報告　北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの利活用を目的としたフライアッシュの品質保証と地域実装

参納千夏男[*1]・宮脇英嗣[*2]・中島隆甫[*3]・鳥居和之[*4]

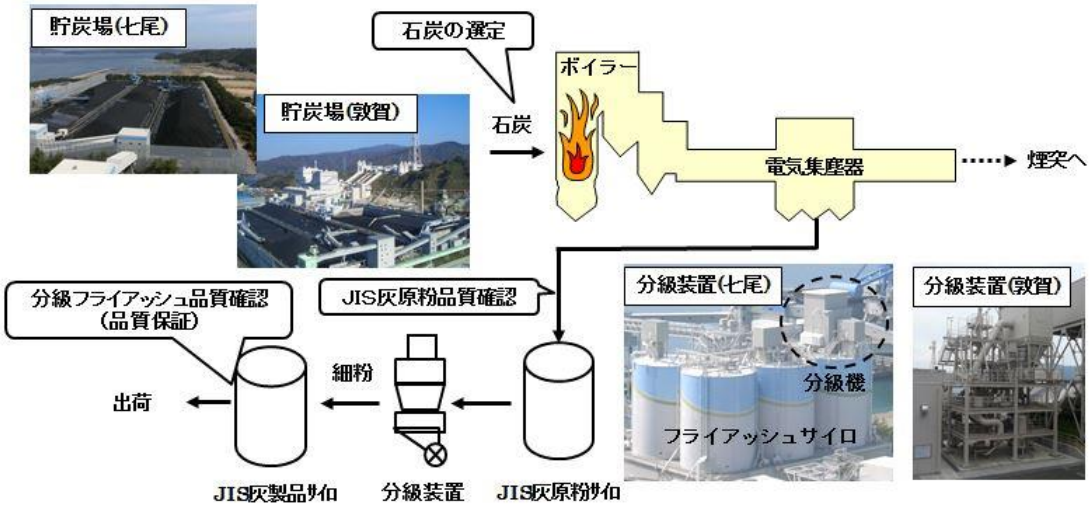
要旨：北陸地方では，産学官連携による委員会「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」の活動を通して，フライアッシュコンクリートの地域実装が進められてきた。この際に，北陸地方の石炭火力発電所からは，高品質なフライアッシュが北陸地方全域に供給されており，この数年間の実績により，フライアッシュの製造管理と供給体制を確立できた。これが，北陸新幹線延伸工事などの公共工事でのフライアッシュコンクリートの標準化に大きく貢献している。本稿では，北陸地方でのフライアッシュコンクリートの利活用の経緯と品質保証について紹介する。

キーワード：フライアッシュ，ポゾラン反応性，高品質化，品質保証，供給体制

1. はじめに

フライアッシュをコンクリートに混和することによる施工性や耐久性の向上効果に関しては，多数の研究報告があるが[1,2]，実際には，全国的な普及に至っていないのが現状である。それに対して，高炉セメントは，2001年の環境省グリーン購入法の施行により公共工事における標準的なセメントとして指定されている。この前提としては，高炉セメントが，全国一律的な品質で安定的に供給できる体制が整っていることにある。その一方で，フライアッシュは，原料である石炭種，発電所ボイラーの特性や燃焼条件などによって，品質が大きく異なり，全国一律の品質の供給が難しいこと，さらには，地域の電力会社によってフライアッシュの供給体制の状況が異なることが，普及の障害になっている。そのため，フライアッシュの有効利用を進める際には，地域の事情にあった品質管理と供給体制を整備していく方策が必要である。北陸地方では，産学官連携による委員会「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」を2011年1月に設置し，コンクリートのASR抑制対策の一環として，フライアッシュコンクリートの標準化を積極的に推奨してきた経緯がある[3,4,5]。

北陸地方での取組みの特色としては，分級装置により細粉のみを選別したフライアッシュ（以下，フライアッシュ）を地域に供給する体制を構築できたことにある。JIS A6201 でのⅠ種灰にほぼ相当する，フライアッシュ



