

## 論文 コンクリートの経年劣化が模擬壁試験体の遮熱性に及ぼす影響

渡部 翔太郎\*1・酒井 正樹\*2・北川 高史\*3・島本 龍\*4

**要旨：**原子力施設では、重要機器等を設置する火災区域の耐火壁に、3時間以上の耐火能力（遮熱性）が求められている。また、安全上重要な機器等に対して高経年化（経年による機能や性能の低下）技術評価が求められており、耐火壁においても経年劣化が遮熱性に影響を及ぼす懸念がある。そこで、耐火壁の遮熱性に影響を与える経年劣化事象を水分逸散と定め、含水率が異なる2種類の模擬壁試験体の耐火試験を実施した。その結果、経年劣化を想定し十分に乾燥を促進した試験体においても、遮熱性の指標となる加熱裏面側の温度上昇は2種類の試験体で概ね同程度であり、水分逸散が遮熱性に与える影響は僅少であることを確認した。

**キーワード：**原子力施設, 耐火壁, 経年劣化, 含水率, 耐火試験, 遮熱性

## 1. はじめに

原子力施設において、原子炉に関する安全機能を有する構築物の火災区域や、放射性物質の貯蔵又は閉じ込め機能を有する構築物、系統及び機器が設置される火災区域の耐火壁には、3時間以上の耐火能力を有することが求められており、その評価については、延焼を防止する観点から、遮熱性（火災時の加熱裏面の温度上昇）に着目している。なお、加熱裏面の温度上昇値には、平均140K以下、最高180K以下という判定基準<sup>1)</sup>がある。また、原子力施設における安全上重要な機器・構築物については、長期間の運転（最大60年間）を想定した高経年化（経年による機能や性能の低下）技術評価が求められているが、耐火壁について、高経年化が耐火性能に及ぼす影響を実験的に確認した例は少ない。

そこで本研究では、コンクリートの経年劣化が遮熱性に及ぼす影響を評価することを目的に、経年劣化事象をパラメータとした模擬壁試験体の耐火試験を実施した。

## 2. 経年劣化要因の抽出

試験計画の立案に際して、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<sup>2)</sup>」（以下、維持管理指針という）に基づいて、原子力施設のコンクリート構築物で着目する経年劣化要因及び経年劣化事象を対象として、コンクリートの耐火性能に影響を及ぼす項目を抽出することとした。着目する経年劣化要因は、原子力施設に特有の熱（高温）や放射線照射をはじめとして、中性化、塩分浸透、アルカリ骨材反応など12項目、経年劣化事象は、コンクリートの強度低下、ひび割れ、剥離・剥落、水分逸散など9項目である。なお、水分逸散を「劣化事象」と定義しているのは、水分逸散によるコンクリ

ートの密度低下が遮蔽性を低下させるためである。

文献調査及び実機の維持管理計画などから、本研究の耐火試験で対象とする経年劣化要因及び経年劣化事象の絞込みを行った。

耐火性能に影響を及ぼす経年劣化事象と経年劣化要因の文献調査結果を表-1に示す。ここでは、原子力施設を含むコンクリート構築物の耐火性能について体系的にまとめられている、国外における報告書2編<sup>3),4)</sup>及び国内における論文1編<sup>5)</sup>の調査結果を取り纏めた。

調査の結果、一般環境下において考慮される中性化、塩分浸透、アルカリ骨材反応などの経年劣化要因が、直接コンクリートの耐火性能に影響を与えることはなく、乾燥収縮や鉄筋腐食等によって生じるコンクリートのひび割れ、剥離、剥落（維持管理指針における経年劣化事象）によって、コンクリート部材の断面が減少することで耐火性能が低下する可能性があることが分かった。しかしながら、国内の原子力施設においては、計画的な維持管理がなされているため、コンクリートの断面減少が放置されるようなことはなく、これらの経年劣化事象は除外できるものと判断された。

