

論文 ポゾランを高含有したコンクリート中の鉄筋腐食挙動

入矢桂史郎^{*1}, 高橋敏樹^{*1}, 三原守弘^{*2}, 本田明^{*2}

要旨：数千年以上の半減期の核種を含む放射性廃棄物の処分では，セメント系材料の溶出による高アルカリ性環境が，ベントナイトなどのバリア材料を変質させる可能性がある。そのため，浸出液の pH が低いポゾランを高含有したセメントの開発を実施してきた。本研究は，ポゾランを 80% 高含有させたコンクリート中の塩化物イオン浸透特性と鉄筋腐食挙動の両方を乾湿繰り返し鉄筋腐食促進試験により調査した。ポゾランを高含有したコンクリートでは，塩化物イオンが浸透しなくても鉄筋の腐食が生じやすいが，水結合材比を 30% と小さくすることで鉄筋は腐食しにくくなることが示された。

キーワード：ポゾラン，フライアッシュ，シリカフェーム

1. はじめに

数千年以上の長半減期の核種を含む放射性廃棄物の処分施設は地下深部に建設し，人工バリアと天然バリアの組み合わせによる多重バリアシステムにより，放射性核種を生物圏から隔離するコンセプトが採用されている。人工バリア材料としては，処分施設作業時の力学的性能に着目したセメント系材料と膨潤に伴う自己シール性とコロイドなどのろ過能力に優れたベントナイトとの複合バリアの検討が行われている¹⁾。

しかし，セメント系材料が数千年以上の長期にわたりベントナイトや岩盤と接触すると，その浸出液が示す高い pH (12.5 以上) の影響によりベントナイトや周辺岩盤を変質させることが懸念されている^{2), 3)}。筆者らは，普通ポルトランドセメント(以下 OPC)をフライアッシュ(以下 FA) やシリカフェーム(以下 SF) などのポゾラン材料で 50% 以上置き換えることによって，浸出液の pH を 11 以下にしたセメント(以下 HFSC: Highly Fly ash contained Silica fume Cement)を開発し，実用性を確認した⁴⁾。しかし，HFSC は，pH11 程度の低アルカリ性を呈するため，これを用いたコンクリート中に補強

材として使用される鉄筋などの鋼材表面に不動態皮膜が形成されにくくなり，腐食が早期に生じる恐れがある。

本研究では，HFSC の鉄筋コンクリートとしての適用性について検討するために，同一の水結合材比(以下 W/P)の OPC と HFSC を用いたコンクリートを作製し，塩化物イオン濃度や鉄筋のかぶり厚さ，ひび割れの有無などをパラメータとして乾湿繰り返しによる鉄筋腐食促進試験を実施し，HFSC コンクリートの塩化物イオン浸透特性とコンクリート中の鉄筋腐食挙動について実験的研究を行った。

2. 鉄筋腐食促進試験方法

2.1 試験のパラメータ

OPC と HFSC を使用し，W/P が 30% および 60% のコンクリートで鉄筋腐食促進試験を実施することにより，HFSC の塩化物イオン浸透特性と鉄筋腐食特性に及ぼす 塩化物イオン濃度の影響 かぶり厚さの影響 ひび割れの有無およびひび割れ幅の鉄筋腐食への影響について評価を行った。鉄筋腐食促進試験方法は供試体中に鉄筋を埋め込み外部から塩化物イオンを乾湿

*1 大林組技術研究所土木材料研究室 材料・施工グループ (正会員)

*2 核燃料サイクル開発機構東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部処分材料研究グループ (正会員)

繰り返しにより浸透させて鉄筋の腐食状況を調査するのが一般的である。また塩化物イオンが最初から存在する状態での腐食状況について検討を加えた。表 - 1 に試験の組み合わせを示す。

2.2 使用材料と配合

鉄筋腐食促進試験に使用した HFSC は、ポゾランを 80% 含むセメントで OPC:SF:FA の比を重量で 2:2:6 としたものである。コンクリートに使用した材料と供試体に埋め込んだ鉄筋の仕様を表 - 2 に示す。コンクリートは、W/P30% では自己充填可能な高流動コンクリートの仕様とし、スランプフローの目標値を $65 \pm 5\text{cm}$ とした。W/P60% では締め固めを行う通常のコンクリートの仕様とし、スランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$ とした。コンクリートの配合を表 - 3 に示す。

