

### 3.1.2 評価方法

#### (1) 評価対象とする事象の決定 (図3の①対応)

対象とする主劣化因子は中性化とし、着目する劣化因子の作用量  $F$  を中性化深さ  $F_1$ 、材料の劣化度  $D$  を鉄筋の腐食減量  $D_3$  とする。

#### (2) $F$ - $t$ 曲線の評価 (図3の②～④対応)

##### 1) 中性化深さ $F_1$ と経過年 $t$ の関係

中性化に影響する劣化因子の作用量としては炭酸ガス、酸素などが考えられるが実測が困難であり、劣化因子の作用量を中性化深さとする。中性化深さと時間との関係式は式(6)がある<sup>4</sup>。ルート  $t$  則とも呼ばれ中性化の進行予測式として示されている<sup>5</sup>。

$$F_1 = \alpha_1 \sqrt{t} \quad (6)$$

$F_1$  : 中性化深さ (mm)

$\alpha_1$  : 中性化での劣化因子指数(mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )

$t$  : 年数(year)

$F_1$  は中性化での劣化因子指数 (添字の 1 は中性化を表す) であり、対象物の環境条件、材料条件などで定まり、その構造物に作用する中性化進行の程度が相対評価できる。

##### 2) 中性化での劣化因子指数 $\alpha_1$ の評価

中性化での劣化因子指数  $\alpha_1$  は、定期点検時  $t_{\text{obs}}$ (例えば  $t_{\text{obs}}=5$  年毎)に対象部位の中性化深さ  $F_{\text{obs}}$  を実測し求める。実測が困難な場合は推定式により求める。

##### (a) 実測による評価

###### a) 中性化深さの測定方法

コンクリートの中性化深さ  $F_{\text{obs}}$  の測定は、コンクリートの中性化深さの測定方法<sup>6</sup>による。コア供試体による中性化深さの測定の場合は圧縮強度試験後の供試体を用いてもよいが、圧縮強度試験の際に両端を切断し研磨あるいはキャッピングしているため元のコンクリート表面からの中性化深さがわかるようにしておく必要がある。<sup>7</sup>

###### b) 劣化因子指数 $\alpha_1$ の評価

<sup>4</sup> 岸谷孝一：“鉄筋コンクリートの耐久性”、鹿島建設技術研究所出版部 (1963)

<sup>5</sup> 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書「維持管理編」, 2008

<sup>6</sup> JIS A 1152:2011：コンクリートの中性化深さの測定方法

<sup>7</sup> 日本建築学会：“鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断及び補修指針(案)・同解説(1997)

実測により得られた中性化深さ  $F_{\text{obs}}$  について、データが複数ある場合は図 6 のように原点回帰分析により、現データ単一の場合はそれと原点とを基本式で回帰し、劣化因子指数  $\alpha_1$  ( $\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$ ) を求める。

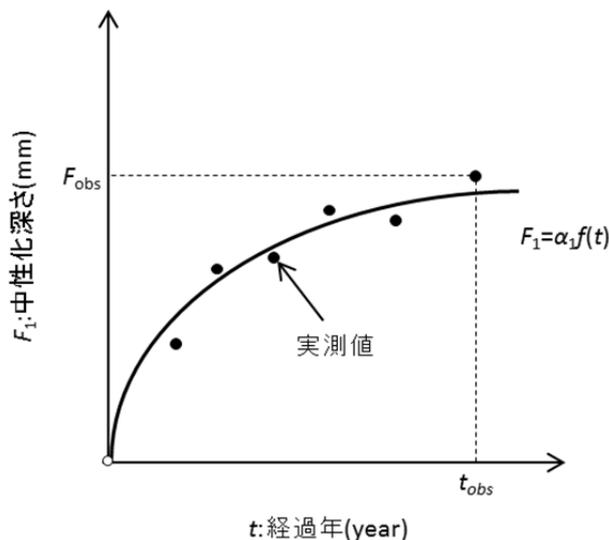


図 6 中性化深さと経過年との関係

(b) 推定による評価

中性化速度係数（劣化因子指数  $\alpha_1$ ）の推定式には式 (7) (8) がある<sup>4</sup>。

$$\alpha_1 = 10 \sqrt{\frac{R^2(W/C - 0.25)^2}{0.3(1.15 + 3W/C)}} \quad (W/C \geq 0.6) \quad (7)$$

$$\alpha_1 = 10 \sqrt{\frac{R^2(4.6W/C - 1.76)^2}{7.2}} \quad (W/C < 0.6) \quad (8)$$

$\alpha_1$  : 劣化因子指数 ( $\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$ )

$R$  : 中性化比率

$W/C$  : 水セメント比 (-)

中性化比率  $R$  は下式 (9) による。

$$R = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \quad (9)$$

$\alpha$  : 劣化外力の区分による係数

$\beta$  : 仕上げ材による係数 (仕上げ材がない場合は  $\beta=1.0$ )

$\gamma$  : セメントによる係数

表 5 劣化外力の区分による係数

劣化外力の区分	屋外	屋内
係数 $\alpha$	1.0	1.7

表 6 仕上げ材による係数（屋外）

プラスター	ペイント	モルタル + プラスター	モルタル	タイル	人造石	モルタル + ペイント
0.73	0.61	0.49	0.48	0.31	0.31	0.19

表 7 仕上げ材による係数（屋内）

モルタル	モルタル + ペイント	タイル	モルタル + リシン
0.26	0.20	0.16	0.12

表 8 セメントによる係数

普通ポルトランド	早強ポルトランド	中庸熱ポルトランド	高炉 B 種	フライアッシュ B 種
1.0	1.1	1.2	1.4	1.4

また、温湿度が変化した場合は表 9 により劣化因子指数  $\alpha_1$  を求める。温度湿度の異なる促進試験結果<sup>8</sup>より中性化速度係数の増加率を求め、劣化因子指数  $\alpha_1$  を求めた。環境条件が表 9 の範囲外である場合は、表 9 から線形補完し劣化因子指数  $\alpha_1$  を求める。

表 9 劣化因子指数  $\alpha_1$  と温湿度の関係

試験条件		$\alpha_1$ (mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )		
温度 (°C)	湿度 (%R.H.)	W/C 0.4	W/C 0.5	W/C 0.6
20	60	0.30	2.01	3.73
60	60	1.63	3.40	5.10
80	60	2.49	3.59	6.11
80	30	5.29	9.08	13.62

### 3) $F-t$ 曲線の決定

評価された劣化因子指数  $\alpha_1$  により、中性化深さ  $F_1$  と経過年  $t$  との関係 ( $F-t$  曲線) を決

<sup>8</sup> 太田貴士，橘高義典，松沢晃一：“様々な温湿度環境下におけるコンクリートの中性化に関する研究”，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1 分冊，pp.557-558，(2011)

定する。

(3)  $D$ - $F$  曲線の評価 (図 3 の⑤～⑦対応)

1) 鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  との関係

鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  との関係は式 (10) による<sup>9</sup>。

$$D_3 = \beta_1 \sqrt{F_1 - F_0^2} \quad (10)$$

$D_3$ : 鉄筋の腐食減量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )

$\beta_1$ : 中性化による鉄筋腐食に関する材料劣化指数( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mm}$ )

$F_1$ : 中性化深さ( $\text{mm}$ )

$F_0$ : 鉄筋が腐食し始めるときの中性化深さ( $\text{mm}$ )

材料劣化指数  $\beta_1$  は対象物の環境条件、材料条件などで定まり、その構造物が潜在的に有する鉄筋腐食の進行の程度を一律に評価できる。

2) 中性化での材料劣化指数  $\beta_1$  の評価

中性化での材料劣化指数  $\beta_1$  は、対象部位の鉄筋の腐食減量  $D_{\text{obs}}$  を実測し求める。実測が困難な場合は推定式により求める。

(a) 実測による評価

a) 鉄筋の腐食減量の計測方法

鉄筋の腐食減量  $D_{\text{obs}}$  の測定には直接法と間接法がある。直接法では腐食後の鉄筋の断面減少率をノギスなどで計る方法、鉄筋を取出し 10%クエン酸 2 アンモニウム溶液中に浸漬しさびを溶解させてコンクリートに埋め込む前の鉄筋重量からさび溶解後の重量を差し引き腐食減量として直接測定する方法などがある。間接法には、自然電位の測定、分極抵抗の測定などがある。自然電位とは、コンクリート中の鉄筋がその腐食状態に対応して示す電位のことであり、自然電位を測定することによって鉄筋の腐食状態を推定する。自然電位法の測定は直流電圧計と照合電極を用いて行う。

b) 材料劣化指数  $\beta_1$  の算定

鉄筋の腐食減量  $D_{\text{obs}}$  データが複数ある場合は図 6 のように回帰分析により ( $F_0$  を原点)、現データ単一の場合はそれと原点とを基本式で回帰し  $\beta_1$  ( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mm}$ ) を求める。

<sup>9</sup> Kitsutaka Y. and Tsukagoshi M. : “Method on the aging evaluation in nuclear power plant concretes structures”, Nuclear Engineering and Design, pp.286–290, (2014)

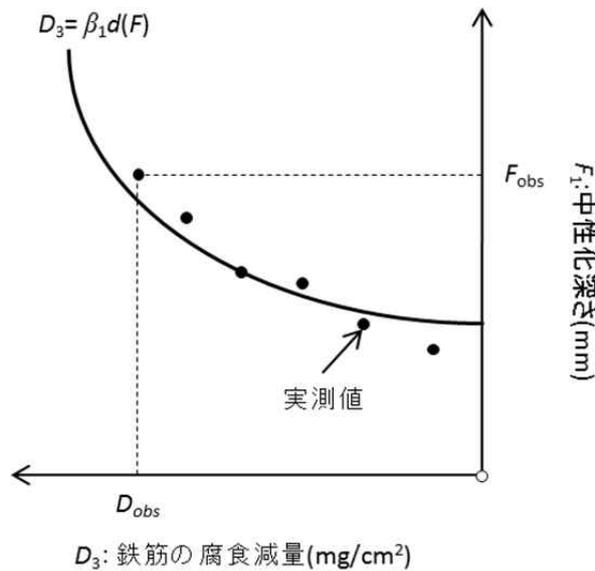


図 7 中性化での材料劣化指数  $\beta_1$  の算定例

(b) 推定による評価

中性化深さと鉄筋腐食度の関係には式 (11) がある<sup>10</sup>。

$$W_c = B\sqrt{d} \quad (11)$$

$$B = \frac{1}{38.1}(1.35T + 2.76H + 1.80O_2 - 163) \quad (12)$$

$W_c$ : 鉄筋の腐食減量 ( $10^{-4}\text{g/cm}^2$ )

$T$ : 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$H$ : 相対湿度 (%)

$O_2$ : 酸素濃度 (%)

$d$ : 鉄筋部分まで中性化達成後からの期間 (day)

中性化の評価式 (1) 及び式 (10) ~ 式 (12) より、材料劣化指数  $\beta_1$  は式 (13) となる。

$$\beta_1 = \frac{B}{\alpha_1} \times \frac{\sqrt{365}}{10} = 1.91 \frac{B}{\alpha_1} \quad (13)$$

一般的な環境条件として、評価式 (7) より、 $W/C=0.6$  の場合、 $\alpha_1=0.375(\text{mm}/\sqrt{\text{year}})$ 、温度  $20^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 60%、酸素濃度 20% の場合、 $\beta_1$  は  $8.82(\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mm})$  となる。

3)  $D$ - $F$  曲線の決定

<sup>10</sup> 友沢史紀、福士勲、森永繁：“中性化及び鉄筋腐食速度にもとづく鉄筋コンクリートの速度論的耐久性予測手法に関する予備的考察”、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.101-102 (1985)

評価された材料劣化指数  $\beta_1$  より、鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  の関係 ( $D$ - $F$  曲線) を決定する。

(4) 健全性一次評価 (図 3 の⑧対応)

図 8 に中性化深さ  $F_1$  と鉄筋の腐食減量  $D_3$  の関係の推定例を示す。中性化深さ  $F_1$  と経過年  $t$  の関係 ( $F$ - $t$  曲線)、鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  の関係 ( $D$ - $F$  曲線) より、評価年  $t_{eva}$  での中性化深さ  $F_{eva}$  を求め、式 (14) を満足するかどうかを評価する。

$$F_{eva} < F_0 \tag{14}$$

$F_{eva}$  : 評価年  $t_{eva}$  での中性化深さ

$F_0$  : 鉄筋が腐食し始めるときの中性化深さ

中性化深さ  $F_{eva}$  が式 (14) を満足すれば評価年においては、中性化による劣化に関しては健全とする。満足しない場合、あるいは長期的な健全性評価を行う場合は、 $P$ - $D$  曲線の評価へ進み、 $PDFt$  曲線を作成し健全性二次評価を行う。

なお、鉄筋が腐食し始めるときの中性化深さ  $F_0$  は屋外側はかぶり厚さ、屋内側はかぶり厚さ+20mm とする<sup>11</sup>。

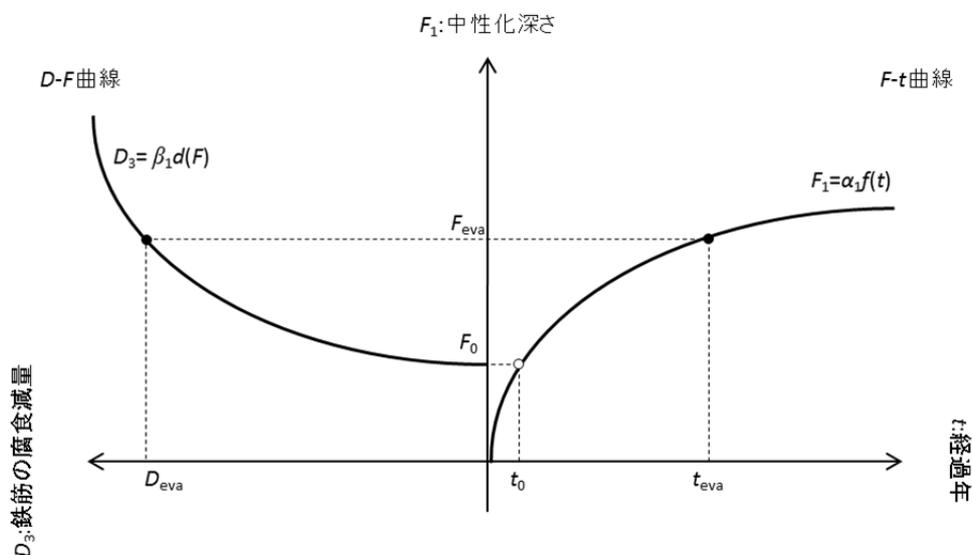


図 8 中性化深さ  $F_1$  と鉄筋の腐食減量  $D_3$  の関係の推定例

<sup>11</sup> 日本建築学会：原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説、2008

### 3.2 塩分浸透

#### 3.2.1 評価プロセス

図 9 に塩分浸透での評価プロセスを示す。本評価は、塩分浸透以外の複合劣化作用も考慮している。 $F-t$  曲線、 $D-F$  曲線による評価について詳細に記す。

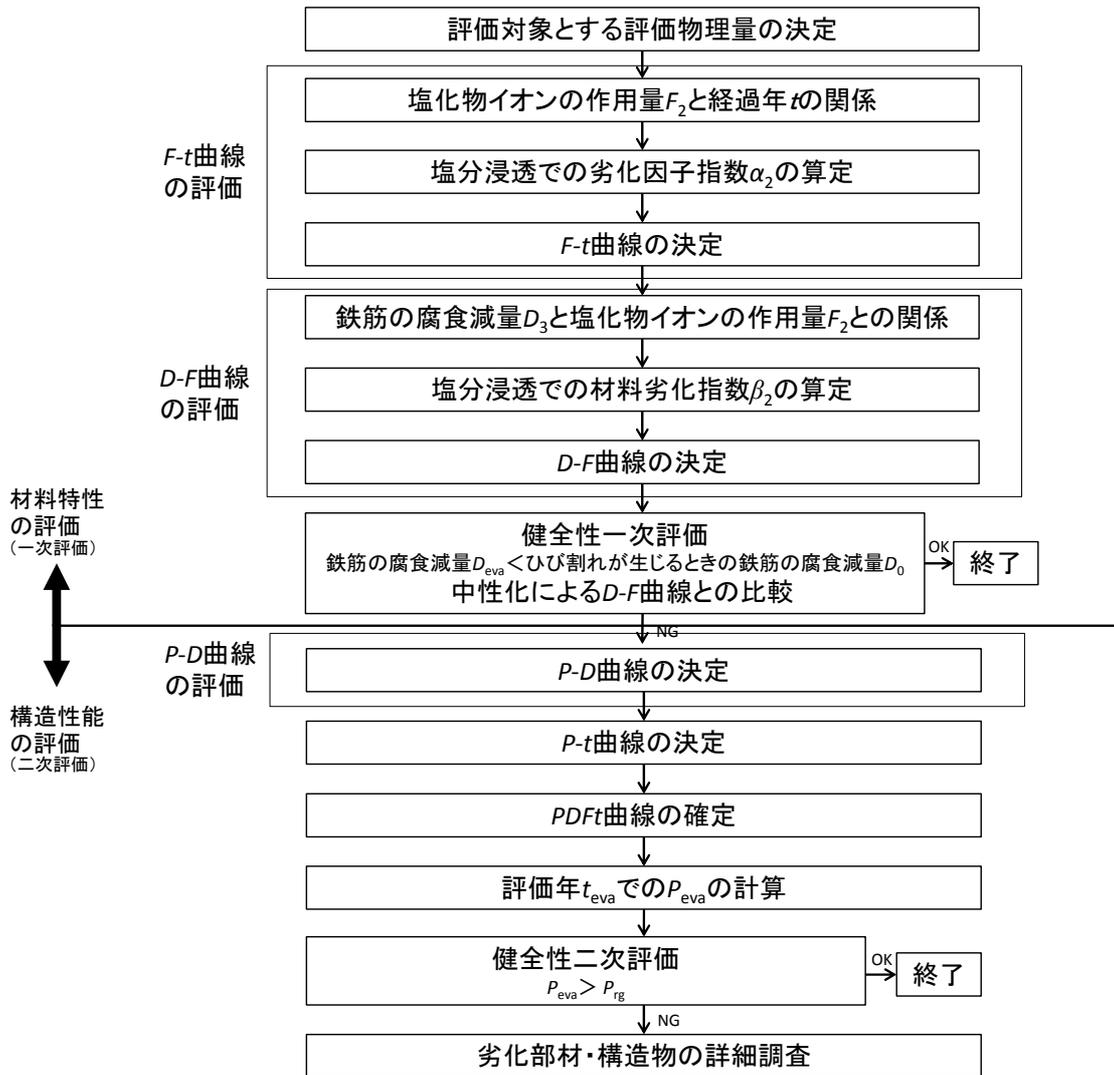


図 9 塩分浸透での評価プロセス

#### 3.2.2 評価方法

##### (1) 評価対象とする事象の決定 (図 3 の①対応)

対象とする劣化因子は塩分浸透とし、着目する劣化因子の作用量  $F$  を塩化物イオンの作用量  $F_2$ 、材料の劣化度  $D$  を鉄筋の腐食減量  $D_3$  とする。

##### (2) $F-t$ 曲線の評価 (図 3 の②～④対応)

1) 塩化物イオンの作用量  $F_2$  と経過年  $t$  の関係

塩化物イオン濃度の時間積算量を塩化物イオンの作用量  $F_2$  とする (図 10)。塩化物イオンの作用量  $F_2$  と経過年  $t$  の関係には式 (15) がある<sup>12</sup>。

$$F_2 = \int_{t_{cr}}^{t_n} C_t dt, \quad C_t \geq C_{cr} \quad (15)$$

$$C_t = C_0 \left\{ 1 - \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{\alpha_2 \cdot x^2}{t}\right)} \right\}, \quad D = \frac{1}{\pi \alpha_2} \quad (16)$$

$F_2$ : 塩化物イオンの作用量 ( $\text{kg/m}^3 \cdot \text{year}$ )

$C_t$ : 鉄筋位置での塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$t$ : 年数(year)

$t_{cr}$ : 鉄筋腐食開始時期(year) :  $C_t \geq C_{cr}$  となる時期

$t_n$ : 評価年(year)

$C_{cr}$ : 鉄筋腐食開始塩化物イオン濃度 =  $1.2\text{kg/m}^3$

$C_0$ : コンクリート表面の塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ ) (一般的塩害環境では 6.9)

$\alpha_2$ : 塩分浸透での劣化因子指数 ( $\text{year}/\text{mm}^2$ )

$D$ : みかけの拡散係数  $D(\text{mm}^2/\text{year})$

$x$ : かぶり厚さ (mm)

$\alpha_2$  は塩分浸透での劣化因子指数 (添字の 2 は塩分浸透を表す) であり, 対象物の環境条件, 材料条件などで定まり, その構造物に作用する塩分浸透の程度が相対評価できる。

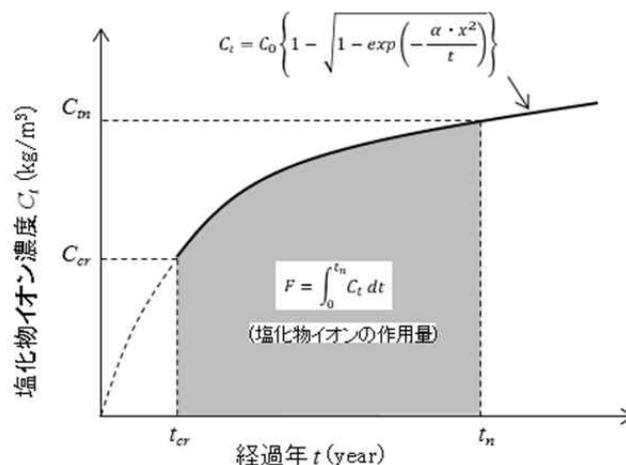


図 10 塩化物イオンの作用量  $F_2$  の概念図

<sup>12</sup> 橘高義典: “塩害による鉄筋腐食における劣化因子の作用量と材料劣化度との関係について”, 2013 年度日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.423-424 (2013)

## 2) 塩分浸透での劣化因子指数 $\alpha_2$ の評価

塩分浸透での劣化因子指数  $\alpha_2$  は、定期点検時  $t_{\text{obs}}$  (例えば  $t_{\text{obs}}=5$  年毎) に対象部位の鉄筋位置での塩化物イオン濃度  $F_{\text{obs}}$  を実測し求める。実測が困難な場合は推定式により求める。

### (a) 実測による評価

#### a) 塩化物イオン濃度の測定方法

コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定方法として、日本コンクリート工学会 JCI 基準案「硬化コンクリートに含まれる塩分の分析方法 (案)<sup>13)</sup>」がある。図 11 に測定部の詳細を示す。

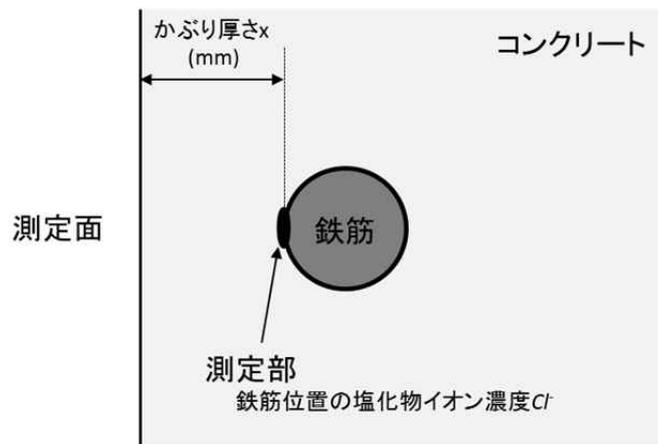


図 11 測定部の詳細

#### ① 試料採取方法

##### ・コア

調査対象部位・部材のコンクリートからコアボーリング機により試料を採取する。塩化物量を測定するために用いるコア供試体は、直径 10cm とすることが望ましいが、10cm とすることが困難な場合は粗骨材の最大寸法の 3 倍あればよい。コア採取位置は、はつりによる調査の位置のできるだけ近傍がよい。

##### ・ドリル粉

ドリル粉による方法は、通常のコンクリート用ドリルでもよいが、資料吸引穴がつけられている特殊ビット。試料補集器、穿孔深さ調整用ストッパー、吸引掃除機が組み合わされたドリルがある。粗骨材の混入によって測定値にばらつきが生じやすいので近接する 3 箇所以上で採取するのがよい。

##### ・はつり片

<sup>13)</sup> 腐食防食研究委員会：「委員会報告「硬化コンクリートに含まれる塩分の分析方法 (案)」」、コンクリート工学、Vol.22、No.12、p p.5-9、(1984)

はつり片は、はつり調査の際に容易に採取できるが、採取箇所の深さが不正確であり、さらに深さ方向で断面積が一樣でないので塩化物量の分布を調査するには適さない。鉄筋に接するコンクリートの塩化物量の測定などには用いてもよいが、その場合でもできるだけ一樣な厚さのものとするのが望ましい。

## ② 試料調整方法

コア試料は、コンクリート中での塩化物量の分布を知るためには、表面から薄い円盤状に切断していく。切断する円盤の厚さは5～15mmが適当であるが、外来塩化物の場合は、表面近くで塩化物含有量が大きく変化するので、表面近くでは薄く、内部に行くにつれて厚くするとよい。円盤の厚さが薄い場合は、塩化物の溶脱をさけるため乾式で切断することが望ましい。

試料は、標準網ふるい145 $\mu$ mを全通するように震動ミルを用いて、微粉碎し、風乾して分析用試料とする。塊状の試料は、ジョークラッシャや金属製乳鉢で5mm以下に粗粉碎してから微粉碎する。試料粉碎過程では、器具の汚れや他試料の混入に十分注意しなければならない。

## ③ 塩化物の抽出

分析用試料の1～40gをビーカーに正確に量り取り、資料1gに対して5ml以上の2規定の硝酸を加え、時計皿でふたをして約5分間静かに煮沸させ、放冷する。時計皿の水滴をイオン交換水でビーカーに洗いいれたあと、5種Cのろ紙を使ってろ過し、ろ紙上の固形物をイオン交換水で5～7回洗浄する。ろ液をメスフラスコで定容とし、分析用の抽出液とする。

## ④ 塩化物イオンの定量分析

抽出液試料から一定量をホールピペットで分取し、JIS K 0101「工業用水試験方法」のチオシアン酸水銀(Ⅱ)吸光光度法、イオン電極法、硝酸銀滴定法のいずれかの方法で塩化物イオン濃度を適量分析する。その際、いずれの場合も必ず空試験を行い、ブランク値を得て適量値を補正する。

## ⑤ 塩化物量の計算

塩化物量の計算は、下式による。

$$C = a \times \frac{V}{V_s} \times \frac{100}{w} \times 0.001 \quad (17)$$

$$C_v = C \times M \times 0.01 \quad (18)$$

$C_v$  : コンクリートの単位容積あたりのCl<sup>-</sup>含有量 (kg/m<sup>3</sup>)

$C$  : 分析試料中のCl<sup>-</sup>含有量 (wt%)

- $a$  : 分取液中の Cl 定量分析値 (mg)
- $V$  : 抽出液量 (ml)
- $V_s$  : 分取液量 (ml)
- $w$  : 資料量り取り量 (g)
- $M$  : コンクリートの単位容積質量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

b) 劣化因子指数  $\alpha_2$  の評価

鉄筋位置での塩化物イオン濃度  $C_t$  について、データが複数ある場合は図 6 のように原点回帰分析により、現データ単一の場合はそれと原点とを回帰し、直線の傾きが塩分浸透での劣化因子指数  $\alpha_2$  ( $\text{year}/\text{mm}^2$ ) となる。

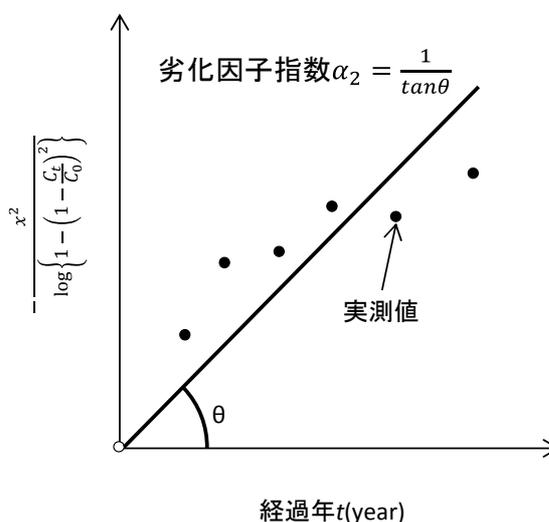


図 12 劣化因子指数  $\alpha_2$  の算定例

(b) 推定方法

実測が困難な場合は、劣化因子指数  $\alpha_2$  ( $\text{year}/\text{mm}^2$ ) は式 (19) による。<sup>14</sup>

$$\alpha_2 = \frac{1}{\pi D} \tag{19}$$

$$D = 65 \times 10^n, \quad n = -3.9 \left(\frac{W}{C}\right)^2 + 7.2 \left(\frac{W}{C}\right) - 2.5 \tag{20}$$

$D$  : みかけの拡散係数 ( $\text{mm}^2/\text{year}$ )

$W/C$  : 水セメント比 (-)

一般的な条件として、 $W/C=0.5$  とすると、 $D=86.68(\text{mm}^2/\text{year})$ 、 $\alpha_2=3.67 \times 10^{-3}(\text{year}/\text{mm}^2)$  となる。

<sup>14</sup> 日本建築学会：“建築工事標準仕様書 JASS 5”、p.600、(2009)

### 3) $F-t$ 曲線の決定

1)での評価式と2)で得られた劣化因子指数  $\alpha_2$  から、塩化物イオンの作用量  $F_2$  と経過年  $t$  の関係 ( $F-t$  曲線) を決定する。

### (3) $D-F$ 曲線の評価 (図3の⑤~⑦対応)

#### 1) 鉄筋の腐食減量 $D_3$ と塩化物イオンの作用量 $F_2$ との関係

鉄筋の腐食減量  $D_3$  と塩化物イオンの作用量  $F_2$  との関係は式 (23)<sup>15</sup>とする。

$$D_3 = \beta_2 F_2 \quad (23)$$

$D_3$ : 鉄筋の腐食減量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )

$\beta_2$ : 塩分浸透による鉄筋腐食に関する材料劣化指数

$F_2$ : 塩化物イオンの作用量 ( $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{year}$ )

材料劣化指数  $\beta_2$  は対象物の環境条件, 材料条件などで定まり, その構造物が潜在的に有する鉄筋腐食の進行の程度を一律に評価できる。

#### 2) 塩分浸透での材料劣化指数 $\beta_2$ の算定

材料劣化指数  $\beta_2$  は対象部位の鉄筋の腐食減量  $D_{\text{obs}}$  を実測し求める。実測が困難な場合は推定式により求める。

##### (a) 実測による評価

##### a) 鉄筋の腐食減量の計測方法

鉄筋の腐食減量  $D_{\text{obs}}$  の測定には直接法と間接法がある。直接法では腐食後の鉄筋の断面減少率をノギスなどで計る方法、鉄筋を取出し 10%クエン酸 2 アンモニウム溶液中に浸漬しさびを溶解させてコンクリートに埋め込む前の鉄筋重量からさび溶解後の重量を差し引き腐食減量として直接測定する方法などがある。間接法には、自然電位の測定、分極抵抗の測定などがある。自然電位とは、コンクリート中の鉄筋がその腐食状態に対応して示す電位のことであり、自然電位を測定することによって鉄筋の腐食状態を推定する。自然電位法の測定は直流電圧計と照合電極を用いて行う。

##### b) 材料劣化指数 $\beta_2$ の算定

---

<sup>15</sup> 橘高義典：“塩害による鉄筋腐食における劣化因子の作用量と材料劣化度との関係について”、2013年度日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.423-424 (2013)

実測により得られた鉄筋の腐食減量  $D_{obs}$  について、データが複数ある場合は図 6 のように原点回帰分析により、現データ単一の場合はそれと原点とを基本式で回帰し、その傾きを塩分浸透での材料劣化指数  $\beta_2$  ( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mm}$ ) とする。

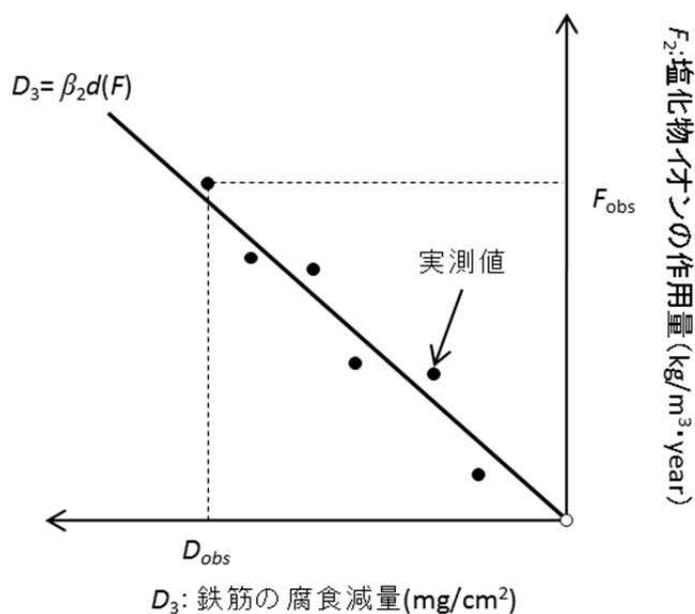


図 13 塩分浸透での材料劣化指数  $\beta_2$  の算定例

(b) 推定方法

鉄筋の腐食減量  $D_3$  は鉄筋の腐食速度  $V_t$  により式 (21) で表せる。

$$D_3 = \int_0^{t_n} V_t dt \quad (21)$$

$D_3$  : 鉄筋の腐食減量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )

$V_t$  : 鉄筋の腐食速度 ( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year}$ )

$V_t$  は一般式 (22) で表せる<sup>16</sup>。

$$V_t = \frac{1}{\sqrt{x}} (a C_t + b) \quad (22)$$

$$a = 6.0, b = 0.4W/C - 31.7$$

$W/C$  : 水セメント比 (%)

式 (22) を式 (21) に代入し、式 (23) の  $D-F$  関係式を得る。

<sup>16</sup> 日本コンクリート工学協会, "コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム委員会報告書・論文", 鳥取式, pp.204, (2004)

$$D_3 = \frac{1}{\sqrt{x}}(aF + bt_n) \quad (23)$$

### 3) $D$ - $F$ 曲線の決定

評価された材料劣化指数  $\beta_2$  より、鉄筋の腐食減量  $D_3$  と塩化物イオンの作用量  $F_2$  の関係 ( $D$ - $F$  曲線) を決定する。

### (4) 健全性一次評価 (図 3 の⑧対応)

図 14 に塩化物イオンの作用量  $F_2$  と鉄筋の腐食減量  $D_3$  の関係の推定例を示す。塩化物イオンの作用量  $F_2$  と経過年  $t$  の関係 ( $F$ - $t$  曲線)、鉄筋の腐食減量  $D_3$  と塩化物イオンの作用量  $F_2$  の関係 ( $D$ - $F$  曲線) より、供用期間  $t_{\text{eva}}$  での鉄筋の腐食減量  $D_{\text{eva}}$  を求め、式 (24) を満足するかどうかを評価する。

$$D_{\text{eva}} < D_0 \quad (24)$$

$D_{\text{eva}}$  : 供用期間  $t_{\text{eva}}$  での鉄筋の腐食減量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )

$D_0$  : ひび割れが生じるときの鉄筋の腐食減量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )

ひび割れが生じるときの鉄筋の腐食減量  $D_0$  は「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説<sup>11)</sup>」に従い、根拠となる資料がない場合には  $10\text{mg}/\text{cm}^2$  とする<sup>17)</sup>。

鉄筋の腐食減量  $D_{\text{eva}}$  が式 (24) を満足すれば評価年においては、塩分浸透による劣化に関しては健全とする。満足しない場合、あるいは長期的な健全性評価を行う場合は、 $P$ - $D$  曲線の評価へ進み、 $PDFt$  曲線を作成し健全性二次評価を行う。

また、異なる種類の劣化因子 (中性化) の作用で同種である鉄筋の腐食減量  $D$  の評価値が算出された場合は、劣化度の大きな方を選択し、劣化因子の種類に応じた評価を行う。

<sup>17)</sup> 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書「維持管理編」, pp.95, 2008

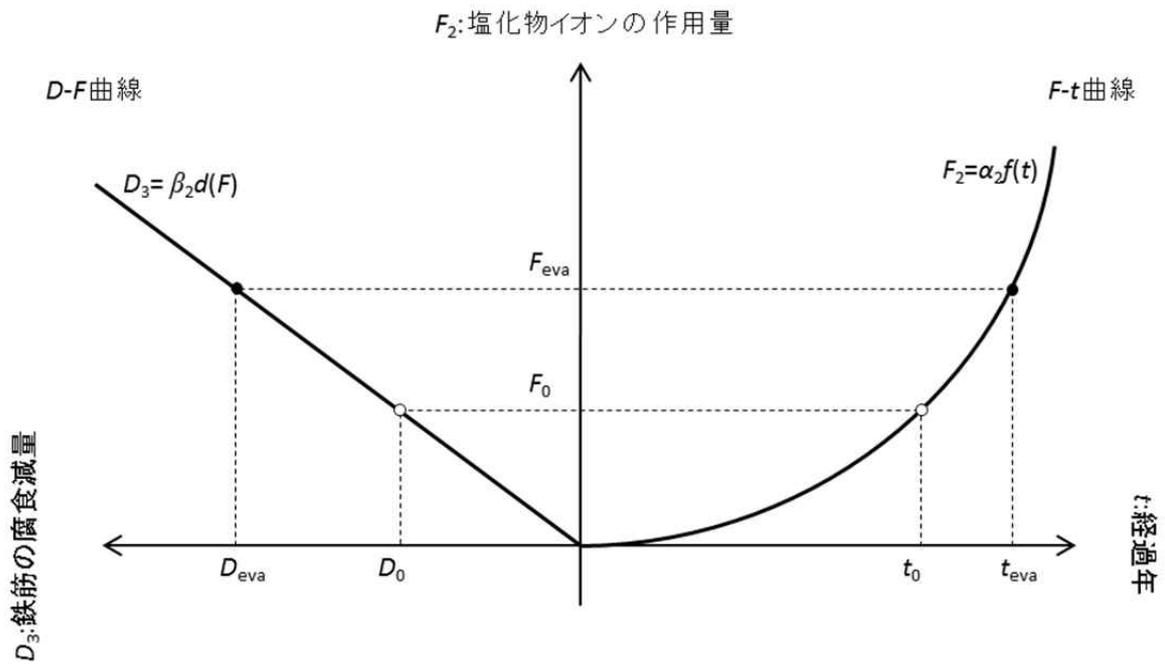


図 14 塩化物イオンの作用量  $F_2$  と鉄筋の腐食減量  $D_3$  の関係の推定例

### 3.3 熱

#### 3.3.1 評価プロセス

図 15 に熱劣化での評価プロセスを示す。本評価は、熱以外の複合劣化作用も考慮している。F-t 曲線、D-F 曲線による評価について詳細に記す。

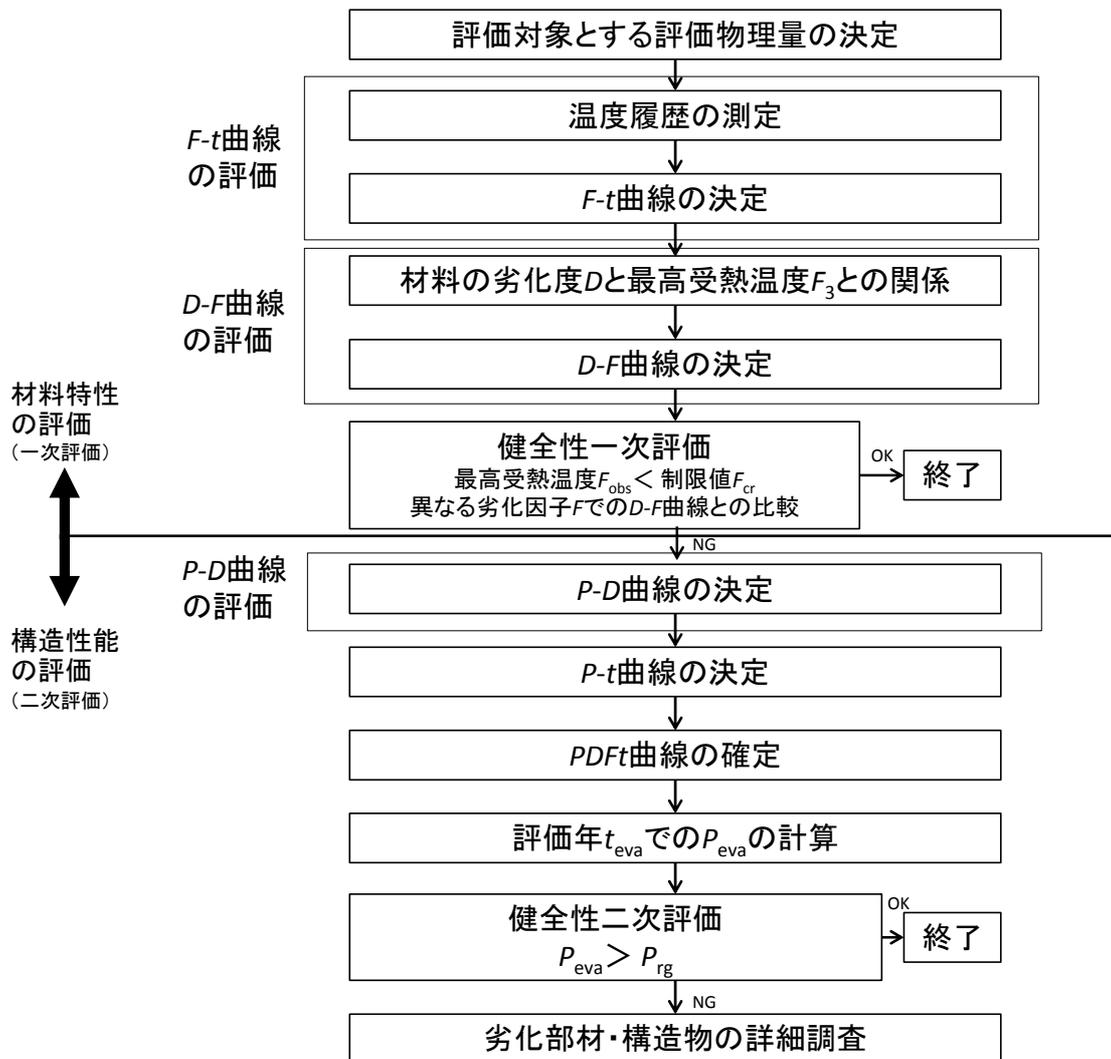


図 15 熱劣化での評価プロセス

#### 3.3.2 評価方法

##### (1) 評価対象とする事象の決定 (図 3 の①対応)

対象とする劣化因子は熱とし、着目する劣化因子の作用量  $F$  は最高受熱温度  $F_3$ 、材料の劣化度  $D$  は圧縮強度低下率  $D_1$ 、ヤング係数低下率  $D_2$ 、必要に応じてひび割れ抵抗性  $D_6$  などとする。

(2)  $F-t$  曲線の評価 (図 3 の②～④対応)

1) 温度履歴の測定

最高受熱温度  $F_3$  は評価部位での最高受熱温度とする。そのため、最高受熱温度  $F_3$  を得るためには、評価部位での温度履歴が必要となる。

(a) 実測による評価

評価部位の温度測定は、熱電対を評価部位の表面に取り付けて行うこととし、一部材につき 3 箇所以上測定する。測定は、稼働時及び非稼働時の両方で継続的に行う。図 16 に実測による温度計測例を示す。

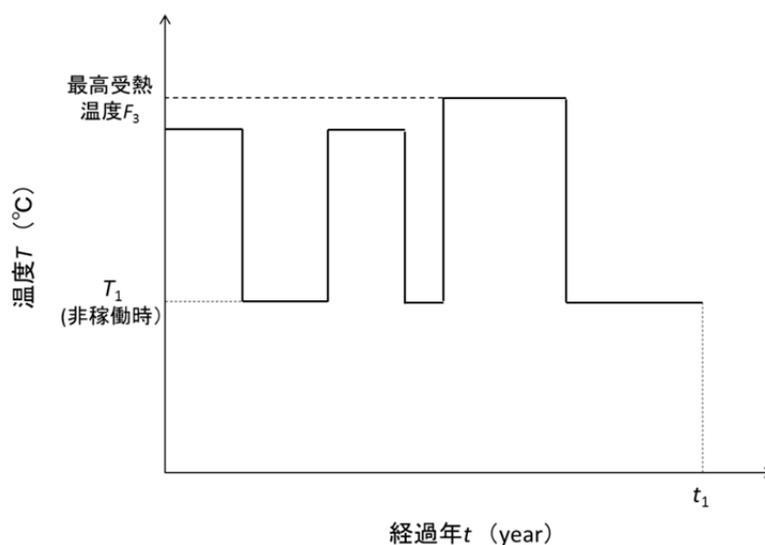


図 16 実測による温度

(b) 推定による評価

温度履歴を推定する場合は、解析などによる。

2)  $F-t$  曲線の決定 (図 3 の④対応)

最高受熱温度  $F_3$  は、過去の最高受熱温度以上の温度を一日以上連続して受けた場合に更新する。図 17 に最高受熱温度  $F_3$  と経過年  $t$  との関係 ( $F-t$  曲線) 例を示す。

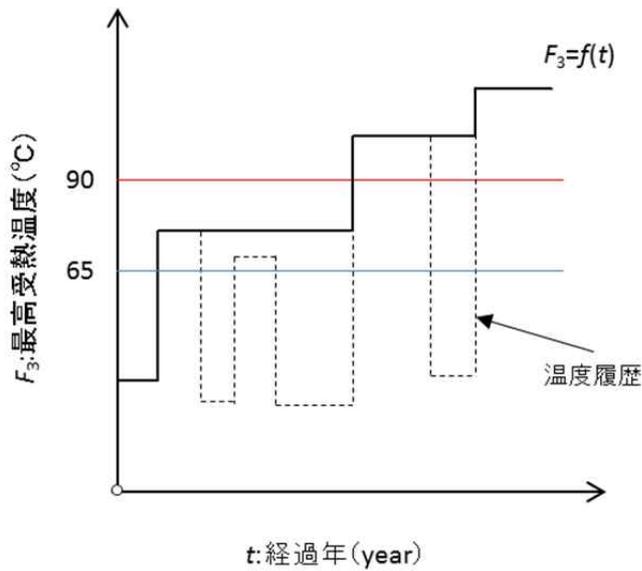


図 17 最高受熱温度  $F_3$  と経過年  $t$  との関係 ( $F-t$  曲線) 例

(3)  $D-F$  曲線の評価 (図 3 の⑤～⑦対応)

1) 材料の劣化度  $D$  と最高受熱温度  $F_3$  との関係

ここでは、最高受熱温度  $F_3$  とコンクリートの圧縮強度低下率  $D_1$ 、ヤング係数低下率  $D_2$ 、必要に応じてひび割れ抵抗性  $D_6$  の関係の評価する。

(a) 圧縮強度低下率  $D_1$

最高受熱温度  $F_3$  とコンクリートの圧縮強度低下率  $D_1$  の関係式より求める<sup>18</sup>。最高受熱温度  $F_3$  と圧縮強度低下率  $D_1$  の関係には式 (25)、(26) がある。図 18 に最高受熱温度  $F_3$  と圧縮強度低下率  $D_1$  の関係例、表 10 に圧縮強度での代表的な骨材における骨材定数  $G$  の例<sup>19</sup>を示す。

$$D_1 = 1 - (1 - 0.2\theta + 0.45\theta^2 - 0.0436\theta^3)\exp(-0.413\theta) \quad (25)$$

$$\theta = G \frac{F_3 - 20}{100} \quad (26)$$

$F_3$  : 最高受熱温度 (°C) (ただし、 $F_3 = 20^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ )

$G$  : 骨材定数

<sup>18</sup> 安部武雄、大塚貴弘、小林裕、道越真太郎：“高温度における普通強度コンクリートの力学的特性”、日本建築学会構造系論文集、pp7-13、(2007)

<sup>19</sup> Abe, T et al.:” Mechanical Properties of Moderate Strength Concrete at High Temperatures”, Journal of structural and construction engineering, AIJ (615), pp.7-13, (2007)

表 10 圧縮強度での代表的な骨材における骨材定数  $G$  の例<sup>19</sup>

	砂岩	玄武岩	石灰岩
$G$	1.2	1.4	1.6

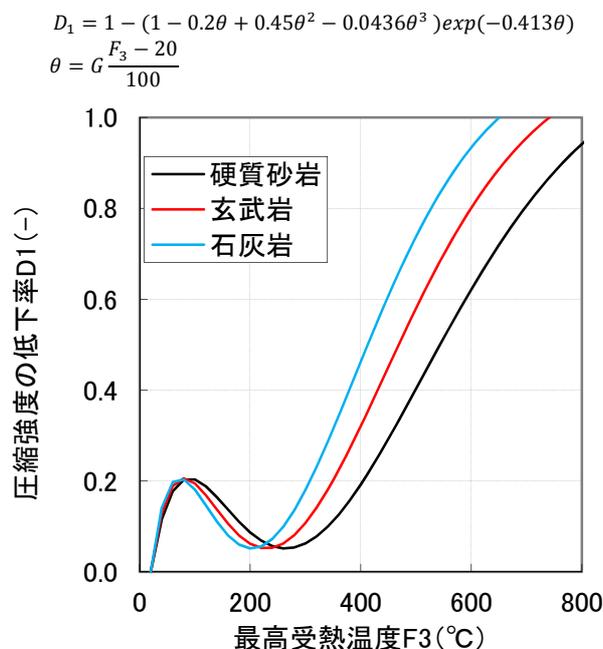


図 18 最高受熱温度  $F_3$  と圧縮強度低下率  $D_1$  の関係例

(b) ヤング係数低下率  $D_2$

圧縮強度低下率  $D_1$  と同様に、最高受熱温度  $F_3$  とコンクリートのヤング係数低下率  $D_2$  の関係式より求める<sup>18</sup>。最高受熱温度  $F_3$  と圧縮強度低下率の関係には式 (27)、(28) がある。図 19 に最高受熱温度  $F_3$  とヤング係数低下率  $D_2$  の関係例、表 11 にヤング係数での代表的な骨材における骨材定数  $G$  の例を示す<sup>20</sup>。

$$D_2 = 1 - 34.0 \exp(-0.234\theta) \tag{27}$$

$$\theta = G \frac{F_3 - 20}{100} \tag{28}$$

$F_3$  : 最高受熱温度 (°C) (ただし、 $F_3 = 20^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ )

$G$  : 骨材定数

<sup>20</sup> U.シュナイダー著、森永繁、山崎庸行、林章二訳：“コンクリートの熱的性質”、技報堂、(1983)

表 11 ヤング係数での代表的な骨材における骨材定数  $G$  の例<sup>19</sup>

	砂岩	玄武岩	石灰岩
$G$	1.6	2.0	1.4

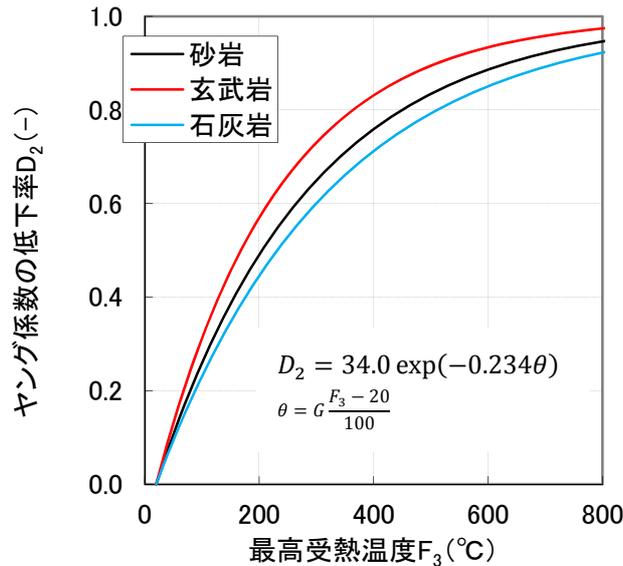


図 19 最高受熱温度  $F_3$  とヤング係数低下率  $D_2$  の関係例

(c) ひび割れ抵抗性  $D_6$

ひび割れ抵抗性  $D_6$  は、破壊エネルギー  $G_F$  による。CEB<sup>21</sup> や土木学会<sup>22</sup> では、圧縮強度から破壊エネルギーを評価する式が提案されている。ここでは、提案式を用い、3.3.2-(3)-1)-(a) に示した圧縮強度から最高受熱温度  $F_3$  とコンクリートの破壊エネルギー低下率の関係を評価する。以下に、影響係数  $\alpha(T)$  を用いて、式(29)及び式 (30)により高温加熱の影響を受けたコンクリートの破壊エネルギーと圧縮強度の関係を示す (2.3 熱影響を受けたコンクリートのひび割れ発生に関する検討、参照)。

$$G_F(T) = \alpha(T) \cdot G_{F0} \left( \frac{F_C(20)}{10} \right)^{0.7} \quad (29)$$

$$G_F(T) = \alpha(T) \cdot 10(d_{\max})^{1/3} \cdot F_C(20)^{1/3} \quad (30)$$

<sup>21</sup> CEB Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin d'Information, No.203, pp.2-1-2-16, July, 1991

<sup>22</sup> 土木学会 : 2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編] , 2013.3

$$\alpha(T) = -0.06 \left( \frac{T-100}{100} \right)^2 + 0.28 \frac{T-100}{100} + 1.54 \quad (31)$$

ここに、 $G_F(T)$ ：加熱温度 $T$ における破壊エネルギー (N/m)

$\alpha(T)$ ：加熱温度  $T$  における影響係数

$d_{\max}$ ：粗骨材の最大寸法 (mm)

$F_C(20)$ ：20°Cにおける圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$T$ ：加熱温度 (°C) {100 ≤  $T$  ≤ 800}

$G_{F0} = 0.025$  (N・mm/mm<sup>2</sup>)       $d_{\max} = 8\text{mm}$

0.030 (N・mm/mm<sup>2</sup>)       $d_{\max} = 16\text{mm}$

0.058 (N・mm/mm<sup>2</sup>)       $d_{\max} = 32\text{mm}$

## 2) $D$ - $F$ 曲線の決定 (図 15 の⑥参照)

対象とした材料の劣化度  $D$  に対応する評価式を用いて、材料の劣化度  $D$  と最高受熱温度  $F_3$  との関係( $D$ - $F$  曲線)を決定する。

## (4) 健全性一次評価 (図 3 の⑧対応)

図 20 に最高受熱温度  $F_3$  と材料の劣化度  $D$  の関係の推定例を示す。最高受熱温度  $F_3$  と経過年  $t$  の関係 ( $F$ - $t$  曲線)、材料の劣化度  $D$  と最高受熱温度  $F_3$  の関係( $D$ - $F$  曲線)より、供用期間  $t_{\text{eva}}$  での最高受熱温度  $F_{\text{eva}}$  を求め、式 (32) を満足するかどうかを評価する。

$$F_{\text{eva}} < F_{\text{cr}} \quad (32)$$

$F_{\text{eva}}$ ：供用期間  $t_{\text{eva}}$  での最高受熱温度 (°C)

$F_{\text{cr}}$ ：最高受熱温度の制限値 (°C)

最高受熱温度の制限値  $F_{\text{cr}}$  は「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説<sup>11)</sup>」に従い、一般部では 65°C、局部では 90°C とする。

最高受熱温度  $F_{\text{eva}}$  が式 (32) を満足していれば、ここで健全性評価を終了とし、満足していなければ 3、4 章の  $P$ - $D$  曲線の評価へ進み、 $PDFt$  曲線を作成し、健全性二次評価を行う。

また、異なる種類の劣化因子 ( $F_1$ 、 $F_2$ ... $F_n$ ) の作用で同種である材料劣化度  $D$  (圧縮強度低下率  $D_1$ 、ヤング係数低下率  $D_2$  等) の評価値が算出された場合は、劣化度の大きな方を選択し、劣化因子の種類に応じた一次評価を行う。

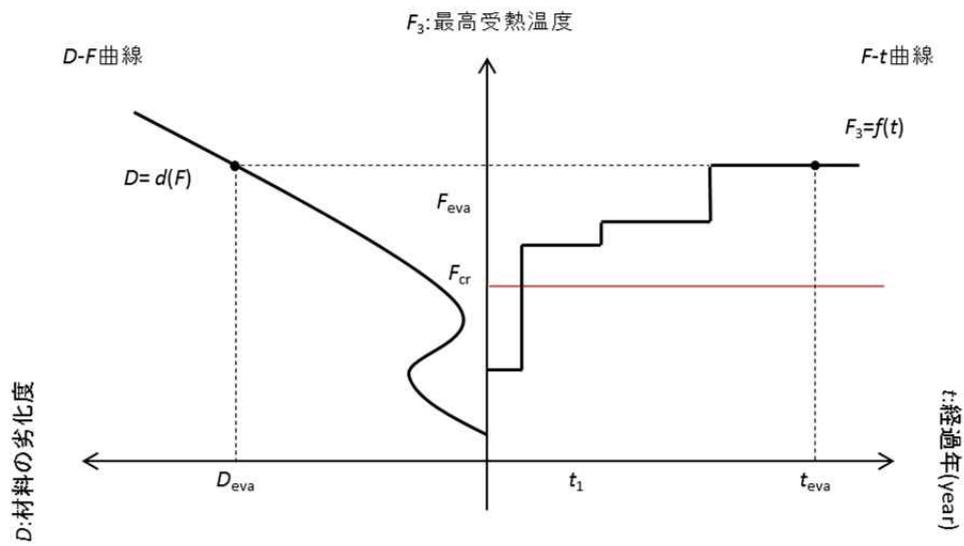


図 20 最高受熱温度  $F_3$  と材料の劣化度  $D$  の関係の推定例

## 4. 構造性能の評価

### 4.1 評価の概要

材料特性の評価（一次評価）で、劣化因子の作用量あるいは、材料劣化度が制限値を超える場合には構造性能の評価（二次評価）を行う。二次評価では、劣化の進行が予想される柱・梁、壁の部材の健全性評価を行う。

この構造性能の評価には、数値解析による性能評価、設定された地震力に対する応答解析による性能評価等の方法があるが、実際の建造物の性能  $P$  を実測することが難しいこと、 $P$  と材料の劣化度  $D$  との関係は地域性や作用因子に関わらず普遍性があることなどから、本事業の長期健全性評価（案）では、柱・梁部材と壁部材のせん断耐力を計算するエクセル計算シートを用いた簡便な評価方法を使用する。

エクセル計算シートを用いて  $P$ - $D$  曲線を決定し、これまでに得られた  $F$ - $t$  曲線、 $D$ - $F$  曲線を用いて、 $t$  及び  $P$  の数値を数点プロットすることで、経過年  $t$  と建造物の性能  $P$  との関係（ $P$ - $t$  曲線）を得ることができる。次に、 $PDFt$  曲線を用いて、推定したい年度  $t_{eva}$  での建造物の性能  $P_{eva}$  を求め、制限値に対する比較を行うことで、構造性能を評価することができる。

### 4.2 せん断耐力による構造性能の評価

本事業における構造性能の評価について、図 3 の評価プロセスにおける⑨ $P$ - $D$  曲線の決定に対応するものとして、原子力発電施設は壁部材、大断面部材が多く使用されており、せん断耐力に対する建屋の健全性評価が主に行なわれていることから、建造物の性能  $P$  の評価物理量を表 2 に示す部材の耐荷力  $P_2$  とした。さらに部材の耐荷力の中でも、せん断耐力に関する一般的な物理量であるせん断強度保持率について着目した。せん断強度保持率とは、1 からせん断耐力低下率を引いたもので、この物理量でせん断強度がどれだけ保持されているかを表すこととした。また、せん断強度保持率は耐力比と同義である。

#### 4.2.1 せん断耐力

現行の一般建造物に対する耐震設計では、一次設計（許容応力度計算：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説<sup>23</sup>による）と二次設計（保有水平耐力計算：部材の終局強度が建造物に応じて要求される水平耐力を上回っていることを確認する。部材の終局強度は「建築物の構造関係技術基準解説書<sup>24</sup>」に記載されている荒川式、靱性指針式で算出）の 2 段階で構成されている。一次設計は建造物の使用期間中に数度経験する可能性のある中小地震動に対して、建造物が損傷することなく、継続使用ができることを確認するものであり、基本的には弾性設計である。二次設計は極めて稀に発生する大地震での人命保護が目標とな

<sup>23</sup> 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、日本建築学会、2010

<sup>24</sup> 建築物の構造関係技術基準解説書、国土交通省住宅局建築指導課・国土交通省国土技術政策総合研究所・建築研究所・日本建築行政会議監修、2007、2015

っており、建造物が倒壊しないことを確認するものであり、局所的な塑性化を許容している。

#### 4.2.2 せん断耐力計算用エクセル計算シート

地震時のせん断力抵抗機構として、本事業では表 12 に示す、柱・梁部材と壁部材のせん断耐力の計算用のエクセル計算シートを作成している。

各エクセル計算シートの中には、各設計規準の設計例と計算結果を含む複数のワークシートで構成されている。エクセル計算シートは、いずれも部材形状、使用材料、材料劣化度をインプットする。ただし、各設計規準による試算は、部材寸法、使用材料強度、境界条件、荷重・外力条件などが不明であるため、各規準書に記載のある設計例を想定した健全部材の耐力と経年劣化した部材の耐力を算定し、健全部材の耐力に対するせん断強度保持率（耐力比）をアウトプットする計算シートとなっている。このエクセル計算シートを用いて  $P-D$  曲線を決定する。

表 12 エクセル計算シートの一覧

番号	エクセル計算シートの名称	出典とした基準名	対象となる地震(注)	対象部材	エクセル計算シートの説明
01	梁・柱のせん断終局強度(荒川式)	原子力施設 RC 規準	大地震	柱・梁	柱・梁部材を対象に、大地震時に対する安全性を検証するための終局強度を算定する計算シートである。多数の実験結果に基づく回帰式である荒川式を用いた計算シートである。実務設計で一般的に使用されている <u>基本的な耐力式</u> である。
02	柱・梁のせん断強度(A法)	靱性指針	大地震	柱・梁	01と同じケースで使用できる計算シートであるが、01の荒川式より高いせん断耐力を示す。
03	梁・柱のせん断に対する算定	RC 規準	中小地震	柱・梁	中小地震に対する使用性・損傷制御性を検証する許容応力度(長期荷重・短期荷重)を算定する計算シートである。
04	耐震壁のせん断終局強度(荒川式)	原子力施設 RC 規準	大地震	壁	壁部材を対象に、大地震時に対する安全性を検証するための終局強度を算定する計算シートである。多数の実験結果に基づく回帰式である荒川式を用いた計算シートである。実務設計で一般的に使用されている <u>基本的な耐力式</u> である。
05	耐震壁のせん断強度	ストラット&タイの方法 <sup>25</sup>	大地震	壁	04と同じケースで使用できる計算シートである。ストラット&タイの方法(半理論式)を用いた計算シートであり、実験結果との整合性が高い。04の荒川式より高いせん断耐力となる。なお、学会等でコンセンサスが得られた方法ではなく、個人の研究者の論文に基づくものである。06より詳細な計算となる。
06	耐震壁のせん断強度	靱性指針	大地震	壁	04と同じケースで使用できる計算シートである。トラス&アーチ機構に基づく半理論式を用いた計算シートであり、実験結果との整合性が高い。04の荒川式より高いせん断耐力となる。建築学会の指針式であり、05より簡便な計算である。
07	壁部材の許容せん断力	RC 規準	中小地震	壁	03と同じケースで使用できる計算シートであるが、対象部材が壁である点が異なる。

(注) 大地震とある表記は、大地震時に対する安全性を検証するための終局強度を算定し、構造物が大地震に対して倒壊しないことを確認することを意味する。中小地震とある表記は、中小地震に対する使用性・損傷制御性を検証(長期荷重・短期荷重)し、中小地震動に対して、構造物が損傷することなく、継続使用できることを確認することを意味する。

<sup>25</sup> 塩原等, コンクリート工学: 耐震壁のせん断耐力(タイ・ストラットモデル) -力の分配と下界の定理, Vol 25, No.8 pp.101-114, 1987;論文 No. 87. 8-1

エクセル計算シートは、いずれも部材形状、使用材料、材料劣化度をインプットし、健全時と経年劣化時のせん断耐力を導出し、耐力比をアウトプットする。なお、エクセル計算シートのアウトプットとなる耐力比とは、*P-D* 曲線で評価するせん断強度保持率と同義である。

各エクセルファイルの中には、各設計規準の設計例と計算結果を含む複数のワークシートで構成されている。ただし、各設計規準の設計例による試算は、部材寸法、使用材料強度、境界条件、荷重・外力条件などが不明であるため、各規準書に記載のある設計例を想定した構造部材断面に対する健全時耐力と経年劣化時耐力を算定し、健全部材耐力に対するせん断強度保持率（耐力比）をアウトプットする計算シートとなっている。

#### 【01,02,04,05,06 のエクセル計算シートについて】

大地震時に対する安全性を検証する場合、実務設計ではよく使用されている基本的な耐力式である荒川式を用いた 01（柱・梁）と 04（壁）のエクセル計算シートの使用が基本である。

しかし、01 と 04 の荒川式で算出したせん断耐力では耐力不足であるが、より高精度に耐力を与える半理論式<sup>26</sup>の 02（柱・梁）、05（壁）、06（壁）の計算シートを使用すると基準を満たしている可能性がある。健全時耐力から経年劣化時の耐力低下率で評価する場合は、より高精度な耐力式を用いた 02、05、06 の計算シートを使用してもよい。なお、05（壁）と 06（壁）の違いについて、05 は学会等の委員会でコンセンサスが得られた方法ではなく、個人研究者の論文に基づくものであるのに対し、06 は建築学会の指針式に基づくものである。06 の指針式は学会で作成されたものであるため、05 よりも 06 の使用が推奨される。

#### 【03,07 のエクセル計算シートについて】

03（柱・梁）及び 07（壁）のは、中小地震に対する使用性・損傷制御性を検証するいわゆる許容応力度計算規準（長期荷重・短期荷重）のエクセル計算シートである。前述したように、わが国の鉄筋コンクリート柱・梁・壁部材の配筋量は、大地震を想定した 2 次設計で決定されることがほとんどである。したがって構造材料の経年劣化による構造性能を評価する場合、最も余裕度のない終局強度を検証するのが合理的である。なぜならば終局耐力の低下率が許容内であれば、その他の構造性能も満たされている可能性が高いからである。ただし、柱部材（重要構造物の梁部材を含む）のように、長期荷重下でせん断ひび割れを許容しない場合は、荷重・外力の諸条件にもよるが、長期荷重で部材寸法が決定する可能性があるため、03 の計算シートを使用して検討する。その他、柱・梁部材の 03 ファイルの短期荷重及び壁部材の 07 ファイルは、配筋量に対して支配的ではないが、上述のせん断ひび割れなど一次設計で要求される使用性・損傷制御性を検討するための計算シート

<sup>26</sup> 構造性能に関わる理論式に実験で得られたデータを代入して導出した式

である。ただし、一次設計を行う場合、断面詳細だけではなく、長期荷重と短期荷重条件や構造部材の境界条件などの設計条件が必要になる。

エクセル計算シートを構造性能の評価に用いる際は、いずれかのエクセル計算シートを用いることになる。エクセル計算シートの選定にあたっては、評価で要求される構造性能が一次設計を対象としたものか、二次設計を対象としたものかを最初に判断する。次に対象とする部材が柱・梁であるか、壁であるか、さらには原子力施設の実務設計でよく使われる荒川式を用いるかどうかを判断し、構造性能の評価に用いるエクセル計算シートを決定する。エクセル計算シートの選定フローを図 21 に示す。

エクセル計算シートには、構造断面諸元、使用材料強度、材料劣化レベルなどをインプットすることによって、せん断強度保持率を算出し、許容内であるか判断する。せん断強度保持率が評価者側で定めた許容値以上の場合、FEM 等を用いた、さらに詳細な検討が必要になる。

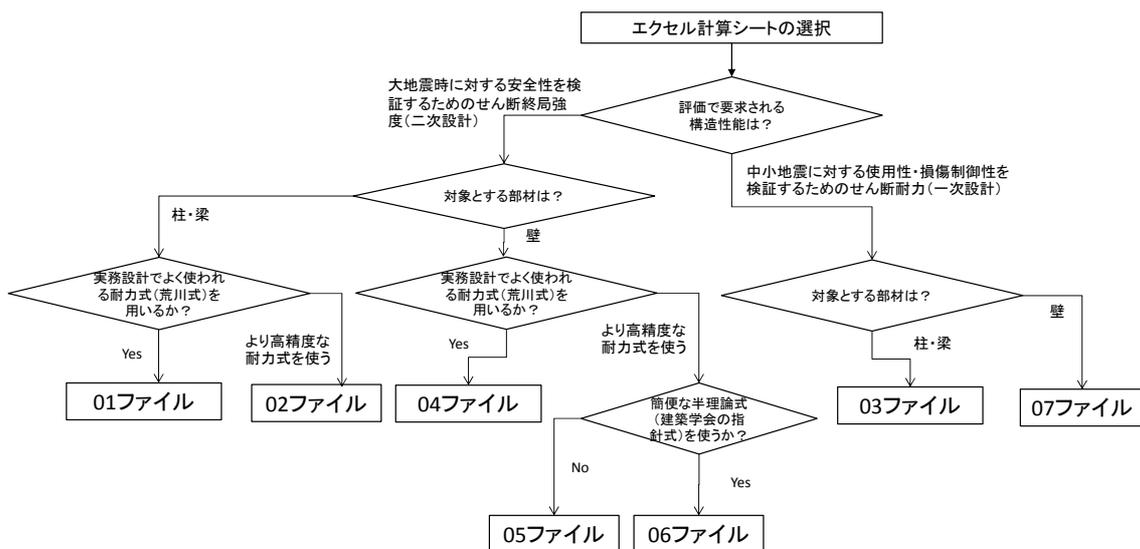


図 21 エクセル計算シートの選定フロー

材料の部材条件としての入力データは以下の通りである。

- ・ 部材のクリアスパン  $L(\text{mm})$
- ・ 部材のせいと幅  $D_b(\text{mm})$
- ・ 1組のせん断補強筋の断面積  $a_w(\text{mm}^2)$
- ・ せん断補強筋間隔  $s(\text{mm})$
- ・ せいと横方向のかぶり厚  $C_d, C_s(\text{mm})$
- ・ せん断補強筋径  $d_s(\text{mm})$
- ・ 中子筋の本数  $N_s$ :

- 主筋中心からせい面，側面までの距離  $d_{ct}$  ,  $d_{cs}$  (mm)
- 主筋径  $d_s$ (mm)
- 主筋の本数  $N_t$
- ヒンジ領域の回転角  $R_p$  (rad)

エクセル計算シートの表示イメージを以下に示す。

01 梁・柱のせん断終局強度(荒川式)\_原子力施設 RC 規準による計算シート

The spreadsheet shows the following data and formulas:

項目	値	単位
(1) 部材の幅 b [mm]	650	mm
(2) 部材のせい D [mm]	950	mm
(3) 引張鉄筋から引張主筋重心までの距離 d [mm]	72	mm
(4) 引張主筋断面積 $A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	4783	mm <sup>2</sup>
(5) せん断補強筋の降伏強度 $\sigma_{sy}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	785	N/mm <sup>2</sup>
(6) 1組のせん断補強筋の断面積 $A_{sv}$ [mm <sup>2</sup> ]	507	mm <sup>2</sup>
(7) せん断補強筋の間隔 s [mm]	100	mm
(8) コンクリート圧縮強度 $F_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	42	N/mm <sup>2</sup>
(9) せん断スレン比 $M(Q-d)$ (1≦M(Q-d)≦5)	1.35	
(10) 軸力 N [N]	5341000	N
(11) コンクリートの圧縮強度低下率 [%]	40	%
(12) せん断補強筋の腐食量 [%]	20	%

せん断終局強度 [N]	劣化耐力	健全耐力	耐力比	
梁 (min)	1955946	2615762	1956	0.75
梁 (mean)	2230226	2996796	2230	0.74
柱 (min)	2387965	3047660	2388	0.78
柱 (mean)	2662144	3428624	2662	0.78

- ① : 使用した計算規準書及び設計例を記述
- ② : 計算式の基本仮定
- ③ : 黄色のセルに設計例の部材寸法、使用材料強度を入力
- ④ : ピンクのセルに材料劣化度を入力 (コンクリートは強度低下%、鉄筋は腐食量%)
- ⑤ : 基本的な荒川式 (最小値と平均値)
- ⑥ : なし
- ⑦ : 設計例の断面及び配筋図
- ⑧ : ボタンを押すと、材料劣化レベル 40 (強度低下約 40%) まで自動計算し、計算例シートに PDFt 曲線の第 3 象限 P-D 曲線をグラフ化
- ⑨ : 材料劣化を考慮したせん断耐力 (梁・柱の最小値と平均値)
- ⑩ : 健全時のせん断耐力 (梁・柱の最小値と平均値)
- ⑪ : ⑨/⑩で健全時耐力に対する耐力比
- ⑫ : 本計算シート (設計例は靱性指針の P.383 4 階 C4 柱)
- ⑬ : ⑧の計算ボタンにより、本シートの計算結果
- ⑭ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例 (P.176 の柱) の計算シート
- ⑮ : ⑧の計算ボタンにより、⑭の計算結果を出力するシート

## 02 柱・梁のせん断強度(A法)\_靱性指針によるエクセル計算シートの説明

The screenshot shows an Excel spreadsheet with columns labeled A through X and rows numbered 1 through 30. The spreadsheet contains various input fields, calculation formulas, and output results. It includes diagrams of column cross-sections and reinforcement layouts. The spreadsheet is divided into sections 1 through 18, corresponding to the numbered list below.

- ① : 使用した計算規準書及び設計例を記述
- ② : 計算式の基本仮定
- ③ : 黄色のセルに設計例の部材寸法、使用材料強度を入力
- ④ : ピンクのセルに材料劣化度を入力（コンクリートは強度低下%、鉄筋は腐食量%）
- ⑤ : 基本的な計算式
- ⑥ : 理論式に関しては、簡単な力学モデル
- ⑦ : 設計例の断面及び配筋図
- ⑧ : ボタンを押すと、材料劣化レベル 40（強度低下約 40%）まで自動計算し、計算例シートに *PDFt* 曲線の第 3 象限 *P-D* 曲線をグラフ化
- ⑨ : 材料劣化を考慮したせん断耐力（本指針では 3 式の最小値）
- ⑩ : 健全時のせん断耐力（本指針では 3 式の最小値）
- ⑪ : 劣化後耐力（本指針ではせん断ひび割れ強度、せん断耐力、付着割裂強度）
- ⑫ : 健全時耐力（本指針ではせん断ひび割れ強度、せん断耐力、付着割裂強度）
- ⑬ : ⑪/⑫で健全時耐力に対する耐力比
- ⑭ : 本計算シート（本指針の設計例は P.383 4 階 C4 柱）
- ⑮ : RC 規準の設計例（P.345 3 階 CB3 柱）の計算シート
- ⑯ : ⑧の計算ボタンにより、⑭と⑮の計算結果を出力するシート（次項参照）
- ⑰ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例（P.176 の柱）の計算シート
- ⑱ : ⑧の計算ボタンにより、⑰の計算結果を出力するシート

03 梁・柱のせん断に対する算定\_RC 規準による計算シートの説明

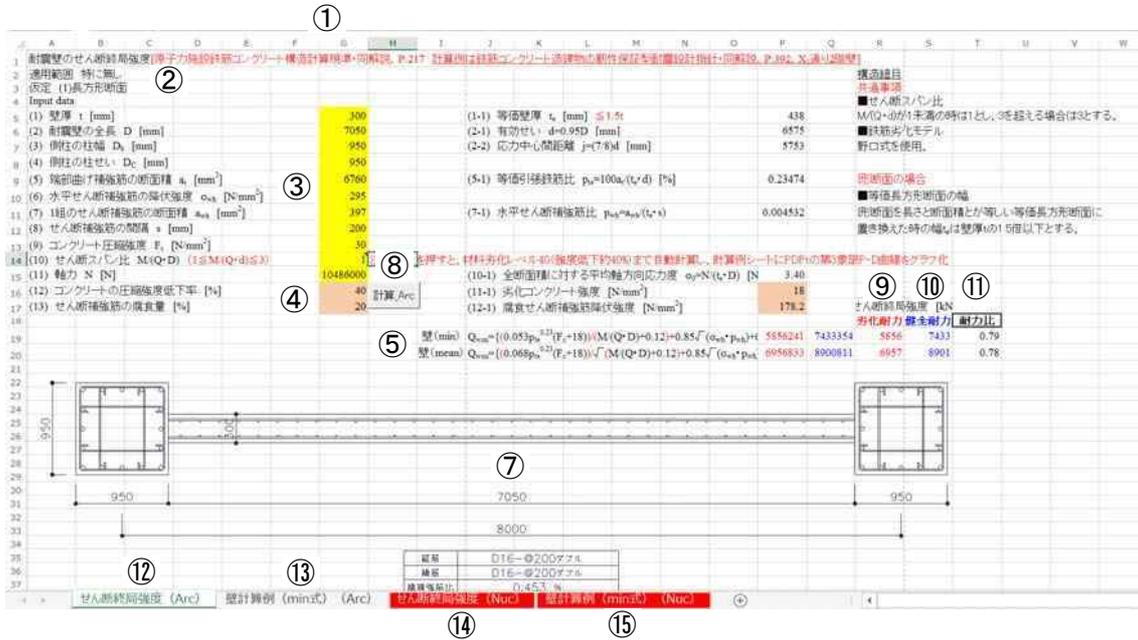
The spreadsheet is divided into several sections:

- Input Data (1-16):** Fields for column diameter, concrete strength, reinforcement ratio, and design shear force.
- Calculation Buttons (17-18):** Buttons for column and beam calculations, with a material degradation level selector (0-40%).
- Results (19-21):** Output fields for shear capacity under various conditions.
- Tables (22-24):** Reference tables for design parameters and material properties.
- Diagram (25):** Cross-section of a column with dimensions 1200mm x 662mm.