図－１　フライアッシュの製造および出荷フロー

*1 北陸電力（株）土木部土木技術チーム　博（工）（正会員）
*2 北陸電力（株）火力部火力発電環境チーム
*3 北陸電力（株）土木部土木技術チーム
*4 中日本ハイウェイ･エンジニアリング名古屋　工博（フェロー会員）

は，従来品（II 種灰，原粉）と比較してポゾラン反応性が大きく改善できることが明らかになっている[6,7]。近年，粉体の分析技術の向上により，フライアッシュ粒子ごとの組成分析やガラス化率の測定が可能となり，ポゾラン反応性に関しての新しい知見が得られている[8,9,10]。

そこで本稿では，北陸地方でのフライアッシュの品質保証と供給体制を紹介するとともに，フライアッシュコンクリートのポゾラン反応性の改善効果をその物理化学的性質との関係から２，３の考察を行った。

2. フライアッシュの品質保証と供給体制の確立

2.1 製造工程と品質管理

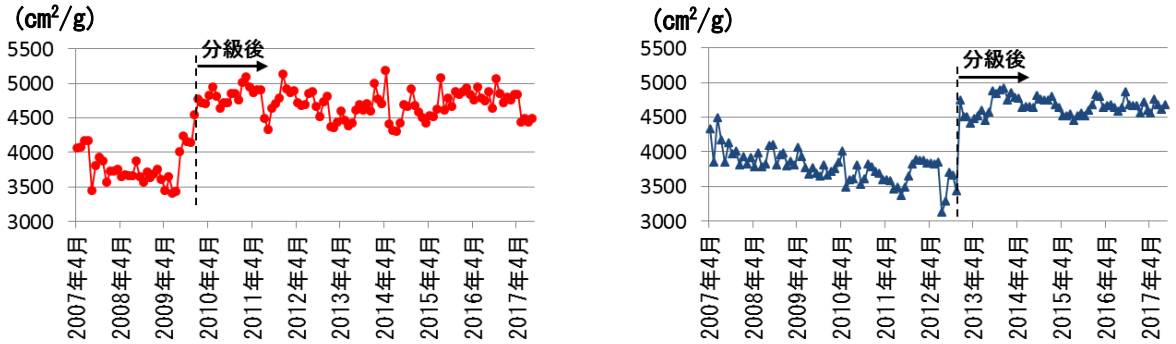
北陸地方には，富山県，石川県，福井県に各々１箇所ずつ石炭火力発電所が稼働している。これらの石炭火力発電所（富山新港火力発電所，七尾大田火力発電所および敦賀火力発電所）から産出されるフライアッシュは，2017 年度の実績では年間約 60 万 t であり，その約 8 割は，セメントの原材料として利用されており，混和材としての利用はわずかである。北陸地方では，コンクリート用にフライアッシュを供給する発電所として，出力が大きく，良質なフライアッシュが産出される七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所２箇所を選定し，それぞれに分級装置を設置した。この背景としては，良質なフライアッシュを地域に供給することによって，有効利用を進めるとともに，分級することによって，フライアッシュのポゾラン反応性を高め，活性度指数を確実に満足するフライアッシュを供給することがある。**図－１**に，フライアッシュの製造および出荷フローを示す。北陸地方の石炭火力発電所では，オーストラリア，インドネシアなどの海外から輸入した石炭を燃料としているが，石炭産地によって，フライアッシュの品質が大きく異なることを明らかにした。燃料調達の基本は，燃焼効率が高く，費用が安い石炭を安定に調達することである。しかし，両発電所では産地毎のフライアッシュの品質データを長年にわたり蓄積しており，燃料調達計画に，JIS Ⅱ種以上のフライアッシュが産出される石炭（「JIS 灰適合炭」という）をフライアッシュの需要に足りる量以上に常時確保することにしている。製造の手順としては，まず，JIS 灰適合炭を燃焼したときに，電気集じん器で採取されたフライアッシュ（原粉）の品質を確認する。次に，JIS Ⅱ種に適合していることを確認した上で，原粉サイロに取り込み，これを分級装置（空気渦セパレータ方式）に通した後に JIS 灰製品サイロに取り込み，さらに，出荷する際には，フライアッシュ（分級品）の品質を定期的に確認している。分級装置はブレーン比表面積で，原粉＋1,000cm^2/g を目標として運用しており，七尾大田火力発電所および敦賀火力発電所のそれぞれで，年間 3 万 t の製造能力を確保している。なお，フライアッシュは，5 割程度が採取され，残りの粗粉は，セメントの原料として有効利用されている。この捕捉率は，採取するフライアッシュの品質をできるだけ高める方針により，分級装置の稼働率を 7 割と想定し，各々の発電所で年間 3 万ｔ採取することのできるバランスから決められたものである。