国内では、原田ら<sup>5)</sup>がコンクリート壁の耐火性能に及ぼす調合と含水率の影響について解析的に検討している。一般に、コンクリートの含水率の影響として、乾燥により熱伝導率が小さくなる、則ち伝熱性が小さくなることが知られているが、火災加熱のように1000℃を超える加熱を受ける場合では、乾燥により加熱時の蒸発潜熱（吸熱）量が減少するため、コンクリートの伝熱性は大きくなるが示されている。原子力施設のコンクリート構築物で着目する経年劣化事象には、熱（高温）や放射線照射などを劣化要因として引き起こされる水分逸散があ

\*1 (株)大林組 原子力本部 技術部 (正会員)

\*2 (株)大林組 技術研究所 (正会員)

\*3 関西電力(株)原子力事業本部 原子力土木建築センター 土木建築設備グループ (正会員)

\*4 中部電力(株)原子力本部 原子力土建部 設計管理グループ

ることから、試験計画への反映が必要と考えられた。

以上より、本研究の耐火試験では、コンクリートの含水率をパラメータとして、水分逸散が構造物の遮熱性に及ぼす影響について検討を行うこととした。

### 3. 試験概要

#### 3.1 試験計画

試験計画の概要を表-2に示す。試験体は原子力発電所の耐火壁を想定し、養生条件の違いにより、竣工直後の含水状態を模擬した標準乾燥試験体(FS)と、長期間の運転後の含水状態を模擬した強制乾燥試験体(FD)をそれぞれ2体ずつ製作し、耐火試験を行い、壁部材の3時間加熱に対する遮熱性を評価した。

乾燥養生条件は、前養生として91日間の封かん養生を行った後、基準となる標準乾燥(気中養生・1年間)と経年における乾燥の進行を模擬した強制乾燥(50℃加熱養生・1年間)の2水準を設定した。

コンクリートの設計基準強度、セメント種別、粗骨材種別、耐火試験体の寸法及び配筋要領は、原子力発電所の壁部材を参考として設定した。

試験体は、耐火試験体と含水率試験体の2種類とした。耐火試験体は、幅1700×高さ1700×壁厚300mmの壁部材で、配筋条件はD16@200ダブル、かぶり厚さは40mmとした。含水率試験体は、乾燥養生期間における乾式コアによる含水率測定に用い、耐火試験体と同一ロットのコンクリートで作製し、部材厚と乾燥条件を同一とした。

耐火試験は、ISO 834 標準加熱温度曲線に従って片面より3時間加熱を行い、加熱終了9時間後まで(非加熱側の裏面温度がピークを示すまで)温度測定を継続した。

耐火試験による評価項目は原子力発電所の耐火壁の評価基準に倣い遮熱性とし、加熱裏面の温度を測定した。試験結果の評価は、加熱裏面の初期温度からの温度上昇(増分)により行った。

#### 3.2 コンクリートの各種性状

コンクリートの使用材料を表-3に示す。コンクリートはレディーミクストコンクリートを使用した。セメント種別は普通ポルトランドセメントとした。細骨材は、硬質砂岩砕砂と山砂の混合砂、粗骨材は、硬質砂岩砕石とした。混和剤は高性能AE減水剤を使用した。

コンクリートの調合を表-4に示す。呼び強度は27N/mm<sup>2</sup>、指定スランブは18cm、空気量は4.5%とした。なお、本調査は、建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事<sup>6)</sup>に規定のある、水セメント比60%以下、単位水量185kg/m<sup>3</sup>以下の項目を満足している。コンクリートの基礎性状として、コンクリートの荷卸し時にフレッシュ性状を測定した。フレッシュ性状の試験項目と試験方法は、温度(JIS

A 1156)、スランブ(JIS A 1101)、空気量(JIS A 1128)、単位容積質量(JIS A 1116)とした。コンクリートの品質管理として、標準養生した供試体(φ100mm×200mm)の材齢28日及び91日の圧縮強度(JIS A 1108)を測定した。また、構造体コンクリート強度の確認として、現場封かん養生した供試体(φ100mm×200mm)の材齢28日、91日、乾燥期間3ヶ月、6ヶ月、9ヶ月、1年の圧縮強度を測定した。