- ① : 使用した計算規準書及び設計例を記述
- ② : 計算式の基本仮定
- ③ : 黄色のセルに設計例の部材寸法、使用材料強度を入力
- ④ : ピンクのセルに材料劣化度をを入力（コンクリートは強度低下%、鉄筋は腐食量%）
- ⑤ : 基本的な許容せん断強度式（長期・短期）
- ⑥ : なし
- ⑦ : 設計例の断面及び配筋図
- ⑧ : ボタンを押すと、材料劣化レベル 40（強度低下約 40%）まで自動計算し、計算例シートに *PDFt* 曲線の第 3 象限 *P-D* 曲線をグラフ化
- ⑨ : 材料劣化を考慮したせん断耐力（長期・短期／大地震は荒川式によるため無視）
- ⑩ : 健全時のせん断耐力（長期・短期／大地震は荒川式によるため無視）
- ⑪ : ⑨／⑩で健全時耐力に対する耐力比
- ⑫ : 本柱部材計算シート（設計例は RC 規準の P.194 3 階 C<sub>B3</sub> 柱）
- ⑬ : ⑧の計算ボタンにより、本シート⑫の計算結果を出力するシート
- ⑭ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例（P.176 の柱）の計算シート
- ⑮ : ⑧の計算ボタンにより、⑭の計算結果を出力するシート
- ⑯ : RC 規準梁部材計算シート（設計例は RC 規準の P.192 4 階 B<sub>A3</sub> 梁）
- ⑰ : ⑧の計算ボタンにより、⑯の計算結果を出力するシート
- ⑱ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例（P.176 の大梁）の計算シート

⑱ : ⑧の計算ボタンにより、⑱の計算結果を出力するシート

04 耐震壁のせん断終局強度(荒川式)\_原子力施設 RC 規準による計算シートの説明



- ① : 使用した計算規準書及び設計例を記述
- ② : 計算式の基本仮定
- ③ : 黄色のセルに設計例の部材寸法、使用材料強度を入力
- ④ : ピンクのセルに材料劣化度を入力（コンクリートは強度低下%、鉄筋は腐食量%）
- ⑤ : 基本的な計算式
- ⑥ : なし
- ⑦ : 設計例の断面及び配筋図
- ⑧ : ボタンを押すと、材料劣化レベル 40（強度低下約 40%）まで自動計算し、計算例シートに PDFt 曲線の第 3 象限 P-D 曲線をグラフ化
- ⑨ : 材料劣化を考慮したせん断耐力
- ⑩ : 健全時のせん断耐力
- ⑪ : ⑨/⑩で健全時耐力に対する耐力比
- ⑫ : 本計算シート（設計例は靱性指針の P.392 X<sub>1</sub> 通り 2 階壁）
- ⑬ : ⑧の計算ボタンにより、本シート⑫の計算結果
- ⑭ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例（P.176 の壁）の計算シート
- ⑮ : ⑧の計算ボタンにより、⑭の計算結果を出力するシート

05 耐震壁のせん断強度\_ストラットとタイによる計算シートの説明

①

②

③

④

⑤

⑥

⑦

⑧

⑨

⑩

⑪

⑫

⑬

⑭

⑮

- ① : 使用した計算規準書及び設計例を記述
- ② : 計算式の基本仮定
- ③ : 黄色のセルに設計例の部材寸法、使用材料強度を入力
- ④ : ピンクのセルに材料劣化率を入力（コンクリートは強度低下%、鉄筋は腐食量%）
- ⑤ : 基本的な計算式
- ⑥ : 理論式に関しては、簡単な力学モデル
- ⑦ : 設計例の断面及び配筋図
- ⑧ : ボタンを押すと、材料劣化レベル 40（強度低下約 40%）まで自動計算し、計算例シートに  $PDFt$  曲線の第 3 象限  $P-D$  曲線をグラフ化
- ⑨ : 材料劣化を考慮したせん断耐力
- ⑩ : 健全時のせん断耐力
- ⑪ : ⑨/⑩で健全時耐力に対する耐力比
- ⑫ : 本計算シート（設計例は靱性指針の P.392  $X_1$  通り 2 階壁）
- ⑬ : ⑧の計算ボタンにより、本シート⑫の計算結果
- ⑭ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例（P.176 の壁）の計算シート

⑮ : ⑧の計算ボタンにより、⑭の計算結果を出力するシート

06 耐震壁のせん断強度\_靱性指針による計算シートの説明

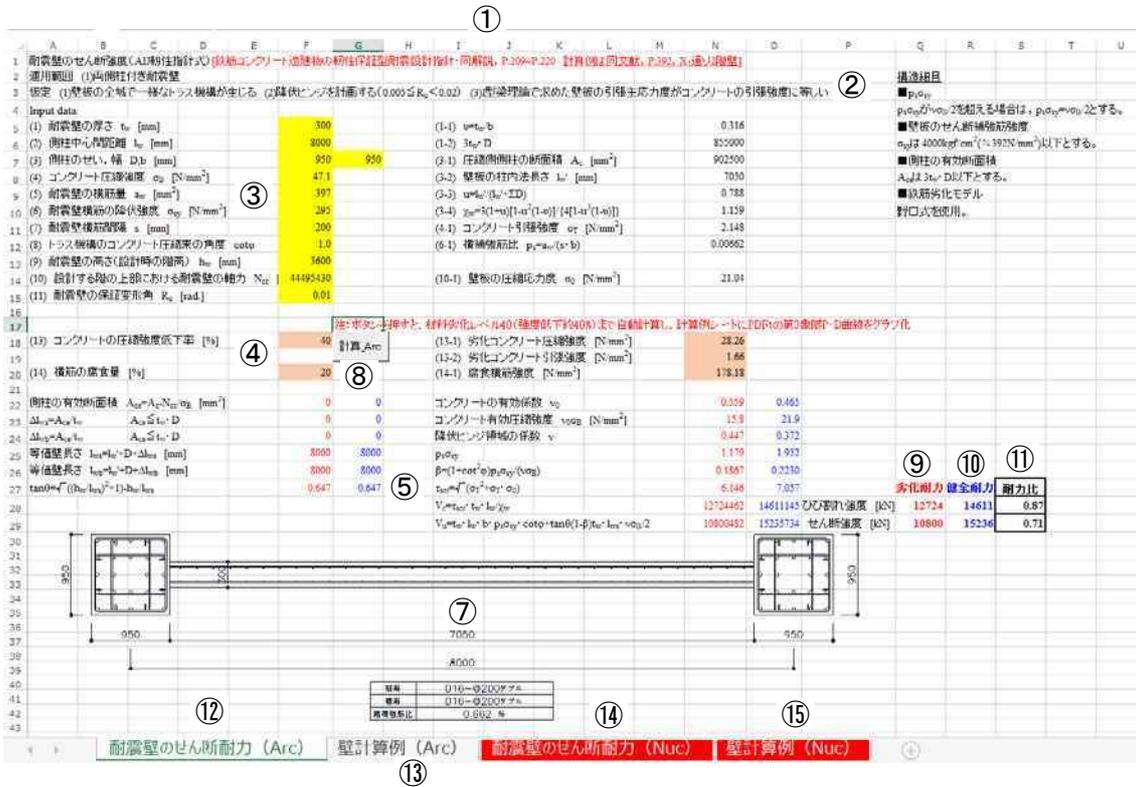


図 2.6.2-22 06 耐震壁のせん断強度\_靱性指針の計算シート

- ① : 使用した計算規準書及び設計例を記述
- ② : 計算式の基本仮定
- ③ : 黄色のセルに設計例の部材寸法、使用材料強度を入力
- ④ : ピンクのセルに材料劣化度を入力（コンクリートは強度低下%、鉄筋は腐食量%）
- ⑤ : 基本的な計算式
- ⑥ : なし
- ⑦ : 設計例の断面及び配筋図
- ⑧ : ボタンを押すと、材料劣化レベル 40（強度低下約 40%）まで自動計算し、計算例シートに  $PDFt$  曲線の第 3 象限  $P-D$  曲線をグラフ化
- ⑨ : 材料劣化を考慮したせん断耐力
- ⑩ : 健全時のせん断耐力
- ⑪ : ⑨/⑩で健全時耐力に対する耐力比
- ⑫ : 本計算シート（設計例は靱性指針の P.392 X<sub>1</sub> 通り 2 階壁）
- ⑬ : ⑧の計算ボタンにより、本シート⑫の計算結果

- ⑭ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例 (P.176 の壁) の計算シート
- ⑮ : ⑧の計算ボタンにより、⑭の計算結果を出力するシート

07 壁部材の許容せん断力\_RC 規準による計算シートの説明

The spreadsheet contains the following tables and data:

**表-1 コンクリートの許容応力度**

コンクリートの種類	系統	せん断	圧	引
普通コンクリート	Ⅰ	0.8	0.70	0.10
軽集約コンクリート	Ⅱ	0.9	1.10	0.10

**表-2 鉄筋の許容応力度**

鉄筋の種類	引張および圧縮	せん断	引張および圧縮	せん断
R235	235	235	235	235
R295	295	295	295	295
R335	335	335	335	335
R400	400	400	400	400
R475	475	475	475	475
R510	510	510	510	510

**変形耐力 健全耐力 耐力比**

	724	427	0.59
	1474	2192	0.67

- ① : 使用した計算規準書及び設計例を記述
- ② : 計算式の基本仮定
- ③ : 黄色のセルに設計例の部材寸法、使用材料強度を入力
- ④ : ピンクのセルに材料劣化度を入力（コンクリートは強度低下%、鉄筋は腐食量%）
- ⑤ : 基本的な計算式
- ⑥ : なし
- ⑦ : 設計例の断面及び配筋図
- ⑧ : ボタンを押すと、材料劣化レベル 40（強度低下約 40%）まで自動計算し、計算例シートに PDFt 曲線の第 3 象限 P-D 曲線をグラフ化
- ⑨ : 材料劣化を考慮したせん断耐力（長期・短期）
- ⑩ : 健全時のせん断耐力（長期・短期）
- ⑪ : ⑨/⑩で健全時耐力に対する耐力比
- ⑫ : 本計算シート（設計例は RC 規準の P.406 3 階 C<sub>B2</sub> 壁）
- ⑬ : ⑧の計算ボタンにより、本シート⑫の計算結果
- ⑭ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例（P.176 の壁）の計算シート
- ⑮ : ⑧の計算ボタンにより、⑭の計算結果を出力するシート

### 4.3 PDFt 曲線を用いた構造物の健全性評価

#### 4.3.1 P-t 曲線の決定と PDFt 曲線の確定

構造物の性能  $P$  と、材料劣化度  $D$ 、劣化因子の作用量  $F$ 、経過年  $t$  との関係より、構造物の性能  $P$  の経年変化を表す  $P$ - $t$  曲線が得られ (図 23)、 $PDFt$  曲線が確定する。本項は、 $PDFt$  曲線による評価プロセスの⑩⑪に対応する。

#### 4.3.2 評価年での構造物の性能の計算

$P$ - $t$  曲線を基に、任意の経過年での構造物の性能低下が予測できる。つまり、評価年  $t_{eva}$  での構造物の性能の評価値  $P_{eva}$  を  $P$ - $t$  曲線により求めることができる。本項は、 $PDFt$  曲線による評価プロセスの⑫に対応する。

#### 4.3.3 健全性二次評価

$PDFt$  曲線を用いることで、点検時  $t_{obs}$  での構造物の性能の評価値  $P_{obs}$ 、構造物の性能の制限値  $P_{rg}$ 、限界値  $P_{cr}$  となる経過年  $t_{rg}$  と  $t_{cr}$ 、評価年  $t_{eva}$  での構造物の性能の評価値  $P_{eva}$  の推定などの健全性評価が行える。健全性二次評価では、 $P_{eva} < P_{rg}$  を満足するかどうかを確認する。本項は、 $PDFt$  曲線による評価プロセスの⑬に対応する。

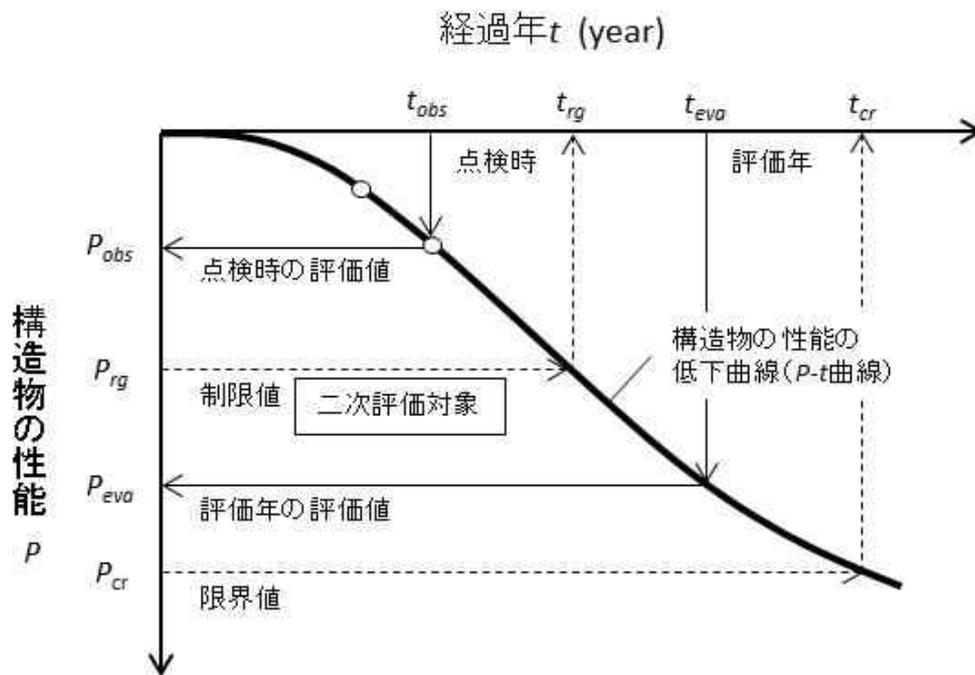


図 23 P-t 曲線による健全性評価

## 5. RC 構造物の健全性評価例

### 5.1 はじめに

ここでは、本説明書で提案した  $PDFt$  曲線を用いて実際に RC 構造物の健全性評価を行う。対象とした劣化因子は中性化、塩分浸透、熱とし、それぞれの劣化因子により複合的に劣化が生じた場合での健全性評価の例を示す。本章にて適用例とした原子力発電施設の詳細を以下に示す。

- ・ 原子力発電プラント：PWR プラント
- ・ 評価対象部位：屋内壁で、内部コンクリート（中性化、熱が作用）、取水構造物で飛沫部分（中性化、塩化物、熱が作用）
- ・ 仕上材：なし
- ・ セメント：普通ポルトランドセメント
- ・ 水セメント比 W/C：0.5
- ・ 評価対象部位の環境条件は、平均温度 40°C、最高受熱温度 65°C、平均相対湿度 80%、平均酸素濃度 20%
- ・ 評価対象部位のかぶり厚さは 20mm
- ・ 評価対象部位は 72 時間以上の長期加熱を受けている
- ・ 評価時期（現在の経過年） $t_{\text{obs}} = 30$  (year)
- ・ 建設初期の評価対象部位に用いられているコンクリートの圧縮強度  $\sigma_0 = 18\text{N/mm}^2$ 、コンクリートの骨材には砂岩を用いた
- ・ 鉄筋の降伏強度 295 N/mm<sup>2</sup>
- ・ 供用期間（劣化度を推定したい年） $t_{\text{eva}} = 60$  (year)

### 5.2 各劣化因子における材料特性の評価

#### 5.2.1 中性化

##### (1) 評価対象とする事象の決定（図 3 の①対応）

対象とする劣化因子は中性化とし、着目する劣化因子の作用量  $F$  は中性化深さ  $F_1$ 、材料の劣化度  $D$  は鉄筋の腐食減量  $D_3$ 、構造物の性能  $P$  を曲げ強度  $P_2$  とする。

##### (2) $F-t$ 曲線の評価（図 3 の②～④対応）

###### 1) 中性化深さ $F_1$ と経過年 $t$ の関係

中性化深さ  $F_1$  と経過年  $t$  の関係は式 (33) (3.1.2 式 (6)) から計算する。

$$F_1 = \alpha_1 \sqrt{t} \quad (33)$$

$F_1$ ：中性化深さ (mm)

$\alpha_1$ ：中性化での劣化因子指数(mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )

$t$ ：年数(year)

2) 中性化での劣化因子指数  $\alpha_1$  の算定

(a) 実測による評価

中性化深さの実測は5年ごとに行っており、コア供試体を用いて行う。対象とした部位から採取したコア供試体の側面にフェノールフタレン溶液を噴霧し、ノギスにより中性化深さを測定した。なお、コア供試体は3体採取し、測定点はコア供試体一体につき、5箇所とする。表13にコア供試体による中性化深さの測定結果を示す。

表13 コア供試体による中性化深さの測定結果

経過年 t(year)	5	10	15	20	25	30
中性化深さ(mm)	12	35	40	42	43	47

図24に中性化深さ  $F_1$  と経過年  $t$  との関係 ( $F-t$  曲線) を示す。実測値をプロットし、回帰分析により劣化因子指数  $\alpha_1$  を求めた結果、劣化因子指数  $\alpha_1$  は 8.90 となる。

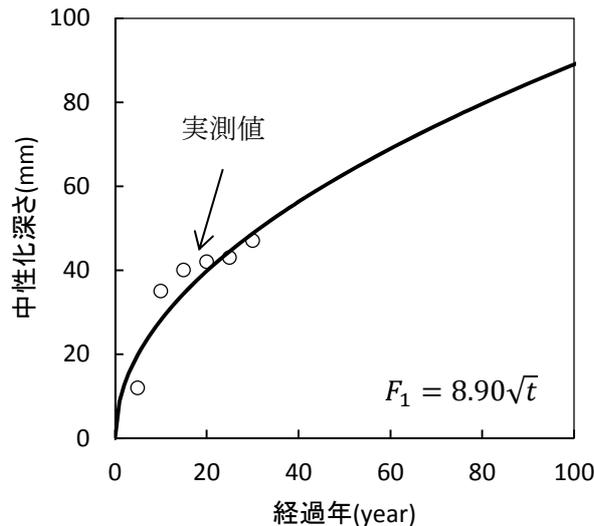


図24 中性化深さ  $F_1$  と経過年  $t$  との関係 ( $F-t$  曲線)

(b) 推定による評価

評価対象部位は屋内壁で、仕上げ材はなし、セメントは普通ポルトランドセメントを使用していることから、中性化比率  $R$  は式(34)で表す。(3.1式(9)参照)

$$R = 1.7 \times 1.0 = 1.7 \tag{34}$$

水セメント比は0.5であるから、劣化因子指数  $\alpha_1$  は式(35)となる。(3.1式(7)参照)

$$\alpha_1 = 10 \sqrt{\frac{1.7^2(4.6 \times 0.5 - 1.76)^2}{7.2}} = 3.42 \quad (35)$$

3)  $F$ - $t$  曲線の決定

(a) 実測による評価

2)より、実測した場合での劣化因子指数  $\alpha_1$  は 8.90 であることから、中性化深さ  $F_1$  と経過年  $t$  の関係は式 (36) となる (図 25)。

$$F_1 = 8.90\sqrt{t} \quad (36)$$

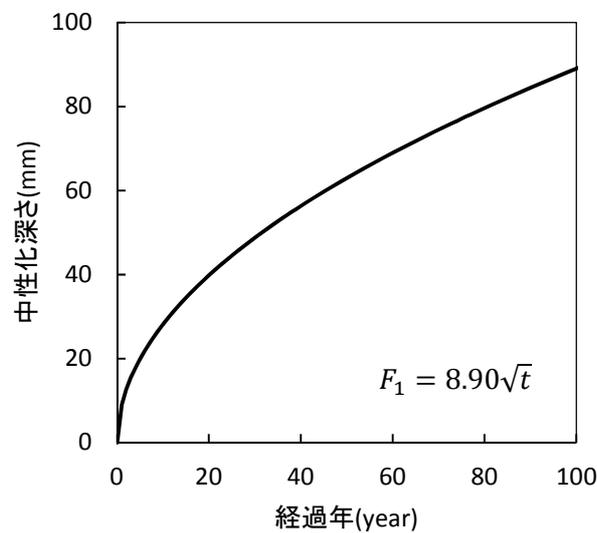


図 25 中性化深さ  $F_1$  と経過年  $t$  との関係 (実測)

(b) 推定による評価

2)より、推定した場合での劣化因子指数  $\alpha_1$  は 3.42 であることから、中性化深さ  $F_1$  と経過年  $t$  の関係は式 (36) となる (図 26)。

$$F_1 = 3.42\sqrt{t} \quad (37)$$

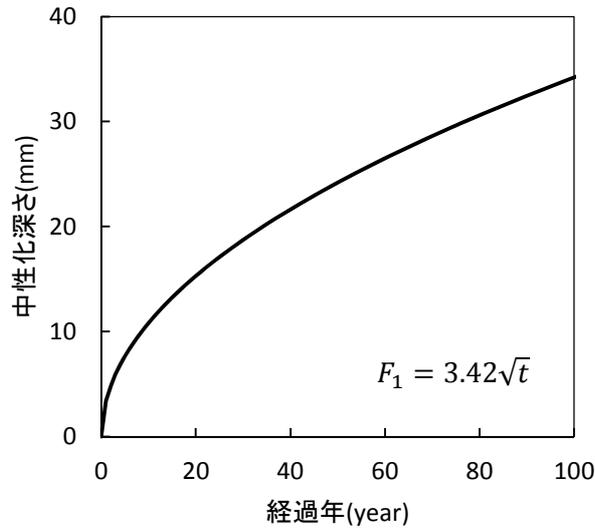


図 26 中性化深さ  $F_1$  と経過年  $t$  との関係 (推定)

(3)  $D$ - $F$  曲線の評価 (図 3 の⑤~⑦対応)

1) 鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  との関係

鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  との関係式より求める。鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  との関係は式 (38) (3.1 式 (10) 参照) とする。

$$D_3 = \beta_1 \sqrt{F_1^2 - F_0^2} \quad (38)$$

$D_3$ : 鉄筋の腐食減量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )

$\beta_1$ : 中性化による鉄筋腐食に関する材料劣化指数( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mm}$ )

$F_1$ : 中性化深さ(mm)

$F_0$ : 鉄筋が腐食し始める鉄筋ときの中性化深さ(mm)

ここでは、鉄筋が腐食し始めるときの中性化深さ  $F_0$  はかぶりコンクリート厚さ+20mm とする<sup>11</sup>。

2) 中性化での材料劣化指数  $\beta_1$  の算定

(a) 実測による評価

鉄筋の腐食減量の測定は 5 年ごとに行っており、自然電位法によって行う。表 14 に自然電位法による鉄筋の腐食減量の測定結果を示す。

表 14 自然電位法による鉄筋の腐食減量の測定結果

経過年 t(year)	5	10	15	20	25	30
鉄筋の腐食減量 (mg/cm <sup>2</sup> )	0	160	200	230	350	400

実測により得られた中性化深さ  $F_1$ 、鉄筋の腐食減量  $D_3$  のデータをプロットし、回帰分析を行う。図 27 より、材料劣化指数  $\beta_1$  は 7.86 となる。

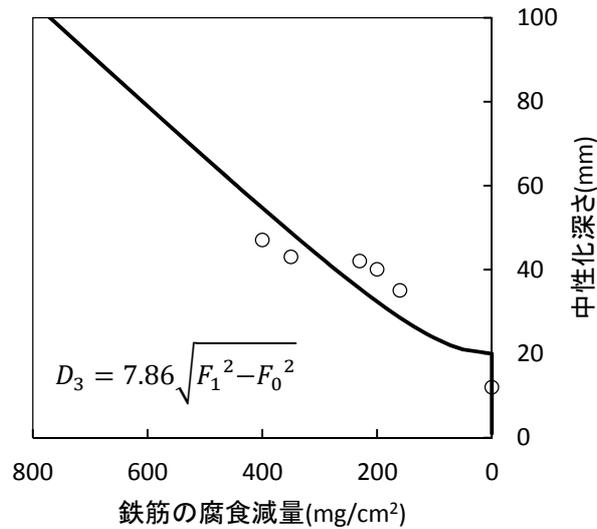


図 27 材料劣化指数  $\beta_1$  の算定

(b) 推定による評価

評価対象部位の環境条件は、平均温度 40℃、平均相対湿度 80%、平均酸素濃度 20%であるから、材料劣化指数  $\beta_1$  は式 (40) で推定できる。(3.1 式 (12)、(13) 参照)

$$B = \frac{1}{38.1} (1.35 \times 40 + 2.76 \times 80 + 1.80 \times 20 - 163) = 3.88 \quad (39)$$

$$\beta_1 = \frac{B}{\alpha_1} \times \frac{\sqrt{365}}{10} = 1.91 \frac{B}{\alpha_1} = 1.91 \frac{3.88}{3.42} = 2.17 \quad (40)$$

3) D-F 曲線の決定

(a) 実測による評価

2)より、材料劣化指数  $\beta_1$  は 85.0 であるから、鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  との関係 (D-F 曲線) は式 (41) となる。図 28 に実測による鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  との関係を示す。

$$D_3 = 7.86 \sqrt{F_1^2 - F_0^2} \quad (41)$$

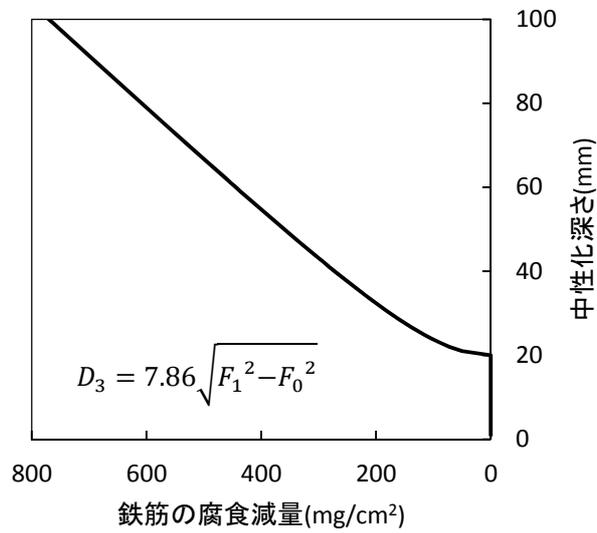


図 28 鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  との関係 (実測)

(b) 推定による評価

2)より、材料劣化指数  $\beta_1$  は 2.17 であるから、鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  との関係 (D-F 曲線) は式 (42) となる。図 29 に推定による鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  との関係を示す。

$$D_3 = 2.17 \sqrt{F_1^2 - F_0^2} \quad (42)$$

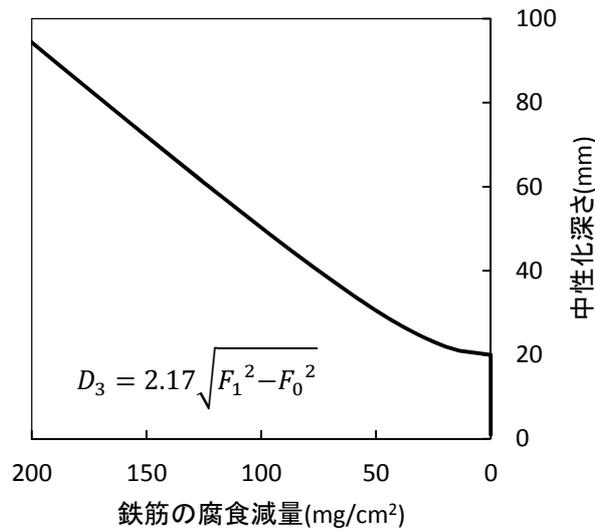


図 29 鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  との関係 (推定)

(4) 健全性一次評価 (図 3 の⑧対応)

1) 実測による評価

求めた中性化深さ  $F_1$  と経過年  $t$  との関係と鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  との関係を図 30 に示す。図 30 より、供用期間  $t_{60}$  での中性化深さ  $F_1$  を求めると、中性化深さ  $F$  は 68.9(mm) となり、鉄筋の腐食減量  $D_3$  は 519( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) となる。制限値  $F_{cr}$  はかぶり厚さ  $F_0$  (= 20mm) であるので、中性化深さ  $F_1$  と制限値  $F_{cr}$  の関係は式 (43) となる。

$$F_1 > F_0 \tag{43}$$

これは、3.1.2-(4)での式 (14) を満足しないため、健全性二次評価へ進む。

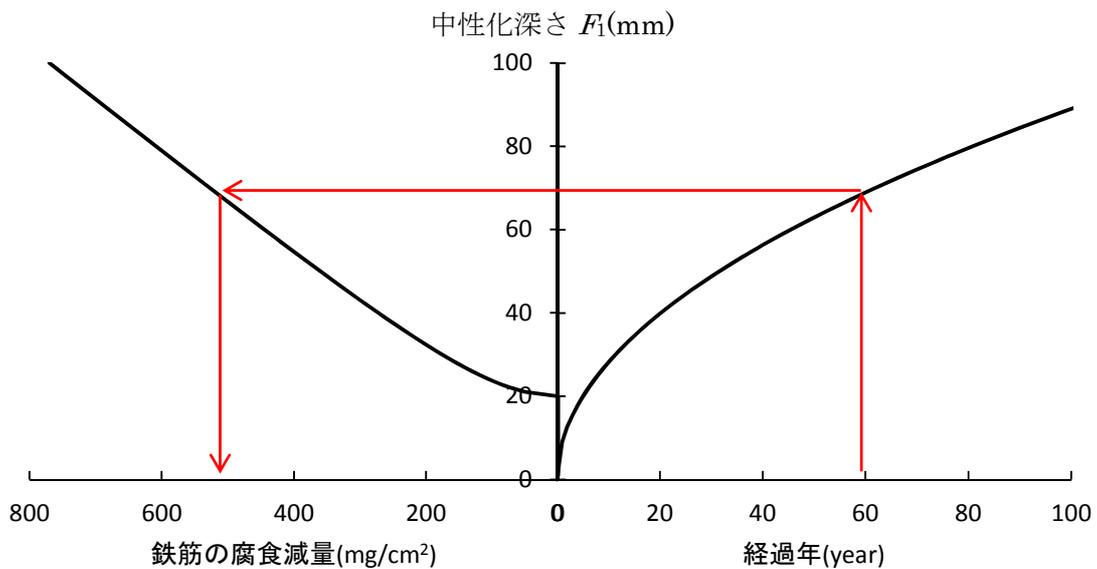


図 30 中性化における  $DFt$  曲線 (実測)

## 2) 推定による評価

求めた中性化深さ  $F_1$  と経過年  $t$  との関係と鉄筋の腐食減量  $D_3$  と中性化深さ  $F_1$  との関係を 図 31 に示す。図 31 より、供用期間  $t_{60}$  での中性化深さ  $F_1$  を求めると、中性化深さ  $F$  は 26.5(cm) となり、鉄筋の腐食減量  $D_3$  は 37.5(mg/cm<sup>2</sup>) となる。制限値  $F_{cr}$  はかぶり厚さ  $F_0$  (= 20mm) であるので、中性化深さ  $F_1$  と制限値  $F_{cr}$  の関係は式 (44) となる。

$$F_1 > F_0 \quad (44)$$

これは、3.1.2-(4)での式 (14) を満足しないため、健全性二次評価へ進む。

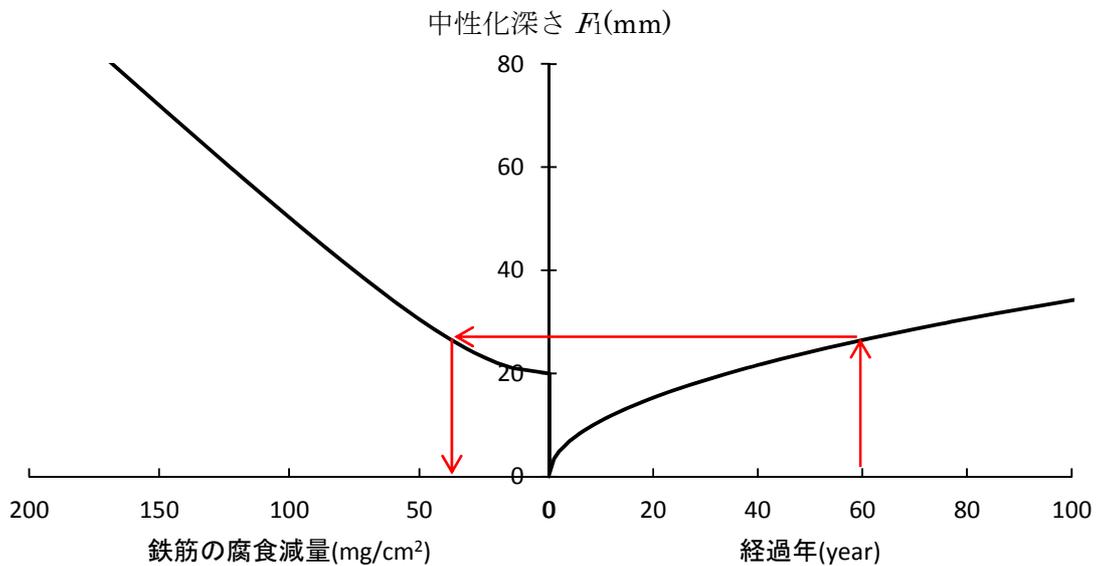


図 31 中性化における  $DFt$  曲線 (推定)

また、中性化の場合は、材料劣化度  $D$  が鉄筋の腐食減量であり、塩分浸透の場合と同一である。異なる種類の劣化因子 ( $F_1, F_2, \dots, F_n$ ) の作用で同種の材料劣化度  $D$  の評価値が算出された場合は、劣化度の大きな方を選択する。本章では、中性化と塩分浸透において、同種の材料劣化度である鉄筋の腐食減量  $D_3$  が算出されているので、 $P$ - $D$ 関係の評価例は 5.3 に後述する。

### 5.2.2 塩分浸透

#### (1) 評価対象とする事象の決定 (図 3 の①対応)

対象とする劣化因子は塩分浸透とし、着目する劣化因子の作用量  $F$  は塩化物イオンの作用量  $F_2$ 、材料の劣化度  $D$  は鉄筋の腐食減量  $D_3$ 、構造物の性能  $P$  をひび割れ幅  $P_8$  とする。

(2)  $F-t$  曲線の評価 (図 3 の②～④対応)

1) 塩化物イオンの作用量  $F_2$  と経過年  $t$  の関係

塩化物イオンの作用量  $F_2$  と経過年  $t$  の関係は式 (45) (3.2 式 (15) 参照) とする。

$$F_2 = \int_0^{t_n} C_t dt, \quad C_t \geq C_{cr} \quad (45)$$

$$C_t = C_0 \left\{ 1 - \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{\alpha_2 \cdot x^2}{t}\right)} \right\}, \quad D = \frac{1}{\pi \alpha_2} \quad (46)$$

$F_2$ : 塩化物イオンの作用量 ( $\text{kg/m}^3 \cdot \text{year}$ )

$C_t$ : 鉄筋位置での塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$t$ : 年数(year)

$t_{cr}$ : 鉄筋腐食開始時期(year) :  $C_t \geq C_{cr}$  となる時期

$t_n$ : 評価年(year)

$C_{cr}$ : 鉄筋腐食開始塩化物イオン濃度 =  $1.2 \text{kg/m}^3$

$C_0$ : コンクリート表面の塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ ) (一般的な塩害環境では  $6.9$ )

$\alpha_2$ : 塩分浸透での劣化因子指数 ( $\text{year/mm}^2$ )

$D$ : みかけの拡散係数  $D(\text{mm}^2/\text{year})$

$x$ : かぶり厚さ (mm)

2) 塩分浸透での劣化因子指数  $\alpha_2$  の算定

(a) 実測による評価

式 (46) を変形すると下式 (47) が得られる。

$$-\frac{x^2}{\log\left\{1 - \left(1 - \frac{C_t}{C_0}\right)^2\right\}} = \frac{1}{\alpha_2} t \quad (47)$$

式 (47) より、塩分浸透での劣化因子指数  $\alpha_2$  を得るには、鉄筋位置での塩化物イオン濃度とコンクリート表面の塩化物イオン濃度を実測する必要がある。対象とした構造物は実測可能であるため、鉄筋位置での塩化物イオン濃度は実測により求める。実測における試料採取方法はコア供試体とする。表 15 に実測により測定した鉄筋位置での塩化物イオン濃度とコンクリート表面の塩化物イオン濃度を示す。

表 15 実測による各位置での塩化物イオン濃度

経過年 t(year)	5	10	15	20	25	30
鉄筋位置での塩化物イオン濃度( $\text{kg/m}^3$ )	4.4	6.1	6.6	7.1	7.3	7.8
コンクリート表面の塩化物イオン濃度( $\text{kg/m}^3$ )	10.8	11.2	11.5	11.0	11.8	12.2

図 32 に劣化因子指数  $\alpha_2$  の算定を示す。実測値をプロットし、直線回帰分析する。劣化因子指数  $\alpha_2$  は回帰直線の傾きで 1 を除した数値となるため、劣化因子指数  $\alpha_2$  は  $4.2 \times 10^{-4}$  となる。

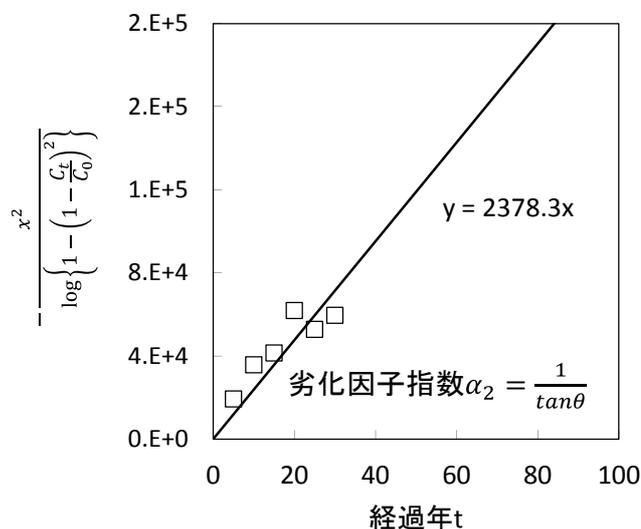


図 32 劣化因子指数  $\alpha_2$  の算定

(b) 推定による評価

劣化因子指数  $\alpha_2$  (year/mm<sup>2</sup>) は式 (48) (3.2 式 (19) 参照) による。<sup>27</sup>

$$\alpha_2 = \frac{1}{\pi D} \quad (48)$$

$$D = 65 \times 10^n \quad (49)$$

$$n = -3.9 \times 0.5^2 + 7.2 \times 0.5 - 2.5 = 0.125 \quad (50)$$

$D$  : みかけの拡散係数 (mm<sup>2</sup>/year)

$n=0.125$  であるから、みかけの拡散係数  $D$  は 86.69、劣化因子指数  $\alpha_2$  は  $3.67 \times 10^{-3}$  となる。

3)  $F-t$  曲線の決定

(a) 実測による評価

評価式 (45) (46) において、コンクリート表面の塩化物イオン濃度  $C_0$  は実測値の平均値 (11.4 kg/m<sup>3</sup>) とし、劣化因子指数  $\alpha_2$  は  $4.2 \times 10^{-4}$ 、かぶり厚さ  $x$  は 20mm であるから、塩化物イオンの作用量  $F_2$  と経過年  $t$  の関係 ( $F-t$  曲線) は図 33 となる。

<sup>27</sup> 日本建築学会：“建築工事標準仕様書 JASS 5”、p.600、(2009)

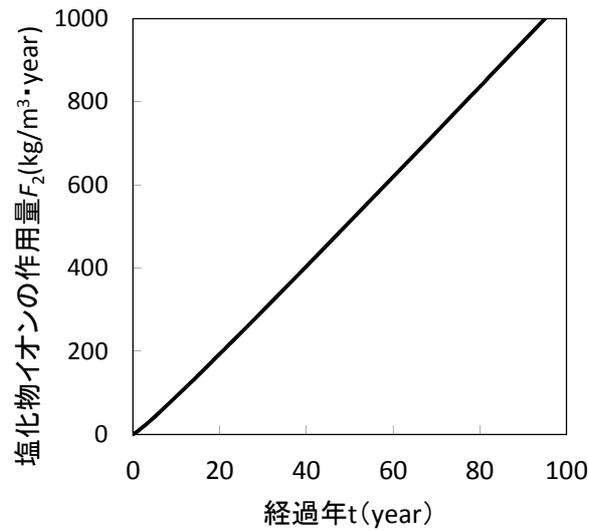


図 33 塩化物イオンの作用量  $F_2$  と経過年  $t$  の関係 (実測)

(b) 推定による評価

評価式 (45) (46) において、評価対象部位は一般的な塩害環境であるとみなして、コンクリート表面の塩化物イオン濃度  $C_0$  は  $6.9\text{kg/m}^3$  とし、劣化因子指数  $a_2$  は  $3.67 \times 10^{-3}$ 、かぶり厚さ  $x$  は  $20\text{mm}$  であるから、塩化物イオンの作用量  $F_2$  と経過年  $t$  の関係 ( $F-t$  曲線) は図 34 となる。

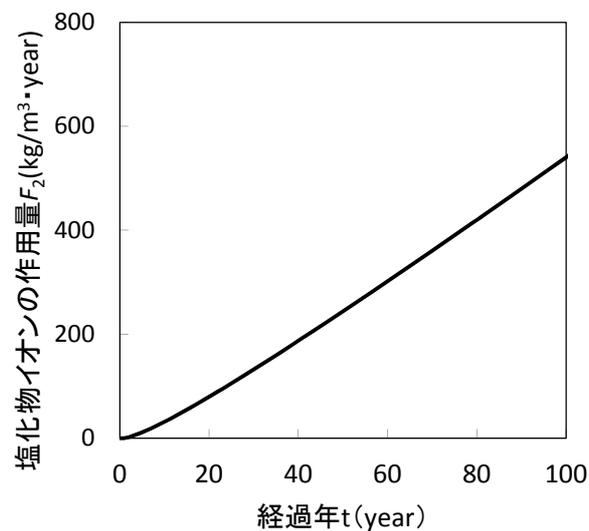


図 34 塩化物イオンの作用量  $F_2$  と経過年  $t$  の関係 (推定)

(3)  $D$ - $F$  曲線の評価 (図 3 の⑤～⑦対応)

1) 鉄筋の腐食減量  $D_3$  と塩化物イオンの作用量  $F_2$  との関係

鉄筋の腐食減量  $D_3$  と塩化物イオンの作用量  $F_2$  との関係は式 (51) (3.2 式 (23) 参照) とする。

$$D_3 = \beta_2 F_2 \quad (51)$$

$D_3$ : 鉄筋の腐食減量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )

$\beta_2$ : 塩分浸透による鉄筋腐食に関する材料劣化指数

$F_2$ : 塩化物イオンの作用量 ( $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{year}$ )

2) 塩分浸透での材料劣化指数  $\beta_2$  の算定

(a) 実測による評価

鉄筋の腐食減量の測定は 5 年ごとに行っており、自然電位法によって行う。表 14 に自然電位法による鉄筋の腐食減量の測定結果を示す。

表 16 自然電位法による鉄筋の腐食減量の測定結果

経過年 t(year)	5	10	15	20	25	30
鉄筋の腐食減量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	16.3	52.9	96.2	126.6	180.3	210.6

ここで、経過年 5、10、15、20、25、30 年における塩化物イオンの作用量  $F_2$  は  $F$ - $t$  曲線より算出できる。(表 17)

表 17 各経過年での塩化物イオンの作用量

経過年 t(year)	5	10	15	20	25	30
塩化物イオンの作用量( $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{year}$ )	19.2	52.4	90.4	131.2	173.8	217.7

実測により得られた塩化物イオンの作用量  $F_2$ 、鉄筋の腐食減量  $D_3$  のデータをプロットし、直線回帰分析を行う。図 35 より、材料劣化指数  $\beta_2$  は回帰直線の傾きで 1 を除した数値となるため、材料劣化指数  $\beta_2$  は 0.97 となる。

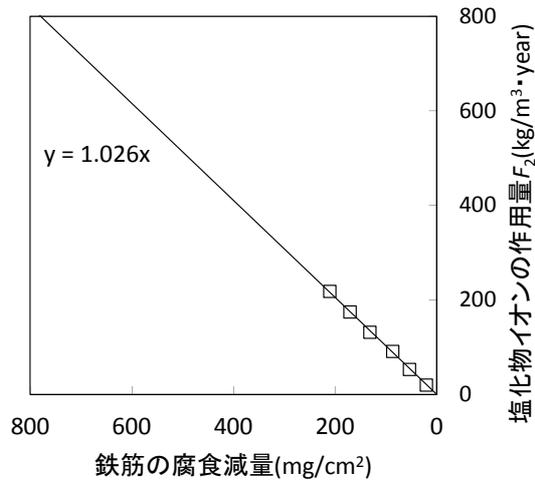


図 35 材料劣化指数  $\beta_2$  の算定

(b) 推定による評価

かぶり厚さ  $x$  は 20mm、水セメント比 W/C は 50%であるから、鉄筋の腐食減量  $D_3$  は式より式 (52) で表せる。

$$\begin{aligned}
 D_3 &= \frac{1}{\sqrt{20}} \{6.0 F_2 + (0.4 \times 50 - 31.7)t_n\} & (52) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{20}} (6.0 F_2 - 11.7t_n)
 \end{aligned}$$

3)  $D-F$  曲線の決定

(a) 実測による評価

2)より、材料劣化指数  $\beta_2$  は 0.97 であることから、鉄筋の腐食減量  $D_3$  と塩化物イオンの作用量  $F_2$  の関係( $D-F$  曲線)は式 (53) となる。図 36 に実測による鉄筋の腐食減量  $D_3$  と塩化物イオンの作用量  $F_2$  の関係を示す。

$$D_3 = 0.97F_2 \quad (53)$$

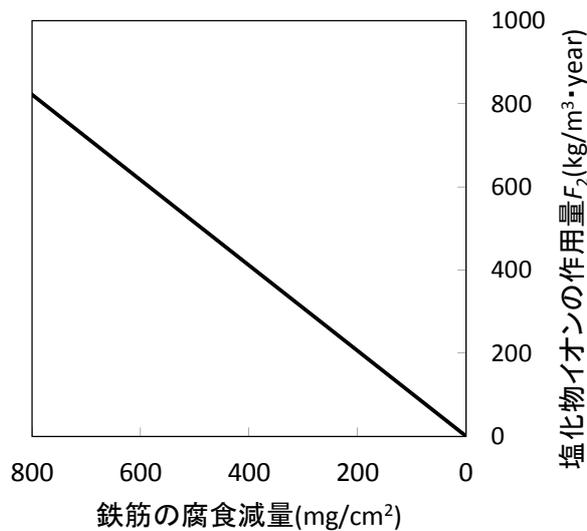


図 36 鉄筋の腐食減量  $D_3$  と塩化物イオンの作用量  $F_2$  の関係（実測）

(b) 推定による評価

2)より、鉄筋の腐食減量  $D_3$  と塩化物イオンの作用量  $F_2$  の関係( $D$ - $F$  曲線)は式 (52) となる。図 37 に推定による鉄筋の腐食減量  $D_3$  と塩化物イオンの作用量  $F_2$  の関係を示す。

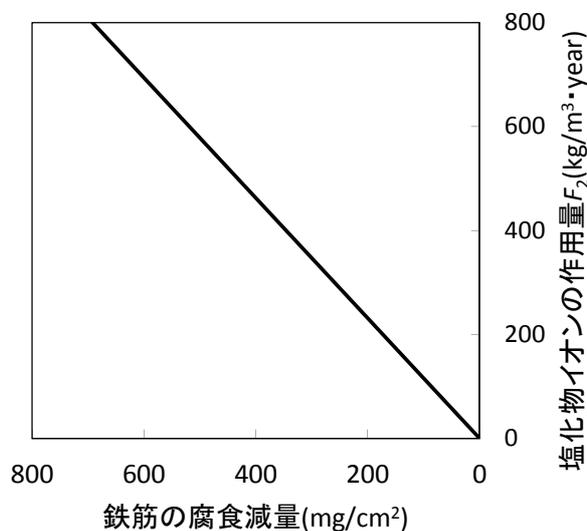


図 37 鉄筋の腐食減量  $D_3$  と塩化物イオンの作用量  $F_2$  の関係（推定）

(4) 健全性一次評価（図 3 の⑧対応）

1) 実測による評価

求めた塩化物イオンの作用量  $F_2$  と経過年  $t$  の関係( $F$ - $t$  曲線)と鉄筋の腐食減量  $D_3$  と塩化物イオンの作用量  $F_2$  の関係( $D$ - $F$  曲線)を図 38 に示す。図 38 より、供用期間  $t_{60}$  での塩化物イ

オンの作用量  $F_2$  を求めると、塩化物イオンの作用量  $F_2$  は  $618.6 \text{ (kg/m}^3 \cdot \text{year)}$  となり、鉄筋の腐食減量  $D_3$  は  $600.0 \text{ (mg/cm}^2)$  となる。

ひび割れが生じるときの鉄筋の腐食減量  $D_0$  を  $10\text{mg/cm}^2$  とすると、鉄筋の腐食減量とひび割れが生じるときの鉄筋の腐食減量  $D_0$  の関係は式となる。

$$D_3 > D_0 \quad (54)$$

これは、3.2.2-(4)での式 (24) を満足しないため、健全性二次評価へ進む。

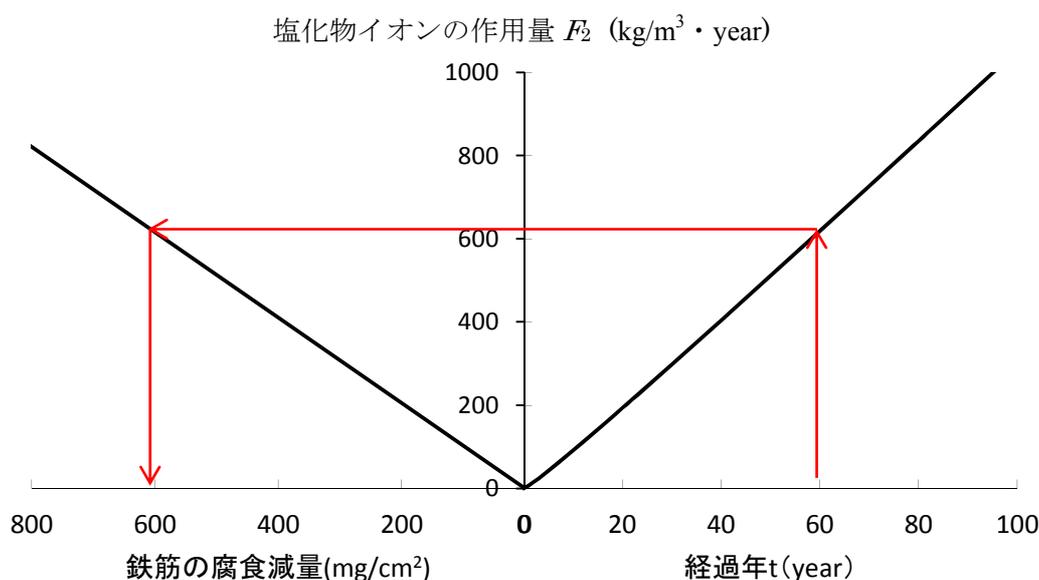


図 38 塩分浸透での  $DFt$  曲線 (実測)

## 2) 推定による評価

求めた塩化物イオンの作用量  $F_2$  と経過年  $t$  の関係 ( $F-t$  曲線) と鉄筋の腐食減量  $D_3$  と塩化物イオンの作用量  $F_2$  の関係 ( $D-F$  曲線) を図 39 に示す。図 39 より、供用期間  $t_{60}$  での塩化物イオンの作用量  $F_2$  を求めると、塩化物イオンの作用量  $F_2$  は  $301.5 \text{ (kg/m}^3 \cdot \text{year)}$  となり、鉄筋の腐食減量  $D_3$  は  $247.5 \text{ (mg/cm}^2)$  となる。

ひび割れが生じるときの鉄筋の腐食減量  $D_0$  を  $10\text{mg/cm}^2$  とすると、鉄筋の腐食減量とひび割れが生じるときの鉄筋の腐食減量  $D_0$  の関係は式 (55) となる。

$$D_3 > D_0 \quad (55)$$

これは、3.2.2-(4)での式 (24) を満足しないため、健全性二次評価へ進む。

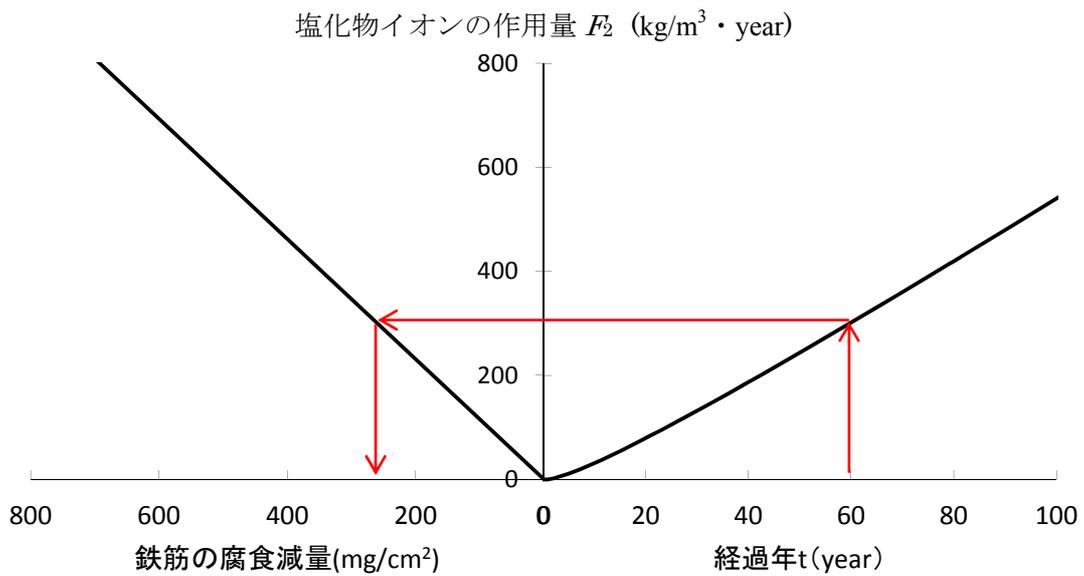


図 39 塩分浸透での  $DFt$  曲線 (推定)

### 5.2.3 熱

#### (1) 評価対象とする事象の決定 (図 3 の①対応)

対象とする劣化因子は熱とし、着目する劣化因子の作用量  $F$  は最高受熱温度  $F_3$ 、材料の劣化度  $D$  は圧縮強度低下率  $D_1$ 、構造物の性能  $P$  をせん断強度保持率  $P_1$  とする。

#### (2) $F-t$ 曲線の評価 (図 3 の②～④対応)

##### 1) 温度履歴の測定

評価部位の温度測定は、熱電対を評価部位の表面に取り付けて行うこととし、一部材につき 3 箇所以上測定する。測定したデータの平均値を温度履歴とする。実測により求めた温度履歴を図 40 に示す。図 40 より、最高受熱温度  $F_3$  は  $65^{\circ}\text{C}$  となる。

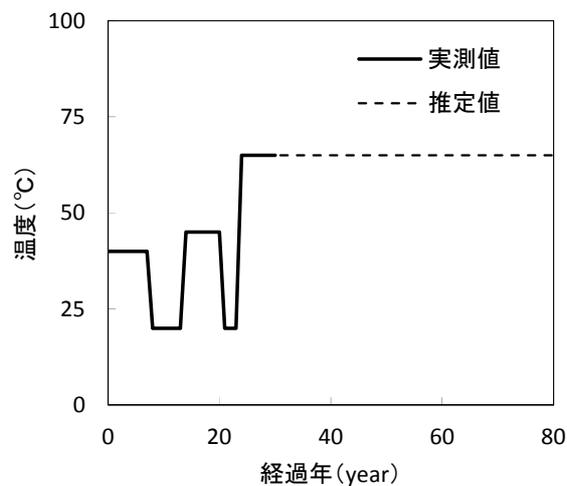


図 40 実測した温度履歴

2)  $F-t$  曲線の決定

最高受熱温度  $F_3$  は、過去の最高受熱温度以上の温度を一日以上連続して受けた場合に更新する。図 40 より、最高受熱温度  $F_3$  と経過年  $t$  との関係 ( $F-t$  曲線) は図 41 となる。

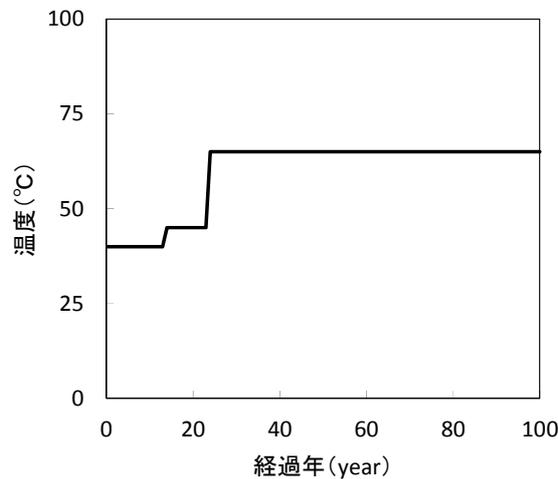


図 41 最高受熱温度  $F_3$  と経過年  $t$  との関係

(3)  $D-F$  曲線の評価 (図 3 の⑤～⑦対応)

1) 圧縮強度の低下率  $D_1$  と最高受熱温度  $F_3$  との関係

圧縮強度低下率  $D_1$  と最高受熱温度  $F_3$  の関係は式(60)とする (3.3 式 (25) 参照)。

$$D_1 = 1 - (1 - 0.2\theta + 0.45\theta^2 - 0.0436\theta^3)\exp(-0.413\theta) \quad (56)$$

$$\theta = G \frac{F_3 - 20}{100} \quad (57)$$

$F_3$  : 最高受熱温度 (°C) (ただし、 $F_3 = 20^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ )

$G$  : 骨材定数

対象とした構造物のコンクリートの骨材は砂岩であるため、3.3 での表 10 を参考に、骨材定数  $G$  を 1.2 とする。

2)  $D-F$  曲線の決定

1)における式 (56) より、圧縮強度の低下率  $D_1$  と最高受熱温度  $F_3$  との関係 ( $D-F$  曲線) は図 42 となる。

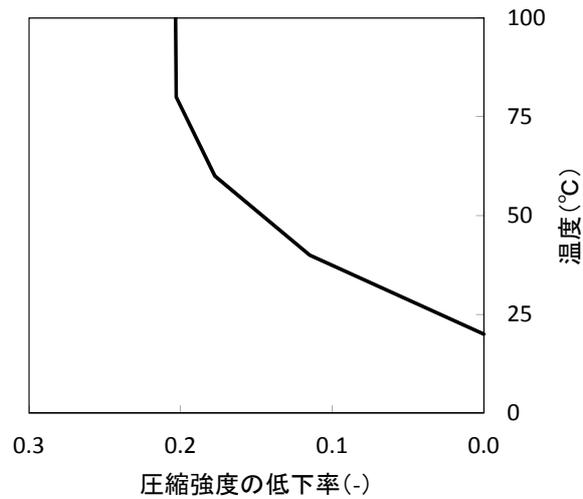


図 42 圧縮強度の低下率  $D_1$  と最高受熱温度  $F_3$  との関係

(4) 健全性一次評価 (図 3 の⑧対応)

求めた最高受熱温度  $F_3$  と経過年  $t$  との関係 ( $F-t$  曲線) と圧縮強度の低下率  $D_1$  と最高受熱温度  $F_3$  との関係 ( $D-F$  曲線) を図 43 に示す。図 43 より、供用期間  $t_{60}$  での最高受熱温度  $F_3$  を求めると、最高受熱温度  $F_{60}$  は  $65^\circ\text{C}$  となり、圧縮強度の低下率  $D_1$  は  $0.19$  となる。

最高受熱温度  $F_3$  の制限値  $F_{cr}$  は、「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説<sup>11)</sup>」に従って、 $65^\circ\text{C}$  とすると、最高受熱温度  $F_3$  と制限値  $F_{cr}$  の関係は式 (58) となる。

$$F_3 = F_{cr} \quad (58)$$

これは、3.3.2-(4)での式 (32) を満足しないため、二次評価へ進む。

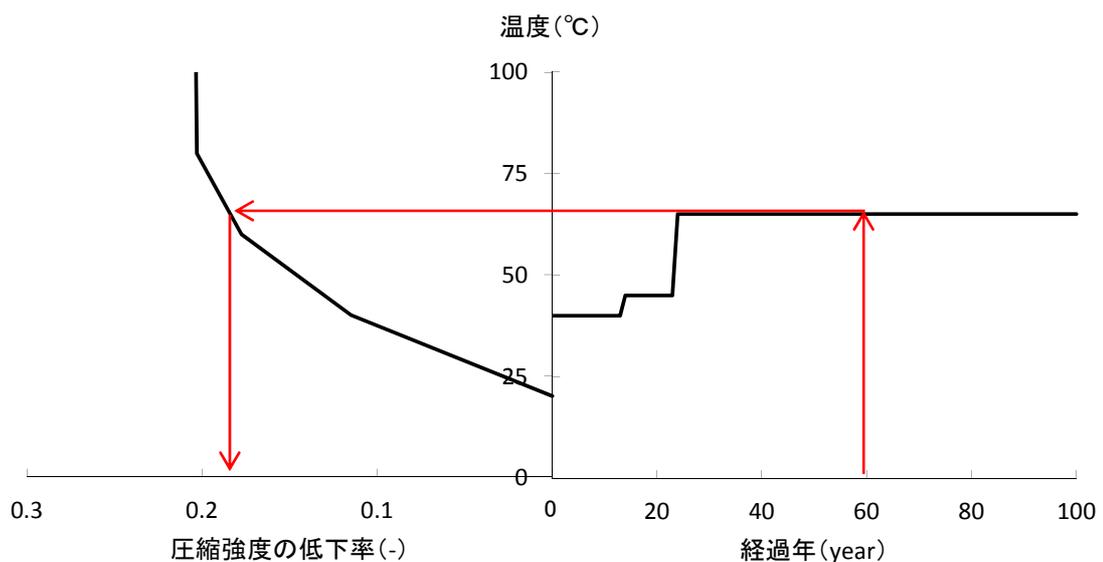


図 43 熱による  $DFt$  曲線

## 5.3 構造性能の評価

### 5.3.1 概要

ここでは、5.2 で評価した材料の劣化の計算例を元に、構造性能の評価例として原子力発電施設で重要となる部材のせん断強度保持率と、部材のひび割れ幅について示す。なお、劣化因子が複合的に作用した場合での評価例を示す。ここでのせん断強度保持率は、1 からせん断耐力低下率を引いたもので、どれだけ強度が保持されているかを表す。また、せん断強度保持率は耐力比と同義である。

### 5.3.2 対象部位における条件

#### (1) 劣化因子の条件

対象とした劣化因子は中性化、塩分浸透、熱である。ここでは、5.2 で評価した材料の劣化の計算例を元に、中性化と熱、塩分浸透と熱、中性化と塩分浸透が複合的に作用した場合での評価例を示す。

#### (2) 材料条件

材料条件は以下の通りとする。

- ・ 仕上げ材：なし
- ・ セメント：普通ポルトランドセメント
- ・ 水セメント比 W/C：0.5
- ・ 対象部位における平均温度（℃）：40
- ・ 対象部位における平均相対湿度（％）：80
- ・ 対象部位における平均酸素濃度（％）：20
- ・ かぶり厚さ（mm）：20
- ・ コンクリートの圧縮強度  $\sigma_B$ （N/mm<sup>2</sup>）：18
- ・ 骨材：砂岩
- ・ 健全なせん断補強筋の降伏強度  $\sigma_{wy}$ (N/mm<sup>2</sup>):295

#### (3) 劣化因子指数、材料劣化指数

中性化、塩分浸透が作用した場合での劣化因子指数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、材料劣化指数  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  は以下の通りとする。（5.2 参照）

- ・ 劣化因子指数  $\alpha_1$ ：8.90
- ・ 劣化因子指数  $\alpha_2$ ：7.86
- ・ 材料劣化指数  $\beta_1$ ： $4.2 \times 10^{-4}$
- ・ 材料劣化指数  $\beta_2$ ：0.97

#### (4) 部材条件

部材条件は以下の通りとする。

- 部材のクリアスパン  $L(\text{mm})$ :2500
- 部材のせいと幅  $D_b(\text{mm})$ :700
- 1組のせん断補強筋の断面積  $a_w (\text{mm}^2)$  :500
- せん断補強筋間隔  $s(\text{mm})$ :100
- せいと横方向のかぶり厚  $C_d, C_s(\text{mm})$ : 20
- せん断補強筋径  $d_s(\text{mm})$ :19
- 中子筋の本数  $N_s$ :2
- 主筋中心からせい面，側面までの距離  $d_{ct}, d_{cs} (\text{mm})$  :40
- 主筋径  $d_s(\text{mm})$ :29
- 主筋の本数  $N_t$  : 12
- ヒンジ領域の回転角  $R_p (\text{rad})$  :0.01

### 5.3.3 部材のせん断強度保持率

#### (1) 中性化と熱が作用した場合

##### 1) せん断強度保持率の計算プログラム

劣化した部材のせん断強度保持率  $P_1$  の計算は、エクセル計算シート 02 柱・梁のせん断強度(A法)靱性指針（鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，日本建築学会）とした。

##### 2) 中性化による鉄筋腐食の $DFt$ 曲線

まず、材料劣化の評価となる  $DFt$  曲線の評価する。中性化による鉄筋腐食減量  $D_3$  は 5.2 で計算した式 (51) に示す  $F-t$  曲線及び、式(52)に示す  $D-F$  曲線より評価する。中性化による鉄筋腐食減量  $D_3$  の時間変化の評価となる  $DFt$  曲線は図 38 に示す通りとなる。 $DFt$  曲線より任意の時間  $t_x$  での鉄筋腐食減量  $D_3$  を求め、エクセル計算シート 02 に代入する。その際、腐食減量考慮バージョンに入力する。鉄筋の断面減少率(%)で入力する場合は腐食減量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) を断面減少率 (%) に換算する。

##### 3) 熱による圧縮強度低下の $DFt$ 曲線

熱による圧縮強度の低下率  $D_1$  は 5.2 で計算した図 40 に示す  $F-t$  曲線及び式(60)に示す  $D-F$  曲線より評価する。熱による圧縮強度の低下率  $D_1$  の時間変化の評価となる  $DFt$  曲線は図 42 に示す通りとなる。2)で中性化による鉄筋腐食の評価に使用した時間  $t_x$  での圧縮強度の低下率  $D_1$  を  $DFt$  曲線より求め、エクセル計算シート 02 に代入する。

##### 4) 中性化と熱が作用した場合でのせん断強度保持率の $PDFt$ 曲線例

2) 及び 3)で計算されたせん断強度保持率  $P_1$  と時間  $t_x$  との関係プロットすると、図 44

に示す中性化と熱が作用した場合でのせん断強度保持率の  $PDFt$  曲線例が得られる。

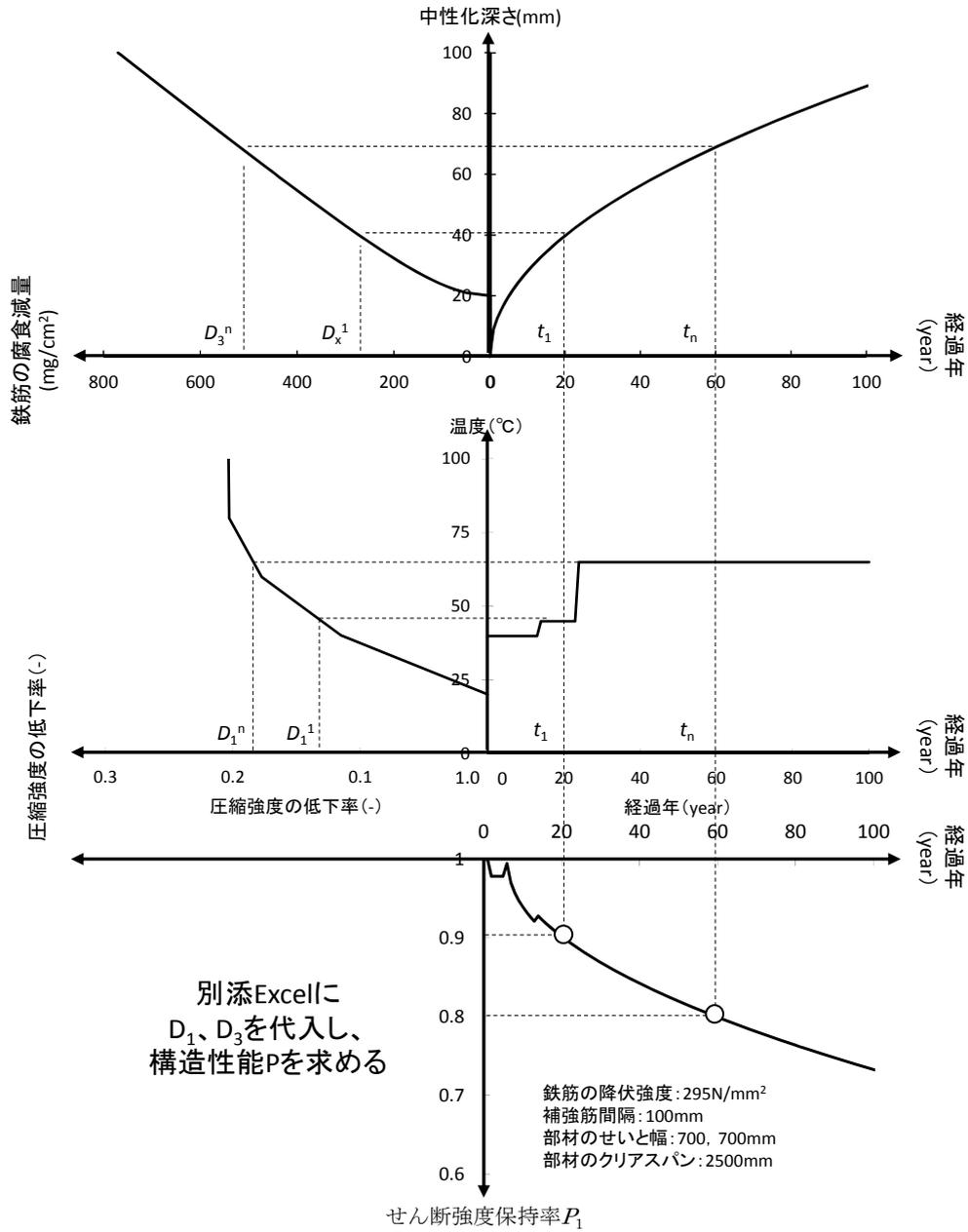


図 44 中性化と熱が作用した場合でのせん断強度保持率の  $PDFt$  曲線例

## (2) 塩分浸透と熱が作用した場合

### 1) せん断強度保持率の計算プログラム

劣化した部材のせん断強度保持率  $P_1$  の計算は、エクセル計算シート 02 柱・梁のせん断強度(A 法)靱性指針、(鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、日本建築学会)とした。

## 2) 塩分浸透による鉄筋腐食の $DFt$ 曲線

塩分浸透による鉄筋腐食減量  $D_3$  は 5.2 で計算した図 36 に示す  $F-t$  曲線及び、式(58)に示す  $D-F$  曲線より評価する。塩分浸透による鉄筋腐食減量  $D_3$  の時間変化の評価となる  $DFt$  曲線は図 38 に示す通りとなる。 $DFt$  曲線より任意の時間  $t_x$  での鉄筋腐食減量  $D_3$  を求め、エクセル計算シート 02 に代入する。その際、エクセル計算シート 02 での鉄筋腐食の入力は、鉄筋の断面減少率(%)であるので式(63)により換算して入力する。

## 3) 熱による圧縮強度低下の $DFt$ 曲線

熱による圧縮強度の低下率  $D_1$  は 5.2 で計算した図 40 に示す  $F-t$  曲線及び式(60)に示す  $D-F$  曲線より評価する。熱による圧縮強度の低下率  $D_1$  の時間変化の評価となる  $DFt$  曲線は図 42 に示す通りとなる。2)で塩分浸透による鉄筋腐食の評価に使用した時間  $t_x$  での圧縮強度の低下率  $D_1$  を  $DFt$  曲線より求め、エクセル計算シート 02 に代入する。

## 4) 塩分浸透と熱が作用した場合でのせん断強度保持率の $PDFt$ 曲線例

2)及び 3)で計算されたせん断強度保持率  $P_1$  と時間  $t_x$  との関係をプロットすると図 44 に示す塩分浸透と熱が作用した場合でのせん断強度保持率の  $PDFt$  曲線例が得られる。

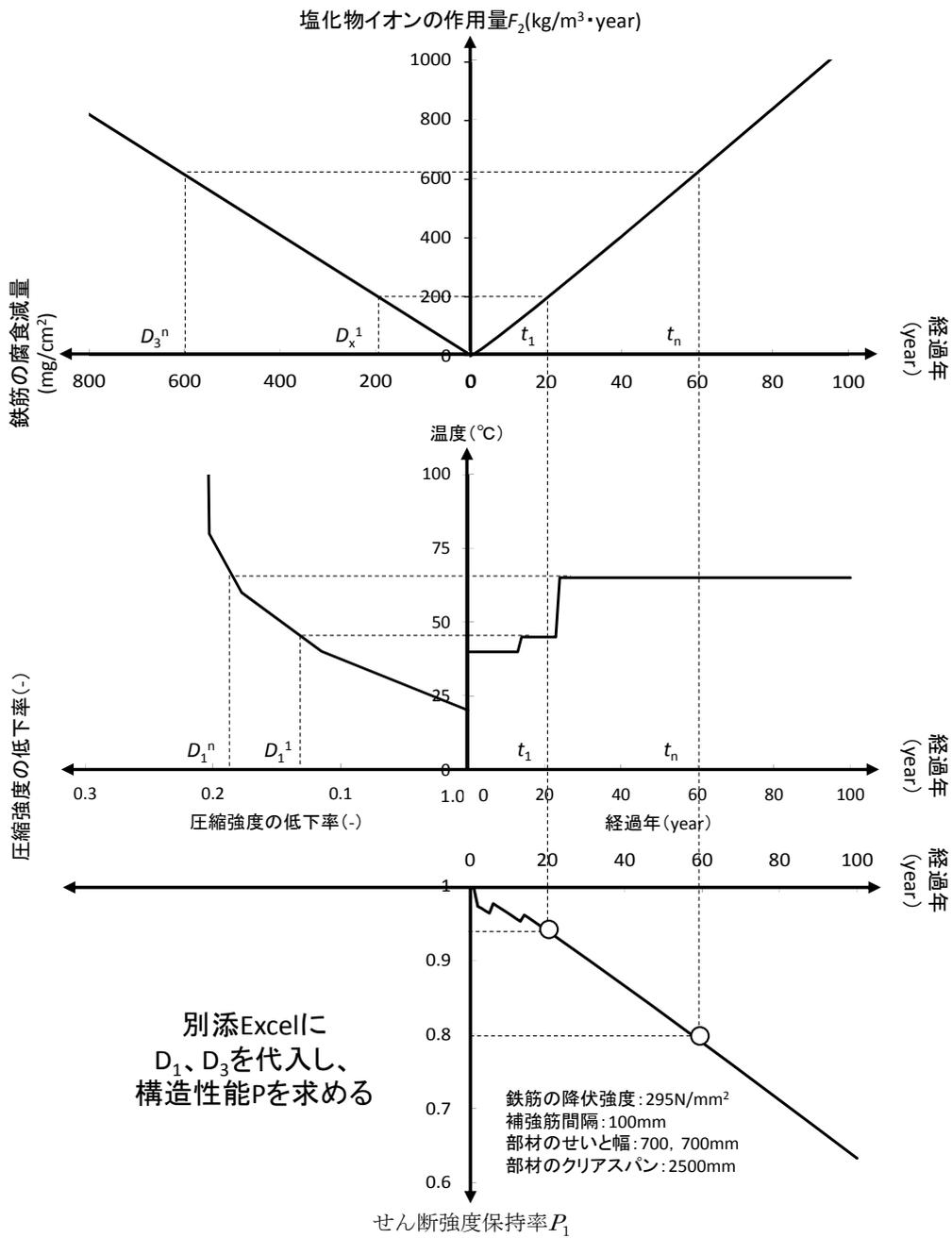


図 45 塩分浸透と熱が作用した場合でのせん断強度保持率の  $PDFt$  曲線例

原子力規制庁 御中

平成27年度原子力施設等防災対策等委託費（高経年  
化技術評価高度化（コンクリート構造物の長期健全性  
評価に関する調査研究））事業

成果報告書（2 / 3）

平成28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、首都大学東京、東京工業大学、名古屋大学、東北大学、広島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

1 序論	1-1
1.1 事業目的	1-1
1.2 事業項目	1-1
1.3 事業遂行体制	1-1
1.4 実施スケジュール	1-2
1.5 事業概要	1-2
2 コンクリート構造物の複合劣化評価	2-1
2.1 はじめに	2-1
2.2 コンクリート構造物の長期健全性評価の提案	2-2
2.2.1 はじめに	2-2
2.2.2 長期健全性評価の枠組み	2-2
2.2.3 材料特性の評価	2-11
2.2.4 構造性能の評価	2-15
2.2.5 まとめ	2-31
2.3 熱影響を受けたコンクリートのひび割れ発生に関する検討	2-33
2.3.1 研究の背景および目的	2-33
2.3.2 破壊特性の評価方法	2-35
2.3.3 100℃未満で長期の加熱を受けたコンクリートのひび割れ特性	2-36
2.3.4 100℃以上で加熱を受けたコンクリートのひび割れ特性	2-50
2.3.5 100℃未満で中性化したコンクリートのひび割れ特性	2-69
2.3.6 まとめ	2-78
2.4 複合劣化を受けた鉄筋コンクリートのひび割れ発生に関する検討	2-80
2.4.1 研究の背景および目的	2-80
2.4.2 実験概要	2-81
2.4.3 実験結果および考察	2-88
2.4.4 まとめ	2-109
2.5 複合劣化を受けた鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食に関する検討	2-110
2.5.1 研究の背景および目的	2-110
2.5.2 実験概要	2-111
2.5.3 実験結果および考察	2-117
2.5.4 まとめ	2-131
2.6 鉄筋コンクリート部材の劣化による構造性能の低下に関する検討	2-132
2.6.1 鉄筋腐食による腐食膨張ひび割れ挙動に関する検討	2-132

2.6.2	経年劣化材料と鉄筋コンクリート部材の構造性能の関係.....	2-195
2.6.3	まとめ .....	2-228
2.7	まとめ .....	2-229
付録	コンクリート構造物の複合劣化による長期健全性評価（案）説明書.....	付-1
3	放射線照射によるコンクリート強度劣化評価.....	3-1
3.1	はじめに .....	3-1
3.2	コンクリートおよび構成要素のガンマ線影響評価.....	3-11
3.2.1	物理特性試験（コンクリート） .....	3-11
3.2.2	物理特性試験（セメントペースト） .....	3-66
3.2.3	物理特性試験（骨材） .....	3-74
3.2.4	まとめ .....	3-138
3.3	コンクリートおよび構成要素の中性子線影響評価.....	3-141
3.3.1	照射試験の実施状況.....	3-141
3.3.2	相互作用試験.....	3-167
3.3.3	物理特性試験.....	3-217
3.3.4	試験結果の分析.....	3-325
3.3.5	JEEP II 炉内の照射に係る解析的検討 .....	3-366
3.3.6	まとめ .....	3-442
3.4	熱・乾燥影響に関するメカニズム解明の試験的検討.....	3-445
3.4.1	異なる温度におけるコンクリート内部の湿度測定.....	3-445
3.4.2	コンクリート強度に対する温度の影響.....	3-452
3.4.3	セメントペーストの乾燥と強度の関係.....	3-458
3.4.4	セメントペースト中の水分と体積変化.....	3-468
3.4.5	まとめ .....	3-483
3.5	数値解析的検討.....	3-484
3.5.1	CCBM と中性子／ガンマ線輸送計算の連成 .....	3-484
3.5.2	コンクリートと放射線の相互作用とそのモデル化.....	3-487
3.5.3	JPDR 炉を用いた検証 .....	3-497
3.5.4	PWR 炉の解析 .....	3-508
3.5.5	まとめ .....	3-516
3.6	放射線影響に関する国際動向.....	3-517
3.7	まとめ .....	3-521
付録	数値解析的検討（案）の使用説明書.....	付-1

4	コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する調査研究.....	4-1
4.1	はじめに .....	4-1
4.2	コンクリートの ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法.....	4-8
4.2.1	既存の骨材試験による長期膨張特性の評価.....	4-10
4.2.2	有効な骨材試験方法の選択と改善.....	4-26
4.2.3	有効な骨材試験方法の根拠データの取得.....	4-44
4.2.4	まとめ .....	4-51
4.3	既存コンクリート構造物の ASR 診断方法.....	4-54
4.3.1	劣化進行段階の異なる試験体の作成および基礎データの取得.....	4-58
4.3.2	外観観察、岩石学的評価等による ASR 反応性評価.....	4-70
4.3.3	劣化進行段階の異なる試験体による ASR 反応性評価.....	4-86
4.3.4	促進膨張試験による膨張のポテンシャル評価.....	4-108
4.3.5	まとめ .....	4-163
4.4	ASR による部材性能変化の予測評価手法の調査 .....	4-167
4.4.1	ASR 膨張予測モデルの調査 .....	4-169
4.4.2	国内外の予測評価手法の調査.....	4-181
4.4.3	予測評価手法の有効性確認.....	4-197
4.4.4	まとめ .....	4-201
4.5	ASR に関する国際動向 .....	4-205
4.6	まとめ .....	4-214
5	事業進捗の管理と成果報告の実施.....	5-1
5.1	実施履歴 .....	5-1
5.2	報告会 .....	5-1
5.3	第三者有識者委員会.....	5-2
5.4	研究会 .....	5-3
5.5	定例報告 .....	5-3
5.6	品質管理活動.....	5-3
6	結論 .....	6-1
	謝辞	

### 3. 1 はじめに

#### (1) 本プロジェクトの背景<sup>1</sup>

(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<sup>2</sup> (以降、JNES 審査マニュアル) 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。」と記載しており、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、60年時点の放射線照射量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、中性子およ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：  $1 \times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>

ガンマ線照射：  $2 \times 10^{10}$  rad

この目安値は、Hilsdorf論文<sup>3</sup>などを参照して設定した数値であることから、目安値に関して文献調査を実施した。具体的には、放射線影響評価や目安値設定の根拠とされている図3-1および図3-2にまとめられている放射線照射試験における材料条件や照射条件について調査し、軽水炉における材料条件や照射条件と比較することにより、軽水炉の高経年化技術評価への適用性について検討した。

その結果、下記の通り、照射試験における試験条件が軽水炉の供用条件と異なることが明らかとなった。

- ・ 評価物性：圧縮強度ではなく曲げ強度を評価しているケースがある。
- ・ 使用材料：軽水炉の建設で使用されているポルトランドセメント以外のセメント(アルミナセメント等)が使われているケースがある。
- ・ 試験体形状：試験体形状(直方体：8×8×70mm)より圧縮強度を評価できるとは考えにくいケースがある。
- ・ 照射条件(温度)：加速照射を行うため、照射温度が100℃を超えているケースが多い。  
なお、軽水炉ではコンクリート構造物の温度が65℃(局部的には90℃)以下に押さえ

