北陸地方におけるフライアッシュ生コンの標準化に向けた取り組み

2017年7月12日

金沢大学理工研究域環境デザイン学系

教授　鳥居和之

於　仙台国際センター（JCI生コンセミナー）

最初に，今，何故，北陸地方で，FAコンクリートなのか！

その時代的、地域的な背景とは，

(1) 現在，北陸電力管内の電気エネルギーの６２％が石炭火力発電所から。残りは石油火力(10%)と水力(26%)から。石炭を炊けば10%の石炭灰（フライアッシュとシンダーアッシュ）が発生する。FA活用の目指す方向は，あくまでも汎用セメント及び汎用コンクリート。

(2) 北陸地方で，何故，今も，ASRが止まらないのか。JIS A 5308のASR抑制対策が不完全，近い将来に，当然，見直しが必要。

(3) 環境負荷低減，社会インフラの長寿命化，国土強靭化，維持管理の時代など，謳い文句はどうでもよい。北陸地方は，コンクリート構造物にとってもっとも厳しい使用・環境条件であり，深刻な劣化が発生した構造物が多く存在することの認識が必要。その対策もJIS A5308（全国一律）とは自ずと異なるはずである。

(4) 北陸新幹線（金沢）の工事が始まる前から，FAコンクリートの開発・普及を北陸地方から始めるべきであった。反省と自戒をこめて。平成29年3月に文書通達が出され，北陸新幹線敦賀延伸工事で初めてFAコンクリートが土木工事標準示方書に取り入れられた。

本日の発表内容

１．アウトライン

２．背景と目的

３．主な試験データの紹介

（１）北陸産分級フライアッシュの品質

（２）フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質

（３）フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性

（４）フライアッシュを使用したコンクリートの実構造物への適用性

４．今後の課題と展望

５．北陸新幹線敦賀延伸工事への適用

1. アウトライン（その１）

北陸の地域特性やこれまでの基礎研究成果を踏まえると、

基本理念：北陸地方のコンクリートにフライアッシュの活用を標準化するべきである

具現化

現状：①フライアッシュの品質の問題
②これまで、電力業界の積極的な関与がなかった　など
⇒　現在、ほとんどフライアッシュが活用されていない

対策：①従来よりも高品質な北陸産分級フライアッシュの製造
②北陸地方の関係者による産学官連携委員会の設立
⇒　検討内容は、実用化に向けた検討と利用方策の検討

（本研究の基礎データ）

【本研究】

問い：「北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートを実社会（北陸地方）において活用すべきか、否か？」

1. アウトライン（その２）

目的：「北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートを実社会（北陸地方）において活用すべきかどうか」を多面的に検証すること

多面的な検証

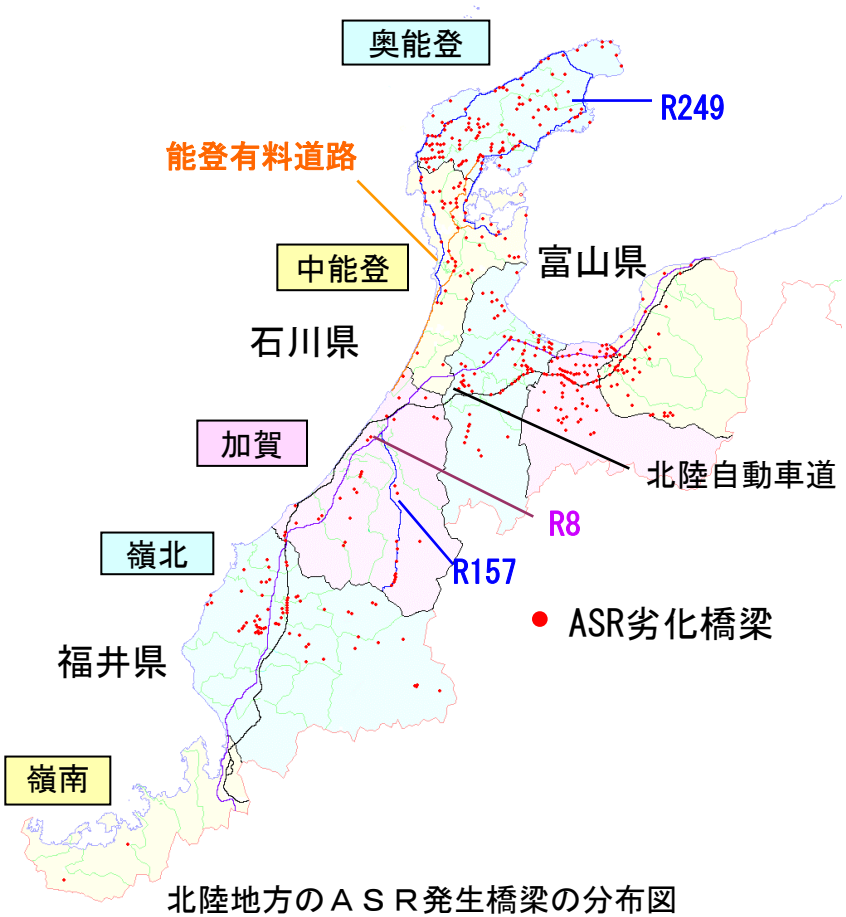
- **論証 1：** 北陸産分級フライアッシュの品質の検証
- **論証 2：** このフライアッシュを使用したコンクリートが、実際の生コンクリート工場で製造されることを想定し、生コンクリート工場配合での製造品質を検証
- **論証 3：** このフライアッシュを使用したコンクリートが、実際の生コンクリート工場で製造されることを想定し、生コンクリート工場配合での耐久性を検証
- **論証 4：** このフライアッシュを使用したコンクリートが、実際の生コンクリート工場で製造されることを想定し、生コンクリート工場配合での実構造物への適用性を検証

結論： 「北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは、汎用コンクリートに比べ品質的に同等以上であり、実社会（北陸地方）において活用すべきである。一方、このコンクリートは、ｽﾗﾝﾌﾟﾛｽ、空気量ﾛｽが経過１時間以降に大きくなる傾向がみられ、今後の標準化に向けては、この課題を克服する必要がある。」

2. 背景と目的

・北陸地方では、北陸3県のほぼ全域にわたり、ASRが発生しており、一部では鉄筋破断を伴う深刻な構造物も確認されている。（北陸地方が抱える深刻なASR問題）

・一方、北陸3県が策定している橋梁長寿命化修繕計画では、ASRが発生している既設構造物の補修・補強には言及しているが、ASRそのものを発生させない、本質的な予防対策の議論がなされていない。



北陸地方のＡＳＲ発生橋梁の分布図

RC橋脚の鉄筋破断状況（上：ハツリ前、下：ハツリ後）

現状のASR抑制対策に不備はないのか？

【現状のASR抑制対策（JIS A5308 ：1986年）】

（1） コンクリートのアルカリ総量を3kg/m^{3}以下にする。

（2） 化学法またはモルタルバー法で「無害」と判定された骨材を使用する。

（3） ASR抑制効果が認められる混合セメントなどを使用する。

の対策のうち、少なくとも、ひとつを選択することを基本としている。

【全国一律のASR抑制対策の問題点】

（1） 北陸地方では、クリストバライトやオパールなどのASRに対して高い反応性を示す鉱物を含む河川産骨材が混入しており、この場合にはアルカリ総量値を遵守してもASRを発生する可能性がある。

（2） 北陸地方の河川産骨材の多くは化学法によって「無害」と「無害でない」の境界線上に分布しており、このことは岩種構成率のわずかな違いにより判定結果が相違することを意味している。

従って、(1),(2) の対策の不確かさ（または不備）を考慮すると、北陸地方においては、(3) の混合セメントなどを使用することが有効である。

（独） 土木研究所 ： 長期屋外暴露試験結果 （2014）
特にペシマムを有する骨材に対しての注意が必要

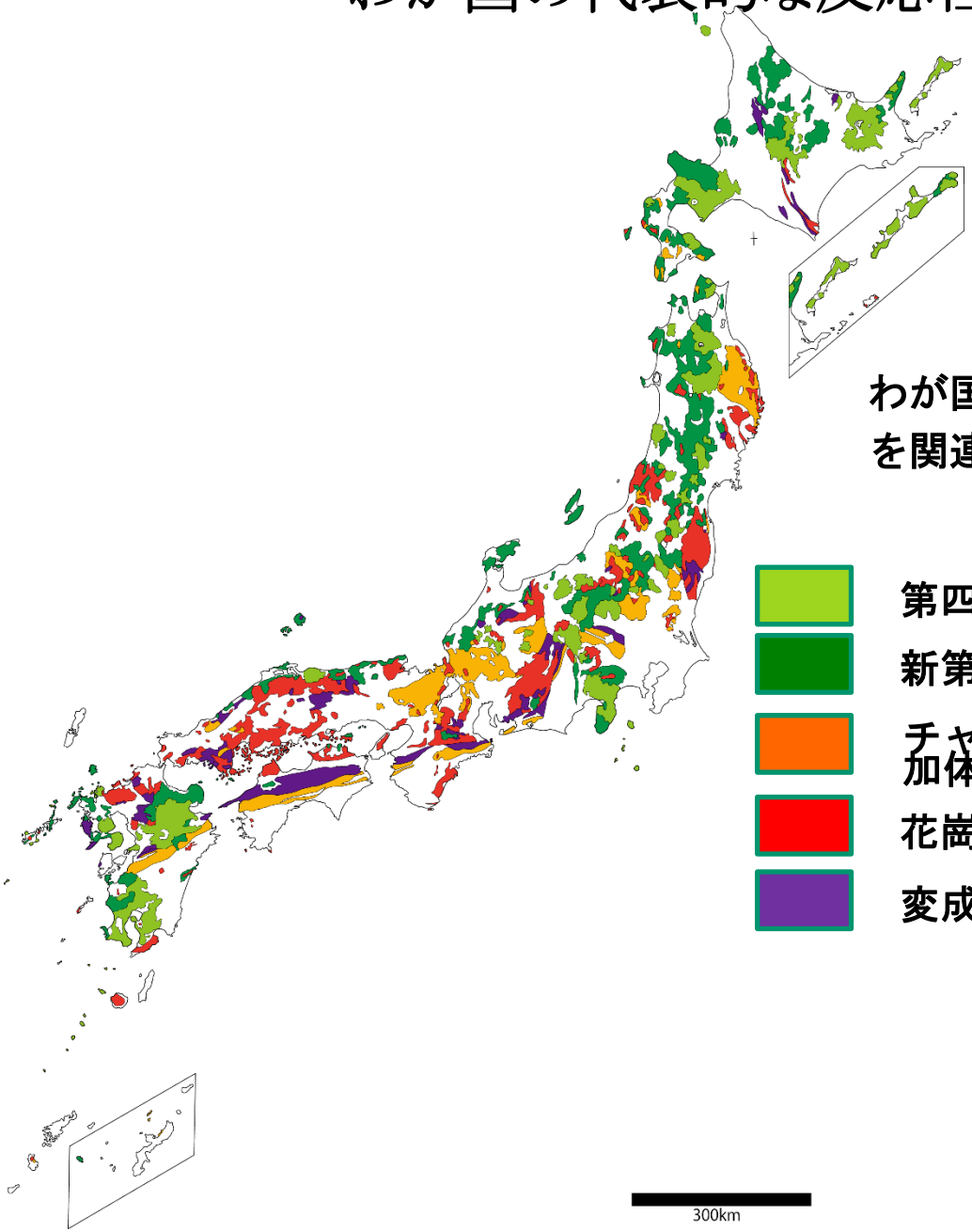
【JR東日本の対応】

（1） ASR試験方法（化学法、モルタルバー法）に独自の上乗せ基準を設定し、従来の2区分から、「E有害」「準有害」「E無害」の3区分に変更した。

（2） 判定区分に対応する対策は、「E有害」では混合セメントなどによる対策、「準有害」ではアルカリ総量を2.2kg/m^{3}以下にする対策、もしくは、混合セメントなどによる対策とした。

従って、JR東日本のASR抑制対策は、現在のASR抑制対策の(1),(2) の対策の不確かさ（または不備）を補い、(3)の対策を原則としていることから、先駆的な事例であるといえる。

わが国の代表的な反応性骨材の分布



わが国の地質状況とASRの危険性・発生状況を関連付けて，地域ごとに考察する。

- 第四紀火山岩類
- 新第三紀火山岩類（グリーンタフを含む）
- チャートを多量に含む付加体（ジュラ紀付加体）
- 花崗岩類→周囲のホルンフェルスが反応性
- 変成岩類

ASRと関係の深い岩石の分布図（小笠原正継・須藤定久（2003）：「地質標本館グラフィックスシリーズ8 日本の鉱物資源」を改変して作成）

JR東日本の橋梁でのASR劣化状況

写真-1　ひび割れ発生状況

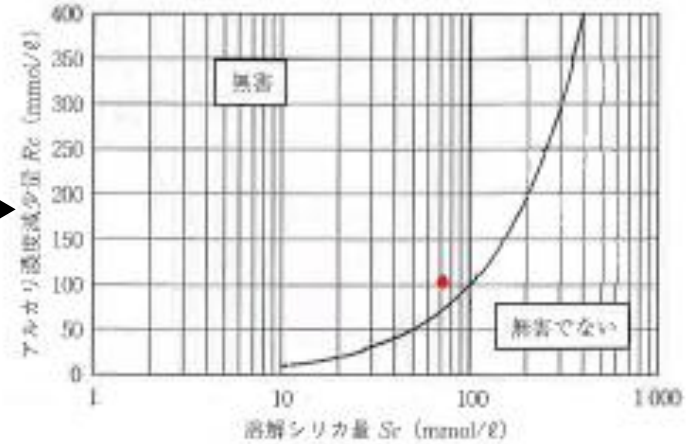


図-2　細骨材の試験結果（化学法）

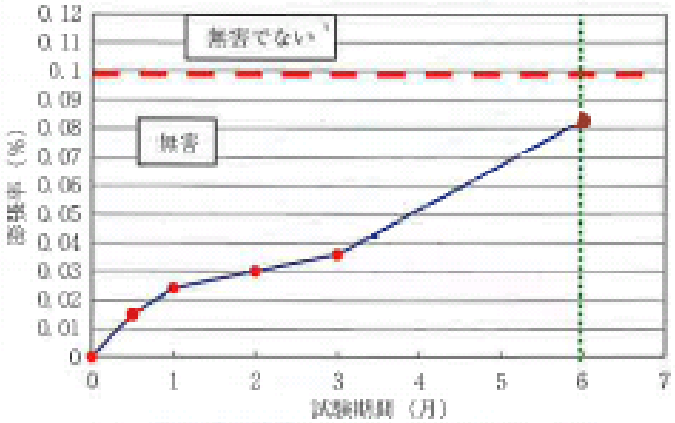


図-1　粗骨材の試験結果（モルタルバー法）

松田芳範：JR東日本における混和材使用の現状と課題, コンクリート工学, Vol.52, No.5, 2014. より抜粋

JR東日本のASR判定区分（化学法）

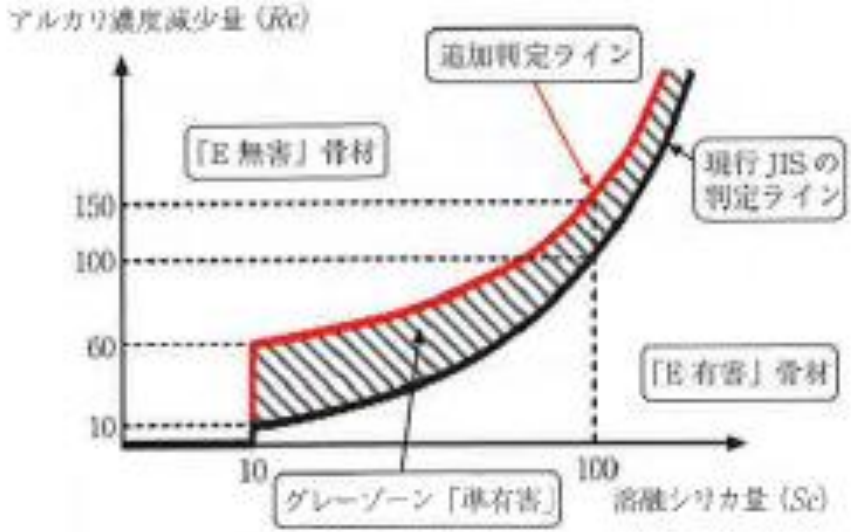


図-5　化学法の判定イメージ

松田芳範：JR東日本における混和材使用の現状と課題，コンクリート工学，Vol.52，No.5，2014.より抜粋

表-2　化学法による骨材判定区分の定義

骨材区分	判定規準
「E有害」骨材	溶融シリカ量（Sc）≧10 mmol/ℓ かつアルカリ濃度減少量（Rc）<700 mmol/ℓ のとき，アルカリ濃度減少量（Rc）が溶融シリカ量（Sc）以下となる骨材（(Rc)≦(Sc) である骨材）
「準有害」骨材	溶融シリカ量（Sc）≧10 mmol/ℓ かつアルカリ濃度減少量（Rc）<700 mmol/ℓ のとき，アルカリ濃度減少量（Rc）が溶融シリカ量（Sc）より大きく，かつ溶融シリカ量（Sc）に50を加えた値（Sc+50）以下となる骨材（(Sc)<(Rc)≦(Sc+50) である骨材）
「E無害」骨材	溶融シリカ量（Sc）≧10 mmol/ℓ かつアルカリ濃度減少量（Rc）<700 mmol/ℓ のとき，アルカリ濃度減少量（Rc）が溶融シリカ量（Sc）に50を加えた値（Sc+50）より大きい骨材（(Sc+50)<(Rc) である骨材）

表-3　モルタルバー法による骨材のJR東日本判定区分

骨材区分	判定規準
「E有害」骨材	膨張率が26週で0.10%以上（c），もしくは膨張率が26週で0.05%以上～0.10%未満であっても13週から26週までの膨張の増加割合が8週から13週までの増加割合に対し大きい骨材（d）
「準有害」骨材	膨張率が26週で0.05%以上～0.10%未満かつ13週から26週までの膨張の増加割合が8週から13週までの膨張の増加割合に対し小さい骨材
「E無害」骨材	膨張率が26週で0.05%未満の骨材（a）および（b）

