

4 コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する調査研究

4.1 はじめに

4.1.1 骨材の反応性の検証

原子力施設の高経年化技術評価において、鉄筋コンクリートにおけるアルカリ骨材反応（ASR）を主に取り上げる。旧原子力安全基盤機構の報告書（JNES レポート）¹には、骨材のアルカリ反応性試験、構造物の ASR 診断、抑制対策の三つの観点から最新技術が紹介され、今後、検証すべき課題もまとめられている。あらためて表 4.1-1 に課題を示す。ここではまず、高経年化評価における ASR 問題の全体像を考え、さらに実施することが必要と考えられる個別の技術要件について説明する。

表 4.1-1 検証すべき今後の課題¹

検証項目		対象
骨材の ASR 試験フロー	RILEM の試験方法は、日本の遅延膨張性骨材で正しく評価できるか	片麻岩または泥岩（微晶質石英含有）
	RILEM の試験方法は、日本の急速膨張性骨材で、ペシマム配合を正しく検出できるか	安山岩（オパールまたはクリストパライト含有）
	室内の各種促進試験は、屋外曝露コンクリートと比べてどの程度、膨張を促進しているか（促進倍率）	急速膨張性骨材・遅延膨張性骨材
構造物の診断フロー	コンクリートの岩石学的試験（偏光顕微鏡観察・SEM 観察・EDS 分析）で、反応性鉱物の存在と反応が確認できるか	供試体：RILEM AAR-3, RILEM AAR-4, JASS5N T-603 など、ペシマム配合時
	コンクリートの岩石学的試験（偏光顕微鏡観察・SEM 観察・EDS 分析）で、ひび割れ・ゲル・ASR の進展段階が確認できるか	屋外曝露コンクリート試験
抑制対策の選定フロー	JIS 抑制対策の規定にない添加量の場合に、混和材による抑制効果が検証できるか	高炉スラグ・フライアッシュ骨材は火山岩（ペシマム配合）
	JIS 抑制対策の規定にない混和剤を添加した場合に、抑制効果があるか	硝酸リチウムまたは亜硝酸リチウム骨材は火山岩（ペシマム配合）

ASR による劣化の影響を評価する方法は、従来、調査報告書に ASR 対策が取られていることが記載されているかどうか为主体であった。1988 年施行から現在に至るまで ASR 対策は、主に化学法とモルタルバー法による無害骨材の使用、アルカリ総量 3.0kg/m^3 以下、抑制効果のある混和材の利用である。JASS5N に従うとさらに T603 によるコンクリートバー試験がある。この方法論では、無害骨材を用いるか抑制対策が講じられていれば、理論上、ASR は起きえないので、施工時のコンクリートの情報からその後の挙動を予測でき

¹ 中野眞木郎：“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)

る。

ところが最新の研究²では、これらの骨材の試験法は急速膨張性骨材の評価には一定の有効性が認められるものの、遅延膨張性骨材についてはアルカリ反応性を検出できず、かつ、骨材の無害/有害を問わず、アルカリ総量規制を満たし、または抑制効果のある混和材が使用したとしても、ASRは発生する場合があることが分かってきた。

骨材の反応性評価の不備の原因はいくつかがある。JNES レポートにも典型的な事例が示してあるので、表 4.1-2、表 4.1-3 に再掲載し、以下に代表例を挙げる。

- ・ JIS の化学法やモルタルバー法は隠微晶質/微晶質石英による遅延膨張性骨材を検出できない。
- ・ モルタルバー法は反応性が高い骨材による組成ペシマム現象を見落とす。
- ・ T603 のコンクリートバー法は遅延膨張性骨材の検出には判定基準が緩すぎる。

表 4.1-2 ASR を生ずる鉱物とペシマム配合¹

シリカ鉱物	ペシマム配合	火山ガラス	SiO ₂	ペシマム配合
オパール	< 5%	流紋岩質ガラス	>70%	75%(100%**)
クリストバライト	< 10%	デイサイト質ガラス	62-70%	>50%(100%**)
トリディマイト	< 10%	安山岩質ガラス	52-62%	境界線上
カルセドニー	20%	玄武岩質ガラス	<52%	無害
隠微晶質石英*	50%			
微晶質石英*	> 80%			

*遅延膨張性 **ガラス質安山岩として 隠微晶質石英とは、粒径 4 μm 以下の石英である

表 4.1-3 遅延膨張性骨材の岩種とアルカリシリカ反応性試験結果¹

岩種	モルタルバー ASTM C227	化学法 ASTM C289	促進モルタルバー ASTM C1260 CSA A 23.2-25A	コンクリートプリズム CSA A23.2-14A	コンクリートの被害 のある国
脱ガラス化流紋岩 /デイサイト	I	I/D	D	D	Ca, No, Sw, Au
古生代石灰岩	I	I	D	D	Ca, UK, No
砂岩/泥岩	I	I/D	D	D	Ca, UK, SA, Au
粘板岩/千枚岩	I	I/D	D	D	Ca, US, No, Au
コーツァイト/メタコーツァ イト	I	I	D	D	Ca, UK, No, Au
片麻岩/花崗岩/マイロナ イト/カタクレーサイト	I	I	I/D	D	Ca, US, No, In, Br

これらの岩種の遅延膨張性は隠微晶質石英・微晶質石英によって引き起こされる

I: 無害, D: 有害 ASTM: 米国材料試験学会 CSA: カナダ規格協会
Ca: カナダ, No: ノルウェー, Sw: スウェーデン, UK: 英国, US: USA, Au: オーストラリア, In: イ
ンド, Br: ブラジル, SA: 南アフリカ

このような背景から、海外では新しい試験方法と抑制対策が提案されるようになった。

²社団法人日本コンクリート工学協会；“作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書”，pp. 87-96 (2008)

新しい方法については JNES レポートにまとめられている。新しい試験法について代表的なものをまとめる。いずれも、日本の体系では用いられない骨材の岩石学的評価の実施が前提となる。

- ・ 促進モルタルバー試験 (ASTM C1260、RILEM AAR-2) : 80°C 1N-NaOH にモルタルバーを 2 週間浸漬する方法。遅延膨張性骨材を含め、激しい促進条件で膨張反応を速め、スクリーニング試験として使用される。ただし、カルセドニーを含有するチャート、いわゆるアルカリ炭酸塩反応を示す泥質ドロマイト質石灰石など、粒径ペシマムを含む骨材には適さない。これらは、骨材の粒径を 1~4mm ではなく、4~8mm とより大きくする RILEM AAR-5 により検出ができる。中部地区で産出するチャートでも RILEM AAR-2 では膨張しないが、RILEM AAR-5 では膨張する事例がある。
- ・ コンクリートプリズム試験 (CPT) (ASTM C1293、CSA23.2-14A、RILEM AAR-3) : アルカリ総量を 5.25~5.50kg/m³ とし、7.5×7.5×25cm のコンクリートプリズム (角柱) を 38°C にて膨張促進する。判定基準は 1 年で 0.04%。骨材試験ではなく、調合試験としても用いられる可能性がある。現在、最も信頼性が高い試験方法と考えられている。
- ・ 促進コンクリートプリズム試験 (RILEM AAR-4) : RILEM AAR-3 の養生温度を 60°C に高めた方法。遅延膨張性骨材の効率的検出に有効である可能性がある。アルカリ溶脱が起きやすく、RILEM AAR-3 に比較し、多くの事例で膨張が早期により小さい値で収束する傾向にある。

原子力施設の ASR 評価を考えた場合、第一に必要なことは、日本の骨材が上記のような国際的標準方法で評価した際に、どのような結果になるかを調べることである。従来の化学法、モルタルバー法で無害とされていても、国際的手法では無害でないと判定される可能性もある。

そのような現象が認められた場合、高経年化評価は従来の調合検査では済まないことになる。したがって、日本国内の代表的な急速膨張性骨材と遅延膨張性骨材を数種類 (例えば 5 種類) 収集し、国内外の代表的アルカリ反応性試験により評価することは重要である。さらに急速、遅延の各 1 種類程度については、試験条件 (温度、アルカリ総量) の影響を詳細に調べることも必要であり、各種の試験法の限界を明確化するとともに、将来予測のために基礎データを得ることが大切である。この内容が平成 26 年度に検討する主要なものである。

さらに現実のコンクリートでの ASR の進行を考えるには、現実のコンクリートのアルカリ量と混和材の影響度合いを定量評価する必要がある。現実のコンクリートでは、過去にはアルカリ総量が海砂や骨材からのアルカリ溶出の影響で極端に多かったり、1986 年以降のセメントの特性変化から、かなり少ないレベルにあったりする。さらに、高炉スラグやフライアッシュなど ASR を抑制する混和材が用いられているケースも多い。また、一般的に抑制効果がある混和材の添加量範囲では、反応性が高い骨材をペシマム条件で用い

たりして、非常に長期間にわたり ASR 膨張を抑制するには不足していたりする可能性もある。これらの条件での、混和材の ASR 抑制効果の評価は長期間を要する検討内容であり事前準備が重要である。加温による膨張促進の影響は平成 26 年度の研究から明らかになるので、一定の短縮は可能と考えられるものの、CSA によれば、38℃におけるコンクリートプリズム試験では 2 年間に要する。しかも、混和材の特性により抑制効果は相当に異なることもわかっている。したがって、抑制効果の検証は 1 年で終わるものではなく、少なくとも数年を要することになる。

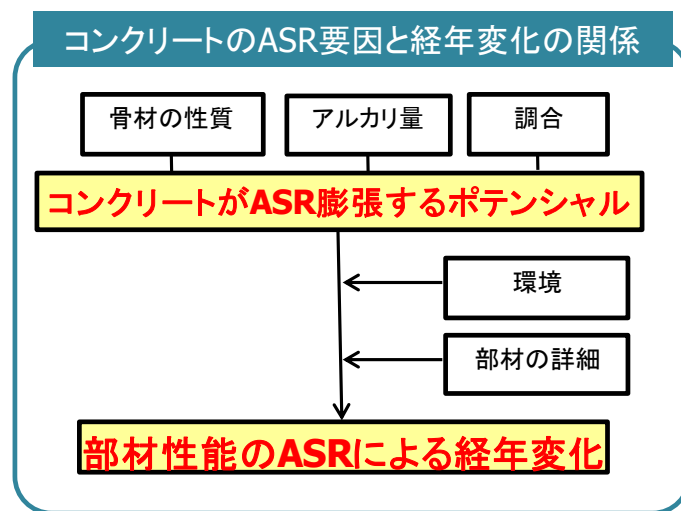


図 4.1-1 ASR による部材性能の経年変化に影響する各種要因

4.1.2 高経年化評価における ASR 評価の全体像

ここで、原子力施設の高経年化評価という視野でより広く、ASR 評価全体を考え、検討課題を再度位置付ける。このような ASR 評価の全体像を考える課題抽出することも平成 26 年度の課題である。

ASR は、反応性骨材、十分なアルカリと水があって初めて発生し、膨張を引き起こす。膨張によりひび割れが多く発生するようになると、鉄筋コンクリート部材の各種の性能が低下していく。この関係を図 4.1-1 に示す。骨材の性質、アルカリ量、調合により、コンクリートが ASR 膨張するポテンシャルが決まる。骨材の種類とは、反応性タイプ（急速、遅延）、反応性の度合い（アルカリ反応性の程度）である。骨材の種類により反応するための最低必要アルカリ量（アルカリ限界量、alkali threshold）は異なる。このアルカリ限界量は評価する材齢（たとえば 10 年なのか、100 年なのか）でも異なるが、この点はあいまいにされている。調合とは、骨材の粒度や非反応性と反応性の骨材の組合せという要因を意味する。

しかし、ポテンシャルがあるからと言ってすべてのコンクリートが膨張するわけではない。乾燥した環境、あるいは低温環境では反応性骨材を用いアルカリ量が多くても膨張は

しない。また、部材の詳細例えば部材厚や鉄筋ほかによる拘束条件も影響する。乾燥環境であってもコンクリート部材厚が一定値以上であれば保有水のみで ASR 膨張しえる。温度が異なる場合には膨張速度は相当に異なる。さらに温度勾配があれば、水分とともにアルカリが移動し、同一部材内に高濃度アルカリの湿潤領域が生じる可能性も考えることができる。同じ反応率でも拘束条件が異なれば外に現れるひび割れ密度や変形量も異なる。

以上を考えると骨材の反応性の有無を評価するだけでは、原子力施設の部材性能の変化までは評価できないことが分かる。したがって、まずは骨材単独ではなく、ある調合のコンクリートそのものの反応性を評価する必要がある。

この際、アルカリ量依存性は骨材種類によっても異なると予想され、一定アルカリ量以下では膨張が起きないアルカリ限界量も存在する。したがって、アルカリ量を変化させた検討も重要である。原子力施設を考えると一般建築物とは異なり、60°C というような高温部材も存在する。したがって、ASR 膨張の温度依存性も理解しておく必要がある。この際、RILEM AAR-4 が養生温度 60°C を採用しているため有効な試験方法の候補となるが、コンクリートプリズムからの著しいアルカリ溶脱が発生することもわかっており、RILEM AAR-4 を骨材試験として用いることはできても、実部材におけるコンクリートの挙動予測の観点からはアルカリ溶脱の影響を排除することが求められる。また、アルカリ量と温度の影響は骨材の種類ごとの反応にも強い影響を及ぼすことも考慮しなければならない。現実ですべての骨材を試験することは困難であり、代表的な骨材の試験結果を普遍化し、反応や膨張速度が異なる現象を現実への予測に変換するには、起きている現象の解析が必要である。このために、これまでも多く用いられてきた偏光顕微鏡や SEM/EDS を用いた分析も実施すべきである。

このように考えると各種試験方法の限界が分かってくる。表 4.1-4 に骨材のアルカリ反応性評価の方法一覧と特徴をまとめる³。

最も信頼性が高いのは実証主義で、評価対象骨材の現場経験である。しかし、ASR が認識されたのが 1940 年であり、しかも原子力施設のような高温部材では事例がない。もちろん実証された骨材の種類は限定される。

その次に信頼性が高いのは一定の大きさを有する試験体の暴露である。通常数 10 cm 以上の大きさの試験体が用いられる。原子力施設を考えると高温環境での暴露試験が望まれる。

暴露試験には長時間を要するので、何らかの方法で膨張促進することが試みられている。現実に近いコンクリートを用いて、コンクリートプリズムを作製し、アルカリ量を増加させ高温で養生する。このコンクリートプリズム試験 (CPT) では、膨張のアルカリ量と温度依存性を評価することが可能であるが、現在の多くの方法はアルカリ溶脱と乾燥防止に欠点を有する場合が多い。日本の原子力施設では JASS5N T603 のコンクリートバー試験

³ 山田一夫ほか：“アルカリ骨材反応の抑制効果の評価方法と膨張予測の新しい考え方”、土木学会第 69 回年次学術講演会、V-481、(2014)に加筆

が用いられる。この方法は日本に特有な安山岩に代表される急速膨張性骨材の組成ペシマム条件を含んだ不確実性を克服する適切な方法である。しかし、試験法制定時には遅延膨張性骨材の存在は知られておらず、改めてその有効性を検証することが必要となっている。海外の試験法との比較を考えると、アルカリ量が少なく、判定期間が短く、判定膨張率が高いので、より緩やかな判定となる。何らかの ASR 膨張の有害性を判定する基準は、原則、現場経験との対比により行う。したがって、原子力施設に応用するには、多数あるすべての原子力施設の総点検の結果と、CPT 等促進試験の結果を、使用骨材の特性と施設のコンクリートの暴露条件を明確に理解したうえで比較検討し、判定基準を定めることが必要である。これが難しい場合は、CPT の結果と暴露試験の結果を勘案して、暫定的に有害な膨張とひび割れが発生する条件を求め、CPT の判定基準を定めることになる。

本事業では、CPT の試験方法としての有効性の検証は行えるものの、判定基準を定めるまでには至らない。判定基準はステークホルダーが議論して定めることが通例であり、その判断のベースとなる情報を提供することになる。

表 4.1-4 に骨材のアルカリ反応性評価の方法一覧と特徴³

手法	特徴
現場経験	長期間の実績主義。最も信頼性が高いが、適用範囲(環境条件)は限られ、信頼できる期間は経験の範囲内。原子力施設の高温部材では事例がない。
コンクリート試験：骨材試験と共に配合試験の意味合いを持つ。	
大型試験体の暴露	長期間を要する。アルカリ溶脱の影響が少ない。暴露条件が限られる。原子力施設の高温部材条件での暴露試験が必要。
CPT (38 °C: RILEM AAR-3 ほか, 40 °C: JASS5N T603)	試験期間0.5~2年。室内試験として高信頼性。AAR-3では水分確保とアルカリ溶脱防止が課題。JASS5N T603は試験体の梱包が煩雑で、試験期間とNa ₂ O _{eq} 量が課題。
加速CPT (60 °C: RILEM AAR-4)	試験期間20週。AAR-3と同じ問題と利点がある。現実よりも高温で検証必要。アルカリ溶脱の抑制必要。
骨材試験：配合依存性がある現象は検出できず、それぞれ限界がある。	
岩石学的試験	骨材種類ごとに適する骨材試験方法があり、スクリーニングとする。
加速モルタルバー (ASTM C1260, RILEM AAR-2)	2週間で結果が得られる。多くの骨材が反応性となる厳しい試験。粒径ペシマムを見落とす。
迅速法 (JIS A 1804)	オートクレーブを用い、短期間で結果が得られる。反応条件が現実あまりに乖離し信頼性に疑問が残る。
モルタルバー法 (JIS A 1146)	急速膨張性には適するがペシマム現象を検出できない。遅延膨張性骨材には適さない。
化学法 (JIS A 1145)	急速膨張性骨材に適する。遅延膨張性骨材には不適。

ここまでは新設の構造物、あるいは調査報告書審査の妥当性に関わる検討である。本来、高経年化評価は、ASR が原子力施設に与える影響を定量評価するためである。つまり、ある時点での施設の健全性を評価し、何らかの情報や試験により将来を予測する。ASR に関して、この過程を図 4.1-2 に示す。

図 4.1-2 は、ある時点の健全性から将来の健全性を予想する過程をまとめたものである。

- ・ 最も基本となる定期的目視点検

- ・ 一定の基準以上のひび割れ/変状を見つけた後のひび割れモニタリング、あるいは非破壊検査
- ・ ひび割れが一定以上に進展する場合、より詳細な解析のためのコア分析
- ・ 将来の ASR 膨張を推定するためのコアの促進膨張試験
- ・ 促進膨張試験結果と環境・構造条件を加味した将来予測（この部分に ASR ポテンシャル評価の検討結果は反映される）
- ・ ASR 膨張から推定した部材性能の推定

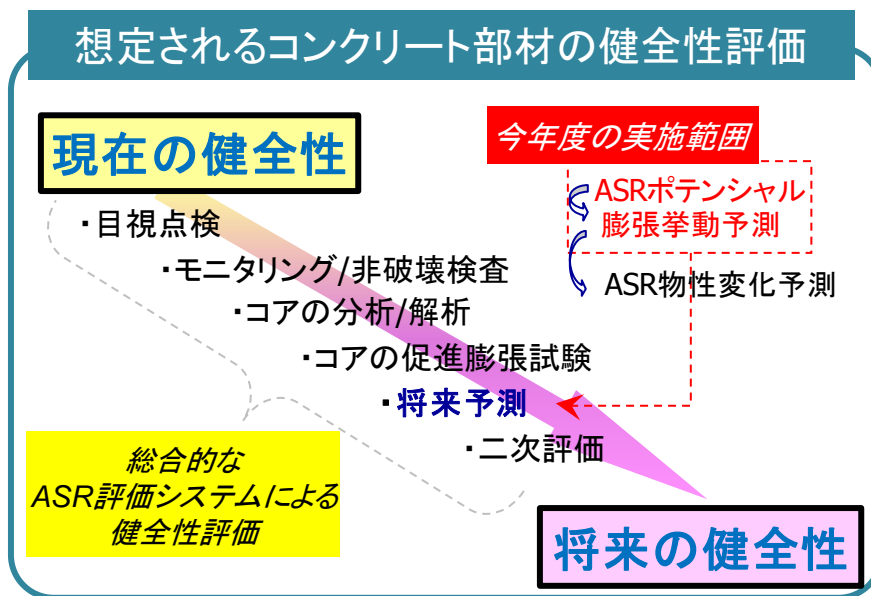


図 4.1-2 ASR に関する原子力施設の健全性評価の過程

このような過程を経て初めて、将来の施設の健全性を評価できる。これらのフローは国内においては日本建築学会に簡易的なものはあるが、具体的な基準や手順詳細は決められていない。国際的な取り組み状況も含め、整備すべき技術的要件の整理も平成 26 年度に調査する。

4.1.3 ASR 診断

骨材試験、あるいは調合試験の次に必要なことは、ASR 診断である。JNES レポートには ASR 診断についても記載されている。ASR の有無の検出、原因の推定、進行度の評価などができる。将来的予想については、ASR ポテンシャル評価としての促進膨張試験は記載されている。したがって、急速膨張性と遅延膨張性骨材について、この ASR 診断手法の適用性の確認がまずは重要である。この実施には、促進膨張試験の試験体、さらに暴露試験体からのコンクリートコアが必要で、一定規模の劣化、あるいは劣化するポテンシャルのあるコンクリート塊の準備が必要である。JNES レポートに記載の方法は、劣化度を

岩石学的検討により判断し、80°C1N-NaOH 溶液に浸漬する促進養生により ASR ポテンシャルを評価し、将来の膨張可能性を判断する。これには、平成 26 年度に実施する種々の条件での調合試験による試験体を偏光顕微鏡観察するなどの分析も必要である。これらの検討は今後の実施が必要である。ただし、この分析がごく一部の技術者にのみ実施できるので高経年化評価技術としては適用できないので、平成 26 年度事業においてもすでに膨張試験を終えた試験体を調達し、微細構造分析の可能性を検討する。

しかし、ASR 診断だけでは将来予測にはつながらず、ASR 膨張を何らかの方法で予測することが望ましい。温度とアルカリ量を変えた CPT の結果から、将来の膨張を予測する手法が提案されているが、これが本事業で用いる骨材にも適用できるのか検証する（平成 27 年度を想定）。この際、アルカリ溶脱を防止するため、コンクリートの空隙水相当のアルカリ溶液で湿らせた不織紙でコンクリート包み（アルカリラッピング）養生を行うことが望ましいと考えられるので、平成 26 年はこの見当も行う。このアルカリラッピングの効果をコアの促進膨張試験に適用する検討が、従来の方法、例えば JCI-DD2 をより合理的にするために必要である。この検討により、コアから ASR ポテンシャルだけではなく、将来の膨張予測ができるようになる可能性がある。現実の膨張は湿度の影響を相当に強く受けることが分かっているため、国内の骨材での挙動を確認しておくことも膨張予測には必要である。この際、単なる膨張予測だけではなく、これに伴う機械的特性変化、及び拘束条件の影響も理解しておく必要がある（平成 26 年度予備調査）。

構造物の健全性評価を考え、全体像を図 4.1-3 に示す。JNES レポートは ASR 診断を的確にまとめている。構造物の健全性評価には、ASR が構造物の機能、部材の性能に与える影響を評価し、さらにそれを種々の条件を加味して何らかのモデルにより予測しモニタリングしていくことが必要である。

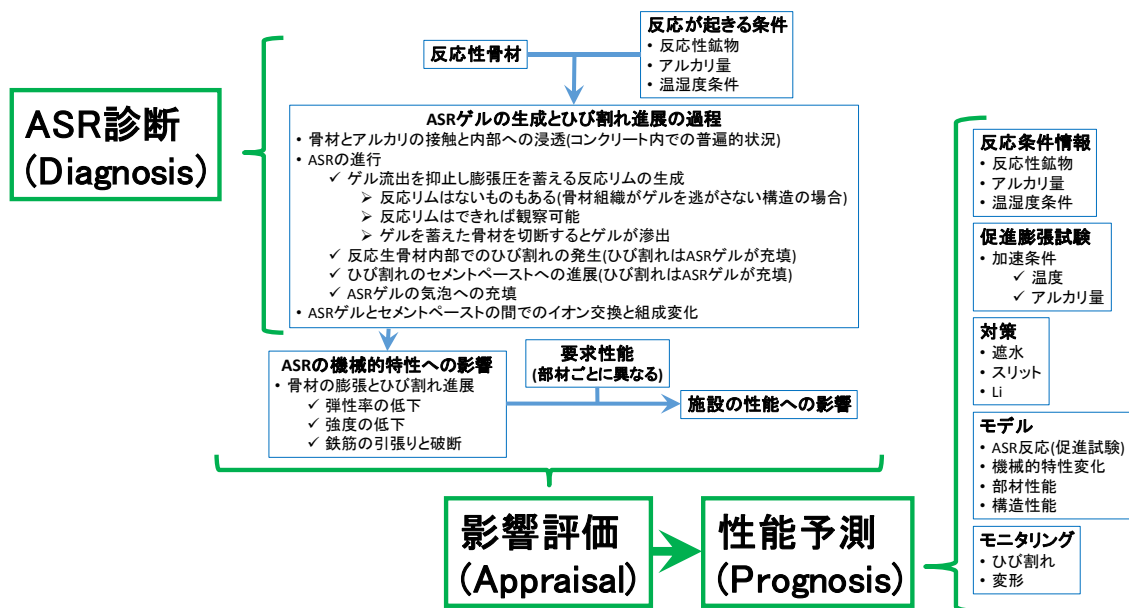


図 4.1-3 構造物の健全性評価の全体像

4.1.4 報告書の構成

原子力施設の健全性評価における骨材の反応性評価の意義を本節では説明してきた。ASR に関する原子力施設の高経年化評価技術の高度化の第一歩として、骨材の反応性評価技術の確立は重要である。高経年化評価技術全体を俯瞰すると、この先には ASR 診断があり、さらに ASR の影響評価、性能予測、維持管理へと繋がっていく。

本事業の概要、すなわち本報告書の構成を説明する。4.2 節に平成 26 年度に実施した ASR ポテンシャル評価の検討を示す。検討では、ASR 研究で最も難しく重要な試験目的に適する骨材の選定から議論を始め、その基本特性の評価をまず行う。そして、国内外の骨材試験方法として、CPT を含めて各種の反応性評価試験の比較を行う。最後に、将来予測に不可欠と考えられる促進条件を変化させた CPT を限定した骨材について行う。

4.3 節では ASR 診断・健全性評価に関する課題抽出を行い、高経年化技術評価の高度化のあるべき姿を提示する。国内外の既存の ASR に関わる健全性評価フローを調査し、最新の知見から ASR 損傷に対する事例調査を行い、今後求められる検討課題を明らかにする。

4.4 節では、ASR に対する高経年化対策の具体例を調査した。骨材の反応性評価（および抑制対策の効果の検証）、ASR 診断、この次に来る、ASR 劣化のモデルと機械的特性への影響をまとめる。さらに、ASR 膨張は温度により直線的に促進されるのではないことを認識し、原子力施設特有の高温部材での挙動を理解することが重要と考えられたため、ASR の作用機構を岩石学的手法で解析する手法の予備調査の結果も説明する。また、個別技術としては先端的非破壊試験の調査、および現実の ASR 診断での第一ステップともいえる各発電所で用いられた骨材の岩種に関する基礎調査の事例も解説する。

4.2 ASR ポテンシャル評価の検討

4.2.1 試験用試料の入手・選定

(1) 目的

本項では、以後の試験に用いる骨材を選定し、入手することを目的とする。ASR 反応性骨材は日本全国各地に分布し、骨材によって反応性が異なる。高経年化技術評価の高度化における ASR 評価に反映するため、遅延膨張性骨材を含むすべての反応性骨材の ASR に係るデータを整備する必要性を鑑みて、反応性の高い鉱物を含み急速膨張を示すと考えられる骨材と、微晶質石英や隠微晶質石英を含有しゆっくりを反応すると考えられる遅延膨張性骨材の 2 つタイプの異なる骨材を用いることとした。

目標とした骨材の種類は、産地の異なる急速膨張性骨材 2 種類、遅延膨張性骨材 3 種類である。

(2) 選定・入手の手順

1) 手順の概要

本研究で実施する ASR 反応性に関する各種試験では、コンクリート試験を含むため、骨材量として数百 kg～1t 程度必要となり、候補地からこの量の骨材を一度に入手することは効率的ではない。そこで、骨材の選定・入手では、以下の手順により、行った。

- ① 候補地の検討
- ② 現地調査およびサンプル採取
- ③ ASR 反応性の確認（偏光顕微鏡による含有鉱物の確認および ASTM C1260⁴によるモルタルバー法）
- ④ 選定
- ⑤ 入手（計 5 種類）

以後に、①～⑤について詳細を記載する。

2) 候補地の検討

試験で用いる骨材の選定入手にあたり、まず、候補地を選定することとした。参考とした岩石の分布⁵を図 4.2.1-1 に示した。ASR 反応性の観点から国内の ASR 反応性骨材の地域性は以下のように考えられる。

急速膨張性の骨材は、新第三期以降の火山活動に伴う安山岩が主体であり、北海道、東

⁴ ASTM C 1260 : “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)”, ASTM(American Society for Testing Materials)で規定される、骨材の潜在的アルカリ反応性を検出するための試験方法であり、モルタルバーを用いた加速試験。

⁵ 山田一夫：“アルカリシリカ反応入門 ①アルカリシリカ反応の基礎～骨材の反応性と試験方法～”，コンクリート工学，Vol. 52, No. 10 (2014)

北、北陸、中国山地、瀬戸内、九州と広く産出する。なかでも、劣化が顕著で検討が進んでいる、瀬戸内の安山岩を利用した阪神高速と北陸地方の高速道路が劣化事例として知られている。チャートは地質的にはジュラ紀付加帯に特徴的に産出し、中部地区が特に知られている。

遅延膨張性の骨材は、変成作用に伴う変形や再結晶化を受けた岩体に多く、中央構造線に沿った広域変成岩体や花崗岩の貫入に伴うホルンフェルスが典型的である。広域変成岩体は秩父地域から中部地方、紀伊半島、四国を経て九州に連なる。花崗岩の貫入岩体は全国に広く認められるが、どこにおいてもホルンフェルスが生成している可能性がある。

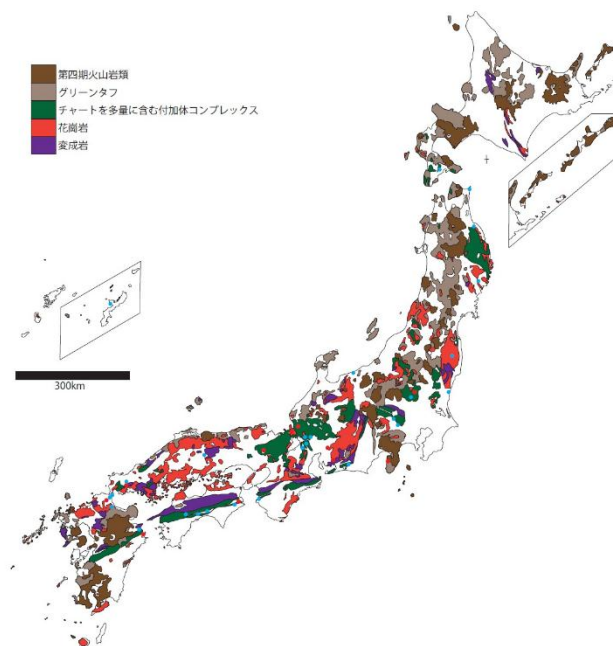


図 4. 2. 1-1 岩石の全国分布⁵

これら ASR 反応性を示すと考えられる岩石の全国分布を考慮し、また、産地に関する情報が記載されている文献^{6, 7, 8, 9, 10, 11}および、ASR 研究に関わる大学、構造物調査診断会社等へのヒアリング情報から、以下の地域を候補地として検討を行うこととした。この内、

⁶ 川端雄一郎 他：“岩石学的分析に基づいた安山岩の ASR 反応性評価および膨張挙動解析”，土木学会論文集 E, Vo. 64, No. 4, pp. 689-703 (2007)
⁷ 佐川康貴 他：“コンクリートプリズムを用いた 60°C 加速養生によるアルカリシリカ反応性の評価に関する研究”，コンクリート工学年次論文集, No. 35, No. 1, pp. 1120-1125 (2014)
⁸ 井上祐一郎 他：“ペシマム現象を生じる骨材を用いたモルタルのフライアッシュによる ASR 抑制効果”，コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 953-958 (2010)
⁹ 山戸博晃 他：“石川県産骨材のアルカリシリカ反応性の評価に関する研究”，コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 1257-1262 (2007)
¹⁰ 広野真一 他：“ASTM C1260 によるフライアッシュ含有モルタルの安山岩に対する ASR 抑制効果の評価”，材料, Vo. 62, No. 8, pp. 498-503 (2013)
¹¹ 山田一夫 他：“原子力施設におけるアルカリ骨材反応の一考察”，セメントコンクリート論文集 (2014) (印刷中)

