

## 論文 低放射化コンクリートのマスコンクリート部材への適用性の検討

藤倉 裕介<sup>\*1</sup>・西田 浩和<sup>\*2</sup>・片寄 哲務<sup>\*2</sup>・金野 正晴<sup>\*3</sup>

**要旨:** 原子力発電所の廃止措置時, 放射化したコンクリートをクリアランスレベル以下にし, 再利用可能なものにするため, 残留放射能が普通コンクリートよりも小さい低放射化コンクリートの開発を行ってきた。本研究では, 特に課題として挙げられてきた白色セメントを使用した低放射化コンクリートの水和熱の低減化を目的として, 低放射化混和材の使用による低発熱化を試み, その有効性を確認した。さらに, マスコンクリート部材となる原子炉遮蔽コンクリートへの適用性を確認するため, 温度応力解析を行い, 適切な低放射化混和材の置換で, 低発熱化と十分な強度発現が実現でき, 高いひび割れ抵抗性を示すことが分かった。

**キーワード:** 低放射化, 混和材, 原子力発電所, 残留放射能, クリアランスレベル

## 1. はじめに

原子炉周りの遮蔽コンクリート, 鋼材, 配管などの材料の多くは, 残留放射能の存在により低レベルの放射性廃棄物となる。コンクリートの建設時の価格は約 1.2 万円/m<sup>3</sup>であるが, 放射化されて放射性廃棄物となると, 埋設コストだけで, L1 区分で約 2800 倍, L2 区分で約 460 倍, L3 区分で約 65 倍に化けると予想されている<sup>1)</sup>。これらに測定費, 解体費, 詰替費, 被ばく対策の管理費などを加えると, 莫大な費用となることが予想される。コンクリート部分の放射性廃棄物をクリアランスレベル以下にし, 一般廃棄物として再利用可能なものにする, あるいは低い埋設区分に落とすことは, 資源の有効利用やコスト低減の観点から有益であると考えられる。

このような背景から, 著者らは原子炉周りのコンクリート部分の全てをクリアランスレベル以下とすることを目的として, 残留放射能が普通コンクリートの 1/10~1/300 になるようなコンクリートの開発<sup>2)</sup>を実施している。これまでに“1/10 低放射化コンクリート”および“1/30 低放射化コンクリート”といった 2 種類のコンク

リートを試作し, その基礎物性について紹介してきた<sup>3)</sup>。しかしながら, 白色セメントを使用した“1/30 低放射化コンクリート”は, 水和熱が大きく, 今後の大きな課題として残されていた。そこで, 本研究では, 主にこの“1/30 低放射化コンクリート”の低発熱化に着目して, 低放射化の混和材を使用し, 水和熱の低減化を試み, 基礎的な物性について調べた。さらに, マスコンクリート部材となる原子炉遮蔽コンクリートへの適用性を確認するため, 発熱特性や力学特性などの実験値を反映させた温度応力解析を行い, 低放射化の混和材の使用による温度ひび割れの抑制効果について検討することとした。低熱ポルトランドセメントを使用した“1/10 低放射化コンクリート”については, ブリーディング率などの改善を図ることとした。

## 2. 試験概要

## 2.1 使用材料および配合

低放射化コンクリートを実用化した金野らの実施した中性子照射実験<sup>2)</sup>によると, Eu や Co といった元素の含有量の少ない材料 (骨材: 高純度の石灰岩など, セメント: 白色セメント,

\*1 (株)フジタ技術センター 土木研究部 工修 (正会員)

\*2 (株)フジタ技術センター 建築研究部 工修 (正会員)

\*3 (株)フジタ技術センター 工博 (正会員)

低熱ポルトランドセメントなど)を選定することにより、 $\Sigma D/C$  ( $\Sigma D_i/C_i$ ,  $D_i$ :核種  $i$  の放射能濃度,  $C_i$ :核種  $i$  のクリアランスレベル) を小さくすることができ、普通コンクリートと比べて残留放射能の少ないコンクリートを製造できることが示されてきた。しかしながら、セメントとして白色セメントを使用した場合、特に水和熱が高いという問題が生じたため、セメントと置換できる低放射化の混和材を選択するためのスクリーニング試験が行われてきた<sup>4)</sup>。

