

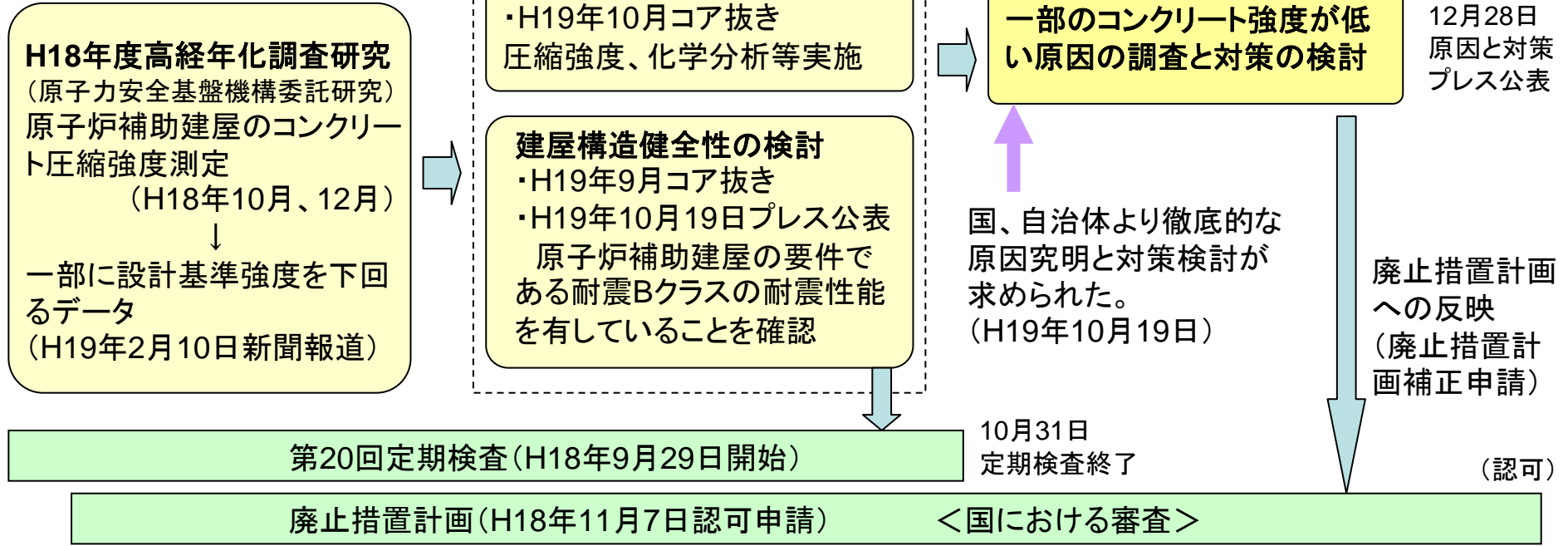
新型転換炉ふげん発電所における 原子炉補助建屋のコンクリート強度の低い 原因等について

平成20年1月16日

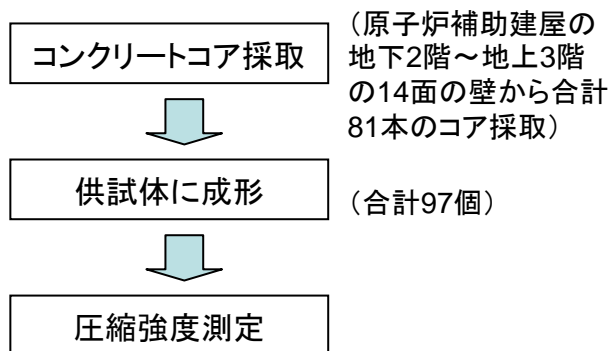
独立行政法人日本原子力研究開発機構

経緯及び圧縮強度の測定

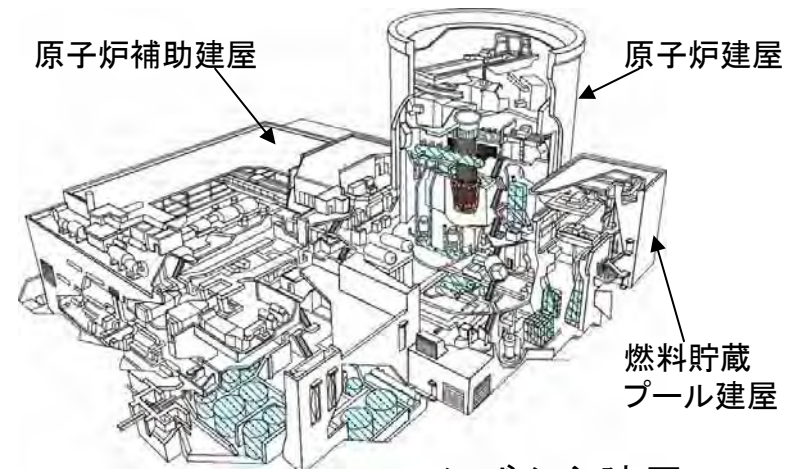
【経緯】



【圧縮強度の測定】 (H18年10月・12月、19年9月・10月に実施)