<sup>1</sup> ここで示す内容は、前フェーズにおける研究成果の内容である。

<sup>2</sup>(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

<sup>3</sup>Hilsdorf, H. K., et al., “The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete,” ACI SP-55, 1978

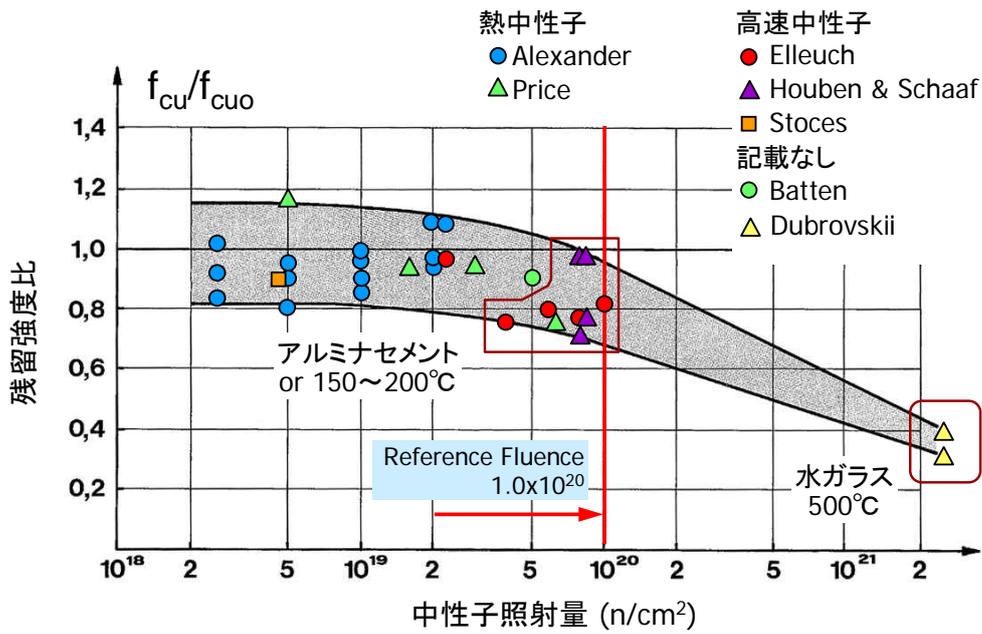
られている。

- ・ 照射条件 (中性子エネルギーレベル) : 高経年化技術評価における中性子照射に対する健全性評価では、0.1MeV以上の高速中性子照射量予測値と目安値の比較により健全性評価を行っているが、エネルギーレベルの低い中性子により照射試験を行っているケースやエネルギーレベルが不明であるケースがある。
- ・ 軽水炉ではステンレス製ライナー等により、コンクリートが直接水と接触することはないが、試験体を水中に浸漬して、ガンマ線照射試験を行っている照射試験が含まれている。

以上の調査結果に基づいて、図 3-1 および図 3-2 より、軽水炉の環境条件とは異なる試験条件で取得されたデータを除去すると、下記のことが明らかとなった。

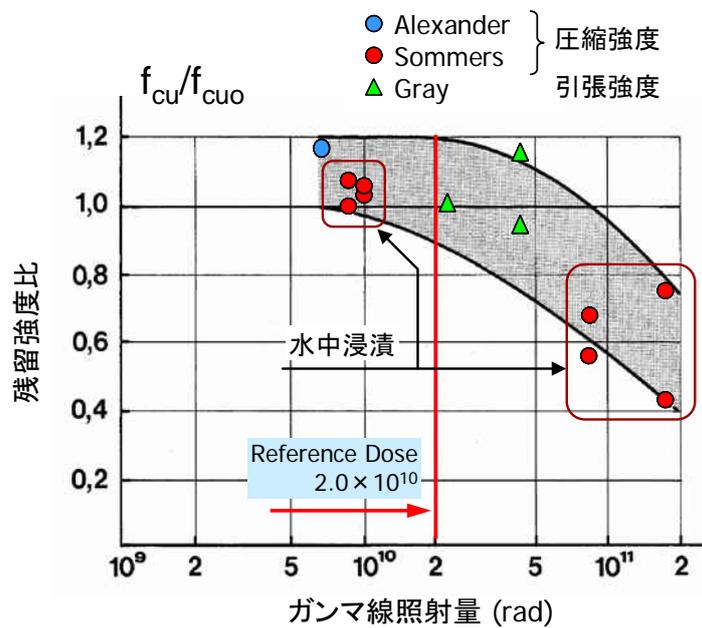
- ・ 中性子のエネルギーレベルを考慮すると、軽水炉の高経年化技術評価に向けて残留強度を議論できるデータ数は2点 (Stoces and Batton) となる。
- ・ ガンマ線については、もともとデータ数が少なく、軽水炉条件とは異なるデータを除去すると、残留強度を議論できるデータは1点 (Alexander) となる。
- ・ Hilsdorf 論文では、中性子およびガンマ線ともに、照射量の増加に伴い、残留圧縮強度が低下する傾向は確認できない。
- ・ Hilsdorf 論文では、中性子およびガンマ線ともに、照射試験データが少ないので、残留強度を議論することは難しい。

このように、Hilsdorf論文は、放射線影響評価や目安値設定の根拠としては、科学的な根拠が不足している。放射線照射に対する健全性評価の信頼性を向上させるためには、放射線照射がコンクリートの物理特性に与える影響を把握し、劣化メカニズムを解明し、安全審査に資する科学的根拠を拡充することが重要である。



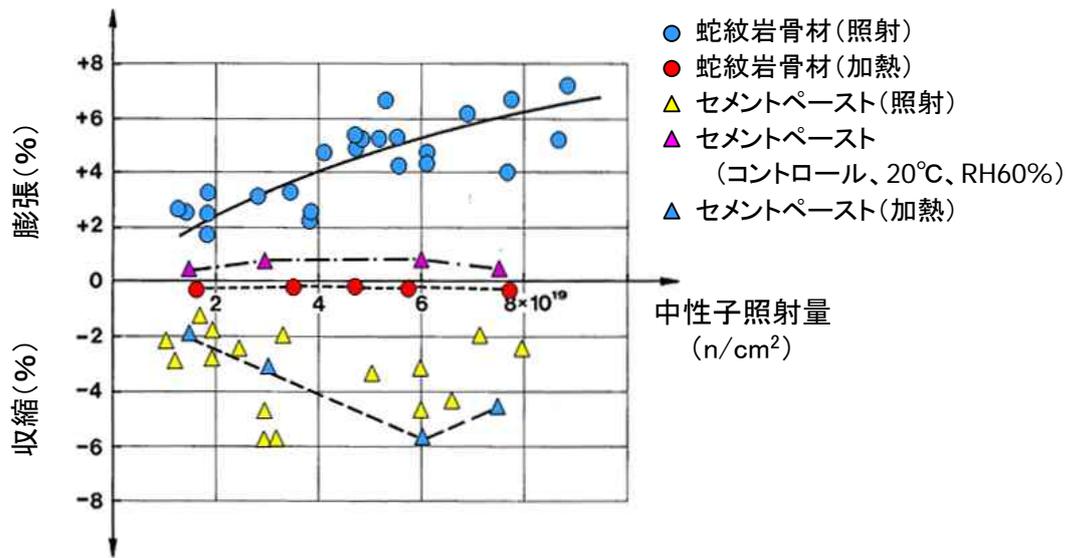
(参考文献 3 の凡例を変更、注記を追加)

図 3-1 中性子照射量とコンクリートの圧縮強度の関係



(参考文献 3 の凡例を変更、注記を追加)

図 3-2 ガンマ線照射量とコンクリートの圧縮強度の関係



(参考文献3の凡例を変更)

図 3-3 中性子照射量と骨材・セメントペーストの体積変化の関係

これらの知見にもとづき、Hilsdorf 以降の研究を評価し、軽水炉に用いるコンクリートの  $F_c/F_{c0}$  (照射後のコンクリート強度とリファレンスコンクリート強度の比) についてとりまとめたものを図 3-4 に示す。ここに示されるように、照射によってコンクリート強度は低下するものと考えられた。

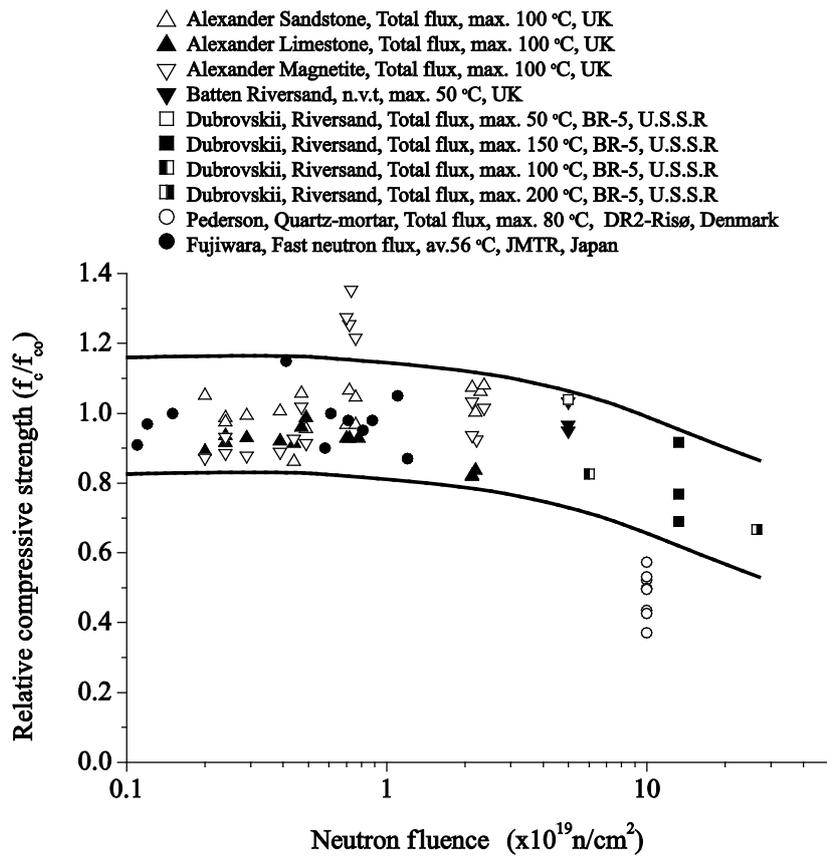
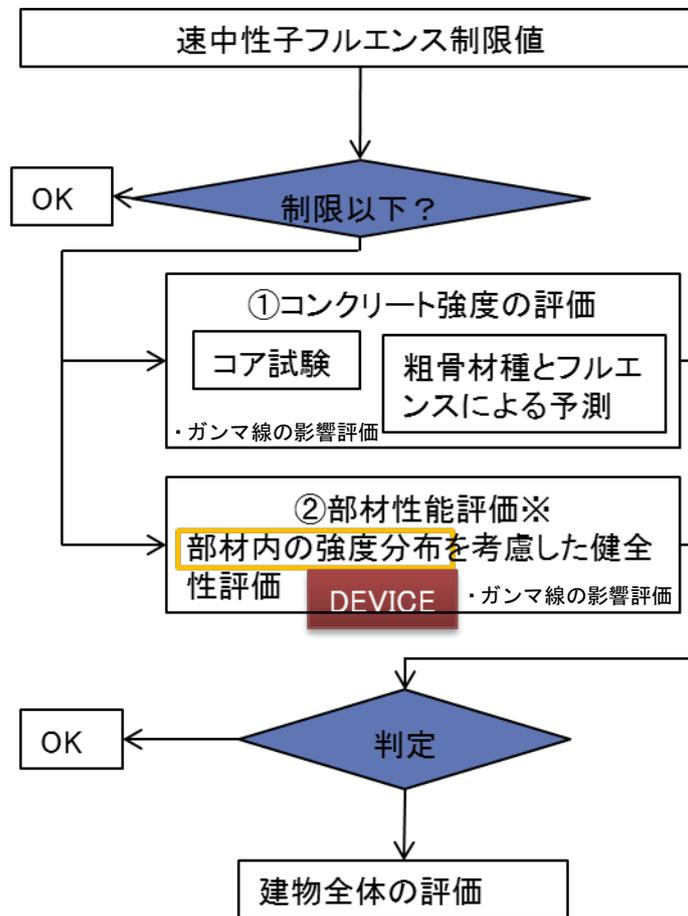


図 3-4 中性子照射量と相対コンクリート強度の関係<sup>4</sup>

<sup>4</sup> J. Komonen and V. Penttala, —Effects of High Temperature on the Pore Structure and Strength of Plain and Polypropylene Fiber Reinforced Cement Pastes, || Fire technology 39(1), pp. 23-34, 2003.

(2) 本研究の目的<sup>5</sup>

本研究では、実機の健全性評価のフローの骨格として、図 3-5 を想定した研究を行う。



\*: 詳細検討の内容については、状況に応じて、その都度検討する。

図3-5 放射線照射の影響を受けるコンクリート部材の健全性評価のフロー

このフローを検証するため、もっとも不足しているものが放射線照射影響に関する科学的根拠や、規制値を定めるための科学的根拠である。また、科学的根拠を網羅し、実験データを整理するだけで照射量による規制値の設定はできるが、健全性評価フローを構成することはできない。科学的根拠を接合する数理モデルによる評価が、規制値より下位の健全性評価フローを構成可能とする。

以上の観点から必要となる研究項目について概要を取りまとめる。

<sup>5</sup> 本節は、2013 年度高経年化技術評価高度化事業の報告書に加筆したものである。

a) 照射量に基づく劣化度評価

どのような骨材を用いた場合に膨張挙動が生じ、結果として、コンクリート内の損傷とコンクリートの強度低下につながるかに関する基盤データの拡充が不可欠である。本研究では、石英量が 90%以上の中性子に対する膨張特性が高いと考えられる骨材と、砂岩で粘土鉱物量が多く、収縮が大きく中性子に対する膨張性が小さいと考えられる骨材を用いたコンクリートの物性を比較することにより、骨材の照射影響を抽出することを一つの目的とした。加えて、照射後の試験体の水分逸散の程度が異なることから、骨材への影響を抽出する目的で照射後の PIE(Post Irradiation Examinations)の前に前乾燥を実施することとした。

また、科学的知見を収集するという観点からは、中性子、ガンマ線、熱の影響が同時に作用する部材内部のコンクリート劣化を適切に評価するためには、中性子線の影響のみならず、ガンマ発熱の影響、ガンマ発熱や伝熱による部材の加熱とそれによる乾燥の影響についても定量的な評価をすることが必要である。そのため、図 3. 3-6 に示す各種要因について、それぞれの化学的変質とそのメカニズム、また、それらがコンクリートの物性変化に及ぼす影響について定量的に把握することを目指した。これは、原子力発電施設に用いられるコンクリートが地産地消であり、さまざまな性質を持つコンクリートの健全性評価の妥当性を判断するためには、基盤となる科学的根拠の確立無しには成し得えないからである。

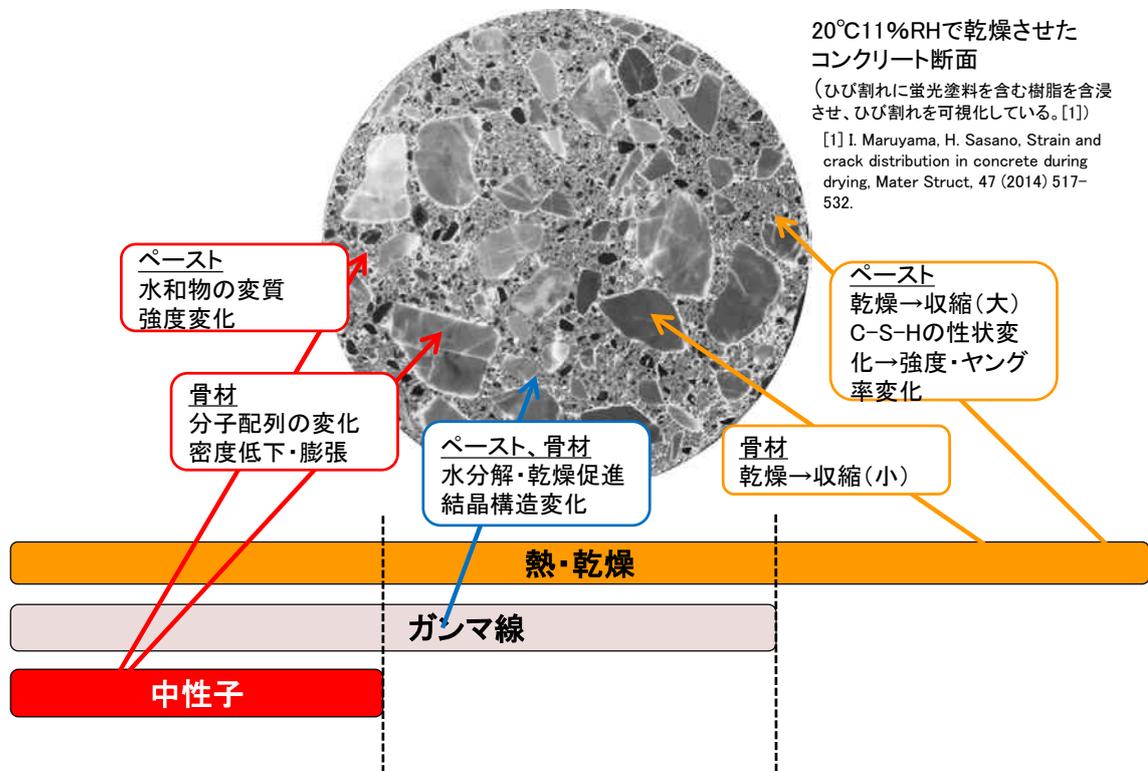


図 3. 3-6 コンクリートの変質を及ぼす要因

次に、さらなる規制のあり方を議論する場合には、以下のような2項目の検討を行う必要があると考える。

#### b) コンクリートコアによる評価

照射量の目安値を上回ったとしてもコンクリートの強度低下が本当に生じているかどうかは、まだ検討の余地がある。この場合、実躯体からのコア強度の調査、あるいは非破壊試験と数値解析的検討の組み合わせなどによって、評価をすることで健全性評価が可能である。また、これは将来の課題となるが、表層部骨材の分析から、骨材の膨張量が推定できる場合においては、この値からコンクリートの健全性を評価することも可能となると考えられる。そのためには、骨材の構成成分と放射線量に依存した膨張特性のデータベースが必要になる。そこで本検討では、異なる石英量を有する試験体についても照射試験を実施している。

#### c) 部材レベルによる性能評価

中性子およびガンマ線が照射される部材のコンクリート劣化は、コンクリート自体に遮蔽効果があるため、もっとも影響を受けるのは内側コンクリートであると考えられる。この内側コンクリートの損傷の程度を理解し、部材の性能を予測・評価は、放射線・水・熱の輸送とコンクリートの変質を評価する数値計算によることで可能となる。これらの枠組みを整備し、健全性評価に資するデータを蓄積することで、健全性評価の枠組みについてより包括的なものを提案することが可能となる。

### 国際知見交換会と先進技術の反映

コンクリートの放射線影響評価は、原子力プラントの Long-term operation において重要な課題となっている。一方、コンクリートの放射線影響を明らかにして規制のあり方を検討する上では、照射試験が高価なこと、コンクリートが地産地消の材料であり、セメントや骨材を初め、極めて多様な構成材料より成り立つといった課題がある。このことを考慮すると、その影響の解明と規制のあり方については、国際的知見を共有することで、本事業に最新知見を反映するとともに、規制に資する考え方を共有することが、我が国の規制研究を実施する上では極めて重要であるといえる。また、現在、科学的にはもっとも進んでいると考えられる日本の検討結果を国際的な場で情報公開することは、国際貢献としても大きな役割として評価されると考えられる。

この観点から、本研究グループでは、国内においても第一線の研究者による照射影響検討会を組織し、本研究の遂行が科学的根拠に基づき行われているかについて、逐次評価をしてもらうことを実施するとともに、米国オークリッジ国立研究所との意見交換会を定期的にも実施してきた。また、これらの意見交換会の枠組みを日米だけでなく、他国（スペイ

ン、フィンランド、チェコ等)に拡大する議論を進めることとし、International Committee on Irradiated Concreteが組織された。

今年度は、2015年11月2-5日に、米国テネシー州ノックスビルのオークリッジ国立研究所において第一回意見交換会議を行った。参加者は米国(ORNL、EPRI、NRC、UCLA、アリゾナ大学)、フィンランド(Fortrum、VTT)、スペイン(規制局、他)、チェコ(チェコ工科大学、原子力研究所UJV)、ポーランド(PAN)、フランス(CEA)、イタリア(パドヴァ大学)であった。議論の結果、第二回意見交換会議に向けて、Tom Rosseeel 博士(ORNL、前議長)、丸山(議長)、Yann Le Pape 博士(副議長)、Ferreira Miguel 博士(VTT、セクレタリー)が選出され、TCとして、以下のものが組織された。

TC :

1. Structural Performance & Mechanistic Understanding of the Effects of Irradiation on Concrete (YannLe Pape - ORNL, USA)
2. Harvesting and Characterization of Service Irradiated Concrete (Manuel Ordonez, ENRESA, Spain)
3. Accelerated Irradiation Studies of Concrete and Its Components (Michal Koleska, RC-Rez, Czech Republic)
4. Characterization of Irradiated Concrete (Carmen Andrade, CSIC, Spain)

NRCからは、国際共同研究の必要性と企画議論開始の要請があった。また、スペイン、米国、日本からは廃炉材研究についての情報提供があった。米国は主として数値解析的検討の紹介と岩石鉱物(石英とカルサイト)のHIFR(High Flux Isotope Reactor)での照射実験の速報が報告された。イタリアでは、水・熱・放射線の解析についての紹介があった。チェコの国立原子力研究所は現在、コンクリートの照射試験を計画中であることが報告され、スペインからはZoritaプロジェクトにおいて、コンクリートの照射環境のキャラクタリゼーション結果が示された。詳細解析の結果、コンクリート部材表面の最大フルエンスは、速中性子(0.1MeV)で $10^{19}\text{n}/\text{cm}^2$ 程度であり、当初見込まれた値よりは小さいことが報告された。この部材のコンクリートに関する実験は、EPRI+ORNLでも実施予定ということであった。また、ZIONプロジェクトについて詳細は報告されなかったが、NRCがORNLに依頼して実験する方向性で進んでいることが報告された。フランスからの報告は、廃棄処分コンクリートを対象としたガンマ線の電離作用によるものであり、セメントの変質よりは、水素発生による鉄筋の脆化について問題視しているという事例が報告された。

次回は、日本で実施の予定で、日程は11月の第二週を想定している。

今後、既存構造物・廃炉からの実験データも出てくるが、検証のためにも本研究プロジェクトで得られる結果は、ひとつのリファレンスとなるはずで、今後、多くのコラボレーションを実施することが可能であると考えられる。

## 3.2 コンクリートおよび構成要素のガンマ線影響評価

### 3.2.1 物理特性試験（コンクリート）

#### (1) 試験概要

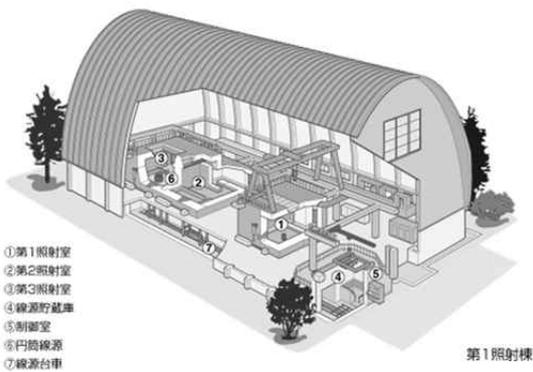
##### 1) 照射試験

##### (a) 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。

##### (b) 試験場所

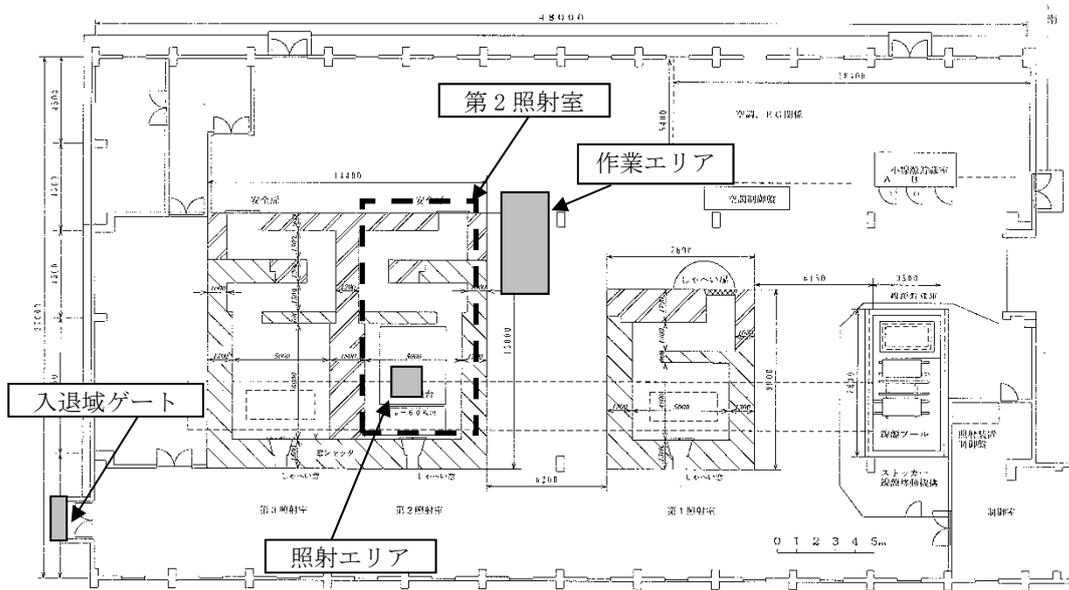
ガンマ線照射は、高崎量子応用研究所（群馬県高崎市綿貫町 1233）のコバルト第 1 照射棟の第 2 照射室で行ない、計測のための配管、配線を照射室外の計測システムに接続した。コバルト第 1 照射棟の概要を図 3.2.1-1 に示す。また照射室内における試験体配置状況、照射室内外での配線の経路および敷設状況、乾湿計の設置箇所を図 3.2.1-2～図 3.2.1-7 に、さらに照射室外の計測システムの外観を図 3.2.1-8～図 3.2.1-10 に示す。図 3.2.1-6 の風速計は照射開始前の時間帯のみに使用され照射開始前に室外に搬出した。



(a) イメージ図

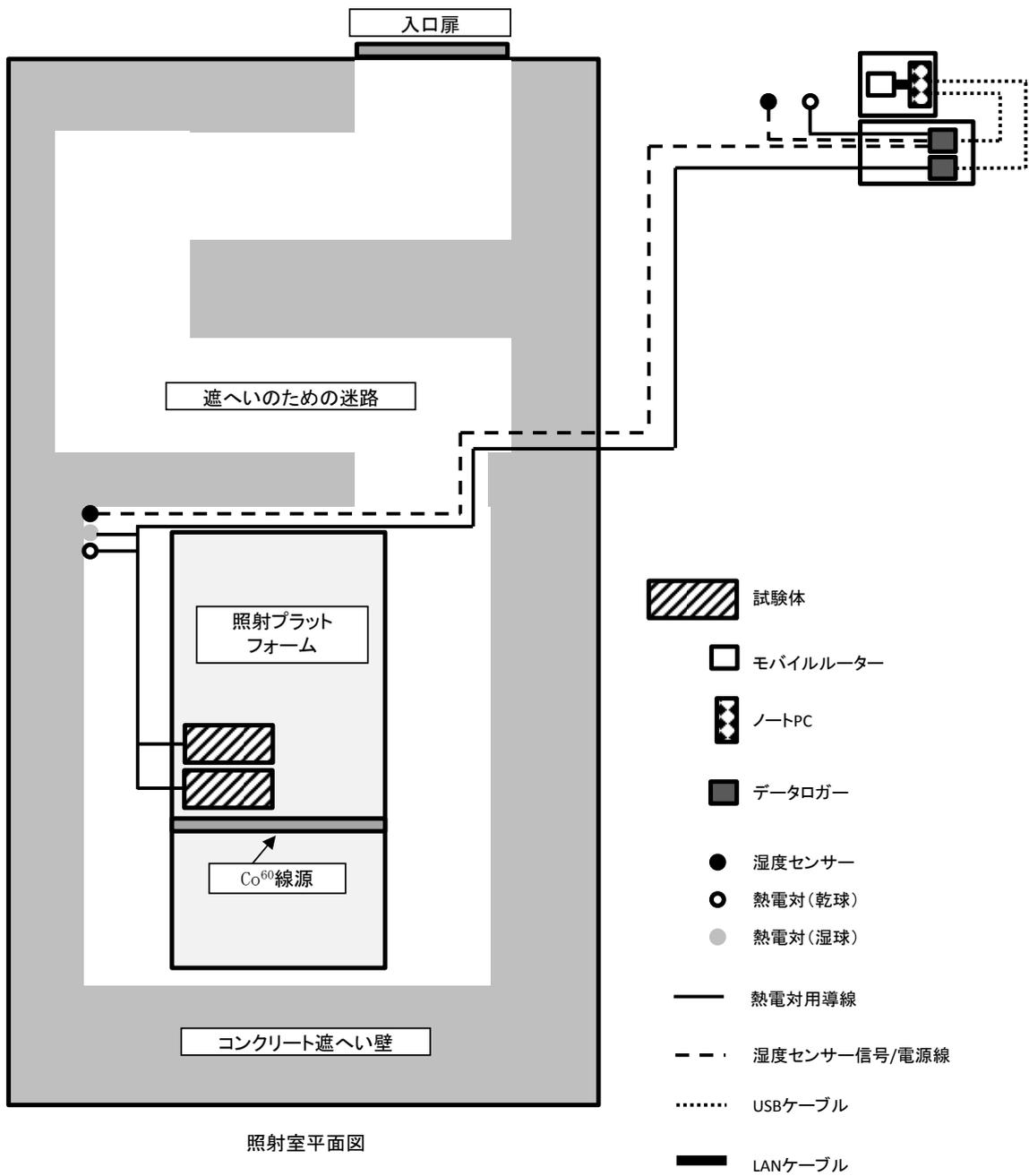


(b) 正面写真



(c) 平面図

図 3.2.1-1 コバルト第1照射棟



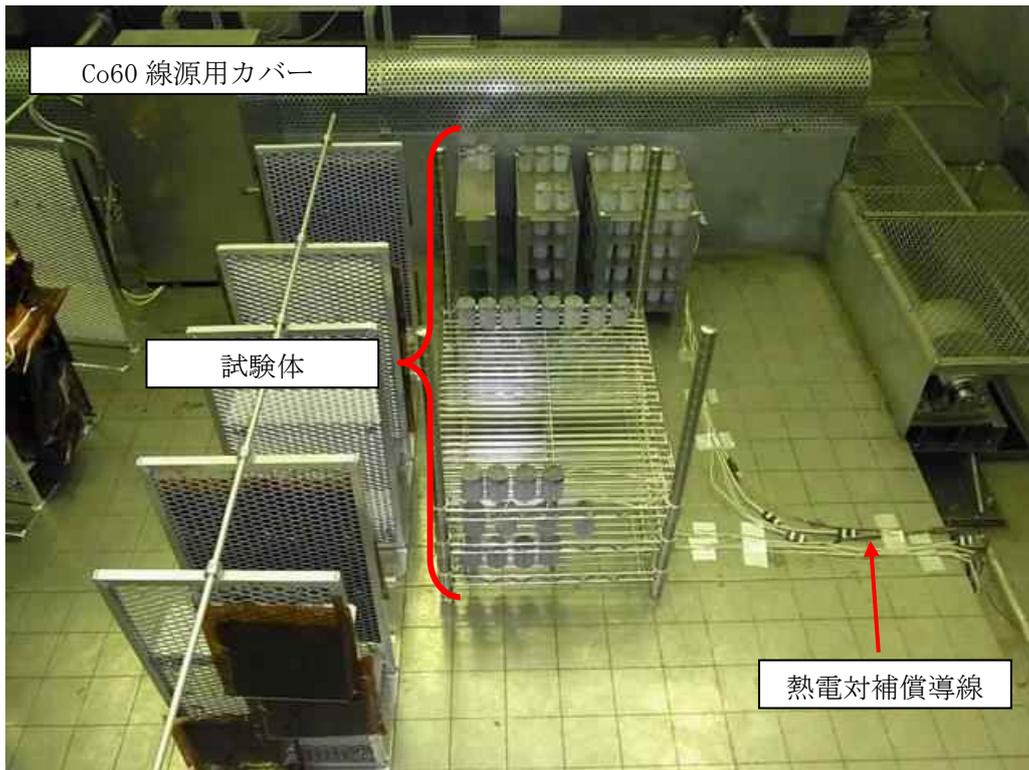


図 3.2.1-3 試験体配置写真 (全体)



図 3.2.1-4 試験体配置写真 (前列棚)



図 3.2.1-5 試験体配置写真（後列棚）



図 3.2.1-6 湿度計測ユニットおよび風速計測システム



図 3.2.1-7 湿度計測ユニット



図 3.2.1-8 照射室外計測システム外観



図 3. 2. 1-9 通信機内臓モバイルルーター外観



図 3. 2. 1-10 照射室外湿度センサおよび熱電対設置箇所

(c) 試験計画

a) 試験体

試験体は、2011年度に製作したφ40×60mm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、粗骨材に砂利1種類と砕石（凝灰岩）1種類を用いた計2調合である。使用材料および調合を表3.2.1-1および表3.2.1-2に示す。打設後、20℃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（骨材1：砂利）（φ40×60mm）：1-001～1-060（60体）
- ・コンクリート試験体（骨材2：砕石）（φ40×60mm）：2-001～2-060（60体）

表 3.2.1-1 コンクリート使用材料

使用材料	記号	備考	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 <sup>3</sup>	
細骨材	SD2	S	山砂、静岡県産	2.61g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	SS6	GC	硬質砂岩砕石、粒度5～13mm、愛知県産	2.66g/cm <sup>3</sup>
	GV2	GG	砂利、粒度5～13mm、静岡県産	2.64g/cm <sup>3</sup>

表 3.2.1-2 コンクリートの調合

調合番号	骨材の種類		セメント の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
	細骨材	粗骨材				W	C	S	GC	GG
WC50-No.1	SD2	SS6	早強	50	45	183	366	799	995	-
WC50-No.2		GV2		50	42	177	354	757	-	1057

b) 照射試験

(i) 試験条件

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3.2.1-11に示す。

照射量は、 $2.0 \times 10^5$  kGy、 $1.0 \times 10^5$  kGy、 $5.0 \times 10^4$  kGy、 $2.5 \times 10^4$  kGyの4水準とし、線量率が10kGy/h、5kGy/h、2.5kGy/h、1.25kGy/hの位置に試験体を4ヶ月、8ヶ月、16ヶ月、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3.2.1-3および図3.2.1-12に示す。図3.2.1-13～図3.2.1-19に照射試験配置図、図3.2.1-20に試験体管理番号、図3.2.1-21に照射エリアを示す。



図 3. 2. 1-11 ステンレス製試験体設置棚

表 3. 2. 1-3 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 <sup>4</sup> kGy 骨材 2種類	—	—	—
	8ヶ月	5.0×10 <sup>4</sup> kGy 骨材 2種類	2.5×10 <sup>4</sup> kGy 骨材 2種類	—	—
	16ヶ月	1.0×10 <sup>5</sup> kGy 骨材 2種類	5.0×10 <sup>4</sup> kGy 骨材 2種類	2.5×10 <sup>4</sup> kGy 骨材 2種類	—
	32ヶ月	2.0×10 <sup>5</sup> kGy 骨材 2種類	1.0×10 <sup>5</sup> kGy 骨材 2種類	5.0×10 <sup>4</sup> kGy 骨材 2種類	2.5×10 <sup>4</sup> kGy 骨材 2種類

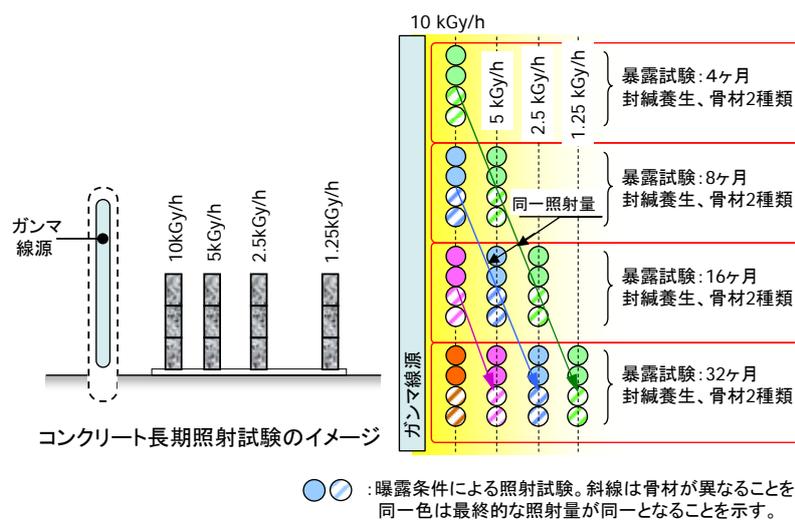


図 3. 2. 1-12 試験体設置のイメージ

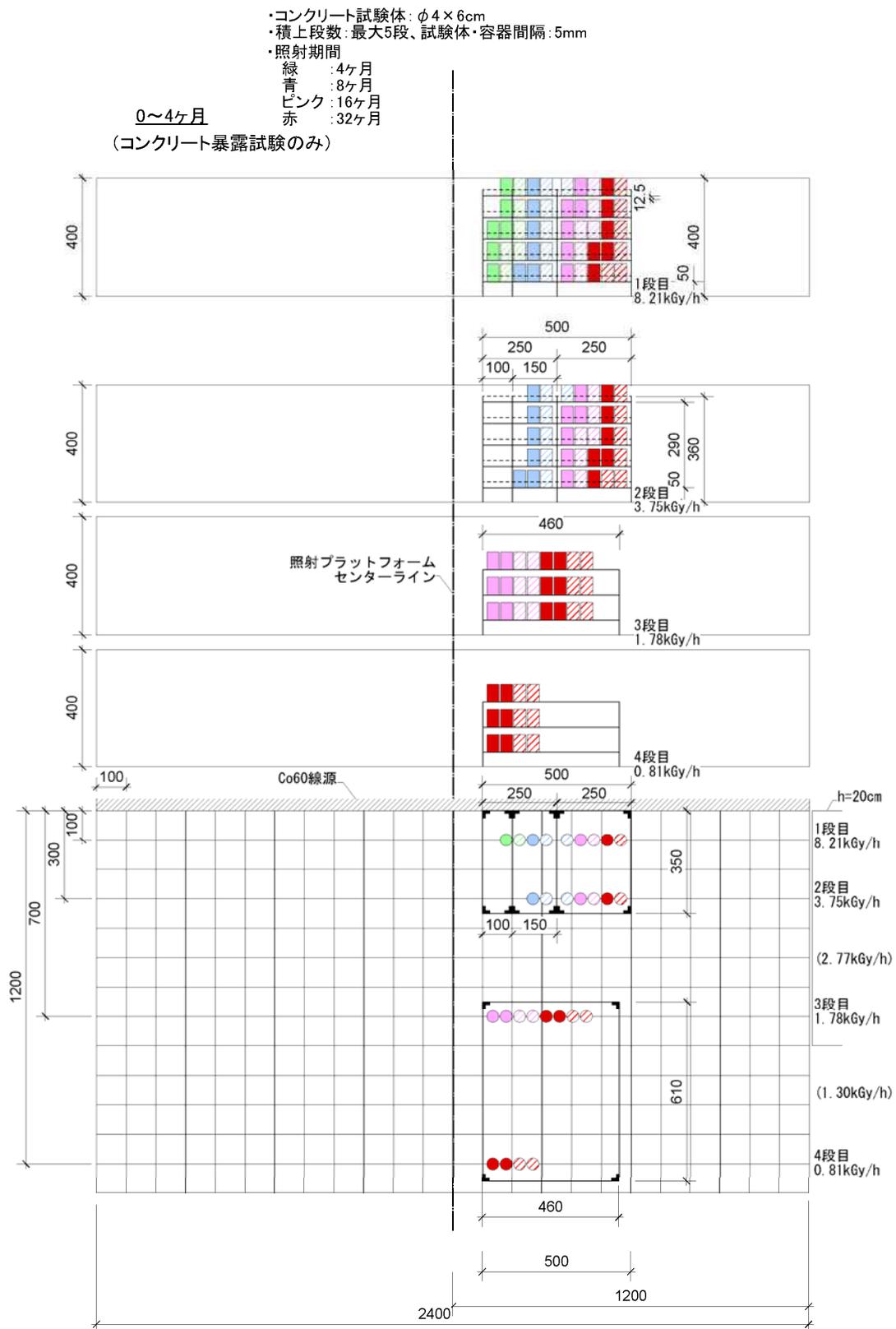


図 3. 2. 1-13 照射試験配置図：0～4ヶ月間

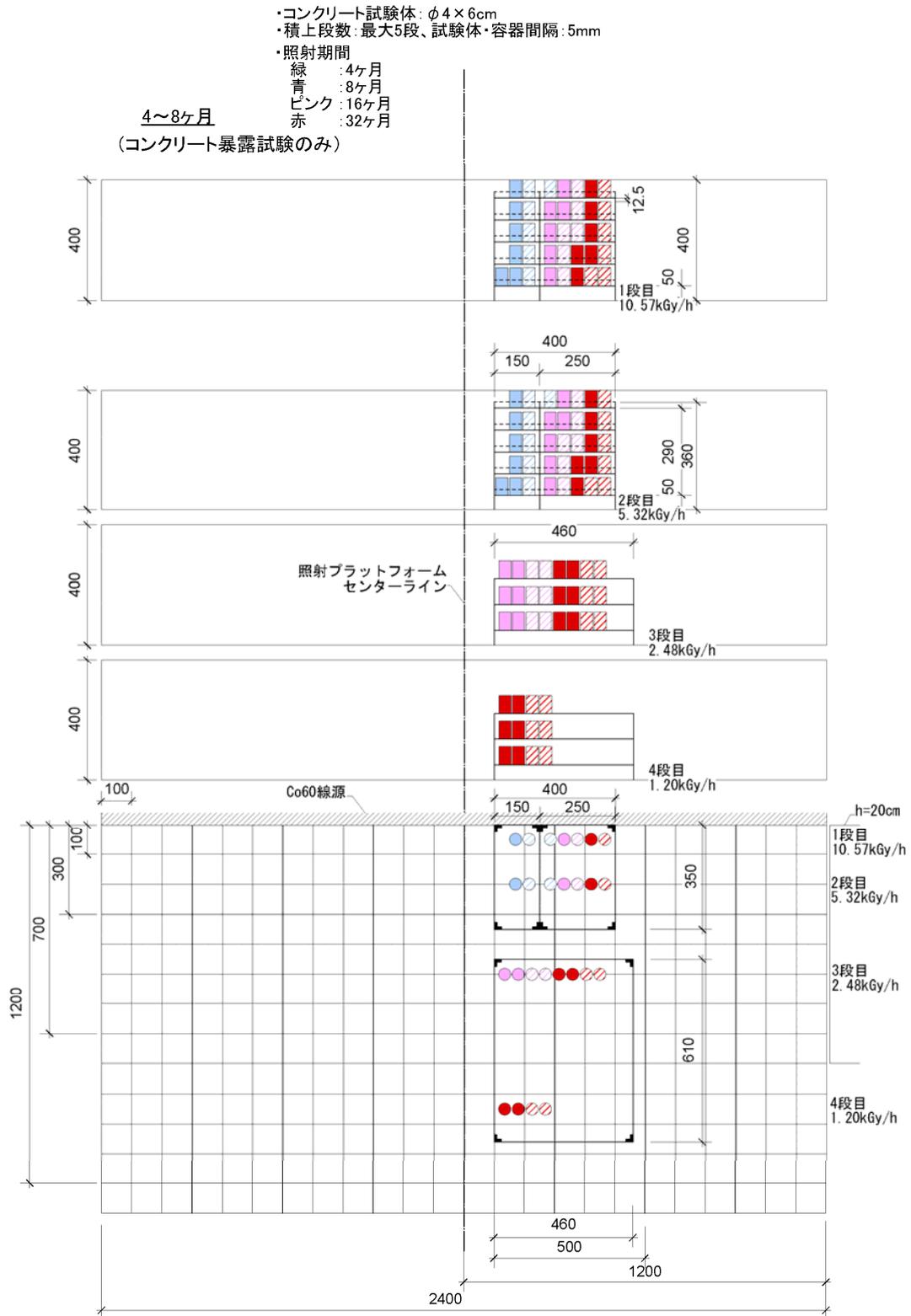


図 3. 2. 1-14 照射試験配置図：4~8ヶ月間

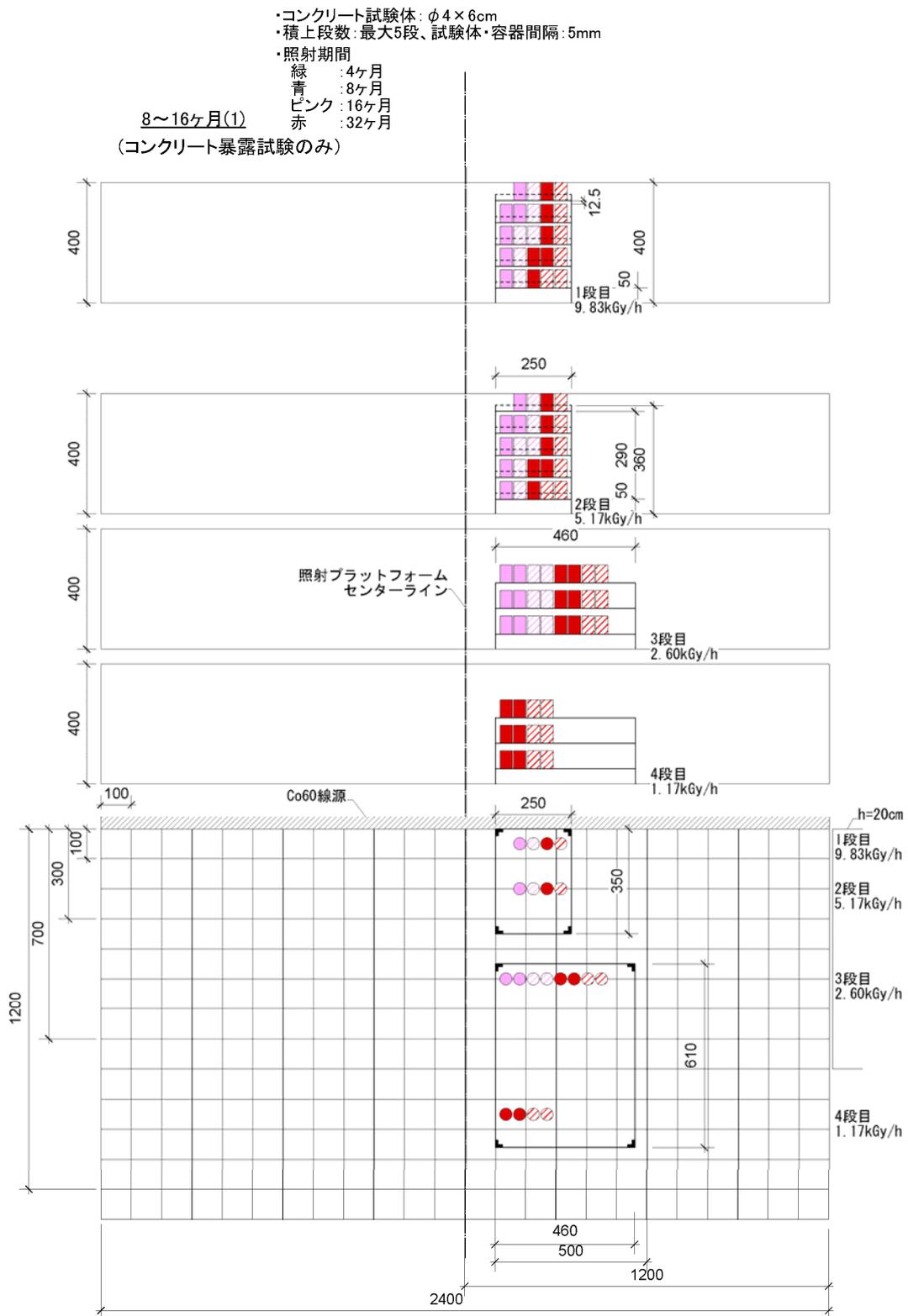


図 3.2.1-15 照射試験配置図 : 8~16ヶ月間 (1)

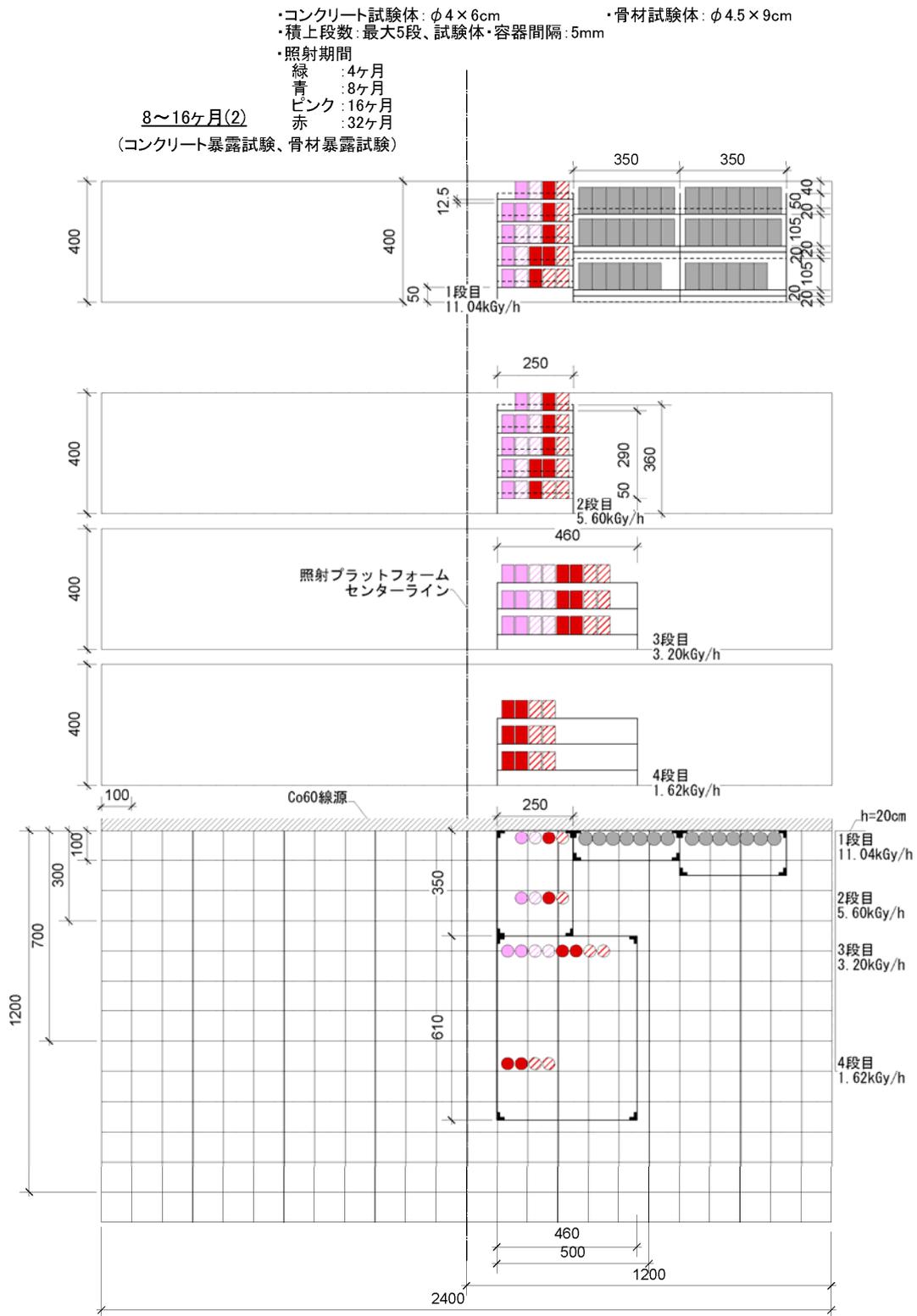


図 3.2.1-16 照射試験配置図：8～16ヶ月間(2)

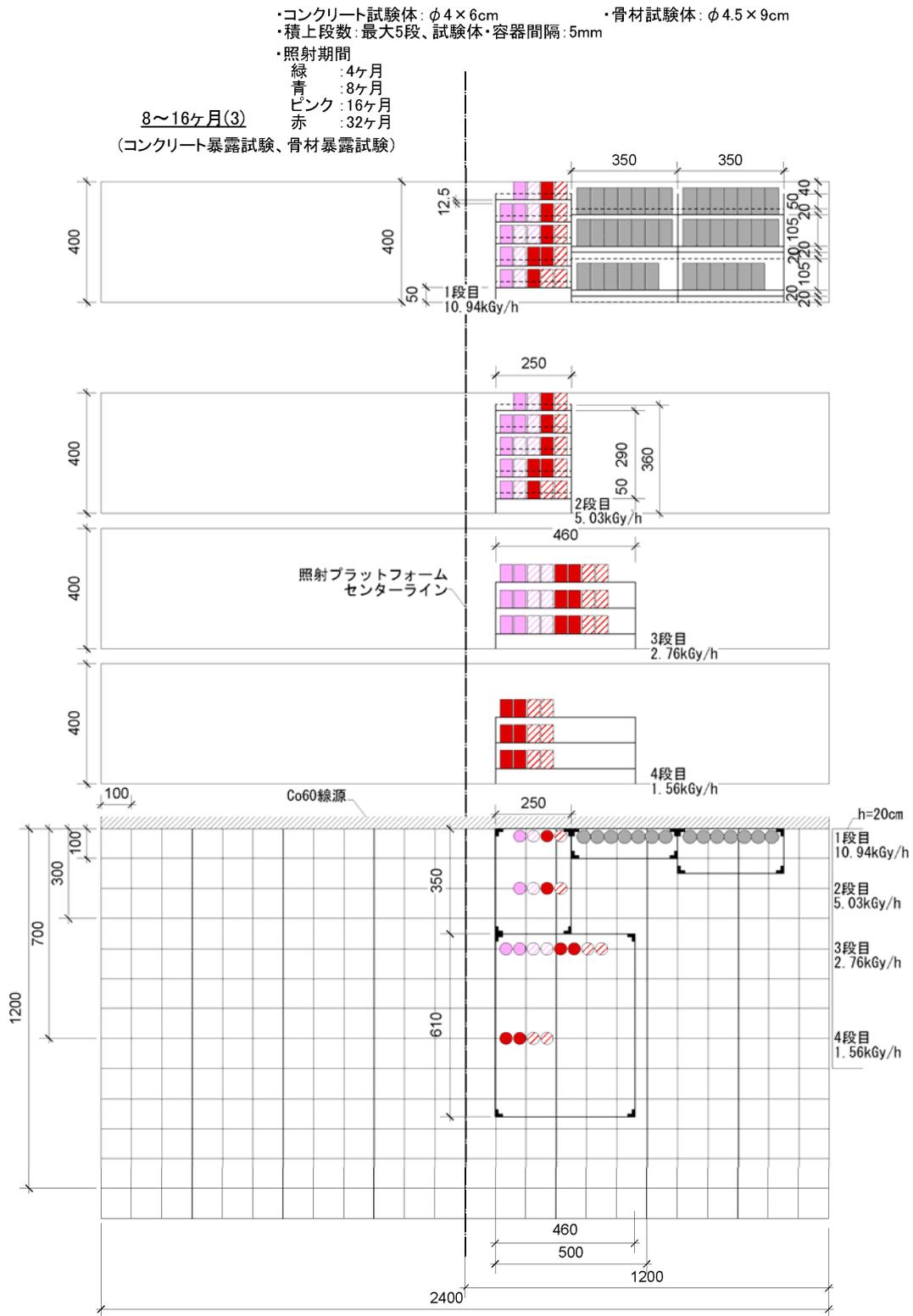


図 3.2.1-17 照射試験配置図：8~16ヶ月間 (3)

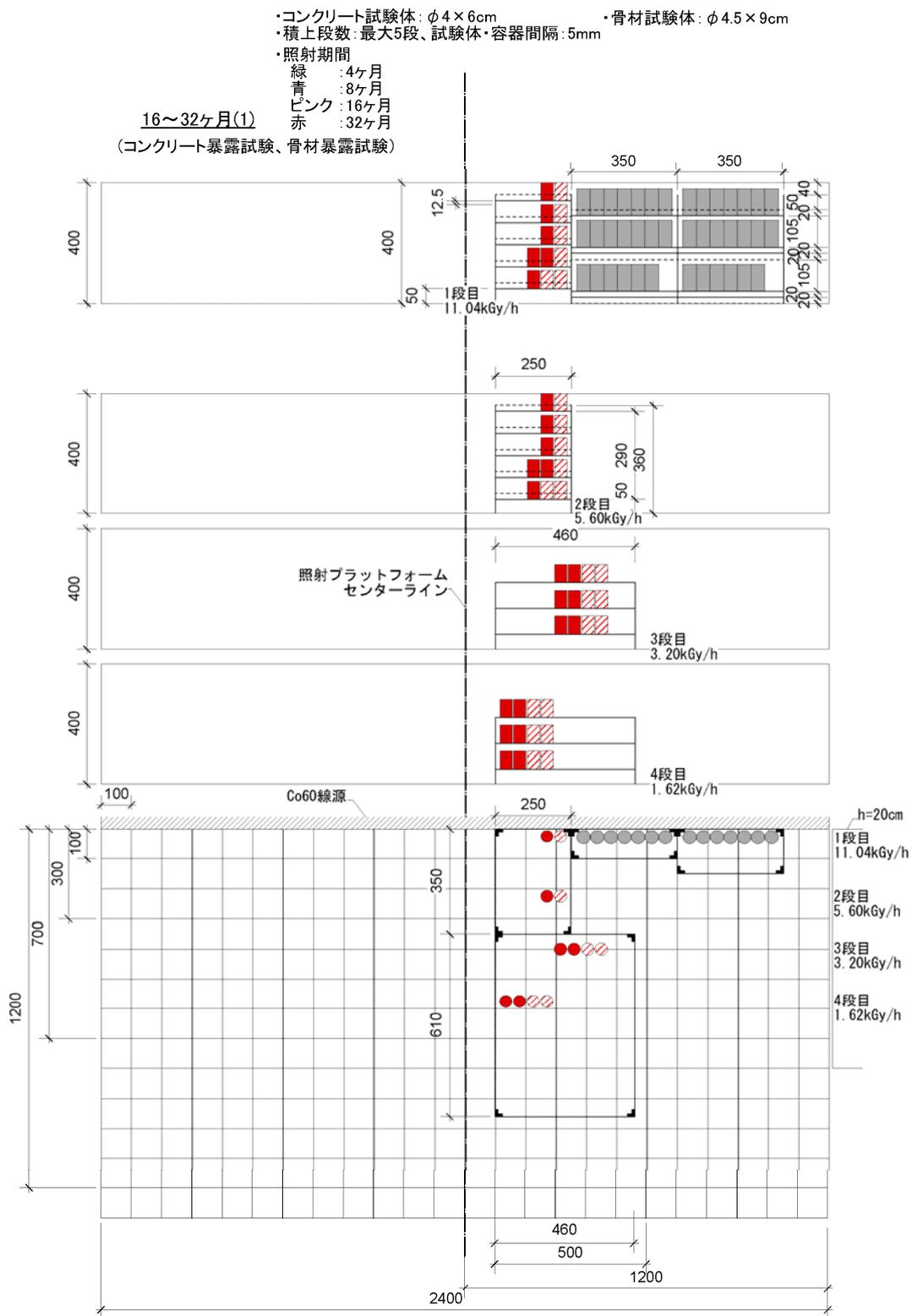


図 3.2.1-18 照射試験配置図：16～32ヶ月間（1）



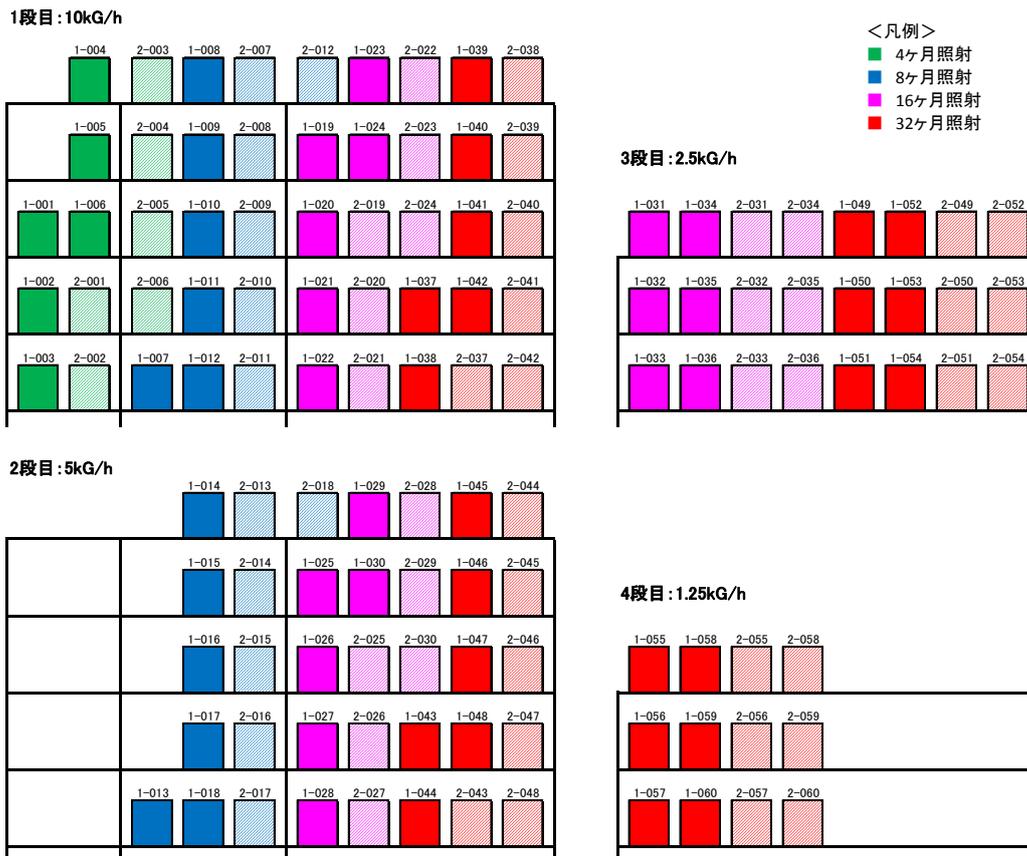


図 3. 2. 1-20 試験体管理番号

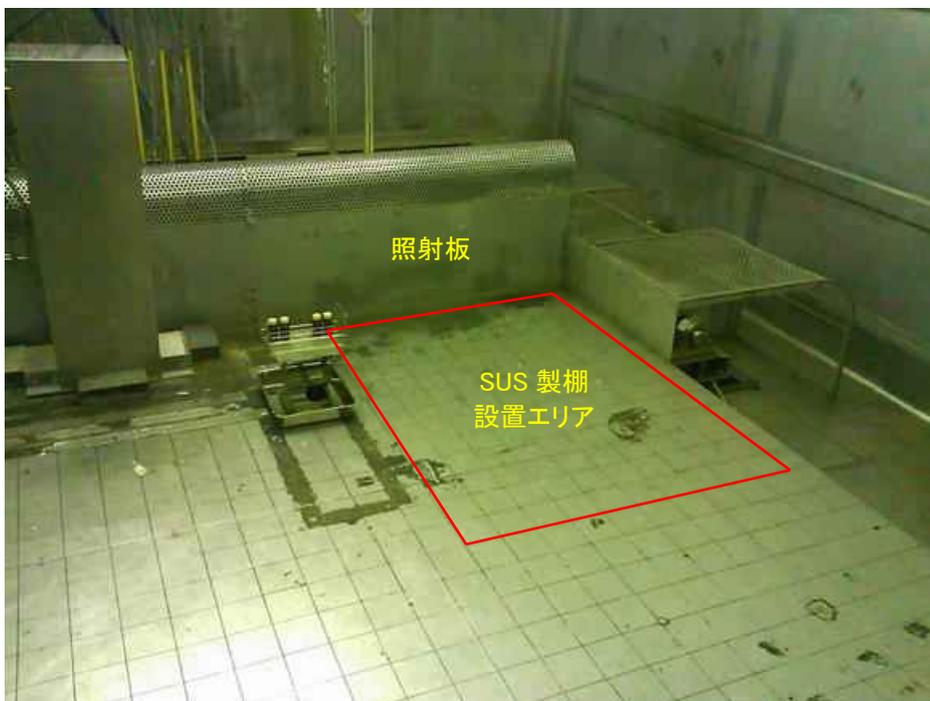


図 3. 2. 1-21 照射試験エリア

(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。試験体に取り付けた熱電対のケーブルをデータロガーに取り込む。なお、照射板からの距離に応じて試験体を8体選定し、試験体側面に熱電対を取り付けた。
- 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

## 2) 非照射・加熱試験

### (a) 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・乾燥の影響をも受ける。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。

### (b) 試験計画

#### a) 試験体

サイズ、調合、材齢および養生方法は、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（骨材 1：砂利）（ $\phi$  40×60mm）：1-061～1-078（18 体）
- ・コンクリート試験体（骨材 2：碎石）（ $\phi$  40×60mm）：2-061～2-078（18 体）

#### b) 非照射・加熱試験

##### (i) 試験条件

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. 2. 1-22～図 3. 2. 1-25 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. 2. 1-4 に、試験体管理番号を図 3. 2. 1-26 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：熱電対による照射試験体表面温度の 1 列目および 4 列目毎の平均値
- ・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. 2. 1-22 恒温恒湿槽：IG400（照射試験 1 列目模擬）



図 3. 2. 1-23 試験体設置状況（照射試験 1 列目模擬）



図 3. 2. 1-24 恒温恒湿槽：PR-2K（照射試験 4 列目模擬）



図 3. 2. 1-25 試験体設置状況（照射試験 4 列目模擬）

表 3.2.1-4 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

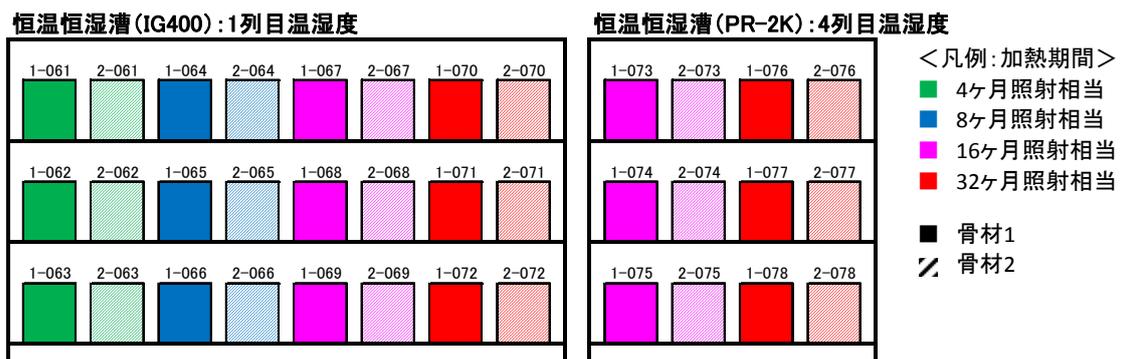


図 3.2.1-26 試験体管理番号

(ii) 測定項目

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

## (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

試験体温度計測用の熱電対 (T 型) は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。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 (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 (%)

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

### 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 3.2.1-5 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 3.2.1-27 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 3.2.1-5 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

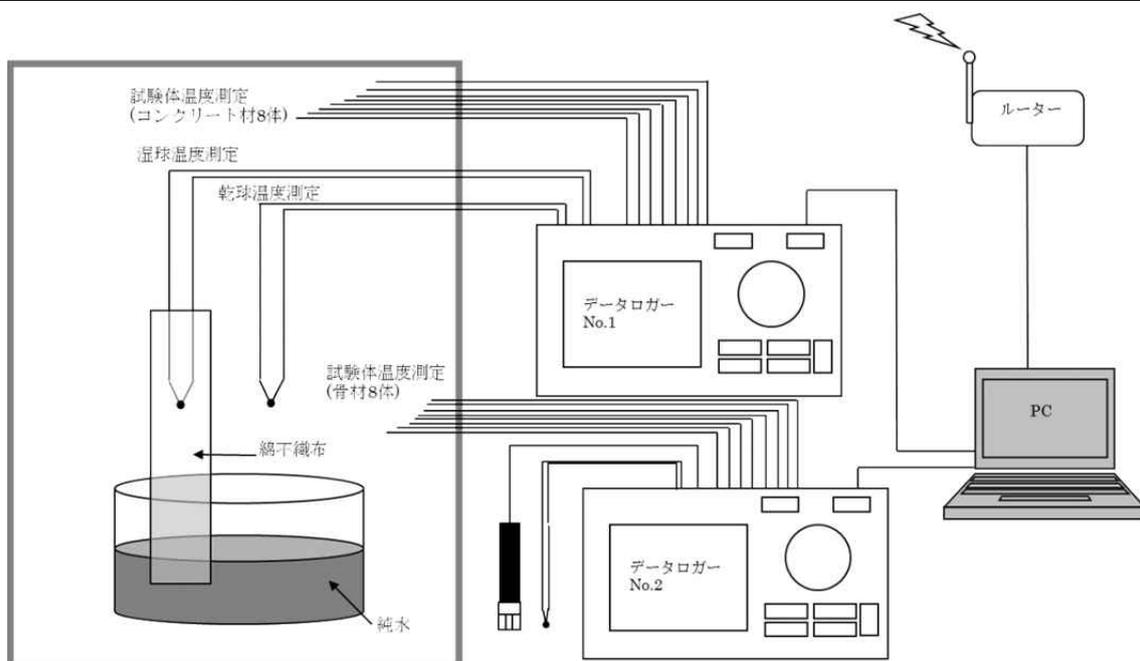


図 3.2.1-27 リモートアクセスシステム伝送系の概略

#### 4) 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、結合水率の4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 3.2.1-6 および表 3.2.1-7 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 3.2.1-28 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砕（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）を振動ミルで微粉砕（105 $\mu$ 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 3.2.1-6 各試験体の試験項目および実施時期（骨材 1：砂利）

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	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
物理特性	暴露	照射試験	4	2.5x10 <sup>4</sup>	照射室内 温度・雰囲気	骨材1 (砂利)	6	1-001	○	○	○
								1-002	○	○	○
								1-003	○	○	○
								1-004	○	○	○
								1-005	○	○	○
			1-006	○	○			○			
			1-007	○	○			○			
			1-008	○	○			○			
			1-009	○	○			○			
			1-010	○	○			○			
			1-011	○	○			○			
			1-012	○	○			○			
			1-013	○	○			○			
			1-014	○	○			○			
			1-015	○	○			○			
		1-016	○	○	○						
		1-017	○	○	○						
		1-018	○	○	○						
		1-019	○	○	○						
		1-020	○	○	○						
		1-021	○	○	○						
		1-022	○	○	○						
		1-023	○	○	○						
		1-024	○	○	○						
		1-025	○	○	○						
		1-026	○	○	○						
		1-027	○	○	○						
		1-028	○	○	○						
		1-029	○	○	○						
		1-030	○	○	○						
		1-031	○	○	○						
		1-032	○	○	○						
		1-033	○	○	○						
		1-034	○	○	○						
		1-035	○	○	○						
		1-036	○	○	○						
		1-037	○	○	○						
		1-038	○	○	○						
		1-039	○	○	○						
		1-040	○	○	○						
		1-041	○	○	○						
		1-042	○	○	○						
		1-043	○	○	○						
		1-044	○	○	○						
		1-045	○	○	○						
		1-046	○	○	○						
		1-047	○	○	○						
		1-048	○	○	○						
		1-049	○	○	○						
		1-050	○	○	○						
		1-051	○	○	○						
		1-052	○	○	○						
		1-053	○	○	○						
		1-054	○	○	○						
		1-055	○	○	○						
		1-056	○	○	○						
		1-057	○	○	○						
		1-058	○	○	○						
		1-059	○	○	○						
		1-060	○	○	○						
		1-061	○	○	○						
		1-062	○	○	○						
		1-063	○	○	○						
		1-064	○	○	○						
		1-065	○	○	○						
		1-066	○	○	○						
		1-067	○	○	○						
		1-068	○	○	○						
		1-069	○	○	○						
		1-070	○	○	○						
		1-071	○	○	○						
		1-072	○	○	○						
		1-073	○	○	○						
		1-074	○	○	○						
		1-075	○	○	○						
		1-076	○	○	○						
		1-077	○	○	○						
		1-078	○	○	○						
		1-127	○	○	×						
		1-128	○	○	×						
		1-129	○	○	○						
		1-130	○	○	×						
		1-131	○	○	×						
		1-132	○	○	○						
		1-133	○	○	○						
		1-134	○	○	○						
		1-135	○	○	○						
		1-136	○	○	○						
		1-137	○	○	○						
		1-138	○	○	○						
		1-139	○	○	○						
		1-140	○	○	○						
		1-141	○	○	○						
		1-142	○	○	○						
		1-143	○	○	○						
		1-144	○	○	○						
		照射試験	8	5.0x10 <sup>4</sup>	照射室内 温度・雰囲気		6	1-006	○	○	○
								1-007	○	○	○
								1-008	○	○	○
								1-009	○	○	○
1-010	○					○		○			
1-011	○			○	○						
1-012	○			○	○						
1-013	○			○	○						
1-014	○			○	○						
1-015	○			○	○						
1-016	○			○	○						
1-017	○			○	○						
1-018	○			○	○						
1-019	○			○	○						
照射試験	16			1.0x10 <sup>5</sup>	照射室内 温度・雰囲気	6		1-020	○	○	○
		1-021	○				○	○			
		1-022	○				○	○			
		1-023	○				○	○			
		1-024	○				○	○			
		1-025	○	○	○						
		1-026	○	○	○						
		1-027	○	○	○						
		1-028	○	○	○						
		1-029	○	○	○						
		1-030	○	○	○						
		1-031	○	○	○						
		1-032	○	○	○						
		1-033	○	○	○						
		1-034	○	○	○						
照射試験	32	2.0x10 <sup>5</sup>	照射室内 温度・雰囲気	6	1-035	○	○	○			
					1-036	○	○	○			
					1-037	○	○	○			
					1-038	○	○	○			
					1-039	○	○	○			
		1-040	○		○	○					
		1-041	○		○	○					
		1-042	○		○	○					
		1-043	○		○	○					
		1-044	○		○	○					
		1-045	○		○	○					
		1-046	○		○	○					
		1-047	○		○	○					
		1-048	○		○	○					
		1-049	○		○	○					
加熱試験	4	—	1段目温度	照射室内 と同一の 雰囲気	3	1-050	○	○	○		
						1-051	○	○	○		
						1-052	○	○	○		
						1-053	○	○	○		
						1-054	○	○	○		
						1-055	○	○	○		
加熱試験	16	—	4段目温度	照射室内 と同一の 雰囲気	3	1-056	○	○	○		
						1-057	○	○	○		
						1-058	○	○	○		
						1-059	○	○	○		
						1-060	○	○	○		
						1-061	○	○	○		
20℃封緘	28日強度	—	20℃封緘	照射室内 と同一の 雰囲気	3	1-062	○	○	○		
						1-063	○	○	○		
						1-064	○	○	○		
						1-065	○	○	○		
						1-066	○	○	○		
						1-067	○	○	○		
20℃封緘	試験開始時強度	—	20℃封緘	照射室内 と同一の 雰囲気	3	1-068	○	○	○		
						1-069	○	○	○		
						1-070	○	○	○		
						1-071	○	○	○		
						1-072	○	○	○		
						1-073	○	○	○		
20℃封緘	4ヶ月照射後	—	20℃封緘	照射室内 と同一の 雰囲気	3	1-074	○	○	○		
						1-075	○	○	○		
						1-076	○	○	○		
						1-077	○	○	○		
						1-078	○	○	○		
						1-079	○	○	○		
20℃封緘	8ヶ月照射後	—	20℃封緘	照射室内 と同一の 雰囲気	3	1-127	○	○	○		
						1-128	○	○	○		
						1-129	○	○	○		
						1-130	○	○	○		
						1-131	○	○	○		
						1-132	○	○	○		
20℃封緘	16ヶ月照射後	—	20℃封緘	照射室内 と同一の 雰囲気	3	1-133	○	○	○		
						1-134	○	○	○		
						1-135	○	○	○		
						1-136	○	○	○		
						1-137	○	○	○		
						1-138	○	○	○		
20℃封緘	32ヶ月照射後	—	20℃封緘	照射室内 と同一の 雰囲気	3	1-139	○	○	○		
						1-140	○	○	○		
						1-141	○	○	○		
						1-142	○	○	○		
						1-143	○	○	○		
						1-144	○	○	○		