既に骨材の生産を行っていない採石場、あるいは、文献に試験結果が記されサンプル入手の必要性がない地域を除き、現地調査およびサンプル入手を行った。なお、試験に用いる非反応性骨材は石灰石骨材を使用することとし、合わせて現地調査を行った。

<急速膨張性骨材の候補地>

- ・北海道（クリストバライトとトリディマイトを含む安山岩）
- ・北陸能登半島（ガラス質安山岩と弱風化安山岩）
- ・四国・瀬戸内海（同上）

<遅延膨張性骨材の候補地>

- ・関東（砂岩）
- ・四国・瀬戸内海（ホルンフェルス）
- ・九州（片麻岩）

<非反応性骨材の候補地>

- ・九州（石灰岩）

3) 現地調査およびサンプル採取

前述 2) の候補地に対して、現地調査では、採石場に関する情報を収集、地質図および航空写真から ASR 反応性と入手の可能性の見通しを検討した上で採石場を訪問、骨材の生産状況および生産される骨材の肉眼目視による確認、採石場近隣の構造物の ASR 発生状況を調査、を行って採石場より骨材サンプルを採取した。特に岩石の地質的産状から考え、採石が産出場所の平均的な性質を代表されることを確認することとした。ただし、現地調査において、多くの岩種が混在し試験への適用が困難と判断される骨材があり、サンプル採取を行っていない骨材もある。また、文献において ASR 反応性を有することが確認されており、現在でも B 種判定として流通し入手が比較的容易な骨材は現地調査を実施せず、サンプルのみ入手した。

4) 骨材の選定

骨材の選定は、以下の判断に基づいて行った。

- ・急速膨張性骨材は、反応性鉱物として、トリディマイト、クリストバライト、あるいは火山ガラスなど、入手したサンプルの偏光顕微鏡による含有鉱物の確認によって ASR 反応性の高い鉱物を含むこと
- ・遅延膨張性骨材は、ASTM C1260 試験で反応性を有すること
- ・非反応性骨材は、ASR 反応性鉱物を含まないこと
- ・現在でも入手することが可能であり、コンクリート用骨材としての物理的特性（泥分を含まない、粒度が適切等）を有していること
- ・特定の地域、岩種に偏らないこと

なお、現地調査における近隣構造物の ASR 劣化事例については、明らかに産出する骨材を用いていると判断される場合もあるが、不明確な場合もあることから、参考情報とした。

5) 骨材の入手

最終的に選定した骨材は、コンクリート試験に用いるために数百 kg～1t を調達し入手した。なお、入手した骨材がサンプル採取した骨材と異なる可能性もあるため、一部骨材については、サンプル採取段階でコンクリート試験に用いることができる数百 kg を調達した骨材もあるが、何れの選定した骨材も最終的には、急速膨張性骨材は 4.2.2 項「試験用試料の岩石学的試験」において含有する鉱物を確認し、遅延膨張性骨材は 4.2.3 項「骨材試験の実証試験」において ASTM C1260 による試験で ASR 反応性を有することを確認した。

(3) 結果

1) 検討した骨材

検討した骨材から最終的に選定した骨材まで、選定における判断結果を含め、一覧表として表 4.2.1-1 に示した。検討した候補地は事前の ASR 反応性骨材の産地に関する文献や有識者へのヒアリング情報から 20 箇所を候補とし、現地調査を行った採石場は、北海道、北陸、関東、四国、九州の計 13 箇所であり、直接入手した骨材を含めて骨材 14 種類をサンプルとして収集した。これら現地調査における採石場の状況、周辺構造物の ASR 発生状況等は添付資料 1 に示した。

現地調査では、骨材の入手性、物理的特性を含め試験に適するか否かについても合わせて確認した。骨材の入手性としては、採石場によっては既に生産を中止し、特定の業者のみが取り扱っており入手できない骨材、現地調査の状況から採掘場所によって反応性が影響を受けやすく試験に適さない、離島などにあり輸送に困難を伴う、産出される岩石が岩体そのものでコンクリート用骨材への調整が困難、あるいは路盤材用のみに生産している採石場など、コンクリート試験に用いるには困難な骨材（骨材の入手性）、骨材の物理的特性としては、骨材の肉眼目視では明らかに泥分が多い、粒度が大きいか微粒分が多いなどの粒度に偏りがある、脆弱な泥岩を含み密度が不足するなど、コンクリート用骨材として適しないと判断される骨材があり、これらの特性は表 4.2.1-1 に併せて記載し、以下の選定における判断とした。

2) 急速膨張性骨材の選定

サンプル採取した急速膨張性骨材の候補の骨材は、偏光顕微鏡による観察で ASR 反応性鉱物を含有することを確認した。なお、現地調査における目視観察で様々な岩種が混在していた骨材 IM は試験用骨材として適しないと判断し、選定候補から除外しサンプル採取は行わなかった。サンプル採取した骨材の偏光顕微鏡観察の写真は、添付資料 2 に添付した。なお、最終的に選定した骨材は、4.2.2 項で詳細な岩石学的試験結果を示すため添付資料 2 には掲載していない。

サンプル採取した候補となり得る急速膨張性骨材は、何れもトリディマイト、クリストバライト、あるいは火山ガラスなど、急速膨張性を示す鉱物を含有し、また、文献に記載される反応性鉱物ともほぼ合致した。

選定では、これら反応性鉱物を含有することに加え、さらに骨材の入手性、物理的特性を考慮した。これら判定基準は、表 4.2.1-1 に合わせて記載した。

その結果、最終的に選定した急速膨張性骨材は、骨材 T0 および骨材 SI の 2 種類とし、以後の国内外の試験比較で用いることとした。

なお、骨材 SI は一般には流通せず、入手性の観点から、環境要因として温度およびアルカリ量を変えた CPT¹²では骨材 T0 を使用することとした。

3) 遅延膨張性骨材の選定

遅延膨張性骨材は、反応性鉱物として微晶質石英、隠微晶質石英を含有する岩石を含有する。サンプル採取した骨材の偏光顕微鏡観察の写真を急速膨張性骨材と併せて添付資料 2 に示した。偏光顕微鏡観察では、これらサンプルは何れも急速膨張性を示す鉱物は認められず、隠微晶質石英を含有していると考えられるが、その ASR 反応性は偏光顕微鏡では判定が困難である。そこで、ASR 反応性確認を ASTM C1260 試験によって確認することとし、漬材齢 14 日における膨張率測定結果を図 4.2.1-2 に示した。

サンプル採取した骨材のうち、骨材 DS は試験材齢 14 日における ASTM の判定基準では不明確の領域にあり、その他の骨材は何れも有害の判定となった。これら何れの骨材も文献記載の ASTM C1260 による膨張率より大きく、より高い反応性を示した。

ASTM C1260 の試験結果から、ASR 反応性の観点からは、骨材 WI、骨材 MO、骨材 HE および骨材 GK の 4 つは何れも候補になり得る。ここで、骨材 WI と骨材 MO は採石場は異なるが何れも同地域であるため、入手性のよい骨材 WI を選定することとし、以後の国内外の試験比較では骨材 WI、骨材 HE および骨材 GK の 3 種類を用いることとした。

なお、この 3 種類のうち、温度およびアルカリ量を変えた CPT では、ASTM C1260 の膨張率がより大きい、骨材 WI および骨材 HE を用いることとした。

¹² CPT : コンクリートプリズム試験 (Concrete Prism Test) , 75×75×250mm のコンクリート試験体を用いた ASR 反応性試験。試験方法としては、RILEM AAR-3、CSA A23. 2. 14A、ASTM C 1293 がある。

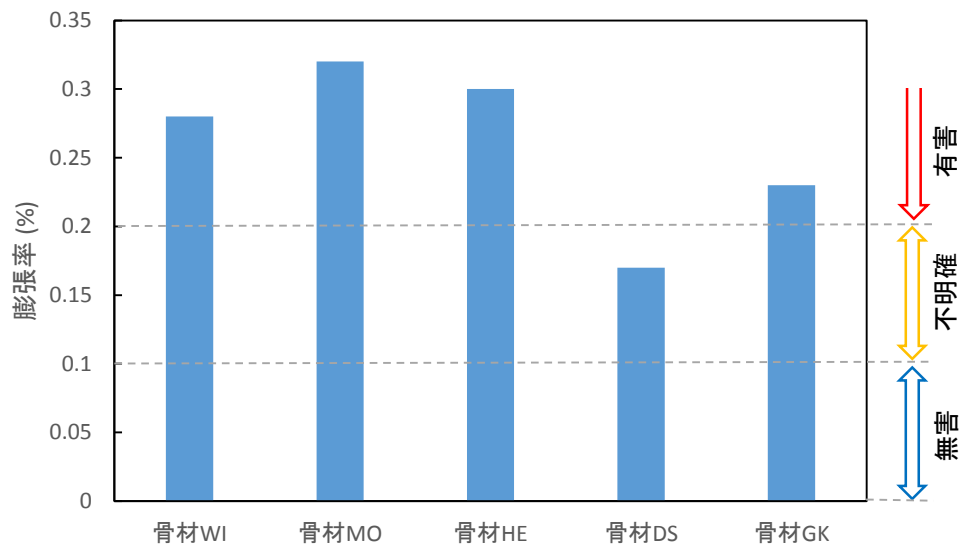


図 4. 2. 1-2 候補とした遅延膨張性骨材の ASTM C1260 による試験結果(材齢 14 日)

表 4.2.1-1 骨材の選定・入手で検討した骨材および選定結果

ターゲット	検討した日本で産出する骨材の地域*1	砕石場記号	現地調査*2	サンプル採取	関連文献*3	岩種およびASR反応性鉱物(採取試料の観察および文献等調査)*4		C1260選定試験*5(14日膨張率)	入手性*6	物理的特性*7	ASR事例*8	選定理由/(不選定理由)
						岩種	主な反応性鉱物など					
急速	北海道	TO		○	[1][2]	安山岩	トリディマイト	有害(0.43%)	○	○	あり	反応性が高い安山岩。現在もコンクリートに用いられている
	北海道	UB			[1]	ガラス質安山岩	火山ガラス		×	—	不明確	(入手不可。ASR反応性が低いと推測)
	北海道	SK	○	○	[3]	堆積物(凝灰岩、安山岩、花崗岩、砂岩、チャートを含む)	オパール、クリストハライト、隠微晶質石英		○	×	あり	(物理特性がコンクリート用骨材に適さない)
	東北	TN			[2]	変質安山岩	オパール、クリストハライト、カルセドニー	有害(0.43%)	△	×	あり	(物理特性がコンクリート用骨材に適さない)
	北陸	GT	○	○	[4][5]	安山岩	火山ガラス、クリストハライト、トリディマイト	有害(0.55%)	×	○	あり	(入手不可)
	北陸	WO	○	○	[4][5]	安山岩	クリストハライト、トリディマイト、(スメクタイト)	有害(0.54%)	×	○	あり	(粒度調整、泥分除去が必要)
	北陸	SI	○	○	[4][5]	安山岩	クリストハライト、火山ガラス	有害(0.26%)	△	○	あり	北陸地方のASR反応性の代表的な安山岩。現在もコンクリートに用いられている
	北陸	SN	○	○		安山岩	火山ガラス		○	×	不明確	(物理特性がコンクリート用骨材に適さない)
	北陸	YK	○	○		安山岩(変質している)	火山ガラス、カルセドニー		○	×	不明確	(物理特性がコンクリート用骨材に適さない)
	北陸	IM	○			様々な岩種が混在	不明		○	×	不明確	(軟石を含む様々な岩種が混在し試験用骨材として不適)
遅延	四国	ST	○	○		安山岩	クリストハライト		×	—	不明確	(入手不可)
	中部	TT			[6]	チャート	隠微晶質石英、カルセドニー	無害(0.0%)	○	○	不明確	(カルセドニーを含有し、遅延膨張性としての試験に適さない)
	関東	WI	○	○		砂質ホルンフェルス	隠微晶質石英	有害(0.29%)	○	○	不明確	C1260で反応性確認。関東地方で使用されている。
	関東	MO	○	○		砂岩	隠微晶質石英	有害(0.30%)	△	○	不明確	(同上である。地域がWIと同じであり、入手性からWIを選定)
	中部	DO			[2]	砂質岩ホルンフェルス	隠微晶質石英	不明確(0.12%)	△	○	不明確	(C1260の膨張率が低い)
	四国	HE	○	○		砂質片岩	隠微晶質石英	有害(0.30%)	△	○	不明確	C1260で反応性確認。四国地方で使用されている。
	四国	YT	○			変成作用をほとんど受けていない砂岩、片岩、チャート類	不明		○	○	不明確	(変成作用を受けてなく、ASR反応性は低いと推定)
	四国	DS	○	○		砂質片岩	隠微晶質石英	不明確(0.17%)	△	○	不明確	(C1260でASR反応性が低い)
	九州	GK	○	○		緑色片岩	隠微晶質石英	有害(0.22%)	△	○	あり	C1260で反応性確認。九州地方で使用されている。
	非反応性	九州	IO	○	○	[2]	石灰岩	方解石	無害(0.08%)	○	○	なし*9

■: 選定した急速膨張性骨材2種類、遅延膨張性骨材3種類の合計5種類。岩石学的評価(偏光顕微鏡および粉末X線回折)、JIS化学法、JISモルタルバー法、AAR-2(ASTM C1260)、AAR-3、AAR-4の比較に用いる

■: 選定した5種類のうち、温度およびアルカリ量を変えたCPT試験に用いる急速膨張性骨材1種類、遅延膨張性骨材2種類

*1 調査対象とした、ASR反応性を有すると考えられる骨材が産出する地域。

→骨材選定においては、異なった地域であることに留意した

*2 現地調査を行った砕石場。IMおよびYTについては目視確認でASR試験に適しないと判断したためサンプル採取は行っていない。

*3 関連する既往の文献。ただし、文献では砕石場の所在は特定されていない場合もある。

*4 選定した骨材の岩種および反応性鉱物は、今後実施する詳しい岩石学的評価によって変わる可能性あり。斜体は文献情報を示す。

→骨材選定においては、急速膨張性骨材においてASR反応性の高い鉱物を含むことを必須条件とした。また、なるべく異なった岩種/鉱物を有する骨材を選定することに留意した。

*5 斜体は文献情報を示す。選定した骨材については別途試験を行う予定。

→骨材選定においては、主に遅延膨張性骨材の判断基準とした。

*6 ○: 日本で多く生産され、現在でもコンクリート用骨材あるいは路盤用骨材として生産されている

△: 特定の事業者のみが取扱っている、採掘場所によって反応性鉱物が偏在する可能性がある、輸送が困難、あるいは、産出する骨材の粒度特性から粒度調整が必要、あるいは泥分除去が必要

×: 閉掘等により入手できない

→骨材選定においては、○を優先し、△でも可とした。

*7 ○: コンクリート用骨材に求められる物理特性を有すると考えられるもの

×: コンクリート用骨材に求められる物理特性を有しないと考えられるもの

—: 不明

→骨材選定においては、○を必須条件とした。

*8 あり: 近隣に多数のASR劣化構造物が見られる、あるいは明らかに産出地の骨材を用いたコンクリートにASRが生じている。

不明確: 骨材の産出場所特定はできないが近隣にASR劣化構造物が認められる。

なし: ASR劣化構造物は稀、あるいは認められない。

→調査対象とした骨材がASR反応性を有するかどうかの妥当性を示すものであり、骨材選定の判断基準には用いず、留意事項とした。

*9 石灰石および他の岩種を組み合わせてコンクリートに用いる場合、他の岩種がASRを生じ、構造物に劣化が生じる可能性あり

<選定での判断基準>

・急速膨張性骨材は、ASR反応性の高い鉱物を含むこと

・遅延膨張性は、ASTM C1260試験で反応性を有すること。

・ASR事例報告・情報があること、あるいは、近隣構造物にASRが発生していること

・特定の地域、岩種に偏らないこと

・現在でも入手することが可能であり、コンクリート用骨材としての物理的特性を有していること

■: 選定候補となる得る評価

■: 選定候補となる得るが優先度が低い評価

■: 選定候補として除外する評価

<文献>

[1] 川端雄一郎 他、岩石学的分析に基づいた安山岩のASR反応性評価および膨張挙動解析、土木学会論文集E、Vo.64、No.4、pp.689-703、2007

[2] 佐川康貴 他、コンクリートプリズムを用いた60℃加速養生によるアルカリシリカ反応性の評価に関する研究、コンクリート工学年次論文集、No.35、No.1、pp.1120-1125、2014

[3] 井上祐一郎 他、ペシマム現象を生じる骨材を用いたモルタルのフライアッシュによるASR抑制効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.1、pp.953-958、2010

[4] 山戸博晃 他、石川県産骨材のアルカリシリカ反応性の評価に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.1257-1262、2007

[5] 広野真一 他、ASTM C1260によるフライアッシュ含有モルタルの安山岩に対するASR抑制効果の評価、材料、Vo.62、no.8、pp.498-503、2013

[6] 山田一夫 他、原子力施設におけるアルカリ骨材反応の一考察、セメントコンクリート論文集、2014(印刷中)

4.2.2 試験用試料の岩石学的試験

(1) 目的

国内の ASR 抑制対策における骨材試験では、骨材の岩石学的な評価は行わず、JIS 化学法、あるいは、JIS モルタルバー法によって反応性を確認する。しかしながら、骨材の岩石学的な評価は、RILEM AAR-1 において偏光顕微鏡による骨材の診断方法が示されており、また、試験に用いる骨材の ASR 反応性を考察する上でも岩種および含有鉱物を明らかとしておく必要がある。

ここでは、4.2.3 項「骨材試験の実証試験」で用いる選定した 5 種類の骨材（急速膨張性 2 種類、遅延膨張性 3 種類）について、骨材の岩石学的な試験を行った。岩石学的検討として、偏光顕微鏡観察による構成鉱物および岩種判定、粉末 X 線回折による鉱物組成分析、および、蛍光 X 線回折による化学組成の分析である。なお、4.2.3 項「骨材試験の実証試験」で用いる非反応性骨材（石灰石骨材）についても、併せて試験を行った。

(2) 方法

1) 偏光顕微鏡観察による構成鉱物および岩種判定

選定・入手した各骨材は何れも砕石であることから、各骨材から、代表的な粒子を数粒子選別し、厚さ 15-20 μ m 程度の薄片を作製した。これを偏光顕微鏡下で観察した。偏光顕微鏡観察では、特に ASR 反応性鉱物に注目して行った。

2) 粉末 X 線回折による鉱物組成分析

ASR 反応性鉱物の検出を目的として粉末 X 線回折を実施した。測定試料は、各試料を粗粉碎、縮分し、瑪瑙乳鉢を用いて指頭に粒を感じなくなるまで微粉化したものとした。測定装置はスペクトリス社製粉末 X 線回折装置 (X' Pert PRO MPD) を使用した。測定条件は、管球 Cu、入射側発散スリット 1°、入射側散乱防止スリット 2°、受光側散乱防止スリット 5.5 mm、管電流 40 mA、管電圧 45 kV、スキャン角度 $2\theta = 5 \sim 60^\circ$ 、スキャンスピード 5°/min、サンプリング間隔 0.03° とした。

3) 蛍光 X 線による化学組成分析

化学組成分析を目的として、蛍光 X 線回折を実施した。測定試料は、105°C にて乾燥後、ディスク型ミルにて微粉碎したものをを用いた。測定装置は、(株)リガク社製の蛍光 X 線分析装 (ZSX primus II) を使用した。

(3) 結果

1) 偏光顕微鏡観察による構成鉱物および岩種判定

各試料の岩石名および認められた鉱物を表 4.2.2-1 に、岩石記載を以下に示す。また、各骨材の偏光顕微鏡写真を添付資料 3 に示した。

(a) 骨材 T0 (北海道、急速膨張性骨材)

斑状組織を示す安山岩。斑晶は、斜長石、単斜輝石、斜方輝石、かんらん石、ホルンブレンド、不透明鉱物からなる。石基は、斜長石、トリディマイト^{※1}、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物から構成される。ASR 反応性鉱物として多量のトリディマイトを含む。

※¹ トリディマイトは、高温で安定なシリカ鉱物であるが、安定領域よりはるかに低温でも石英に転移せず存在しているもので、熱力学的に不安定で ASR 反応性（急速膨張性）を示す。

(b) 骨材 SI (北陸、急速膨張性骨材)

斑状組織を示す安山岩。斑晶は、斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物からなる。石基は、斜長石、クリストバライト^{※2}、輝石、不透明鉱物、ガラス^{※2}から構成される。石基の輝石のほとんどと斑晶の輝石の一部はスメクタイトなどの粘土鉱物などに変質している。また、石基のガラスや斑晶の斜長石に包有されていたガラスの大部分は、クリストバライトと粘土鉱物に変質している。ASR 反応性鉱物として多量のクリストバライトを含む。

※² クリストバライトは、高温で安定なシリカ鉱物であるが、安定領域よりはるかに低温でも石英に転移せず存在しているもので、熱力学的に不安定で ASR 反応性（急速膨張性）を示す。ガラスは、マグマが急冷されたため結晶化することなく固化したもので、 SiO_4 四面体の結合が不規則で弱いため不安定であり、シリカ分が高い場合は ASR 反応性を示す。ガラスは鉱物ではないが構成成分として示してある。

(c) 骨材 WI (関東、遅延膨張性骨材)

砂質岩起源のホルンフェルス。主成分鉱物は、石英、斜長石、黒雲母、白雲母である。原岩組織がよく残存しており、碎屑粒子の粒間に、微細な黒雲母や隠微晶質石英^{※3}などの生成が見られる。黒雲母はデッカセイト組織を示し特定の方向へ配向伸長しない。ASR 反応性鉱物である隠微晶質石英を含む。

※³ 隠微晶質石英は偏光顕微鏡下で個々の粒子が識別不可能なほど細粒な組織を指す。隠微晶質な結晶粒子は非常に微細で表面積が大きく、また結晶度が低いため、それが石英であれば ASR 反応性（遅延膨張性）を示す。

(d) 骨材 HE (四国、遅延膨張性骨材)

砂岩優勢の砂岩泥岩互層が広域変成作用を受けて生成したもので、全体としては砂質片岩（白雲母黒雲母片岩）である。主成分鉱物は、石英、斜長石、黒雲母、白雲母である。原岩の組織が比較的残存しており、黒雲母および白雲母は定向配列を示す。砂粒起源の粗

粒な石英・長石の結晶を多量に含む砂質岩起源の粒子と、それを含まない泥質岩起源の粒子とがあるが、前者を主とする。さらに、珪質な薄層に由来する主に隠微晶質石英からなる粒子も存在し、この粒子には、その他に雲母やざくろ石などが含まれる。ASR 反応性鉱物として隠微晶質石英※3 を含む。

(e) 骨材 GK (九州、遅延膨張性骨材)

玄武岩などの苦鉄質な岩石を含む凝灰岩などを原岩とする変成岩（緑色片岩）である。主成分鉱物は、緑泥石、曹長石、緑レン石、石英である。再結晶が進み、また片理が発達している。苦鉄質岩より導かれた緑泥石に富む濃い色の部分と、曹長石や石英に富む珪長質で淡色の部分とで細かい縞状構造をなす。粒子によっては、破碎作用(カタクレサイト作用)を受け、細粒化した組織が認められる。ASR 反応性鉱物として隠微晶質石英を含む。

(f) 骨材 IO (九州、非反応性骨材)

方解石のみから構成され、石英粒子や粘土鉱物などの不純物は認識されない。微晶質ないし隠微晶質な方解石からなるミクライト質な基質と、脈状にあるいは化石が置き換えられるなどにより粗粒方解石に再結晶した部分とからなる。

表 4.2.2-1 偏光顕微鏡観察結果

試料名	岩石名	主要な構成鉱物※6	ASR反応性鉱物
骨材 T0 (北海道)	安山岩	斜長石、単斜輝石、斜方輝石、かんらん石、ホルンブレンド、トリディマイト、不透明鉱物、石英	トリディマイト
骨材 SI (北陸)	安山岩	斜長石、単斜輝石、斜方輝石、クリストバライト、石英、不透明鉱物、スメクタイト、ガラス、その他の粘土鉱物	クリストバライト、ガラス
骨材 WI (関東)	砂質ホルンフェルス	石英、隠微晶質石英、黒雲母、白雲母、石墨	隠微晶質石英
骨材 HE (四国)	砂質片岩	石英、隠微晶質石英、黒雲母、白雲母、石墨、ざくろ石	隠微晶質石英
骨材 GK (九州)	緑色片岩	緑泥石、曹長石、隠微晶質石英、緑レン石、方解石、石墨、スフェーン、石英	隠微晶質石英
骨材 OI (九州)	石灰岩	方解石	

※6 主要な構成鉱物は、概ね構成量比の多いものから順に記載してある。

2) 粉末 X 線回折による鉱物組成分析

粉末 X 線回折試験による検出鉱物の一覧を表 4.2.2-2 に示す。なお、粉末 X 線回折の測定データは添付資料 4「選定した 5 種類の骨材、非反応性骨材およびセメントの粉末 X 線

回折図」に示す。

ASR 反応性鉱物として、骨材 T0 (急速) にはトリディマイト、骨材 SI (急速) にはクリストバライトが検出された。これらの結果は、偏光顕微鏡観察の結果と一致した。なお、1) 項の偏光顕微鏡観察では、骨材 WI (遅延)、骨材 HE (遅延) および骨材 GK (遅延) に ASR 反応性の隠微晶質石英が認められたことから、これら骨材の粉末 X 線回折で検出された石英には、ASR 反応性の隠微晶質石英も含まれると考えられる。

なお、非反応性骨材として選定した骨材 IO は、含有量は低いけどロマイトおよび石墨が検出されたが、何れも ASR に対して非反応性である。

表 4. 2. 2-2 粉末 X 線回折による検出鉱物の一覧

試料名	ASR 反応性鉱物		斜長石	石英	カリ長石	輝石	角閃石	雲母	緑泥石	緑レン石	方解石	ドロマイト	石墨
	トリディマイト	※1 クリストバライト											
T0 (急速)	○	—	◎	△	△	△	—	—	—	—	—	—	—
SI (急速)	—	△	◎	△	—	△	—	—	—	—	—	—	—
WI (遅延)	—	—	○	◎	△	—	—	○	—	—	—	—	—
HE (遅延)	—	—	○	◎	—	—	—	○	△	—	—	—	—
GK (遅延)	—	—	○	◎	—	—	△	△	○	△	△	—	—
IO (非反応性)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	◎	△	△

注記) 表中の記号は、最強ピークの回折強度に応じた表記 (◎:40, 000Counts 以上、○:40, 000~20, 000Counts、△:20, 000Counts 未満、—:検出せず)

※1 : クリストバライトの最強ピーク ($2\theta=22^\circ$ 付近) は、斜長石のピークと重複した位置にあるため、斜長石のピークのうち 22° とほぼ同等の強度を有する 24° 付近のピークと 22° のピークの強度差を、クリストバライトの最強ピーク強度とした。

3) 蛍光 X 線による化学組成分析

蛍光 X 線による化学組成の分析結果を表 4. 2. 2-3 に示す。

一般的に、火成岩については、おおよその SiO_2 含有量から 45%~52%が玄武岩、52~62%が安山岩、62%~70%がデイサイト、70%超が流紋岩とされる。安山岩と鑑定された骨材 T0 および骨材 SI は、 SiO_2 含有量からも安山岩の領域となった。また、骨材 OI (非反応性骨材) において、ig. loss (強熱減量) が他の骨材に比べ大きい値となった。これは、骨材 OI の中に含まれる方解石 (組成は炭酸カルシウム、 CaCO_3) が、 825°C 以上に加熱される

と酸化カルシウム (CaO) と二酸化炭素 (CO₂) に分解される性質を有することから、二酸化炭素の放出に伴う質量減少である。

表 4. 2. 2-3 蛍光 X 線による化学組成の分析結果

試料名	ig.loss※	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	合計
T0(急速)	0.30	60.38	15.99	8.00	7.22	3.26	0.00	2.61	1.55	0.65	0.10	0.16	100.22
SI(急速)	1.61	61.21	18.22	5.32	5.76	1.13	0.00	4.21	1.63	0.87	0.19	0.07	100.22
WI(遅延)	1.44	75.02	11.71	2.25	2.16	1.23	0.13	2.34	3.22	0.37	0.08	0.03	99.98
HE(遅延)	2.01	76.69	11.11	3.70	0.83	1.05	0.10	1.91	2.02	0.37	0.07	0.27	100.13
GK(遅延)	6.59	58.43	12.81	6.50	7.88	2.54	0.00	3.18	1.26	0.72	0.13	0.16	100.20
I0(非反応性)	43.64	0.46	0.18	0.12	54.88	0.60	0.01	0.00	0.01	0.03	0.02	0.00	99.95

注記) ※: 1050°C1 時間強熱における減量値

(単位: mass%)

(4) 考察

以上の偏光顕微鏡観察の結果から、急速膨張性として選定した 2 種類の骨材は、何れも安山岩であり、高い ASR 反応性を有する鉱物として、骨材 SI はクリストバライトおよびガラスであり、骨材 T0 ではトリディマイトであった。また、粉末 X 線回折ではガラスは検出はできないが、これら骨材が、それぞれクリストバライトおよびトリディマイトを含有することを粉末 X 線回折においても確認した。選定した急速膨張性骨材は、急速膨張性を示す異なった ASR 反応性鉱物を含有することから、試験における多様性という観点からも、これら骨材は、以後の試験に用いる急速膨張性骨材として適すると考えられる。

遅延膨張性として選定した 3 種類の骨材は、骨材 WI が砂質ホルンフェルス、骨材 HE が砂質片岩、骨材 GK が緑色片岩であり、原岩の種類や変成作用が異なるものであった。また、何れも ASR 反応性の高い鉱物を含有せず、かつ、ASR 反応性鉱物として遅延膨張性を示す隠微晶質石英を含有していた。したがって、選定した 3 種類の骨材は、以後の試験に用いる遅延膨張性骨材のとして適すると考えられる。

一方、非反応性として選定した骨材は、方解石からなる石灰岩であり、ASR 反応性鉱物を含有しないことから、ASR 反応性はないと考えられる。

表 4. 2. 2-4 に、選定した骨材の岩石学的特徴を纏める。

表 4.2.2-4 選定した骨材の岩石学的特徴

分類		試料名 (地域)	岩石名	ASR 反応性鉱物
反応性 骨材	急速	T0 (北海道)	安山岩	トリディマイト
	膨張性	SI (北陸)	安山岩	クリストバライト、ガラス
	遅延 膨張性	WI (関東)	砂質ホルンフェルス	隠微晶質石英
		HE (四国)	砂質片岩	隠微晶質石英
		GK (九州)	緑色片岩	隠微晶質石英
非反応性骨材		I0 (九州)	石灰岩	(含有しない)

4.2.3 骨材の試験方法の比較検討

(1) 国内外の骨材試験方法の比較

1) 目的

本項では、骨材試験の実証試験として、4.2.1 項で選定した骨材を用いて、国内の試験方法として従来から行われている試験方法と、最新知見に基づき提案されている外国の試験方法を比較し、急速膨張性骨材と遅延膨張性骨材に対する有効性を確認する。

まず、国内外の ASR 試験法とその課題を抽出し、本試験の目的に合致する試験方法を検討し、その結果を踏まえ試験法を一部変更し試験を開始した。

2) 使用セメントの分析

使用するセメント中のアルカリ量を確認するため、蛍光 X 線分析により化学組成を確認した。また、使用するセメントの特性を把握しておくため、基礎データとしてリートベルト解析により鉱物組成の定量分析を行った。使用セメントは、市販の太平洋セメント製 普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³、比表面積：3320cm²/g）であり、後述する ASR 反応性試験で実施した試験（JIS モルタルバー法¹³、RILEM AAR-2¹⁴（本業務では ASTM C1260 を採用）、AAR-3¹⁵および AAAR-4¹⁶）では、何れも同じロットのセメントを用いた。

