アルカリシリカ反応抑制対策としてのフライアッシュコンクリートの地域実装

金沢大学理工研究域環境デザイン学系
教授　鳥居和之

平成29年10月16日
（琉球大学SIP技術講演会）

講演内容

1. わが国の反応性骨材と反応性鉱物の特徴

2. 沖縄の反応性骨材の特徴とASR発生事例

3. 高品質フライアッシュの製造と地域への供給

4. JIS A5308によるASR抑制対策の不備

5. フライアッシュコンクリートの北陸地方での実装

急速膨張性反応性鉱物

	代表的なASR反応性の岩石
オパール （水を含んだ非晶質）	変質を受けた岩石 （火山岩類を含む）
クリストバライト トリディマイト	新第三紀以降の火山岩類 （新第三紀以降の安山岩，流紋岩など）
ガラス	新第三紀以降の火山岩類 （新第三紀以降の安山岩，流紋岩など）
微細な石英：隠微晶質石英 カルセドニー 微晶質石英	様々な岩石（チャート・珪質頁岩，ホルンフェルス，広域変成岩，断層岩類・・・）

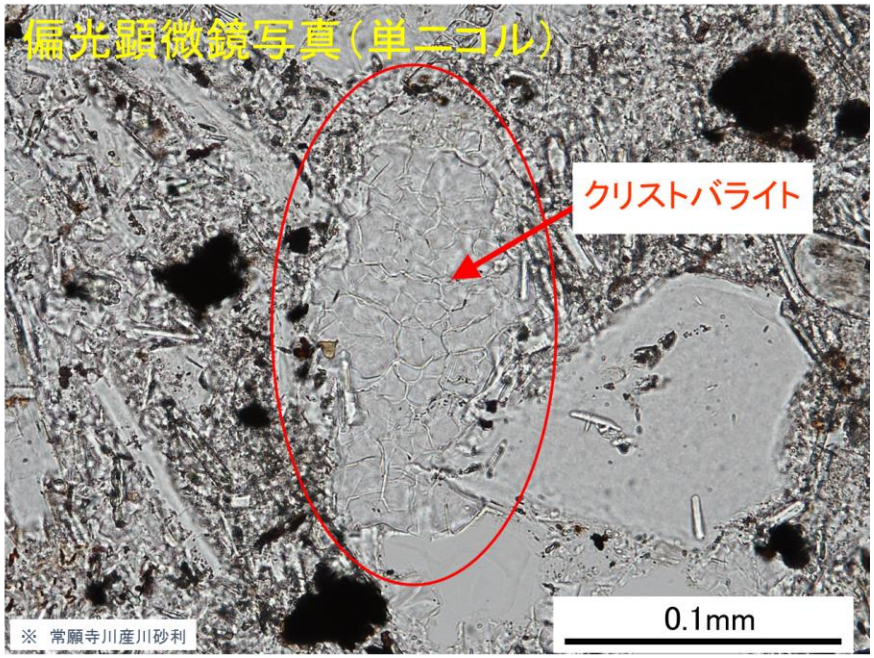
急速膨張性

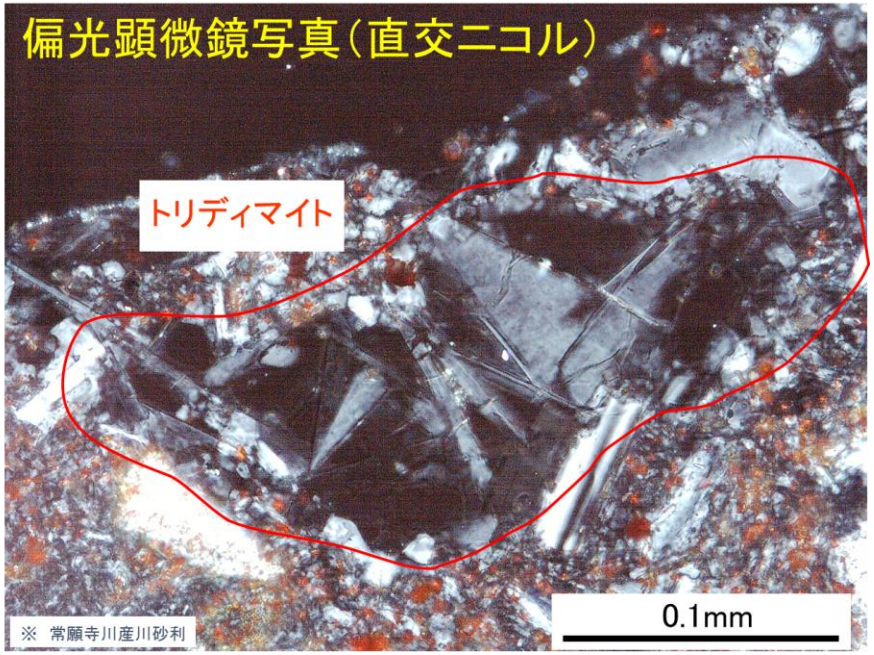
遅延膨張性

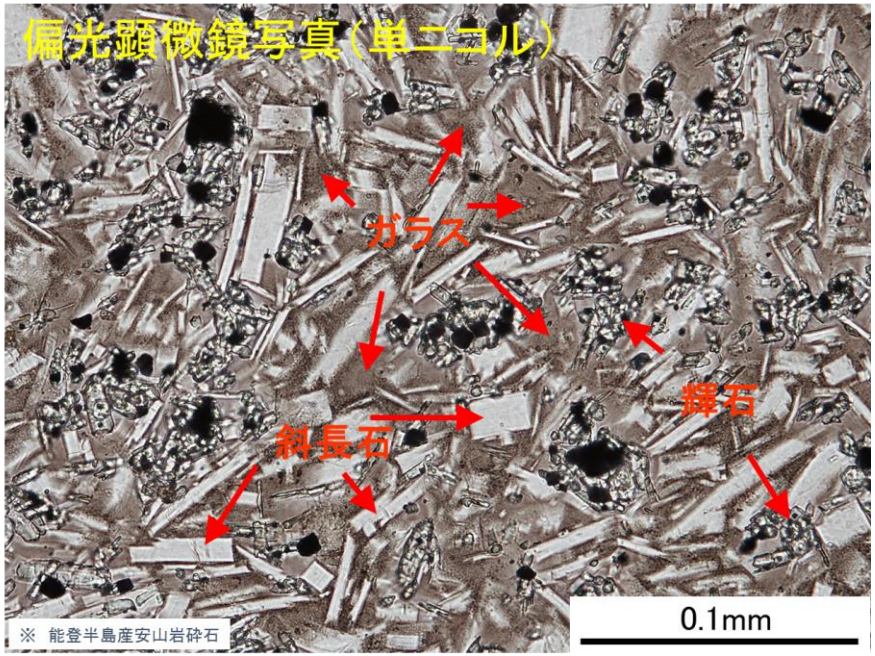
カルセドニー：繊維状で微細な石英の集合体

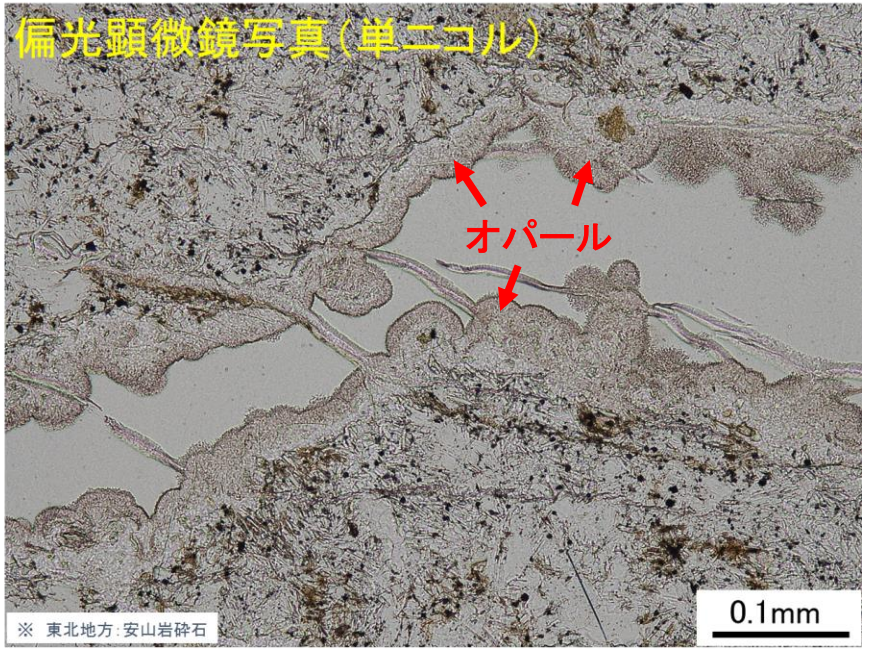
隠微晶質：偏光顕微鏡でも個々の鉱物粒子が見えないほど細粒な組織

微晶質：偏光顕微鏡で個々の鉱物粒子がようやく見える程度の細粒な組織









新第三紀以降の火山岩類（安山岩など）の反応性鉱物（急速膨張性）

遅延膨張性反応性鉱物

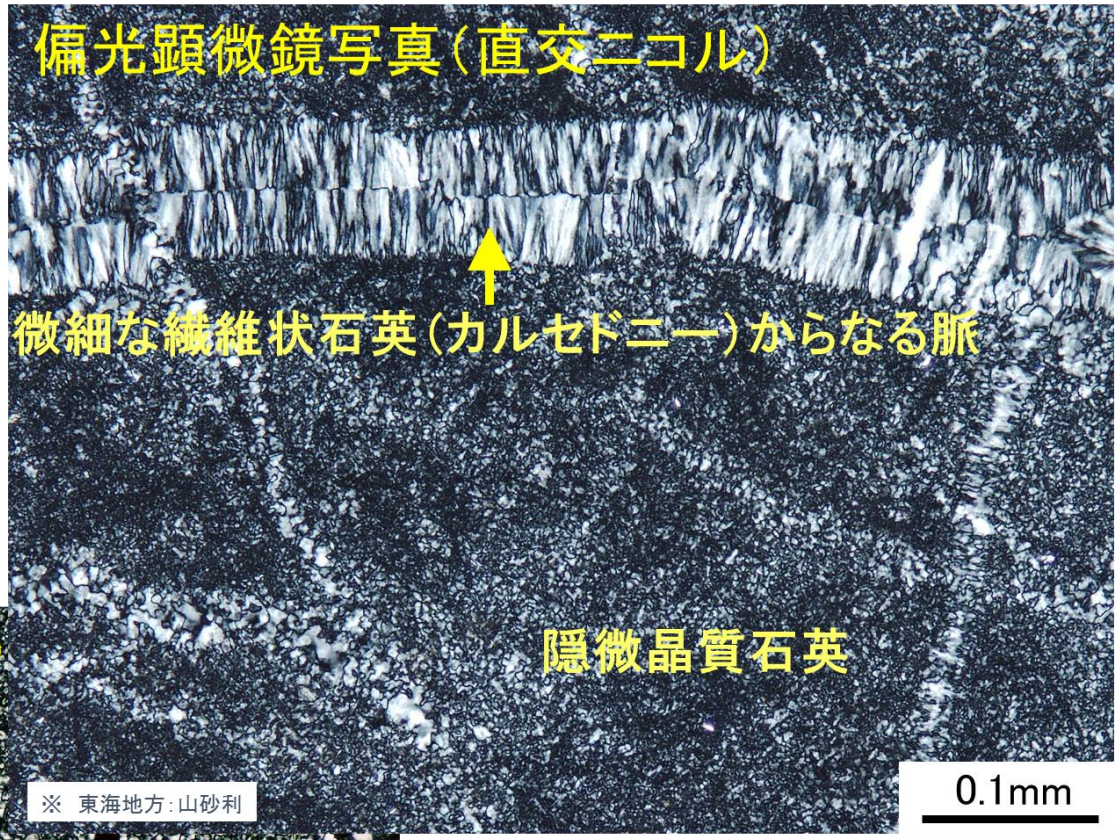
	代表的なASR反応性の岩石
オパール （水を含んだ非晶質）	変質を受けた岩石 （火山岩類を含む） 急速膨張性
クリストバライト トリディマイト	新第三紀以降の火山岩類 （新第三紀以降の安山岩，流紋岩など）
ガラス	新第三紀以降の火山岩類 （新第三紀以降の安山岩，流紋岩など）
微細な石英：隠微晶質石英 カルセドニー 微晶質石英	様々な岩石（チャート・珪質頁岩，ホルンフェルス，広域変成岩，断層岩類・・・） 遅延膨張性