コアボーリングによる試料採取



ふげん主建屋

コンクリート圧縮強度測定結果

単位: N/mm²

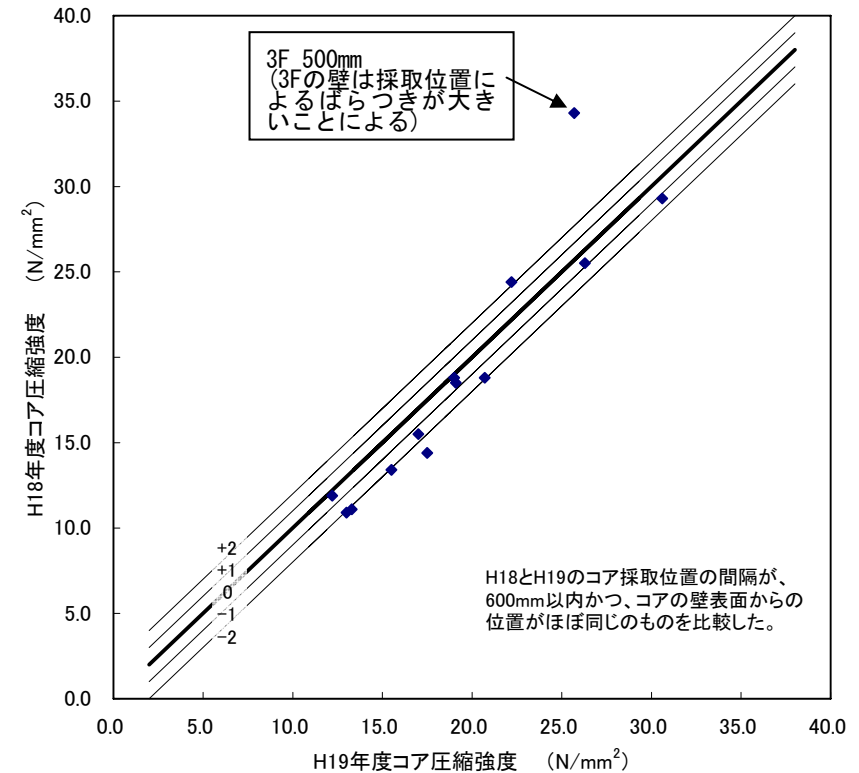
壁の位置		壁厚 (mm)	H18年10月,12月 (高経年化研究)	H19年9月 (構造健全性)	H19年10月 (要因分析)
地上3階	外壁北面	250	13.3 13.4 15.5 16.5	—	15.5 16.9 17.0
	ホット計器修理室	250	—	12.2 12.4 14.1	—
	外壁南面	500	20.9 29.3 34.3 36.6	21.3 25.7 30.9	—
1100		—	38.2 41.8 45.2	—	
地上2階	原子炉補機室	400	—	18.3 19.2 19.4	—
	タービンフロア側壁	750	—	23.4 25.9 27.7	—
地上1階	常用エアロック通路	400	—	12.9 15.3 25.4	—
	タービンフロア側壁	800	—	32.0 43.1 51.1	—
	貯蔵タンク室(遮へい壁)	1000	—	26.9 27.3 27.9	20.8 24.7 25.2
地下1階	常用電気室(北側)	400	10.6 10.9 11.1 11.9 12.4 12.1 12.8 12.8 13.3 14.0	—	12.2 13.0 13.3
	貯蔵タンク室(遮へい壁)	1000	—	20.2 26.4 30.5	18.8 20.3 24.4
	常用電気室(東側)	1500	23.4 24.4 25.5	25.8 30.2 31.8	23.0 26.3 28.5 14.7 22.2 13.4 15.6 20.1 20.9 21.1 (長さ10cmの短尺供試体)
地下2階	非常用電気室(南側)	400	16.9 17.9 17.9 18.5 18.7 18.8 18.8 18.9 19.4	—	19.0 19.1 20.7
	非常用電気室(北側)	1000	27.4 29.8 14.4 29.3	34.0 36.4 34.2	17.5 30.6
	給水加熱器室	1400	—	35.0 39.7 40.7	—

平成18年度に取得したデータの妥当性・信頼性の確認

- (1) 18年度のコア採取場所の近傍(60cm以内)から再度コアを採取、圧縮強度を測定し結果を比較。その結果、18年度データと19年度データは1~2N/mm²の範囲内で一致。
- (2) このことから、18年度の圧縮強度データは妥当なものと判断。原因調査に用いることとした。

18年度データと19年度データの比較

壁の位置		壁厚 (mm)	H18年 10月,12月	H19年 9月,10月
地上3階	外壁北面	250	13.4	15.5
	外壁南面		500	34.3
地下1階	常用電気室 (北側)	400	10.9	13.0
			11.1	13.3
			11.9	12.2
	常用電気室 (東側)	1500	24.4	22.2
			25.5	26.3
地下2階	非常用電気室 (南側)	400	18.5	19.1
			18.8	19.0
			18.8	20.7
	非常用電気室 (北側)	1000	14.4	17.5
			29.3	30.6



18年度データと19年度データの相関

圧縮強度測定結果のまとめ

- ・ 厚壁中央部の圧縮強度は、ほとんどが設計基準強度 (22.06N/mm^2) を満足。
- ・ 厚壁表層部の圧縮強度は、一部が設計基準強度より小さい。
- ・ 薄壁の圧縮強度は、ほとんどが設計基準強度より小さい。