2.2 比表面積，ガラス化率とポゾラン反応性との関係

両発電所のフライアッシュの JIS 項目データのまとめを**表－１**に示す。**表－１**に示す通り，両発電所産フライアッシュの品質は同様に確保されており，ブレーン比表面積の標準偏差は，JIS で規定されている品質の均一性（±450 cm^2/g）を十分に満足している。さらに，両発電所産フライアッシュのブレーン比表面積の推移を**図－２**に，活性度指数（材齢 91 日）の推移を**図－３**に，フロー値比の推移を**図－４**に示す。これらの図に示すとおり，ブレーン比表面積は，分級開始後から，平均で約 4,700 cm^2/g 程度と JIS Ⅰ種に近い細かさであり，ブレーン比表面積の増加にともない，活性度指数，フロー値比もすべて増加しているのが分かる。活性度指数に関しては，材齢 91 日において，100 を超えており，ポゾラン反応性が大きく向上していることが確認される。活性度指数が増加する要因としては，主として比表面積の増加（分級化により平均粒径は約 1/3 なり，比表面積が 9 倍になる）にともなうフライアッシュ自身の反応率（反応表面積）

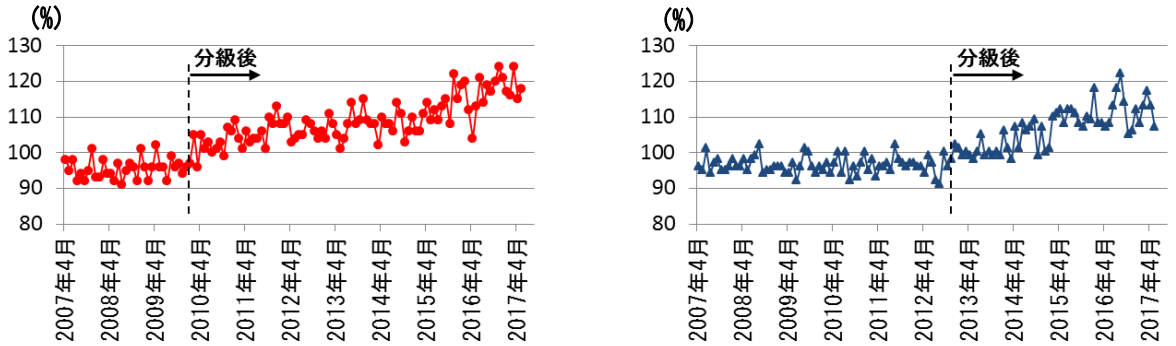
表－１　フライアッシュの品質データ一覧

JIS項目		JIS規格値（Ⅱ種）	七尾大田火力発電所				敦賀火力発電所			
			分級前(2007.4～2009.7)		分級後(2010.1～2017.8)		分級前(2007.4～2012.11)		分級後(2012.12～2017.8)	
			平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
二酸化けい素含有量(%)		45.0以上	67.6	1.9	57.3	4.1	64.4	3.0	63.6	1.7
湿分(%)		1.0以下	0.1以下	－	0.1以下	－	0.1以下	－	0.1以下	－
強熱減量(%)		5.0以下	2.1	0.4	2.0	0.3	3.6	0.5	3.5	0.3
密度(g/cm^3)		1.95以上	2.24	0.05	2.40	0.05	2.22	0.02	2.29	0.01
粉末度	網ふるい方法(45μ mふるい残分)(%)	40以下	16.2	4.2	0.5	0.5	17.4	4.9	1.3	0.3
	ブレーン方法(比表面積)(cm^2/g)	2,500以上	3,730	204	4,710	198	3,780	225	4,660	122
フロー値比(%)		95以上	100	1	107	2	101	2	102	2
活性度指数	材齢28日	80以上	83	2	97	7	82	2	94	7
	材齢91日	90以上	95	3	109	6	96	2	107	6