(a) 方法

化学組成の分析は、(株)リガク社製の蛍光 X 線分析装置（ZSX primus II）を使用し、JIS R 5204「セメントの蛍光 X 線分析方法」に準拠した。

一方、リートベルト解析によるセメント鉱物の定量分析は、粉末 X 線回折装置 D8-Advance（Bruker AXS 社製）を用い、星野らの手法に準拠した¹⁷。

なお解析ソフトは、TOPAS（Bruker AXS 社製）を用い、以下の鉱物について定量した。

【リートベルト解析における定量対象鉱物】

エーライト（C₃S）、ビーライト（C₂S）、アルミネート（C₃A）、フェライト（C₄AF）、フリーライム（f. CaO）、ペリクレーズ（MgO）、二水石膏（Gyp.）、半水石膏（Bas.）、カルサイト（Calcite）

¹³ JIS モルタルバー法：JIS A 1146 “骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）”，日本で広く用いられている骨材のアルカリシリカ反応性試験方法。

¹⁴ RILEM AAR-2: “Detection of potential alkali-reactivity - Accelerated mortar-bar test method for aggregates”，RILEM が提唱する潜在的アルカリ反応性を検出するモルタルバーを用いた加速試験。加速条件（80℃1N-NaOH 溶液に 14 日浸漬）、膨張率の判定基準は ASTM C1260 と同じ。

¹⁵ RILEM AAR-3: “Detection of potential alkali-reactivity - 38℃ test method for aggregate combinations using concrete prisms”，RILEM が提唱する潜在的アルカリ反応性を検出するコンクリートプリズムを用いた試験。

¹⁶ RILEM AAR-4: “Detection of potential alkali-reactivity - 60℃ test method for aggregate combinations using concrete prisms”，RILEM が提唱する潜在的アルカリ反応性を検出するコンクリートプリズムを用いた加速試験。温度を 60℃に高めて膨張を加速する。

¹⁷ 星野清一，平尾宙，山田一夫：“非晶質混和剤を含むセメントの鉱物の定量における X 線回折リートベルト法の適用”，セメント・コンクリート論文，No. 59，pp. 14-21（2005）

定量した鉱物のうち、セメントの主要成分である C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、および C_4AF 以外の鉱物の定量値は参考程度の値である。

(b) 結果

蛍光 X 線によるセメント化学組成の分析結果を表 4. 2. 3-1 に、リートベルト解析によるセメント鉱物組成の定量分析結果を表 4. 2. 3-2 に示す。

セメント中のアルカリ量 (R_2O) は、 Na_2O 換算で 0.55mass%であった。この値は、JIS R 5210 「ポルトランドセメント」に規定される普通ポルトランドセメントの範囲（全アルカリ Na_2O_{eq} が 0.50 ± 0.05 、 $Na_2O : K_2O = 1:1 \sim 1:2.5$ ）を満足した。

表 4. 2. 3-1 蛍光 X 線によるセメント化学組成の分析結果

ig. loss _※	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	合計
2.32	20.53	5.13	3.02	64.24	0.91	2.12	0.34	0.33	0.28	0.43	0.09	99.74

注記) ※ : 975°C1 時間強熱における減量値

(単位 : mass%)

表 4. 2. 3-2 リートベルト解析によるセメント鉱物組成の定量分析結果 a

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	f. CaO	MgO	Gyp.	Bas.	Calcite
56.0	17.9	8.5	10.0	0.0	0.1	0.7	1.6	5.2

(単位 : mass%)

3) ASR 反応性試験

(a) 方法

本項で実施した試験項目と各試験方法における ASR 判定に関する課題、本業務での実施要領を以下に記す。

a) 試験項目および ASR 判定に関する課題

(i) JIS 化学法 (JIS A 1145)

JIS A 1145 「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (化学法)」は、150~300 μm に粒度を調整した骨材を 80°C、1 規定の NaOH 水溶液中に 24 時間浸漬し、骨材から NaOH 水溶液中に溶出した SiO_2 の量 (溶解シリカ量:Sc) と、試験中の NaOH 水溶液中のアルカリ濃度の低下量 (アルカリ濃度減少量:Rc) を測定するものである。判定基準は以下の通りである。

- ① Sc が 10mmol/L 以上で、Rc が 700mmol/L 未満の範囲では、Sc が Rc 未満となる場合、その骨材を「無害」と判定し、Sc が Rc 以上となる場合、その骨材を「無害でない」と判定
- ② Sc が 10mmol/L 未満で、Rc が 700mmol/L 未満の場合、その骨材を「無害」と判定
- ③ Rc が 700mmol/L 以上の場合、判定しない

なお JIS 規格では、化学法で「無害でない」と判定された骨材でも、モルタルバー法 (JIS A 1146) の試験結果が「無害」と判定された場合は、その骨材は「無害」の扱いとなる。

JIS 化学法は、短時間で結果が得られるため、広く用いられているが、同一産地の骨材であっても試験結果に大きなバラツキが生じる¹⁸、遅延膨張性骨材の検出ができないこと¹⁹等の課題が指摘されている。

(ii) JIS モルタルバー法 (JIS A 1146)

JIS A 1146 「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (モルタルバー法)」は、セメントの等価アルカリ量 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ が 1.2% になるように、NaOH を添加したモルタル供試体 (4×4×16cm) を、湿気箱 (温度 40°C、相対湿度 95%以上) 中に保存する方法である。所定の材齢 (2 週、4 週、8 週、3 ヶ月および 6 ヶ月) でモルタルの膨張量を測定する。6 ヶ月後に 0.100% 未満の場合は「無害」とし、0.100% 以上の場合 (もしくは 3 ヶ月で 0.050% 以上の場合) には「無害でない」と判定する。

この方法は、日本で広く用いられているが、隠微晶質石英が含まれる等の遅延膨張性骨材を検出できないこと、反応性の高い骨材のペシマム現象を考慮できないこと、温度が低く促進が足りないこと、試験期間中に供試体内部より比較的多量の水酸化物イオンが溶出すること等の問題点が挙げられている¹⁹。

¹⁸ 社団法人日本コンクリート工学協会: “作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書”, pp. 87-96 (2008)

¹⁹ 社団法人日本コンクリート工学協会: “ASR 診断の現状とあるべき姿研究会報告書”, pp. 272-284 (2014)

(iii) RILEM AAR-2 (ASTM C1260)

RILEM AAR-2 「Detection of potential alkali-reactivity - Accelerated mortar-bar test method for aggregates」²⁰は、温度 80°C の 1N の NaOH 溶液中にモルタル供試体 (25×25×285mm) を浸漬させる方法である。判定基準は、促進材齢 14 日間の膨張率で定められ、0.1%以下を「無害」、0.1～0.2%を「不明瞭」、0.2%以上を「有害」と判定する。

この方法は、ASR 反応性評価に関する国際的なスクリーニング手法として用いられており、供試体成型後 16 日で結果が得られ、迅速な試験方法と言える。しかし、NaOH 濃度が高く促進条件が厳しすぎることで、中部地区のチャートが有害判定できないこと、粒径ペシマムを検出できないこと等が課題として挙げられる²¹。

また、AAR-2 は ASTM C1260 「Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)」を包含した試験法と考えられる。これは、AAR-2 では、試験に用いるために調整する骨材粒度として、「A ふるい」、「B ふるい」、および「C ふるい」の何れかを用いて粒度調整する方法が示されているが、「B ふるい」を用いた粒度は ASTM C1260 に規定される粒度と同じである。また、RILEM AAR-2 では、2 つの供試体サイズ (AAR-2.1 では 25×25×285mm、AAR-2.2 では 40×40×160mm) が規定されているが、AAR-2.1 で規定される供試体サイズは ASTM C1260 で示される供試体サイズと同じである。AAR-2 と ASTM C1260 の違いは、供試体の作製において、骨材セメント比が AAR-2.1 では 2.25 に対し、ASTM C1260 では 2.45 と差異があり、また、基長 (初期値) の測定条件に若干の差異がある程度である。従って、AAR-2.1 「C ふるい」を用いた方法は ASTM C1260 の試験法とほぼ同等とみなすことができると考えられる。

一方、AAR-2 では、これら異なった粒度、異なった供試体サイズを許容している。試験は 1N NaOH への浸漬であるため、供試体サイズが大きくなれば、当然、外部からのアルカリの浸透に時間を要することが考えられるが、判定基準は先に述べたように AAR-2 は ASTM C1260 と同じである。既往の知見²²では、供試体サイズの異なる AAR-2 の比較を行っているが、明確な結果は得られていない。また、AAR-2 では、供試体の作製法などの細部に規定が無く、試験者によって結果に影響を及ぼす可能性も否定できない。

(iv) RILEM AAR-3 および AAR-4

RILEM AAR-3 「Detection of potential alkali-reactivity - 38°C test method for aggregate combinations using concrete prisms」²³は、75×75×250mm のコンクリート

²⁰ RILEM TC 219-ACS: “Detection of potential alkali-reactivity-Accelerated mortar-bar test method for aggregates”, RILEM Recommended Test Method: AAR-2, (2014)

²¹ 岩月栄治, 森野奎二: “ASTM C1260 及び JIS A5308 による ASR モルタルバーの膨張挙動と微細構造”, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 687-692 (2002)

²² Lindgard, J. et al: “The EU “PARTNER” Project-European standard tests to prevent alkali reaction in aggregates:Final results and recommendations”, Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp.611-635 (2010)

²³ RILEM TC 219-ACS: “Detection of potential alkali-reactivity - 38°C test method for

プリズムを製作し、底部に水を張った養生容器に供試体を入れ、 $38\pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温槽内で養生を行う方法である。コンクリート中のアルカリ総量は $5.5\text{kg}/\text{m}^3$ とする。養生期間 2、4、13、26 および 52 週で膨張量を測定し、その膨張量の大小からアルカリシリカ反応性を評価する。室内試験としては、現時点で最も信頼されている試験方法である²⁴。

一方、RILEM AAR-4.1 「Detection of potential alkali-reactivity - 60°C test method for aggregate combinations using concrete prisms」²⁵は、RILEM AAR-3 と同様、コンクリート中のアルカリ総量を $5.5\text{kg}/\text{m}^3$ とし、 $75\times 75\times 250\text{mm}$ のコンクリートプリズムを製作して、底部に水を張った容器に供試体を入れる操作は同じであるが、養生温度($60\pm 2^{\circ}\text{C}$)と測定材齢(養生期間 5、10、15 および 20 週で膨張量を測定)が異なる。また、 60°C の高温環境で加速するため、水分逸散の対策として、加温する養生槽は加湿され、さらに、その中に底部に水を張ったステンレス製の養生容器に供試体を入れて養生することが示され、また、養生中に養生容器内の水滴が供試体に直接当たらないような構造を採用している。

(iii)項までに述べた試験方法は、骨材の ASR 反応性を評価する方法に対し、この方法はコンクリートにして評価する方法であるが、RILEM AAR-3 および AAR-4 の記載内容は、コンクリートの調合および骨材の混合率が限定されており、コンクリート調合の ASR 反応性を評価するものではなく、モルタルバー法と同様に骨材の ASR 反応性を評価する方法となっている。したがって、ペシマム現象の評価や混和材による抑制効果の評価が困難である。また、試験期間が長期(AAR-3 の場合は 0.5~2 年、AAR-4 の場合は 20 週)であり、その間に水分の逸散とアルカリ溶脱の影響で、膨張を過小評価している可能性が指摘されている^{26, 27}。

aggregate combinations using concrete prisms” , RILEM Recommended Test Method: AAR-3, (2011)

²⁴ 独立行政法人原子力安全基盤機構: “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-Report Series, JNES-RE-2013-2050, (2014)

²⁵ RILEM TC 219-ACS: “Detection of potential alkali-reactivity - 60°C test method for aggregate combinations using concrete prisms” , RILEM Recommended Test Method: AAR-4, (2011)

²⁶ 井上祐一郎, 佐川康貴, 川端雄一郎: “コンクリートの ASR 促進膨張試験結果にアルカリ溶脱が及ぼす影響” , 土木学会年次学術講演会講演概要集 第 5 部, 65 巻, pp. 545-546 (2010)

²⁷ Yamada, K et al: “CPT as an evaluation method of concrete mixture for ASR expansion” , Construction and Building Materials, Vol. 64, pp. 184-191 (2014)

b) ASR 反応性試験方法の特徴と課題

a) 項で挙げた特徴と課題を表 4. 2. 3-3 にまとめて示す。これらの課題を踏まえ、RILEM AAR-3 および AAR-4 で記載されている方法の一部を変更して試験を実施した。変更した内容と本業務での実施条件は c) 項で述べる。

表 4. 2. 3-3 ASR 反応性試験方法の特徴と課題

	試験概要	特徴	課題
JIS 化学法	150～300 μm に調整した骨材 80℃1N-NaOH 溶液に浸漬	早期に結果が分かる。	・急速膨張性骨材に適するが、遅延膨張性骨材には不適。
JIS モルタルバー法	モルタルバー 40℃、湿空養生	日本ではより信頼性の高い方法で、化学法と判定結果が異なる場合は、モルタルバーの結果を優先。	・判定に 6 ヶ月要する。 ・急速膨張性骨材には適するが、ペシマム現象を検出できない。 ・遅延膨張性骨材には適さない。
RILEM AAR-2 (ASTM C1260)	モルタルバー 80℃1N-NaOH 溶液に浸漬 (ASTM C1260 とほぼ同等の試験法を選択できる)	供試体成型後 16 日で結果が得られる。	・加速条件が厳しく、多くの骨材が反応性となる。 ・粒径ペシマムを検出できない。 ・ある種のチャートは検出できない。 ・用いる試料の粒度、試験体サイズに選択枝があるが、その評価が明確となっていない ・試験の詳細が規定されていない
RILEM AAR-3	コンクリートプリズム 38℃湿空養生 (アルカリ総量:5.5kg/m ³)	室内試験としては最も信頼されている試験方法。	・判定に 1～2 年要する。 ・供試体の湿分保持とアルカリ溶脱に課題がある。 ・骨材試験であり、コンクリート調合が国内で用いられている調合とかけ離れている。
RILEM AAR-4	コンクリートプリズム 60℃湿空養生で工夫された養生層/容器を使用 (アルカリ総量:5.5kg/m ³)	温度を 60℃に高めて膨張を加速する。試験期間は 20 週。	・供試体の湿分保持とアルカリ溶脱に課題がある。 ・骨材試験であり、コンクリート調合が国内で用いられている調合とかけ離れている。

c) 本業務での実施条件

a)項で挙げた試験方法のうち、JIS 化学法およびモルタルバー法は、JIS の規定から変更せずに、外国の試験方法 (RILEM AAR-2、AAR-3 および AAR-4) は、a)および b)項で述べた試験方法の特徴と課題を踏まえて、以下の内容に変更した手順で実施した。

(i) RILEM AAR-2 (ASTM C1260)

a)項で述べたように、RILEM AAR-2 と ASTM C1260 は、浸漬する溶液の条件、膨張率の判定基準が同じであるが、ASTM C1260 では試験手順が詳細に規定されているのに対し、RILEM AAR-2 では選択肢がある。手順によって試験結果が左右されることが考えられるため、本業務では ASTM C1260 の試験規格に準拠することとした。なお ASTM C1260 では、材齢 14 日における膨張率で ASR 反応性を判定するが、遅延膨張性骨材の反応性を確認するため、本業務では材齢 28 日まで測定した。

(ii) RILEM AAR-3 および AAR-4

① コンクリート調合

日本国内で製造されている普通コンクリートの単位水量は、コンクリートの耐久性を確保する観点から、単位水量の上限値を日本建築学会では $185\text{kg}/\text{m}^3$ 、土木学会では $175\text{kg}/\text{m}^3$ と定められている。これに対し、RILEM AAR-3 および AAR-4 に記載の単位水量は、 $220\text{kg}/\text{m}^3$ であり、国内の普通コンクリートとかけ離れた値となっている。

そこで本業務では、国内で用いられている実用的な調合に変更し、コンクリートの単位水量、単位セメント量および粗骨材粒度は、既往の実績がある以下の条件で、骨材種類によらず同じとした。なお、目標スランプは $8\sim 18\text{cm}$ 、空気量は $4.5\pm 1.5\%$ とし、フレッシュ性状は混和剤 (減水剤および AE 剤量) の添加量で調整することとした。

- 単位水量 : $160\text{ kg}/\text{m}^3$ (RILEM 記載値 : $220\text{kg}/\text{m}^3$)
- 単位セメント量 : $320\text{ kg}/\text{m}^3$ (RILEM 記載値 : $440\text{kg}/\text{m}^3$)
- 粗骨材粒度 : $20\text{-}10\text{mm}:10\text{-}5\text{mm} = 6:4$ (反応性、非反応性骨材ともに)

ここで、本業務では単位セメント量を $320\text{kg}/\text{m}^3$ としたのに対し、RILEM の記載値は $440\text{kg}/\text{m}^3$ となっているが、膨張は単位セメント量に依存しないとの既往の知見²⁸があることから、試験結果に影響はないと考えた。

② 反応性骨材の混合率

RILEM AAR-3 および AAR-4 では、骨材の混合率が限定された記載となっており、ペシマム現象の評価が困難である。特に急速膨張性の骨材では、ペシマム現象により、より顕著な反応性を示すことがある。そこで本業務では、骨材中の反応性骨材の混合比率を、遅延

²⁸ Lindgard, J., Andic-Cakir, O., Fernandes, I., Ronning, T.F., Thomas, M.D.A. : "Alkali-silica reactions (ASR) : Literature review on parameters influencing laboratory performance testing", Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp. 223-243 (2012)

膨張性および急速膨張性それぞれで、以下の通りとした。

(遅延膨張性) S : 石灰石 G : 反応性骨材 100%

(急速膨張性) S : 石灰石 G : 反応性骨材 30% 非反応性骨材 70%

ここで、今回入手した急速膨張性骨材と同じ産地の骨材を用いた ASR に関する既往研究において、骨材混合率と膨張率の関係を試験し、反応性骨材使用率 30%で膨張率が最大となった結果²⁹が示されている。このことから、急速膨張性の反応性骨材の混合比率は、30%とした。

③ 測定材齢

RILEM AAR-3 と AAR-4 は、養生温度の他、測定材齢が異なる。しかし、両者を養生温度の観点で比較評価する際、同一材齢とする方が望ましく、また、測定間隔が長くなっても、膨張挙動の評価には影響を及ぼさないと考え、測定材齢は RILEM AAR-4 に準じて、以下の通りに設定した。

・測定材齢：2(急速のみ)、5、10、15、20、26 週（以降、2 ヶ月毎）

なお、RILEM AAR-4 における基長測定後の材齢は、規格上は 5 週であるが、急速膨張性骨材は比較的短い期間で反応することから、急速膨張性骨材の水準のみ、材齢 2 週での測定を追加した。

④ アルカリラッピング

前述の通り、RILEM AAR-3 および AAR-4 は、供試体からのアルカリ溶脱が指摘されており、骨材の違いによるアルカリ濃度依存性の影響を把握できなくなる可能性がある。そこで本業務では、試験に供する 5 試料 (TO、SI、WI、HE、GK) 全ての水準で、それを補う条件 (アルカリラッピング) を採用することとした。アルカリラッピングは、アルカリ溶液を含む不織布を供試験体に巻き、フィルムラッピングして養生する方法である³⁰。ただし、試験ではアルカリラッピングの有無による影響を比較評価するため、「(2) コンクリートプリズム試験の整備」の項で、アルカリラッピングを行わない水準を設け、アルカリ溶脱量を確認することとした。アルカリラッピングの濃度 (NaOH 濃度) は、日本コンクリート工学会「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」で示されてされている方法³⁰に準じて、1.5mol/l とした。

c) 変更内容の整理

²⁹ 井上祐一郎，濱田秀則，川端雄一郎，山田一夫：“ペシマム現象を生じる骨材を用いたモルタルのフライアッシュによる ASR 抑制効果”，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32，No. 1，pp. 953-958 (2010)

³⁰ 社団法人日本コンクリート工学会：“ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書”，pp. 272-284 (2014)

b)項で述べた変更内容を整理するため、本業務における RILEM 試験方法の変更点を表 4.2.3-4 に示す。以降、本報告書では、AAR-2 については、ASTM C1260 (RILEM AAR-2 相当) と表記する。

表 4.2.3-4 本業務における RILEM 試験方法の変更点

試験方法	変更点	変更理由
AAR-2	ASTM C1260 に準拠	・ AAR-2 は試験での選択肢が多くあり、結果に影響するため、より厳格な C1260 に準拠
	試験期間を 14 日から 28 日に延長	・ 遅延膨張性の反応性を確認するため
AAR-3	調合(単位水量、セメント量および空気量)の変更	・ 国内の実用的な調合で実施するため ・ 膨張はセメント量に依存しないとの知見あり
	反応性骨材の混合率を設定(遅延)100% (急速)30%	・ 急速膨張性骨材は、ペシマム現象により、より顕著な反応を示すため
	測定材齢を AAR-4 に合わせて変更(2、5、10、15、20 および 26 週)	・ AAR-4 と比較評価するため
	アルカリラッピング(AW)の採用	・ AW なしでは、供試体からのアルカリ溶脱が指摘されているため
AAR-4	AAR-3 と同様に調合を変更	・ AAR-3 の欄で述べた理由と同じ
	反応性骨材の混合率を設定	・ AAR-3 の欄で述べた理由と同じ
	測定材齢に 2 週と 26 週を追加(2、5、10、15、20 および 26 週)	・ 急速膨張性の初期の膨張性を確認するため ・ 遅延膨張性の反応性を確認するため
	アルカリラッピング(AW)の採用	・ AAR-3 の欄で述べた理由と同じ

(b) 結果

a) JIS 化学法

化学法による判定結果を表 4. 2. 3-5 に、アルカリ濃度減少量と溶解シリカ量の関係を図 4. 2. 3-1 に示す。

判定の結果、急速膨張性では 2 種類が何れも「無害でない」となったが、遅延膨張性では骨材 HE と骨材 KG が「無害」、骨材 WI のみが「無害でない」となった。なお、骨材 WI では Sc が Rc を僅か 5mmol/L 上回り「無害でない」の判定に、骨材 HE では Sc が Rc を僅か 4mmol/L 下回り「無害」の判定となった。

表 4. 2. 3-5 化学法による判定結果

試料名	溶解シリカ量 (Sc) mmol/L	アルカリ濃度減少量 (Rc) mmol/L	判定
TO (急速)	637	100	無害でない
SI (急速)	447	170	無害でない
WI (遅延)	29	24	無害でない
HE (遅延)	32	36	無害
KG (遅延)	17	50	無害

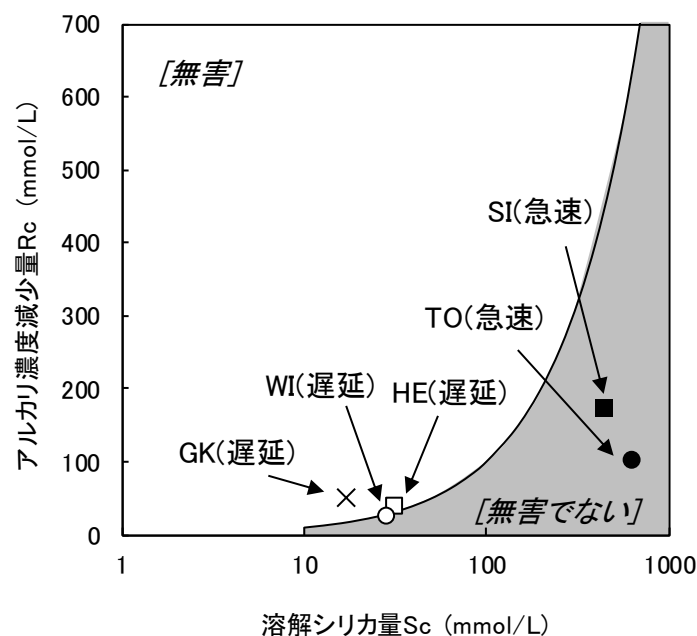


図 4. 2. 3-1 アルカリ濃度減少量 (Rc) と溶解シリカ量 (Sc) の関係

b) JIS モルタルバー法

現時点で得られている材齢8週までの結果を図4.2.3-2に示す。JISモルタルバー法は、材齢6ヶ月における膨張率で判定をするが、骨材T0（急速）については、材齢2週の時点で、「無害でない」の判定基準（膨張率0.100%）を上回っていた。

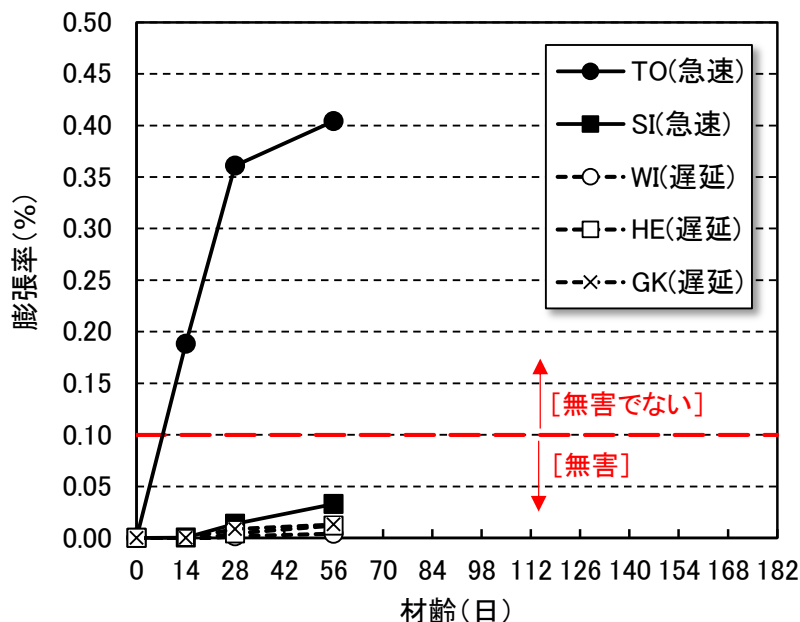


図4.2.3-2 JISモルタルバー法の測定結果 (材齢8週まで)

c) ASTM C1260 モルタルバー法 (RILEM AAR-2 相当)

ASTM C1260 (RILEM AAR-2 相当) によるモルタルバー法の測定結果を図4.2.3-3に示す。

試験の結果、材齢14日における膨張量は何れも0.2%を超えており、選定した5試料は全て「有害」と判定された。なお、急速膨張性の2種類（実線）は、比較的初期の材齢で0.2%を超えているのに対し、遅延膨張性の3種類（破線）は、急速膨張性に比べ緩やかに膨張する傾向にあった。

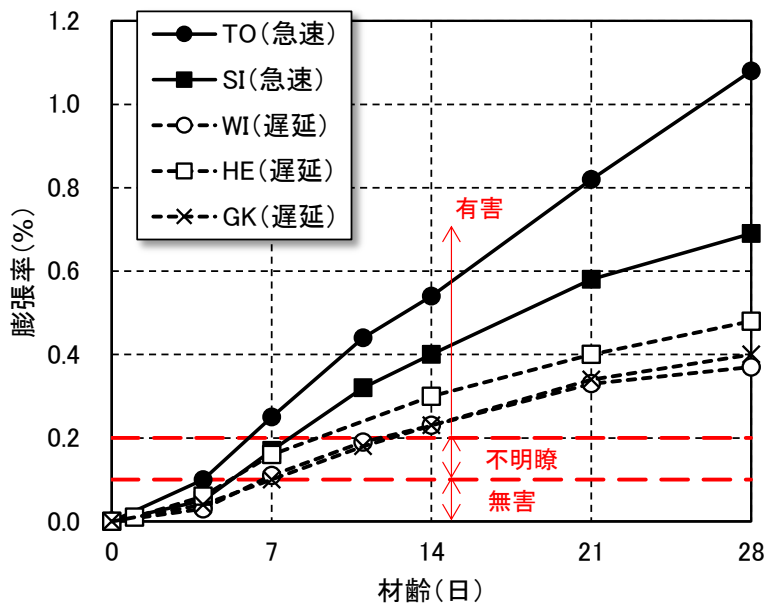


図 4.2.3-3 ASTM C1260 (RILEM AAR-2 相当) の試験結果

d) RILEM AAR-3 および AAR-4

使用した骨材の物理特性に関する試験結果の一覧を表 4.2.3-6 に示す。何れも、コンクリート練混ぜ時に用いた、20-10mm : 10-5mm=6:4 に粒度調整した試料で測定した。なお、骨材 HE (遅延) については、入手した骨材の粒径が 10mm 以上であったことから、破碎およびふるい分けによって粒度を調整した。

これら物理的試験の結果は、JIA A5308 のレディミクストコンクリート用骨材に示される物性値を満足するものであった。

表 4.2.3-6 骨材の物理試験結果の一覧

分類	骨材	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積 質量 (kg/L)	実積率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)
反応性	TO (急速)	2.69	2.65	1.52	1.60	60.4	6.61	—
	SI (急速)	2.62	2.58	1.59	1.53	59.3	6.61	—
	WI (遅延)	2.64	2.62	0.82	1.58	60.1	6.59	—
	HE (遅延)	2.70	2.68	0.52	1.60	59.7	6.68	—
	KG (遅延)	2.73	2.71	0.81	1.63	60.0	7.05	—
非 反応性	粗骨材	2.71	2.70	0.22	1.56	57.8	6.67	—
	細骨材	2.63	2.59	1.74	1.85	71.4	2.91	8.4

次いで、供試体の製作結果として、コンクリートの調合を表 4.2.3-7 に、フレッシュ性

状の測定結果を表 4.2.3-8 に示す。なお、供試体製作時の状況写真は、添付資料 5「CPT 試験用供試体の製作状況」にまとめて掲載する。

表 4.2.3-7 コンクリートの調合

骨材 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤量			
			水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材(G)		減水剤※1 (C×%)	AE 調整剤※2 (C×%)	
						反応性	非反応性			
TO(急速)	50.0	45.0	160	320	821	724	309	1.45	0.001	
SI(急速)						724	306	1.45	0.001	
WI(遅延)						1007	—	1.45	—	
HE(遅延)						1030	—	1.45	—	
KG(遅延)						1042	—	1.45	0.002	

注記) ※1：減水剤は、マスターポゾリス No. 70 を使用。

※2：AE 調整剤は、マスターエア 404。

表 4.2.3-8 フレッシュ性状測定結果

骨材 種類	フレッシュ性状		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	C. T. (°C)
TO(急速)	16.5	4.2	20
SI(急速)	14.5	4.2	21
WI(遅延)	15.5	4.0	20
HE(遅延)	15.0	4.6	20
KG(遅延)	17.5	3.5	21

RILEM AAR-3 および AAR-4 は、供試体の成型が完了し、試験に着手した。供試体の初期値の測定結果は、添付資料 6「CPT 測定データシート」に掲載する。ここでは、現時点で得られている促進養生からの材齢 2 週での測定結果を示す。膨張率の比較を図 4.2.3-4 に、質量変化の比較を図 4.2.3-5 に示す。何れも急速膨張性骨材の測定結果である。

試験の結果、骨材種類によらず、温度が高い条件 (RILEM AAR-4) の方が膨張率は大きくなったことから、少なくとも促進材齢 2 週までは、加温によって ASR の反応が促進されていることが分かった。なお、質量増加率については、少なくとも促進材齢 2 週までは、温度条件による差は認められなかった。

ここで、RILEM AAR-3 および-4 では、膨張量の判定基準が記載されていないが、既往の文献では^{31,32}、次の判定基準が記されている。

- RILEM AAR-3 : 材齢 1 年における膨張率が 0.05%未満であれば無害³¹
- RILEM AAR-4 : 材齢 20 週における膨張率が 0.04%未満であれば無害³²