2.3 促進試験方法

(1) 促進方法と供試体寸法

供試体を練混ぜ後 28 日間 20℃ で水中養生した後、促進試験を開始した。促進試験は 3 日間 50℃ の人工海水(金属腐食試験用人工海水:各元素濃度は ASTM D1141-90 に相当、塩化物イオ

ン濃度は 1.8%)に浸漬した後、4 日間 50℃、60%RH の室内で乾燥させたものを 1 サイクルと称し、全部で 13 サイクル(試験期間 91 日)の繰り返しを行った。また、浸漬水の塩化物イオン濃度をパラメータとして試験は、この人工海水を 1.5 倍に濃縮した溶液(塩化物イオン濃度 2.7%、以下濃縮人工海水)も用いた。

浸透した塩化物イオン量を測定する供試体は、直径 15cm × 高さ 15cm の円柱供試体を使用した。上面の 1 面を残して周辺をエポキシ樹脂で十分厚くコーティングし、1 面からの塩化物イオンの浸透性を評価できるようにした。鉄筋の腐食を調査する供試体は、10cm × 10cm × 20cm の直方体で、図 - 1 に示すように上面から所定の位置(25mm を基本とし 15mm、35mm)に鉄筋が埋め込まれ、上面のみを残して他の 5 面は十分厚くエポキシ樹脂で被覆している。ひび割れ形成は、供試体中央に厚みを精度よく調整したセルロイド板をコンクリート打設時に埋め込み、硬化後引き抜くことによって、所定の幅のひび割れを形成した。

初期塩分を混入した供試体の作製方法は、あらかじめ塩化物イオン濃度 0.6% の人工海水を

表 - 1 塩分浸透促進試験の組み合わせ

試験名	セメントの種類	水セメント比(%)	固定条件	パラメータ
塩水濃度	OPC	30	かぶり 25mm	人工海水濃度 塩化物イオン濃度 1.8%, 2.7%
		60		
	HFSC	30		
		60		
かぶり	OPC	30	人工海水濃度 100%	かぶり 15・25・35mm
		60		
	HFSC	30		
		60		
ひび割れ幅	OPC	30	人工海水濃度 100%	ひび割れ幅 0.2・0.5・1.0mm
		60		
	HFSC	30		
		60		
内部塩分	OPC	30	人工海水濃度 100%	水道水 希釈人工海水 (塩化物イオン濃度 0.6%)
		60		
	HFSC	30		
		60		

表 - 2 使用材料

材料の種類	メーカー・産地	密度 (g/cm ³)	備考
OPC	T社製	3.16	
SF	ノルウェー	2.20	
FA	碧南火力	2.38	最大粒径20μ
細骨材	静岡県小笠	2.59	陸砂F.M.2.77
粗骨材	茨城県岩瀬	2.64	砕石F.M.6.5
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸	1.07	
鉄筋			磨き鋼棒 直径13mm

表 - 3 コンクリートの配合

記号	セメント	W/P	目標スランプまたはフロー	s/a	単位量(kg/m ³)						
					W	P			S	G	SP (%×C)
						OPC	FA	SF			
OPC30	OPC	30.0	65 ± 5	55.0	165	550		550	877	732	1.65
OPC60		60.0	12 ± 2.5	48.0	165	275		275	883	988	0.70
HFSC30	HFSC	30.0	65 ± 5	55.0	165	110	330	110	807	673	3.00
HFSC60		60.0	12 ± 2.5	48.0	165	55	165	55	854	953	1.35

作製し、これを混練水として使用して練り混ぜた。使用したコンクリートの単位水量が 165kg/m^3 であるので、 1kg/m^3 の塩化物イオンがコンクリート中に混練されたことになる。

(2) 遮塩性および鉄筋腐食の評価方法

コンクリート中の塩化物イオン量の測定は、JCI-SC5(硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法)に準じて行い、塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法により全塩分量の測定を行った。なお、測定位置は、試料の切断に用いたカッターの厚み等から決まる最小厚さ 10mm 毎とし、表面から 0~10mm、10~20mm、20~30mm、30~40mm とした。

鉄筋の腐食面積の測定は、13 サイクル終了後鉄筋を取り出し、端部の影響を取り除くために、長さ方向の中心から 50mm ずつ計 100mm の部分について行った。測定方法は透明なシートを鋼材に当て、発錆している部分を写し取り、その面積の合計を mm^2 単位で測定した。なお、明らかに汚れと判断できる薄い皮膜状の付着物については発錆部分と認めなかった。

