強度への影響は熱・乾燥影響と同等かそれよりも小さい。ガンマ線環境下で中性化が伴う場合には強度が増大する可能性があることを明らかにした。このことから、ガンマ線照射はセメントペーストの強度低下には大きく寄与しないと言える。

(3) 骨材

骨材試験体の照射試験によって、 1.0×10^5 kGy の範囲で体積変化は熱・乾燥影響と同等の範囲でしか変化せず、特段の膨張挙動はしないことを確認した。ガンマ線の電離作用により岩石鉱物がメタミクト化し、膨張する可能性はあるが、実際の原子炉内への影響としては非常に小さく、熱・乾燥影響と同等である。

<補足>

ガンマ線照射試験を終えた照射量が 2.5×10^4 、 5.0×10^4 、 1.0×10^5 kGy のコンクリート試験体（骨材 2 種類、 $\phi 4 \times 6$ cm）、セメントペースト試験体（水セメント比 3 種類、 $3 \times 13 \times 300$ mm）、骨材試験体（4 種類、 $\phi 4.5 \times 9$ cm）の物理特性については、以下の結果が得られた。

1) コンクリート

a) 質量・寸法

質量減少量は、乾燥の程度に依存して大きくなる傾向が確認された。寸法（直径、高さ）についても、乾燥により概ね縮小される傾向にあるが、変化率としては質量ほど大きな変化は生じなかった。また、骨材の違いによる顕著な差はなかった。（図 3. 48、図 3. 49、図 3. 50）

b) 圧縮強度

ガンマ線および加熱を受けた試験体において強度が増加する傾向が見られた（図 3. 60）。これは、ガンマ線発熱および加熱試験での乾燥の影響により強度が変化した

ことに加え、セメントペーストの中性化による強度増大のためと考えられる。

c) 静弾性係数

ガンマ線および加熱を受けた試験体の方が 20℃封緘養生の試験体より小さくなった (図 3. 56)。乾燥が進み密度が減少したことで、ヤング率が低下したことが考えられる。また照射量や線量率の大小で顕著な差は確認できなかった。

d) 自由水率

照射量および線量率が大きいほど自由水率の減少が大きくなる傾向が見られた (図 3. 57)。

e) 結合水率

照射の有無、照射量および線量率による明らかな差は確認できなかった (図 3. 58)。

以上より、ガンマ線照射影響は、熱・加熱影響によって評価してよく、ガンマ線影響に関する目安値は再設定しなくてよいと考えられる。ただし、熱・加熱影響評価における 65℃の設定根拠を明確にすることが同時に求められる。

2) セメントペースト

ほぼすべてのケースで照射後に強度増加が確認され、かつ、非照射のものよりも強度増加は大きかった (図 2. 2. 1-3～図 2. 2. 1-8)。このことから、ガンマ線の照射はセメントペーストに対して強度増加の影響を有するものと考えられるが、そのメカニズムは不明である。

3) 骨材

本試験の範囲ではガンマ線により骨材の物性に大きな影響が生じないことが明らかとなった (図 3. 109～図 3. 112)。

しかし、ばらつきが大きく、ガンマ線照射や 65℃加熱による乾燥影響は明確に分からなかった。

4. 熱・乾燥影響に関するメカニズム解明の試験的検討

4. 1 物理特性試験（セメントペースト）

4. 1. 1 セメントペーストの熱・乾燥影響

(1) 概要

本検討は、照射試験で実施したセメントならびに水セメント比を有する硬化セメントペーストを作製し、乾燥・加熱による強度変化を確認することによって、照射環境下にあるコンクリート強度評価に資する基礎データを取得することを目的とした。

(2) 実験方法

本実験には市販の早強セメントを用いた。用いたセメントは照射試験においてコンクリートを作製したセメントと同一のものである。水セメント比 0.50 として、ホバートミキサにより 3 分間の練混ぜを行った。練混ぜ後、ブリージングが収まるまで練返しを行い、その後、 $3 \times 13 \times 300\text{mm}$ の鋼製型枠に打込みを行い、打込み後 4 日で脱型を行った。その後は恒温室 ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) において、アルミ蒸着した袋を用いて試験体を材齢 6 ヶ月まで養生した。その後、測定用の試験体を精密切断機で $13 \times 100 \times 3\text{mm}$ に切り出した。長さや質量を測定し、その後、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 環境したで、相対湿度 95%、80%、79%、58%、45%、33%、11%、および 40°C と 75°C での環境で加熱を行った。長さの測定には、精度 0.001mm の変位計を、質量変化には精度 0.0001mg の精密天秤を用いた。乾燥後、加熱後約 100 日後に長さ変化と質量変化を測定した上で、曲げ試験を実施した。曲げ試験はスパンを 60mm として、 100mm の試験体から 2 回、曲げ試験を行い、計 8 つの試験の平均で各加熱・乾燥状態における曲げ強度を評価した。

(3) 実験結果

質量変化と収縮ひずみの測定結果を表 4.1 に示す。これらの乾燥状況がわかるように、質量変化を図 4.1 に、長さ変化を図 4.2 に示す。ここに示されるように、乾燥にともない、水分が逸散し、収縮するようすが確認できる。収縮の傾向は既往研究と概ね一貫性があるが、45%RH 以下の収縮量は既往研究よりも大きい傾向にある。

表 4.1 乾燥後の試験体の状況

	ひずみ	質量減少率
75 degC	-0.00518	-0.18338
40 degC	-0.00487	-0.14684
11%RH	-0.00526	-0.14538
33%RH	-0.00444	-0.12408
45%RH	-0.00367	-0.0809
58%RH	-0.00266	-0.06013
79%RH	-0.00215	-0.0295
85%RH	-0.00157	-0.01451
95%RH	-0.00074	-0.00594
100%RH	0	0

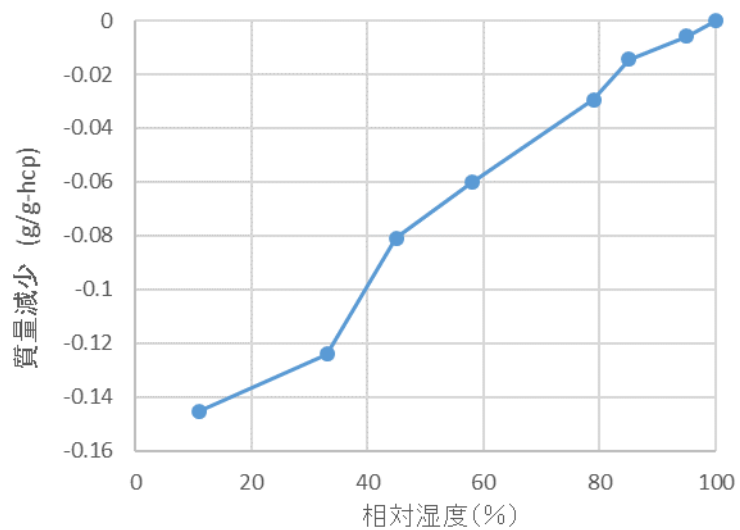


図 4.1 H50 試験体の質量減少と乾燥の関係

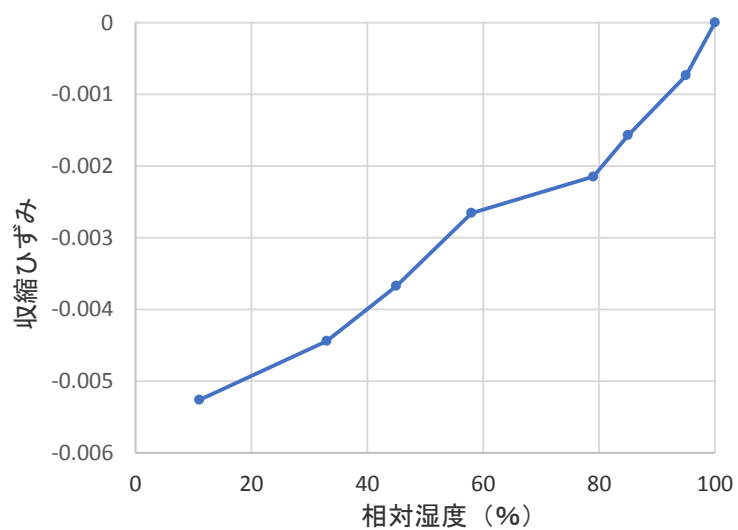
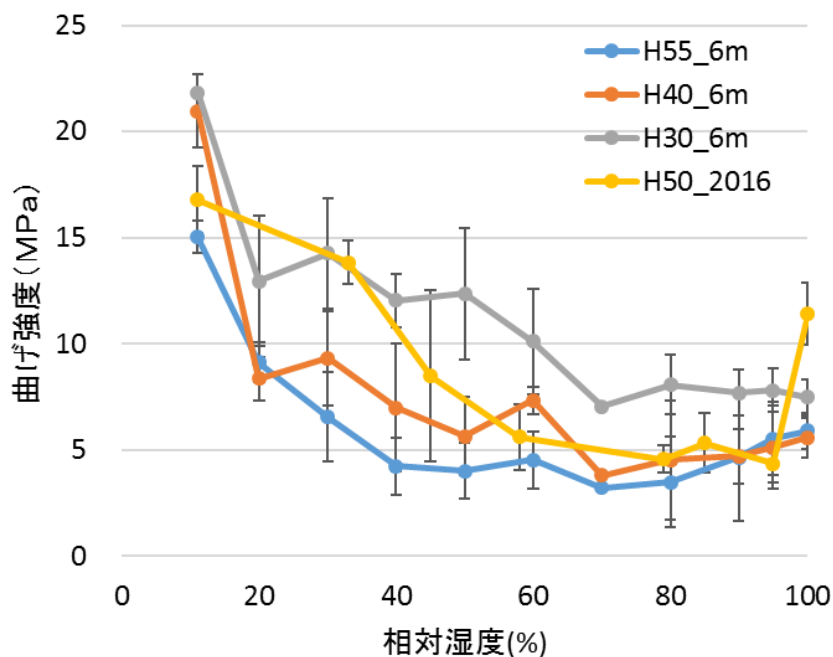


図 4.2 H50 試験体の長さ変化の乾燥の関係

この乾燥の状態から、曲げ試験を行って強度を得た。その傾向を過年度までの異なる水セメント比のデータとの関係から評価するため、過年度までのデータも含めて図 4.3 に示す。ここに示されるように、封緘状態と飽水状態の試験体強度の差はあるが、乾燥に伴い、特に 60%RH の環境で強度が増大していく挙動は、水セメント比 0.40 (H40) と 0.55 (H55) の過去のデータのちょうど中間に位置しており、一貫性のあるデータが得られている。11%RH 時の強度も水セメント比の関係に一貫性があった。このように乾燥にともない H50 の試験体は強度が増大する。このことから、実験に際して、中性子照射試験の PIE においては、乾燥の程度を同一にすることの意義は大きかったとかがえられる。今後、これらのペーストのデータならびに骨材照射のデータから、メソスケールモデルを構築して、照射環境下における強度変化のメカニズムを定量的に評価することが望ましい。



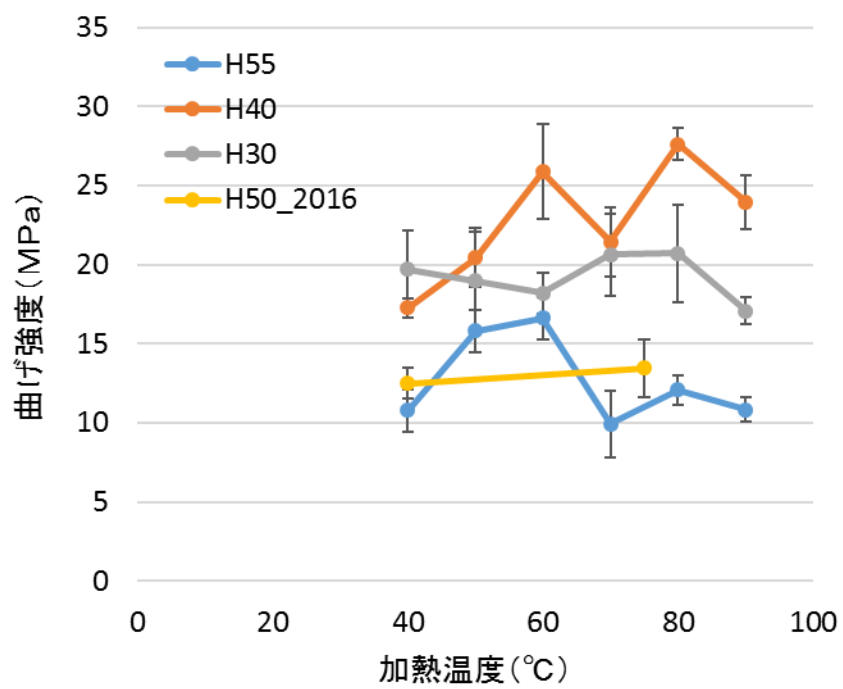


図 4.3 乾燥の違いによる曲げ強度の変化

4. 2 物理特性試験（モルタル）

(1) 試験目的

セメントペーストベースでの熱・乾燥影響評価に加え、モルタルベースでの熱・乾燥による物性変化のプロセスを確認するため、ガンマ線照射試験、中性子照射試験と同等の調合のモルタル試験体を用いて熱・乾燥試験を実施し、各物性データを取得する。熱・乾燥条件を試験パラメータとする。

(2) 試験計画

1) 試験体

高崎で実施したガンマ線照射試験およびエネルギー技術研究所 JeepⅡ 照射炉（kjeller, Norway）で実施した中性子照射試験に使用されたコンクリート試験体と同じ材料を用いてモルタル試験体を 30 体作製した。使用材料および調合は表 4.2 および表 4.3 に示す通り、セメントには早強ポルトランドセメントを、細骨材には山砂を用いて、水セメント比を 50% として、粗骨材に凝灰岩碎石を用いた 1 調合である。モルタル試験体の作製方法としては、表 4.3 に示す調合のコンクリートを練混ぜて、そのコンクリートを 5mm の網ふるいでウェットスクリーニングし、粗骨材を除去しモルタルを抽出した。

コンクリートの練混ぜには、容量 60 リットルの強制練りミキサ（水平 2 軸）を用いた。また、コンクリートの練混ぜおよびフレッシュコンクリートの試験は、温度 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の恒温室で実施した。コンクリートの練混ぜ方法は、ミキサ内に粗骨材、セメントおよび細骨材を投入し、30 秒間空練りし水を投入し 60 秒間練混ぜた。その後、ミキサ内をかき落としし再度、60 秒間練混ぜて排出した。

粗骨材を除去して抽出したモルタルを直径 40mm、高さ 65mm の塩化ビニル製の型枠に打設した。モルタル試験体作製は、JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠した。なお、モルタル試験体の養生は、試験体打設後に上面をビニルシートで被覆し、翌日まで 20°C の恒温室に静置し、翌日、脱型せずにアルミパックに封緘し、 20°C の恒温室に静置した。その後、乾燥前に脱型し、供試体高さが 60mm 程度になるように研磨して寸法、質量を測定後に材齢 186 日より各種乾燥を開始した。

モルタル試験体の試験体番号および試験項目の一覧を表 4.4 に示す。本試験では、上述のモルタル試験体に M2-01～M2-30 の試験体番号を付与した。

表 4.2 コンクリート使用材料

使用材料		記号	材料の詳細	密度
水		W	水道水	—
セメント		C	早強ポルトランドセメント、太平洋セメント社製	3.14g/cm ³
細骨材	SD2	S	山砂、静岡県産	2.61g/cm ³
粗骨材	SS6	GC	凝灰岩碎石、粒度 5～13mm、愛知県産	2.66g/cm ³

表 4.3 コンクリートの調合

調合番号	骨材の種類		W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
	細骨材	粗骨材			W	C	S	GC
WC50-No. 1	S(砂岩)	GC(凝灰岩)	50	45	183	366	799	995

表 4.4 モルタル試験体の試験体番号および計測項目の一覧

試験体番号	熱・乾燥条件	計測項目					
		寸法・質量				圧縮強度・静弾性係数・ポアソン比	含水率
		乾燥期間				乾燥期間	乾燥期間
		0週	14週	20週	26週	26週	26週
M2-01	塩化リチウム飽和塩法 (20℃、11%RH程度)	○	○	○	○	○	○
M2-02		○	○	○	○	○	-
M2-03		○	○	○	○	○	-
M2-04		○	○	○	○	○	-
M2-05		○	○	○	○	○	-
M2-06	炭酸カリウム飽和塩法 (20℃、44%RH程度)	○	○	○	○	○	○
M2-07		○	○	○	○	○	-
M2-08		○	○	○	○	○	-
M2-09		○	○	○	○	○	-
M2-10		○	○	○	○	○	-
M2-11	恒温恒湿室 (20℃、60%RH程度)	○	○	○	○	○	○
M2-12		○	○	○	○	○	-
M2-13		○	○	○	○	○	-
M2-14		○	○	○	○	○	-
M2-15		○	○	○	○	○	-
M2-16	塩化ナトリウム飽和塩法 (20℃、76%RH程度)	○	○	○	○	○	○
M2-17		○	○	○	○	○	-
M2-18		○	○	○	○	○	-
M2-19		○	○	○	○	○	-
M2-20		○	○	○	○	○	-
M2-21	75℃、窒素ガス環境	○	○	○	○	○	○
M2-22		○	○	○	○	○	-
M2-23		○	○	○	○	○	-
M2-24		○	○	○	○	○	-
M2-25		○	○	○	○	○	-
M2-26	20℃、封緘	○	○	○	○	○	○
M2-27		○	○	○	○	○	-
M2-28		○	○	○	○	○	-
M2-29		○	○	○	○	○	-
M2-30		○	○	○	○	○	-

2) 熱・乾燥条件

モルタル試験体は、20℃封緘状態で材齢 186 日まで養生した後、以下の 6 種類の熱・乾燥条件で 26 週間の乾燥を行った。

- ①20℃、11%RH 程度（塩化リチウム飽和塩法）
- ②20℃、44%RH 程度（炭酸カリウム飽和塩法）
- ③20℃、60%RH 程度（恒温恒湿室保管）
- ④20℃、76%RH 程度（塩化ナトリウム飽和塩法）
- ⑤75℃、窒素ガス送気（恒温器保管）
- ⑥20℃、封緘（恒温室保管、試験体アルミパック封緘）

各熱・乾燥条件の詳細を以下に示す。

a) 20℃、11%RH 程度（塩化リチウム飽和塩法）

材齢 186 日の M2-01～M2-05 のモルタル試験体について、26 週間、20℃、11%RH 程度で乾燥した。モルタル試験体の乾燥方法は、塩化リチウム飽和塩法で実施した。飽和塩法とは、塩化リチウムなどの塩類の飽和水溶液と熱平衡状態にある空気の相対湿度が塩の種類と溶液の温度で定まるという原理を用いて、塩の飽和水溶液を入れた容器を一定の温度に保って平衡状況を作り、その表面の空気の湿度を既知の値にする方法である。

飽和塩法の乾燥方法の概略図を図 4.4 に示す。図 4.4 に示すように、塩化リチウム飽和塩法の乾燥方法は、ポリエチレン製の容器に塩化リチウムの飽和水溶液を深さ 20mm 程度投入し、下部に試験体設置用の台を設置し、事前に容器内の所定の高さ（試験体を配置する予定の高さ付近）に温度・湿度センサーが配置されるように、センサーを取り付けた蓋を設置し容器内部を密閉し、容器を 20±2℃の恒温室に設置したものである。なお、容器蓋の内側にエアポンプを取り付けて、エアポンプより排出される空気をホースにより塩化リチウム飽和水溶液の液面に放出することで、容器内部の空気を循環させた。なお、塩化リチウム飽和塩法による乾燥では、容器内の温度が 20℃程度、相対湿度が 11%程度になると予想される。

塩化リチウム飽和水溶液は、イオン交換水 100g に対して塩化リチウム（特級：関東化学社製）を 84g 以上投入したものである。飽和水溶液を入れて密閉された容器内の温度および湿度は、株式会社ティアンドデイ社製のデータロガー（TR-72wf）および高精度・温湿度センサー（HHA-3151）を用いて計測した。

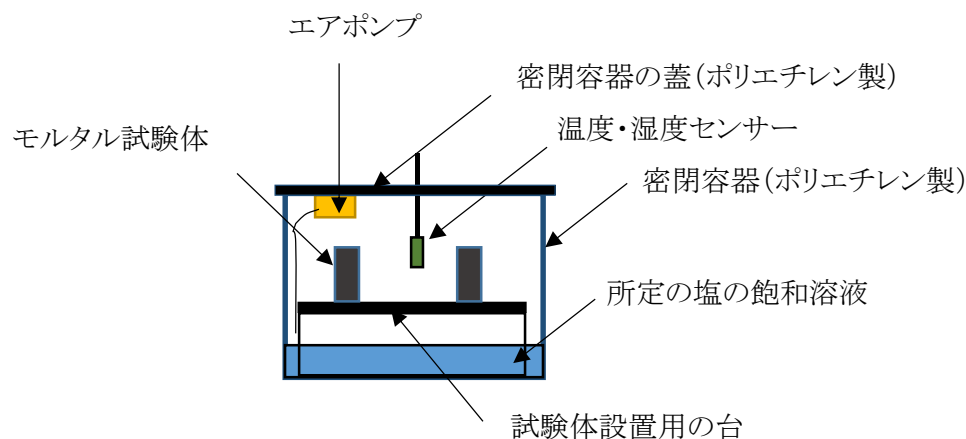


図 4.4 飽和塩法の乾燥方法の概略図

b) 20℃、44%RH 程度（炭酸カリウム飽和塩法）

材齢 186 日の M2-06～M2-10 のモルタル試験体について、26 週間、20℃、44%RH 程度で乾燥した。モルタル試験体の乾燥方法は、炭酸カリウム飽和塩法で実施した。

飽和塩法の乾燥方法の概略図を図 4.4 に示す。図 4.4 に示すように、炭酸カリウム飽和塩法の乾燥方法は、ポリエチレン製の容器に炭酸カリウムの飽和水溶液を深さ 20mm 程度投入し、下部に試験体設置用の台を設置し、事前に容器内の所定の高さ（試験体を配置する予定の高さ付近）に温度・湿度センサーが配置されるように、センサーを取り付けた蓋を設置し容器内部を密閉し、容器を $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温室に設置したものである。なお、容器蓋の内側にエアポンプを取り付けて、エアポンプより排出される空気をホースにより炭酸カリウム飽和水溶液の液面に放出することで、容器内部の空気を循環させた。なお、炭酸カリウム飽和塩法による乾燥では、容器内の温度が 20℃程度、相対湿度が 44%前後になると予想される。

炭酸カリウム飽和水溶液は、イオン交換水 100g に対して炭酸カリウム（特級：関東化学社製）を 112g 以上投入したものである。飽和水溶液を入れて密閉された容器内の温度および湿度は、株式会社テイアンドデイ社製のデータロガー（TR-72wf）および高精度・温湿度センサ（HHA-3151）を用いて計測した。

c) 20℃、60%RH 程度（恒温恒湿室）

材齢 186 日の M2-11～M2-15 のモルタル試験体について、26 週間、20℃、60%RH 程度で乾燥した。モルタル試験体は、温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室で保管した。設置場所の温度および湿度は、株式会社テイアンドデイ社製のデータロガー（RTR-53）および温湿度センサ（TR-3310）を用いて計測した。

d) 20℃、76%RH 程度（塩化ナトリウム飽和塩法）

材齢 186 日の M2-16～M2-20 のモルタル試験体について、26 週間、20℃、76%RH 程度で乾燥した。モルタル試験体の乾燥方法は、塩化ナトリウム飽和塩法で実施した。飽和塩法の乾燥方法の概略図を図 4.4 に示す。図 4.4 に示すように、塩化ナトリウム飽和塩法の乾燥方法は、ポリエチレン製の容器に塩化ナトリウムの飽和水溶液を深さ 20mm 程度投入し、下部に試験体設置用の台を設置し、事前に容器内の所定の高さ（試験体を配置する予定の高さ付近）に温度・湿度センサーが配置されるように、センサーを取り付けた蓋を設置し容器内部を密閉し、容器を 20±2℃の恒温器に設置したものである。なお、容器蓋の内側にエアポンプを取り付けて、エアポンプより排出される空気をホースにより塩化ナトリウム飽和水溶液の液面に放出することで、容器内部の空気を循環させた。なお、塩化ナトリウム飽和塩法による乾燥では、容器内の温度が 20℃程度、相対湿度が 76%前後になると予想される。

塩化ナトリウム飽和水溶液は、イオン交換水 100g に対して塩化ナトリウム（特級：関東化学社製）を 40g 以上投入したものである。飽和水溶液を入れて密閉された容器内の温度および湿度は、株式会社ティアンドデイ社製のデータロガー（TR-72wf）および高精度・温湿度センサ（HHA-3151）を用いて計測した。

e) 75℃、窒素ガス環境

材齢 186 日の M2-21～M2-25 のモルタル試験体について、26 週間、75℃、窒素ガス環境で乾燥した。乾燥状況の概略図を図 4.5 に示す。図 4.5 に示すように、75℃、窒素ガス環境での乾燥方法は、モルタル試験体をデシケータに入れて蓋をして密閉し、恒温器に設置する。次に、窒素ガスボンベよりフローメータに窒素ガスを送気し、流量を 100cc/分に制御した窒素ガスをシリコンチューブにより、デシケータ内に送気し、デシケータの片側からシリコンチューブにより恒温器の外に排気する。窒素ガスを送気しながら、恒温器の温度をデシケータ内の温度が 75℃程度になるように調整した。

デシケータ内の温度は、株式会社ティアンドデイ社製のデータロガー（TR-71wf）および温度センサ（TR-1106）を用いて計測した。

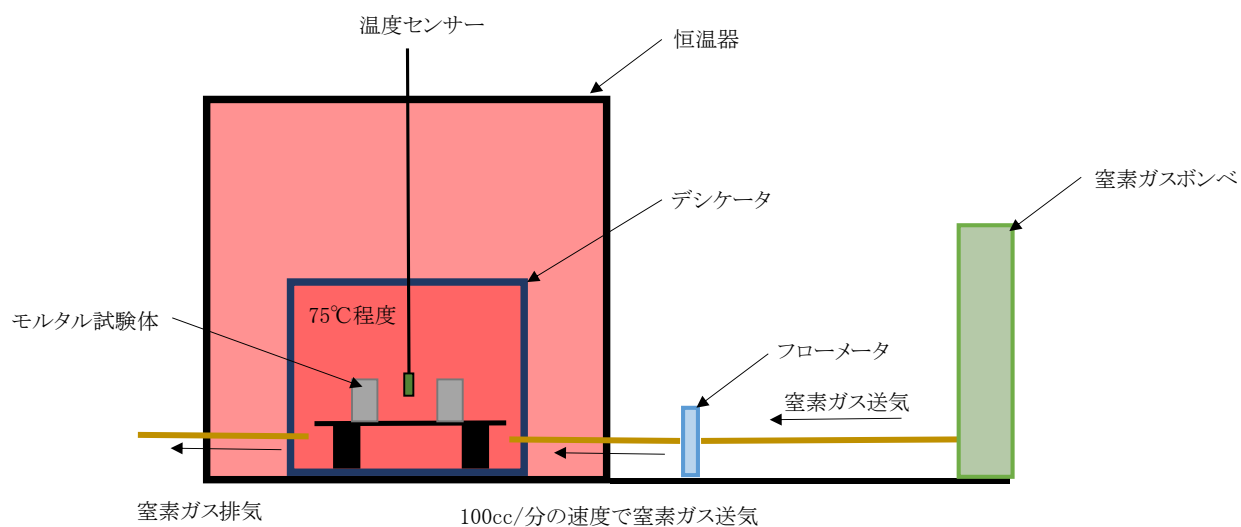


図 4.5 75°C、窒素ガス環境乾燥の概略図

f) 20°C、封緘養生（恒温室）

材齢 186 日の M2-26～M2-30 のモルタル試験体について、アルミパックに入れて封緘状態として 26 週間、20°C で養生した。モルタル試験体は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の恒温室で保管した。設置場所の温度は、株式会社テイアンドデイ社製のデータロガー（RTR-53）および温湿度センサー（TR-3310）を用いて計測した。

3) 計測項目

各条件で乾燥させたモルタル試験体について、寸法、質量、圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比および含水率のデータを取得する。寸法および質量については、乾燥開始時、乾燥期間 14 週、20 週、26 週で計測し、圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比および含水率については、乾燥期間 26 週のみで計測する。各計測方法を以下に示す。

a) 寸法および質量

モルタル試験体について、乾燥開始時、14 週（99 日）、20 週（140 日）および 26 週（182 日）において、寸法（直径および高さ）および質量を測定した。モルタル試験体の直径は、上下高さの 1/4 及び高さの中央において、互いに直交する 2 方向で 0.01mm までノギスを用いて測定した。モルタル試験体の高さは、断面を 4 等分した位置で 4 箇所、0.01mm までノギスを用いて測定した。モルタル試験体の質量は、電子天秤を用いて 0.01g まで測定した。

b) 圧縮強度、静弾性係数およびポアソン比

乾燥 26 週後のモルタル試験体について、圧縮強度、静弾性係数およびポアソン比試験を実施した。圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した。静弾性係数試験は、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠した。ポアソン比試験は、JHS307「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠した。

c) 含水率

乾燥 26 週後に圧縮強度試験を実施した後の各熱・乾燥条件につき 1 体のモルタル試験体（M2-01、M2-06、M2-11、M2-16、M2-21 および M2-26）について、含水率試験を実施した。含水率試験の概略図を図 4.6 に示す。図 4.6 に示すように、含水率試験は、最初にモルタル試験体の質量を 0.01g まで計測し、その後、試験体をデシケータに入れて蓋をして密閉し、恒温器に設置する。次に、窒素ガスボンベよりフローメータに窒素ガスを送気し、流量を 100cc/分に制御した窒素ガスをシリコンチューブにより、デシケータ内に送気し、デシケータの片側からシリコンチューブにより恒温器の外に排気する。窒素ガスを送気しながら、恒温器の温度をデシケータ内の温度が 105℃程度になるように調整した。その後、定期的にデシケータより試験体を取り出し質量を 0.01g まで計測し、試験体の質量が一定になるまで乾燥を継続し、乾燥後の試験体質量を 0.01g まで計測した。含水率は式 3 により算出した。

$$\text{式 3 : 含水率 (\%)} = (M_0 - M_n) / M_n \times 100$$

ここで、 M_0 : 試験開始前のモルタル試験体の質量 (g)

M_n : 105℃の乾燥後のモルタル試験体の質量 (g)

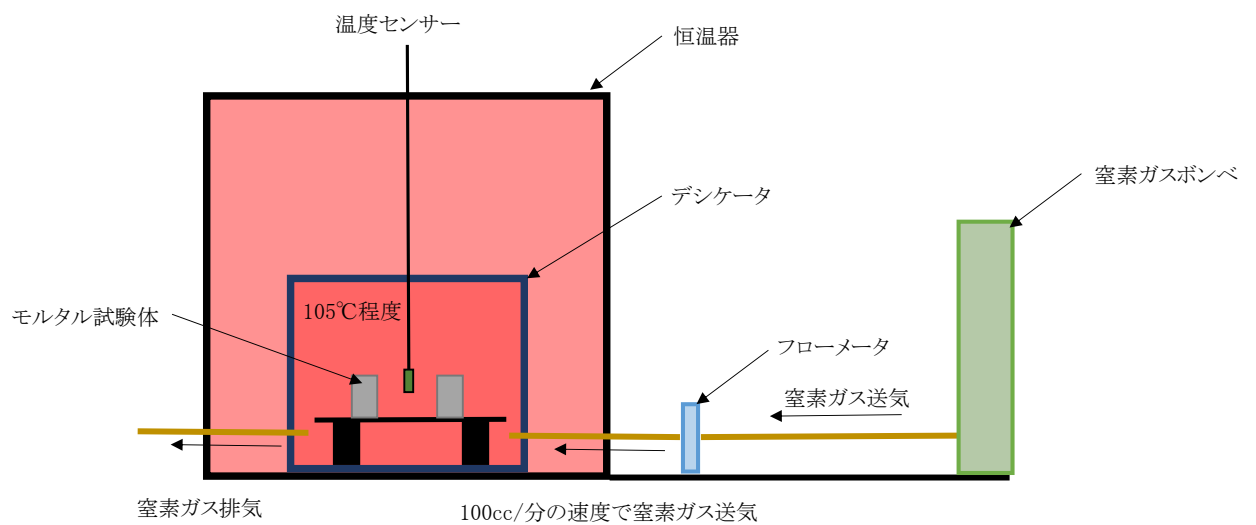


図 4.6 含水率試験状況の概略図

(3) 試験結果

1) 乾燥時の温度および湿度計測結果

乾燥時の温度および湿度計測結果を図 4.7～図 4.16 に示す。乾燥期間中の温度、湿度は以下の通り、予定通りの範囲で制御出来ていることを確認した。

- ・ 塩化リチウム飽和塩法：温度 20～22℃、湿度 11%程度で制御
- ・ 炭酸カリウム飽和塩法：温度 20～22℃、湿度 41%程度で制御
- ・ 恒温恒湿室による乾燥：温度 19～20℃、湿度 55～65%で制御
- ・ 塩化ナトリウム飽和塩法：温度 19.5～21.5℃、湿度 71%程度で制御
- ・ 75℃の窒素ガス環境での乾燥：温度 75℃で制御
- ・ 20℃封緘：温度 19～21℃で制御