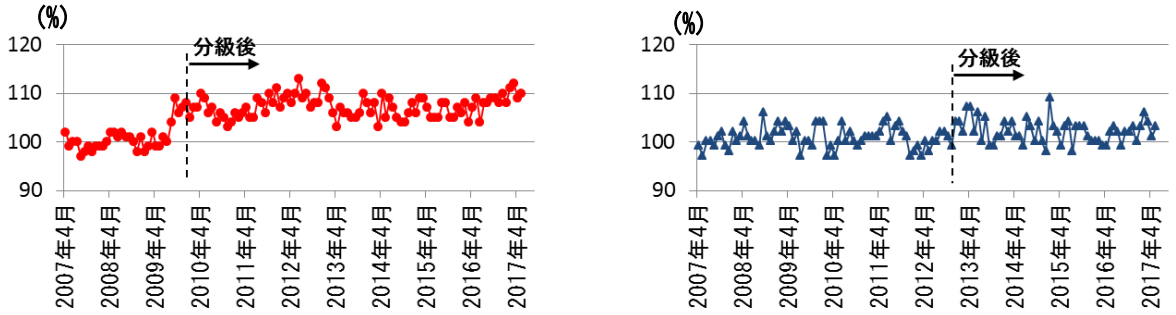
七尾大田火力発電所産　　敦賀火力発電所産

図－２　ブレーン比表面積の推移



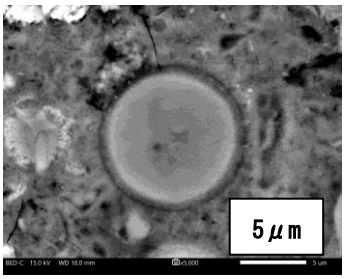
七尾大田火力発電所産　　敦賀火力発電所産

図－３　活性度指数（材齢 91 日）の推移



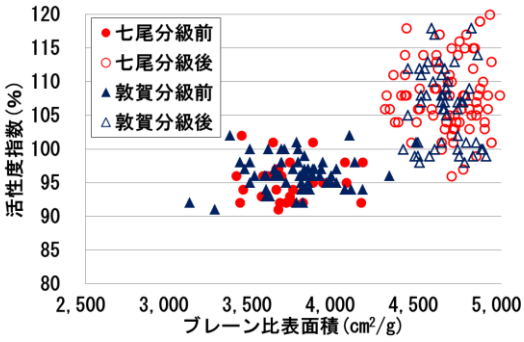
七尾大田火力発電所産　　敦賀火力発電所産

図－４　フロー値比の推移

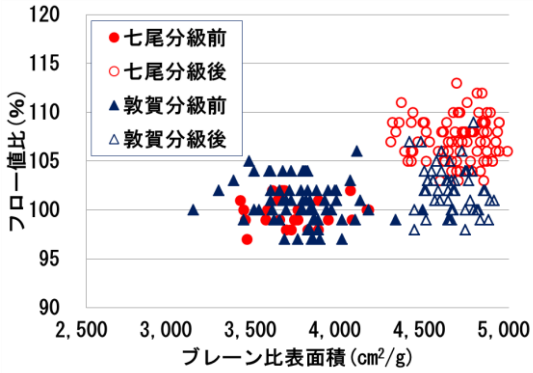


写真－１　フライアッシュ粒子の走査電子顕微鏡による反射電子像

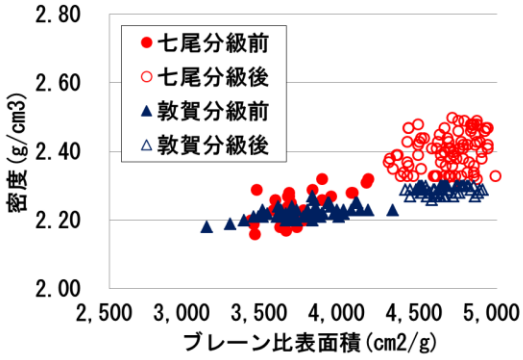
の増大によるとの報告がある [9]。**写真－１**に，フライアッシュ粒子の水和生成物相（低 Ca/Si 比の CSH （外部））を示す。このように，フライアッシュのポゾラン反応は，フライアッシュ粒子のごく表面（1μm 程度）のみで進んでいるのが観察できる。この表面部分はガラス相で構成（ムライトや石英粒子などの結晶相は反応しない）されているために，前述したように，相乗的に反応が高まり，とくに初期材齢でのポゾラン反応率の増加に貢献することが考えられる [11]。さらに，アルミノシリケートガラス相の反応過程で，Ca/Si 比が小さい CSH が生成（アルカリ吸着性が大きい）されることにより，細孔溶液のアルカリ濃度が低下し，コンクリートの初期強度の増加の効果とともに，コンクリートの耐久性の向上，すなわちアルカリシリカ反応（ASR）や遅延型エトリンガイト(DEF)に対する大きな抑制効果が発揮されることになる [12,13,14]。