図 4.2.3-4 に示した膨張率の結果は、まだ判定する材齢にはなっていないが、上記の判定基準に照合すると、AAR-4 では何れの骨材も「有害」の判定となる。

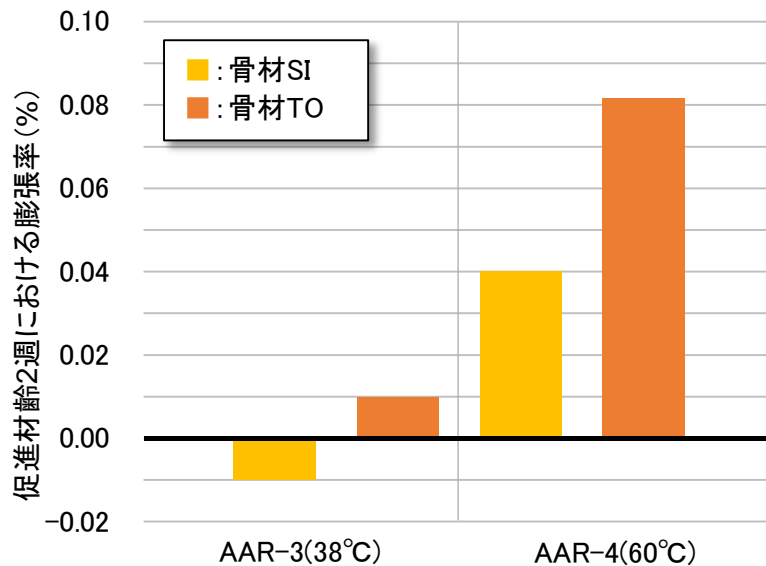


図 4.2.3-4 RILEM AAR-3 および AAR-4 の膨張率の比較 (促進材齢 2 週)

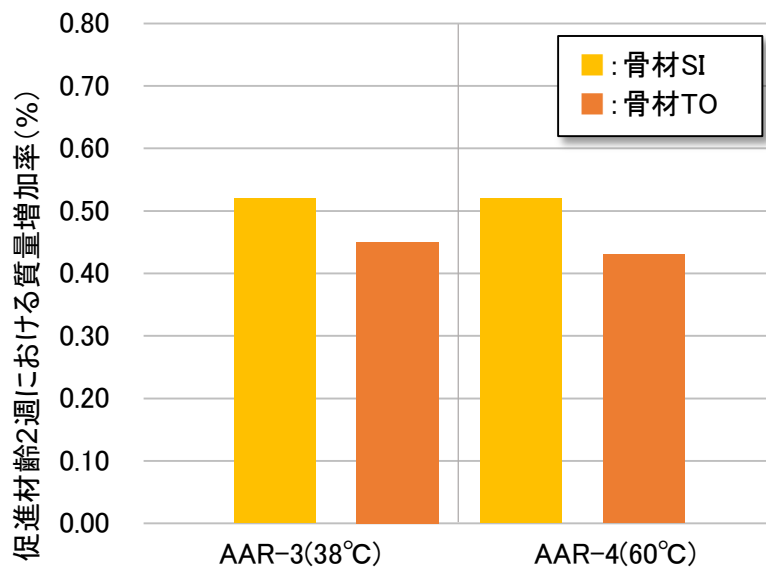


図 4.2.3-5 RILEM AAR-3 および AAR-4 の質量増加率の比較 (促進材齢 2 週)

³¹ Jan Lindgard, et al:” The EU ‘PARTNER’ Project -European standard test to prevent alkali reactions in aggregates:Final results and recommendations” , Cement and Concrete Research 40, pp. 611-635 (2010)

³² Jan Lindgard, et al:” Alkali-silica reaction(ASR)-performance testing:Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prizm size on alkali leaching and prizm expansion” , Cement and Concrete Research 53, pp. 68-90 (2013)

(c) 考察

現時点で得られている、ASR 反応性に関する判定結果の比較を表 4.2.3-9 に示す。

試験の結果、遅延膨張性の 2 種類 (HE および KG) は、JIS 化学法では「無害」となったが、ASTM C1260 (RILEM AAR-2 相当) では「有害」となった。試験に用いた遅延膨張性の 3 種類の骨材には ASR 反応性鉱物として隠微晶質石英が含まれている (4.2.2 項の偏光顕微鏡観察の結果) が、JIS 化学法では必ずしも「無害でない」との判定結果にはならないことが分かった。

これらのことから、ASR 反応性評価に関する国際的なスクリーニング手法である ASTM C1260 (RILEM AAR-2 相当) により、日本の急速膨張性骨材と遅延膨張性骨材の ASR 反応性を検出できると考えられる。

表 4.2.3-9 ASR 反応性に関する判定結果の比較

試験方法	急速膨張性骨材		遅延膨張性骨材		
	TO	SI	WI	HE	KG
JIS 化学法	無害でない	無害でない	無害でない	無害	無害
JIS モルタルバー法	(無害でない) (0.404%) ^{※1}	(測定中)	(測定中)	(測定中)	(測定中)
ASTM C1260 ^{※2} (RILEM AAR-2 相当)	有害 (0.54%)	有害 (0.40%)	有害 (0.23%)	有害 (0.30%)	有害 (0.23%)
RILEM AAR-3	(測定中)	(測定中)	(測定中)	(測定中)	(測定中)
RILEM AAR-4 ^{※2}	(有害) ^{※3} (0.082%)	(有害) ^{※3} (0.040%)	(測定中)	(測定中)	(測定中)

(注記) 括弧書きの判定結果は、判定材齢前に基準値を超えた水準。

※1: JIS モルタルバー法の欄にある数値は、材齢 8 週における膨張率 (判定基準は材齢 6 ヶ月で 0.100%以上で「無害でない」)。

※2: ASTM C1260、AAR-4 の欄にある数値は、材齢 14 日 (2 週) における膨張率。

※3: RILEM AAR-4 では、膨張率の判定基準が記載されていないが、ここでは、文献値³³ (材齢 20 週における膨張率が 0.04%未満で無害) に従って判定。

一方、RILEM AAR-3 と AAR-4 の比較では、促進材齢 2 週までの結果であるが、養生温度が高い RILEM AAR-4 の方が、AAR-3 より早く膨張挙動を示した。しかし、既往の知見では、促進試験の温度によって膨張量の終局点が異なり、60℃で促進された場合の膨張量は、38℃で促進された場合に比べ短い時間で収束するが、38℃の場合よりも低い膨張量で収束する

³³ Jan Lindgard, et al. :” Alkali-silica reaction (ASR)-performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prizm size on alkali leaching and prizm expansion” , Cement and Concrete Research 53, pp. 68-90 (2013)

との報告がある³⁴。

このように、ASR の膨張挙動は、温度、アルカリ総量といった環境要因の影響を大きく受ける。したがって、今後の膨張挙動の予測に向けては、反応性骨材の特徴と、環境条件による膨張への影響との関係を詳しく調べ、高経年化技術評価として適切な方法を ASR 反応性メカニズムの観点からも検証するための基礎データを集積することが重要と考えられる。以降の 4.2.3(2)項のコンクリートプリズム試験 (CPT) の整備では、環境要因として温度およびアルカリ量を挙げ、これらをパラメーターとした CPT を作製した。なお、4.2.3(2)項の CPT 試験では、本項で試験に供した 5 種類から、急速膨張性骨材 1 種類、遅延膨張性骨材 2 種類を選定している。

³⁴ Folliard, K.J., Ideker, J., Thomas, M.D.A., Fournier, B.: “Assessing Aggregate Reactivity Using the Accelerated Concrete Prism Tests”, Proceedings of Seventh CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Supplemental Papers, pp. 269-284 (2004)

(2) コンクリートプリズム試験の整備

1) 目的

環境要因が ASR に与える影響を評価するため、温度およびアルカリ量をパラメーターとした RILEM のコンクリートプリズム試験 (CPT) を実施し、ASR の長期挙動を予測する基本データを取得した。

2) 方法

(a) 対象試料

4.2.2 項で選定した 5 種類のうち、温度およびアルカリ量を変えた CPT 試験に用いる急速膨張性骨材 1 種類、遅延膨張性骨材 2 種類は、4.2.3(1) 項の「国内外の試験方法の比較」で得られている結果を踏まえ、急速膨張性は T0、遅延膨張性は WI および HE を選定した。選定理由は、以下の通りとした。

- ・急速膨張性 2 種類で、ASTM C1260 (RILEM AAR-2 相当) の材齢 14 日における膨張量を比較すると、T0 の方が膨張量は大きい。
 - ・遅延膨張性 3 種類で、ASTM C1260 (RILEM AAR-2 相当) の材齢 14 日における膨張量を比較すると、HE が最も膨張量が大きい。
 - ・JIS 化学法で、KG は「無害」であったのに対し、WI は「無害でない」と判定された。
- 以上のことから、急速膨張性は T0 を、遅延膨張性は WI と HE を用いることとした。

(b) アルカリ量および温度の条件

4.2.3(1) 項での実施水準も含めた CPT 試験の水準を表 4.2.3-10 に示した。

平成 26 年度の環境要因 (試験パラメータ) は、骨材の種類 (急速膨張性骨材 1 種類および遅延膨張性骨材 2 種類)、温度 (20、38 および 60℃ の 3 条件) およびアルカリ総量 (3.0、4.25 および 5.5kg/m³) とした。温度 20℃ の CPT は、4.2.3(1) 項の「(3) ASR 反応性試験」における AAR-3 と同様であり養生温度のみ 20℃ とし、温度 38℃ の CPT は AAR-3 と同様、温度 60℃ の CPT は AAR-4 と同様である。

なお、4.2.3(1) 項の「(3) ASR 反応性試験」で述べた通り、RILEM AAR-3 および AAR-4 では供試体からのアルカリ溶脱の影響を指摘されていることから、アルカリラッピング (AW) を施すこととした。ただし、試験ではアルカリラッピングの有無による影響を比較評価するため、T0 (急速膨張性) および WI (遅延膨張性) を用いた養生温度 60℃ (RILEM AAR-4) の試験でアルカリラッピングを行わない水準を設け、経時的に養生容器の底に溶出するアルカリ溶脱量を確認することとした。アルカリ溶脱量の測定材齢を表 4.2.3-11 に示した。

表 4.2.3-10 CPT 試験の水準

骨材 種類	アルカリ総 量 (kg/m ³)	温度(°C)		
		20	38	60
T0 (急速)	3.00	—	○	—
	4.25	—	○	—
	5.50	○	●	●*
WI (遅延)	3.00	—	—	○
	4.25	—	○	○
	5.50	○	●	●*
HE (遅延)	3.00	—	—	—
	4.25	—	○	○
	5.50	○	●	●

- : 4.2.3(1)項「国内外の骨材試験方法の比較」で実施
- * : アルカリラッピング (AW) なしも実施
- : 4.2.3(2)項で実施の水準

表 4.2.3-11 アルカリ溶脱量の測定材齢

アルカリラッピング(AW)有無	溶液採取材齢 (週)
AW なし(2水準:T0、WI、60°C)	(2急速のみ)、5、10、15、20、26
AW あり(AW なしと同じ骨材)	26のみ

(c) アルカリラッピングの濃度設定

前述の通り、供試体からアルカリが溶脱すると、骨材の違いによるアルカリ濃度依存性の影響を把握できなくなる。それを補うため、本業務ではアルカリラッピング (AW) を供試体に施すこととした。

AW の濃度は、日本コンクリート工学会「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」の方法に従い、アルカリ総量 5.5kg/m³ では 1.5 mol/l とした。しかし本項では、アルカリ量をパラメーターとするため、コンクリート中のアルカリ総量 (液相のアルカリ濃度) に応じて、AW の濃度を設定する必要がある。

ここで、液相のアルカリ濃度は、アルカリ総量と比例するとの既往の知見がある³⁵。実

³⁵ 川端雄一郎, 山田一夫, 松下博通: “セメント系材料により生成される水和物の相組成と ASR 膨張抑制効果の関係”, 土木学会論文集 E2, Vol. 69, No. 4 (2013)

際のコンクリート空隙水中のアルカリ濃度は、様々な要因で変化する可能性がある。このため、今後細孔溶液との平衡状態を検証する必要があるが、本業務では 1.5 mol/l に対し、アルカリ総量に応じた比例計算で AW の濃度を設定した。設定した値を以下に記す。

【アルカリラッピングの濃度設定】

5. 50kg/m³→1.50 mol/l

4. 25kg/m³→1.16 mol/l

3. 00kg/m³→0.818 mol/l

3) 結果

供試体の製作結果として、コンクリートの調合を表 4.2.3-12 に、フレッシュ性状の測定結果を表 4.2.3-13 に示す。なお、製作した供試体の写真は、添付資料 5 「CPT 試験用供試体の製作状況」 にまとめて掲載する。

表 4.2.3-12 コンクリートの調合

骨材種類	アルカリ総量 (kg/m ³)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤量	
				水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)		減水剤 ^{※1} (C×%)	AE 調整剤 ^{※2} (C×%)
							反応性	非反応性		
TO (急速)	3.00	50.0	45.0	160	320	821	724	309	1.45	0.001
	4.25									
	5.50									
WI (遅延)	3.00						1007	-	1.45	-
	4.25									
	5.50									
HE (遅延)	4.25						1030	-	1.45	-
	5.50									

表 4. 2. 3-13 フレッシュ性状測定結果

骨材 種類	アルカリ総量 (kg/m ³)	フレッシュ性状		
		スランプ (cm)	空気量 (%)	C. T. (°C)
T0 (急速)	3.00	17.0	4.0	20
	4.25	17.0	4.0	20
	5.50	16.5	4.2	20
WI (遅延)	3.00	17.5	4.5	20
	4.25	17.5	4.9	20
	5.50	15.5	4.0	20
HE (遅延)	4.25	17.5	4.9	20
	5.50	15.0	4.6	20

CPT の整備に関する試験は、供試体の成型が完了して養生を開始し、膨張率の測定に着手した。供試体の初期値の測定結果は、添付資料 6「CPT 測定データシート」に掲載する。ここでは、現時点で得られている、材齢 2 週での測定結果を示す。温度条件および AW 有無による膨張率および質量変化の比較を、図 4. 2. 3-6 および図 4. 2. 3-7 に、アルカリ総量の違いによる膨張率および質量変化の比較を、図 4. 2. 3-8 および図 4. 2. 3-9 に示す。何れも急速膨張性骨材 T0 の測定結果である。

まず、温度条件で比較した結果、60°C (RILEM AAR-4) の膨張率は、材齢 2 週時点で 0.08% 程度であったのに対し、20°C と 38°C (RILEM AAR-3) では 0.01% 程度であり、60°C とすることで、膨張が促進されていた。次いで、AW の有無で比較すると、膨張率は、「AW あり」より「AW なし」の方が大きいですが、質量増加率は「AW あり」の方が大きく、AW を施すことによって湿潤状態が保持されていることが確認された。なお、アルカリ総量による差は、材齢 2 週時点では認められなかった。

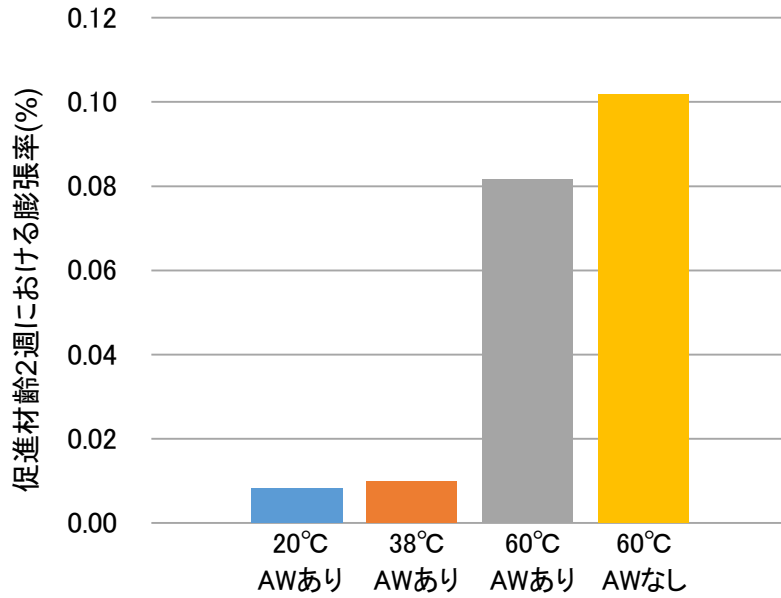


図 4. 2. 3-6 温度条件および AW 有無による膨張率の比較
(骨材 T0、アルカリ総量 5.5kg/m³)

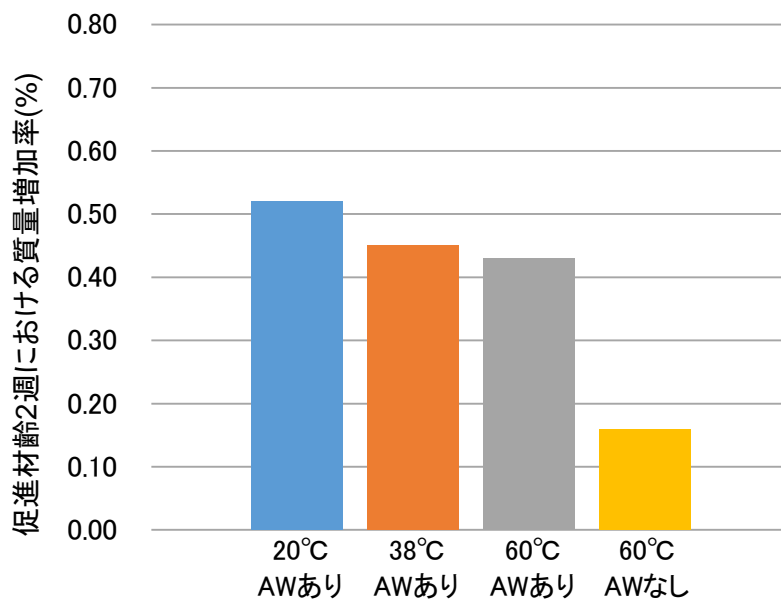


図 4. 2. 3-7 温度条件および AW 有無による質量増加率の比較
(骨材 T0、アルカリ総量 5.5kg/m³)

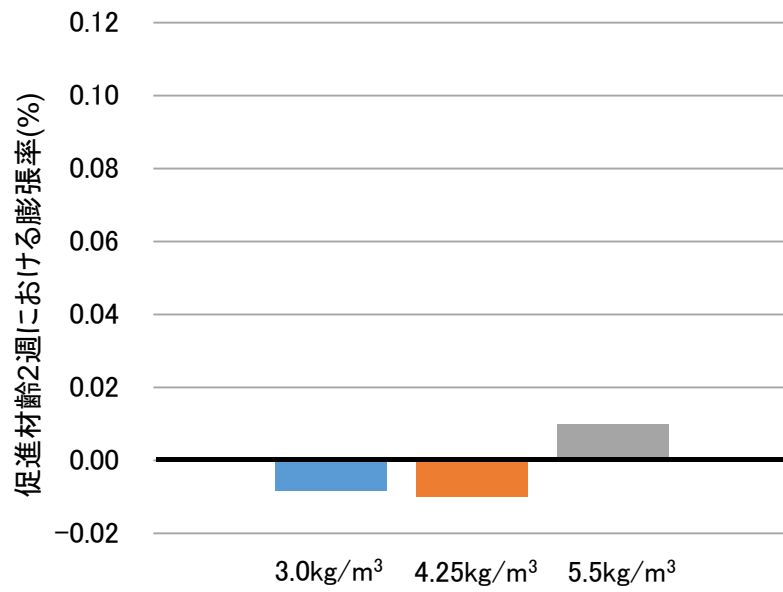


図 4. 2. 3-8 アルカリ総量による膨張率の比較 (骨材 T0、温度条件 : 38°C)

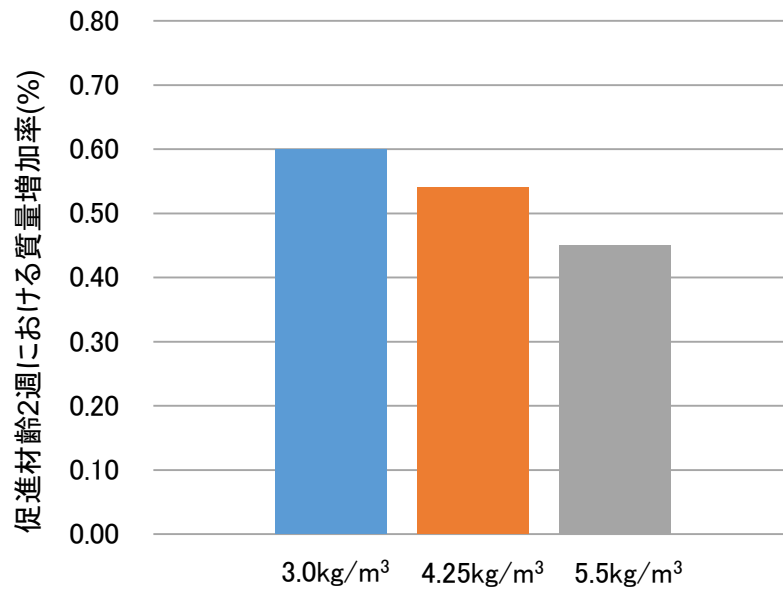


図 4. 2. 3-9 アルカリ総量による質量増加率の比較 (骨材 T0、温度条件 : 38°C)

4.2.4 まとめ

高経年化技術評価に関わるアルカリ骨材反応(ASR)において、新しい評価基準を策定することを目的とし、従来から国内で行われている試験法、および最新知見に基づいた外国の試験法を、国内で産出する ASR 反応性を有する骨材を用いて比較検討し、その有効性を確認することとした。また、ASR 反応性骨材の環境要因による反応性を把握し、高経年化技術評価に反映させるため、環境要因として骨材の温度およびアルカリ総量の影響を把握することとした。

以下に得られた知見をまとめる。

- ① 試験に用いる骨材として適すると考えられる骨材を選定し、入手した。選定は、以下の手順で行った。
 1. 日本における ASR 反応性骨材の状況、既往の文献等から候補地を選択
 2. 15 箇所の現地調査と 14 種類サンプル採取
 3. サンプル採取した骨材の ASR 反応性を評価するため、偏光顕微鏡を用いた ASR 反応性鉱物の確認、あるいは、スクリーニングとして ASTM C1260 試験を実施結果として、北海道から九州に跨る急速膨張性骨材 2 種類、遅延膨張性骨材 3 種類、および非反応性骨材 1 種類を選定し、ASR 反応性の試験に用いることができる量の各骨材を入手した。
- ② 入手した骨材は、岩石学的試験を行い、以下の特徴を有するものであった
 1. 急速膨張性骨材は、何れも安山岩で ASR 反応性の高いクリストバライト、トリディマイト、または火山ガラスを含む
 2. 遅延膨張性骨材は、砂質ホルンフェルス、砂質片岩、または緑色片岩であり、何れもゆっくり反応する陰微晶質石英を含む
 3. 非反応性骨材は石灰岩であり ASR 反応性鉱物を含有しない
- ③ 国内で従来から行われている試験方法として JIS 化学法および JIS モルタルバー法と、新知見に基づいた外国の試験方法として RILEM AAR-2 (本業務では同等の ASTM C1260 を採用)、AAR-3 および AAR-4 での ASR 評価の有効性を確認するため、選定した急速膨張性骨材と遅延膨張性骨材を用いて、これら試験における試験体を作製した。ASR 評価試験では長期間必要となるが、現在のところ、JIS 化学法では「無害」と判定される骨材であっても、ASTM あるいは RILEM 試験法では有害判定となる場合があることが確認された。今後、膨張の継続測定によって、外国で用いられている各試験の国内の骨材への適用性を評価できると考えられる。
- ④ 高経年化技術評価では ASR の長期挙動を予測することが求められる。骨材に潜在的な ASR 反応性があるとしても膨張するか否かは環境要因の影響を受ける。環境要因として、温度およびアルカリ総量が ASR 膨張に与える影響を把握するため RILEM AAR-3 および AAR-4 に準じたコンクリートプリズム試験 (CPT) を作製し、基本データとして各試験体の膨張挙動把握のための初期値を取得した。各試験体の ASR によ

る膨張は初期段階であるが、反応温度が高いほど、また、アルカリ総量が多いほど、早く膨張する傾向にあった。ASR 反応が進めば、用いた骨材の急速膨張性や遅延膨張性といった骨材特性や含有鉱物の特徴と、骨材の温度依存性、あるいはアルカリ濃度依存性が明らかとなり、構造物の劣化診断における将来の膨張予測に活用できる基本データが得られ、また、環境要因は構造物の部位によって異なることから、点検において評価すべき部位の特定にも活用できる可能性がある。

以上

添付資料 1 調査した採石場および周辺構造物の ASR 発生状況
<北海道 SK>



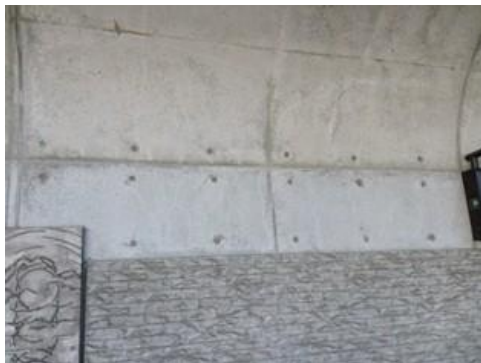
(a) 採石場



(b) 採石場



(c) 採取される骨材(粒度が細かく試験に適さない)



(d) 周辺構造物 A



(e) 構造物 A の拡大



(f) 周辺構造物 B(塗装されているが内部から劣化)



(g) 周辺構造物 C(凍害の可能性もある)



(h) 周辺構造物 D (防波堤)



(i) 周辺構造物 E



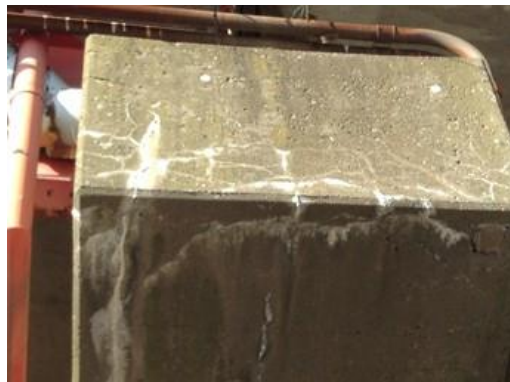
(j) 周辺構造物 F (道路側壁)



(k) 周辺構造物 F の拡大(採石場と同様の骨材が使用)



(l) 周辺構造物 G (桁が撤去された橋脚)



(m) 周辺構造物 H (橋脚張出し部)

添付図 1-1 北海道 SK の採石場および周辺構造物の ASR 発生状況

<北陸 GT>



(a) 採石場全景(現在は操業していない)



(b) 周辺の岩体



(d) 採取したサンプル(黒色のサンプル)



(e) 周辺構造物

添付図 1-2 北陸 GT の採石場および周辺構造物の ASR 発生状況

<北陸 W0>



(a) 採石場全景(現在は操業していない)



(b) 採取したサンプル

添付図 1-3 北陸 W0 の採石場および周辺構造物の ASR 発生状況

<北陸 SI>



(a) 採石場(岩種により、赤っぽい岩石と黒っぽい岩石があり酸化により赤色を呈すると考えられる)



(b) 採取したサンプル

添付図 1-4 北陸 SI の採石場および周辺構造物の ASR 発生状況

<北陸 SN>



採取したサンプル

(濃緑色を呈する、変質した安山岩。路盤材用骨材と思われ粒径が大きい)

添付図 1-5 北陸 SN の採石場および周辺構造物の ASR 発生状況

<北陸 YK>



(a) 採石場全景



(b) 採取したサンプル (玄武岩質なガラス質の岩石)

添付図 1-6 北陸 YK の採石場および周辺構造物の ASR 発生状況

<四国 ST>



(a) 採石場全景（現在は採掘されていない）



(b) 露頭(黒色のガラス質安山岩と弱風化した灰色の安山岩(写真右は黒色、灰色の岩石)

添付図 1-7 四国 ST の採石場および周辺構造物の ASR 発生状況

<関東 WI>



(a)採石場全景(1)



(b)採石場全景(2)



(c)切羽



(d)破碎された岩石



(e)岩石(色調は異なるが均質な砂岩)



(f)白色物は圧力で層状に染出たと考えられるシリカ

添付図 1-8 関東 WI の採石場および周辺構造物の ASR 発生状況

<関東 M0>



(a) 採石場全景



(b) 産出する砂岩

(黒色、灰色など不定形な層状に産出)

添付図 1-9 関東 M0 の採石場および周辺構造物の ASR 発生状況

<四国 HE>



採石場と破碎／粒度調整後の骨材 岩石は特徴的な輝きを有する雲母が存在すると推定される泥質～砂質の雲母片岩でホルンフェルスと考えられる。

添付図 1-10 四国 HE の採石場および周辺構造物の ASR 発生状況

<四国 YT>

写真なし。HE と数百 m の距離にあるが、変成作用をほとんど受けていない砂岩、片岩、チャート類と推定される骨材であり、ASR 反応性は低いと考えられたため、サンプリングを行っていない。

<四国 DS>

写真なし。主体は花崗岩であるが、西部の寒霞溪は玄武岩からなる。土庄付近に採石場があり、片岩と思われる岩石サンプルを採取した。

<九州 GK>



(a) 採石場全景



(b) 骨材ストックヤード



(c) 周辺の岩体(緑色の片岩、黒色の岩石)



(d) 変成作用によりシリカ脈岩石



(e) 周辺構造物 A(土留壁)



(f) 周辺構造物 B(ダム)



(g) 構造物 B に生じたひび割れ(3~5mm) (h) 構造物 B 風化浸食された緑色片岩の骨材が認められる

添付図 1-11 九州 GK の採石場および周辺構造物の ASR 発生状況

<九州 I0>



(a) 鉱山全景



(b) 鉱山全景



(c) 採掘/一次破碎された岩石



(d) 破碎/粒度調整で製造された骨材(石灰石)



(e) 周辺構造物 A (坑道トンネル入口)



(f) 周辺構造物 A (3~4mm)



(g) 周辺構造物 B(よう壁) 何れの構造物も粗骨材は石灰石であり、かつ、細骨材は海砂であり細骨材が反応したと推定される



(h) 周辺構造物 C (ダム)



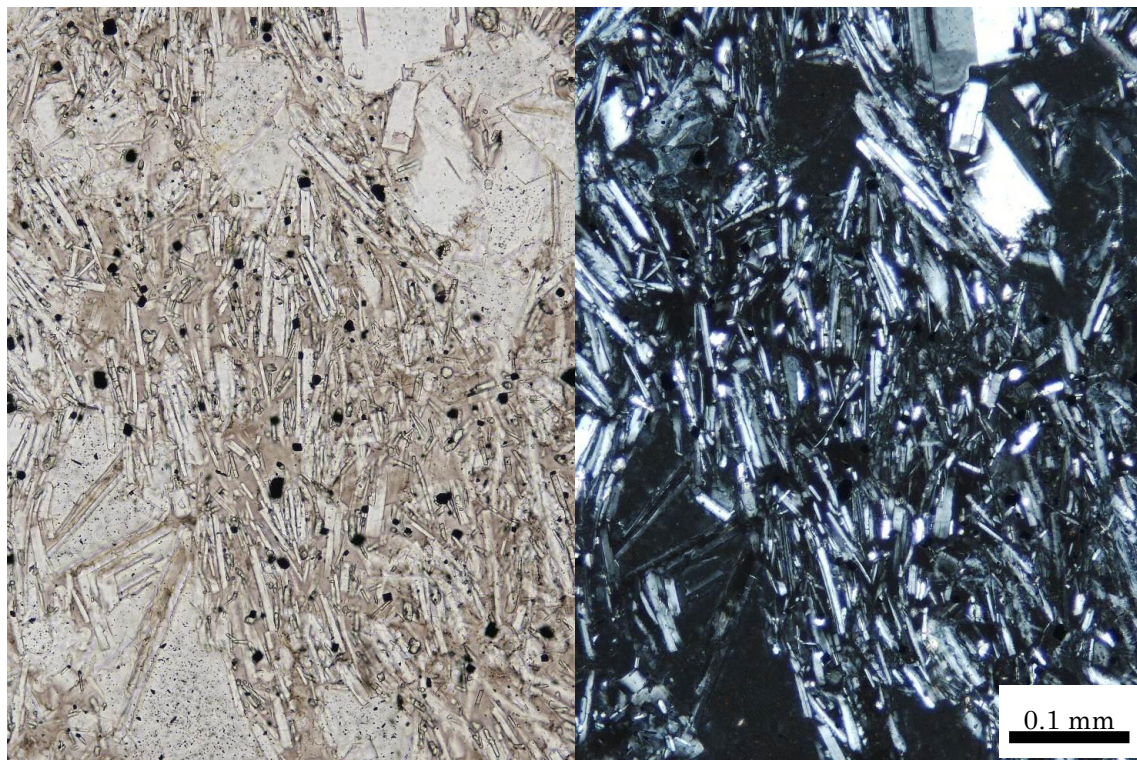
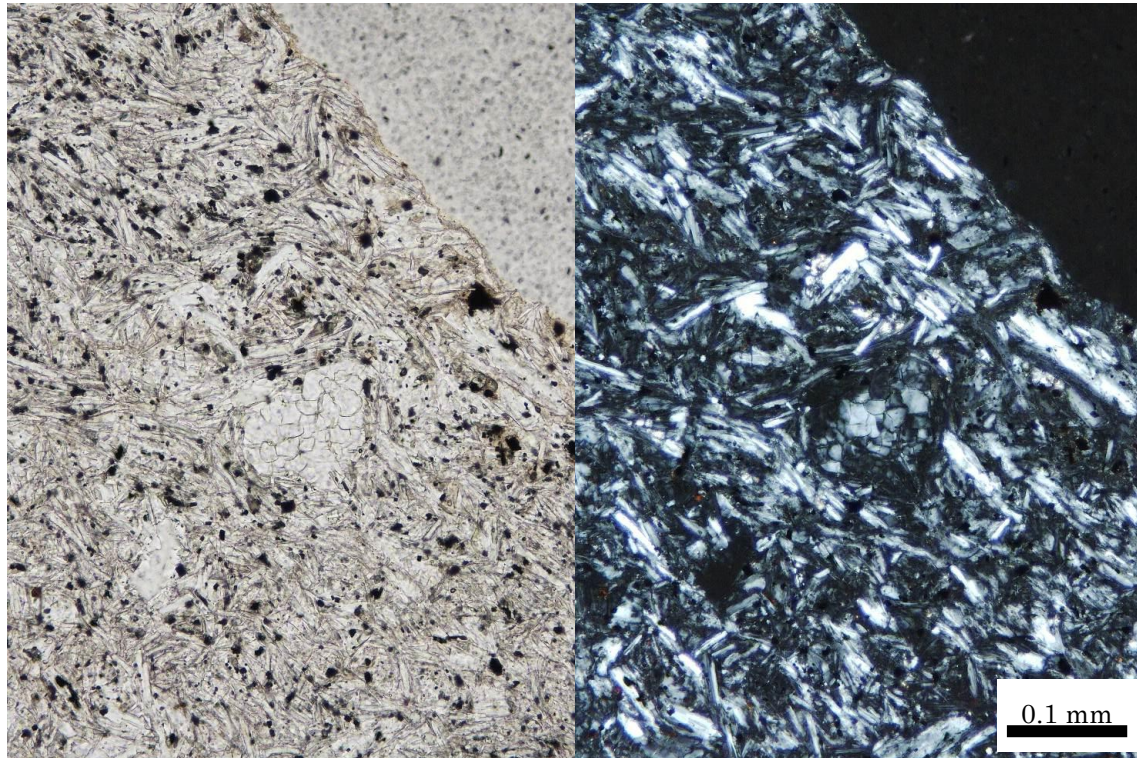
(i) 周辺構造物 D (河川敷ブロック)