※表中の試験項目において着色部は実施済み（2016/02/29 時点）の項目を示す。

表 3.2.1-7 各試験体の試験項目および実施時期（骨材 2：碎石）

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	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
物理特性	暴露	照射試験	4	2.5x10 <sup>4</sup>	照射室内 温度・雰囲気	骨材2 (砂岩)	6	2-001	○	○	○
								2-002	○	○	○
								2-003	○	○	○
								2-004	○	○	○
								2-005	○	○	○
			2-006	○	○			○			
			2-007	○	○			○			
			2-008	○	○			○			
			2-009	○	○			○			
			2-010	○	○			○			
			2-011	○	○			○			
			2-012	○	○			○			
			2-013	○	○			○			
			2-014	○	○			○			
			2-015	○	○			○			
		2-016	○	○	○						
		2-017	○	○	○						
		2-018	○	○	○						
		2-019	○	○	○						
		2-020	○	○	○						
		2-021	○	○	○						
		2-022	○	○	○						
		2-023	○	○	○						
		2-024	○	○	○						
		2-025	○	○	○						
		2-026	○	○	○						
		2-027	○	○	○						
		2-028	○	○	○						
		2-029	○	○	○						
		2-030	○	○	○						
		2-031	○	○	○						
		2-032	○	○	○						
		2-033	○	○	○						
		2-034	○	○	○						
		2-035	○	○	○						
		2-036	○	○	○						
		2-037	○	○	○						
		2-038	○	○	○						
		2-039	○	○	○						
		2-040	○	○	○						
		2-041	○	○	○						
		2-042	○	○	○						
		2-043	○	○	○						
		2-044	○	○	○						
		2-045	○	○	○						
		2-046	○	○	○						
		2-047	○	○	○						
		2-048	○	○	○						
		2-049	○	○	○						
		2-050	○	○	○						
		2-051	○	○	○						
		2-052	○	○	○						
		2-053	○	○	○						
		2-054	○	○	○						
		2-055	○	○	○						
		2-056	○	○	○						
		2-057	○	○	○						
		2-058	○	○	○						
		2-059	○	○	○						
		2-060	○	○	○						
		2-061	○	○	○						
		2-062	○	○	○						
		2-063	○	○	○						
		2-064	○	○	○						
		2-065	○	○	○						
		2-066	○	○	○						
		2-067	○	○	○						
		2-068	○	○	○						
		2-069	○	○	○						
		2-070	○	○	○						
		2-071	○	○	○						
		2-072	○	○	○						
		2-073	○	○	○						
		2-074	○	○	○						
		2-075	○	○	○						
		2-076	○	○	○						
		2-077	○	○	○						
		2-078	○	○	○						
		2-127	○	○	×						
		2-128	○	○	×						
		2-129	○	○	○						
		2-130	○	○	×						
		2-131	○	○	×						
		2-132	○	○	○						
		2-133	○	○	○						
		2-134	○	○	○						
		2-135	○	○	○						
		2-136	○	○	○						
		2-137	○	○	○						
		2-138	○	○	○						
		2-139	○	○	○						
		2-140	○	○	○						
		2-141	○	○	○						
		2-142	○	○	○						
		2-143	○	○	○						
		2-144	○	○	○						
		照射試験	8	5.0x10 <sup>4</sup>	照射室内 温度・雰囲気		6	2-012	○	○	○
								2-013	○	○	○
								2-014	○	○	○
								2-015	○	○	○
2-016	○					○		○			
2-017	○		○	○							
2-018	○		○	○							
2-019	○		○	○							
2-020	○		○	○							
2-021	○		○	○							
2-022	○		○	○							
2-023	○		○	○							
2-024	○		○	○							
2-025	○		○	○							
2-026	○		○	○							
2-027	○	○	○								
2-028	○	○	○								
2-029	○	○	○								
2-030	○	○	○								
2-031	○	○	○								
2-032	○	○	○								
2-033	○	○	○								
2-034	○	○	○								
2-035	○	○	○								
2-036	○	○	○								
2-037	○	○	○								
2-038	○	○	○								
2-039	○	○	○								
2-040	○	○	○								
2-041	○	○	○								
2-042	○	○	○								
2-043	○	○	○								
2-044	○	○	○								
2-045	○	○	○								
2-046	○	○	○								
2-047	○	○	○								
2-048	○	○	○								
2-049	○	○	○								
2-050	○	○	○								
2-051	○	○	○								
2-052	○	○	○								
2-053	○	○	○								
2-054	○	○	○								
2-055	○	○	○								
2-056	○	○	○								
2-057	○	○	○								
2-058	○	○	○								
2-059	○	○	○								
2-060	○	○	○								
2-061	○	○	○								
2-062	○	○	○								
2-063	○	○	○								
2-064	○	○	○								
2-065	○	○	○								
2-066	○	○	○								
2-067	○	○	○								
2-068	○	○	○								
2-069	○	○	○								
2-070	○	○	○								
2-071	○	○	○								
2-072	○	○	○								
2-073	○	○	○								
2-074	○	○	○								
2-075	○	○	○								
2-076	○	○	○								
2-077	○	○	○								
2-078	○	○	○								
2-127	○	○	×								
2-128	○	○	×								
2-129	○	○	○								
2-130	○	○	×								
2-131	○	○	×								
2-132	○	○	○								
2-133	○	○	○								
2-134	○	○	○								
2-135	○	○	○								
2-136	○	○	○								
2-137	○	○	○								
2-138	○	○	○								
2-139	○	○	○								
2-140	○	○	○								
2-141	○	○	○								
2-142	○	○	○								
2-143	○	○	○								
2-144	○	○	○								
加熱試験	4	—	照射室内 と同一の 雰囲気	3	2-061	○	○	○			
					2-062	○	○	○			
					2-063	○	○	○			
					2-064	○	○	○			
					2-065	○	○	○			
					2-066	○	○	○			
2-067	○	○		○							
2-068	○	○		○							
2-069	○	○		○							
2-070	○	○		○							
2-071	○	○		○							
2-072	○	○		○							
2-073	○	○	○								
2-074	○	○	○								
2-075	○	○	○								
2-076	○	○	○								
2-077	○	○	○								
2-078	○	○	○								
20℃封緘	28日強度	—	20℃封緘	3	2-127	○	○	×			
					2-128	○	○	×			
					2-129	○	○	○			
					2-130	○	○	×			
					2-131	○	○	×			
					2-132	○	○	○			
2-133	○	○		○							
2-134	○	○		○							
2-135	○	○		○							
2-136	○	○		○							
2-137	○	○		○							
2-138	○	○		○							
2-139	○	○	○								
2-140	○	○	○								
2-141	○	○	○								
2-142	○	○	○								
2-143	○	○	○								
2-144	○	○	○								
加熱試験	8	—	照射室内 と同一の 雰囲気	3	2-061	○	○	○			
					2-062	○	○	○			
					2-063	○	○	○			
					2-064	○	○	○			
					2-065	○	○	○			
					2-066	○	○	○			
2-067	○	○		○							
2-068	○	○		○							
2-069	○	○		○							
2-070	○	○		○							
2-071	○	○		○							
2-072	○	○		○							
2-073	○	○	○								
2-074	○	○	○								
2-075	○	○	○								
2-076	○	○	○								
2-077	○	○	○								
2-078	○	○	○								
加熱試験	16	—	照射室内 と同一の 雰囲気	3	2-061	○	○	○			
					2-062	○	○	○			
					2-063	○	○	○			
					2-064	○	○	○			
					2-065	○	○	○			
					2-066	○	○	○			
2-067	○	○		○							
2-068	○	○		○							
2-069	○	○		○							
2-070	○	○		○							
2-071	○	○		○							
2-072	○	○		○							
2-073	○	○	○								
2-074	○	○	○								
2-075	○	○	○								
2-076	○	○	○								
2-077	○	○	○								
2-078	○	○	○								
加熱試験	32	—	照射室内 と同一の 雰囲気	6	2-061	○	○	○			
					2-062	○	○	○			
					2-063	○	○	○			
					2-064	○	○	○			
					2-065	○	○	○			
					2-066	○	○	○			
2-067	○	○		○							
2-068	○	○		○							
2-069	○	○		○							
2-070	○	○		○							
2-071	○	○		○							
2-072	○	○		○							
2-073	○	○	○								
2-074	○	○	○								
2-075	○	○	○								
2-076	○	○	○								
2-077	○	○	○								
2-078	○	○	○								
加熱試験	32	—	照射室内 と同一の 雰囲気	6	2-061	○	○	○			
					2-062	○	○	○			
					2-063	○	○	○			
					2-064	○	○	○			
					2-065	○	○	○			
					2-066	○	○	○			
2-067	○	○		○							
2-068	○	○		○							
2-069	○	○		○							
2-070	○	○		○							
2-071	○	○		○							
2-072	○	○		○							
2-073	○	○	○								
2-074	○	○	○								
2-075	○	○	○								
2-076	○	○	○								
2-077	○	○	○								
2-078	○	○	○								

※表中の試験項目において着色部は実施済み（2016/02/29 時点）の項目を示す。

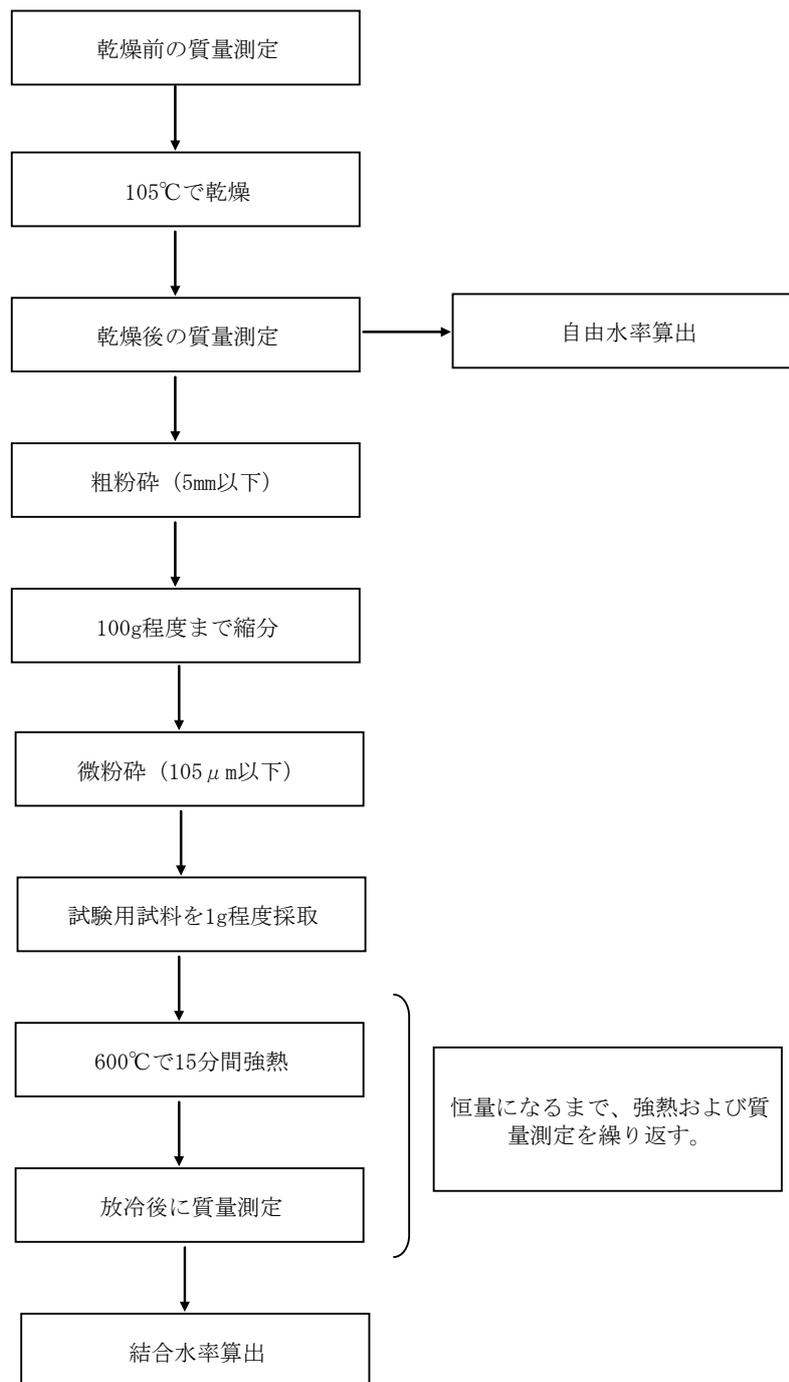


図 3. 2. 1-28 自由水率試験および結合水率試験フロー

### (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3.2.1-8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。表3.2.1-9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3.2.1-30)および照射室内外における湿度計測結果(図3.2.1-31)に基づくものである。

以降のページでまとめる各試験結果は、2016年2月29日時点までに実施済みの結果について示す。

表 3.2.1-8 主な照射停止期間

照射停止期間	備考
2013.2.3/24-2014/01/10	線源交換に伴う照射施設・装置停止
2014/01/3.2.30-2014/02/02	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)

表 3.2.1-9 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 3.2.1-10 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) 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3.2.1-29に、試験体温度計測結果を図3.2.1-30に示す。なお、表3.2.1-8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。

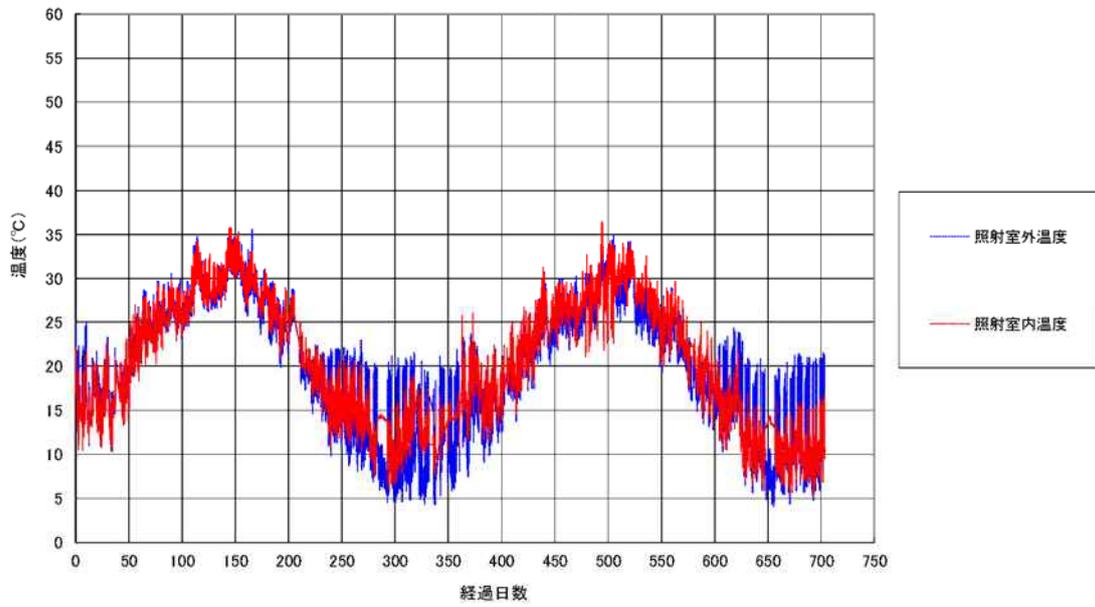


図 3. 2. 1-29 照射室内外における温度計測結果

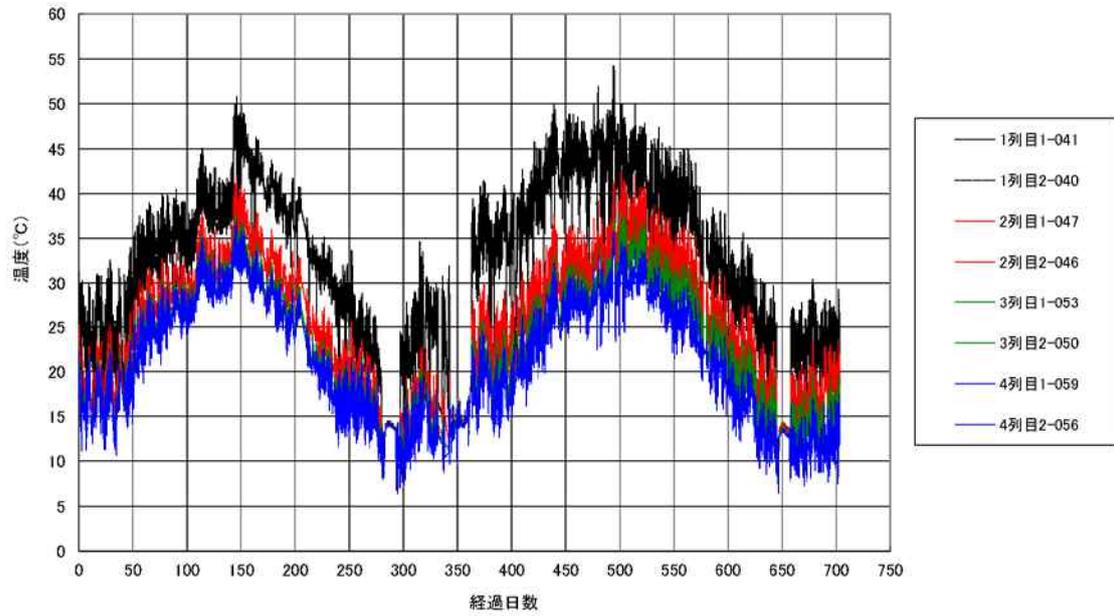


図 3. 2. 1-30 試験体温度計測結果（実線：骨材 1(砂利)、点線：骨材 2(碎石)）

### 3) 照射室内湿度計測結果

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3.2.1-31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。

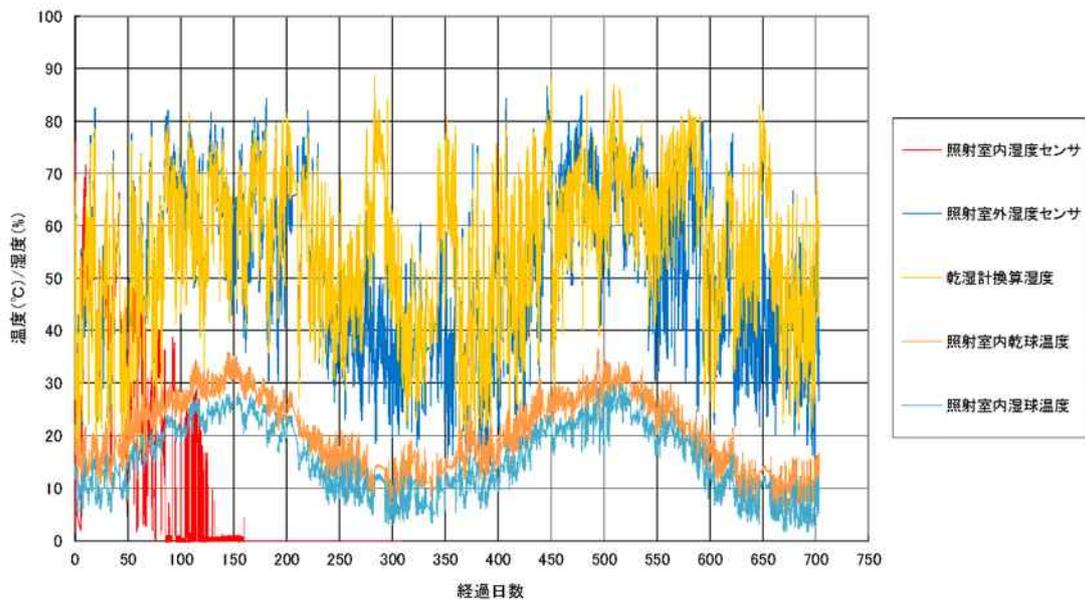


図 3.2.1-31 照射室内外における湿度計測結果

#### 4) 照射後物性試験

##### (a) 質量・寸法計測結果

質量および寸法の計測状況を図 3.2.1-32 および図 3.2.1-33 に、質量・寸法計測結果一覧を表 3.2.1-11 および表 3.2.1-12 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 3.2.1-34 質量変化の比較～図 3.2.1-36 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 3.2.1-32 質量測定状況



(a) 直径



(b) 高さ

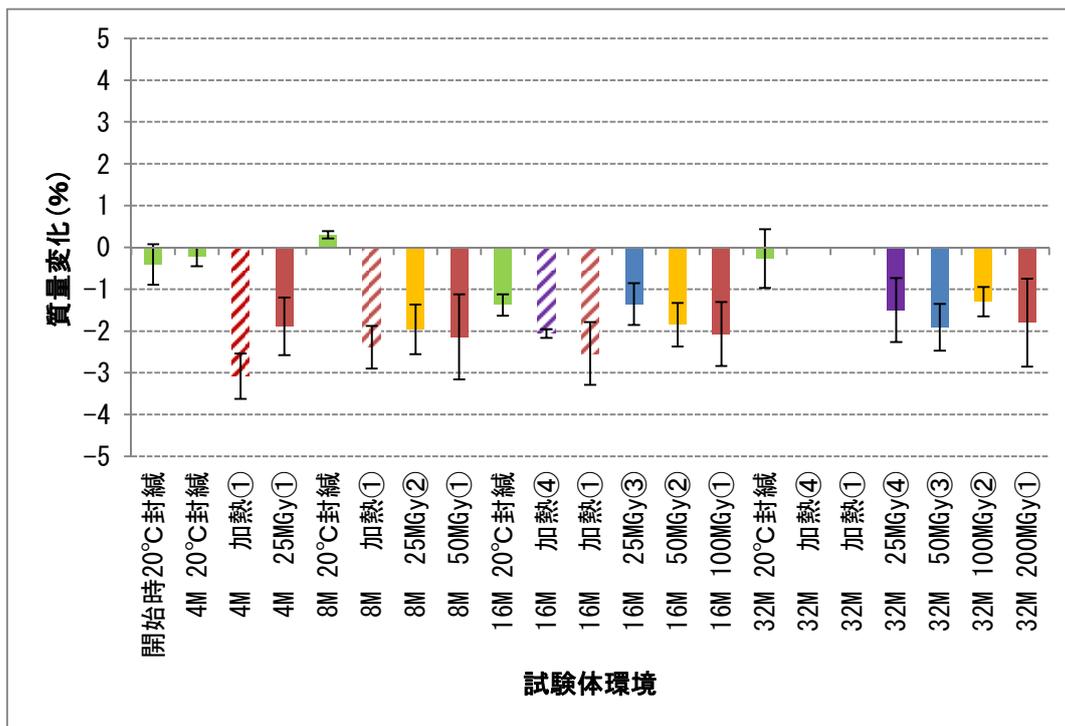
図 3.2.1-33 寸法測定状況

表 3.2.1-11 質量・寸法計測結果一覧（骨材 1：砂利）

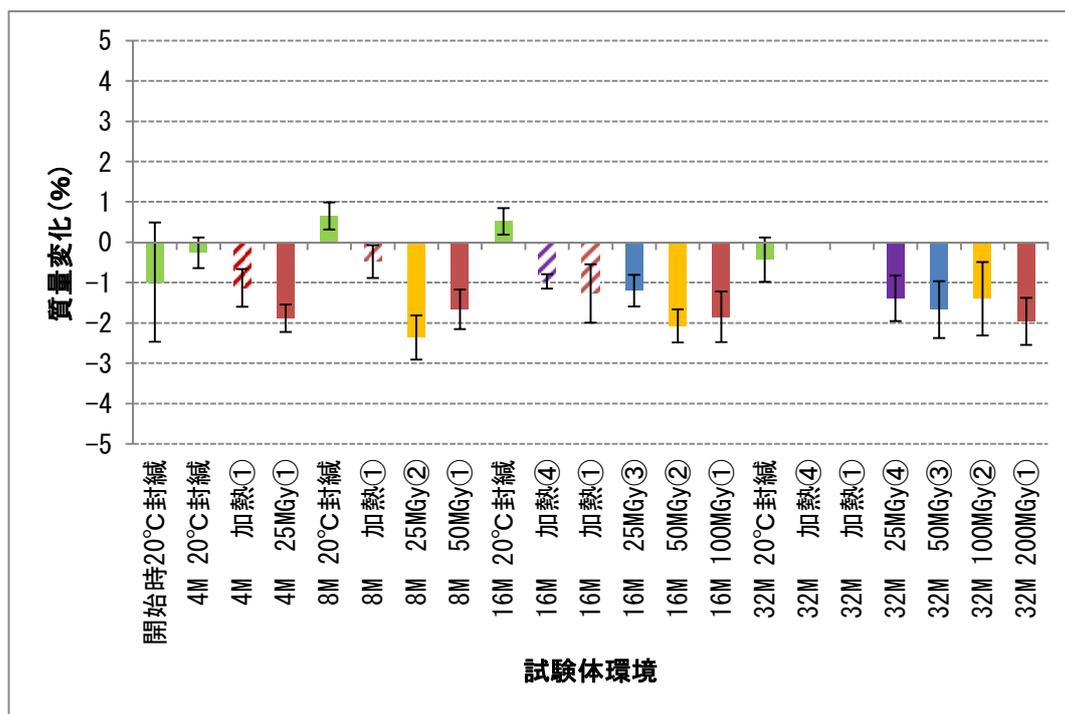
試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	照射・加熱試験前後						強度試験前		
				直径(mm)		高さ(mm)		質量(g)		直径(mm)	高さ(mm)	質量(g)
				試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後			
				平均	平均	平均	平均	平均	平均			
1-001	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 <sup>4</sup>	40.23	40.22	59.52	59.47	181.72	177.87	40.20	59.50	177.90
1-002				40.31	40.32	59.53	59.51	183.14	179.38	40.30	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				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				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				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		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		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		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		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		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		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	-	-	-		
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			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			180.95		176.20	40.29	59.54	176.24				
1-070			184.10		180.17	-	-	-				
1-071			183.16		179.22	-	-	-				
1-072			178.54		174.67	-	-	-				
1-073			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	-	-	-				
1-077		182.77	180.01	-	-	-						
1-078		183.73	180.89	-	-	-						
1-127		20℃封緘 養生	材齢28日	-	40.30	60.00	183.90					
1-128			照射試験 開始時	-	40.30	60.00	184.20					
1-129				-	40.20	60.00	184.20					
1-130				-	40.30	59.80	182.90					
1-131				-	40.20	59.70	180.80					
1-132			4ヶ月後	-	40.30	59.70	182.30					
1-133				-	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				-	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				-	40.23	59.26	181.39					
1-144		32ヶ月後	-	40.21	59.14	181.31						

表 3.2.1-12 質量・寸法計測結果一覧（骨材 2：碎石）

試験体ID	試験内容	期間	照射量 (kGy) 温湿度	照射・加熱試験前後						強度試験前		
				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			
2-001	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 <sup>4</sup>	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		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		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		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		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		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		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		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		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		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					
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		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		185.42		181.45	40.28	60.07	181.45					
2-070		184.07		180.50								
2-071		184.84		181.60								
2-072		185.97		182.56								
2-073		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								
2-077		182.11		179.65								
2-078		183.32		180.84								
2-127	20℃封緘 養生	材齢28日	-	40.20	60.00	184.80						
2-128		照射試験 開始時	-	40.20	59.00	183.70						
2-129			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			40.30	59.70	182.60							
2-134		4ヶ月後	-	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		16ヶ月後	-	40.30	59.78	183.74						
2-141			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						

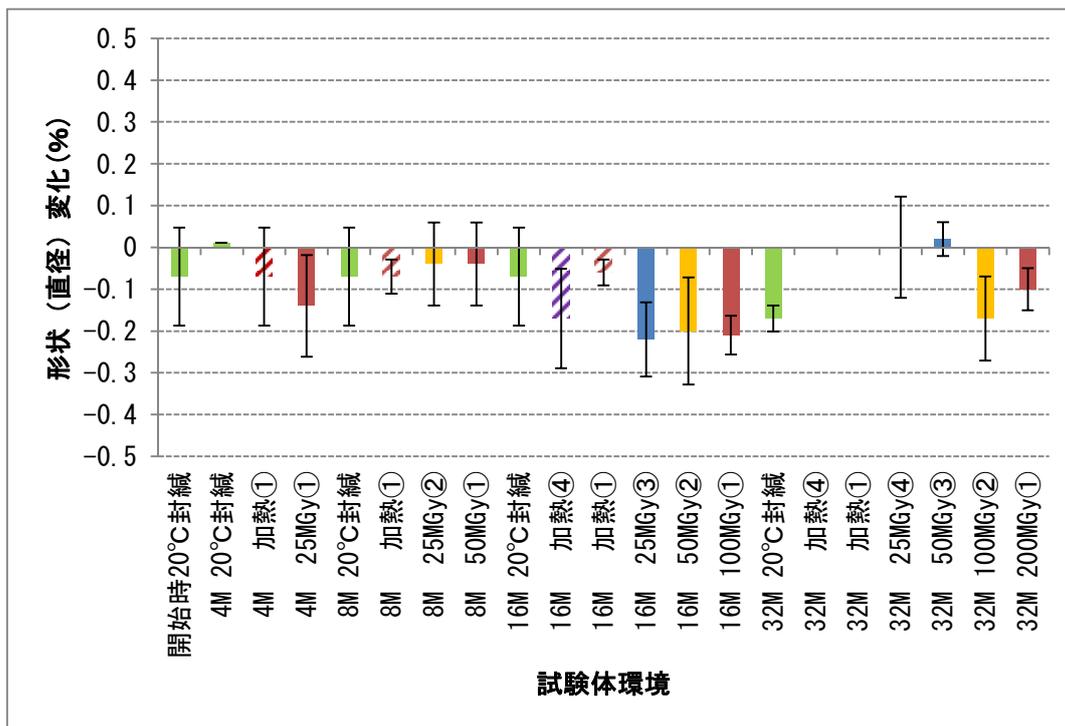


(a)骨材 1(砂利)

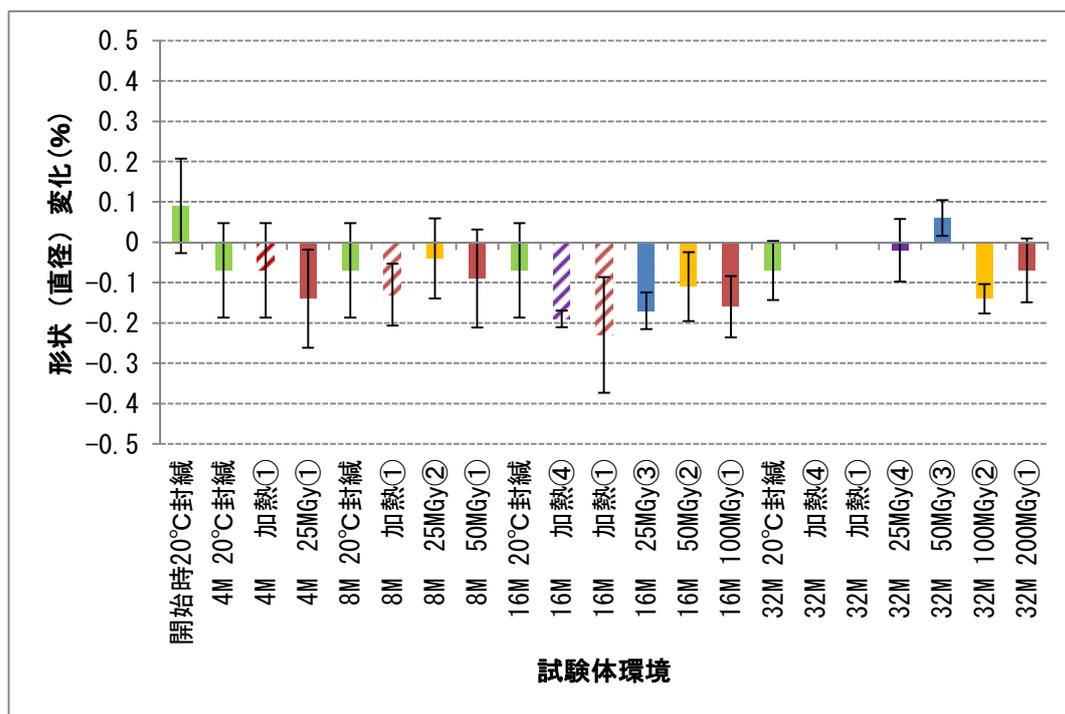


(b)骨材 2(碎石)

図 3. 2. 1-34 質量変化の比較

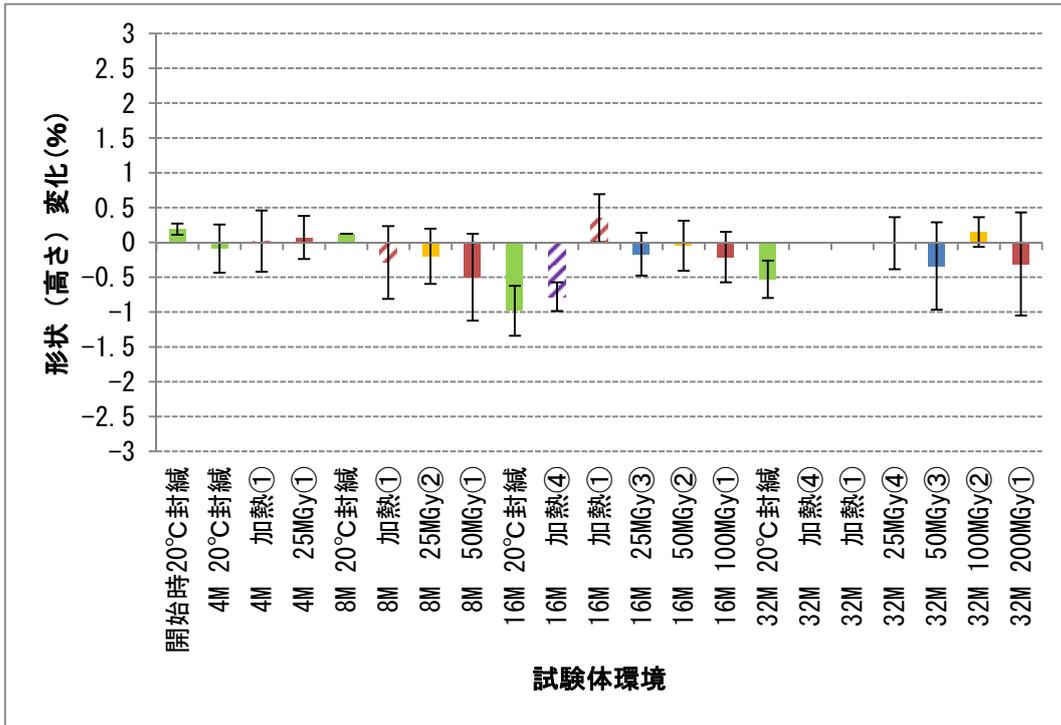


(a)骨材 1(砂利)

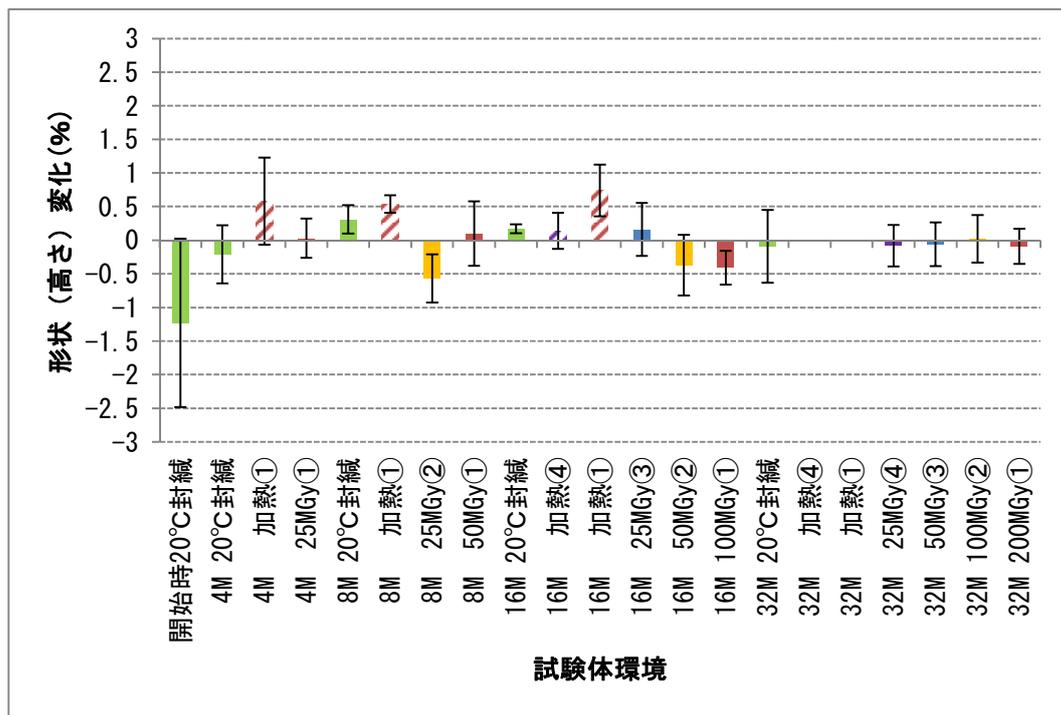


(b)骨材 2(碎石)

図 3.2.1-35 形状 (直径) 変化の比較



(a)骨材 1(砂利)



(b)骨材 2(碎石)

図 3. 2. 1-36 形状 (高さ) 変化の比較

## (b) 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 3.2.1-13～表 3.2.1-16 および図 3.2.1-37～図 3.2.1-40 に示す。

圧縮強度について、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、その傾向はガンマ線の方がやや大きかった。ガンマ線発熱および加熱の影響により乾燥したことで強度が増加したとが考えられるが、ガンマ線の影響を受けた方の試験体でより強度上昇が大きくなるメカニズムは不明である。

なお、試験開始時点で強度変化に関して既に十分な材齢を経ているため、材齢による強度増進は小さいと考えられる。

累積照射量および乾燥による圧縮強度への影響をより明確に評価するために、累積照射量－圧縮強度比（照射試験体／同材齢 20℃封緘試験体）の関係と、乾燥による質量減少量－圧縮強度比（照射・加熱試験体／同材齢 20℃封緘試験体）の関係を示したグラフを図 3.2.1-41 に示す。後者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。これらのグラフにより、照射を受けることによる圧縮強度の増進が確認され、また、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。

一方で、静弾性係数については、図 3.2.1-38 に示されるようにガンマ線照射および加熱を受けた試験体の方が小さくなった。これは乾燥が進むことで、密度が低下したことが考えられる。また累積照射量や線量率の大小で顕著な差は確認できなかった。

自由水率については、既に述べたガンマ線発熱および加熱の影響による自由水率の減少に関連して、図 3.2.1-39 より累積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。

結合水率については、図 3.2.1-40 より熱影響度や照射の有無、累積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。これについては、上で述べたガンマ線発熱および加熱による強度増進に関連して結合水が増えたことが考えられるが、本試験方法が 600℃の強熱を与えて、その前後の質量差分で結合水量を評価する方法であることが起因している可能性も考えられる。つまり、水分以外の物質（例えば、中性化した試験体から強熱時に発散される炭酸ガス等）が強熱時に放出されていて、その分が水分量として評価されている可能性がある。このため、本試験結果の妥当性を検証するために、強熱時に発生する水分量を直接捕集することで結合水量を評価する方法での試験を今後実施する予定である。

表 3.2.1-13 物性試験結果一覧（骨材 1：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 <sup>2</sup> )		静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		自由水率 (%)		結合水率 (%)						
					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 <sup>4</sup>	66.7	65.5	35.2	34.5	1.5	1.5	3.8	3.9					
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		照射開始 8ヶ月後	5.0×10 <sup>4</sup>	79.9	75.2	32.6	34.2	1.4	1.4	3.5	3.5					
1-008				72.9		36.8		1.4		3.6						
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 <sup>4</sup>	76.3	73.4	36.3	35.9	1.6	1.6	3.4	3.4					
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 <sup>5</sup>		73.0		74.4		37.1	36.5	0.9	1.0	3.8
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 <sup>4</sup>	64.8		66.4	32.8	33.8	1.3	1.3	4.3	4.4					
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 <sup>4</sup>	75.6	71.6	32.0	34.5	1.5	1.5	4.4	4.2						
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 <sup>5</sup>		81.8		79.0		32.3	33.8	1.0	1.0	6.0	6.1
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		1.0×10 <sup>5</sup>		80.4	74.7	36.6	33.1	1.5	1.4	4.7	4.2					
1-044				80.3		35.1		1.4		4.6						
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 <sup>4</sup>	72.3	76.5	31.0	36.0	1.2	1.4	3.9	4.2						
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 <sup>4</sup>	74.1	75.1	37.8	36.4	1.6	1.5	4.4	4.2						
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 3.2.1-14 物性試験結果一覧（骨材 1：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 <sup>2</sup> )		静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		自由水率 (%)		結合水率 (%)	
					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	66.8	65.4	36.6	32.9	1.5	1.5	3.3	3.4
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	29.5	30.9	1.4	1.4	3.8	3.8
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	34.6	32.4	1.3	1.3	4.2	4.2
1-068				66.1		32.5		1.3		4.2	
1-069				63.1		30.1		-		-	
1-070		32ヶ月後									
1-071											
1-072											
1-073		16ヶ月後		75.3	72.9	33.1	32.7	1.8	1.8	4.7	4.7
1-074				72.7		33.4		1.8		4.6	
1-075				70.6		31.5		-		-	
1-076		32ヶ月後									
1-077											
1-078											
1-127	20℃封緘 養生	材齢28日	-	46.8	46.1	-	-	-	-	-	-
1-128				45.1		-		-		-	
1-129				46.5		-		-		-	
1-130		照射試験 開始時		62.0	61.9	31.9	34.1	-	-	-	-
1-131				61.6		37.9		-		-	
1-132				62.1		32.5		-		-	
1-133		4ヶ月後		66.1	61.8	37.1	35.2	4.5	4.3	3.8	3.6
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	47.1	42.6	4.5	4.5	3.4	3.4
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	28.7	34.3	4.4	4.4	3.5	3.5
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	40.2	38.1	3.8	4.0	3.9	4.1
1-143				69.4		33.9		4.2		4.3	
1-144				72.4		40.1		-		-	

表 3.2.1-15 物性試験結果一覧（骨材 2：碎石）

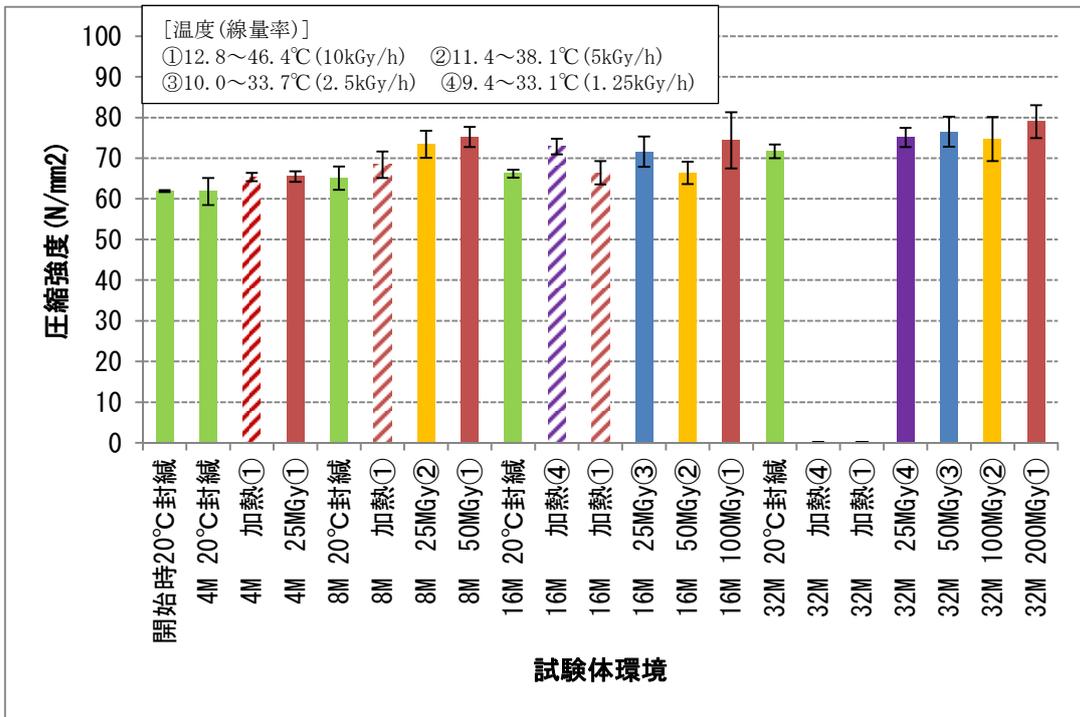
試験体ID	試験内容	材齢情報	照射量 (kGy) 温度 湿度	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		自由水率 (%)		結合水率 (%)	
					平均		平均		平均		平均
2-001	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 <sup>4</sup>	76.4	70.9	37.0	36.0	1.3	1.4	3.4	3.5
2-002				70.0		34.5		1.5		3.5	
2-003				68.7		36.4		1.4		3.5	
2-004				68.5		33.5		1.5		3.6	
2-005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

表 3.2.1-16 物性試験結果一覧（骨材 2：碎石）

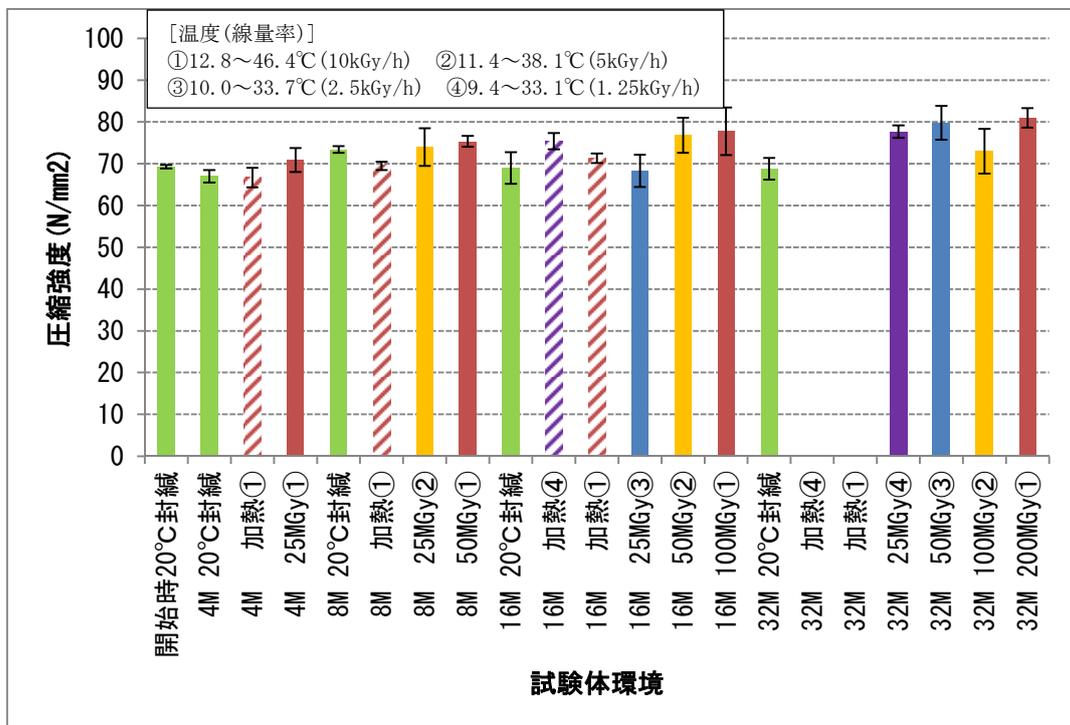
試験体ID	試験内容	材齢情報	照射量 (kGy) 温湿度	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		自由水率 (%)		結合水率 (%)	
					平均		平均		平均		平均
2-061	加熱試験	4ヶ月後	1段目温度 雰囲気湿度	63.4	66.7	29.9	32.3	1.3	1.4	3.2	3.3
2-062				68.0		36.6		1.4		3.4	
2-063				68.7		30.5		-		-	
2-064		8ヶ月後		68.7	69.5	33.7	33.0	1.3	1.4	3.2	3.3
2-065				69.0		31.8		1.4		3.4	
2-066				70.9		33.6		-		-	
2-067		16ヶ月後		71.2	71.3	36.2	35.4	1.3	1.3	4.0	4.0
2-068				70.0		33.3		1.2		3.9	
2-069				72.8		36.7		-		-	
2-070		32ヶ月後									
2-071											
2-072											
2-073		16ヶ月後		72.7	75.4	35.6	37.3	1.7	1.8	4.2	4.3
2-074				77.3		37.9		1.8		4.4	
2-075				76.1		38.3		-		-	
2-076		32ヶ月後									
2-077											
2-078											
2-127	20℃封緘 養生	材齢28日	-	50.4	54.1	-	-	-	-	-	-
2-128				58.3		-		-		-	
2-129				53.5		-		-		-	
2-130		照射試験 開始時		69.5	69.3	34.3	36.2	-	-	-	-
2-131				68.7		36.5		-		-	
2-132				69.7		37.9		-		-	
2-133		4ヶ月後		68.8	67.0	40.9	39.3	4.1	4.1	3.1	3.2
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	38.9	38.6	4.4	4.4	3.0	3.1
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	41.2	39.5	4.2	4.2	3.0	3.1
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	37.1	38.0	4.7	4.8	4.5	4.6
2-143	72.4		39.8	4.8		4.6					
2-144	67.0		37.0	-		-		-			

【凡例】■: 照射試験、▨: 加熱試験

■: 20°C封緘養生、■: 1列目温度、■: 2列目温度、■: 3列目温度、■: 4列目温度



(a)骨材 1(砂利) 平均

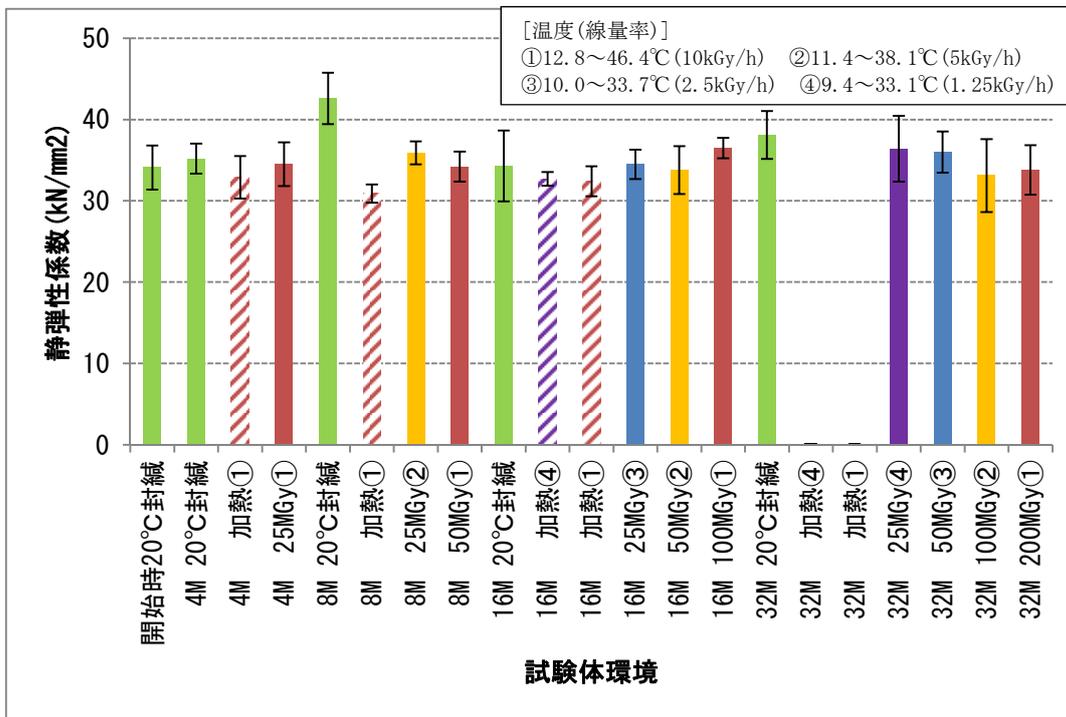


(b)骨材 2(碎石) 平均

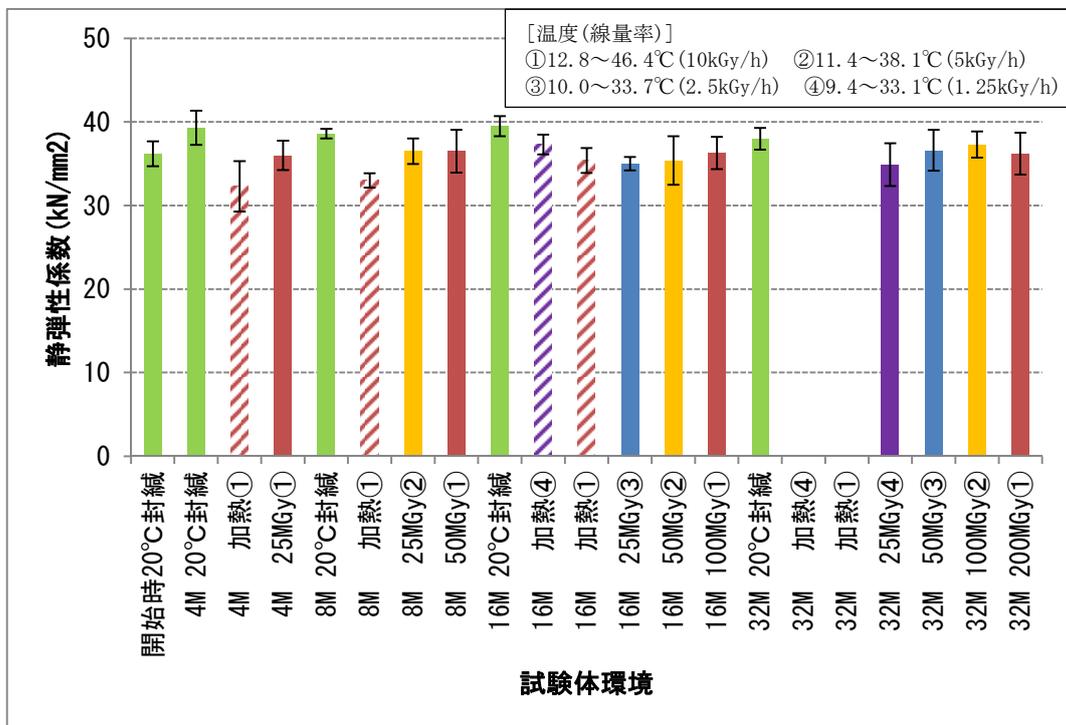
図 3.2.1-37 圧縮強度の比較

【凡例】■：照射試験、▨：加熱試験

■：20°C封緘養生、■：1列目温度、■：2列目温度、■：3列目温度、■：4列目温度



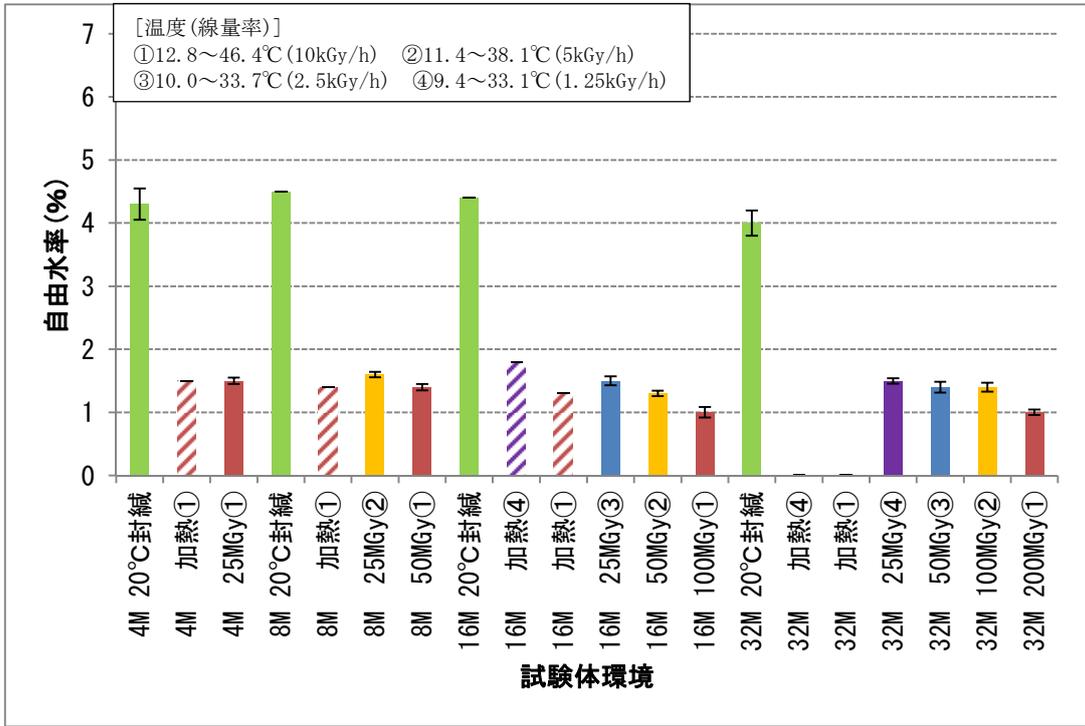
(a)骨材1(砂利)平均



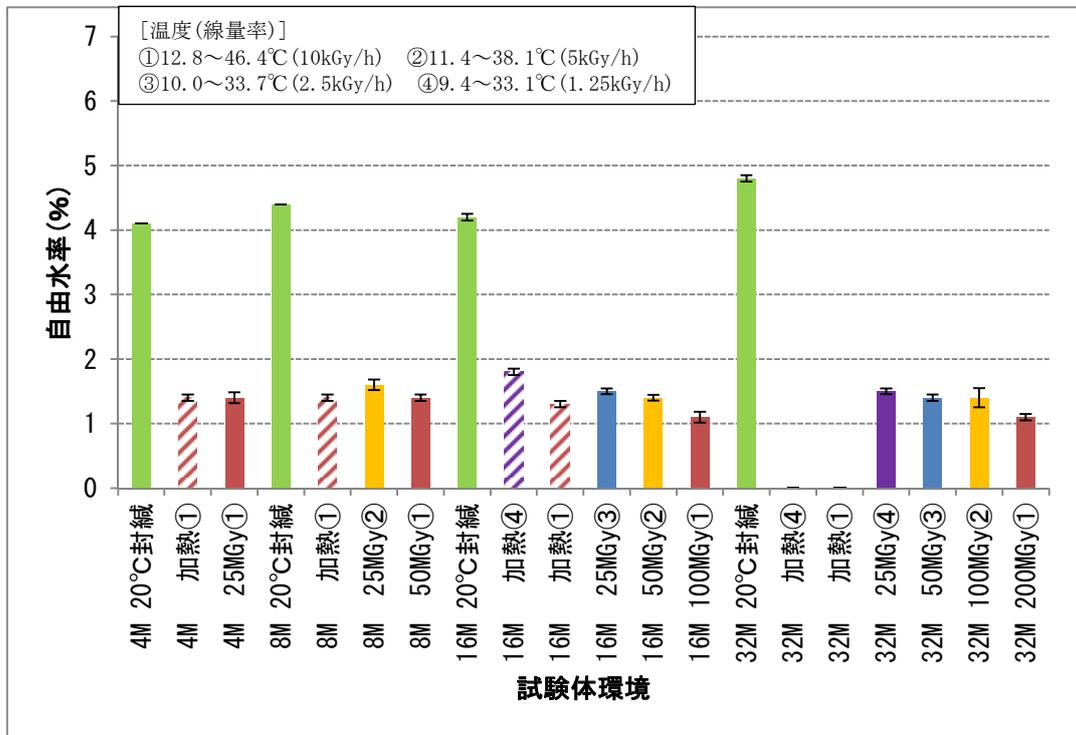
(b)骨材2(碎石)平均

図 3.2.1-38 静弾性係数の比較

【凡例】■:照射試験、▨:加熱試験  
 ■:20°C封緘養生、■:1列目温度、■:2列目温度、■:3列目温度、■:4列目温度



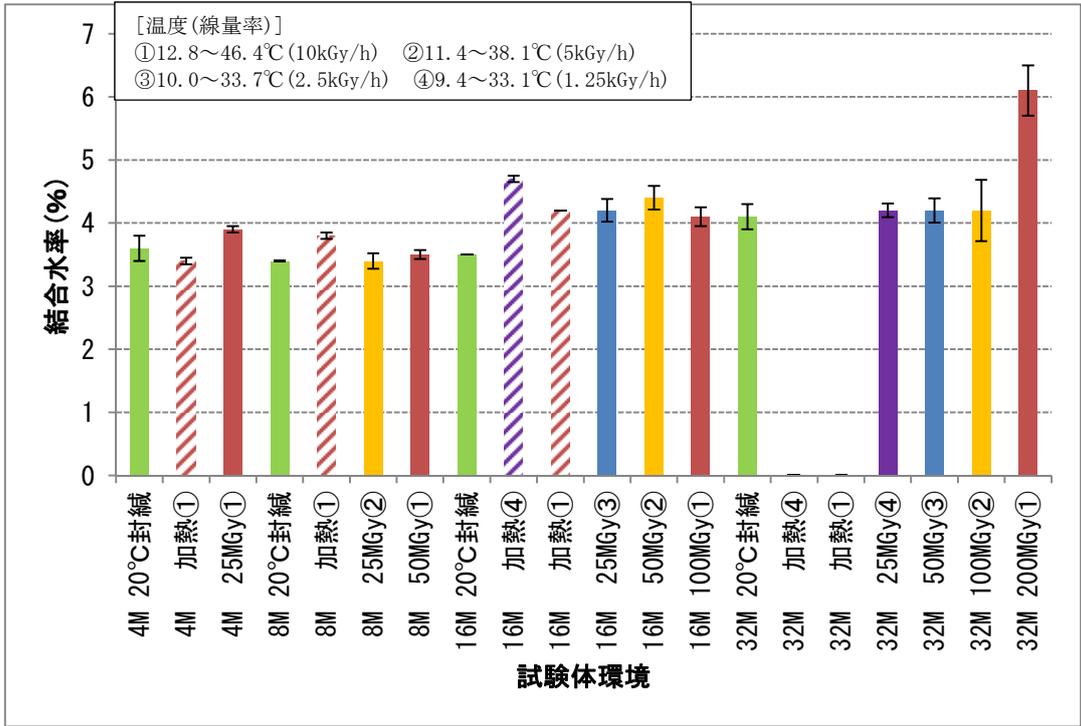
(a)骨材 1(砂利) 平均



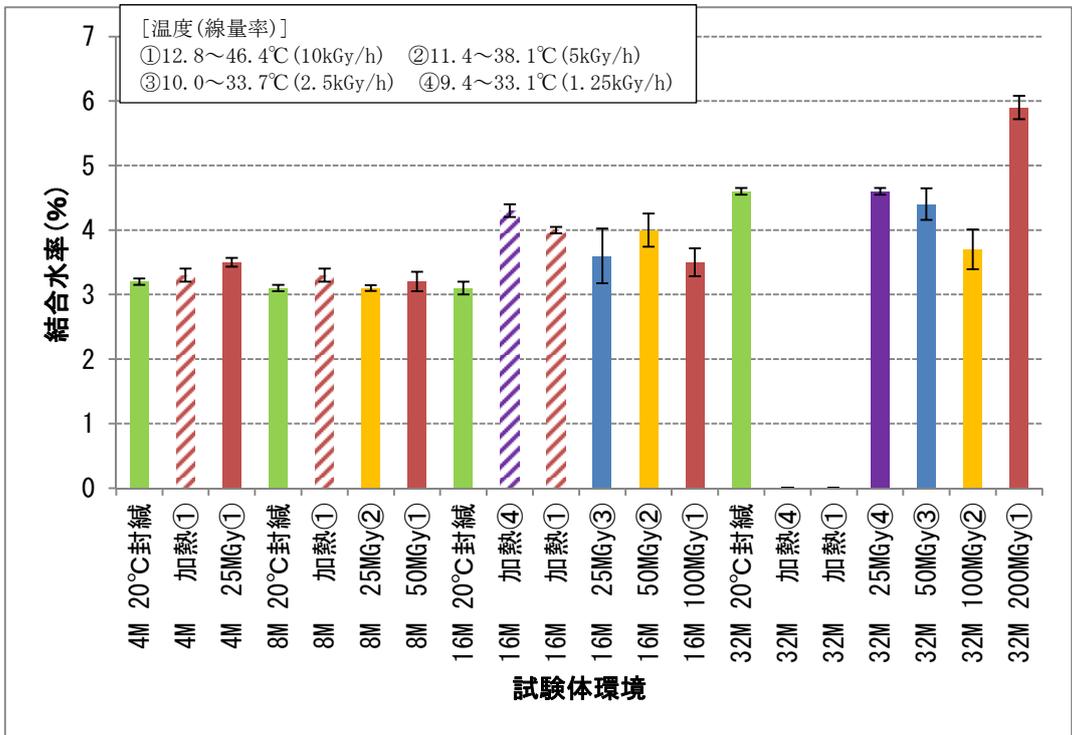
(b)骨材 2(碎石) 平均

図 3.2.1-39 自由水率の比較

【凡例】■:照射試験、▨:加熱試験  
 ■:20℃封緘養生、■:1列目温度、■:2列目温度、■:3列目温度、■:4列目温度

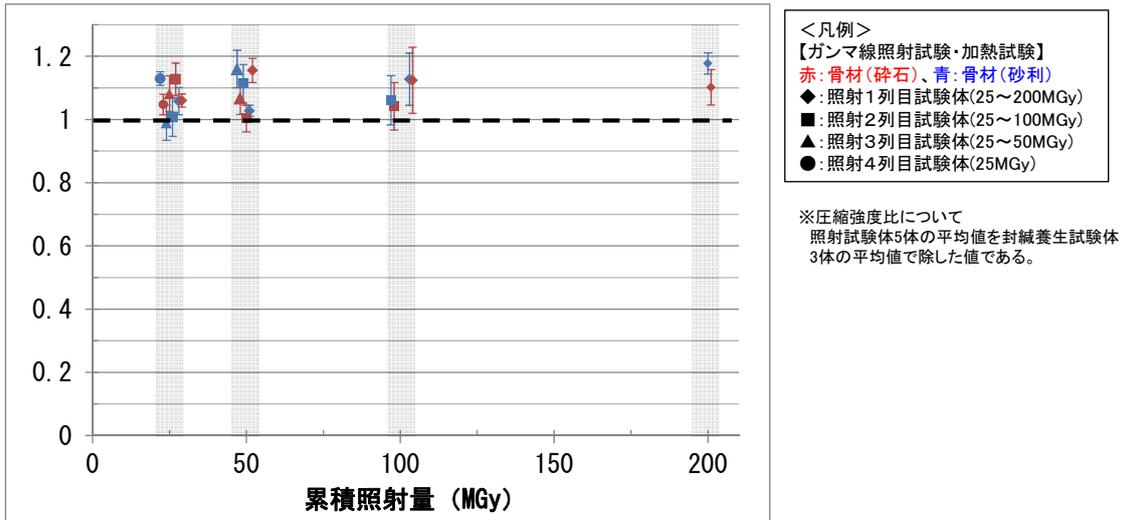


(a)骨材 1(砂利) 平均

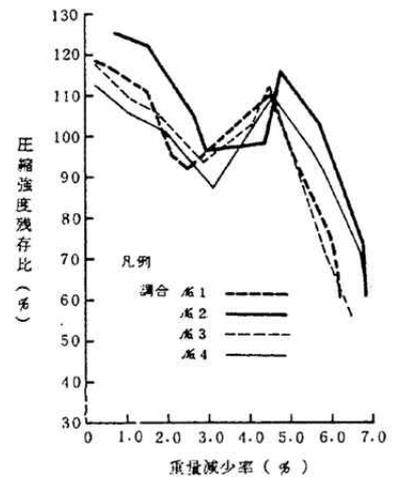
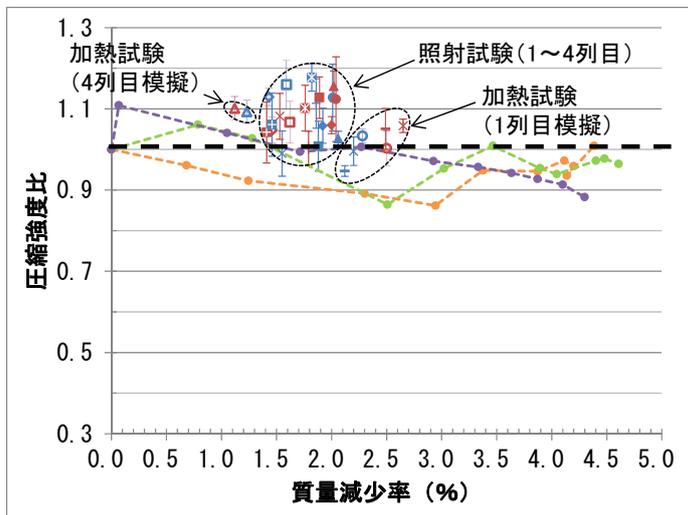
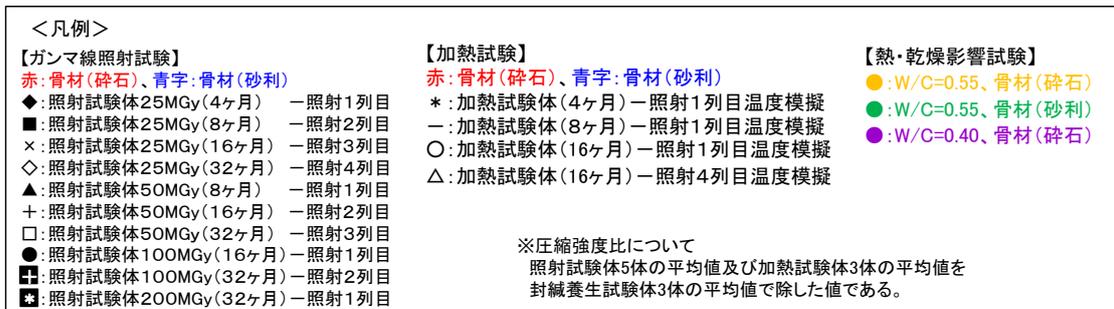


(b)骨材 2(碎石) 平均

図 3.2.1-40 結合水率の比較



(a)横軸：累積照射量 (MGy)



参考文献：岸谷孝一，高英雄，押田文雄，奥野亨，20~300℃の高温に長期間さらされたコンクリートの性状に関する研究・その1，その2，日本建築学会大会学術講演梗概集，1982年

(b)横軸：質量減少率 (%)

図 3.2.1-41 圧縮強度比 (照射・加熱試験体/同材齢 20℃封緘試験体)

(c) 線量計測結果

線量計測結果を表 3.2.1-17 に、照射試験完了時点の累積照射量および平均線量率を表 3.2.1-18 に示す。

また、線量計測状況を図 3.2.1-42 および図 3.2.1-43 に示す。

表 3.2.1-17 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	試験開始	-	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	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	1.62
	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	-	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	-	-
10	コンクリート 32 ヶ月試験体回収	-	9.91	-	-	-	
2016	1	セメントペースト 8 ヶ月試験体回収	-	10.10	-	-	-

表 3.2.1-18 累積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)	累積照射量 (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



(a) 線量計



(b) 線量計取り付け状況

図 3.2.1-42 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. 2. 1-43 線量計測状況 (2)

### 3.2.2 物理特性試験（セメントペースト）

#### (1) 目的

本試験は、過年度までに示されたガンマ線照射環境下にあったコンクリートの強度が、いずれも加熱試験によるコンクリート強度よりも高い値を示したことから、セメントペーストによる強度増大現象の要因を区分するために、セメントペースト単体の強度（曲げ強度）を評価するためのものである。

#### (2) 試験方法

本試験は各種のセメント（早強ポルトランドセメント、ホワイトセメント、中庸熱ポルトランドセメント、フライアッシュセメント）を用いたセメントペーストを使用し、水セメント比 W/C は 0.55、0.40、0.30 の 3 種類とした。セメントペースト試験体は、セメント粉体 1 に対して水 0.55、0.40、0.30 のいずれかとした。また、MF（中庸熱フライアッシュセメント）については、中庸熱ポルトランドセメントが 0.8、フライアッシュが 0.2、水が 0.55 あるいは 0.40 となっている。

試験体寸法は、迅速に乾燥を行うこと、断面内の含水率分布・ひずみ分布をなくすことを目的に、3×13×300 mm とした。練混ぜはモルタルミキサーを使用し、W/C=0.4 と 0.55 については、ブリーディングがなくなるまで練返しを行った。その後、3×13×300 mm の鋼製型枠に打込みを行い、材齢 1～4 日で脱型を行った。脱型後、恒温室 (20±2℃) にて水中養生を行った。十分水和が進んだのち、試験体の乾燥を行った。試験体は、水中養生後に試験体の基準となる長さ、質量を測定した後、20±2℃恒温室中で水酸化ナトリウム塩の濃度を制御することによって 95、90、80、70、60、50、40、30、20、11% RH の各湿度に調湿したチャンバー内で 6 ヶ月間以上の乾燥を行った。表 3.2.2-1 にセメントの化学組成および物性、表 3.2.2-2 にセメントの鉱物組成、表 3.2.2-3 にフライアッシュの鉱物組成を示す。

中庸熱フライアッシュペースト (MF) のセメント置換率は、20 mass% である。いずれのペーストも半年以上水中養生し、MF の場合は 9 か月の養生である。

調質後、いくつかの代表的な試料については、を図 3.2.2-1 に示すように、高崎研究所の <sup>60</sup>Co ガンマ線照射室に設置し、50,000 kGy の照射量を目指して照射を行った。一部の試験体についてはさらに同室に設置して、非照射で同一環境における変質を評価した。

ガンマ線影響評価に用いるセメントペースト試験体の一覧を表 3.2.2-4 に示す。

表 3.2.2-1 セメントの化学組成および物性

	Blain	Density	ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
H	3.14	4400	0.78	20.46	4.96	2.49	65.71	1.48	2.9	0.2	0.33
W	3.05	3490	2.93	22.43	4.67	0.16	65.69	0.98	2.51	0	0
M	3.2	3210	0.8	23.3	3.8	3.9	63.3	0.9	2.4	0.3	0.35
F	2.24	4230	2.36	64.45	21.36	3.6	1.37	0.64	0.23	0.36	1.28

※表中の記号は、H：早強ポルトランドセメント、W：ホワイトセメント、M：中庸熱ポルトランドセメント、F：フライアッシュセメントを示す。

表 3.2.2-2 セメントの鉱物組成 (XRD/Rietveld 解析)<sup>6</sup>

	C3S	C2S	C3A	C4AF	Periclase	Bassanite	Gypsum
H	66±0.6	14.3±0.8	6.7±0.2	8.8±0.1	0.7±0.1	2.96±0.2	0.559±0.1
W	53.1±1.4	33.2±1.5	5.5±0.4	0	0.5±0.3	2.01±0.2	3.96±0.7
M	41.6±1.0	38.6±1.4	3.7±0.3	12.7±0.3	0.8±0.2	2.40±0.3	0.6±0.1

※記号は表 3.2.1-1 と同様

表 3.2.2-3 フライアッシュの鉱物組成 (XRD/Rietveld 解析)

	Amorphous	Quartz	Mullite	Magnetite	Hematite
F	76.4±1.1	7.88±0.5	15.3±0.6	0.2±0.1	0.2±0.1

※記号は表 3.2.1-1 と同様

<sup>6</sup> XRD/Rietveld 解析：粉末 X 線回折法によってまず、対象となるセメントの X 線回折プロファイル（回折角  $2\theta$  と X 線カウントの関係）を得る。この X 線回折プロファイルに対して、中に入っている鉱物の理論回折プロファイルを用いて、それらに重みづけをして X 線回折プロファイルを再現することにより、中に入っている鉱物の質量比を得る手法。



図 3.2.2-1 ガンマ線照射室の設置状況

表 3.2.2-4 ガンマ線影響評価用試験体一覧

	W/C	照射 有無	調湿条件および試験体数
H	0.55	照射	飽水：2体、80% RH、50% RH、11% RH：各1体
		非照射	飽水(ただし計測できず)：2体
	0.40	照射	80% RH、50% RH、11% RH：各1体
	0.30	照射	80% RH、50% RH、11% RH：各1体
W	0.55	照射	飽水、50% RH：各2体
		非照射	飽水、50% RH：各2体
MF	0.55	照射	飽水(ただし計測できず)、80% RH、50% RH、11% RH：各2体
		非照射	飽水(ただし計測できず)、80% RH、50% RH、11% RH：各2体
	0.40	照射	飽水、80% RH、50% RH、11% RH：各2体
		非照射	飽水、80% RH、50% RH、11% RH：各2体

※記号は表 3.2.2-1 セメントの化学組成および物性と同様

セメントペーストの強度（曲げ強度）試験は、小型引張圧縮試験装置に折り曲げ治具を用いて実施し、荷重方法は中央1点荷重とした。一つの試験体(3×13×300 mm)について、スパン60 mm ずつに分割し、5回以上測定を実施した。図 3.2.2-2 に試験装置の概要を示す。また、各湿度において一つの試験体で荷重試験を実施した。曲げ強度は次式により評価した。

$$f_b = P \cdot \frac{l}{4} / \frac{I}{h/2} \quad (1)$$

ここで、 $f_b$ ：曲げ強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $P$ ：最大荷重(N)、 $l$ ：荷重スパン(mm)、 $I$ ：試験体の断面二次モーメント(mm<sup>4</sup>)、 $h$ ：試験体厚さ(mm)である。

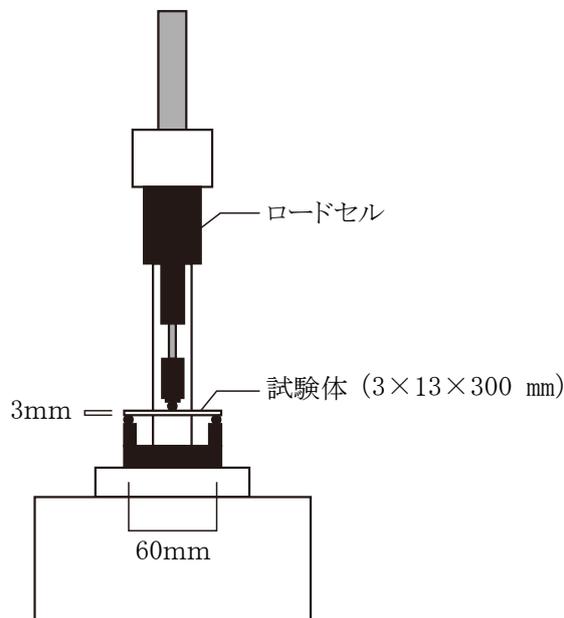


図 3.2.2-2 試験装置の概要

### (3) 試験結果

本研究の試験結果について、図 3.2.2-3～図 3.2.2-8 に示す。図中●はガンマ線照射後の強度、◆は同一環境でガンマ線が照射されていない試験体の強度、および■は試験開始前に異なる湿度で調湿度しておいた試験体の強度を示している。本図では、試験開始時の試験体の含水率もパラメータとしている。試験体を設置している間に、試験体が照射室内の環境（図 3.2.2-9）と平衡になる傾向にあるため、本来の最終湿度とは異なっている点で、データ解釈に留意する必要がある。試験体の平衡相対湿度については、今後の課題である。