↓

【北陸地方のASR抑制対策】

- JR東日本では混合セメントを原則としているが、北陸地方では、ほぼ全域でASRが発生している現状を踏まえると、

JR東日本のASR抑制対策を更に一歩進めた　⇒「コンクリートへの混合セメントなどの使用を標準化」

更に、北陸の地域特性を踏まえた対策　⇒「コンクリートへのフライアッシュの活用を標準化」

◎ 北陸の地域特性を踏まえた対策とは？

北陸の地域特性

【地産地消の観点】

・北陸地方にはフライアッシュを産出する石炭火力発電所はあるが、高炉スラグ微粉末を産出する製鉄所はない。
・従って、フライアッシュの活用は地産地消に繋がる。

【対策（基本理念）】

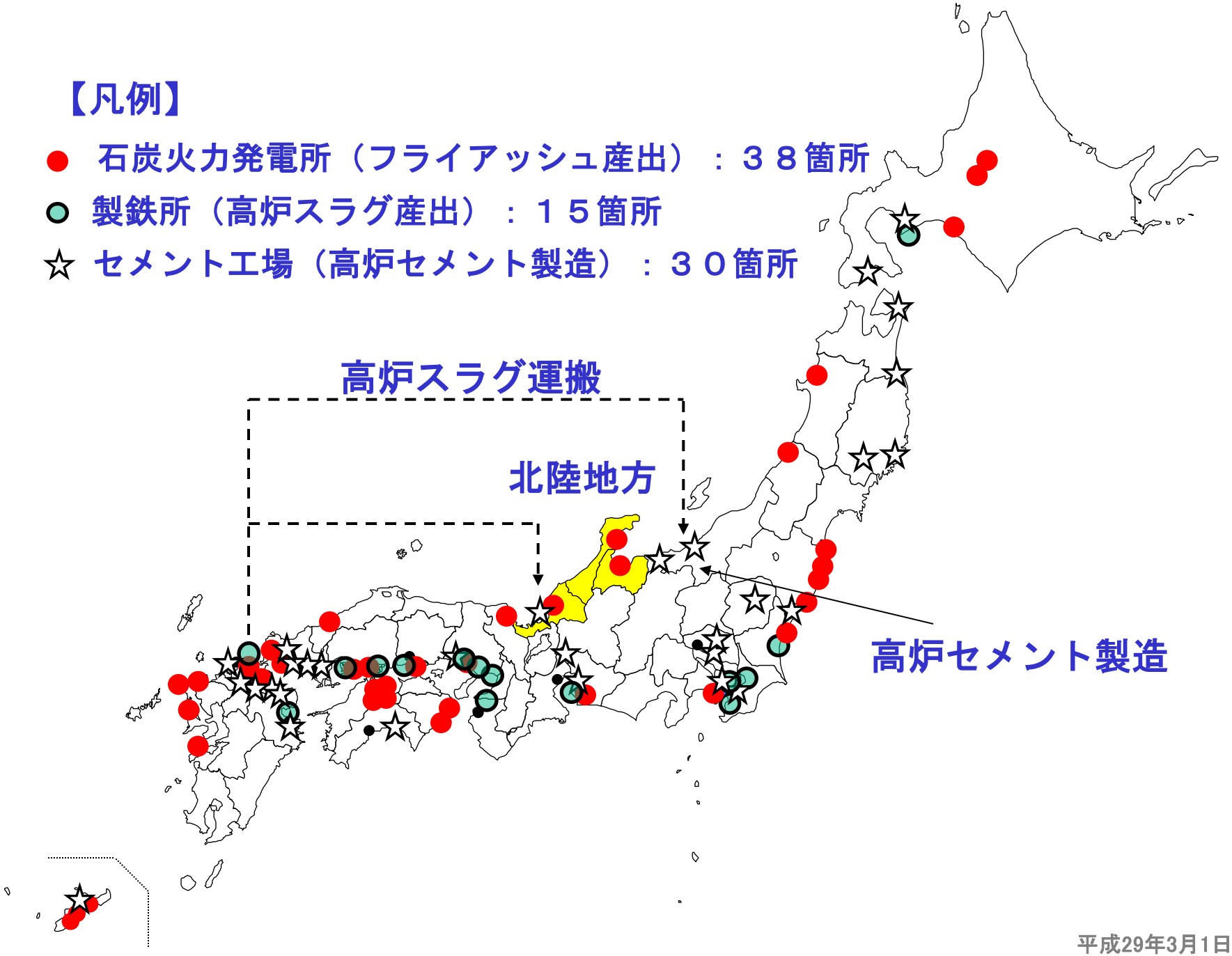
北陸地方のコンクリートに、フライアッシュセメントまたは混和材としてのフライアッシュの使用を標準化

【エネルギーセキュリティーの観点】

・東日本大震災以降の北陸地方のエネルギー事情から、石炭火力発電の運転に伴い発生する石炭灰の処理などが今まで以上に切迫した課題となっている。

【コンクリート構造物の長寿命化の観点】

・基礎研究の結果、北陸産のフライアッシュを混和することで、この地域のコンクリート構造物の主たる劣化原因であるASRと塩害の両方を抑制できる。



平成29年3月1日作成

背景　：

　北陸の地域特性を反映した「北陸地方のコンクリートにフライアッシュの活用を標準化するべき」との**基本理念**

目的　：

　上記、基本理念の実現を目指し設立された産官学連携委員会の活動の一環として、「北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートを実社会（北陸地方）において活用すべきかどうか」を**多面的に検証**すること

3. 主な試験データの紹介（品質確保）

論証 1 ：

北陸産分級フライアッシュの品質の検証

◎ 北陸産分級フライアッシュの製造

- 北陸産分級フライアッシュの製造のポイントは、「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」である。
- また、北陸産分級フライアッシュの供給能力は、七尾大田火力発電所で年間 3 万トン、敦賀火力発電所で年間 3 万トン、これら合わせて年間 6 万トンの供給体制を構築している。

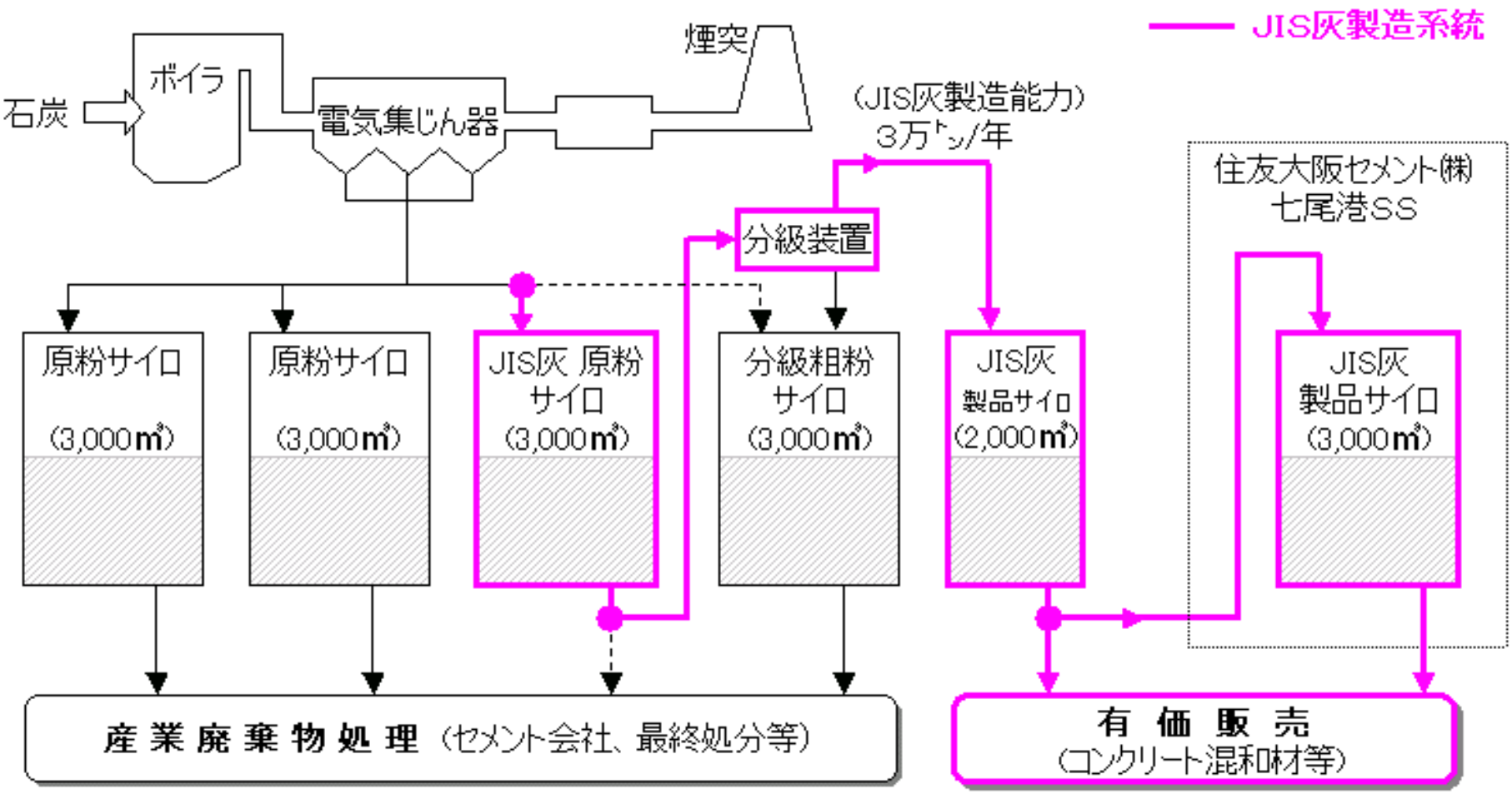
「品質管理体制の強化」:

- JIS灰の生産が可能な石炭（JIS灰候補炭）を、年度の石炭調達計画に反映する。
- このJIS灰候補炭を燃焼した際に発生したフライアッシュは、分級装置にかける前と後の 2 回、JIS規格の品質管理項目についての品質確認を実施する。

「分級装置の導入」:

- 七尾大田火力発電所では、2009年（平成21年） 8月から、敦賀火力発電所では、2012年（平成24年） 9月から分級装置を稼動させた。
- 分級装置は、フライアッシュの取り扱いが容易で、分級粒子径領域が比較的細かく、かつ、精密な分級が可能である 「強制渦遠心分級」方式とした。
- また、分級装置の運用は、フライアッシュ原粉の比表面積の値が1,000 cm^2/g 程度高くなるように調整した。

七尾大田火力発電所のＪＩＳ規格フライアッシュの製造工程



※ＪＩＳ灰安定供給量の確保を図るため、射水市および福井市で新たな供給拠点（ＪＩＳ灰製品サイロ）を確保

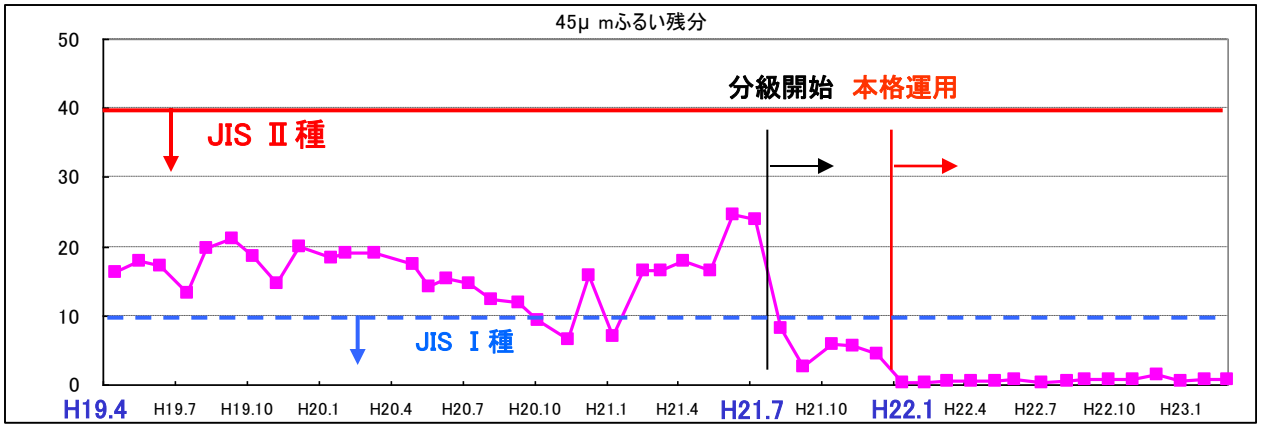
七尾大田産分級フライアッシュの品質確認

七尾産フライアッシュのJIS項目について、分級開始前のデータ(H19.4～H21.7)と分級装置本格運用後のデータ(H22.1以降)を示す。

（１）分級により改善が見込まれるJIS項目

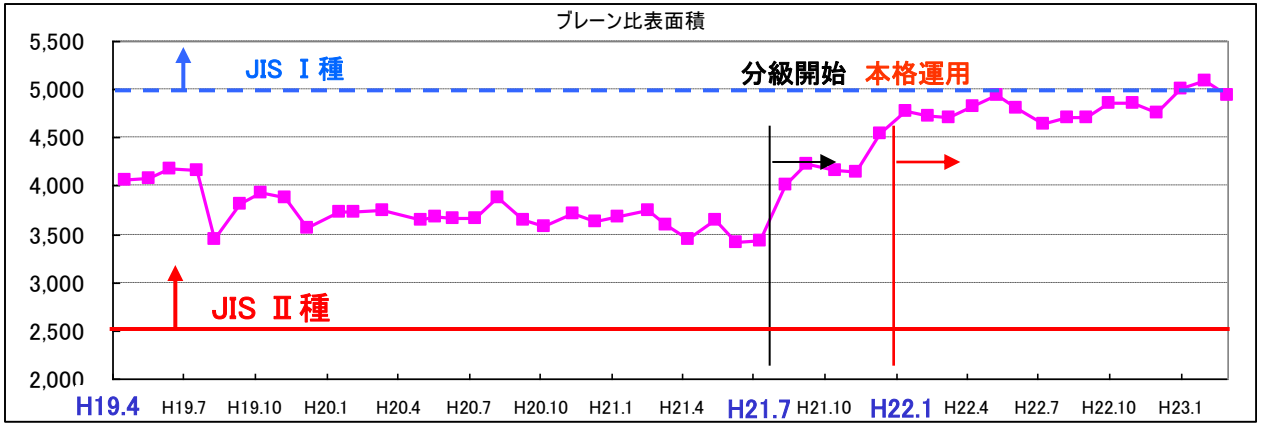
①粉末度：ポゾラン反応性や流動性に影響

１）45μmふるい残分（%）



	分級開始前 (H21.7以前)	本格運用後 (H22.1以降)
Max	24.6	1.3
Min	6.5	0.2
Ave	16.2	0.6
標準偏差	4.2	0.3
JIS Ⅱ種	40以下	

２）比表面積(cm²/g)



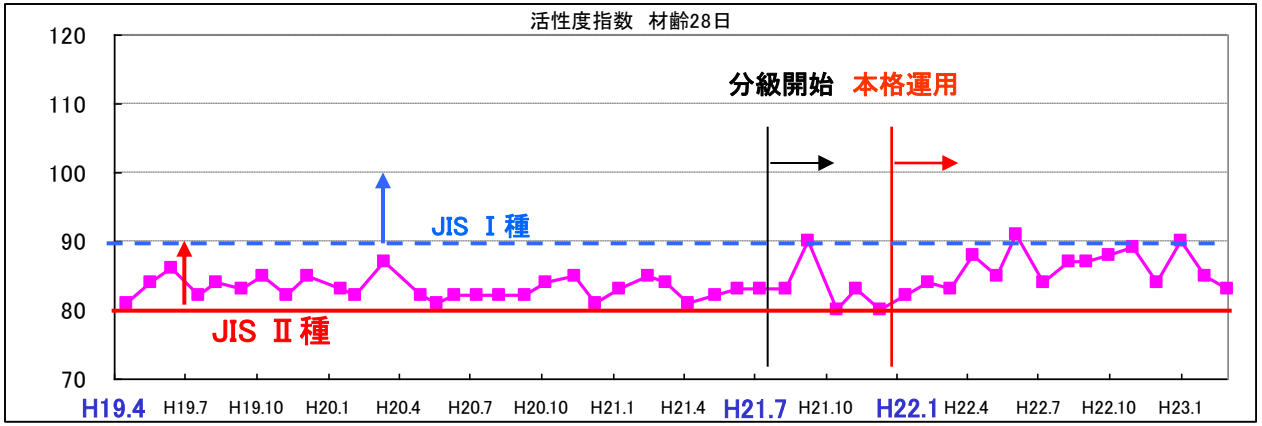
	分級開始前 (H21.7以前)	本格運用後 (H22.1以降)
Max	4170	5090
Min	3410	4640
Ave	3725	4821
標準偏差	204	123
JIS Ⅱ種	2500以上	

・45μmふるい残分は、分級開始から減り、本格運用後はJIS Ⅰ種の規格を満足している。

・比表面積は、分級開始から増え、本格運用後は、JIS Ⅰ種の規格に近い値を示すようになっている。

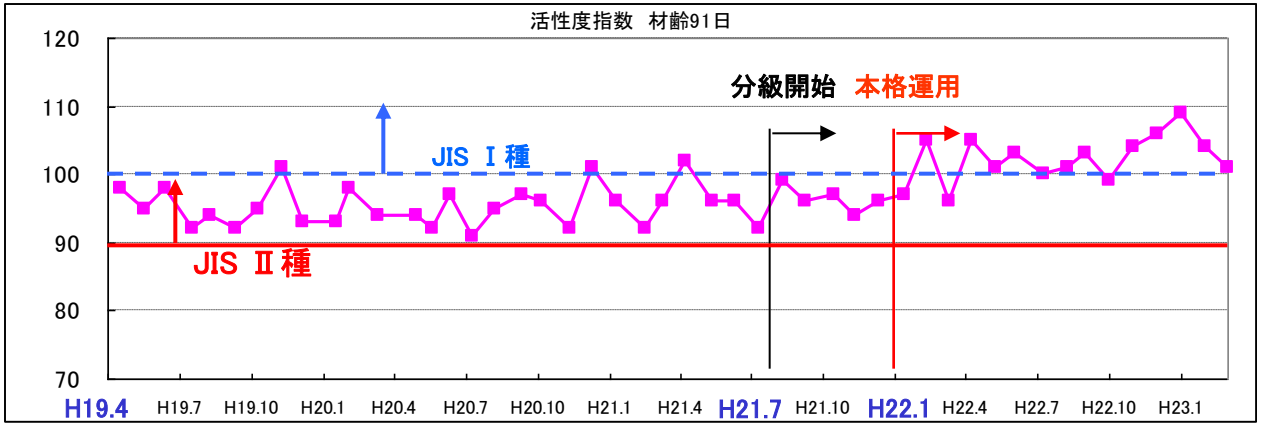
②活性度指数：強度増進を示す指標

１）材齢28日(%)