表-1に、主に低熱化のために選択した低放射化の混和材と本試験で使用した骨材およびセメントの $\Sigma D/C$ を、参考として挙げた普通の材料と比較して示す。各種低放射化コンクリートの配合および $\Sigma D/C$ を表-2に示す。基準とした安山岩コンクリートの $\Sigma D/C$ は18.8である。Lシリーズは低熱ポルトランドセメントを使用した“1/10低放射化コンクリート”と呼ばれるもので、WTシリーズは白色セメントを使用した“1/30低放射化コンクリート”と呼ばれるものである。これらの配合に、低放射化の石灰石微粉末Cと低放射化のシリカフェームBを置換して、各種の物性試験を実施した。尚、低熱ポルトランドセメントを使用した“1/10低放射化コンクリート”に関しては、既往の試験<sup>3)</sup>で課題となったブリーディング率の改良などに注目して性状を調べた。

配合条件は、粗骨材の最大寸法を20mmとし、設計基準強度33N/mm<sup>2</sup>、スランプ15±2.5cm、空気量4±1%とした。所定のスランプ、空気量が得られるように高性能減水剤、AE助剤を使用した。

## 2.2 試験項目

### (1) フレッシュコンクリートの性状

コンクリートの練り上がり温度は20℃に設定し、練上がり直後のスランプ、空気量、コンクリート温度を測定した。また、凝結時間をJIS A 1147に準じて測定し、JIS A 1123に準じてブリーディング試験を実施した。

### (2) 力学特性

標準(水中)養生にて材齢7日、28日、91日

表-1 低放射化材料<sup>4)</sup>

No.	材料名	$\Sigma D/C^*$
1	石灰石微粉末C	1.10
2	シリカフェームB	0.65
3	石灰岩骨材D	0.106
4	白色セメントA	4.19
5	低熱ポルトランドセメントA	5.39
参考	玄武岩JB-1	25.8
参考	安山岩JA-1	16.1
参考	流紋岩JR-1	4.70
参考	普通ポルトランドセメントA	10.0
参考	シリカフェームH	2.26

\*熱中性子束 ( $E_n < 0.4\text{eV}$ )  $2 \times 10^5 \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のみと仮定し、40年運転、6年冷却として計算した。日本の原子炉に対するクリアランスレベルとしては、経産省省令第112号(2005.12.施行)のものを使用し、<sup>55</sup>Fe, <sup>60</sup>Co, <sup>134</sup>Cs, <sup>152</sup>Eu, <sup>154</sup>Euで評価した。

表-2 低放射化コンクリートの配合

記号	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			W/ (C+SF) (%)	s/a (%)	SP (C+SF) ×%	$\Sigma D/C^*$
	C	LP	SF				
L-1*	350	—	—	50	50	1.0	2.09
L-2	225	125	—	67	47	0.75	-
L-3	175	150	25	75	47	1.2	-
WT-1*	316	—	—	50	46	0.50	0.613
WT-2	250	100	—	60	46	0.85	0.785
WT-3	200	100	50	60	46	1.15	0.567
WT-4	133	140	100	69	46	2.10	0.294

C:セメント, L低熱ポルトランドセメント(密度3.22g/cm<sup>3</sup>), WT白色セメント(密度3.05g/cm<sup>3</sup>)  
 LP:石灰石微粉末C(密度2.71g/cm<sup>3</sup>)  
 SF:シリカフェームB(密度2.20g/cm<sup>3</sup>)  
 細骨材:石灰石砕砂(密度2.69g/cm<sup>3</sup>)  
 粗骨材:石灰石砕石(密度2.70g/cm<sup>3</sup>)  
 SP:ポリカルボン酸系高性能減水剤