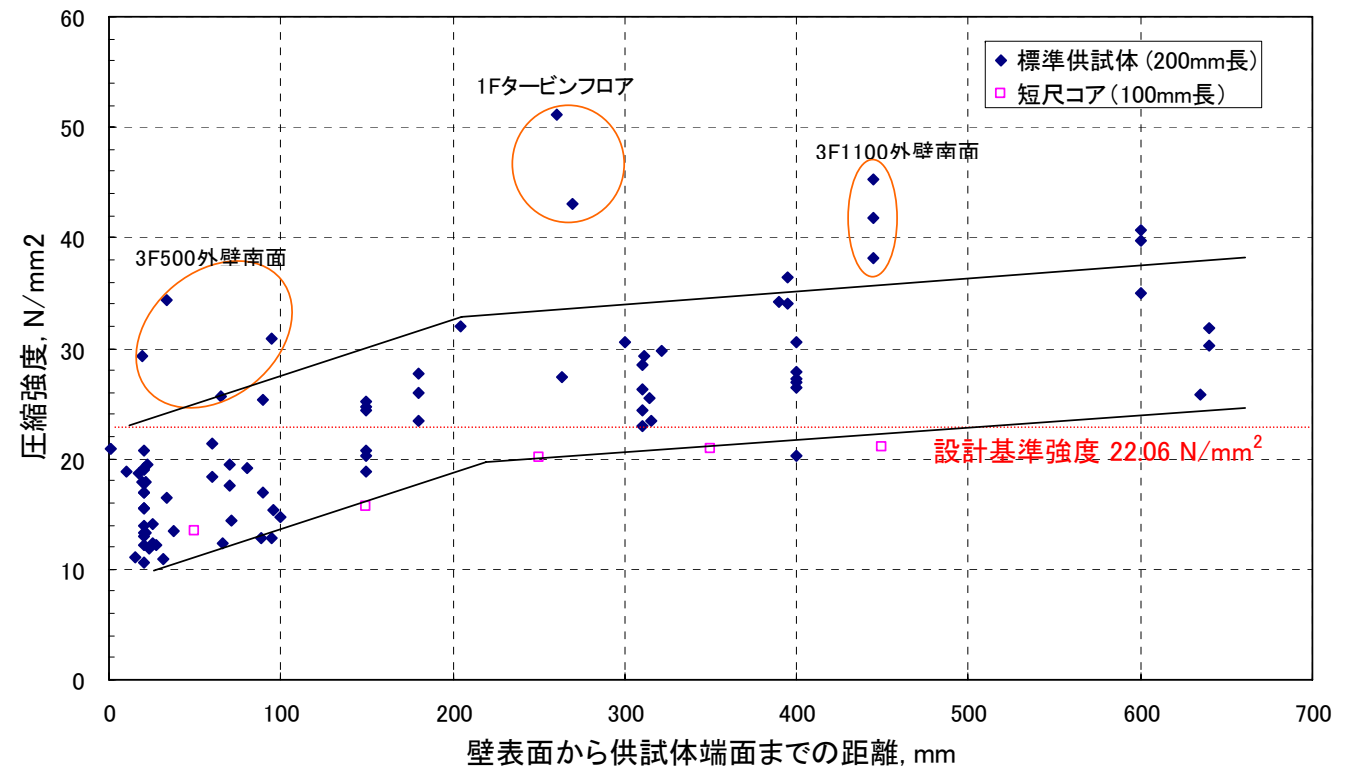
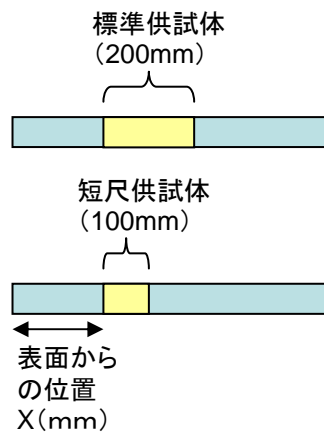
厚壁中央部： $20.2 \sim 51.1\text{ N/mm}^2$
 表層部： $14.4 \sim 36.4\text{ N/mm}^2$
 薄壁： $10.6 \sim 25.4\text{ N/mm}^2$

【定義】

厚壁： 厚さ500mm以上の壁

薄壁： 厚さ400mm以下の壁

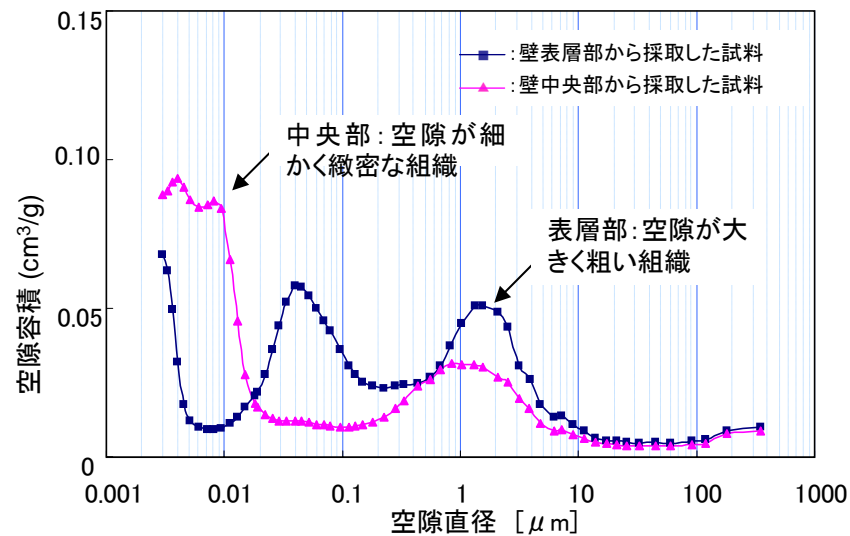
厚壁表層部： 厚壁表面からの深さが200mm以下の部位



原因調査：組織等の詳細分析結果

- (1) 圧縮強度が低い薄壁や壁表層部は、**粗な組織**で、**水和反応初期のコンクリート組織の様相**。
- (2) 圧縮強度が高い厚壁の中央部は、**密実な組織**で、**水和反応が十分完了したコンクリート組織の様相**。
- (3) 中性化深さは27～150mmであったが、鉄筋の腐食はなかった。