試験の結果から、多くの場合、試験体はガンマ線照射によって強度が増大する傾向があることがわかった。

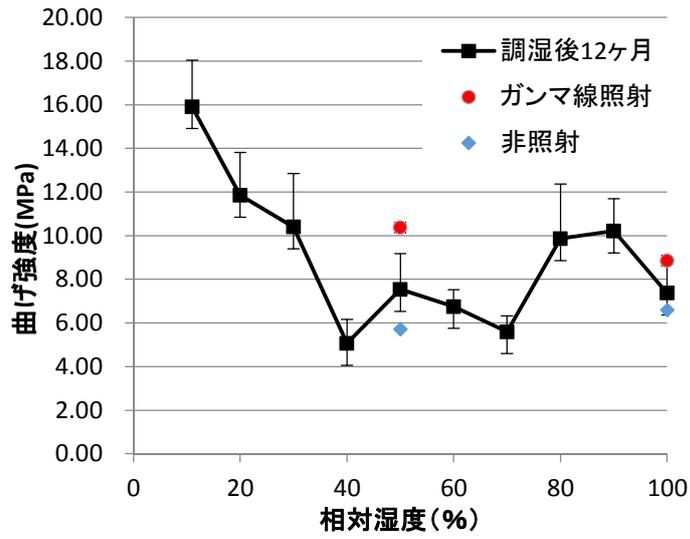


図 3.2.2-3 ホワイトセメントペースト (W/C=0.55) の試験結果

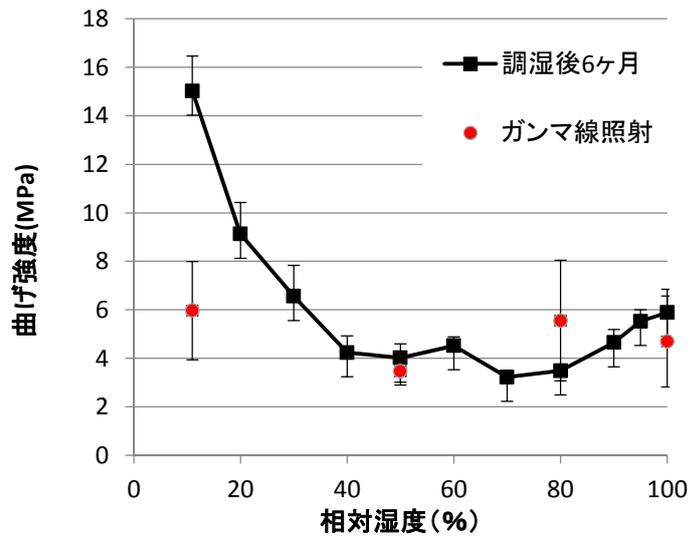


図 3.2.2-4 早強ポルトランドセメントペースト (W/C=0.55) の試験結果

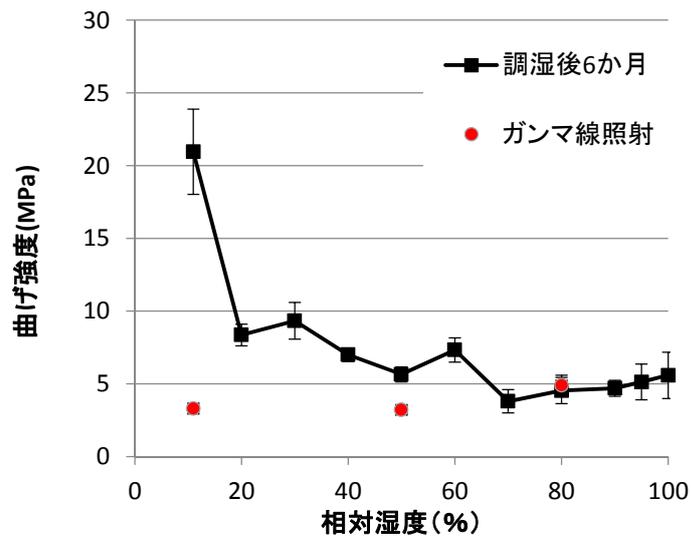


図 3.2.2-5 早強ポルトランドセメントペースト (W/C=0.40) の試験結果

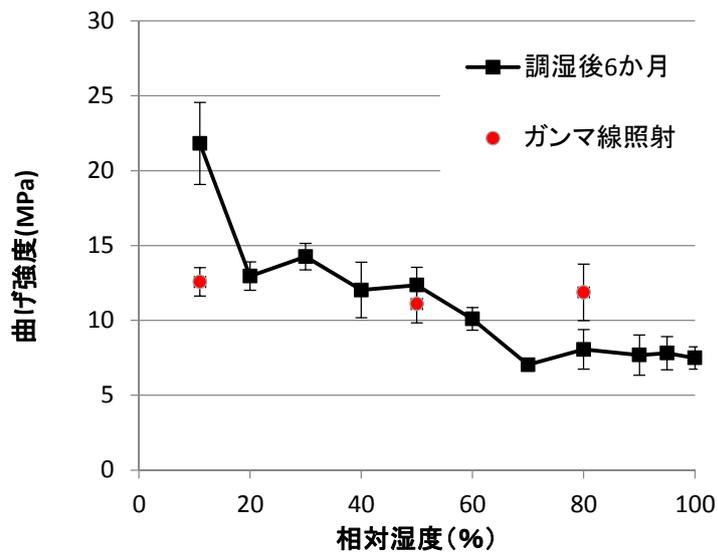


図 3.2.2-6 早強ポルトランドセメントペースト (W/C=0.30) の試験結果

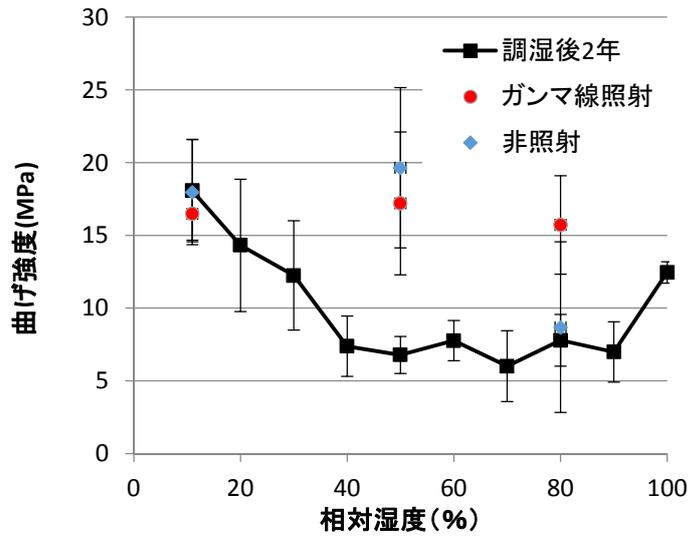


図 3.2.2-7 中庸熟フライアッシュセメントペースト (W/C=0.55) の試験結果

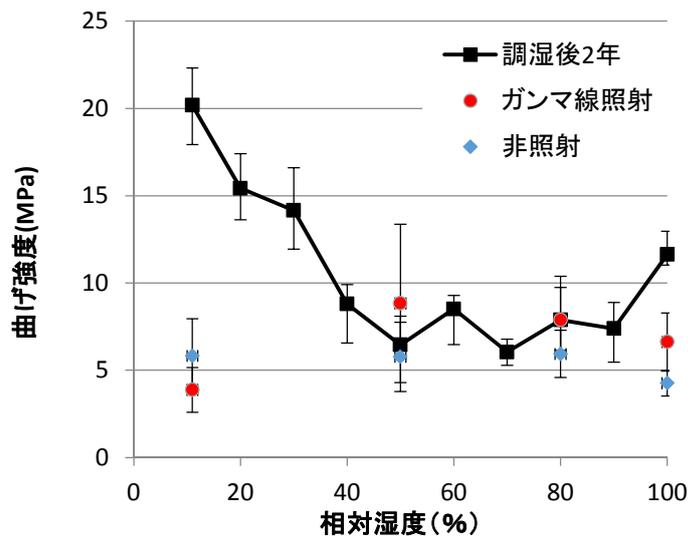


図 3.2.2-8 中庸熟フライアッシュセメントペースト (W/C=0.40) の試験結果

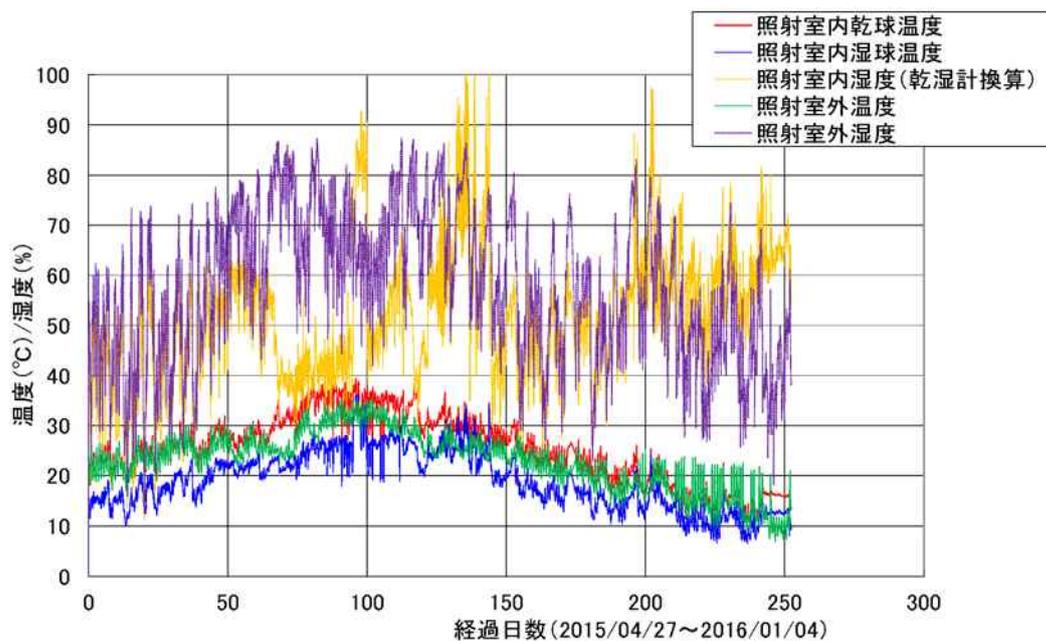


図 3. 2. 2-9 照射室内の温湿度変化の推移

(4)まとめ

セメントペーストのガンマ線照射による強度変化について、 $^{60}\text{Co}$  による照射により検討した。本検討の結果、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。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。今後は、照射後の試験体の含水率と平衡湿度の関係、セメントの化学分析などを通じて、強度増大メカニズムについてさらに詳細に明らかにする必要がある。

### 3.2.3 物理特性試験（骨材）

#### (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 3.2.3-1 および図 3.2.3-2 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 3.2.3-1 に示す。また、図 3.2.3-3、図 3.2.3-4 および図 3.2.3-5 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。

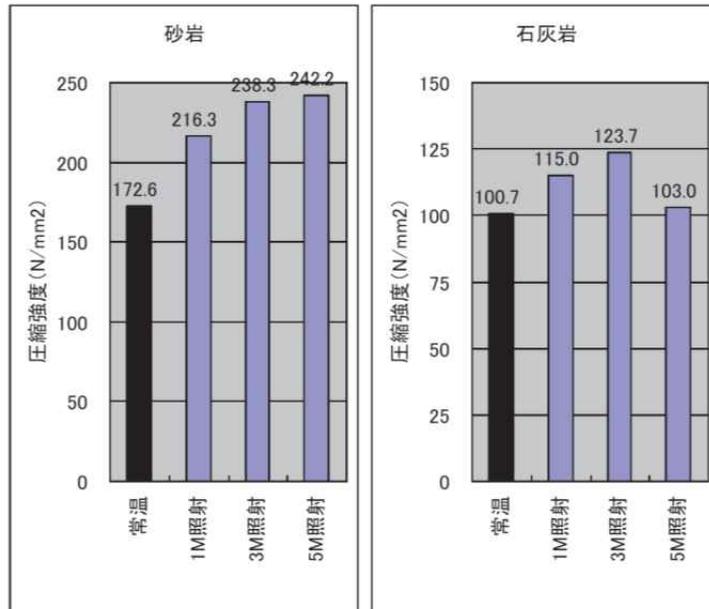


図 3.2.3-1 骨材の圧縮強度変化

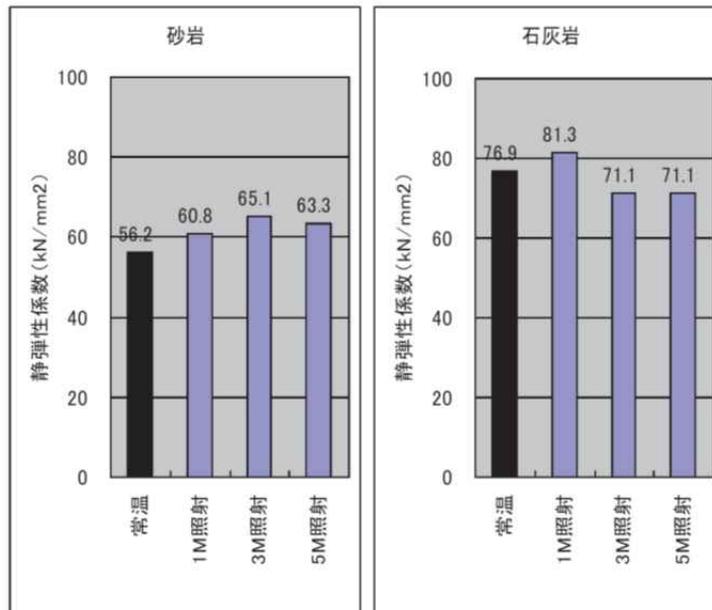


図 3.2.3-2 骨材の静弾性係数変化

表 3.2.3-1 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 <sub>2</sub> とAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> がSS5と同等		○
		SS3	岐阜県	砂岩ではなくチャート SiO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> とAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> がSS2と同等	○	○
		SS5	—	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> の含有率が77%程度 石英がGV2と同等に卓越		
GV4		富山県	SiO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> の含有率が78%程度 石英がSD2と同等に卓越		
		SD2	静岡県	SiO <sub>2</sub> 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。

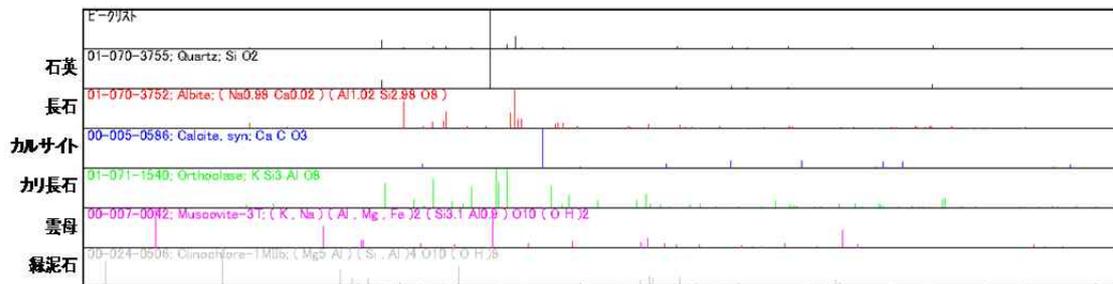
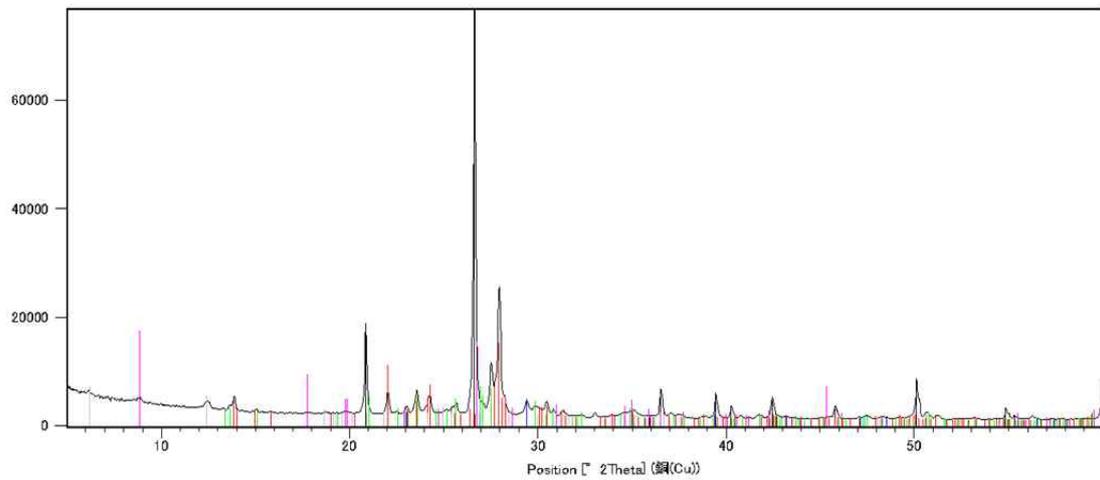
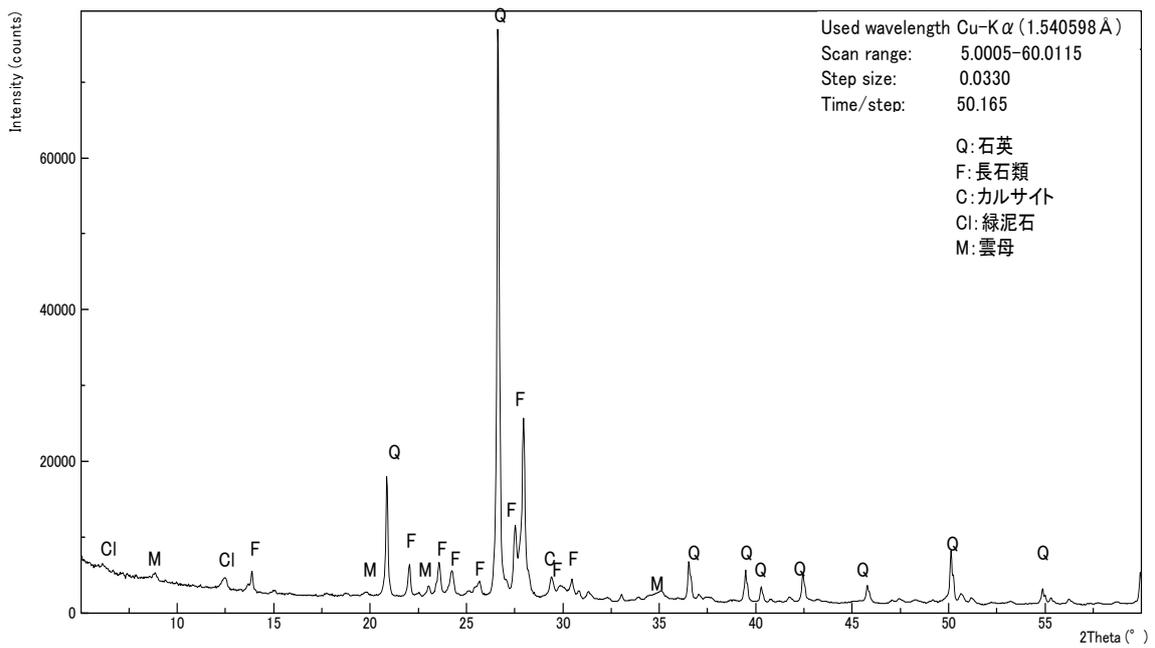


図 3. 2. 3-3 XRD 試験結果 (SS4)

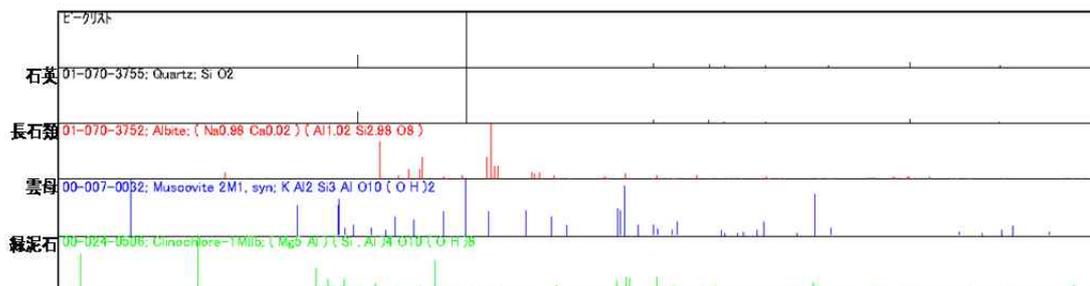
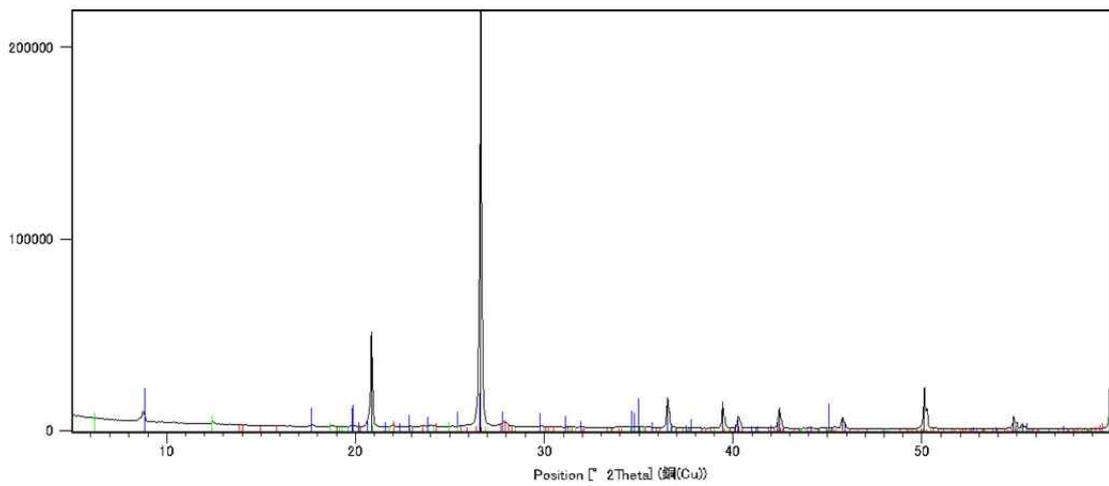
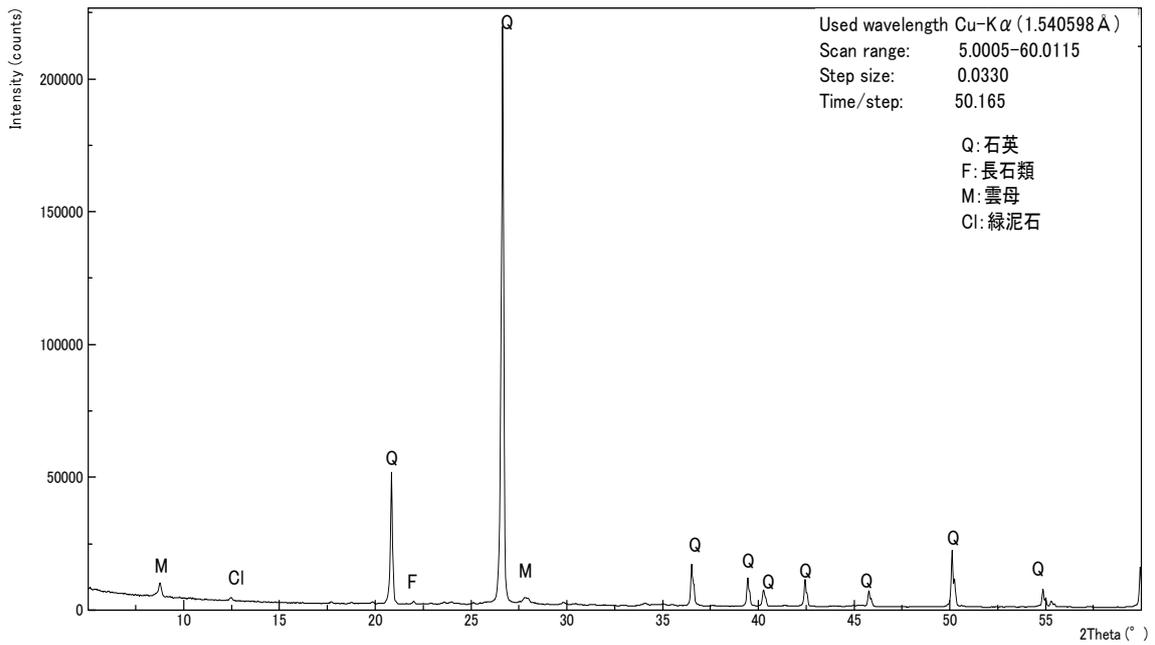


図 3. 2. 3-4 XRD 試験結果 (SS6)

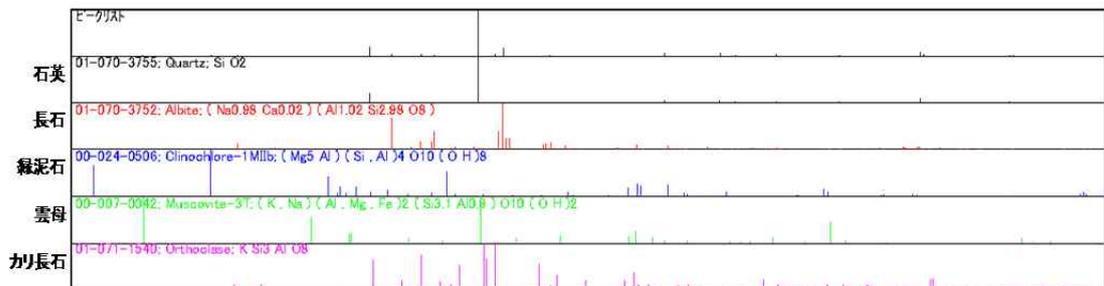
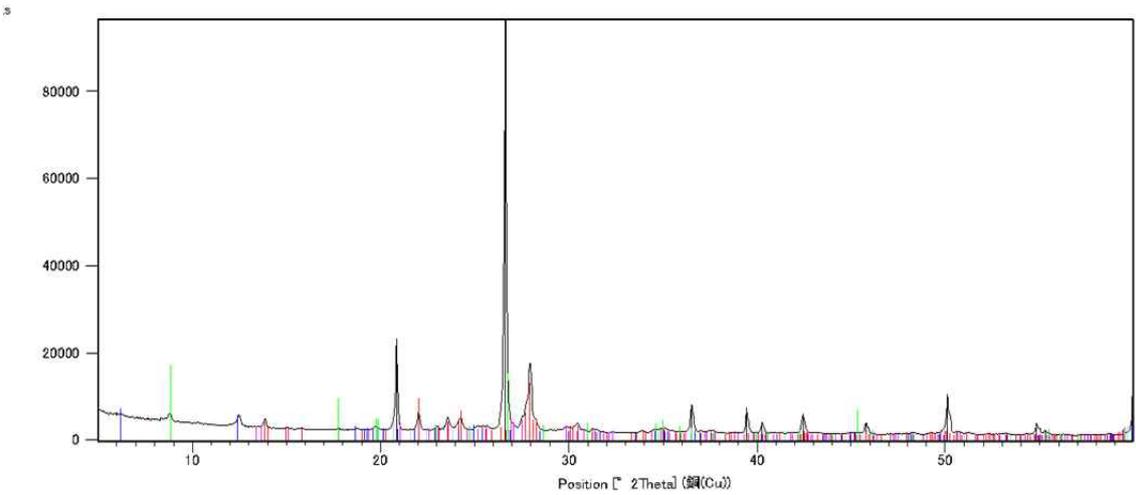
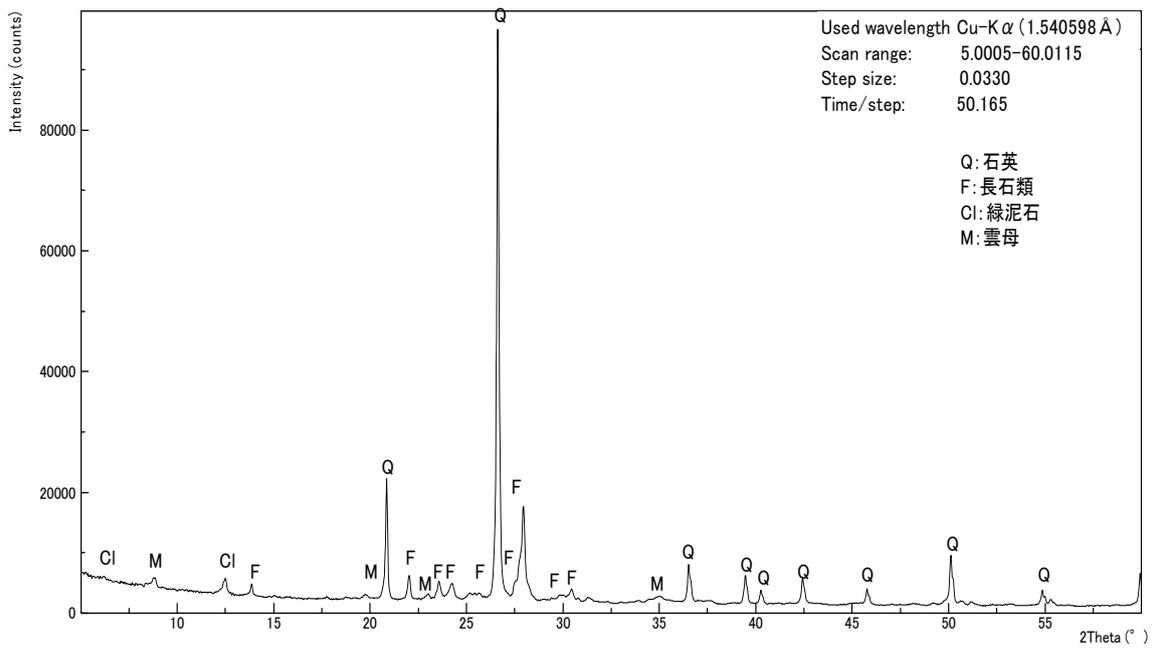


図 3. 2. 3-5 XRD 試験結果 (GV2)

(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3.2.3-6に示す。

骨材試験体による試験ケースを表3.2.3-2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3.2.3-2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 3.2.3-2 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 ( $2.5 \times 10^4$ )	8ヵ月 ( $5.0 \times 10^4$ )	16ヵ月 ( $1.0 \times 10^5$ )	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

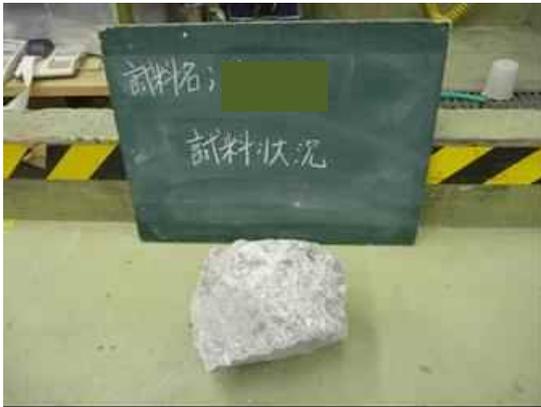
( ) : 目標照射量 (kGy)



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. 2. 3-6 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3.2.3-3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3.2.3-4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3.2.3-5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ヵ月照射と8ヵ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3.2.3-7および図3.2.3-8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3.2.3-9～図3.2.3-11に示す。

表 3.2.3-3 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 ヶ月	8 ヶ月	16 ヶ月	4 ヶ月	8 ヶ月	16 ヶ月	
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 3.2.3-4 熱影響評価試験ケース

実施項目	65°C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 3.2.3-5 骨材試験体番号

試験種類			A 凝灰岩	B 砂岩	C 砂岩	D 石灰岩
			(碎石)	(砂利)	(碎石)	(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
		16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
		16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	65℃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	

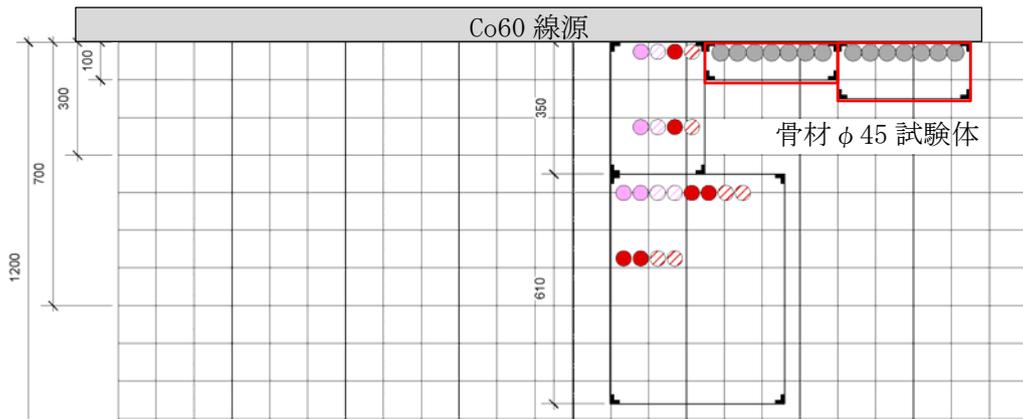
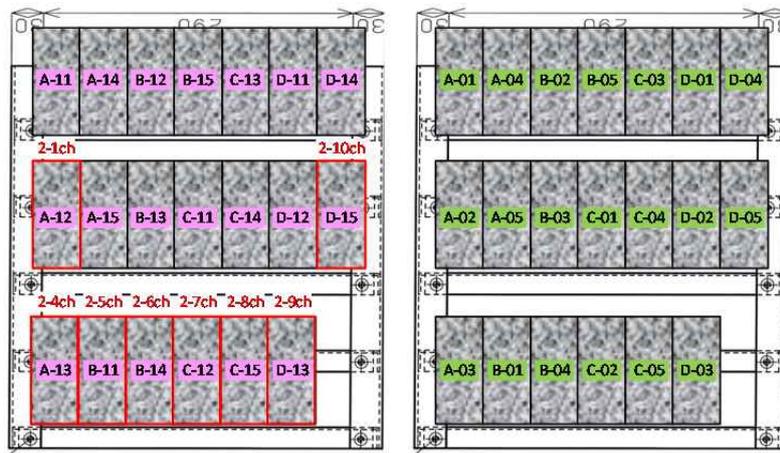
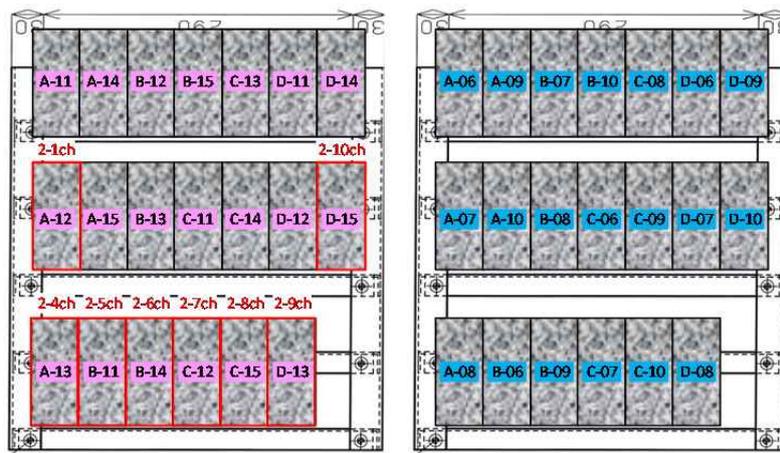


図 3.2.3-7 照射室での試験体設置のイメージ (平面)



(a)照射開始から4ヵ月間の状況



(b)照射開始4ヵ月以降の状況

図 3.2.3-8 照射室での試験体設置のイメージ (立面)



図 3.2.3-9 骨材試験体



図 3.2.3-10 熱電対の取り付け状況



図 3.2.3-11 骨材試験体の照射状況

### (3) 試験結果

各試験結果は、2016年2月29日時点までの結果について示す。

#### 1) 試験期間

照射試験は2014年1月に開始した。表3.2.1-8 主な照射停止期間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。表3.2.3-6 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3.2.1-30）および照射室内外における湿度計測結果（図3.2.1-31）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3.2.3-12 に骨材試験体の温度測定結果を示す。

表 3.2.3-6 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

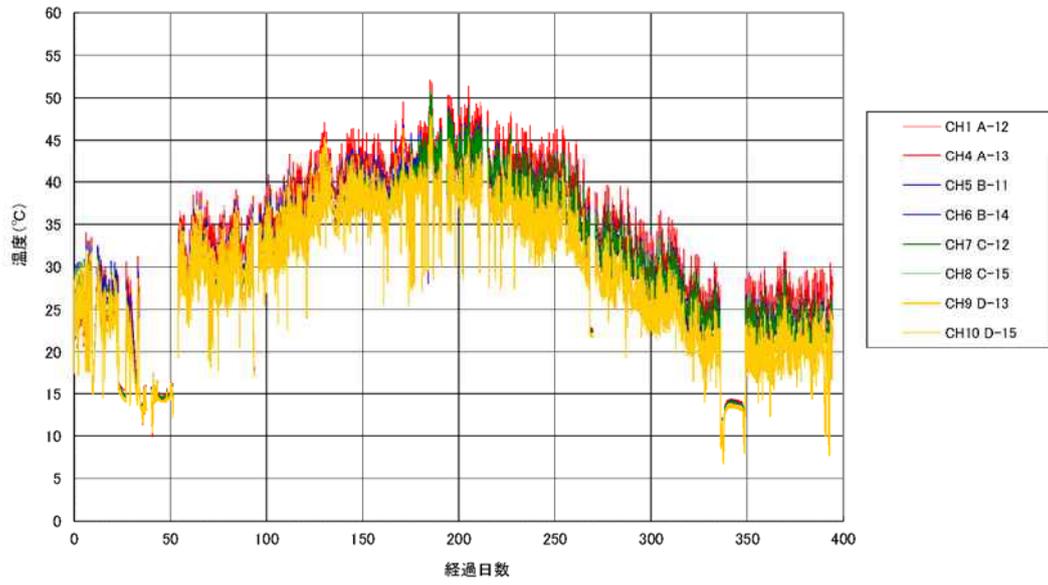


図 3.2.3-12 骨材試験体の温度計測結果

### 3) 物性試験結果

#### (a) 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 3.2.3-7～表 3.2.3-10 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 3.2.3-13～図 3.2.3-13 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 3.2.3-14 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 3.2.3-7 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(g)	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			
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			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			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			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		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		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	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	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	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 3.2.3-8 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(g)	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			
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				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			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			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			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		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		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		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		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 3.2.3-9 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(g)	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			
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			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			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			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		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		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	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	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	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 3.2.3-10 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(g)	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			
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			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			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		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		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		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		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		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		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		

<凡例> ◆:質量変化

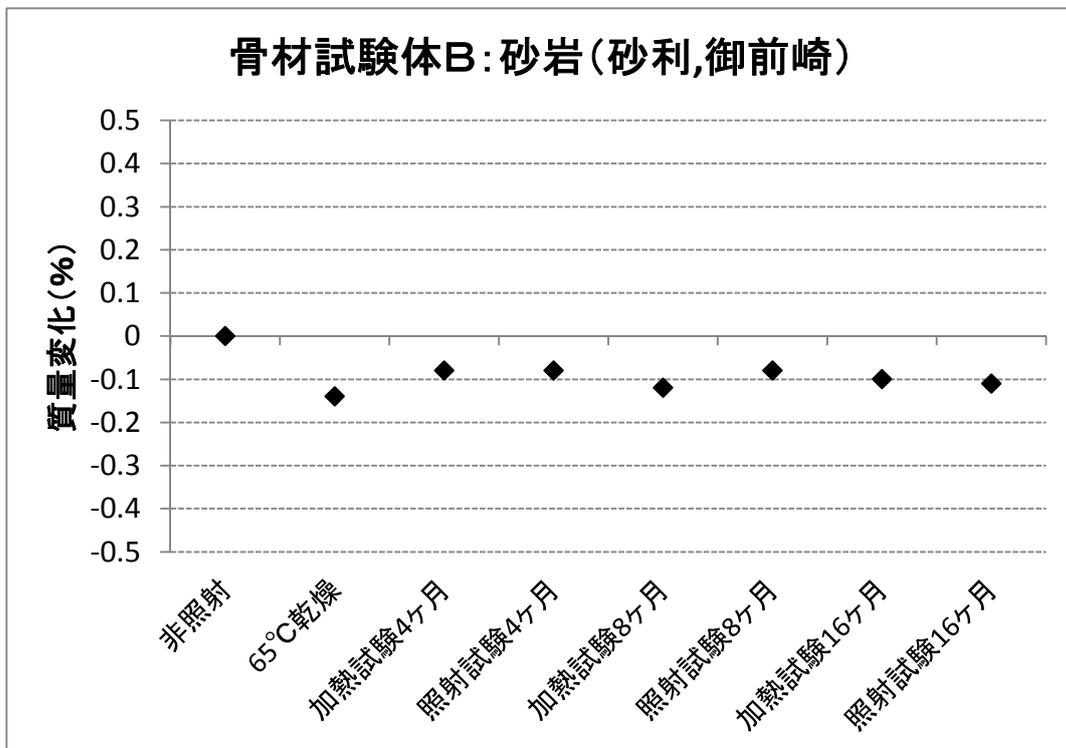
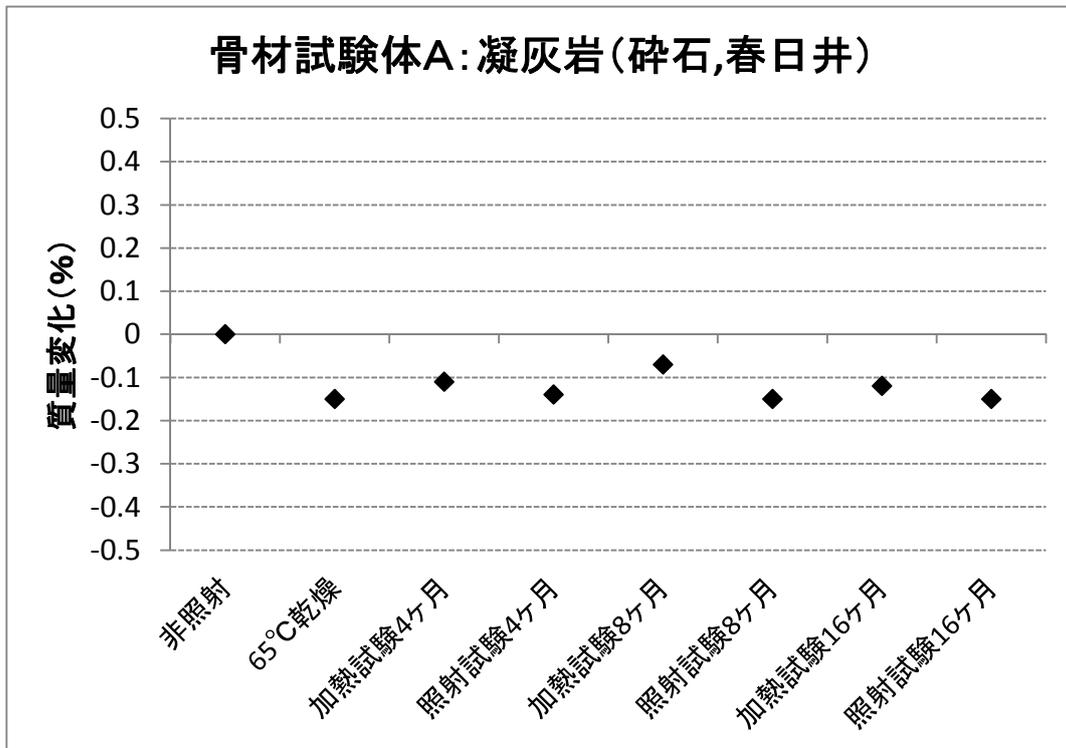


図 3.2.3-13 質量変化比較 (1)

<凡例> ◆:質量変化

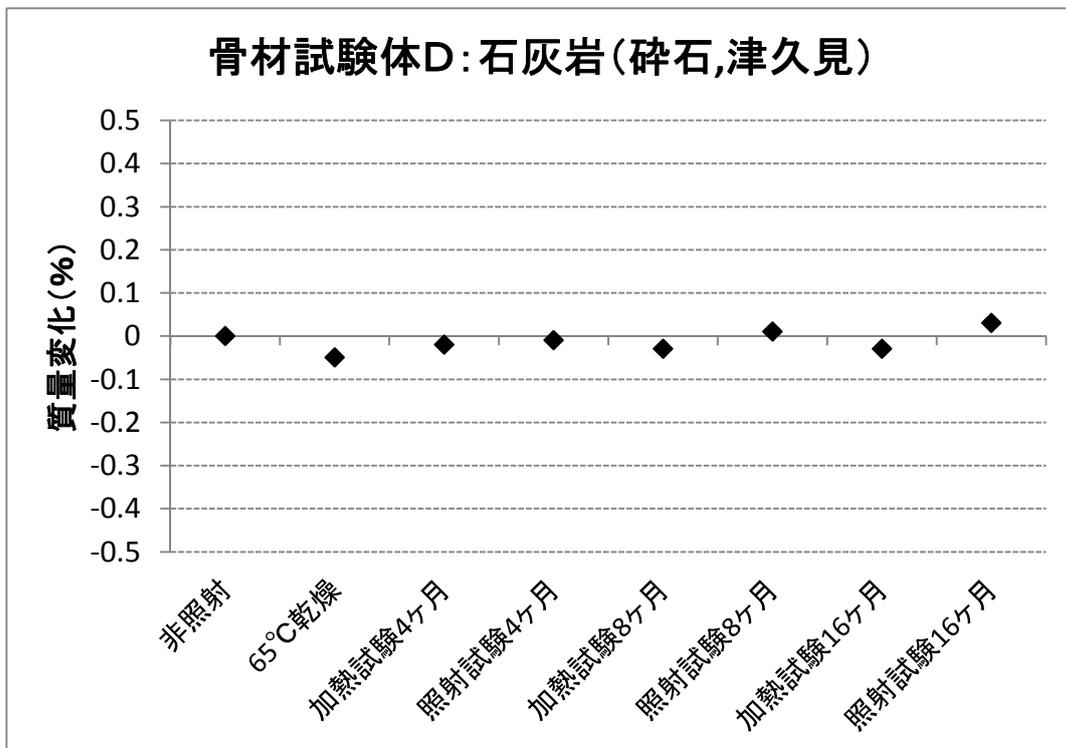
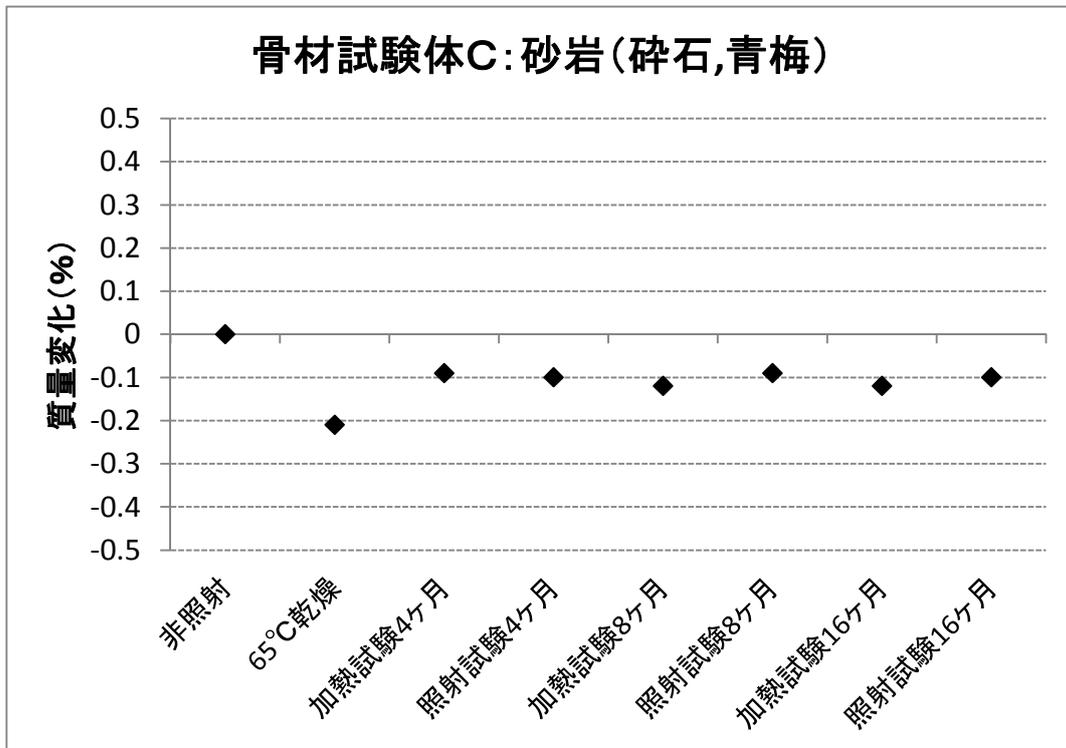


図 3. 2. 3-14 質量変化比較 (2)

<凡例> ◆: 直径变化  
▲: 高さ变化

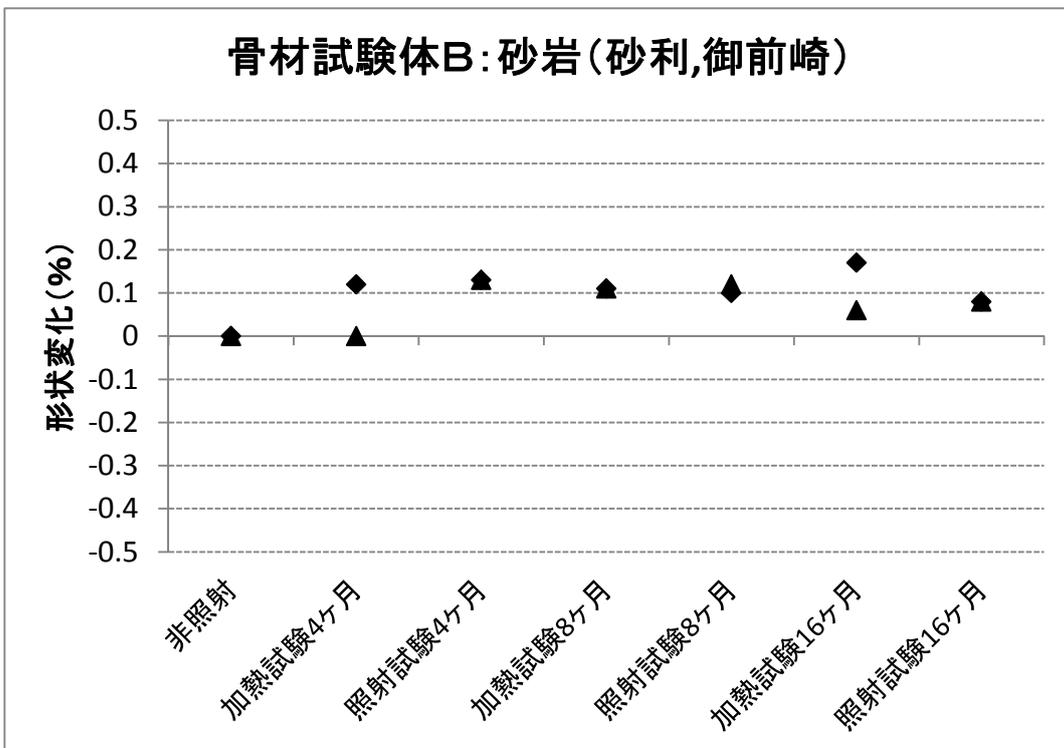
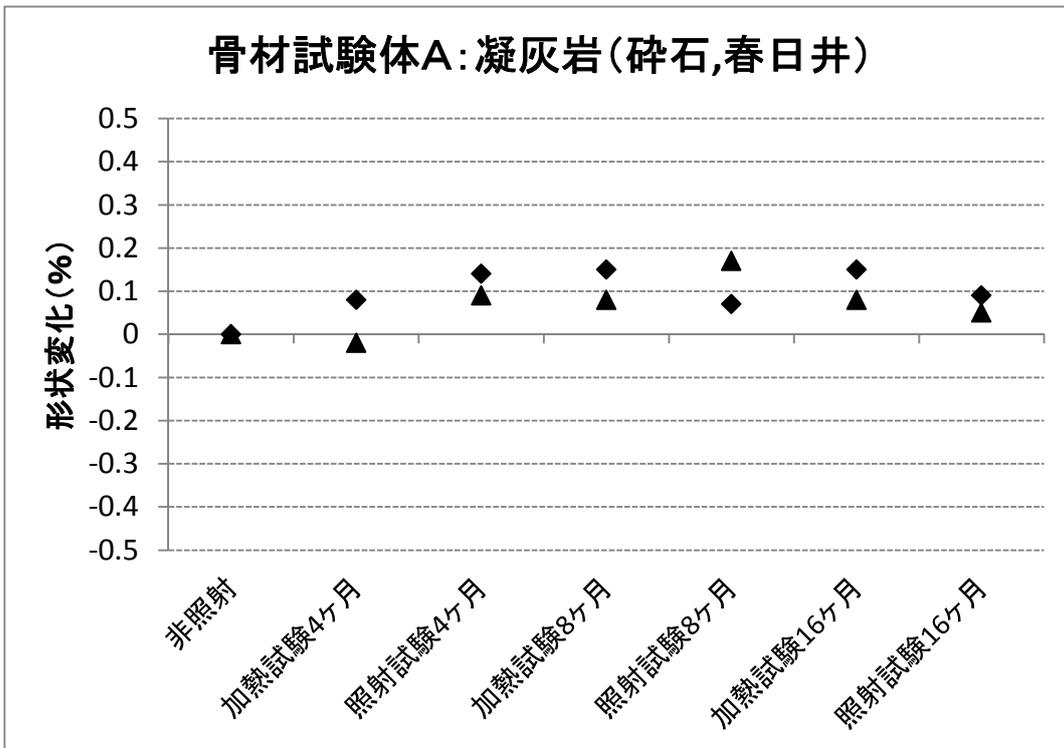


図 3. 2. 3-15 形状 (直径・高さ) 変化比較 (1)

<凡例> ◆: 直径变化  
▲: 高さ变化

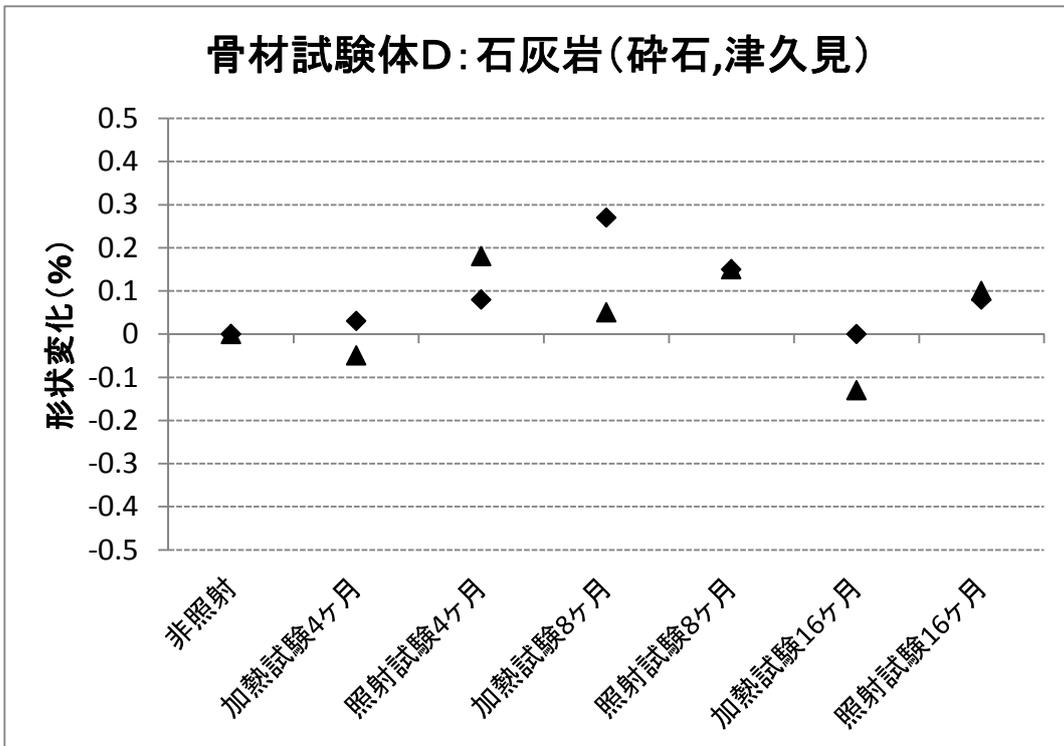
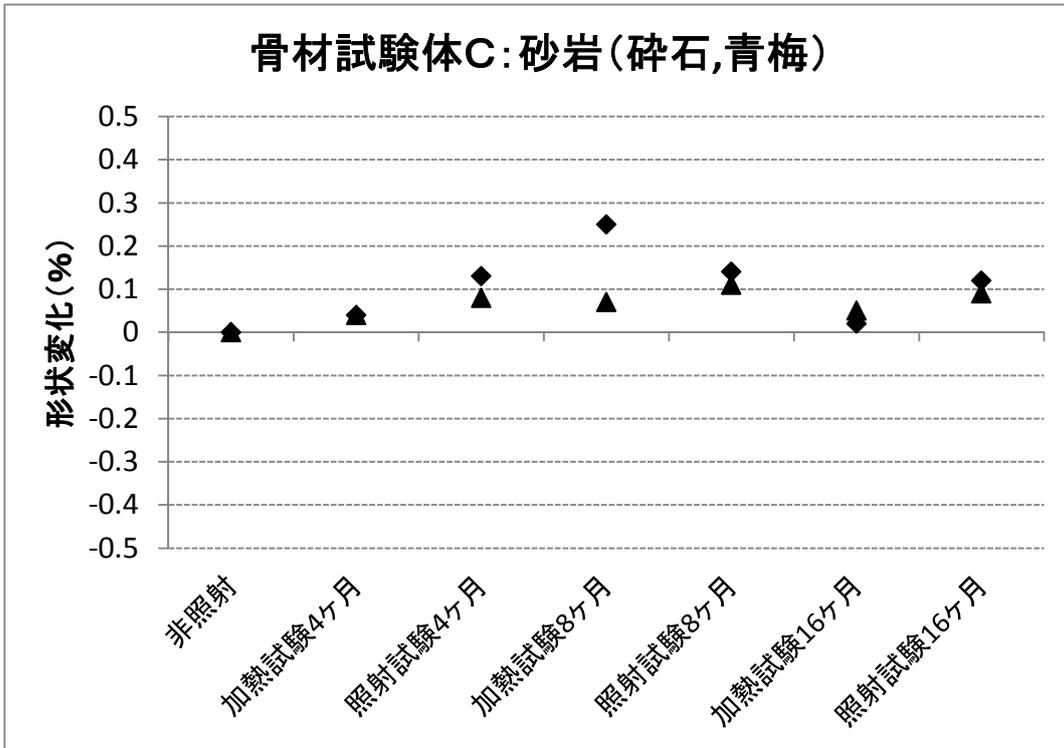


図 3. 2. 3-16 形状 (直径・高さ) 変化比較 (2)

(b) 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 3.2.3-11 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 3.2.3-17 および図 3.2.3-18 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 3.2.3-11 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 <sup>2</sup> )		静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		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 <sup>2</sup> )		静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )			
					平均		平均						平均				
A-01	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 <sup>4</sup>	318	261	90.7	79.8	B-01	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 <sup>4</sup>	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		358	85.7	B-06	401	68.2											
A-07		320	69.1	B-07	266	75.2											
A-08		照射開始 8ヶ月後	5.0×10 <sup>4</sup>	299	296	77.2	77.8	B-08		照射開始 8ヶ月後	5.0×10 <sup>4</sup>	387	359	67.5	73.4		
A-09				239		84.9		B-09				417		80.8			
A-10				266		72.1		B-10				324		75.1			
A-11				374		66.2		B-11				274		80.4			
A-12		347	136.0	B-12	235	44.6											
A-13		照射開始 16ヶ月後	1.0×10 <sup>5</sup>	243	317	119.0	104.0	B-13		照射開始 16ヶ月後	1.0×10 <sup>5</sup>	218	286	80.4	93.7		
A-14				309		85.8		B-14				351		149.0			
A-15				312		113.0		B-15				354		114.0			
A-16	279			72.4		B-16		453	80.1								
A-17	加熱試験	4ヶ月後	1列目 温度 雰囲気 湿度	253	256	61.8	74.0	B-17	加熱試験	4ヶ月後	1列目 温度 雰囲気 湿度	433	368	78.2	76.1		
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				206		70.7		B-21				358		71.8			
A-22		255		82.8	B-22	359	63.4										
A-23		8ヶ月後		210	195	210	77.5	77.7		B-23		8ヶ月後	286	195	286	63.1	68.4
A-24					251		75.7			B-24				364		62.3	
A-25					141		81.7			B-25				153		81.6	
A-26					333		84.9			B-26				268		75.2	
A-27	332		68.8		B-27		383		67.2								
A-28	16ヶ月後	324	405	324	86.3	76.9	B-28	16ヶ月後	288	312	288	71.2	68.8				
A-29			200		72.8		B-29			262		70.2					
A-30			350		71.5		B-30			214		60.4					
A-31			262		85.0		B-31			198		68.2					
A-32	250	52.0	B-32	300	61.6												
A-33	標準養生	管理試験	20℃封緘	258	246	84.1	73.5	B-33	標準養生	管理試験	20℃封緘	236	275	46.1	60.3		
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	加熱影響 確認試験	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 3.2.3-12 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 <sup>2</sup> )		静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		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 <sup>2</sup> )		静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
					平均		平均						平均		
C-01	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 <sup>4</sup>	124	184	58.7	64.5	D-01	照射試験	照射開始 4ヶ月後	2.5×10 <sup>4</sup>	129	131	78.3	77.6
C-02				260		69.3		D-02				203		78.5	
C-03				198		53.5		D-03				75		69.4	
C-04				177		71.3		D-04				114		83.7	
C-05				159		69.8		D-05				134		78.0	
C-06		照射開始 8ヶ月後	5.0×10 <sup>4</sup>	160	187	66.6	D-06	176		66.6					
C-07					221	75.0	D-07	53		49.2					
C-08					96	58.7	D-08	52		65.0					
C-09					129	65.3	D-09	134		64.1					
C-10					169	65.8	D-10	145		68.5					
C-11		照射開始 16ヶ月後	1.0×10 <sup>5</sup>	198	221	72.3	D-11	49		52.1					
C-12					215	67.4	D-12	69		56.1					
C-13					150	48.5	D-13	85		57.8					
C-14					184	55.4	D-14	148		62.8					
C-15					222	66.5	D-15	61		47.0					
C-16	加熱試験	4ヶ月後	1列目 温度 雰囲気 湿度	208	63.6	D-16	151	79.1							
C-17				240	67.8	D-17	81	68.0							
C-18				134	64.6	D-18	77	67.0							
C-19				207	68.9	D-19	95	75.0							
C-20				154	61.7	D-20	61	79.7							
C-21		8ヶ月後	144	80	39.0	D-21	110	69.6							
C-22				162	52.5	D-22	83	63.9							
C-23				230	62.6	D-23	110	70.4							
C-24				91	39.7	D-24	119	84.2							
C-25				159	62.6	D-25	134	82.9							
C-26		16ヶ月後	215	228	61.7	D-26	138	79.3							
C-27				196	56.9	D-27	97	53.3							
C-28				256	63.0	D-28	54	66.1							
C-29				189	57.6	D-29	95	79.2							
C-30				207	61.9	D-30	102	73.9							
C-31	標準養生	管理試験	20℃封緘	129	60.6	D-31	135	82.5							
C-32				167	48.6	D-32	151	69.0							
C-33				145	45.1	D-33	130	81.6							
C-34				170	63.0	D-34	92	81.6							
C-35				156	46.2	D-35	85	70.7							
C-36	加熱影響 確認試験	加熱後	65℃	373	70.0	D-36	117	70.0							
C-37				210	64.0	D-37	111	73.9							
C-38				373	63.7	D-38	88	72.2							
C-39				261	69.5	D-39	102	61.8							
C-40				243	61.6	D-40	177	70.3							
C-41		管理試験	20℃封緘	166	150	65.9	D-41	114	73.8						
C-42					131	64.5	D-42	176	80.9						
C-43					139	51.3	D-43	179	85.2						
C-44					287	61.7	D-44	176	79.2						
C-45					124	61.1	D-45	174	72.6						

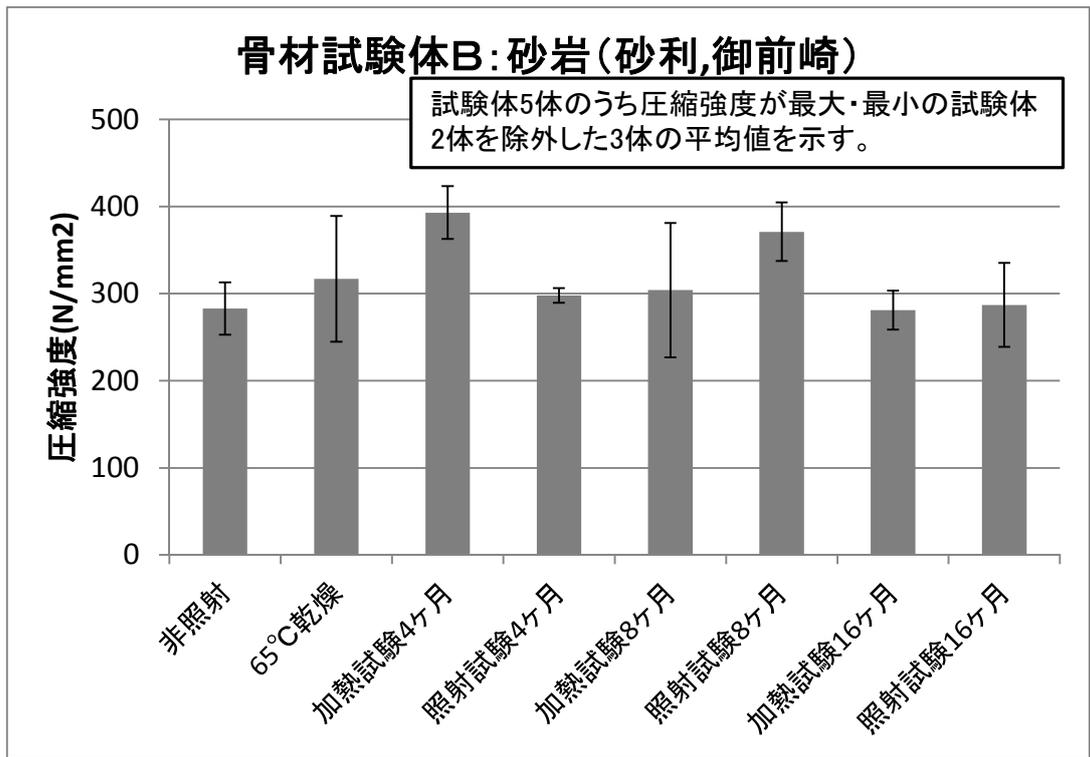
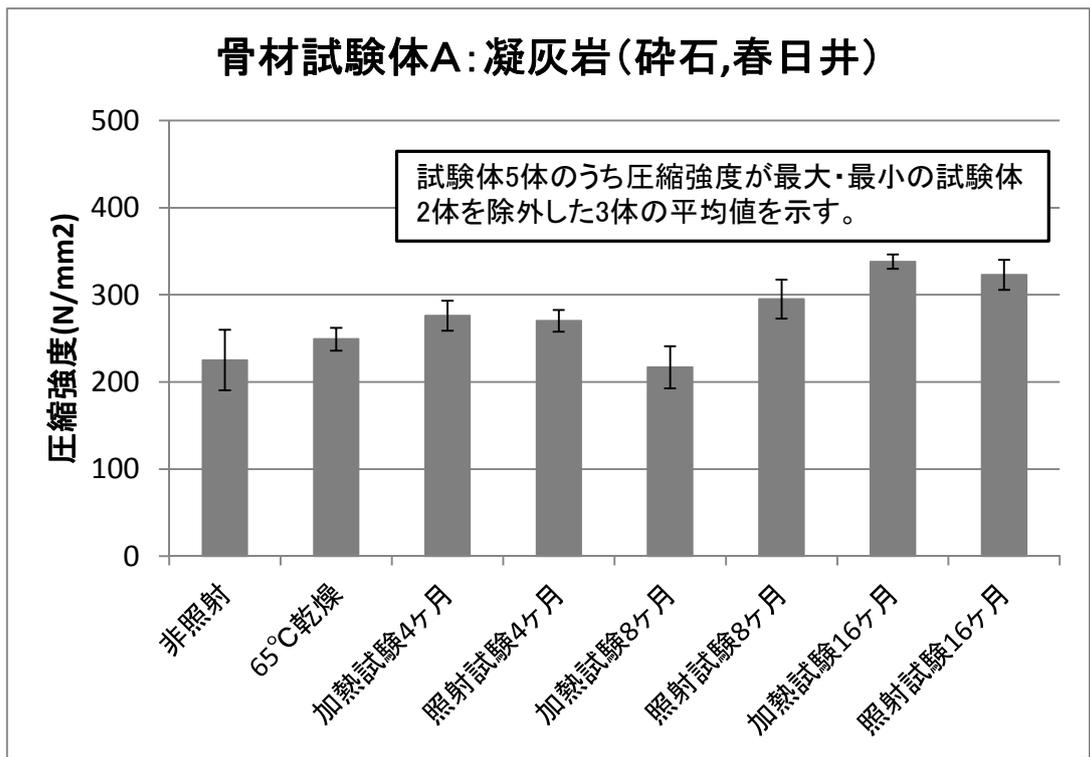


図 3. 2. 3-17 骨材圧縮強度比較 (1)

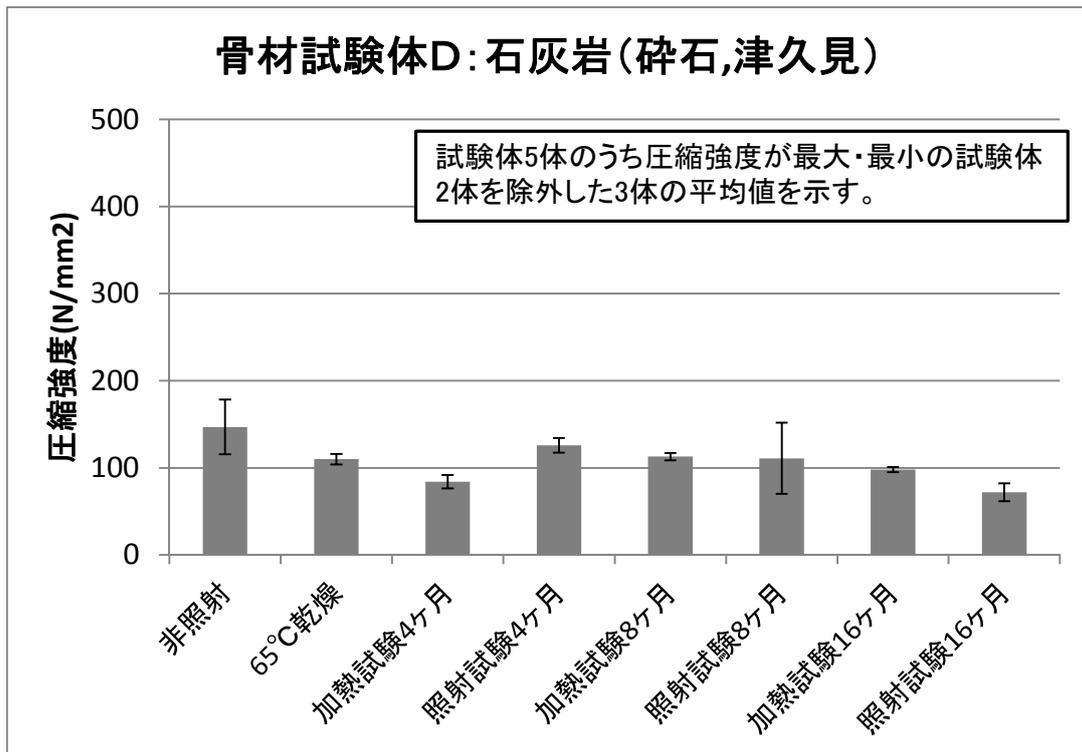
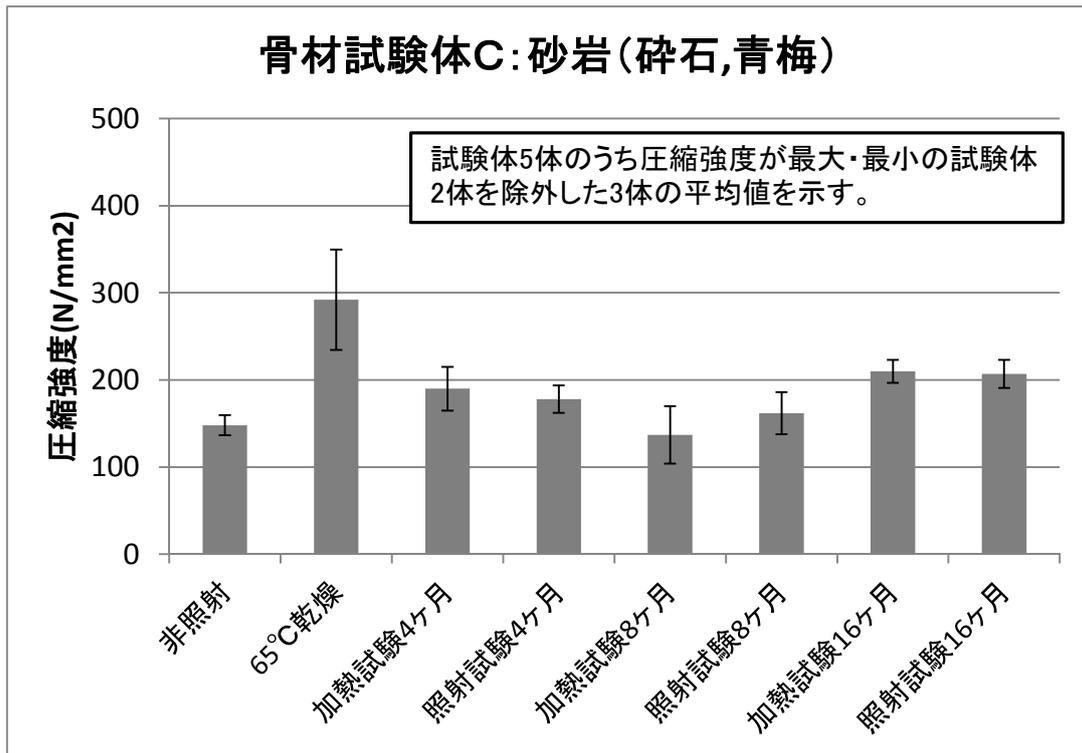


図 3. 2. 3-18 骨材圧縮強度比較 (2)

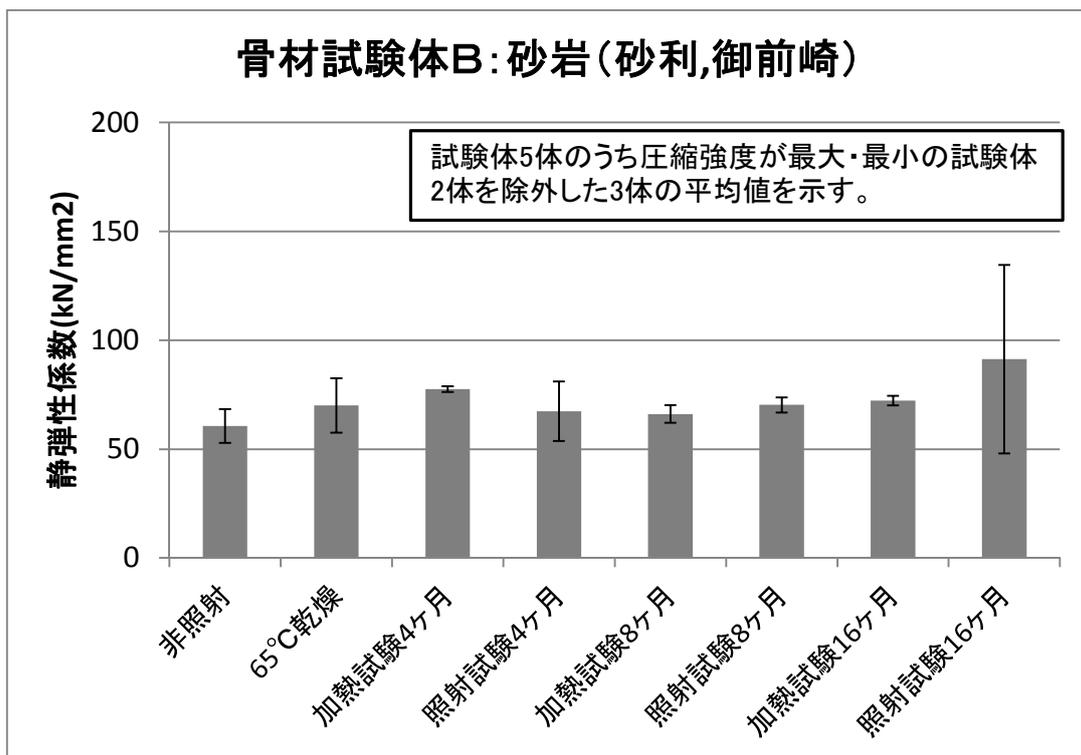
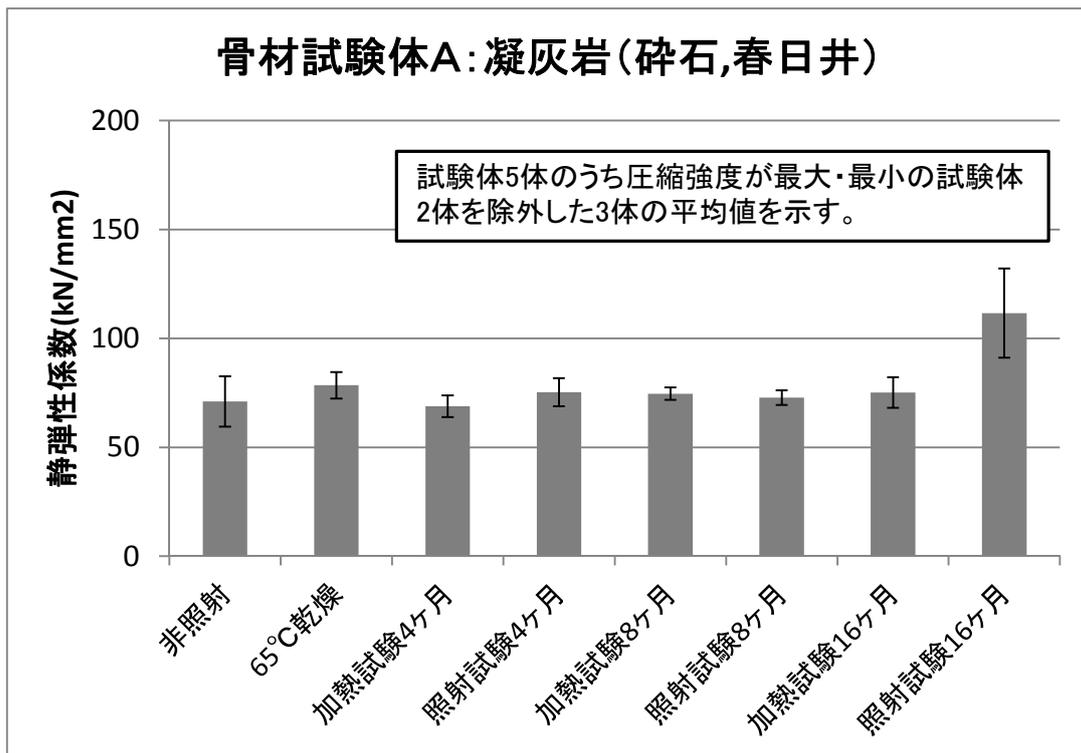


図 3. 2. 3-19 骨材静弾性係数比較 (1)

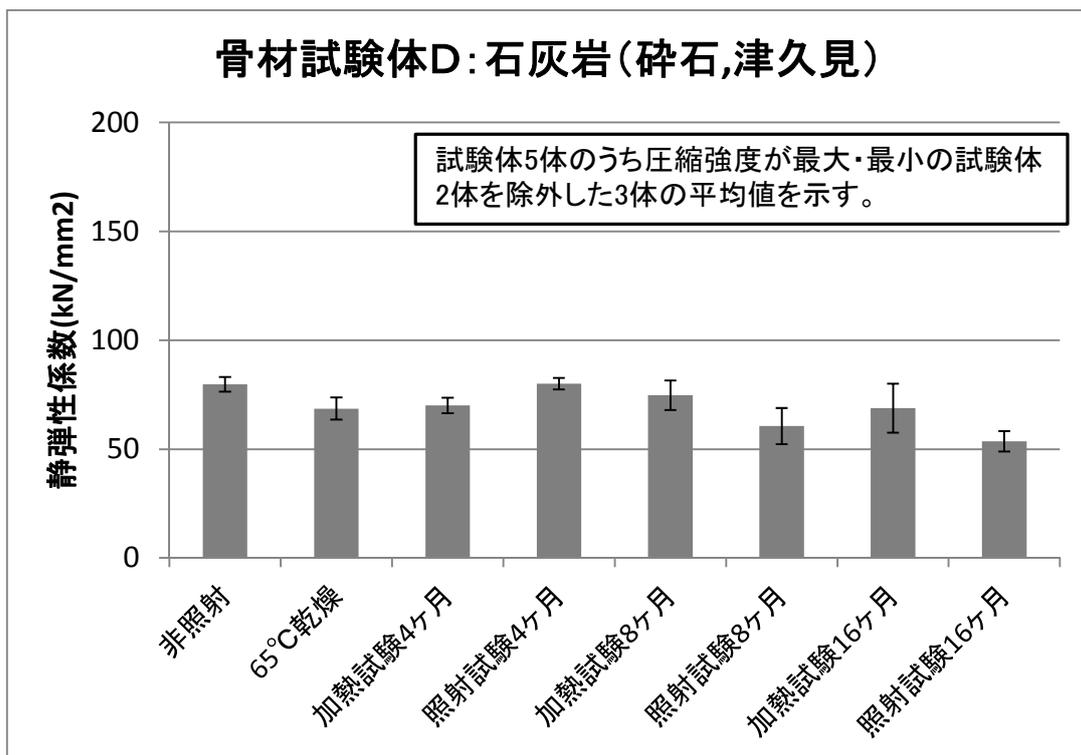
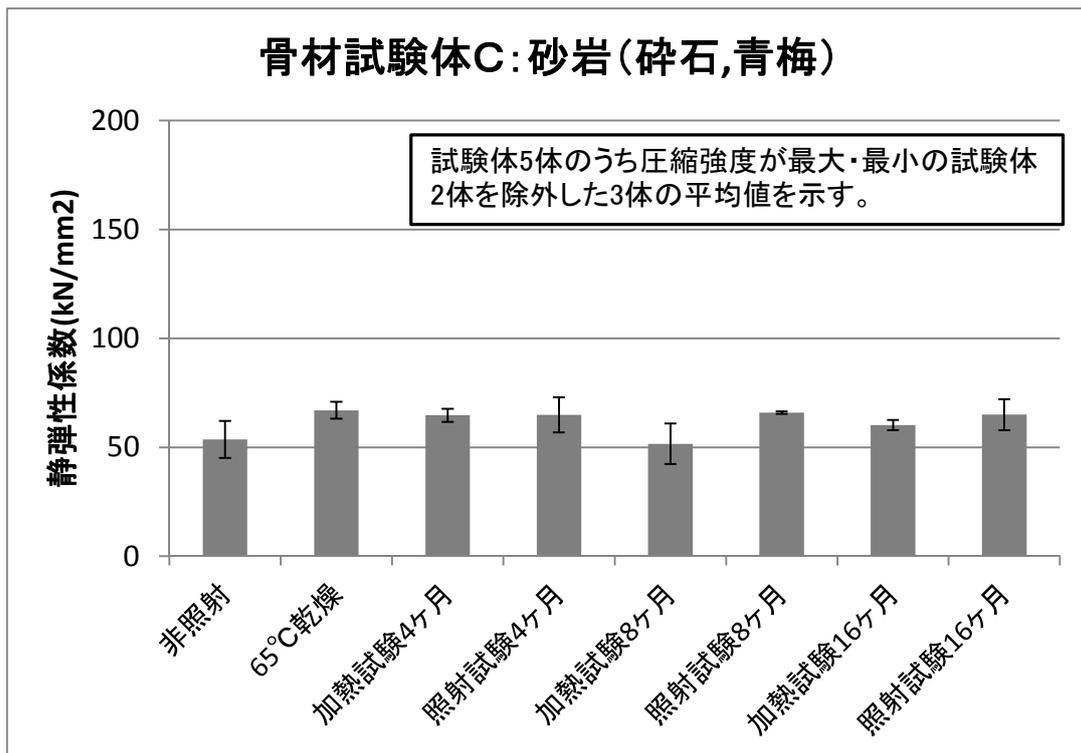


図 3. 2. 3-20 骨材静弾性係数比較 (2)

## 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 3.2.3-13 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 3.2.3-24 に示す。

図 3.2.3-24 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（ナプコバリヤー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 3.2.3-21 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 3.2.3-13 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 3.2.3-14～表 3.2.3-17 および図 3.2.3-23 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 3.2.3-13 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		
C32		試験体成形直後(非照射)
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)