\*L-1は“1/10低放射化コンクリート”<sup>3)</sup>を示し、WT-1は、“1/30低放射化コンクリート”<sup>3)</sup>を示す。

\*安山岩コンクリートの $\Sigma D/C=18.8$

における圧縮強度、割裂強度、静弾性係数を各JIS基準(JIS A 1108, JIS A 1113, JIS A 1149)に準じてそれぞれ測定した。

### (3) 長さ変化

100mm×100mm×400mmの鋼製型枠の中央に埋込み型ひずみ計((株)東京測器研究所社製KM-100BT)を設置し、室温を20℃、湿度を60%とした恒温恒湿の環境下でコンクリートの長さ変化を測定した。試験体は乾燥収縮および自己収縮の2体とした。試験体の養生条件は、打設から材齢7日までは封緘養生とし、材齢7日にて脱型を行い、乾燥収縮測定用の試験体は乾燥

(気中)養生し、自己収縮測定用の試験体は乾燥を防ぐ目的で、脱型直後に試験体全面をアルミ箔粘着テープでシールして養生を行った。

#### (4) 発熱特性

JCI SQA3 に準じ、空気循環式(二槽式)の断熱温度上昇試験機を用いて、コンクリートの断熱温度上昇量を測定した。上部φ410mm、下部300mm×高さ420mmの金属製円錐台形容器にコンクリートを打設して試験体とした。

### 3. 試験結果

#### 3.1 フレッシュコンクリートの性状

練り上がり直後のフレッシュコンクリートの性状を表-3に示す。スランプおよび空気量は、良好な値を示した。凝結時間は、低熱ポルトランドセメント単体での配合(L-1)が最も遅く、シリカフュームを含む配合では早くなる。

Lシリーズの配合では、混和材の使用によってブリーディング率が小さくなり、改良効果が表れていることが分かる。また、シリカフュームを含む配合では、ブリーディング水を生じず、ブリーディング率は0%であった。

#### 3.2 力学特性

標準養生における材齢と圧縮強度の関係を図-1, 2に示す。図中には式(1)で表される土木学会の提案式<sup>5)</sup>で近似した曲線を示し、各係数の算定結果を図-1, 2中にそれぞれ示す。

$$f'_c(t) = \frac{t}{a+bt} \cdot f'_c(28) \cdot d \quad (1)$$

ここで、 $f'_c(t)$ は材齢t日のコンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $f'_c(28)$ は材齢28日のコンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、a, b, dは係数を示す。

単位セメント量が少ない配合であっても、石灰石微粉末やシリカフュームによる空隙充填効果、各反応による水和組織の生成による強度増進の効果により、十分な強度が得られていることが分かる。しかし、WT-3, や WT-4 の配合では水酸化カルシウムの生成量とシリカフュームの反応率<sup>6)</sup>から推察すると、セメントと置換した多くのシリカフュームは未水和となる。すなわ

表-3 フレッシュコンクリートの性状

記号	SL (cm)	Air (%)	凝結時間 (hr : min)		ブリーディング率 (%)
			始発	終結	
L-1	13.0	4.6	7 : 08	9 : 46	11.4
L-2	17.0	3.5	4 : 25	7 : 49	1.13
L-3	16.0	4.9	4 : 25	5 : 57	0.00
WT-1	12.5	4.0	4 : 31	6 : 11	2.26
WT-2	14.5	5.0	3 : 11	4 : 33	0.57
WT-3	16.5	3.5	2 : 51	4 : 23	0.00
WT-4	17.0	3.8	3 : 25	5 : 29	0.00

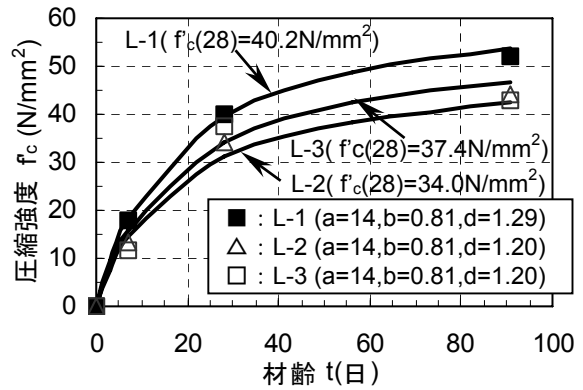


図-1 材齢と圧縮強度の関係 (L-1, 2, 3)