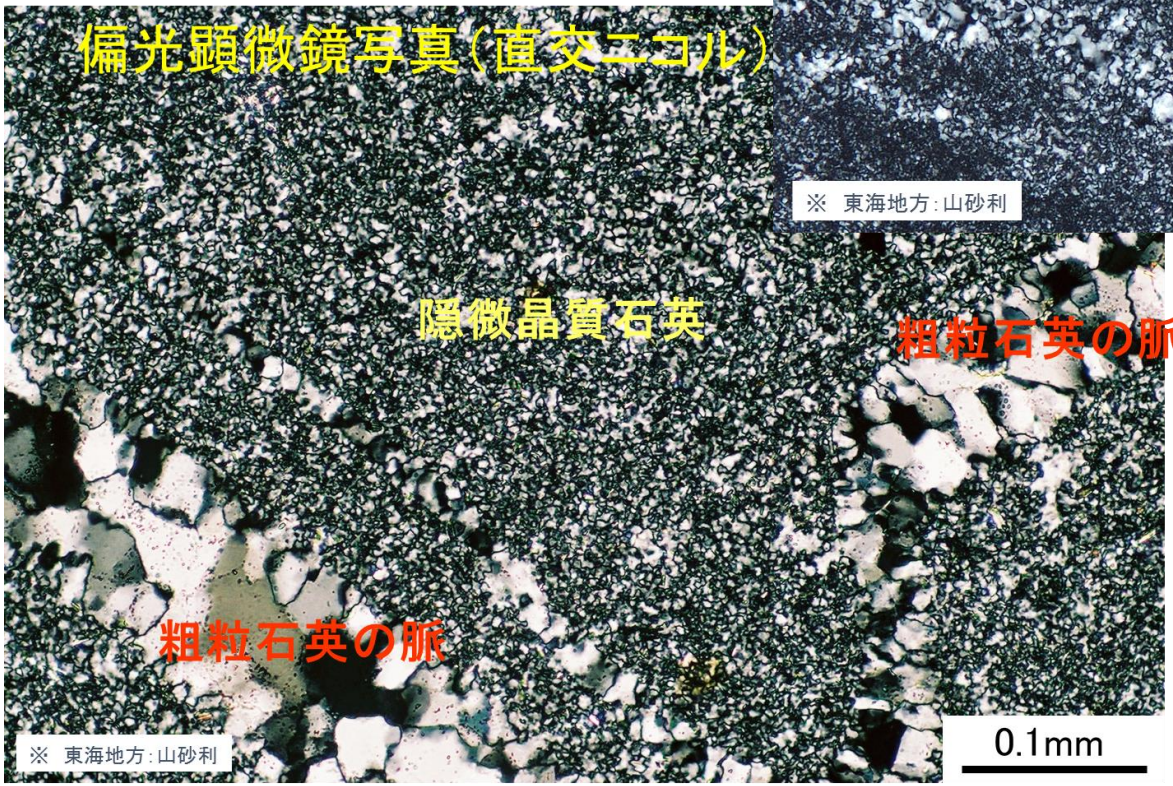
カルセドニー：繊維状で微細な石英の集合体

隠微晶質：偏光顕微鏡でも個々の鉱物粒子が見えないほど細粒な組織

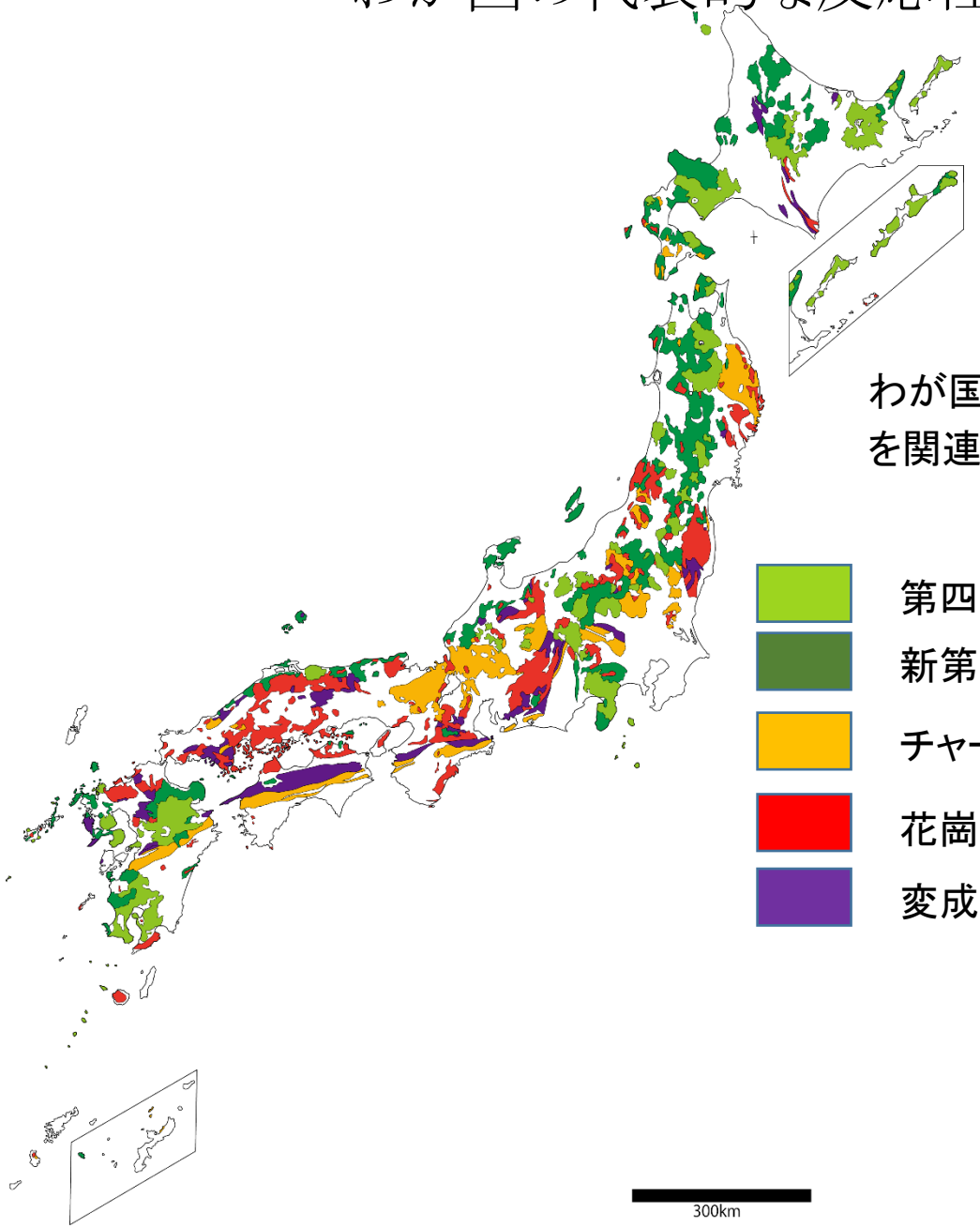
微晶質：偏光顕微鏡で個々の鉱物粒子がようやく見える程度の細粒な組織

チャートの反応性鉱物（遅延膨張性）





わが国の代表的な反応性骨材の分布

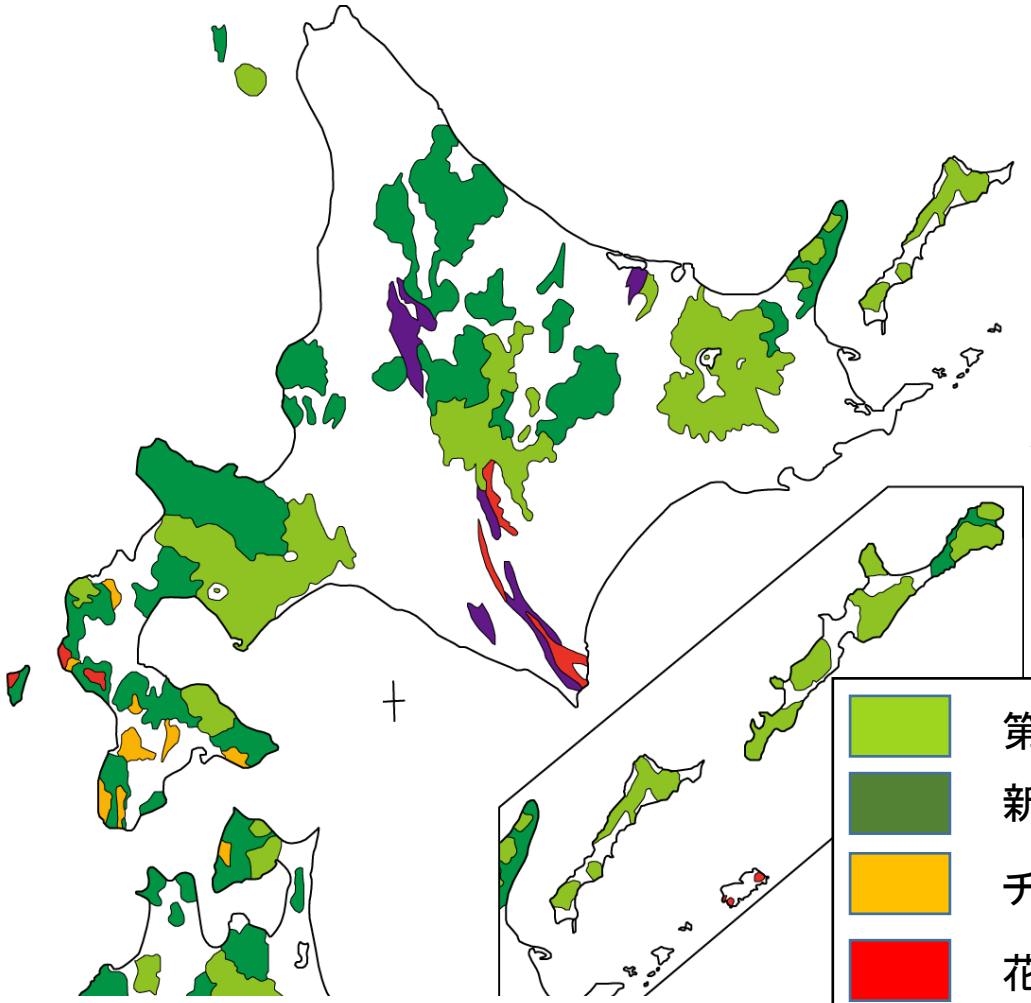


わが国の地質状況とASRの危険性・発生状況を関連付けて，地域ごとに考察する。

- 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）

北海道



主な反応性骨材

新第三紀以降の安山岩をはじめとする火山岩類（急速膨張性）が非常に広く分布。砕石として非常に多く利用されている。

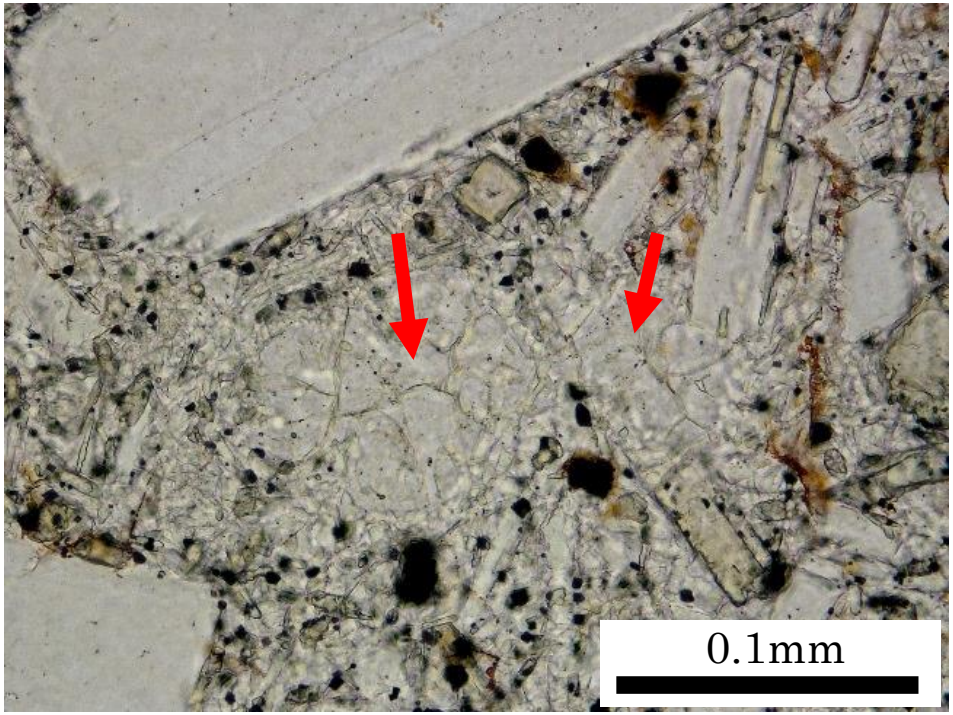
中軸部には変成岩類（遅延膨張性）も南北方向に分布し，川砂利・陸砂利などに混入する。

ASRの発生

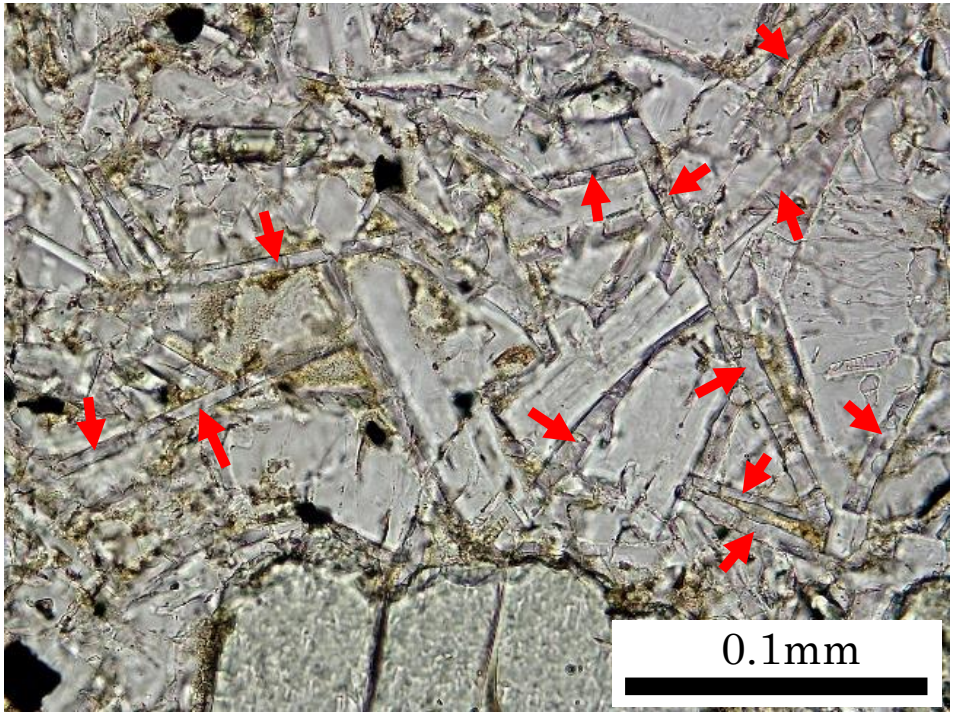
安山岩をはじめとする火山岩類が広く骨材利用されているが，ASRの事例報告は非常に少ない。

- 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

北海道



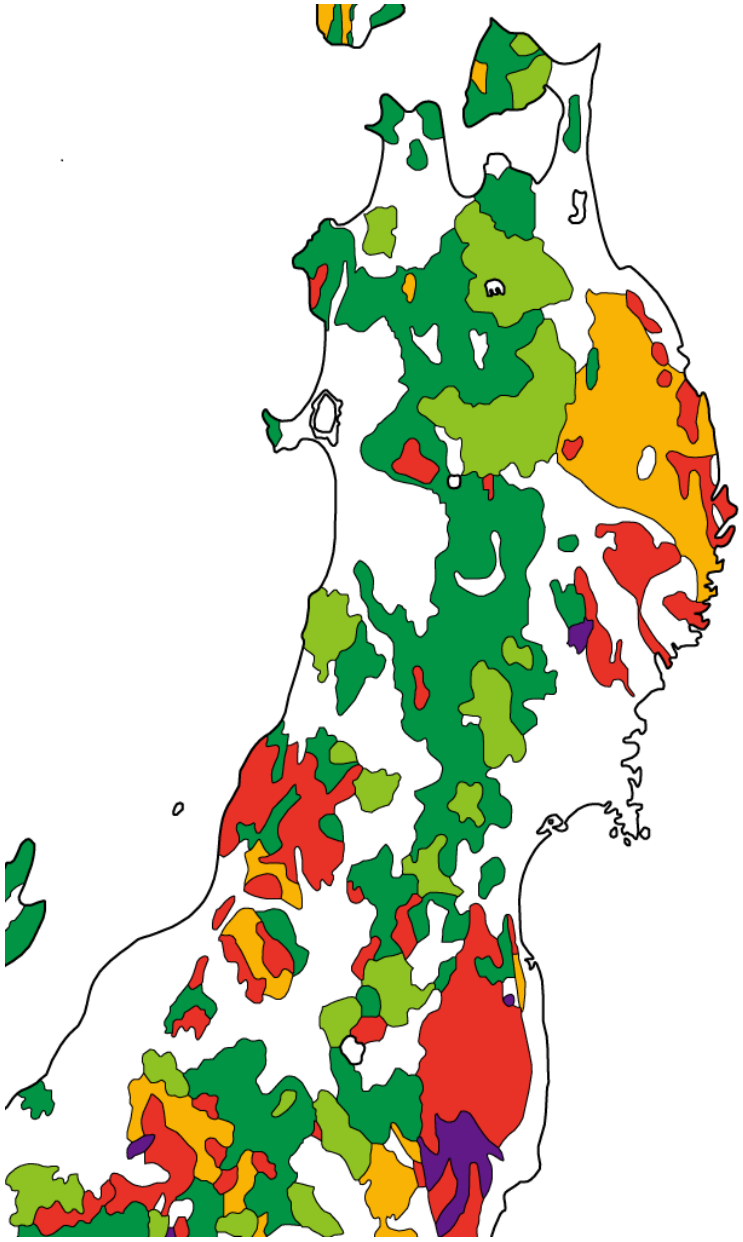
安山岩砕石中に多量に含まれるクリストバライト



“無害”な安山岩砕石中に
多量に含まれるトリディマイト

北海道産安山岩砕石の偏光顕微鏡観察

東北



主な反応性骨材とASR

奥羽脊梁山地から日本海側の地域にかけて，安山岩をはじめとする火山岩類が広く分布し，太平洋側でも仙台市・名取市付近をかすめる。これを砕石などに使用したことによる急速膨張性ASRの発生事例が非常に多い。

その他の主な反応性骨材

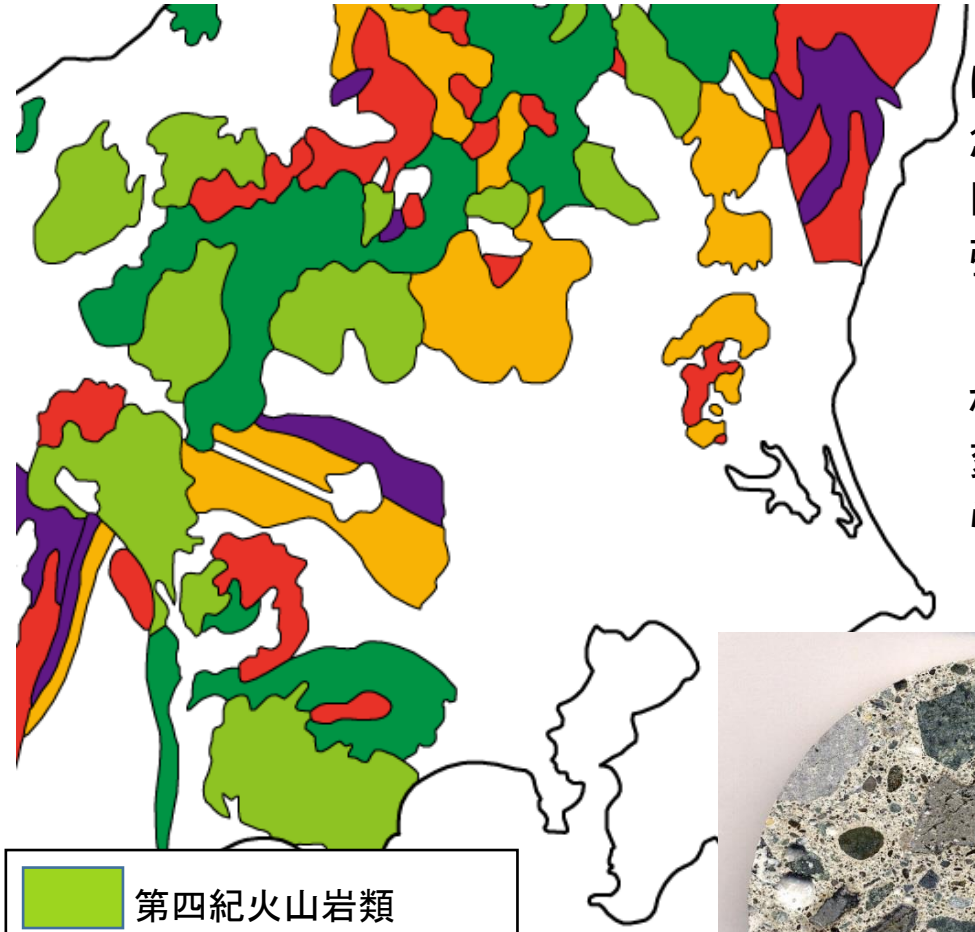
北部北上山地にはチャートを頻繁に挟む地層が分布。阿武隈山地南部には変成岩類が広く分布。東北地方南部～北関東にはチャートを頻繁に挟む地層が分布，またこれを起源とする山砂利の骨材利用もある（福島県いわき市付近）。これらの遅延膨張性骨材によるASRの発生については不明である。

- 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

青森県産安山岩砕石を使用したPC水槽

関東地方

主な反応性骨材とASR



北と西を新第三紀以降の安山岩などの火山岩類に囲まれ，砕石に多く使用されている。これによる急速膨張性ASRの発生事例が多い。北部のチャート，北東部のホルンフェルスや変成岩による遅延膨張性ASRの事例も見られる。

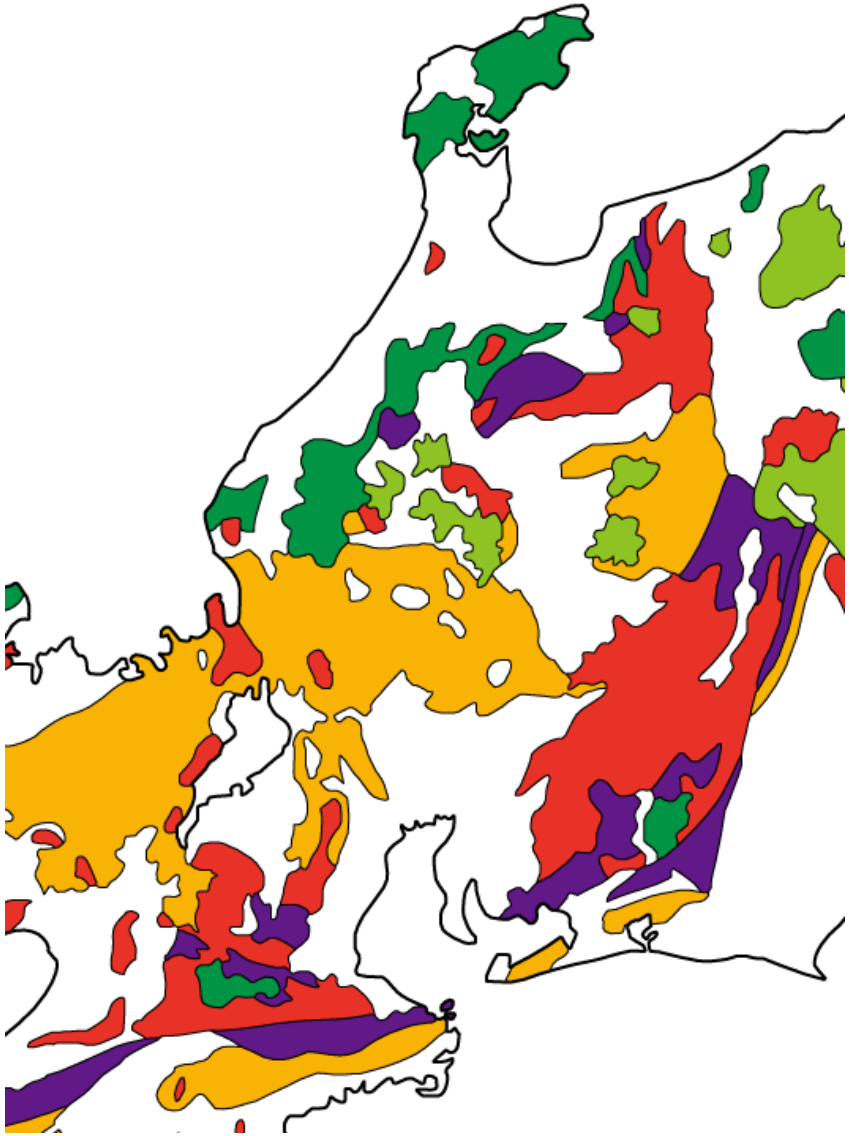
利根川・那珂川・相模川などの流域には安山岩などの火山岩類が分布，荒川などにはチャートや変成岩類が分布，これらの水系の砂利には，それらが混入している。

海上輸送による他地域からの骨材流入もある。

安山岩砕石によるASR

荒川砂利によるASR
（チャート・変成岩）

北陸地方・東海地方



- 第四紀火山岩類
- 新第三紀火山岩類
- チャートを多量に含む地層
- 花崗岩類（周囲のホルンフェルスが反応性）
- 変成岩類

特徴

砕石のほかに砂利資源も豊富。飛騨山脈・両白山地から日本海にかけての地域には，新第三紀以降の急速膨張性火山岩類が分布。遅延膨張性のチャート・珪質頁岩を多く含む地層や変成岩類も分布。

主な反応性骨材とASR

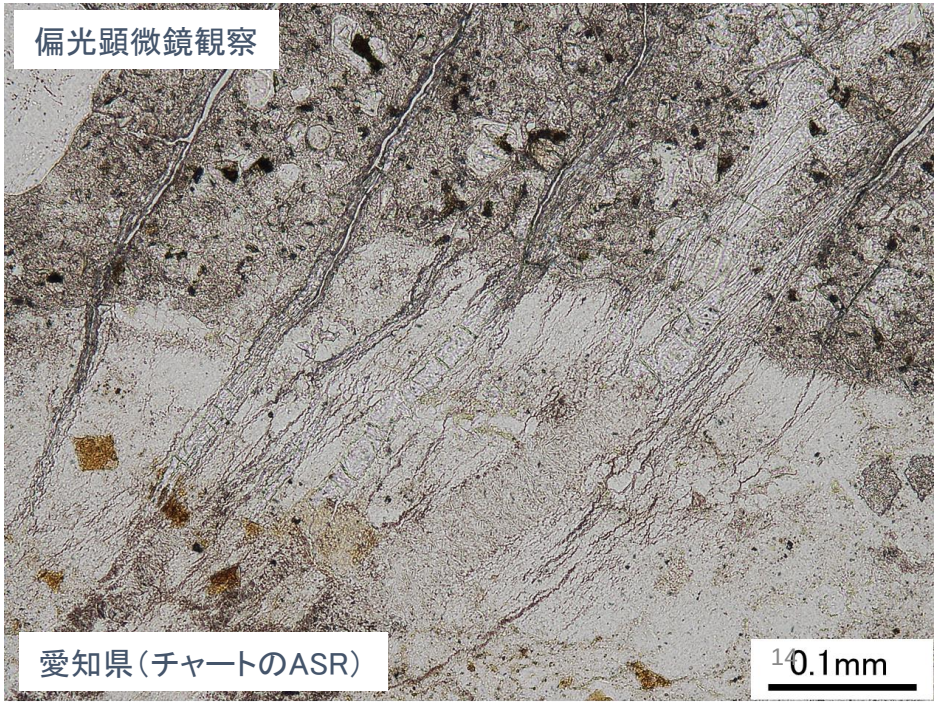
常願寺川をはじめ，日本海側の川砂利資源には急速膨張性の火山岩類が混入する場合がある。一方，名古屋市周辺では遅延膨張性のチャートなどを含む山砂利資源が利用されている。

北陸地方では安山岩による急速膨張性ASR，東海地方ではチャート・珪質頁岩・変成岩類による遅延膨張性ASRが顕在化している。近年，北陸地方では急速膨張性骨材によるASR劣化コンクリート中で，遅延膨張性骨材もASRに加わってきている事例もある。