表-1 耐火性能に影響を及ぼす劣化事象と劣化要因

文献	劣化事象	劣化要因
3)	ひび割れ、剥離	化学的浸食、骨材反応
	ひび割れ、材料損失(断面減少)	凍結融解、化学的浸食、骨材反応
	埋設鋼材の腐食による材料損失(断面減少)	中性化
4)	セメント成分の分解、Ca(OH) <sub>2</sub> の分解	化学的浸食
	鉄筋腐食(断面減少)	中性化
	剥離、剥落(断面減少)	凍結融解、塩分浸透
5)	水分逸散	熱(高温)、放射線照射

※文献3) 米国原子力規制委員会, NUREG-1801 (GALL Report)

文献4) スウェーデン国立試験研究所, Brandforsk Project 322-011

文献5) 原田ほか, コンクリート壁の耐火性能に及ぼす調合と含水率の影響

表-2 試験計画の概要

対象	項目	仕様・条件
養生条件	前養生	封かん養生91日間
	乾燥養生(含水率)	標準乾燥(気中養生)1年間 強制乾燥(加熱乾燥)1年間
	設計基準強度	24N/mm <sup>2</sup>
材料諸元	セメント種別	普通ポルトランドセメント
	粗骨材種別	硬質砂岩砕石
耐火試験体	試験体寸法	模擬壁(1700×1700×300mm)
	配筋要領	D16@200ダブル (かぶり厚さ40mm)
	試験体数	標準乾燥2体, 強制乾燥2体
含水率試験体	試験体寸法	600×600×300mm
	配筋要領	なし
	試験体数	標準乾燥2体, 強制乾燥2体
耐火試験方法	加熱曲線	ISO 834 標準加熱温度曲線
	評価対象	遮熱性(裏面温度上昇の増分)

表-3 コンクリートの使用材料

種類	記号	概要
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度3.14g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S1	硬質砂岩砕砂(表乾密度2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.61%, 粗粒率3.02)
	S2	山砂(表乾密度2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.35%, 粗粒率1.63)
粗骨材	G	硬質砂岩砕石(表乾密度2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.35%, 実積率60.0%)
水	W	地下水
混和剤	Ad	高性能AE減水剤

表-4 コンクリートの調合

呼び名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					SP (C×%)
			W	C	S1	S2	G	
27-18-20N	59.1	52.8	180	305	652	280	868	0.85

#### 4. 耐火試験体の製作

耐火試験体の立面図及び断面図を図-1に示す。耐火試験体は、幅1700mm×高さ1700mm×壁厚300mmとし、耐火試験で加熱を与える範囲は、試験体中央の1400mm×1400mmとする。ただし、外周に近い領域では、周囲への放熱影響により温度むらが生じる可能性があるため、裏面温度の評価範囲は温度が均一とみなせる試験体中央の600mm×600mmとした。

試験体の製作には、レディーミクストコンクリート(27-18-20N)を用いた。コンクリートのフレッシュ性状の試験結果を表-5に示す。全車ともに、目標としたスランプ(18±2.5cm)、空気量(4.5±1.5%)コンクリート温度(30℃以下)を満足した。コンクリートの打込みは、耐火試験時の加熱面が下となるように試験体を平置きとし、パイプレータを用いて締め固めを行った。

コンクリートの打込み後は、型枠ごとビニルシートで覆い封かん養生とした。材齢91日で脱型し、厚さ方向の周囲4面にアルミテープを貼付け、小口からの水分逸散を防止した。なお、脱型後の試験体は、縦置きとして乾燥養生を行った。

標準養生した供試体(φ100mm×200mm)の材齢28日と91日の圧縮強度、及び現場封かん養生した供試体の材齢28日、91日、以後1年間の乾燥養生期間における圧縮強度の経時変化を図-2に示す。