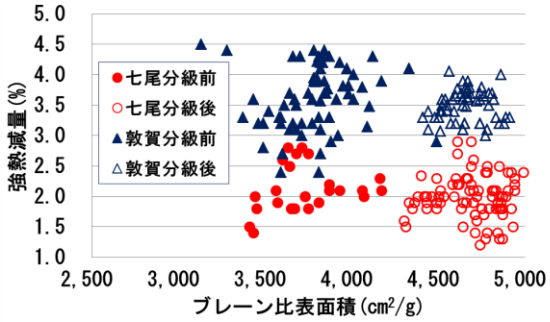
図－５　ブレーン比表面積と活性度指数（材齢 91 日）の関係



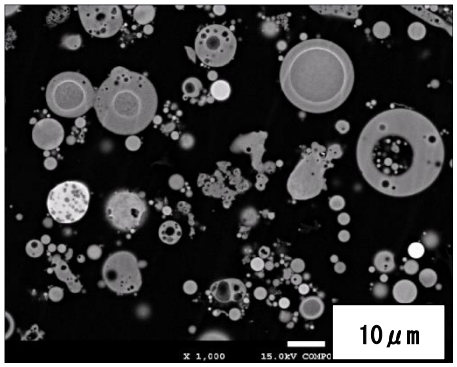
図－６　ブレーン比表面積とフロー値の関係



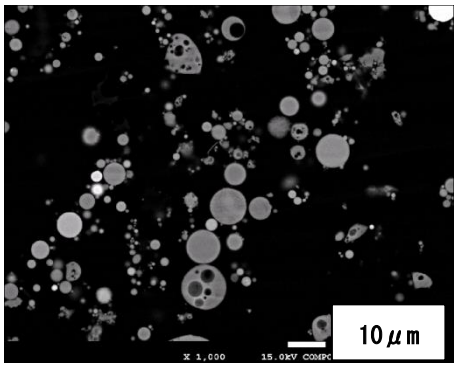
図－７　ブレーン比表面積と密度の関係



図－８　ブレーン比表面積と強熱減量の関係

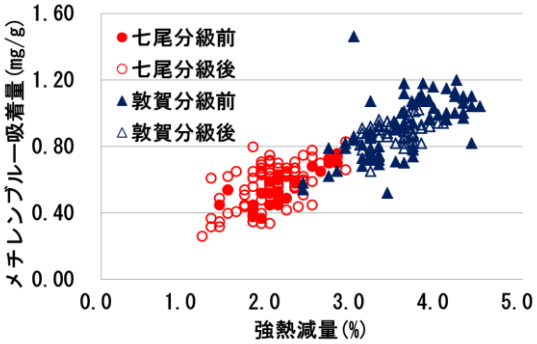


分級前



分級後

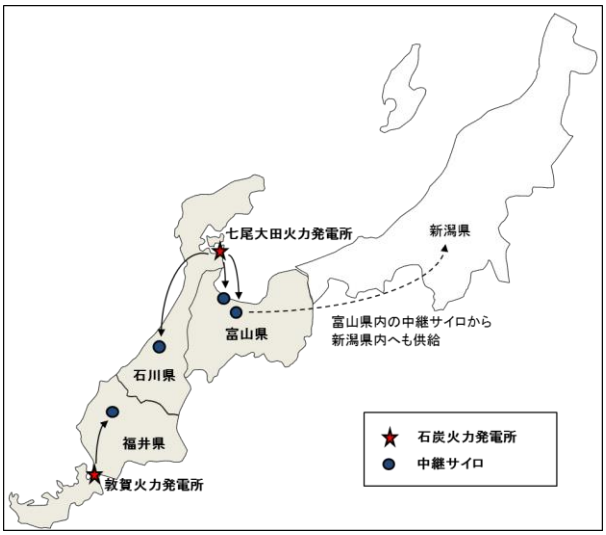
写真－２　分級前後のフライアッシュ粒子の走査電子顕微鏡による反射電子像



図－９　強熱減量とメチレンブルー吸着量の関係

2.3 物理化学的性質と品質変動との関係

図－５～図－８に，フライアッシュの物理化学的性質とコンクリート混和材への利用に重要となる工学的諸性質との関係を示す。図－５に示すとおり，活性度指数は，両発電所産のフライアッシュに差異は見られず，ブレーン比表面積が大きいものほど高い傾向にある。図－６に示すとおり，分級前後でのフロー値比は，敦賀火力発電所産のフライアッシュと比較して，七尾大田火力発電所産のフライアッシュのものは，全体的に増加している。この原因は，七尾大田火力発電所産のフライアッシュが，分級後の密度増加が高めであり，フロー値試験では，フライアッシュを質量置換して試験をするために，