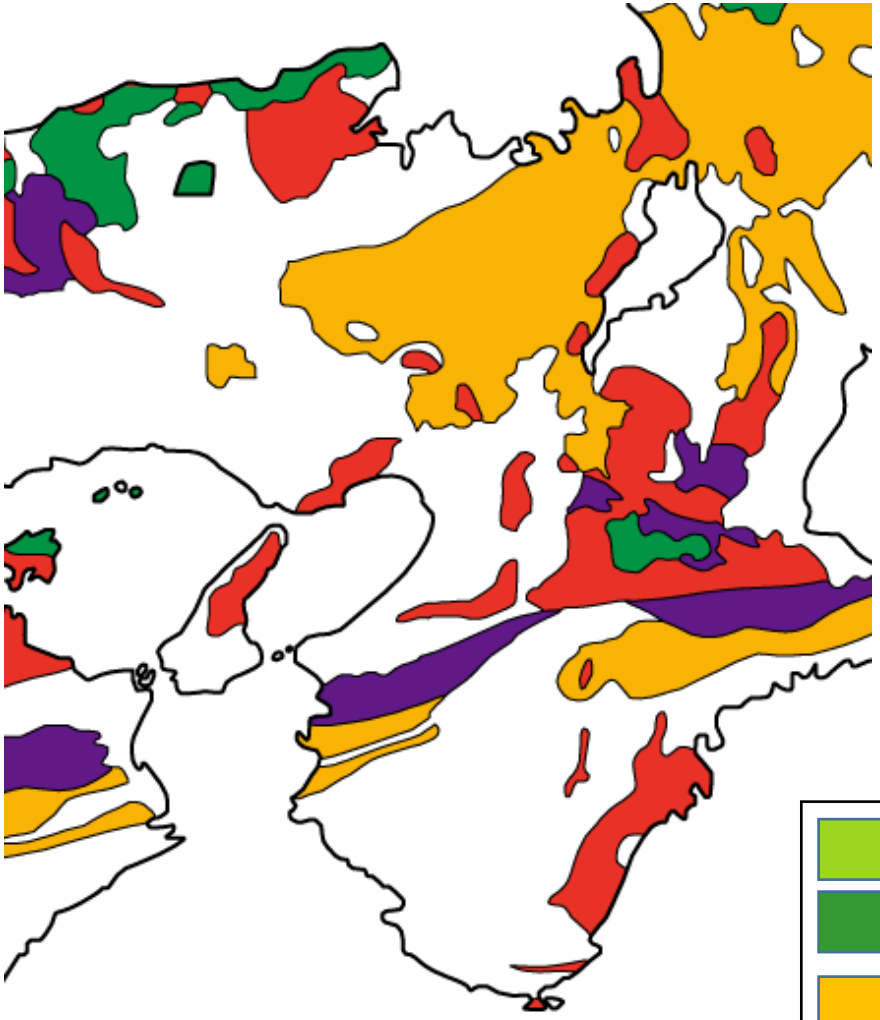
富山県（安山岩）

石川県（安山岩）

愛知県（変成岩類）


偏光顕微鏡観察
愛知県（チャートのASR）
0.1mm

近畿



特徴

遅延膨張性のチャート・珪質頁岩を多く含む地層や変成岩類が広く分布。日本海沿いと瀬戸内海沿いには新第三紀以降の急速膨張性の火山岩類が分布。

主な反応性骨材とASR

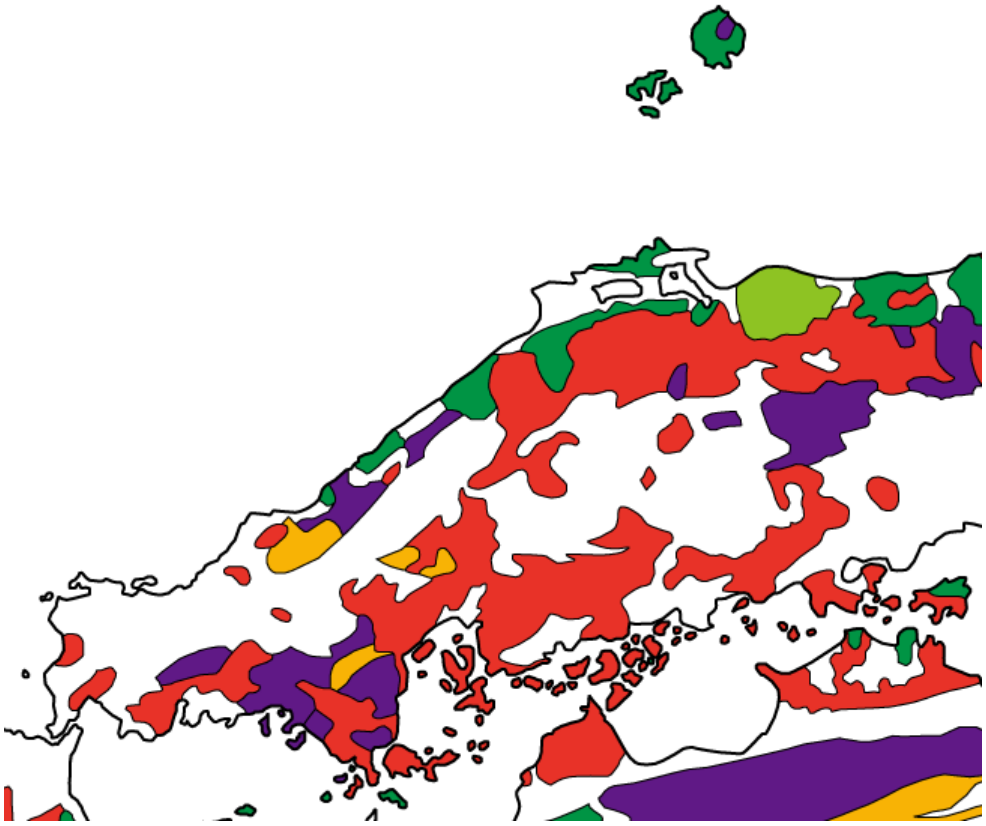
骨材は，砂岩・緑色岩などのほか，古第三紀以前の流紋岩類（遅延膨張性）が利用されている。

遅延膨張性のチャートや変成岩類からなる山砂利が京都府南部などの丘陵で採取されている。

現在までに顕在化しているASRは瀬戸内海からもたらされた急速膨張性の安山岩などの火山岩類によるものが主である。

- 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

中国



- 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

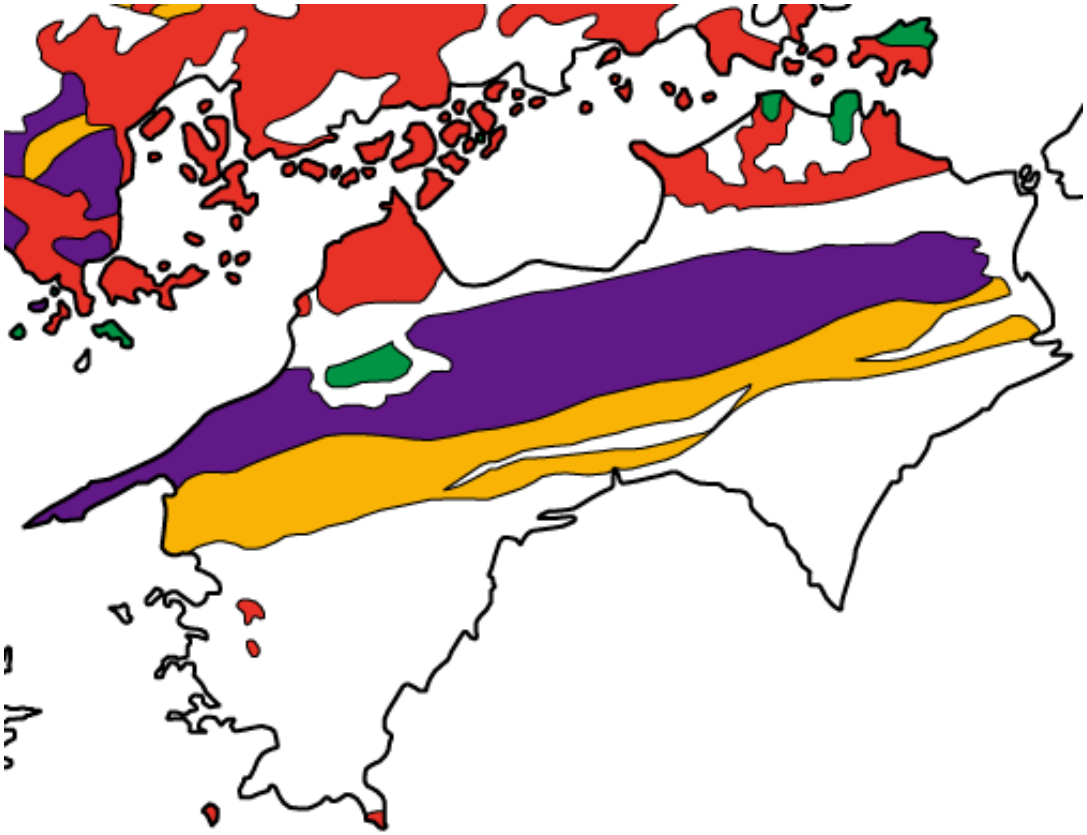
特徴

安山岩などの急速膨張性の火山岩類が山陰海岸沿いから中国山地へ続く地域と，瀬戸内海沿岸に分布。花崗岩や古第三紀以前の遅延膨張性の流紋岩溶結凝灰岩の分布が広大であり，またその周囲には遅延膨張性のホルンフェルスが多く生成。

主な反応性骨材とASR

山陰地方では安山岩などの火山岩類によるASRが多い。山陽地方では砂質岩・泥質岩起源のホルンフェルスによるASRが目立つ。流紋岩溶結凝灰岩が砕石などで利用されているが，古第三紀以前のものであり，クリストバライトやガラスなどが隠微晶質石英に再結晶した遅延膨張性骨材である。

四国



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

特徴

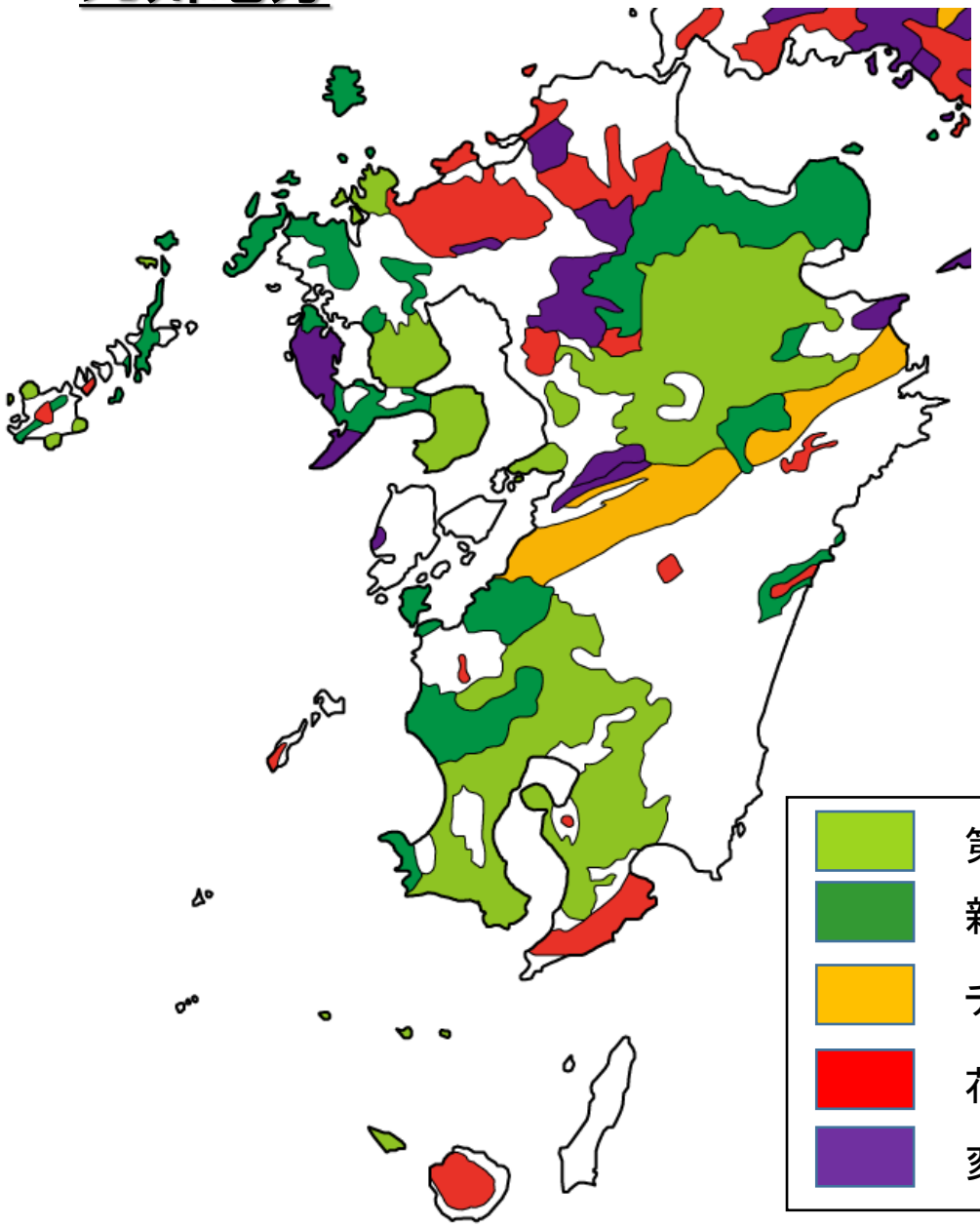
瀬戸内の石鎚山一松山を中心とした地域・讃岐平野・備讃瀬戸の島々に新第三紀の安山岩などの急速膨張性の火山岩類が分布。

遅延膨張性の変成岩類やチャートを多く含む地層が広く分布する。

主な反応性骨材とASR

砕石としては砂岩が最も多く利用されている。ASRは瀬戸内地域の安山岩によるものが主であるが，砂岩・広域変成岩類・ホルンフェルス・流紋岩でも確認されている。この地域の安山岩は瀬戸内海を渡って近畿地方のASRにも関与した。

九州地方



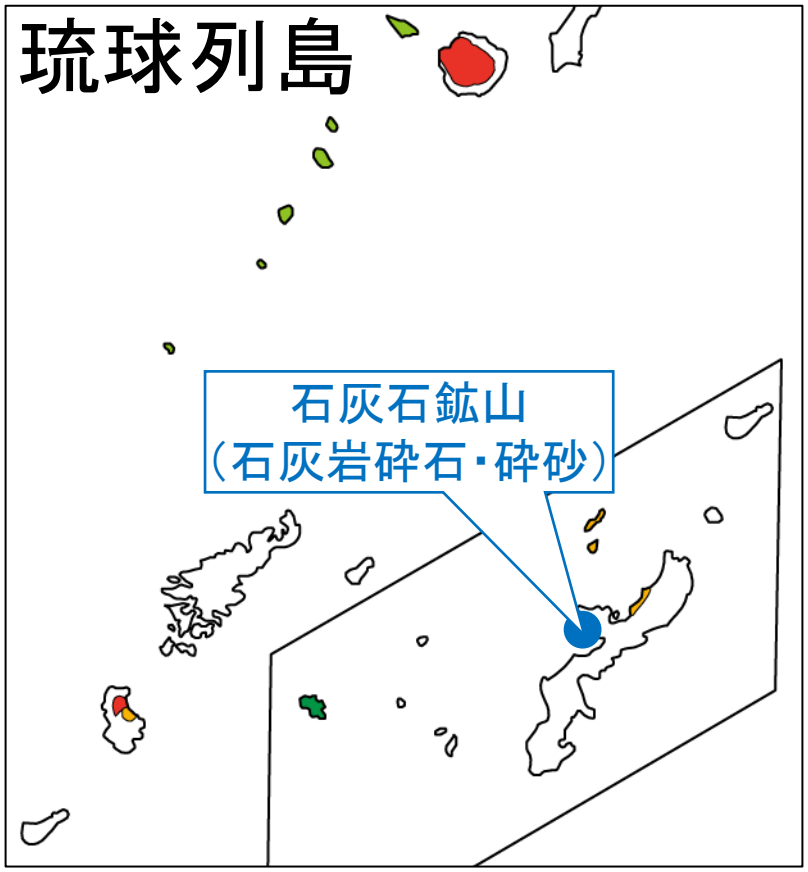
特徴

安山岩をはじめとする急速膨張性の火山岩類に広く覆われ，これを除くと北部九州では遅延膨張性の変成岩類と花崗岩類，南部九州では砂岩や頁岩が多く，中間の秩父累帯分布域には遅延膨張性のチャートも多量に分布する。

主な反応性骨材とASR

ほぼ全域で安山岩などの火山岩類によるASRが多発。北部九州では変成岩類によるもの，秩父累帯分布域ではチャートや珪質頁岩によるものも加えて発生。また，花崗岩類周囲の砂質・泥質ホルンフェルスについても遅延膨張性ASRが発生する可能性がある。