細孔径分布測定結果

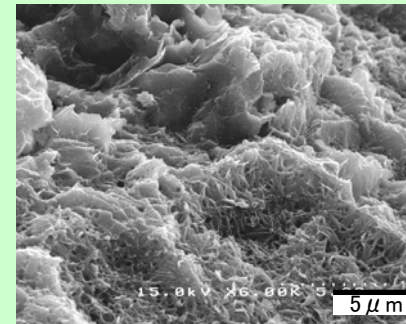


細孔径分布測定：水銀圧入法（圧力をかけた水銀を試料に浸させ、圧力と圧入された水銀量から細孔の大きさの分布を測定する方法）により測定

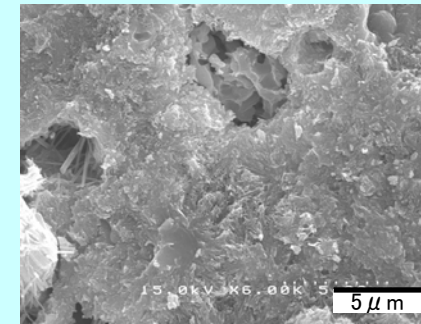
組織観察・分析

（地下2階1000mmの厚壁）

走査型電子顕微鏡 (SEM) による組織観察



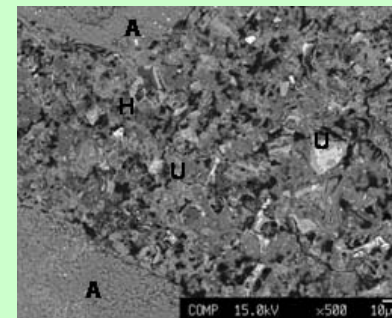
繊維状の粗な水和物が多く見られる



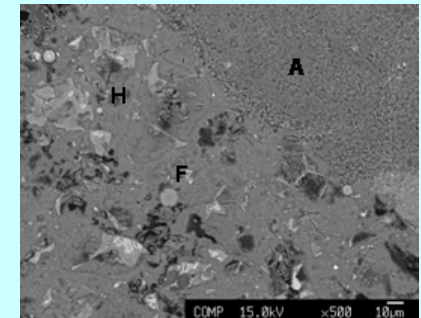
緻密な水和物が多く見られる

電子線マイクロアナライザ (EPMA) による分析

（空隙部は黒い画像として観察される）



黒い空隙部が多く見られる他、未水和セメントも見られる



黒い空隙部は少なく、緻密な組織が多く見られる

厚壁表層部

厚壁中央部

原因調査：調合推定及びSEM観察結果に基づく推定

調合推定(セメント協会法による)：

- ・ 単位セメント量の推定値(平均 $217\text{kg}/\text{m}^3$)が調合設計値($298\text{kg}/\text{m}^3$)に比較して低い値を示した。
- ・ 圧縮強度は単位セメント量の調合推定値に依存していない。(単位セメント量推定値が小さくても、十分な強度が出ているところがある。)

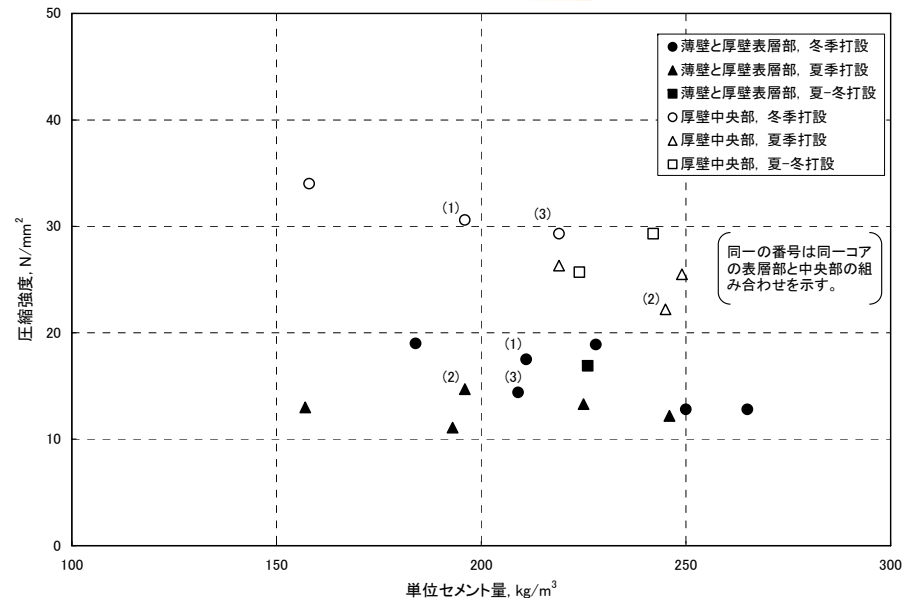
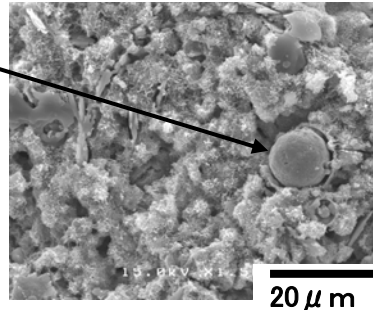
SEM観察：

- ・ 観察した全ての試料中*でフライアッシュを確認。フライアッシュの定量はできないが、粒子は数多く確認でき、ある程度の量含まれていたと推定。

*：地下2階～地上3階の厚壁・薄壁、表層・中央より採取した合計26試料を観察

フライアッシュ粒子

石炭灰の微粒子で主成分は SiO_2 、 Al_2O_3 。普通ポルトランドセメントに添加することにより、長期強度の増進、水和熱の低減、コンクリートの流動性向上による作業性改善の効果あり。



セメント量推定値と圧縮強度の相関

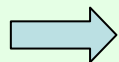
セメント協会法による調合推定：

試料を希塩酸に溶解し、溶液中のCa濃度から普通ポルトランドセメント量を推定、不溶残渣から骨材量を推定する。測定誤差は±10%程度ある。また、フライアッシュと結合したセメントは不溶性のため、セメント量を小さく評価する傾向がある。

調合推定の結果、単位セメント量が調合設計値に比較して低い値を示したが、

- ・ 厚壁中央部では、単位セメント量の推定値が小さくても十分な強度があること、
- ・ 試料の微細組織構造の観察でフライアッシュが確認されたこと

から、



原子炉補助建屋のコンクリートとして、普通ポルトランドセメントにフライアッシュが含まれたコンクリート(セメント量は調合設計値を満足していた)を使用したと推定。

フライアッシュを添加したコンクリートの施工上の留意点

【硬化反応の違い】

普通ポルトランドセメントの場合

セメントの主成分CaO、SiO₂がコンクリート中の水と水和反応し、ケイ酸カルシウム水和物を生成し、硬化する。

普通ポルトランドセメントにフライアッシュを添加した場合

セメントの水和反応とフライアッシュのポゾラン反応により硬化する。ポゾラン反応がセメントの水和反応に比べ遅いため、普通ポルトランドセメントよりも硬化は遅い。

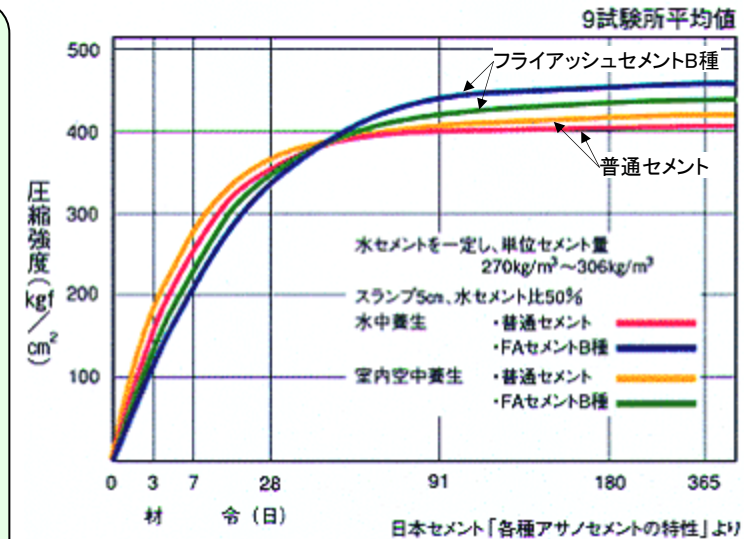
〔ポゾラン反応:フライアッシュの主成分SiO₂やAl₂O₃がセメント中の水酸化カルシウムCa(OH)₂と反応し、不溶性のシリカ質化合物が生成・硬化する反応。〕