図－１０　北陸地方におけるフライアッシュの供給体制

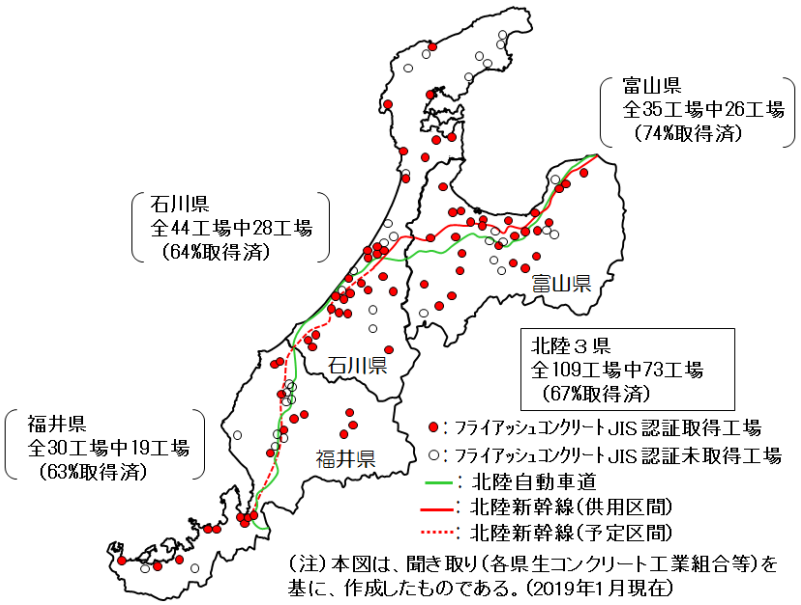
紛体量が分級前後で増加したことが影響している。なお，密度の増分が両発電所で異なるのは，分級装置自体の性能の違いによるものと考えられる。**図－７**に示すとおり，両発電所産のフライアッシュの密度は，分級後に，ともに増加している。これは，**写真－２**に示すとおり，分級過程で角張った粒子や中空状，内部に細かな粒子を含んでいるものの比率が低減していることによるものである[6]。なお，七尾大田火力発電所産フライアッシュの密度のバラツキが大きいのは，燃料調達計画等の関係で，七尾大田火力発電所は，敦賀火力発電所に比べて，供給されているフライアッシュの元となる石炭種が多いことが影響している。さらに，**図－８**に示すとおり，両発電所産のフライアッシュの強熱減量値は，分級後に大きな変動は見られず，七尾大田火力発電所産が，敦賀火力発電所産に比べて，全体的に小さい傾向にある。この違いは，発電所によるボイラー性能の違いによるものと考えられる。

図－９に強熱減量値とメチレンブルー吸着量との関係を示す。メチレンブルー吸着量は，JIS 項目にはないが，生コンクリートプラントの AE 剤の使用量の目安となるので，敢えて測定項目に入れているものである。**図－９**に示すとおり，強熱減量とメチレンブルー吸着量には高い相関性があり，生コンクリートやコンクリート製品の日常の配合設計に実際に供されている。

2.4 供給体制と地域実装

図－１０に，北陸地方全域におけるフライアッシュの供給体制を示す。北陸地方では，七尾大田火力発電所産のフライアッシュを富山県，石川県に供給し，敦賀火力発電所産のフライアッシュを福井県に供給する体制を構築した。**図－１０**に示すとおり，各所に拠点となる中継サイロを設け，主な利用者である生コンクリートプラントへの便宜を図っている。さらに，近年，新潟県など近隣の県の需要に応じる体制も整えた。