- 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



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

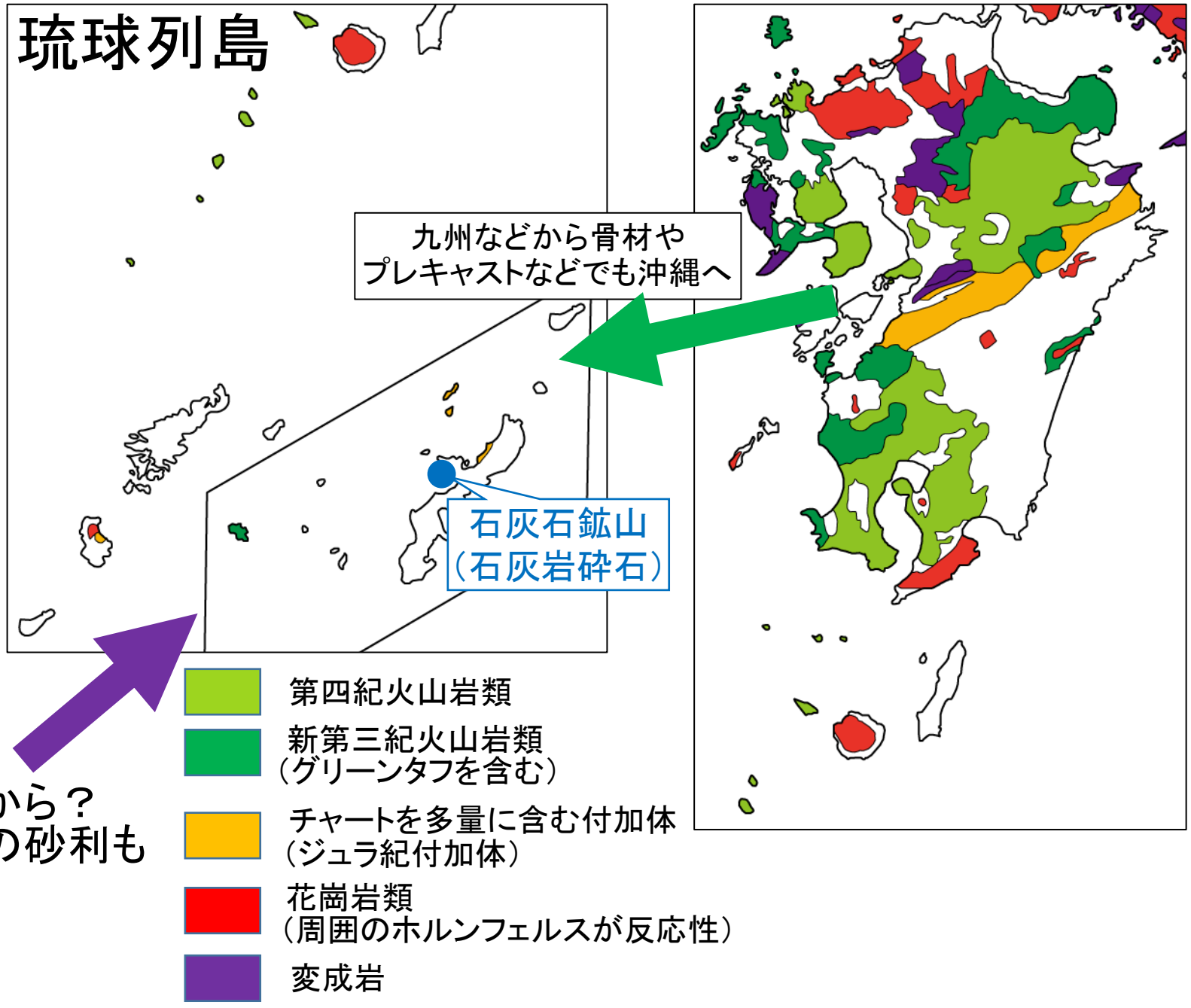
島々の基盤

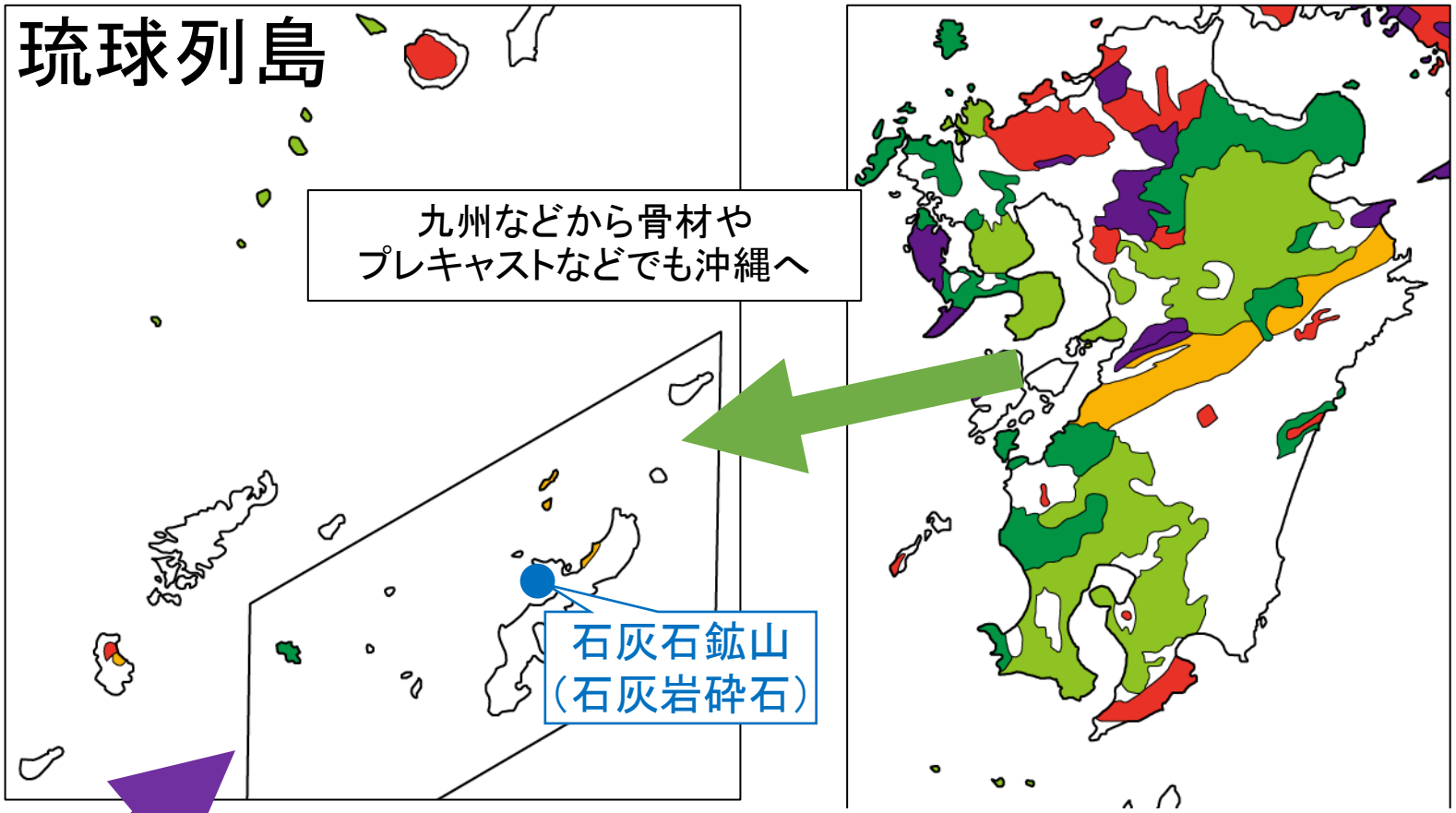
北～中琉球（沖縄島以北）
主に泥質岩（頁岩・粘板岩など）や砂岩からなるが，石灰岩やチャートの岩体も含む。

南琉球以南（石垣島・西表島など）
主に変成岩（八重山変成岩）が分布。

砂利・砂を育むような大河川に乏しい。また，これらの硬い基盤は，新第三紀以降の固結度の弱い地層で覆われていることも多い。

現地産の骨材としては，沖縄島本部半島の石灰石（石灰岩）と，海砂（現世サンゴ礁堆積物）が主である。


琉球列島
九州などから骨材や
プレキャストなどでも沖縄へ
石灰石鉱山
（石灰岩砕石）
台湾から？
変成岩の砂利も
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



台湾から？
変成岩の砂利も

ASRの事例

- 石灰岩中に分布していた安山岩岩脈が石灰石骨材に混入して発生。
- 台湾から輸入された？変成岩の砂利によるASR。
- 九州などから持ち込まれたプレキャストコンクリートや骨材に発生。 ・・・・・などがある。

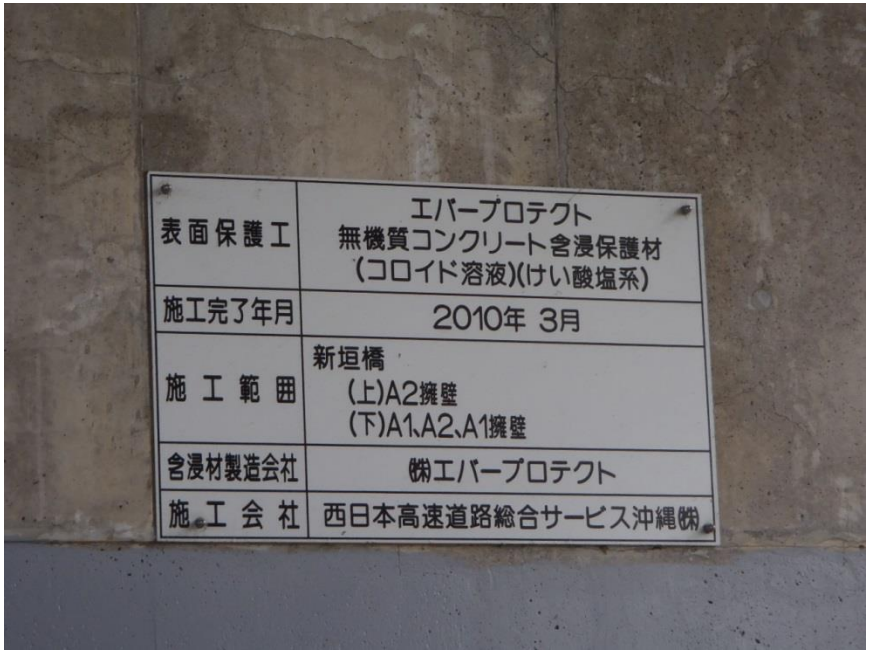
伊奈武瀬海岸消波ブロック(2012.9)

泊　大　橋

波の上橋

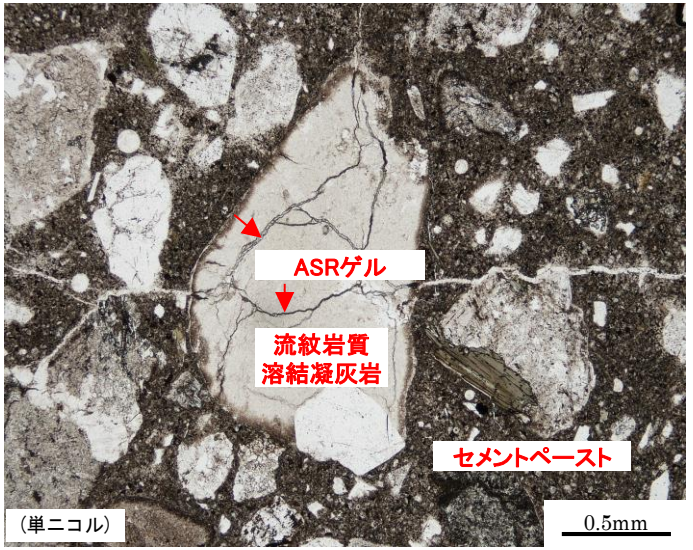
沖縄コンベンションセンター

新垣高架橋


表面保護工
エバープロテクト
無機質コンクリート含浸保護材
(コロイド溶液)(けい酸塩系)
施工完了年月
2010年 3月
施工範囲
新垣橋
(上)A2擁壁
(下)A1、A2、A1擁壁
含浸材製造会社
㈱エバープロテクト
施工会社
西日本高速道路総合サービス沖縄㈱

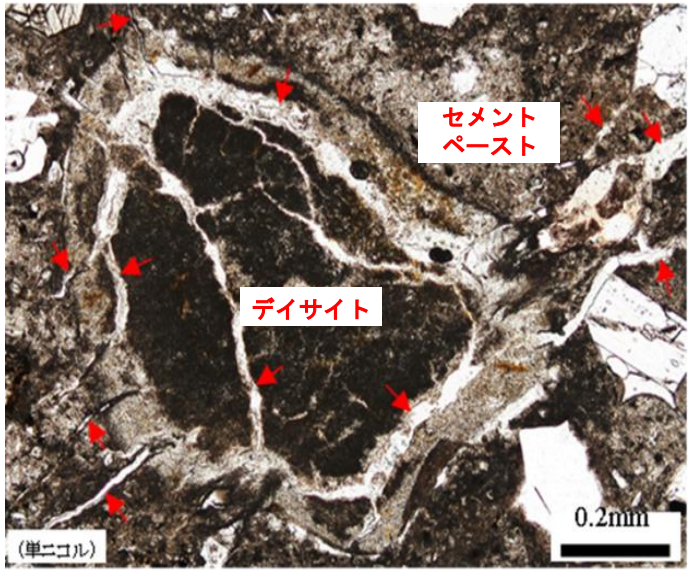
【PC橋梁・PCa部材のASR劣化の実態調査】

［事例Ⅰ：プレテンション式PC橋梁（ホロー桁）（北陸）］



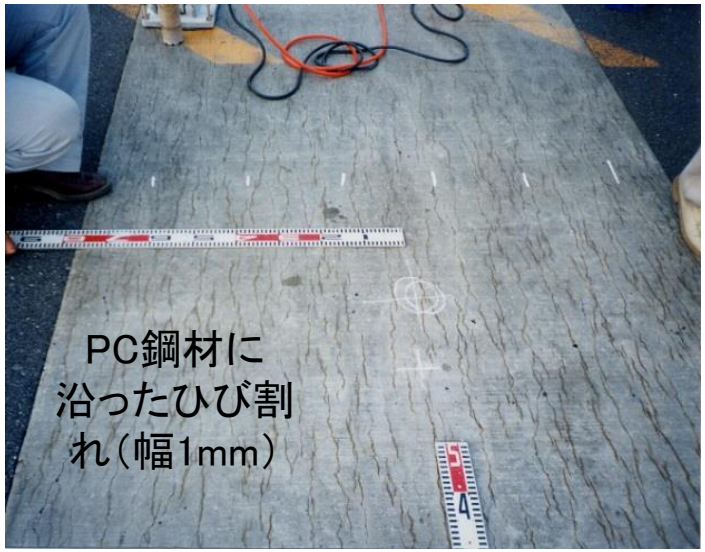
・富山県庄川産の河川骨材（一部、黒部川産）が使用されていた。
・石川県および富山県の市町村道に使用されており、昭和50年代に架設されたものにASRが発生している。
・下フランジの側面および下面に橋軸方向のひび割れが発生している。
（ホロー桁は中空部に水が滞留することによりASRが促進される）
・流紋岩質溶結凝灰岩に顕著なASRの反応痕跡と膨張ひび割れが観察された。

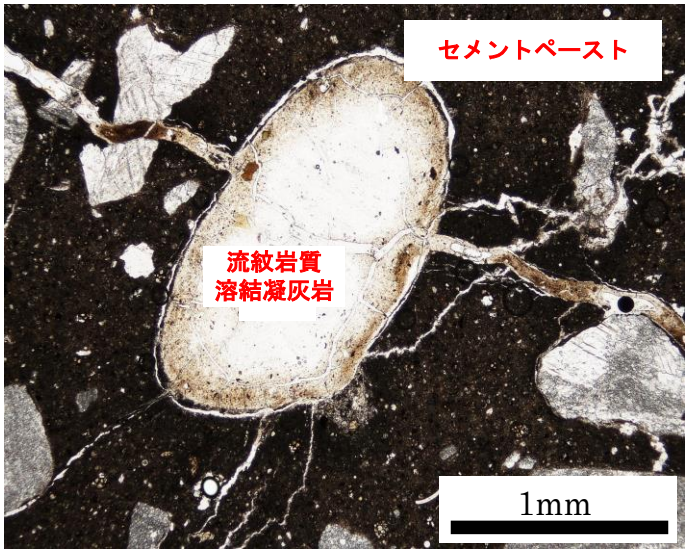
［事例Ⅱ：PC橋梁（PC床版）（東北）］



- 東北地方のポストテンション式PC橋梁の柱頭部に打設されており、冬期に凍結防止剤が多量に散布される、厳しい環境条件下にあった。
- PC橋梁に用いられたコンクリートの配合上のアルカリ総量はRC床版：2.4kg/m^3およびPC床版：2.8 kg/m^3程度であり，アルカリ量の相違によりPC床版により深刻なASR劣化が発生したものと推測された。
  （骨材には，石灰石砕石（結晶性）と火山岩性の陸砂が使用されていた）
- PC床版のコア片では，石英安山岩（デイサイト）（1～2 mm）が良く反応しており、骨材粒子内のひび割れはセメントペーストに進展していた。これは石灰石砕石と火山岩性の陸砂の組み合わせの組成ペシマムによるASRの発生事例であった。

[事例Ⅲ：PC舗装（関東）]





・このPC 舗装は東京都の臨海部にあり，建設後約1年でPC鋼材に沿った舗装表面に幅1 mmのひび割れが多数発生した。
（コンクリートのアルカリ量が2.2kg/m^{3}程度であり、規制値以下であった。）
・骨材には、石灰石砕石と千葉県産の山砂と北海道産の陸砂の混合物が使用されていた。山砂と陸砂の混合物はモルタルバー法（JIS A 1146）で「無害」と判定されていた。
・黒色および褐色の粒子はそれぞれ安山岩と流紋岩質溶結凝灰岩であり、反
応性鉱物（オパール）を含有する溶結凝灰岩粒子から膨張ひび割れが進展していた。

[事例Ⅳ：PC電柱（北陸）]

- 地際部にPC鋼線に沿った数mmの縦方向のひび割れが発生していた。
- コンクリートのアルカリ量は3.6kg/m^{3}で規制値を満足していなかった。
- 使用した富山県産の川砂および川砂利は、いずれも化学法（JIS A 1145）で「無害」と判定されていた。
- 川砂中の安山岩粒子が反応しており、骨材からの膨張ひび割れの進展が観察された。
- 富山県の河川産骨材の事例のように、反応性骨材を含有する火山岩粒子が混入する場合には、組成ペシマム現象が顕著に現れるので、化学法で「無害」と判定された骨材でも、ASRが実際に発生することに注意が必要である。

【北陸地方における石炭火力発電所】

七尾大田火力発電所

1号：50万kW（H 7運転開始）

2号：70万kW（H10運転開始）

敦賀火力発電所

1号：50万kW

（H 3運転開始）

2号：70万kW

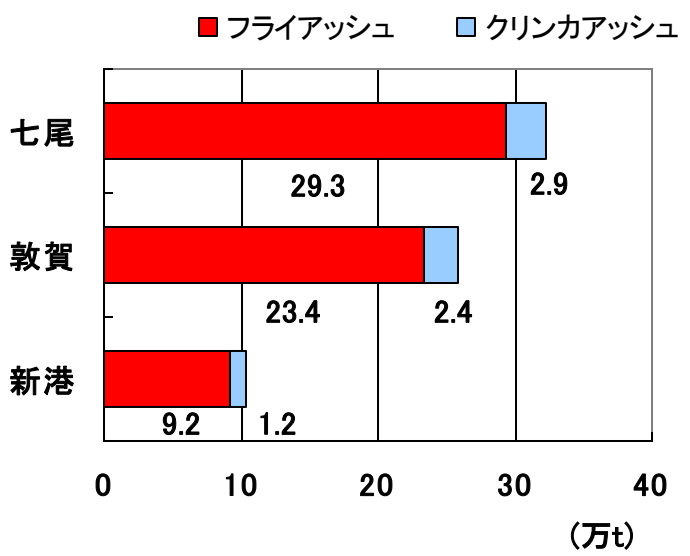
（H12運転開始）

富山新港火力発電所

1号：25万kW（S46運転開始、S59石炭火力に燃料転換）

2号：25万kW（S47運転開始、S59石炭火力に燃料転換）

発電所別石炭灰発生量(H22年度実績)



石炭灰

フライアッシュ：61.9万 t

クリンカアッシュ：6.5万 t

合計：68.4万 t

H23. 7. 18

北陸地方で有効利用へ　フライアッシュ混合コンクリート

産学官で委員会設置

石炭灰の有効利用　取り巻く環境が変化

石炭を燃焼させる際に副生する石炭灰の発生量は09年度実績で1095万2千㌧となり、3年ぶりのマイナスとなった。このうち有効利用されたのは1066万8千㌧（前年比11・1％減）と落ち込み、セメントの減産を受けて石炭灰の利用は大きな転換期を迎えている。他方で、東日本大震災での福島第一原子力発電所事故の影響で、稼働を停止する原子力発電所が全国で相次いでいる。電力の安定供給に向け、石炭火力発電設備の増強が見込まれ、石炭灰の有効利用率の維持・向上を図るためには新たな用途開発が待たれる。ここでは最近の事例として、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」の取り組みを紹介する。

1、委員会設立の経緯

北陸地方は塩害およびASR（アルカリシリカ反応）の問題を抱えており、コンクリート構造物を長寿命化し、維持管理を容易にする高耐久性のコンクリートを供給することが求められてきた。

北陸地方の3県（富山、石川、福井）では、石炭火力発電所がそれぞれ稼働しており、七尾大田火力発電所（石川県）では、10年1月から分級装置を本格稼働、従来よりも高品質なJIS灰（JIS II種規格に適合するFA）を供給することが可能になった。このJIS灰をコンクリートに混和することで、ボールベアリング作用により施工性が向上し、ポゾラン反応で耐久性を高められる。環境負荷低減や地産地消の観点からも、FAの有効利用の促進を図る機運が高まり、「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」が今年1月に設立された。

産学官連携のもと、大学から金沢大学、金沢工業大学、富山県立大学、福井大学、産業界から北陸3県の生コンクリート工業組合と北陸電力、国土交通省、富山県、石川県、福井県がオブザーバーとして参画する。

2、委員会の進ちょく

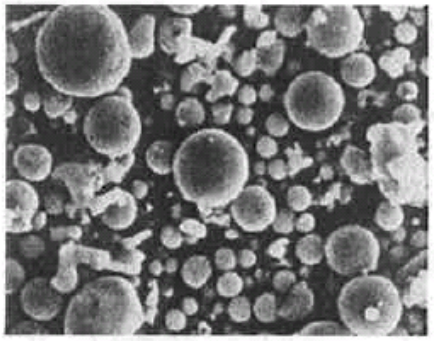
委員会の目的は、北陸地方での建設工事で有効利用されるようにFAの具体的な使用方法について検討すること。第1回委員会では、活動計画とFAコンクリートの技術的知見が審議され、FAの品質保証とFAコンの課題抽出とその解決を検討する。

北陸電力では、七尾大田火力発電所から富山県と石川県へ、敦賀火力発電所（福井県）から福井県へそれぞれFAを供給する体制をとっている。

敦賀火力発電所では、12年度から分級装置の稼働を予定しており、富山県と石川県が先行し、室内・実機試験を進めている。

ここまでの試験結果では、分級装置の効果により、従来のFAコンに比べて28日の強度発現性が向上。生コン工組側は、問題なく利用できる手応えを感じている。

現在は試験データをもとに標準配合について検討中の段階ではあるが、富山県では8月以降にJIS認証を取得する工場も出てくる見通し。今後、長期強度の確認および大学で普通コンや高炉B種コンとの比較試験、9月以降に同県でFAコンを使った試験施工を予定する。本委員会は、10月と3月に開催し、年度内に報告書をまとめる。



分級効果で品質向上

富山・石川で試験施工へ

3、室内・実機試験

室内・実機試験結果について、委員長の島居和之金沢大学教授は「生コン会社は過去のFAへの『トラウマ』があり、最初は尻込みしていたが、現在のFAはJIS II種に近いものが安定供給され、試験練りおよび実機試験で全く問題なく利用できることを確認した。生コン側の意識も変わったのではないか」と語る。

室内での試験練りは4月に、富山工組の2工場では早月川と庄川、石川では手取川と能登半島北部の砕石を使用した。

富山工組は、2工場ともFA用のサイロと計量設備を有し、試験はスムーズに進んだ。実機試験の結果をみると、同配合の普通コンクリートや高炉B種コンに比べ、空気量、強度やスランプに差異はみられなかった。

石川工組も、品質安定の手応えを得たが、2工場とも専用サイロや計量設備を持っておらず通常のAE剤を用いた。試験練りは「FA用のAEを使用」、実機試験は「FA用のAEを使用し、単位水量を減らす」ことで対応した。