	分級開始前 (H21.7以前)	本格運用後 (H22.1以降)
Max	87	91
Min	81	82
Ave	83	86
標準偏差	1.6	2.7
JIS Ⅱ種	80以上	

２）材齢91日(%)



	分級開始前 (H21.7以前)	本格運用後 (H22.1以降)
Max	102	109
Min	91	96
Ave	95	102
標準偏差	2.9	3.4
JIS Ⅱ種	90以上	

・活性度指数は、材齢28日、材齢91日ともに、本格運用後、改善傾向を示している。
・特に材齢91日については、JIS Ⅰ種の規格に近い値を示すようになっている。

【分級前後におけるJIS規格項目の比較】

〔七尾大田火力発電所の品質管理データ〕

JIS項目		分級後（H22.1～H25.12）		分級前（H19.4～H21.7）		判定※
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	
二酸化けい素(%)		59．3	3．7	67．6	1．9	×
湿分(%)		（＜0．2）	－	（＜0．1）	－	△
強熱減量(%)		2．0	0．3	2．1	0．4	△
密度(g/cm³)		2．38	0．04	2．24	0．05	○
粉末度	45μ mふるい残分(%)	0．6	0．4	16．2	4．2	○
	比表面積(cm²/g)	4，717	189	3，725	204	
フロー値比(%)		107	2	100	1	○
活性度指数	材齢28日	93	6	83	2	○
	材齢91日	105	4	95	3	

分級後に炭種が変更となったことが影響

※　【判定の凡例】

○：分級後に標準偏差以上に品質が向上

△：分級前後での変化が標準偏差以内

×：分級後に標準偏差以上に品質が低下

〔敦賀火力発電所の品質管理データ〕

JIS項目		分級後（H24.12～H25.12）		分級前（H19．4～H24．11）		判定※
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	
二酸化けい素(%)		64．8	2．2	64．4	3．0	△
湿分(%)		（＜0．1）	－	（＜0．1）	－	△
強熱減量(%)		3．2	0．1	3．6	0．5	△
密度(g/cm³)		2．29	0．01	2．22	0．02	○
粉末度	45μ mふるい残分(%)	1．4	0．3	17．4	4．9	○
	比表面積(cm²/g)	4，635	180	3，780	225	
フロー値比(%)		104	3	101	2	○
活性度指数	材齢28日	86	1	82	2	○
	材齢91日	100	2	96	2	

分級により明らかな品質の向上が確認された項目

- **粉末度**（分級の運用条件）
- **密度**
- **フロー値比**
- **活性度指数**

その他の項目については、分級による明らかな品質の低下はみられない。

◎ 北陸産分級フライアッシュの分級効果の検証

- 北陸産分級フライアッシュの品質管理データによる分級前後の比較では、分級前後で炭種や燃焼条件が一定でないため、純粋な分級による効果がわからない。
- そこで、炭種や燃焼条件が同じになるように、同一サンプルを用いた分級効果確認試験を試験室レベルで実施した。
- 試験用の分級機には、実際の分級装置と同じ強制渦遠心分級による方式のものを用い、実際の運用と同様、フライアッシュ原粉の比表面積の値が1,000 cm^2/g 程度高くなるように調整した。
- 試験結果は、物理的性質と化学的性質の変化として整理した。

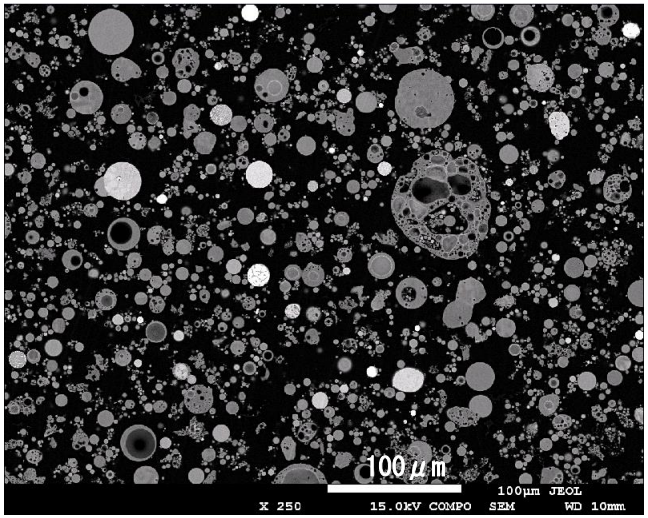
試験サンプルの分級試験結果

試料名	分級条件				収率（%）		ブレーン比表面積（cm^2/g）		
	風量（m^3/min）	回転数（rpm）	粉体濃度（kg/m^3）	原料挿入量（kg/hr）	粗粉	細粉	原粉①	細粉②	②－①
七尾産	22	950	0.2	264	50.5	49.5	3,390	4,380	1,080
敦賀産	20	1,600	0.2	240	47.3	52.7	3,740	4,810	1,070

物理的性質の変化（七尾産）

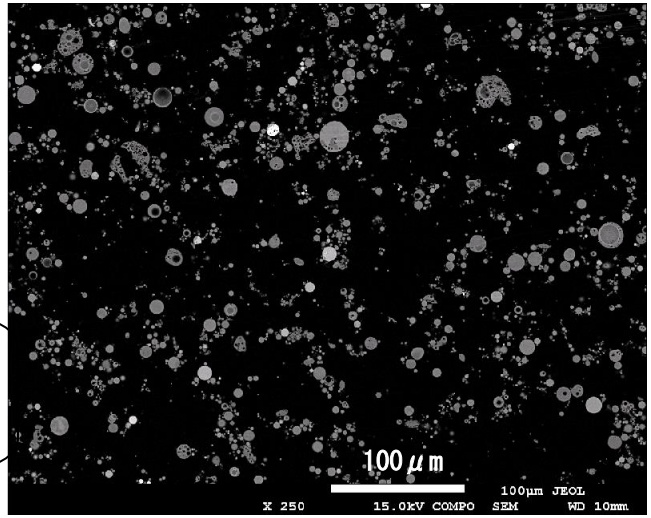
走査電子顕微鏡による反射電子像

（フライアッシュ原粉）



分級

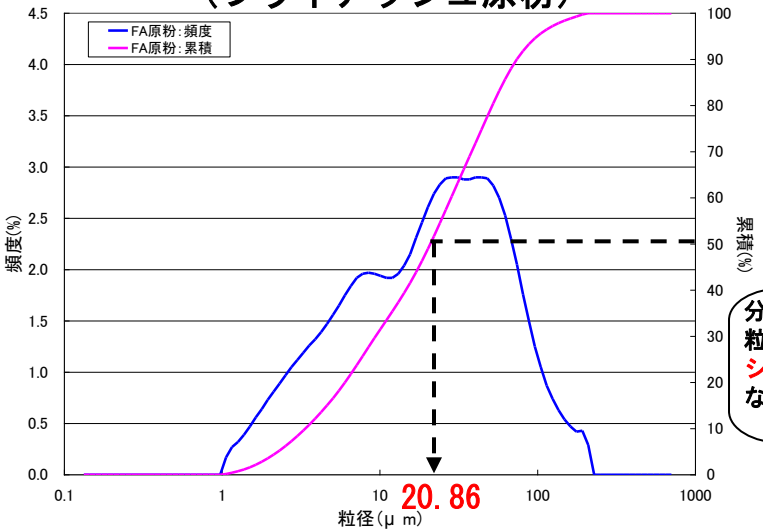
（分級フライアッシュ）



分級により、角ばった粒子、中空の粒子が少なくなり、細かく均等になっている。

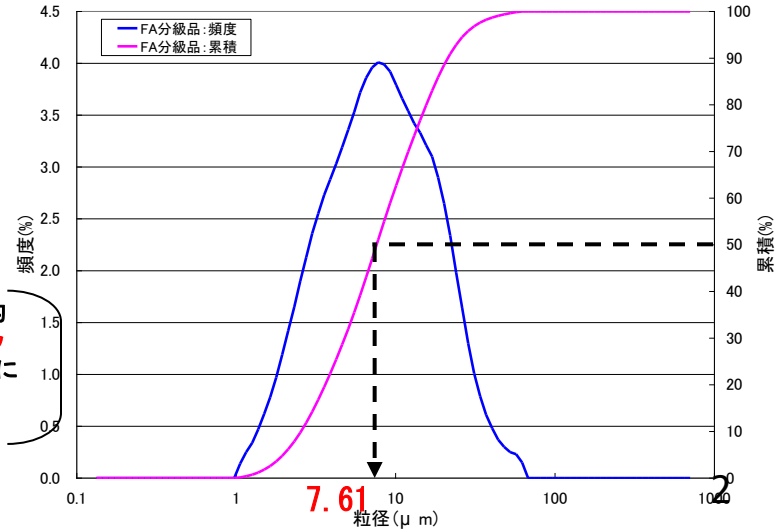
レーザー回折法による粒度分布測定結果

（フライアッシュ原粉）



分級

（分級フライアッシュ）



分級により、平均粒径がフライアッシュ原粉の約1/3になっている。

化学的性質の変化（七尾産、敦賀産）

蛍光Ｘ線法による化学組成分析結果および強熱減量

（単位：%）

試料名		化学組成分析											強熱減量
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	
七尾産	フライアッシュ原粉	50.93	29.53	8.01	4.36	0.82	0.15	0.25	0.55	1.38	0.86	0.12	1.8
	フライアッシュ分級品	53.60	28.93	6.74	3.20	0.77	0.22	0.30	0.72	1.39	0.98	0.09	2.0
敦賀産	フライアッシュ原粉	56.88	25.90	5.41	1.37	0.88	0.21	0.43	1.28	1.18	0.36	0.06	4.4
	フライアッシュ分級品	57.84	26.43	4.45	1.24	0.81	0.25	0.49	1.41	1.17	0.48	0.05	4.0

粉末Ｘ線回折／リートベルト解析による鉱物組成分析結果

（単位：%）

試料名		結晶質成分				ガラス質成分	合計
		石英	ムライト	マグネタイト	ライム		
七尾産	フライアッシュ原粉	5.4	26.7	2.0	0.8	65.1	100.0
	フライアッシュ分級品	5.0	20.6	1.0	0.2	73.2	100.0
敦賀産	フライアッシュ原粉	9.9	22.0	1.4	0.0	66.6	100.0
	フライアッシュ分級品	8.7	19.0	0.7	0.0	71.6	100.0

【分級効果のまとめ】

〈物理的性質の変化〉

試料名	平均粒径（μm）	比表面積（cm²/g）
ﾌﾗｲｱｯｼｭ原粉	20．86（19．70）	3，390（3，740）
分級ﾌﾗｲｱｯｼｭ	7．61（7．10）	4，380（4，810）

＋

〈化学的性質の変化〉

結晶質成分（%）	ｶﾞﾗｽ質成分（%）
34．9（33．4）	65．1（66．6）
26．8（28．4）	73．2（71．6）

注）数値は七尾産フライアッシュの値

（　）内は敦賀産フライアッシュの値を示す

ポゾラン反応性が向上

活性度指数（%）	
材齢28日	材齢91日
83（81）	95（95）
91（87）	104（105）

流動性が向上

フロー値比（%）
101（101）
106（105）

- 物理的性質として、分級により粒径が1/3程度になることや細かく均等な粒径になることにより、ポゾラン反応性や流動性が向上する。
- 化学的性質として、分級によりガラス質成分が増加し、ポゾラン反応性が向上する。
- 物理的・化学的性質の変化により、硬化コンクリートの強度・耐久性に影響する活性度指数やフレッシュコンクリートの流動性に影響するフロー値比が向上する。

◎ 論証1のまとめ

論証１では、コンクリート用フライアッシュのJIS規格（JIS A6201）について、七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所の日常の品質管理データの分析を行うとともに、炭種や燃焼条件を同じとした分級効果確認試験を実施し、これらの結果を総合的に評価することにより、北陸産分級フライアッシュの品質を検証した。

その結果、北陸産分級フライアッシュの品質は、フレッシュコンクリートの流動性や硬化コンクリートの耐久性に関わる粉末度、密度、フロー値比、活性度指数の4項目において、明確な品質の向上が認められ、従来よりも高品質なフライアッシュになっていることを検証できた。また、北陸産分級フライアッシュの品質の向上は、その製造過程により、物理的・化学的性質が改善されたためであった。

3. 主な試験データの紹介

論証 2 ：

　北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートが、実際の生コンクリート工場で製造されることを想定し、生コンクリート工場配合での製造品質を検証

◎ コンクリートの製造品質とは？

実際の生コンクリート工場における、コンクリート製造品質の安定のためのステップ

STEP1 ：室内試験
- 強度－C／W関係式
- ｽﾗﾝﾌﾟ－単位水量関係式

⇒ 配合の決定

⇨

STEP2 ：実機試験
- 強度確認
- スランプロス確認
- 空気量ロス確認

⇒ 必要により、配合修正

⇨

STEP3 ：実施工
- 強度確認
- ｽﾗﾝﾌﾟ，空気量確認
- 打設・仕上がり状況確認

⇒ 必要により、配合修正

⇨

製造品質の安定

従って、コンクリートの製造品質 ⇒ 施工性と強度発現性の確認が必要

論証2では、実際の生コンクリート工場において、北陸地方の代表的な骨材を用いた室内試験および実機試験を実施し、北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合を決定し、同一の呼び強度において、以下の 項目について検証する。

- STEP1 室内試験結果
- STEP2 実機試験結果
- 施工性に関する汎用コンクリートとの比較
- 強度発現性に関する汎用コンクリートとの比較 （強度改善メカニズムの考察を含む）

※1： STEP3 実施工については、論証4で検証する。

※2： 汎用コンクリートとは、普通セメントおよび高炉セメントを使用したコンクリートを示す。

記号の説明

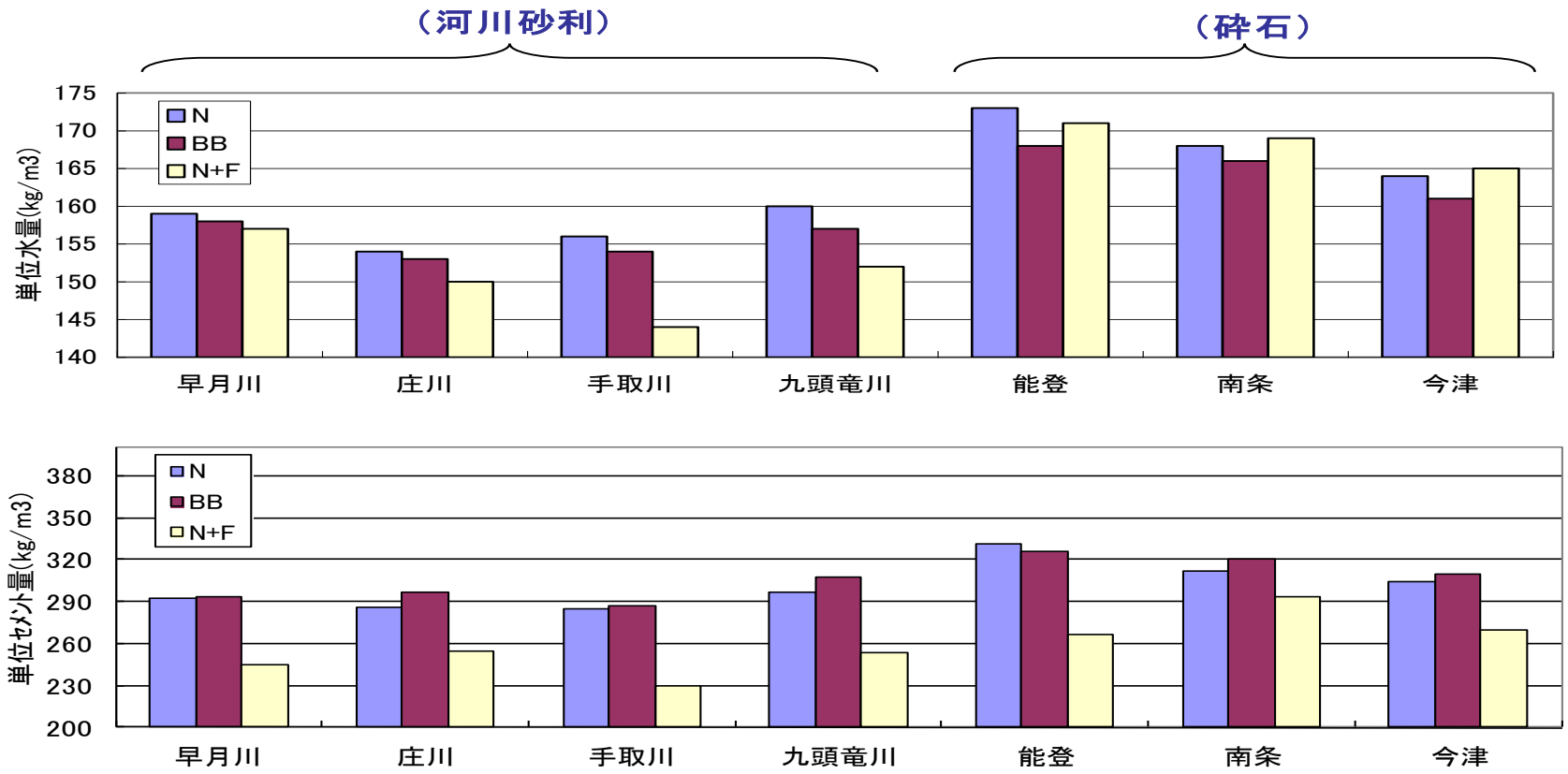
OPC(N)　：　普通セメントを用いたコンクリート

BB(N+B)：　高炉スラグ微粉末を混和したコンクリート

FB(N+F)　：分級フライアッシュを混和したコンクリート

◎ STEP1 室内試験結果の検証

- 北陸地方の代表的な骨材を用いた室内試験により決定された配合(24-8-25)において、単位水量と単位セメント量について、汎用コンクリートとの比較を実施した。
- その結果、当該コンクリートは汎用コンクリートに対し、単位水量は河川砂利で1～12kg/m^{3}低減でき、単位セメント量は20～60kg/m^{3}低減することができ、配合上有利であることを検証できた。一方、砕石では単位水量が減らなかったのは、骨材同士の噛み合わせ効果がスランプ値に影響したものと推察された。