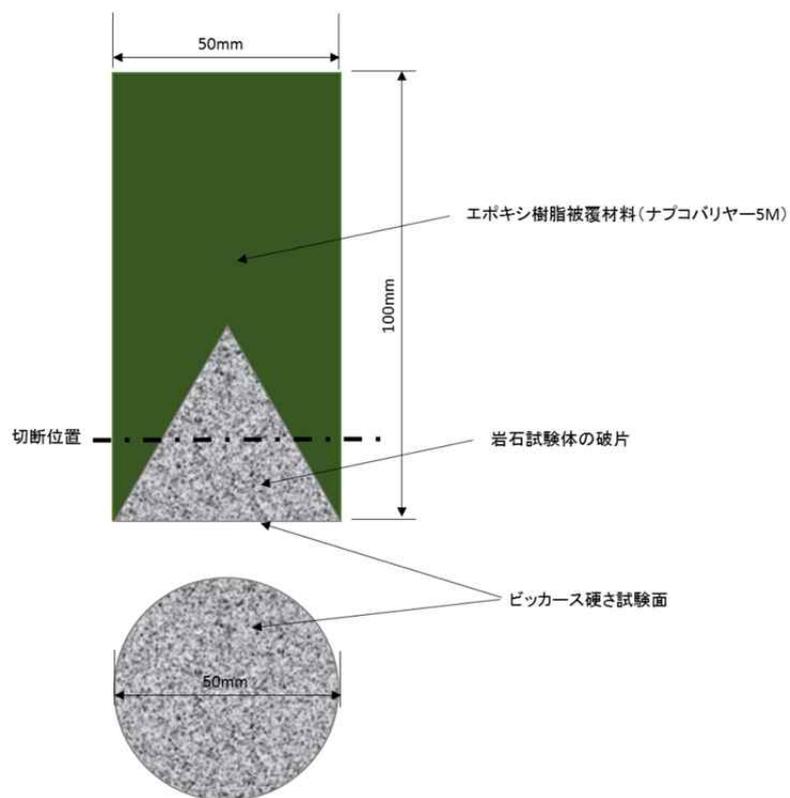


図 3. 2. 3-21 ビッカース硬さ試験用試験体の試料調整方法の概略



(a) 試験前試料



(b) マイクロビッカース試験機

図 3. 2. 3-22 ビッカース硬さ試験状況

表 3.2.3-14 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																				平均
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
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	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	1.0	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 3.2.3-15 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																				平均
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
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	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	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 3.2.3-16 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																				平均
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	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	1.0	0.5	1.0	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 3.2.3-17 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																				平均
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
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	0.5	1.0	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

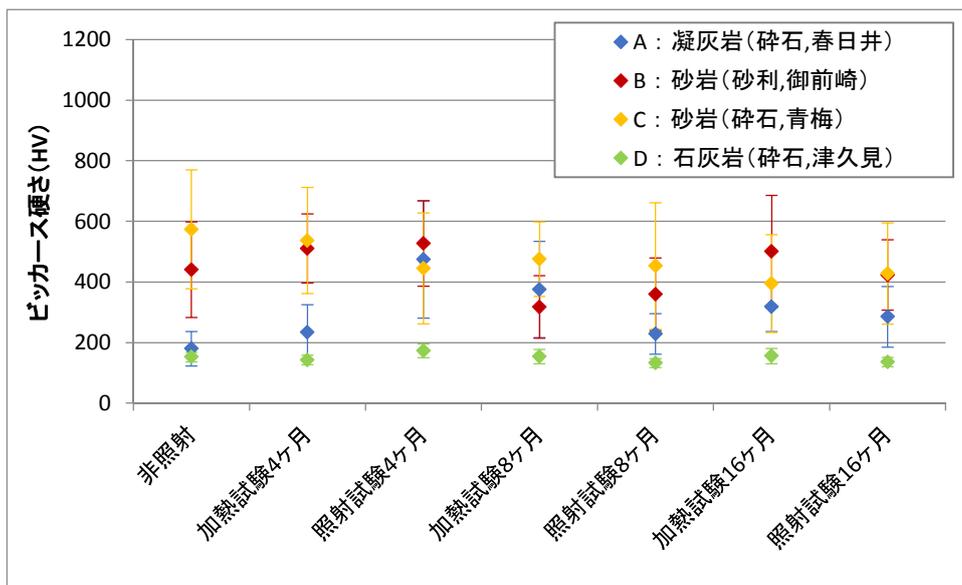


図 3.2.3-23 ビッカース硬さ試験結果

(c) 線量計測結果

線量計測結果を表 3.2.3-18 に、照射試験完了時点の累積照射量および平均線量率を表 3.2.3-19 に示す。

表 3.2.3-18 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 3.2.3-19 累積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)	累積照射量 (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

(d) 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なった。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 $0.03^\circ$ である。

XRD（粉末X線回折）試験結果を表3.2.3-20および図3.2.3-24～図3.2.3-47に示す。

表 3.2.3-20 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。

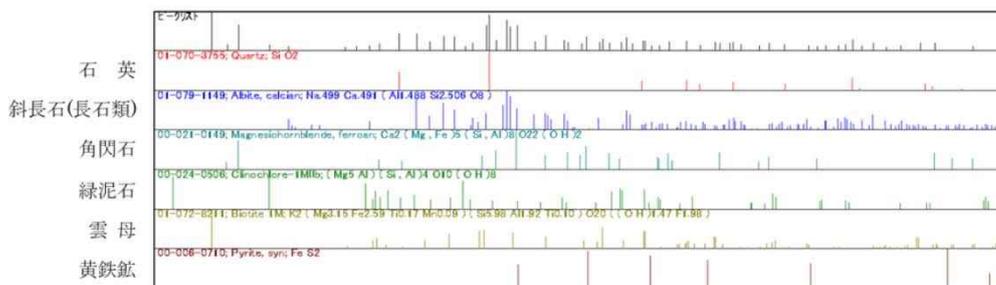
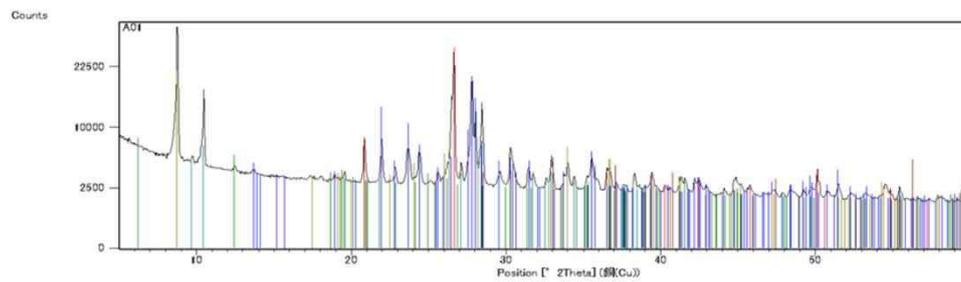
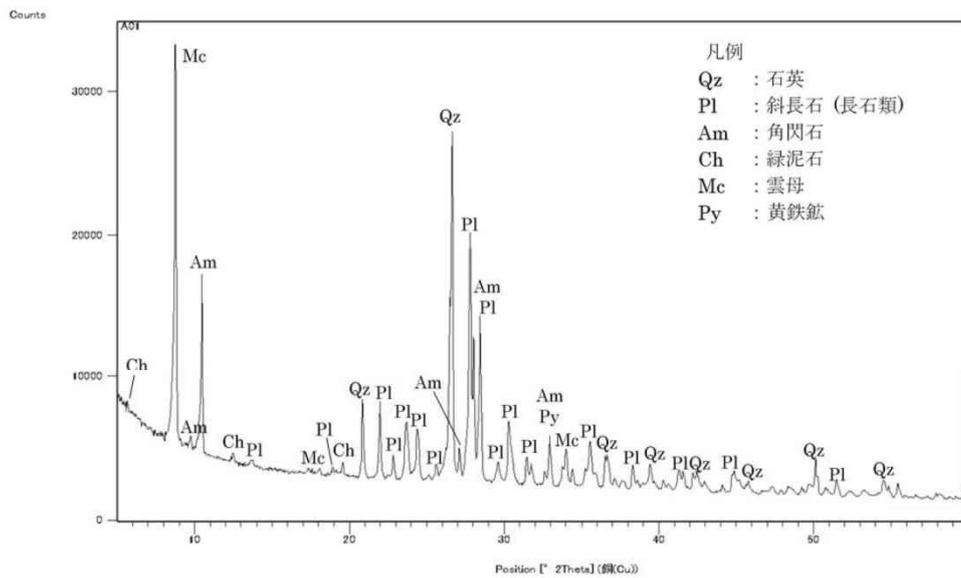


図 3. 2. 3-24 粉末X線回折試験結果 (A01 : 凝灰岩)

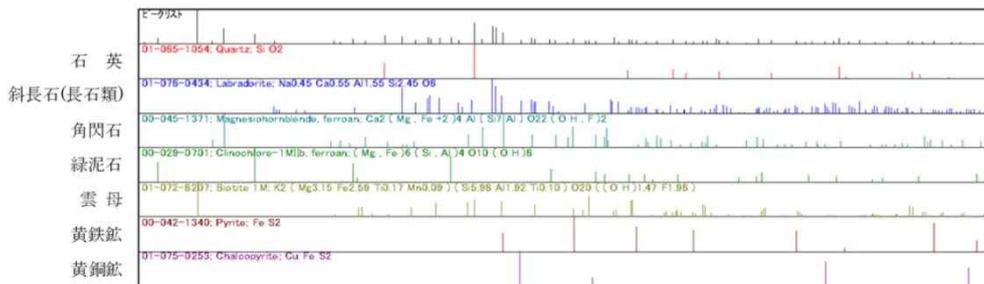
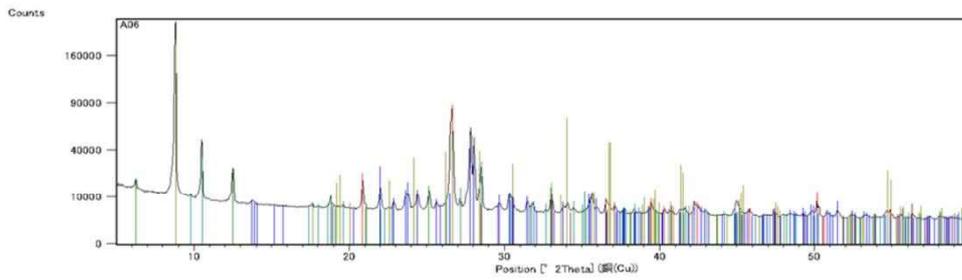
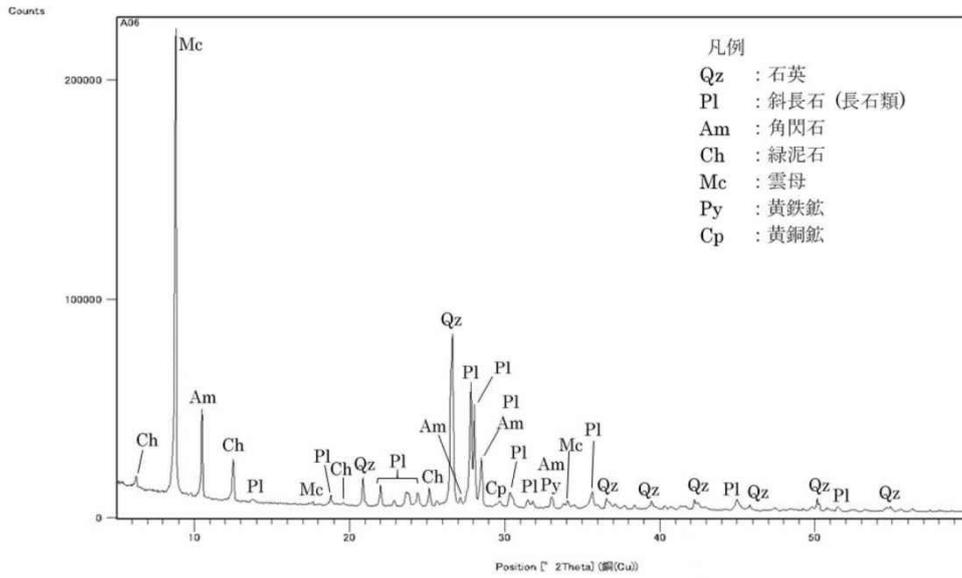


図 3. 2. 3-25 粉末X線回折試験結果 (A06 : 凝灰岩)

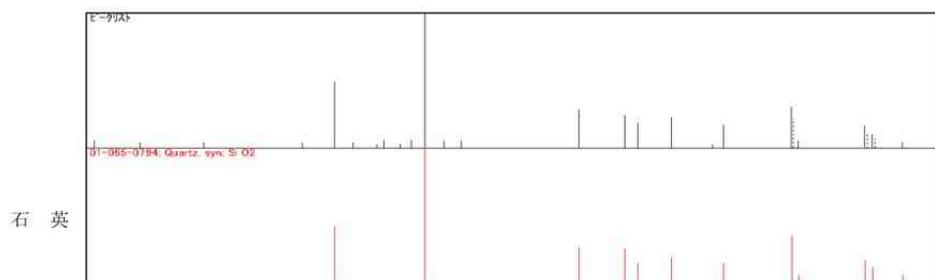
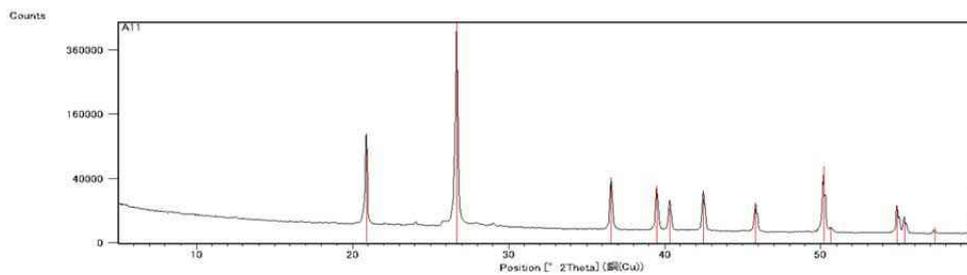
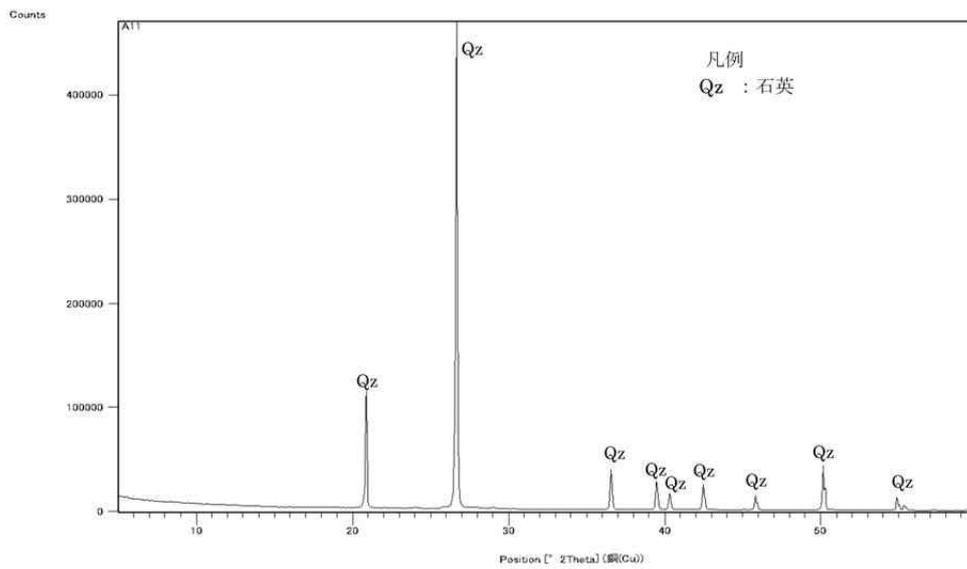


图 3. 2. 3-26 粉末X線回折試験結果 (A11 : 凝灰岩)

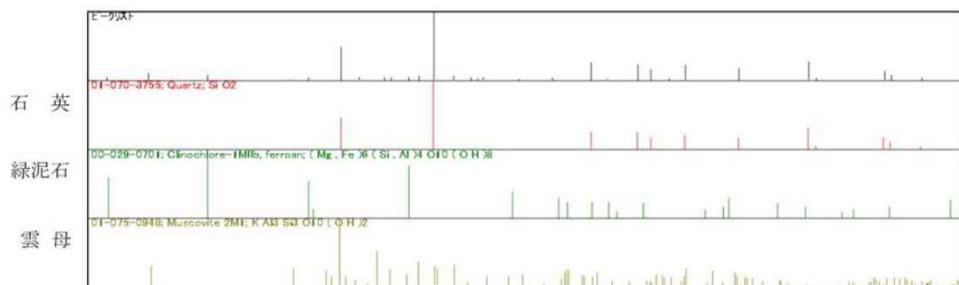
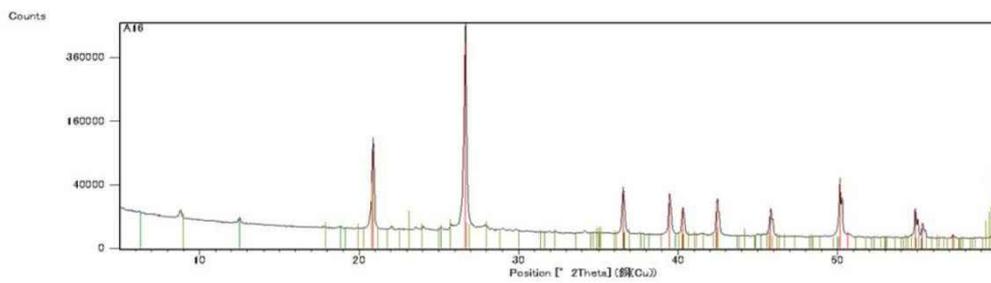
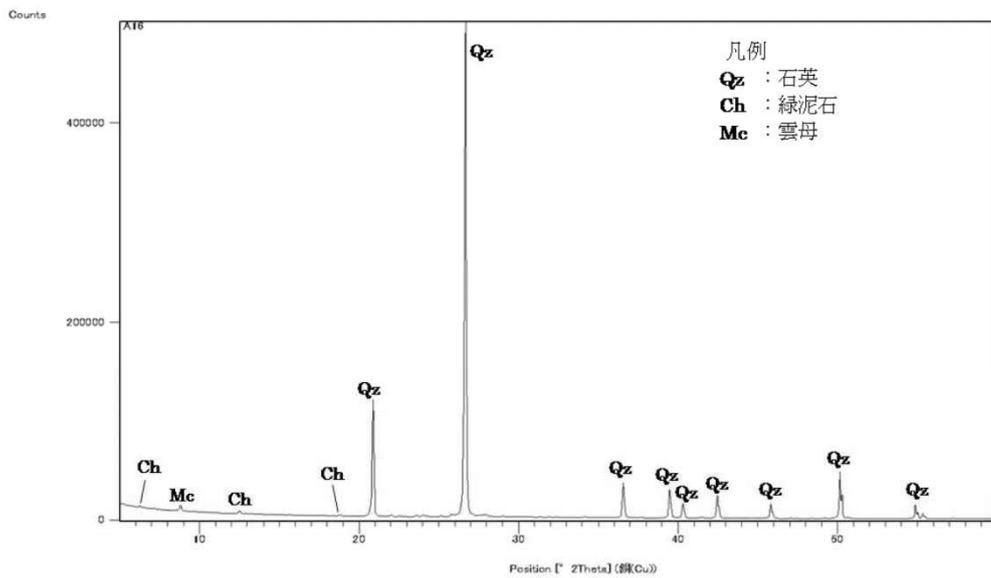


図 3. 2. 3-27 粉末 X 線回折試験結果 (A16 : 凝灰岩)

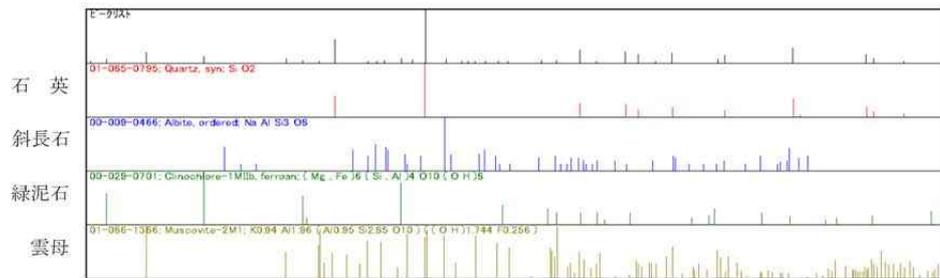
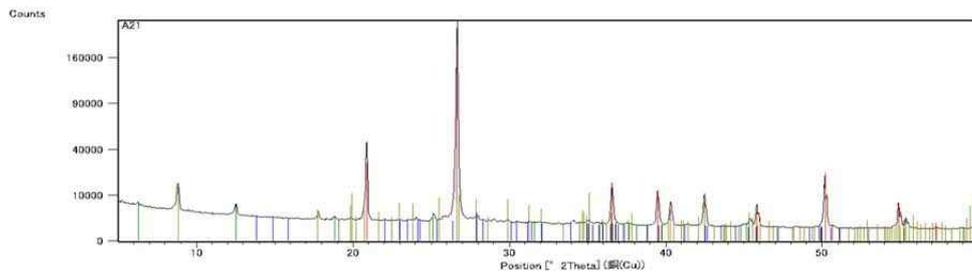
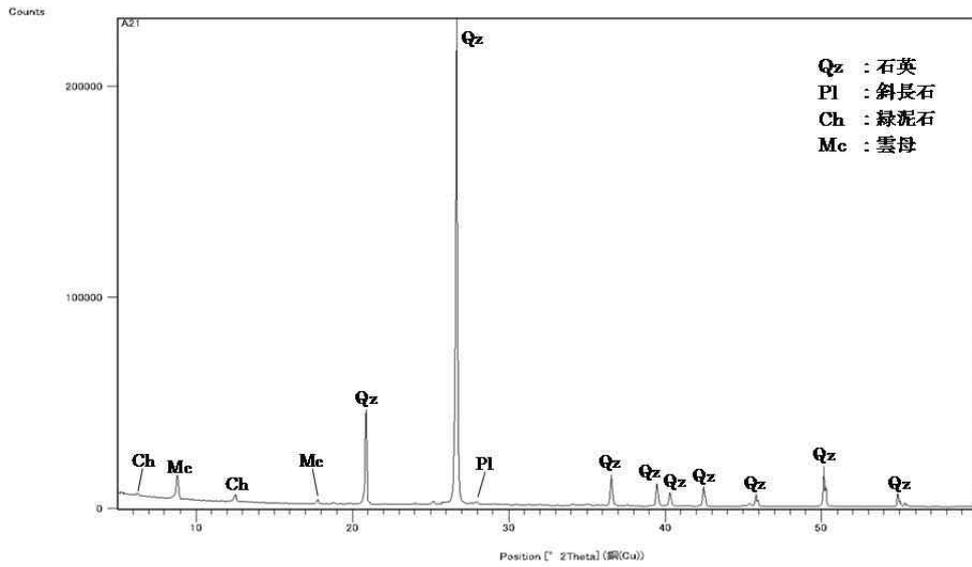


圖 3. 2. 3-28 粉末 X 線回折試驗結果 (A21 : 凝灰岩)

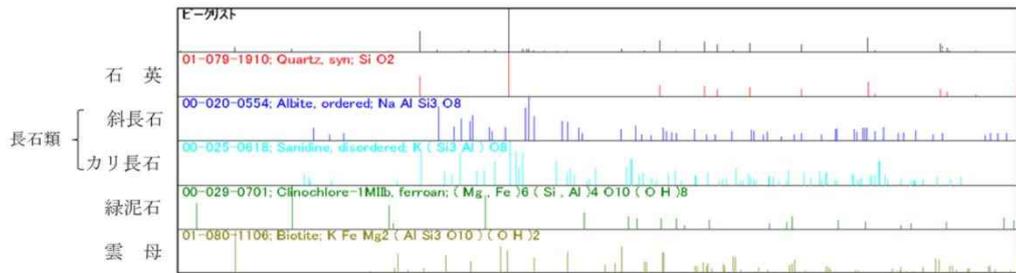
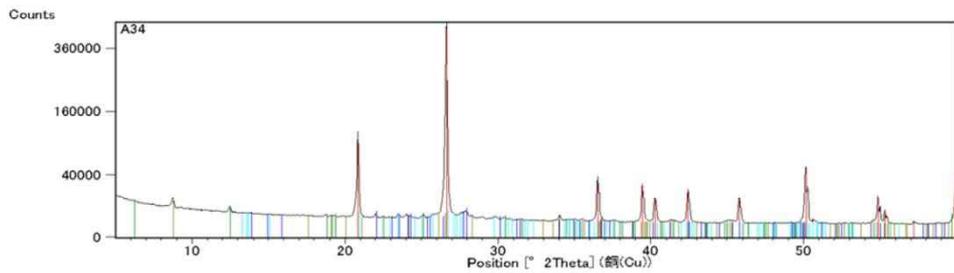
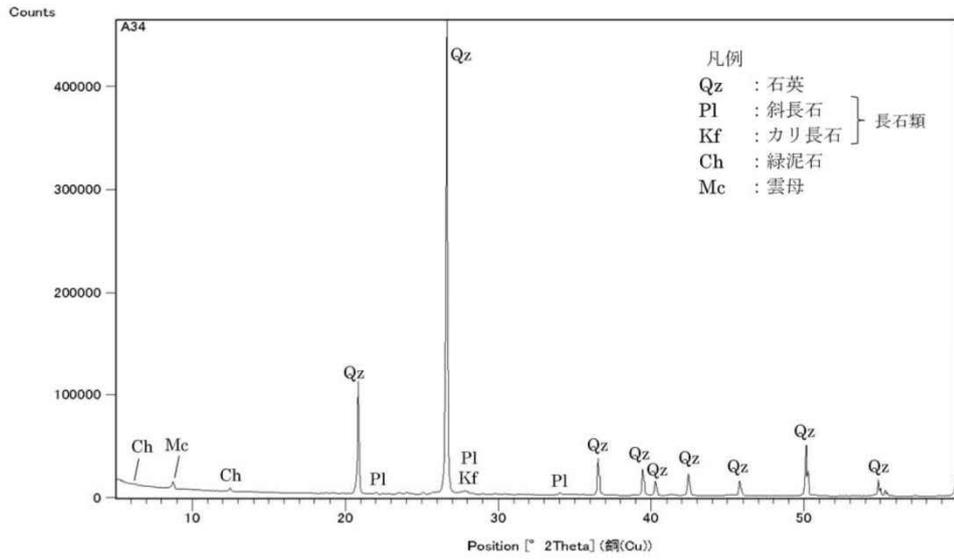


図 3. 2. 3-29 粉末 X 線回折試験結果 (A34 : 凝灰岩)

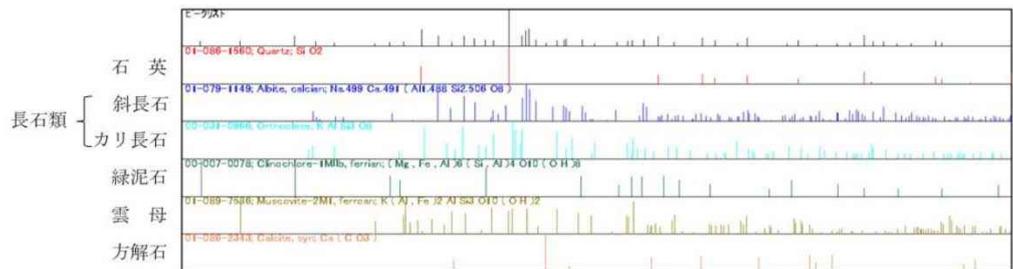
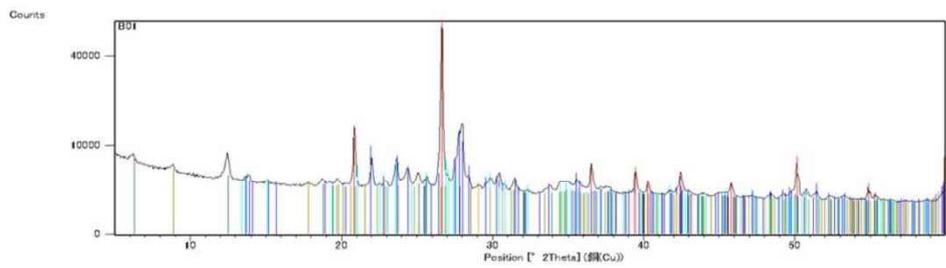
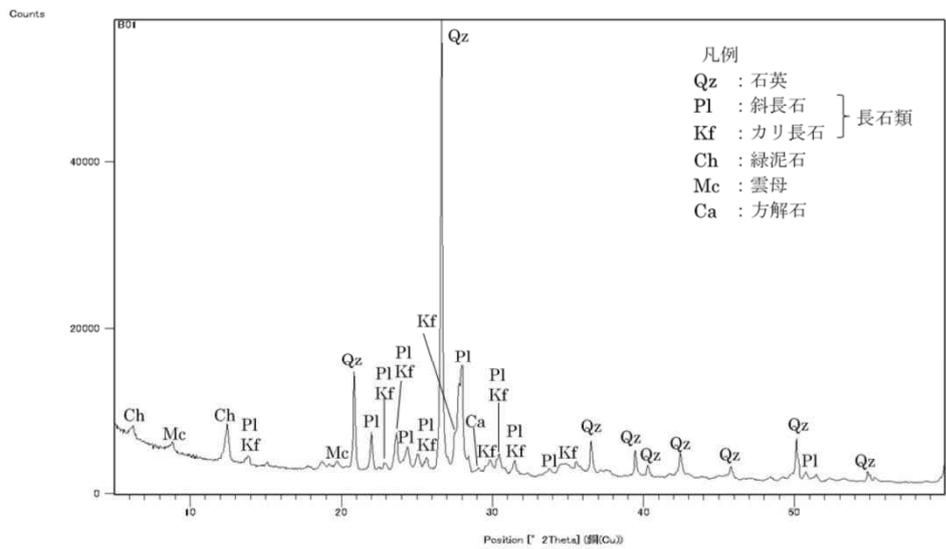


図 3. 2. 3-30 粉末X線回折試験結果 (B01 : 砂岩)

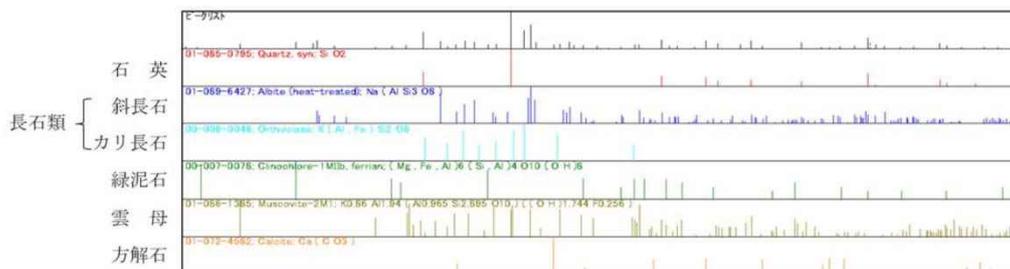
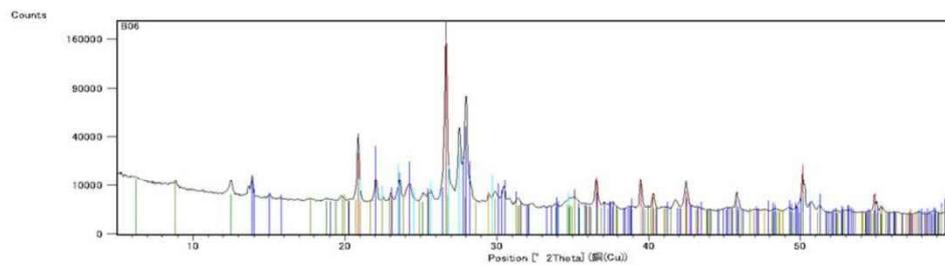
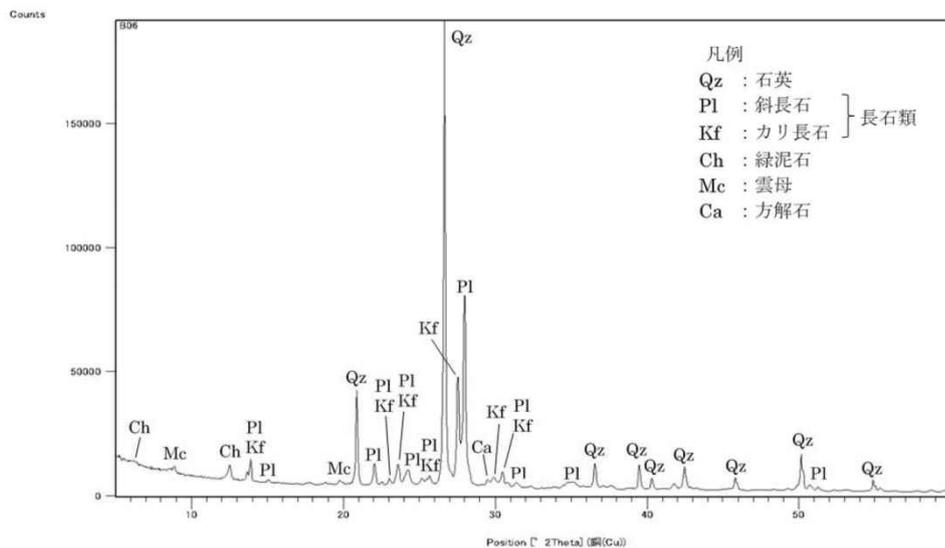


図 3. 2. 3-31 粉末 X 線回折試験結果 (B06 : 砂岩)

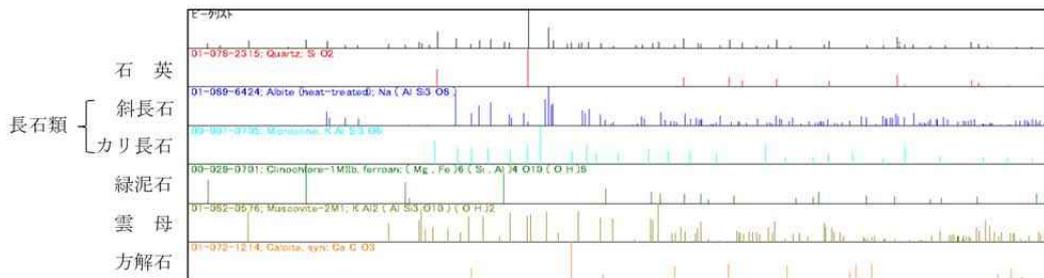
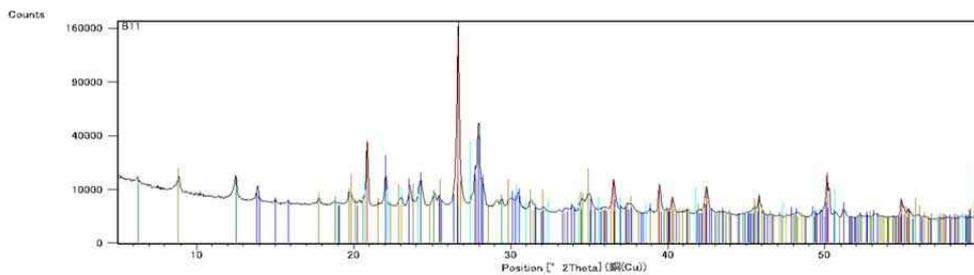
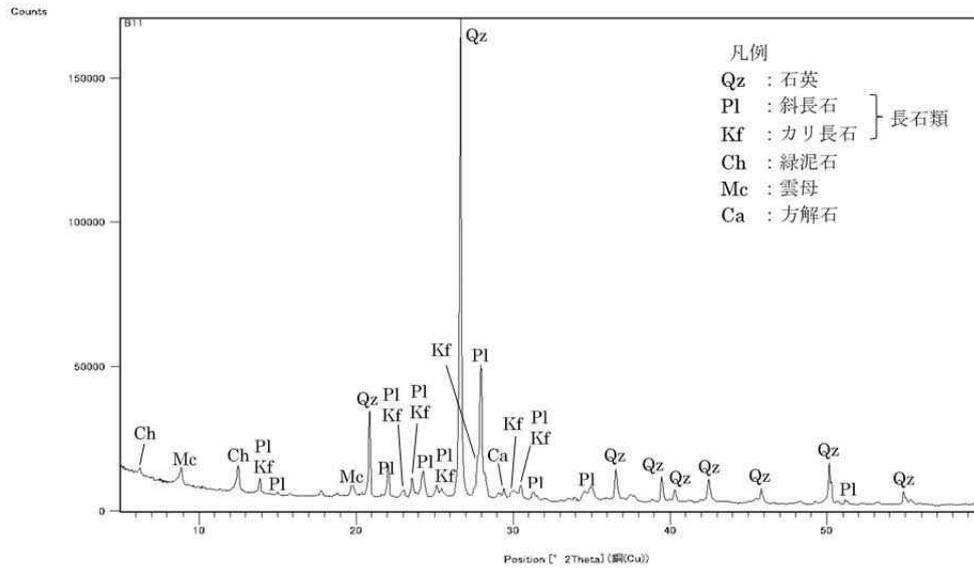


図 3. 2. 3-32 粉末X線回折試験結果 (B11: 砂岩)



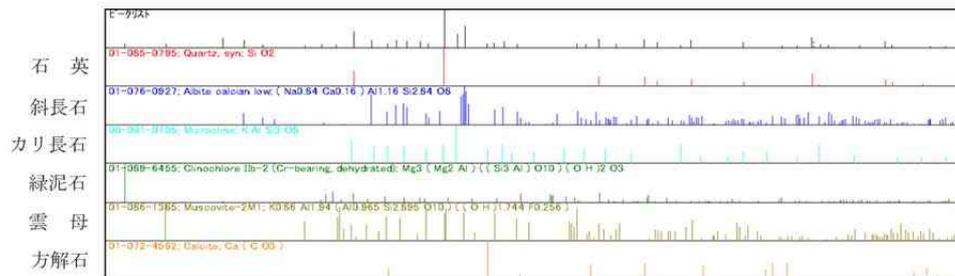
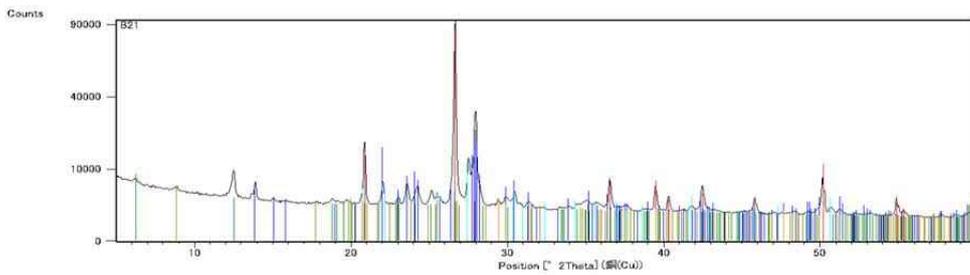
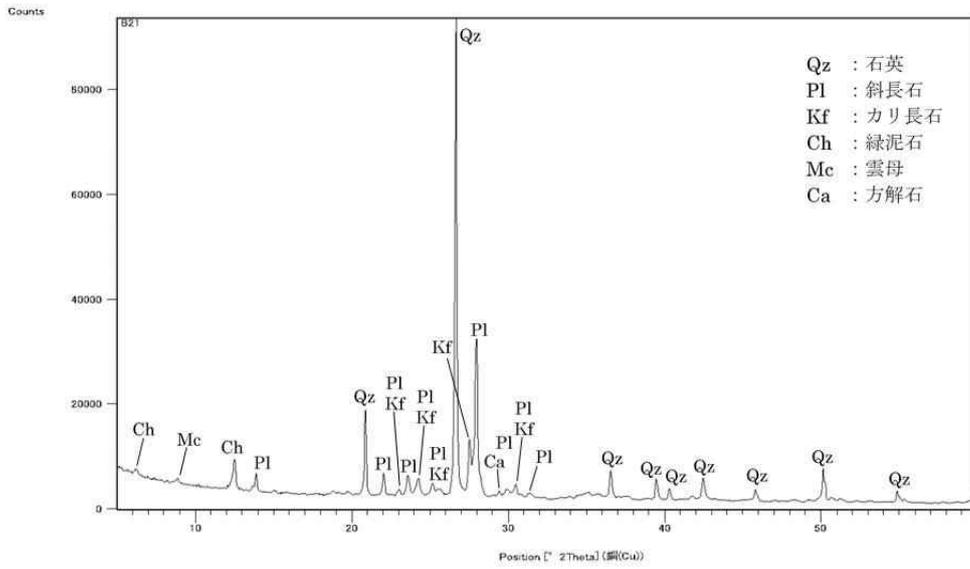


図 3. 2. 3-34 粉末X線回折試験結果 (B21 : 砂岩)

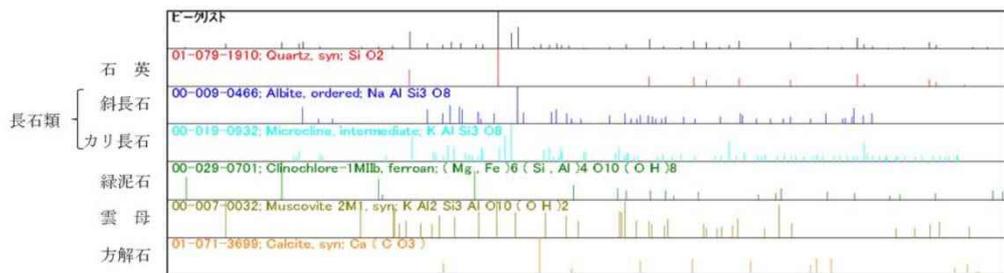
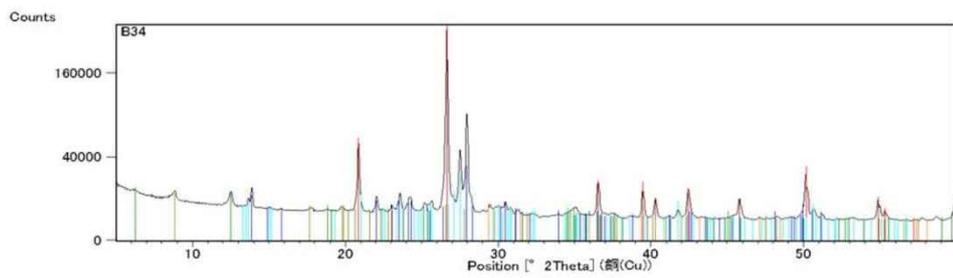
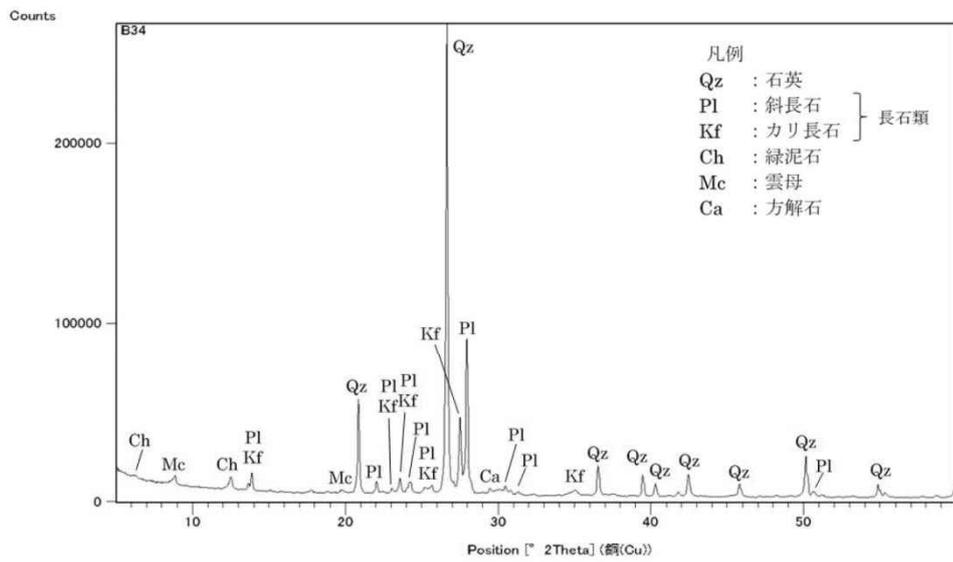


図 3. 2. 3-35 粉末X線回折試験結果 (B34 : 砂岩)

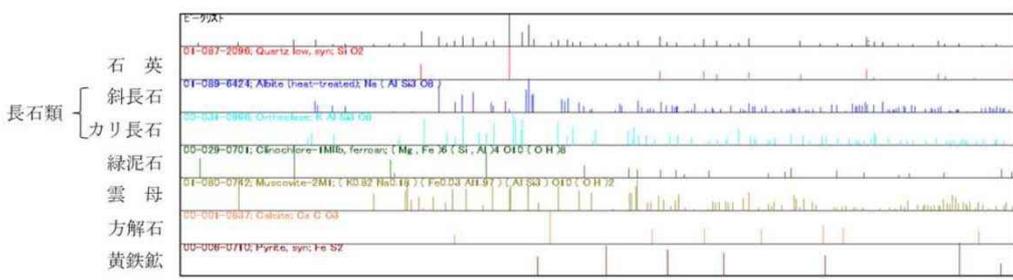
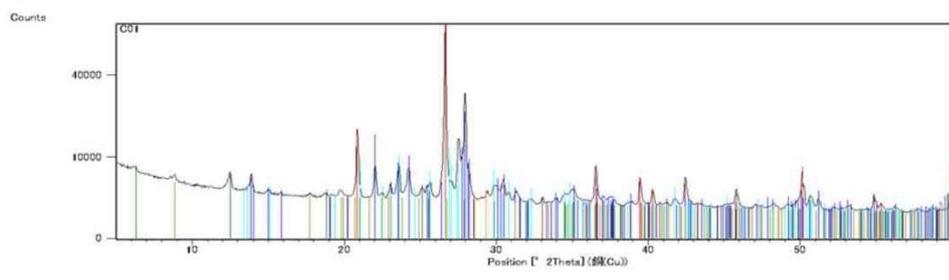
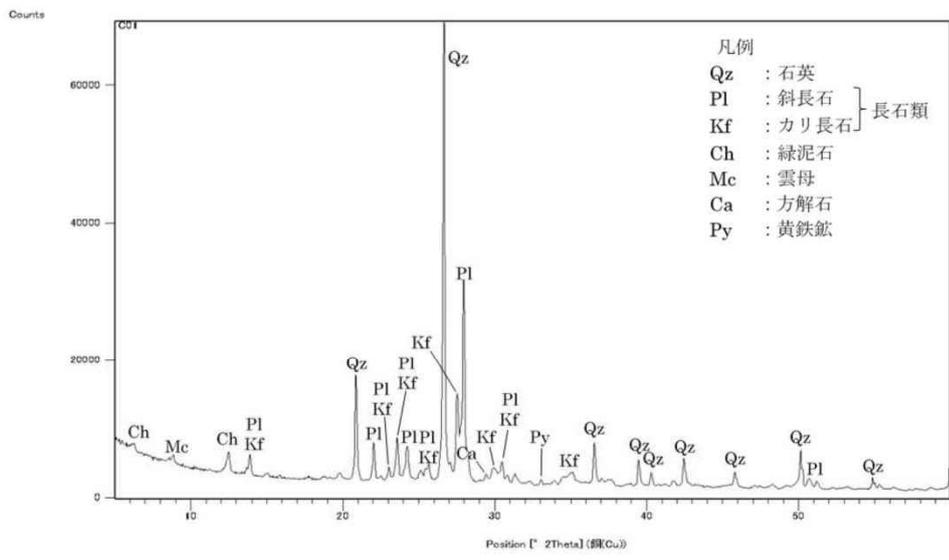


図 3. 2. 3-36 粉末X線回折試験結果 (C01 : 砂岩)

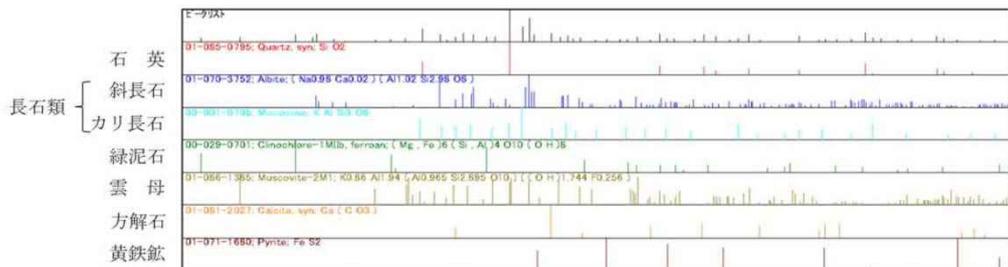
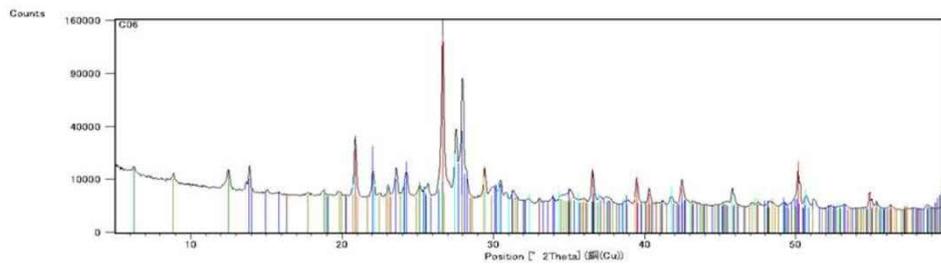
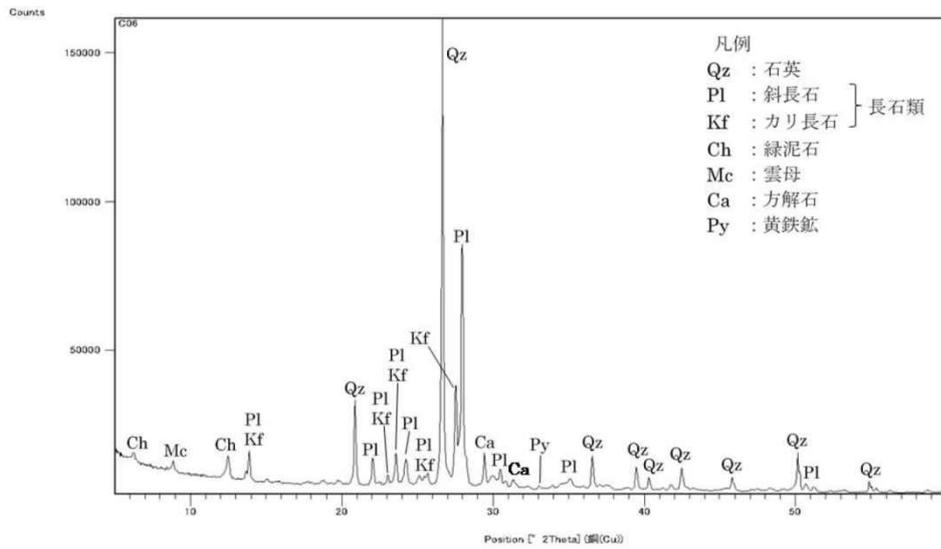


図 3. 2. 3-37 粉末 X 線回折試験結果 (C06 : 砂岩)

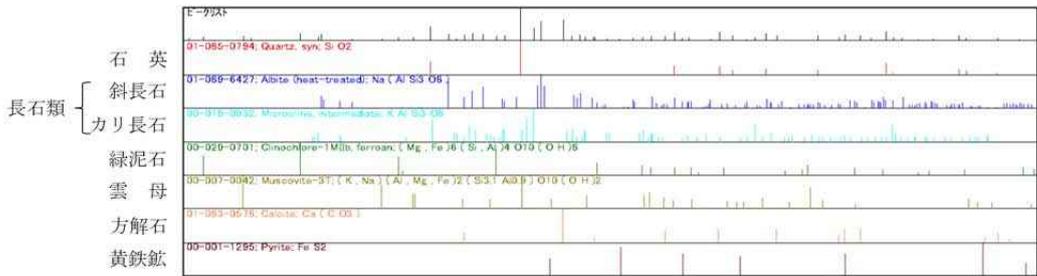
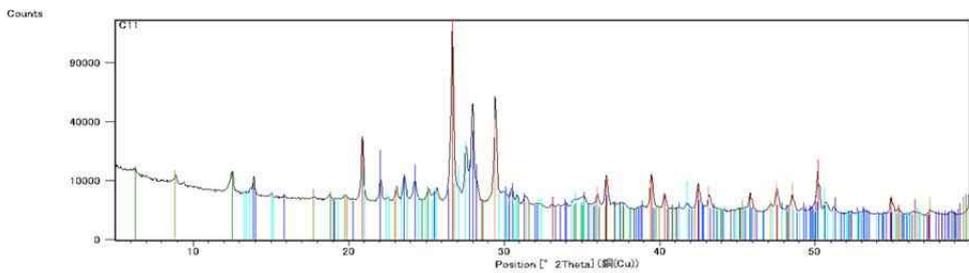
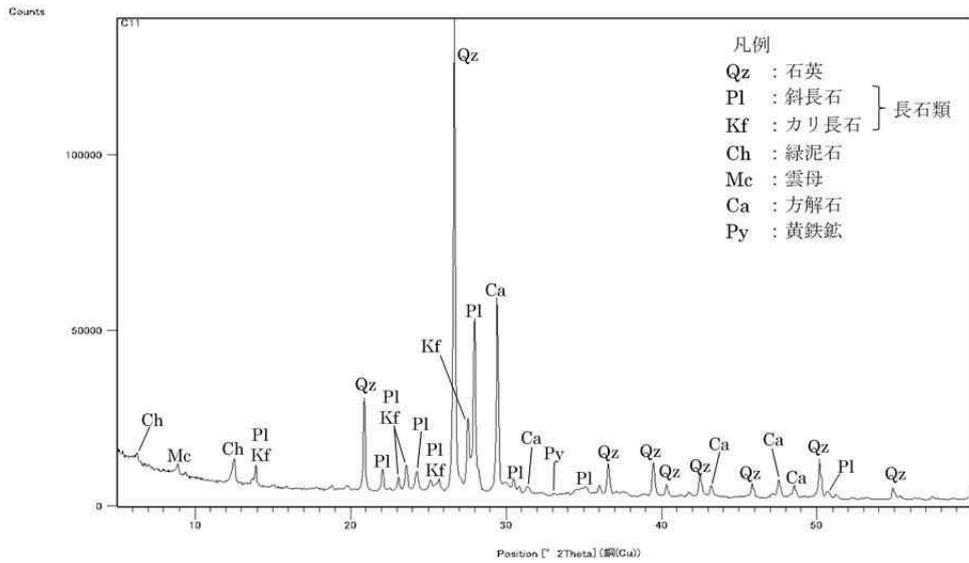


図 3. 2. 3-38 粉末X線回折試験結果 (C11 : 砂岩)

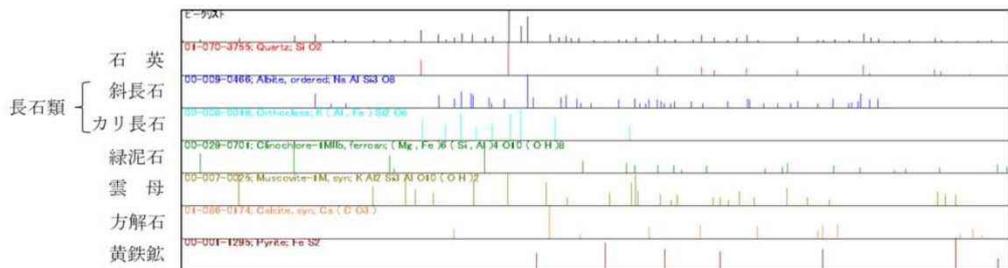
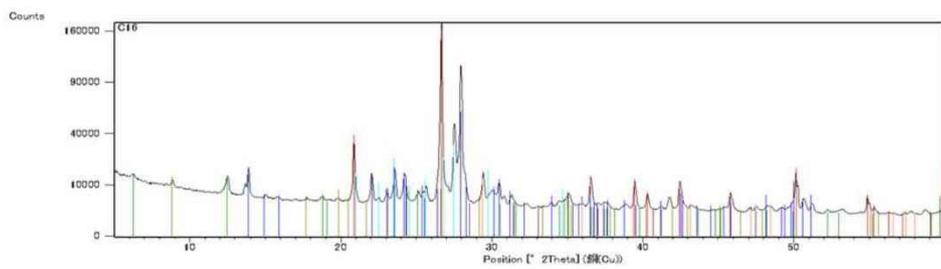
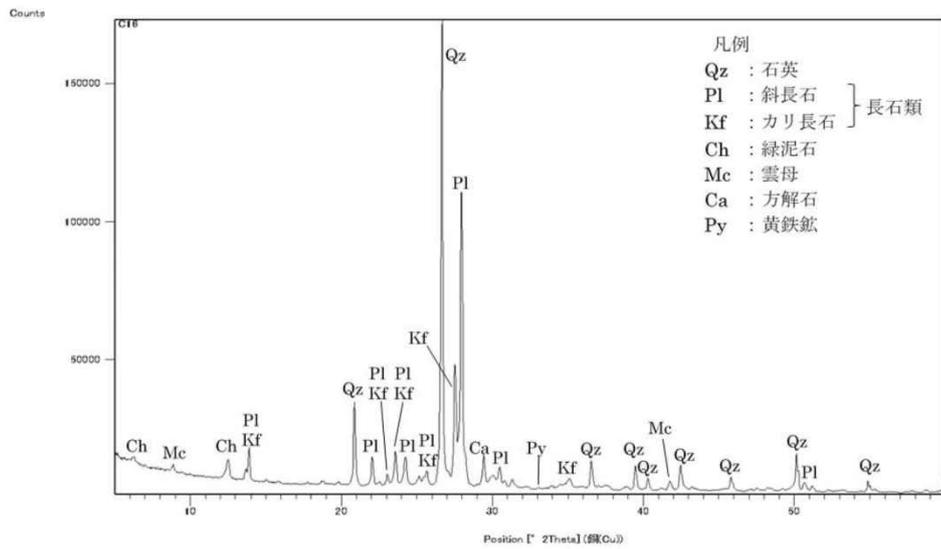


図 3. 2. 3-39 粉末X線回折試験結果 (C16 : 砂岩)

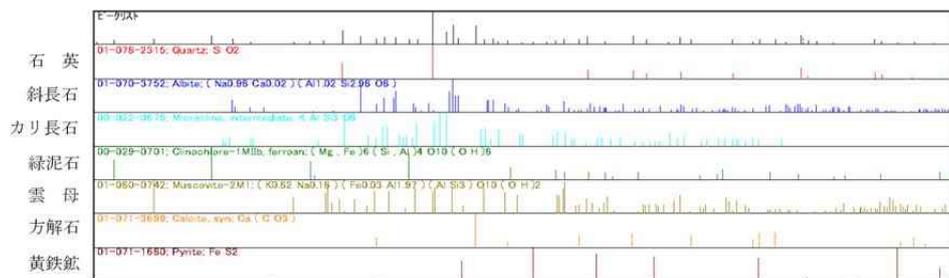
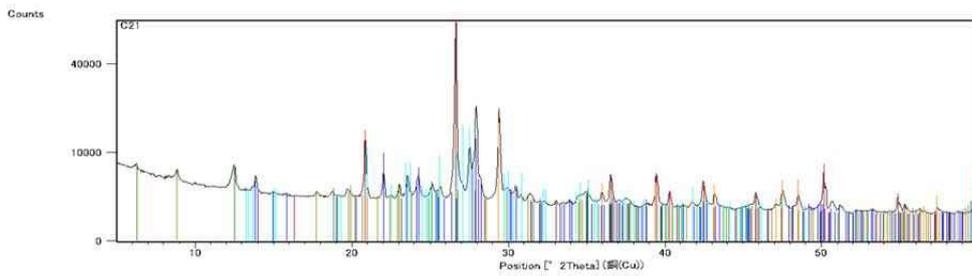
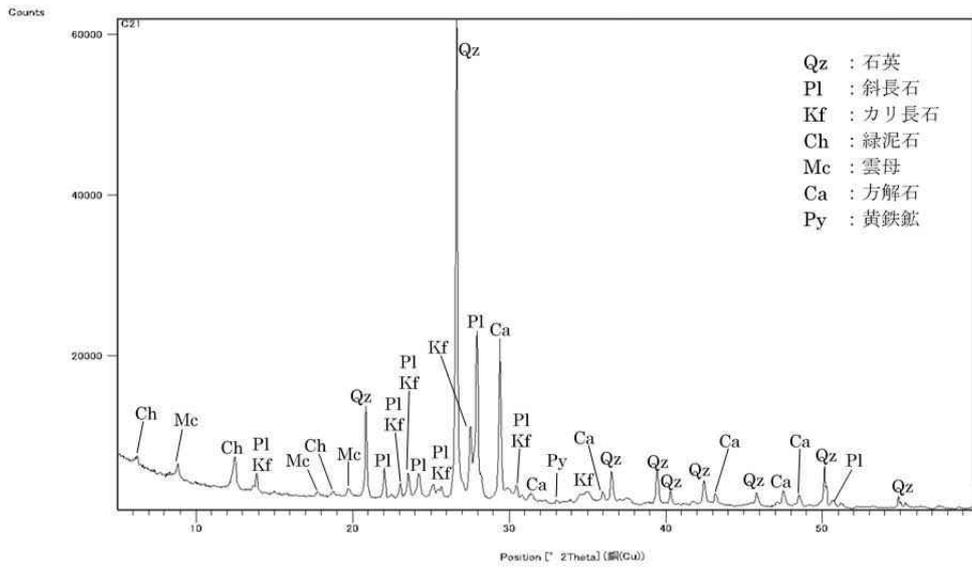
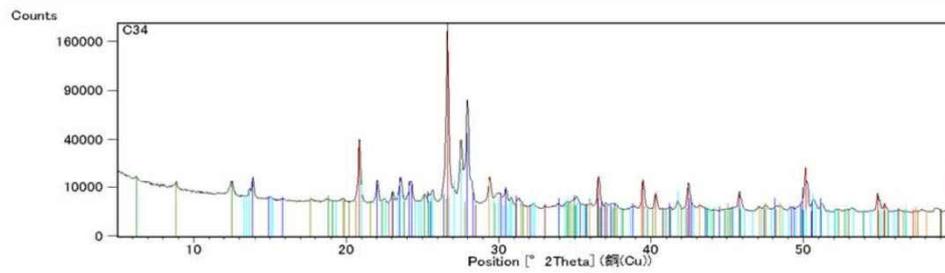
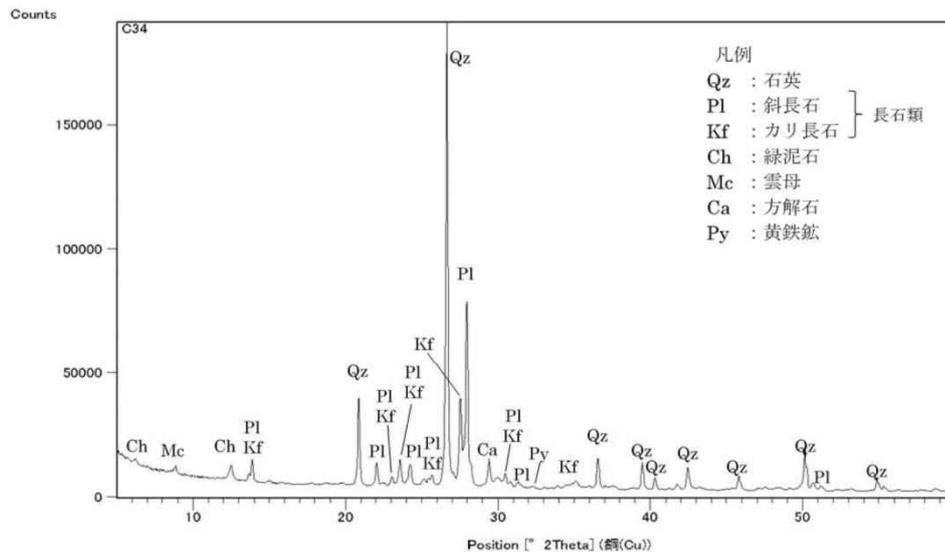


図 3. 2. 3-40 粉末X線回折試験結果 (C21 : 砂岩)



E-リスト	
石英	01-078-1910: Quartz, syn: Si O <sub>2</sub>
長石類	00-009-0466: Albite, ordered: Na Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
	00-019-0932: Microcline, intermediate: K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
斜長石	00-029-0701: Clinoclone-1M1b, ferroan: ( Mg, Fe ) <sub>6</sub> ( Si, Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>8</sub>
カリ長石	00-007-0032: Muscovite 2M, syn: K Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> Al O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>
緑泥石	
雲母	
方解石	01-071-3699: Calcite, syn: Ca ( C O <sub>3</sub> )
黄鉄鉱	01-071-4470: Pyrite, syn: Fe S <sub>2</sub>

図 3. 2. 3-41 粉末X線回折試験結果 (C34 : 砂岩)



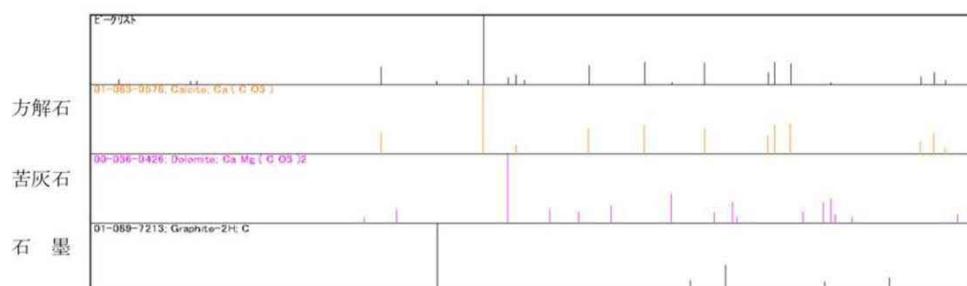
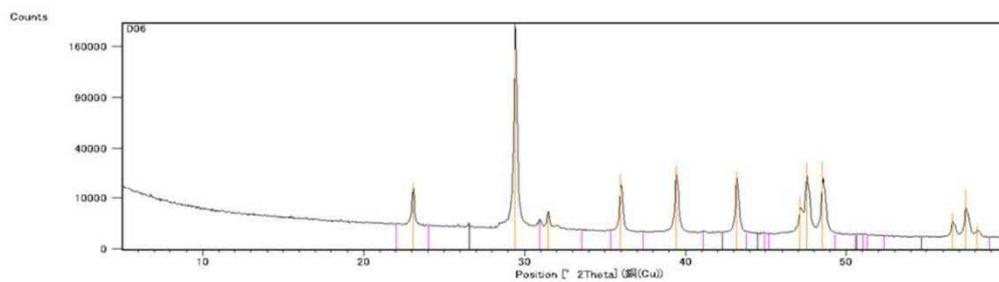
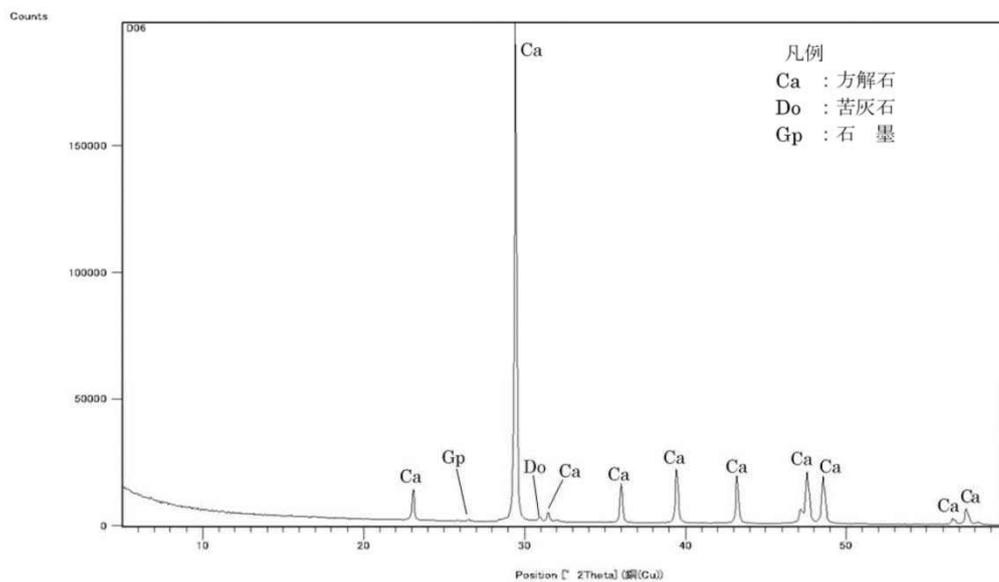


图 3. 2. 3-43 粉末 X 线回折试验结果 (D06 : 石灰石)

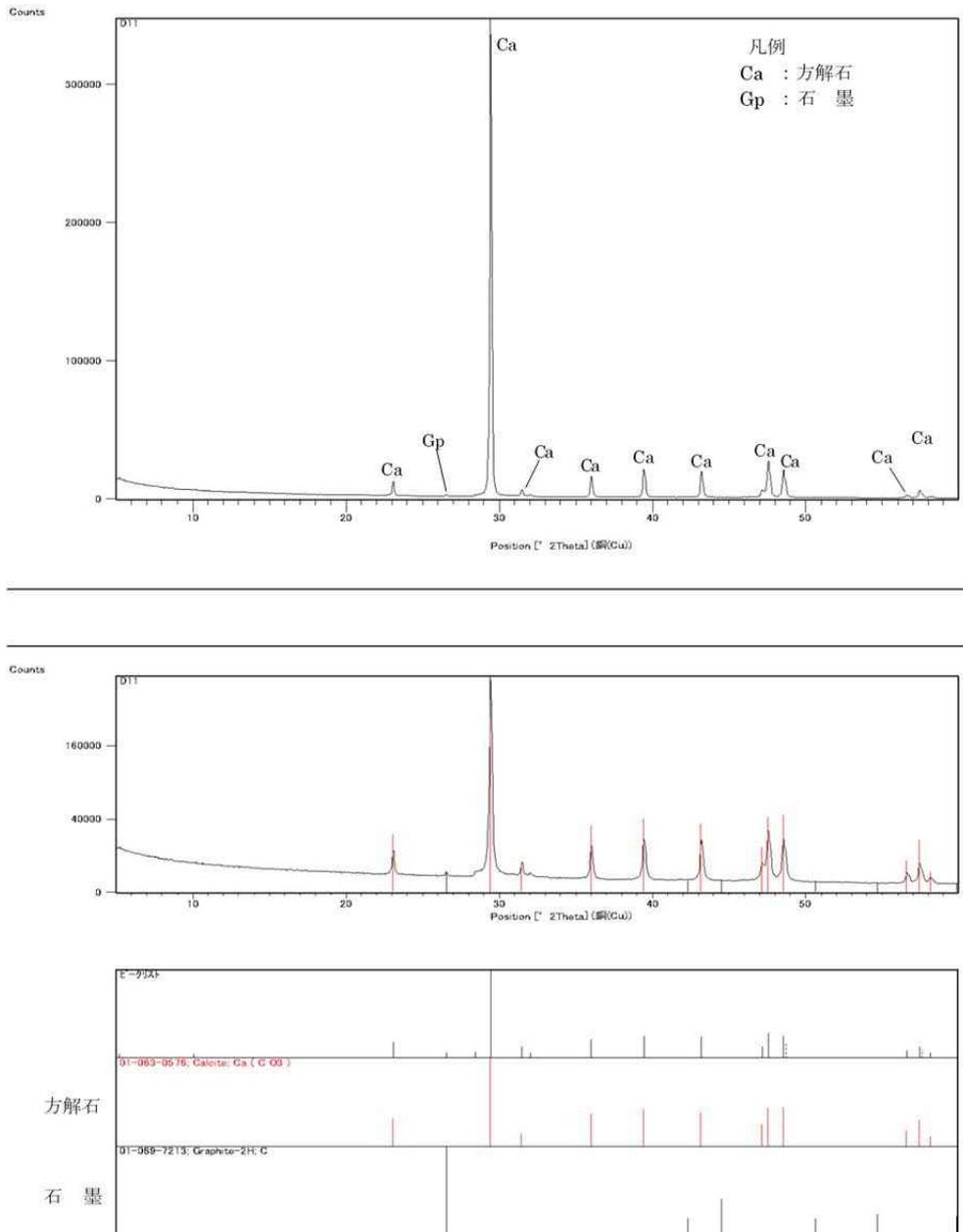


図 3. 2. 3-44 粉末X線回折試験結果 (D11 : 石灰石)

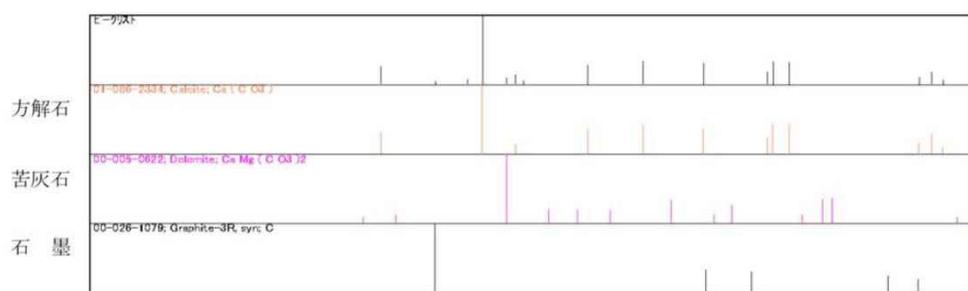
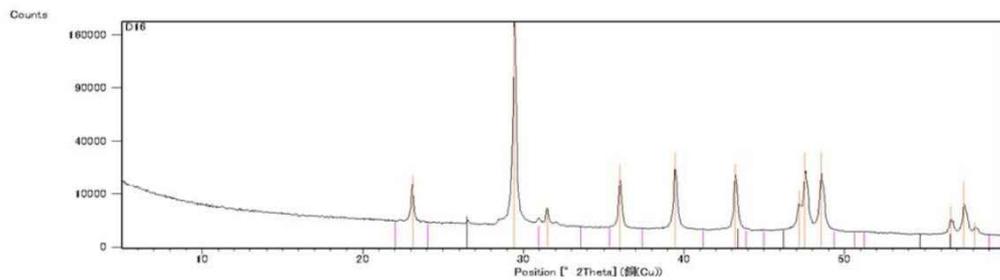
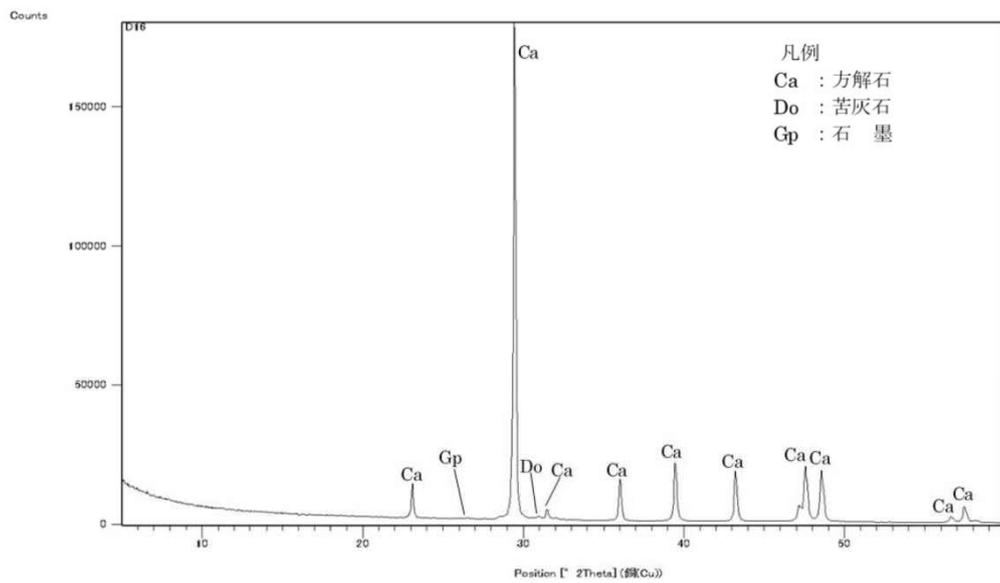


图 3. 2. 3-45 粉末X線回折試驗結果 (D16 : 石灰石)

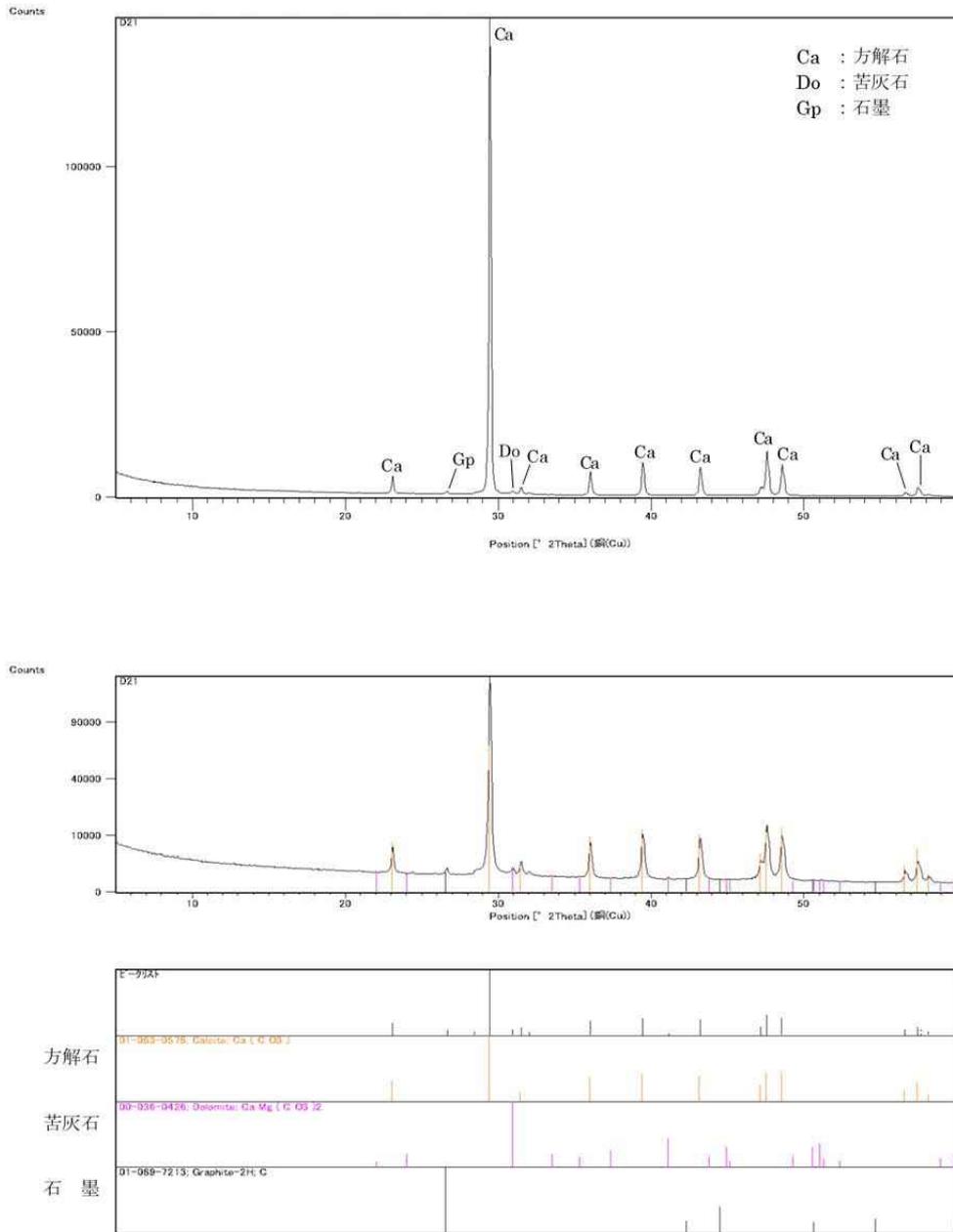


図 3. 2. 3-46 粉末X線回折試験結果 (D21 : 石灰石)

