

# コンクリート構造物の ASR 診断方法に関する評価

## Evaluation on ASR diagnostic method for concrete structures

三菱総合研究所	江藤 淳二	Junji ETOH	Member
東北大学	五十嵐 豪	Go IGARASHI	NON - Member
太平洋コンサルタント	小川 彰一	Shoichi OGAWA	NON - Member
太平洋コンサルタント	渋谷 和俊	Kazutoshi SHIBUYA	NON - Member
名古屋大学	丸山 一平	Ippeï MARUYAMA	NON - Member
国立環境研究所	山田 一夫	Kazuo YAMADA	NON - Member
三菱総合研究所	滝沢 真之	Masayuki TAKIZAWA	Member

### Abstract

Recently, many concrete structures such as bridge piers of the highway, damaged by Alkali Silica Reaction (ASR) have been observed in Japan. From this background, based on the latest knowledge of domestic and international, the ASR diagnostic method that emphasizes the petrological examination after the core sampling was proposed on Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES) report.

In this research, in order to confirm the effectiveness of ASR diagnostic method for concrete structures proposed in JNES report, various petrological examinations were performed on core samples collected from concrete specimens with different degradation progress phases, and the ASR diagnostic method was evaluated .

**Keywords:** ASR, Concrete core, Aggregate, Diagnostic method , Aging management

## 1. 諸言

これまで日本ではアルカリ骨材反応 (ASR) によって劣化を生じた構造物の事例は、急速膨張性を示す骨材によるものが多数報告されてきたが、近年では遅延膨張性骨材<sup>1)</sup> (10 数年以上経過してからコンクリートにひび割れを生じる。) による劣化事例が報告されている<sup>2),3)</sup>。

このような背景のもと、旧独立行政法人原子力安全基盤機構 (旧 JNES) が、RE レポート (以下、JNES レポート) として、国内外の最新知見に基づき、コア試料採取後の岩石学的試験を重視したコンクリート中に生じた ASR の診断方法を提案している<sup>4)</sup>。Fig.1 に提案されているコンクリート構造物の ASR 診断フローを示す。本診断フローでは、日常点検によるひび割れ等の外観の変状を検出、既存記録の調査、現地調査と進み、ASR が疑われるような部材であれば、環境及び変形のモニタリングを行い、その結果に応じてコンクリートコアを採取し、各種岩石学的評価を行うことが提案されている。

そこで、本研究では、各種岩石学的評価の適用性検証を目的として、劣化進行段階の異なる各種の供試体より

採取したコアサンプルを対象に各種試験結果の比較を行い、ASR 診断方法を評価した。具体的には、劣化進行段階の異なる各種の供試体に対して、コアの外観観察 (可視光観察、実体顕微鏡観察、ASR 蛍光試薬を用いた観察 (蛍光法)、コンクリート薄片観察 (フィルムスキャナによる写真撮影、偏光顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡観察 (SEM) 等) を実施し、提案されている ASR 診断方法を評価した。