腐食減量については、腐食面積を測定後の鉄

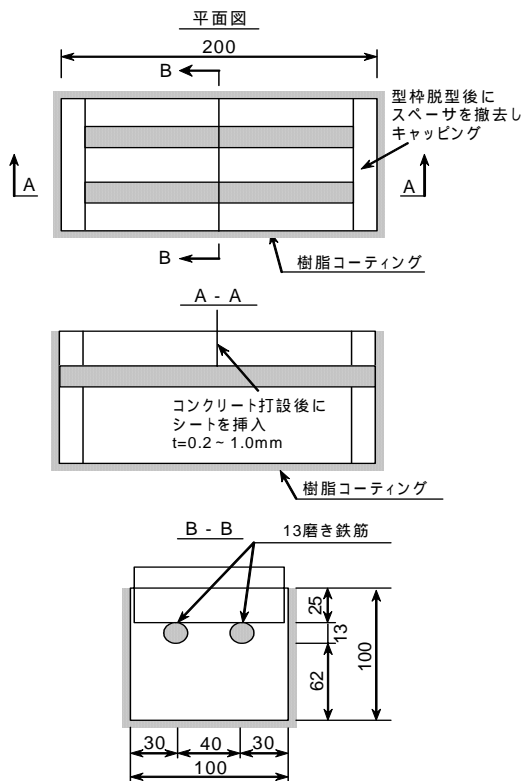


図 - 1 鉄筋腐食試験供試体 (単位: mm)

筋をクエン酸アンモニウム 10% 水溶液に浸漬し、除錆処理を行った後、水洗・乾燥後に質量を測定し、腐食減量を算出した。腐食減量の測定では、腐食面積と異なり端部の影響を取り除くことが困難なため、鉄筋全体の減量とした。

腐食試験を行った供試体の pH の測定は、鉄筋を取り出した際の供試体から粗骨材を取り除き 5mm 以下に粉碎し、液固比 2:1 の条件で蒸留水に 3 日間浸漬した後 20 で pH を測定した。pH を測定した試料の一部を使用して、水銀圧入法により総細孔率も測定した。

3. 試験結果

3.1 塩化物イオン浸透性

人工海水と濃縮人工海水の条件における促進

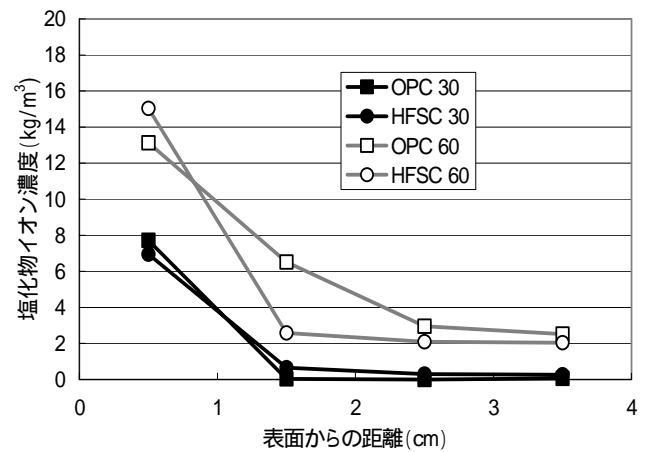


図 - 2 塩化物イオン濃度分布

(人工海水: 塩化物イオン濃度 1.8%)

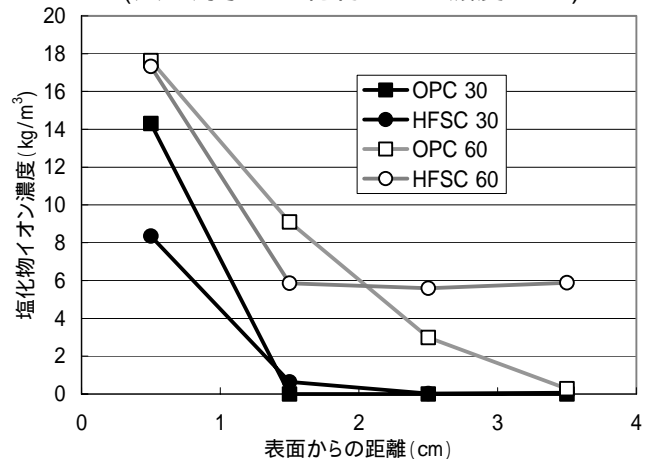


図 - 3 塩化物イオン濃度分布

(濃縮人工海水: 塩化物イオン濃度 2.7%)