(これらは反応した岩種は(g)と同じと考えられる)

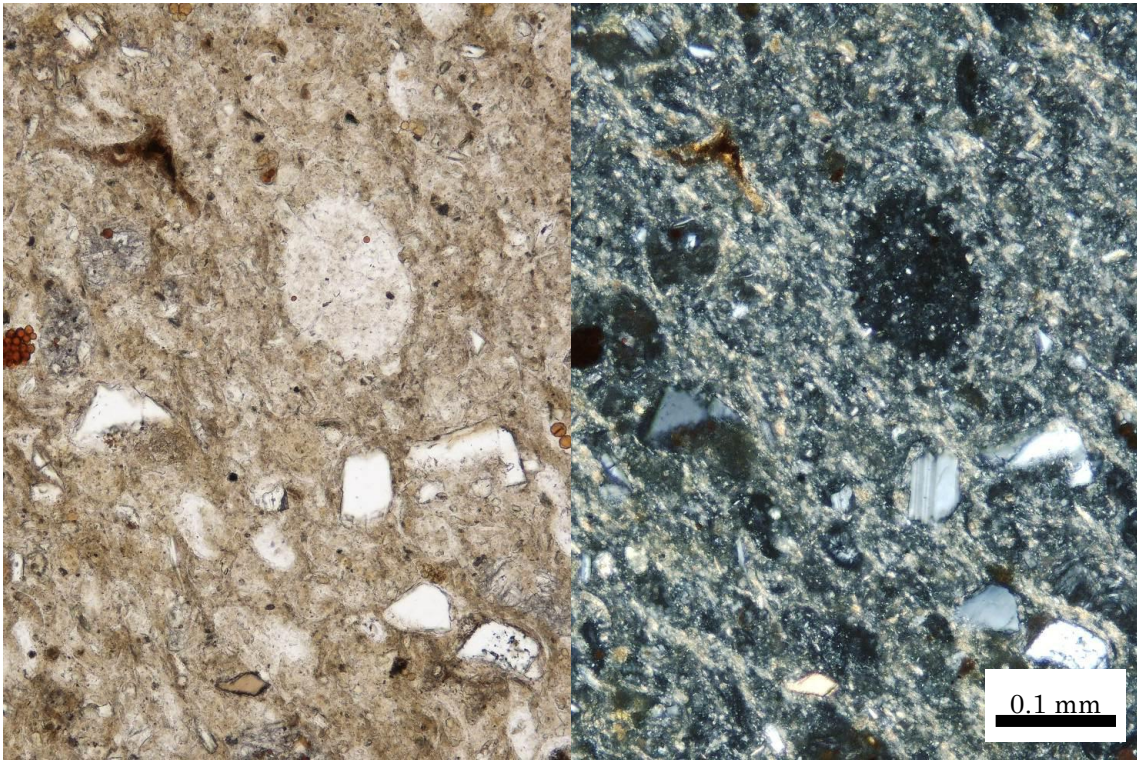
添付図 1-12 九州 I0 の採石場および周辺構造物の ASR 発生状況

添付資料 2 サンプル採取した骨材の偏光顕微鏡写真

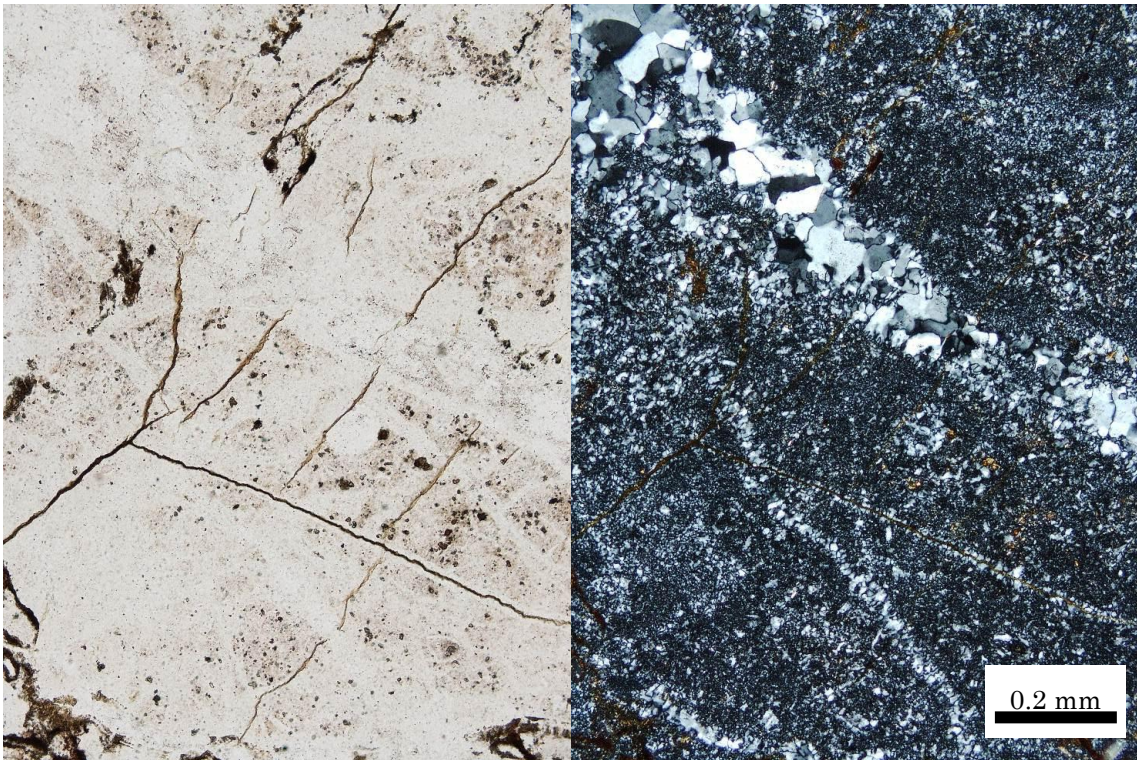
(選定した骨材 5 種類は、別途 4.2.2 および添付資料 3 に詳細を含めて記載)



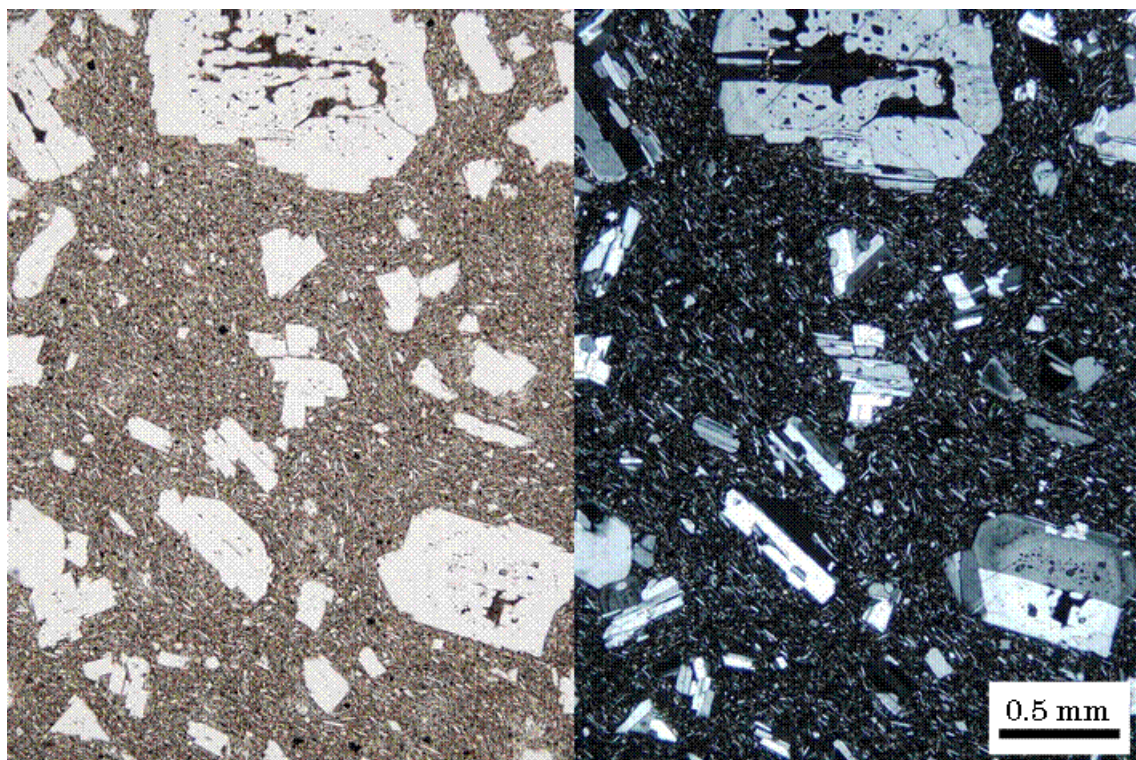
添付図 2-1 サンプル採取した骨材 SK(安山岩)の偏光顕微鏡写真



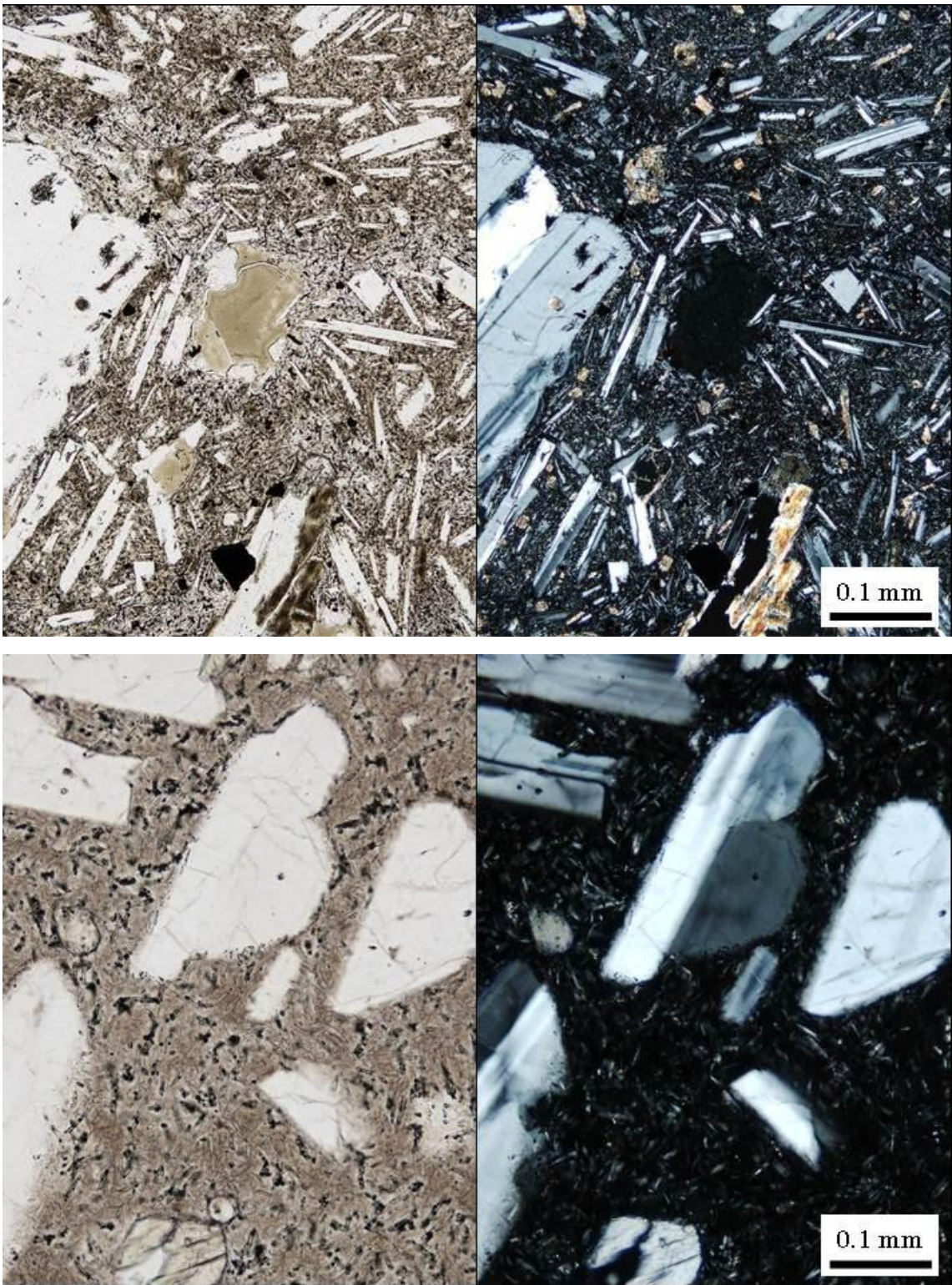
添付図 2-2 サンプル採取した骨材 SK(珪質泥岩)の偏光顕微鏡写真



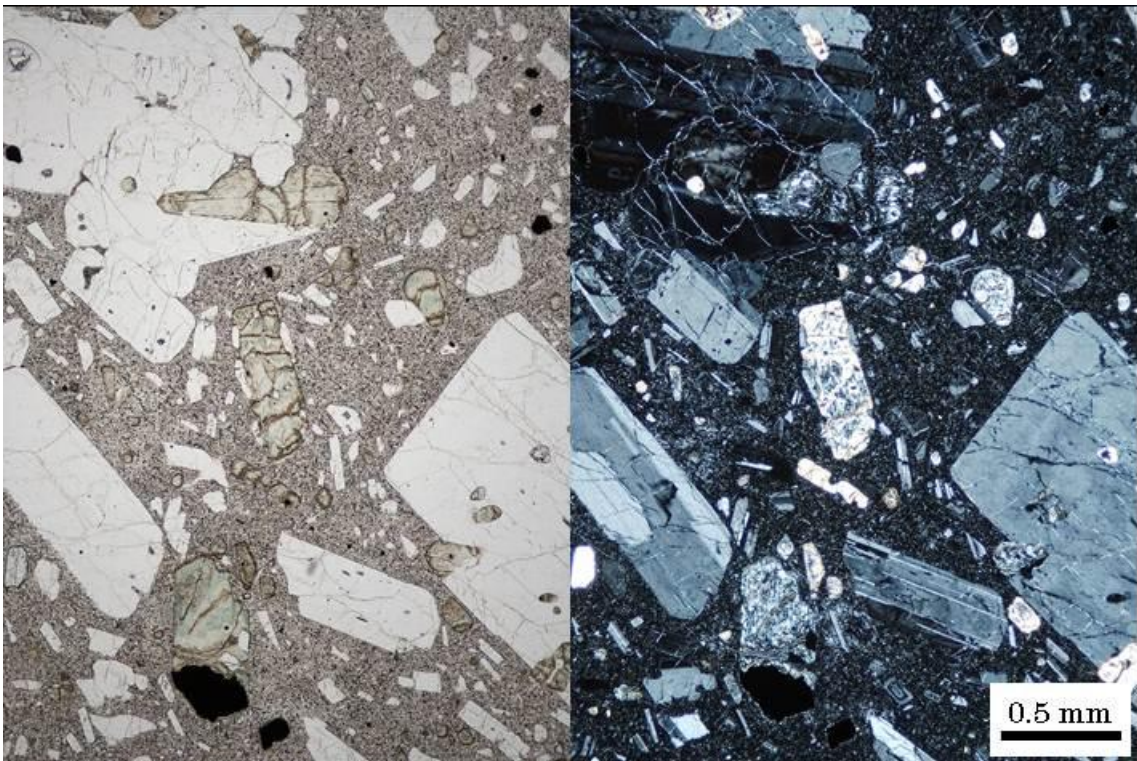
添付図 2-3 サンプル採取した骨材 SK(チャート)の偏光顕微鏡写真



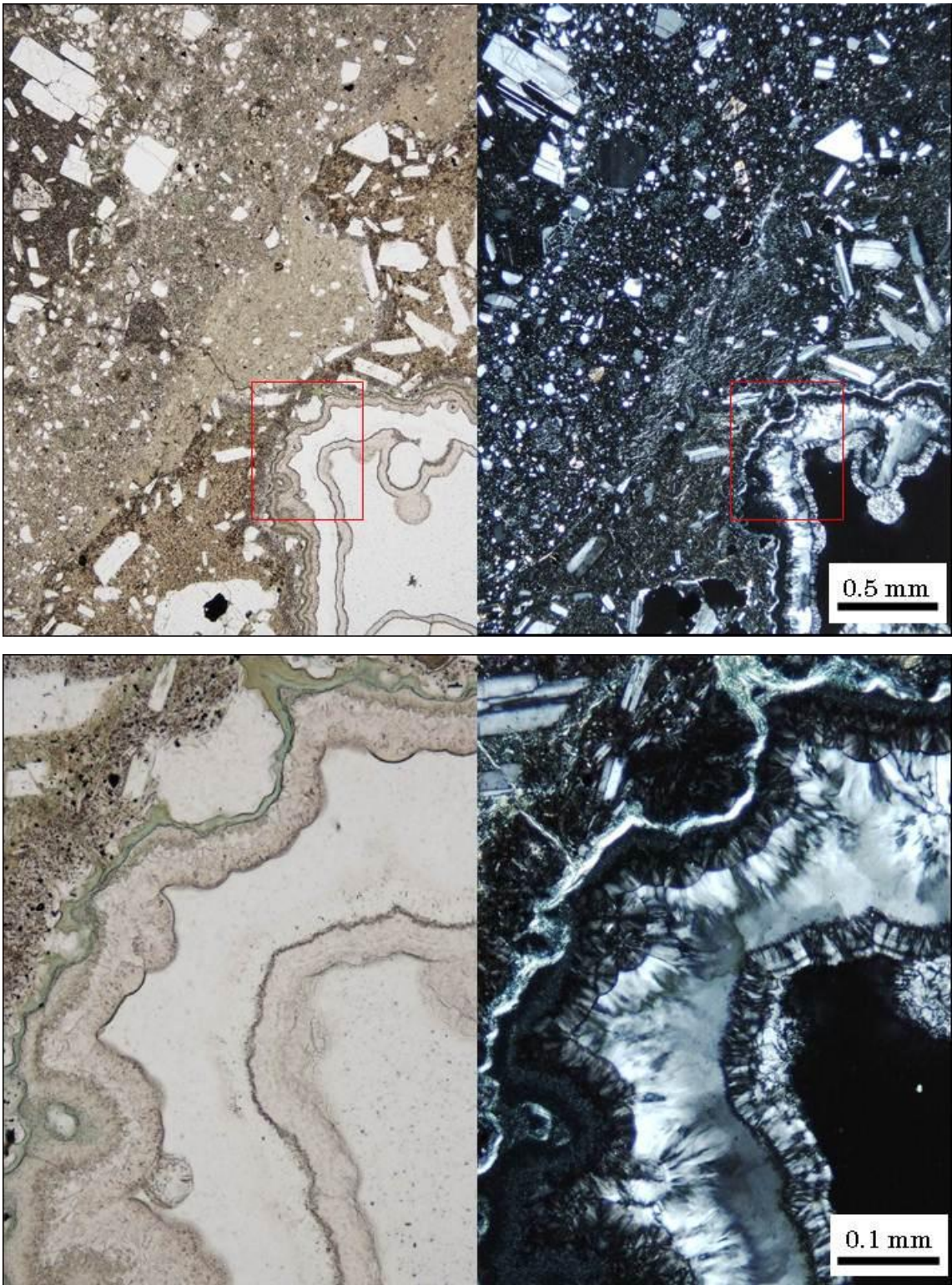
添付図 2-4 サンプル採取した骨材 GT (ガラス質安山岩) の偏光顕微鏡写真



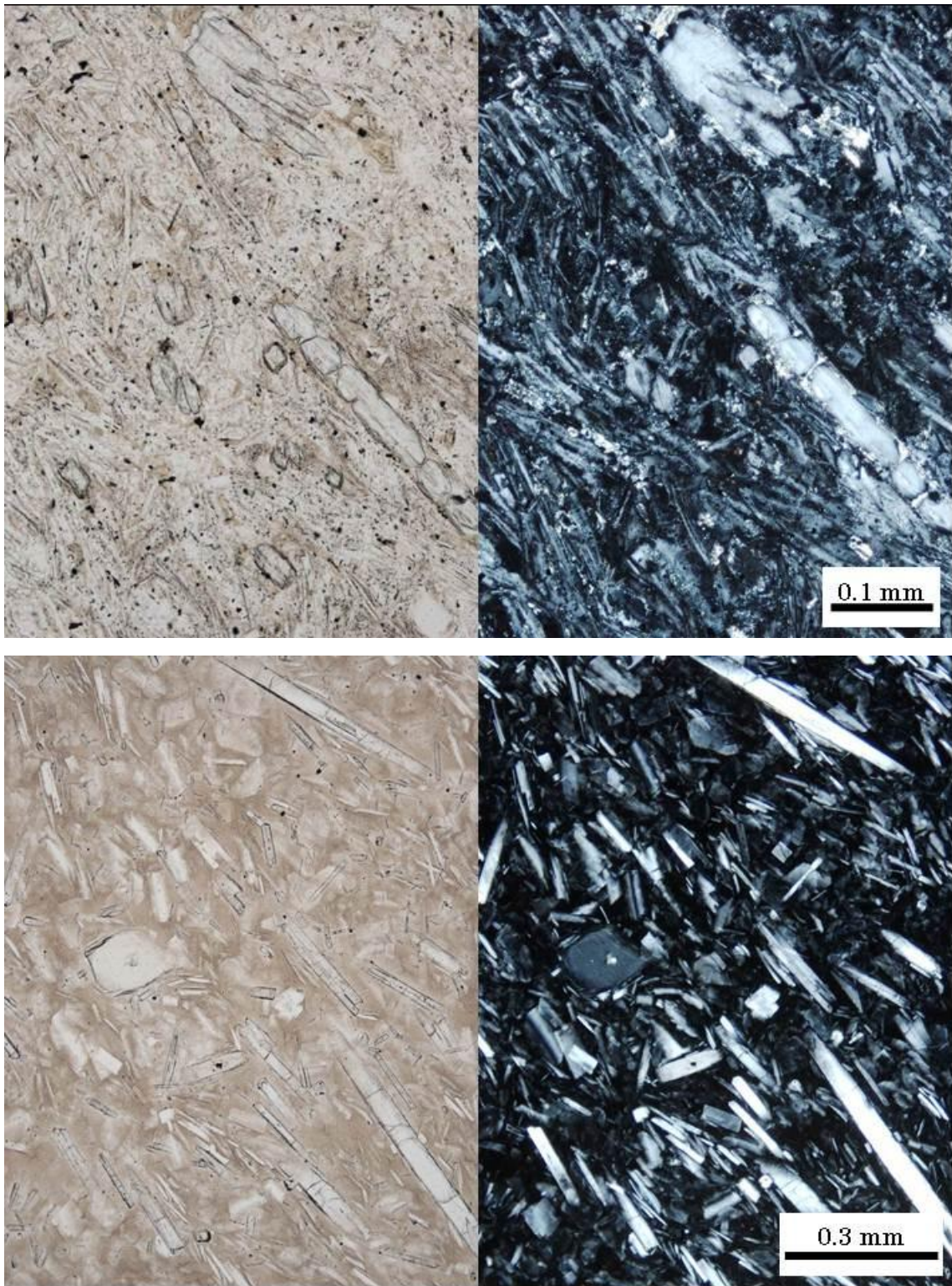
添付図 2-5 サンプル採取した骨材 W0 (ガラス質安山岩) の偏光顕微鏡写真



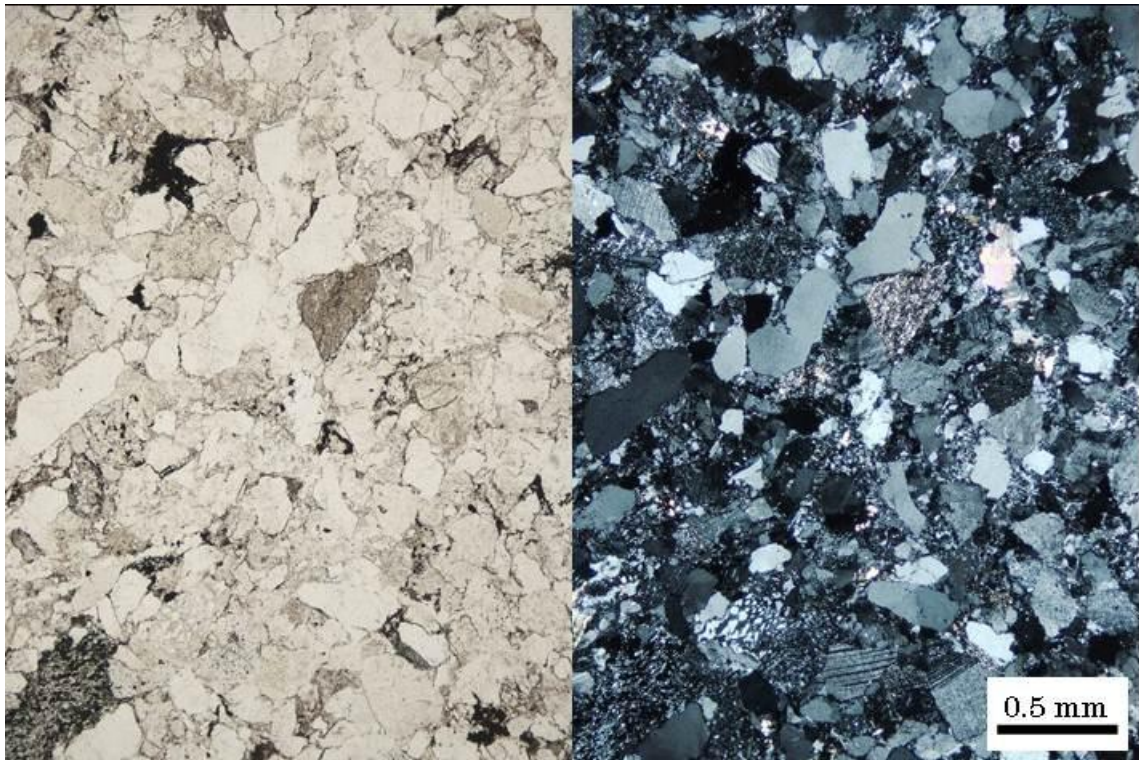
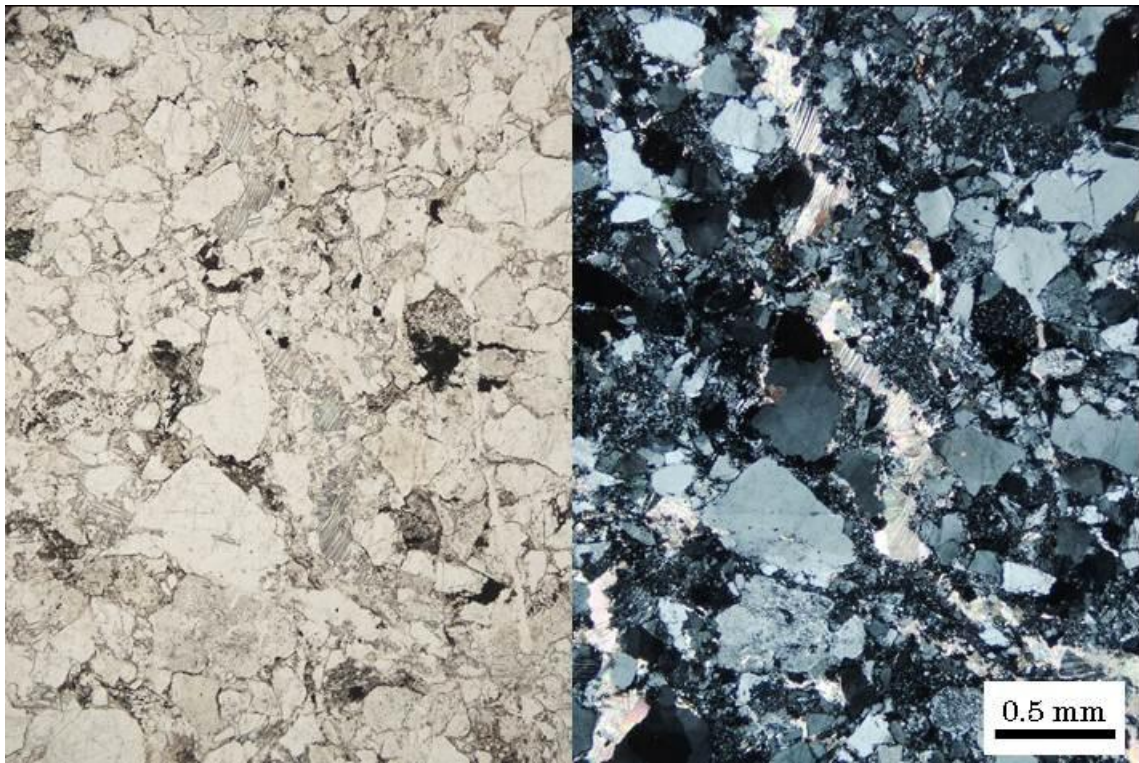
添付図 2-6 サンプル採取した骨材 SN (安山岩) の偏光顕微鏡写真