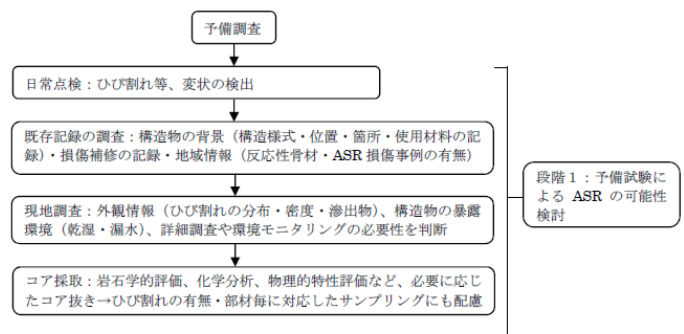


Fig.1 ASR diagnostic method for concrete structures (proposal)<sup>4)</sup>

## 2. 試験体作製

各種岩石学的評価に用いるコアを採取し、ASR 反応性評価において必要な試験体の基礎データを取得するために、アルカリ量、促進程度（促進養生温度、あるいは促進材齢）が異なるコンクリート試験体（RILEMAAR-3 または AAR-4 に準じた方法で作製した試験体）を作製し、この試験体からコアを採取して外観観察及び岩石学的評価を実施した。反応性粗骨材には骨材 TO（急速膨張性骨材）及び骨材 WI（遅延膨張性骨材）を、非反応性粗骨材及び細骨材には骨材 IO（石灰石骨材）を用い、普通ポルトランドセメントを使用した。Table 1 にコンクリートの調合を示す。また、ASR による劣化進行段階は、試験体の膨張率と膨張が飽和に達する期間（養生を継続しても膨張が大きく継続しない材齢）等を考慮して設定した。設定した劣化進行段階を Table 2 に示す。

基礎データとして、コアを採取するコンクリート試験体の膨張率変化を測定した。作製した試験体の膨張率の測定結果を Fig.2 に示す。コア採取は、Table 2 で設定した劣化進行段階に達した状態で実施した。

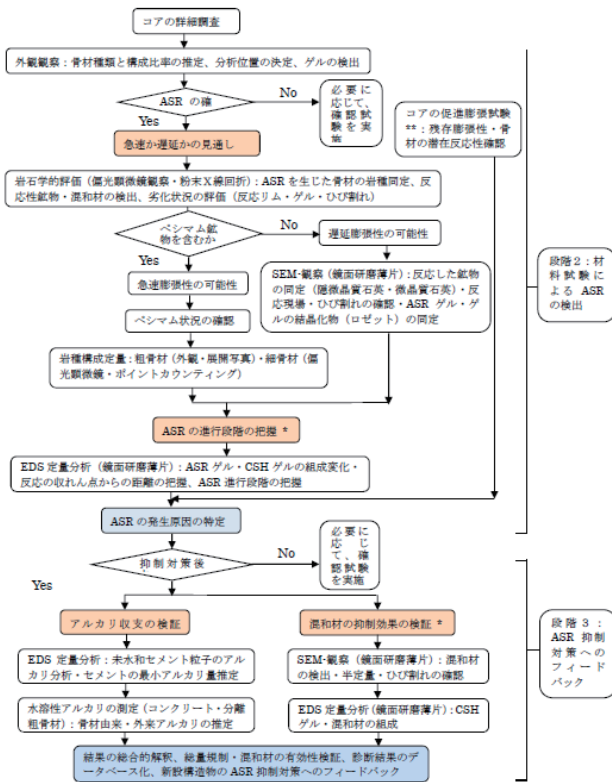


Fig.1 (continued) ASR diagnostic method for concrete structures (proposal) 4)

Table 1 Mix proportion of concrete

骨材種類	7mm 総量 (kg/m <sup>3</sup> )	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤			
				水 (W)	結合材 (B)		粗骨材		AE 減水剤 (B×%) <sup>※1</sup>	AE 調整剤 (B×%) <sup>※2</sup>	NaOH 水溶液 <sup>※3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	
					セメント	フライアッシュ	(非反応性)	反応性骨材				非反応性骨材
骨材 TO (急速)	3.0	50	45	160	320	—	821	309	724	1.45	0.1	8.00
	5.5				320	—	821	309	724		0.1	24.1
	3.0				272	48	814	308	718		—	4.59
	5.5				272	48	814	308	718		—	20.7
骨材 WI (遅延)	4.25				320	—	821	1007	—		—	16.1
	5.5				320	—	821	1007	—		—	24.1
骨材 IO (非反応性)	5.5							320	—		821	—

注記) ※1: AE 減水剤は、4 倍希釈液としての添加率を表示  
 ※2: AE 調整剤は、100 倍希釈液としての添加率を表示  
 ※3: 5N の水酸化ナトリウム水溶液を使用

Table 2 Degradation progress phases

劣化進行段階	設定条件
初期	ASR 反応が進んでいない状態 ・ある程度の強度発現がないとコアを採取できないため、成形直後ではなく、20℃で2週間養生後とした。
中期	ASR 反応がある程度進行した状態 ・膨張率が 0.1% 強度に達した状態（後期の約 1/2 の膨張率）。
後期	ASR 反応が収束した状態 ・膨張が 0.2~0.3%（中期の約 2 倍）に達した状態（膨張が飽和に達する期間）。