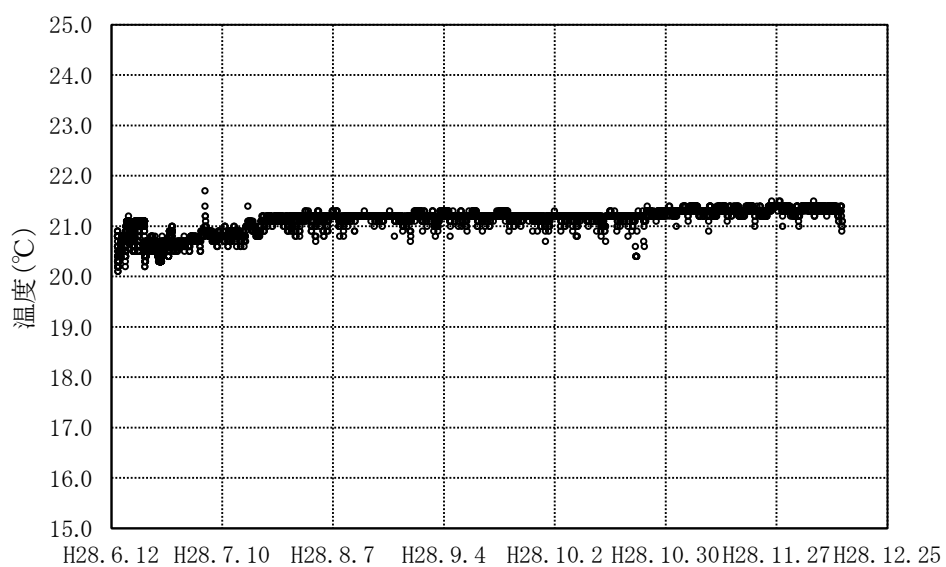


図 4.7 塩化リチウム飽和塩法の乾燥時の温度計測結果

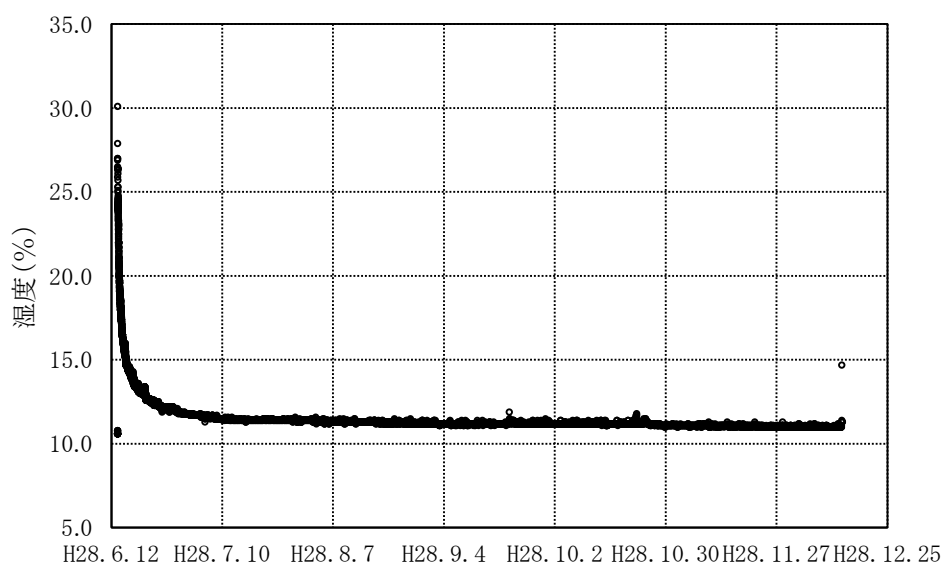


図 4.8 塩化リチウム飽和塩法の乾燥時の湿度計測結果

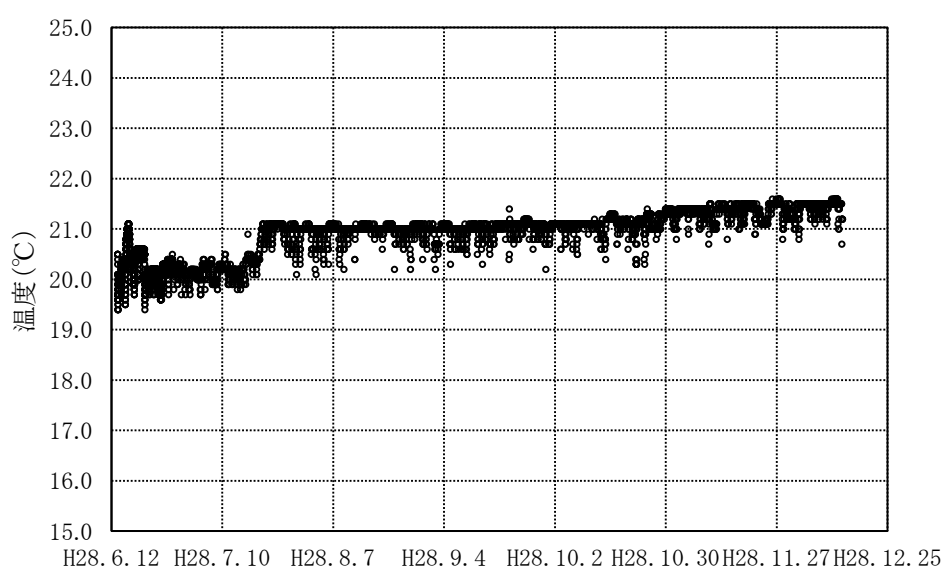


図 4.9 炭酸カリウム飽和塩法の乾燥時の温度計測結果

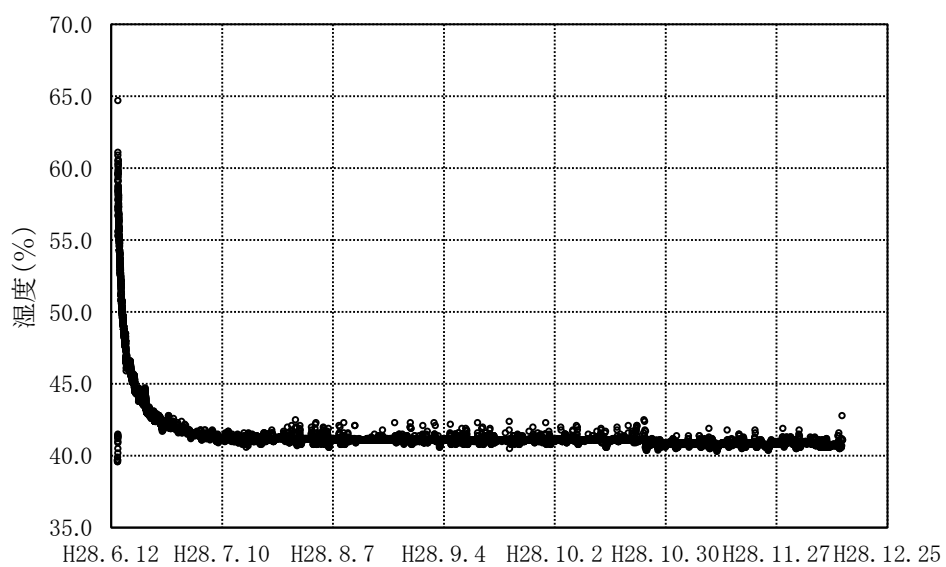


図 4.10 炭酸カリウム飽和塩法の乾燥時の湿度計測結果

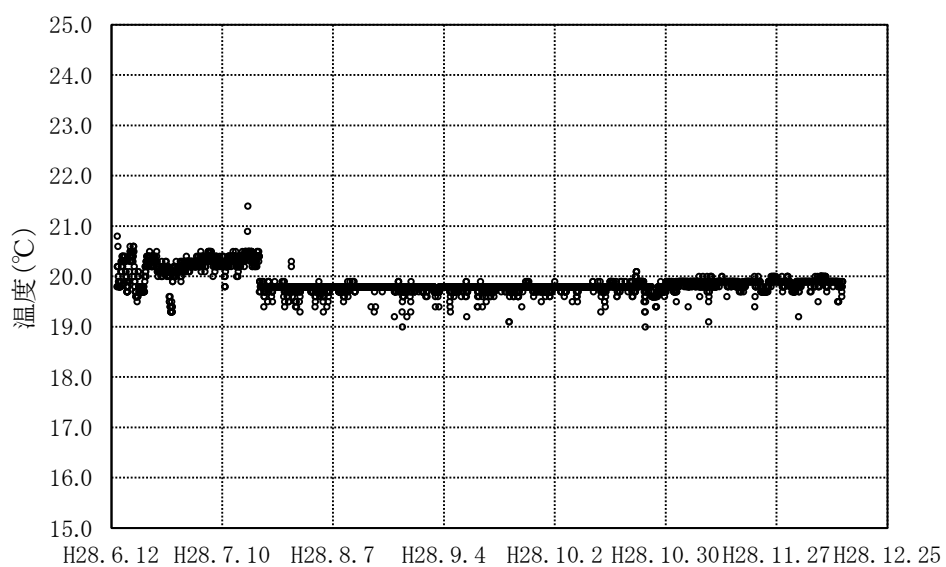


図 4.11 20°C、60%RH の乾燥時の温度計測結果

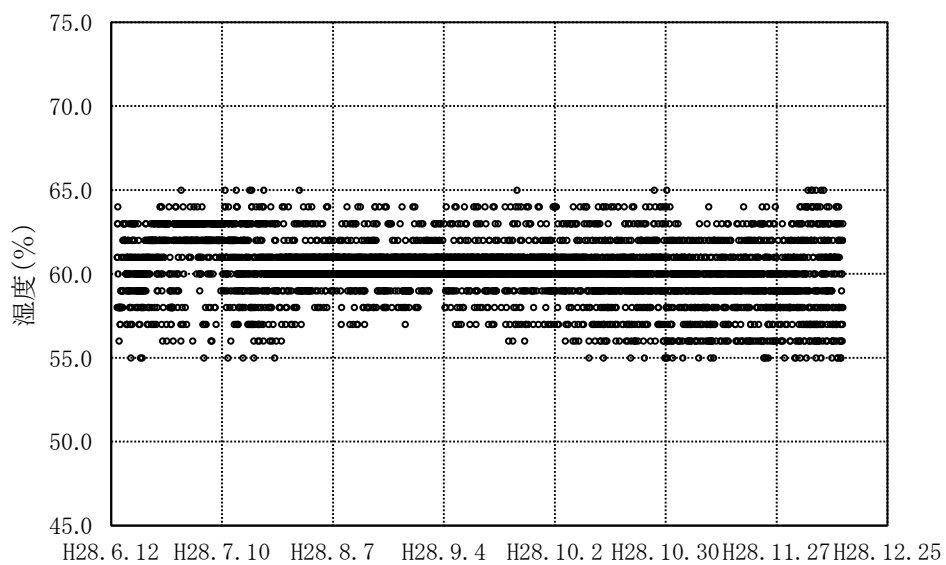


図 4.12 20°C、60%RH の乾燥時の湿度計測結果

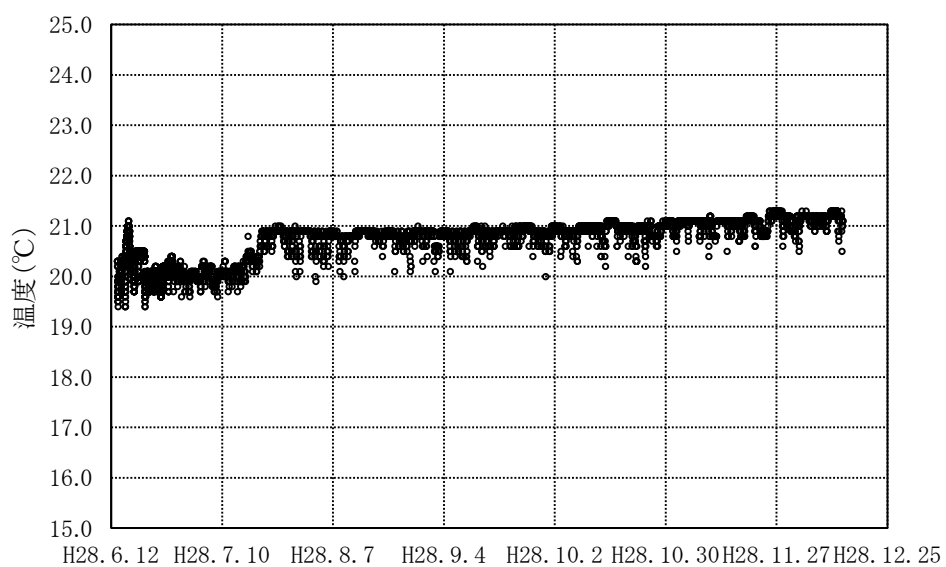


図 4.13 塩化ナトリウム飽和塩法の乾燥時の温度計測結果

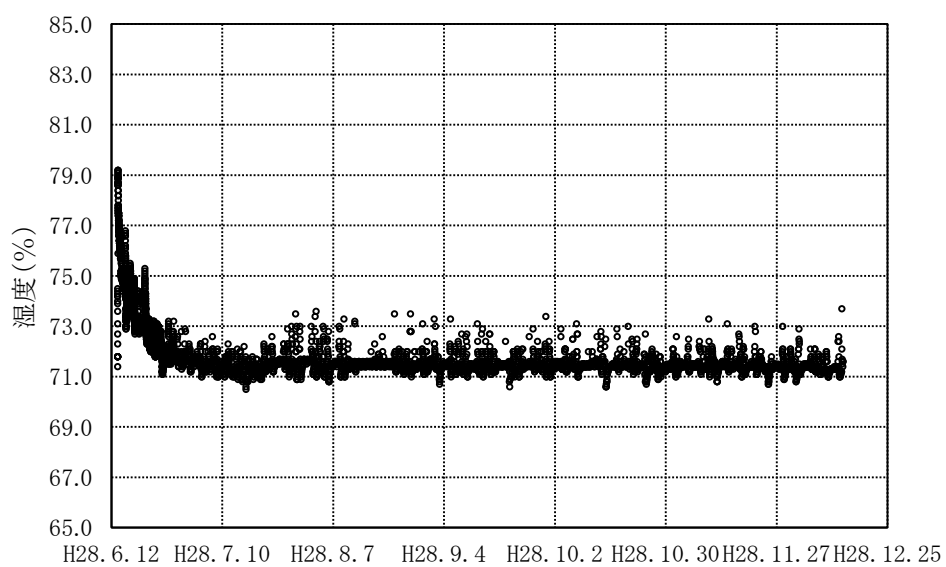


図 4.14 塩化ナトリウム飽和塩法の乾燥時の湿度計測結果

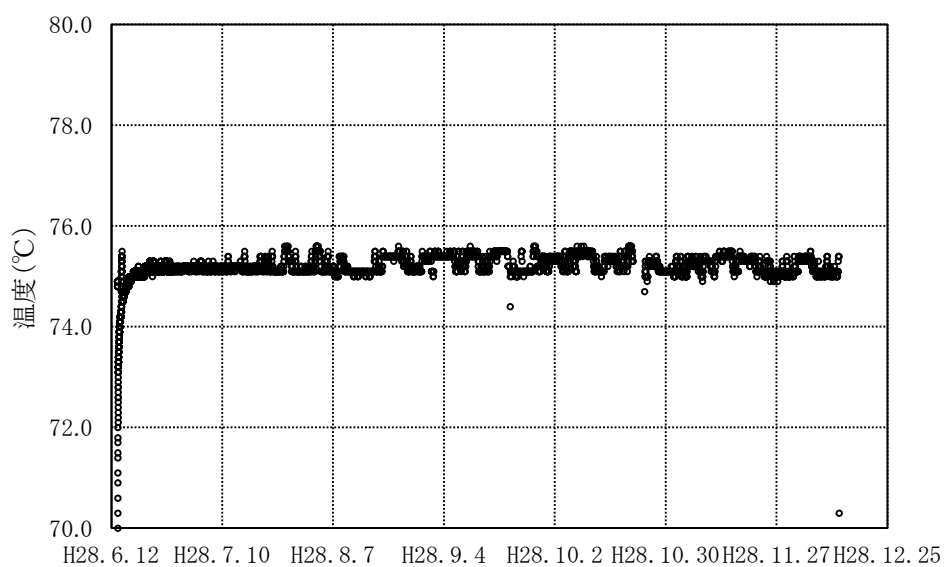


図 4.15 75℃窒素ガスの乾燥時の温度計測結果

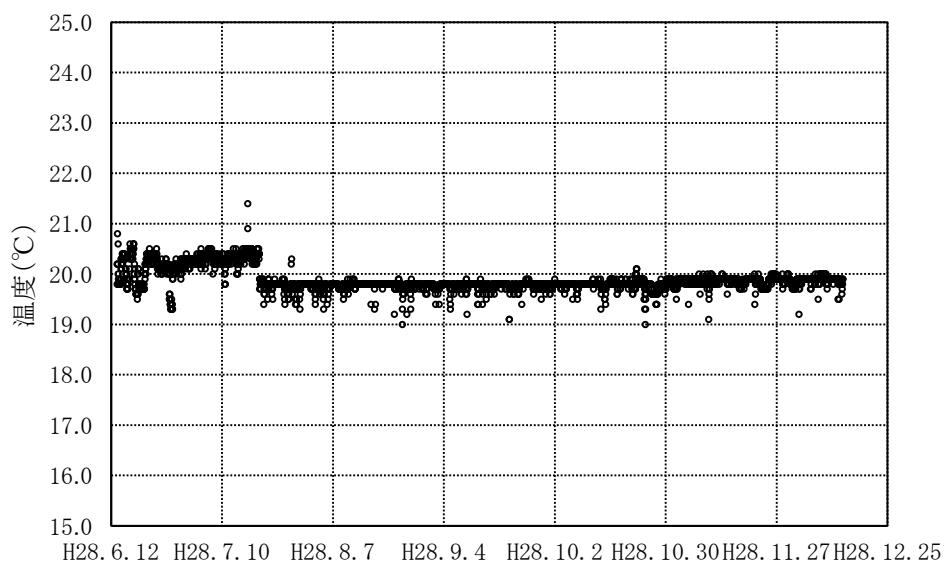


図 4.16 20℃封緘時の温度計測結果

2) 寸法および質量の計測結果

各時期に実施したモルタル試験体の寸法および質量の計測結果を表 4.5～表 4.8 に示す。
また、モルタル試験体の平均直径、平均高さおよび質量のまとめを表 4.9 に示す。

各熱・乾燥条件での質量変化率の推移を図 4.17 に示しているが、20℃封緘の水準ではほとんど変化は見られないが、他の水準は熱・乾燥条件が厳しいほど質量減少が大きくなっている。乾燥期間 14 週までではほぼ恒量に達しているが、その後も若干の質量減少が見られるものもある。図 4.18 および図 4.19 に高さの変化率と直径の変化率を示しているが、ばらつきはあるものの、試験体の乾燥に伴って収縮していることがわかる。

表 4.5 モルタル試験体の寸法および質量測定結果（乾燥開始時）

乾燥開始時(乾燥期間0日)														
試験体番号	熱・乾燥条件	高さ(mm)					直径(mm)							試験体質量 (g)
		1	2	3	4	平均	1	2	3	4	5	6	平均	
M2-01	塩化リチウム飽和塩法 (20℃、11%RH程度)	58.54	58.59	58.50	58.49	58.53	40.57	40.60	40.55	40.60	40.54	40.58	40.57	171.50
M2-02		59.35	59.41	59.45	59.37	59.40	40.07	40.22	40.10	40.25	40.11	40.28	40.17	171.59
M2-03		59.50	59.57	59.68	59.62	59.59	40.31	40.47	40.22	40.44	40.24	40.46	40.36	173.49
M2-04		59.17	59.14	59.14	59.17	59.16	40.56	40.61	40.60	40.61	40.57	40.61	40.59	174.41
M2-05		60.31	60.18	60.23	60.27	60.25	40.29	40.20	40.33	40.23	40.35	40.18	40.26	174.86
M2-06	炭酸カリウム飽和塩法 (20℃、44%RH程度)	59.50	59.56	59.50	59.46	59.51	40.30	40.27	40.29	40.27	40.29	40.24	40.28	172.15
M2-07		59.88	59.73	59.66	59.83	59.78	40.51	40.55	40.53	40.55	40.51	40.52	40.53	176.06
M2-08		60.00	60.00	59.94	59.96	59.98	40.11	40.36	40.12	40.39	40.13	40.38	40.25	174.48
M2-09		60.04	60.04	60.16	60.20	60.11	40.55	40.56	40.56	40.59	40.57	40.58	40.57	177.22
M2-10		59.41	59.54	59.43	59.27	59.41	40.40	40.14	40.39	40.10	40.39	40.10	40.25	171.67
M2-11	恒温恒湿室 (20℃、60%RH程度)	60.18	60.18	60.21	60.21	60.20	40.14	40.37	40.09	40.38	40.09	40.35	40.24	174.45
M2-12		58.79	58.77	58.76	58.80	58.78	40.57	40.52	40.56	40.52	40.57	40.51	40.54	171.67
M2-13		59.12	59.20	59.28	59.27	59.22	40.19	40.34	40.21	40.28	40.19	40.27	40.25	171.07
M2-14		58.97	59.15	59.20	59.08	59.10	40.50	40.50	40.49	40.51	40.50	40.52	40.50	173.23
M2-15		58.79	58.79	58.83	58.85	58.82	40.33	40.03	40.39	40.05	40.35	40.03	40.20	170.56
M2-16	塩化ナトリウム飽和塩法 (20℃、76%RH程度)	59.18	59.21	59.15	59.10	59.16	40.53	40.57	40.51	40.55	40.53	40.56	40.54	173.42
M2-17		59.12	59.13	59.17	59.15	59.14	40.21	40.40	40.23	40.26	40.27	40.34	40.29	171.07
M2-18		59.21	59.27	59.24	59.09	59.20	40.23	40.39	40.19	40.40	40.22	40.39	40.30	171.61
M2-19		58.11	58.18	58.24	58.16	58.17	40.25	40.26	40.22	40.22	40.28	40.23	40.24	168.61
M2-20		60.03	60.12	60.14	60.05	60.09	40.41	40.20	40.44	40.18	40.44	40.19	40.31	174.04
M2-21	75℃、室素ガス環境	59.58	59.53	59.51	59.55	59.54	40.61	40.57	40.61	40.56	40.62	40.56	40.59	175.77
M2-22		58.96	58.91	58.79	58.87	58.88	40.54	40.55	40.53	40.56	40.56	40.53	40.55	173.75
M2-23		58.80	58.79	58.50	58.74	58.71	40.23	40.18	40.26	40.24	40.22	40.19	40.22	169.24
M2-24		59.61	59.65	59.60	59.64	59.63	40.63	40.56	40.61	40.56	40.62	40.58	40.59	175.51
M2-25		58.35	58.30	58.35	58.40	58.35	40.14	40.41	40.14	40.36	40.17	40.37	40.27	168.96
M2-26	20℃、封緘	59.96	59.94	60.00	60.01	59.98	40.45	40.12	40.44	40.15	40.46	40.10	40.29	174.73
M2-27		59.02	59.00	59.01	59.04	59.02	40.37	40.22	40.36	40.18	40.37	40.19	40.28	171.54
M2-28		60.24	60.27	60.13	60.17	60.20	40.56	40.51	40.56	40.49	40.56	40.52	40.53	176.77
M2-29		59.50	59.59	59.55	59.44	59.52	40.11	40.41	40.09	40.41	40.14	40.42	40.26	172.55
M2-30		59.24	59.05	59.06	59.21	59.14	40.56	40.50	40.56	40.50	40.56	40.49	40.53	174.56

表 4.6 モルタル試験体の寸法および質量測定結果（乾燥期間 14 週）

乾燥期間14週(乾燥期間99日)														
試験体番号	熱・乾燥条件	高さ(mm)					直径(mm)							試験体質量 (g)
		1	2	3	4	平均	1	2	3	4	5	6	平均	
M2-01	塩化リチウム飽和塩法 (20℃、11%RH程度)	58.48	58.46	58.43	58.44	58.45	40.51	40.54	40.50	40.53	40.48	40.53	40.52	162.94
M2-02		59.33	59.38	59.39	59.28	59.35	40.01	40.19	40.03	40.21	40.03	40.24	40.12	162.67
M2-03		59.46	59.52	59.59	59.51	59.52	40.18	40.40	40.14	40.42	40.17	40.39	40.28	164.65
M2-04		59.06	59.04	59.03	59.09	59.06	40.51	40.53	40.49	40.53	40.51	40.53	40.52	165.40
M2-05		60.12	60.11	60.15	60.18	60.14	40.24	40.12	40.27	40.06	40.29	40.12	40.18	165.56
M2-06	炭酸カリウム飽和塩法 (20℃、44%RH程度)	59.44	59.59	59.39	59.41	59.46	40.16	40.14	40.23	40.13	40.23	40.12	40.17	166.38
M2-07		59.87	59.68	59.61	59.80	59.74	40.48	40.51	40.45	40.49	40.46	40.50	40.48	170.32
M2-08		59.96	59.92	59.92	59.97	59.94	40.08	40.36	40.12	40.44	40.07	40.34	40.24	168.71
M2-09		59.95	60.00	60.09	60.08	60.03	40.50	40.54	40.50	40.53	40.47	40.53	40.51	171.41
M2-10		59.37	59.43	59.37	59.35	59.38	40.37	40.09	40.37	40.05	40.33	40.02	40.21	165.93
M2-11	恒温恒湿室 (20℃、60%RH程度)	60.08	60.08	60.15	60.15	60.12	40.10	40.36	40.02	40.32	40.06	40.33	40.20	170.76
M2-12		58.75	58.71	58.76	58.75	58.74	40.53	40.57	40.53	40.52	40.47	40.52	40.52	168.26
M2-13		59.05	59.11	59.23	59.17	59.14	40.35	40.19	40.28	40.08	40.32	40.17	40.23	167.66
M2-14		58.95	59.15	59.20	58.94	59.06	40.46	40.49	40.45	40.50	40.47	40.47	40.47	169.67
M2-15		58.74	58.78	58.79	58.76	58.77	40.09	40.31	40.02	40.33	40.05	40.32	40.19	167.15
M2-16	塩化ナトリウム飽和塩法 (20℃、76%RH程度)	59.17	59.20	59.22	59.10	59.17	40.49	40.54	40.48	40.56	40.50	40.53	40.52	171.26
M2-17		59.08	59.12	59.14	59.13	59.12	40.14	40.32	40.16	40.30	40.17	40.37	40.24	168.87
M2-18		59.10	59.24	59.22	59.00	59.14	40.18	40.37	40.13	40.35	40.21	40.36	40.27	169.54
M2-19		58.06	58.17	58.18	58.17	58.15	40.22	40.25	40.18	40.21	40.24	40.24	40.22	166.15
M2-20		60.02	60.09	60.11	60.00	60.06	40.40	40.13	40.39	40.06	40.40	40.17	40.26	171.67
M2-21	75℃、窒素ガス環境	59.55	59.42	59.40	59.52	59.47	40.53	40.50	40.53	40.49	40.59	40.51	40.53	163.63
M2-22		58.84	58.87	58.75	58.83	58.82	40.45	40.45	40.43	40.47	40.48	40.46	40.46	161.94
M2-23		58.71	58.72	58.22	58.41	58.52	40.13	40.14	40.17	40.13	40.19	40.14	40.15	157.48
M2-24		59.59	59.73	59.56	59.54	59.61	40.55	40.49	40.54	40.45	40.56	40.47	40.51	163.69
M2-25		58.34	58.17	58.32	58.29	58.28	40.10	40.26	40.06	40.28	40.10	40.28	40.18	157.13
M2-26	20℃、封緘	59.91	59.96	60.02	59.99	59.97	40.49	40.17	40.45	40.16	40.43	40.18	40.31	174.61
M2-27		59.01	59.08	59.01	59.09	59.05	40.36	40.20	40.34	40.13	40.38	40.13	40.26	171.43
M2-28		60.25	60.22	60.17	60.17	60.20	40.50	40.49	40.54	40.48	40.50	40.44	40.49	176.62
M2-29		59.51	59.59	59.48	59.42	59.50	40.11	40.43	40.14	40.38	40.12	40.40	40.26	172.46
M2-30		59.14	59.05	59.05	59.27	59.13	40.57	40.52	40.55	40.48	40.54	40.49	40.53	174.48

表 4.7 モルタル試験体の寸法および質量測定結果（乾燥期間 20 週）

乾燥期間20週(乾燥期間140日)														
試験体番号	熱・乾燥条件	高さ(mm)					直径(mm)							試験体質量 (g)
		1	2	3	4	平均	1	2	3	4	5	6	平均	
M2-01	塩化リチウム飽和塩法 (20℃、11%RH程度)	58.49	58.52	58.45	58.58	58.51	40.50	40.53	40.48	40.52	40.49	40.52	40.51	162.57
M2-02		59.30	59.48	59.37	59.29	59.36	40.09	40.21	40.02	40.17	40.05	40.21	40.13	162.36
M2-03		59.47	59.67	59.61	59.56	59.58	40.17	40.04	40.10	40.36	40.10	40.38	40.19	164.34
M2-04		59.12	59.17	59.10	59.13	59.13	40.52	40.53	40.47	40.52	40.48	40.51	40.51	165.14
M2-05		60.21	60.13	60.17	60.24	60.19	40.22	40.24	40.06	40.26	40.36	40.25	40.23	165.27
M2-06	炭酸カリウム飽和塩法 (20℃、44%RH程度)	59.55	59.52	59.52	59.43	59.51	40.24	40.18	40.27	40.21	40.29	40.13	40.22	166.05
M2-07		59.83	59.58	59.56	59.76	59.68	40.53	40.55	40.47	40.48	40.45	40.45	40.49	169.99
M2-08		59.95	59.96	59.86	59.91	59.92	40.09	40.36	40.09	40.34	40.13	40.36	40.23	168.42
M2-09		59.97	60.01	60.13	60.12	60.06	40.54	40.55	40.46	40.66	40.50	40.56	40.55	171.07
M2-10		59.33	59.48	59.44	59.26	59.38	40.32	40.07	40.31	40.03	40.32	40.06	40.19	165.50
M2-11	恒温恒湿室 (20℃、60%RH程度)	60.12	60.18	60.14	60.13	60.14	40.05	40.32	40.00	40.32	40.04	40.33	40.18	170.54
M2-12		58.73	58.74	58.75	58.76	58.75	40.51	40.48	40.52	40.46	40.52	40.47	40.49	168.06
M2-13		59.10	59.08	59.22	59.27	59.17	40.12	40.31	40.11	40.34	40.12	40.30	40.22	167.47
M2-14		58.89	59.11	59.20	59.08	59.07	40.54	40.54	40.52	40.51	40.51	40.46	40.51	169.46
M2-15		58.68	58.82	58.77	58.86	58.78	40.28	40.01	40.32	40.01	40.38	40.13	40.19	166.94
M2-16	塩化ナトリウム飽和塩法 (20℃、76%RH程度)	59.12	59.31	59.09	59.19	59.18	40.53	40.55	40.51	40.54	40.51	40.55	40.53	171.14
M2-17		59.08	59.15	59.20	59.10	59.13	40.15	40.35	40.17	40.34	40.18	40.36	40.26	168.74
M2-18		59.22	59.22	59.22	59.05	59.18	40.18	40.36	40.11	40.30	40.25	40.35	40.26	169.32
M2-19		58.08	58.19	58.22	58.14	58.16	40.22	40.30	40.28	40.27	40.25	40.30	40.27	166.05
M2-20		60.00	60.21	60.11	60.02	60.09	40.35	40.13	40.41	40.06	40.38	40.17	40.25	171.49
M2-21	75℃、窒素ガス環境	59.46	59.47	59.47	59.46	59.47	40.56	40.51	40.56	40.51	40.54	40.51	40.53	163.42
M2-22		58.85	58.88	58.76	58.83	58.83	40.54	40.51	40.47	40.49	40.50	40.51	40.50	161.70
M2-23		58.71	58.78	58.27	58.25	58.50	40.16	40.17	40.18	40.18	40.22	40.18	40.18	157.27
M2-24		59.57	59.58	59.55	59.57	59.57	40.56	40.51	40.56	40.52	40.55	40.50	40.53	163.44
M2-25		58.24	58.24	58.24	58.32	58.26	40.17	40.37	40.11	40.33	40.14	40.33	40.24	156.91
M2-26	20℃、封緘	59.98	60.01	60.08	59.99	60.02	40.42	40.12	40.41	40.12	40.45	40.13	40.28	174.54
M2-27		59.00	59.05	59.00	59.00	59.01	40.37	40.15	40.36	40.12	40.34	40.16	40.25	171.30
M2-28		60.28	60.26	60.09	60.16	60.20	40.57	40.51	40.57	40.51	40.52	40.52	40.53	176.48
M2-29		59.50	59.58	59.48	59.40	59.49	40.11	40.41	40.08	40.36	40.11	40.42	40.25	172.30
M2-30		59.15	58.97	59.16	59.27	59.14	40.54	40.49	40.55	40.48	40.55	40.48	40.52	174.28

表 4.8 モルタル試験体の寸法および質量測定結果（乾燥期間 26 週）

乾燥期間26週(乾燥期間182日)														
試験体番号	熱・乾燥条件	高さ(mm)					直径(mm)							試験体質量 (g)
		1	2	3	4	平均	1	2	3	4	5	6	平均	
M2-01	塩化リチウム飽和塩法 (20℃、11%RH程度)	58.39	58.43	58.31	58.46	58.40	40.44	40.58	40.44	40.46	40.40	40.44	40.46	162.39
M2-02		59.37	59.36	59.34	59.37	59.36	39.90	40.10	39.98	40.11	39.98	40.19	40.04	162.13
M2-03		59.38	59.49	59.52	59.49	59.47	40.09	40.33	40.07	40.30	40.08	40.32	40.20	164.11
M2-04		59.00	59.04	58.96	58.99	59.00	40.44	40.46	40.42	40.45	40.47	40.50	40.46	164.94
M2-05		60.09	60.10	60.07	60.12	60.10	40.17	40.04	40.18	40.04	40.21	40.05	40.12	165.03
M2-06	炭酸カリウム飽和塩法 (20℃、44%RH程度)	59.34	59.39	59.50	59.34	59.39	40.15	40.09	40.22	40.07	40.22	40.07	40.14	165.70
M2-07		59.69	59.71	59.44	59.81	59.66	40.35	40.40	40.36	40.44	40.43	40.40	40.40	169.57
M2-08		60.12	59.91	59.84	60.10	59.99	40.01	40.24	39.99	40.29	40.05	40.27	40.14	168.09
M2-09		59.96	60.04	60.02	59.97	60.00	40.40	40.48	40.44	40.47	40.40	40.47	40.44	170.58
M2-10		59.19	59.34	59.63	59.33	59.37	40.30	40.12	40.23	40.20	40.25	40.18	40.21	165.11
M2-11	恒温恒湿室 (20℃、60%RH程度)	60.05	60.05	60.14	60.11	60.09	40.04	40.33	40.02	40.30	40.02	40.27	40.16	170.27
M2-12		58.77	58.70	58.77	58.76	58.75	40.54	40.48	40.50	40.49	40.40	40.39	40.47	167.82
M2-13		58.95	59.08	59.15	59.10	59.07	40.32	40.27	40.02	40.32	40.00	40.23	40.19	167.24
M2-14		58.83	59.02	59.09	58.95	58.97	40.42	40.34	40.46	40.41	40.41	40.35	40.40	169.21
M2-15		58.72	58.74	58.83	58.82	58.78	40.26	39.90	40.29	39.99	40.26	40.00	40.12	166.72
M2-16	塩化ナトリウム飽和塩法 (20℃、76%RH程度)	59.12	59.08	59.00	59.15	59.09	40.41	40.58	40.40	40.45	40.50	40.46	40.47	170.94
M2-17		59.00	59.12	59.17	59.07	59.09	40.37	40.42	40.16	40.48	40.17	40.42	40.34	168.60
M2-18		59.07	59.32	59.19	59.07	59.16	40.10	40.39	40.02	40.28	40.09	40.26	40.19	169.21
M2-19		58.04	58.11	58.17	58.03	58.09	40.18	40.19	40.15	40.21	40.18	40.19	40.18	165.85
M2-20		59.93	60.16	60.29	60.11	60.12	40.35	40.05	40.32	39.99	40.35	40.08	40.19	171.27
M2-21	75℃、窒素ガス環境	59.41	59.32	59.59	59.37	59.42	40.46	40.45	40.45	40.43	40.47	40.40	40.44	163.34
M2-22		58.81	58.67	58.72	58.78	58.75	40.53	40.41	40.38	40.37	40.44	40.40	40.42	161.64
M2-23		58.75	58.68	58.11	58.27	58.45	40.10	40.06	40.12	40.02	40.08	40.06	40.07	157.20
M2-24		59.55	59.45	59.52	59.43	59.49	40.51	40.41	40.47	40.43	40.53	40.51	40.48	163.38
M2-25		58.16	58.16	58.18	58.26	58.19	40.04	40.28	40.05	40.23	39.96	40.23	40.13	156.85
M2-26	20℃、封緘	59.85	59.91	60.01	59.94	59.93	40.04	40.09	40.37	40.08	40.43	40.10	40.19	174.49
M2-27		59.12	59.12	59.06	59.19	59.12	40.26	40.32	40.11	40.26	40.35	40.13	40.24	171.24
M2-28		60.22	60.28	60.11	60.11	60.18	40.48	40.44	40.48	40.42	40.43	40.41	40.44	176.45
M2-29		59.38	59.59	59.51	59.38	59.47	40.03	40.30	40.03	40.30	40.06	40.29	40.17	172.26
M2-30		59.09	58.90	58.97	59.16	59.03	40.48	40.36	40.42	40.54	40.51	40.46	40.46	174.38

表 4.9 モルタル試験体の平均直径、平均高さおよび質量測定結果

試験体番号	熱・乾燥条件	試験体の平均高さ(mm)				試験体の平均直径(mm)				試験体の質量(g)			
		測定時期				測定時期				測定時期			
		開始時	14週	20週	26週	開始時	14週	20週	26週	開始時	14週	20週	26週
M2-01	塩化リチウム飽和塩法 (20℃、11%RH程度)	58.53	58.45	58.51	58.40	40.57	40.52	40.51	40.46	171.50	162.94	162.57	162.39
M2-02		59.40	59.35	59.36	59.36	40.17	40.12	40.13	40.04	171.59	162.67	162.36	162.13
M2-03		59.59	59.52	59.58	59.47	40.36	40.28	40.19	40.20	173.49	164.65	164.34	164.11
M2-04		59.16	59.06	59.13	59.00	40.59	40.52	40.51	40.46	174.41	165.40	165.14	164.94
M2-05		60.25	60.14	60.19	60.10	40.26	40.18	40.23	40.12	174.86	165.56	165.27	165.03
M2-06	炭酸カリウム飽和塩法 (20℃、44%RH程度)	59.51	59.46	59.51	59.39	40.28	40.17	40.22	40.14	172.15	166.38	166.05	165.70
M2-07		59.78	59.74	59.68	59.66	40.53	40.48	40.49	40.40	176.06	170.32	169.99	169.57
M2-08		59.98	59.94	59.92	59.99	40.25	40.24	40.23	40.14	174.48	168.71	168.42	168.09
M2-09		60.11	60.03	60.06	60.00	40.57	40.51	40.55	40.44	177.22	171.41	171.07	170.58
M2-10		59.41	59.38	59.38	59.37	40.25	40.21	40.19	40.21	171.67	165.93	165.50	165.11
M2-11	恒温恒湿室 (20℃、60%RH程度)	60.20	60.12	60.14	60.09	40.24	40.20	40.18	40.16	174.45	170.76	170.54	170.27
M2-12		58.78	58.74	58.75	58.75	40.54	40.52	40.49	40.47	171.67	168.26	168.06	167.82
M2-13		59.22	59.14	59.17	59.07	40.25	40.23	40.22	40.19	171.07	167.66	167.47	167.24
M2-14		59.10	59.06	59.07	58.97	40.50	40.47	40.51	40.40	173.23	169.67	169.46	169.21
M2-15		58.82	58.77	58.78	58.78	40.20	40.19	40.19	40.12	170.56	167.15	166.94	166.72
M2-16	塩化ナトリウム飽和塩法 (20℃、76%RH程度)	59.16	59.17	59.18	59.09	40.54	40.52	40.53	40.47	173.42	171.26	171.14	170.94
M2-17		59.14	59.12	59.13	59.09	40.29	40.24	40.26	40.34	171.07	168.87	168.74	168.60
M2-18		59.20	59.14	59.18	59.16	40.30	40.27	40.26	40.19	171.61	169.54	169.32	169.21
M2-19		58.17	58.15	58.16	58.09	40.24	40.22	40.27	40.18	168.61	166.15	166.05	165.85
M2-20		60.09	60.06	60.09	60.12	40.31	40.26	40.25	40.19	174.04	171.67	171.49	171.27
M2-21	75℃、窒素ガス環境	59.54	59.47	59.47	59.42	40.59	40.53	40.53	40.44	175.77	163.63	163.42	163.34
M2-22		58.88	58.82	58.83	58.75	40.55	40.46	40.50	40.42	173.75	161.94	161.70	161.64
M2-23		58.71	58.52	58.50	58.45	40.22	40.15	40.18	40.07	169.24	157.48	157.27	157.20
M2-24		59.63	59.61	59.57	59.49	40.59	40.51	40.53	40.48	175.51	163.69	163.44	163.38
M2-25		58.35	58.28	58.26	58.19	40.27	40.18	40.24	40.13	168.96	157.13	156.91	156.85
M2-26	20℃、封緘	59.98	59.97	60.02	59.93	40.29	40.31	40.28	40.19	174.73	174.61	174.54	174.49
M2-27		59.02	59.05	59.01	59.12	40.28	40.26	40.25	40.24	171.54	171.43	171.30	171.24
M2-28		60.20	60.20	60.20	60.18	40.53	40.49	40.53	40.44	176.77	176.62	176.48	176.45
M2-29		59.52	59.50	59.49	59.47	40.26	40.26	40.25	40.17	172.55	172.46	172.30	172.26
M2-30		59.14	59.13	59.14	59.03	40.53	40.53	40.52	40.46	174.56	174.48	174.28	174.38

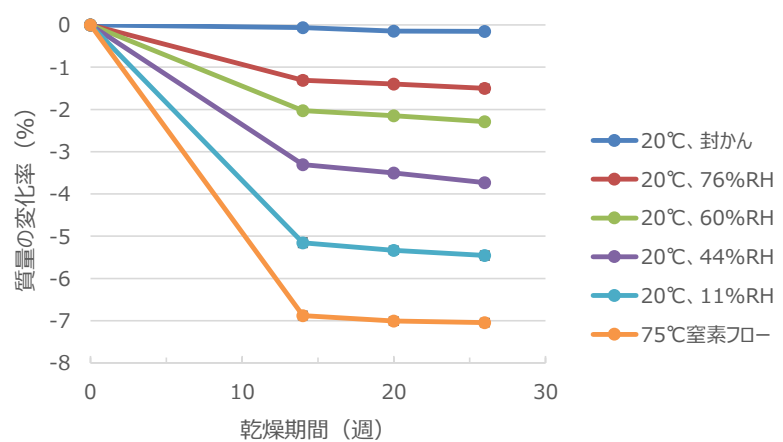


図 4.17 質量変化率の推移

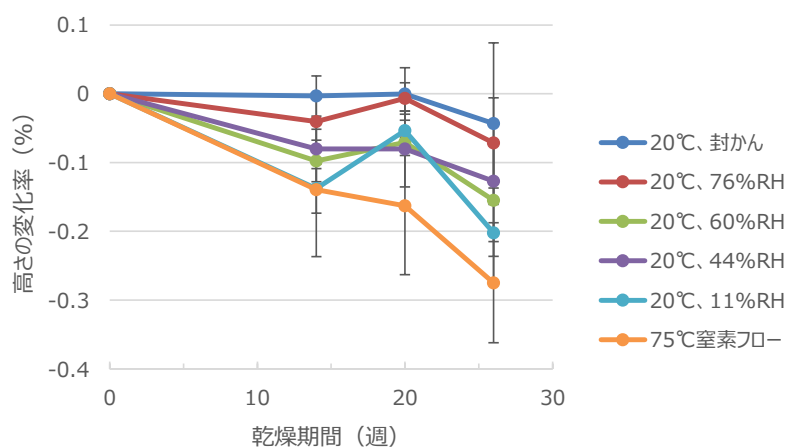


図 4.18 高さ変化率の推移

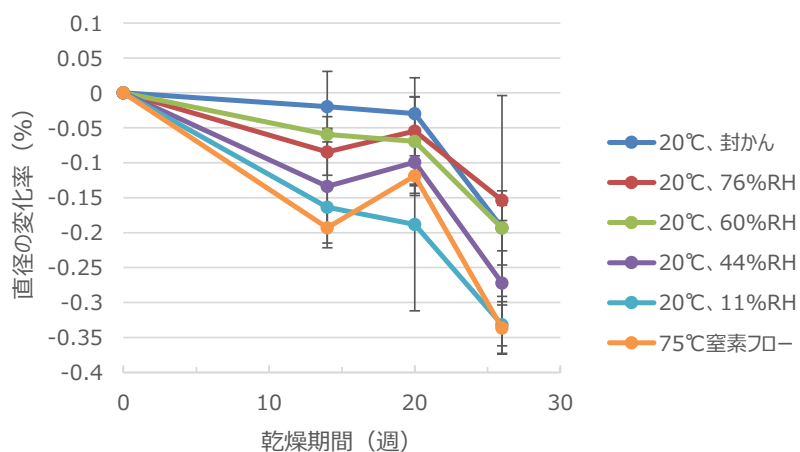


図 4.19 直径変化率の推移

3) 圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比および含水率試験結果

圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比および含水率試験結果を表 4. 10 に示す。乾燥期間 26 週での圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比および含水率の各熱・乾燥条件の比較を図 4. 20 ～図 4. 23 に示す。

含水率は、熱・乾燥条件が厳しいほど小さくなっており妥当な結果を示している。20℃封緘から 60%RH まで乾燥するに伴い圧縮強度を増大し、44%RH で一度低下し、さらに乾燥が進むと圧縮強度は増大した。静弾性係数は 20℃封緘から 60%RH まで乾燥するに伴い増大し、その後、低下していた。

表 4.10 圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比および含水率試験結果

試験体番号	熱・乾燥条件	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)		ポアソン比		含水率 (%)
M2-01	塩化リチウム飽和塩法 (20℃、11%RH程度)	88.4	89.6	30.0	29.2	0.184	0.176	2.4
M2-02		91.8		29.2		0.185		－
M2-03		88.8		29.0		0.167		－
M2-04		88.4		29.2		0.174		－
M2-05		90.6		28.4		0.170		－
M2-06	炭酸カリウム飽和塩法 (20℃、44%RH程度)	79.5	80.2	30.4	30.2	0.206	0.199	4.3
M2-07		79.3		28.0		0.158		－
M2-08		84.2		30.4		0.202		－
M2-09		79.1		30.6		0.217		－
M2-10		78.8		31.6		0.211		－
M2-11	恒温恒湿室 (20℃、60%RH程度)	85.9	85.6	30.6	31.8	0.192	0.203	5.6
M2-12		87.0		32.1		0.208		－
M2-13		80.4		33.6		0.229		－
M2-14		87.1		30.7		0.181		－
M2-15		87.5		32.2		0.204		－
M2-16	塩化ナトリウム飽和塩法 (20℃、76%RH程度)	82.9	82.0	29.6	31.5	0.193	0.216	6.6
M2-17		79.4		31.0		0.213		－
M2-18		84.0		31.4		0.217		－
M2-19		85.0		32.8		0.238		－
M2-20		78.6		32.5		0.218		－
M2-21	75℃、窒素ガス環境	89.2	89.3	27.7	27.5	0.201	0.196	0.7
M2-22		94.0		29.4		0.204		－
M2-23		87.5		25.9		0.190		－
M2-24		87.6		28.1		0.195		－
M2-25		88.1		26.6		0.189		－
M2-26	20℃、封緘	82.4	80.3	30.1	30.4	0.192	0.202	7.7
M2-27		82.4		30.8		0.192		－
M2-28		78.3		30.4		0.222		－
M2-29		77.7		29.8		0.195		－
M2-30		80.7		31.1		0.210		－