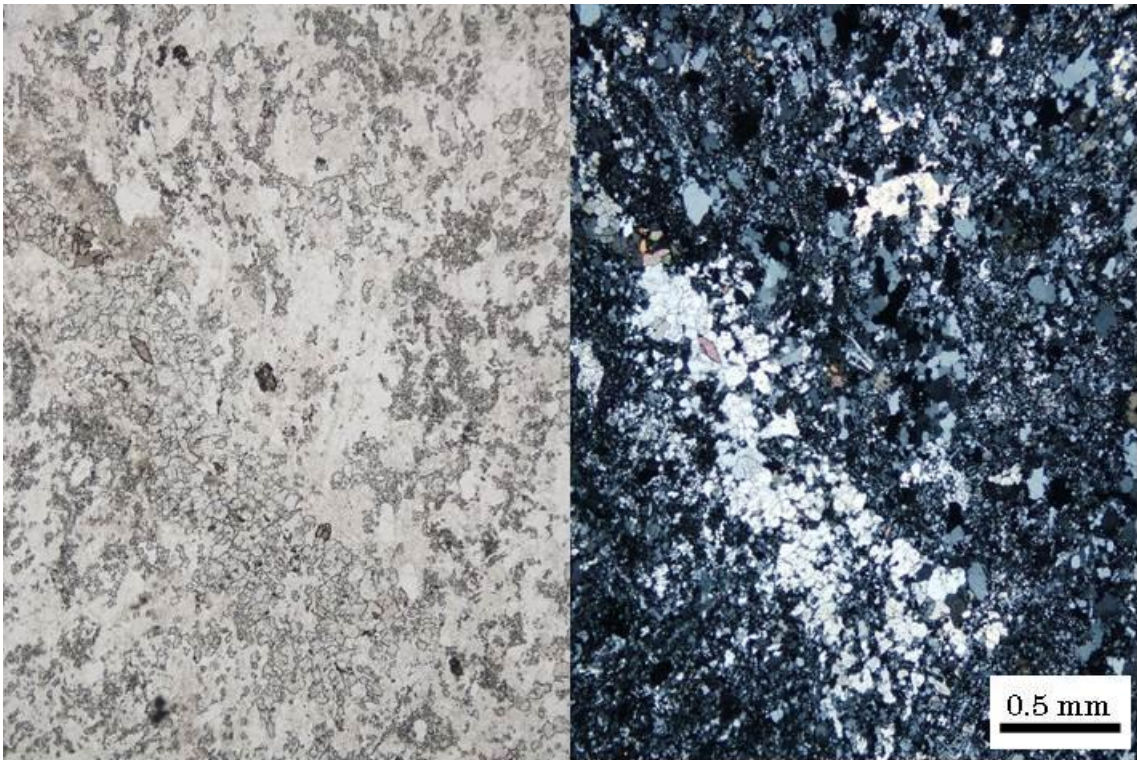
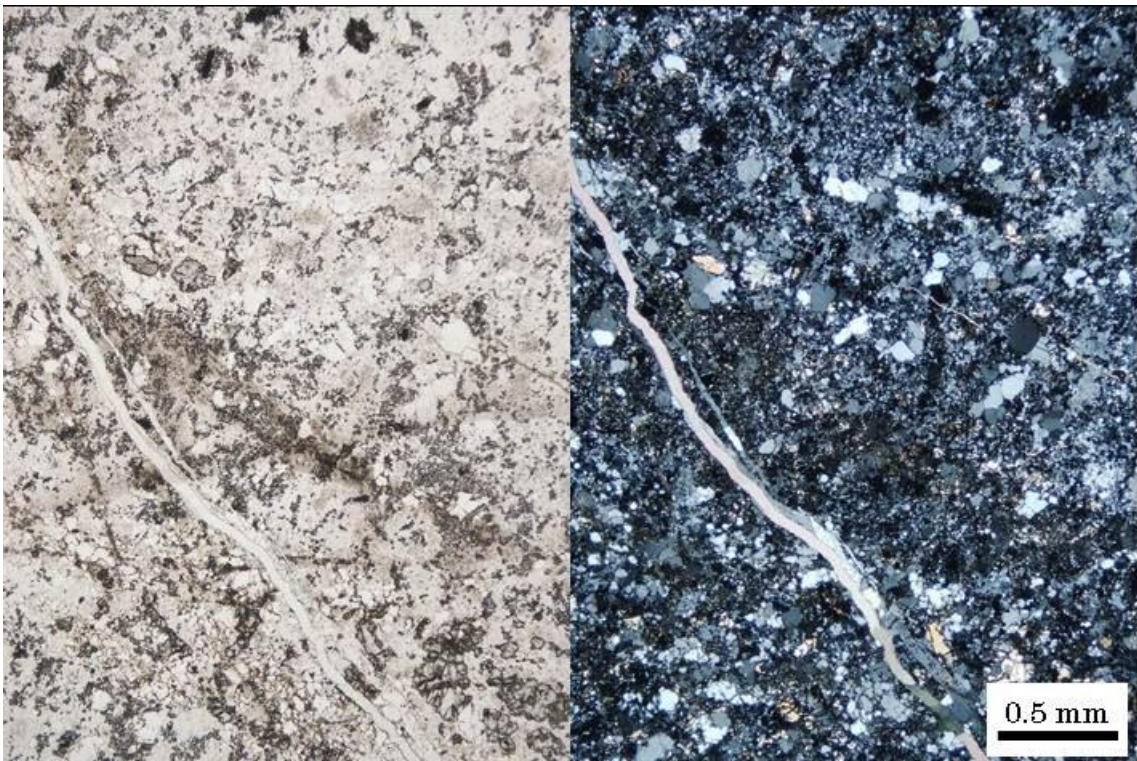
添付図 2-7 サンプル採取した骨材 YK (風化安山岩) の偏光顕微鏡写真



添付図 2-8 サンプル採取した骨材 ST (ガラス質安山岩) の偏光顕微鏡写真

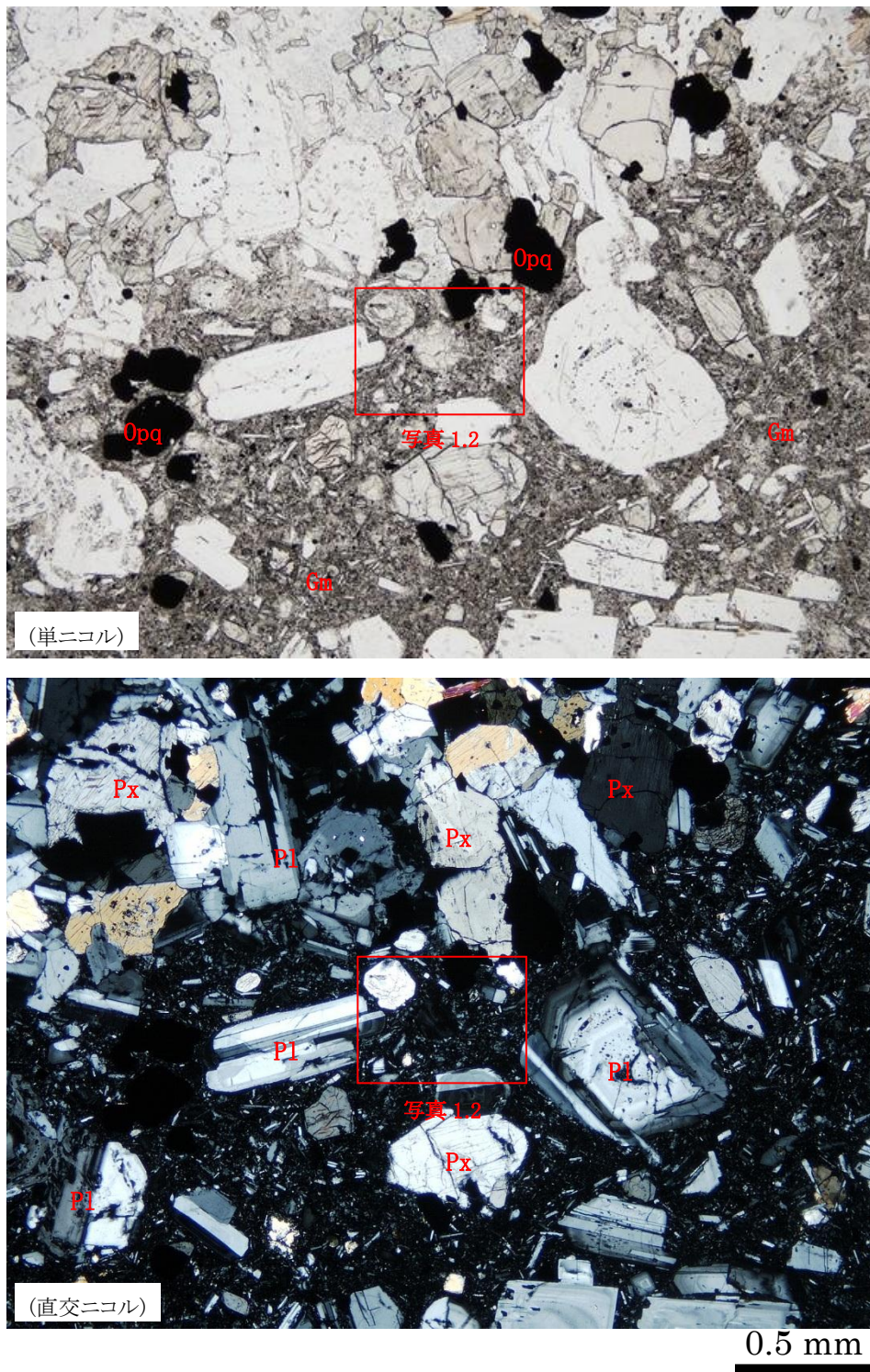


添付図 2-9 サンプル採取した骨材 M0 (砂岩と考えられる) の偏光顕微鏡写真



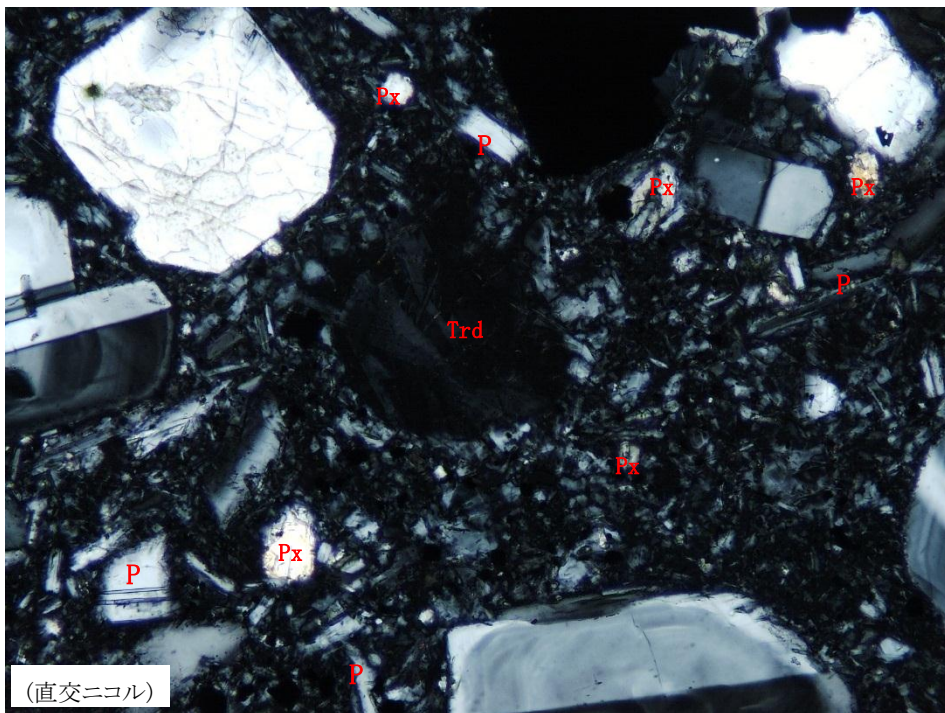
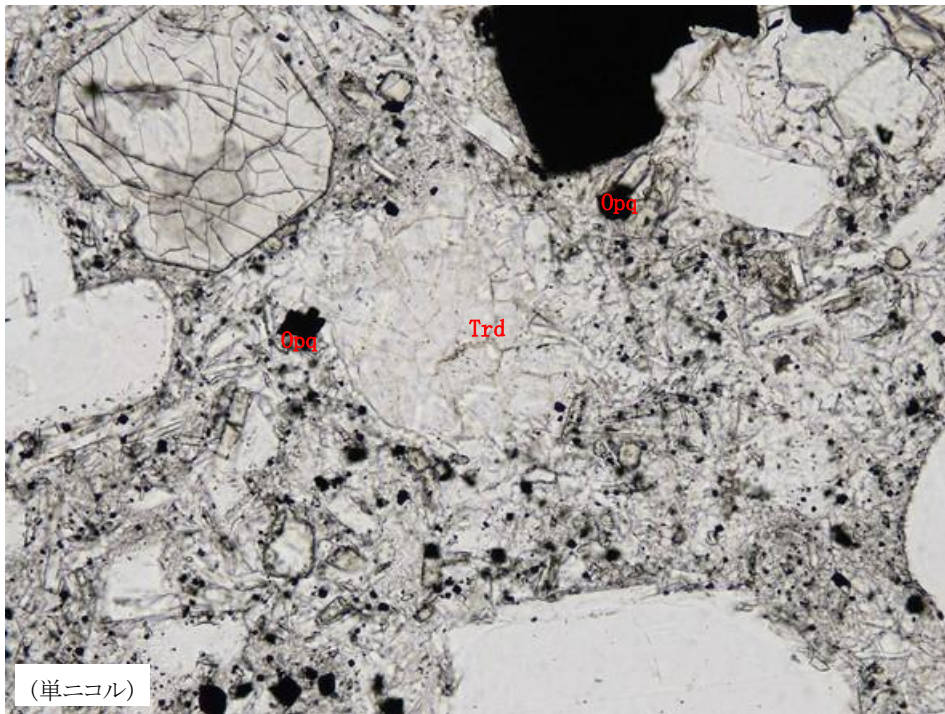
添付図 2-10 サンプル採取した骨材 DS (砂質片岩) の偏光顕微鏡写真

添付資料 3 選定した 5 種類の骨材、および非反応性骨材の偏光顕微鏡写真



添付図 3-1 骨材 T0(安山岩)の偏光顕微鏡観察結果

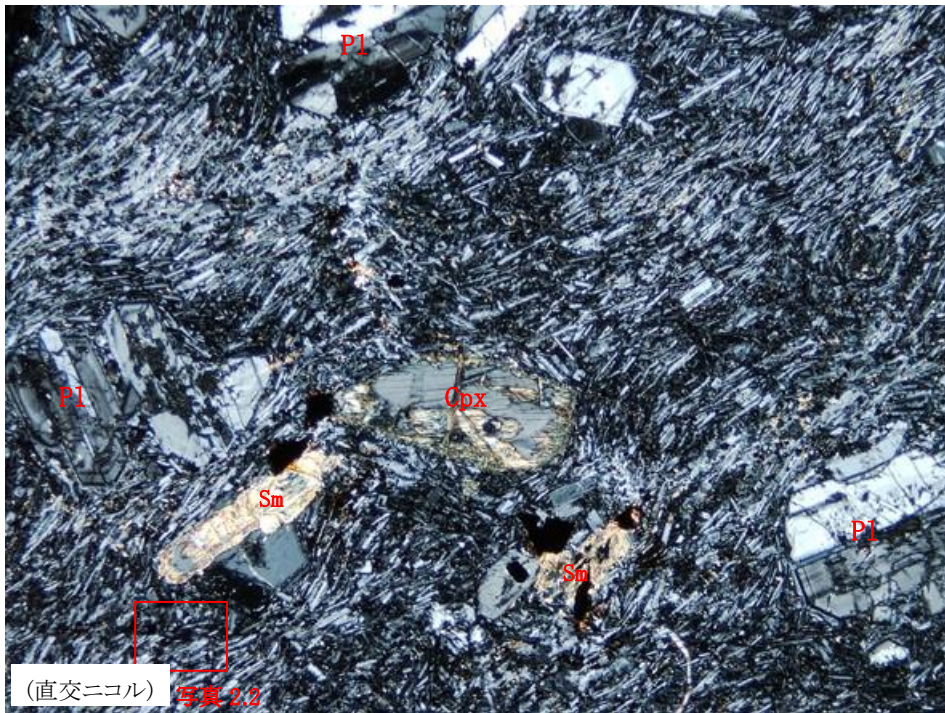
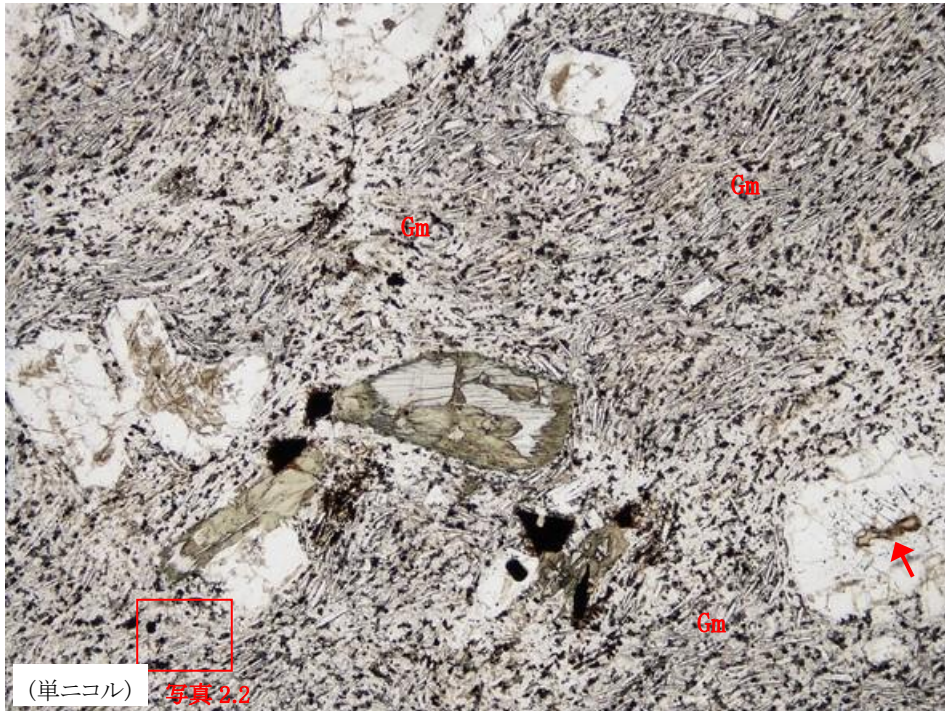
T0 (北海道) は斑晶 (写真上部は集合斑晶) と石基 (Gm) からなる斑状組織をもった安山岩である。斑晶は斜長石 (Pl)、輝石 (Px)、不透明鉱物 (Opq) などから構成される



0.1 mm

添付図 3-2 骨材 T0(安山岩)の偏光顕微鏡観察結果

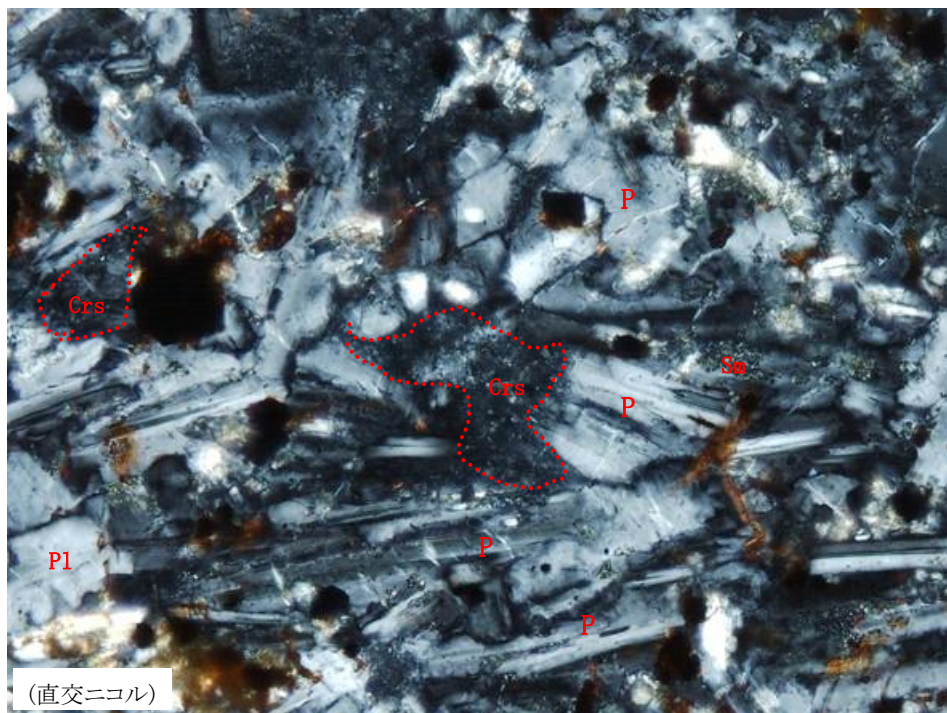
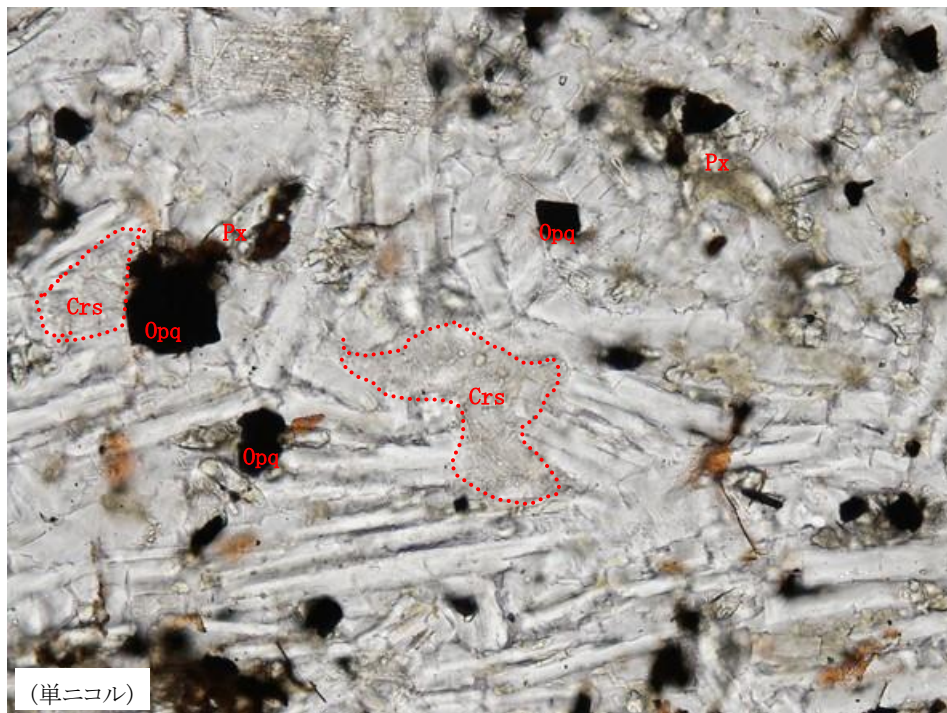
写真 1.1 の枠内の拡大。この安山岩の石基は細かな斜長石 (Pl)、トリディマイト (Trd)、輝石 (Px) と不透明鉱物 (Opq: 磁鉄鉱など) から主に構成される。トリディマイトは薄板状の結晶で、しばしば双晶をなす。薄片 (断面) では細柱状あるいはくさび状 (写真中央) に観察される。トリディマイトは ASR 反応性の高い鉱物 (急速膨張性) である。



0.5 mm

添付図 3-3 骨材 SI(安山岩)の偏光顕微鏡観察結果

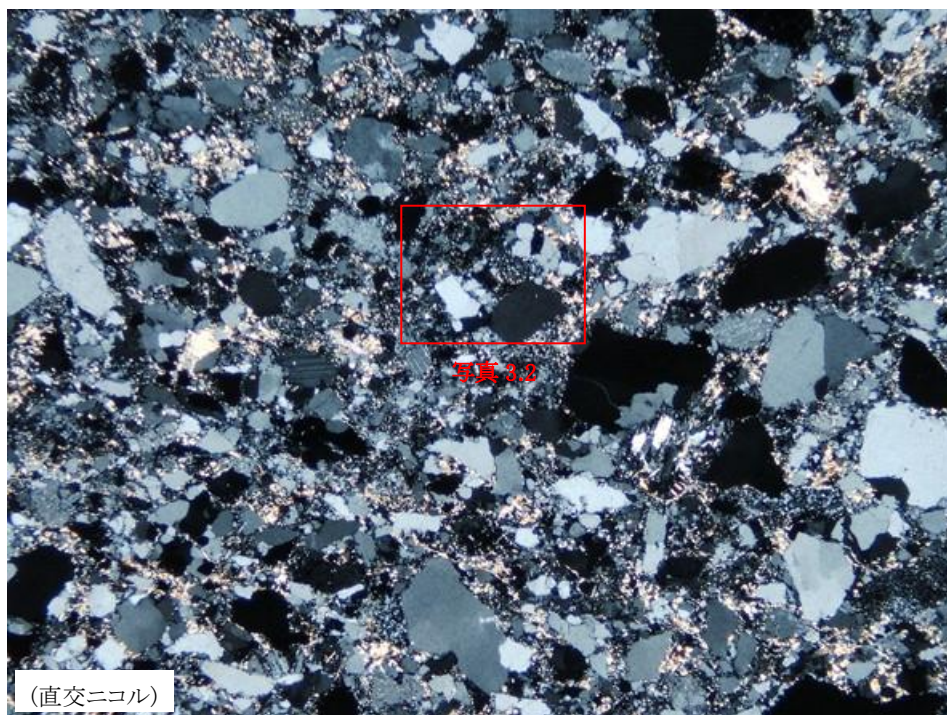
SI (北陸) は斑晶と石基 (Gm) からなる斑状組織をもった安山岩である。斑晶は斜長石 (P1)、単斜輝石 (Cpx)、不透明鉱物などから構成される。輝石の一部は粘土鉱物(Sm)に、斜長石に包有されていたガラスはクリストバライトと粘土鉱物に変質している(矢印など)。



0.1 mm

添付図 3-4 骨材 SI(安山岩)の偏光顕微鏡観察結果

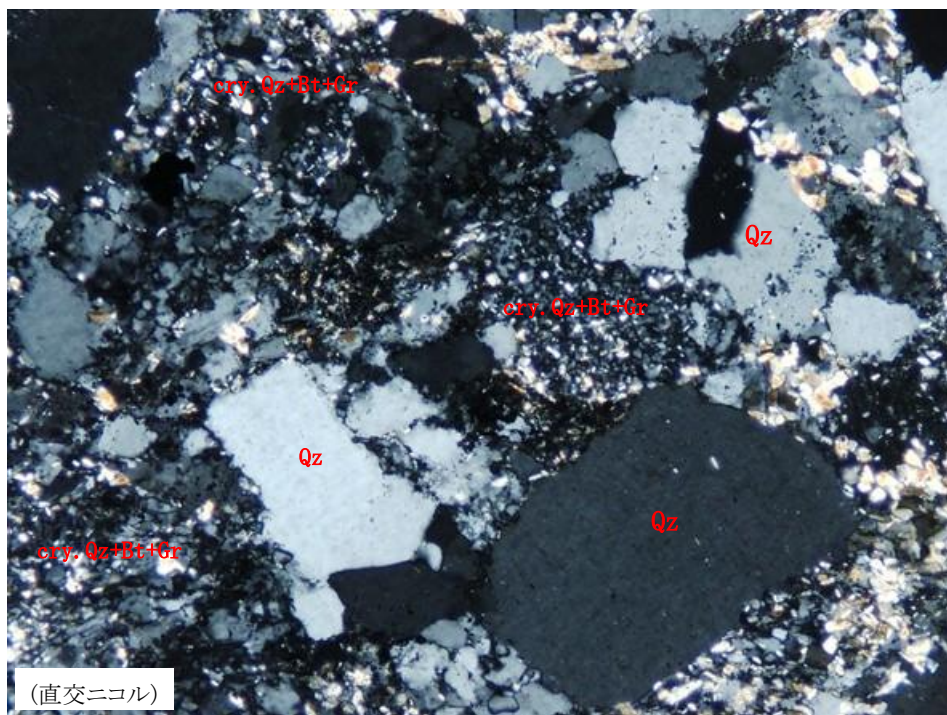
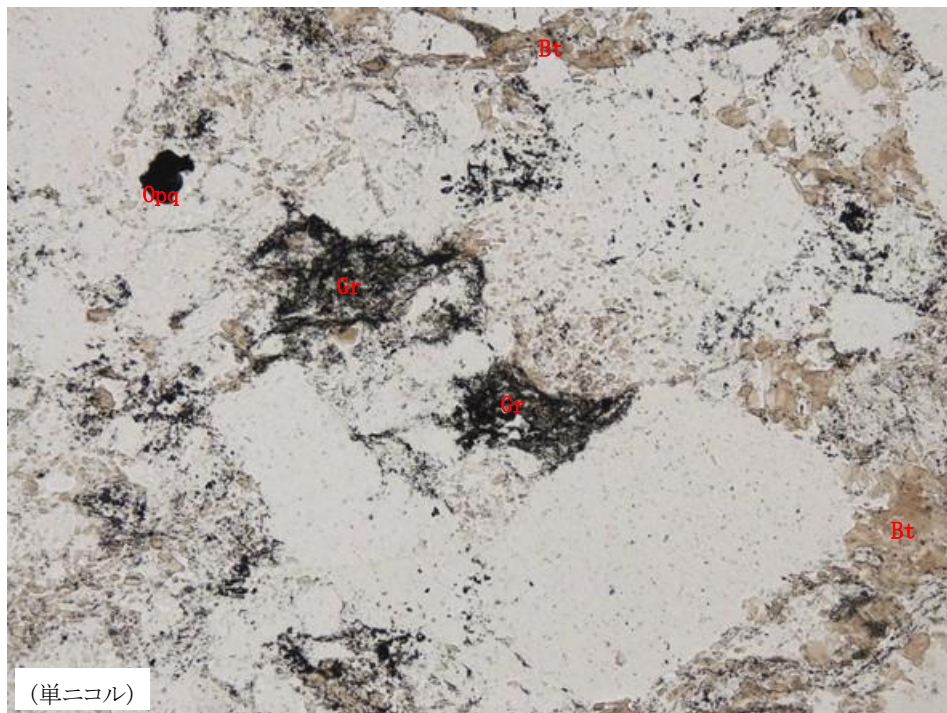
写真 2.1 の枠内の拡大。この安山岩の石基は細かな斜長石 (P1)、クリストバライト (Crs)、輝石 (Px) および不透明鉱物 (Opq: 磁鉄鉱など) から主に構成される。石基の輝石の一部も変質し、スメクタイト (Sm) が生成している。クリストバライトは斜長石の粒間やパッチ状 (写真の視野中央点線内) の形態で存在する。クリストバライトは ASR 反応性の高い鉱物 (急速膨張性) である。



0.5 mm

添付図 3-5 骨材 WI(砂質ホルンフェルス)の偏光顕微鏡観察結果

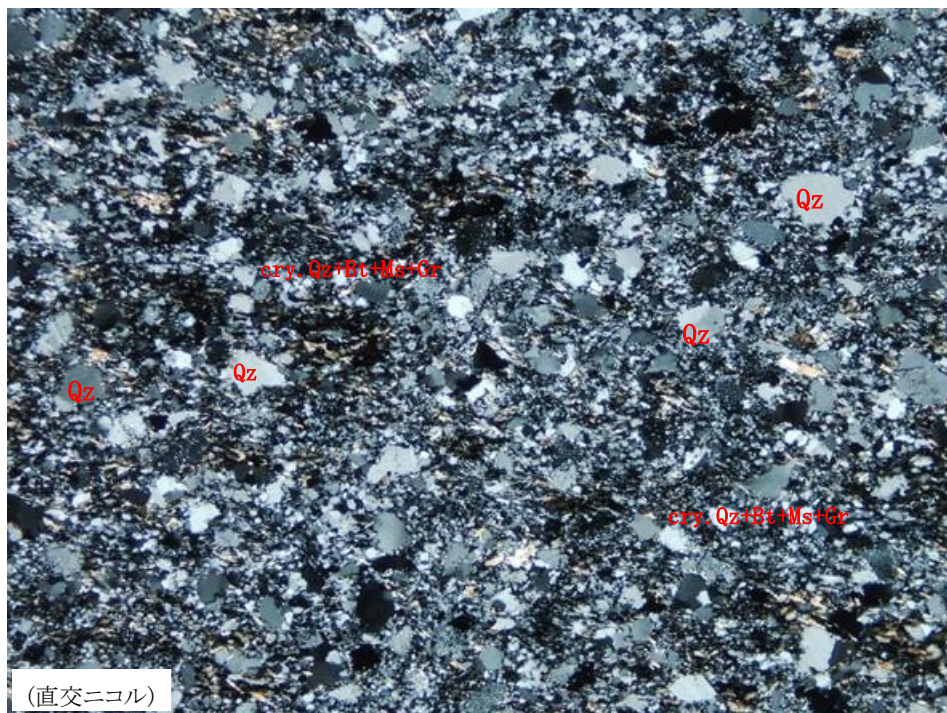
WI (関東) は、砂質岩が接触変成作用を受け形成された、砂質ホルンフェルスである。原岩の組織がよく残存しているが、石英や長石などの碎屑粒子の粒間には、微細な黒雲母の生成が見られる。黒雲母は特定の方向へ配向しない。