図－１１に，北陸地方における生コンクリートプラントのフライアッシュコンクリートの JIS 取得状況を示す。北陸地方では，産学官におけるフライアッシュコンクリートの利用促進状況を見極めて，約 6 割の生コンクリートプラントが JIS を取得している。このことにより，汎用的に使用できなかったフライアッシュコンクリートが，広い地域において使用できる環境が整ってきている。この際にフライアッシュの品質面との関係で重要なことは，前述したように，発電所により，ボイラーの性能や燃料となる石炭種が異なるため，JIS の規定を満足していても，発電所ごとにフライアッシュの品質は異なる



図－１１　北陸地方における生コンクリートプラントのフライアッシュコンクリートの JIS 取得状況

ことから，生コンクリートプラントでは，異なる発電所のフライアッシュを使用する場合には，配合の修正が必要になるために，地域を分けて，同じ発電所産のフライアッシュを常に供給し，さらには，石炭種を限定することにより，フライアッシュの品質変動が少なくなるように留意していることがある。さらに，これを供給者である電力会社の責任で実施していることにある。

3. まとめ

本稿では，北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの利活用を目的としたフライアッシュの品質保証と供給体制について報告した。

本報告の主な内容は以下に示すとおりである。

(1) 北陸地方におけるフライアッシュの品質管理に関して，製造および出荷フローを明示した。製造工程管理では，ブレーン比表面積で，原粉に対して 1,000cm^2/g 高くすることを目標として分級装置を運用することにしている。