コアを採取した時の膨張率のプロットは、大きいサイズで表示している。凡例の（）内は、(使用骨材(骨材 TO の場合は省略)又はフライアッシュの有無)-アルカリ量 (30, 55)-養生温度-劣化進行段階(m, l)を表す。

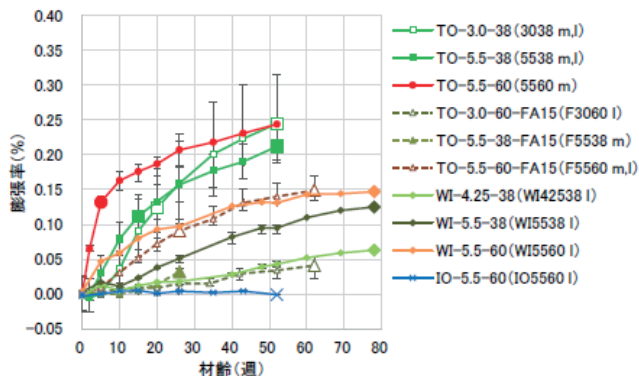


Fig.2 Measurement results of ASR expansion of the prepared concrete specimen

### 3. 試験結果

#### 3.1 外観観察

##### 3.1.1 可視光源下の展開写真

採取直後のコア表面が乾かないうちに水膜ができるように十分な水で濡らした状態で市販のポリ塩化ビニリデン (PVDC) 製ラップで包み、その上から湿布で包んだ状態で1週間以上経過した後、コンクリートコアを開封し外観観察を行った。可視光源下で撮影した画像から作成した展開写真例を図4.9に、観察結果のまとめをTable3に示す。図4.9に示されるように、中期から後期にかけて反応性骨材に反応リムが生じ、コア側面全体を白色のASGが覆っている様子が確認されたことから、ASR診断への有効性があると判断できる。

Table 3 Summary of observation results

コア水準名。	観察結果。
初期。	5538i。反応リム。
中期。	5538m。反応リム、全面を覆う透明または白いゲル。
	3038m。反応リム、全面を覆う透明または白いゲル。
	5560m。反応リム、全面を覆う透明または白いゲル。
	F5538m。反応リム。
	F5560m。反応リム。
後期。	5538l。反応リム、全面を覆う透明または白いゲル。
	3038l。反応リム、全面を覆う透明または白いゲル。
	F3060l。反応リム、全面を覆う透明または白いゲル。
	F5560l。反応リム、全面を覆う透明または白いゲル。
	WI42538l。反応リム、全面を覆う透明または白いゲル。
	WI5538l。反応リム、全面を覆う透明または白いゲル。
	WI5560l。反応リム、全面を覆う透明または白いゲル。
	IO5560l。反応リム、全面を覆う透明または白いゲル。