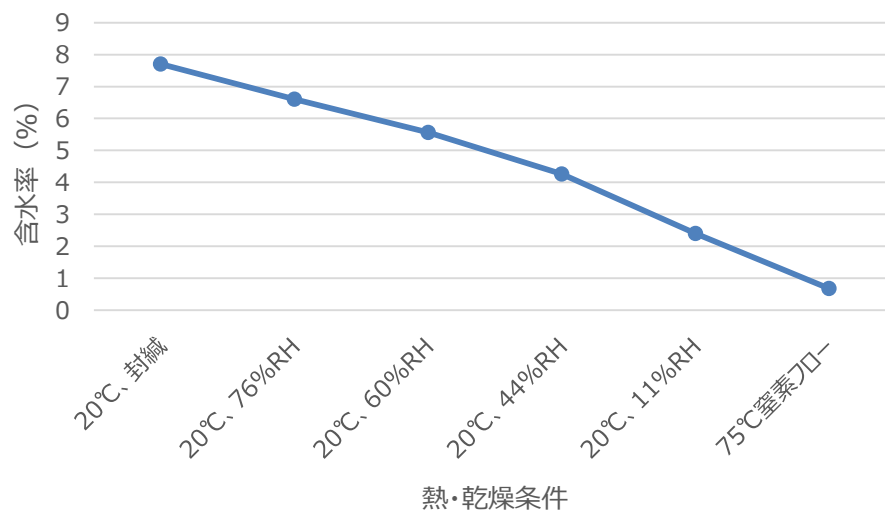


図 4.20 各熱・乾燥条件での含水率（乾燥期間 26 週）

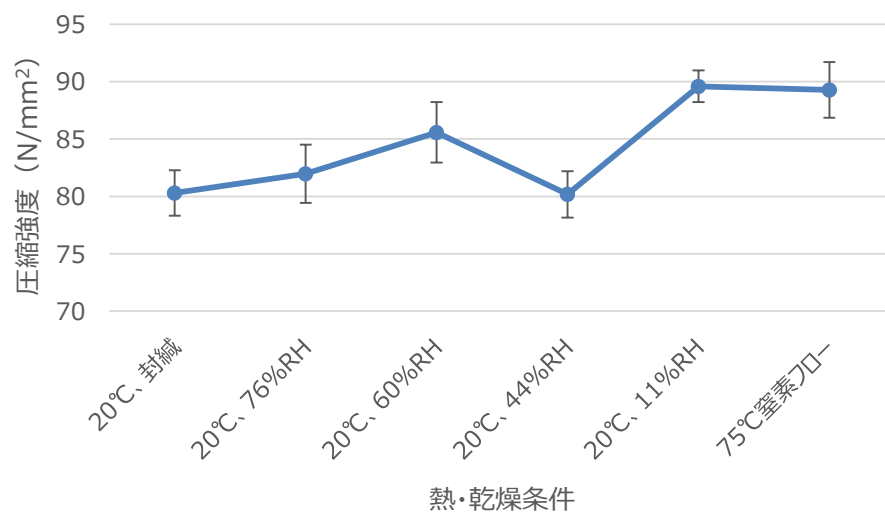


図 4.21 各熱・乾燥条件での圧縮強度（乾燥期間 26 週）

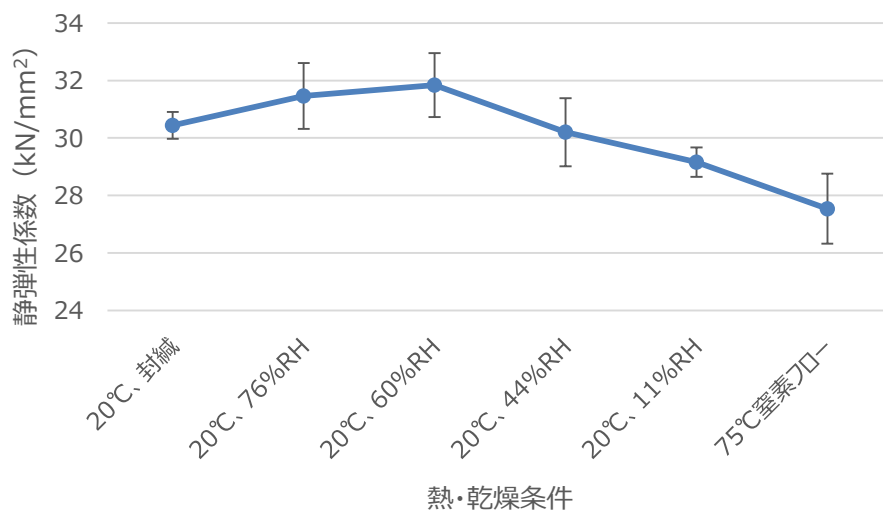


図 4.22 各熱・乾燥条件での静弾性係数（乾燥期間 26 週）

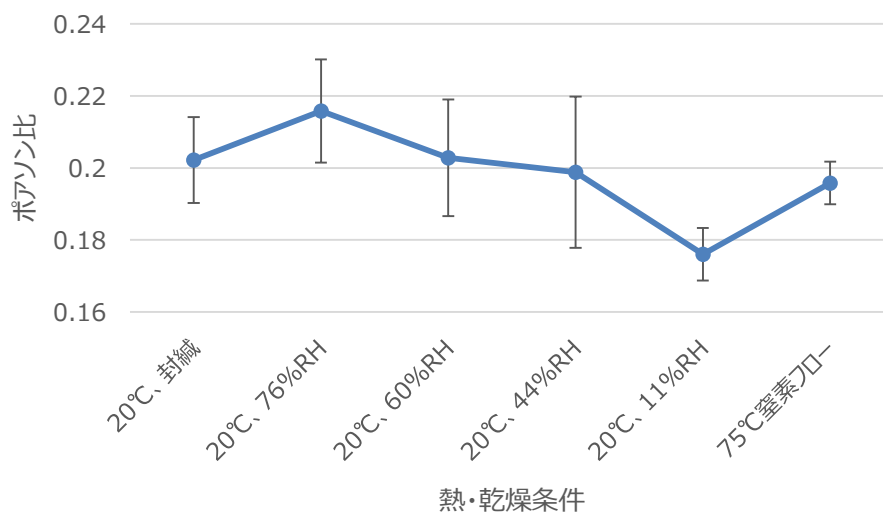


図 4.23 各熱・乾燥条件でのポアソン比（乾燥期間 26 週）

4. 3 まとめ

(1)セメントペースト

熱・乾燥影響については、セメントペーストは乾燥にともない、水分が逸散し、収縮することを確認した。収縮の傾向は既往研究と概ね一貫性があるが、45%RH 以下の収縮量は既往研究よりも大きい傾向にあることを確認した。

また、曲げ強度試験については、封緘状態と飽水状態の試験体強度の差はあるが、乾燥に伴い、特に 60%RH の環境で強度が増大していく結果が得られ、水セメント比 0.40 (H40) と 0.55 (H55) の過去のデータのちょうど中間に位置しており、一貫性のあるデータが得られていることを確認した。

(2)モルタル

熱・乾燥影響について、セメントペーストベースでの評価に加え、モルタルベースでの評価を実施した。各種熱・乾燥条件での乾燥後の圧縮強度試験の結果から、モルタルの圧縮強度は、20℃封緘から 60%RH までの乾燥に伴い増大し、44%RH で一度低下し、さらに乾燥が進むと再び増大した。セメントペーストの挙動と概ね同様の結果となっており、これまでの考察に大きな影響は生じないことを確認した。

5. 数値解析的検討

5. 1 実施概要

過年度までに放射線に加え、コンクリートに作用する湿度、温度を環境外力とし、部材内の強度分布を定量的に評価可能な数値解析的検討を実施した。

数値解析的検討では、既存のプログラムを活用した計算プログラム“DEVICE”(Damage Evaluation for Irradiated ConcretE)を用いた。

DEVICE は大きく 2 つの構成要素からなり、1 つは放射線の輸送からコンクリートへの照射影響の ANISN⁵⁵による計算であり、1 つは水分・熱移動およびセメントの水和反応、相組成計算から、コンクリートの強度等を算出する名古屋大学で開発した“CCBM”(Computational Cement-Based Material model)⁵⁶である。DEVICE では原子炉内の放射線場を取り入れたコンクリートの変質を評価するために ANISN と CCBM を連成している。

DEVICE には既往の研究のみならず、モデル化された本研究における実験的検討の成果が実装されている。これまでに JPDR 炉での部材性能評価を用いた検証と健全性評価における留意点の考察のために PWR 炉での計算を実施した。

5. 2 コンクリート放射線影響評価

5. 2. 1 放射線照射環境に関する汎用性の向上

昨年度までの DEVICE は放射線源を入力としておらず、解析した JPDR 炉と PWR 炉のみの評価に限定されていた。今年度は放射線照射環境として、JPDR 炉や PWR 炉以外の原子炉や高さの異なるコンクリート部材を評価できるようにした。

5. 2. 2 対象構造物の寸法

昨年度までの DEVICE は評価の対象とするコンクリートの厚さが固定化されていた。しかし実機の違いや同一実機であっても、照射量に応じて DEVICE の評価を行うべき部材、領域は異なってくると考えられる。対象とするコンクリートの厚みを選択できるようにした。

5. 2. 3 グラフの作成

昨年度までの DEVICE は評価結果をテキストでのみ出力しており、ユーザーが表計算ソフトウェアやグラフ作成のためのアプリケーションソフトウェアを別途用意し、自らテキストファイルからグラフ作成を行う必要があった。本検討では表計算ソフトウ

⁵⁵ Engle Jr., E. A. (1967). “A User’s Manual for ANISN, A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering.” USAEC Report K-1963.

⁵⁶ Maruyama, I. and G. Igarashi (2015). “Numerical Approach towards Aging Management of Concrete Structures: Material Strength Evaluation in a Massive Concrete Structure under One-Sided Heating.” Journal of Advanced Concrete Technology 13 11 500-527.

ェアのマクロ機能を用いて、グラフの作成をできるようにした。

5. 2. 4 出力材齢

昨年度までの DEVICE は 60 年間の照射環境におけるコンクリートの強度を評価できるものの、出力される材齢はユーザー指定ではなく、固定値であった。運転期間等が異なることを想定し、本検討では出力する材齢を指定できるようにした。

5. 3 まとめ

今年度の検討では DEVICE の利用用途を拡大するための検討を実施した。昨年度の DEVICE とは異なる放射線環境やコンクリート厚さ、出力材齢で評価を行うことが可能となった。更に、グラフを作成できるようにした。

6. 長期健全性評価の検討

6. 1 長期健全性評価フロー

本研究で実施した試験結果に基づき、放射線影響を受ける鉄筋コンクリート部材の長期健全性評価を検討した。本研究では既往の目安値の妥当性を科学的合理性を持った形で検証することを目的としたが、目安値だけで評価するのではなく、コンクリートのコア強度による評価、部材性能による評価を想定した長期健全性評価フロー（案）を検討した。図 6.1 に長期健全性評価フロー（案）を示す。

中性子及びガンマ線の目安値を照射試験及び加熱試験の結果から検討した。中性子照射試験の結果から、照射量 $1.48 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ までは圧縮強度は大きく低下していないことから、中性子照射量の目安値を $1.0 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ から $1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (> 0.1 \text{ Mev})$ に再設定することが必要であると判断した。また、ガンマ線照射試験の結果から、最大 $2 \times 10^5 \text{ kGy}$ でもガンマ線照射による圧縮強度の低下は認められず、加熱試験の結果から、熱の影響が支配的であることから、ガンマ線照射量の目安値を現状の $2 \times 10^5 \text{ kGy}$ に設定することは、妥当であると判断した。

(1) 照射量の評価

60 年運転時の累積照射量（中性子、ガンマ線）を確認する。

- ・ 目安値以下の場合は、健全と評価する。
- ・ 目安値を超える場合は、目安値を超える部位又は近傍からコンクリートコアを採取する。

(2) コア強度の評価

目安値を超える部位又は近傍からコンクリートコアを採取し、現時点で設計基準強度を満足するか確認する。

- ・ 設計基準強度を満足しない場合又はコア採取できない場合は、部材性能を評価する。
- ・ 設計基準強度を満足する場合は、現時点でのコンクリートは健全と評価する。なお、設計基準強度を満足する場合でも、60 年時点の部材性能を評価する。

(3) 部材性能の評価

目安値を超える部位を考慮した耐力（該当する断面部材の鉛直荷重が、工事計画認可申請書に示されている圧縮耐力に対して十分余裕があるか、最大せん断ひずみが（社）日本電気協会原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987））に示されている基準値（ 2.0×10^{-3} ）を下回っているか）を確認する。

- ・ 上記の部材性能評価が満足されていなければ、対策を検討する。
- ・ 上記の部材性能が満足されていれば、健全と評価する。

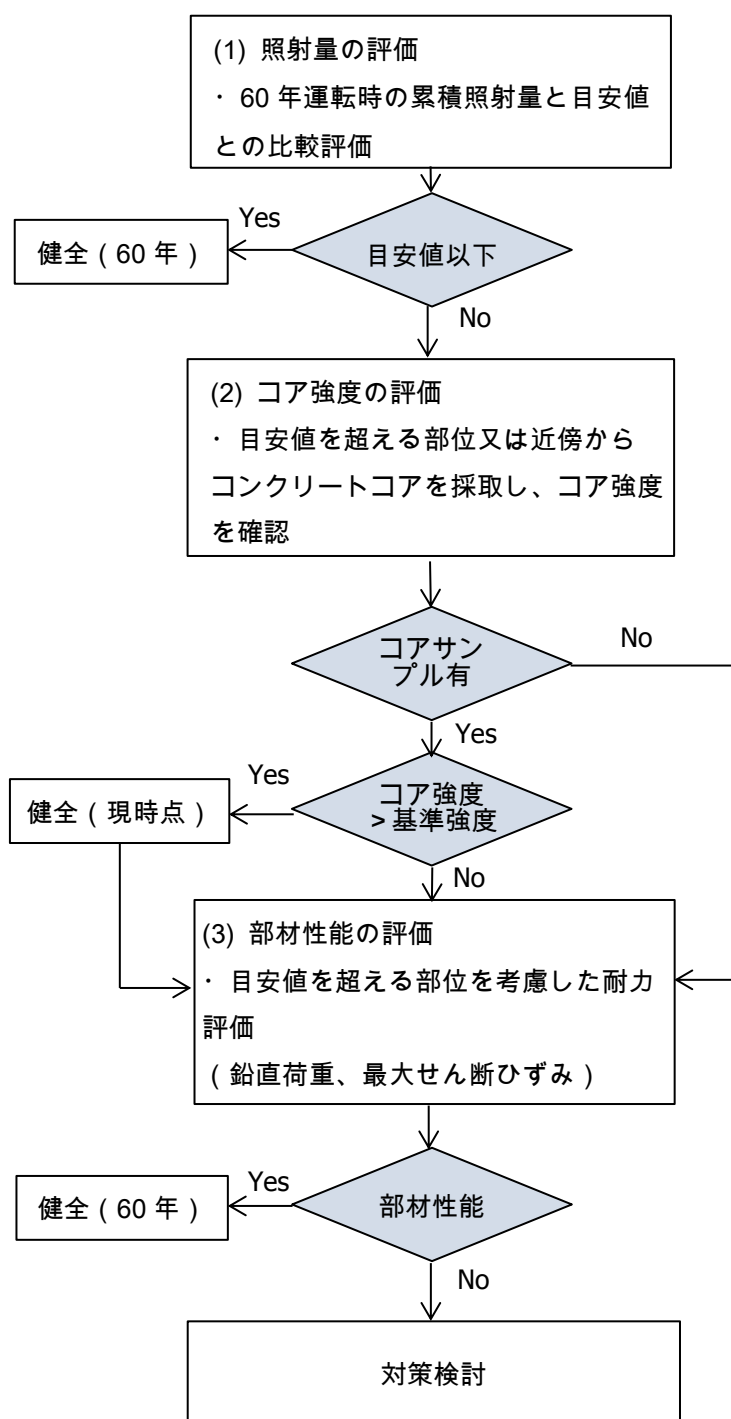


図 6.1 長期健全性評価フロー（案）

6. 2 コンクリート強度低下に関する累積照射量の目安値

従来、放射線影響については、中性子について高速中性子 (0.1MeV 以上) で 1×10^{20} n/cm², ガンマ線については 2×10^5 kGy とされて来た。

ガンマ線照射については、本研究の試験結果では強度の低下は確認されず、むしろ強度が増大した。構成成分別にみてもセメントペーストに対して、ガンマ線の相互作用によって生ずる電子によって強度が、熱・乾燥影響以上に低下する理論的なメカニズムは考えにくいことが分かった。また、骨材については、既往の電子線照射の研究から主要鉱物である石英がメタミクト化するには 10^{10} kGy 程度のエネルギー付与が必要なが指摘されており、この値は既往のガンマ線の目安値より大きい。

中性子照射については、本研究の試験結果でも、既往の研究と同様に強度低下が確認された。その要因はコンクリート中の骨材の膨張にあり、特に石英のメタミクト化による膨張の影響が大きく、ついで長石の影響も無視できないと考えられた。セメントペーストは、中性化のため若干の強度の増大を生じた可能性が高く、同時に収縮を生じた。この結果、骨材とペーストの体積変化差に起因して大きなひび割れが生じ、結果としてコンクリートの圧縮強度とヤング率が低下した。

石英のメタミクト化については既往の研究から照射温度の影響が大きいことが明らかとなっており、そのことから熱的な治癒効果が大きな役割を果たすと考えられる。しかし、この現象について定量的な予測ができるほど詳細なデータは蓄積されていない。また、メタミクト化を生じさせる中性子エネルギーの下限値については議論の余地があるが、0.1MeV 以上を一つの閾値として考えることが妥当と考える。従って、ここでは中性子による岩石鉱物のメタミクト化を評価する上で 0.1MeV 以上の中性子を対象とすることとする。

作業仮説でも記載したように、中性子照射環境では、ガンマ線影響と熱・乾燥影響が同時に生ずる。ガンマ線影響は原子炉格納容器の環境では本研究の成果により無視しうると考えられたが、熱・乾燥影響については無視できない。乾燥影響はセメント種類、水セメント比、骨材種類の影響を受ける。中性子の劣化主要因を骨材膨張として考えるのであれば、熱・乾燥影響による強度低下を排除して考える必要がある。図 6.2 に照射環境の温度影響 (約 70℃) を補正し、実機の環境に近い 55℃の温度条件で同等の石英膨張量となる中性子照射量にして結果を示している。ここに示されるように既往研究と本試験結果は類似の傾向を示しており、 1×10^{19} n/cm² より大きい範囲で中性子による強度低下の影響が確認できる。この数値は、Hilsdorf の提案値⁵⁷や Field ら、オークリッジ国立研究所の研究者らの膨大な既往データのレビュー結果 (図 1.4) とも対応している⁵⁸。このことから、目安値は 0.1MeV 以上の高速中性子において $1 \times$

⁵⁷ H. Hilsdorf, J. Kropp, H. Koch, The effects of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete, ACI SP-55, (1978) 223-251.

⁵⁸ K.G. Field, I. Remec, Y. Le Pape, Radiation effects in concrete for nuclear

10^{19} n/cm^2 とするのが妥当と考えられる。

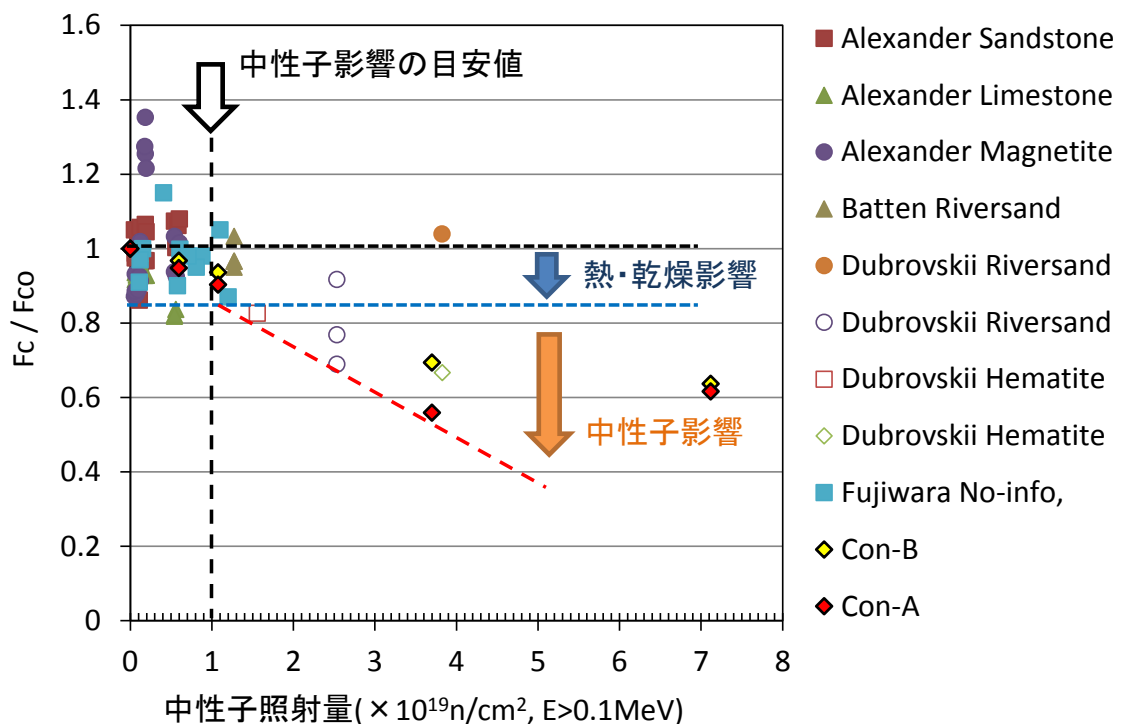


図 6.2 中性子照射量と F_c/F_{c0} の関係

ただし、この中性子照射量の目安値は変性凝灰岩として石英含有量が 90%以上のきわめて中性子耐性の弱い骨材を用いた照射試験の結果から決定したものである。

また、現状の規制では、65℃以下であればコンクリートは健全であるとされている。この数値は、ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III-Division 2 and ACI Standard 359⁵⁹の値と整合しているが、その背景データは明確ではない。本研究の熱・乾燥影響で確認された最大で 15%の強度低下が生じうる現象と健全性評価の間の考え方の整合性は今後、検討すべき内容である。なお、米国では標準水中養生 28 日の強度よりも実機のコア強度が 2 割以上高くなっているという実情を踏まえ、規制される温度を 82℃に緩和するという議論があるが⁶⁰、2015 年時点で ACI-359 には反映されていない。これらのデータは、米国 NRC の報告書⁶¹に基づくものと考えられる

power plants - Part I: Quantification of radiation exposure and radiation effects, Nuclear Engineering and Design, 282 (2015) 126–143.

⁵⁹ ACI-ASME Joint Committee, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III-Division 2 and ACI Standard 359, 2001.

⁶⁰ ACI 349-12 document (dated 4/20/2013) in Appendix E.

⁶¹ D. J. Naus, A compilation of elevated temperature concrete material property

が、日本においても今後検討すべき項目と考えられる。

6. 3 コンクリート強度の評価

図 6.1 では、60 年運転時の累積照射量が目安値を超える場合、コンクリートコアを採取し、コア強度を確認することになっている。しかし、コンクリートコアを採取できない場合は、以下のような考えに基づけば照射影響部のコンクリート強度を予測できる可能性がある。

目安値の評価では岩種の影響を考慮できない。しかしながら、4 章で記載したように岩種によって骨材膨張量は大きく異なり、その量はおおむね石英含有量に比例する(図 6.3)。

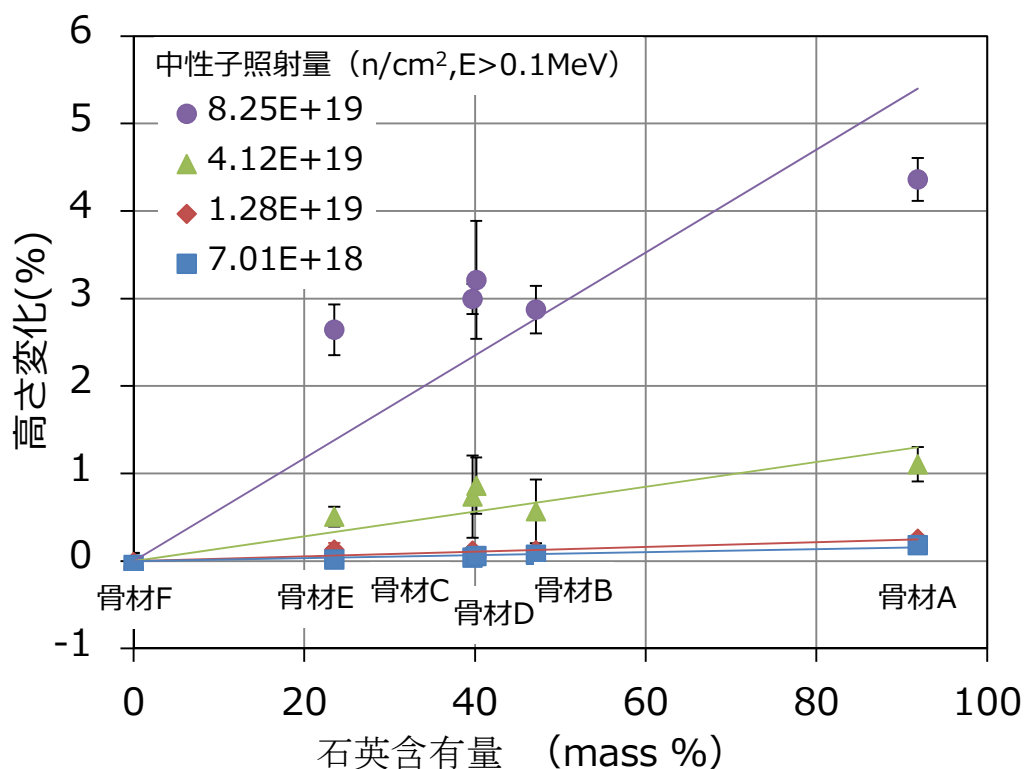


図 6.3 骨材中の石英含有量と長さ変化の関係

ついで、骨材中に石英以外は膨張しないと考え、骨材中の石英割合で骨材膨張ひずみが決定するとし、さらに粗骨材の膨張ひずみに基づきコンクリート全体の平均化ひずみについて、複合則を用いて予測することとした。

data and information for use in assessments of nuclear power plant reinforced concrete structures, NUREG/CR-7031, US-NRC2010.

Hobbs のモデルに ITZ(Interfacial Transition Zone : 遷移帯)の影響をひずみに換算した以下のモデルを採用した⁶²。ここで、Hobbs モデルとは、骨材の収縮、骨材のヤング率、モルタルの収縮、モルタルのヤング率とコンクリートの構成体積比から、コンクリートの収縮を予測するために開発された予測式であるが、本検討では、ここに骨材の膨張を考慮してコンクリートの膨張を予測するモデルとして援用することとした。また、近年の研究では、コンクリートの体積変化において骨材周囲に生ずる粗な領域である遷移帯⁶³によってコンクリートの収縮における骨材寸法依存性が説明できることから、収縮において考慮することの重要性が指摘されている⁶⁴。そのため、本検討ではその点を拡張して評価することとした。

$$\frac{\varepsilon_{c,n}}{\varepsilon_m} = \frac{n+1+(2mn-n-1)V_{agg}}{n+1+(n-1)V_{agg}} \quad (6-1)$$

$$n = E_{agg}/E_m$$

$$m = \varepsilon_{agg}(n)/\varepsilon_m$$

$$\varepsilon_{agg}(n) = r_{quartz} \cdot \varepsilon_{n,quartz,\infty} \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{n}{K(T)} \right)^d \right) \right) \quad (6-2)$$

$$K(T) = 0.50 \times 10^{20} \times \frac{\text{Exp}(2000/298)}{\text{Exp}(2000/T)}$$

$$\frac{F_c}{F_{co}} = 0.3 + 0.7 \text{Exp}(-1.4 \times 10^4 \varepsilon_{c,n})$$

ここで、 $\varepsilon_{c,n}$: コンクリートの骨材膨張に基づく膨張量、 $\varepsilon_{agg}(n)$: 中性子による骨材膨張ひずみ、 n : 高速中性子累積照射量 (n/cm²)、 V_{agg} : コンクリートの骨材体積、 r_{quartz} : 骨材中の平均石英含有量、 F_c/F_{co} : 中性子影響によるコンクリートの強度比、である。

⁶² Hobbs, D. W. (1974). "Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete." ACI Journal 71 9 445-450.

⁶³ 遷移帯は粉体の壁効果によって形成されるとされている。すなわちセメント粒子は、骨材表面近傍では、壁によって充填が阻害されるために、水が多い粗な状態になる。そのため、強度やヤング率が小さく、コンクリート内の弱点部となると考えられている。

⁶⁴ Maruyama, I. and A. Sugie (2014). "Numerical study on drying shrinkage of concrete affected by aggregate size." Journal of Advanced Concrete Technology, 12, 8, pp. 279-288.

この結果から、コンクリートの骨材容積が65%としたときの異なる石英含有量の場合の強度低下を求めた。その結果を図 6.4 に示す。なお、石英含有量がゼロであれば F_c/F_{co} は 1.0 である。

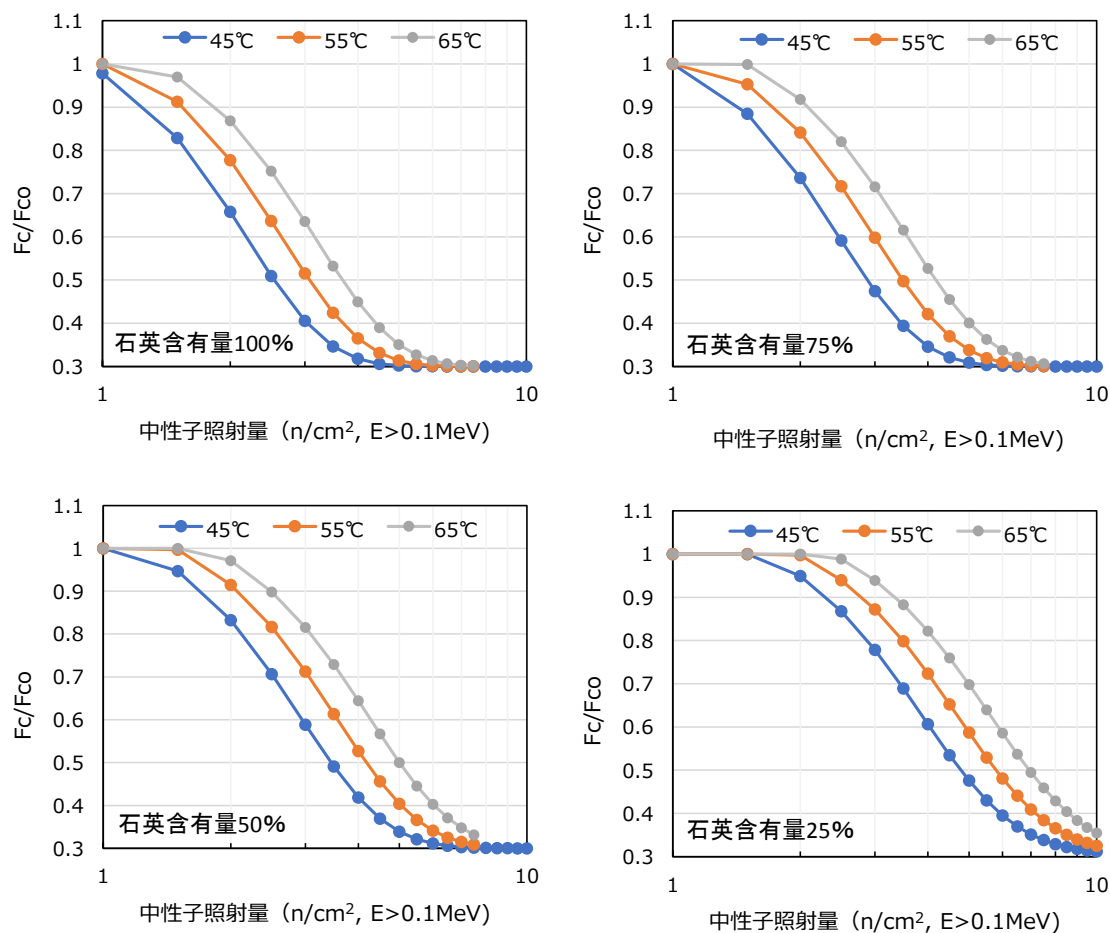


図 6.4 異なる石英含有量の骨材を用いたときの中性子照射量 F_c/F_{co} との関係

このように、骨材の平均石英含有量を算出し、高速中性子の累積照射量の推定値と調査データから、 F_c/F_{co} を算出することができる。もし、直接的に照射影響部のコア抜きを行って強度試験ができなかったとしても、構造体コンクリートからコア抜きを行って強度データを得て、 F_c/F_{co} を乗じることで照射影響部の強度を予測することができる。この照射影響部のコンクリート強度の推定値と設計基準強度を比較することで、材料レベルの健全性評価が可能である。その他、高度な方法としては、管理試験体や構造体コンクリート強度のデータでキャリブレーションを行い、DEVICE で評価することで最も放射線の影響を受ける部位の強度を予測してもよい。

6. 4 部材性能の評価

部材性能の評価については、目安値を超える部位を考慮した耐力（鉛直荷重、最大せん断ひずみ）を確認することを原則とする。既往の事例では、該当する断面部材の鉛直荷重が工事計画認可申請書に示されている圧縮耐力に対して十分余裕があり、最大せん断ひずみが（社）日本電気協会 原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG 4601-1987）に示されている基準値（ 2.0×10^{-3} ）を下回っていれば健全と評価してきた。その他、放射線影響部位を強度低下と体積変化を勘案し、有限要素法などで長期荷重の影響や地震時の挙動について評価する方法も考えられる。

6. 5 まとめ

本検討では、2～5章の内容を踏まえ、長期健全性評価フロー（案）とその手段について提案した。長期健全性評価のプロセスとしては、

- 1) 照射量の評価
- 2) コア強度の評価
- 3) 部材性能の評価

の3つの手段を提案した。ただし、これらの手段では現状の最新知見を反映したもの、いくつかの課題が残る。1)については、石英等の岩石鉱物のメタミクト化に関する詳細なメカニズムが把握できていないために、累積照射量を評価するときの中性子エネルギースペクトルの下限値が不明となっており、高速中性子の範囲（ $>0.1\text{MeV}$ ）を提案している。2)については、強度低下の予測評価において、石英と石灰岩については本研究の範囲で挙動が概ね明らかになったが、長石に関するデータが欠落している。また、熱・乾燥影響による強度変化をどのように考えるかが明確となっていない。3)については、部材レベルの劣化が構造体レベルに及ぼす影響を評価する方法について検討が必要である。

7. 今後の課題

7. 1 熱・乾燥影響評価

熱・乾燥影響については、今回の試験の範囲では 60℃以下で最大 15%程度の強度低下が認められたが、実機の環境条件やコンクリート調合・材料のデータのもとに現状の温度制限値（65℃以下）の位置付けを明確にする必要がある。

また、今回の試験においても熱・乾燥影響による剛性低下が確認されたが、部材レベルでの試験を行うことが望ましい。

物性変化の基本は水分移動にある。特に大断面部材の性能評価において、高温や温度勾配が生じた時の水分移動に関するデータの拡充を行う必要がある。

乾燥による強度変化については、セメントの種類、水セメント比の違いに関するデータを拡充する必要がある。また今回の試験で、瞬間的に高温にしたときに過度に強度低下が生じ、その後回復する傾向が確認されている。過度的な温度影響と部材耐力の関係から、強度回復メカニズムに関する研究を行うことが望ましい。

7. 2 中性子影響評価

コンクリートに対する中性子影響については、照射したサンプルに樹脂を含浸させた上で中性子ラジオグラフィによる 3 次元トモグラフィ撮影を行うことで、コンクリート内部の損傷分布が明らかになる。このデータは、メソスケールの解析手法による強度評価の検証データとなるため、測定の価値が高い。数値解析によって実構造物の性能評価への外挿を行う上でも重要な資料となる。

骨材に対する中性子影響については、照射した骨材において、各鉱物の密度変化について分析し、岩石鉱物の中性子照射による膨張挙動に対して定量データを得る必要がある。このデータを取得することで、広範な骨材に対応したコンクリートの劣化リスク評価の基盤的データを拡充できる。また、骨材を取りして岩石鉱物の密度を取り出して評価する手法は、廃炉材研究の上でも必要である。

放射線影響の要は、骨材中の岩石鉱物の膨張挙動である。この膨張挙動は、電離影響と原子の弾き出し影響の両方が影響するが、岩石鉱物がメタミクト化する速度及び最終密度変化のデータベースを構築することで、個別の骨材に応じた評価が可能となる。

岩石鉱物のメタミクト化のメカニズムと速度、特に治癒効果に関する知見を拡充することで、加速試験と実機の違いを確認することができる。異なるフラックス（照射時間）で比較を行い、実機での膨張可能性について確認する必要がある。

モルタルに対する中性子影響については、中性子照射環境下でのモルタルの挙動は未解明な部分が多い。骨材径が小さく遷移帯の影響が多いモルタル物性の評価は、熱・乾燥影響を含めてコンクリート工学上曖昧なままである。本研究ではモルタルの膨張がコンクリート内の損傷を緩和していることを示唆している。モルタルとコンクリー

トの照射を同時に行うことで、メソスケールモデルの妥当性検証が重要である。

目安値以上の照射量となった部位が鉄筋の内側まで進んだ場合の健全性評価の検討が必要である。骨材膨張が部材に及ぼす影響を含めて、数値解析と骨材膨張のアナロジーと成る現象による部材性能評価を行う必要がある。

捨て型枠がある場合には生体遮蔽壁の炉内側で含水量が多く、かつ、骨材の石英や長石がアモルファス化される。この場合、このメタミクト化された石英や長石が ASR を生じる可能性が高い。

7. 3 ガンマ線影響評価

セメントペーストに対するガンマ線影響については、未反応の水和物があると、電離作用とともに溶解・析出プロセスが変化すると考えられる。高強度コンクリートで未反応セメントが残る場合やフライアッシュが使われている状態でのガンマ線照射が水和を通じて強度・剛性に及ぼす影響を確認する必要がある。また、クリープ・体積変化に及ぼす影響についての確認も必要である。

骨材に対するガンマ線影響については、高エネルギーのガンマ線による石英や他の骨材への照射試験を行い、アモルファス化に関わる基礎データを拡充し、炉内のガンマ線に対する骨材膨張挙動に関する知見を拡充する必要がある。

コンクリートに対するガンマ線影響については、本研究で得られたペースト、コンクリートに関する知見について、中性化が生じない環境でのデータを取得し、ガンマ線影響が熱・乾燥影響の一部として評価して良い根拠データの取得が必要である。

8. 放射線影響に関する国際動向

本研究の立ち上げ時より、米国の関心が高く、米国 NRC 及び米国 DOE、オークリッジ国立研究所(ORNL)と定期的な知見交換を行った。その後、これらの知見交換会をもとに、国際的な委員会の設置が試みられ、オークリッジ国立研究所が中心となっている International Committee on Irradiated Concrete が立ち上がった。この委員会は、コンクリートの放射線影響に関する知見交換を目的とする非公開の国際委員会であり、参加者の条件は照射影響に関する試験を実施している研究者及びその関係者となっている。これまでに実施した会合は以下のとおりである。

2014 年 3 月：第 1 回 WS (CSN, バルセロナ) 参加国数：5 (議長国：ORNL、米国)

2014 年 10 月：第 2 回 WS (Fortum, ヘルシンキ) 参加国数：8 (議長国：ORNL、米国)

2015 年 11 月：第 1 回国際会議 (ORNL, 米国) 参加国数：10 (議長国：ORNL、米国)

2016 年 11 月：第 2 回国際会議 (名大、日本) 参加国：8 (議長国：名大、日本)

本会議では、参加各国が研究を進めている加速試験、廃炉活用研究、モデリング (照射影響評価のためのコード開発) などについての技術報告及び意見交換を行ってきた。参加国は 10 か国、20 機関まで増えており、今後も増加する見込みである。日本の研究アクティビティは数値モデルから試験までを包括し、将来における研究方針についても強い発言力を獲得している。

次の会議は、2017 年 11 月上旬にチェコ・プラハで実施の予定である。

その他、国際的な動向と成果について収集する必要があると考えるコンクリートの照射影響プロジェクトを以下に示す。

- ・LIGHT WATER REACTOR SUSTAINABILITY (LWRS) PROGRAM における照射研究 (Zorita project by NRC, 他)
- ・Halden project における照射中のペーストクリープ試験の提案
- ・Electric Power Research Institute (EPRI) の 3 次元 FEM による構造評価
- ・スペインの Zorita project の試験とその成果 (放射性廃棄物管理公社 (ENRESA))
- ・原子力安全審議会 (CSN), スペイン高等科学研究院 (CSIC) 他), EU SCAP (NFRP 1: “Continually improving safety and reliability of Generation II and III reactors) と EU SAEXFUEL (NFRP 7: “Research and Innovation on the overall management of radioactive waste other than geological disposal”)

Ⅲ 事業進捗の管理と成果報告の実施

1 実施履歴

表 1.1 に、事業進捗の管理と成果報告の履歴を示す。

表 1.1 事業進捗の管理と成果総括に係る活動履歴

作業項目	平成28年度											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1. 研究会 照射劣化研究会						27		30		23		
2. 第三者有識者委員会						27		30		23		
3. 報告会		16 実施計画			1 中間報告		17 中間報告		19 中間報告		20 成果報告	
4. 報告書作成												
5. 品質管理活動												
規制庁殿との打合せ 月報提出		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△

2 報告会

(1) 第1回

今年度実施計画を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：長期健全性評価（案）の中の部材性能評価等、早い段階から議論を行い、その結果を評価フローに反映する。

2016年5月16日（月）10：00～11：40 原子力規制庁 18F 会議室 出席者 13名

(2) 第2回

第一回中間進捗状況を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：累積中性子照射量の目安値の設定については、本研究の結果、既往の文献等から見解を取りまとめる。

2016年8月1日（月）10：00～12：00 原子力規制庁 18F 会議室 出席者 10名

(3) 第3回

第二回中間進捗状況を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：作業仮説に対する検証結果と根拠データが1対1で分かるように整理する。

2016年10月17日（月）10：00～12：00 原子力規制庁 18F会議室 出席者16名

(3)第4回

第三回中間進捗状況を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：長期健全性評価（案）について、コンクリート強度と設計基準強度との比較を行うフローの位置づけを検討する。

2016年12月19日（月）13：30～15：15 原子力規制庁 18F会議室 出席者13名

(4)第5回

最終成果を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：長期健全性評価（案）で、高経年化技術評価におけるコンクリートコア強度評価は、設計基準ベースで良い。