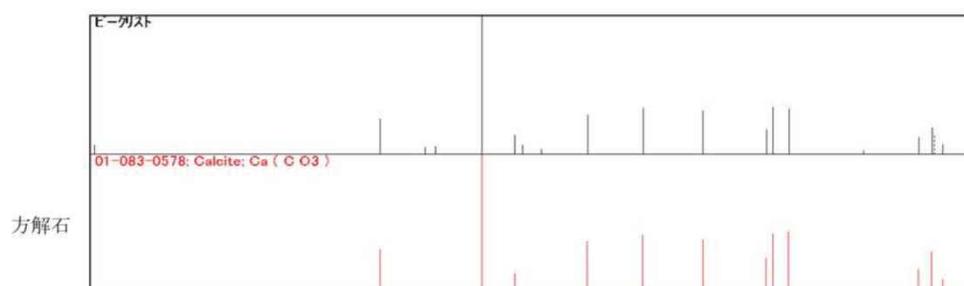
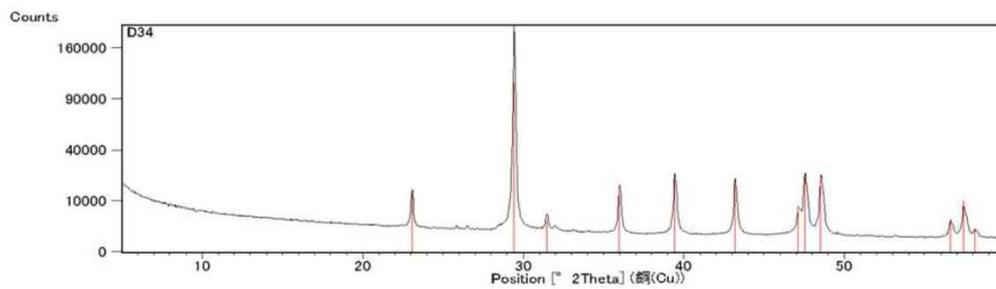
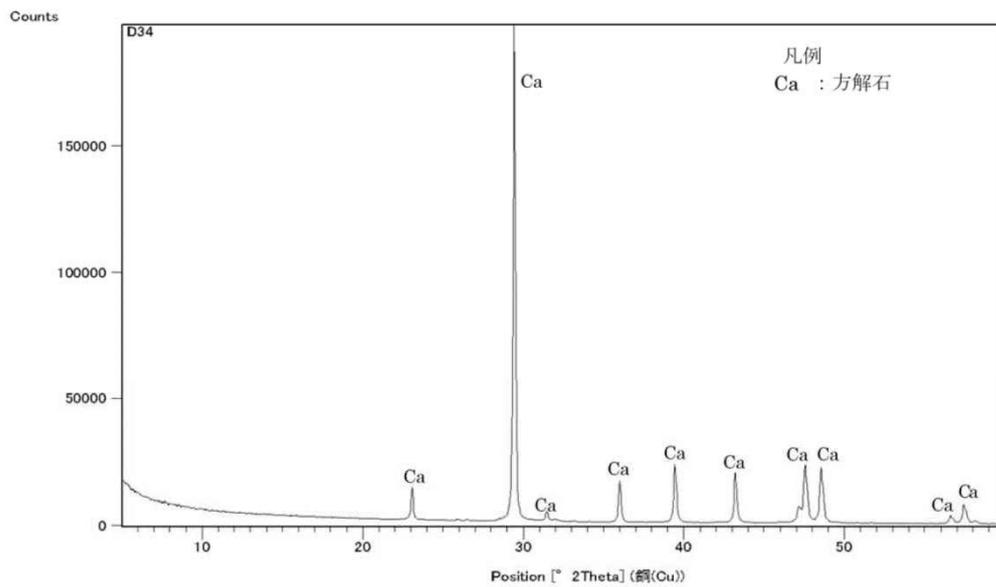


図 3. 2. 3-47 粉末X線回折試験結果 (D34 : 石灰石)

### 3.2.4 まとめ

#### (1) コンクリートのガンマ線影響評価

ガンマ線照射後のコンクリートの強度は、既往の研究報告とは異なり増大した。骨材はガンマ線により若干膨張するが、それによる強度低下は顕著でなく、むしろ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。

今後は、ガンマ線照射サンプルと同等の質量減少率時のコンクリート強度を取得したり、モルタルの熱影響データを取得して、強度増大メカニズムについてさらに詳細な裏付けを得ることが必要となる。

#### (2) セメントペーストのガンマ線影響評価

$^{60}\text{Co}$  によるガンマ線を 8~10kGy/h の線量率で 50,000 kGy 照射し、曲げ試験を実施した結果、ガンマ線の照射によってペーストの強度が増大する可能性が示された。これらは、既往の研究報告と傾向が異なっている。

今後は、中性化の影響および乾燥の影響について評価するとともに、詳細な化学分析を実施し、強度増大につながる化学的変質について明らかにする必要がある。

#### (3) 骨材のガンマ線影響評価

骨材の収縮、ヤング率、強度へのガンマ線の影響を確認したが、現在までに得られた範囲で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。

### <補足>

ガンマ線照射試験を終えた累積照射量が  $2.5 \times 10^4$ 、 $5 \times 10^4$ 、 $1.0 \times 10^5$  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 3.2.1-34）

##### 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、その傾向はガンマ線の方がやや大きかった（図 3.2.1-41）。ガンマ線発熱および加熱試験の熱影響により乾燥したことで強度が増加したことが考えられるが、ガンマ線の影響を受けた

方の試験体でより強度上昇が大きくなるメカニズムは不明である。

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 3.2.1-38)。乾燥が進み密度が減少したことで、静弾性係数が低下したことが考えられる。また累積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

累積照射量および線量率が大きいくほど自由水率の減少が大きくなる傾向が見られた (図 3.2.1-39)。

e) 結合水率

照射の有無、累積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 3.2.1-40)。

以上より、ガンマ線によるコンクリートの物理特性変化の主要因は、ガンマ発熱による温度や放射線分解による水分の逸散と推定される。しかし、ガンマ線の影響による強度上昇のメカニズムは不明である。

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 3.2.1-3~図 3.2.1-8)。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 3.2.3-17~図 3.2.3-20)。

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ため、ばらつきがより小さい範囲での分析としてビッカース硬さ試験を行ったが、依然ばらつきが大きかった。

上記の結果より、今後の課題は以下の 2 点である。

- ・ガンマ線によるコンクリート強度増大に関するメカニズムに不明な点が残っているので、まずはセメントペースト部分についての分析 (NMR、FE-SEM 観察、TEM 観察、水蒸気吸着等温線、TG-DTA など) を網羅的に行い、セメントペーストのガンマ線特有の変質を探す必要がある。

- コンクリート試験体の結合率試験（質量差分による方法）結果の妥当性を検証するため、別の方法による同試験（水分を捕集する方法）を実施する予定である。
- 骨材試験体の乾燥影響について、圧縮強度試験やビッカース硬さ試験では、依然ばらつきが大きく、乾燥影響は明確に分からなかった。別の指標によりガンマ線が骨材の物理特性に及ぼす影響について検討する必要がある。

### 3.3 コンクリートおよび構成要素の中性子影響評価

#### 3.3.1 照射試験の実施状況

##### (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 3.3.1-1 に示す 2 種類の中性子照射試験を行う。



図 3.3.1-1 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。

表 3.3.1-1 に相互作用試験の試験ケースを示す。図 3.3.1-2 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 3.3.1-1 相互作用試験ケース

試験 ID	水分条件	中性子束	温度
IT-A1	75℃乾燥	一定	一定
IT-A2	120℃乾燥		
IT-A3	封緘		
IT-A4	封緘		

照射期間は、約 2 ヶ月とする。



図 3.3.1-2 相互作用試験キャプセル内部の試験体の設置

表 3.3.1-2 に物理特性試験の試験ケースを示す。図 3.3.1-3 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 3.3.1-3 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 3.3.1-2 物理特性試験ケース

試験 ID	水分条件	中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> )	温度
PPT-B	封緘	$0.75 \times 10^{19}$	一定
PPT-C		$1.5 \times 10^{19}$	
PPT-D		$3.0 \times 10^{19}$	
PPT-E		$6.0 \times 10^{19}$	

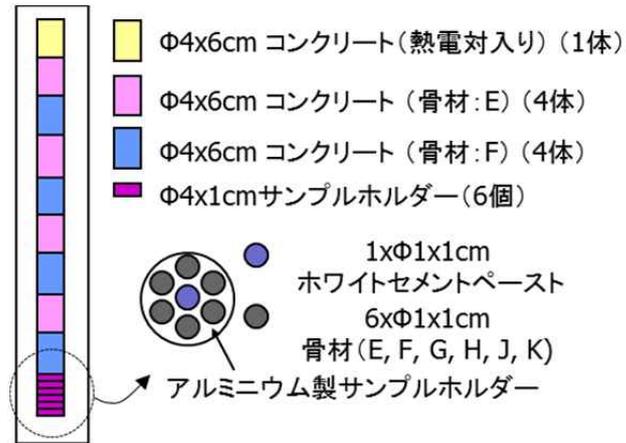


図 3.3.1- 3 物理特性試験キャプセル内部の試験体の設置状況

表 3.3.1- 3 非照射・加熱試験ケース

試験ID	キャプセル#	対応する照射試験	加熱期間	温度
H1-3	IFA-757	PPT-B	約2ヶ月	コンクリート 中央最高温度
H1-6		PPT-C	約5ヶ月	
H1-12		PPT-D	約10ヶ月	
H2-24	IFA-756	PPT-E	約20ヶ月	
H3-3	IFA-755	PPT-B	約2ヶ月	コンクリート断面 内平均温度
H3-6		PPT-C	約5ヶ月	
H3-12		PPT-D	約10ヶ月	
H4-24	IFA-754	PPT-E	約20ヶ月	

水分条件：封緘

(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、粗骨材には凝灰岩碎石 (E) と砂利 (F) を用いた 2 種類の調合で、製作した。

表 3.3.1- 4 に使用材料を示す。表 3.3.1- 5 に最終調合を示す。

表 3.3.1- 4 使用材料

使用材料	記号	材料の詳細	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
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
細骨材	S	山砂、静岡県産	2.61
粗骨材	E	砂利、粒度5~13mm、静岡県産	2.64
	F	凝灰岩碎石、粒度5~13mm、愛知県産	2.66

表 3.3.1- 5 最終調合

調合番号	骨材の種類		W/C (%)	s/a (%)	単位量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				
	細骨材	粗骨材			W	C	S	E	F
WC55-P	—	—	50	—	611	1222	—	—	—
WC50-#1	山砂(S)	凝灰岩 碎石(F)	50	45	183	366	799	—	995
WC50-#2		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 3.3.1- 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、アルミパック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 3.3.1-7 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 3.3.1- 4 に照射後の加熱スケジュールを示す。

表 3.3.1- 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 <sub>2</sub> 環境	3週間
11	照射後物性試験(PIE)	23℃	30%RH	6時間

表 3.3.1- 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	川砂利	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
	碎石 (凝灰 岩)	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

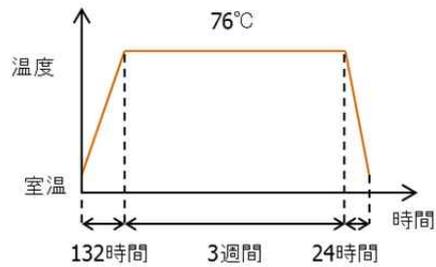


図 3.3.1- 4 照射後加熱スケジュール

### 3) 照射条件

図 3.3.1-5 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 3.3.1-6 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 3.3.1-7 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 3.3.1-8 に JEEP II の中性子束分布を示す。図 3.3.1-8 (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  $3.9 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>/s、外側高さ (高さ 45cm、105cm) では  $3.1 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>/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 3.3.1-8 (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  $3.7 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>/s、

外側高さ（高さ 60cm、90cm）では  $3.5 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>/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  $3.6 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>/s となっている。

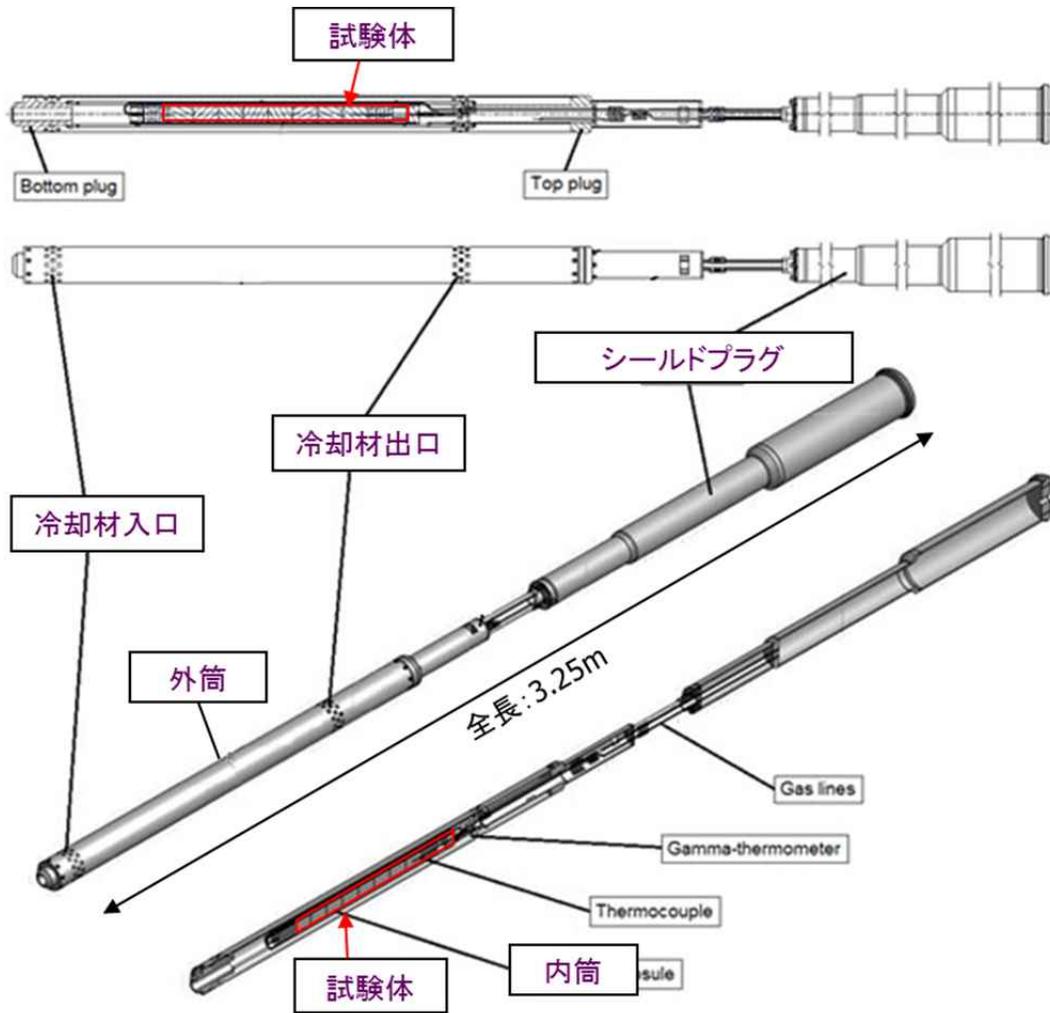


図 3.3.1-5 中性子照射試験用キャプセル

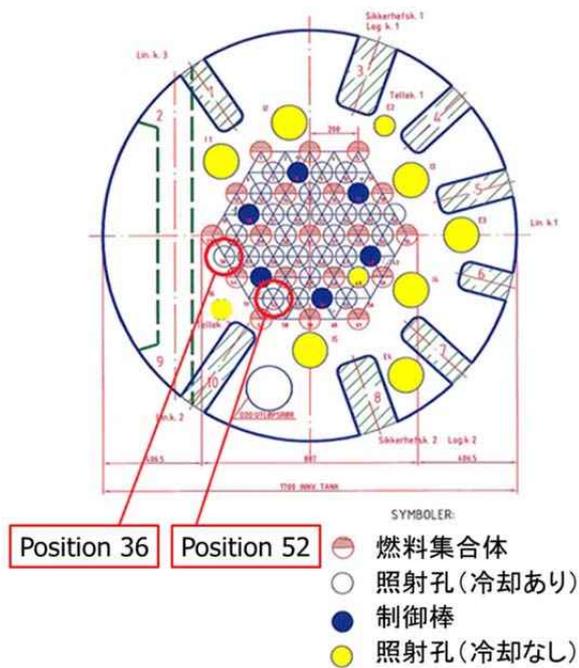


図 3. 3. 1- 6 JEEP II 原子炉水平断面

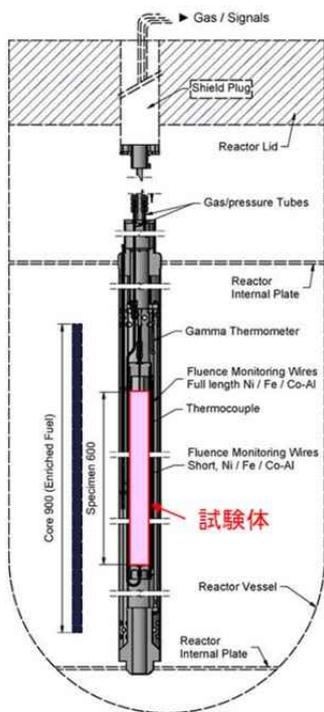
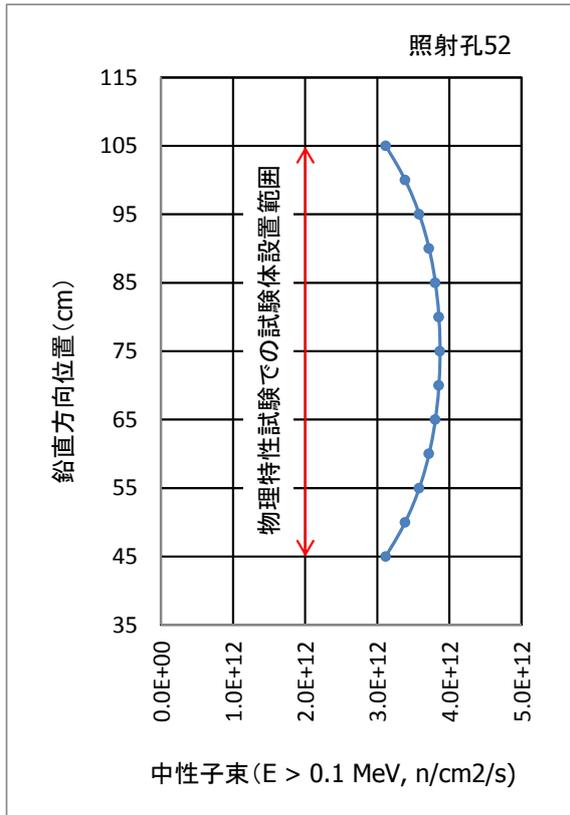
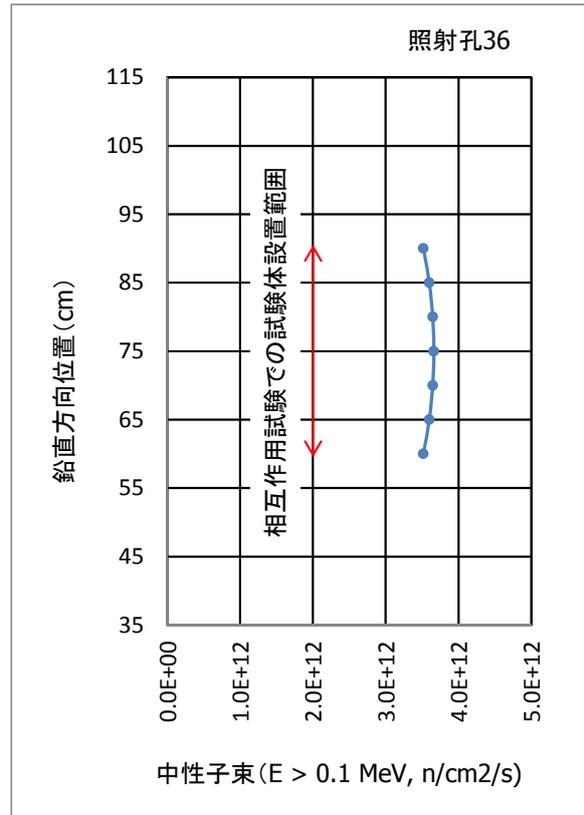


図 3. 3. 1- 7 JEEP II 原子炉鉛直断面 (物理特性試験を想定)



(a) 照射孔 52



(b) 照射孔 36

図 3.3.1-8 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 3.3.1-9～図 3.3.1-16 に示す。比較のために照射が完了している試験体についても照射状況を実績として示す。

- 図 3.3.1-9 中性子照射の状況（IT-A1(IFA-758)：照射孔 36)
- 図 3.3.1-10 中性子照射の状況（IT-A2(IFA-759)：照射孔 36)
- 図 3.3.1-11 中性子照射の状況（IT-A3(IFA-760)：照射孔 36)
- 図 3.3.1-12 中性子照射の状況（IT-A4(IFA-761)：照射孔 52)
- 図 3.3.1-13 中性子照射の状況（PPT-B(IFA-753)：照射孔 52)
- 図 3.3.1-14 中性子照射の状況（PPT-C(IFA-752)：照射孔 36)
- 図 3.3.1-15 中性子照射の状況（PPT-D(IFA-751)：照射孔 36)
- 図 3.3.1-16 中性子照射の状況（PPT-E(IFA-750)：照射孔 52)

表 3.3.1-8 に中性子照射状況をまとめて示す。表 3.3.1-9 に加熱試験状況をまとめて示す。

中性子束については、どの試験ケースでも  $3.60 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>/s と一定となっている。一方、ガンマ線線量率については、 $2.95 \sim 4.27 \times 10^2$  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 3.3.1-10 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、 $6.2 \times 10^{19}$ n/cm<sup>2</sup>、および  $2.0 \times 10^5$ 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  $4.4 \times 10^{10}$ n/cm<sup>2</sup>/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  $3.6 \times 10^{12}$ n/cm<sup>2</sup>/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  $3.0 \sim 4.3 \times 10^2$ 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。

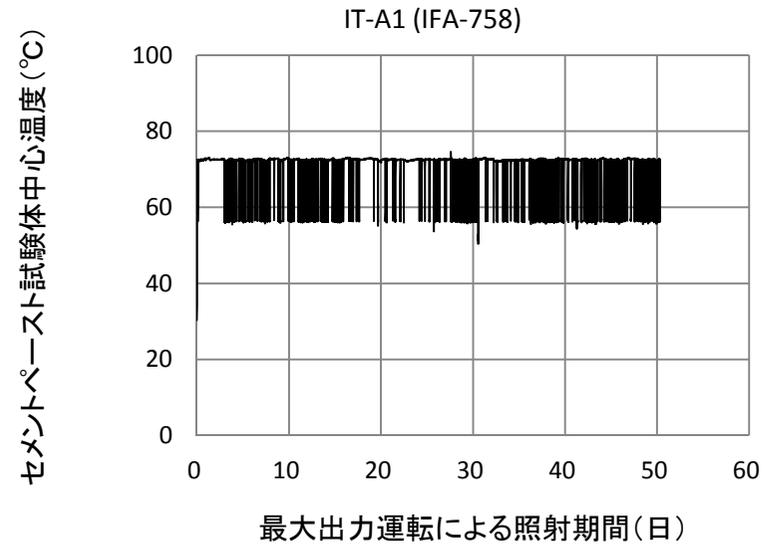
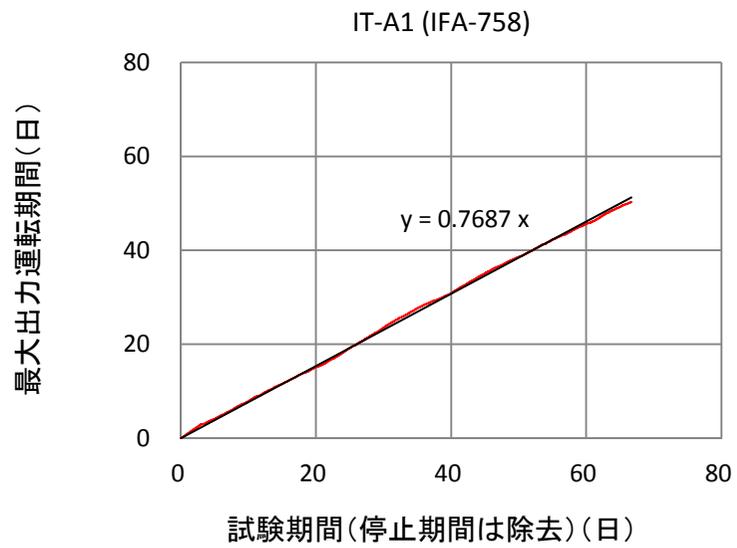
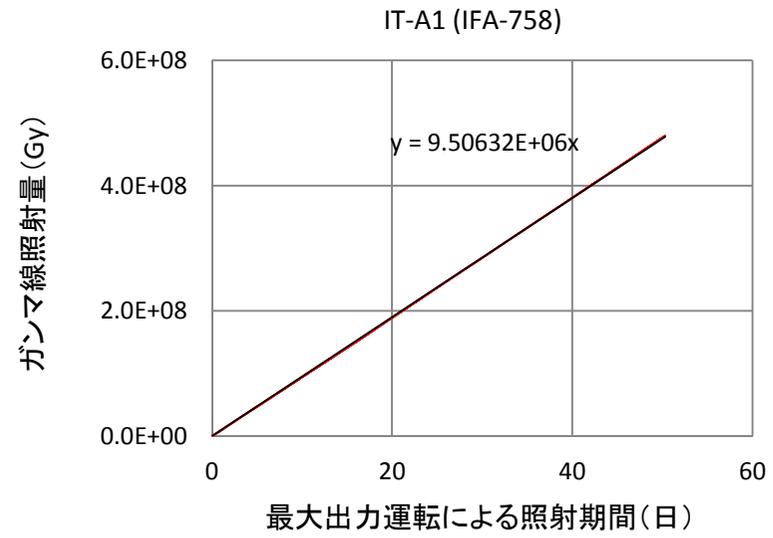
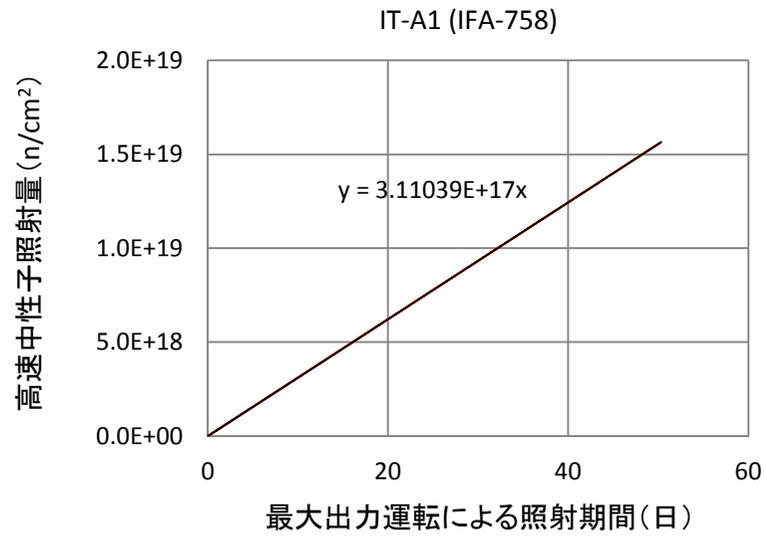


図 3.3.1- 9 中性子照射の状況 (IT-A1 (IFA-758) : 照射孔 36)

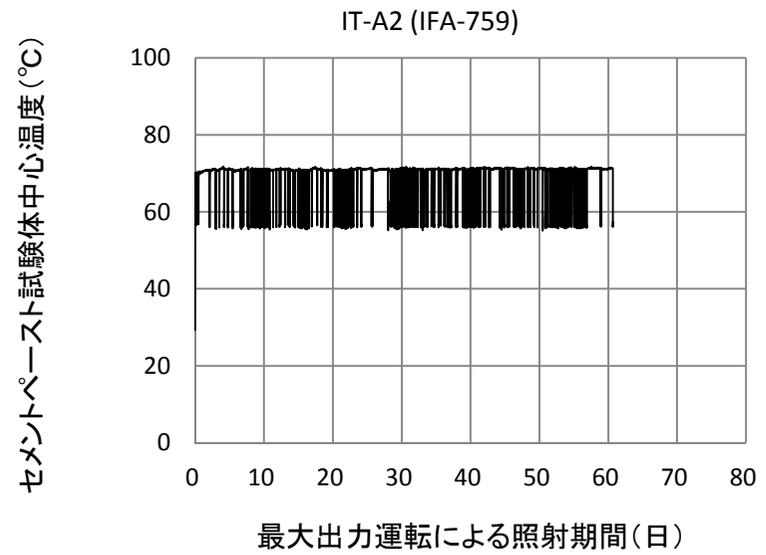
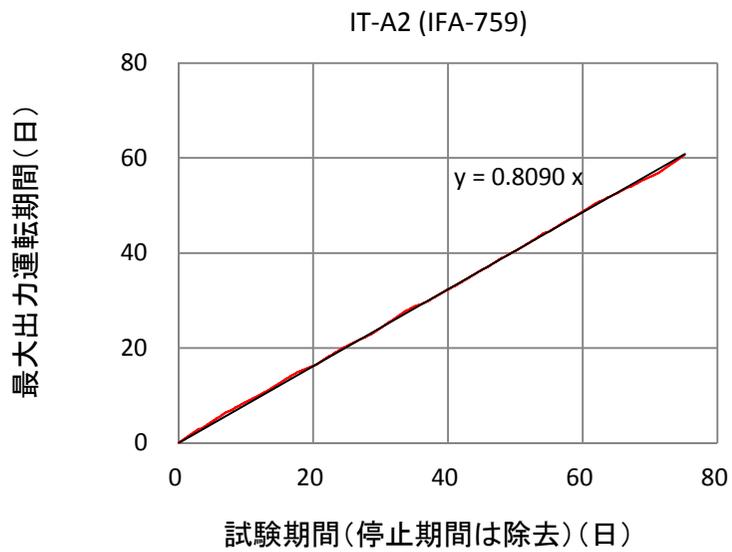
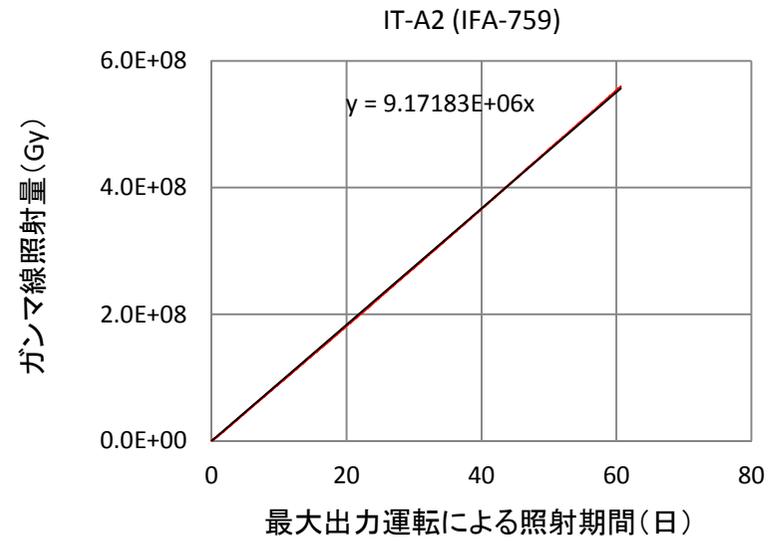
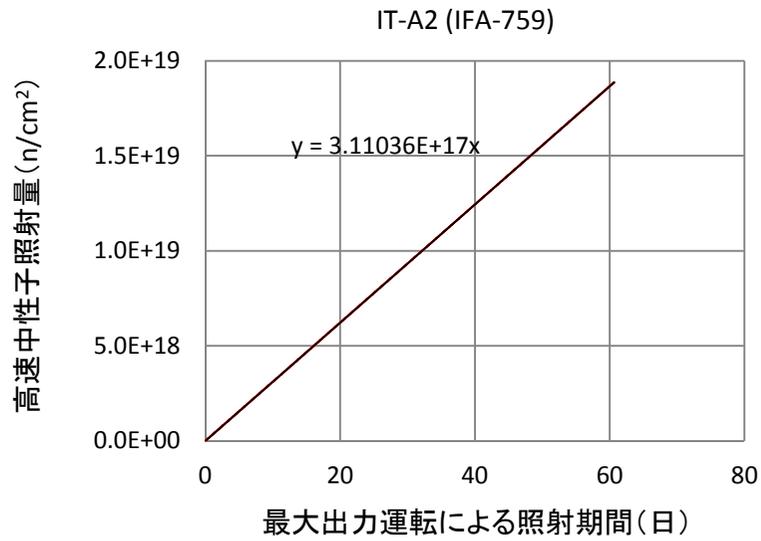


図 3.3.1- 10 中性子照射の状況 (IT-A2(IFA-759) : 照射孔 36)

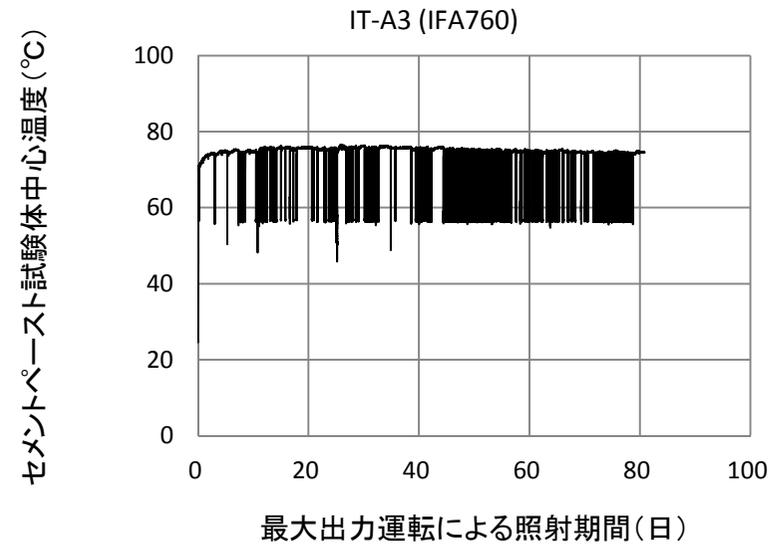
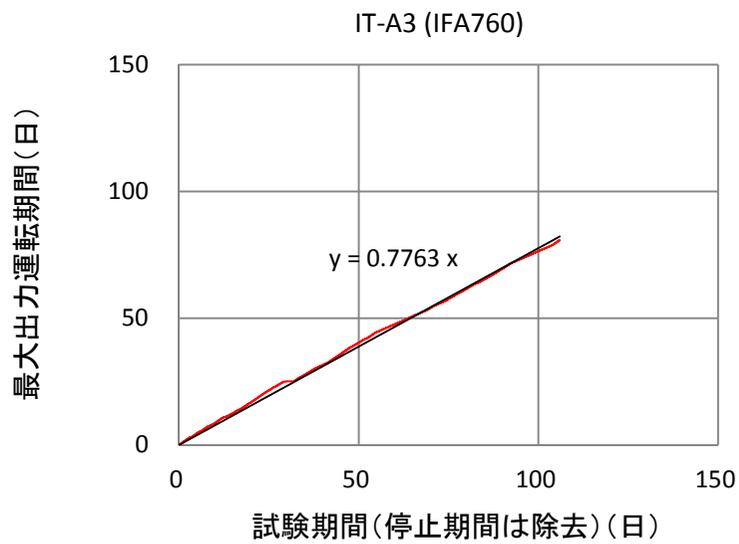
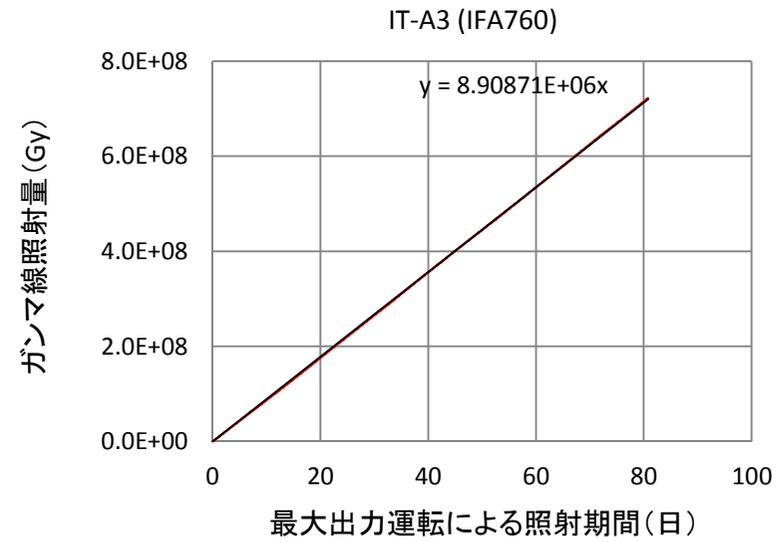
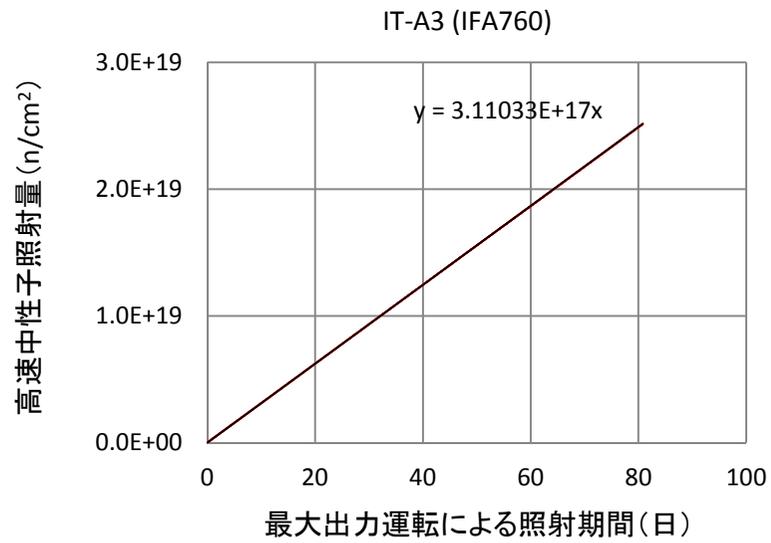


図 3.3.1- 11 中性子照射の状況 (IT-A3(IFA-760) : 照射孔 36)

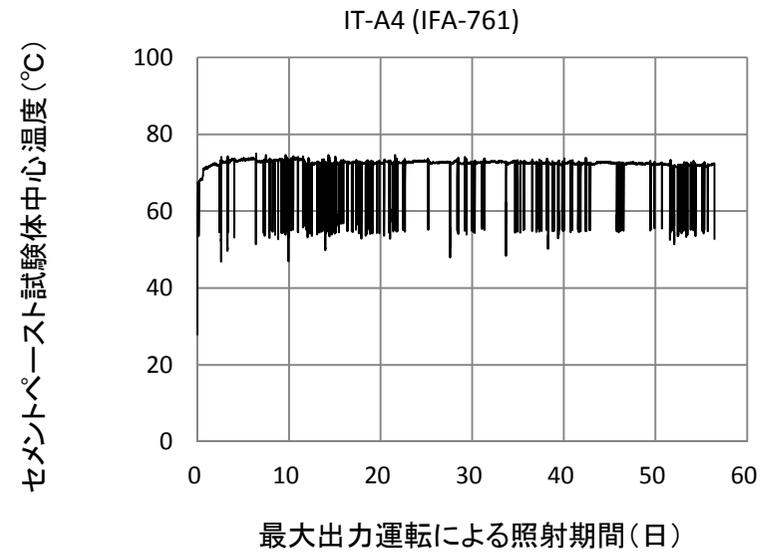
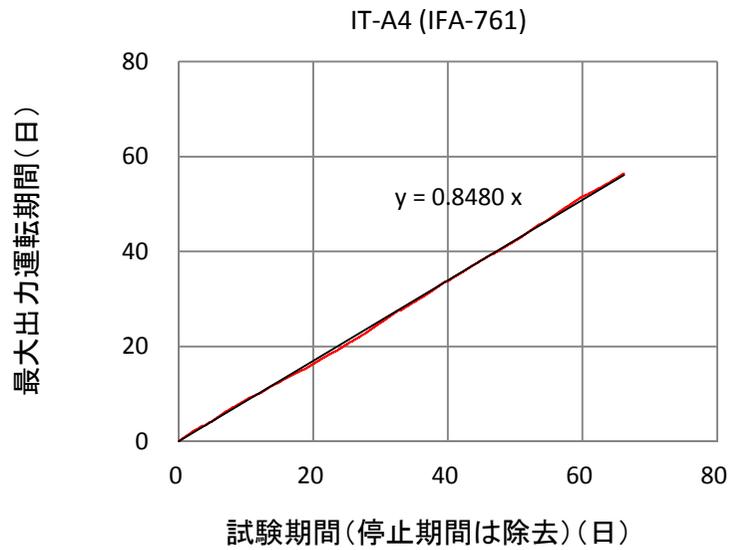
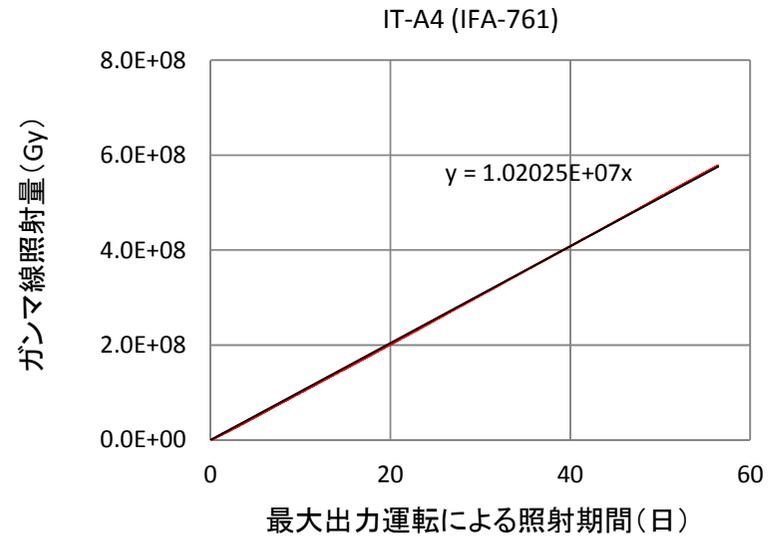
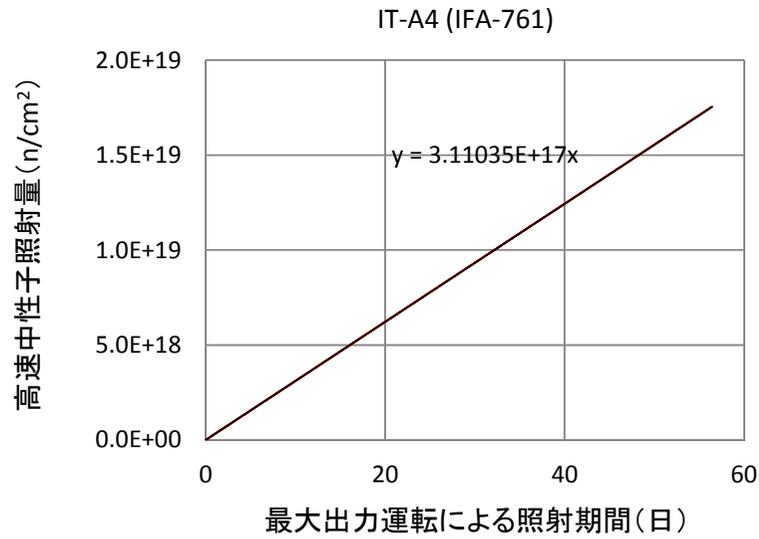


図 3.3.1- 12 中性子照射の状況 (IT-A4(IFA-761) : 照射孔 52)

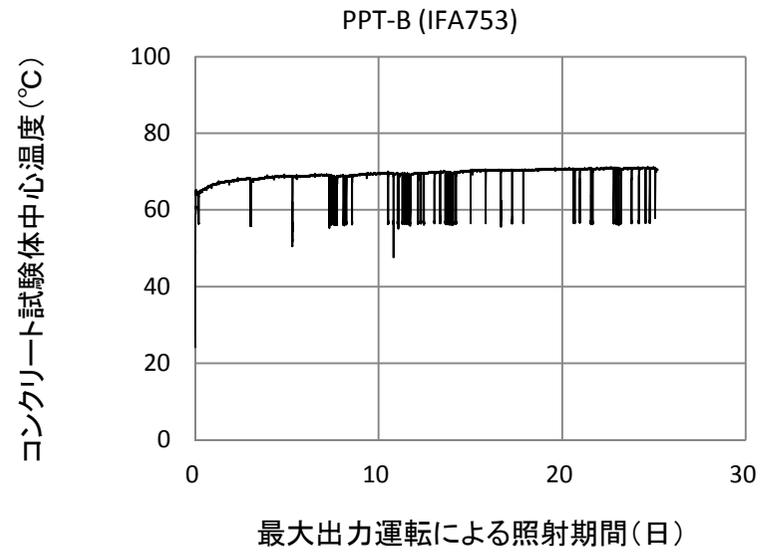
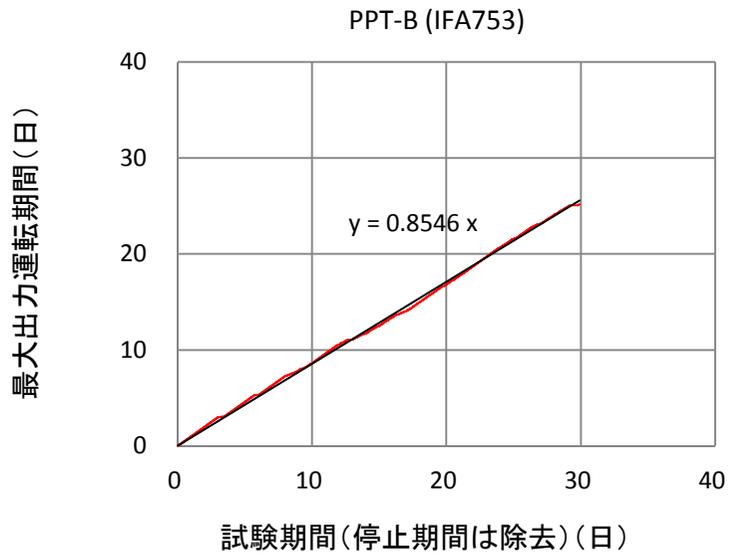
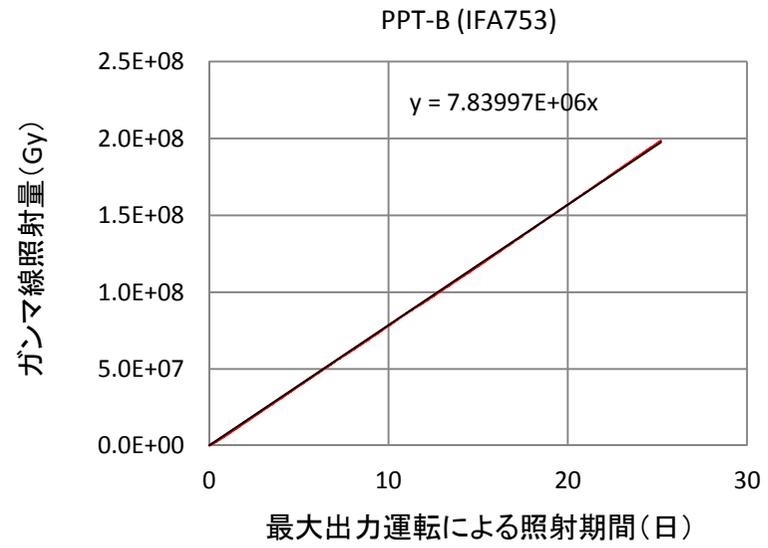
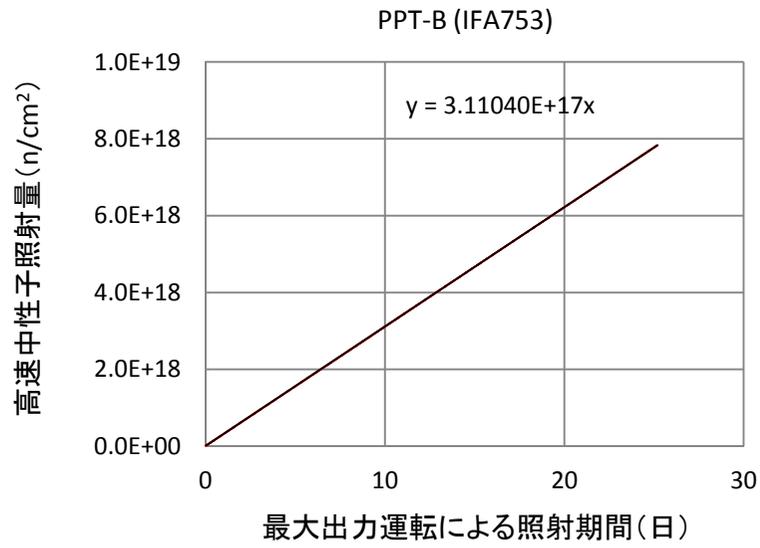


図 3.3.1- 13 中性子照射の状況 (PPT-B(IFA-753) : 照射孔 52)

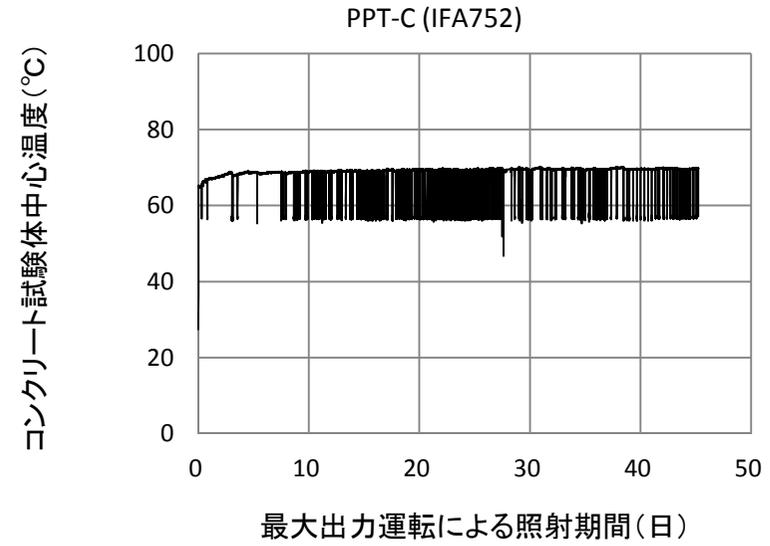
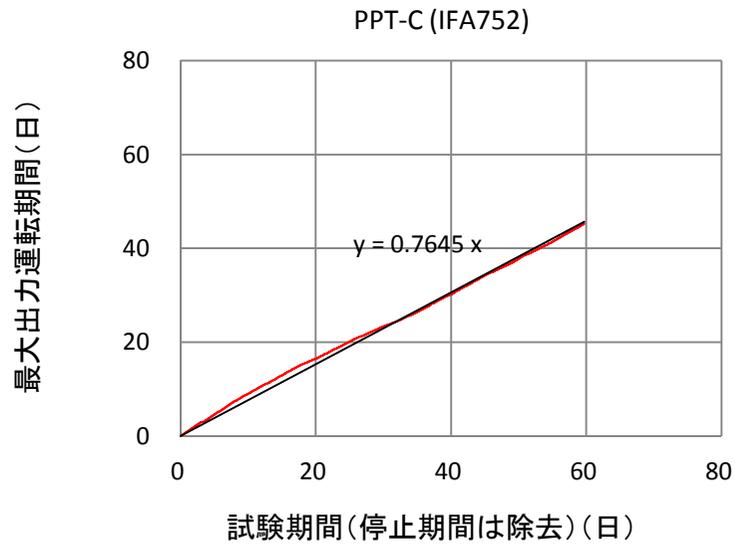
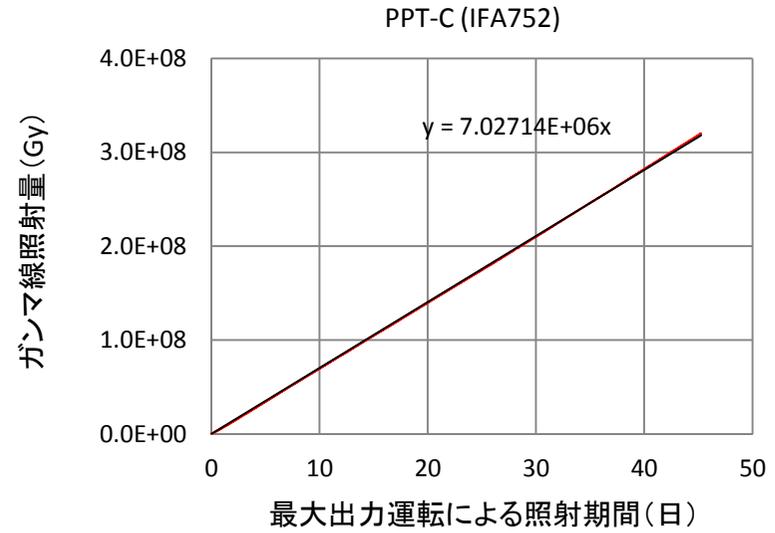
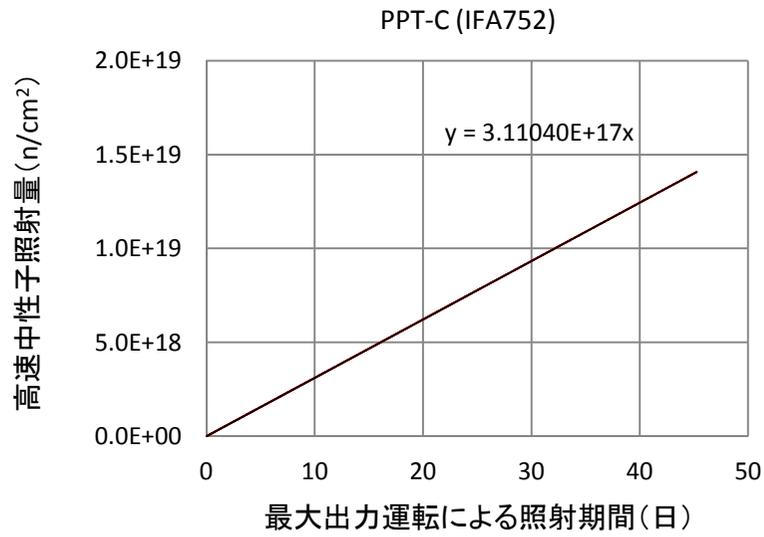


図 3.3.1- 14 中性子照射の状況 (PPT-C(IFA-752) : 照射孔 36)

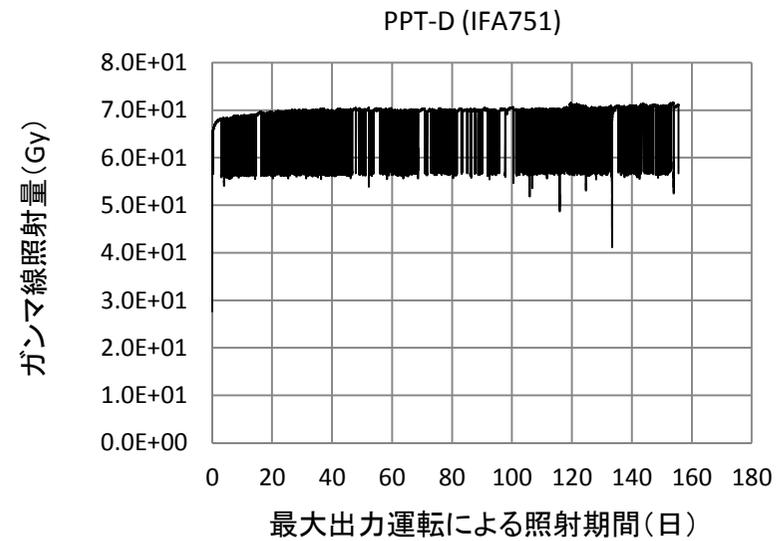
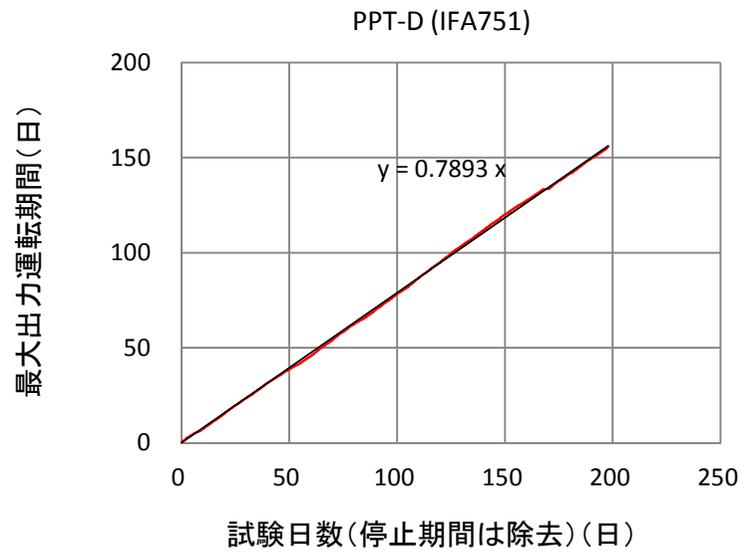
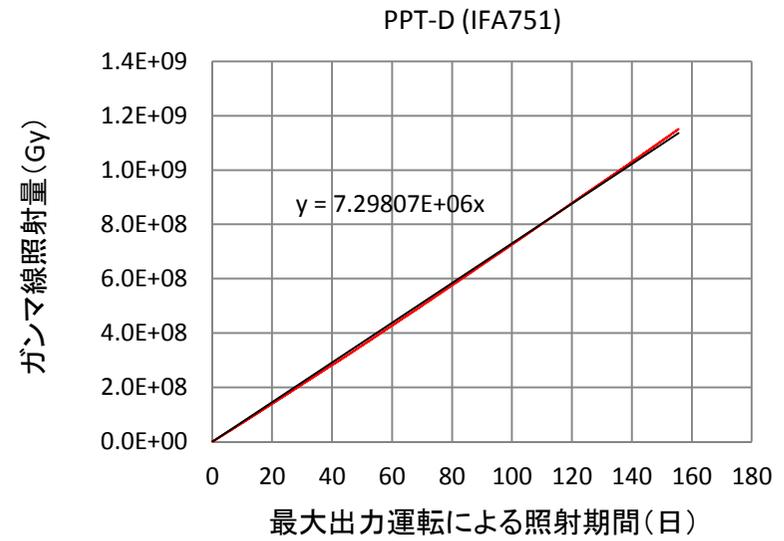
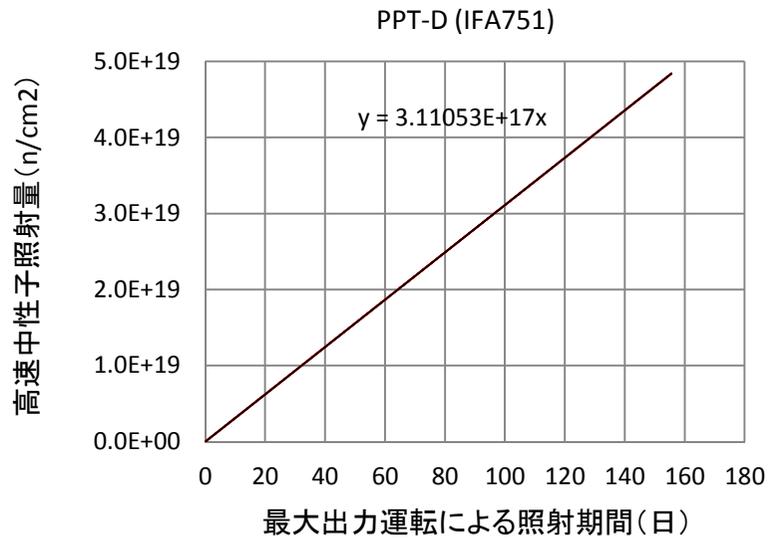


図 3.3.1- 15 中性子照射の状況 (PPT-D(IFA-751) : 照射孔 36)

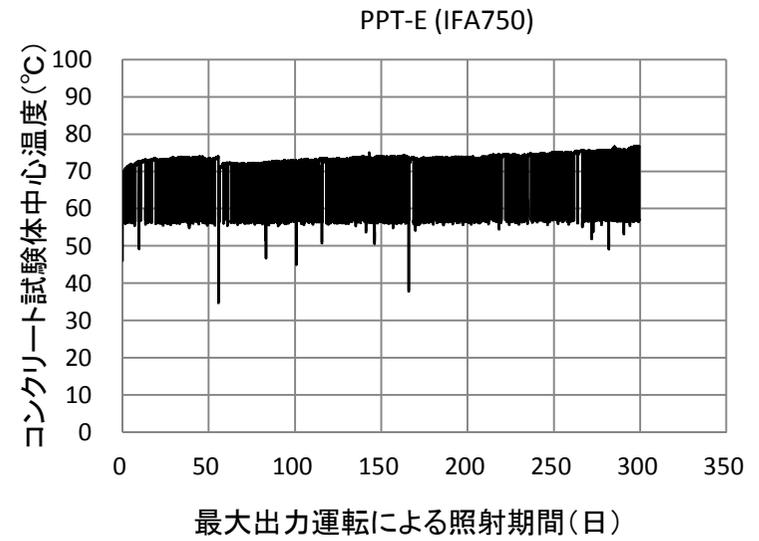
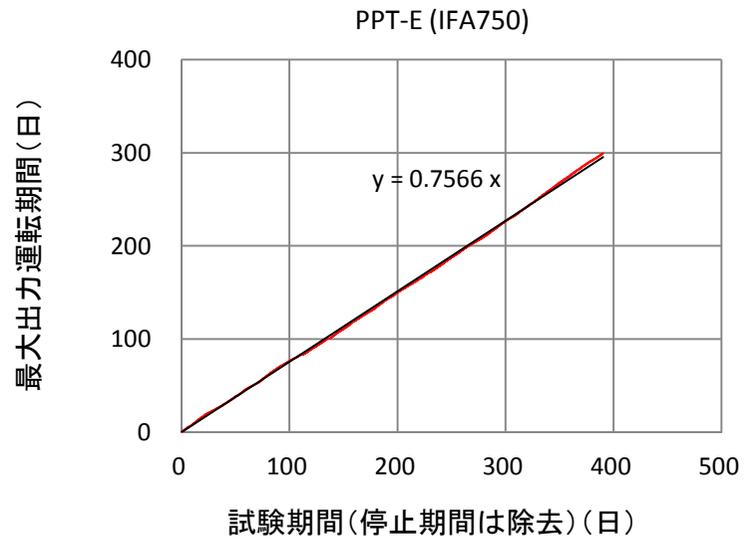
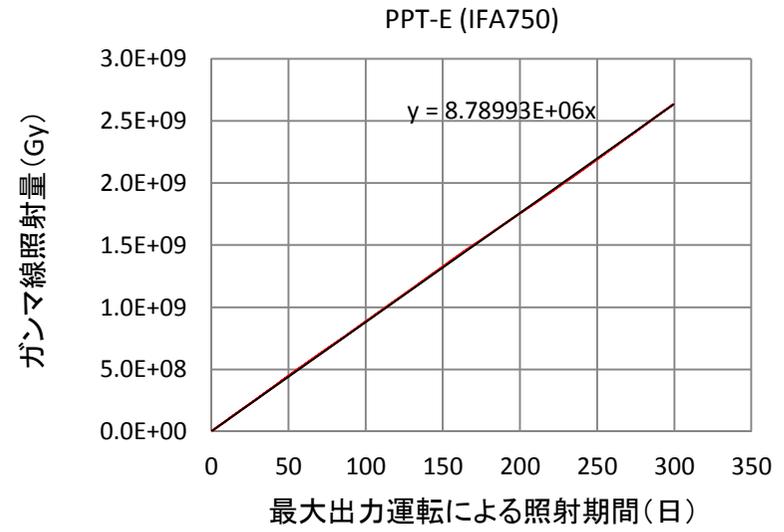
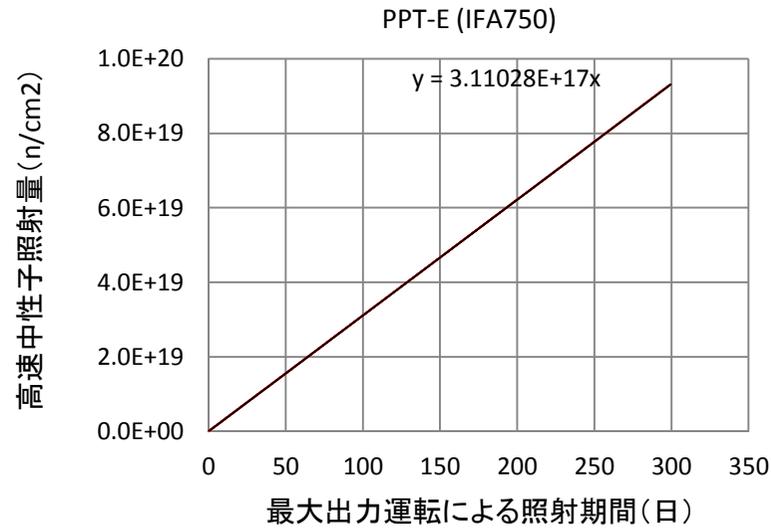


図 3.3.1- 16 中性子照射の状況 (PPT-E(IFA-750) : 照射孔 52)

表 3.3.1- 8 中性子照射状況のまとめ

試験名称	照射孔位置	試験状況	高速中性子(E≥0.1MeV)			ガンマ線		JEEP II 稼働率 (計画停止期間を除く)	全出力 換算日数	水分条件
			目標照射量	中性子束	累積照射量	線量率	累積照射量			
			(n/cm <sup>2</sup> )	(n/cm <sup>2</sup> /s)	(n/cm <sup>2</sup> )	(kGy/h)	(kGy)			
IT-A1(IFA-758)	#36	完了		3.60E+12	1.57E+19	3.97E+02	4.80E+05	0.769	50.3	75°C乾燥
IT-A2(IFA-759)	#36	完了		3.60E+12	1.89E+19	3.84E+02	5.59E+05	0.809	60.7	120°C乾燥
IT-A3(IFA-760)	#36	完了		3.60E+12	2.51E+19	3.73E+02	7.23E+05	0.776	80.8	封緘養生
IT-A4(IFA-761)	#52	完了		3.60E+12	1.76E+19	4.27E+02	5.79E+05	0.848	56.4	封緘養生
PPT-B(IFA-753)	#52	完了	7.50E+18	3.60E+12	7.84E+18	3.29E+02	1.99E+05	0.855	25.2	封緘養生
PPT-C(IFA-752)	#36	完了	1.50E+19	3.60E+12	1.41E+19	2.95E+02	3.20E+05	0.765	45.3	
PPT-D(IFA-751)	#36	完了	3.00E+19	3.60E+12	4.84E+19	3.08E+02	1.15E+06	0.789	155.6	
PPT-E(IFA-750)	#52	完了	6.00E+19	3.60E+12	9.31E+19	3.67E+02	2.63E+06	0.757	299.4	

高速中性子累積照射量：計算により概略算定した値である。

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）

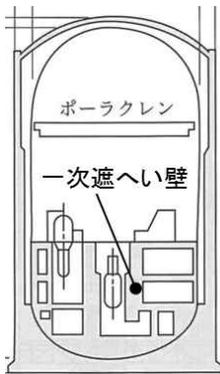
表 3.3.1- 9 加熱試験状況のまとめ

試験 ID	キャプセル#	対応する 照射試験	試験状況	温度
H1-3	IFA-757.1	PPT-B	加熱完了	コンクリート 中央最高温度
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	加熱完了	コンクリート 断面内平均温度
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 3.3.1- 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 <sup>2</sup> /s	4.4×10 <sup>10</sup>	3.60×10 <sup>12</sup> (82 倍)	
ガンマ線線量率	kGy/h	0.51	3.0×10 <sup>2</sup> ~4.3×10 <sup>2</sup> (590 倍~840 倍)	10 (20 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

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

\*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

### (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 3.3.1- 17 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。

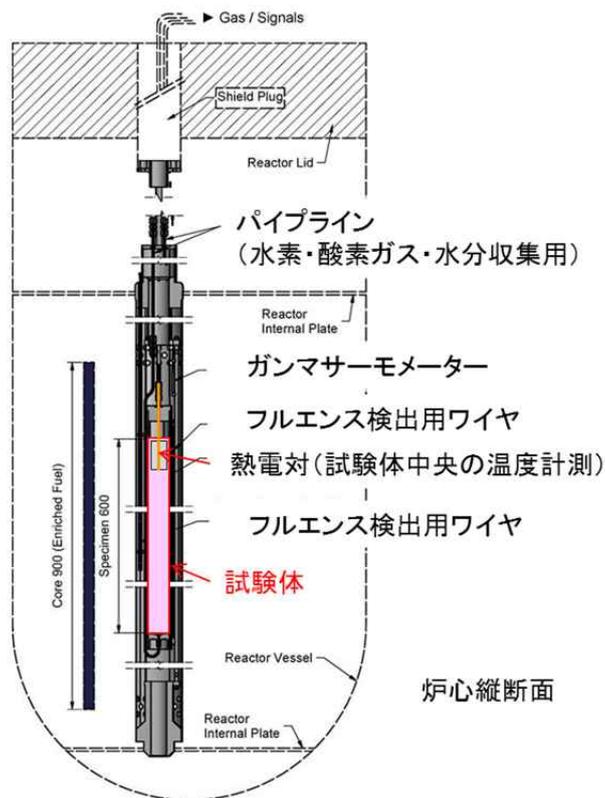


図 3.3.1- 17 照射試験中の計測位置

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 3.3.1- 18 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 3.3.1- 19 に改良後の水蒸気捕集システムを、図 3.3.1- 20 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。

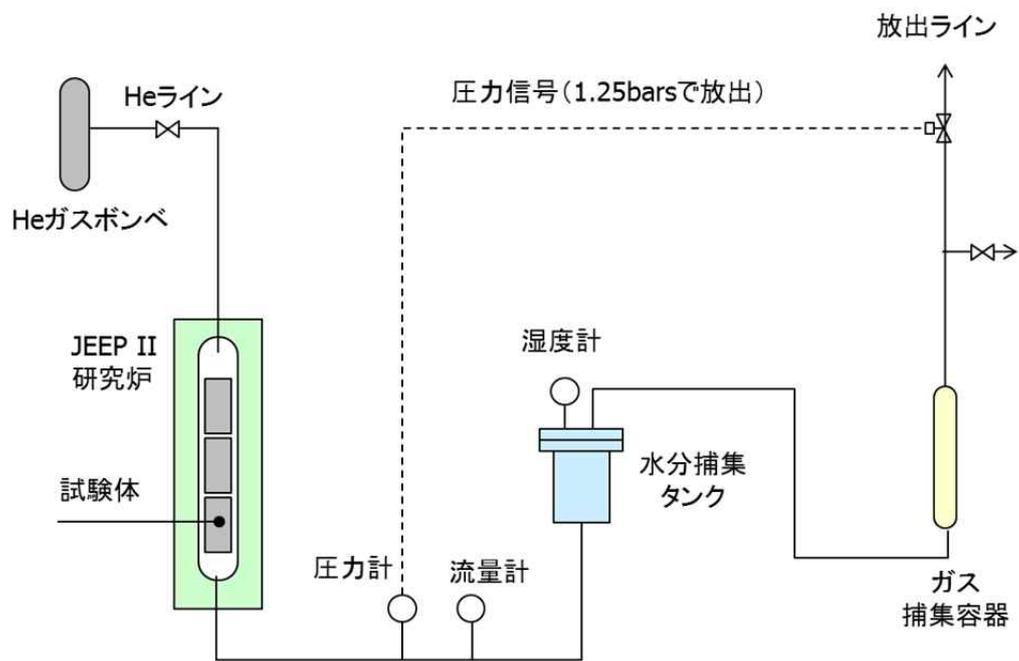


図 3.3.1- 18 初期の水蒸気捕集システム

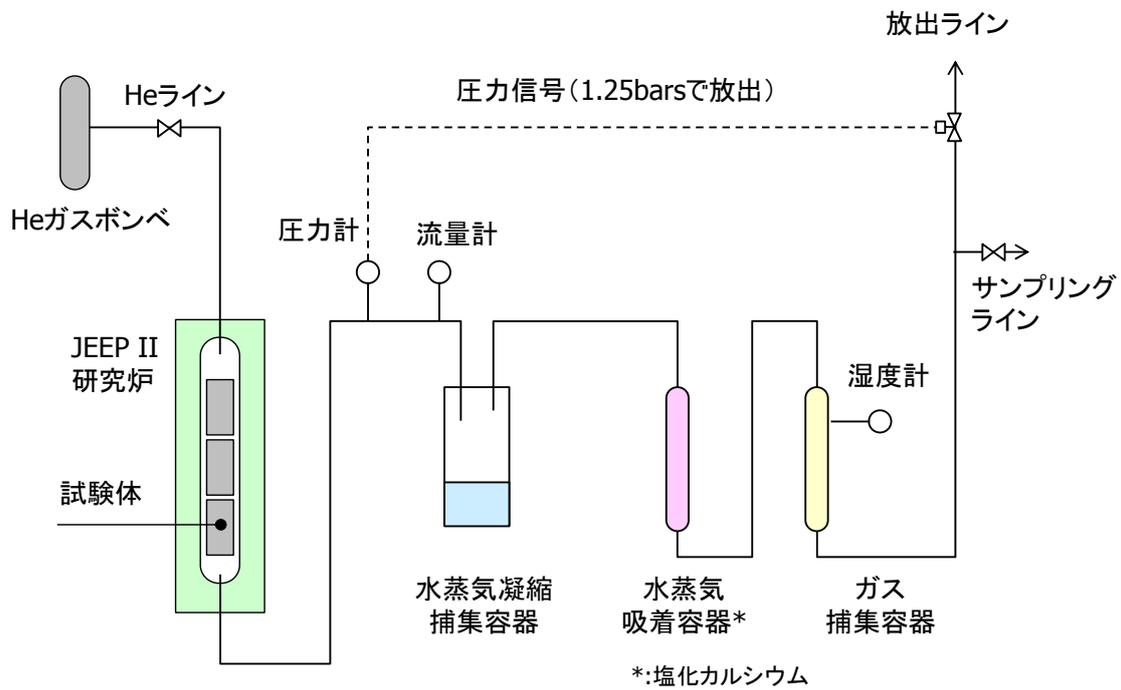


図 3.3.1- 19 改良後の水蒸気捕集システム



図 3.3.1- 20 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 3.3.1- 21 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。

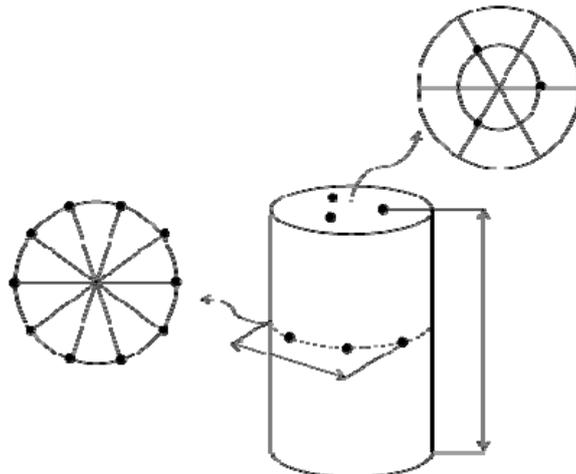


図 3.3.1- 21 寸法計測位置

### 3.3.2 相互作用試験 (IT : Interaction Test)

#### (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 3.3.2-1 に示す仮説を設定している。

表 3.3.2-1 中性子とセメントペースト/骨材の相互作用

	水分相	固体相
セメントペースト	<ul style="list-style-type: none"> <li>核反応や反跳原子によるエネルギー付与が及ぼす影響についてはガンマ線の場合と同じであると考えられるが、エネルギー付与密度の違いから、微視的なセメントペースト構造との相互作用により、同じ吸収線量の場合でも影響の程度がガンマ線と異なることが考えられる。(線質効果)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>セメントペーストは多孔質で疎な構造なので、中性子により原子が弾き出されても、ペースト内を簡単に移動でき、少々の体積膨張は吸収できると考えられるので、損傷を受け難い。</li> </ul>
骨材	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子は水分に影響を及ぼすと考えられるが、セメントペーストと比較すると水分量は少ないので、影響も小さいと考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>骨材中の共有結合に塑性ひずみが生じ、密度低下が生じる。場合によってはアモルファス化が生じる。</li> <li>この密度低下には、骨材の弾き出しの影響も無視できない。</li> <li>ガンマ線との重畳効果の可能性も無視できない。</li> <li>密度低下、すなわち体積膨張によってコンクリート中で周囲のモルタル相にひび割れを生じさせる可能性がある。</li> </ul>

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 3.3.2- 2 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  $\phi 4 \times 6$  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。

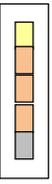
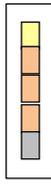
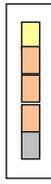
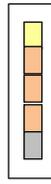
- |                   |   |
|-------------------|---|
| ・質量変化、寸法変化        | : 密度および体積の変化                            |
| ・強度               | : 機械的特性の変化                              |
| ・細孔径分布            | : 空隙構造の変化                               |
| ・自由水量、結合水量        | : 水の挙動の変化（中性子とガンマ線の影響の違い）               |
| ・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 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。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 3.3.2- 2 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 <sup>2</sup> /s	F1 n/cm <sup>2</sup> /s	F1 n/cm <sup>2</sup> /s	F1 n/cm <sup>2</sup> /s		
Temperature		Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere	Irradiation atmosphere		
Period (M)		2	2	2	2		
Moisture condition of specimens		dried at 120 degree	dried at 75 degree	Sealed	Sealed		
Specimen Arrangement		 <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: yellow; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 1xΦ4x6cm Cement paste (Thermo couple installed)</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: orange; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 3xΦ4x6cm Cement paste</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: grey; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 1xΦ4x6cm Dummy</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: yellow; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 1xΦ4x6cm Cement paste (Thermo couple installed)</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: orange; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 3xΦ4x6cm Cement paste</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: grey; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 1xΦ4x6cm Dummy</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: yellow; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 1xΦ4x6cm Cement paste (Thermo couple installed)</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: orange; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 3xΦ4x6cm Cement paste</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: grey; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 1xΦ4x6cm Dummy</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: yellow; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 1xΦ4x6cm Cement paste (Thermo couple installed)</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: orange; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 3xΦ4x6cm Cement paste</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: grey; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 1xΦ4x6cm Dummy</li> </ul>		
		Number of specimens					
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) 試験結果

### 1) 照射試験結果

#### (a) 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 3.3.2-1 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 3.3.2-2 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 3.3.2-3 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 3.3.2-4 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 3.3.2-5 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険があったので、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 3.3.2-6 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 3.3.2-7 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 3.3.2-8 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/cm<sup>2</sup>/s、ガンマ線量率は 397kGy/h であった。図 3.3.2-9 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.2-10 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 3.3.2-11 および図 3.3.2-12 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 3.3.2-13 および図 3.3.2-14 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 3.3.2-15 および図 3.3.2-16 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 3.3.2-17 および図 3.3.2-18 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 3.3.2-19 に、水分放出量の時間変化を示す。