【フライアッシュを添加したコンクリート施工時の留意点】

- (1) 型枠の存置期間は、普通ポルトランドセメントの場合より長い期間が必要
- (2) 打設直後から湿潤養生を保つことが必要

(参考図)

出典:日本フライアッシュ協会パンフレット「石炭灰」



型枠存置期間

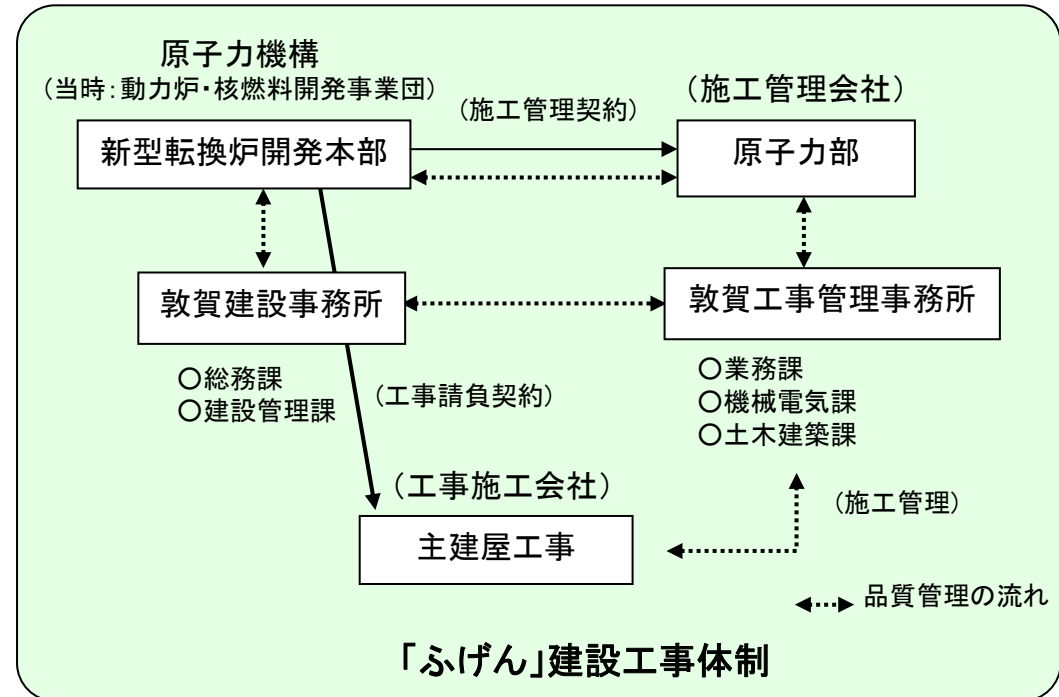
「JASS 5 建築工事標準仕様書・同解説」(1969年)では、型枠存置期間の最小値として以下、または、コンクリート圧縮強度が5N/mm²以上と確認されたとき取り外すとしている。

平均気温	普通ポルトランドセメント	フライアッシュセメントB種
15°C以上	3日	5日
5°C以上	5日	7日

原因調査：施工状況等に関する調査結果

【建設工事の体制】

- ・ 建設工事：1972年4月末～1978年2月頃
（原子炉補助建屋は1972年8月～1975年4月頃に建設）
- ・ 原子力機構は、施工管理会社、工事施工会社とそれぞれ契約を締結して工事を実施。



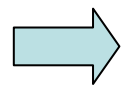
【記録類の調査、聞き取り調査】

- ・ 「ふげん」の建設工事に係る記録は、使用前検査に関わる記録が残っているのみで、**原子炉補助建屋の施工記録は残っていない。**
- ・ 聞き取り調査は、当時、コンクリート工事に携わっていた**原子力機構、施工管理会社、工事施工会社の職員合計37名のうち、亡くなられた方等を除く29名に対して複数回(延べ44名)実施。**

原因調査：施工状況等に関する調査結果

【記録類の調査結果、聞き取り調査結果】

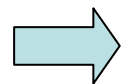
- ・工事計画認可：材料として「普通コンクリート」を用いると規定
- ・工事仕様書：建屋躯体の使用セメントは「普通ポルトランドセメント」としていた。観察された「フライアッシュ」については記述はなかった。
- ・原子炉補助建屋の施工記録が残っていないため確認はできないが、保存してある原子炉建屋の記録から類推すると、原子炉補助建屋のコンクリートは、普通ポルトランドセメントを前提とした施工管理要領書に従い施工していた。
- ・原子力機構は、自主的な検査として普通ポルトランドセメントの材料検査成績書を確認していた。
- ・現時点で可能な限りの聞き取り調査の結果、施工管理要領書に従い適正に施工したとのこと。フライアッシュの混合に関する証言はなかった。



使用したコンクリートにフライアッシュが含まれていたが、普通ポルトランドセメントを前提とした施工を行ったと推定。そのため、フライアッシュを含むコンクリートの型枠存置期間や養生等の施工上の留意点が施工に反映されなかった。

【品質管理に関する要因】

フライアッシュが含まれたコンクリートに適した施工が行われなかったことについて、建設当時の建屋コンクリート工事の品質管理に関して要因分析を行った結果、工事仕様書にフライアッシュについての特記事項を記載しなかったこと、現場確認が不十分であったこと、施工後の観察が十分でなく改善すべき事項が抽出できなかったことなどの要因が抽出された。