2017年2月20日（月）10：00～12：00 原子力規制庁 18F会議室 出席者12名

3 第三者有識者委員会

委員は、本テーマに関係する分野に造詣が深い、本事業には直接関与していない第三者の立場の有識者の観点から東京工業大学・名誉教授、東京大学・教授を選任した。

(1)第1回

第三回報告会に向けて、進捗内容に関する意見を聴取した。

要点：今回の加速試験に基づく評価は保守的であると言えよう。

2016年9月27日（火）10：00～12：00 弊社CR-D会議室 出席者16名

(2)第2回

第四回報告会に向けて、進捗内容に関する意見を聴取した。

要点：バルク材料の表面から劣化する領域が、60年経過したときに肉厚に対して何%に収まっているかで全体強度を表現することができる。

2016年11月30日（水）18：00～20：00 弊社CR-F会議室 出席者17名

(2)第3回

最終報告会に向けて、成果案の内容に関する意見を聴取した。

要点：累積照射量は深さに対してほぼ指数関数で減衰するため、どここの累積照射量を見るかに留意が必要であろう。

2017年1月23日（月）17：15～19：15 弊社CR-C会議室 出席者17名

4 研究会

(1) 照射劣化研究会

研究会委員は、主査を始め、大学、国研、民間の6名で構成される。

9/27、11/30、1/23に開催し、報告会に向けた意見交換を行った。

5 定例報告

規制庁殿との打合せや月報提出も、予定通り定期的に行った。打合せは、5回の報告会以外に6/20、9/12、11/28、1/30、3/13に行い、月報は翌月の初旬に毎月提出した。

6 品質管理活動

5月に提出・承認された品質管理計画書に従って、弊社品質管理体制のもとで、品質管理活動や文書管理等を行った。

IV 結論

原子力施設の遮蔽機能及び支持機能が要求される放射線照射環境下にある安全上重要なコンクリート構造物の長期健全性評価を目的として、以下の試験研究を実施した。

ガンマ線及び中性子の累積照射量の目安値設定根拠の妥当性検証並びに放射線がコンクリートの物理特性に及ぼす影響を把握するため、ガンマ線及び中性子の照射試験を実施し、累積照射量と劣化の関係を評価した。また、放射線の影響と区別することを目的に、照射試験の温度履歴を模擬した非照射の加熱試験を行い、熱単独による劣化メカニズムを解明するためのデータ取得と分析を行った。あわせて、放射線の影響によるコンクリート部材内部の強度、温度、水分量、照射量の経時変化及び分布数値解析的検討を行った。

以上を踏まえて、放射線影響を受ける鉄筋コンクリート部材の長期健全性評価フロー（案）を提案した。

謝辞

本研究は、株式会社三菱総合研究所が原子力規制庁より委託を受け、再委託契約の下で、名古屋大学と連携して実施したものです。

したがって、本報告書は株式会社三菱総合研究所のクレジットで作成しておりますが、再委託先が有するノウハウや知見も含めた研究活動の成果を取りまとめたものです。加えて、専門性の高い知見が必要な研究のとりまとめに際しては、学术界、産業界の方々から構成される委員会や研究会から多大なご協力を賜りました。

あらためて、再委託先の機関ならびにご協力頂いた関係各所に対し、御礼申し上げます。

平成 29 年 3 月

株式会社三菱総合研究所

原子力規制庁 御中

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
正誤表

MRI株式会社三菱総合研究所

P2-364

(誤)

表 3.12(2) 質量・寸法計測結果一覧 コンクリート試験体 1(砂岩)

コンクリート試験体1(砂岩)				照射・加熱試験前後						強度試験前			
試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	直径(mm)		高さ(mm)		質量(g)		直径 (mm) 平均	高さ (mm) 平均	質量 (g)	
				試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後				
				平均	平均	平均	平均						
1-061	加熱試験	4ヶ月後	1段目温度 雰囲気湿度					182.95	178.48	40.30	60.00	178.44	
1-062								181.31	176.09	40.20	59.40	176.04	
1-063		8ヶ月後						181.31	176.91	40.30	59.50	176.87	
1-064								183.88	179.56	40.25	59.89	179.55	
1-065								182.20	177.27	40.29	59.22	177.27	
1-066								182.43	178.35	40.27	59.24	178.31	
1-067		16ヶ月後						183.23	178.63	40.26	59.97	178.58	
1-068								183.84	179.43	40.27	59.98	179.48	
1-069								180.95	176.20	40.29	59.54	176.24	
1-070								184.10	180.17	40.30	60.10	180.65	
1-071		32ヶ月後						183.16	179.22	40.21	59.87	179.68	
1-072								178.54	174.67	40.21	58.54	175.16	
1-073		16ヶ月後	4段目温度 雰囲気湿度					181.23	178.56	40.25	59.11	178.92	
1-074								180.45	178.85	40.27	59.03	179.23	
1-075								181.34	178.44	40.16	59.32	178.79	
1-076								183.84	181.34	40.27	59.74	181.50	
1-077		32ヶ月後						182.77	180.01	40.22	59.53	180.24	
1-078								183.73	180.89	40.28	59.76	181.21	
1-127	20℃封緘 養生	材齢28日	-							40.30	60.00	183.90	
1-128										40.30	60.00	184.20	
1-129										40.20	60.00	184.20	
1-130		照射試験 開始時	-							40.30	59.80	182.90	
1-131										40.20	59.70	180.80	
1-132										40.30	59.70	182.30	
1-133		4ヶ月後	-							40.30	59.30	181.80	
1-134										40.30	59.60	182.40	
1-135										40.30	59.80	182.80	
1-136										40.20	59.70	183.10	
1-137		8ヶ月後	-							40.30	59.70	183.30	
1-138										40.30	59.70	183.50	
1-139										40.20	59.07	180.26	
1-140		16ヶ月後	-							40.30	58.76	179.64	
1-141										40.30	59.28	180.79	
1-142										40.24	59.52	184.07	
1-143		32ヶ月後	-							40.23	59.26	181.39	
1-144										40.21	59.14	181.31	
1-145	予備												
1-146	追加乾燥	1% 到達時	20℃ 60%					177.79	176.02	40.27	57.66	176.02	
1-147								181.58	179.77	40.17	59.14	179.77	
1-148								179.44	177.66	40.27	58.31	177.66	
1-149		1% 含水均質後						183.10	181.28	40.28	59.33	181.28	
1-150								180.67	178.86	40.26	58.91	178.86	
1-151								183.45	181.59	40.26	59.58	181.59	
1-152		1.5% 到達時						182.40	179.66	40.32	59.57	179.66	
1-153								181.36	178.60	40.32	58.72	178.60	
1-154								181.75	179.04	40.21	59.63	179.04	
1-155		1.5% 含水均質後						179.55	176.86	40.19	58.51	176.86	
1-156								182.36	179.61	40.28	59.19	179.61	
1-157								184.38	181.64	40.19	59.82	181.64	
1-158		1% 到達時	40℃ 60%					182.15	180.27	40.23	59.88	180.27	
1-159								181.22	179.46	40.27	58.75	179.46	
1-160								185.87	184.00	40.23	60.36	184.00	
1-161		1% 含水均質後						176.74	174.86	40.23	57.71	174.86	
1-162								183.89	181.77	40.22	60.31	181.77	
1-163								182.75	180.86	40.26	59.58	180.86	
1-164		1.5% 到達時						200.68	197.66	40.22	65.55	197.66	
1-165								179.86	177.13	40.09	59.28	177.13	
1-166								182.86	179.89	40.27	59.88	179.89	
1-167		1.5% 含水均質後						181.87	179.14	40.44	59.24	179.14	
1-168								181.67	178.94	40.25	59.61	178.94	
1-169								181.50	178.77	40.22	59.79	178.77	

(正)

表 3.12(2) 質量・寸法計測結果一覧 コンクリート試験体 1(砂岩)

コンクリート試験体1(砂岩)				照射・加熱試験前後						強度試験前						
試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	直径(mm)		高さ(mm)		質量(g)		直径 (mm) 平均	高さ (mm) 平均	質量 (g)				
				試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後							
1-061	加熱試験	4ヶ月後	1段目温度 雰囲気湿度					182.95	178.48	40.30	60.00	178.44				
1-062								181.31	176.09	40.20	59.40	176.04				
1-063								181.31	176.91	40.30	59.50	176.87				
1-064								183.88	179.56	40.25	59.89	179.55				
1-065		8ヶ月後		182.20	177.27	40.29	59.22	177.27								
1-066				182.43	178.35	40.27	59.24	178.31								
1-067				183.23	178.63	40.26	59.97	178.58								
1-068				183.84	179.43	40.27	59.98	179.48								
1-069		16ヶ月後		180.95	176.20	40.29	59.54	176.24								
1-070				184.10	180.17	40.30	60.10	180.65								
1-071				183.16	179.22	40.21	59.87	179.68								
1-072				178.54	174.67	40.21	58.54	175.16								
1-073		4段目温度 雰囲気湿度		181.23	178.56	40.25	59.11	178.92								
1-074				180.45	178.85	40.27	59.03	179.23								
1-075				181.34	178.44	40.16	59.32	178.79								
1-076				183.84	181.34	40.27	59.74	181.50								
1-077			182.77	180.01	40.22	59.53	180.24									
1-078			183.73	180.89	40.28	59.76	181.21									
1-127			20℃封緘 養生	材齢28日	-									40.30	60.00	183.90
1-128														40.30	60.00	184.20
1-129	40.20	60.00												184.20		
1-130	40.30	59.80												182.90		
1-131	照射試験 開始時	-										40.20	59.70	180.80		
1-132												40.30	59.70	182.30		
1-133												40.30	59.30	181.80		
1-134												40.30	59.60	182.40		
1-135	4ヶ月後	-											40.30	59.80	182.80	
1-136													40.20	59.70	183.10	
1-137													40.30	59.70	183.30	
1-138													40.30	59.70	183.50	
1-139	8ヶ月後	-												40.20	59.07	180.26
1-140														40.30	58.76	179.64
1-141														40.30	59.28	180.79
1-142														40.23	59.47	181.37
1-143	32ヶ月後	-												40.30	60.00	183.37
1-144														40.28	59.23	181.12
1-145														予備		
1-146	追加乾燥	1% 到達時	20℃ 60%					177.79	176.02	40.27	57.66	176.02				
1-147								181.58	179.77	40.17	59.14	179.77				
1-148								179.44	177.66	40.27	58.31	177.66				
1-149								183.10	181.28	40.28	59.33	181.28				
1-150		1% 含水均質後		180.67	178.86	40.26	58.91	178.86								
1-151				183.45	181.59	40.26	59.58	181.59								
1-152				182.40	179.66	40.32	59.57	179.66								
1-153				181.36	178.60	40.32	58.72	178.60								
1-154		1.5% 到達時		181.75	179.04	40.21	59.63	179.04								
1-155				179.55	176.86	40.19	58.51	176.86								
1-156				182.36	179.61	40.28	59.19	179.61								
1-157				184.38	181.64	40.19	59.82	181.64								
1-158		1% 含水均質後		182.15	180.27	40.23	59.88	180.27								
1-159				181.22	179.46	40.27	58.75	179.46								
1-160				185.87	184.00	40.23	60.36	184.00								
1-161				176.74	174.86	40.23	57.71	174.86								
1-162		1% 含水均質後		183.89	181.77	40.22	60.31	181.77								
1-163				182.75	180.86	40.26	59.58	180.86								
1-164				200.68	197.66	40.22	65.55	197.66								
1-165				179.86	177.13	40.09	59.28	177.13								
1-166		1.5% 到達時		182.86	179.89	40.27	59.88	179.89								
1-167				181.87	179.14	40.44	59.24	179.14								
1-168				181.67	178.94	40.25	59.61	178.94								
1-169				181.50	178.77	40.22	59.79	178.77								

P2-366
(誤)

表 3.13(2) 質量・寸法計測結果一覧 コンクリート試験体 2(凝灰岩)

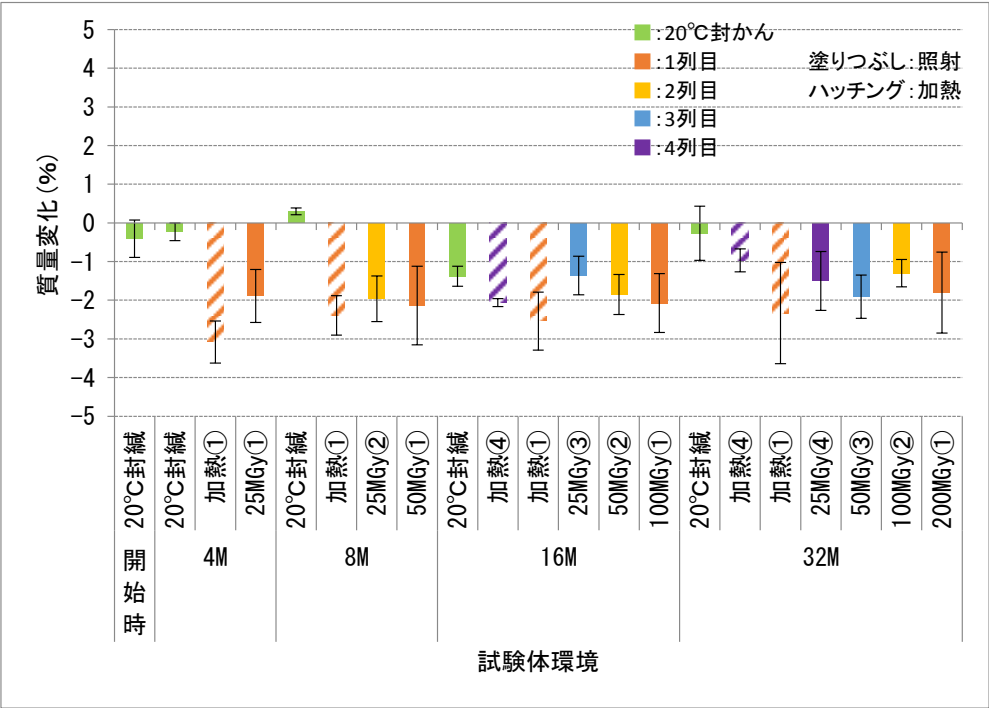
コンクリート試験体2(凝灰岩)				照射・加熱試験前後						強度試験前		
試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	直径(mm)		高さ(mm)		質量(g)		直径 (mm) 平均	高さ (mm) 平均	質量 (g)
				試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後			
				平均	平均	平均	平均					
2-061	加熱試験	4ヶ月後	1段目温度 雰囲気湿度					184.42	180.53	40.20	59.80	180.52
2-062								183.85	179.76	40.30	59.60	179.74
2-063								185.85	181.83	40.30	60.50	181.81
2-064								186.47	182.66	40.26	60.00	182.65
2-065		8ヶ月後						184.95	180.86	40.27	59.99	180.86
2-066								185.76	182.07	40.20	59.83	182.09
2-067								185.55	181.28	40.19	60.34	181.26
2-068								182.90	178.58	40.14	59.78	178.56
2-069		16ヶ月後						185.42	181.45	40.28	60.07	181.45
2-070								184.07	180.50	40.26	59.59	181.00
2-071								184.84	181.60	40.25	59.72	181.95
2-072								185.97	182.56	40.21	60.37	183.17
2-073		32ヶ月後						183.43	180.87	40.22	59.69	181.17
2-074								183.52	180.92	40.23	59.91	181.25
2-075								182.72	180.19	40.21	59.52	180.51
2-076								182.49	179.88	40.24	59.43	180.04
2-077	16ヶ月後	4段目温度 雰囲気湿度					182.11	179.65	40.23	59.49	179.84	
2-078							183.32	180.84	40.20	59.74	181.11	
2-127									40.20	60.00	184.80	
2-128									40.20	59.00	183.70	
2-129	照射試験 開始時								40.00	59.00	183.50	
2-130									40.40	58.83	181.20	
2-131									40.30	58.00	177.50	
2-132									40.30	59.83	184.10	
2-133	4ヶ月後								40.30	59.70	182.60	
2-134									40.20	59.13	181.30	
2-135									40.30	59.65	182.90	
2-136									40.20	59.70	183.60	
2-137	8ヶ月後								40.30	59.73	183.40	
2-138									40.30	59.98	184.80	
2-139									40.30	59.69	182.93	
2-140									40.30	59.78	183.74	
2-141	16ヶ月後							40.20	59.70	184.40		
2-142								40.23	59.47	181.37		
2-143								40.30	60.00	183.37		
2-144		32ヶ月後							40.28	59.23	181.12	
2-145	予備											
2-146	追加乾燥	1% 到達時	20℃ 60%					185.59	183.83	40.31	60.12	183.83
2-147								179.60	177.80	40.27	58.09	177.80
2-148								180.81	179.03	40.31	58.94	179.03
2-149								182.50	180.75	40.23	59.23	180.75
2-150		1% 含水均質後						177.41	175.67	40.17	57.99	175.67
2-151								180.84	179.08	40.18	58.66	179.08
2-152								182.80	180.17	40.25	59.35	180.17
2-153								179.50	176.68	40.27	58.66	176.68
2-154		1.5% 到達時						181.72	179.01	40.20	59.20	179.01
2-155								186.09	183.49	40.14	60.41	183.49
2-156								182.81	180.16	40.12	59.55	180.16
2-157								182.10	179.27	40.14	59.08	179.27
2-158		1% 到達時						182.50	180.66	40.25	59.63	180.66
2-159								181.56	179.79	40.18	59.42	179.79
2-160								179.80	177.99	40.24	58.70	177.99
2-161								186.71	184.76	40.19	60.75	184.76
2-162		1% 含水均質後	40℃ 60%					179.58	177.73	40.28	58.47	177.73
2-163								183.00	181.09	40.24	59.38	181.09
2-164								181.82	179.07	40.20	58.96	179.07
2-165								185.69	182.90	40.30	60.39	182.90
2-166		1.5% 到達時						179.63	176.90	40.23	58.51	176.90
2-167								182.07	179.24	40.19	59.62	179.24
2-168								180.50	177.72	40.25	58.91	177.72
2-169								181.25	178.53	40.19	59.08	178.53

(正)

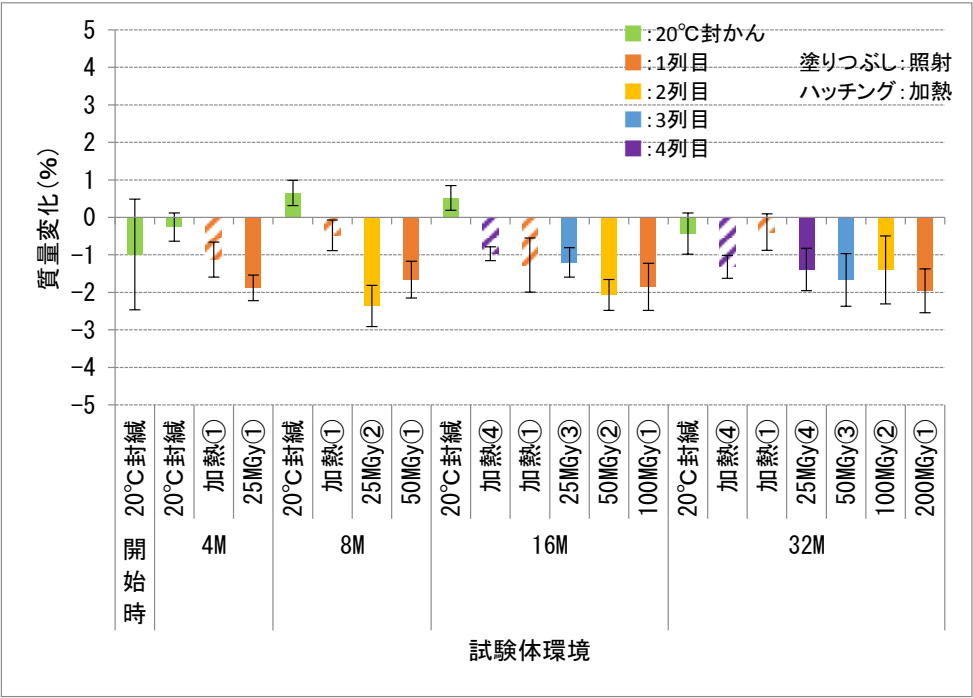
表 3.13(2) 質量・寸法計測結果一覧 コンクリート試験体 2(凝灰岩)

コンクリート試験体2(凝灰岩)				照射・加熱試験前後						強度試験前			
試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	直径(mm)		高さ(mm)		質量(g)		直径 (mm) 平均	高さ (mm) 平均	質量 (g)	
				試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後				
				平均	平均	平均	平均						
2-061	加熱試験	4ヶ月後	1段目温度 雰囲気湿度					184.42	180.53	40.20	59.80	180.52	
2-062								183.85	179.76	40.30	59.60	179.74	
2-063								185.85	181.83	40.30	60.50	181.81	
2-064		8ヶ月後						186.47	182.66	40.26	60.00	182.65	
2-065								184.95	180.86	40.27	59.99	180.86	
2-066								185.76	182.07	40.20	59.83	182.09	
2-067		16ヶ月後						185.55	181.28	40.19	60.34	181.26	
2-068								182.90	178.58	40.14	59.78	178.56	
2-069								185.42	181.45	40.28	60.07	181.45	
2-070		32ヶ月後						184.07	180.50	40.26	59.59	181.00	
2-071								184.84	181.60	40.25	59.72	181.95	
2-072								185.97	182.56	40.21	60.37	183.17	
2-073		16ヶ月後	4段目温度 雰囲気湿度					183.43	180.87	40.22	59.69	181.17	
2-074								183.52	180.92	40.23	59.91	181.25	
2-075								182.72	180.19	40.21	59.52	180.51	
2-076		32ヶ月後						182.49	179.88	40.24	59.43	180.04	
2-077								182.11	179.65	40.23	59.49	179.84	
2-078								183.32	180.84	40.20	59.74	181.11	
2-127	20℃封緘 養生	材齢28日	-							40.20	60.00	184.80	
2-128										40.20	59.00	183.70	
2-129										40.00	59.00	183.50	
2-130		照射試験 開始時	-							40.40	58.83	181.20	
2-131										40.30	58.00	177.50	
2-132										40.30	59.83	184.10	
2-133		4ヶ月後	-							40.30	59.70	182.60	
2-134										40.20	59.13	181.30	
2-135										40.30	59.65	182.90	
2-136		8ヶ月後	-							40.20	59.70	183.60	
2-137										40.30	59.73	183.40	
2-138										40.30	59.98	184.80	
2-139		16ヶ月後	-							40.30	59.69	182.93	
2-140										40.30	59.78	183.74	
2-141										40.20	59.70	184.40	
2-142		32ヶ月後	-							40.24	59.52	184.07	
2-143										40.23	59.26	181.39	
2-144										40.21	59.14	181.31	
2-145	予備												
2-146	追加乾燥	1% 到達時	20℃ 60%					185.59	183.83	40.31	60.12	183.83	
2-147								179.60	177.80	40.27	58.09	177.80	
2-148								180.81	179.03	40.31	58.94	179.03	
2-149		1% 含水均質後						182.50	180.75	40.23	59.23	180.75	
2-150								177.41	175.67	40.17	57.99	175.67	
2-151								180.84	179.08	40.18	58.66	179.08	
2-152		1.5% 到達時						182.80	180.17	40.25	59.35	180.17	
2-153								179.50	176.68	40.27	58.66	176.68	
2-154								181.72	179.01	40.20	59.20	179.01	
2-155		1.5% 含水均質後						186.09	183.49	40.14	60.41	183.49	
2-156								182.81	180.16	40.12	59.55	180.16	
2-157								182.10	179.27	40.14	59.08	179.27	
2-158		1% 到達時	40℃ 60%					182.50	180.66	40.25	59.63	180.66	
2-159								181.56	179.79	40.18	59.42	179.79	
2-160								179.80	177.99	40.24	58.70	177.99	
2-161		1% 含水均質後						186.71	184.76	40.19	60.75	184.76	
2-162								179.58	177.73	40.28	58.47	177.73	
2-163								183.00	181.09	40.24	59.38	181.09	
2-164		1.5% 到達時						181.82	179.07	40.20	58.96	179.07	
2-165								185.69	182.90	40.30	60.39	182.90	
2-166								179.63	176.90	40.23	58.51	176.90	
2-167		1.5% 含水均質後						182.07	179.24	40.19	59.62	179.24	
2-168								180.50	177.72	40.25	58.91	177.72	
2-169								181.25	178.53	40.19	59.08	178.53	

P2-367
(誤)



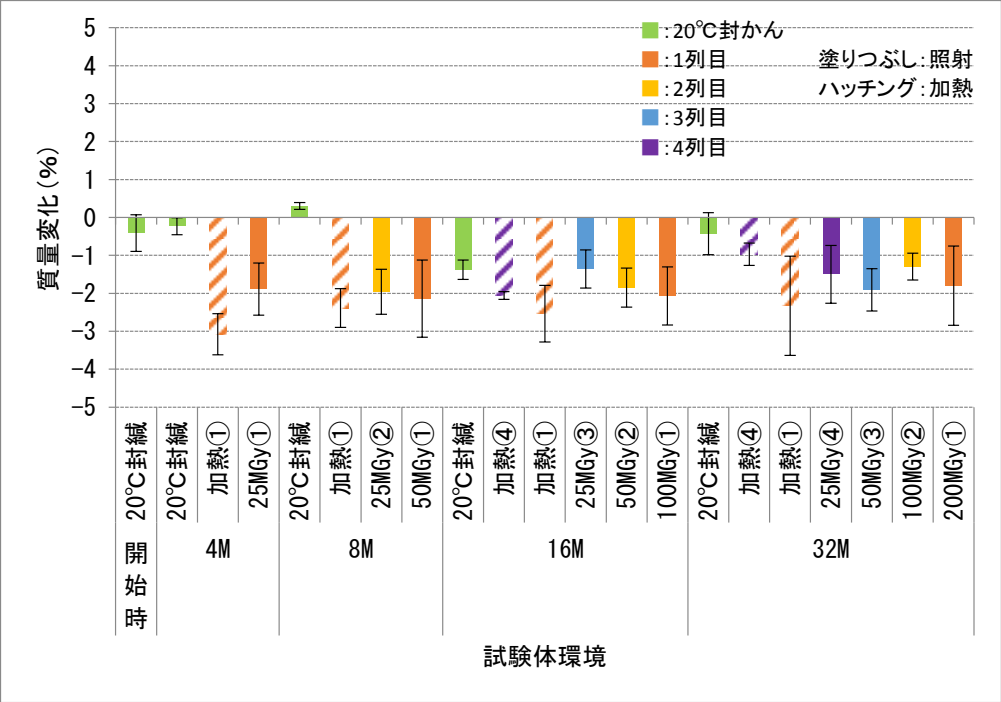
(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)



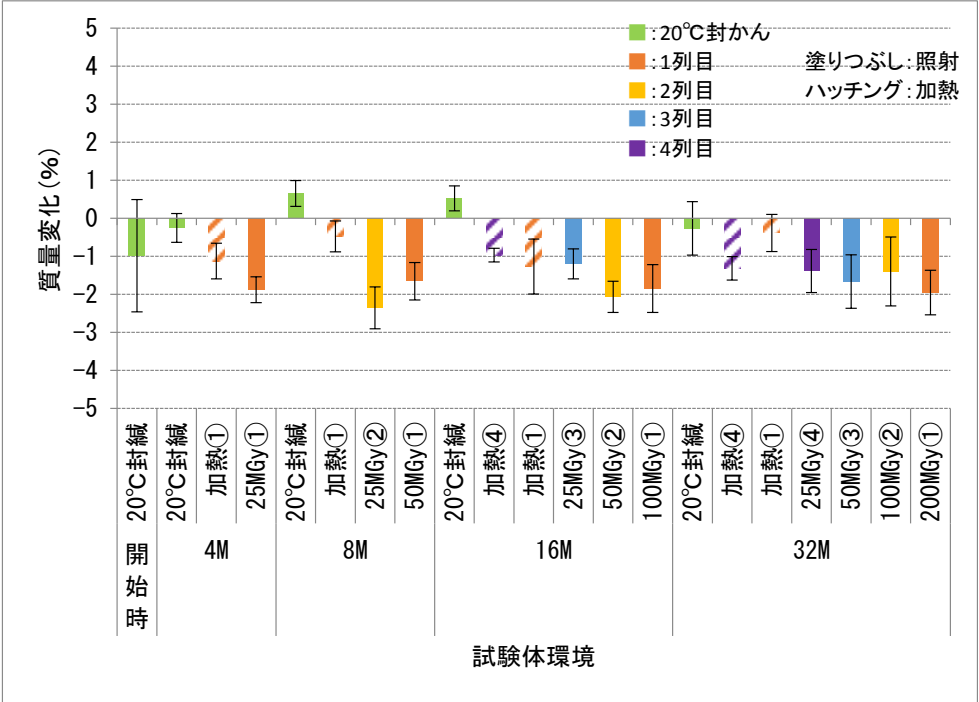
(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3. 45 質量変化の比較

(正)



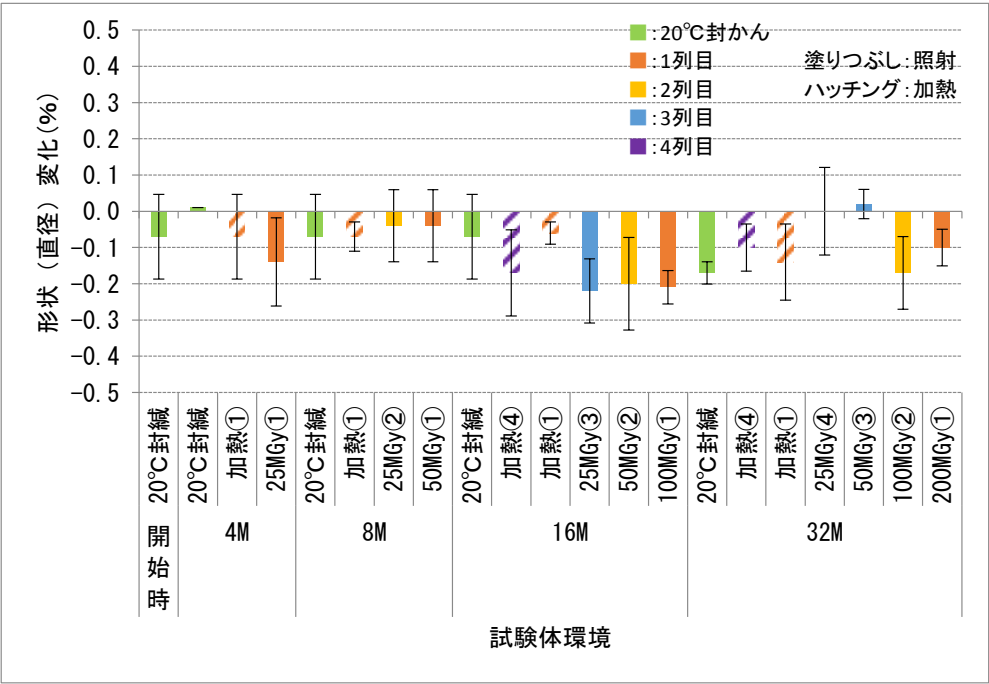
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



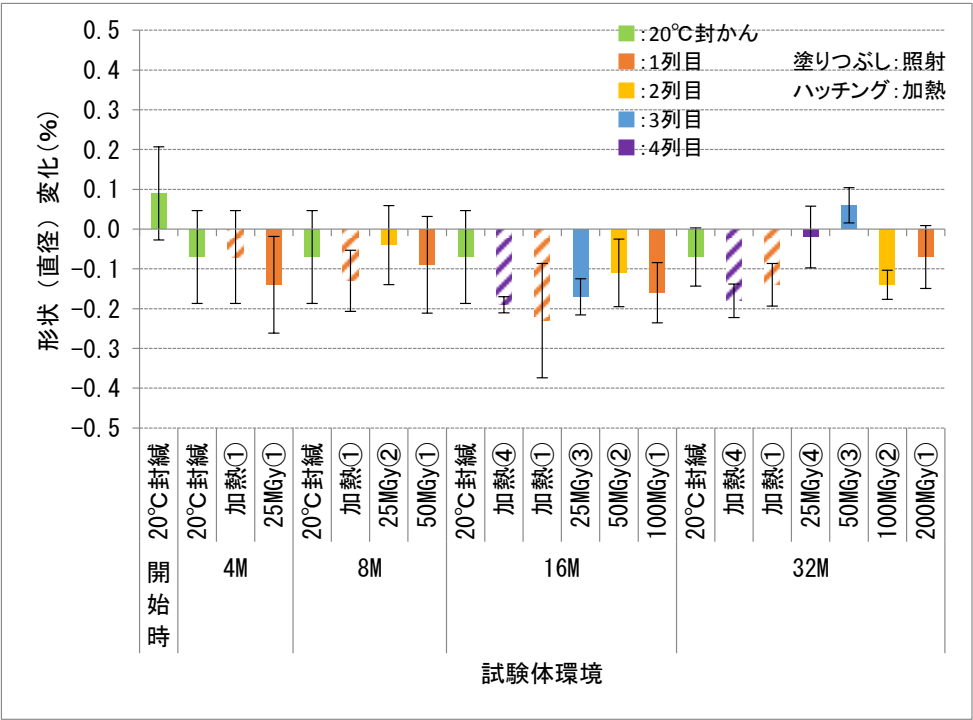
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3. 45 質量変化の比較

P2-368
(誤)



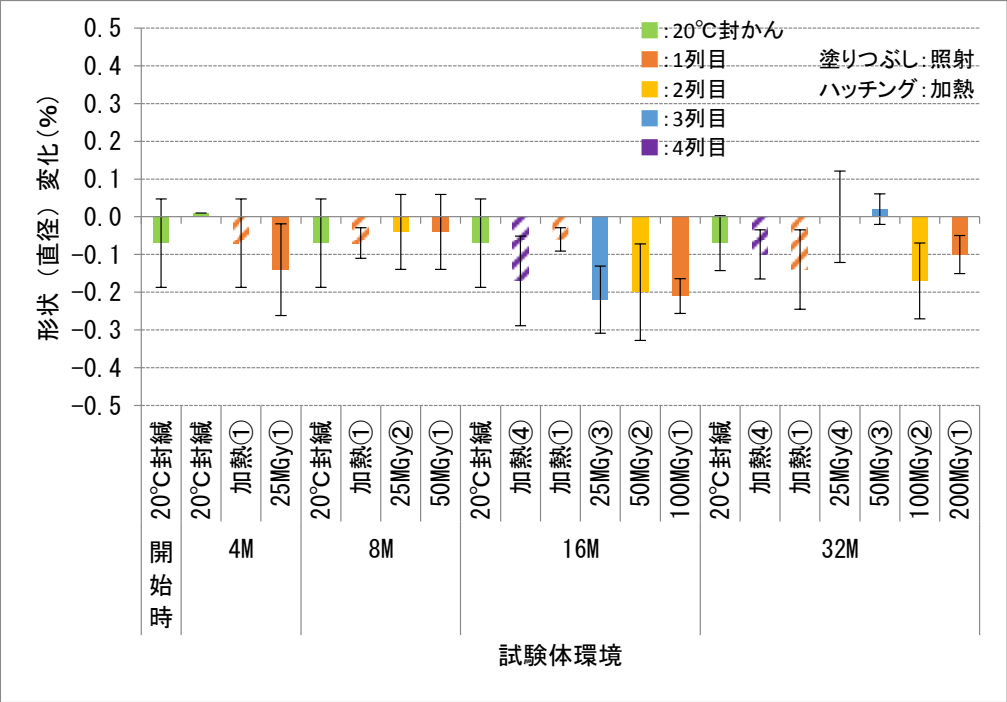
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



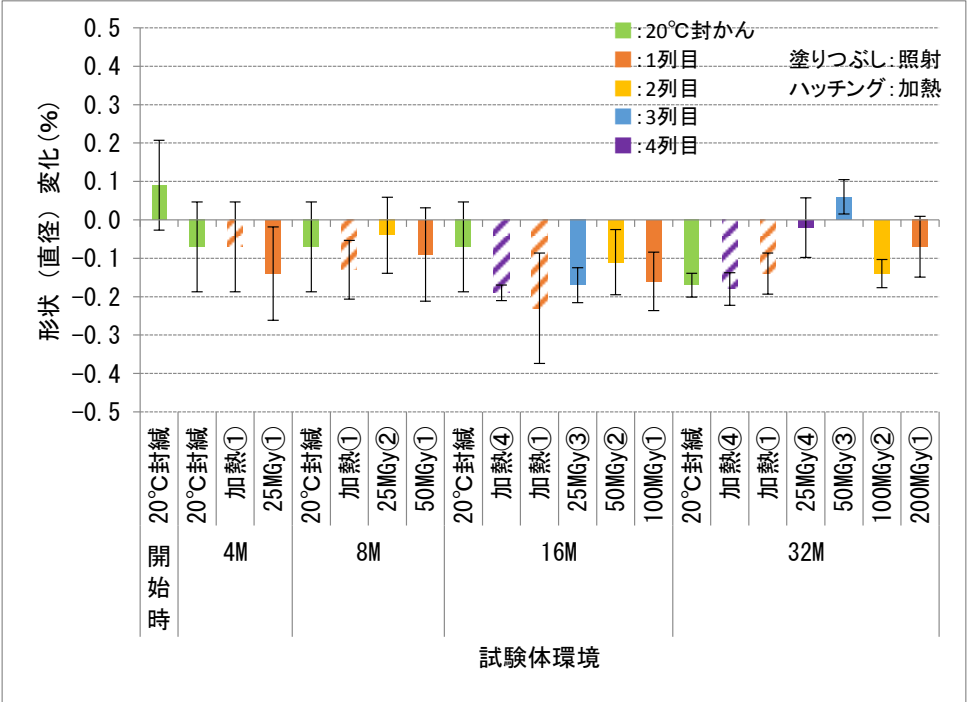
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3. 46 形状 (直径) 変化の比較

(正)



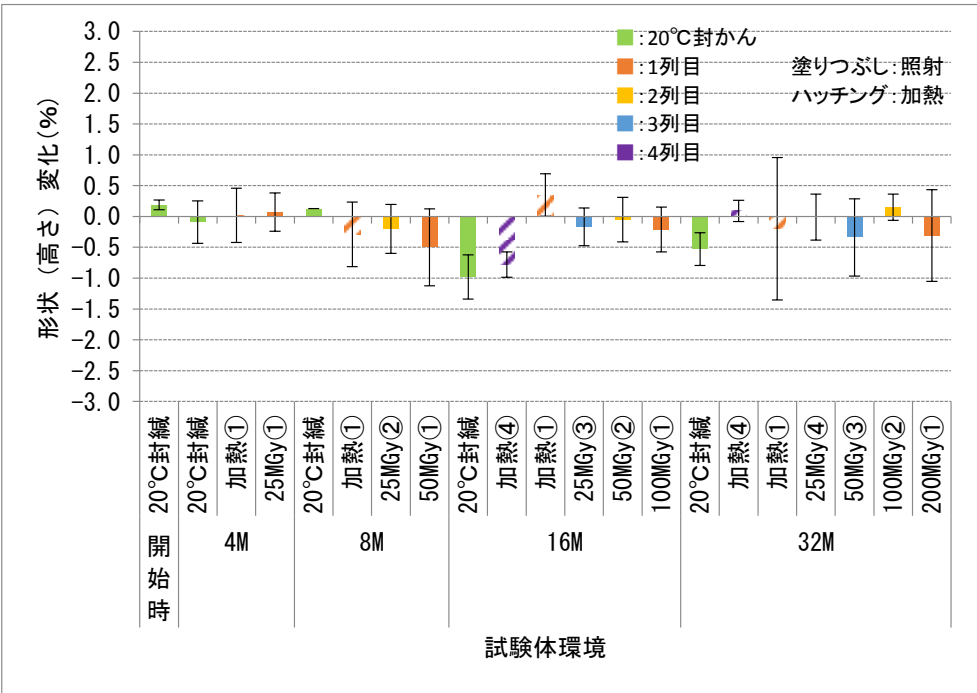
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



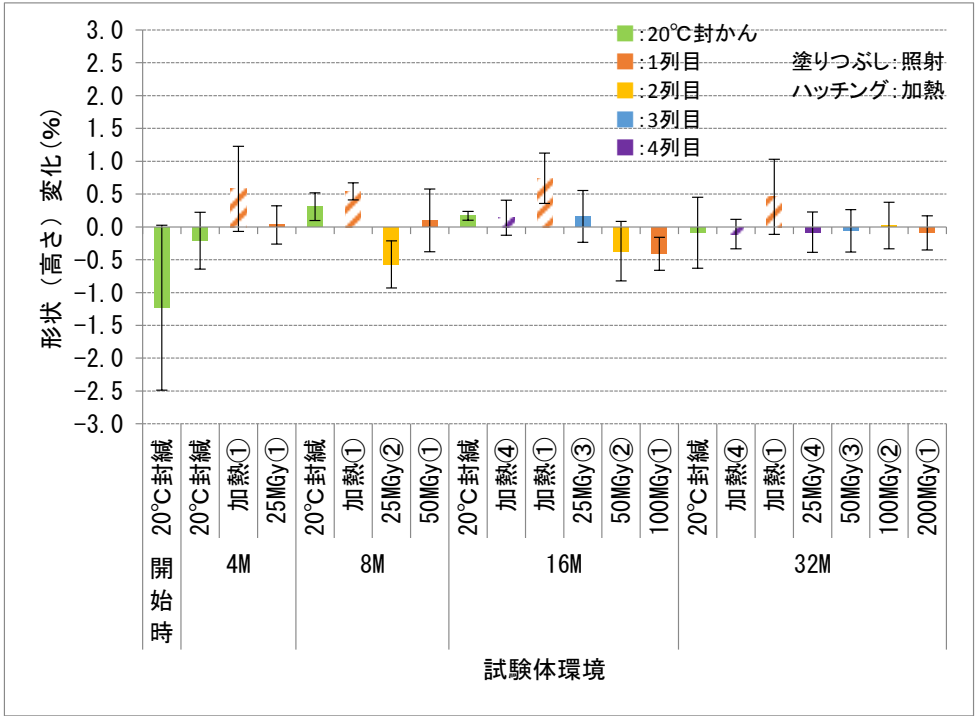
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3. 46 形状 (直径) 変化の比較