標準養生では材齢28日で31.7N/mm<sup>2</sup>、材齢91日で36.6N/mm<sup>2</sup>、現場封かん養生では材齢28日で30.7N/mm<sup>2</sup>、

表-5 フレッシュ性状の試験結果

台数	スランプ (cm)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	UW (kg/m <sup>3</sup> )	CT (℃)
1	18.5	29.0×29.0	4.8	2285	29
2	20.0	33.0×32.0	4.5	2293	29
3	18.0	30.5×29.0	5.5	2262	29

(記号) UW：単位容積質量，CT：コンクリート温度

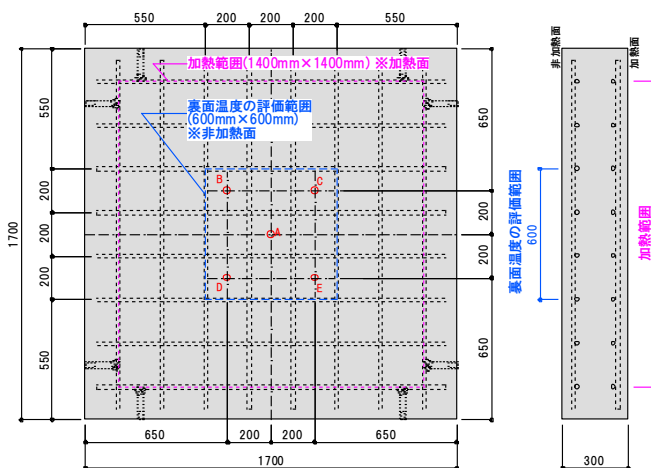


図-1 耐火試験体の立面図及び断面図

材齢91日で35.9N/mm<sup>2</sup>となった。現場封かん養生では、以後1年間の乾燥養生期間で圧縮強度を測定したが、圧縮強度の増進はわずかであった。1年間の乾燥養生終了後の圧縮強度は、標準乾燥(気中養生)で39.0N/mm<sup>2</sup>、強制乾燥(加熱養生)で38.1N/mm<sup>2</sup>となり、乾燥養生条件の違いによる差は殆ど認められなかった。

#### 5. 乾燥養生方法及び乾燥養生後の含水率

標準乾燥とした試験体は、温湿度管理のされていない屋内空間に縦置きで静置した。標準乾燥状況を写真-1に示す。標準乾燥期間における屋内空間の温湿度を図-3に示す。屋内空間の温度は概ね10~30℃の範囲、湿度は概ね20~90%RHの範囲となった。

強制乾燥を行う試験体は、材齢91日で脱型後、専用の養生建屋に縦置きで配置し、材齢98日より温風ヒータによる加熱を行った。養生建屋内部の制御温度は50℃とし、除湿剤を設置した。強制乾燥状況を写真-2に、強制乾燥期間における養生建屋内の温湿度を図-4に示す。温風ヒータを停止した計画停電時および3ヶ月毎の含水率測定試験時を除き、養生建屋内の温度は45~50℃、湿度は5~30%RHの範囲であった。

乾燥養生後の耐火試験体の乾燥程度を把握するため、同一の乾燥養生条件とした含水率試験体の含水率を測定した。含水率の測定方法は、φ100mm×300mmの乾式コア供試体を3ヶ月毎に3本ずつ採取し、表層より30mm

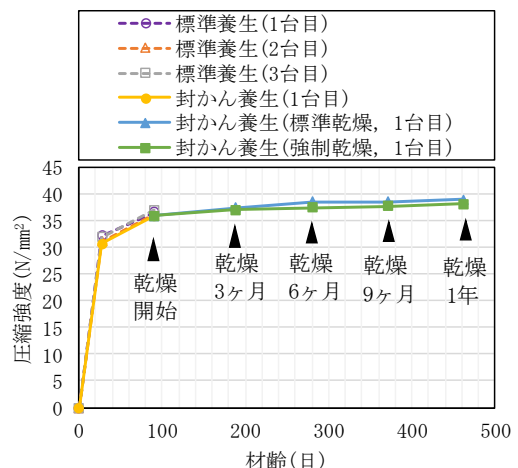


図-2 供試体(φ100mm×200mm)の圧縮強度の経時変化



写真-1 標準乾燥状況

写真-2 強制乾燥状況

間隔で10等分し、JASS 5N T-602に準じた105℃乾燥により試験片ごとの含水率を算定した。なお、コア供試体同士の距離はコア中心間で140mmとし、含水率試験体のコア採取痕の表面はアルミテープを貼付け水分逸散を防止した。