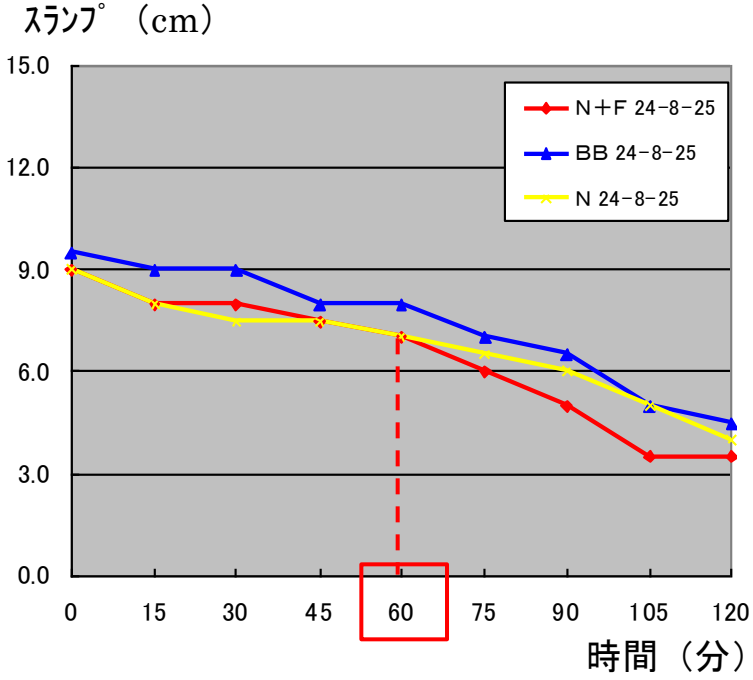


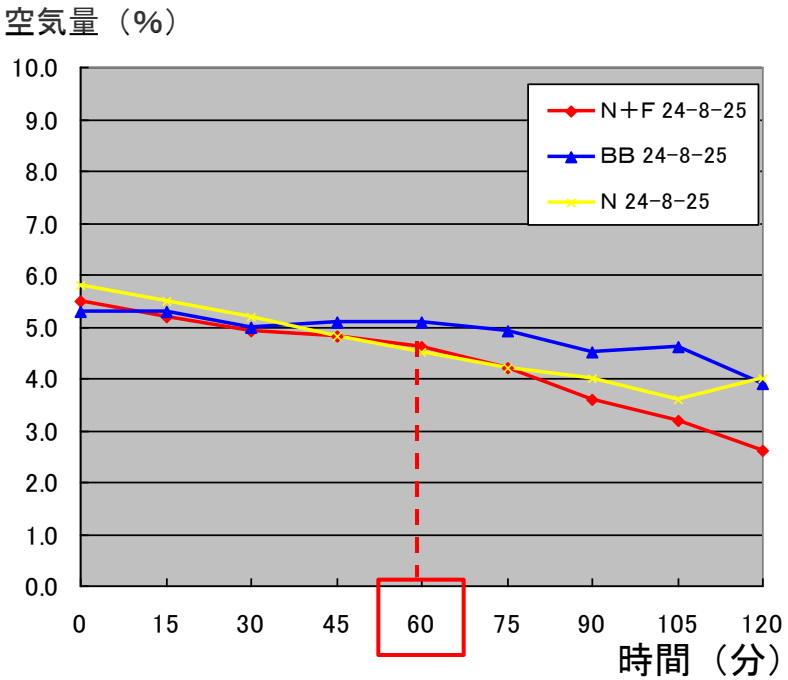
(N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，N＋F:フライアッシュ 15%置換(内割り))

◎ STEP2 実機試験結果の検証

- 北陸地方の代表的な骨材を用いた実機試験により、強度発現性を確認するとともに、スランプロスと空気量ロスについて、汎用コンクリートとの比較を実施した。
- その結果、当該コンクリートは、室内試験と同様の強度発現性を示し、スランプロス、空気量ロスは、汎用コンクリートに対し、経過1時間以降、ロスが大きい傾向がみられたため、実施工では、経過1時間以内での施工が推奨された。

【九頭竜川産骨材の例】





（N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，N＋F:フライアッシュ 15%置換(内割り)）

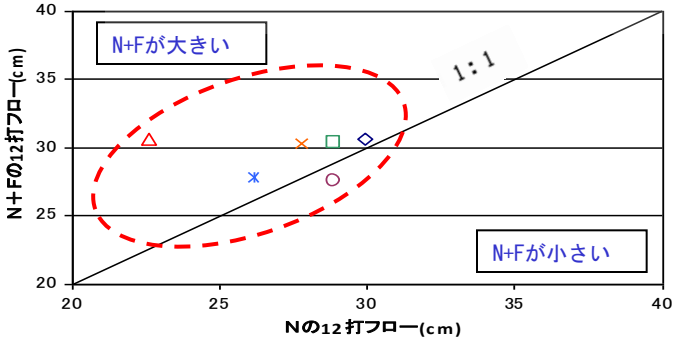
◎ 施工性に関する汎用コンクリートとの比較による検証

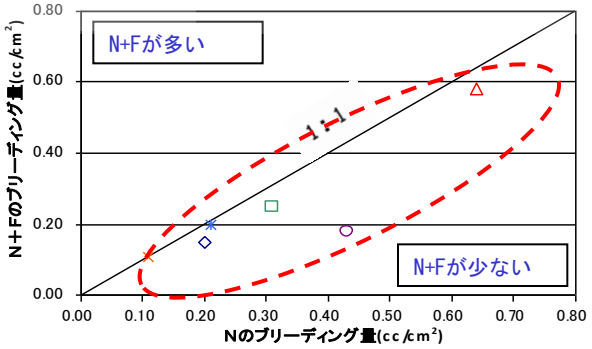
- コンクリートの施工性に関して、コンクリートの所要の流動性が確保されているか、また、ブリーディングを確認するため、12打フロー試験とブリーディング試験について、汎用コンクリートとの比較を実施した。
- その結果、当該コンクリートは汎用コンクリートに対し、流動性が大きく、ブリーディングが少ないことが確認され、ブリーディングの減少に伴う仕上げ時間の短縮や沈降ひび割れの減少などの効果が期待できることが検証できた。

【12打フロー試験結果】

【ブリーディング試験結果】

【Nに対して】

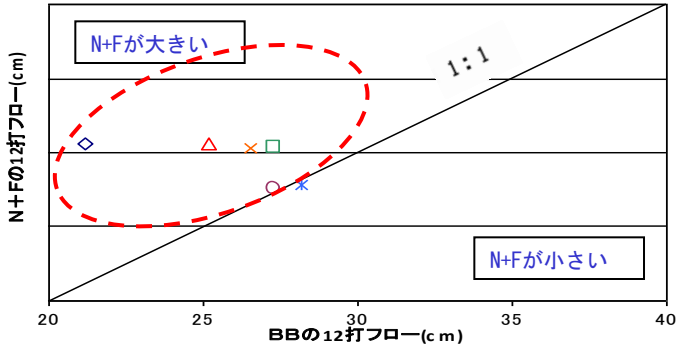


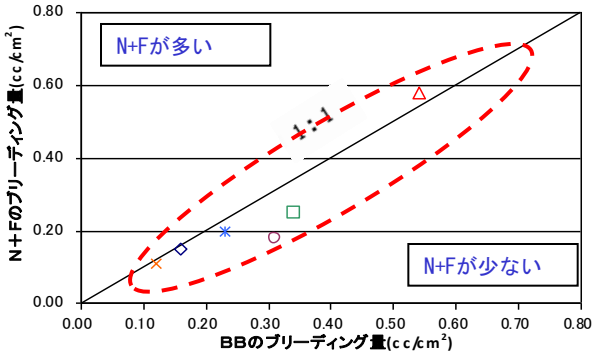


（骨材の産地名）

- △早月川産
- ○庄川産
- ◇手取川産
- □能登産
- ＊九頭竜川産
- ×滋賀県今津産

【BBに対して】



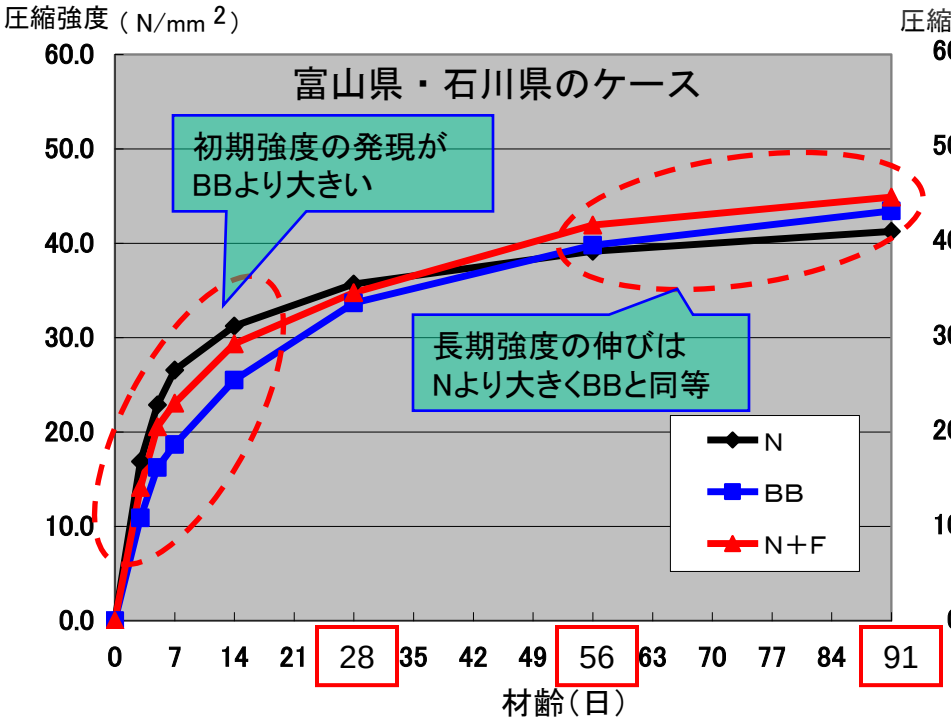


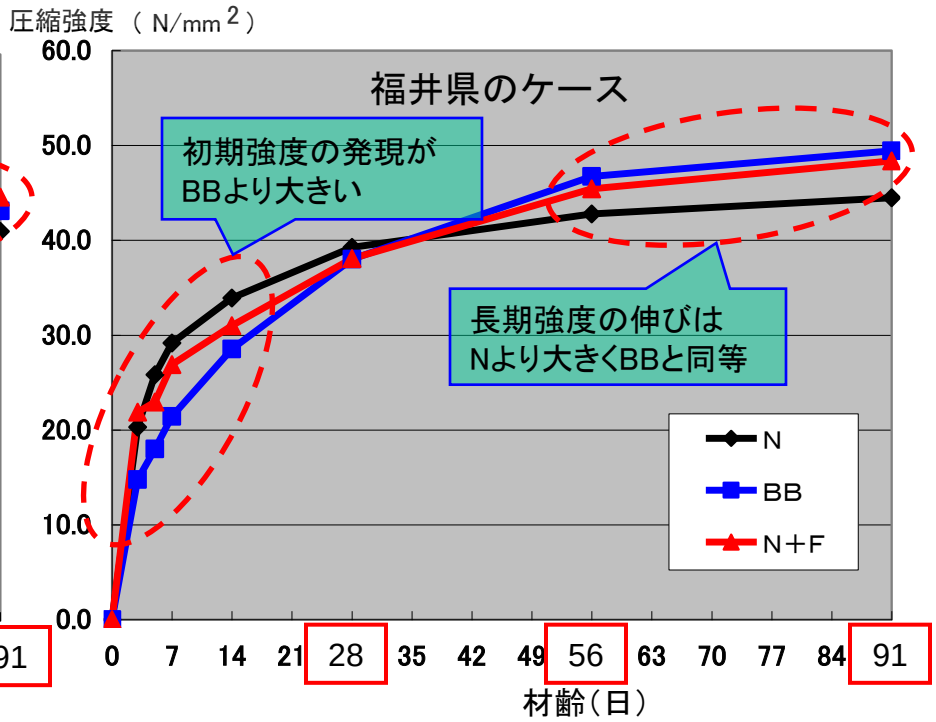
（N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，N＋F:フライアッシュ 15%置換(内割り)）

◎ 強度発現性に関する汎用コンクリートとの比較による検証

- コンクリートの強度発現性に関して、同一の呼び強度での配合を用いて、圧縮強度試験について、汎用コンクリートとの比較を実施した。
- その結果、当該コンクリートは汎用コンクリートに対し、Nに対する初期強度発現を除いて、同等以上の強度発現があることを検証できた。また、初期強度発現はNより小さいが、型枠の取外し時期などの実質的な問題のない範囲であった。

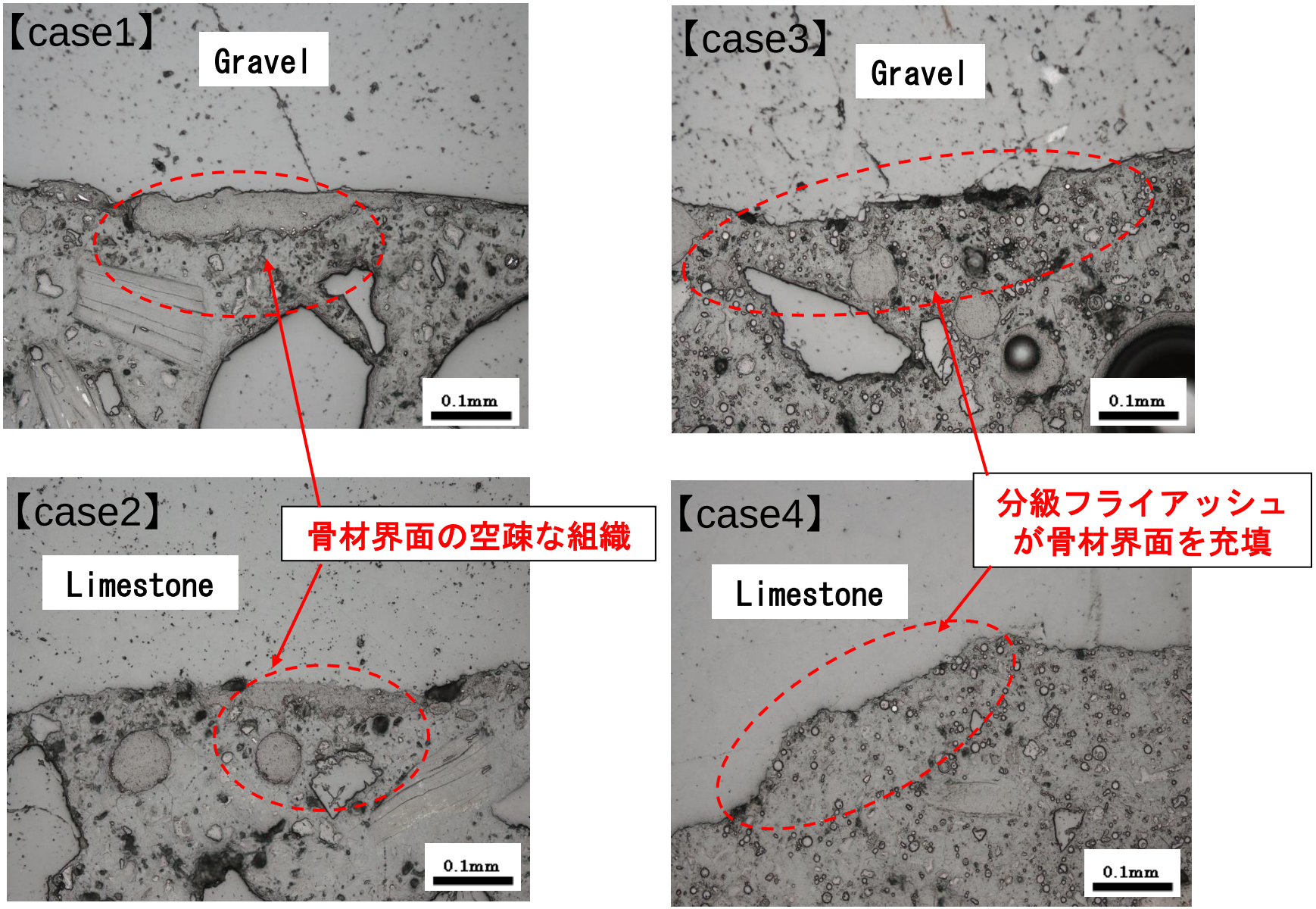
【圧縮強度試験結果】





（N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，N＋F:フライアッシュ 15%置換(内割り)）

偏光反射顕微鏡による骨材界面の反射電子像 ： 粒径10μm以下の分級フライアッシュがセメントペーストとともに骨材界面を充填し、遷移帯（ITZ）の改善に寄与していると推察される。



◎ 論証2のまとめ

論証2では、実際の生コンクリート工場において、施工性や強度発現性の観点から、北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質が、汎用コンクリートに対し同等以上であるかどうかを検証した。

その結果、北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの製造品質は、施工性や強度発現性の観点から、Ｎに対する初期強度発現を除いて、汎用コンクリートよりも品質的に同等以上であることが検証できた。また、初期の強度発現は、Ｎより小さいが、型枠の取り外し時期などの実質的な問題がない範囲であった。さらに、この強度発現は、フライアッシュのポゾラン反応性に関して、従来からいわれているコンクリート内部組織の緻密化だけでなく、粒径10μm以下の北陸産分級フライアッシュがセメントペーストとともに粗骨材界面を十分に充填することにより、材齢7日以降の長期にわたり、ITZを改善する効果もあることが示唆された。一方、北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは、スランプロスや空気量ロスが経過1時間以降に大きくなる傾向があるため、経過1時間以内での施工が推奨された。

3. 主な試験データの紹介（耐久性）

論証 3 ：

　北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートが、実際の生コンクリート工場で製造されることを想定し、生コンクリート工場配合での耐久性を検証