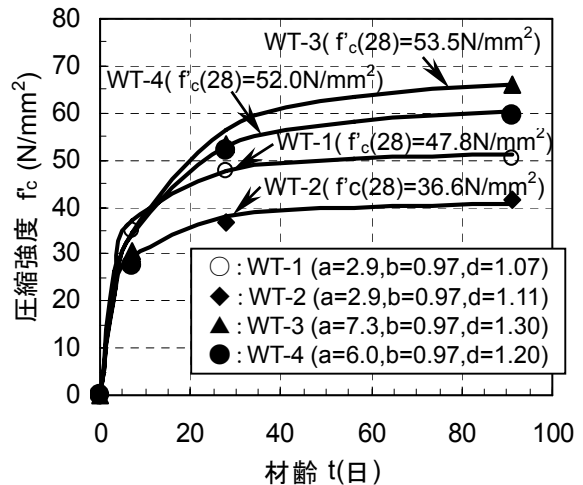


図-2 材齢と圧縮強度の関係 (WT-1, 2, 3, 4)

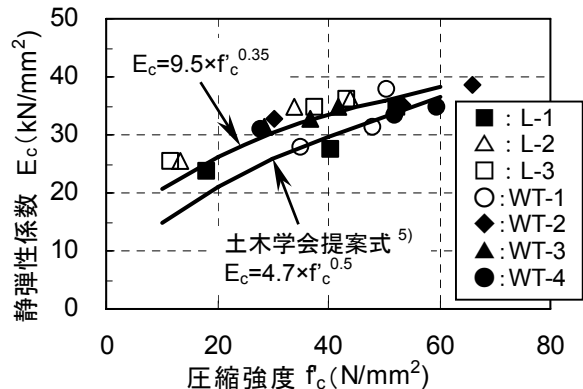


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

ち、シリカフュームは充填効果を有するものの、多くは水和反応に寄与していないと考えられる。

図-3は、圧縮強度と静弾性係数の関係を示し、図-4は、圧縮強度と割裂強度の関係を示す。両図中には、それぞれ土木学会で提案されている圧縮強度からの推定式<sup>5)</sup>を示す。静弾性係数、割裂強度ともに圧縮強度に対して土木学会で提案されている値よりも大きくなる傾向にある。今回の試験の範囲では、セメントの種類、混和材の置換率などの配合条件によらず、図-3、4中に示す式でそれぞれ近似した。

### 3.3 長さ変化

図-5に各配合における材齢150日までの乾燥収縮ひずみを示す。シリカフューム含有量の多いWT-3およびWT-4の配合に関して自己収縮ひずみを同図中に示す。ちなみに、WT-3とWT-4以外の配合における自己収縮ひずみは100 $\mu$ 以下であった。土木学会では、乾燥に伴うひび割れによって構造物の所要の性能が失われるひずみの限界値として、一般に500~700 $\mu$ としている<sup>5)</sup>。シリカフュームを多く含有し、自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみの比較的大きなWT-3やWT-4の配合においては、構造物の形状や鉄筋量などの影響について検討の余地を残すが、いずれの配合においても一般的な構造物に十分に適用できるものと考えられる。

### 3.4 発熱特性

断熱温度上昇試験の結果および式(2)による近似曲線を図-6、7に示す。また、式(2)中の終局断熱温度上昇量 $Q_{max}$ および係数 $\alpha$ 、 $\beta$ の算出結果をそれぞれ図-6、7中に示す。

$$Q = Q_{max} \times (1 - \exp(-\alpha \times t^\beta)) \quad (2)$$

ここで、 $Q$ は断熱温度上昇量(°C)、 $Q_{max}$ は終局断熱温度上昇量(°C)、 $t$ は材齢(日)、 $\alpha$ 、 $\beta$ ：発熱速度に関する係数を示す。

単位セメント量の低下、混和材の置換により、若材齢時における発熱は緩やかに上昇することが分かる。大幅に単位セメント量を減少させたWT-4の配合では差がみられるが、その他の配合ではセメント単体の配合と比べ、終局断熱温度