標準乾燥養生における含水率分布の推移を図-5に示

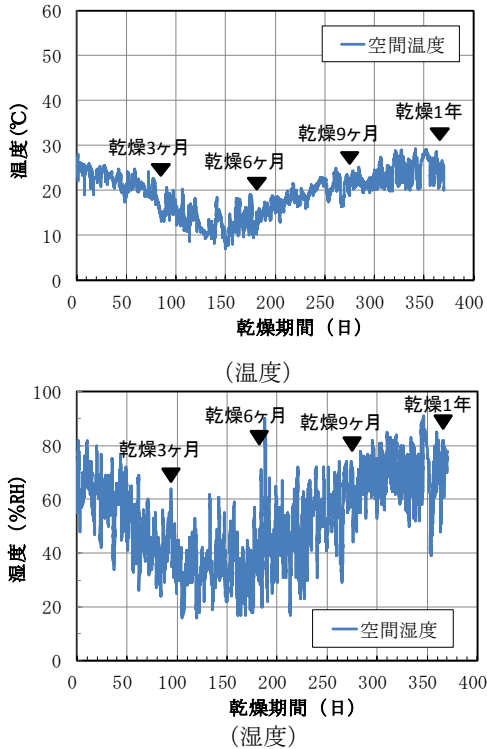


図-3 標準乾燥養生空間の温湿度

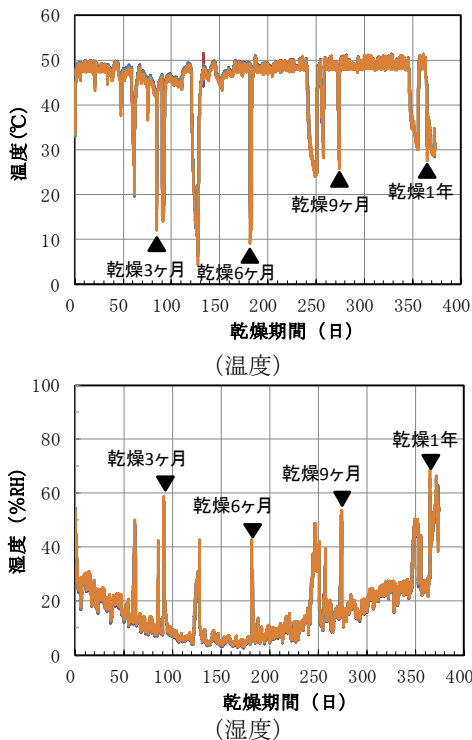


図-4 強制乾燥養生空間の温湿度

す。乾燥開始時点の含水率は全断面の平均値で6.4%であった。材齢経過に伴い、表層から乾燥が進行し、表層で含水率が小さく、中心部で大きい含水率分布が形成された。乾燥1年後では、試験体2体の平均含水率は中心部で5.3%、表層で4.0%、全断面の平均値で4.8%となった。

強制乾燥養生における含水率分布の推移を図-6に示す。標準乾燥養生と同様に、材齢経過に伴い、表層から乾燥が進行し、断面内には含水率分布が形成された。乾燥1年後では、試験体2体の平均含水率は、部材の中心部で3.2%、表層で1.2%、全断面の平均値で2.4%となった。標準乾燥養生と比較し、大幅に乾燥が促進されており、大きく含水率の異なる2種類の試験体を作製できた。