◎ コンクリートの耐久性に関する比較項目

論証3では、北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性に関して、論証2での配合により、汎用コンクリートとの比較評価を実施する。比較項目としては、コンクリート構造物の耐久性を著しく低下させる「ひび割れ」を誘発する要因に対する性能として、以下の項目について検証した。

○ 初期段階の「ひび割れ」に関わる項目

- **収縮性能**
- **水和発熱性能**

○ 劣化機構の過程で「ひび割れ」に関わる項目

- **ASR抑制性能**
- **遮塩性能**
- **中性化抑制性能**
- **凍害抵抗性能**

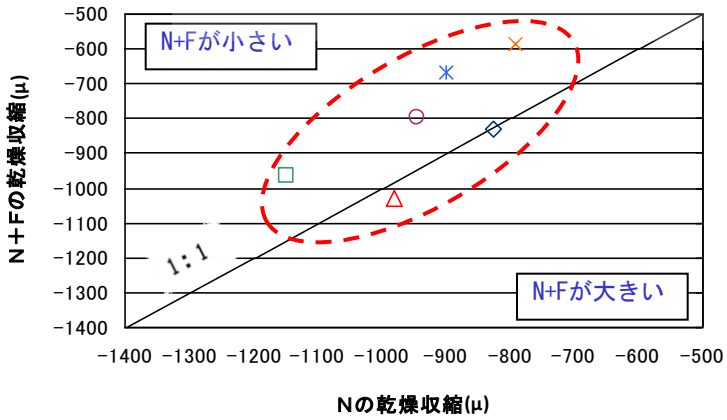
◎ 収縮性能の検証

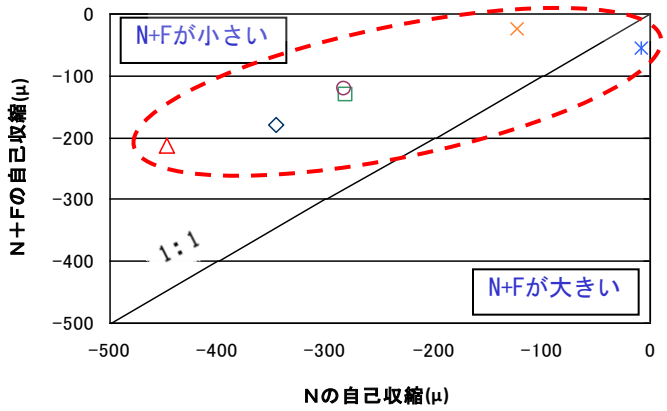
- コンクリートの収縮性能に関して、乾燥収縮試験と自己収縮試験により、汎用コンクリートとの比較評価を実施した。
- その結果、当該コンクリートは汎用コンクリートに対し、乾燥収縮および自己収縮が小さく、品質的に優れていることが検証できた。

【乾燥収縮試験結果】

【自己収縮試験結果】

【Nに対して】

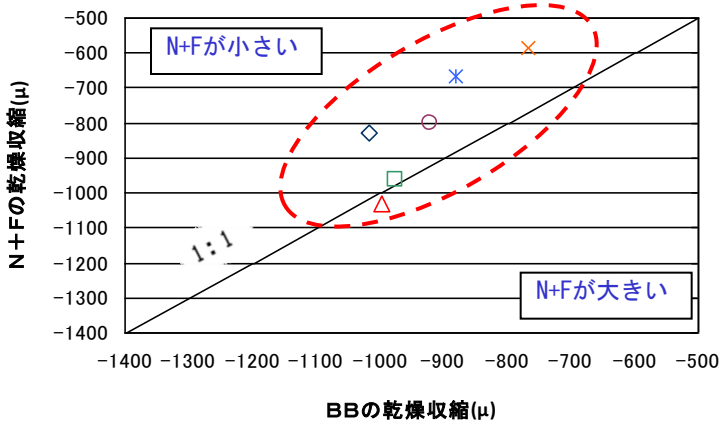


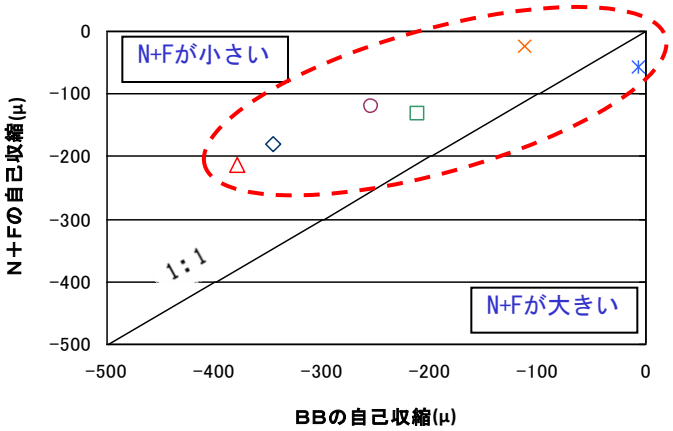


（骨材の産地名）

- △早月川産
- ○庄川産
- ◇手取川産
- □能登産
- ＊九頭竜川産
- ×滋賀県今津産

【BBに対して】



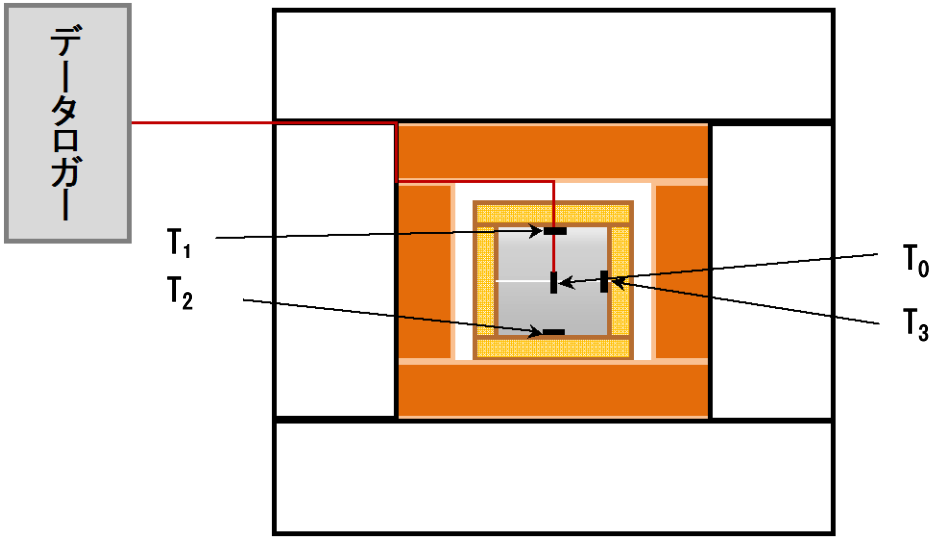


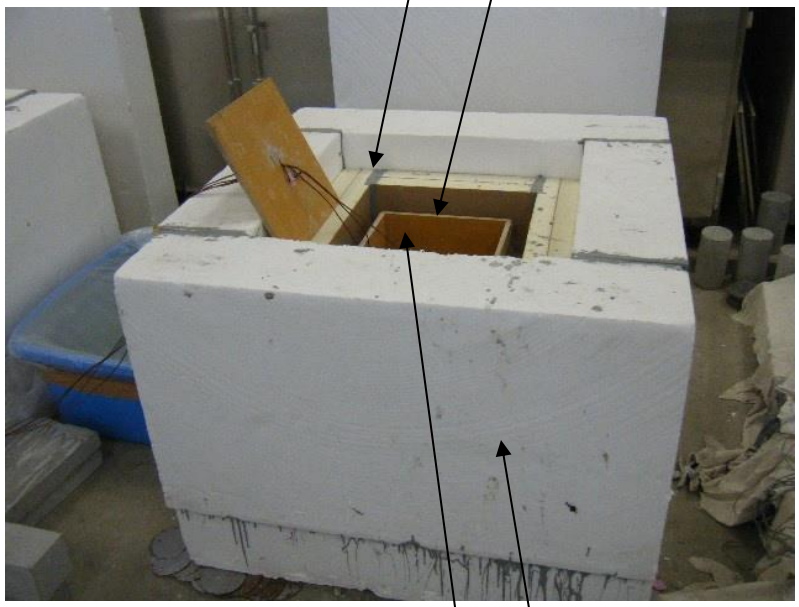
（N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，N＋F:フライアッシュ 15%置換(内割り)）

◎ 水和発熱性能の検証

- コンクリートの水和発熱性能に関して、簡易断熱温度上昇試験により、汎用コンクリートとの比較評価を実施した。
- その結果、当該コンクリートは汎用コンクリートに対し、温度上昇量が小さく、品質的に優れていることが検証できた。

簡易断熱温度上昇試験装置の概要



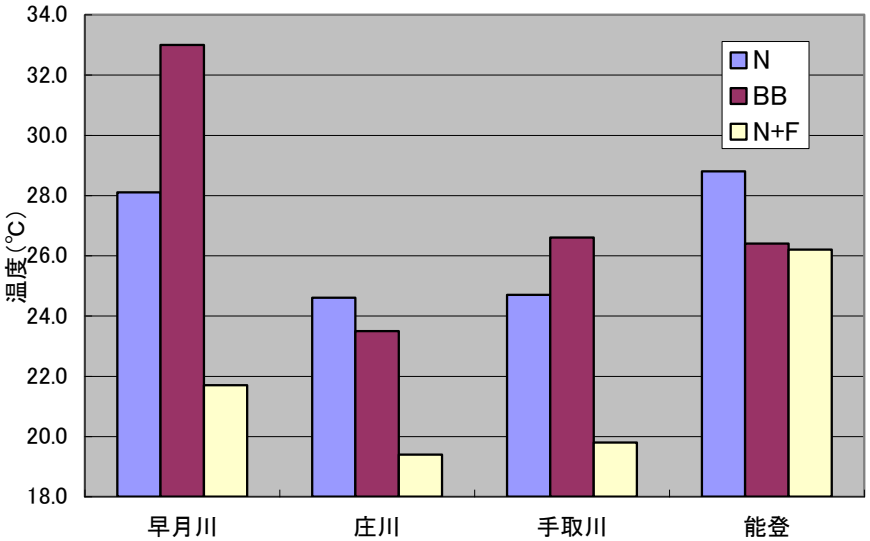


測定環境下：約20℃の実験室内
測定期間：7日間

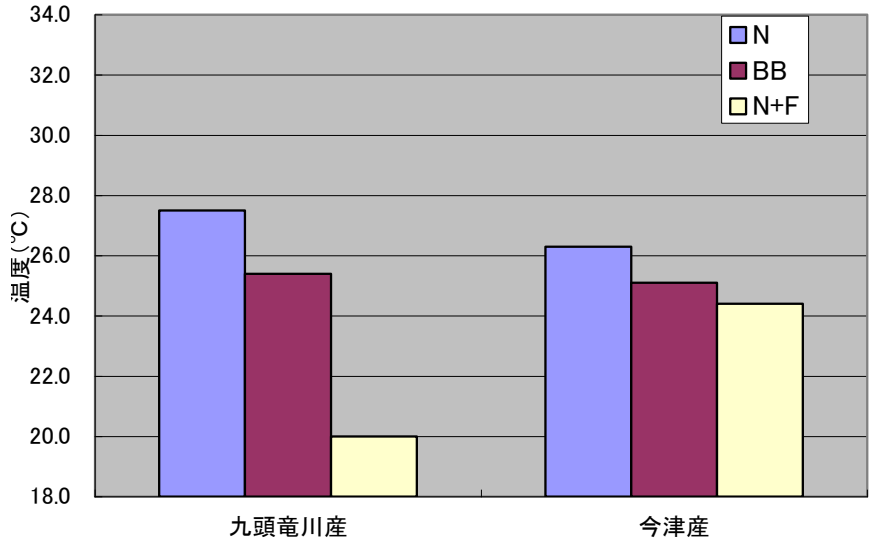
簡易断熱温度上昇試験でのピーク温度比較

（呼び強度 24, スランプ 8cm, 最大骨材寸法 25(20)mm, W/B≦55%の配合）

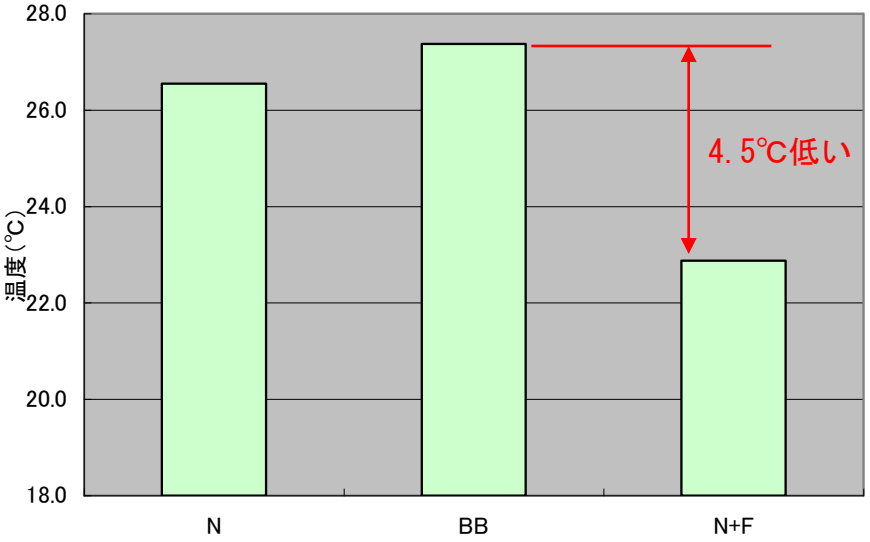
＜富山・石川県のケース＞



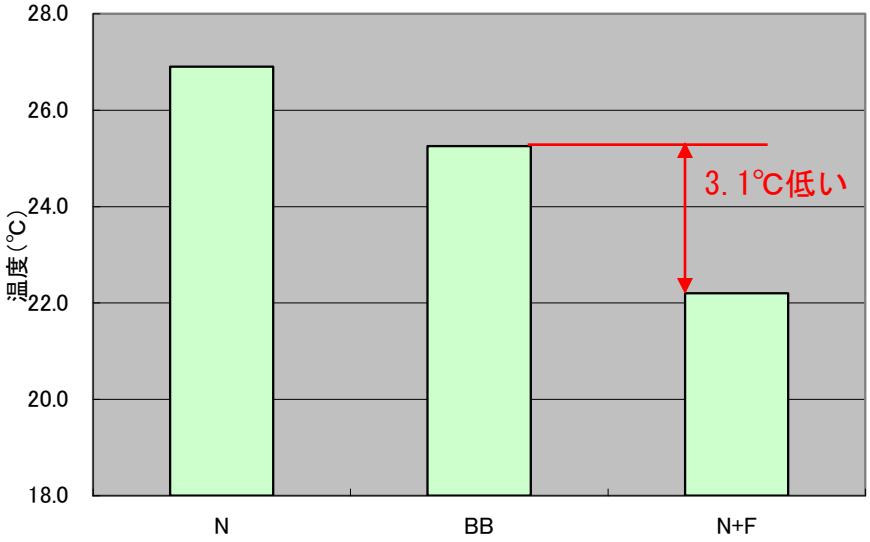
＜福井県のケース＞



⇩ 平均



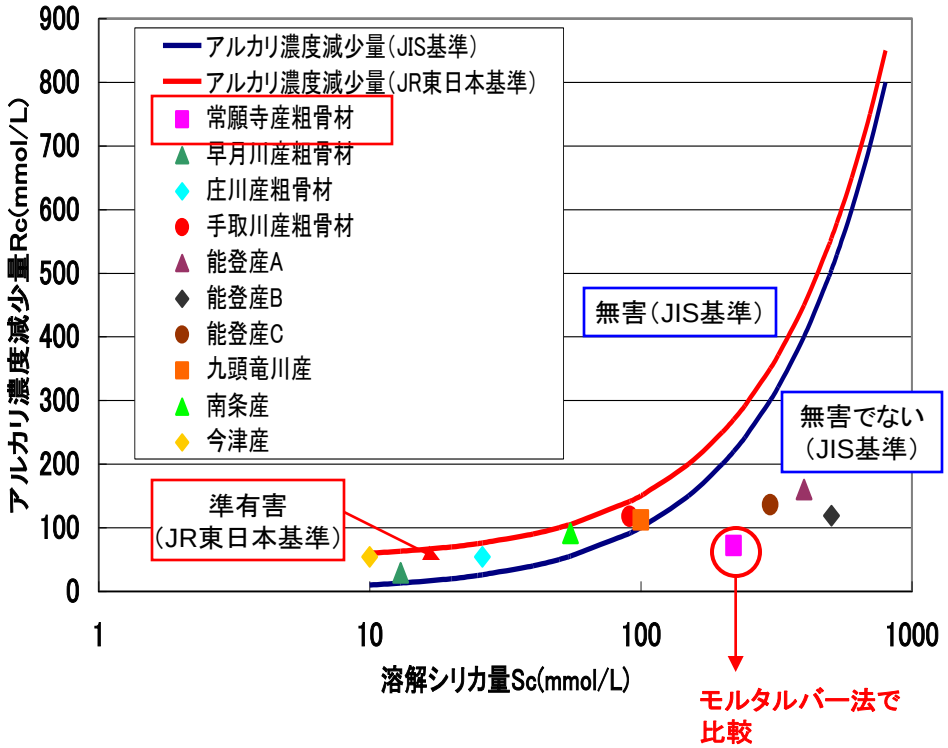
⇩ 平均



◎ ASR抑制性能の検証

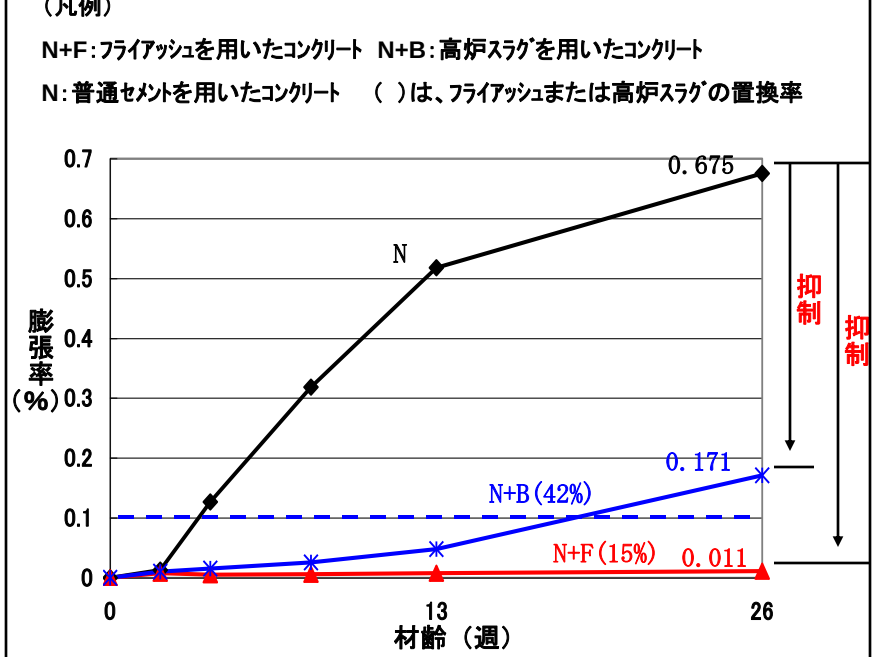
- コンクリートのASR抑制性能に関して、化学法およびモルタルバー法により、汎用コンクリートとの比較評価を実施した。
- その結果、当該コンクリートは、常願寺川産の反応性の高い骨材に対しても膨張が抑制され、ASR抑制に優れていることが検証できた。