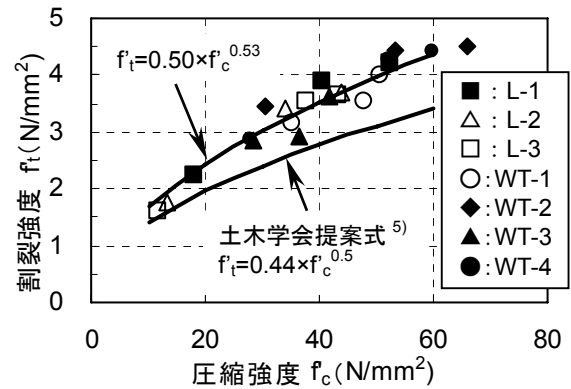


図-4 圧縮強度と割裂強度の関係

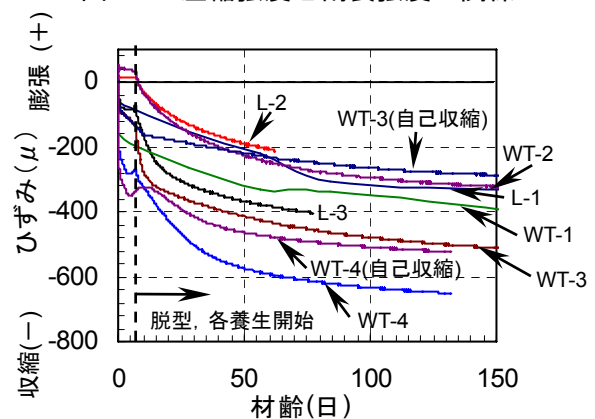


図-5 材齢と長さ変化の関係

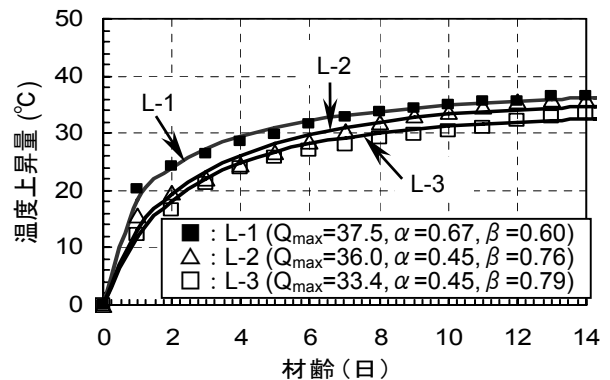


図-6 断熱温度上昇試験結果

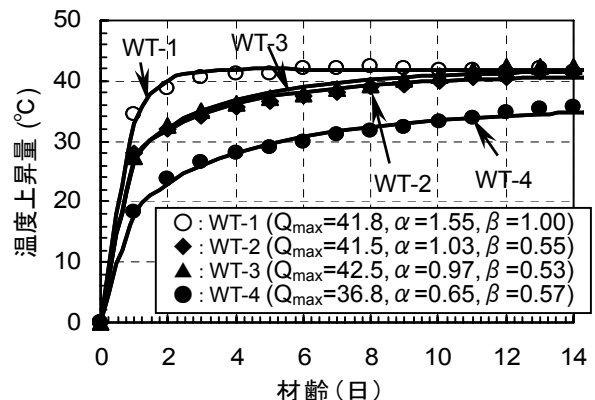


図-7 断熱温度上昇試験結果

上昇量に大きな差がみられない。これは、終局断熱温度上昇量は単位セメント量が少なくてもシリカフェームのポズラン活性と石灰石微粉末の水和への影響<sup>7)</sup>によって緩やかに増加すると考えられるが、既述のとおり WT-4 の配合では、水酸化カルシウムの生成量が少なく、シリカフェームを多く含んでも、その多くは水和に寄与していないことによると考えられる。