## 6. 耐火試験

耐火試験は壁用耐火炉を使用して行った。耐火試験状況を写真-3に示す。耐火試験の方法及び遮熱性の判定方法は、建築基準法に基づき国土交通大臣が指定した指定性能評価機関が定める「防耐火性能試験・評価業務方法書」に準拠した。

裏面温度の測定は、温度が均一とみなせる試験体中央の600mm×600mmの範囲で行い、測定数は5点とした。測定にはプレートタイプ(銅ディスク)のK熱電対を使用した。熱電対は試験体裏面の所定の位置に固定した後、

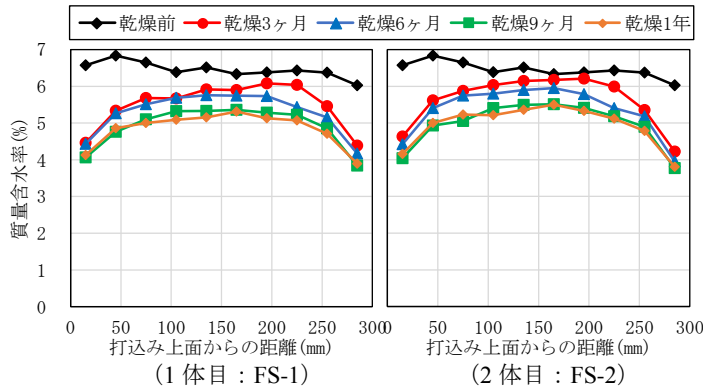


図-5 標準乾燥養生における含水率分布の推移

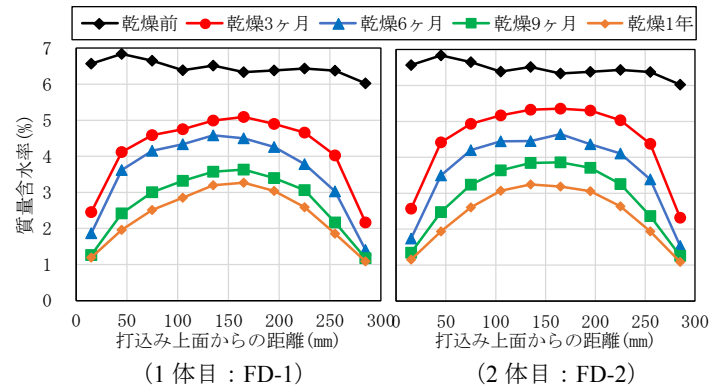


図-6 強制乾燥養生における含水率分布の推移

所定の断熱パッドと耐熱テープで覆った。炉内温度の測定は、試験体の加熱面から 100mm 離れた位置で行い、測定数は 5 点とした。

耐火炉内に設置したカメラにより撮影した、加熱終了直後の試験体の表面状況を写真-4 に示す。加熱開始から加熱終了まで (3 時間加熱)、試験体の加熱面には爆裂などの損傷は認められなかった。

## 7. 裏面温度の測定結果

### 7.1 裏面温度上昇 (増分) の測定値

裏面温度の測定結果を表-6 に示す。ここでは、試験体中央 5 点の平均値を示す。初期温度からの温度増分の最高値は、標準乾燥とした試験体 1 体目 (記号: FS-1) では平均 60°C・最高 62°C, 2 体目 (記号: FS-2) では平均 66°C・最高 66°C となった。一方、強制乾燥とした試験体 1 体目 (記号: FD-1) では平均 66°C・最高 67°C, 2 体目 (記号: FD-2) では平均 64°C・最高 65°C となった。