試験後の塩化物イオン濃度の分布を図 - 2 および図 - 3 に示す。縦軸はコンクリート中に含まれる塩化物イオン濃度とした。W/P60%で OPC(以下 OPC60)と HFSC(以下 HFSC60)を比較すると、HFSC60 の方が表面部の塩化物イオンの浸透量が多いが、内部の浸透量は少なくなった。ただし、HFSC60 では表面から 15mm 以深の塩化物イオン濃度にあまり差がない。HFSC60 ではセメント硬化体の組織がポーラスなために、塩化物イオンが内部へ浸透する量は少ないが、浸透深さは大きくなるのではないかと推察される。また、W/P30%では OPC (以下 OPC30) および HFSC(以下 HFSC30)ともに大きな差は認められない。

この結果から、腐食試験の鉄筋位置 25mm において、OPC60、HFSC60 とも OPC で鉄筋腐食が生じるとされている塩化物イオン量 1.2kg/m^3 を超えていることがわかる。また、W/P30%では、表面から 15mm において 0.5kg/m^3 以下の少量の塩化物イオン量で、鉄筋位置まで塩化物イオンは達していない。一般にシリカフュームを使用すると、遮塩性が向上するといわれている⁶⁾。しかし本実験においては、HFSC のようにフライアッシュを多量に含んでいる場合には、シリカフュームによる遮塩性向上の効果は W/P が大きい場合には認められるが、小さい場合や濃縮海水の場合には顕著には認められなかった。

3.2 ひび割れ無し供試体の腐食性状

(1) 外部塩分による影響

促進試験により得られた鉄筋の腐食面積率を図 - 4 に示す。OPC30 では、かぶり 25mm と 35mm については、図 - 2 に示したように鉄筋位置で腐食が発生する塩化物イオン量に達していないことから、鉄筋の腐食は見られなかった。しかし、同じ W/P の HFSC30 では、OPC30 と同様に鉄筋位置で塩化物イオン量は腐食限界値に到達していないにもかかわらず、かぶり 25mm と 35mm の鉄筋表面は腐食していた。また、塩化物イオンが鉄筋まで到達している OPC60 および HFSC60 ともに鉄筋は腐食しているが、

HFSC60 の方の腐食面積率が大きく、ほぼ全面が腐食している。さらに、鉄筋位置が表面に近いほど腐食面積率が大きくなっている。

鉄筋位置を変えた試験における鉄筋の腐食減量率の測定結果を図 - 5 に示す。試験結果は腐食面積率の測定結果とほぼ同じ傾向にあるが、試験期間が短くほとんど腐食減量が進んでいないために、減量率の定量化については十分に評価できなかった。

(2) 内部塩分の影響

次に塩化物イオンが最初から混入している場合の影響について、図 - 6 に塩化物イオン濃度 0.6%の希釈人工海水でコンクリートを混練した場合と水道水を使用した場合の比較を示す。希釈人工海水で混練した場合は、OPC も HFSC

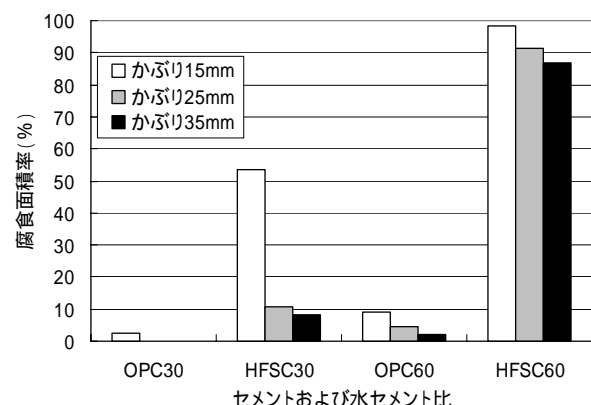


図 - 4 腐食面積率

(人工海水；塩化物イオン濃度 1.8%)

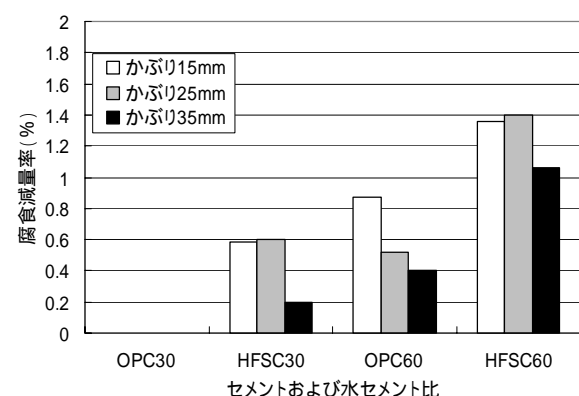


図 - 5 腐食減量率

(人工海水；塩化物イオン濃度 1.8%)