P2-369
(誤)



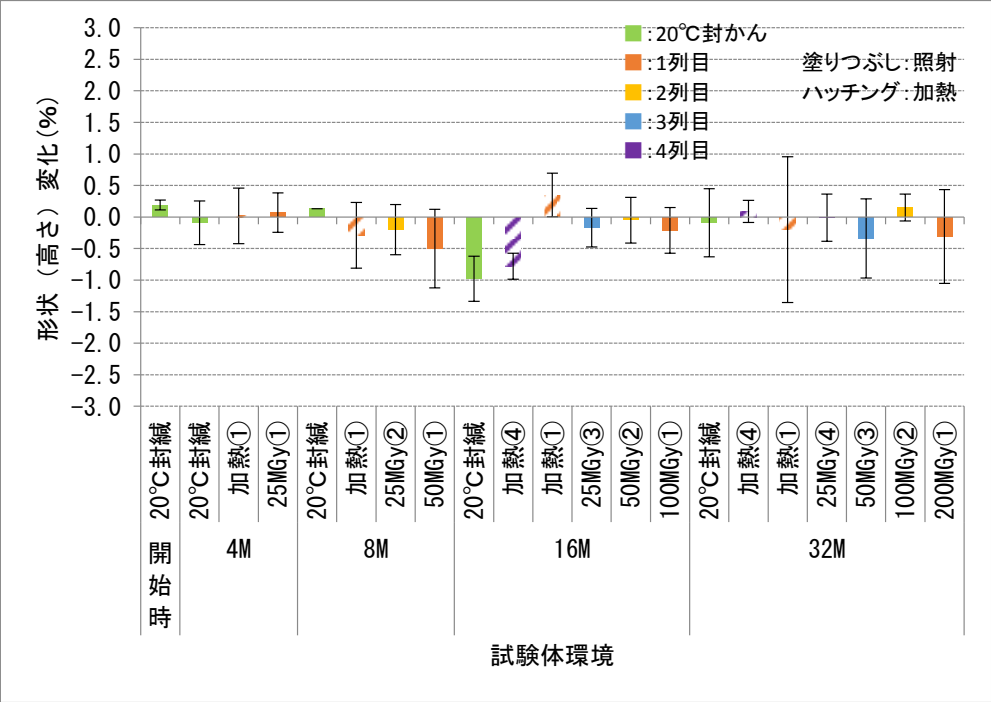
(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)



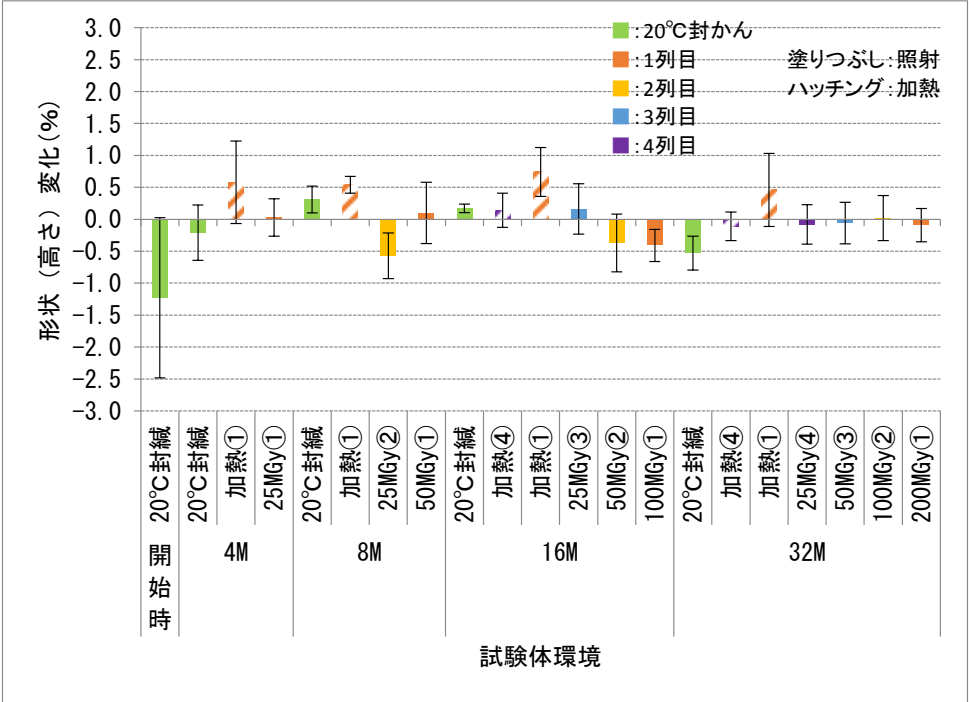
(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3.47 形状 (高さ) 変化の比較

(正)



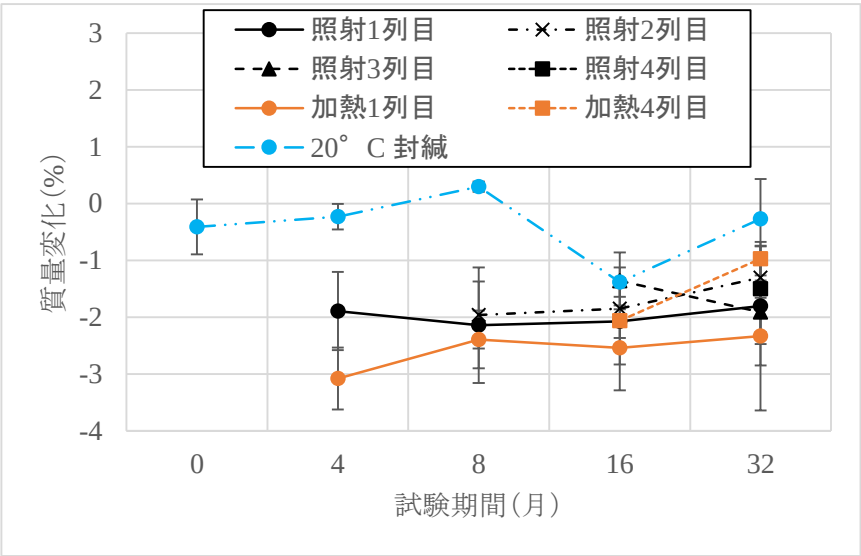
(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)



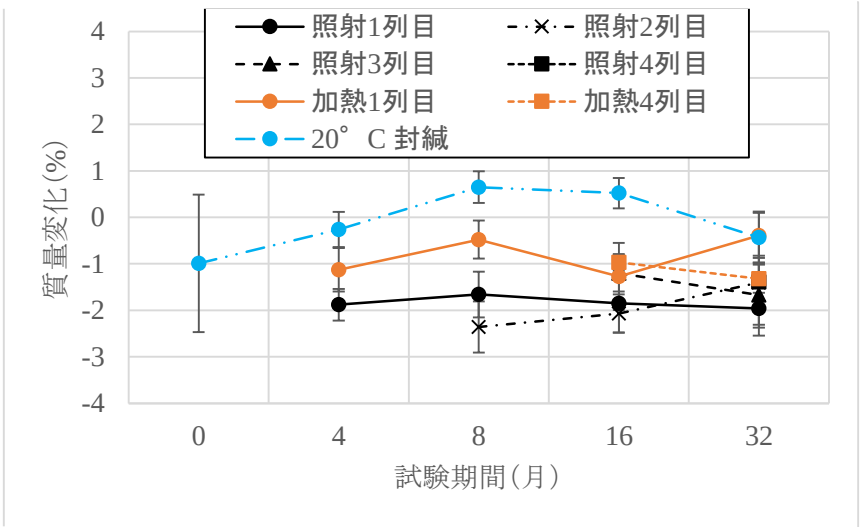
(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3.47 形状 (高さ) 変化の比較

P2-370
(誤)



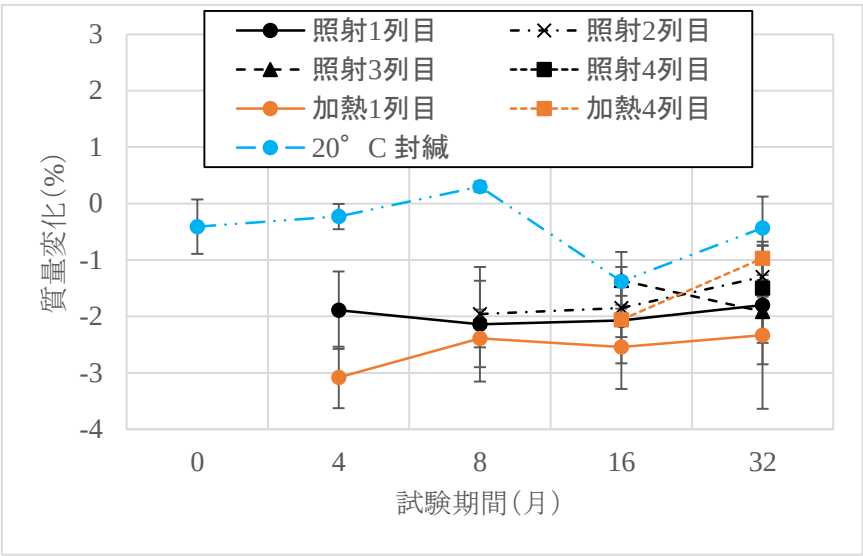
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



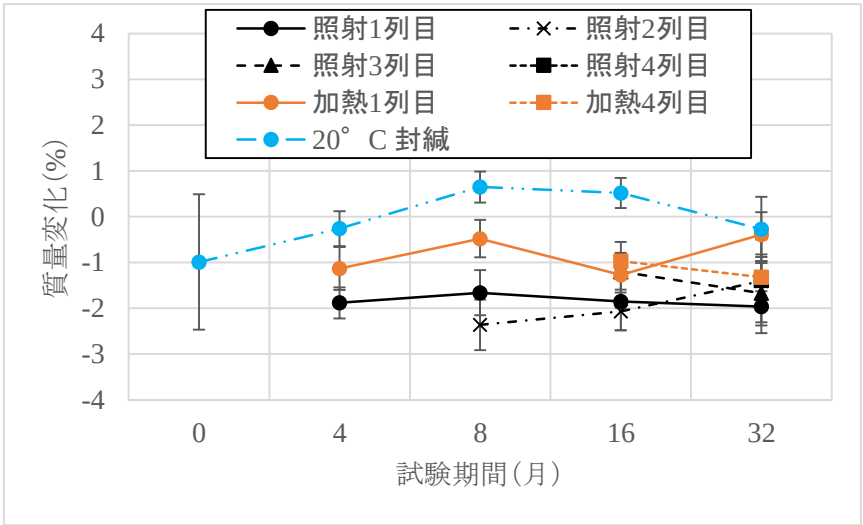
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.48 質量変化の推移

(正)



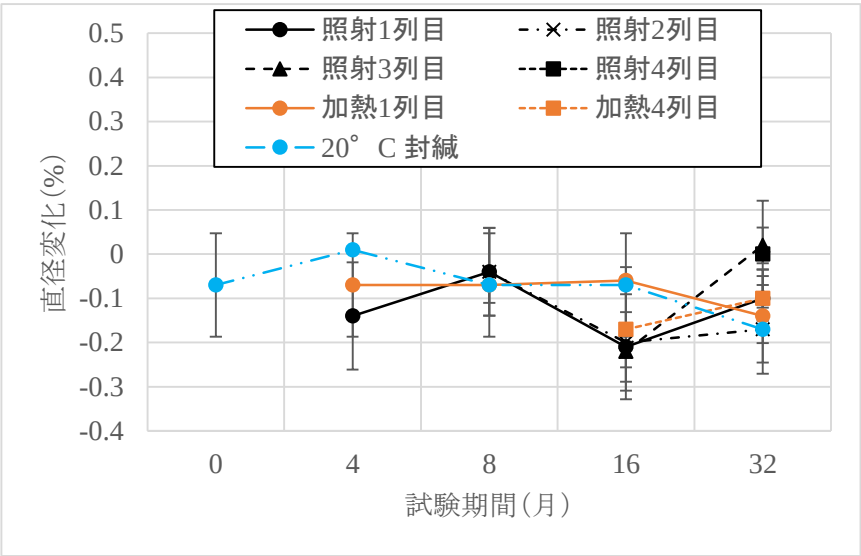
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



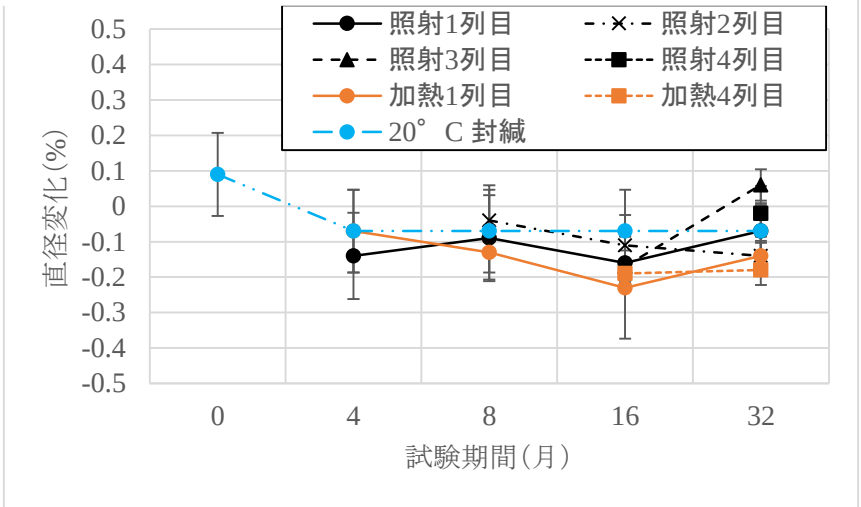
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.48 質量変化の推移

P2-371
(誤)



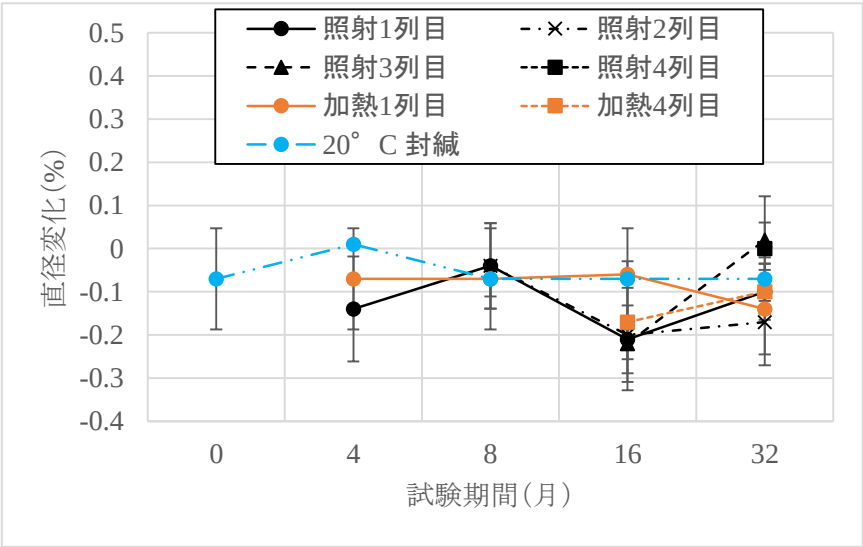
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



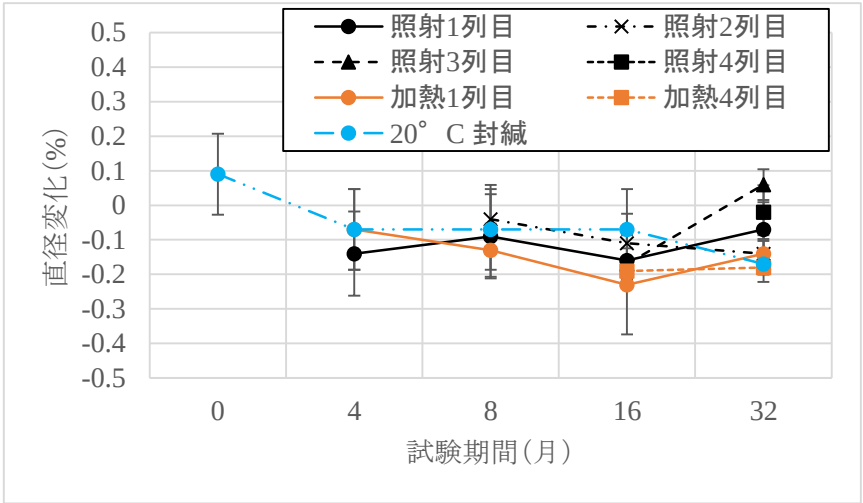
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.49 直径変化の推移

(正)



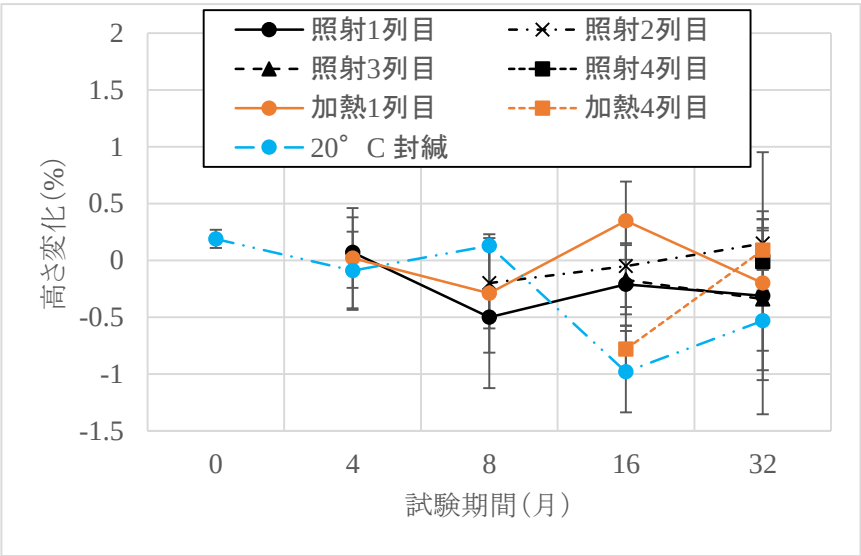
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



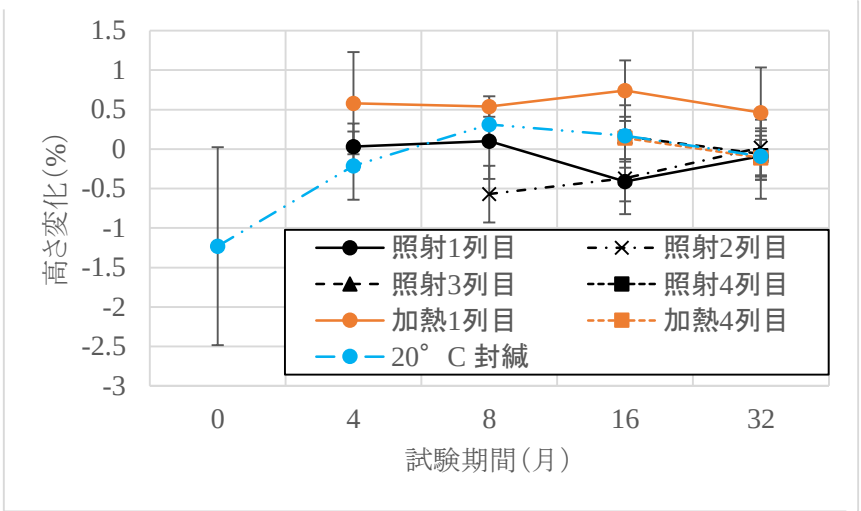
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.49 直径変化の推移

P2-372
(誤)



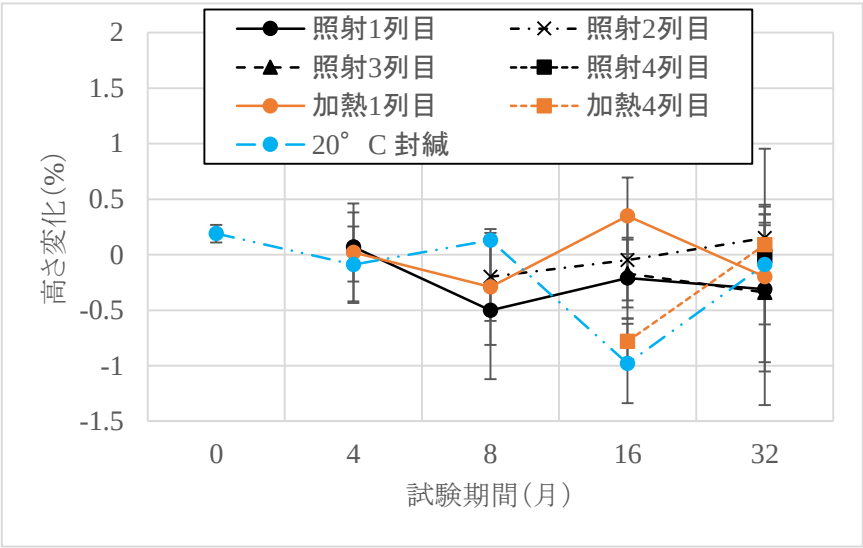
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



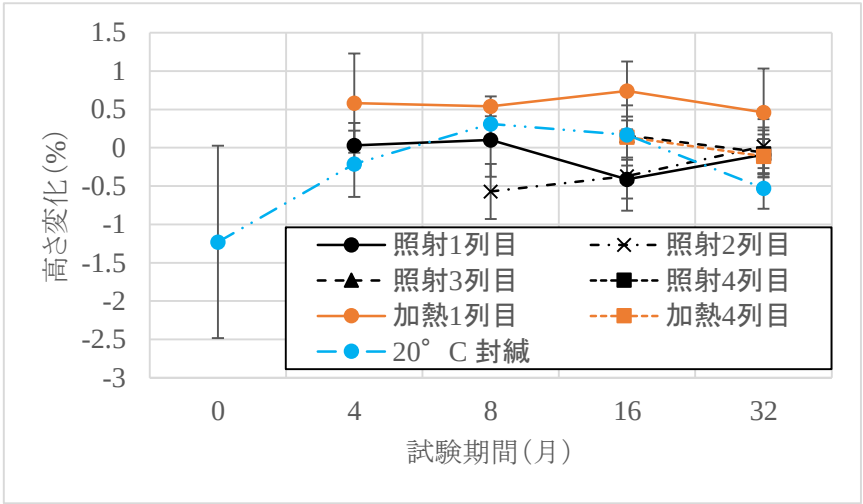
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.50 高さ量変化の推移

(正)



(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)



(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3.50 高さ量変化の推移

P2-375

(誤)

表 3.14(2) 物性試験結果一覧 コンクリート試験体 1 (砂岩)

試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)			自由水率 (%)			結合水率 (%)								
					平均	σ		平均	σ		平均	σ		平均	σ						
1-061	加熱試験	4ヶ月後	1段目温度 雰囲気湿度	66.8	65.4	1.0	36.6	32.9	2.6	1.5	1.5	0.0	3.3	3.4	0.1						
1-062				64.5			30.7			1.5			3.4								
1-063				64.8			31.5			-			-			-	-				
1-064		8ヶ月後		65.0	68.4	3.3	29.5	30.9	1.1	1.4	1.4	0.0	3.8	3.8	0.0						
1-065				72.8			32.2			1.4			3.7								
1-066				67.3			30.9			-			-			-	-	-	-		
1-067		16ヶ月後		70.1	66.4	2.9	34.6	32.4	1.8	1.3	1.3	0.0	4.2	4.2	0.0						
1-068				66.1			32.5			1.3			4.2								
1-069				63.1			30.1			-			-			-	-	-	-		
1-070		32ヶ月後		70.1	70.0	0.2	36.1	34.5	1.4	1.2	1.2	0.0	4.6	4.4	0.3						
1-071				69.8			34.8			1.1			4.1								
1-072				70.2			32.7			-			-			-	-	-	-	-	
1-073		16ヶ月後	75.3	72.9	1.9	33.1	32.7	0.8	1.8	1.8	0.0	4.7	4.7	0.1							
1-074			72.7			33.4			1.8			4.6									
1-075			70.6			31.5			-			-			-	-	-	-	-		
1-076		32ヶ月後	74.1	76.5	3.7	34.7	34.9	0.9	1.4	1.5	0.1	4.6	4.7	0.1							
1-077			81.8			33.8			1.6			4.8									
1-078			73.7			36.1			-			-			-	-	-	-	-		
1-127	20℃封緘 養生	材齢28日	-	46.8	46.1	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
1-128				45.1			-			-			-			-	-	-	-	-	
1-129				46.5			-			-			-			-	-	-	-	-	
1-130		照射試験 開始時	-	62.0	61.9	0.2	31.9	34.1	2.7	-	-	-	-	-	-						
1-131				61.6			37.9			-			-			-	-	-	-	-	
1-132				62.1			32.5			-			-			-	-	-	-	-	
1-133		4ヶ月後	-	66.1	61.8	3.4	37.1	35.2	1.8	4.5	4.3	0.3	3.8	3.6	0.2						
1-134				57.9			35.8			4.0			3.4								
1-135				61.3			32.7			-			-			-	-	-	-	-	
1-136		8ヶ月後	-	64.8	65.1	2.9	47.1	42.6	3.2	4.5	4.5	0.0	3.4	3.4	0.0						
1-137				61.8			40.2			4.5			3.4								
1-138				68.8			40.6			-			-			-	-	-	-	-	
1-139		16ヶ月後	-	65.6	66.2	1.0	28.7	34.3	4.4	4.4	4.4	0.0	3.5	3.5	0.0						
1-140				67.6			35.0			4.4			3.5								
1-141				65.4			39.3			-			-			-	-	-	-	-	
1-142		32ヶ月後	-	73.3	71.7	1.7	40.2	38.1	2.9	3.8	4.0	0.2	3.9	4.1	0.2						
1-143				69.4			33.9			4.2			4.3								
1-144				72.4			40.1			-			-			-	-	-	-	-	
1-145				予備																	
1-146		追加乾燥	1% 到達時	20℃ 60%	72.8	75.0	2.5	41.6	37.0	3.4	-	-	-	-	-	-					
1-147					73.6			33.6			-			-			-	-	-	-	-
1-148					78.5			35.8			-			-			-	-	-	-	-
1-149			1% 含水均質後		79.3	75.9	2.9	42.3	38.1	4.0	-	-	-	-	-	-					
1-150					76.2			39.3			-			-			-	-	-	-	
1-151	72.2				32.7			-			-			-			-	-	-	-	
1-152	1.5% 到達時		69.2		68.3	0.7	32.0	34.7	1.9	-	-	-	-	-	-						
1-153			67.5				36.4			-			-			-	-	-	-		
1-154			68.2				35.6			-			-			-	-	-	-	-	
1-155	1.5% 含水均質後		80.4		74.2	4.9	36.6	36.6	1.2	-	-	-	-	-	-						
1-156			73.8				38.0			-			-			-	-	-	-		
1-157			68.4				35.1			-			-			-	-	-	-	-	
1-158	1% 到達時		64.5	69.0	3.3	32.2	35.8	2.9	-	-	-	-	-	-							
1-159			72.2			39.2			-			-			-	-	-	-			
1-160			70.2			35.9			-			-			-	-	-	-	-		
1-161	1% 含水均質後		65.5	69.2	2.7	35.0	37.7	3.1	-	-	-	-	-	-							
1-162			70.6			42.0			-			-			-	-	-	-			
1-163			71.6			36.1			-			-			-	-	-	-	-		
1-164	1.5% 到達時		66.0	68.0	4.2	36.7	36.8	1.0	-	-	-	-	-	-							
1-165			73.9			38.1			-			-			-	-	-	-			
1-166			64.2			35.6			-			-			-	-	-	-	-		
1-167	1.5% 含水均質後		65.6	68.1	2.9	37.0	35.7	1.8	-	-	-	-	-	-							
1-168			66.4			33.2			-			-			-	-	-	-	-		
1-169			72.2			37.0			-			-			-	-	-	-	-	-	

(正)

表 3.14(2) 物性試験結果一覧 コンクリート試験体 1 (砂岩)

試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)			自由水率 (%)			結合水率 (%)		
					平均	σ		平均	σ		平均	σ		平均	σ
1-061	加熱試験	4ヶ月後	1段目温度 雰囲気湿度	66.8	65.4	1.0	36.6	32.9	2.6	1.5	1.5	0.0	3.3	3.4	0.1
1-062				64.5			30.7			1.5			3.4		
1-063				64.8			31.5			-			-		
1-064		8ヶ月後		65.0	68.4	3.3	29.5	30.9	1.1	1.4	1.4	0.0	3.8	3.8	0.0
1-065				72.8			32.2			1.4			3.7		
1-066				67.3			30.9			-			-		
1-067		16ヶ月後		70.1	66.4	2.9	34.6	32.4	1.8	1.3	1.3	0.0	4.2	4.2	0.0
1-068				66.1			32.5			1.3			4.2		
1-069				63.1			30.1			-			-		
1-070		32ヶ月後		70.1	70.0	0.2	36.1	34.5	1.4	1.2	1.2	0.0	4.6	4.4	0.3
1-071				69.8			34.8			1.1			4.1		
1-072				70.2			32.7			-			-		
1-073		16ヶ月後	4段目温度 雰囲気湿度	75.3	72.9	1.9	33.1	32.7	0.8	1.8	1.8	0.0	4.7	4.7	0.1
1-074				72.7			33.4			1.8			4.6		
1-075				70.6			31.5			-			-		
1-076		32ヶ月後		74.1	76.5	3.7	34.7	34.9	0.9	1.4	1.5	0.1	4.6	4.7	0.1
1-077				81.8			33.8			1.6			4.8		
1-078				73.7			36.1			-			-		
1-127	20℃封緘 養生	材齢28日		-	46.1	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1-128				45.1			-			-			-		
1-129				46.5			-			-			-		
1-130		照射試験 開始時		-	61.9	0.2	31.9	34.1	2.7	-	-	-	-	-	-
1-131				61.6			37.9			-			-		
1-132				62.1			32.5			-			-		
1-133		4ヶ月後	-	61.8	3.4	37.1	35.2	1.8	4.5	4.3	0.3	3.8	3.6	0.2	
1-134			57.9			35.8			4.0			3.4			
1-135			61.3			32.7			-			-			-
1-136		8ヶ月後	-	65.1	2.9	47.1	42.6	3.2	4.5	4.5	0.0	3.4	3.4	0.0	
1-137			61.8			40.2			4.5			3.4			
1-138			68.8			40.6			-			-			-
1-139		16ヶ月後	-	66.2	1.0	28.7	34.3	4.4	4.4	4.4	0.0	3.5	3.5	0.0	
1-140			67.6			35.0			4.4			3.5			
1-141			65.4			39.3			-			-			-
1-142		32ヶ月後	-	68.8	2.6	37.1	38.0	1.3	4.7	4.8	0.0	4.5	4.6	0.0	
1-143			72.4			39.8			4.8			4.6			
1-144			67.0			37.0			-			-			-
1-145	予備														
1-146	追加乾燥	1% 到達時	20℃ 60%	72.8	75.0	2.5	41.6	37.0	3.4	-	-	-	-	-	-
1-147				73.6			33.6			-			-		
1-148				78.5			35.8			-			-		
1-149		1% 含水均質後		79.3	75.9	2.9	42.3	38.1	4.0	-	-	-	-	-	-
1-150				76.2			39.3			-			-		
1-151				72.2			32.7			-			-		
1-152		1.5% 到達時		69.2	68.3	0.7	32.0	34.7	1.9	-	-	-	-	-	-
1-153				67.5			36.4			-			-		
1-154				68.2			35.6			-			-		
1-155		1.5% 含水均質後		80.4	74.2	4.9	36.6	36.6	1.2	-	-	-	-	-	-
1-156				73.8			38.0			-			-		
1-157				68.4			35.1			-			-		
1-158		1% 到達時	40℃ 60%	64.5	69.0	3.3	32.2	35.8	2.9	-	-	-	-	-	-
1-159				72.2			39.2			-			-		
1-160				70.2			35.9			-			-		
1-161		1% 含水均質後		65.5	69.2	2.7	35.0	37.7	3.1	-	-	-	-	-	-
1-162				70.6			42.0			-			-		
1-163				71.6			36.1			-			-		
1-164		1.5% 到達時		66.0	68.0	4.2	36.7	36.8	1.0	-	-	-	-	-	-
1-165				73.9			38.1			-			-		
1-166				64.2			35.6			-			-		
1-167		1.5% 含水均質後		65.6	68.1	2.9	37.0	35.7	1.8	-	-	-	-	-	-
1-168				66.4			33.2			-			-		
1-169				72.2			37.0			-			-		

P2-377

(誤)

表 3.15(2) 物性試験結果一覧 コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)			自由水率 (%)			結合水率 (%)			
					平均	σ		平均	σ		平均	σ		平均	σ	
2-061	加熱試験	4ヶ月後	1段目温度 雰囲気湿度	63.4	66.7	2.4	29.9	32.3	3.0	1.3	1.4	0.0	3.2	3.3	0.1	
2-062				68.0			36.6			1.4			3.4			
2-063				68.7			30.5			-			-			-
2-064		8ヶ月後		68.7	69.5	1.0	33.7	33.0	0.9	1.3	1.4	0.0	3.2	3.3	0.1	
2-065				69.0			31.8			1.4			3.4			
2-066				70.9			33.6			-			-			-
2-067		16ヶ月後		71.2	71.3	1.1	36.2	35.4	1.5	1.3	1.3	0.1	4.0	4.0	0.1	
2-068				70.0			33.3			1.2			3.9			
2-069				72.8			36.7			-			-			-
2-070		32ヶ月後		85.6	83.3	3.3	38.6	39.2	0.4	1.1	1.1	0.1	3.9	3.8	0.1	
2-071				85.7			39.2			1			3.7			
2-072				78.7			39.7			-			-			-
2-073		16ヶ月後	72.7	75.4	1.9	35.6	37.3	1.2	1.7	1.8	0.1	4.2	4.3	0.1		
2-074			77.3			37.9			1.8			4.4				
2-075			76.1			38.3			-			-			-	-
2-076		32ヶ月後	77.6	79.7	1.5	37.5	37.5	0.0	1.5	1.6	0.1	4.6	4.5	0.1		
2-077			81.0			37.5			1.6			4.4				
2-078			80.4			37.4			-			-			-	-
2-127		20℃封緘 養生	材齢28日	-	50.4	54.1	3.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-128				58.3	-			-			-					
2-129				53.5	-			-			-					
2-130			照射試験 開始時	-	69.5	69.3	0.4	34.3	36.2	1.5	-	-	-	-	-	-
2-131				68.7	36.5			-			-					
2-132				69.7	37.9			-			-					
2-133	4ヶ月後		-	68.8	67.0	1.5	40.9	39.3	2.0	4.1	4.1	0.0	3.1	3.2	0.1	
2-134			66.9	36.4			4.1			3.2						
2-135			65.2	40.5			-			-			-			-
2-136	8ヶ月後		-	74.0	73.4	0.8	38.9	38.6	0.6	4.4	4.4	0.0	3.0	3.1	0.1	
2-137			72.3	37.8			4.4			3.1						
2-138			74.0	39.1			-			-			-			-
2-139	16ヶ月後		-	73.8	69.0	3.8	41.2	39.5	1.2	4.2	4.2	0.1	3.0	3.1	0.1	
2-140			64.5	38.4			4.1			3.2						
2-141			68.6	38.9			-			-			-			-
2-142	32ヶ月後		-	66.9	68.8	2.6	37.1	38.0	1.3	4.7	4.8	0.0	4.5	4.6	0.0	
2-143			72.4	39.8			4.8			4.6						
2-144			67.0	37.0			-			-			-			-
2-145	予備															
2-146	追加乾燥		1% 到達時	20℃ 60%	79.2	76.6	2.7	39.6	37.9	1.3	-	-	-	-	-	-
2-147					72.8			37.6			-			-		
2-148					77.8			36.4			-			-		
2-149			1% 含水均質後		75.5	72.4	3.1	41.5	40.0	1.9	-	-	-	-	-	-
2-150					73.4			37.3			-			-		
2-151		68.2			41.1			-			-					
2-152		1.5% 到達時	82.5		78.5	3.1	32.8	36.8	2.8	-	-	-	-	-	-	
2-153			78.1				39.1			-			-			
2-154			75.0				38.5			-			-			
2-155		1.5% 含水均質後	78.3		75.5	2.1	35.4	36.1	0.7	-	-	-	-	-	-	
2-156			75.0				37.0			-			-			
2-157			73.3				35.8			-			-			
2-158		1% 到達時	40℃ 60%	77.6	73.7	2.9	36.7	36.0	0.8	-	-	-	-	-	-	
2-159				70.8			36.4			-			-			
2-160				72.7			34.8			-			-			
2-161		1% 含水均質後		72.7	74.6	2.6	45.0	41.5	2.5	-	-	-	-	-	-	
2-162				78.3			39.9			-			-			
2-163				72.7			39.6			-			-			
2-164		1.5% 到達時		72.6	72.2	2.3	37.5	40.4	2.7	-	-	-	-	-	-	
2-165				74.7			39.6			-			-			
2-166				69.2			44.0			-			-			
2-167		1.5% 含水均質後		68.1	69.8	2.6	41.9	37.5	3.2	-	-	-	-	-	-	
2-168				73.5			35.8			-			-			
2-169				67.8			34.7			-			-			

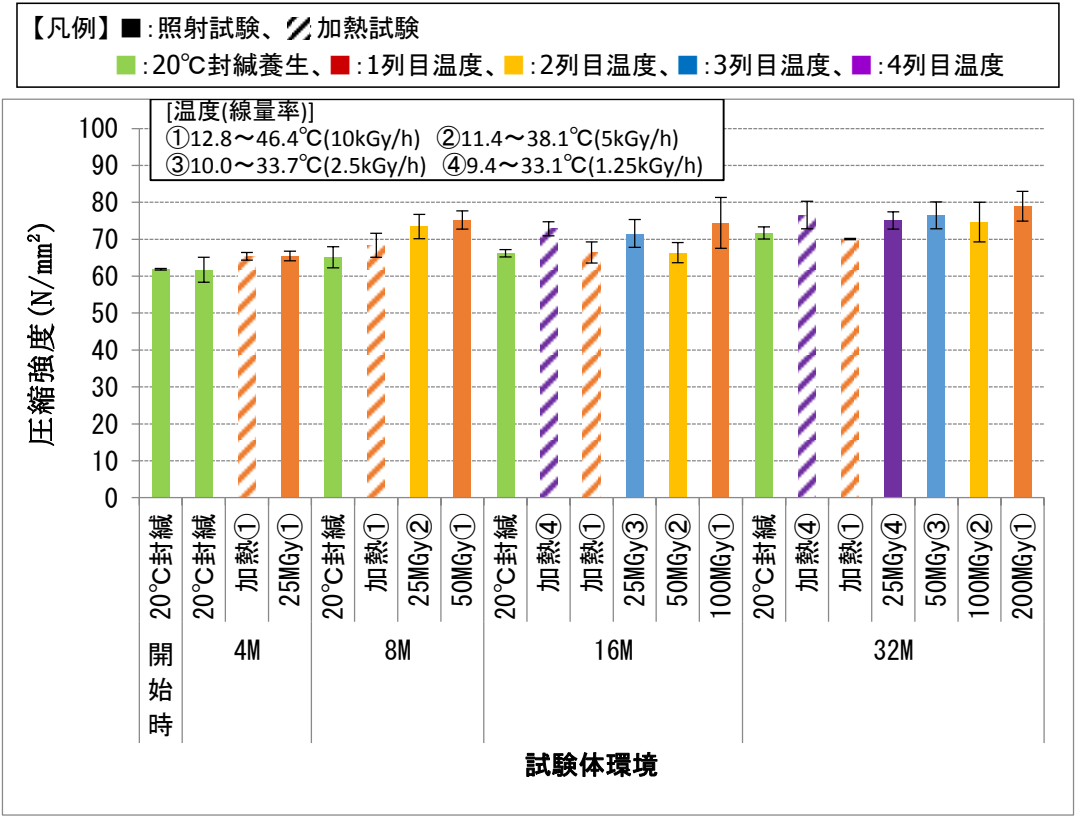
(正)