化学法（JIS A1145に準拠）



北陸3県の代表的骨材を用いた化学法 の試験結果

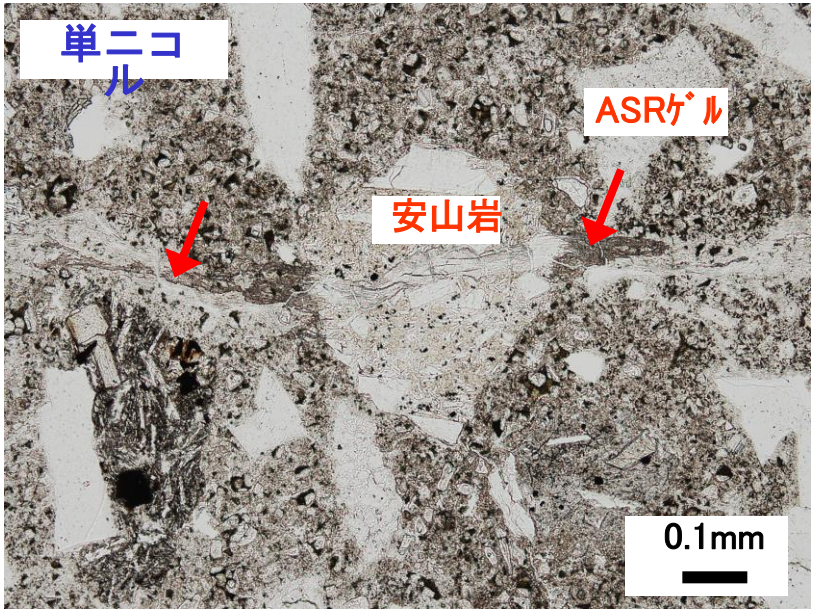
モルタルバー法（JIS A1146に準拠）

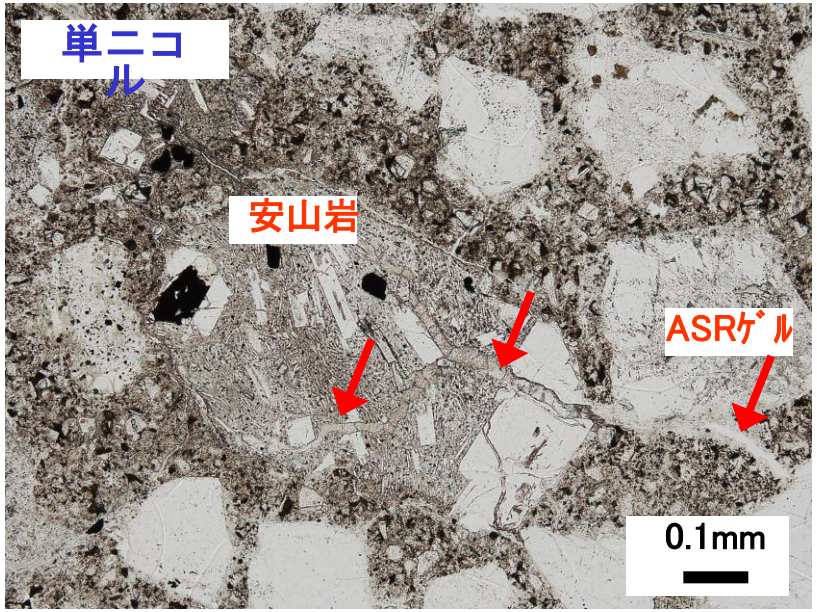


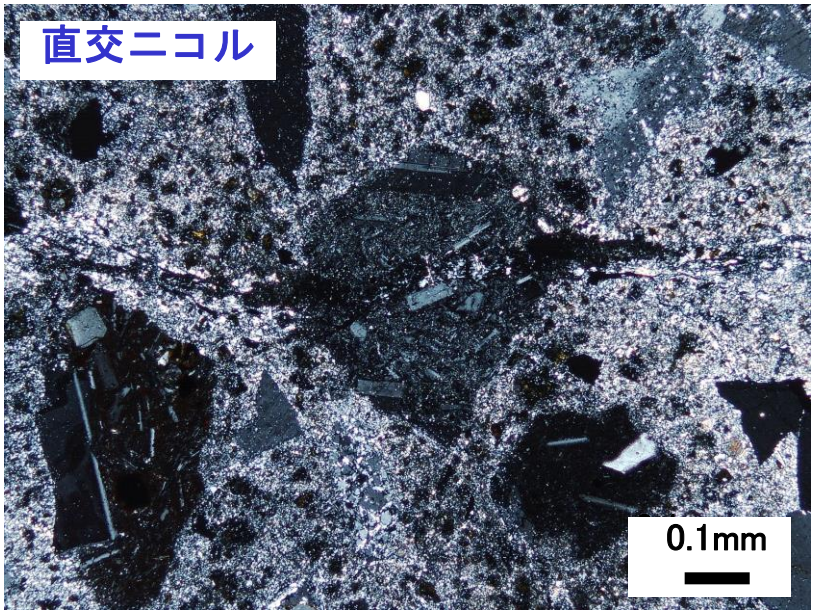
※ モルタルバー法（JIS A1146）では、膨張率が26週後に0.1%未満の場合は「無害」とし、0.1%以上の場合は「無害でない」とする。

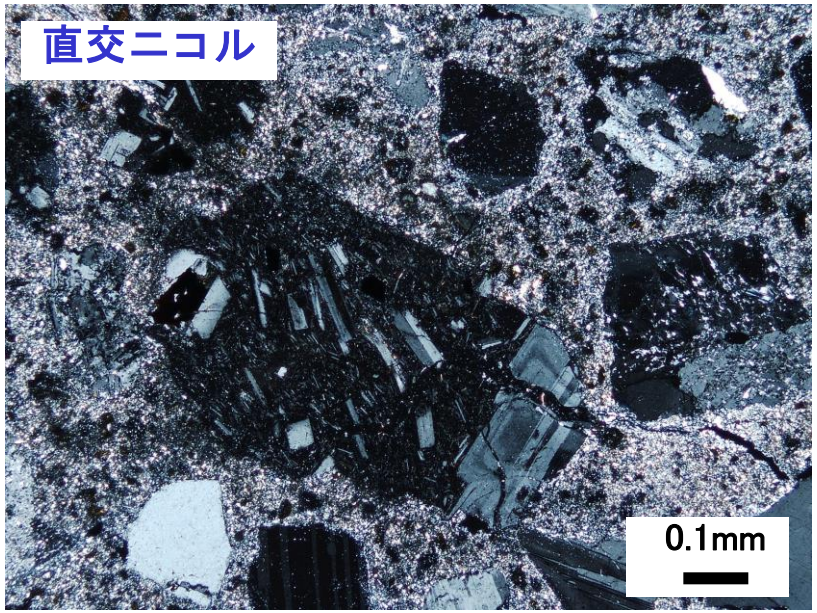
常願寺川産骨材（産地のなかで特に反応性の高い材料）を用いたモルタルバー法（JIS）の試験結果

【普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄを使用したﾓﾙﾀﾙ】



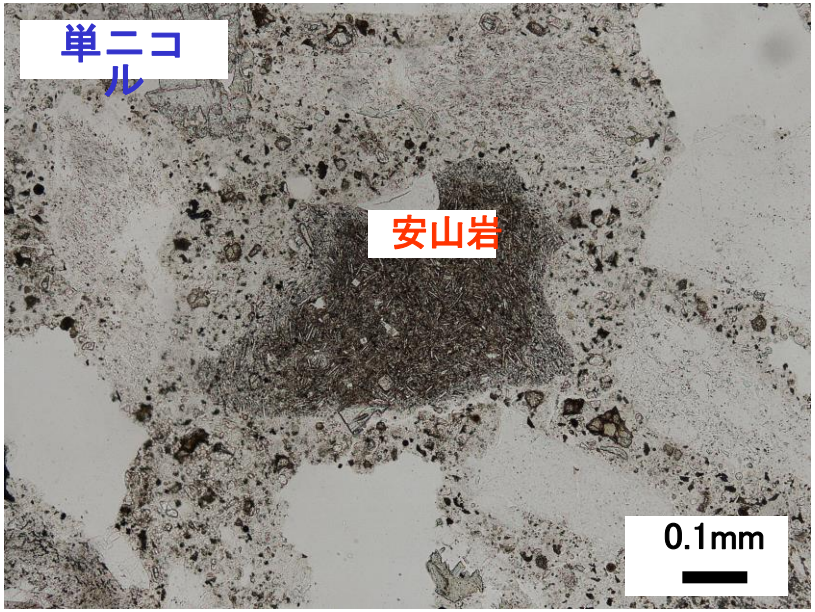


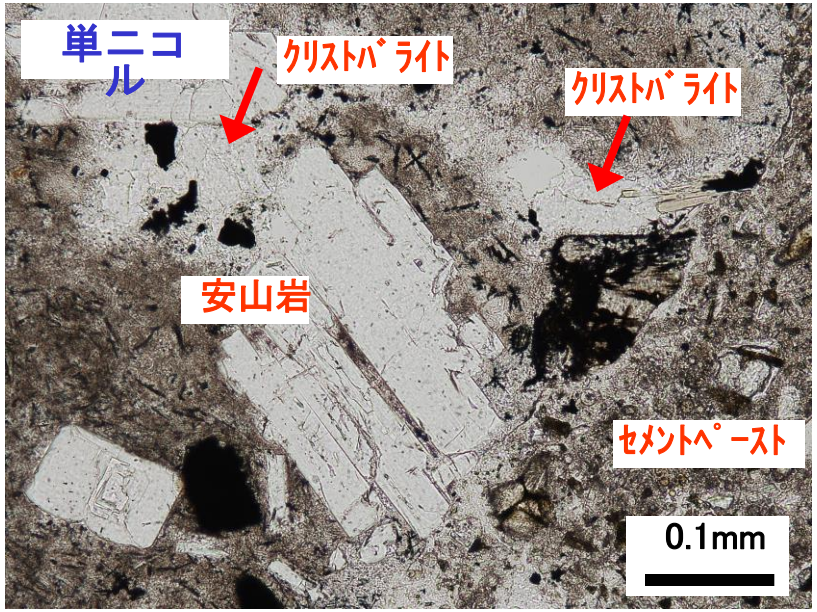


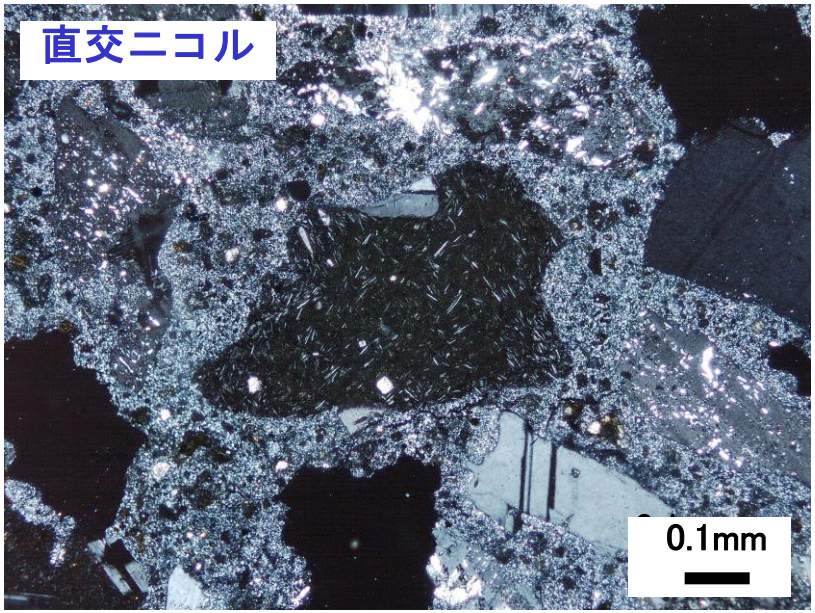


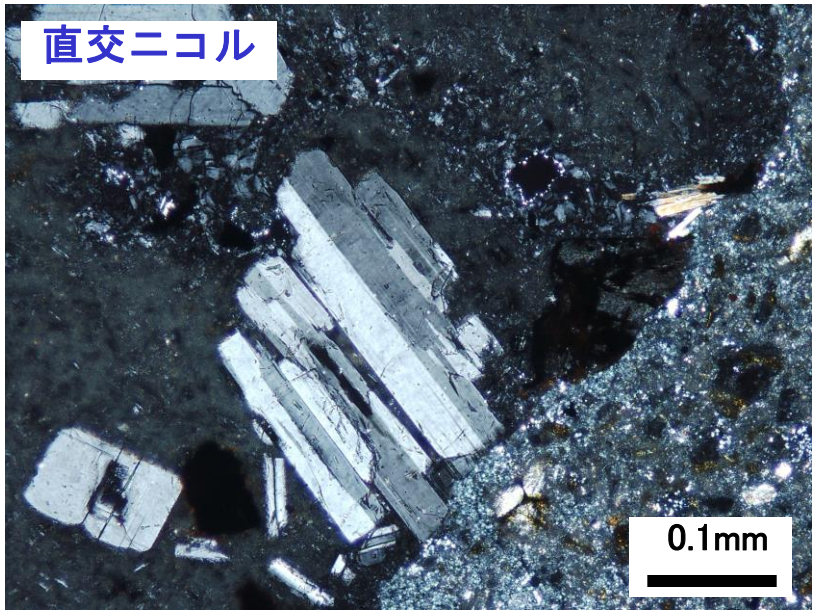
・ASRゲルの生成により安山岩を貫通する大きなひび割れが発生 ⇒ 内部での膨張圧 ⇒ ﾓﾙﾀﾙが膨張

【ﾌﾗｲｱｯｼｭを混和したﾓﾙﾀﾙ】



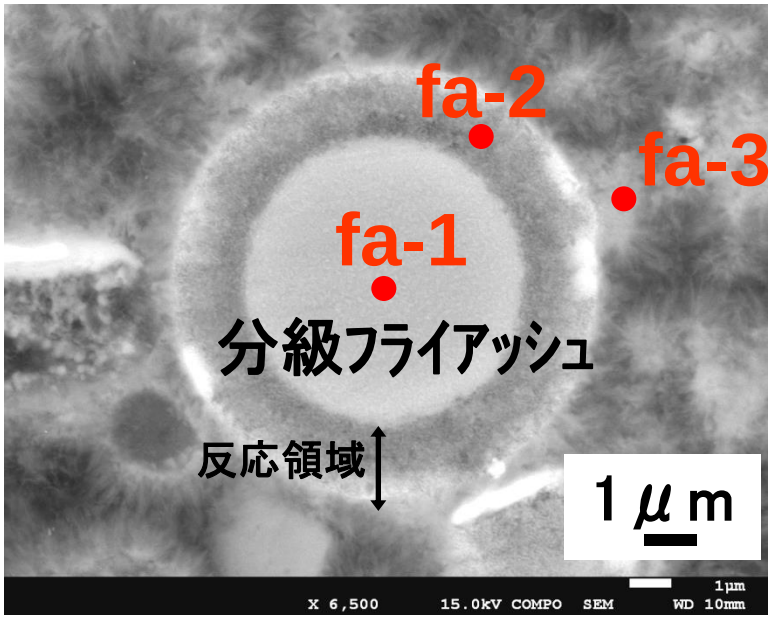


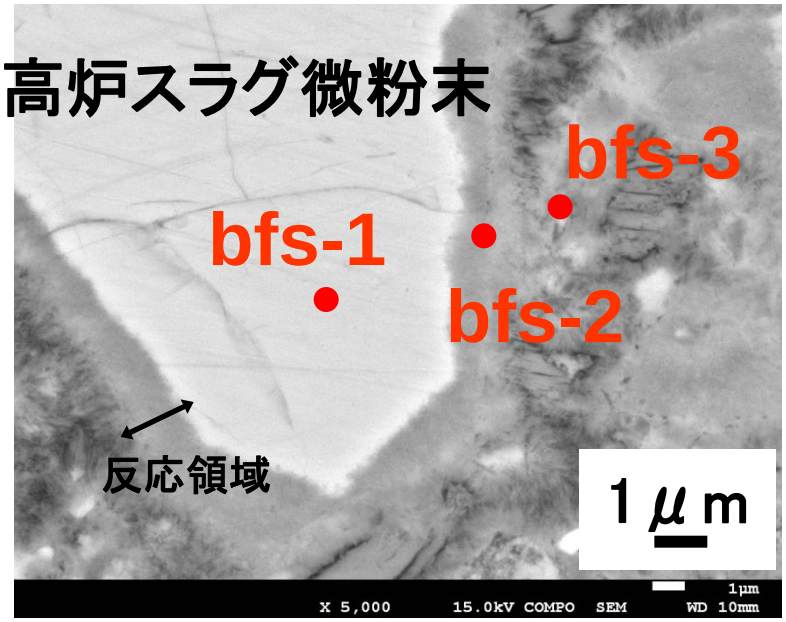




・反応性鉱物（ｸﾘｽﾄﾊﾞﾗｲﾄ）はあるが、ASRゲルやひび割れはない ⇒ ﾌﾗｲｱｯｼｭによりASR抑制

SEM-EDS測定(文献データ:広野ら(2013))