も腐食しているが、HFSC の腐食面積率が大きい。また、W/P が大きいと腐食面積率が大きい結果となった。HFSC においても OPC と同様に塩化物イオンが存在すれば鉄筋は腐食しやすくなることが認められる。

3.3 ひび割れ供試体の腐食性状

人工海水で鉄筋位置 25mm の供試体において、ひび割れ幅を変化させた試験を行い、鉄筋の腐食面積率を測定した。その結果を図 - 7 に示す。ひび割れの無い部分からも塩化物イオンが鉄筋に到達し、腐食が進行している HFSC60 のケースでは、ひび割れ幅の影響は顕著ではない。しかし、ひび割れの無い部分からは塩化物イオンが到達していない HFSC30 のケースでは、ひび割れは幅が増大するにしたがって、腐食面積率が大きくなった。

3.4 圧縮強度と総細孔率

表 - 4 に試験開始材齢である 28 日と試験終了材齢である 119 日の標準養生供試体の圧縮試験結果を示す。HFSC の圧縮強度は OPC に比べて低く、HFSC60 では 10N/mm^2 であった。

W/P30% の供試体について、試験を終了した材齢 119 日の供試体から試料を採取し、総細孔率を測定した結果を表 - 5 に示す。総細孔率は HFSC のほうが 5% 程度大きく、W/P が 30% であっても OPC に比べポラスである。同一 W/P において HFSC の圧縮強度が OPC に比べて低いことと HFSC の方が OPC に比して間隙率が大きいことと対応している。

3.5 pH

HFSC30 の浸出液の pH は試験終了後で 11.0 であった。促進試験開始時の pH は、11.5 であり、試験中もポゾラン反応は持続し pH が低下していることがわかる。この測定結果から供試体中の鉄筋は試験中、pH11.5 ~ 11.0 の環境に置かれたものと考えられる。

4. HFSC 中での鉄筋腐食に関する考察

4.1 ひび割れがない場合の鉄筋腐食

強度的に同じレベルにある HFSC30 と OPC60 の試験結果を比較して両セメント中での鉄筋腐

食性状について比較検討した。供試体の鉄筋位置は、深さ 15mm、25mm、35mm であるが、すべての同じ深さ位置での浸透塩分量は、OPC60 に比べて HFSC30 は少ない。しかし、鉄筋の腐食面積率はすべての同じ深さ位置で HFSC30 の

表 - 4 試験時の圧縮強度

セメントの種類	W/C(%)	圧縮強度(N/mm ²)	
		28日 (試験開始)	119日 (試験終了)
OPC	30	88.9	99.3
HFSC		33.8	54.5
OPC	60	34.2	42.3
HFSC		6.3	10.5

表 - 5 総細孔率と pH

セメントの種類	W/C(%)	総細孔率 (%)	pH
OPC	30	12.46	12.70
HFSC		17.20	11.05

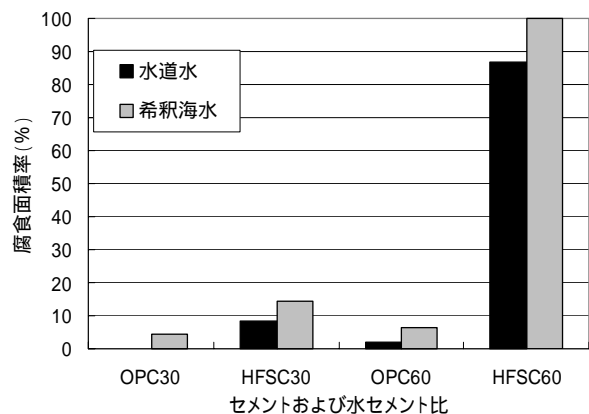


図 - 6 腐食面積率 (塩化物イオンの有無) (人工海水; 塩化物イオン濃度 1.8%)