原子力機構の当時の品質管理が十分に機能していなかったものと判断する。

原因調査：経年劣化に関する調査結果

(1) 中性化深さ

中性化深さについては、27～150mmであったものの、鉄筋の腐食はなく、コンクリート強度に直接影響を与えるものではない。

〔 中性化深さが深かったのは、表層部のセメントの水和反応が阻害されたことからの粗い組織のまま乾燥したことから、空気中の二酸化炭素が侵入し易い状況にあったことが原因と推定。 〕

(2) 放射線、熱、機械的振動、化学的浸食

壁の使用環境条件から、これらの要因の可能性は考えられない。また、「ふげん」の立地場所は凍害危険地域ではないため、凍結・融解による劣化は考え難い。

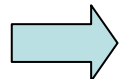
(3) アルカリ骨材反応

骨材産出地の調査及び今回のコアの観察結果より考えられない。

(粗骨材：敦賀市産砕石、細骨材：福井県産山砂)

(4) 塩分浸透

一部の壁で浸透が確認されたが、塗装以前の影響であること及び錆がないことから、浸透が進行していないことを確認した。



経年劣化が強度に影響を与えたのではないと判断する。

原因推定のまとめ

- ① 原子炉補助建屋のコンクリートとして、普通ポルトランドセメントにフライアッシュが含まれたコンクリートを使用した。

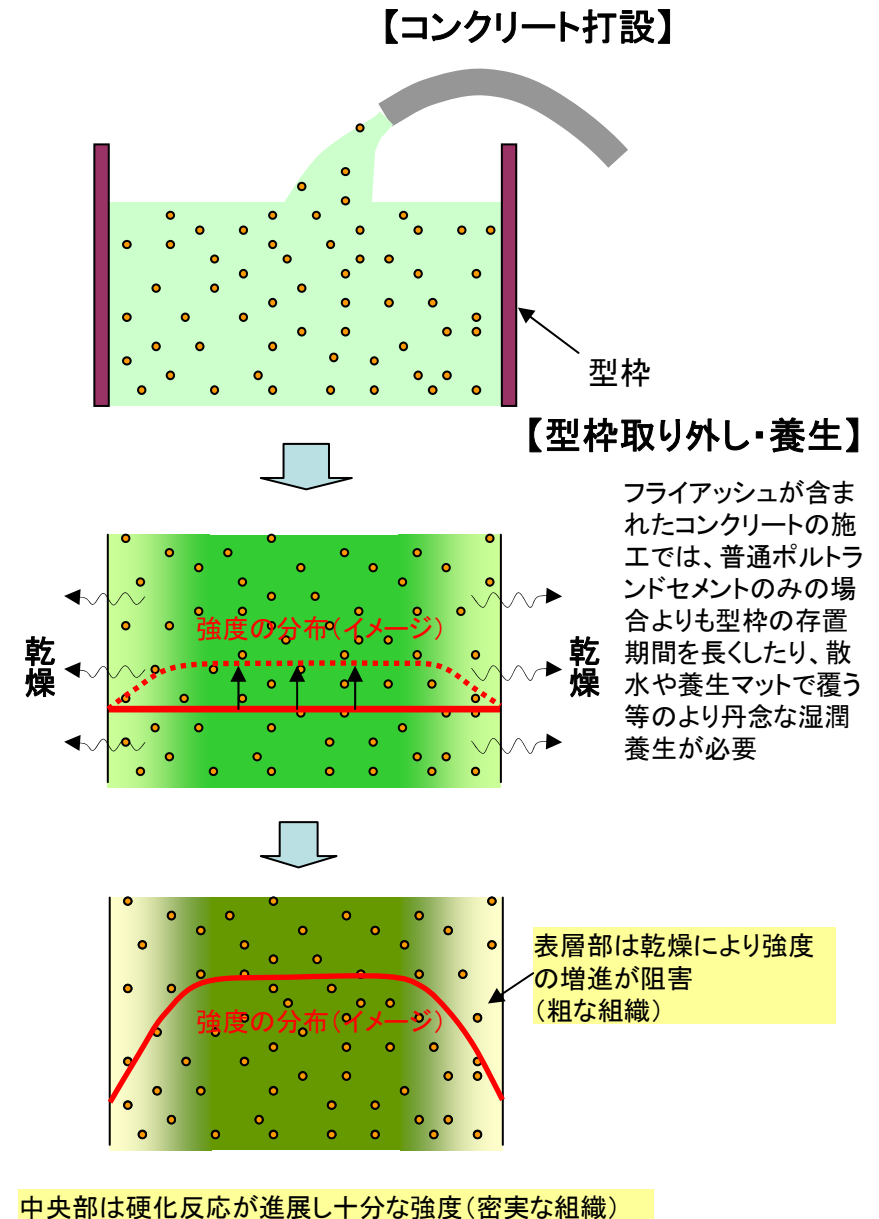
「ふげん」建設後の1978年に制定された日本建築学会の指針*によれば、「混和材としてフライアッシュを用いる場合はセメントの一部とみなすこと及びその混合率は30%以下とする」旨記載されている。

*:「フライアッシュセメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針、同解説」

- ② 使用したコンクリートにフライアッシュが含まれていたが、普通ポルトランドセメントを前提とした施工を行ったため、フライアッシュを含むコンクリートの型枠存置期間や養生等の施工上の留意点が施工に反映されなかった。

- ・そのため、型枠脱型が早く、湿潤養生も不足したため、表層部からの乾燥が進み、硬化に必要な水分が不足、薄壁や厚壁表層部の強度増進が阻害された。
- ・一方、厚壁中央部は乾燥せずに適度な水が存在していたため、硬化反応が進展し強度が得られたと推定。

- ③ フライアッシュが含まれたコンクリートに適した施工が行われなかったことについては、原子力機構の当時の品質管理が十分に機能していなかったことによるものと判断する。



対策と関連事項等

(1) 対策

【品質保証の充実】

- ① 今回の問題を教訓とし、施設等の建設については、**品質マネジメントシステムのより一層の改善**を図る。
- ② コンクリート工事等に係る規格・指針類については、今後とも**最新の情報を適切に工事仕様書等に反映し、工事施工における品質管理を更に充実**。