コンクリートの乾燥により、裏面温度増分の最高値は同等もしくはそれ以上となったが、その差は最大でも数°C程度であった。

### 7.2 標準乾燥と強制乾燥の比較

標準乾燥及び強制乾燥した試験体の裏面温度 (試験体中央 5 点の平均値) の経時変化の比較を図-7 に示す。

強制乾燥とした試験体 (FD-1, FD-2) は、標準乾燥とした試験体 (FS-1, FS-2) と比較して、裏面温度が上昇し始める時間はほぼ等しいが、その後の温度上昇速度 (温度上昇の勾配) が大きくなっている。加熱開始後 180 分では、強制乾燥とした試験体 FD-1 と FD-2 の裏面温度増分はともに 39°C に達しているが、標準乾燥とした試験体 FS-1 では 26°C, FS-2 は 31°C に留まり、コンクリートの含水率が低いほど温度上昇速度が大きい傾向を示した。この理由として、加熱を受けたコンクリートは、内部温度が 100°C となった位置で水分蒸発が生じて蒸発潜熱として熱が奪われるため、温度上昇が一時的に停滞し、コンクリート温度の上昇量が小さくなる。そのため、含水率が低いほど、水分が気化する際の蒸発潜熱 (吸熱) が小さくなり、コンクリートの温度上昇を助長するものと考えられる。

各試験体の裏面温度増分の最高値は、巨視的にはほぼ同等の値を示したが、標準乾燥とした試験体 FS-2 は、養生条件が同じ FS-1 に比べて裏面温度増分の上昇が大きく、その最高値は強制乾燥とした試験体 2 体とほぼ同等な値となっている。この理由について、次の通り考察した。

試験日の室内気温と裏面温度の実測値の経時変化を図-8 に示す。FS-1, FD-1, FD-2 では、加熱開始時における裏面温度と室内気温がほぼ等しいが、FS-2 では裏面温

度が室内気温より 5°C 低い。このことから、裏面温度と室内気温の初期値の差が影響しているものと推察される。裏面温度は、コンクリートの表面温度であるため、加熱面側からの熱移動の他、裏面に接する外気との温度差に応じた対流・放射熱伝達の影響を受ける。ただし、その影響度合いは数°C程度であり、有意な影響を及ぼすものではないと考えられる。

裏面温度が最高値を示した時点における、サーモグラフィカメラによる裏面温度の分布を写真-5 に示す。標準乾燥、強制乾燥試験体ともに、裏面温度の評価範囲とした試験体中央の 600mm×600mm の範囲では、ほぼ一様に温度が上昇しており、裏面温度が最高値を示した時点ではほぼ一様な温度分布となっていることが確認された。

以上より、大幅に乾燥が促進されたコンクリート試験体では、火災加熱を受けるコンクリート温度の上昇速度が大きくなる傾向が確認された。また、遮熱性の評価指標である裏面温度増分の最高値は、乾燥前と同等もしくはそれ以上となるが、その差は最大でも数°C程度に留まることが確認された。従って、経年に伴う乾燥がコンクリート構造物の遮熱性におよぼす影響は僅少であるものと判断される。

表-6 裏面温度の測定結果 (試験体中央 5 点の平均値)

記号	加熱前の断面内平均含水率 (%)	初期温度 (°C)	最高到達温度 (°C)	初期温度からの温度増分 (°C)	到達時間 (分)
FS-1	4.8	29	89	60	515
FS-2	4.8	23	89	66	501
FD-1	2.4	25	90	66	503
FD-2	2.4	23	87	64	506



写真-3 耐火試験状況



(FS-1 : 加熱後 180 分) (FD-1 : 加熱後 180 分)  
写真-4 加熱終了直後の試験体表面状況 (加熱炉内)