課題は「原粉供給側のFA有効利用への意識改革」だ。

同社は、90年代から七尾大田と敦賀の運転を開始し、FAの有効利用を図ってきた。コンクリート分野では、二次製品向けの混和材として使われることが多く、FAコンは七尾大田や富山太陽光所、FAセメントで敦賀原子力発電所の関連など、社内利用にとどまっていた。

生コン側からコンクリート用混和材としてFAを使いにくいという声があるが、昨年からの分級装置の稼働により、品質へ価が一変した。JISの品質の安定化や供給を増加させるため、分級装置を稼働したわけだが、分級前に比べては飛躍的に高まった

「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」が**平成26年度土木学会環境賞を受賞**しました！

フライアッシュの**地産地消**による**耐久性の高いコンクリートの製造**や、使用セメント量低減による**二酸化炭素排出量の低減**等が高く評価された

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）

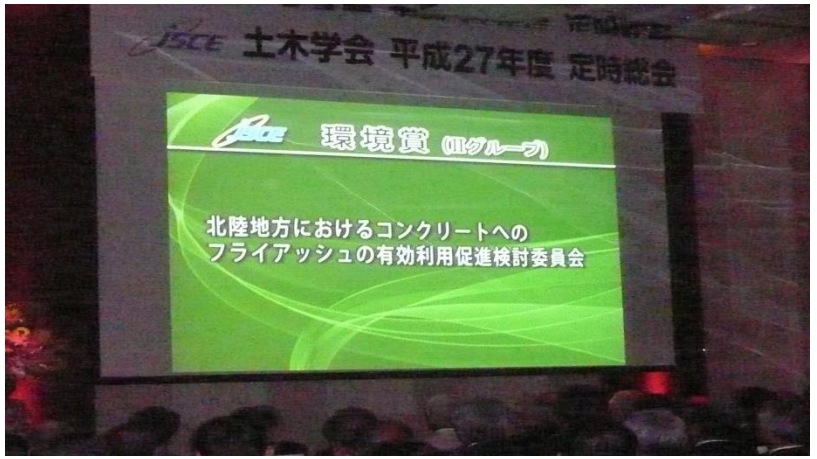
＜受賞対象プロジェクト＞
北陸地域における高品質フライアッシュを用いたコンクリートの普及のための技術開発

＜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。

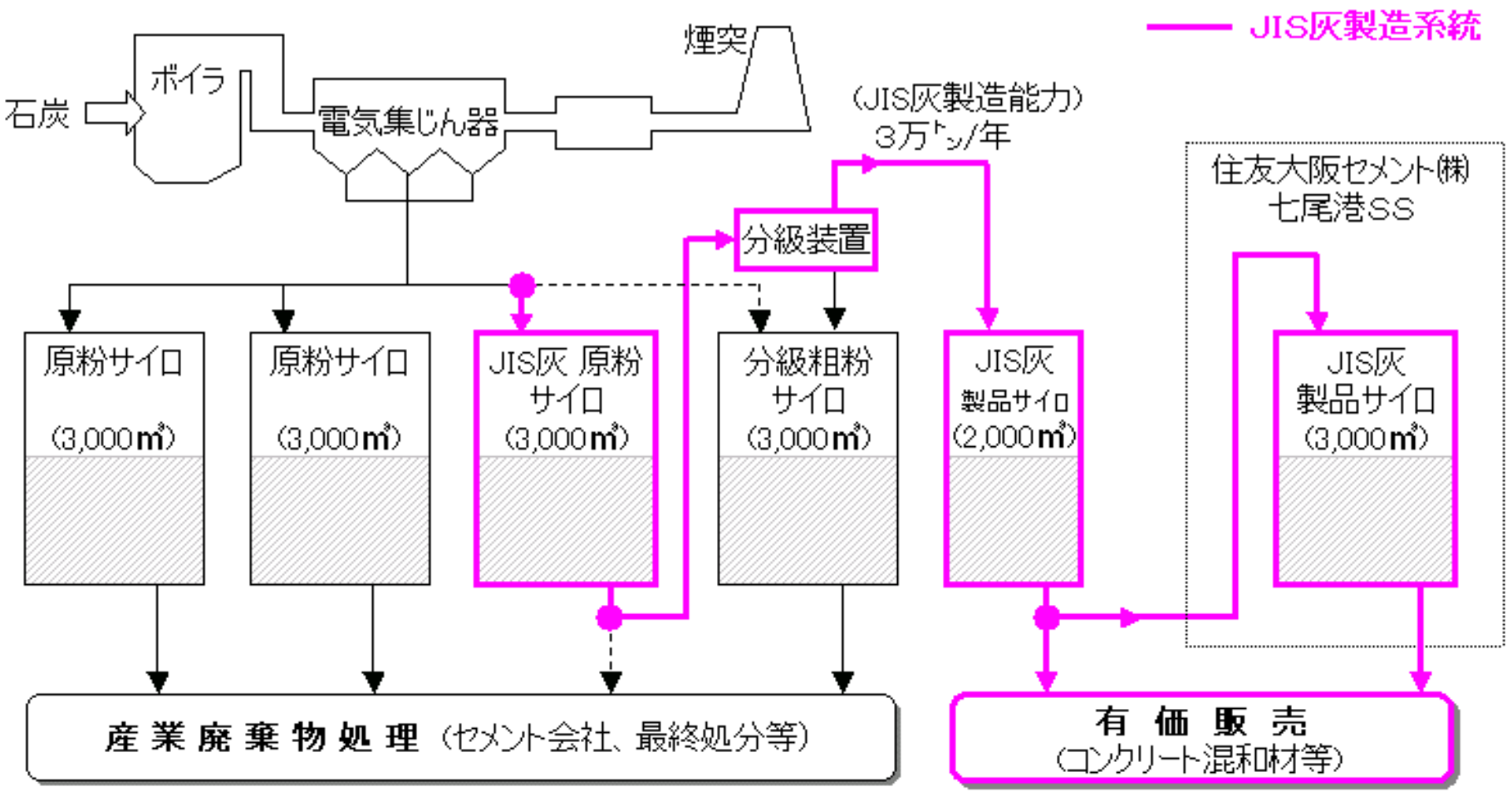
以　上

H27.5.26　プレスリリース



H27.6.12　授賞式の様子

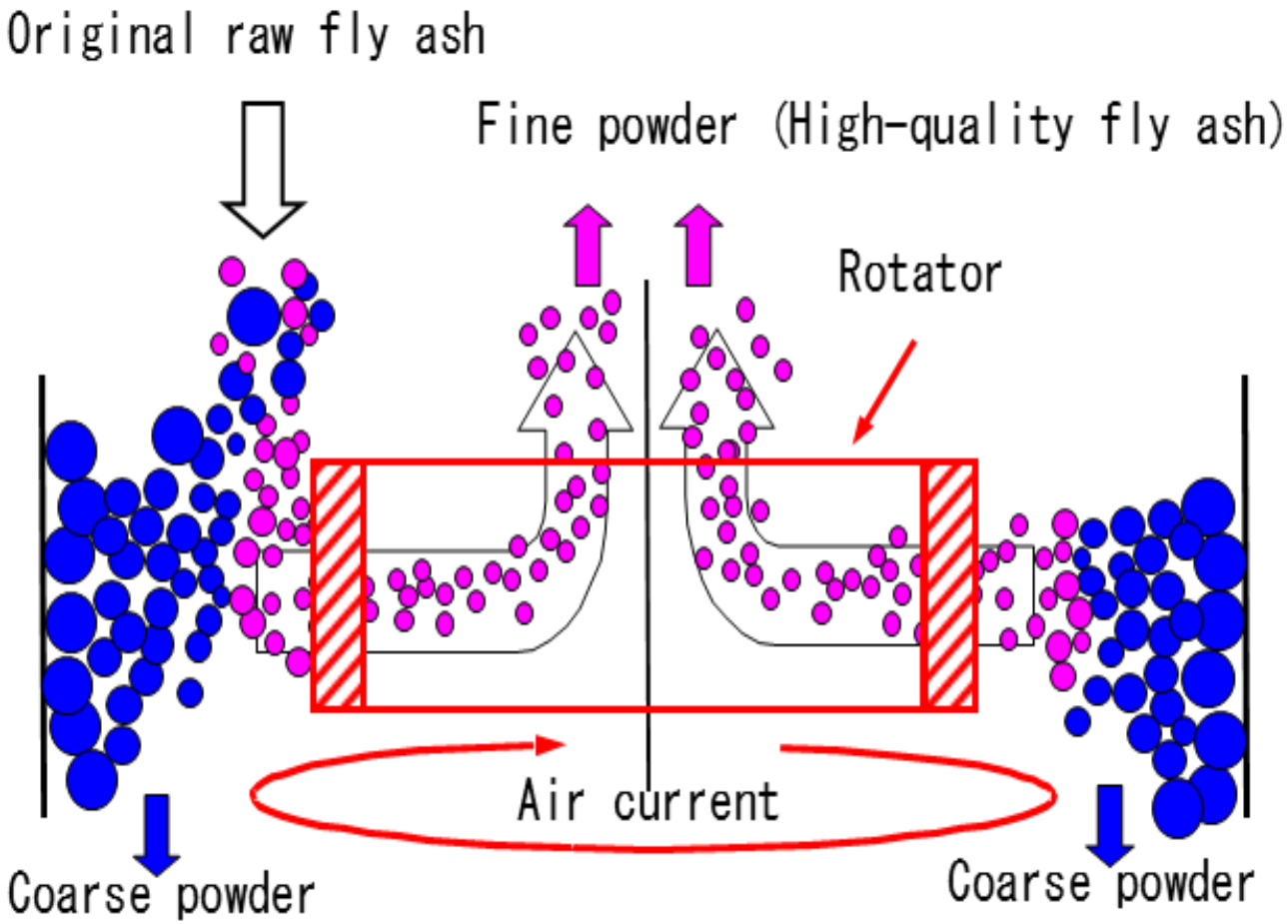
七尾大田火力発電所の JIS規格フライアッシュの製造工程



分級装置による捕捉率：50%

※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

フライアッシュの分級化の模式図

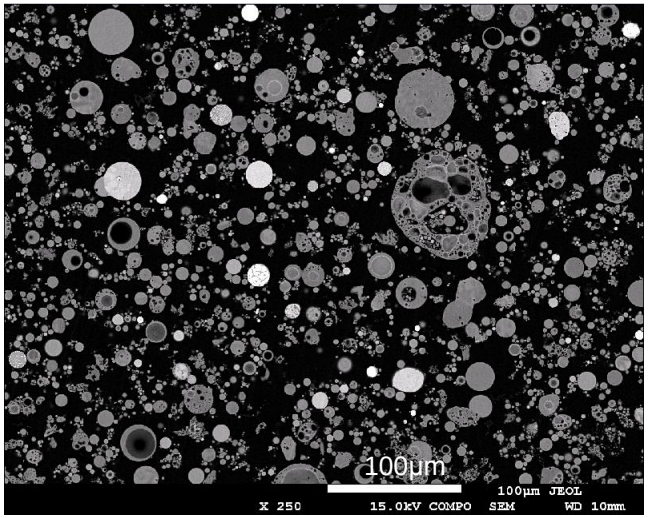


The physical and chemical properties of fly ash produced are well in line with the quality standard of the highest level “Class I” according to JIS A6201.

フライアッシュの物理的性質の変化（七尾産）

走査電子顕微鏡による反射電子像

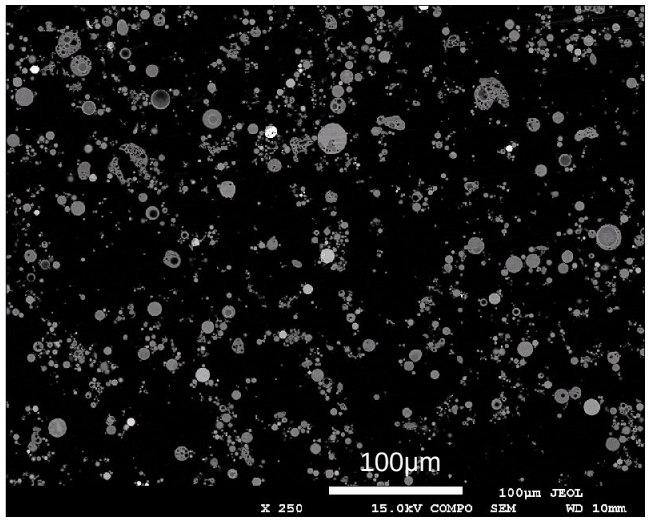
（フライアッシュ原粉）



分級

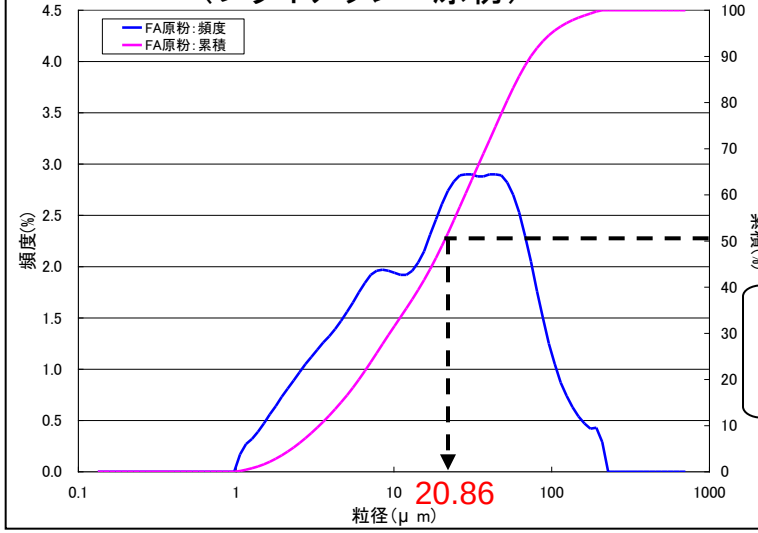
分級により、角ばった粒子、中空の粒子が少なくなり、細かく均等になっている。

（分級フライアッシュ）



レーザー回折法による粒度分布測定結果

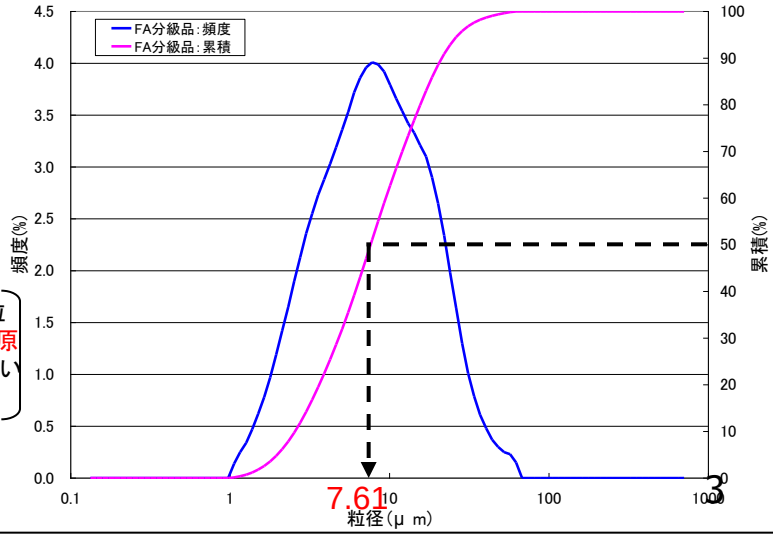
（フライアッシュ原粉）



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。

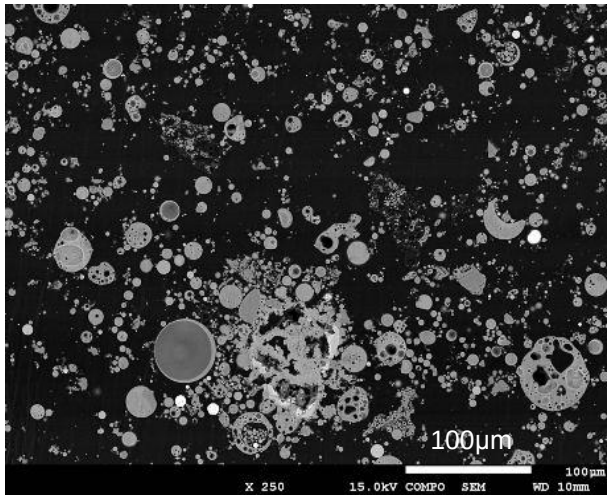
（分級フライアッシュ）



フライアッシュの物理的性質の変化（敦賀産）

走査電子顕微鏡による反射電子像

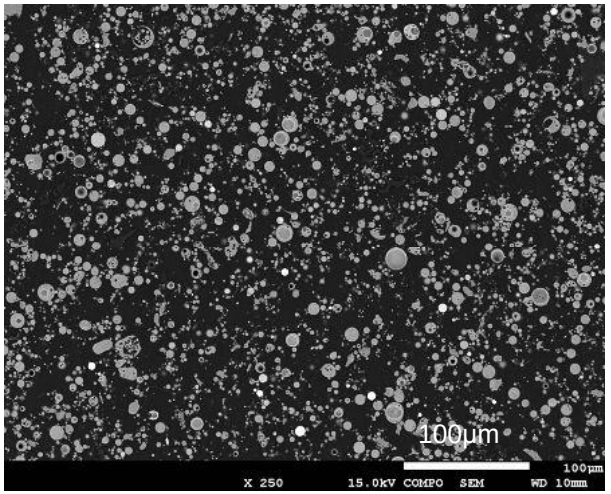
（フライアッシュ原粉）



分級

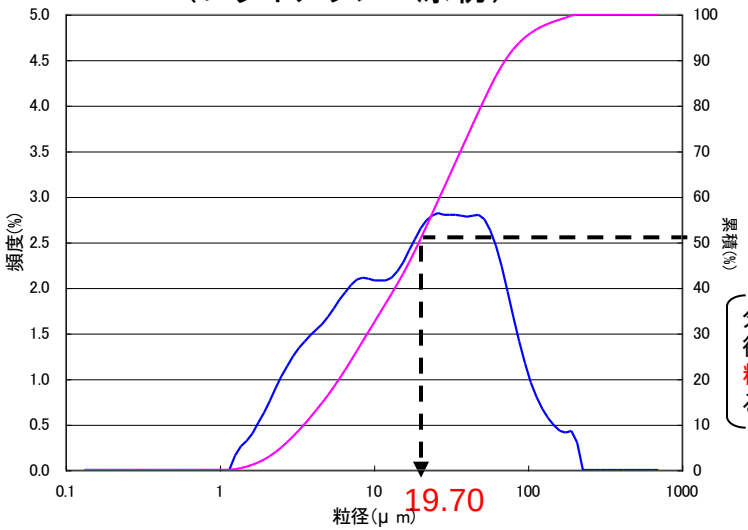
分級により、角ばった粒子、中空の粒子が少なくなり、細かく均等になっている。

（分級フライアッシュ）



レーザー回折法による粒度分布測定結果

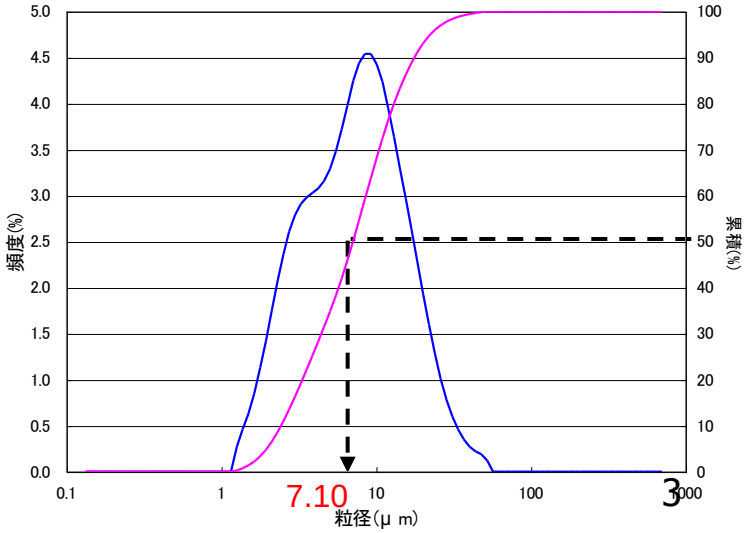
（フライアッシュ原粉）



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。

（分級フライアッシュ）



フライアッシュの化学的性質の変化（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

【フライアッシュの分級による改善効果】

〈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。

【フライアッシュによるASR抑制対策】

○JIS　A5308「レディーミクストコンクリート」附属書Bによる規定

a)コンクリート中のアルカリ総量を規制する抑制対策
⇒　3kg/m^{3}以下で十分か？
b)アルカリシリカ反応抑制効果のある混合セメントなどを使用する抑制対策
⇒　抑制するために必要な置換率は？
c)安全と認められる骨材を使用する抑制対策
⇒　化学法は万全ではない？