表 3.15(2) 物性試験結果一覧 コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

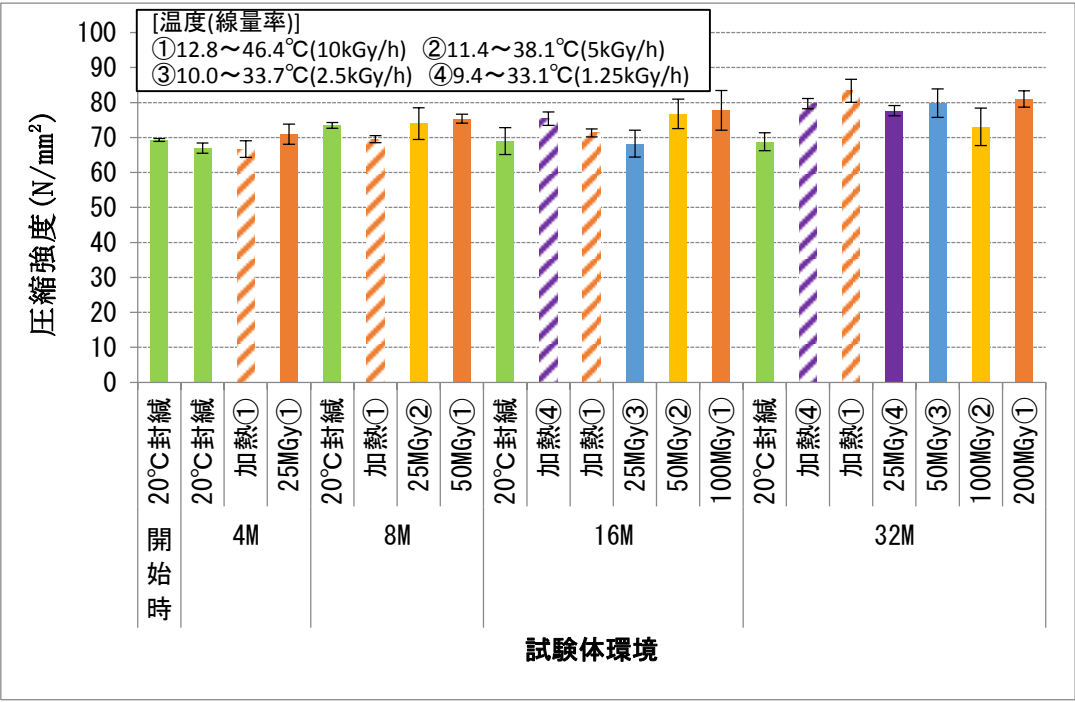
試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)			自由水率 (%)			結合水率 (%)							
					平均	σ		平均	σ		平均	σ		平均	σ					
2-061	加熱試験	4ヶ月後	1段目温度 雰囲気湿度	63.4	66.7	2.4	29.9	32.3	3.0	1.3	1.4	0.0	3.2	3.3	0.1					
2-062				68.0			36.6			1.4			3.4							
2-063				68.7			30.5			-			-			-	-	-		
2-064		8ヶ月後		68.7	69.5	1.0	33.7	33.0	0.9	1.3	1.4	0.0	3.2	3.3	0.1					
2-065				69.0			31.8			1.4			3.4							
2-066				70.9			33.6			-			-			-	-	-		
2-067		16ヶ月後		71.2	71.3	1.1	36.2	35.4	1.5	1.3	1.3	0.1	4.0	4.0	0.1					
2-068				70.0			33.3			1.2			3.9							
2-069				72.8			36.7			-	-	-	-	-	-	-				
2-070				32ヶ月後			85.6			83.3	3.3	38.6	39.2	0.4	1.1	1.1	0.1	3.9	3.8	0.1
2-071		85.7			39.2	1	3.7													
2-072		78.7			39.7	-	-	-	-			-			-	-				
2-073		16ヶ月後	72.7	75.4	1.9	35.6	37.3	1.2	1.7	1.8	0.1	4.2	4.3	0.1						
2-074			77.3			37.9			1.8			4.4								
2-075			4段目温度 雰囲気湿度			76.1			79.7	1.5	38.3	37.5	0.0	-	-	-	-	-	-	
2-076		77.6		37.5	1.5	1.6	4.6	4.5			0.1									
2-077		81.0		37.5	1.6	4.4														
2-078		80.4		37.4	-	-	-	-			-			-	-					
2-127		20℃封緘 養生		材齢28日	-	50.4	54.1	3.2			-			-	-	-	-	-	-	-
2-128					58.3	-					-					-		-		
2-129	53.5		-		-	-			-	-	-	-								
2-130	照射試験 開始時		-	69.5	69.3	0.4	34.3	36.2	1.5	-	-	-	-	-						
2-131			68.7	36.5			-			-		-			-	-				
2-132			69.7	37.9			-			-		-			-	-				
2-133	4ヶ月後		-	68.8	67.0	1.5	40.9	39.3	2.0	4.1	4.1	0.0	3.1	3.2	0.1					
2-134			66.9	36.4			4.1			3.2										
2-135			65.2	40.5			-			-	-	-	-	-						
2-136	8ヶ月後		-	74.0	73.4	0.8	38.9	38.6	0.6	4.4	4.4	0.0	3.0	3.1	0.1					
2-137			72.3	37.8			4.4			3.1										
2-138			74.0	39.1			-			-	-	-	-	-						
2-139	16ヶ月後		-	73.8	69.0	3.8	41.2	39.5	1.2	4.2	4.2	0.1	3.0	3.1	0.1					
2-140			64.5	38.4			4.1			3.2										
2-141			68.6	38.9			-			-	-	-	-	-						
2-142	32ヶ月後		-	73.3	71.7	1.7	40.2	38.1	2.9	3.8	4.0	0.2	3.9	4.1	0.2					
2-143			69.4	33.9			4.2			4.3										
2-144			72.4	40.1			-			-	-	-	-	-	-					
2-145	予備																			
2-146	追加乾燥	1% 到達時	20℃ 60%	79.2	76.6	2.7	39.6	37.9	1.3	-	-	-	-	-	-					
2-147				72.8			37.6			-			-			-	-	-		
2-148				77.8			36.4			-			-			-	-	-		
2-149		1% 含水均質後		75.5	72.4	3.1	41.5	40.0	1.9	-	-	-	-	-	-					
2-150				73.4			37.3			-			-			-	-	-		
2-151				68.2			41.1			-			-			-	-	-		
2-152		1.5% 到達時		82.5	78.5	3.1	32.8	36.8	2.8	-	-	-	-	-	-					
2-153				78.1			39.1			-			-			-	-	-		
2-154				75.0			38.5			-			-			-	-	-		
2-155		1.5% 含水均質後		78.3	75.5	2.1	35.4	36.1	0.7	-	-	-	-	-	-					
2-156				75.0			37.0			-			-			-	-	-		
2-157				73.3			35.8			-			-			-	-	-		
2-158		1% 到達時	77.6	73.7	2.9	36.7	36.0	0.8	-	-	-	-	-	-						
2-159			70.8			36.4			-			-			-	-	-			
2-160			72.7			34.8			-			-			-	-	-			
2-161		1% 含水均質後	72.7	74.6	2.6	45.0	41.5	2.5	-	-	-	-	-	-						
2-162			78.3			39.9			-			-			-	-	-			
2-163			72.7			39.6			-			-			-	-	-			
2-164		1.5% 到達時	72.6	72.2	2.3	37.5	40.4	2.7	-	-	-	-	-	-						
2-165			74.7			39.6			-			-			-	-	-			
2-166			69.2			44.0			-			-			-	-	-			
2-167		1.5% 含水均質後	68.1	69.8	2.6	41.9	37.5	3.2	-	-	-	-	-	-						
2-168			73.5			35.8			-			-			-	-	-			
2-169			67.8			34.7			-			-			-	-	-			

P2-378

(誤)



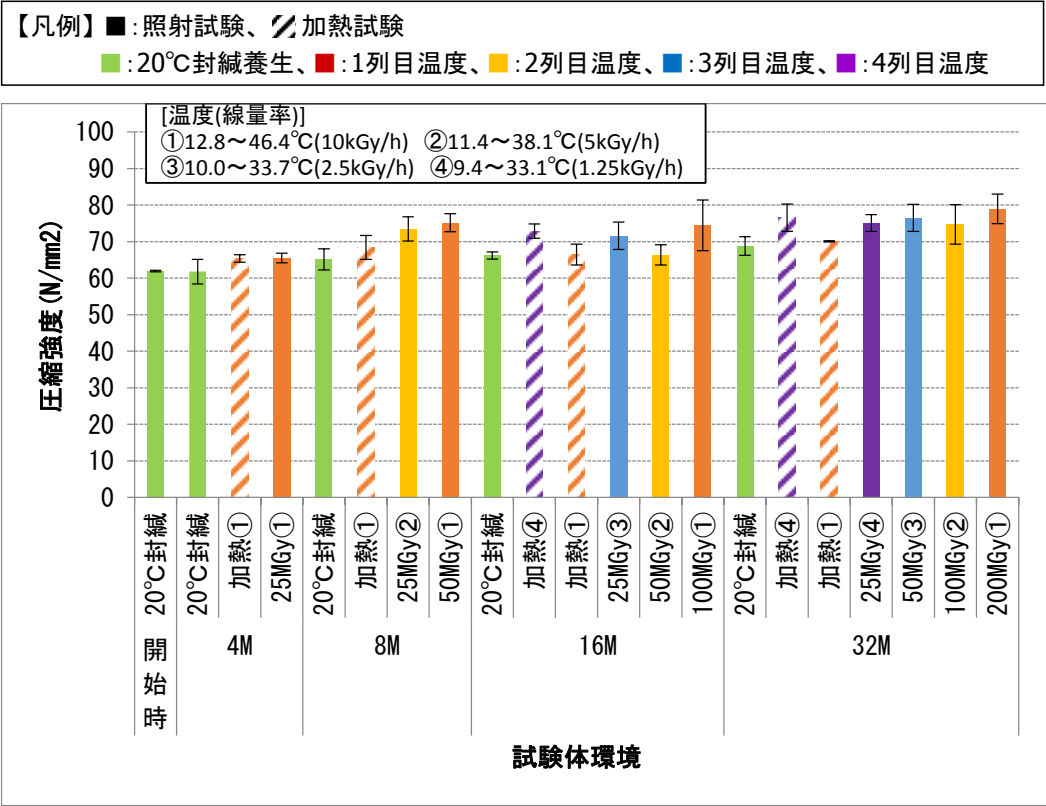
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



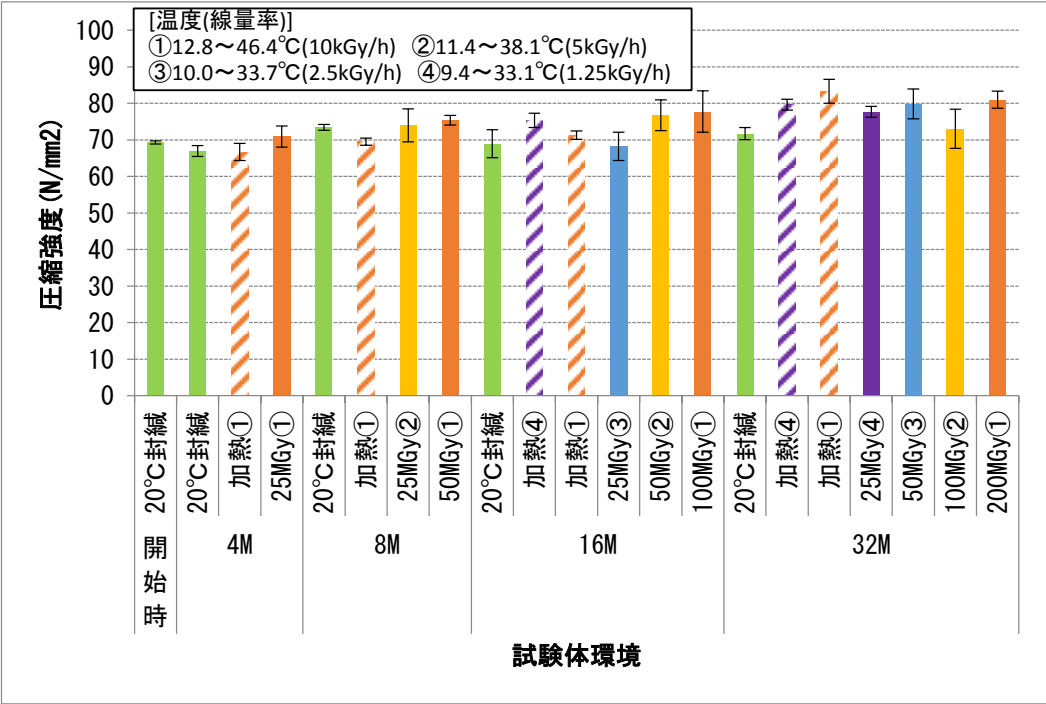
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.51 圧縮強度の比較

(正)



(a) コンクリート試験体 1(砂岩)

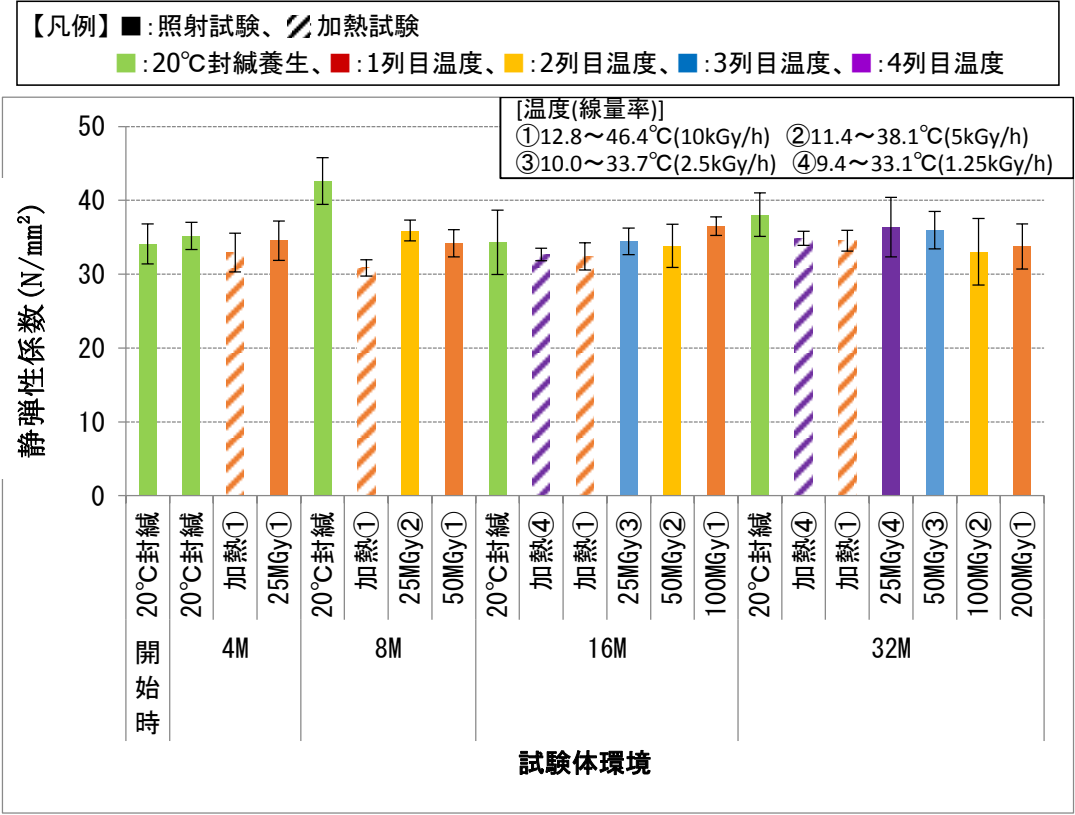


(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

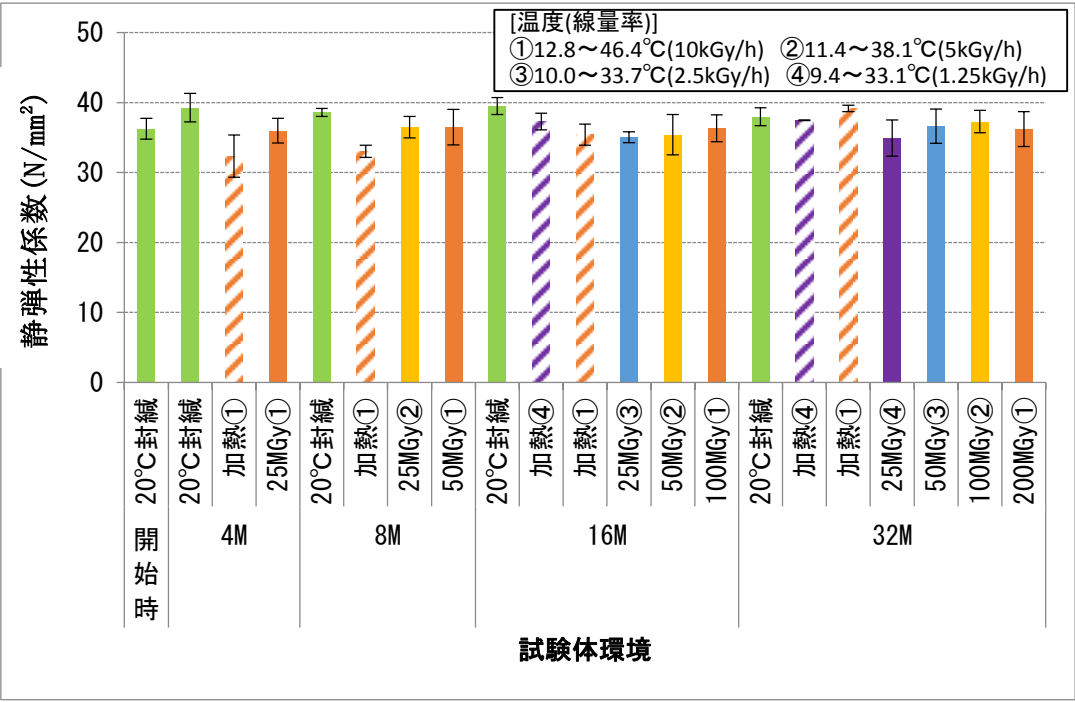
図 3.51 圧縮強度の比較

P2-379

(誤)



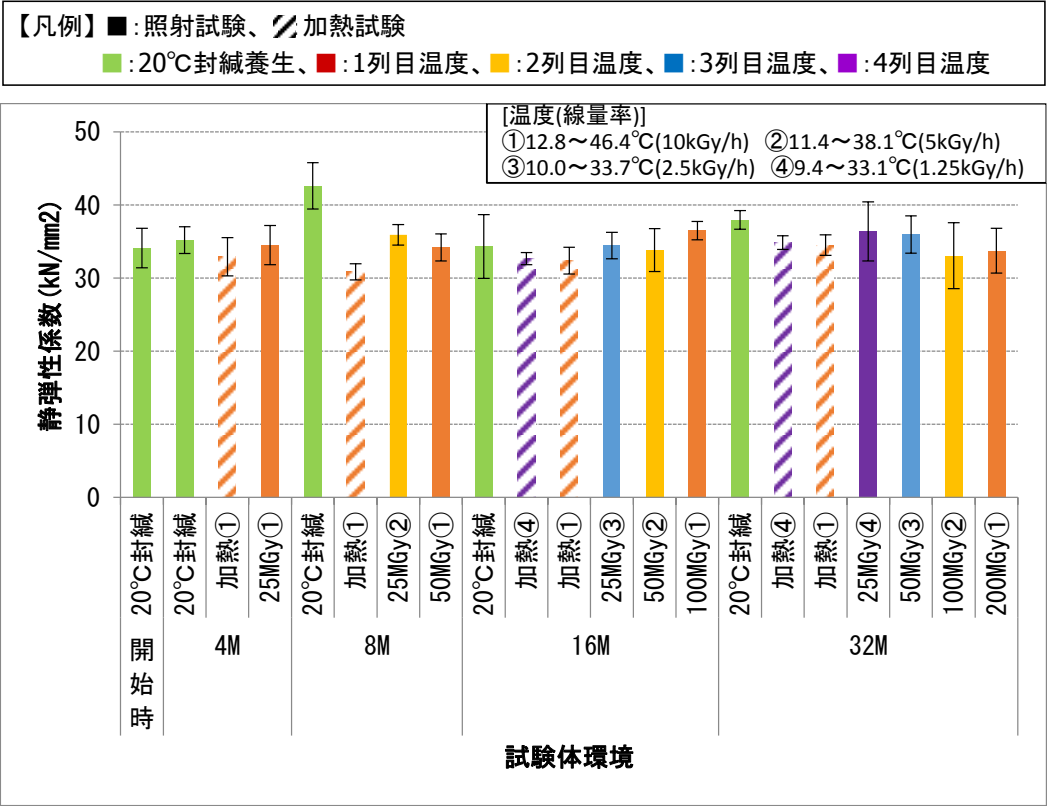
(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)



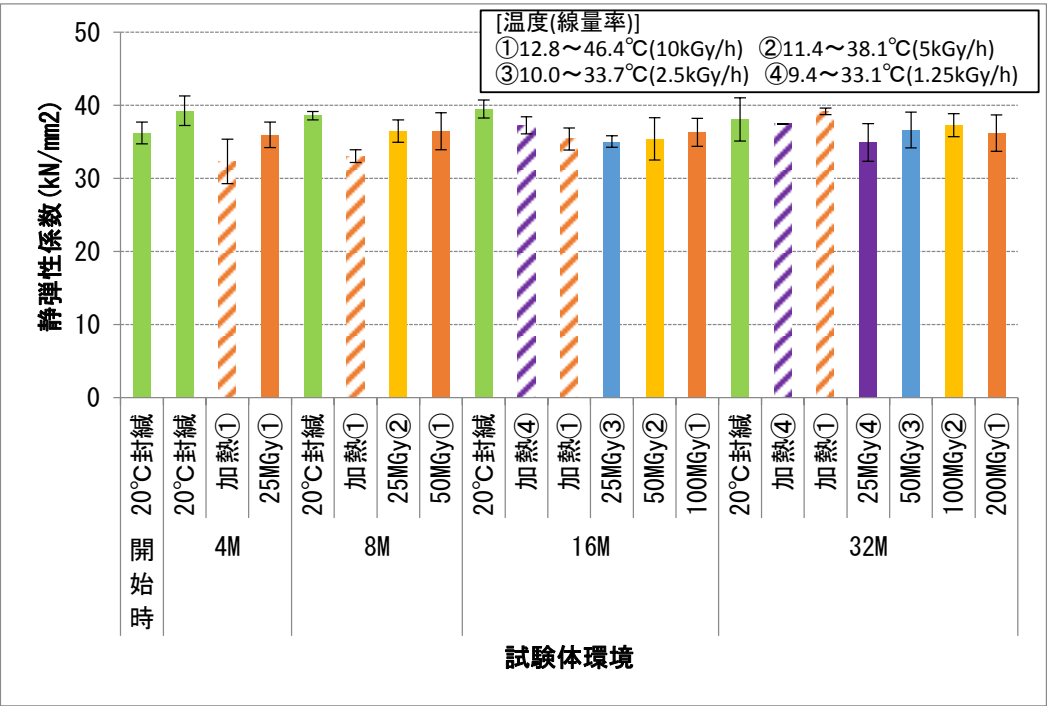
(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3.52 静弾性係数の比較

(正)



(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)

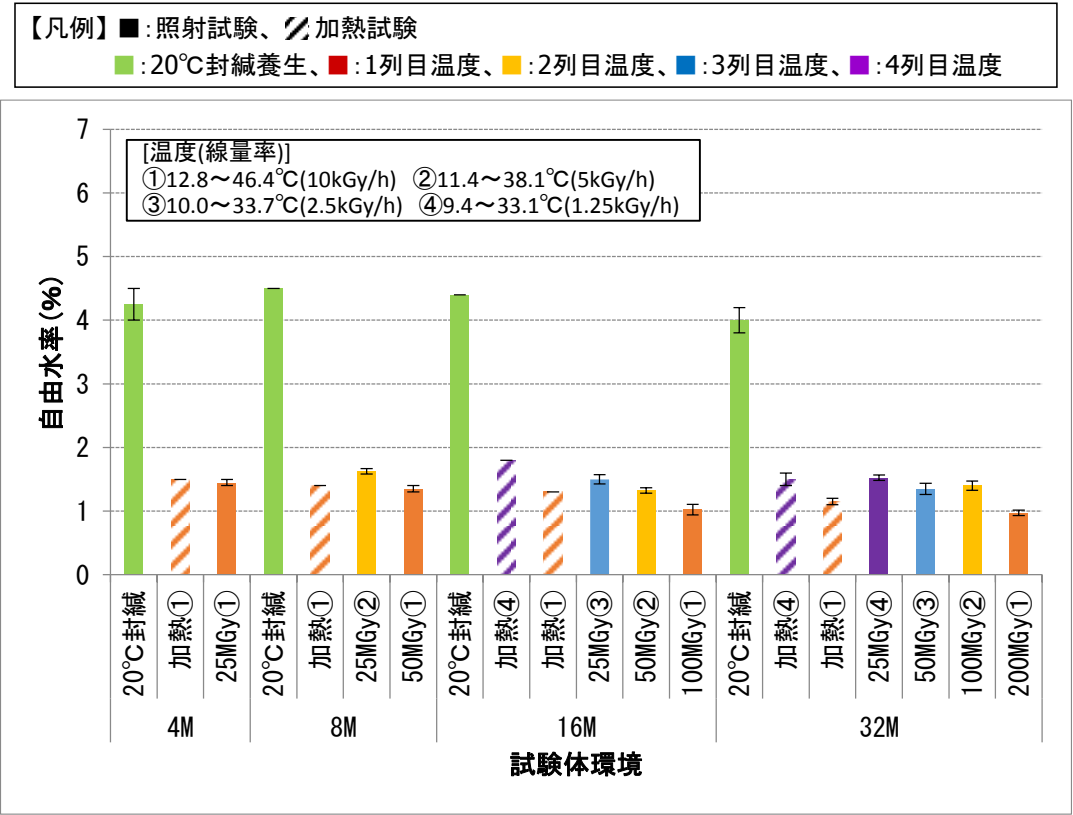


(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

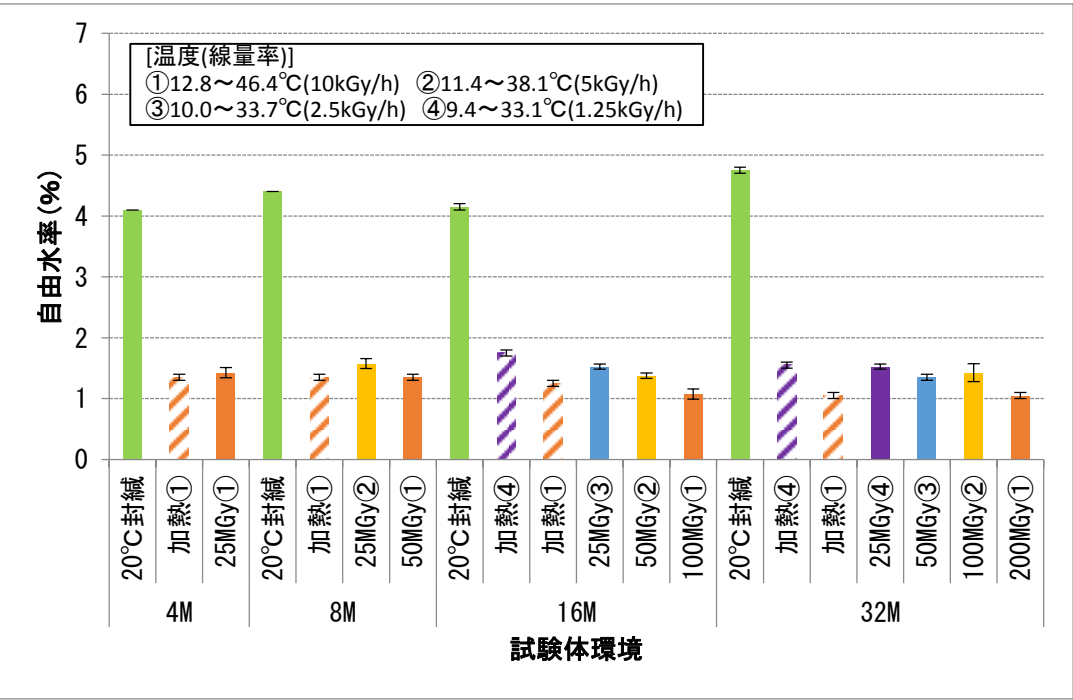
図 3.52 静弾性係数の比較

P2-380

(誤)



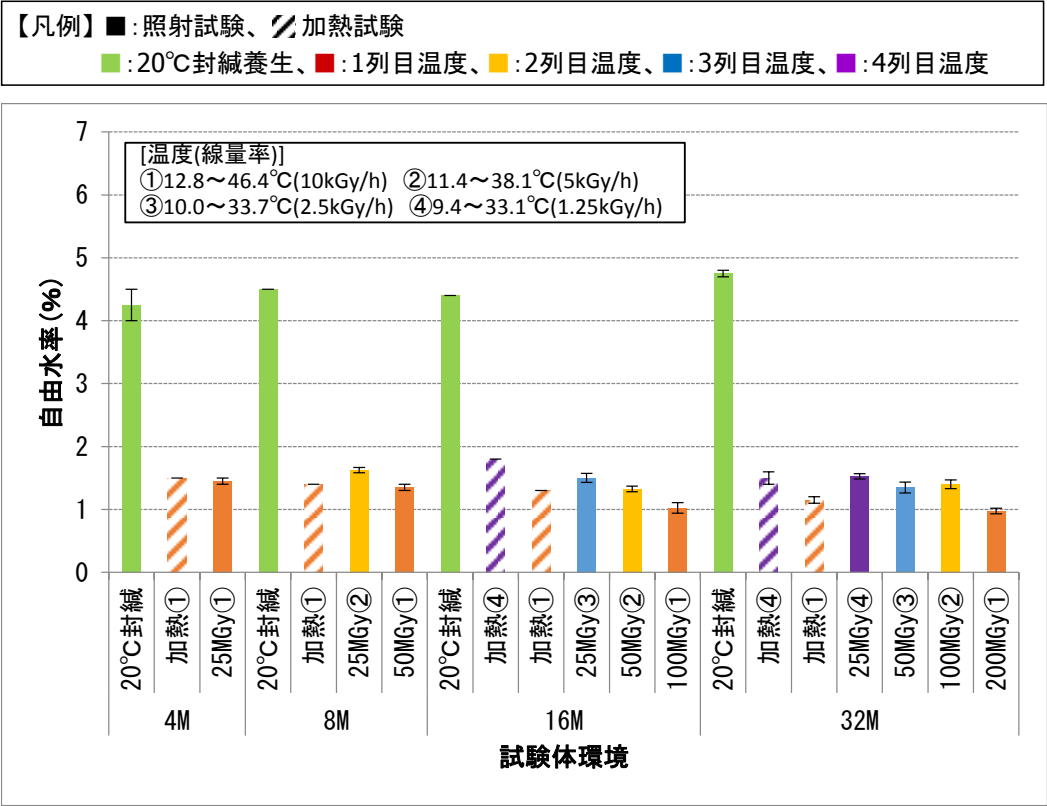
(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)



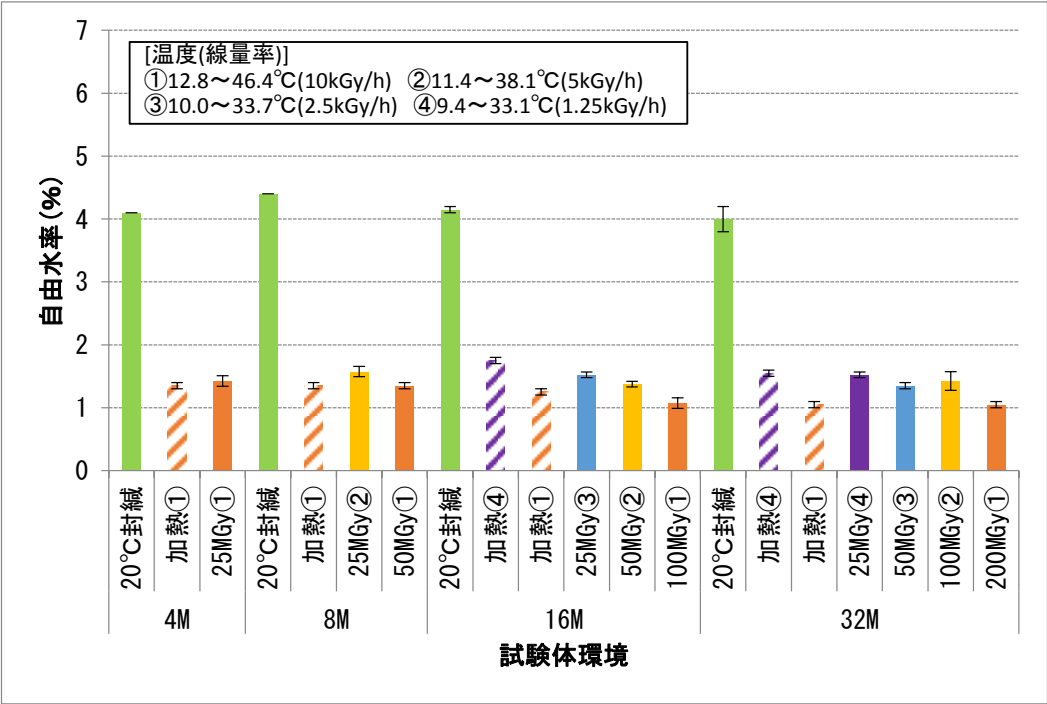
(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3.53 自由水率の比較

(正)



(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)

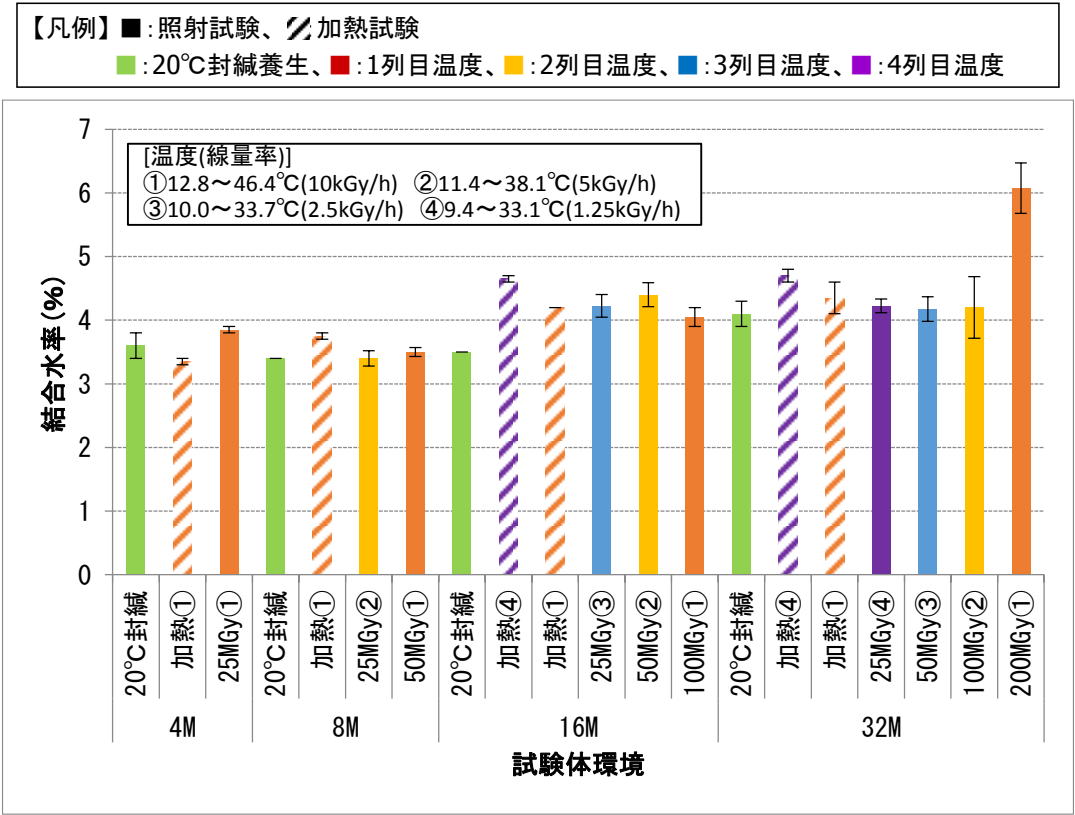


(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

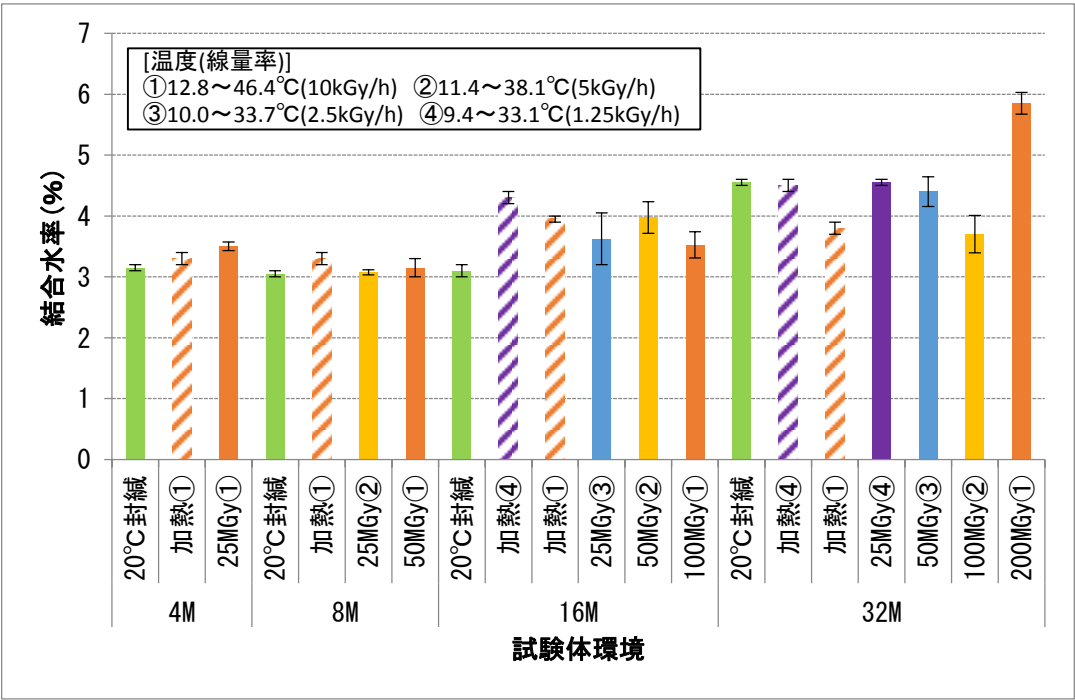
図 3.53 自由水率の比較

P2-381

(誤)



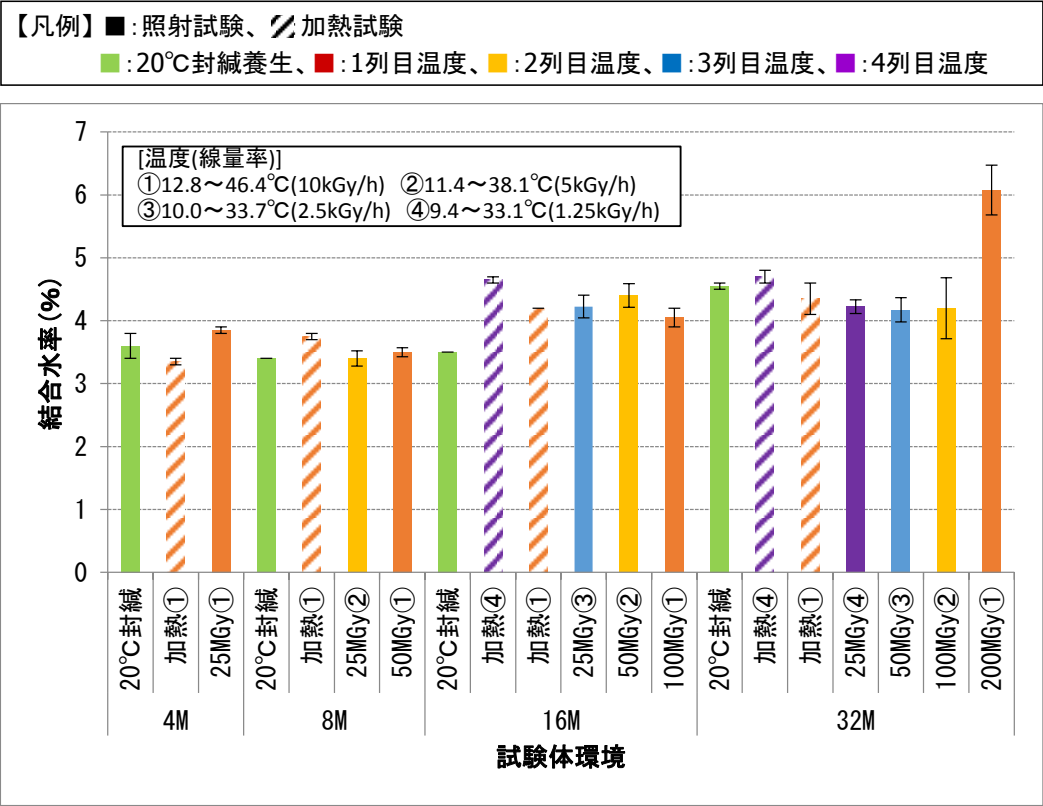
(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)