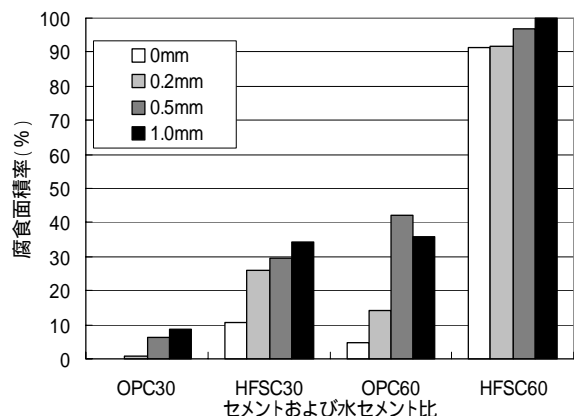


図 - 7 腐食面積率 (ひび割れ有) (人工海水; 塩化物イオン濃度 1.8%)

方が大きい。また、HFSC30では浸透塩化物イオン濃度が高くなる表面部に近い位置で腐食面積率が增大している。OPC60では、塩化物イオン浸透量が少ないかぶり35mmではほとんど腐食が進んでいないが、HFSC30のかぶり35mmでは腐食が進行している。HFSC30ではコンクリート間隙水のpHが11.0程度と低いために、塩化物イオンが浸透しなくても鉄筋が腐食しやすい環境にあるものと思われる。しかし、塩化物イオンが浸透すれば、腐食がさらに促進することも認められた。一方OPC60ではpHが高く鉄筋が不動態で保護されているので、塩分が浸透しなければ腐食は進行しないと考えられる。

以上から、OPC60とHFSC30は強度的には同じレベルであるが、コンクリート内部の鉄筋の腐食メカニズムは異なることが示唆される。

4.2 ひび割れを有する場合

OPC60とHFSC30について比較検討する。ひび割れ幅の影響を比較した試験結果は、OPC60とHFSC30がほぼ同じような腐食面積率となっている。しかし、細かく見ると以下の点に相違が見られる。HFSC30では、ひび割れがない場合と幅0.2mmでの腐食面積率がOPC60に比べて大きい。OPC60ではひび割れ幅が小さいケースでは腐食がほとんど進行していないが、HFSC30ではひび割れ幅が小さくても腐食が進行しやすくなる。HFSC30ではpHが低い分、ひび割れが発生した場合、鉄筋を保護する能力がOPCに比べ低いと考えられる。

5. 結論

ポゾランを80%置換した、浸出液のpHが11程度のコンクリート中での鉄筋腐食に関する促進試験の結果から、次のことが明らかになった。

- a) HFSCを用いたW/Pが60%のコンクリートは、28日材齢の強度が 10N/mm^2 と小さく、かつ、塩化物イオンの存在の有無に係わらず鉄筋の腐食しやすい状況にある。
- b) HFSCの塩化物イオン浸透量は、W/P一定の条件で比較して、W/P60%では、OPCより小さ

いが、W/P30%では表面にのみ塩化物イオンの浸透がある条件で、OPCとほぼ変わらない。

- c) HFSCを用いたW/P30%のコンクリートとOPCを用いたW/P60%のコンクリートの鉄筋の腐食面積率にはあまり差がなかった。しかし、腐食のメカニズムから見るとHFSC中の鉄筋はOPC中のものと比較して、塩化物イオン濃度が高なくても腐食するのに対して、OPC中では塩化物イオンがある程度浸透しないと腐食しない結果を得た。

以上から、ポゾランを80%と高含有させたコンクリートは浸出液のpHが11程度で、普通コンクリートに比べて鉄筋が腐食しやすい環境にあるので、W/Pを小さくし緻密化させ、水や空気の浸透を防ぐとともに、腐食を促進させる塩化物イオンの浸透を遅らせるなどの対応が必要である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構・電気事業連合会：TRU 廃棄物処分概念検討書，JNC TY1400 2000-001，2000.3
- 2) 久保博他：ベントナイト系緩衝材のコンクリート間隙水による長期変質の基礎研究，地盤工学会誌，1998.10.
- 3) 大和田仁他：アルカリ溶液中での花崗岩の変質挙動，JNC TN8400 2000-027，2000.8
- 4) 入矢桂史郎他：ポゾランを高含有した低アルカリ性コンクリートの開発，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.185~190，2003.6
- 5) 例えば，鳥居和之他：種々のポゾランを使用したコンクリート中の鉄筋の腐食状況，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.1，pp.489~494，1990
- 6) 土木学会シリカフェーム調査研究小委員会：シリカフェームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー，No.80，土木学会，1995