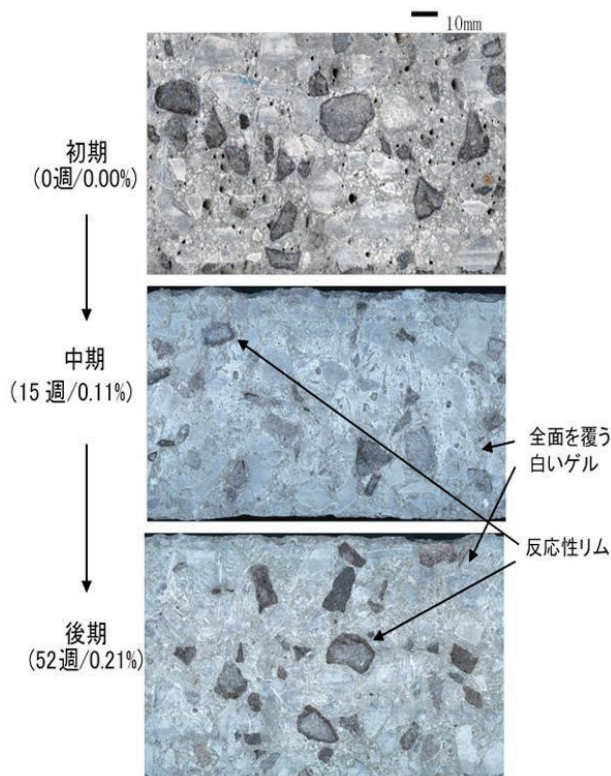


Fig.3 Example of observation results of concrete core samples (5538, 75 mm×141 mm)

##### 3.1.2 実体顕微鏡観察

コンクリートコア側面の観察を行った後、小割切断機で半分に油式切断し、アセトンで切削油を洗い流し、1日程度放置した後、実体顕微鏡観察を行った。Fig4の左側に実体顕微鏡による撮影画像例を示す。なお、右側には左側の撮影画像に用いた同一切断面のマクロ写真を示す。反応性骨材のASGの滲み出し、反応リム、ひび割れといった様子が確認されたことから、ASR診断への有効性があると判断できる。

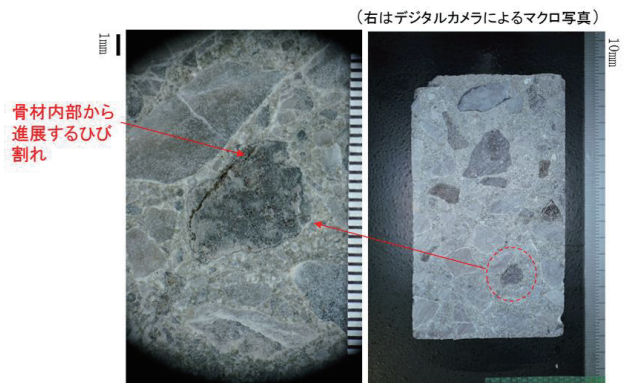


Fig.4 Example of cutting surface observation results of concrete core samples by stereoscopic microscope (3038l)

### 3.1.3 UV 光源下での展開写真（蛍光法）

蛍光発色試薬により、アルカリシリカゲル（ASG）は短波長 UV 光下で緑色に蛍光反応を示す。そのため、ASG を容易に観察でき、コアの外観観察の段階における ASG の検出に有効と考え、蛍光法を実施した。コンクリートコア側面の可視光での観察を行った後、前処理として、蛍光発色試薬（ファースト社製）を塗布し、ポリエチレンフィルムで包んだ状態で 30 分以上経過した後に、フィルムを取り外し表面の余剰な試薬を乾燥させた。照明には、短波長（254nm）UV ランプ（アズワン、SUV-16×2 台）、カメラには、デジタル一眼カメラ（SONY、α 7R II、4240 万画素、35mm フルサイズ CMOS センサー、E30mm F3.5 マクロレンズ）を用いた。短波長（254nm）UV 光源下で撮影した画像から作成した展開写真例を Fig.5 に、観察結果のまとめを Table 4 に示す。可視光による外観観察と比較してコア側面全体を ASG が覆っている様子が明確に確認されたことから、可視光源下での展開写真に加えて蛍光法を実施することで ASR 診断への有効性があると判断できる。