分析点	fa-1	fa-2	fa-3
Ca/Si比	0.05	0.88	1.64

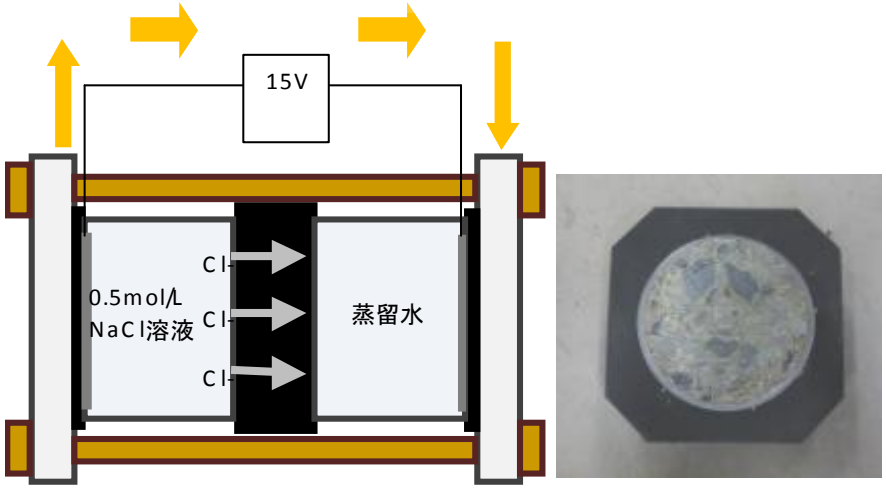
分析点	bfs-1	bfs-2	bfs-3
Ca/Si比	1.39	1.47	1.58

北陸産分級フライアッシュによる反応相の厚さは１から２μm程度と小さいことから、分級により細かくなることにより、全体としてポゾラン反応に寄与できるフライアッシュの表面積が多くなる。

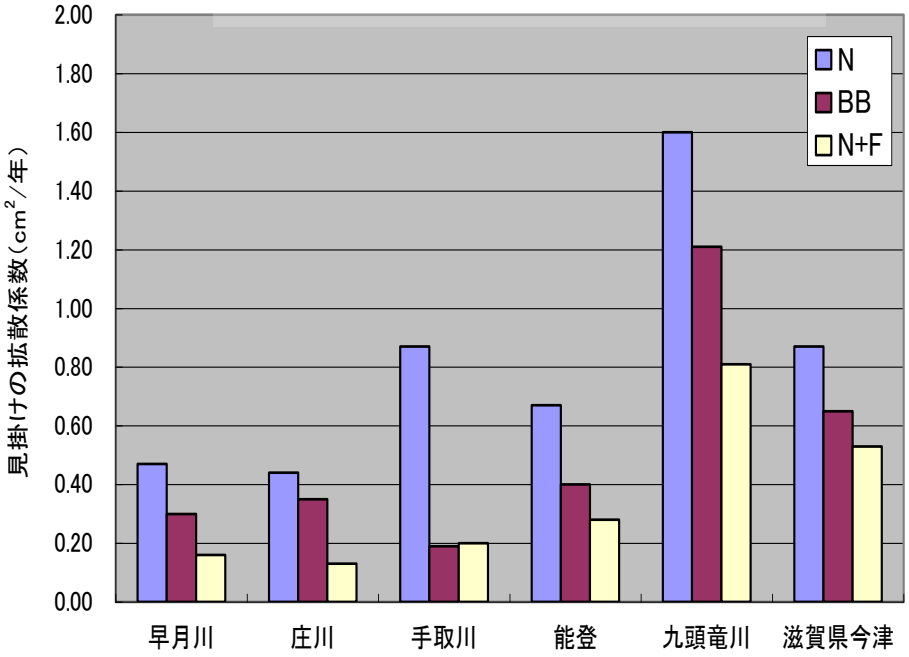
◎ 遮塩性能の検証

- コンクリートの遮塩性能に関して、電気泳動試験により見掛けの拡散係数を算出し、汎用コンクリートとの比較評価を実施した。
- その結果、当該コンクリートは汎用コンクリートに対し、見掛けの拡散係数が小さく、品質的に優れていることが検証できた。

【電気泳動試験装置】



【見掛けの拡散係数比較図】

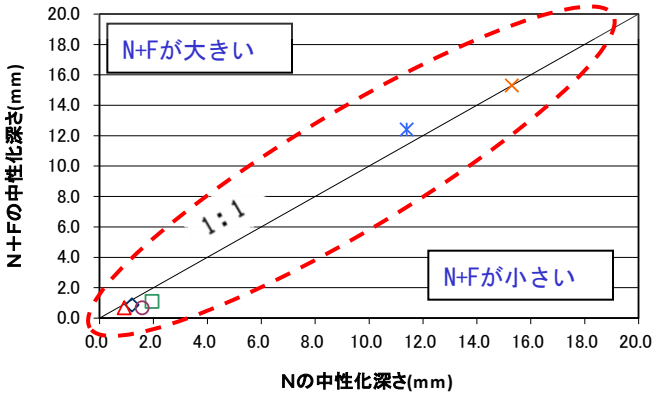


◎ 中性化抑制性能および凍害抵抗性能の検証

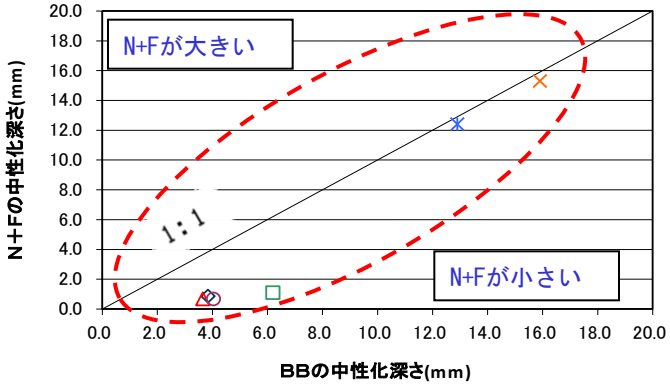
- コンクリートの中性化抑制性能および凍害抵抗性能に関して、中性化深さ測定および凍結融解試験を実施し、汎用コンクリートとの比較評価を実施した。
- その結果、当該コンクリートは汎用コンクリートに対し、品質的に同等であることが検証できた。

【中性化深さ測定結果】

【Nに対して】



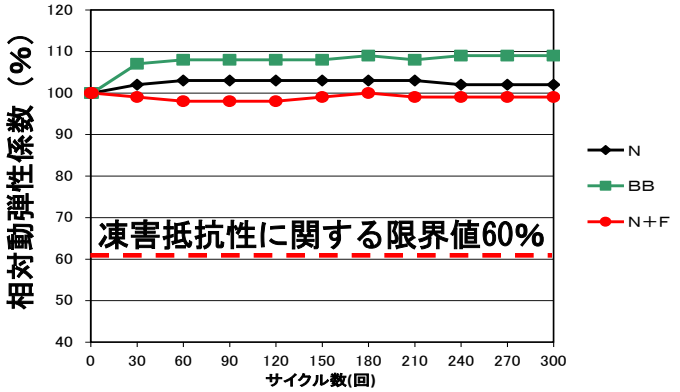
【BBに対して】



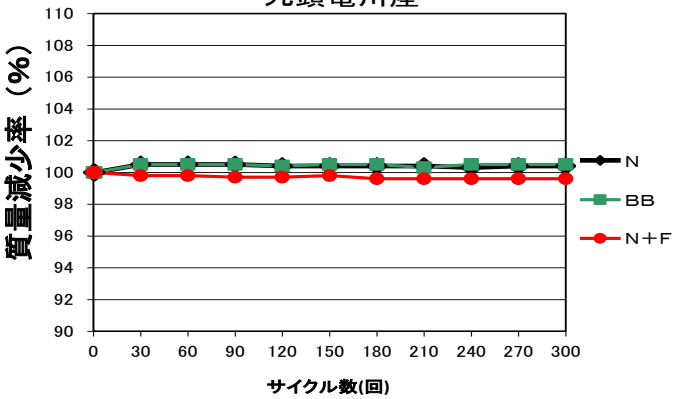
（骨材の産地名）

- △早月川産
- ○庄川産
- ◇手取川産
- □能登産
- ＊九頭竜川産
- ×滋賀県今津産

【凍結融解試験結果（九頭竜川産骨材の例）】



九頭竜川産



（N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，N＋F:フライアッシュ 15%置換(内割り)）

◎ 論証3のまとめ

論証3では、北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性が、汎用コンクリートに比べ、同等以上であるかどうかを検証した。

その結果，下表に示すように，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性は，**収縮性能，水和発熱性能，ASR抑制性能，遮塩性能に対し品質的に優れ，中性化抑制性能，凍害抵抗性能に対し同等**であることが確認できた。従って，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，汎用コンクリートに比べ，**品質的に同等以上の耐久性を有することを検証**できた。

比較項目		試験項目	性能評価
初期段階の「ひび割れ」に関わる項目	(1)収縮抑制性能	・乾燥収縮試験	・品質的に優れている
		・自己収縮試験	
	(2)水和発熱性能	・簡易断熱上昇試験	・品質的に優れている
		・完全断熱上昇試験	
劣化機構の過程で「ひび割れ」に関わる項目	(3)ASR抑制性能	・モルタルバー法（JIS A1146）	・品質的に優れている
		・モルタルバー法（デンマーク法）	
	(4)遮塩性能	・塩化物イオン浸透深さ	・品質的に優れている
		・電気泳動試験	
		・鉄筋腐食試験	
	(5)中性化抑制性能	・中性化深さ測定	・品質的に同等
	(6)凍害抵抗性能	・凍結融解試験	・品質的に同等

3. 本研究の主な試験データの紹介

論証 4 ：

北陸産分級フライアッシュを使用した**コンクリート**が、実際の生コンクリート工場で製造されることを想定し、生コンクリート工場配合での**実構造物への適用性**を検証

◎　「試験施工」および「モデル工事」の実施

これまで、論証1では北陸産分級フライアッシュの品質が高品質になったことを検証し、論証2および論証3では、このフライアッシュを使用したコンクリートの製造品質および耐久性が、汎用コンクリートに比べ品質的に同等以上であることを検証した。

これらの結果を受けて、論証4では、官公庁が実施する「試験施工」および「モデル工事」により、実構造物による検証（前述のSTEP3)を実施した。なお、工事の選定に当たっては、1時間以内の施工を原則とした。

○「試験施工」の実施

- 富山県、石川県、福井県

⇒　逆T型擁壁または重力式擁壁による汎用コンクリートとの比較試験

- 国交省

⇒　北陸産分級フライアッシュと常願寺川産骨材を使用したコンクリートを護岸工事に試験的に適用

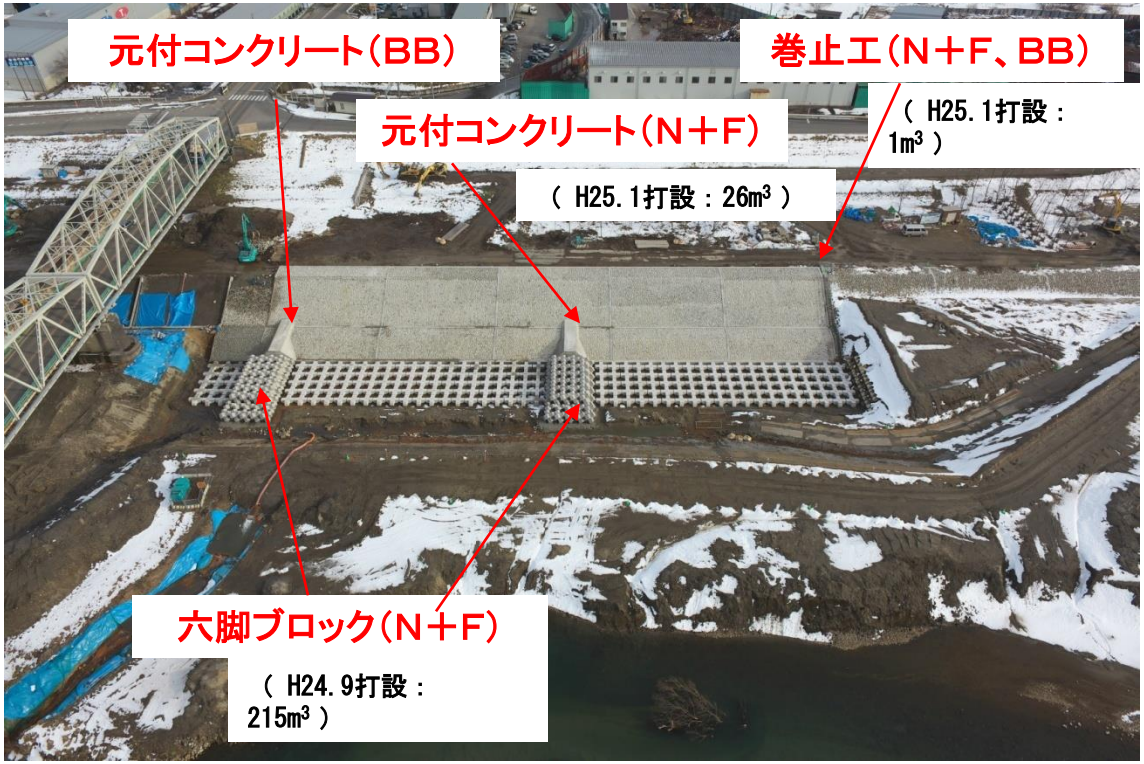
○「モデル工事」の実施

- 富山県、石川県、福井県

⇒　試験施工結果を踏まえ、様々な種類の実構造物に適用

＜国交省の試験施工＞

（常願寺川水橋護岸その６工事の完成写真）



六脚ブロック

元付コンクリート

（施工者現場代理人の感想）

- BBとフライアッシュは生コンの状態ではほとんど変わらず施工出来た。
- 打ち上がり直後に表面を均している時に、少し粘性を感じた。
- フライアッシュの方がブリーディング水の発生時間が短く、１時間程度早く仕上げ作業を始めることができた。
- 標準養生の他に現場養生で行った脱型確認用の供試体で圧縮強度試験を実施したところ、フライアッシュの方が強度が出ていた。

◎　「モデル工事」の実施例

＜富山県のモデル工事例＞

富山市白岩川樋門工

（ H24.12打設：67m³ ）

朝日町砂防堰堤流路工

（ H24.9～10打設：112m³ ）

（施工者現場代理人の感想）

・コンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度に問題なし。
・外観調査において、収縮等によるひび割れは見られなかった。
・ポンプ打設を行い、荷卸性状及び筒先性状は良好であった。

＜石川県のモデル工事例＞

七尾市ボックスカルバート

（ H24.11～H25.3打設：2,321m³ ）

内灘町逆T式橋台

（ H24.12～H25.2打設：760m³ ）

（施工者現場代理人の感想）

- コンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度に問題なし。
- 外観調査において、収縮等によるひび割れは見られなかった。
- 全体的には、通常使用しているＢＢと特に変わらないと感じた。

◎ 論証4のまとめ

論証4では，富山県，石川県，福井県および国交省の「試験施工」において，汎用コンクリートとの実構造物での比較試験を実施し，その施工性，強度発現性および耐久性（初期ひび割れ，水和発熱性能）の観点から，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの実構造物による検証を行った。また，様々な構造物や施工時期をとおして，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートでの「モデル工事」を実施し，実構造物への適用に問題がないかどうかを検証した。

その結果，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，その施工性，強度発現性および耐久性の観点から，実構造物への適用に問題がないことを検証できた。

まとめ

目的：「北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートを実社会（北陸地方）において活用すべきかどうか」を多面的に検証すること

多面的な検証

論証 1： 北陸産分級フライアッシュの品質が、その製造過程により、物理的・化学的性質が改善され、コンクリート品質に対し、従来よりも高品質であることを検証できた。

論証 2： このフライアッシュを使用したコンクリートが、実際の生コンクリート工場で製造ができ、その製造品質が汎用コンクリートに対し同等以上であることを検証できた。一方、スランプロスや空気量ロスが経過1時間以降に大きくなる傾向があるため、経過1時間以内での施工が推奨された。

論証 3： このフライアッシュを使用したコンクリートが、耐久性に関する各種比較試験において、汎用コンクリートに対し同等以上であることを検証できた。

論証 4： このフライアッシュを使用したコンクリートを様々な種類の実構造物に適用し、施工面・品質面において問題がないことを検証できた。

結論：「北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートは、汎用コンクリートに比べ品質的に同等以上であり、実社会（北陸地方）において活用すべきである。一方、このコンクリートは、ｽﾗﾝﾌﾟﾛｽ、空気量ﾛｽが経過１時間以降に大きくなる傾向がみられ、今後の標準化に向けては、この課題を克服する必要がある。」

４．今後の課題と展望

◎ 今後の課題

１．北陸産分級フライアッシュの品質の継続的改善

これまで、「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」により、従来よりも高品質なフライアッシュの提供を可能としたが、今後も、その品質の変動を小さくする努力が必要である。この改善の積み重ねが、北陸産分級フライアッシュの「ブランド化」に繋がるものと考える。

２．コンクリートの製造品質および施工品質の改善

今回の試験施工やモデル工事では、経過１時間以内での施工が可能である工事を選定したが、今後、1時間を超える施工箇所でも適用できるよう、最適なAE減水剤とAE剤の組み合わせを検討することが必要と考える。また、今回は夏期での施工実績が少なかったことから、施工者の理解を得るためにも、夏期や冬期での施工実績を蓄積し、製造品質や施工品質の継続的な改善が必要と考える。

３．フライアッシュコンクリートの価格の問題

フライアッシュを混和材として使用する場合、コンクリートの材料費は低減されるが、サイロや計量器などの固定費が増える。この問題の解決としては、官公庁による「需要の創出」と生コンクリート工場オーナーによる「JIS認証工場の拡大」を一体として進める必要があり、現在、委員会の取り組みにより着実な効果がみられている。この取り組みを、今後も、バランスよく継続していくことが価格の問題の解決につながる。