(2) フライアッシュの品質に関して，実際に北陸地方でフライアッシュを供給している 2 発電所の品質データを明らかにして，両発電所産フライアッシュの品質の違いや分級による効果を考察した。なお，これらの品質データは，ユーザーに情報提供されている。

(3) 分級化（細粉の選別）により，比表面積が増加し，それに伴い活性度指数が増加していることを示した。この要因として，フライアッシュのポゾラン反応は，フライアッシュ粒子のごく表面（1μm 程度）のみで進むこと，表面部分はガラス相で構成されていることから，相乗的に反応が高まり，とくに初期材齢でのポゾラン反応率が増加していると推察した。

(4) フライアッシュの有効利用促進並びに普及には，地域の産官学民の関係者が連携すること，また地域の実状に応じた利用体制を構築することが必要であることを北陸地方の地域実装の事例から明らかにした。

謝辞：北陸新幹線敦賀延伸工事では，JR-TT および JR 西日本の土木工事示方書にフライアッシュコンクリートが標準化され，平成 30 年度からその需要が急速に増大した。また，石川県では，七尾地区に続いて南加賀地区での特区指定がなされた。これらは，本稿で紹介したフライアッシュの品質保証に関する取組みが理解されたことによるものと考えており，ここに，関係者各位に心より感謝いたします。

参考文献

1) 鳥居和之，川村満紀，枷場重正，谷口公一：石炭灰のコンクリート用混和材としての適用性，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.7，pp.193-196，1985
2) 長瀧重義，大賀宏行，越智康介，中村武夫：フライアッシュの品質とその評価に関する研究，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.7，pp.197-200，1985
3) 鳥居和之，参納千夏男：骨材資源の活用を目指したアルカリシリカ反応抑制対策の提案，コンクリート工学，Vol.48，No.1，pp.44-47，2010
4) 北陸地方におけるフライアッシュのコンクリートへの有効利用促進検討委員会報告書（富山・石川・福井県版），2013
5) 久保哲司，参納千夏男，蟹谷真生，鳥居和之：フライアッシュコンクリートの社会実装を目的とした技術開発－北陸地方での経緯と実績－，コンクリート工学，Vol.54，No.9，pp.914-919，2016
6) 大賀宏行，國府勝郎，坂井悦郎，大門正機：フライアッシュの潜在的品質とモルタルの諸物性，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.339-344, 1996
7) 山本武志，金津努：フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織緻密化と強度メカニズムの実験的考察，土木学会論文集 E，Vol.63，No.1，pp.52-65，2007
8) 高橋晴香，山田一夫：ASR 抑制効果を支配するフライアッシュキャラクターの SEM-EDS/EBSD による解析, コンクリート工学論文集, 第 23 巻第 1 号, pp.1-11, 2012
9) 土肥浩大，白濱暢彦，山下牧生：分級により粒度調整したフライアッシュの諸特性，セメント・コンクリート論文集，Vol.71，pp.626-631，2017
10) 岸森智佳，扇嘉史，細川佳史，平尾宙：粒子解析によるフライアッシュの反応性評価，セメント・コンクリート論文集，Vol.68，pp.61-67，2014
11) 広野真一，鳥居和之：北陸地方を代表する安山岩系骨材のアルカリシリカ反応性とフライアッシュによる抑制機構, セメント・コンクリート論文集, No.66, pp.499-506，2012
12) 山本武志，金津努：API 法によるフライアッシュのアルカリシリカ反応抑制効果の評価，土木学会論文集 E，Vol.62，No.4，pp.657-671，2006
13) 川端雄一郎，松下博通：アルカリシリカ反応抑制の観点からのフライアッシュの品質評価に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.63，No.3，pp.379-395，2007
14) Ando,Y.,Mitani,Y.,Ohno,T.,Joseph,S.H.Lim,Doraipandian, L.：Petrographic Observation and Evaluation of DEF in Concrete Using Fly Ash Cement，Proc. of 43rd Inter. Conf. on Our World in Concrete & Structures,pp.221-230，2018