○海外の規定の例（カナダ：CSA　A23．2－27A）
・予防レベルに応じてアルカリ総量又は混和材置換率を設定

対策方法	予防レベル				
	低い	中程度	高い	非常に高い	特別
ｱﾙｶﾘ総量(kg/m^3)	3.0	2.4	1.8	1.2	ｱﾙｶﾘ総量1.2kg/m^{3}以下，かつﾌﾗｲｱｯｼｭ置換率35%以上
ﾌﾗｲｱｯｼｭ置換率(%)	15	20	25	35	

○「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」の推奨
・「フライアッシュ分級品※15%以上」を「ASR抑制効果があると確認された単位量」としている。

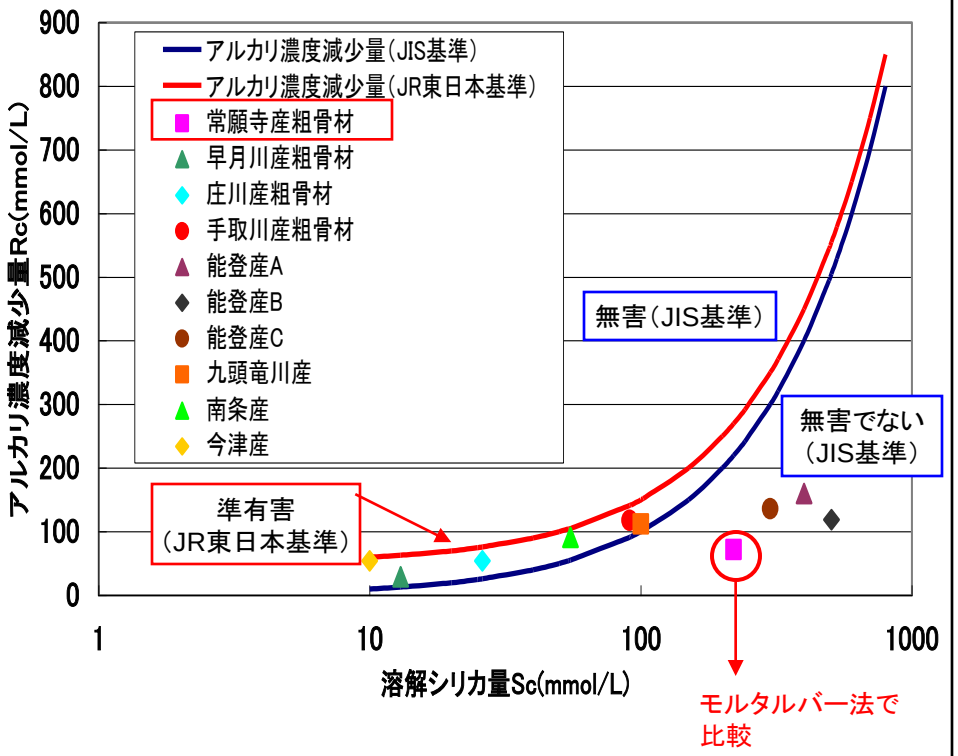
※「フライアッシュ分級品」とは、北陸電力株式会社の七尾大田火力発電所または敦賀火力発電所で産出されるフライアッシュで原粉を分級装置でさらに分級したフライアッシュのことをいう。

フライアッシュによるASR抑制対策

【フライアッシュによるASR抑制効果】（委員会による検証）

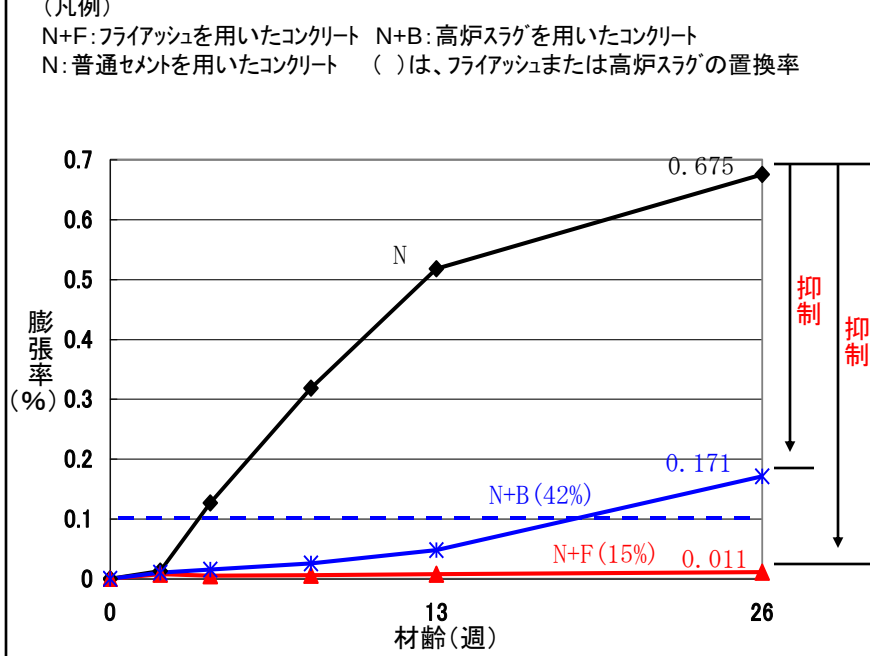
・ASR抑制効果に関して、化学法およびモルタルバー法により、比較評価を実施
・フライアッシュを混和した場合、常願寺川産の反応性の高い骨材に対しても膨張が抑制され、フライアッシュには優れたASR抑制効果があることが検証できた。

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

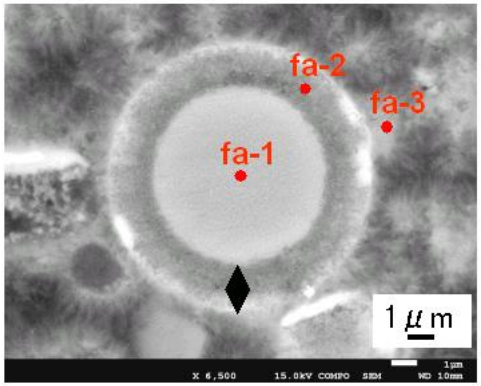
【フライアッシュによるASR抑制メカニズム】

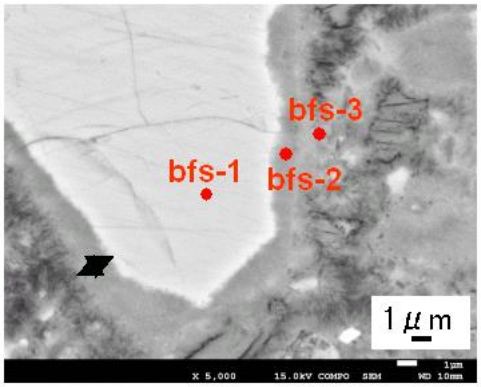
○一般的な解釈

①セメントとの置換により，コンクリート中のアルカリ総量が減る効果
②フライアッシュのポゾラン反応により，コンクリートが密実になる効果
③フライアッシュのポゾラン反応の際に，細孔溶液中のアルカリが吸着される効果

「③アルカリ吸着効果」について

フライアッシュ粒子の反応層　　高炉スラグ微粉末の反応層





	fa-1	fa-2	fa-3
Ca/Si	0.05	0.88	1.64

	bfs-1	bfs-2	bfs-3
Ca/Si	1.39	1.47	1.58

・Ca/Si比が小さい方が，細孔溶液中のアルカリが吸着されやすいことが言われており、フライアッシュの反応層のCa/Si比は、高炉スラグ微粉末の反応層のCa/Si比に比べて小さく、細孔溶液中のアルカリを吸着し、OH-濃度を下げる効果が高いことが推察される。
（ASR抑制効果が高い。）

【出典】広野真一；安藤陽子；大代武志；鳥居和之．フライアッシュと高炉スラグ微粉末によるASR抑制効果の比較．セメント・コンクリート論文集．Vol.67，2014，p.441 - 448.

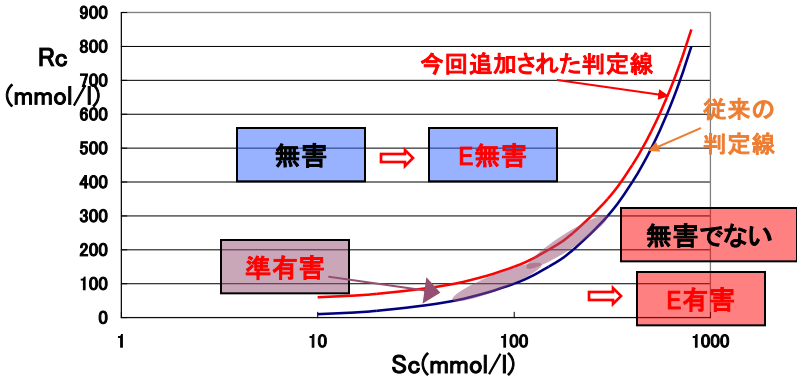
JR東日本のASR抑制対策強化（H23.2.1）

・無害とされる骨材を使用したが、ASRによるひび割れが発生した事例があり、対策を強化した。（独自の厳しい判定基準設定）
・2月1日付で改訂する土木工事標準仕様書から適用セメント工業新聞（H23.1.13記事より）

［JIS A1145(化学法)］

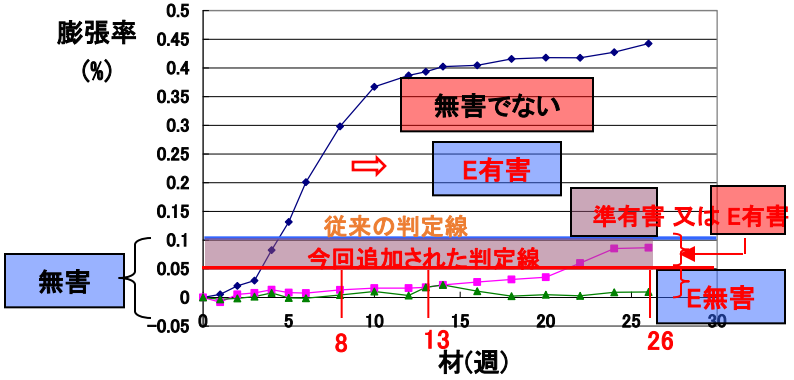
※Sc：溶解シリカ量、Rc：アルカリ濃度減少量(mmol/l)

JIS判定		JRの判定	
Sc＜Rc	「無害」	Sc＋50＜Rc	「E無害」
		Sc＜Rc≦Sc＋50	「準有害」
Sc ≧Rc	「無害でない」	Sc ≧Rc	「E有害」



［JIS A1146(モルタルバー法)：6か月の膨張率］

JIS判定		JRの判定		
0.1%未満	「無害」	0.05%未満		「E無害」
		0.05～0.1%	膨張率の傾き 8～13週＞ 13～26週	「準有害」
			膨張率の傾き 8～13週＜ 13～26週	「E有害」
0.1%以上	「無害でない」	0.1%以上		



［対策方法の比較］

JIS抑制対策		JR抑制対策		備考（北陸地方への影響）
「無害」	対策不要	「E無害」	対策不要	・北陸地方の骨材は多くが従来の「無害」から「準有害」または「E有害」に判定されることになる。 ・PCやPCa製品は、総量規制をクリアーできないので、混合セメントの使用に変更せざるをえない。 ・従来の「無害でない」は、「E有害」となり、「混合セメントの使用」のみがASR抑制対策として認められる。
		「準有害」	・アルカリ総量規制 (2.2kg/m^3) ・混合セメントなど使用	
「無害でない」	・アルカリ総量規制(3kg/m^3) ・混合セメントなど使用 ・安全と認められる骨材の使用	「E有害」	混合セメントなど使用	

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

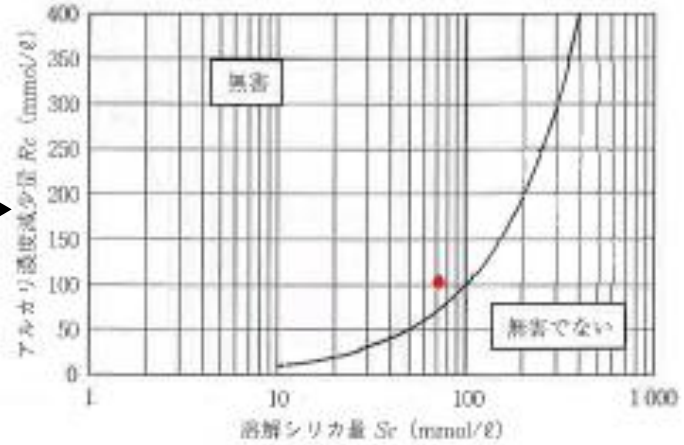


図-2　細骨材の試験結果（化学法）

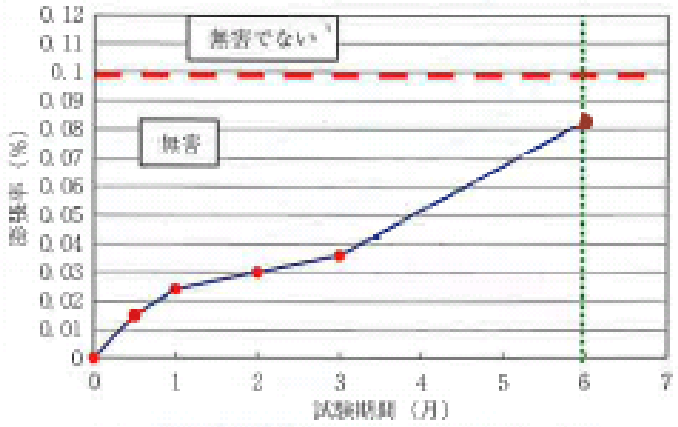


図-1　細骨材の試験結果（モルタルバー法）

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）

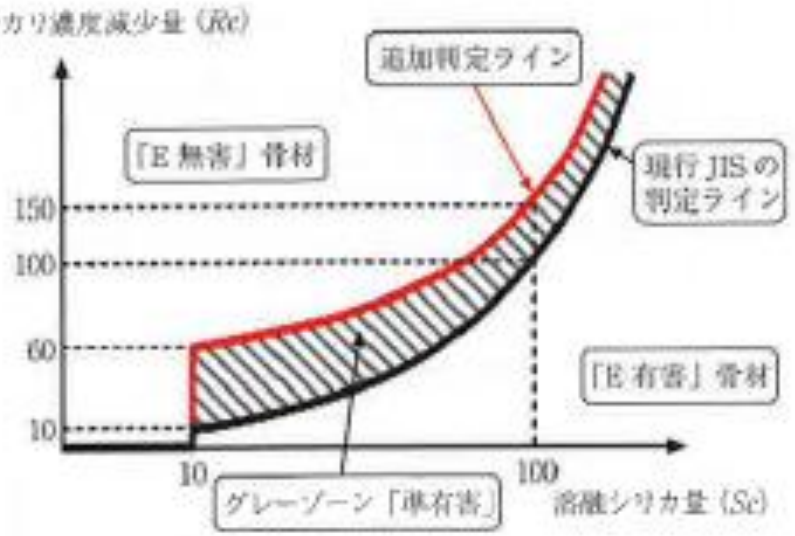


図-5　化学法の判定イメージ

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)

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

【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」

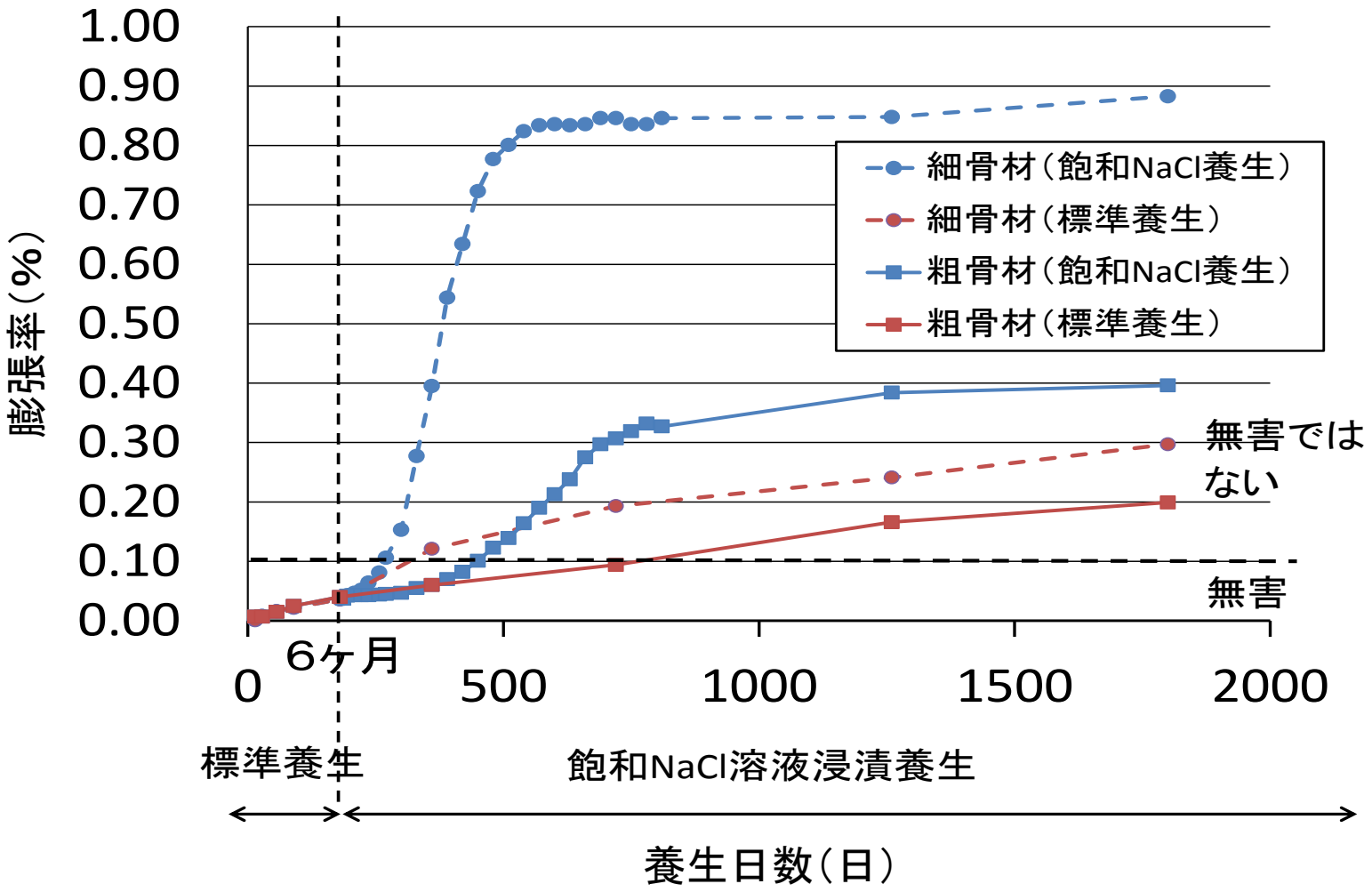
新潟駅立体化交差事業（JR東日本Oでの FAコンクリートの採用
（平成25年度より，20万m³打設，**七尾大田火力フライアッシュ**）