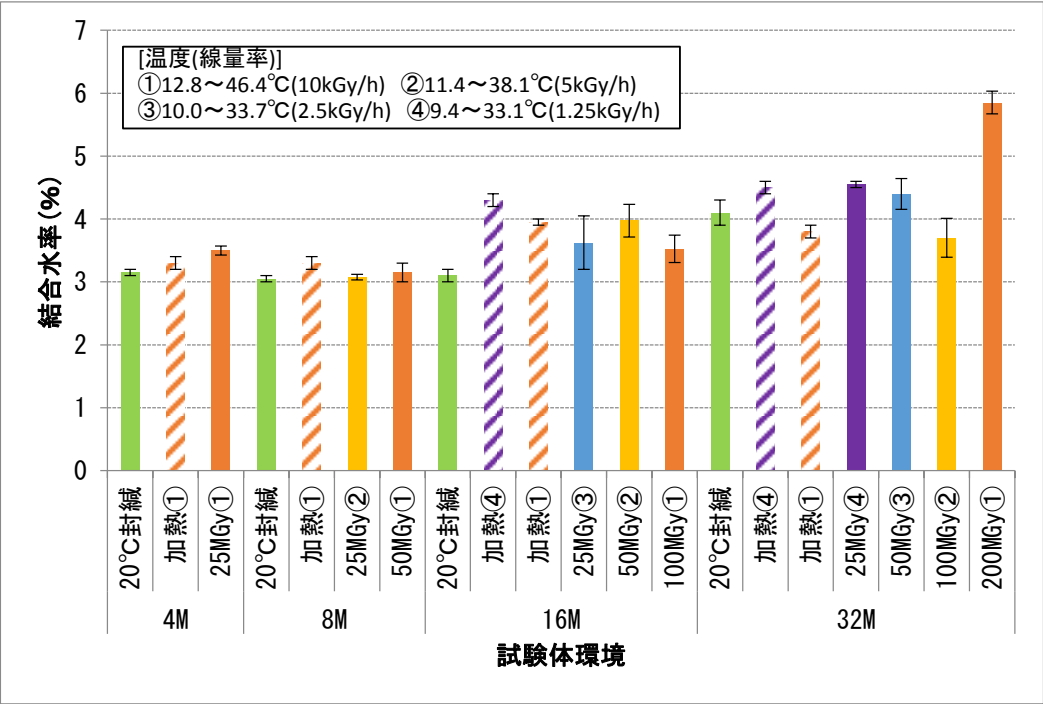
(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3.54 結合水率の比較

(正)



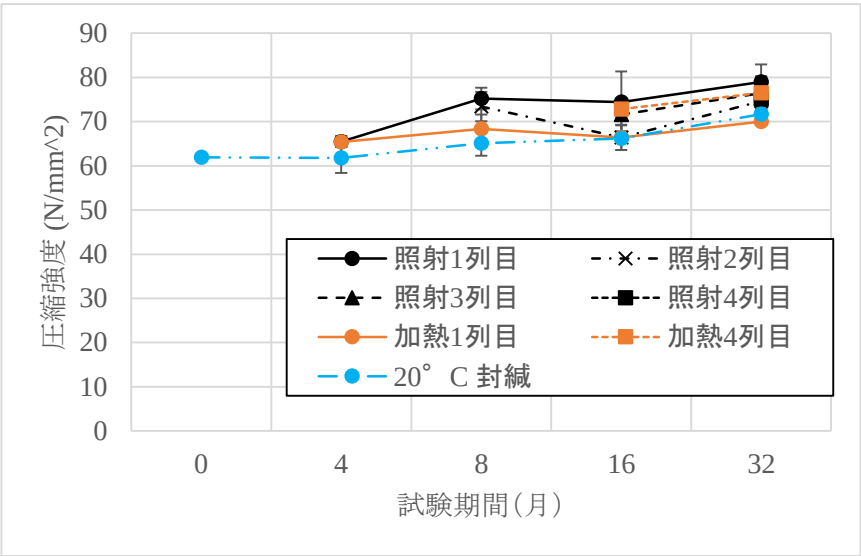
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



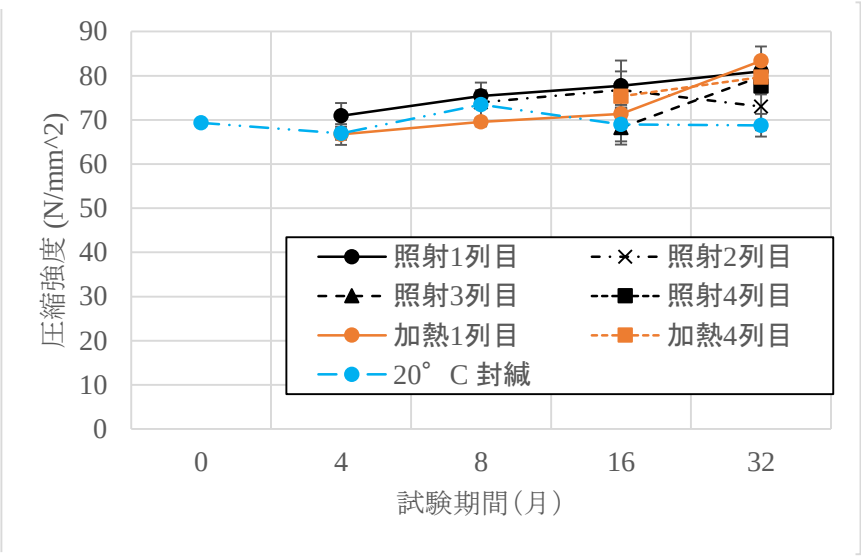
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.54 結合水率の比較

P2-382
(誤)



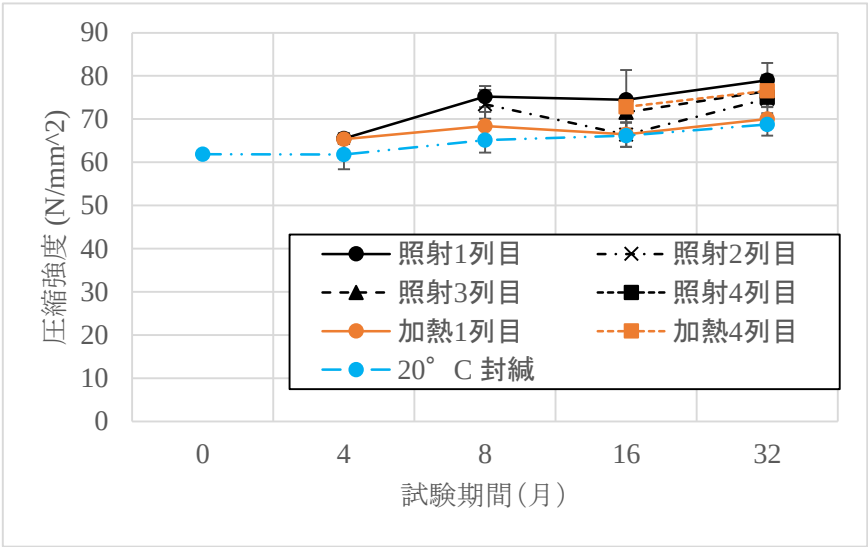
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



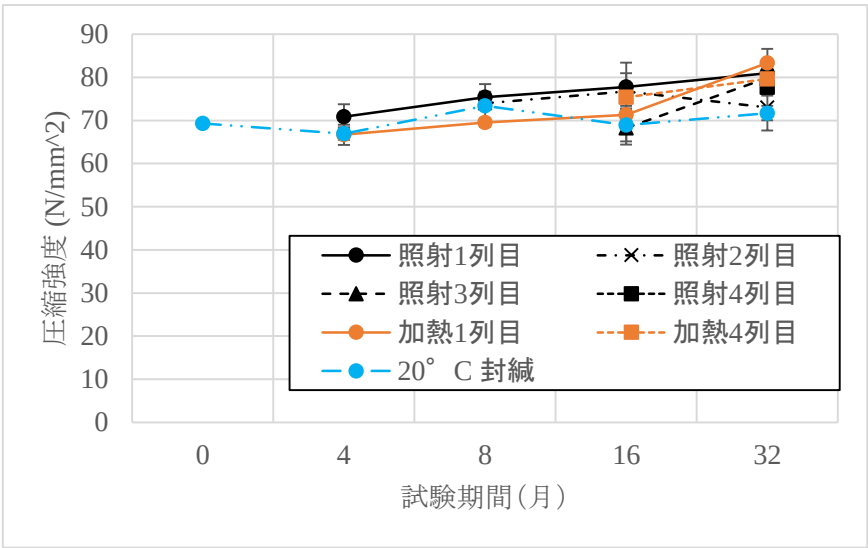
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.55 圧縮強度の推移

(正)



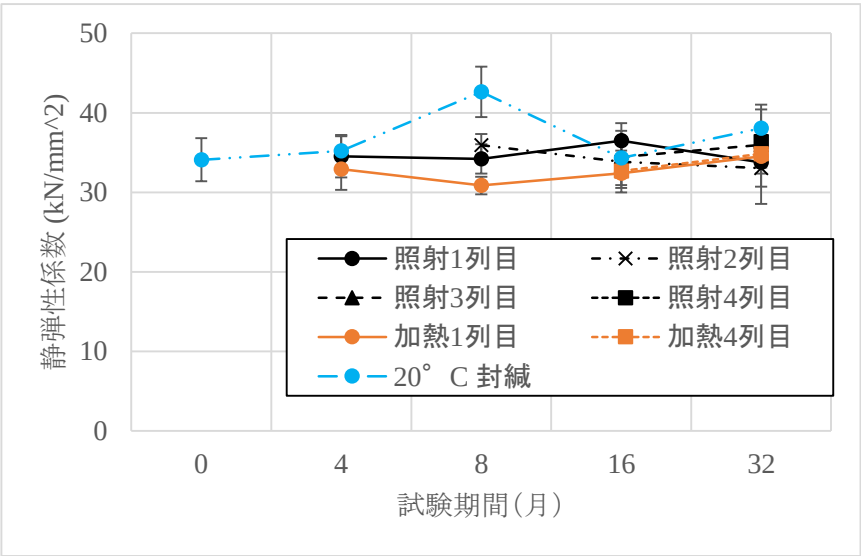
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



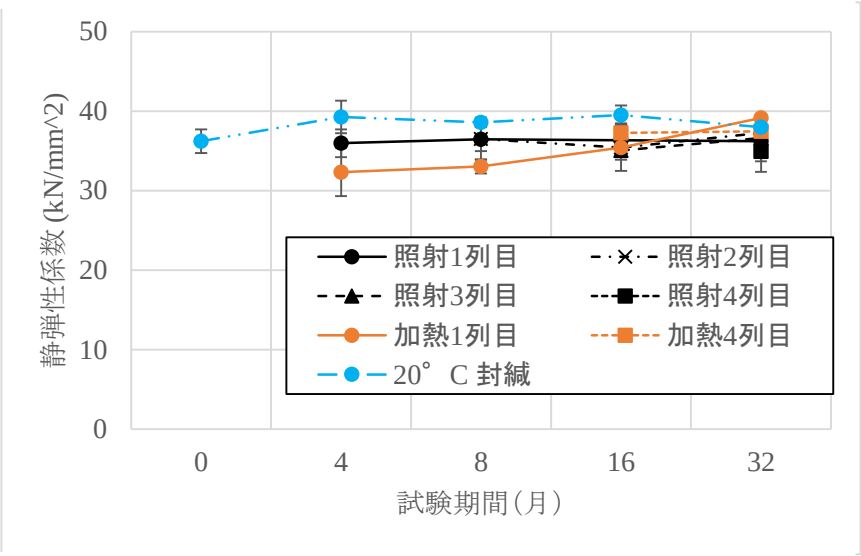
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.55 圧縮強度の推移

P2-383
(誤)



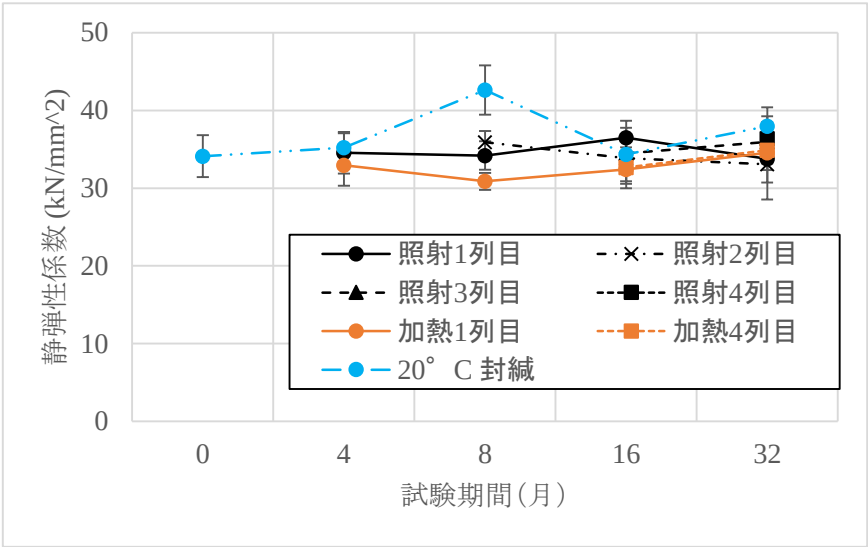
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



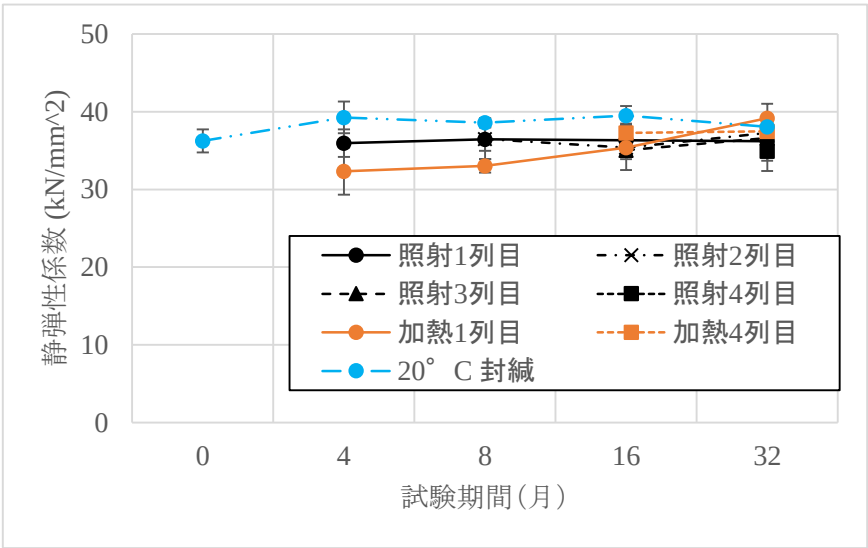
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.56 静弾性係数の推移

(正)



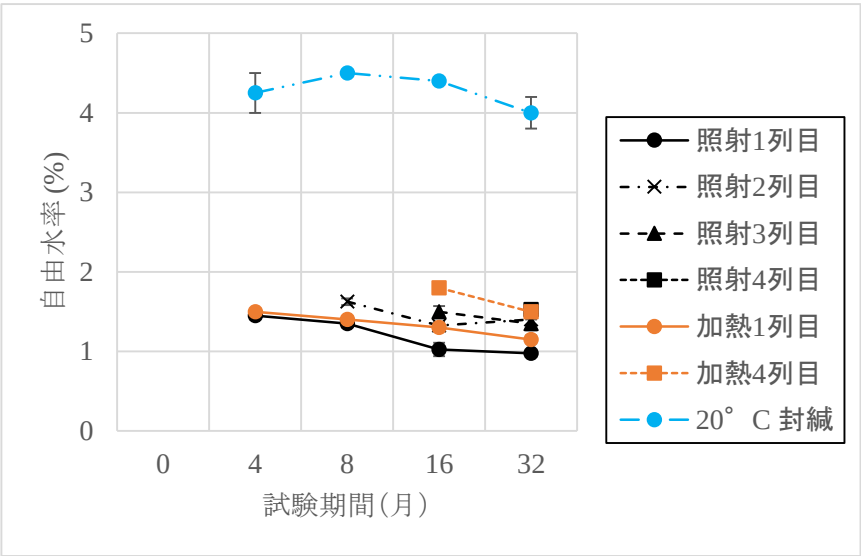
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



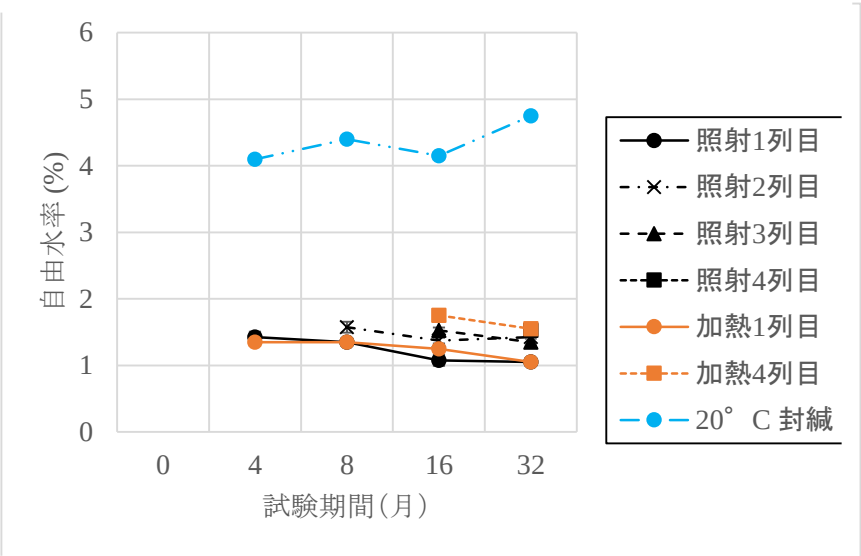
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.56 静弾性係数の推移

P2-384
(誤)



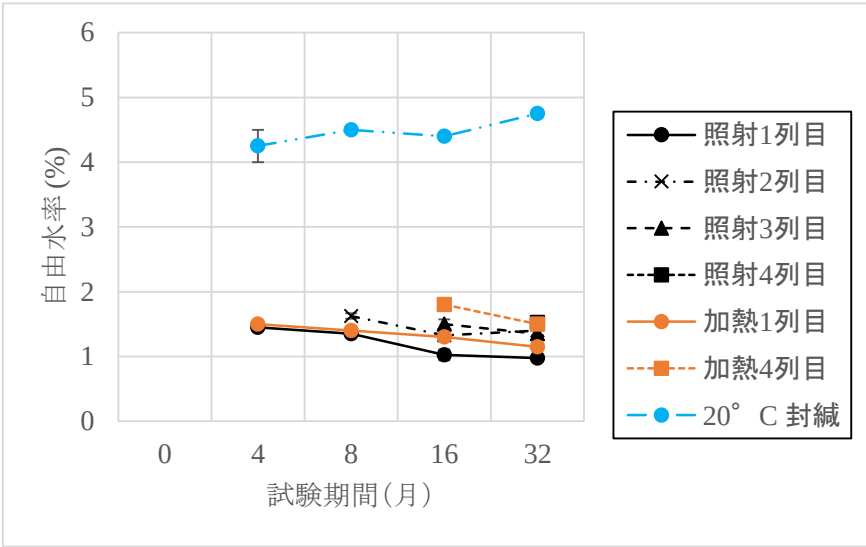
(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)



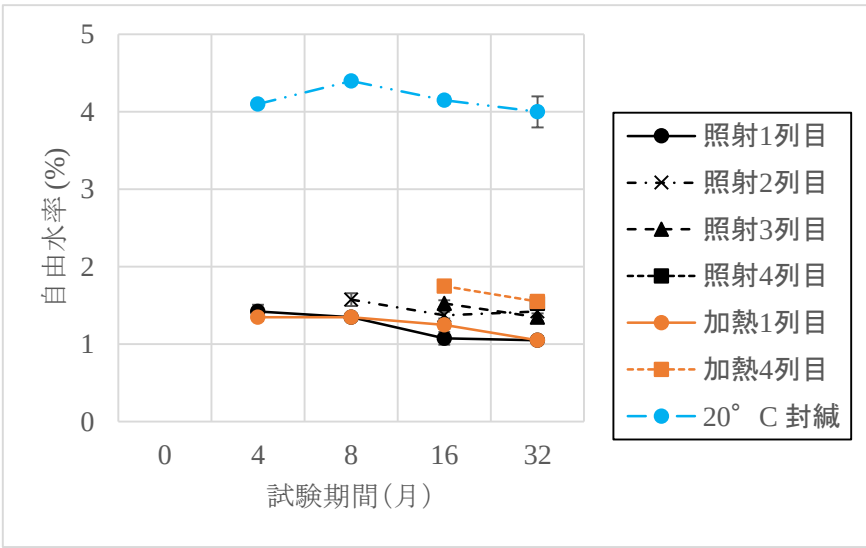
(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3.57 自由水率の推移

(正)



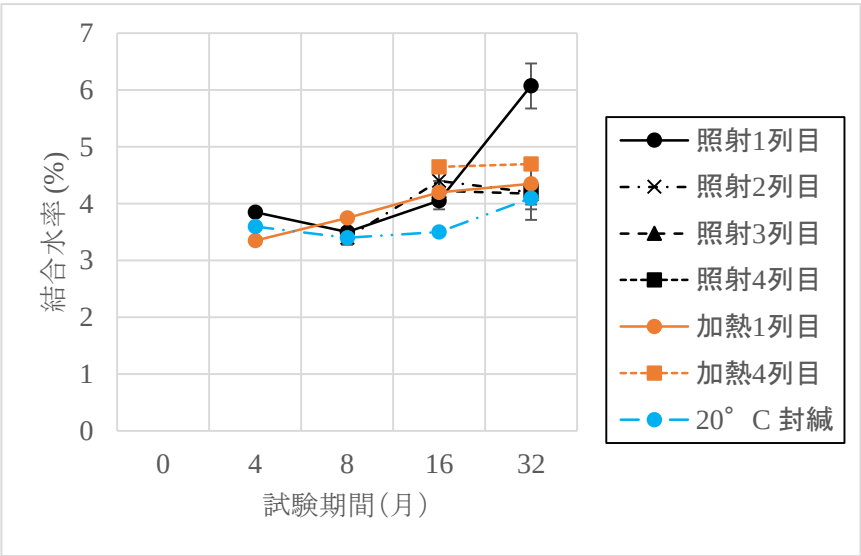
(a) コンクリート試験体 1 (砂岩)



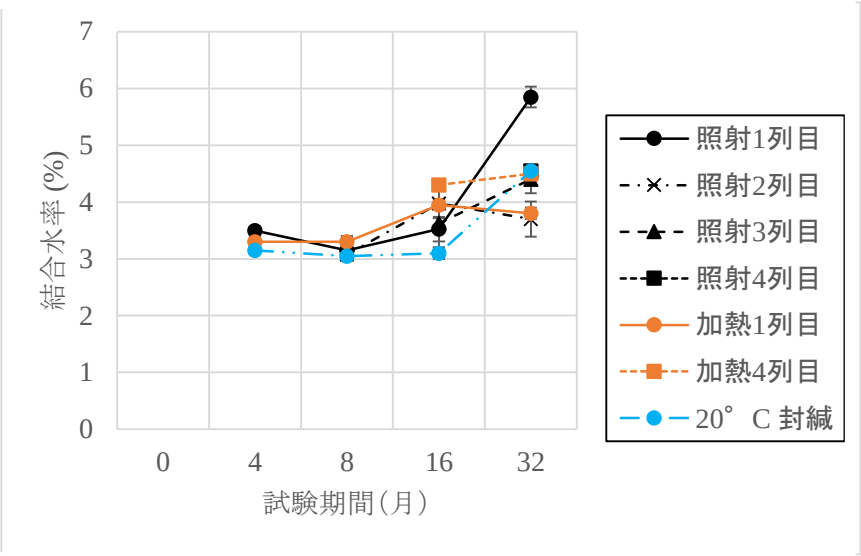
(b) コンクリート試験体 2 (凝灰岩)

図 3.57 自由水率の推移

P2-385
(誤)



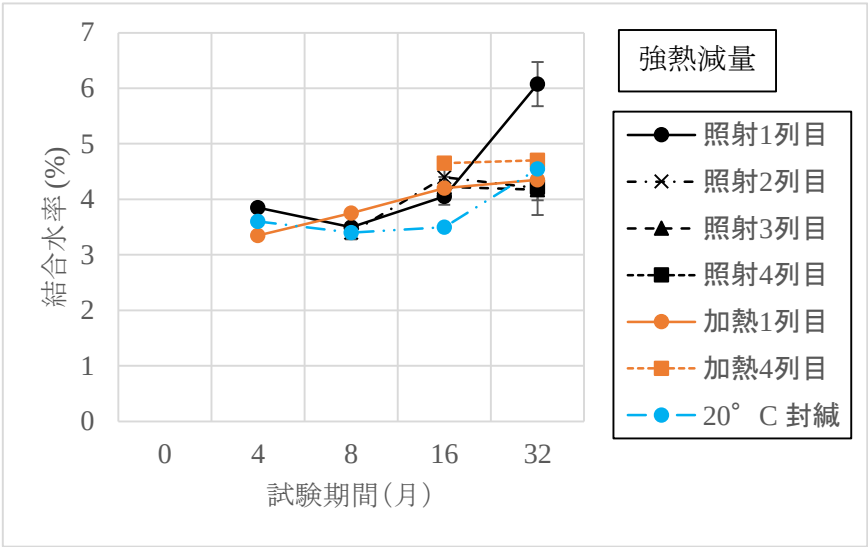
(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



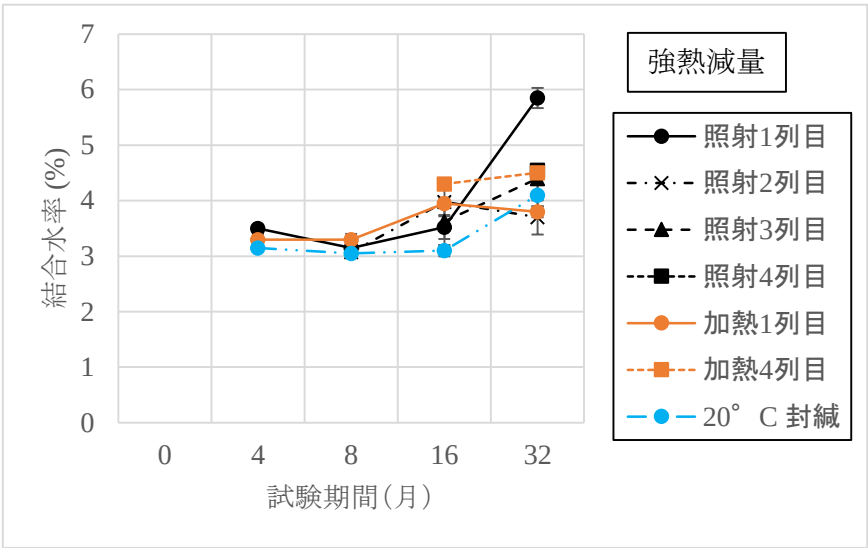
(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.58 結合水率の推移

(正)



(a) コンクリート試験体 1(砂岩)



(b) コンクリート試験体 2(凝灰岩)

図 3.58 結合水率の推移

P2-386
(誤)

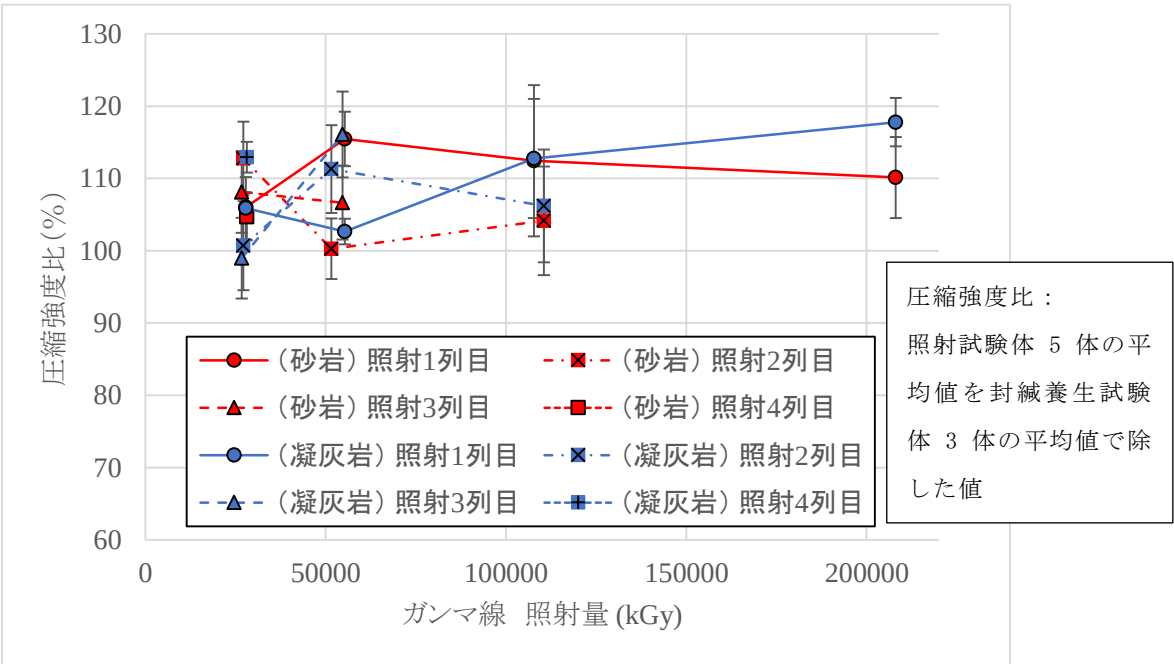


図 3.59 照射量と圧縮強度比（照射・加熱試験体／同材齢 20℃封緘試験体）の関係

(正)

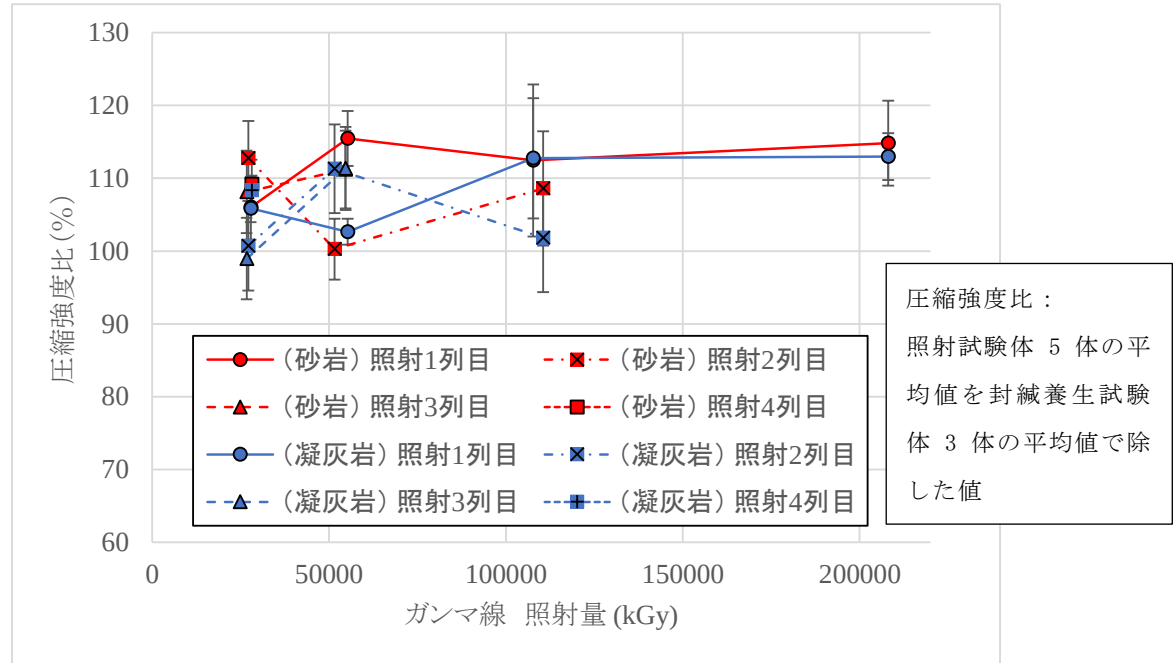


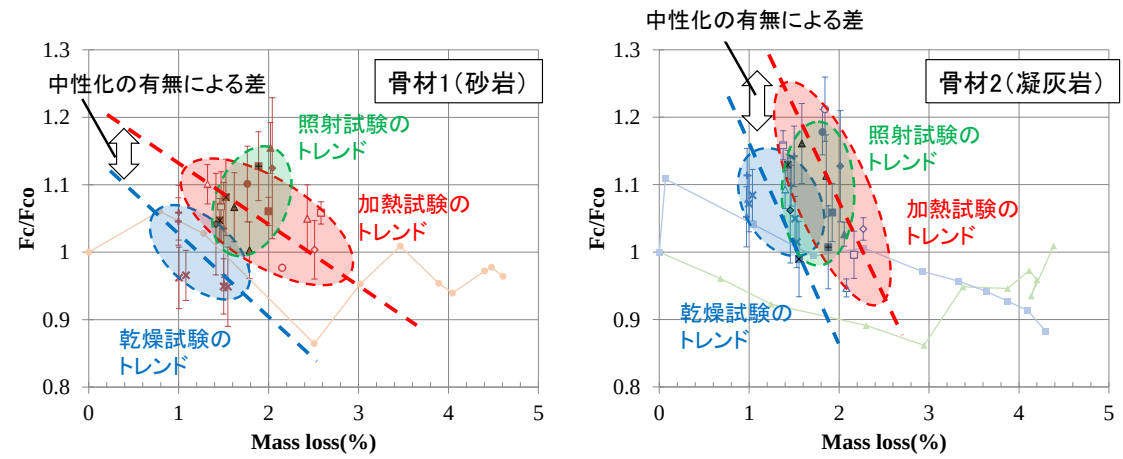
図 3.59 照射量と圧縮強度比（照射・加熱試験体／同材齢 20℃封緘試験体）の関係

P2-386

(誤)

【凡例】

- | | | | |
|--------------|---------------|-------------|---------------------|
| ■ 4M 25MGy① | ▲ 8M 50MGy① | □ 4M Heat① | + 1%, 1.5%loss @20℃ |
| # 8M 25MGy② | △ 16M 50MGy② | △ 8M Heat① | × 1%, 1.5%loss @40℃ |
| × 16M 25MGy③ | ▲ 32M 50MGy③ | △ 16M Heat④ | — 静岡・川砂利 W/C-0.55 |
| * 32M 25MGy④ | ◆ 16M 100MGy① | ◇ 16M Heat① | — 春日井骨材 W/C-0.55 |
| | ◇ 32M 100MGy② | □ 32M Heat④ | — 春日井 W/C-0.40 |
| | ● 32M 200MGy① | ○ 32M Heat① | |



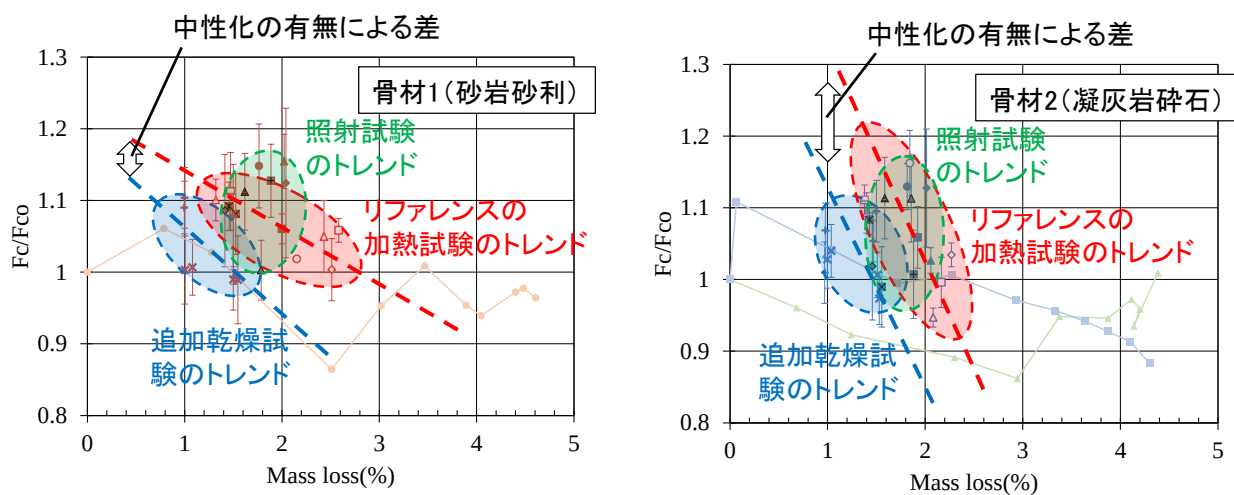
(b)横軸：質量減少率

図 3.60 乾燥と圧縮強度比（照射・加熱試験体／同材齢 20℃封緘試験体）の関係

(正)

【凡例】

- | | | | |
|--------------|---------------|-------------|---------------------|
| ■ 4M 25MGy① | ▲ 8M 50MGy① | □ 4M Heat① | + 1%, 1.5%loss @20℃ |
| # 8M 25MGy② | △ 16M 50MGy② | △ 8M Heat① | × 1%, 1.5%loss @40℃ |
| × 16M 25MGy③ | ▲ 32M 50MGy③ | △ 16M Heat④ | — 静岡・川砂利 W/C-0.55 |
| * 32M 25MGy④ | ◆ 16M 100MGy① | ◇ 16M Heat① | — 春日井骨材 W/C-0.55 |
| | ◇ 32M 100MGy② | □ 32M Heat④ | — 春日井 W/C-0.40 |
| | ● 32M 200MGy① | ○ 32M Heat① | |



(b) 横軸：質量減少率

図 3.60 乾燥と圧縮強度比（照射・加熱試験体／同材齢 20℃封緘試験体）の関係

P2-403
(誤)

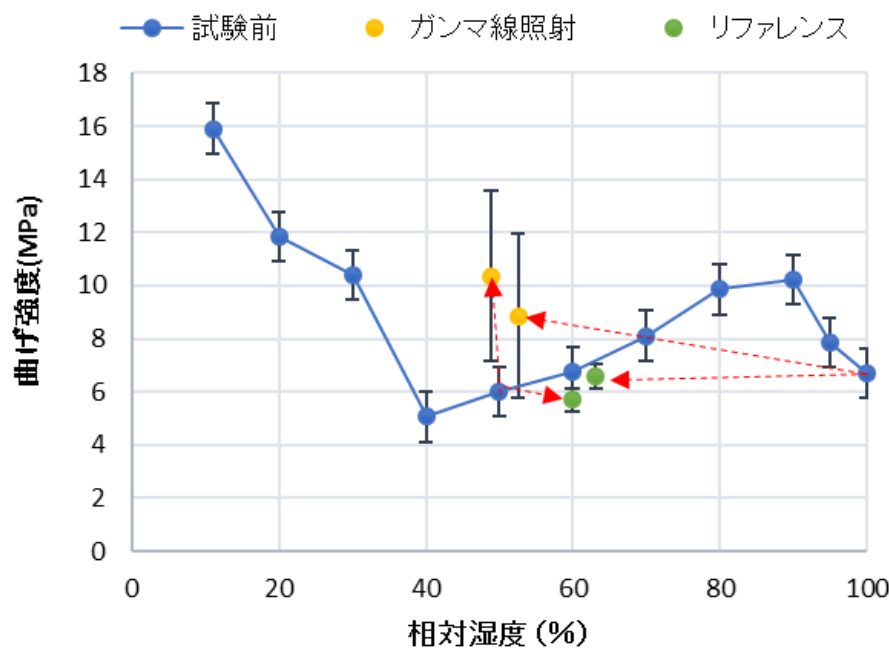


図 3.71 ガンマ線照射試験体，リファレンス試験体，および試験前の試験体の曲げ強度

(正)

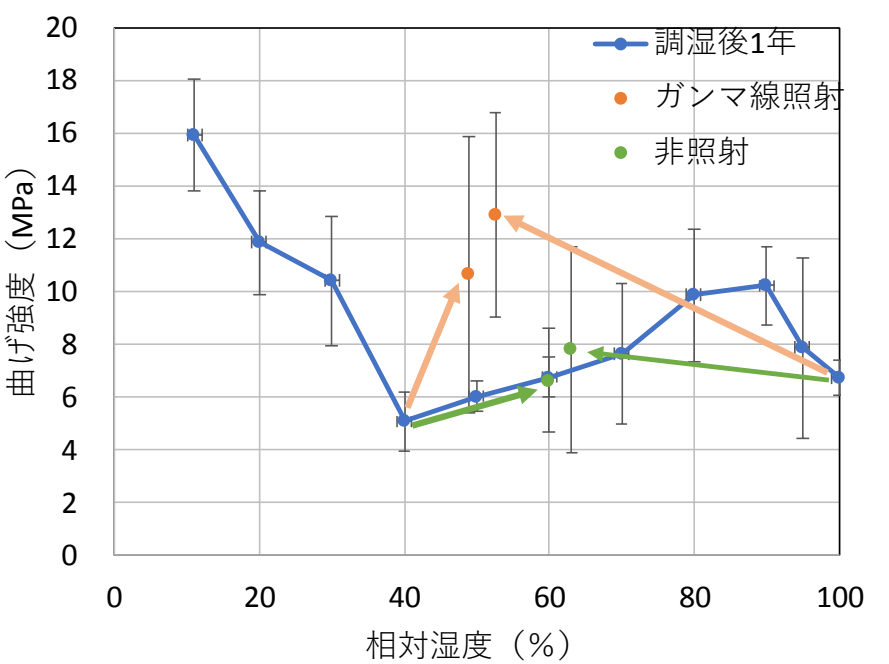


図 3.71 ガンマ線照射試験体，リファレンス試験体，および試験前の試験体の曲げ強度

P2-471
(誤)