【廃止措置に向けた対策】

保安規定や管理要領等に下記の対策を明記し、確実に計画・実施し、フォローしていく。

- ① 解体撤去工事等に際しては、必要な安全措置を講じる等、**コンクリート強度を考慮した工事方法を計画・実施**。
- ② 各建屋の**巡視・点検等の継続実施**。

(2) 関連事項等

- ① 平成19年12月28日に、経済産業省原子力安全・保安院に対し、「**新型転換炉ふげん発電所における原子炉補助建屋のコンクリート強度の低い原因等について**」報告書を提出。
- ② 同日付で、本件対策を盛り込んだ**廃止措置計画認可申請の補正、保安規定の変更申請等**の手続きを実施。
- ③ 廃止措置計画の認可後、「**原子炉廃止措置研究開発センター**」として**廃止措置の研究開発等に取り組み、県の拠点化計画にも貢献**できるよう努めていく。

福井県内の原子力発電所の 建屋コンクリート健全性確認の状況について

平成20年1月16日

独立行政法人日本原子力研究開発機構
関西電力株式会社
日本原子力発電株式会社

「ふげん」で確認されたコンクリートの問題点

(1) 採取したコアで設計基準強度を下回る値を確認。特に壁の厚さが比較的薄い壁で強度が低い。また、厚い壁でも、表層部は強度が低い箇所がある。

(2) 普通ポルトランドセメントにフライアッシュが混合されたコンクリートを使用したか、そのことを考慮した適切な施工がなされていない。

県内の原子力発電所建物の概要

会社名	ユニット名	建設時期【設置許可～運転開始】(年)						建屋躯体部 使用セメント
		1965	1970	1975	1980	1985	1990	
原子力機構	ふげん							普通ポルトランドセメント*
	もんじゅ							フライアッシュセメントB種
関西電力(株)	美浜1号							フライアッシュセメントB種
	美浜2号							
	高浜1号							
	高浜2号							
	美浜3号							中庸熱ポルトランドセメント
	大飯1号							
	大飯2号							
	高浜3号							
	高浜4号							中庸熱ポルトランドセメント (フライアッシュ混合)
	大飯3号							
	大飯4号							
大飯4号								
日本原子力 発電(株)	敦賀1号							普通ポルトランドセメント
	敦賀2号							中庸熱ポルトランドセメント (フライアッシュ混合)

*: フライアッシュが混合されたものを使用していた。

「もんじゅ」の状況について

(1) コア供試体を用いた破壊試験により、壁の厚さに関係なく、コンクリートの圧縮強度が設計基準強度を満足していることを確認している。

- ・ 建設時に建屋建設に使用したのと同じコンクリートで製作した試験体を屋外に設置しており、そこから定期的にコアを採取し、破壊試験により表層部も含め圧縮強度を確認している。



コンクリート試験体

〔 1.2m × 1.5m × 0.6m (厚さ) 4体
1.2m × 1.5m × 1.5m (厚さ) 1体 〕

試験実施	試験結果 (N/mm ²)	設計基準強度 (N/mm ²)
2003年10月	32.5 ~ 54.4	23.5

- ・ 実機建屋のコンクリートからコアを採取し、破壊試験により表層部も含め圧縮強度を確認している。

試験実施	コア採取箇所	壁厚	試験結果 (N/mm ²)	設計基準強度 (N/mm ²)
2005年10月	原子炉補助建屋地下4階	2000mm	37.1 ~ 49.2	23.5
	原子炉補助建屋地下3階	2000mm		
	取水口	500mm		

(2) 「もんじゅ」ではフライアッシュセメントB種を使用しているが、品質管理記録等（施工管理要領書、使用前検査記録等）により、コンクリート工事が適切に施工されていたことを確認している。

美浜・高浜・大飯発電所の状況について(1/2)

(1) コア供試体を用いた破壊試験により、壁の厚さに関係なく、コンクリートの圧縮強度が設計基準強度を満足していることを確認している。

- ・ 実機建屋のコンクリートからコアを採取し、破壊試験により表層部も含め圧縮強度を確認している。



発電所	号機	試験実施年	コア採取建屋	試験結果 (N/mm ²)	設計基準強度 (N/mm ²)
美浜	1・2号機	1993～1999年	外部遮へい壁 他	32.7～45.0	20.6
	3号機	1999～2000年	外部遮へい壁 他	31.6～34.3	20.6
		2003年	原子炉補助建屋 他	22.6	17.7
高浜	1・2号機	1994～2002年	外部遮へい壁 他	28.2～54.8	20.6
		1999～2002年	原子炉補助建屋 他	27.2～48.4	17.7
	3・4号機	2000～2007年	外部遮へい壁 他	30.8～54.5	24.5
		2007年	タービン建屋(架台)	57.1～66.2	20.6
大飯	1・2号機	2001～2002年	内部コンクリート	37.2～55.0	24.5
		2002～2007年	外部遮へい壁 他	38.1～49.8	20.6
		1999年	原子炉補助建屋	41.3～48.5	17.7
	3・4号機	2000～2001年	原子炉補助建屋	52.4～52.4	29.4

美浜・高浜・大飯発電所の状況について(2/2)

(2) 各ユニットとも、品質管理記録等(施工管理要領書、使用前検査記録等)により、コンクリート工事が適切に施工されていたことを確認している。また、美浜1・2号機、高浜1～4号機および大飯3・4号機ではフライアッシュを使用しているが、適切に施工されていたことを確認している。

敦賀発電所の状況について

(1) コア供試体を用いた破壊試験により、壁の厚さに関係なく、コンクリートの圧縮強度が設計基準強度を満足していることを確認している。

- ・ 実機建屋のコンクリートからコアを採取し、破壊試験を行い強度を確認している。なお、コアは全て表層部から採取したものである。



コア採取状況

号機	試験実施年	コア採取建屋	部位	試験結果 (N/mm ²)	設計基準強度 (N/mm ²)
1号機	1996年	原子炉建屋	基礎	40.7	24.5
		原子炉建屋	壁	37.0	
		タービン建屋	架台	31.9	22.1
2号機	1997年	原子炉建屋	壁	38.8	23.6
		原子炉補助建屋	壁	45.0	