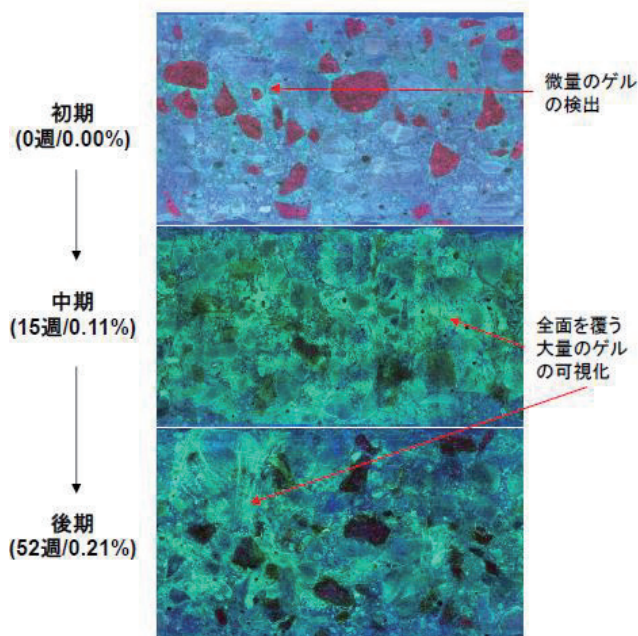


Fig.5 Example of observation results of concrete core samples by fluorescence method (5538, 75 mm×141 mm)

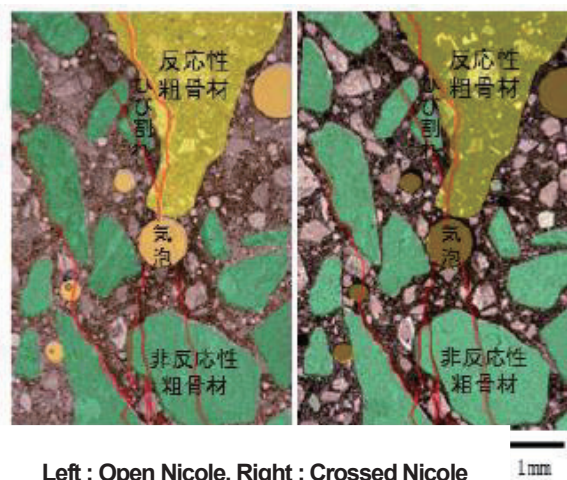
Table 4 Summary of observation results (fluorescence method)

コア水準名	観察結果	
初期	5538i	微量の緑色蛍光のゲル。
中期	5538m	全面を覆う緑色蛍光のゲル。
	3038m	全面を覆う緑色蛍光のゲル。
	5560m	全面を覆う緑色蛍光のゲル。
	F5538m	少量の緑色蛍光のゲル。
後期	F5560m	少量の緑色蛍光のゲル。
	5538l	全面を覆う緑色蛍光のゲル。
	3038l	全面を覆う緑色蛍光のゲル。
	F3060l	全面を覆う緑色蛍光のゲル。
	F5560l	全面を覆う緑色蛍光のゲル。
	WI42538l	全面を覆う緑色蛍光のゲル。
	WI5538l	全面を覆う緑色蛍光のゲル。
WI5560l	全面を覆う緑色蛍光のゲル。	
	I05560l	—

## 3.2 岩石学的評価

### 3.2.1 コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察

コンクリート薄片の偏光顕微鏡写真例を Fig.6 に示し、各劣化進行段階における偏光顕微鏡写真例を Fig.7 に示す。薄片全体の分布情報（モルタル、反応性粗骨材、非反応性粗骨材、ひび割れ、気泡の位置関係）は限定されるが、粗骨材、細骨材の岩種及び鉱物組成、反応性骨材内や反応性骨材からペーストマトリクスへと延びるひび割れや、ひび割れや気泡を充填する ASG を微細なレベルまで観察可能であることが確認されたことから、ASR 診断への有効性があると判断できる。



Left : Open Nicole, Right : Crossed Nicole

Fig.6 Example of observation results of concrete core samples by polarization microscope

(5538l, ×20, 4.9 mm×7.3 mm)