表 3.38 XRD 試験結果

骨材記号	骨材名	試験体管理番号	試験実施時期	鉱物名										
				石英	長石類		角閃石	緑泥石	雲母	方解石	苦灰石	黄鉄鉱	黄銅鉱	石墨
					斜長石	カリ長石								
A	凝灰岩 (春日井)	A01	ガンマ線照射試験4ヶ月後	○	○		△	△	○			△		
		A06	ガンマ線照射試験8ヶ月後	◎	◎		◎	△	◎			△	△	
		A11	ガンマ線照射試験16ヶ月後	◎										
		A16	非照射・加熱試験4ヶ月後	◎				△	△					
		A21	非照射・加熱試験8ヶ月後	◎	△			△	△					
		A26	非照射・加熱試験16ヶ月後	○	○		◎	△	◎					
		A34	試験体成形直後	◎	△	△		△	△					
B	砂岩 (御前崎)	B01	ガンマ線照射試験4ヶ月後	◎	△	△		△	△	△	△			
		B06	ガンマ線照射試験8ヶ月後	◎	◎	◎		△	△	△	△			
		B11	ガンマ線照射試験16ヶ月後	◎	◎	△		△	△	△	△			
		B16	非照射・加熱試験4ヶ月後	◎	◎	○			△					
		B21	非照射・加熱試験8ヶ月後	◎	○	△		△	△	△				
		B26	非照射・加熱試験16ヶ月後	◎	◎	△			○					
		B34	試験体成形直後	◎	◎	◎		△	△	△	△			
C	砂岩 (青梅)	C01	ガンマ線照射試験4ヶ月後	◎	○	△		△	△	△	△		△	
		C06	ガンマ線照射試験8ヶ月後	◎	◎	○		△	△	△	△		△	
		C11	ガンマ線照射試験16ヶ月後	◎	◎	△		△	△	◎	△		△	
		C16	非照射・加熱試験4ヶ月後	◎	◎	○		△	△	△	△		△	
		C21	非照射・加熱試験8ヶ月後	◎	○	△		△	△	○		△		
		C26	非照射・加熱試験16ヶ月後	◎	◎	○		△	△	○				
		C34	試験体成形直後	◎	◎	○		△	△	△		△		
D	石灰石 (津久見)	D01	ガンマ線照射試験4ヶ月後							◎	△			△
		D06	ガンマ線照射試験8ヶ月後							◎	△			△
		D11	ガンマ線照射試験16ヶ月後							◎				△
		D16	非照射・加熱試験4ヶ月後							◎	△			△
		D21	非照射・加熱試験8ヶ月後							◎	△			△
		D26	非照射・加熱試験16ヶ月後							◎	△			△
		D34	試験体成形直後							◎				

備考) 最強ピークの回折強度：◎：40、000Counts 以上 ○：40、000～20、000Counts △：20、000Counts 未満
空白：未検出最強ピークの回折強度は、バックグラウンドを差し引いた値を用いた。

(正)

表 3.38 XRD 試験結果

岩石記号	岩石名	試験体管理番号	試験実施時期	鉱物名										
				石英	長石類		角閃石	緑泥石	雲母	方解石	苦灰石	黄鉄鉱	黄銅鉱	石墨
					斜長石	カリ長石								
A	凝灰岩 (春日井)	A01	ガンマ線照射試験4ヶ月後	○	○		△	△	○			△		
		A06	ガンマ線照射試験8ヶ月後	◎	◎		◎	△	◎			△	△	
		A11	ガンマ線照射試験16ヶ月後	◎										
		A16	非照射・加熱試験4ヶ月後	◎				△	△					
		A21	非照射・加熱試験8ヶ月後	◎	△			△	△					
		A26	非照射・加熱試験16ヶ月後	○	○		◎	△	◎					
		A34	試験体成形直後	◎	△	△		△	△					
A36	65℃加熱後	◎		△		△								
B	砂岩 (御前崎)	B01	ガンマ線照射試験4ヶ月後	◎	△	△		△	△	△				
		B06	ガンマ線照射試験8ヶ月後	◎	◎	◎		△	△	△				
		B11	ガンマ線照射試験16ヶ月後	◎	◎	△		△	△	△				
		B16	非照射・加熱試験4ヶ月後	◎	◎	○			△					
		B21	非照射・加熱試験8ヶ月後	◎	○	△		△	△	△				
		B26	非照射・加熱試験16ヶ月後	◎	◎	△			○					
		B34	試験体成形直後	◎	◎	◎		△	△	△				
B36	65℃加熱後	◎		◎		○	△	△						
C	砂岩 (青梅)	C01	ガンマ線照射試験4ヶ月後	◎	○	△		△	△	△			△	
		C06	ガンマ線照射試験8ヶ月後	◎	◎	○		△	△	△			△	
		C11	ガンマ線照射試験16ヶ月後	◎	◎	△		△	△	◎			△	
		C16	非照射・加熱試験4ヶ月後	◎	◎	○		△	△	△			△	
		C21	非照射・加熱試験8ヶ月後	◎	○	△		△	△	○			△	
		C26	非照射・加熱試験16ヶ月後	◎	◎	○		△	△	○				
		C34	試験体成形直後	◎	◎	○		△	△	△			△	
C36	65℃加熱後	◎		◎		△	△	△						
D	石灰石 (津久見)	D01	ガンマ線照射試験4ヶ月後							◎	△			△
		D06	ガンマ線照射試験8ヶ月後							◎	△			△
		D11	ガンマ線照射試験16ヶ月後							◎				△
		D16	非照射・加熱試験4ヶ月後							◎	△			△
		D21	非照射・加熱試験8ヶ月後							◎	△			△
		D26	非照射・加熱試験16ヶ月後							◎	△			△
		D34	試験体成形直後							◎				
D36	65℃加熱後							◎						

備考) 最強ピークの回折強度：◎：40、000Counts 以上 ○：40、000～20、000Counts △：20、000Counts 未満
空白：未検出最強ピークの回折強度は、バックグラウンドを差し引いた値を用いた。

P2-476
(正)
図を追加

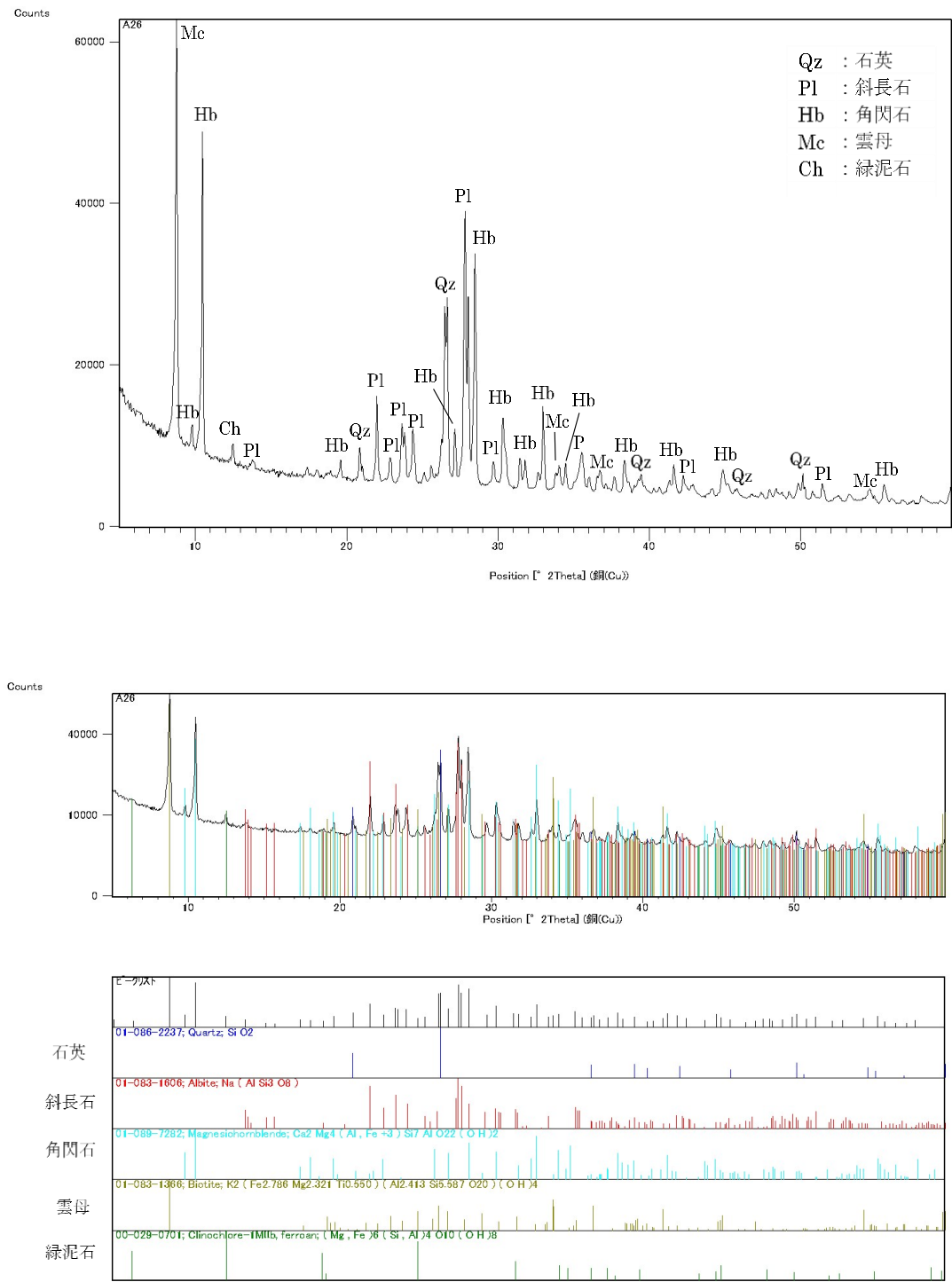


図 粉末X線回折試験結果 (A26：凝灰岩)

P2-482
(正)
図を追加

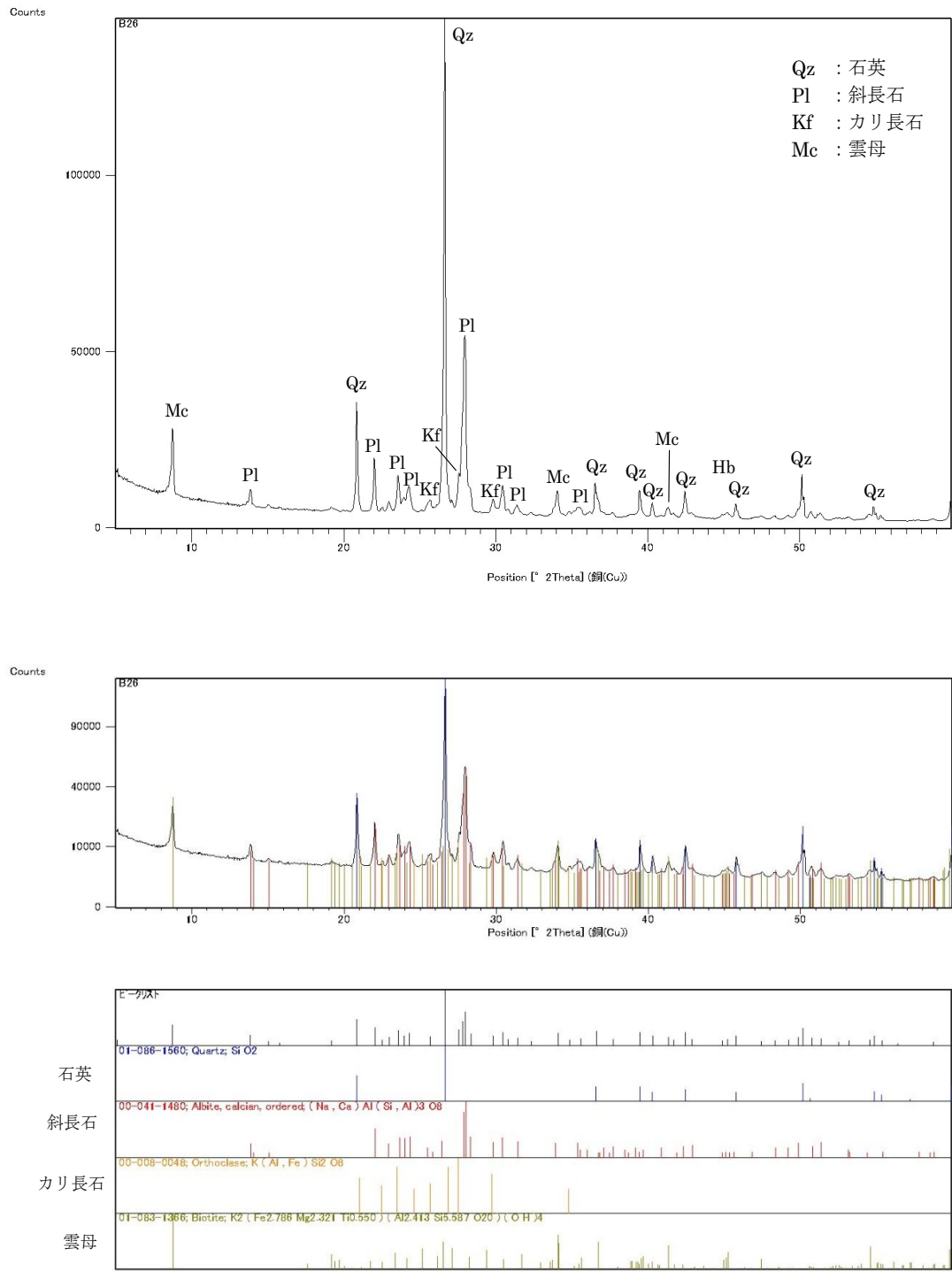


図 粉末 X 線回折試験結果 (B26 : 砂岩)

P2-488
(正)
図を追加

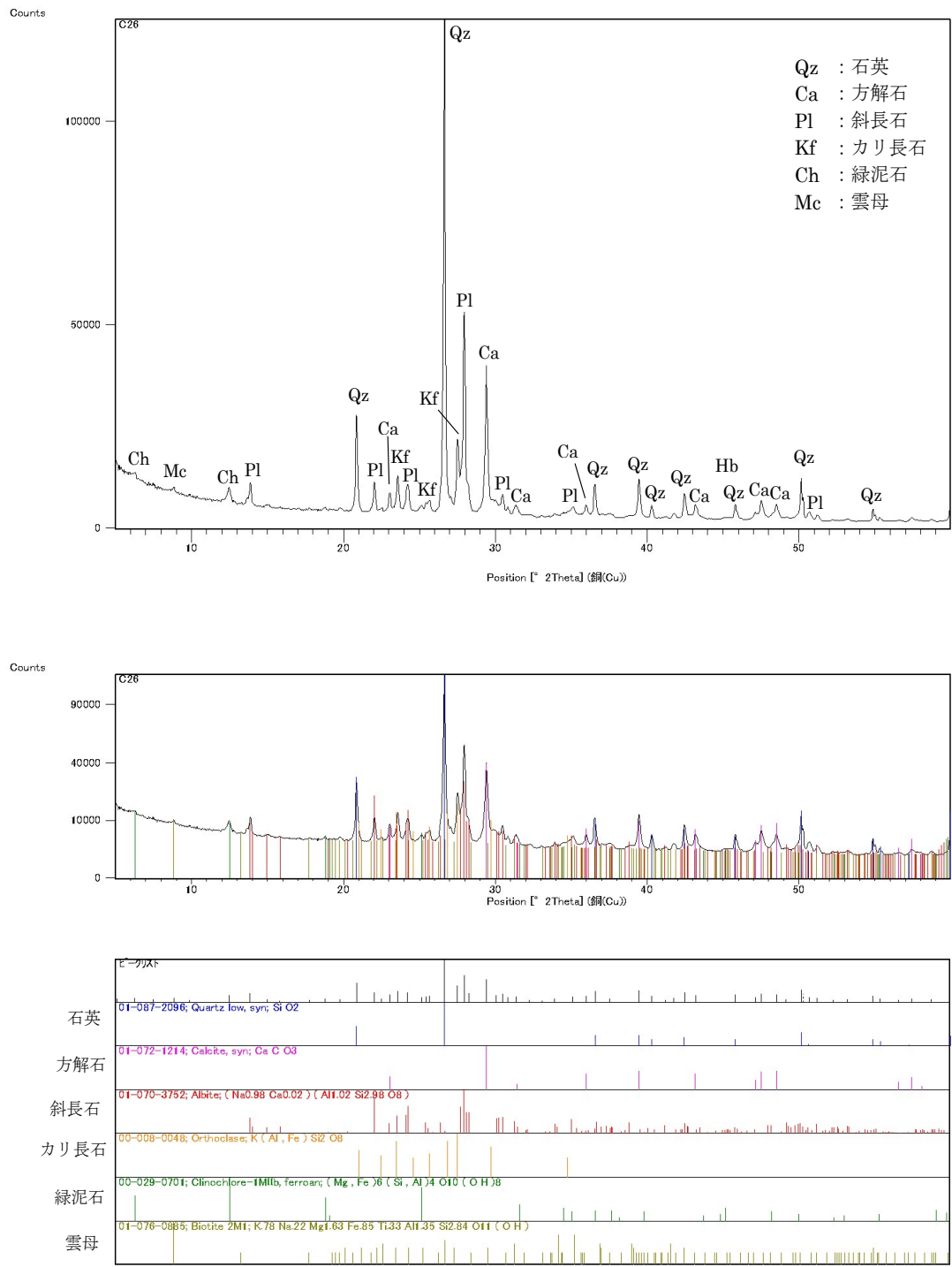


図 粉末X線回折試験結果 (C26 : 砂岩)

P2-494
(正)
図を追加

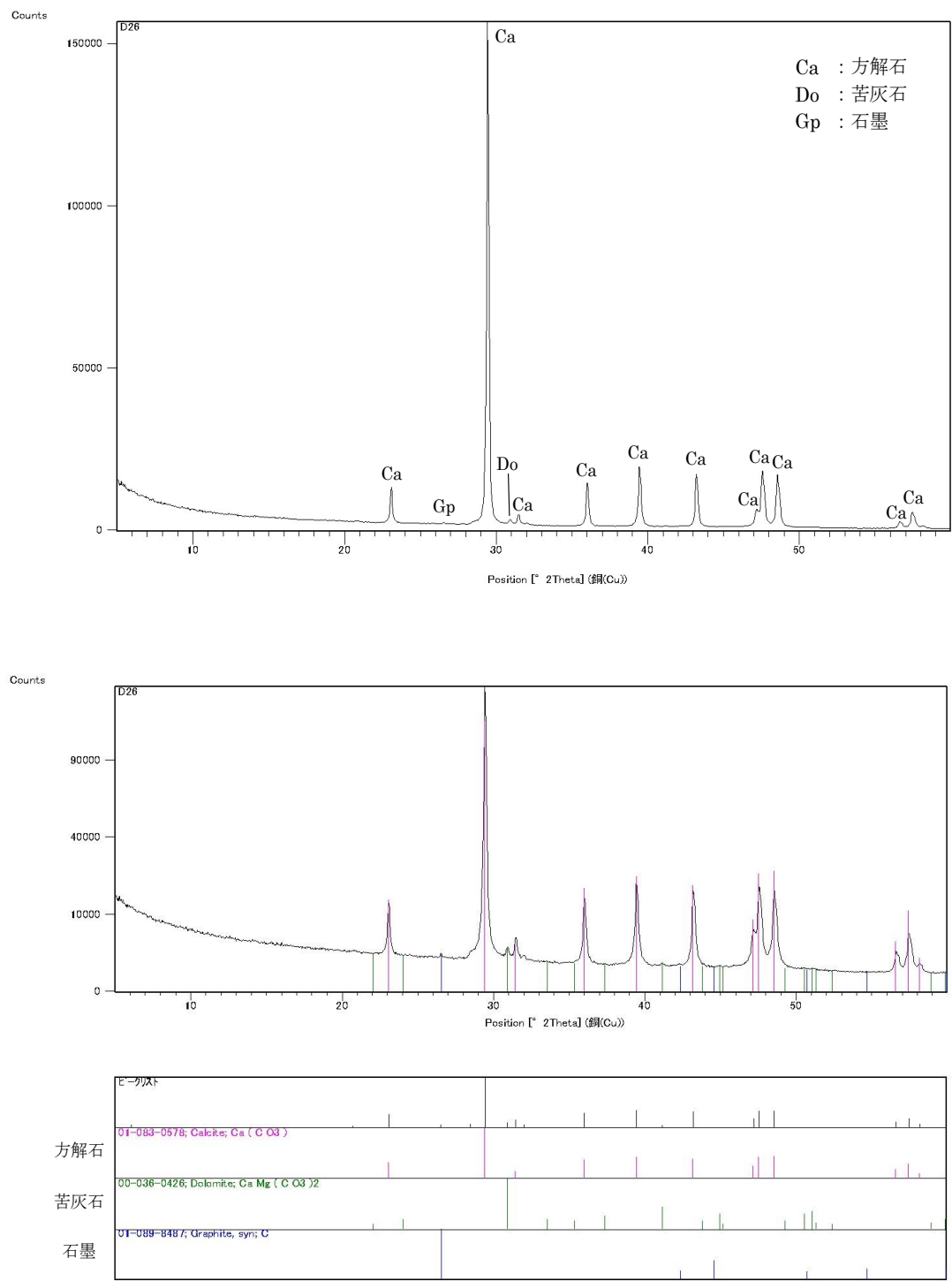


図 粉末X線回折試験結果 (D26 : 石灰石)

P2-477

(正)

図を追加

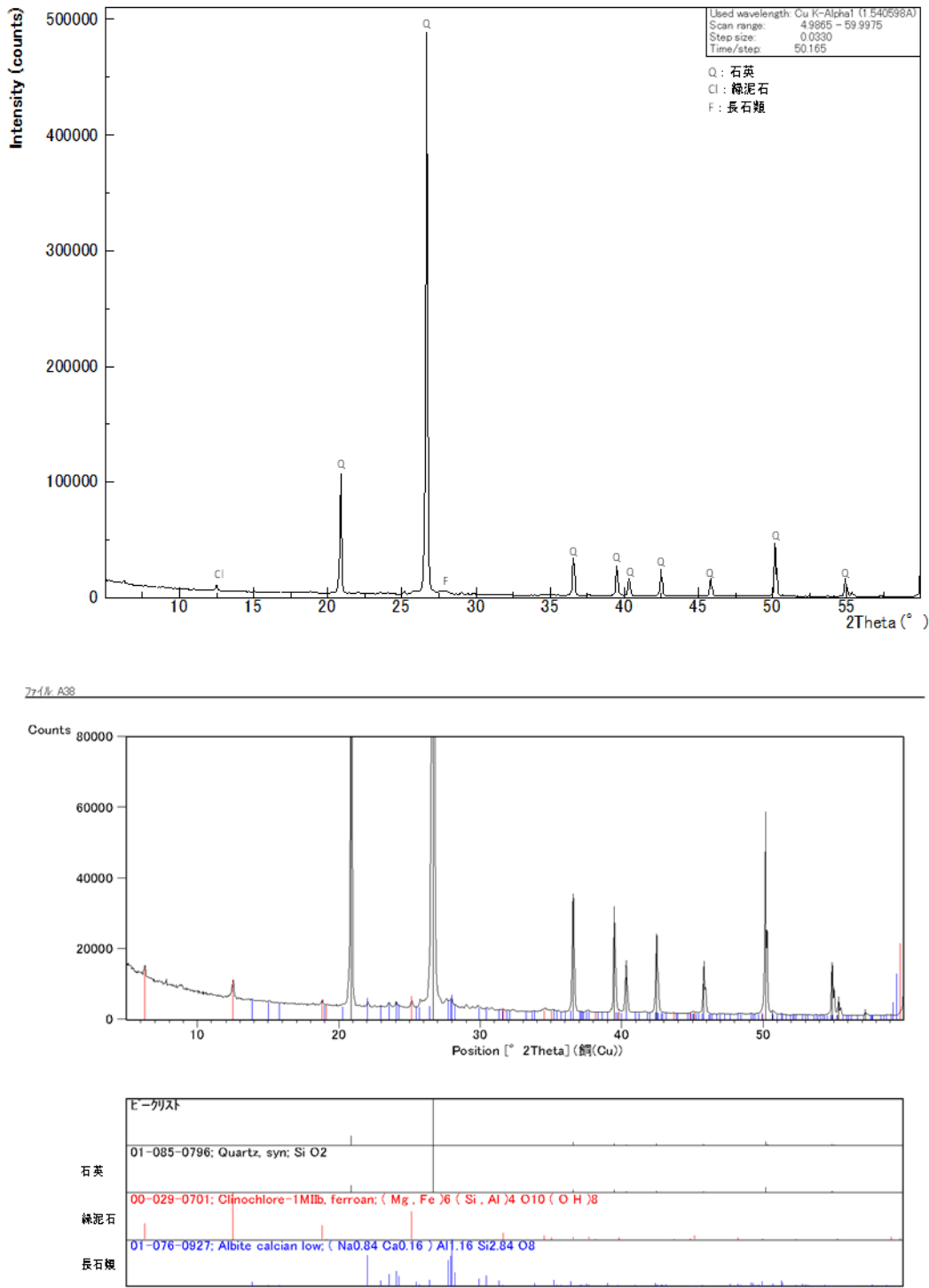
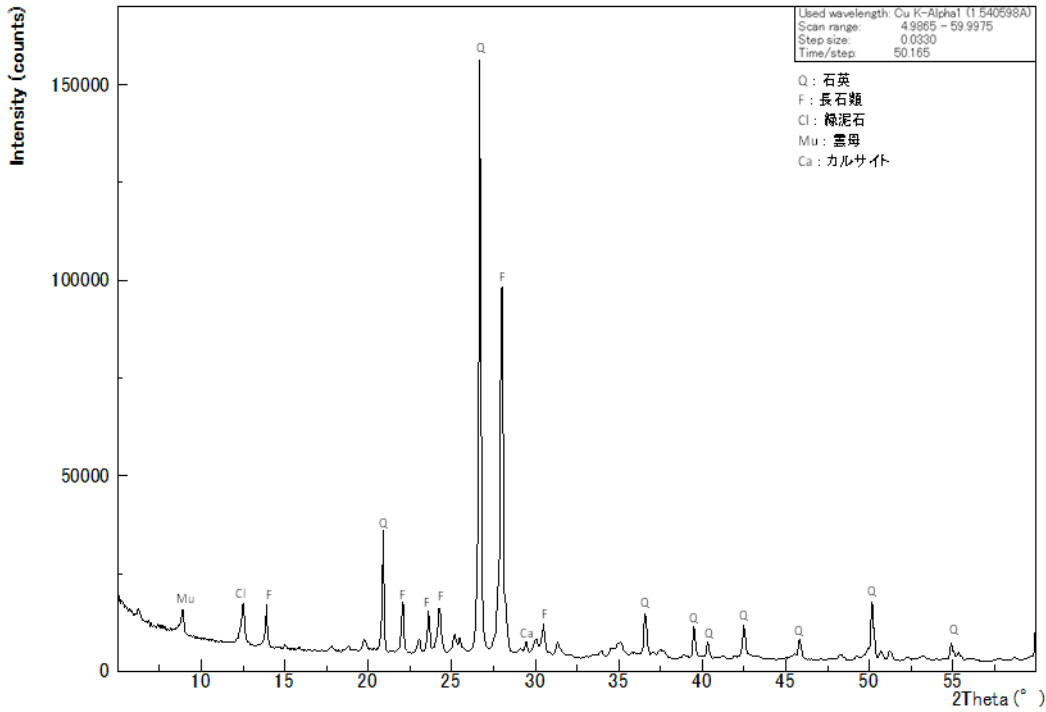


図 粉末 X 線回折試験結果 (A36 : 凝灰岩)

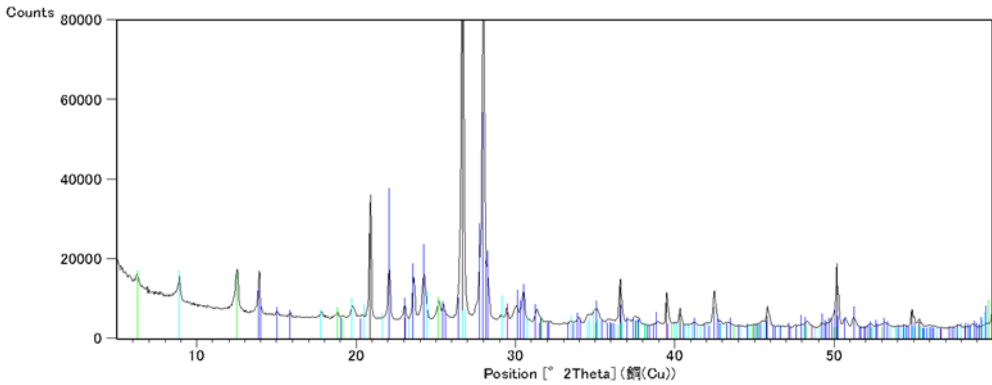
P2-483

(正)

図を追加



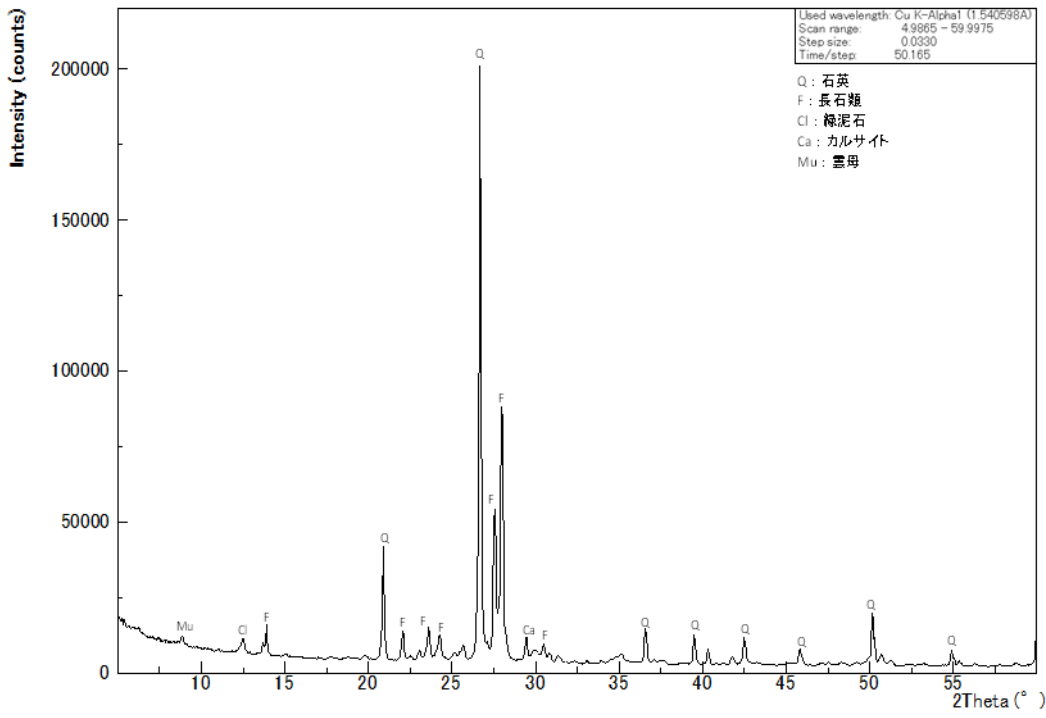
771/B36



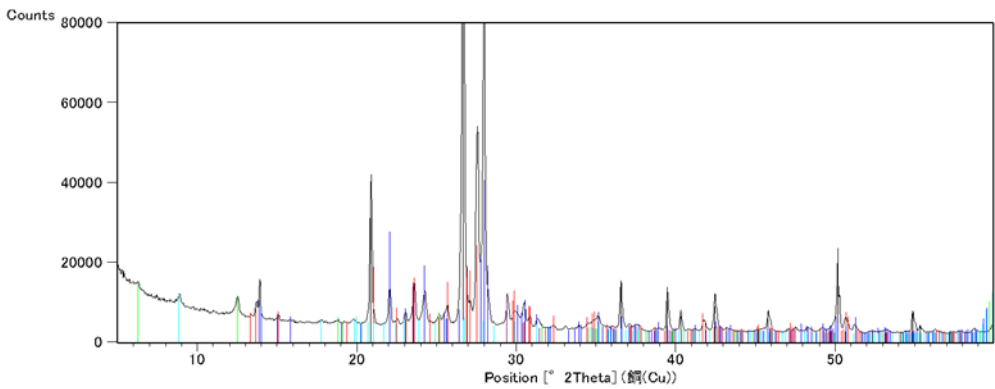
	ピークリスト
石英	01-085-0796; Quartz, syn; Si O2
長石類	01-089-6424; Albite (heat-treated); Na (Al Si3 O8)
綠泥石	00-029-0701; Clinochlore-1M1b, ferroan; (Mg , Fe)6 (Si , Al)4 O10 (O H)8
雲母	01-078-1928; Muscovite-1M, magnesian; (K0.80 Na0.02 Ca0.01) (Al1.66 Fe0.06 Fe0.02 Mg0.28) (Si3.41 Al0.59) O10 (O H)2
カルサイト	01-085-1108; Calcite, syn; Ca C O3

図 粉末 X 線回折 (B36 : 砂岩)

P2-489
(正)
図を追加



774/L C36



	E-リスト
石英	01-085-0796; Quartz, syn; Si O2
長石類	01-076-0826; Microcline intermediate; K.871 Na.120 Rb.008 Al0.94 Si3.06 O8
長石類	01-089-6427; Albite (heat-treated); Na (Al Si3 O8)
綠泥石	00-029-0701; Clinochlore-1M1b, ferroan; (Mg , Fe)6 (Si , Al)4 O10 (OH)8
カルサイト	01-083-0578; Calcite; Ca (C O3)
雲母	01-086-1385; Muscovite-2M1; K0.86 Al1.94 (Al0.965 Si2.895 O10) ((OH)1.744 F0.256)

図 粉末 X 線回折 (C36 : 砂岩)

P2-495

(正)

図を追加

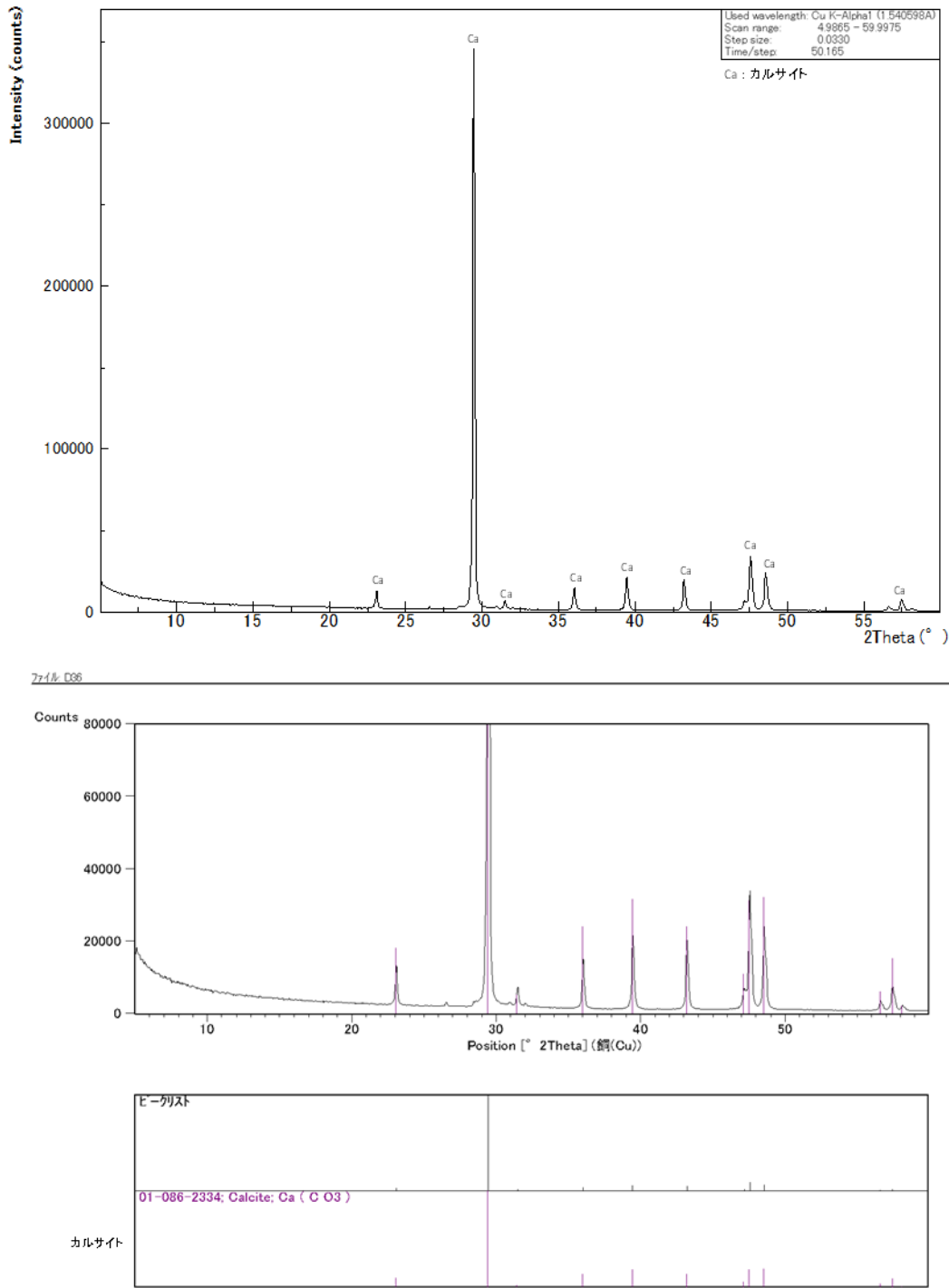


図 粉末 X 線回折 (D36 : 石灰石)

P2-495

(正)

図を追加

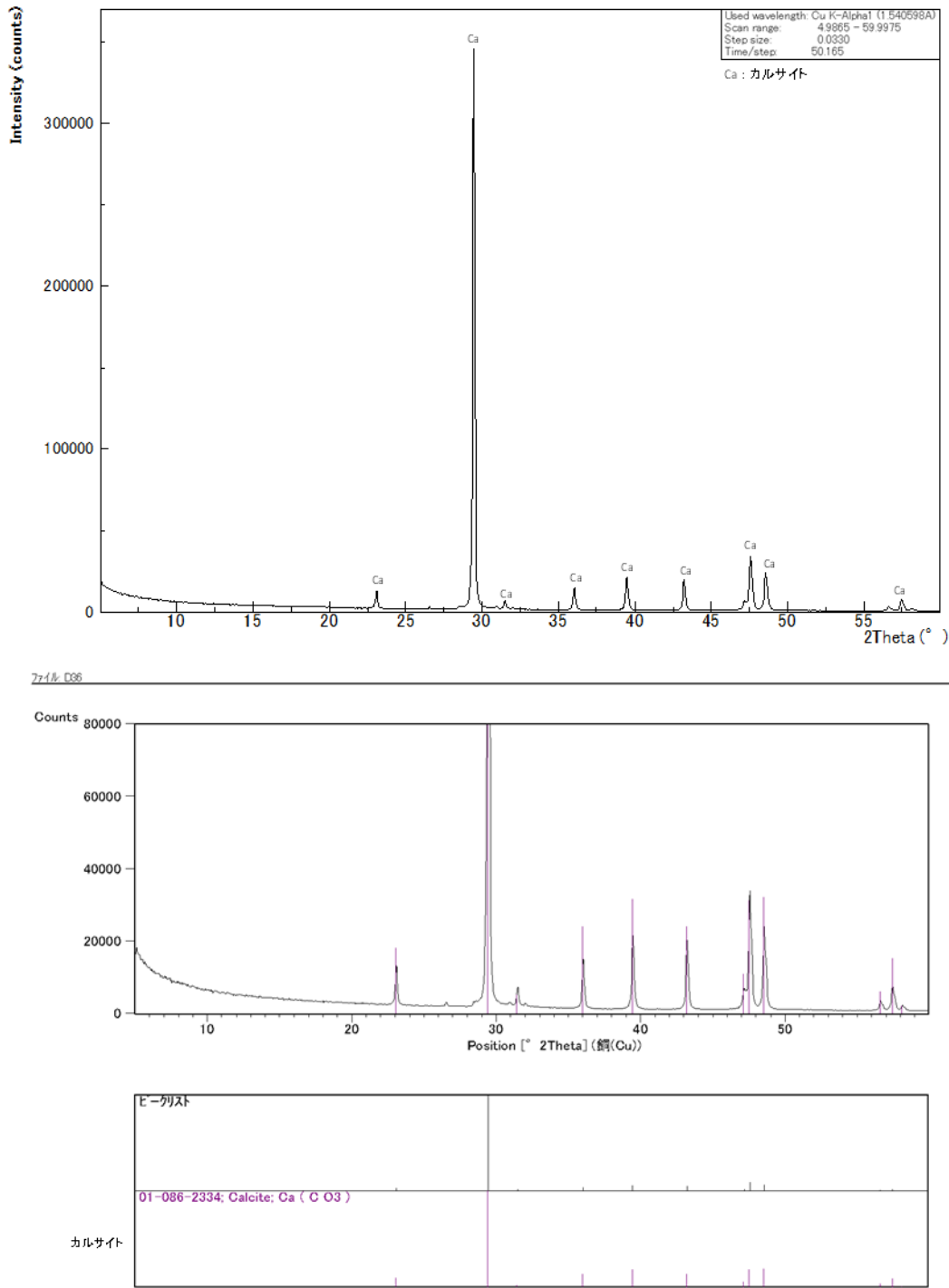


図 粉末 X 線回折 (D36 : 石灰石)