(2) 1, 2号機とも、品質管理記録等(施工管理要領書、使用前検査記録等)により、コンクリート工事が適切に施工されていたことを確認している。なお、2号機ではフライアッシュを混合したコンクリートを使用したがあ適切に施工されていたことを確認している。

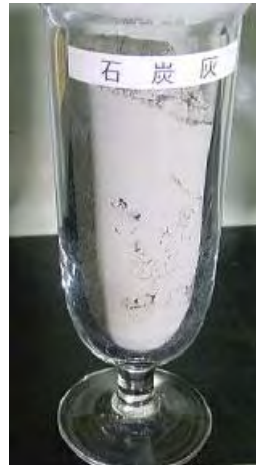
參考資料

【参考】フライアッシュを混合したセメントの特徴

出典：日本フライアッシュ協会パンフレット「石炭灰」

(1) 作業性の向上

フライアッシュの微細粒子がボールベアリング効果を発揮し、コンクリートの流動性が改善され、作業性が向上



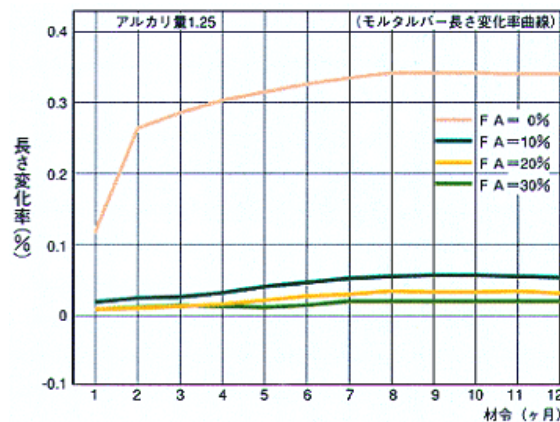
石炭灰

(2) 長期強度の増進

フライアッシュによる硬化反応により、セメントだけの場合よりも長期強度が増進

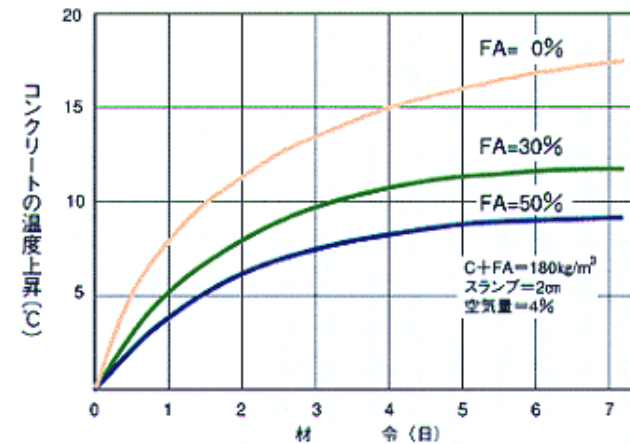
(3) アルカリ骨材反応の抑制

アルカリ骨材反応の原因となるケイ酸ソーダの生成反応をフライアッシュが抑制する効果あり



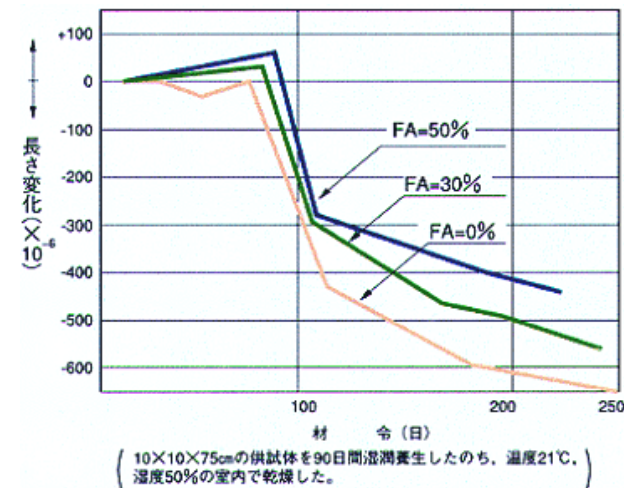
(4) 水和熱の減少

セメントの水和反応に伴う発熱が少なくなるため、ダム工事や発電所基礎工事などのマスコンクリート工事における温度応力を低減する効果あり



(5) 乾燥収縮の減少

硬化後の収縮率が小さくなりひび割れの発生を抑制



【参考】セメントの種類

JISに規定されたセメントの種類

【ポルトランドセメント】

名称	特徴	用途
超早強ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメントが7日で発揮する強度を1日で発揮	緊急補修
早強ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメントが3日で発揮する強度を1日で発揮	緊急工事、寒冷期
普通ポルトランドセメント	土木・建築構造物の建設用として最も一般的な汎用性の高いセメント	幅広く使用(国内セメントの70%)
中庸熱ポルトランドセメント	水和熱を低くするためにセメント成分を調整したセメント。	ダム、大規模橋脚
低熱ポルトランドセメント	中庸熱ポルトランドセメントよりも更に水和熱が低いセメント	ダム、大規模橋脚 高流動コンクリート
耐硫酸塩ポルトランドセメント	硫酸塩に対する抵抗性が弱いアルミネート相含有量を減らしたセメント	護岸工事、温泉地、 化学工場

【混合セメント】

名称	特徴	用途
高炉セメント(A、B、C種)	製鉄所から出る高炉スラグの微粉末を混合したセメント	ダム、港湾など
フライアッシュセメント(A、B、C種)	石炭灰の中の良質な粒子を混合したセメント。水和熱減少、流動性向上、乾燥収縮減少、アルカリ骨材反応の抑制などの効果あり	ダム、港湾、火力・原子力発電所、大型土木工事
シリカセメント	耐薬品性に優れているが、初期強度低く、強度発現に時間を要す	コンクリート製品

(この他、JISに規定されたその他のセメントとしてエコセメントがある。)

原子力機構の施設(躯体部)の使用セメント

＜普通ポルトランドセメント＞

- ・「ふげん」主建屋、廃棄物処理建屋
- ・再処理施設、プルトニウム燃料施設、試験研究炉施設の各建屋

＜フライアッシュセメントB種＞

- ・もんじゅ、常陽、HTTRの各建屋

ふげん発電所建屋