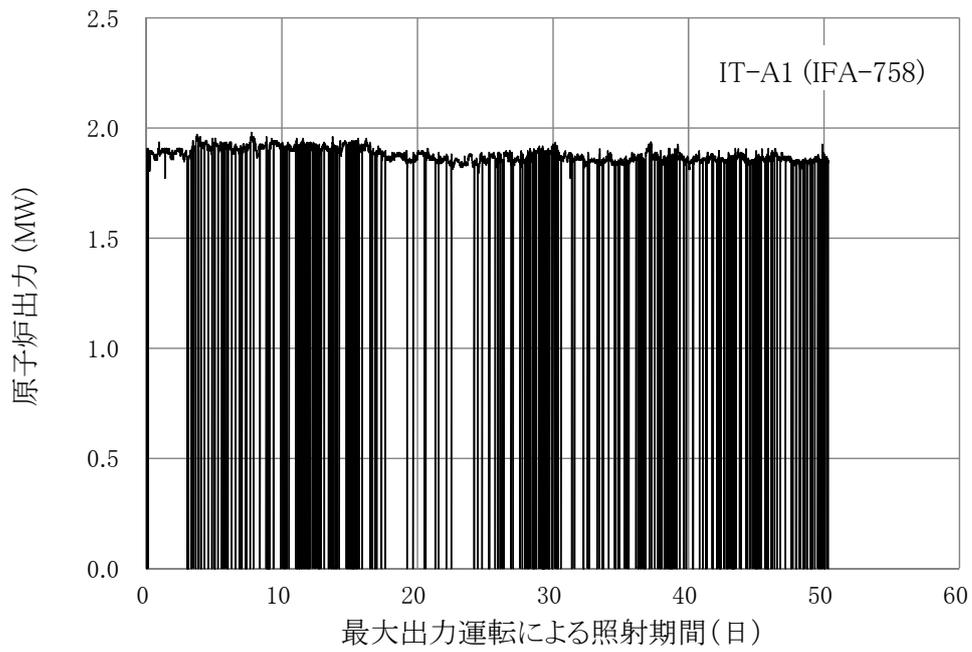


図 3.3.2- 1 原子炉出力の変化

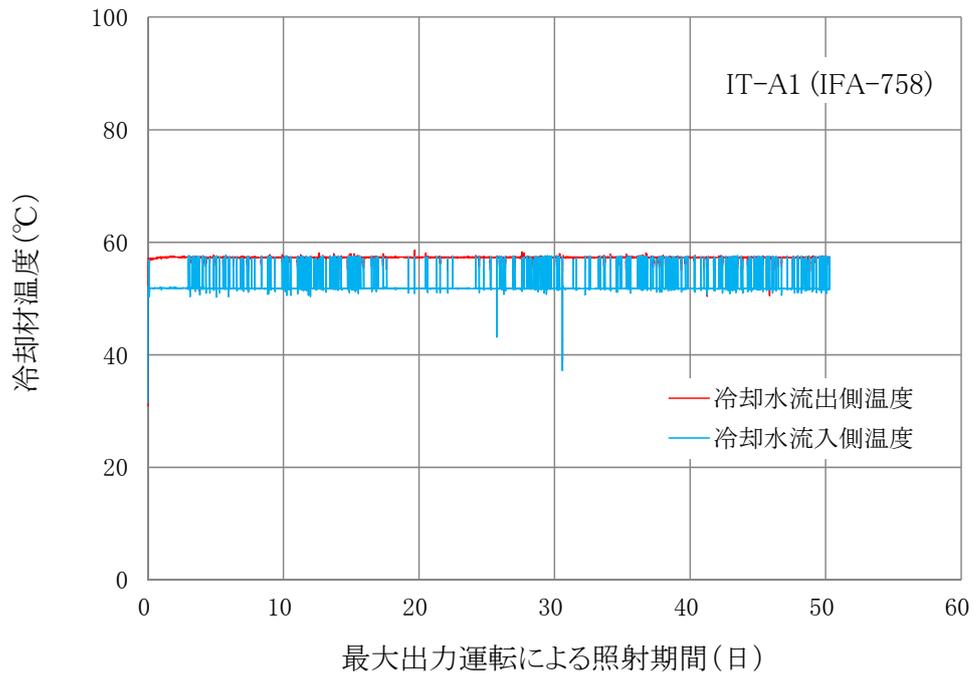


図 3.3.2- 2 原子炉冷却材の温度変化

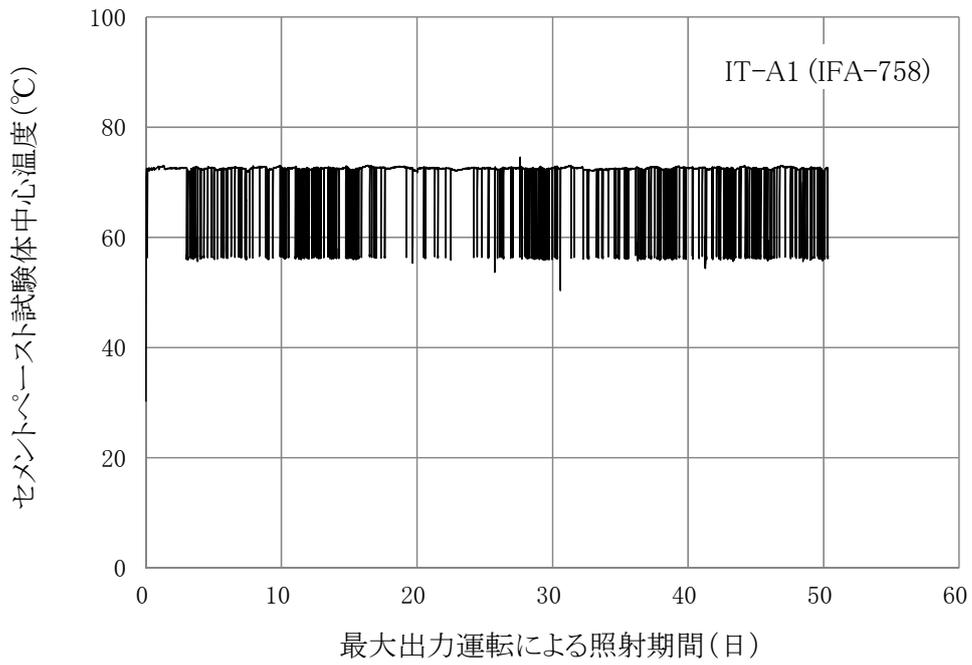


図 3.3.2- 3 セメントペースト試験体の中心温度の時間変化

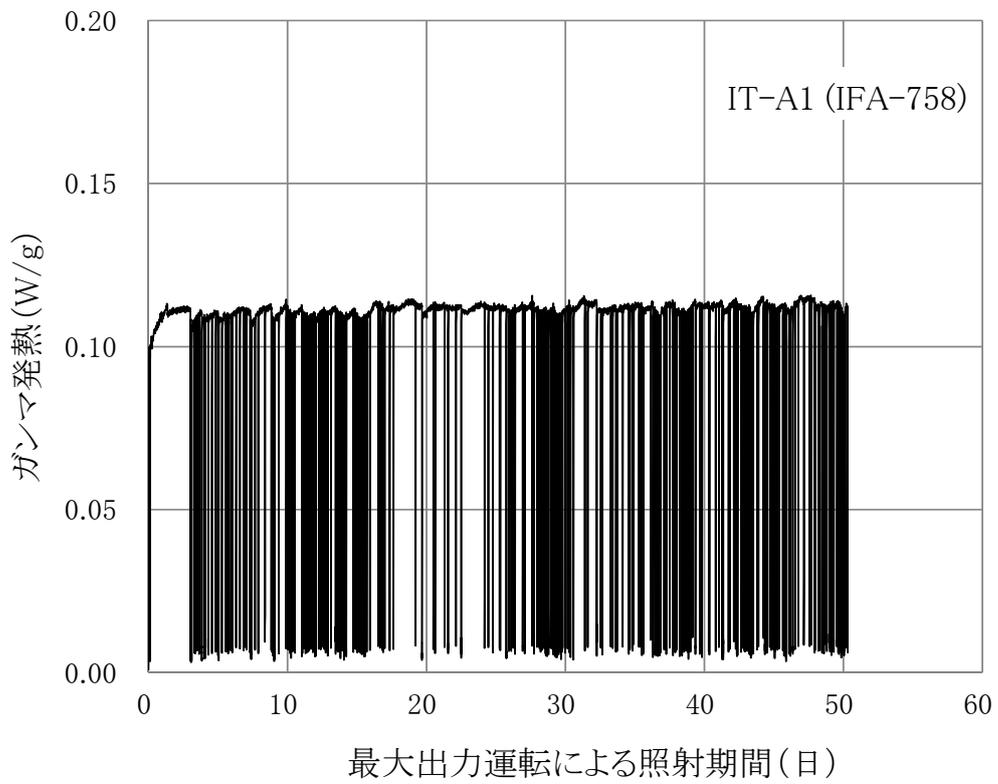


図 3.3.2- 4 ガンマ発熱の時間変化

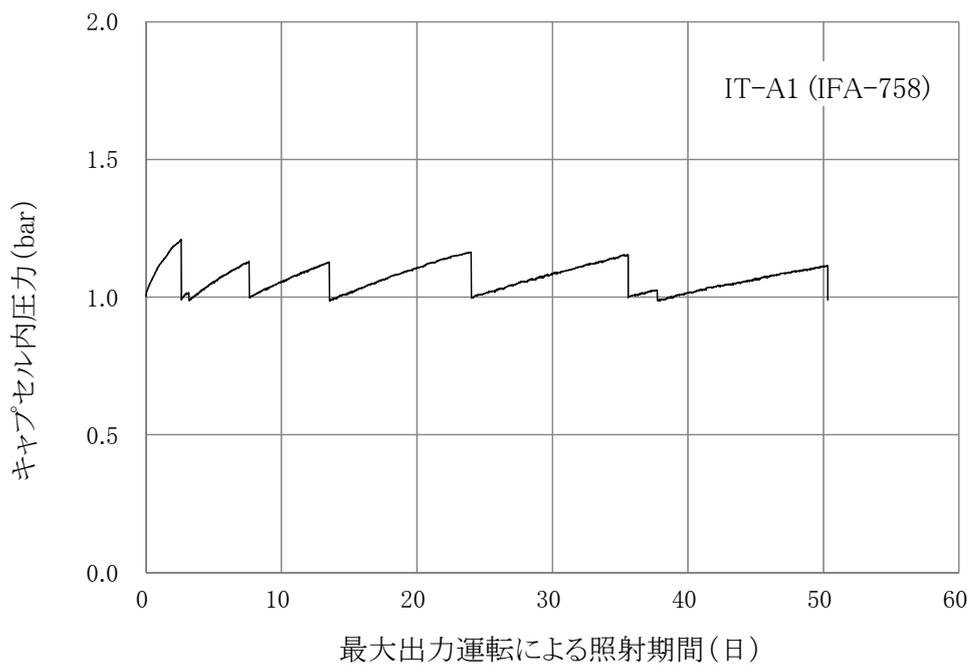


図 3.3.2- 5 ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

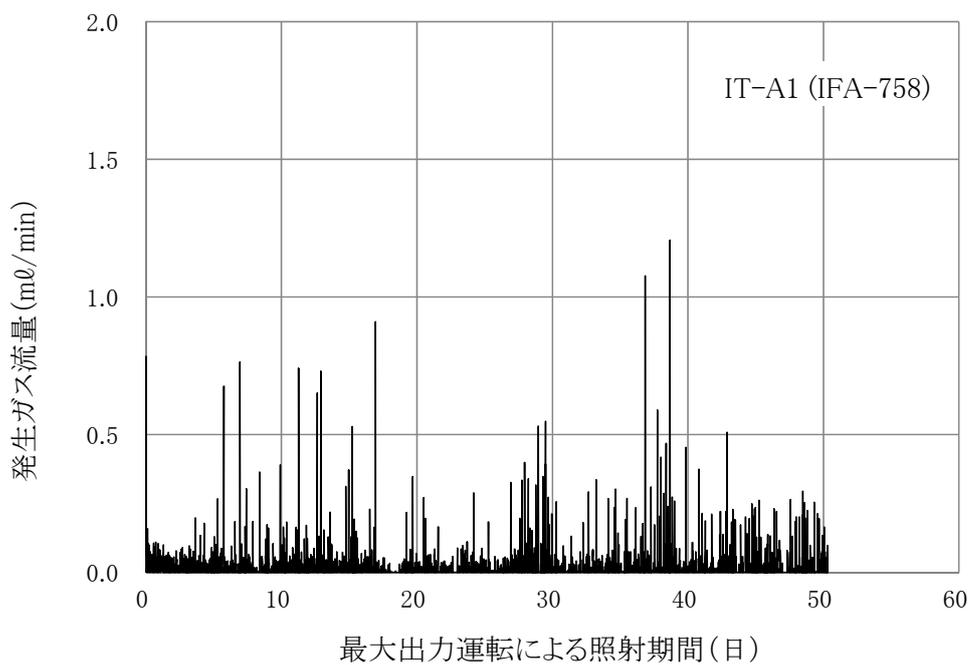


図 3.3.2- 6 発生ガス流量の時間変化

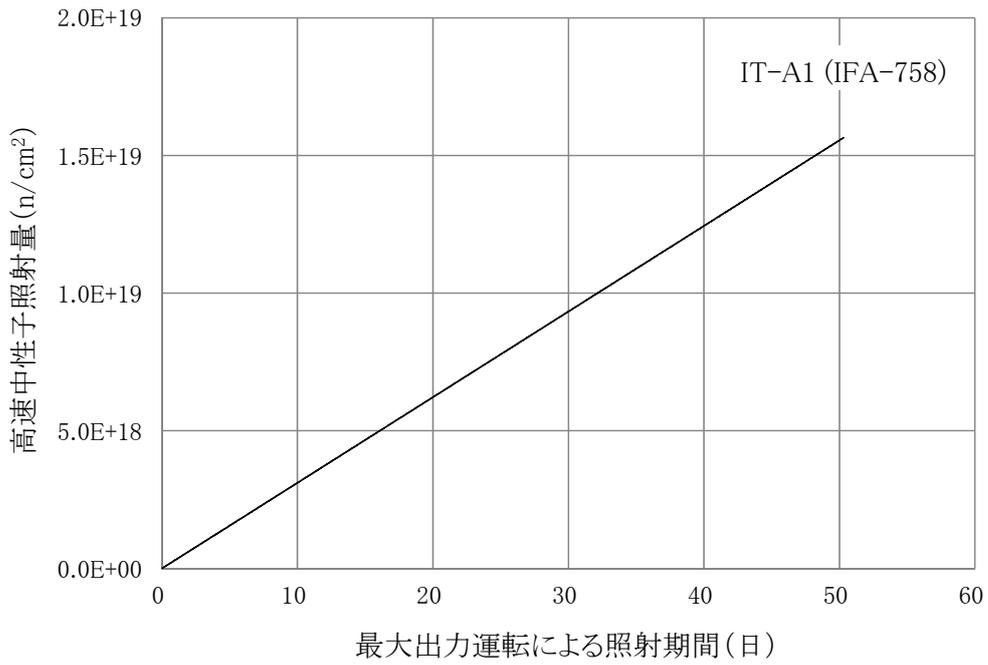


図 3.3.2- 7 高速中性子照射量の時間変化

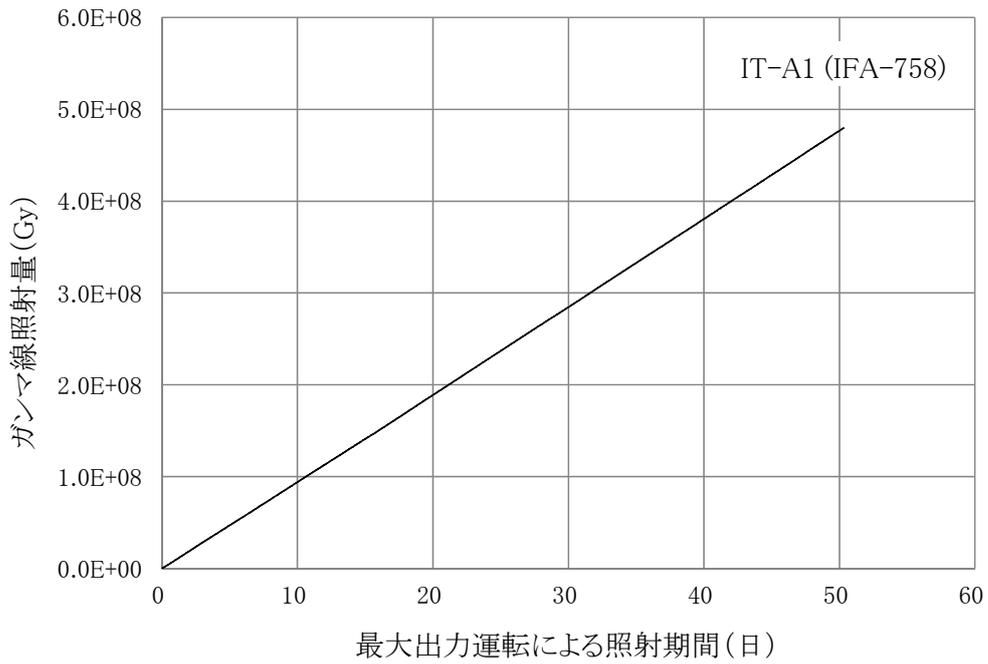
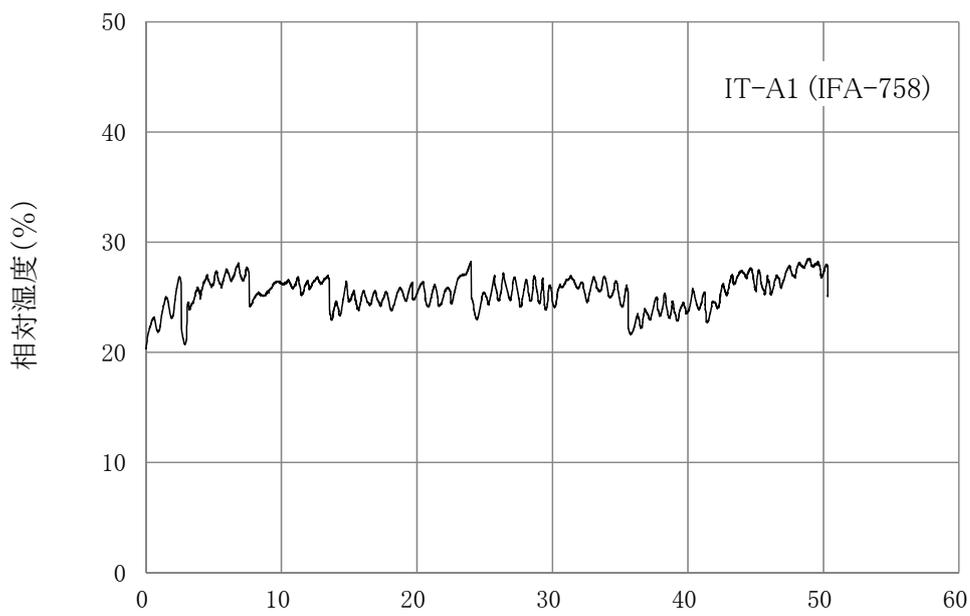
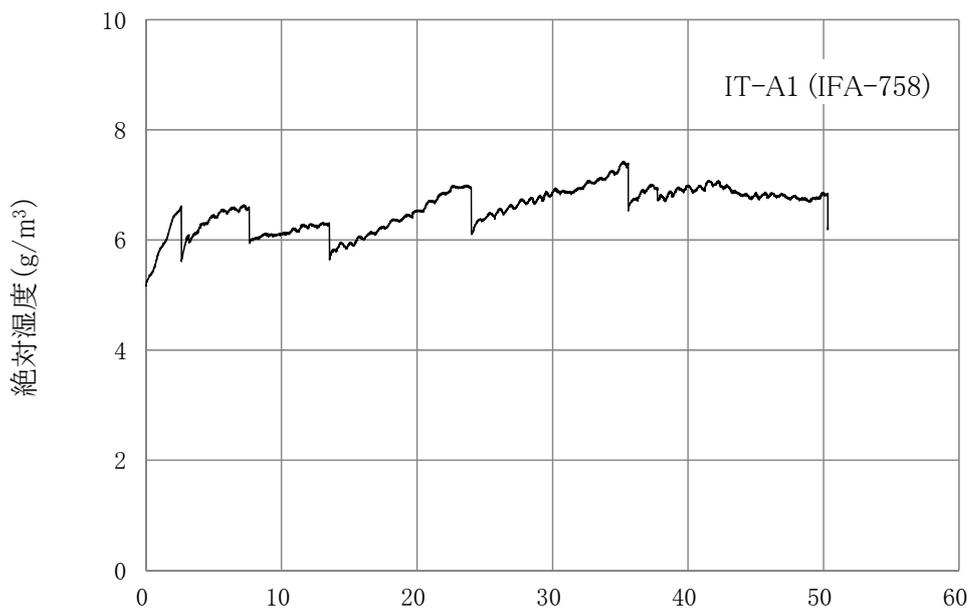


図 3.3.2- 8 ガンマ線照射量の時間変化



最大出力運転による照射期間(日)

図 3.3.2- 9 炉外の計測系内相対湿度の時間変化



最大出力運転による照射期間(日)

図 3.3.2- 10 炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

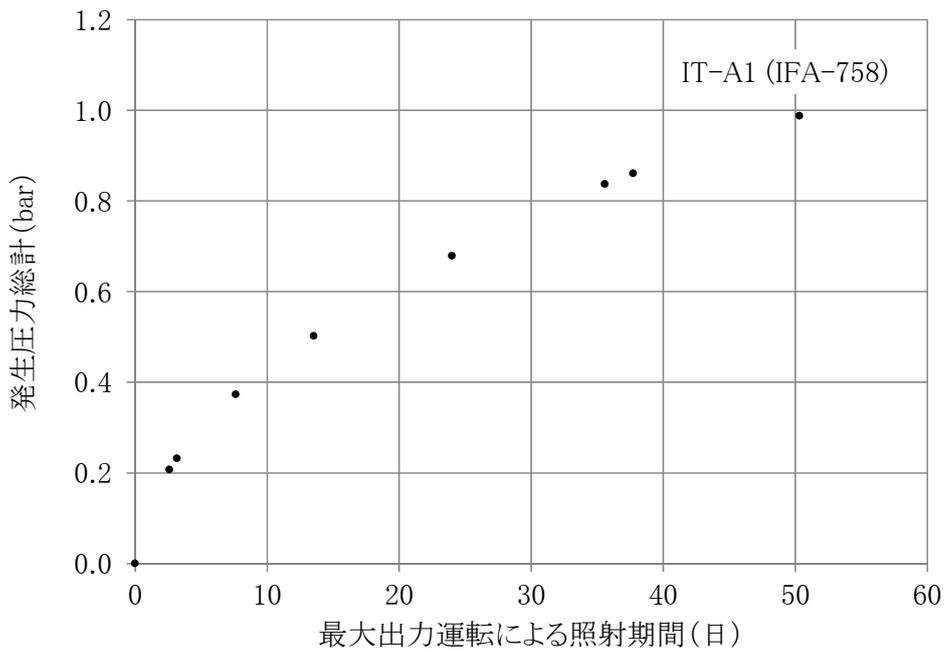


図 3. 3. 2- 11 発生圧力総計の時間変化

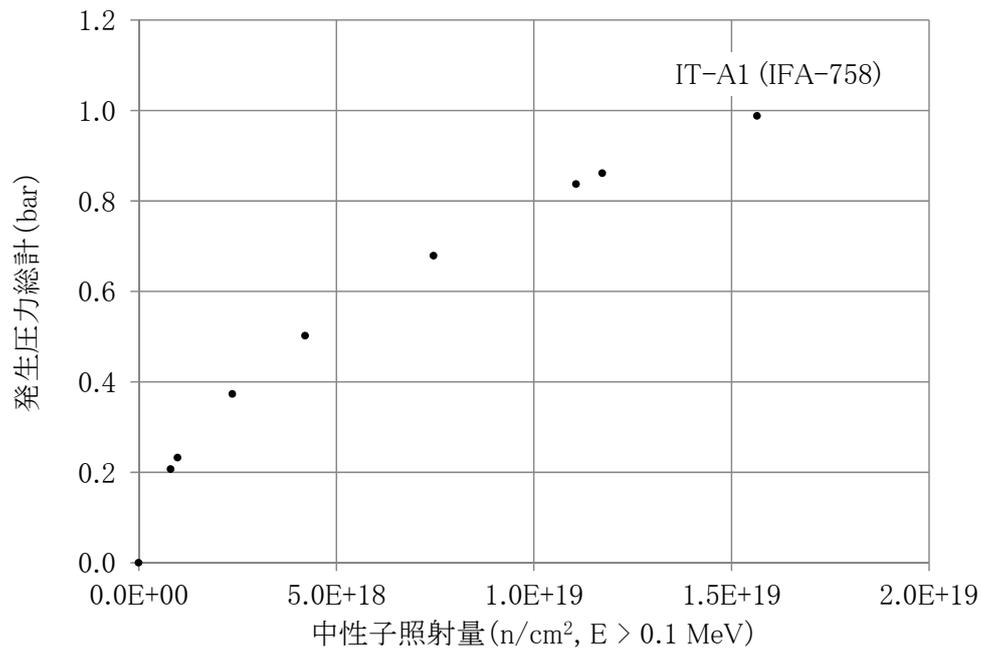


図 3. 3. 2- 12 発生圧力総計の照射量に対する変化

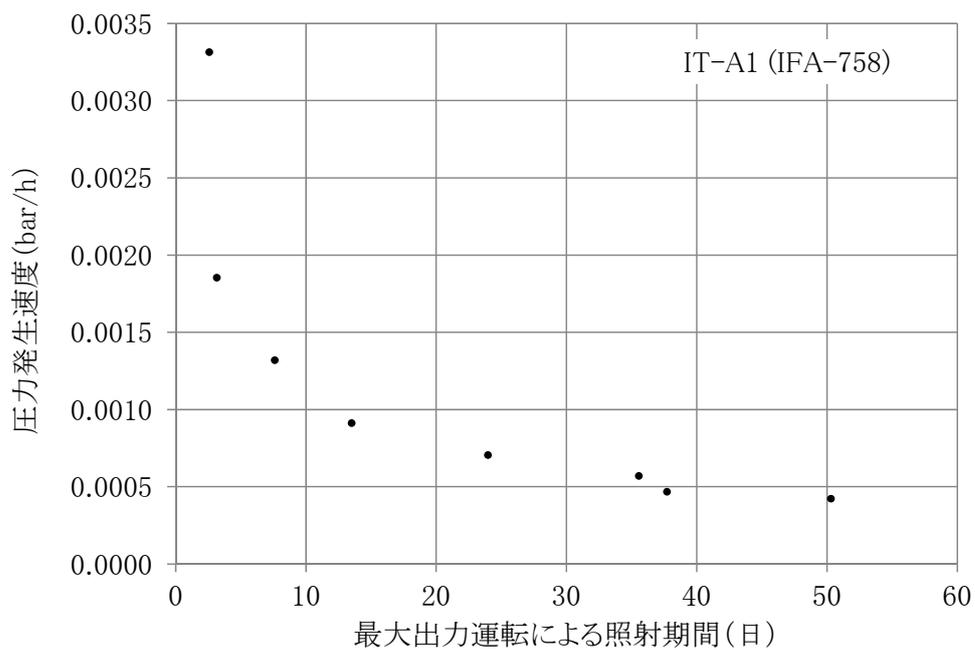


図 3.3.2- 13 圧力発生速度の時間変化

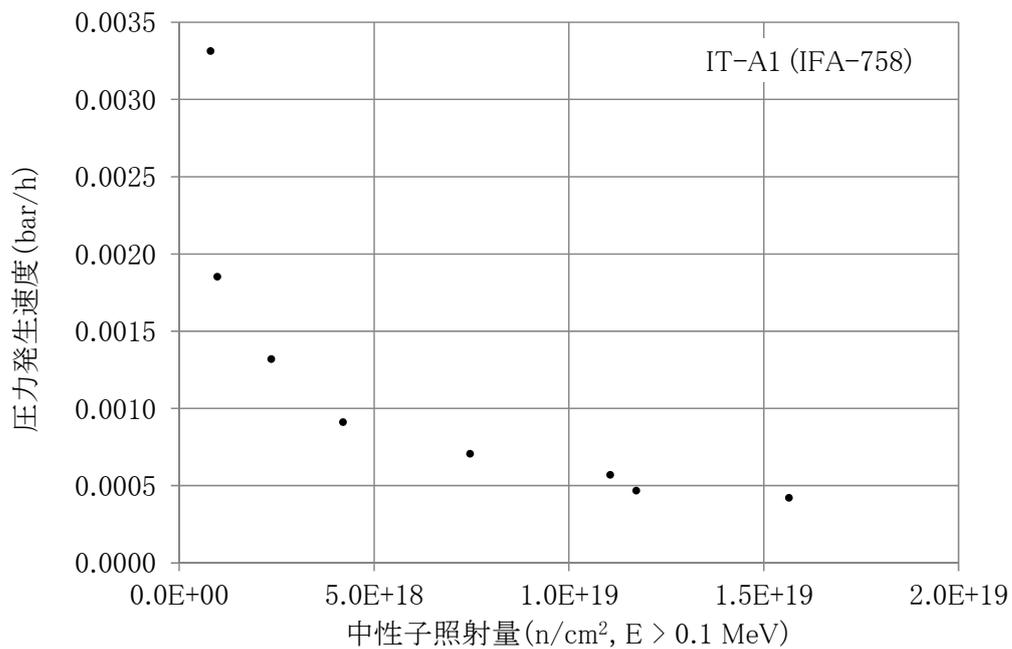


図 3.3.2- 14 圧力発生速度の照射量に対する変化

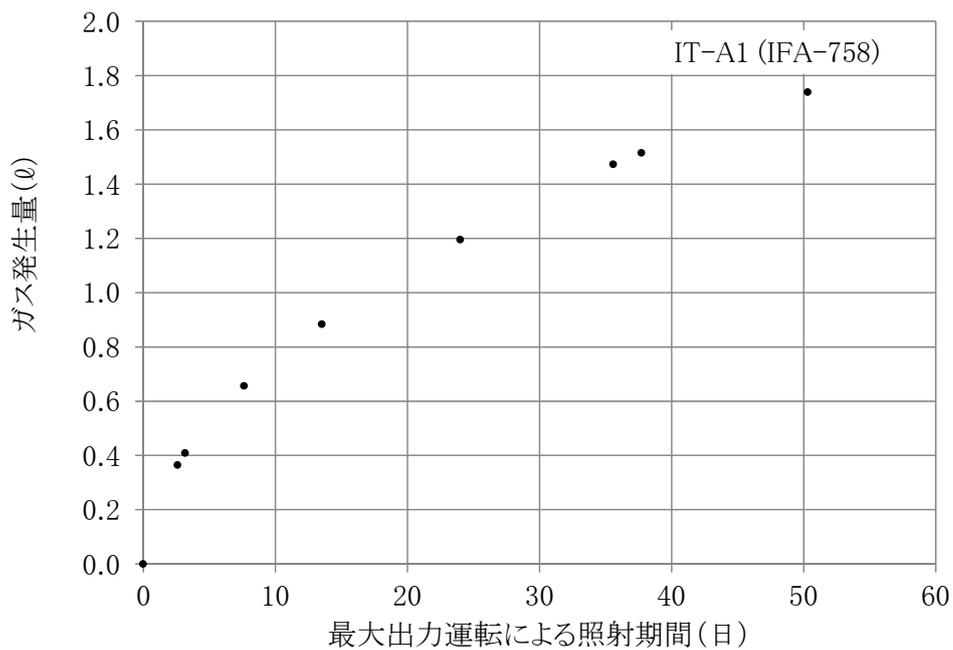


図 3.3.2- 15 ガス発生量の時間変化 (0°C、1 気圧)

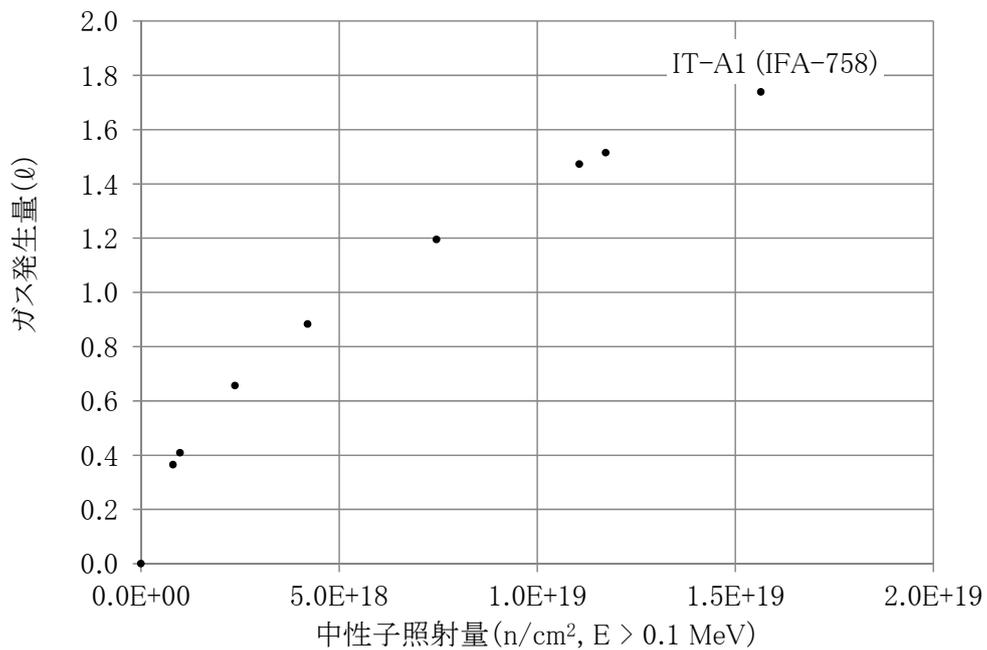


図 3.3.2- 16 ガス発生量の照射量に対する変化 (0°C、1 気圧)

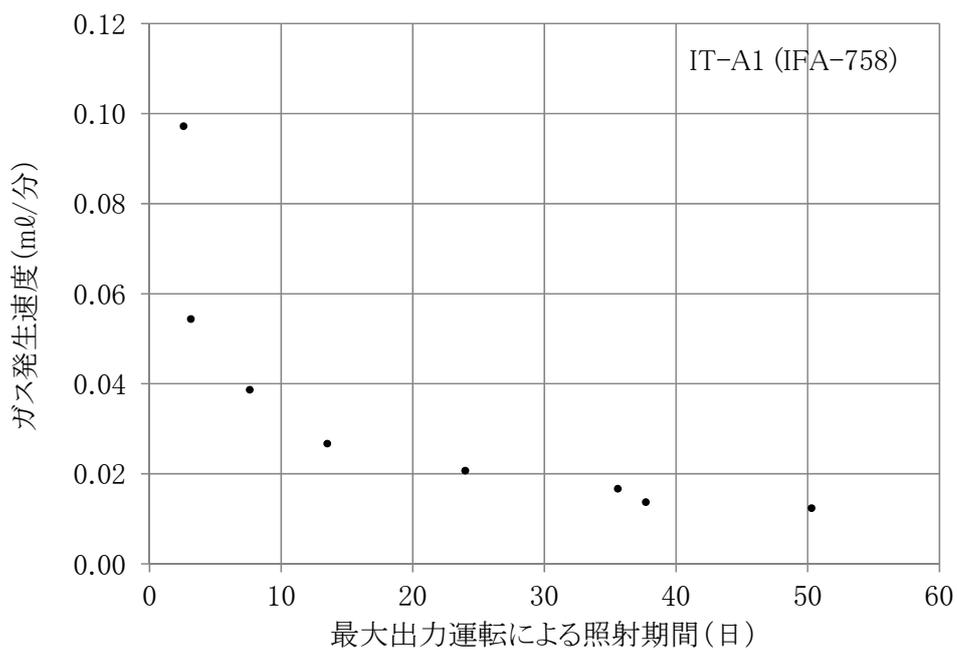


図 3.3.2- 17 ガス発生速度の時間変化 (0°C、1 気圧)

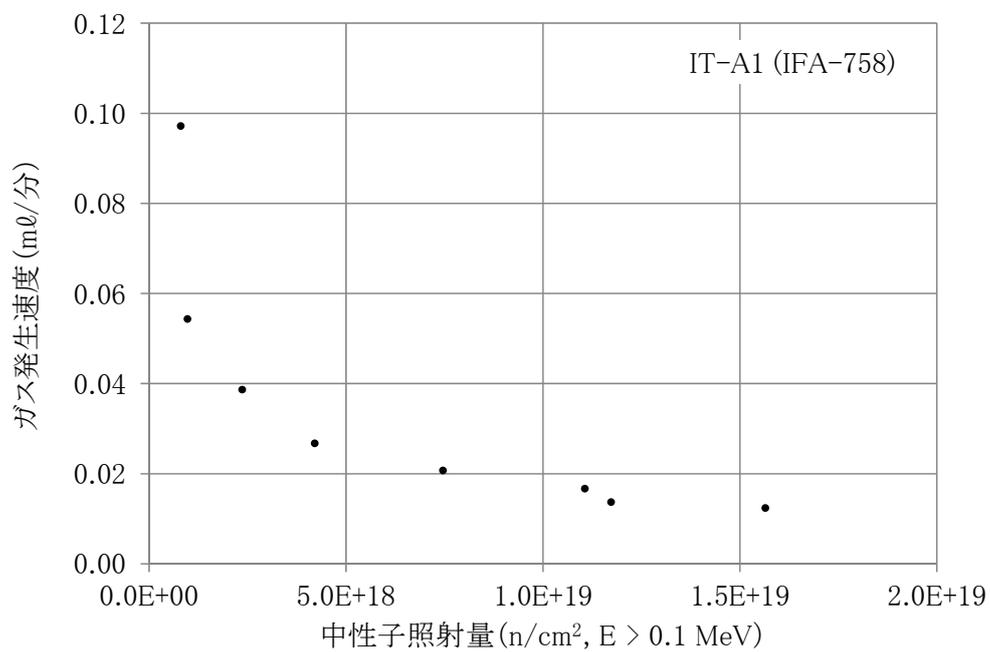


図 3.3.2- 18 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0°C、1 気圧)

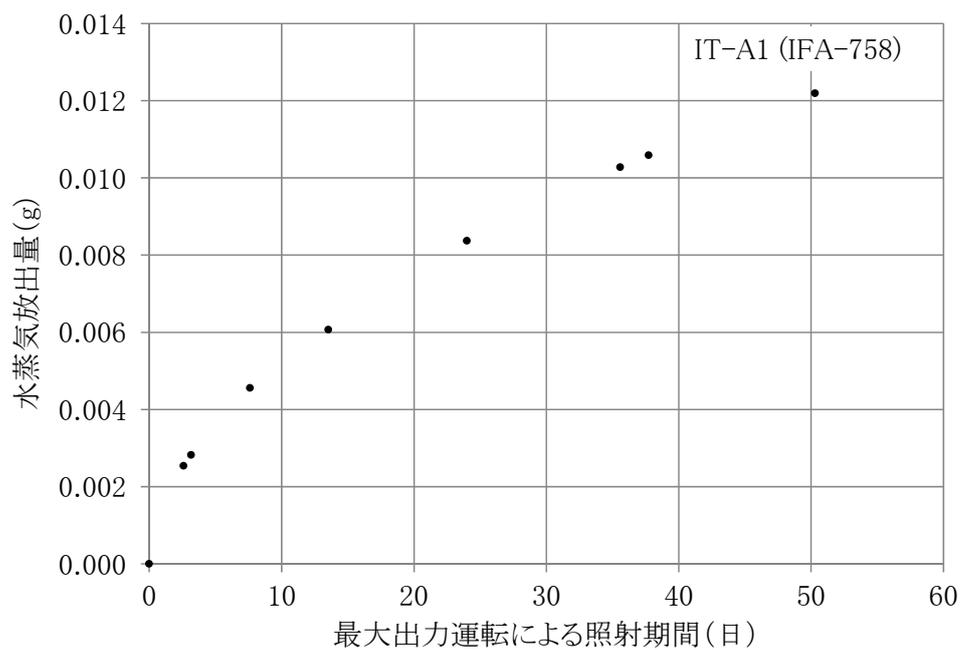


図 3.3.2- 19 水分放出量の時間変化

(b) 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 3.3.2- 20 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 3.3.2- 21 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 3.3.2- 22 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 3.3.2- 23 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 3.3.2- 24 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 3.3.2- 25 に発生ガス流量の時間変化を示す。

図 3.3.2- 26 に高速中性子照射量の時間変化を示す。図 3.3.2- 27 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/cm<sup>2</sup>/s、ガンマ線量率は 384kGy/h であった。図 3.3.2- 28 に湿度計測タンクでの相対湿度の時間変化を示す。図 3.3.2- 29 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 3.3.2- 30 および図 3.3.2- 31 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 3.3.2- 32 および図 3.3.2- 33 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 3.3.2- 34 および図 3.3.2- 35 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 3.3.2- 36 および図 3.3.2- 37 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 3.3.2- 38 に、水分放出量の時間変化を示す。

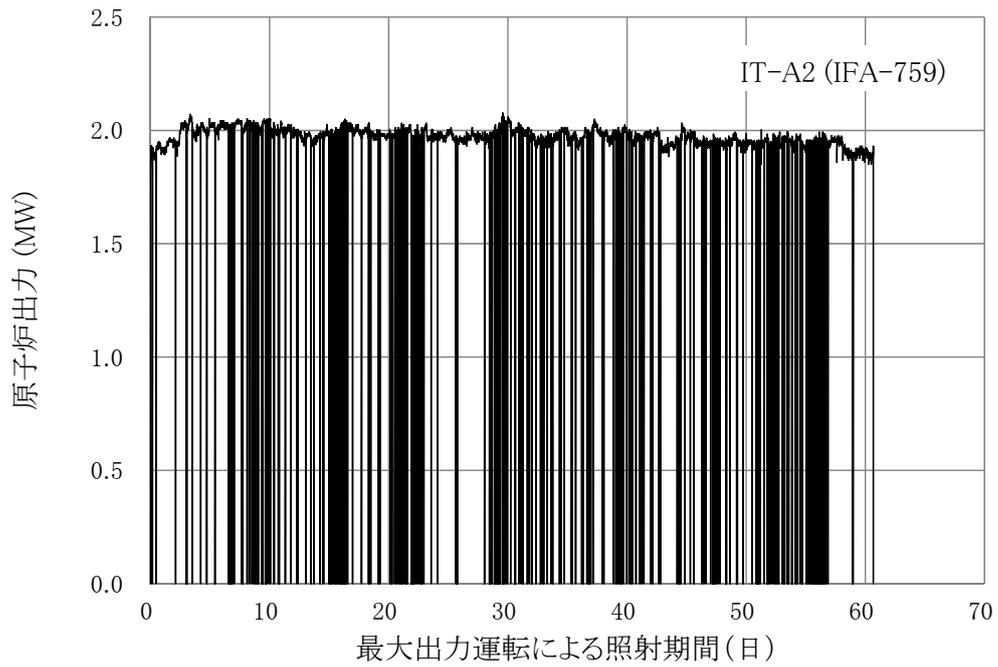


図 3.3.2- 20 原子炉出力の変化

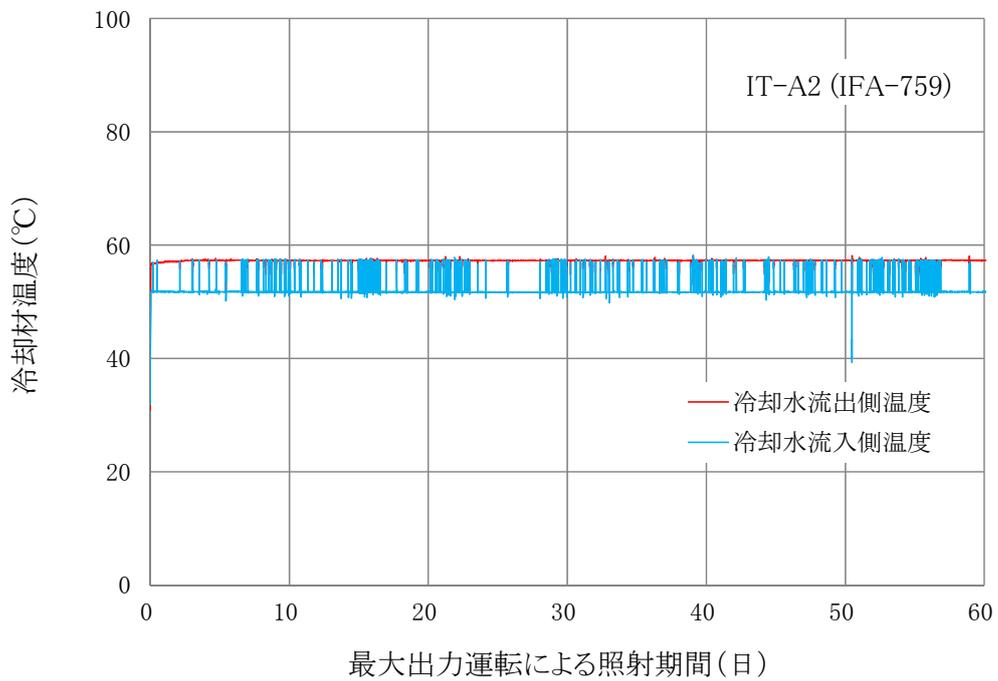


図 3.3.2- 21 原子炉冷却材の温度変化

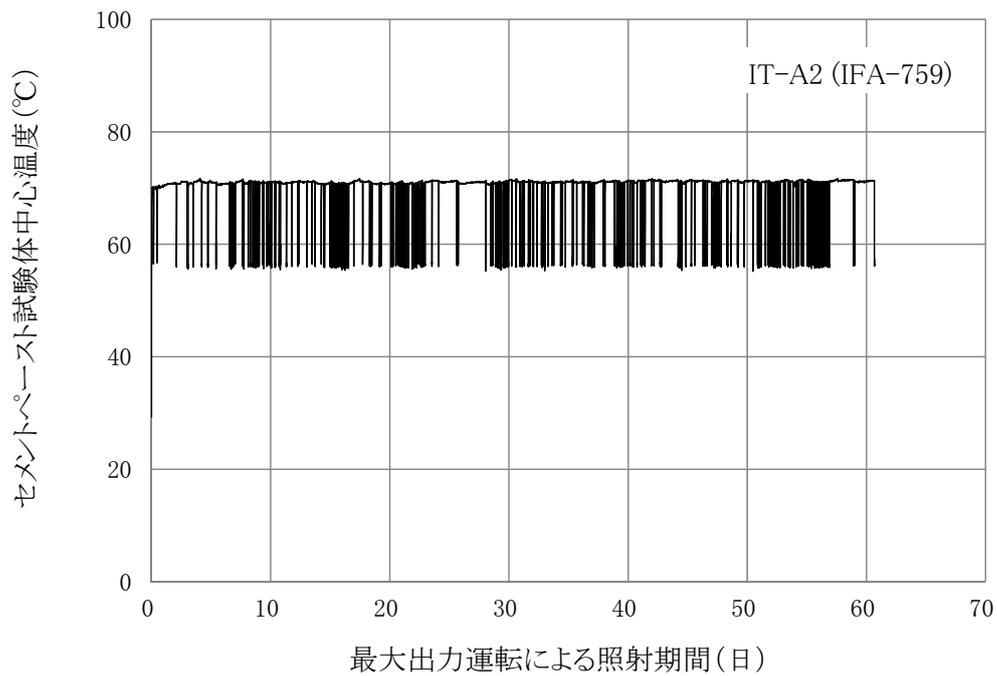


図 3.3.2- 22 セメントペースト試験体の中心温度の時間変化

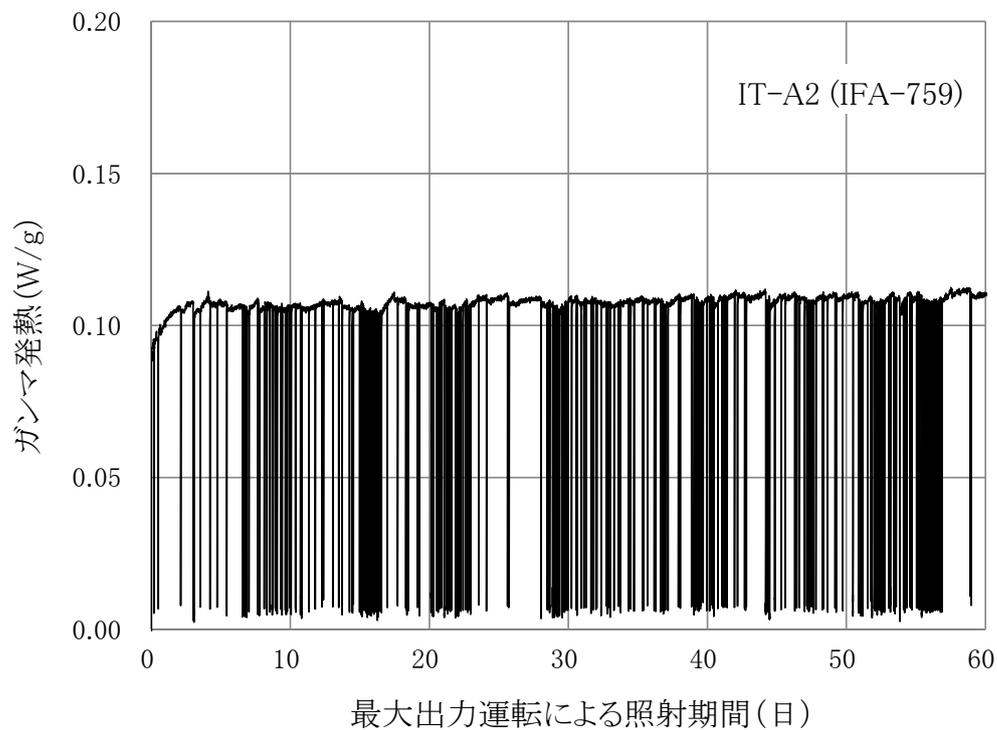


図 3.3.2- 23 ガンマ発熱の時間変化

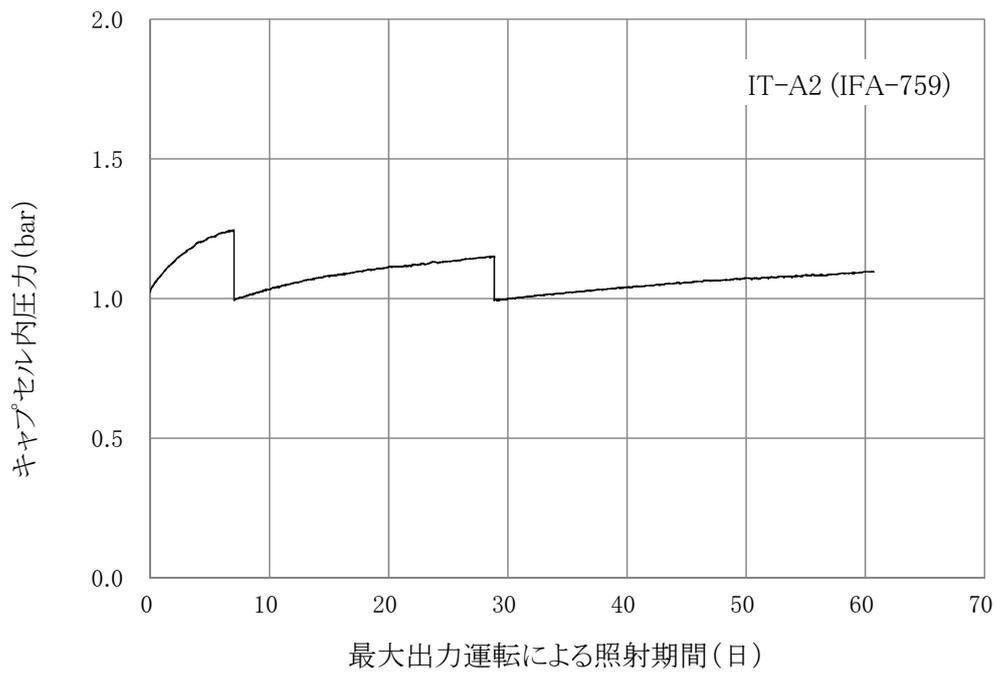


図 3.3.2- 24 ガス発生によるキャプセル内圧力の時間変化

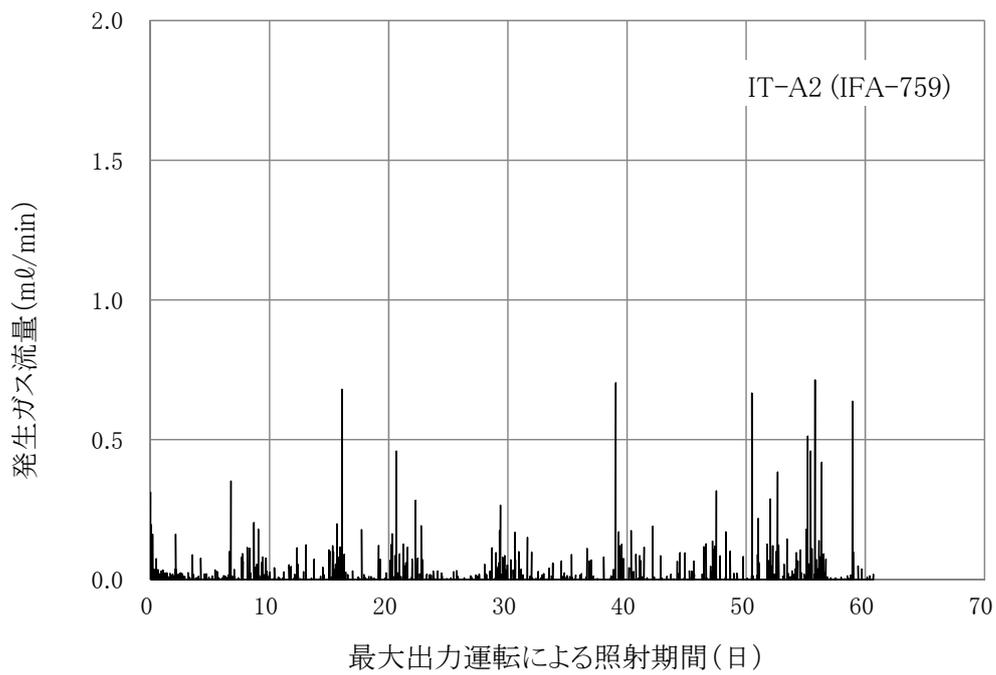


図 3.3.2- 25 発生ガス流量の時間変化

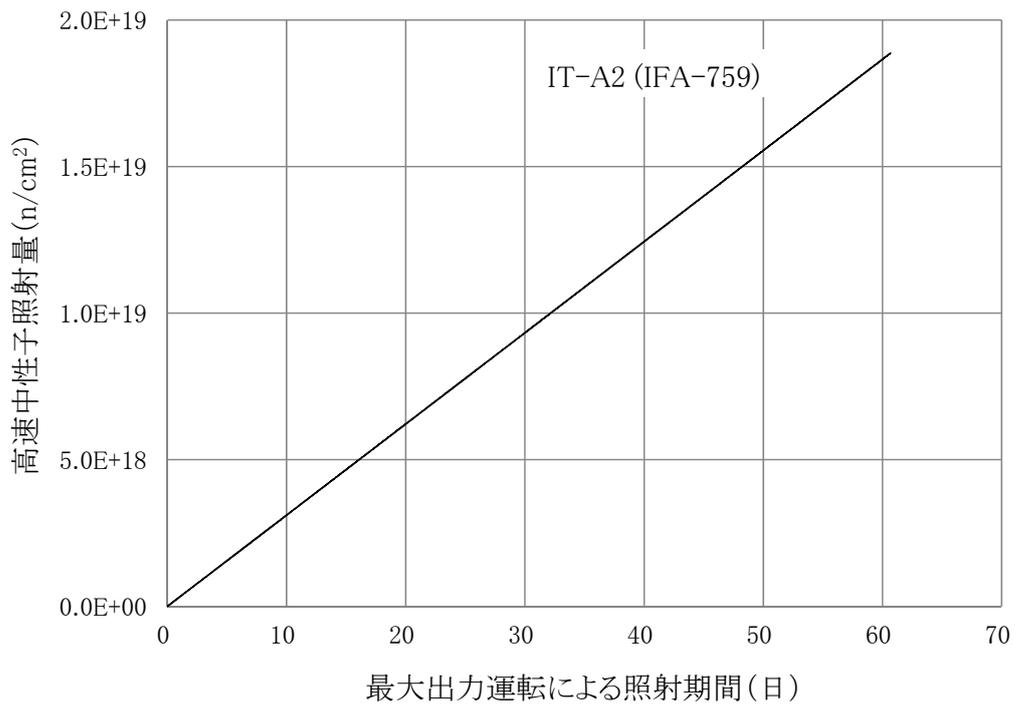


図 3.3.2- 26 高速中性子照射量の時間変化

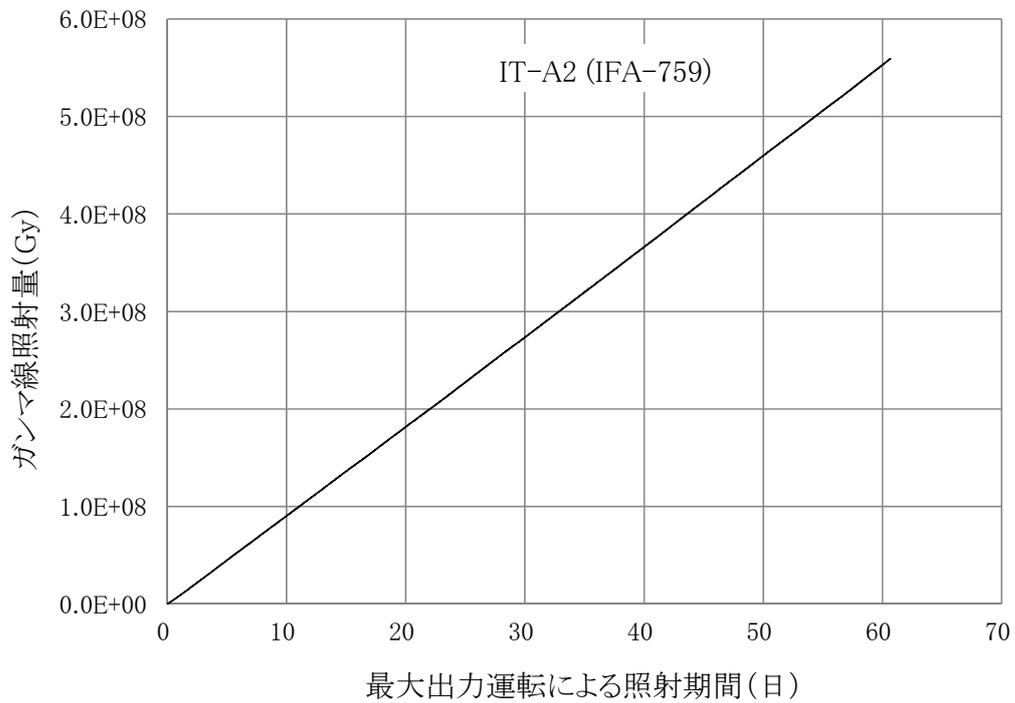


図 3.3.2- 27 ガンマ線照射量の時間変化

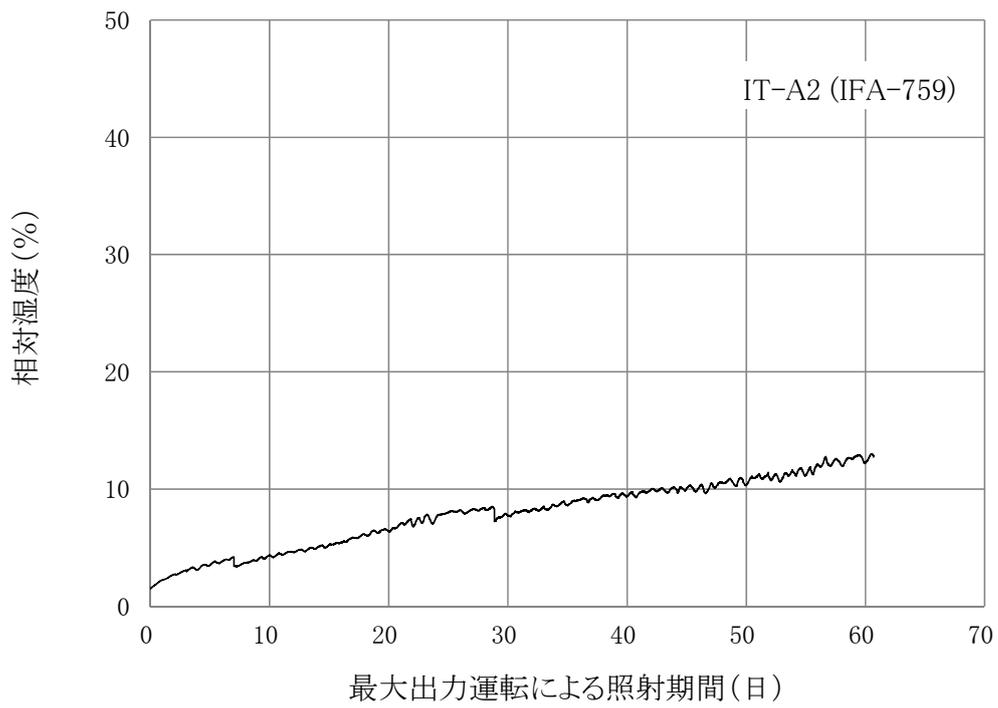


図 3.3.2- 28 炉外の計測系内相対湿度の時間変化

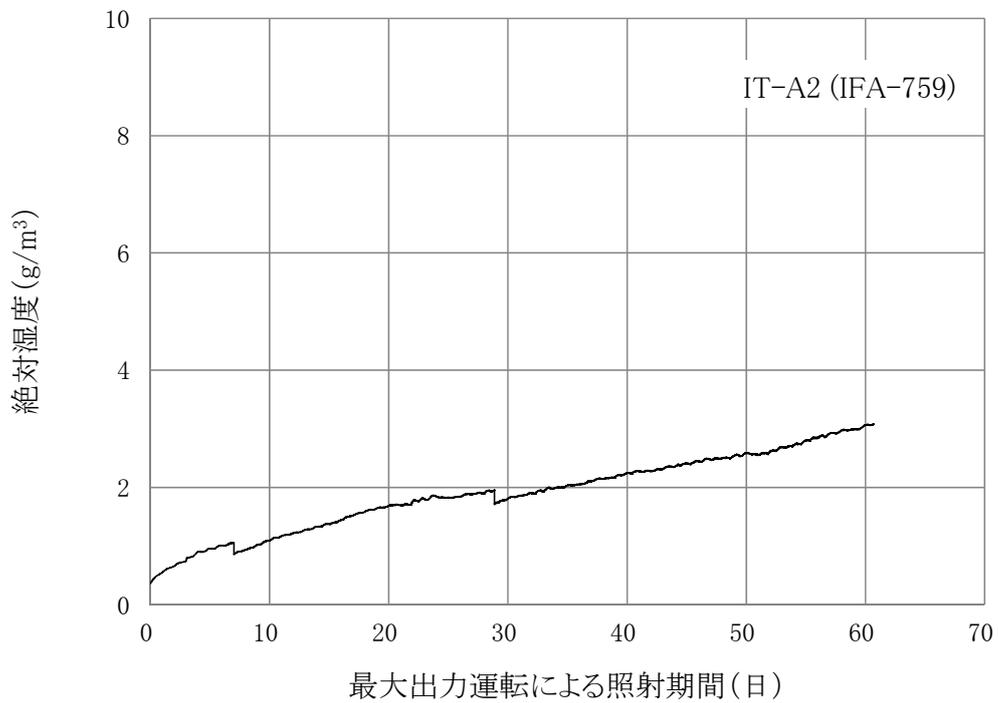


図 3.3.2- 29 炉外の計測系内絶対湿度の時間変化

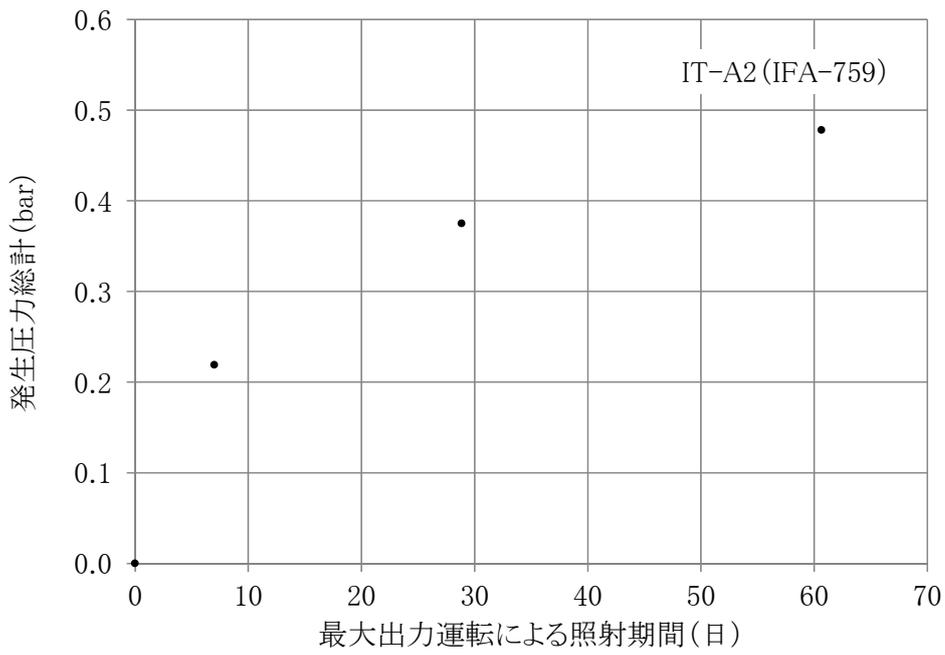


図 3. 3. 2- 30 発生圧力総計の時間変化

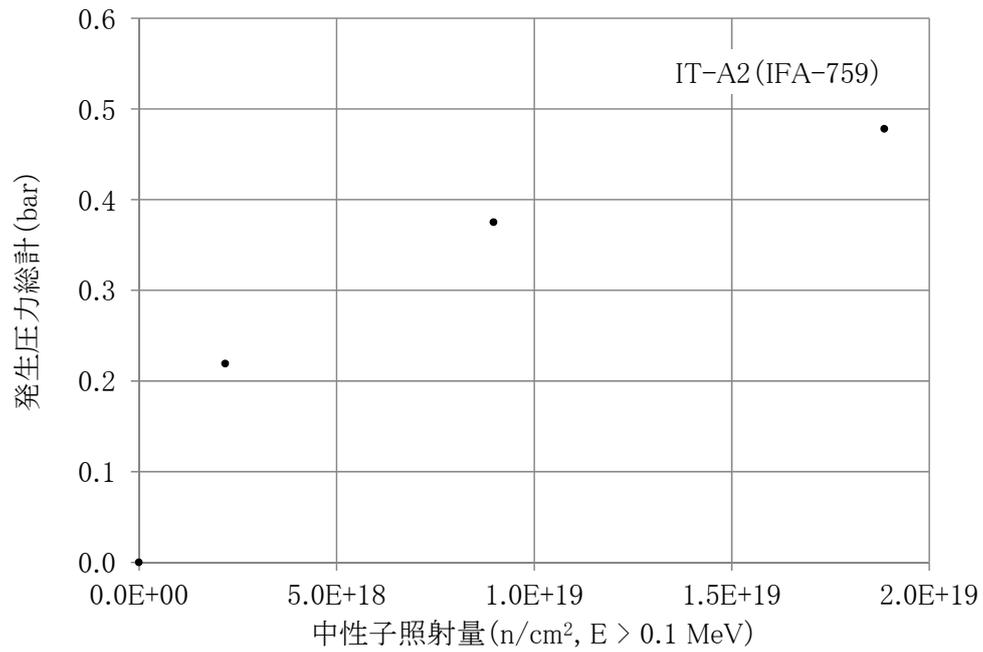


図 3. 3. 2- 31 発生圧力総計の照射量に対する変化

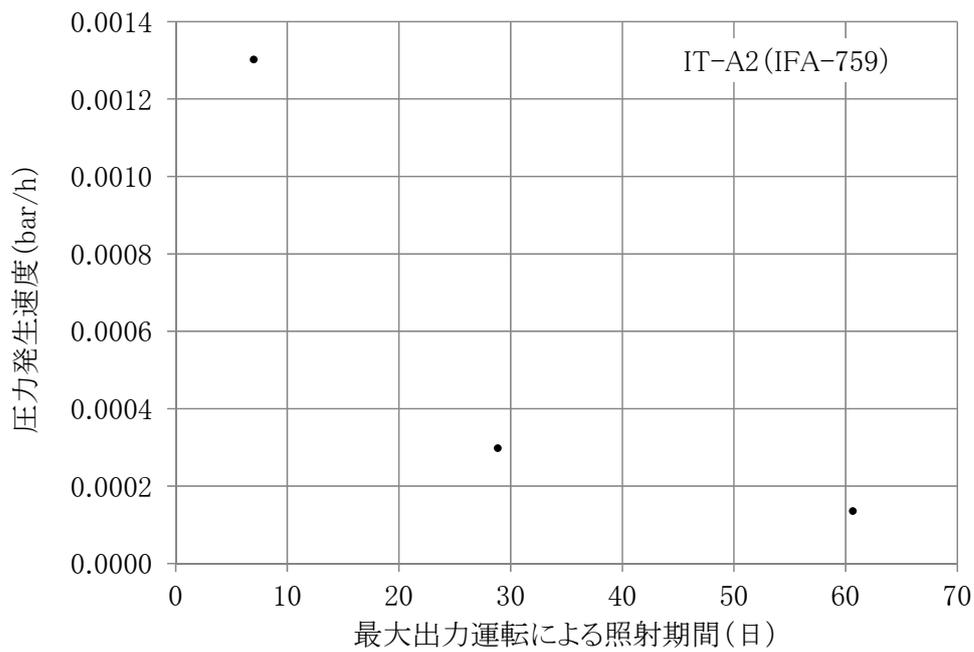


図 3.3.2- 32 圧力発生速度の時間変化

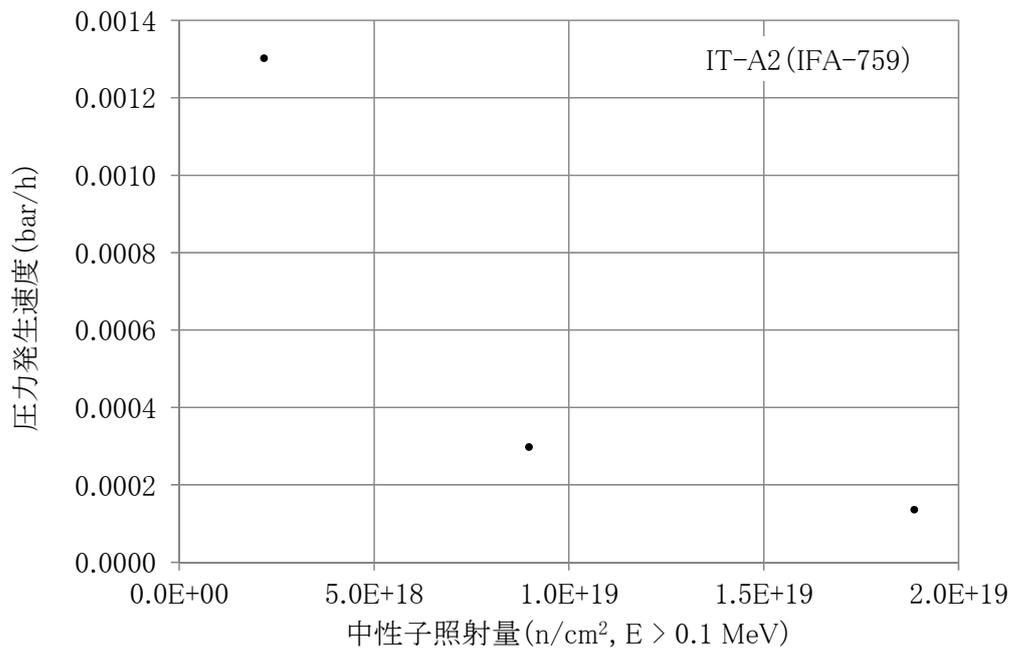


図 3.3.2- 33 圧力発生速度の照射量に対する変化

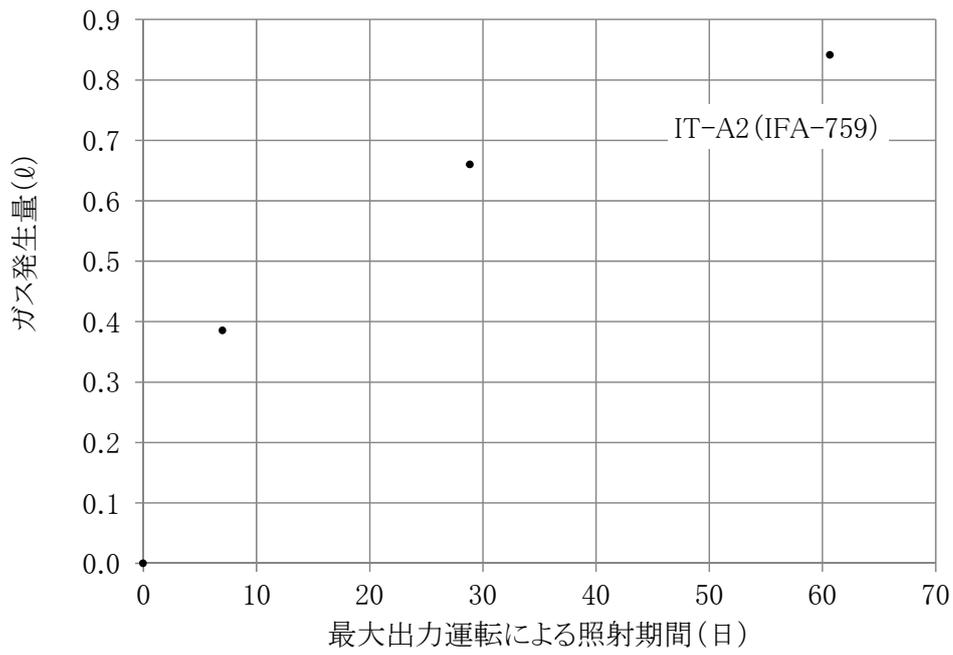


図 3.3.2- 34 ガス発生量の時間変化 (0°C、1 気圧)

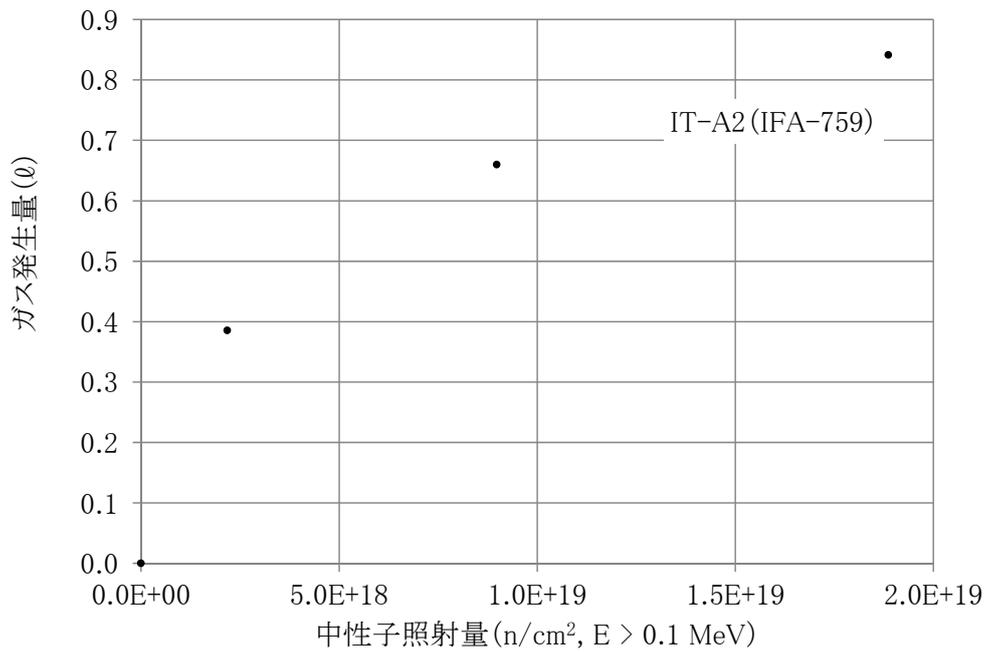


図 3.3.2- 35 ガス発生量の照射量に対する変化 (0°C、1 気圧)

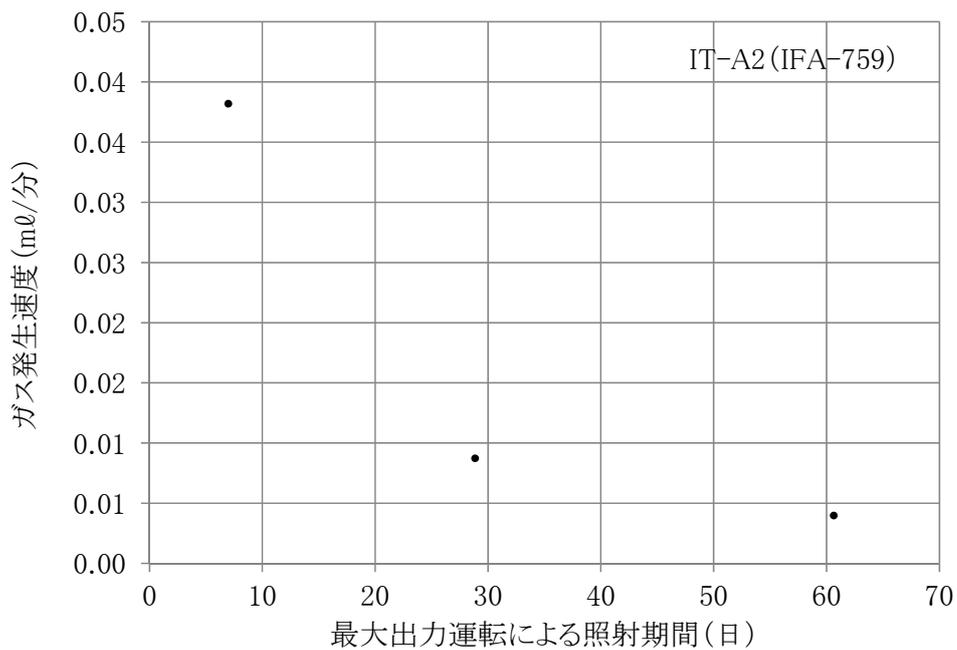


図 3.3.2- 36 ガス発生速度の時間変化 (0°C、1 気圧)

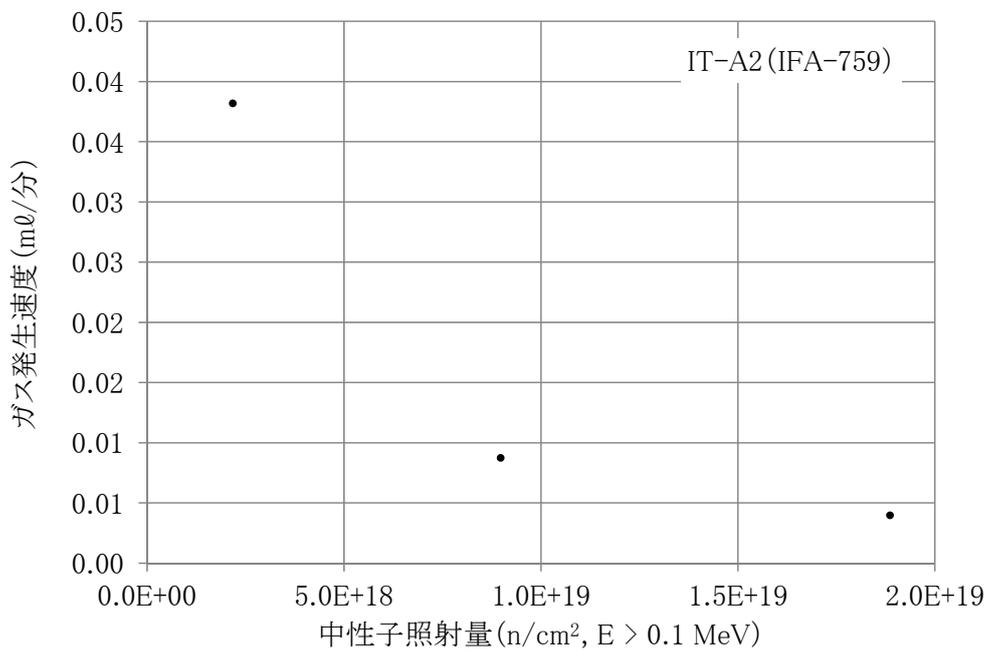


図 3.3.2- 37 ガス発生速度の照射量に対する変化 (0°C、1 気圧)

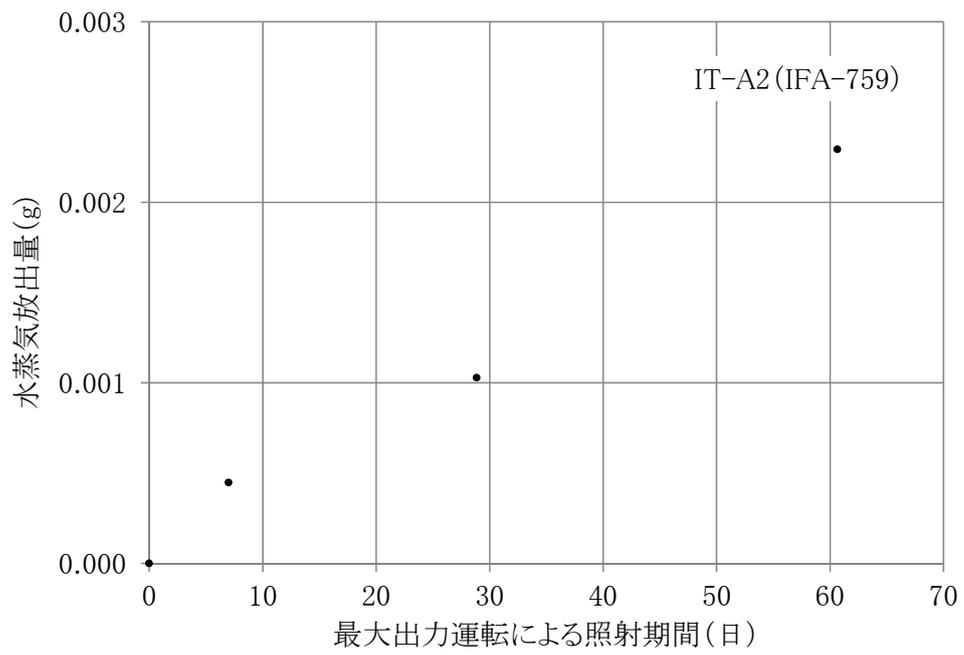


図 3.3.2- 38 水分放出量の時間変化