0.1 mm

添付図 3-6 骨材 WI(砂質ホルンフェルス)の偏光顕微鏡観察結果

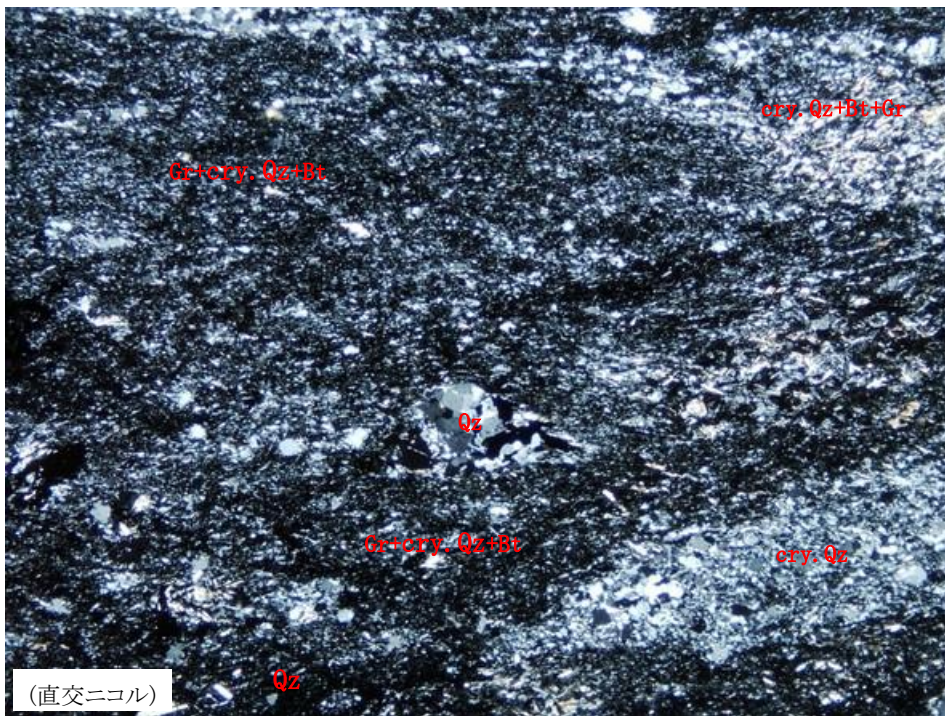
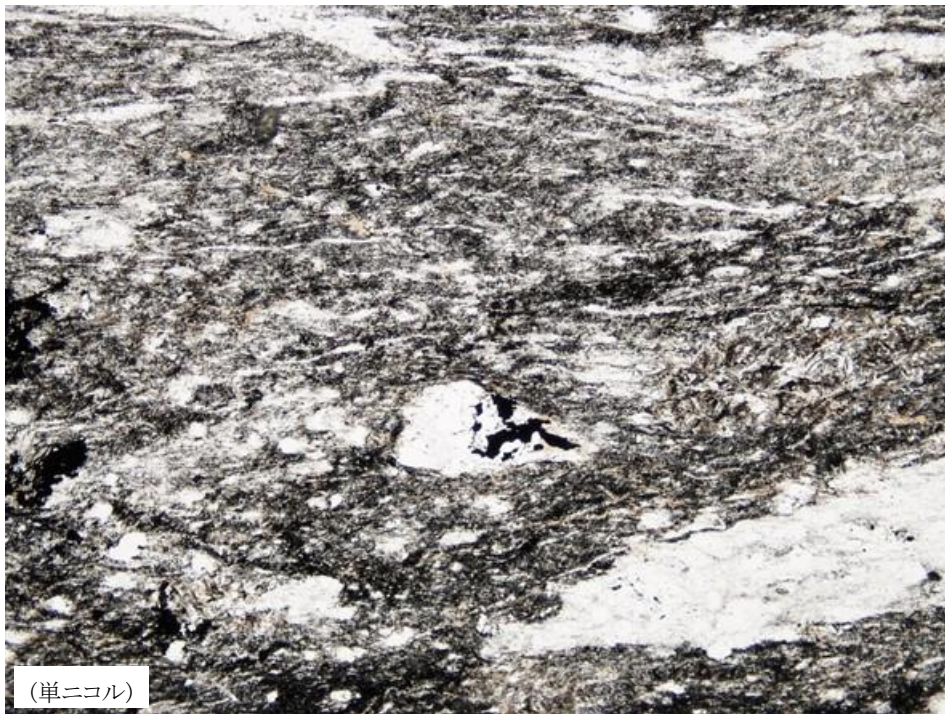
写真 3.1 の枠内の拡大。碎屑粒子起源の石英 (Qz) の粒間には隠微晶質石英 (cry. Qz)、黒雲母 (Bt)、石墨 (Gr) などが認められる。隠微晶質石英は遅延膨張性の ASR 反応性鉱物である。



0.5 mm

添付図 3-7 骨材 HE (砂質片岩) の偏光顕微鏡観察結果

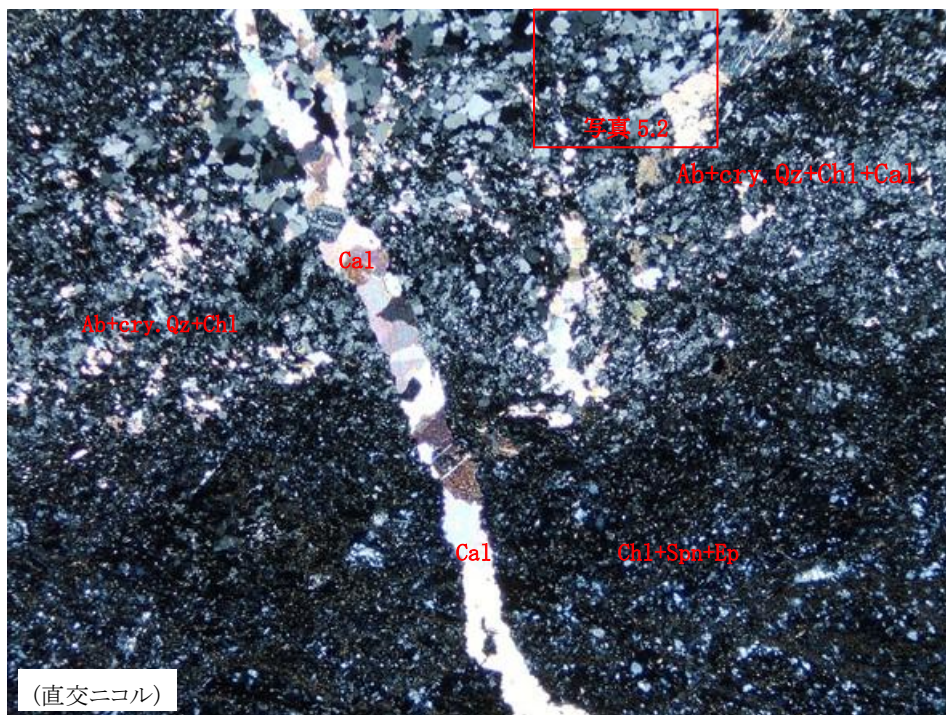
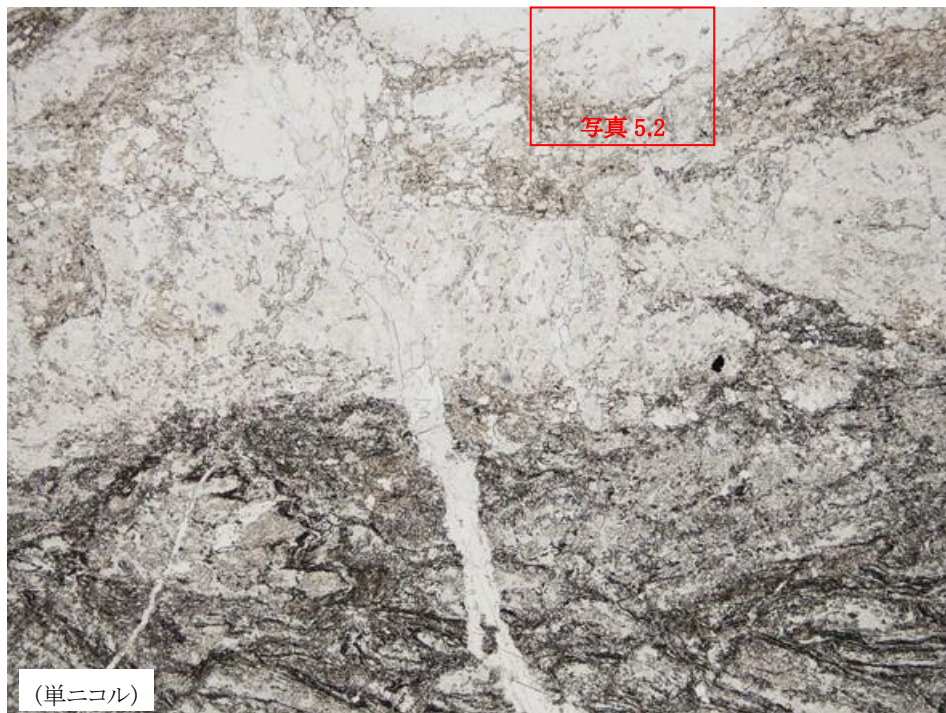
HE (四国) は、砂岩優勢の砂岩泥岩互層が広域変成作用を受けて生成した砂質片岩 (白雲母黒雲母片岩) である。原岩の組織が比較的残存しており、石英 (Qz)、斜長石、カリ長石などの碎屑粒子の粒間に、多量の黒雲母 (Bt)、白雲母 (Ms)、隠微晶質石英 (cry. Qz)、石墨 (Gr) などが認められる。黒雲母および白雲母は写真左右方向に定向配列を示す。



0.5 mm

添付図 3-8 骨材 HE(やや泥質な砂質片岩)の偏光顕微鏡観察結果

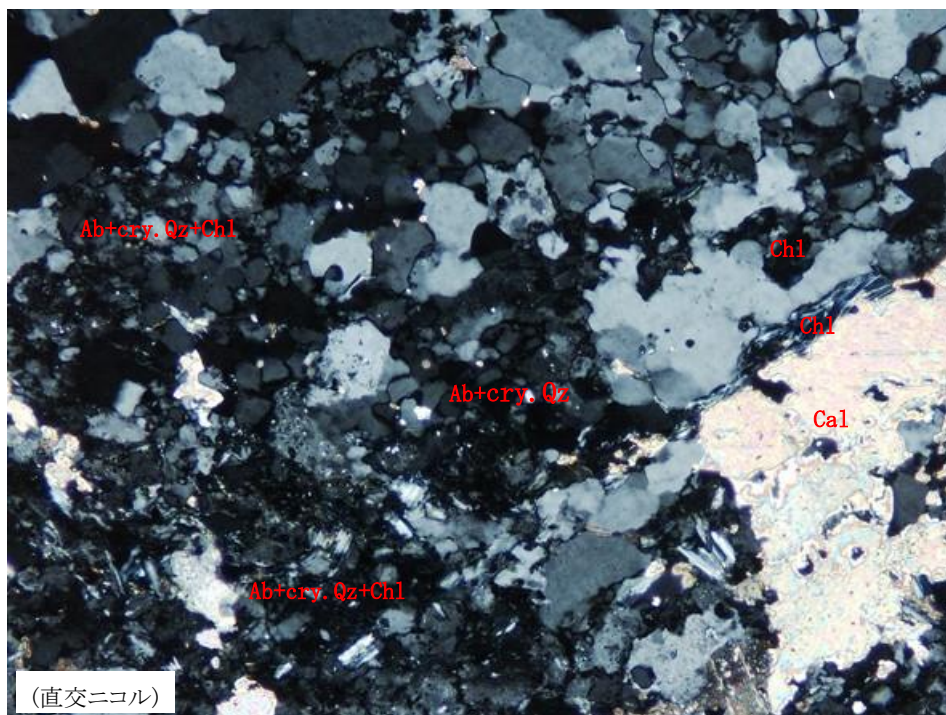
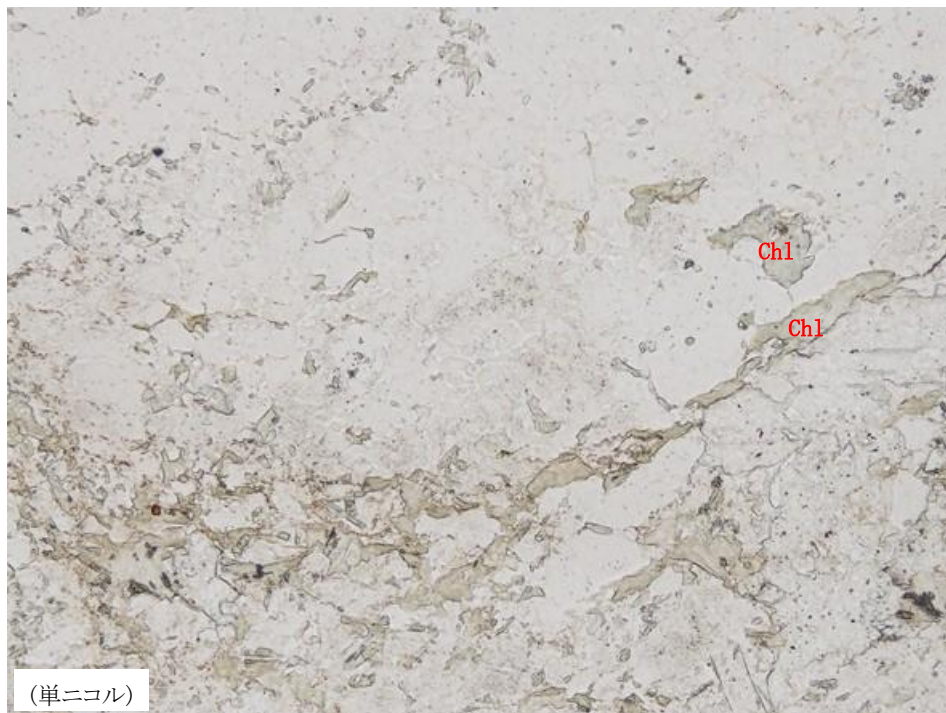
写真の粒子は、HE(四国)の骨材の中でも泥質な部分である。堆積構造がよく残存している。(cry. Qz : 隠微晶質石英、Bt : 黒雲母、Gr : 石墨)



0.5 mm

添付図 3-9 骨材 GK(緑色片岩)の偏光顕微鏡観察結果

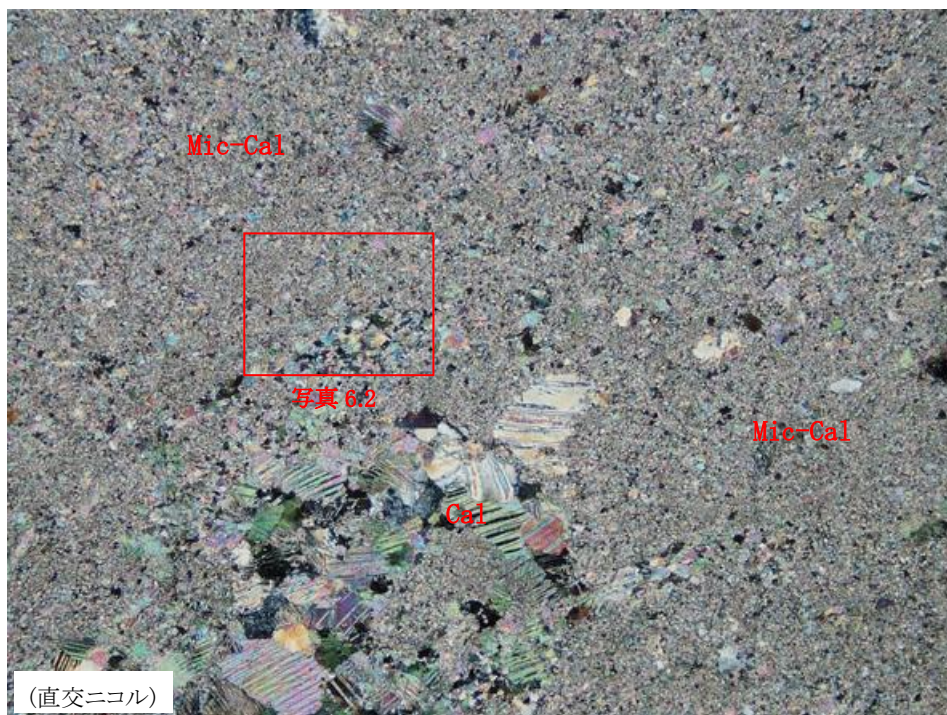
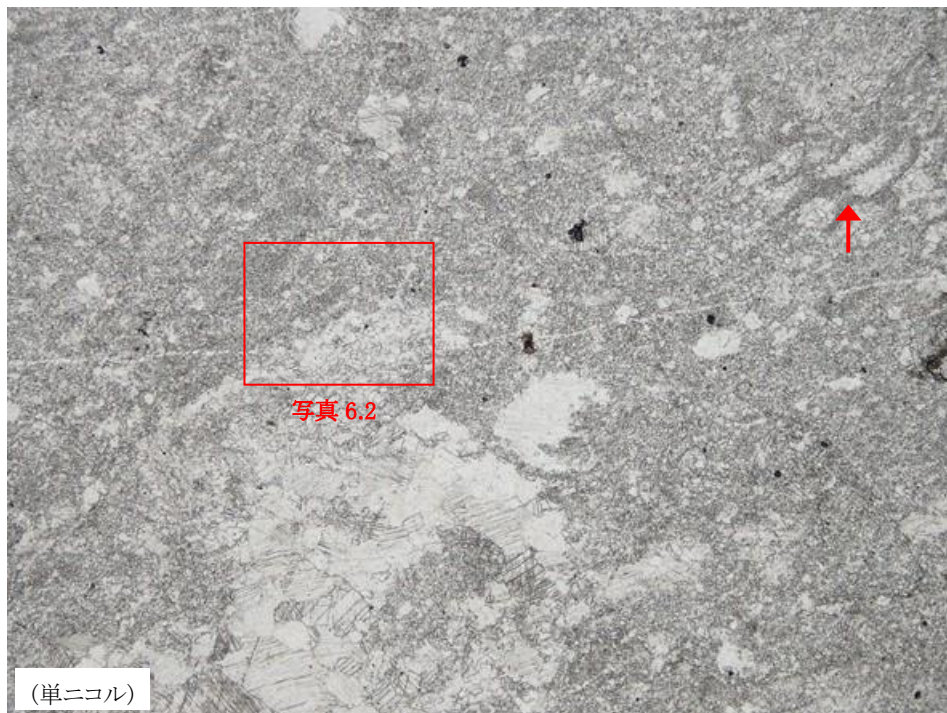
GK(九州)は玄武岩質凝灰岩などの苦鉄質岩を含む岩石を原岩とする変成岩であり、苦鉄質な部分と珪長質な部分とが細かい縞状構造をなす。写真の視野上部は微細な曹長石(Ab)や石英(隠微晶質石英:cry.Qz)が多量に存在する珪長質で淡色の部分、下半分は緑泥石(Ch1)、緑レン石(Ep)、スフェーン(Spn)に富む苦鉄質で色の濃い部分である。方解石脈(Cal)も認められる。



0.1 mm

添付図 3-10 骨材 GK(緑色片岩)の偏光顕微鏡観察結果

写真 5.1 の枠内の拡大。石英や長石に富む部分。主に微細な曹長石 (Ab) と石英 (隠微晶質石英 : cry. Qz) からなり、緑泥石 (Chl) や方解石 (Cal) などを含む。隠微晶質石英は遅延膨張性の ASR 反応性鉱物である。



0.5 mm

添付図 3-11 骨材 I0(石灰岩)の偏光顕微鏡観察結果

I0 (九州) は石灰岩である。微晶質ないし隠微晶質な方解石からなるミクライト質な基質 (Mic-Cal) と、脈状にあるいは化石 (矢印) が置き換えられるなどにより粗粒方解石 (Cal) に再結晶した部分とからなる。



添付図 3-12 骨材 I0(石灰岩)の偏光顕微鏡観察結果

写真 6.1 の枠内の拡大。ほとんど方解石のみから構成され、石英粒子や粘土鉱物などの不純物は認識されない。ミクライト質な基質 (Mic-Cal) と粗粒方解石 (Cal) に再結晶した部分とからなる。

添付資料 4 選定した 5 種類の骨材、非反応性骨材およびセメントの 粉末 X 線回折図

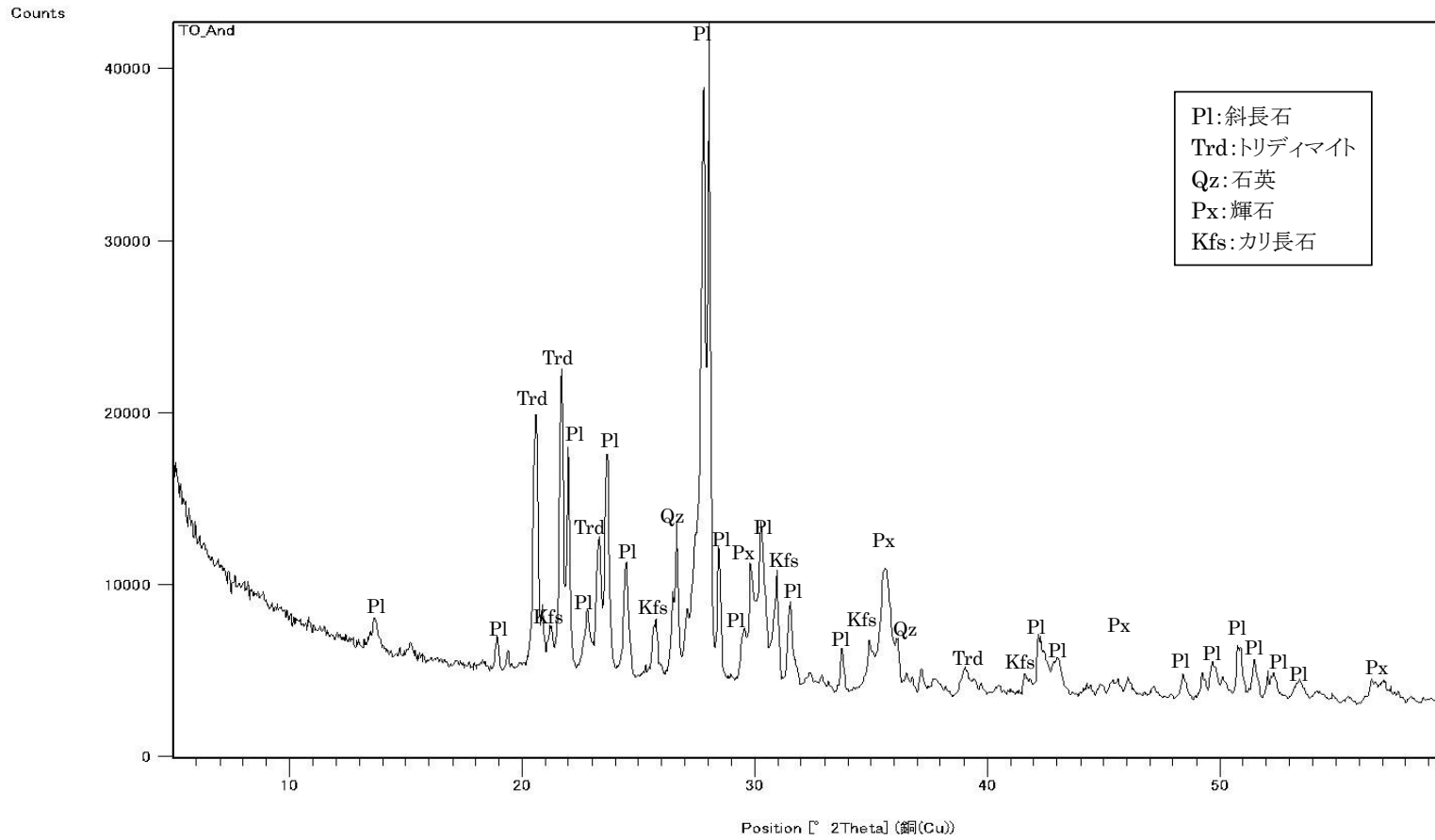
【添付図目次】

(骨材)

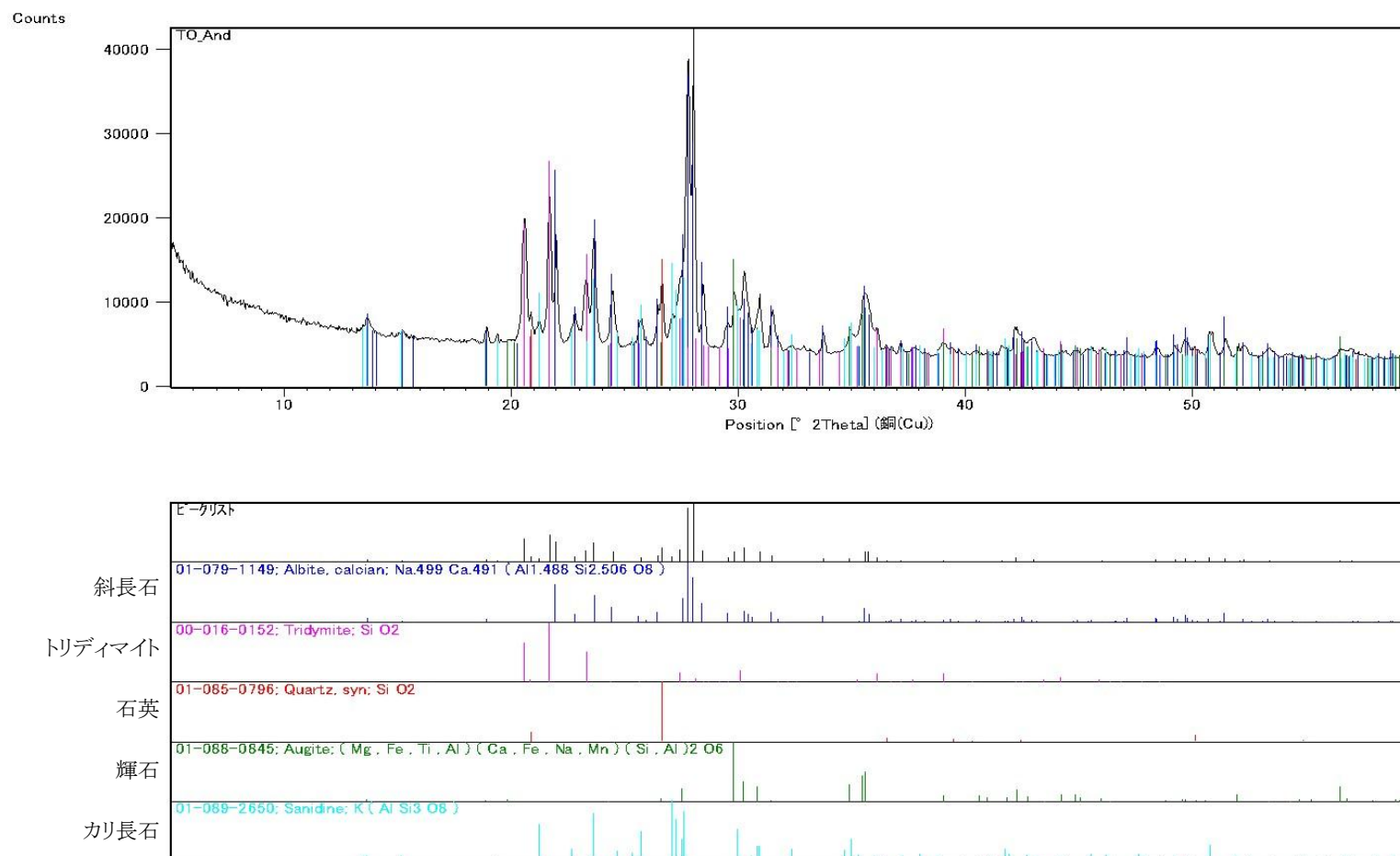
- 添付図 4-1 粉末 X 線回折図 [骨材種類：T0 (急速膨張性、北海道)]
- 添付図 4-2 粉末 X 線回折図_チャート [骨材種類：T0 (急速膨張性、北海道)]
- 添付図 4-3 粉末 X 線回折図 [骨材種類：SI (急速膨張性、北陸)]
- 添付図 4-4 粉末 X 線回折図_チャート [骨材種類：SI (急速膨張性、北陸)]
- 添付図 4-5 粉末 X 線回折図 [骨材種類：WI (遅延膨張性、関東)]
- 添付図 4-6 粉末 X 線回折図_チャート [骨材種類：WI (遅延膨張性、関東)]
- 添付図 4-7 粉末 X 線回折図 [骨材種類：HE (遅延膨張性、四国)]
- 添付図 4-8 粉末 X 線回折図_チャート [骨材種類：HE (遅延膨張性、四国)]
- 添付図 4-9 粉末 X 線回折図 [骨材種類：GK (遅延膨張性、九州)]
- 添付図 4-10 粉末 X 線回折図_チャート [骨材種類：GK (遅延膨張性、九州)]
- 添付図 4-11 粉末 X 線回折図 [骨材種類：IO (非反応性骨材、九州)]
- 添付図 4-12 粉末 X 線回折図_チャート [骨材種類：IO (非反応性骨材、九州)]

(セメント)

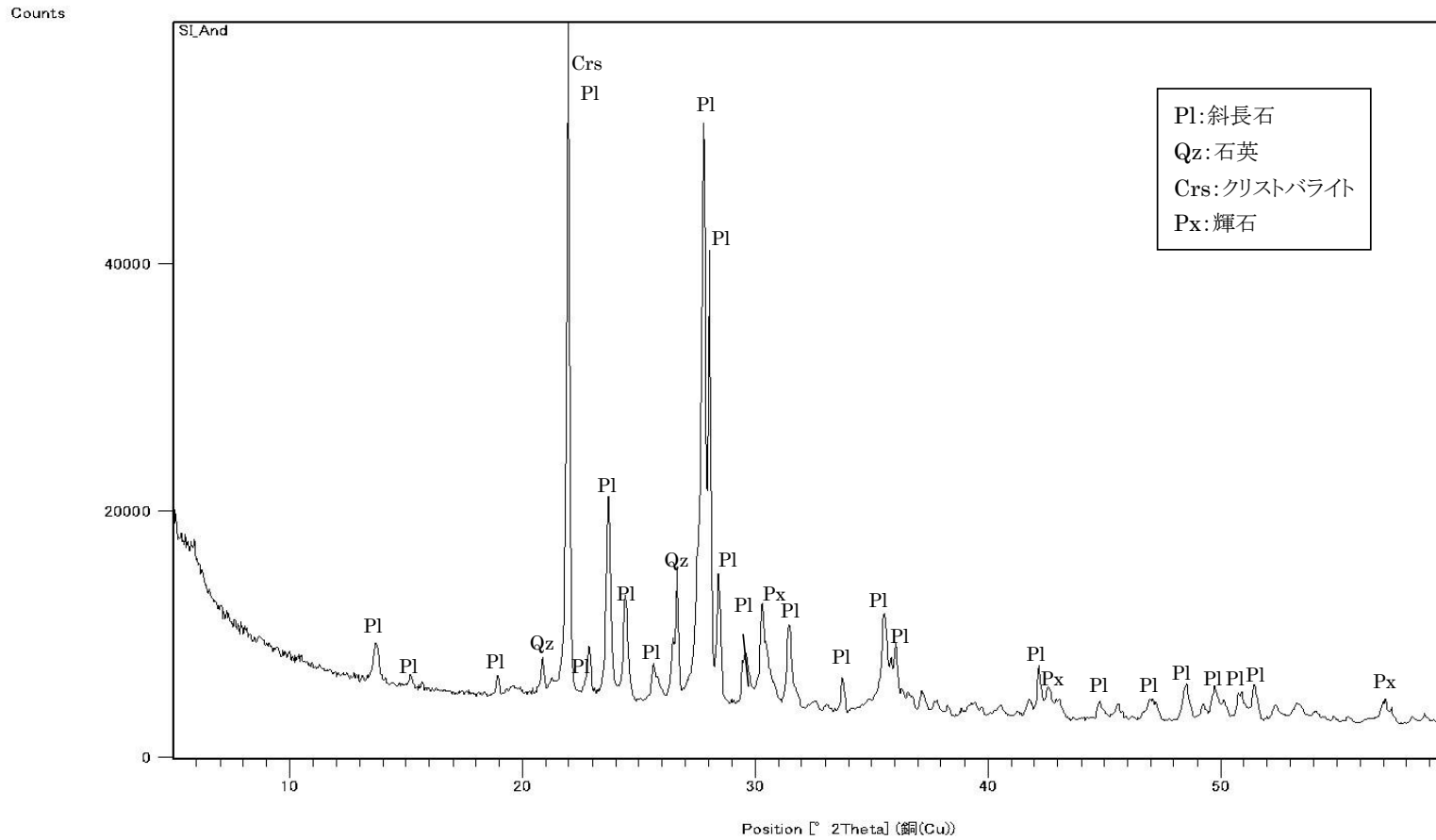
- 添付図 4-13 粉末 X 線回折／リートベルト解析のフィッティング結果
(普通ポルトランドセメント)