#### 4. 温度応力解析

##### 4.1 解析モデルおよび条件

表-2 に示す各配合に関し、原子炉遮蔽コンクリートへの適用を想定した 3 次元の温度応力解析を実施した。原子炉遮蔽コンクリート部分の解析モデルおよび境界条件を図-8 に示す。解析に用いた熱物性値を表-4 に示す。力学特性は、部材内で異なる温度履歴、有効ヤング係数やクリープなどを考慮した値を用いることが望ましいと考えられるが、本解析では配合の違いによる発熱特性と強度発現がひび割れ抵抗性へ与える影響を確認することを目的とし、力学特性は図-1～図-4 にて得られた実験値に基づく近似式を用い、発熱特性は図-6、7 に示す断熱温度上昇履歴から得られた各係数を用いた。なお、本解析では図-5 に示す収縮は考慮していない。コンクリートの打設温度、地盤の初期温度は 20℃とし、外気温度は 20℃一定の条件とした。ベースコンクリートの打設から 28 日後に遮蔽壁コンクリートの第 1 リフトを打設し、さらに 28 日後に第 2 リフトを打設する設定とした。第 1 リフト、第 2 リフトともに、壁の上面はコンクリート打設からコンクリート表面を露出するものとし、壁の側面は打設から 7 日後に脱型し、その後はコンクリート表面を露出するように熱伝達率を与えた。

##### 4.2 解析結果

温度応力解析の結果として、図-8 中に丸印で示す遮蔽壁部分の各打設リフト中央部の断面 A、B の中心および壁の内側表面の節点に着目した。解析結果に関し、材齢とコンクリート温度の関

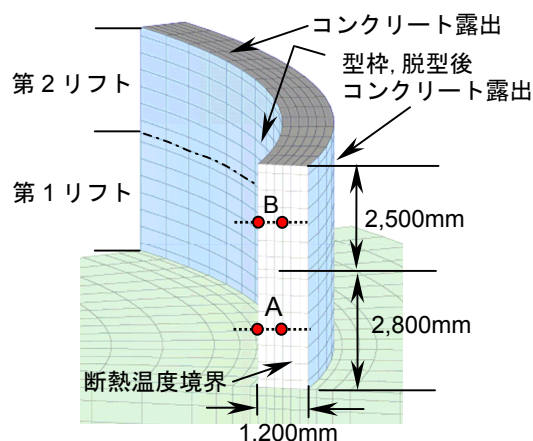
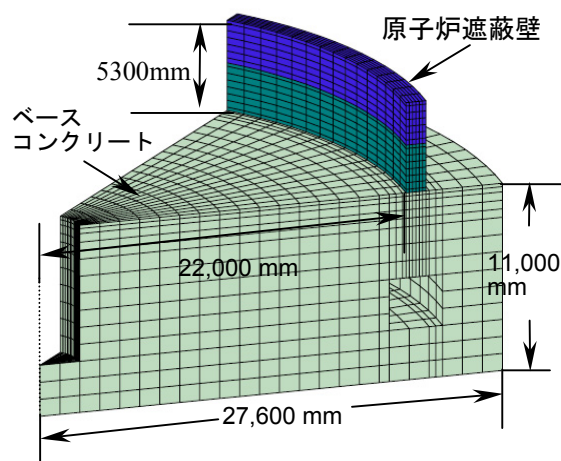


図-8 解析モデルおよび境界条件<sup>3)</sup>

表-4 解析に用いた熱物性値

材料	比熱 (kJ/kg°C)	熱伝導率 (W/m°C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> °C)	
				露出	型枠
コンクリート	1.15	2.7	2400	12.0	8.0
地盤	0.80	1.7	2600	—	—

線膨張係数=0.00001/°C

係、材齢とひび割れ指数の関係を調べた結果、各打設リフト断面の中心の節点で最高温度を示した。また、壁の内側表面の節点において内部拘束により引張応力が発生し、ひび割れ指数の低下がみられ、最小ひび割れ指数を示した。各配合におけるコンクリートの最高温度上昇量、最小ひび割れ指数、またそのときの各リフト打設後の材齢を表-5 に示す。終局断熱温度上昇量の最も小さい L-3 の配合が最も高いひび割れ指数を示していることが分かる。終局断熱温度上昇量の最も大きな WT-1 の配合では、ひび割れ指数が 1.0 を下回っており、ひび割れの発生確率は