高架横梁に発生したASRひび割れ

単繊維混入FAコンクリートにより打設

背景：上越新幹線のASR劣化（阿賀野川産骨材のASR対策）

長期保存におけるモルタルバーの膨張挙動（富山県庄川産骨材）



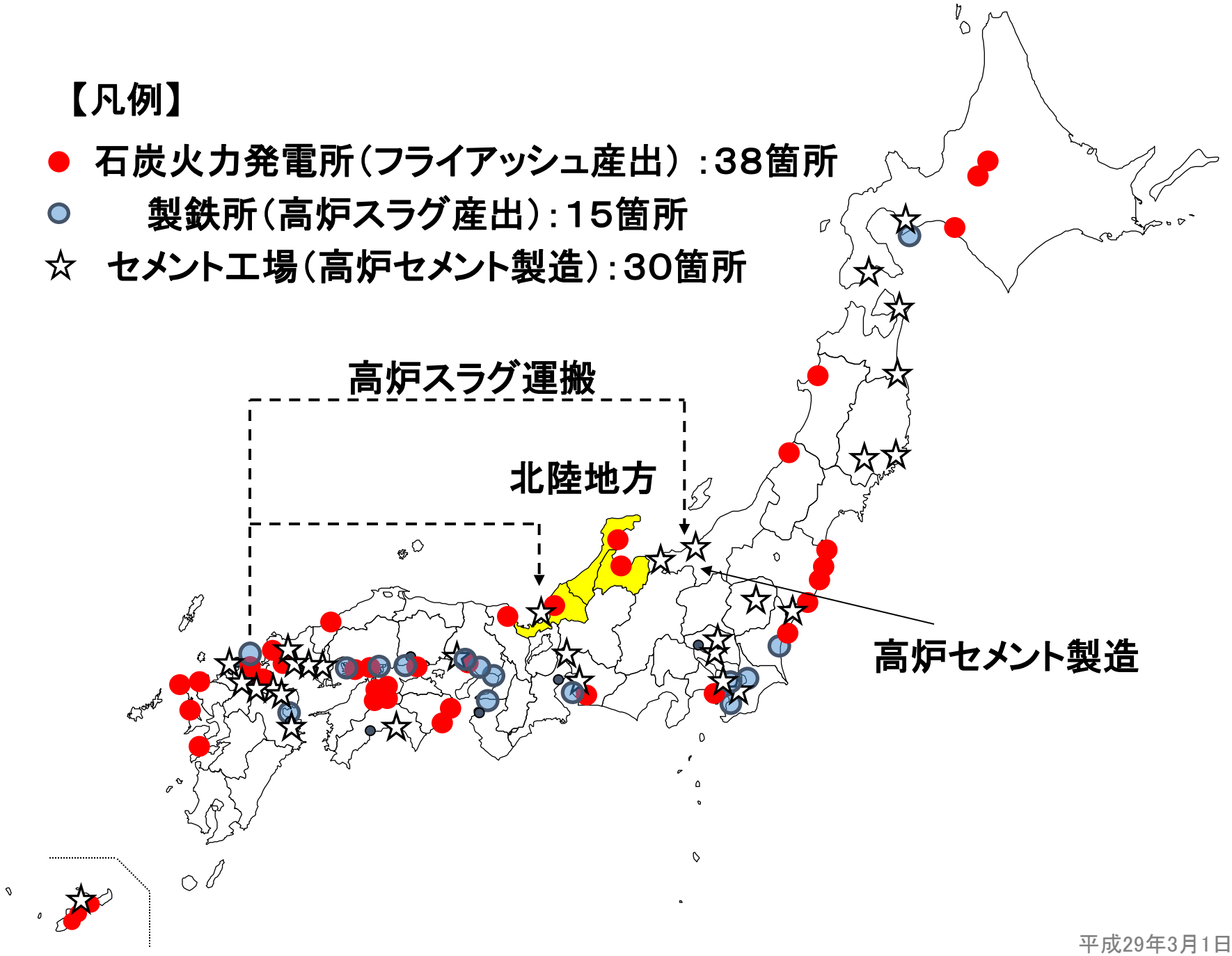
標準養生　　：JIS A 1146（温度40℃・湿度100%）
飽和NaCl養生：飽和NaCl溶液浸漬養生（温度50℃）

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工事仕様書への取り込み（平成29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）



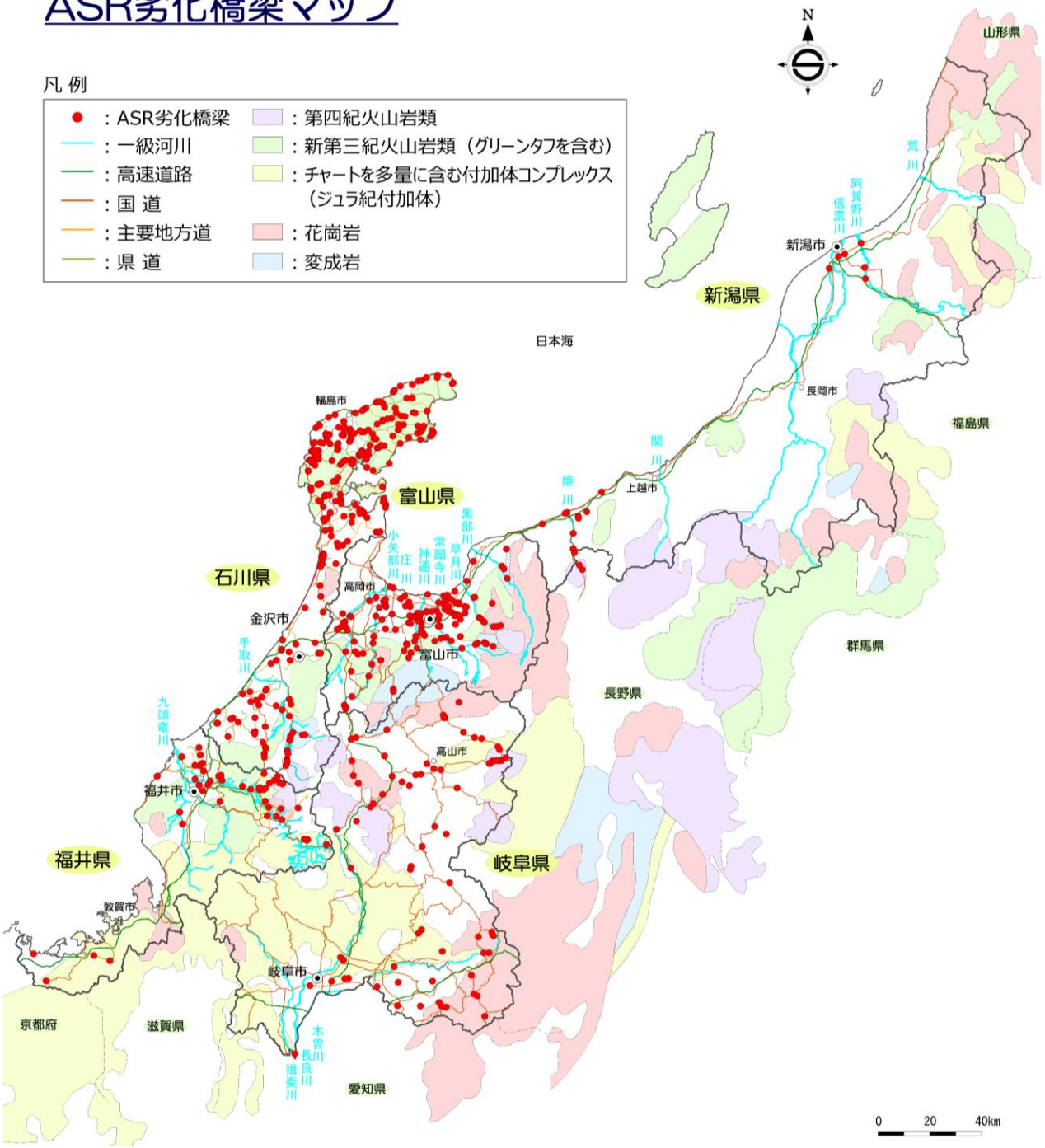
平成29年3月1日作成

フライアッシュコンクリートの需要創出とJIS認証工場の拡大

注）数量(m³)は、コンクリート数量を示す

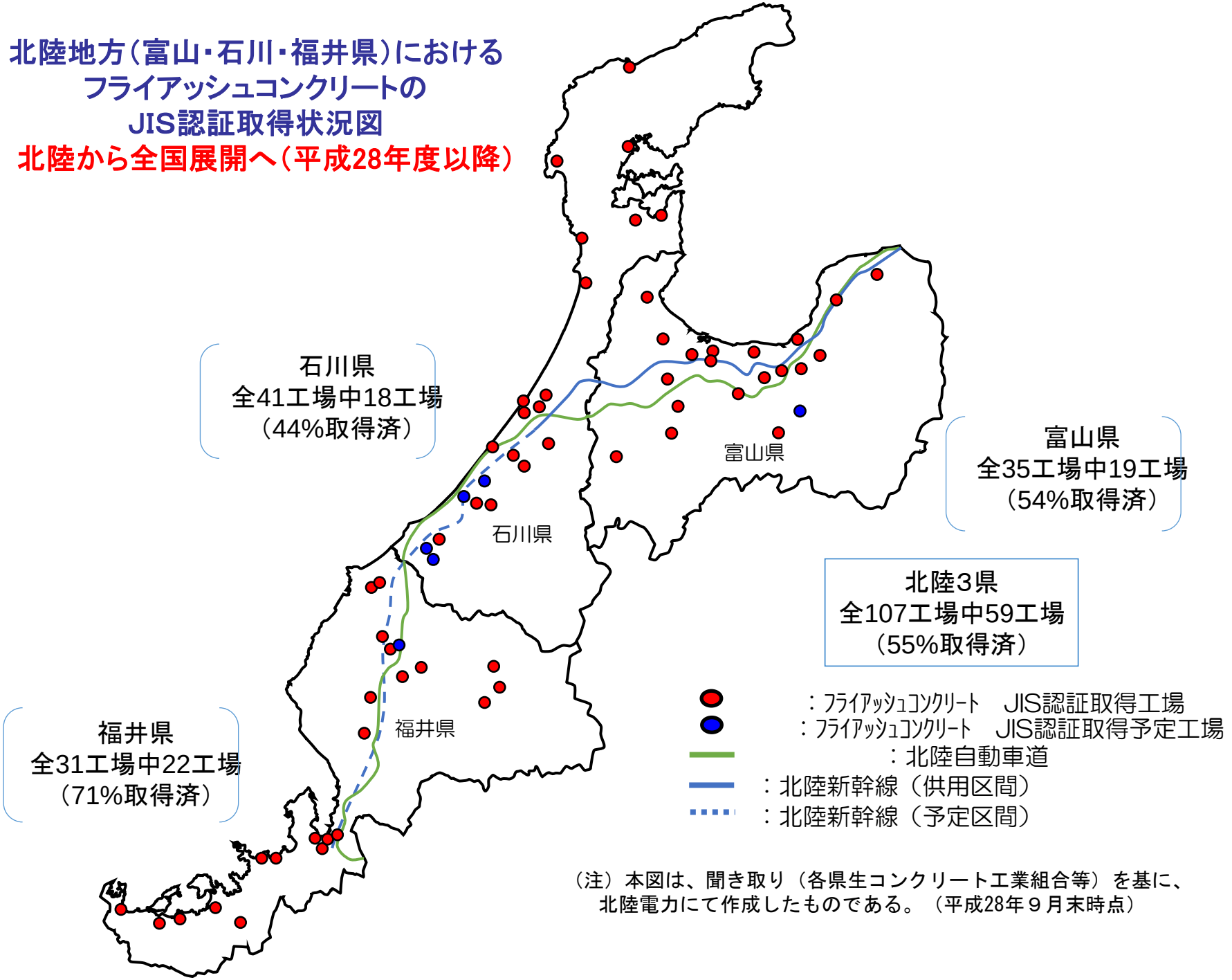
		～平成23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度（計画）	平成29年度以降
委員会等の開催		第1回 第2回	第3回 第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回▽(1回/年の頻度)
公共工事	富山県工事	試験施工（約30m³）	モデル工事（約340m³）	モデル工事（約1,440m³）	（継続）モデル工事（約723m³）	（継続）モデル工事（約1,612m³）	（継続）モデル工事（約6,378m³）	公共工事等での標準使用
	石川県工事	試験施工（約28m³）	モデル工事（約3,800m³）	モデル工事（約2,030m³）	（モデル地区化）モデル地区（約2,800m³）モデル工事（約5,406m³）	（モデル地区化）モデル地区（約2,800m³）モデル工事（約9,710m³）	（モデル地区化）モデル地区（約2,800m³）モデル工事（約10,591m³）	
	福井県工事	―	試験施工（約16m³）	モデル工事（約820m³）	（推進地区化）モデル工事（約5,759m³）	（推進地区化）モデル工事（約20,314m³）	（推進地区化）モデル工事（約8,423m³）	
	国交省工事	―	試験施工（約242m³）	モデル工事（約710m³）	（継続）モデル工事（約339m³）	（継続）モデル工事（約726m³）	（継続）モデル工事（約726m³）	
フライアッシュコンクリートの需要		約58m³	約4,398m³	約5,000m³	約15,027m³	約35,162m³	約26,118m³＋施工者提案	（需要の拡大・定着）
JIS認証工場数の拡大（富山県：全35工場、石川県：全41工場、福井県：全29工場）		富山：3工場 石川：2工場	富山：16工場 石川： 7工場 福井： 4工場	富山：17工場 石川： 7工場 福井： 7工場	富山：17工場 石川：10工場 福井：11工場	富山：17工場 石川：17工場 福井：14工場	富山：18工場 石川：22工場 福井：22工場	（JIS工場の拡大・定着）

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
新潟市
荒川
阿賀野川
信濃川
日本海
長岡市
福島県
関川
姫川
上越市
富山県
黒部川
早月川
常願寺川
神通川
小矢部川
庄川
石川県
高岡市
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

北陸から全国展開へ（平成28年度以降）



（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）

フライアッシュコンクリートの地域での社会実装

①宮坂橋歩道橋（石川県：橋長22.7m，七尾大田石炭火力フライアッシュ)

平成28年5月　プレストレストコンクリート工学会論文賞受賞

②大月橋（福井県：橋長12m，敦賀石炭火力フライアッシュ）

平成28年7月完成　福井県発注工事での設計変更

③日野川橋（北陸自動車道）のRC床版取替え（平成28年10月）

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

北陸中日新聞　H29.8.14掲載

北陸中日新聞　2017年（平成29年）8月14日（月曜日）　©中日新聞北陸本社2017　（日刊）

北陸中日新聞

中日新聞北陸本社
金沢市鞍西本町2丁目12番30号
〒920-8570　電話 076（261）3111

延伸にコンクリ新手法

細かな灰使用 構造物の劣化防止

通常のコンクリ ひび多数

新しい手法は劣化激減

北陸新幹線の敦賀延伸に伴う橋りょうなどの工事に、構造物を劣化させるアルカリ骨材反応を防ぐ新手法を使ったコンクリートが採用される見通しとなった。鉄道建設・運輸施設整備支援機構（横浜市）は既に石川県内で試験施工しており、将来的にすべての整備新幹線の工事で使われる可能性がある。新手法を考案した金沢大の研究者は「適切に維持・管理すれば、百年は劣化に耐えられる」と説明する。（沢井秀和）

鉄道運輸機構 県内で試工

北陸地方では、この反応を起こしやすい安山岩の砂利を多く使う上、海岸沿いでは塩害もあり、国や自治体が建てた構造物には強度や耐久性の不足が指摘されているものもある。金大などは、二〇一五年三月に開業した北陸新幹線の富山県内の構造物でひび割れを確認している。

新しい手法は、石炭の燃焼時に出る細かな粒子の灰を使ってコンクリートを造る。コンクリート内のアルカリ性水溶液が灰の水和物に取り込まれて固まるため、アルカリ骨材反応が起きにくい。飛散する灰を用いるという意味で「フライアッシュコンクリート」と呼ばれている。

鉄道・運輸機構は今年三月、土木工事のあり方を定めた「標準示方書」にフライアッシュコンクリートの標準配合を初めて明示。北陸地方のアルカリ骨材反応の抑制対策として明確に打ち出した。機構は「北陸ではフライアッシュの適用が推進されていたため」と理由を説明する。

これまではアルカリ骨材反応はアルカリ量の制限で対応してきた。石川県能美市西任田工区の高架橋で既に試験施工しており、その評価を踏まえ本格採用の道が開かれる見通しだ。

こうした動きは、北陸電力が石川県七尾市と福井県敦賀市の火力発電所で石炭を燃焼した際に発生する粒の細かい灰を集じん機で採取する態勢を整えたことも追い風になっている。

セットは西へ
北陸新幹線 延伸に向けて

建設が進む北陸新幹線の構造物。新手法による試験施工がされている＝石川県能美市西任田町で

⑥反応性骨材とフライアッシュを入れたコンクリート。1年半、野外にさらしてもひび割れは限定的だった　⑦反応性骨材を入れたコンクリート。フライアッシュはなし。1年半、野外にさらすと、多くのひび割れが見られた。これに雨水がしみこみ、膨張、ひび割れを繰り返し劣化。中の鋼材が切れれば、構造物の変形、破壊につながる＝いずれも金沢市角間町の金沢大で（金大提供）

アルカリ骨材反応　コンクリートがひび割れし、そこに雨水が入り、膨張、ひび割れを繰り返し、構造物を変形、崩壊させる。コンクリートに含まれるアルカリ性の水溶液が骨材である砂利や砂の成分と反応し、膨張するのが原因。

考案の金沢大教授 研究30年

新手法によるコンクリートが「国家プロジェクト」に採用される方向となり、三十年にわたり研究してきた金沢大の鳥居和之教授（ボ）は感慨ひとしおだ。

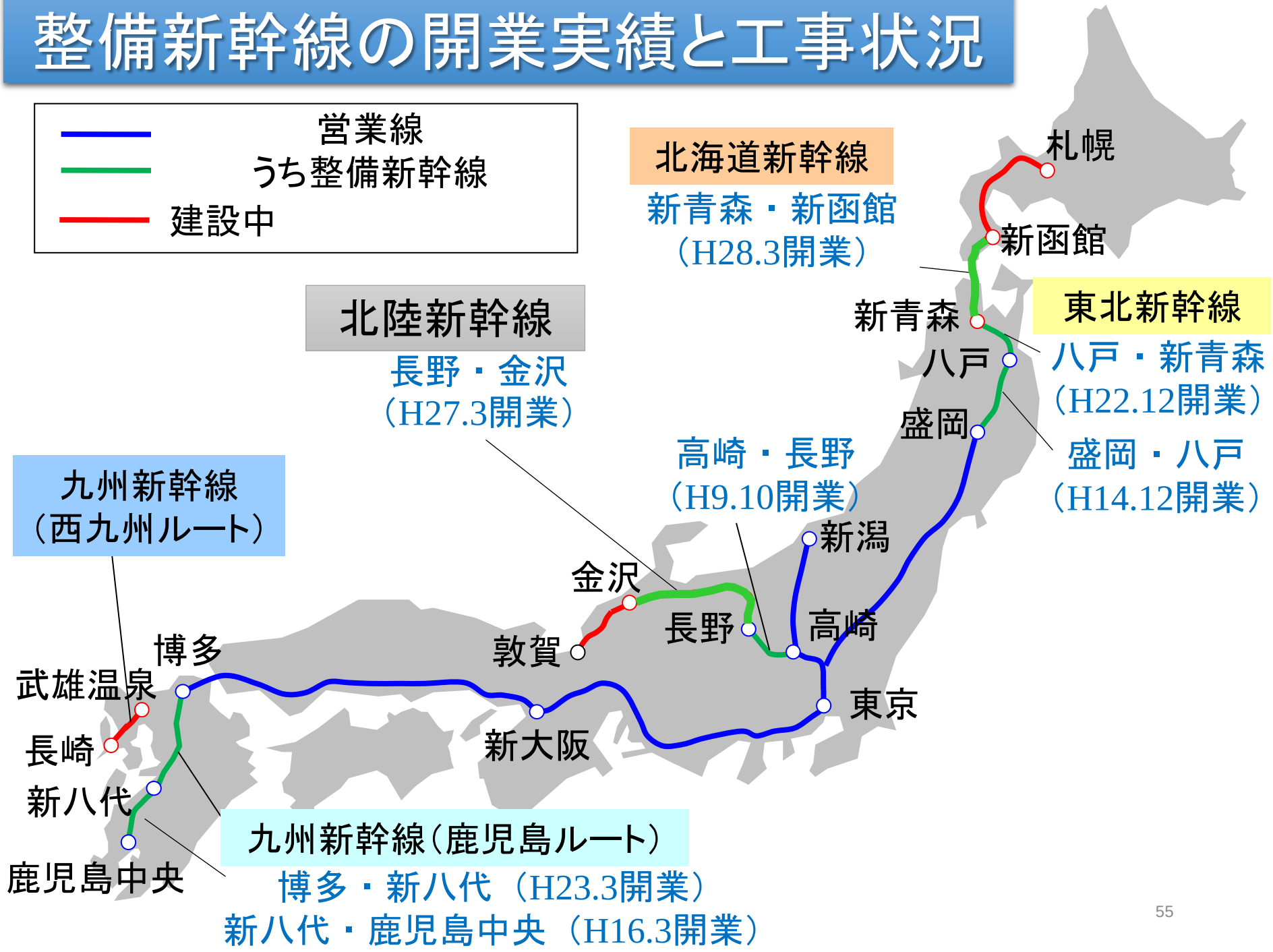
北陸では、アルカリ骨材反応で劣化が進み、二十～三十年後にはコンクリートの中の鋼材が切れて強度が保てなくなると推定される構造物がある。これらの現状を指摘し、訴え続けてきた。