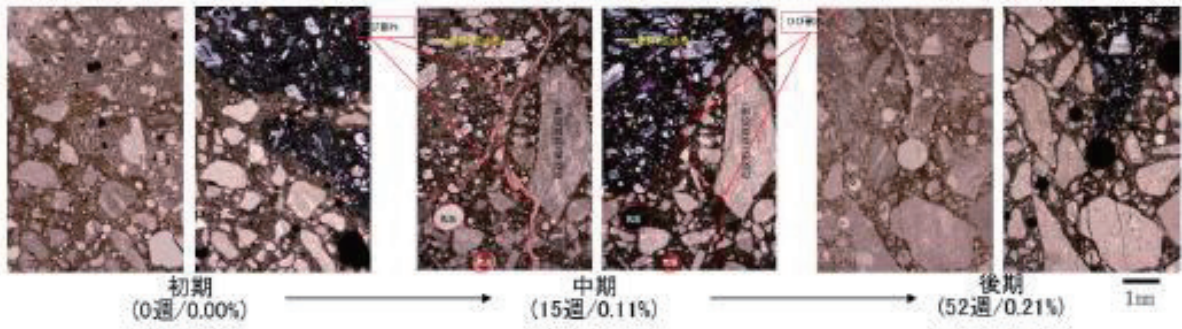


Fig.7 Example of observation results of concrete core samples by polarization microscope at each degradation progress phases (5538)

コンクリート薄片を大山らの報告<sup>9)</sup>を参考にして、市販のフィルムスキャナ (EPSON、GT-X980、最大光学解像度 6,400dpi) を用いて Fig.8 に示すように全景写真を撮影した。また、観察結果のまとめを Table 5 に示す。偏光顕微鏡視野と比較して薄片全体の分布情報 (モルタル、反応性粗骨材、非反応性粗骨材、ひび割れ、気泡の位置関係) を取得可能であり、コアの外観観察と薄片の偏光顕微鏡観察の中間のスケールの情報を補完できる。図に示されるように、粗骨材、細骨材の岩種や、顕著な ASR が生じている場合、フィルムスキャナによって反応性骨材の反応リムに沿った骨材内部のひび割れ、反応性骨材から周囲のセメントペーストマトリクスへと延びるひび割れ、ひび割れや気泡を充填する ASG が観察可能であることが確認されたことから、外観観察及び偏光顕微鏡観察と組み合わせて実施することで ASR 診断への有効性があると判断できる。

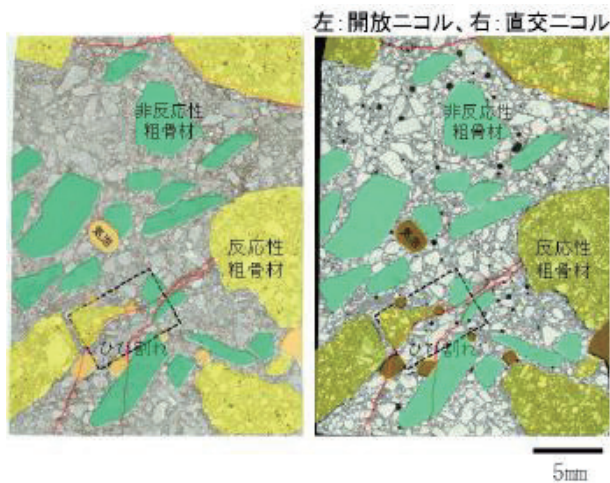


Fig.8 Example of observation results of concrete core samples by film scanner at each degradation progress phases (5538I, 24 mm×32 mm)

Table 5 Summary of observation results (film scanner)

コア水準名	観察結果
初期	5538i ASR の症状確認できず
中期	5538m 太いひび割れ
	3038m 細いひび割れ
	5560m 太いひび割れ
	F5538m 細いひび割れ
	F5560m 細いひび割れ
後期	5538I 太いひび割れ、気泡を埋めるゲル
	3038I 太いひび割れ、気泡を埋めるゲル
	F3060I 細いひび割れ、気泡を埋めるゲル
	F5560I 細いひび割れ、気泡を埋めるゲル
	WI42538I 太いひび割れ、気泡を埋めるゲル
	WI5538I 太いひび割れ、気泡を埋めるゲル
	WI5560I 太いひび割れ、気泡を埋めるゲル
I05560I ASR の症状確認できず。	