表一五 断面 A, Bにおける最高温度上昇量と最小ひび割れ指数

配合	1 <sup>st</sup> リフト 断面 A				2 <sup>nd</sup> リフト 断面 B			
	断面中心の最高温度上昇量		表面の最小ひび割れ指数 ic		断面中心の最高温度上昇量		表面の最小ひび割れ指数 ic	
	温度(°C)	材齢(日)	指数	材齢(日)	温度(°C)	材齢(日)	指数	材齢(日)
L-1	18.60	1.8	1.47	1.0	18.54	1.6	1.52	1.0
L-2	15.64	2.5	1.75	1.5	15.49	2.3	1.85	1.5
L-3	14.84	2.5	1.88	1.6	14.68	2.3	1.99	1.5
WT-1	30.83	1.4	0.93	1.1	32.82	1.4	1.00	1.1
WT-2	25.40	1.4	1.22	1.0	25.42	1.3	1.28	1.0
WT-3	25.11	1.4	1.20	1.0	25.13	1.3	1.25	1.0
WT-4	17.67	1.4	1.80	1.0	17.62	1.6	1.89	1.0

高い。図-6, 図-7 より, WT-4 では, L-2 や L-3 と同等程度の終局断熱温度上昇量を示しているが, 特に若材齢時の発熱速度は若干速い傾向にある。しかしながら, WT-4 では L-1 や L-2 と比較して高いひび割れ指数を示していることが表-5 より分かる。これは, L-1 や L-2 と同様に低発熱であるにも関わらず, 図-2 に示すように若材齢時の強度発現が十分であり, 高いひび割れ抵抗性を有したものと推察できる。

## 5. まとめ

- (1) 低放射化混和材を使用して, “1/30 低放射化コンクリート”の配合試験および基礎物性試験を行った結果, 良好な性状が得られるとともに低発熱化が可能であることが分かった。
- (2) 白色セメントと低放射化混和材を使用した配合では, 低熱ポルトランドセメントを使用した場合と同程度の低発熱特性を示し, 十分な強度発現も得られることが分かった。
- (3) 温度応力解析を行った結果, 適切な低放射化混和材の置換により, 低発熱化と十分な強度発現で高いひび割れ抵抗性を示すことが分かった。
- (4) 低放射化混和材を使用して, “1/10 低放射化コンクリート”の配合試験および基礎物性試験を行った結果, ブリーディング率などの大幅な改善が見られた。
- (5) 今後は, これら低放射化コンクリートの耐久性に関して検討を行い, さらに高性能な低放射化コンクリートの開発を行う予定である。

謝辞：本報告は, 「資源エネルギー庁・平成 18 年度革新的実用原子力技術開発費補助事業」の成果の一部である。

## 参考文献

- 1) 経済産業省総合エネルギー調査会原子力部会廃止措置対策小委員会公開資料, 1997
- 2) 金野正晴: 低放射化コンクリートの開発の現状, コンクリート工学, Vol.42, No.6, pp.3-10, 2004.6
- 3) Fujikura, Y. et al. : Feasibility Study on Application of Low-activation-concrete to Biological Shielding Wall in Light Water Reactor, Proceedings of 2<sup>nd</sup> ACF International Conference, pp.175-182, 2006.11
- 4) 長谷川晃ほか: クリアランスレベル以下にするための低放射化設計法に関する技術開発, 資源エネルギー庁・平成 17 年度革新的実用原子力技術開発費補助事業報告書, 2006.3
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 2002 年版【施工編】, 2002
- 6) 小菅啓一, 坂井悦郎, 大門正機, 浅賀喜与志: シリカフェュームのポゾラン反応と反応率測定方法, 土木学会, コンクリート技術シリーズ No.4, pp.1-6, 1993
- 7) Kishi T., and Saruul D. : Hydration Heat Modeling for Cement with Limestone Powder, IABSE COLLOQUIUM PHUKET, pp.133-138, 1999