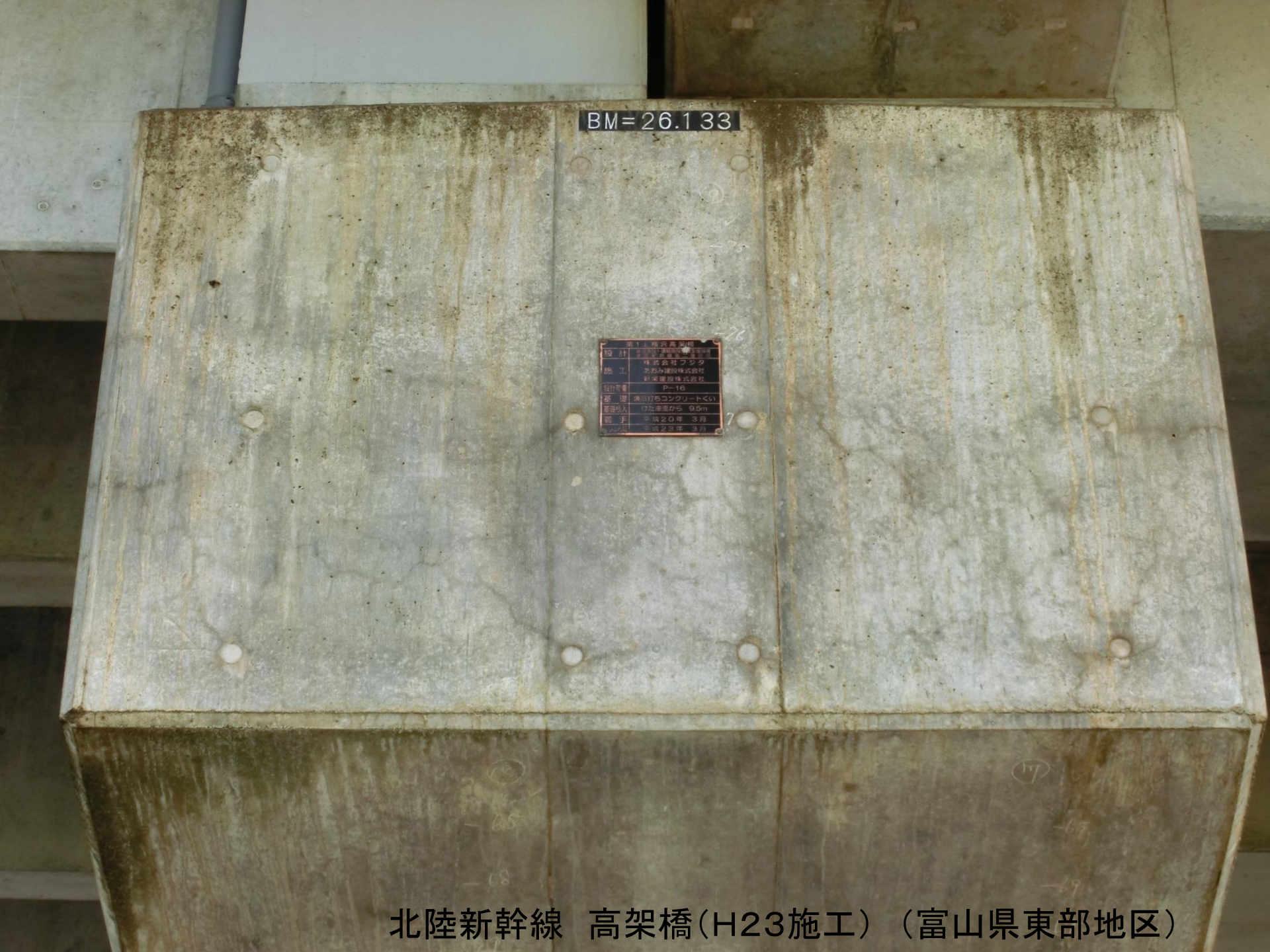
節目となったのは十年前の能登半島地震の復興工事でかかわった能登有料道路（現のと里山海道）の補修。問題の深刻さと対策の必要性を浮き彫りにした。国、自治体や民間の土木技術者らを巻き込んだ研究会を組織し活動を続けてきた。

三年前には、金大をはじめ、金沢工業大や石川工業高等専門学校、長岡技術科学大（新潟県）、福井大の研究者らで構成し、鳥居教授を責任者とするグループの研究が、国の「戦略的イノベーション創造プログラム」に採択された。三億五千万円の国費が投じられ、五年計画で実証試験を重ねている。

鳥居教授は「北陸では財源、人材、技術力が不足する中、いかにインフラを維持、管理することが喫緊の課題。だからこそ産学官が一体になって新しい技術を開発できる。一つのモデルケースになればうれしい」と話している。

整備新幹線の開業実績と工事状況





北陸新幹線　高架橋（H23施工）（富山県東部地区）

北陸新幹線の金沢･敦賀間のコンクリートの配合条件表（土木工事標準示方書）（H29.3）

配合条件表は普通（N)、高炉(BB)、フライアッシュ(FB)の3種類を並列併記

（注）1.水結合材比53％で呼び強度が27以上となる地域(寒冷地)に適用する。

2.この表は、北陸新幹線、金沢･敦賀間の設計条件における標準値であるので、構造物の重要度、気象および地域の条件等に応じて、適宜修正して用いるものとする。

種別	構造物種別	設計基準強度（呼び強度）（N／mm²）	部材名称	粗骨材の最大寸法（mm）	スランプの範囲（cm）	寒冷地用 空気量の範囲（%）	寒冷地用 示方配合に示す最大水結合材比（%） 普通	高炉	FA※	示方配合に示す単位水量の上限値（kg／m³）	備　考 ※FAのセメント置換率は内割15～17%を標準とする
鉄筋コンクリート	ラーメン高架橋										
	ラーメン高架橋	27（27）	スラブ、上層梁、柱、中層梁	25	12±2.5	5.5±1.5	53	☆45	☆50	175	
			地中梁			4.5±1.5	55	◎☆55	◎☆55	175	
			フーチング	40	8±2.5		55	◎☆55	◎☆55	165	1柱1基礎形式は地中梁扱い
	桁関係										
	RC桁	27(27)		25	12±2.5	5.5±1.5	53	☆45	☆50	175	
	合成桁･SRC桁	27(27) 30(30) 36(36) 40(40)					53	＊	＊		＊高炉セメント及びフライアッシュセメントは別途検討を要する。
	橋　脚･橋　台										
	一般的な橋脚･橋台	27(27)	く体	25	8±2.5	5.5±1.5	53	☆45	☆50	175	

（本表は全体の一部を紹介）

「ASR問題の解決のために今、何をすべきか」

北陸地方（全国共通）においては、

ASR発生リスク低減のため、

フライアッシュの標準化（実際に使っていくこと）が必要（当然）

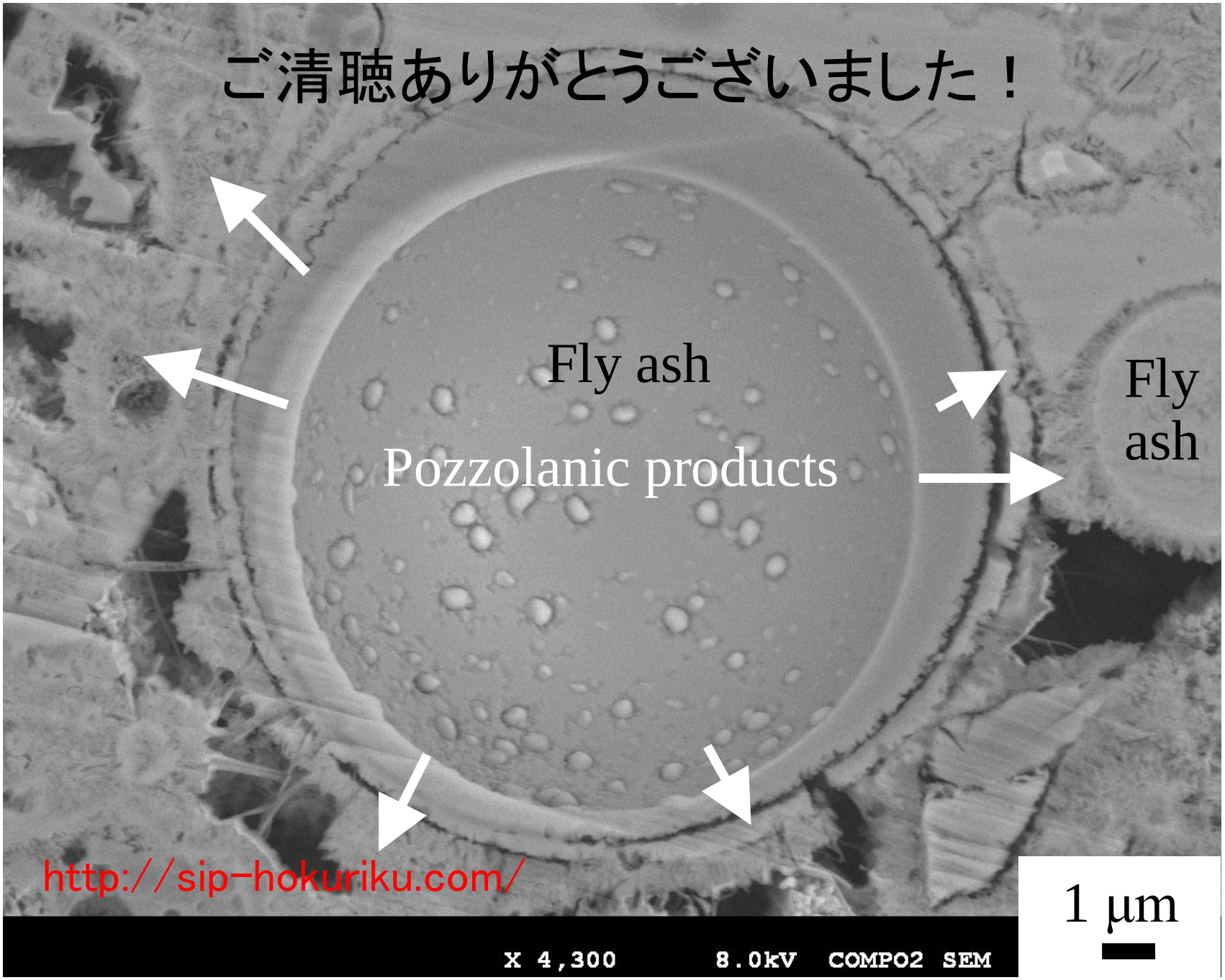
そのためには，フライアッシュを使うことができる**仕組み作り**が重要

（1）フライアッシュ産出事業者である電力会社のフライアッシュ供給体制と品質保証の確立

（2）コンクリートを製造するコンクリート工場のサイロ，計量設備等の増設や整備とフライアッシュコンクリートの配合設計

（3）発注者が設計に積極的にフライアッシュの使用を推進すること

⇒ **関係者間での連携、ルール作りが必要**


ご清聴ありがとうございました！
Fly ash
Pozzolanic products
Fly ash
http://sip-hokuriku.com/
X 4,300 8.0kV COMPO2 SEM
1 μm

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）
インフラ維持管理・更新・マネジメント技術

採択課題の概要

コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発

研究開発責任者：鳥居和之
（金沢大学　理工研究域）
研究開発グループ　　：金沢大学
共同研究グループ（1）：金沢工業大学
共同研究グループ（2）：石川工業高等専門学校
共同研究グループ（3）：長岡技術科学大学
共同研究グループ（4）：福井大学
共同研究グループ（5）：富山県立大学（H29.4）

コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発

塩害劣化

ASR劣化

塩害およびASR
劣化機構の解明

メンテナンスマネジメントシステム

塩害，ASR対策

チタンワイヤセンサーによる点検

劣化模擬したPC試験桁

北陸から全国へ技術情報を発信

塩害対策
電気防食

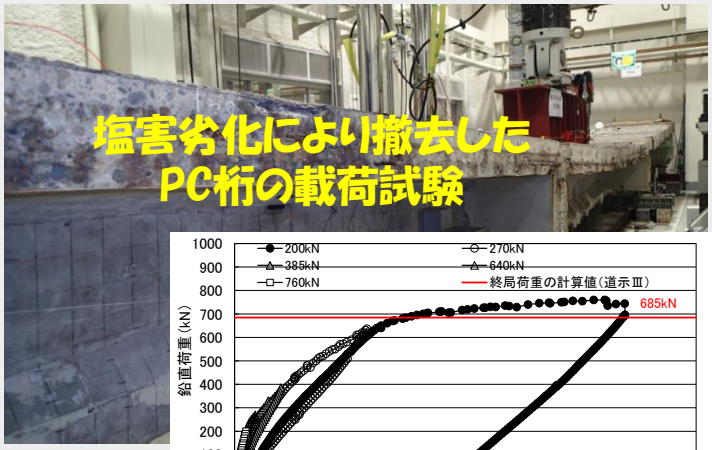
塩害・ASR対策
フライアッシュコンクリートPCa・PC床版

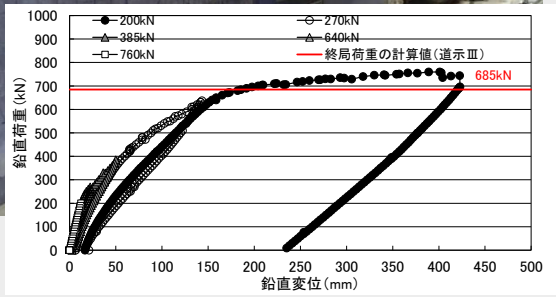
長期モニタリング

フライアッシュ（地産地消）

金沢大学SIP 全体概要
進捗状況 ①

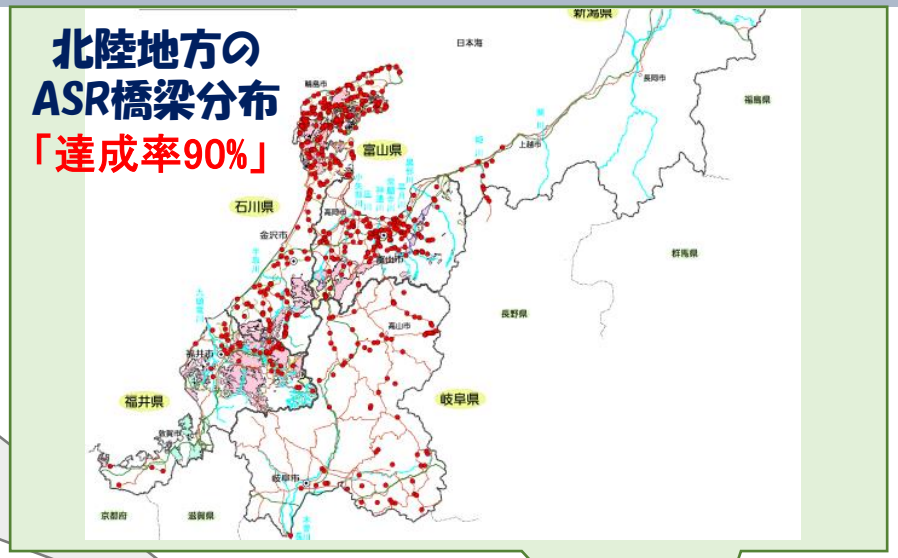
塩害劣化機構の解明 「達成率90%」

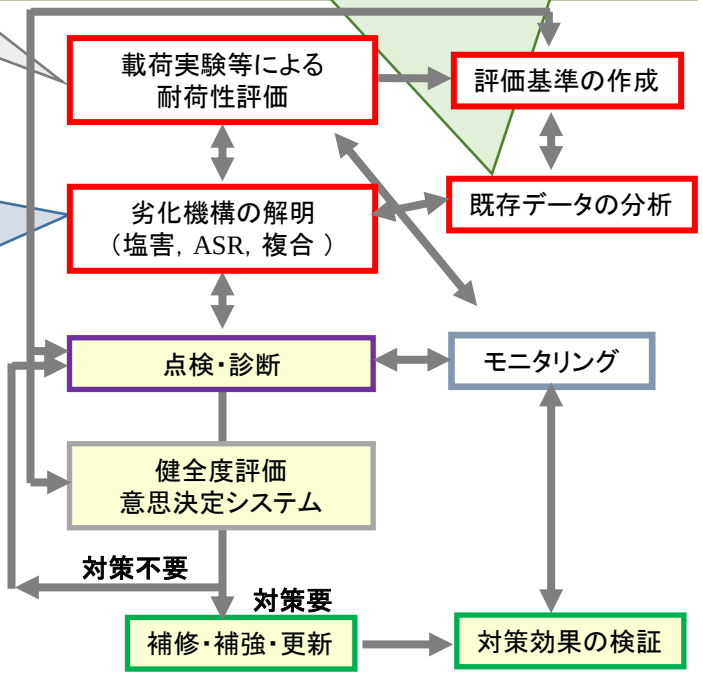




ASR劣化機構の解明 「達成率90%」

北陸地方のASR橋梁分布 「達成率90%」



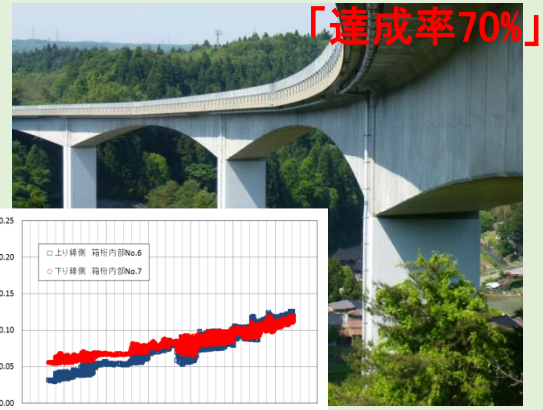


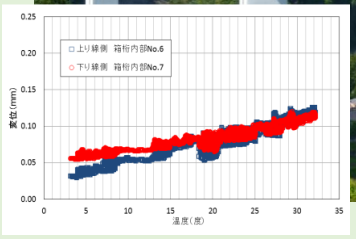
金沢大学SIP 全体概要
進捗状況 ②

早期劣化を生じた床版の現況把握と健全度評価
「達成率80%」

北陸3県の橋梁における維持管理計画の現状把握
「達成率70%」

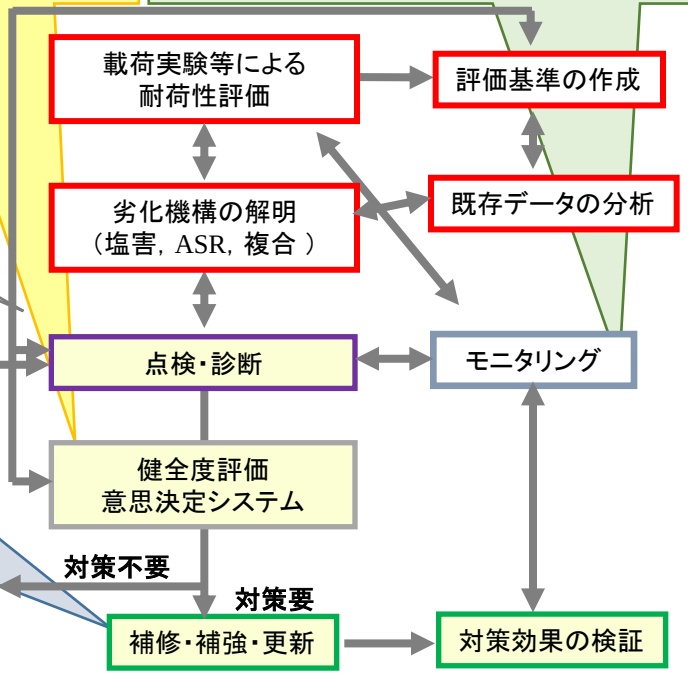
長期モニタリングと数値解析による早期劣化橋梁の健全度評価
「達成率70%」





早期劣化を生じた下部構造の現況把握と健全度評価
「達成率90%」

ASR劣化を生じた下部構造の補修方法の検討



金沢大学SIP 全体概要
全体スケルトン

ホームページによる技術情報の公開

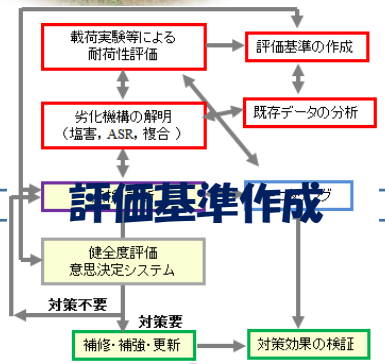
http://sip-hokuriku.com

技術者の育成

産学官民連携

早期劣化機構の解明

正確な診断技術の構築



メンテナンス マネジメント システム提案

維持管理 マニュアル刊行

調査診断

チタンワイヤ
センサーによる
点検簡易化
コスト縮減

加速期

塩害対策
電気防食技術の
適用拡大

劣化期

フライアッシュの有効利用
地産地消

塩害・ASR対策としての
フライアッシュコンクリートを用いた
高耐久プレキャストPC床版による更新

北陸3県コンクリート診断士会との連携による北陸地方と同様な問題を抱えている地域へ展開

金沢大学SIP地域実装支援の構成

1．各市町の地域実装に向けた支援活動報告

②市町への地域実装支援

2．コンクリート診断士会との連携による人材育成支援活動
3．石川県内の橋梁に対する維持管理計画への実装
4．道路管理者と連携した橋梁モニタリングの地域実装

5．地域実装における出口戦略

①新技術の地域実装

1．流電陽極方式，電気防食工法の地方道路橋への地域実装
2．衝撃診断法による早期劣化した地方道路橋床版の劣化度評価と補強方法の検討
3．早期劣化した橋梁に対する補修工法の地域展開
4．塩害劣化させたPC試験桁の長期モニタリングと載荷試験の概要

③関係自治体からの報告
富山市・富山県・石川県・福井県としての新技術導入への意向・見解およびSIP技術評価

5．JCI研究委員会によるSIP研究成果に基づく全国展開 ⇐ H29～30年度の発信