### 3.2.3 コンクリート薄片の SEM 観察

SEM 観察には、ショットキー電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) (JEOL、JSM-7001F、加速電圧: 0.5~30kV、倍率: x10~1,000,000、分解能: 1.2nm (30kV)、3.0nm (1 kV)) を使用し、加速電圧: 15.0kV、ワーキングディスタンス 10mm、電流量 1.40nA で観察を行い、コンクリート薄片の SEM 観察から得られた反射電子像 (BEI 像) 写真例を Fig.9 に、SEM 観察結果を Table 6 に示す。図に示されるように、偏光顕微鏡と比較して薄片全体の分布情報 (モルタル、反応性粗骨材、非反応性粗骨材、ひび割れ、気泡の位置関係) は限定されるが、劣化進行段階の違いに応じて、反応性骨材内や反応性骨材からペーストマトリクスへと延びるひび割れや、ひび割れや気泡を充填する ASG をより微細なレベルまで観察可能であることが確認されたことから、ASR 診断への有効性があると判断できる。

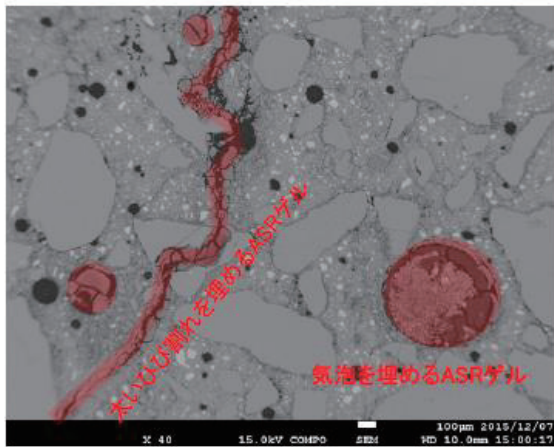


Fig.9 Example of SEM observation results of concrete core samples (5538I, 24 mm×32 mm)

Table 6 Summary of SEM observation results

コア水準名	観察結果
初期	5538I ASRの症状確認できず
	5538m 太いひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	3038m 太いひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
中期	5560m ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	F5538m ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル
	F5560m ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
後期	5538I 太いひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	3038I 太いひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	F3060I ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	F5560I ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	W142538I ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	W15538I ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	W15560I ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	I05560I ASRの症状確認できず。

## 謝辞

本研究は、原子力規制庁「平成28年度原子力施設等防災対策等委託費（高経年化技術評価高度化（アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の長期健全性評価に関する研究）事業）」における成果の一部である。

## 参考文献

- [1] T. Katayama, A review of alkali-aggregate reactions in Asia –Recent topics and future research, S. Nishibayashi, M.Kawamura (ed.), East Asia alkali-aggregate reaction seminar,Tottori, Supplementary Papers, pp. A33-A44, 1997.
- [2] T. Katayama et al., Late-expansive alkali-silica reaction in

## 4. 結論

コンクリートコアの採取によるASR診断方法の検証を目的として、ASR促進試験後の試験体から採取したコンクリートコアを対象に、岩石学的評価の各試験項目を実施した。

コンクリートコアの外観観察（可視光、蛍光法、実体顕微鏡観察）から劣化進行段階に応じたASGを検出できることを確認した。コンクリートコアの可視光による外観観察に加えて、ASG蛍光反応試薬を塗布し、短波長（254nm）UV光の観察を実施することで、コンクリートコアの表面ににじみ出たASGを容易に観察できることを確認した。

コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察及びSEM観察から劣化進行段階に応じたASRによるひび割れ、ASGが観察できることを確認した。コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察に加えて、フィルムスキャナによる写真撮影を実施することで、コンクリートコアの外観観察よりもマイクロ、コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察よりもマクロな中間のスケールの観察が可能になることを確認した。

the Ohnyu and Furikusa headwork structures, Central Japan, Proceeding of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.1086-1094, 2004

- [3] T. Katayama: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.862-873, 2008
- [4] 中野真木郎、原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案、JNES-RE-2013-2050 (2014)
- [5] 大山次男、伊藤嘉紀、北風嵐：“フィルムスキャナによる岩石・鉱物の大型薄片の偏光像観察”，東北アジア研究, 4, pp. 207-211 (2000)