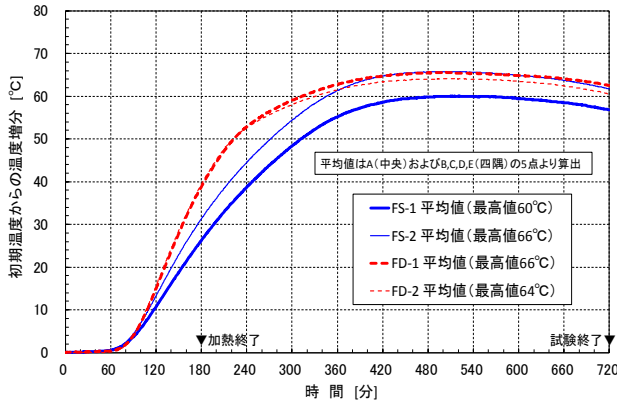


図-7 裏面温度(初期温度からの増分)の経時変化比較

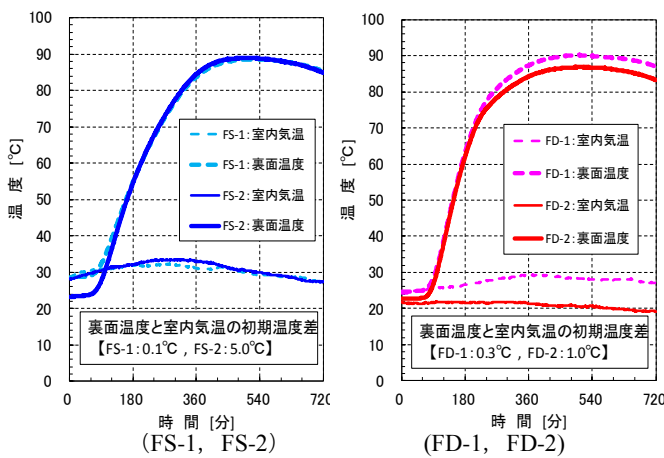
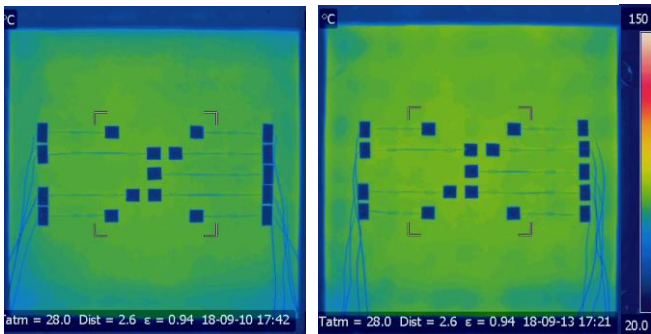


図-8 室内気温と裏面温度の実測値の経時変化



(FS-1:加熱後 520分) (FD-1:加熱後 500分)  
 写真-5 裏面温度が最高値を示した時点における  
 サーモグラフィカメラによる裏面温度の分布

## 8. まとめ

コンクリートの経年劣化が原子力施設の耐火壁の遮熱性に及ぼす影響を評価することを目的に、含水率が大きく異なる2種類の試験体による耐火試験をした。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 1年間の乾燥養生後の試験体の含水率は、標準乾燥では平均 4.8%、強制乾燥では平均 2.4%となり、大きく含水率が異なる2種類の模擬壁試験体を製作することができた。
- (2) 本研究でのコンクリート調合、試験体形状において、長期間の運転後の含水状態を模擬した強制乾燥試験体(FD)では、標準乾燥試験体(FS)に対し加熱時の裏面温度上昇速度が大きくなる傾向を示した。但し、遮熱性の評価指標である加熱裏面の温度上昇については、数°C程度の差であり、水分逸散が遮熱性に及ぼす影響は僅少である。

## 謝辞

本研究は電力共通研究の一環として実施したものである。本研究の実施にあたりご指導いただいた瀧口克己東京工業大学名誉教授、嵩英雄先生、畑中重光三重大学教授、岸本一蔵近畿大学教授、丸山一平名古屋大学教授に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 建材試験センター編：耐火性能試験・評価業務方法書，2001.6.1 制定，2018.2.1 改定
- 2) 日本建築学会編：原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説，2015
- 3) United States Regulatory Commission: NUREG-1801, Rev.2, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, Final Report, 2010.12
- 4) SP Swedish National Testing and Research Institute: Ageing effects on the fire resistance of building structures, Brandforsk Project 322-011, ISBN 91-7848-920-1, 2002
- 5) 原田和典ほか：コンクリート壁の耐火性能に及ぼす調合と含水率の影響，日本建築学会構造系論文集，第481号，pp.145-151，1996.3
- 6) 日本建築学会編：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事，2013