◎ 産官学連携委員会の設立（H23.1）とその経緯

［北陸の地域特性］

1. 全国的にみてASRの発生が多い地域

2. 飛来塩分による塩害が多い地域

抑制可能 ⇦ 基礎研究

3. 北陸地域の再生資源としてのフライアッシュ（地産地消）

⇩ 北陸産分級フライアッシュの製造

［産学官連携委員会］

「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」（H23.1設立）

－ コンクリート構造物の長寿命化 と 環境負荷低減 を目指して －

委員長（金沢大学　鳥居和之教授）

産業界
- 富山県・石川県・福井県の各生ｺﾝｸﾘｰﾄ工業組合
- ｾﾒﾝﾄﾒｰｶｰ（ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ）
- 北陸電力株式会社

大学
- 金沢大学
- 金沢工業大学
- 富山県立大学
- 福井大学

官公庁（ｵﾌﾞｻﾞｰﾊﾞｰ）
- 国交省（北陸地整）
- 富山県
- 石川県
- 福井県

第１回委員会の様子（H23.1.24）

【概略スケジュール】

		H22	H23	H24	H25	H26以降	備考
委　員　会		第1回	第 2回 第3回	第4回 第5回	第6回	1回/年の頻度で開催	
対象地域	富山・石川						七尾灰
	福井						敦賀灰
国　交　省							

凡例
- 委員会活動
- 使用に向けた諸試験・試験施工の実施
- ﾓﾃﾞﾙ工事の実施

「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」
平成26年度土木学会環境賞を受賞(H27.5 土木学会総会）

News Release　北陸電力

「平成26年度土木学会環境賞」受賞について
－フライアッシュコンクリートの普及のための技術開発－

平成27年5月26日
北陸電力株式会社

当社が、北陸の大学、国・自治体、生コンクリート工業組合と共同で取り組んでいる「北陸地域における高品質フライアッシュ[※1]を用いたコンクリートの普及のための技術開発」について、このたび、「平成26年度土木学会環境賞[※2]」を受賞することとなりましたので、お知らせいたします。

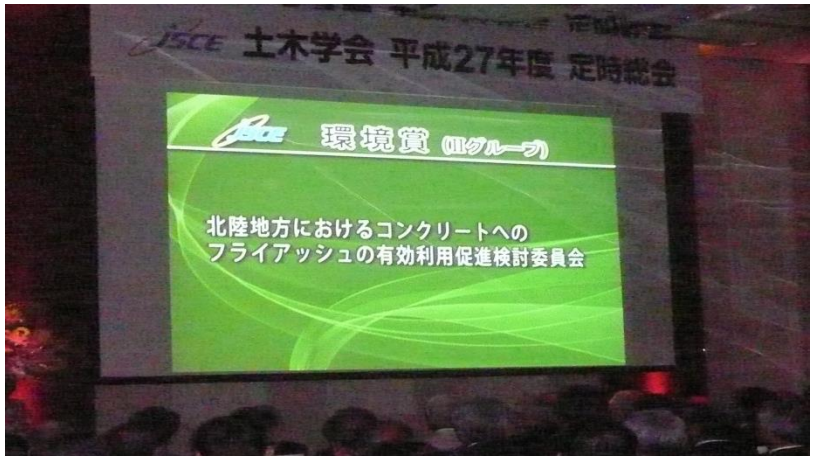
＜受賞者＞
北陸地域におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会
（委員長：金沢大学教授　鳥居　和之）

＜受賞対象プロジェクト＞
北陸地域における高品質フライアッシュを用いたコンクリートの普及のための技術開発

＜受賞プロジェクトの概要＞
産学官連携による当委員会では、北陸地域で顕在化しているコンクリート構造物のアルカリシリカ反応（ＡＳＲ）[※3]や塩害などへの対策として、当社の火力発電所の副産物として産出されるフライアッシュに着目し、選別した高品質なフライアッシュの供給体制を確保するとともに、委員会活動を通して、耐久性の高いフライアッシュコンクリートを製造、実工事に利用するまでの仕組み作りに取組んできました。
地域の特性を生かした本取組みは、他の地域への展開も可能なプロジェクトであり、フライアッシュの地産地消は、使用セメント量低減による二酸化炭素排出量の低減などの観点からも高く評価できる技術として、土木学会環境賞に相応しいものと判断されました。

なお、本技術は、平成23年度から、北陸地域の公共事業のモデル工事等で利用されており、今後も、更なる利用拡大が期待されます。
当社は、今後とも関係者と一体となって、本取組みを推進し、循環型社会の実現に配慮した事業活動に取り組んでまいります。

以　上



５．北陸新幹線敦賀延伸工事でのフライアッシュコンクリートの土木工事標準仕方書への取り込み
（2018年3月）

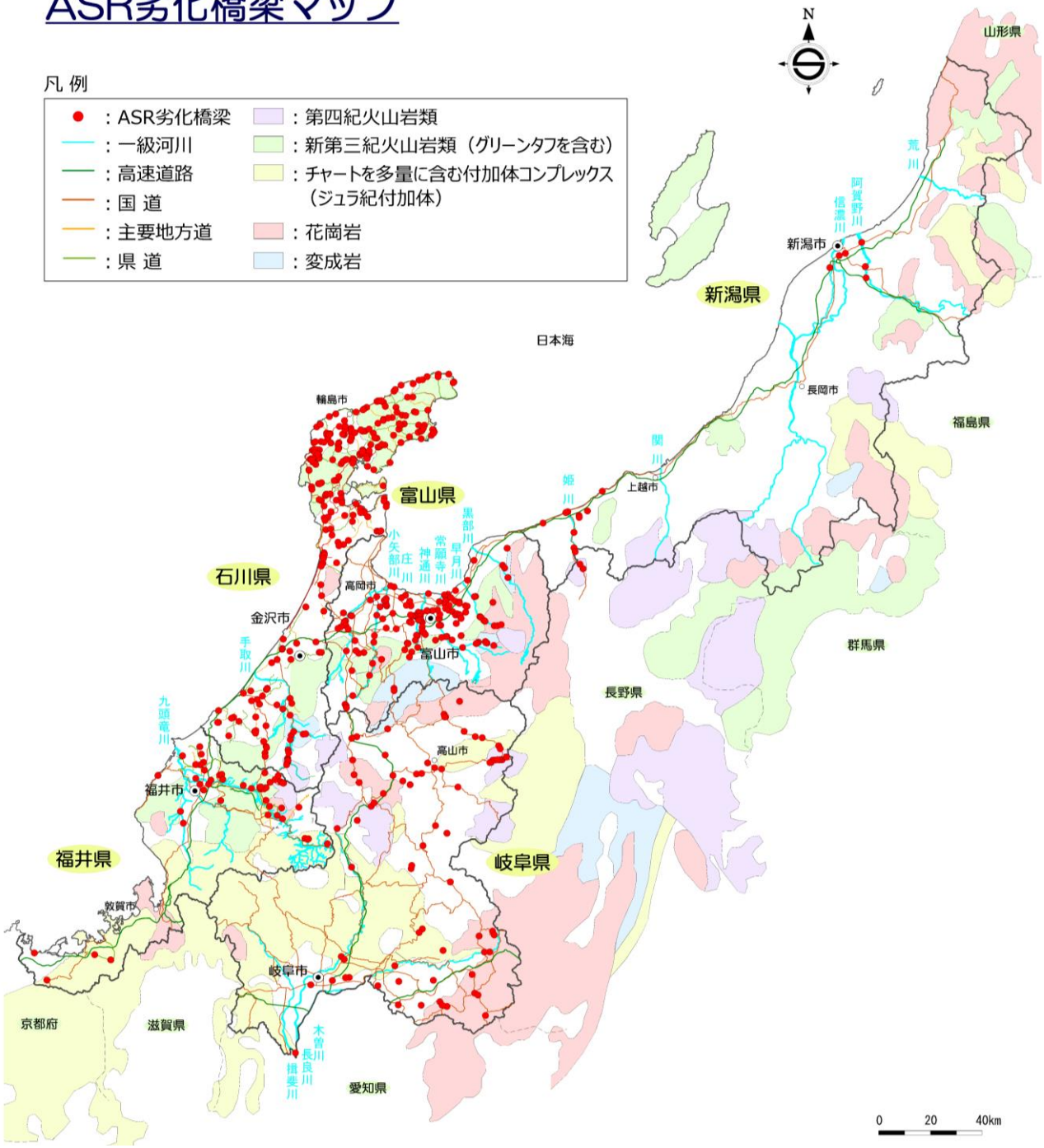
背景１　コンクリートのブリーディング対策
（材料分離が凍害を促進，沈降ひび割れの発生防止）

背景２　新潟及び富山地区でのASRの発生
（姫川，常願寺川，神通川，庄川産の骨材，砂のASR対策）

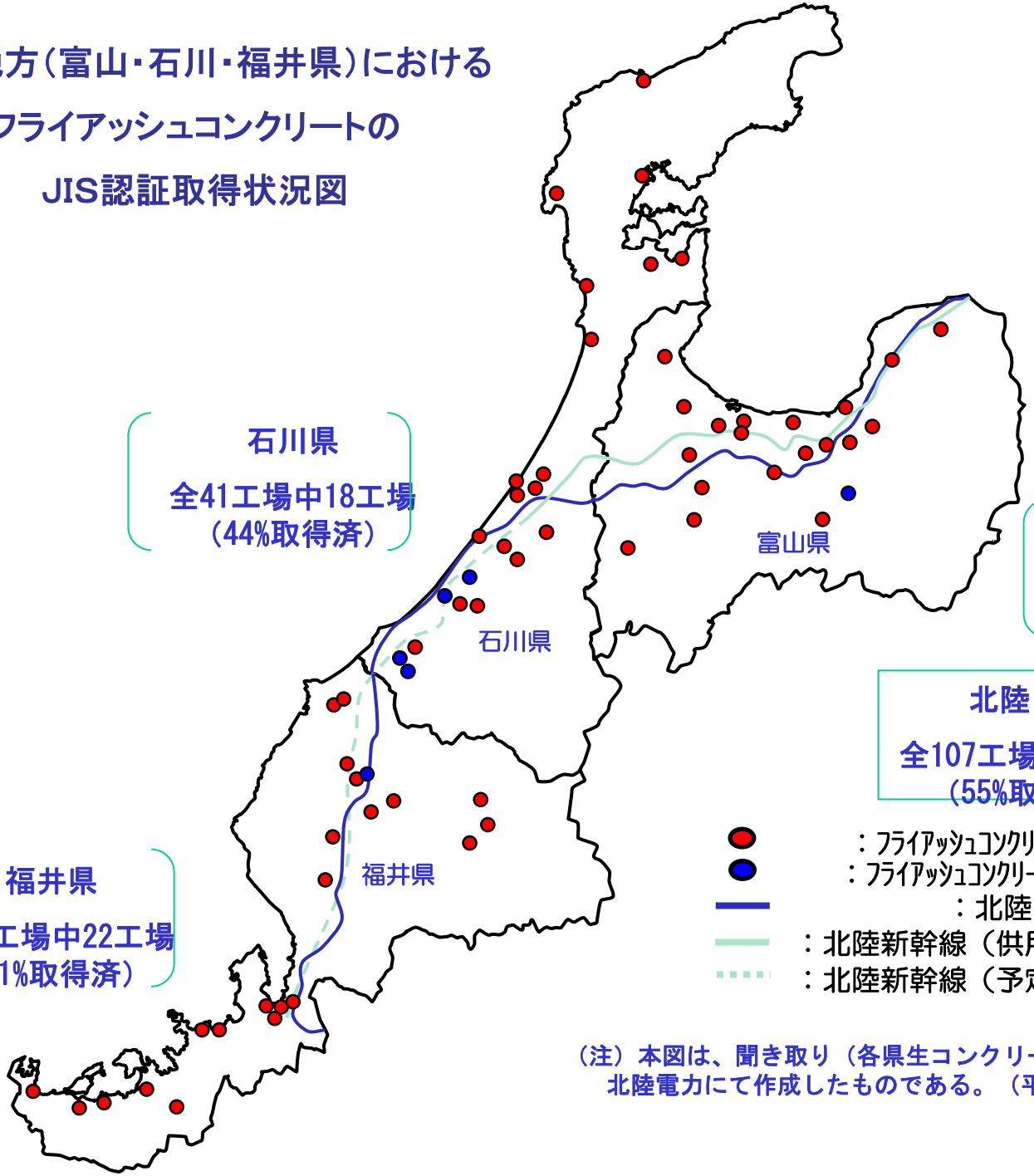
背景３　福井先行開業または敦賀延伸工事の課題
（プレキャスト部材の活用，冬期工事，労働力確保）

北陸新幹線橋脚（姫川）

ASR劣化橋梁マップ


凡 例
：ASR劣化橋梁
：一級河川
：高速道路
：国 道
：主要地方道
：県 道
：第四紀火山岩類
：新第三紀火山岩類（グリーンタフを含む）
：チャートを多量に含む付加体コンプレックス（ジュラ紀付加体）
：花崗岩
：変成岩
N
山形県
新潟県
日本海
新潟市
長岡市
福島県
上越市
関川
姫川
荒川
阿賀野川
信濃川
輪島市
富山県
黒部川
早月川
常願寺川
神通川
庄川
小矢部川
高岡市
石川県
金沢市
手取川
富山市
群馬県
長野県
九頭竜川
高山市
福井市
福井県
岐阜県
敦賀市
岐阜市
京都府
滋賀県
木曽川
長良川
揖斐川
愛知県
0
20
40km

北陸地方（富山・石川・福井県）における フライアッシュコンクリートの JIS認証取得状況図



石川県
全41工場中18工場
（44%取得済）

富山県
全35工場中19工場
（54%取得済）

北陸３県
全107工場中59工場
（55%取得済）

福井県
全31工場中22工場
（71%取得済）

：ﾌﾗｲｱｯｼｭｺﾝｸﾘｰﾄ　JIS認証取得工場
：ﾌﾗｲｱｯｼｭｺﾝｸﾘｰﾄ　JIS認証取得予定工場
：北陸自動車道
：北陸新幹線（供用区間）
：北陸新幹線（予定区間）

（注）本図は、聞き取り（各県生コンクリート工業組合等）を基に、
北陸電力にて作成したものである。（平成28年９月末時点）

プレテンション方式ＰＣ橋梁へのフライアッシュコンクリートの使用実績

１． 宮坂橋歩道橋（石川県：橋長22.7m ， 幅員3.3m,

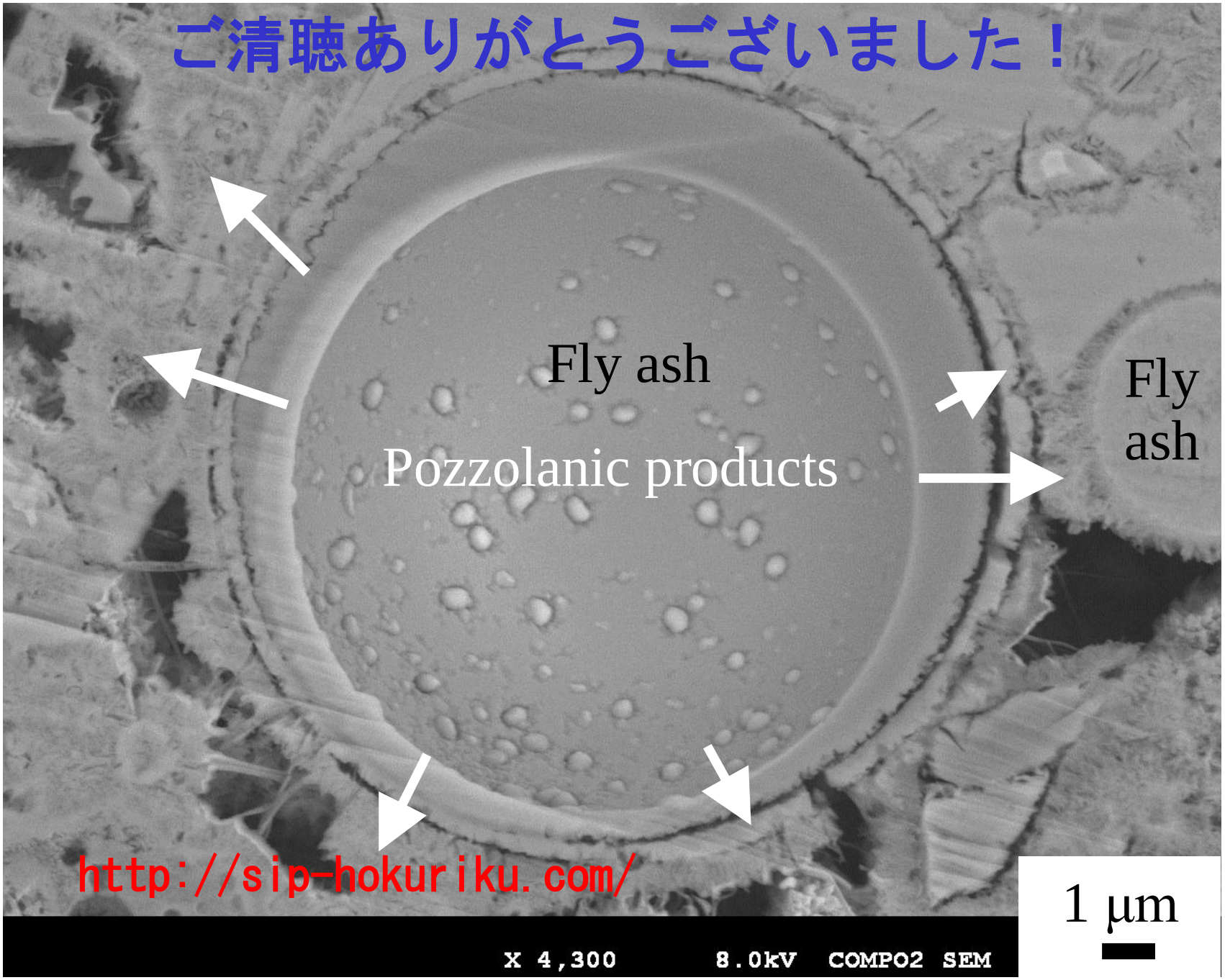
七尾大田フライアッシュ）

2. 日野川橋（北陸自動車道）の塩害劣化RC床版取替え

フライアッシュコンクリートの打設

プレキャストPC床版の養生（敦賀工場）

旧RC床版の撤去

プレキャストPC床版の設置

ご清聴ありがとうございました！