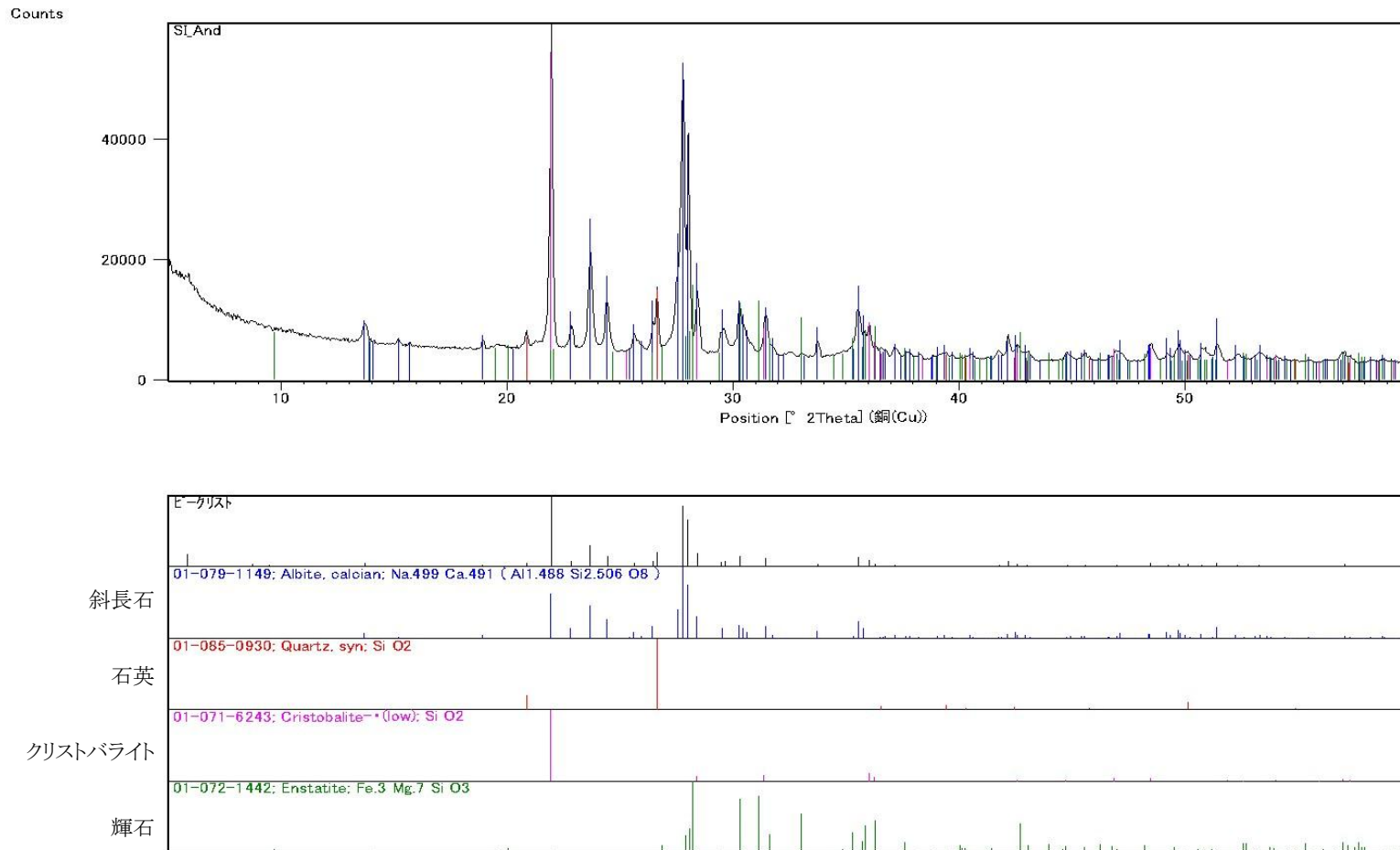
添付図 4-1 粉末 X 線回折図 [骨材種類 : T0 (急速膨張性、北海道)]



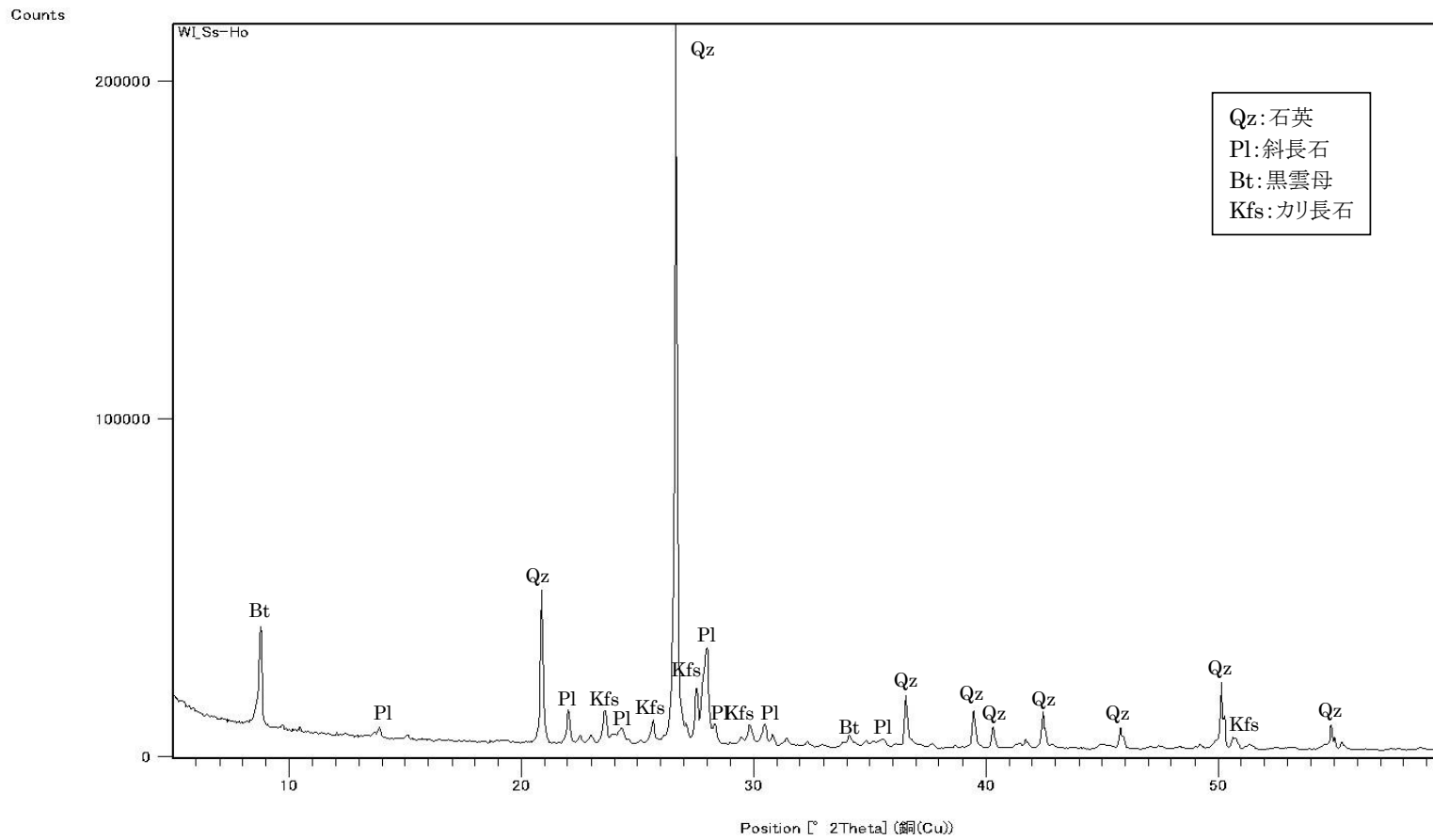
添付図 4-2 粉末 X 線回折図_チャート [骨材種類 : T0 (急速膨張性、北海道)]



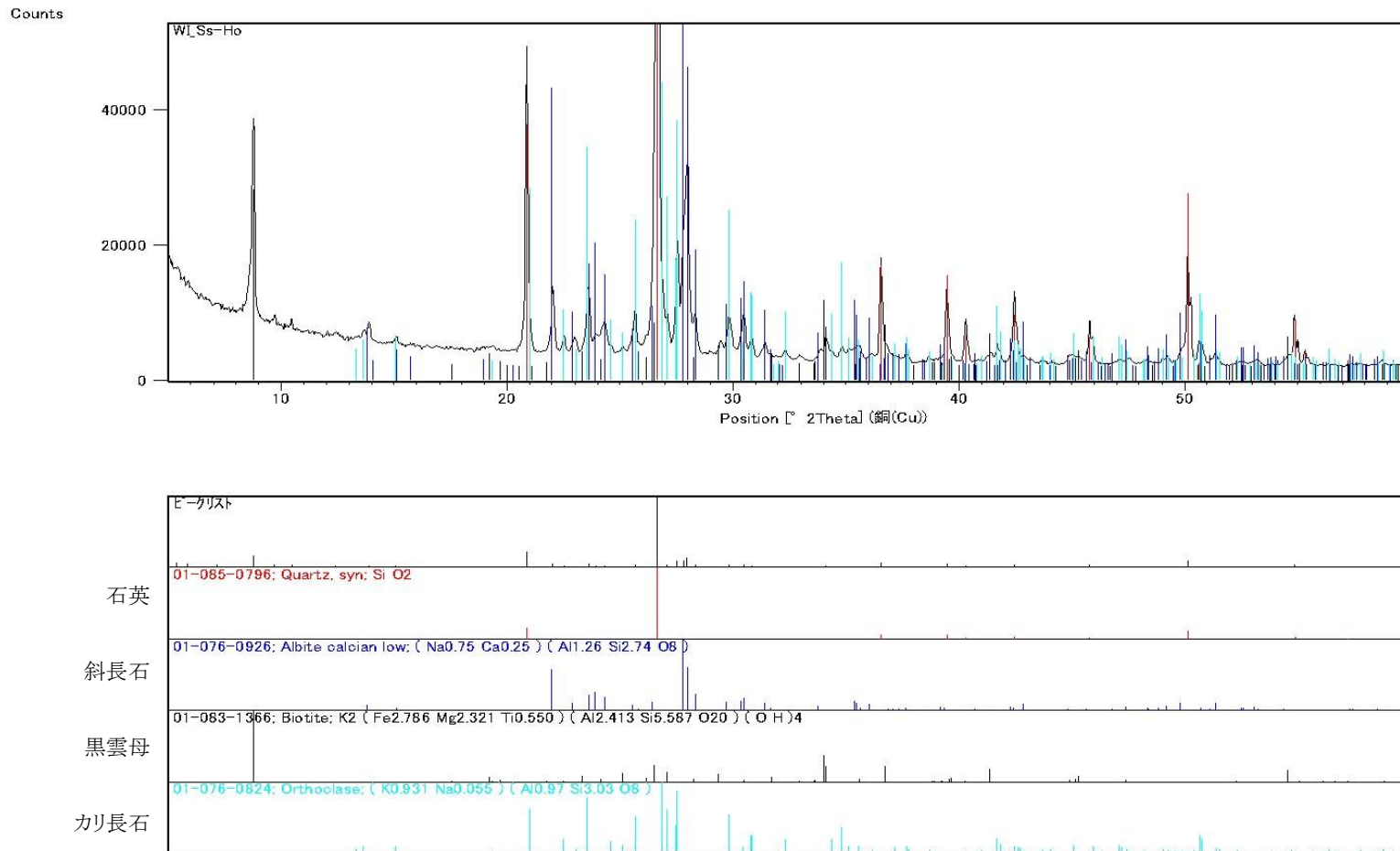
添付図 4-3 粉末 X 線回折図 [骨材種類 : SI (急速膨張性、北陸)]



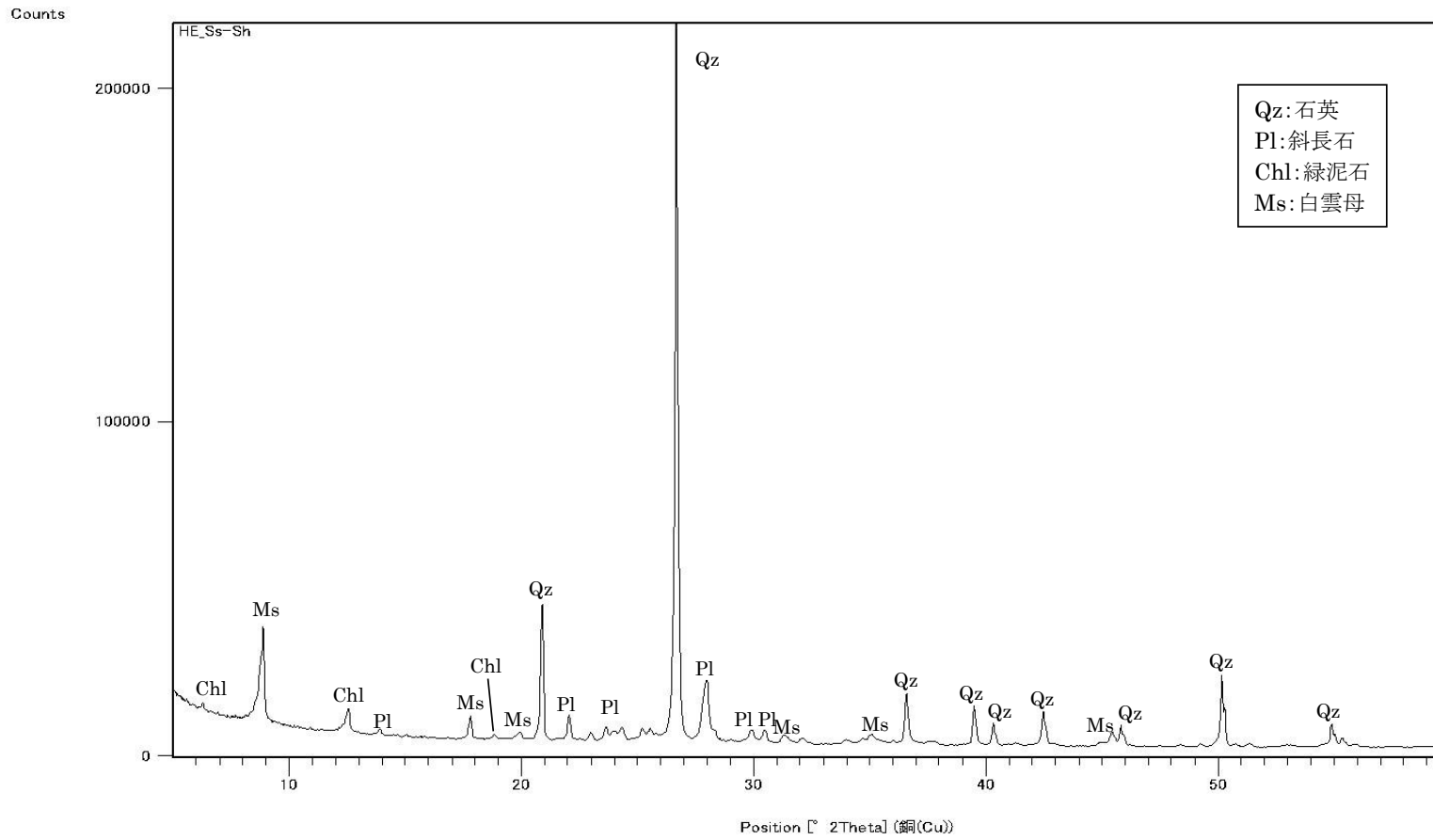
添付図 4-4 粉末 X 線回折図_チャート [骨材種類 : SI (急速膨張性、北陸)]



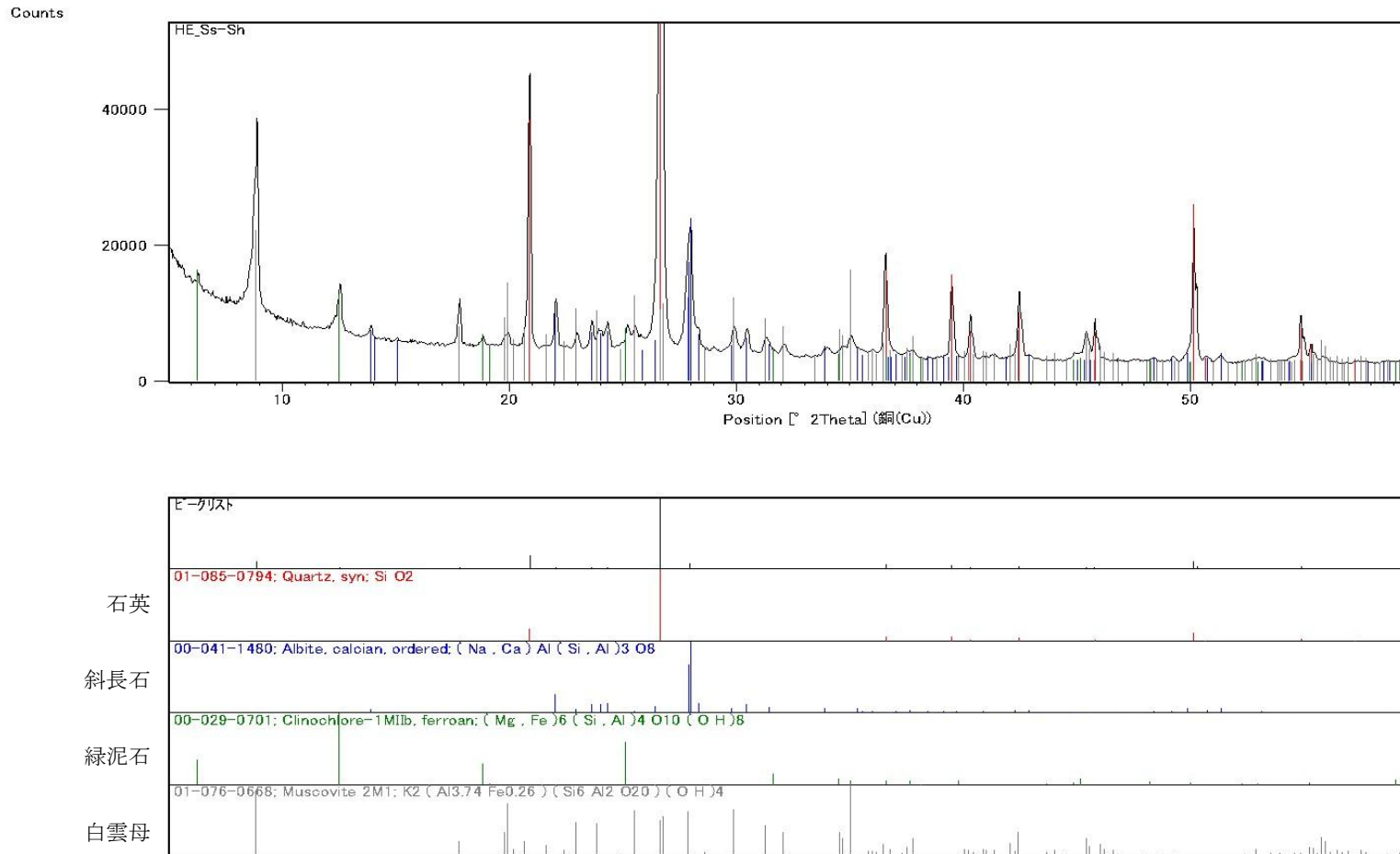
添付図 4-5 粉末 X 線回折図 [骨材種類 : WI (遅延膨張性、関東)]



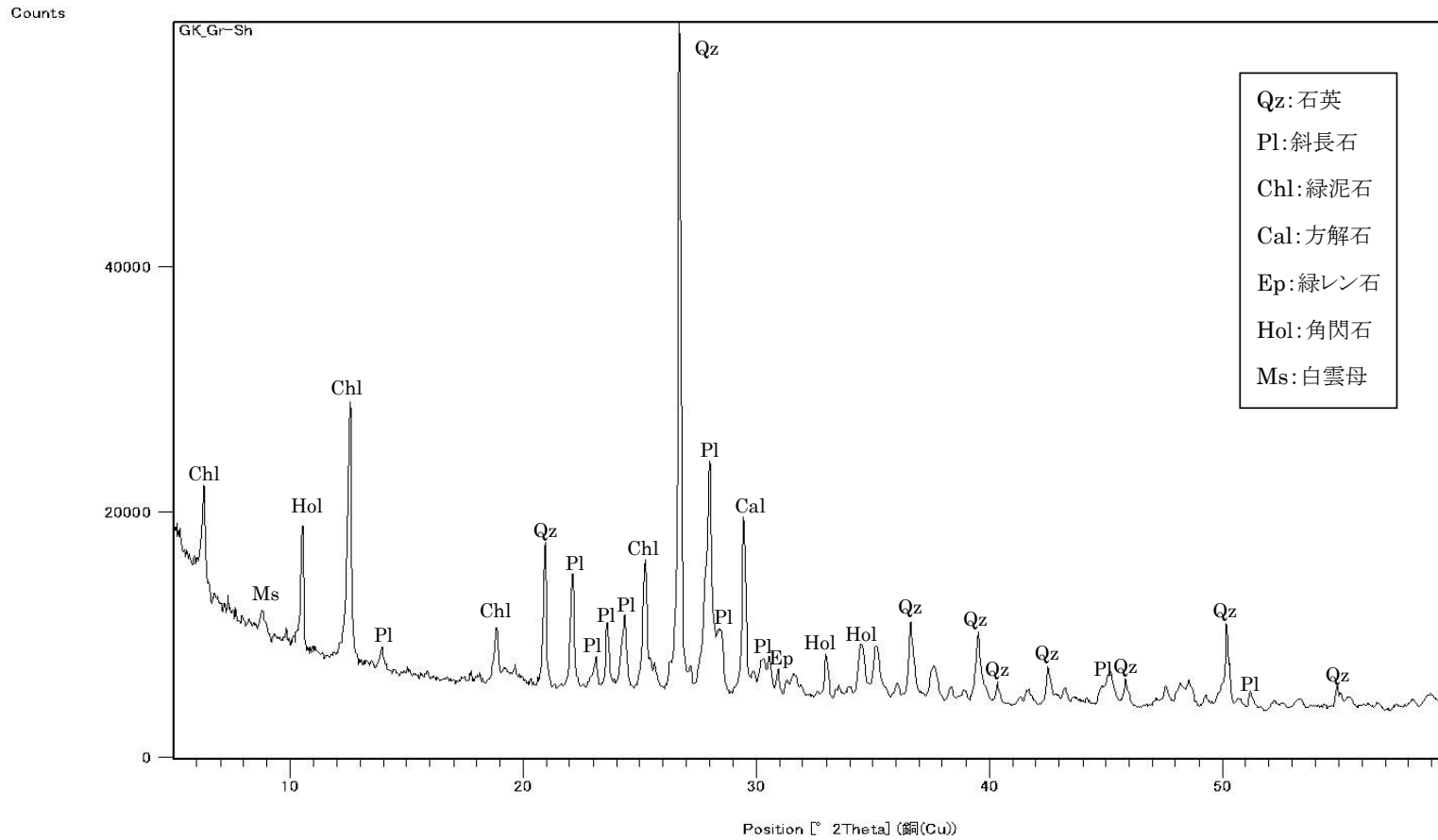
添付図 4-6 粉末 X 線回折図_チャート [骨材種類 : WI (遅延膨張性、関東)]



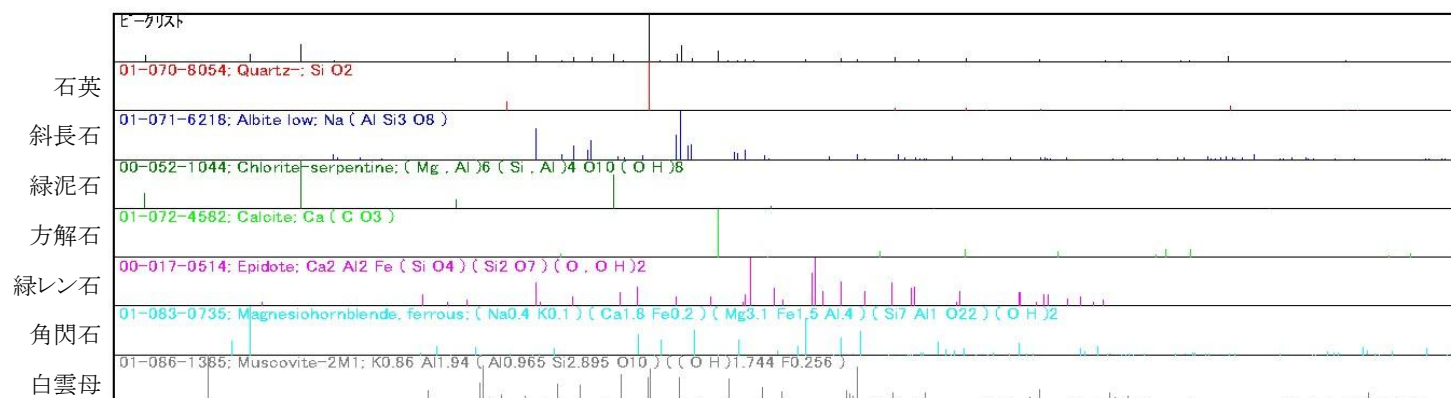
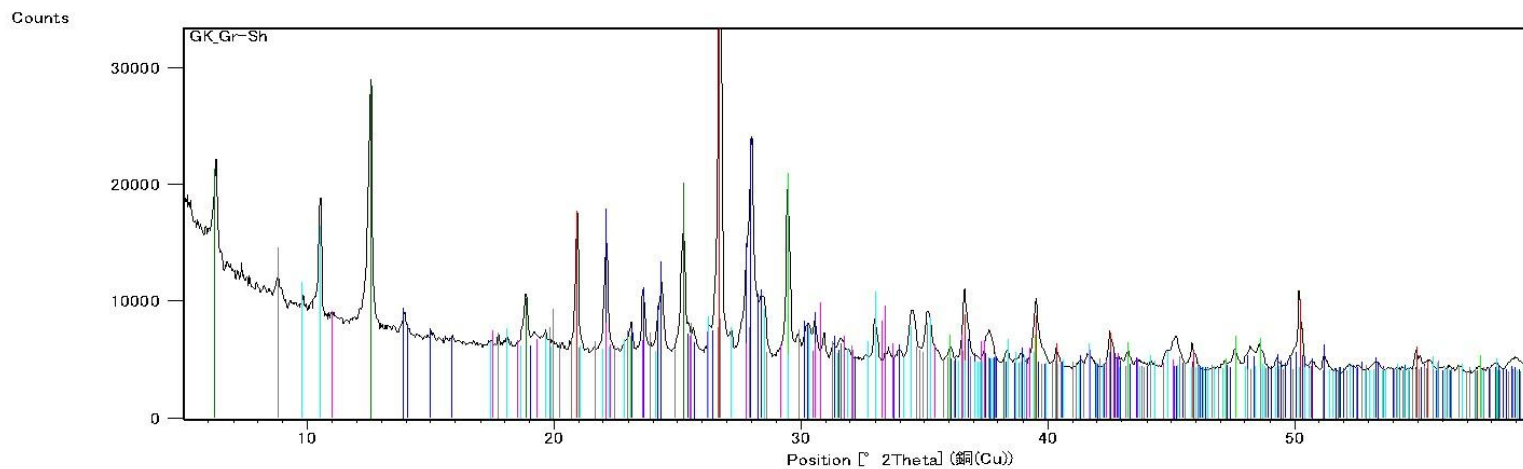
添付図 4-7 粉末 X 線回折図 [骨材種類：HE (遅延膨張性、四国)]



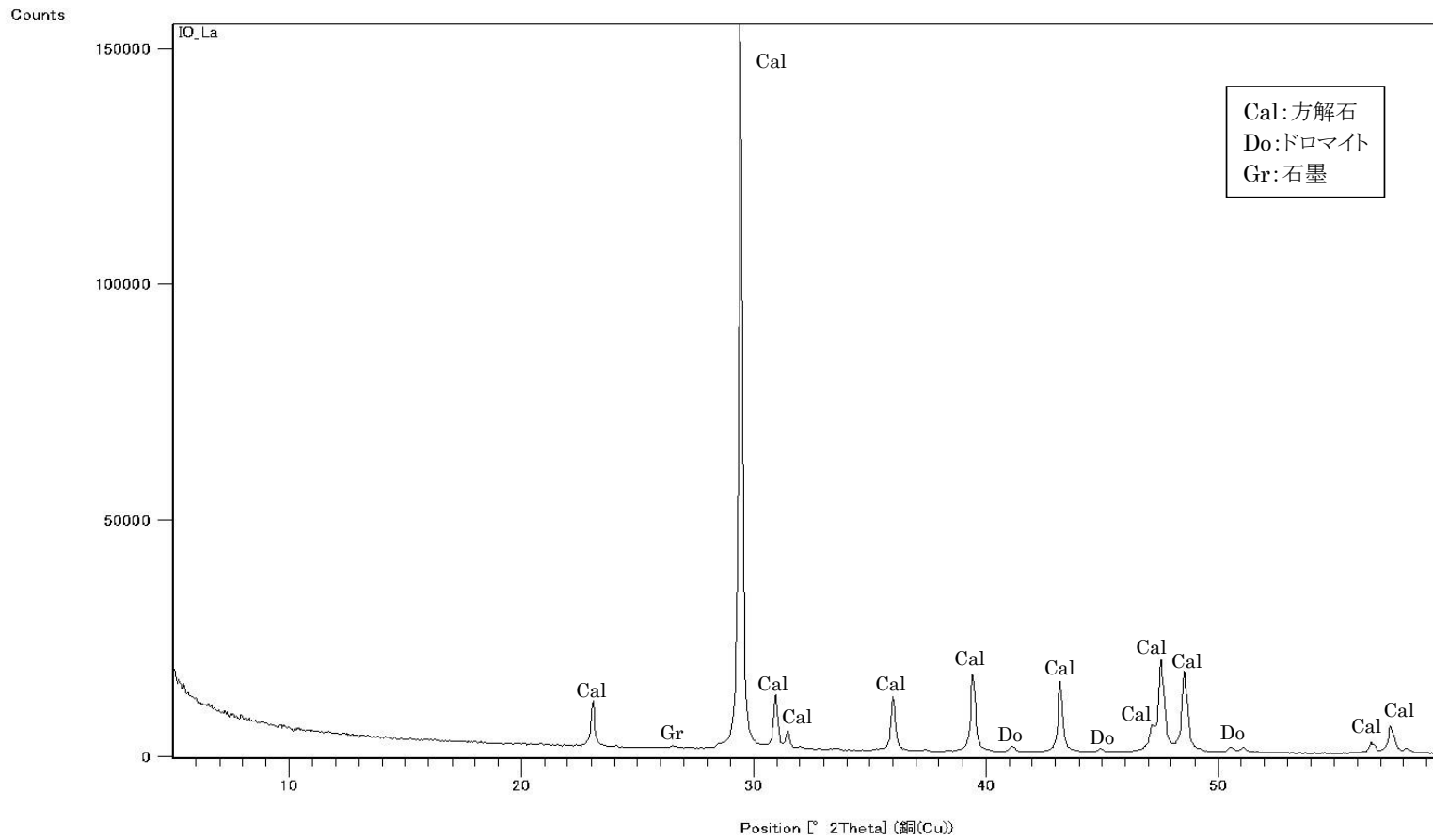
添付図 4-8 粉末 X 線回折図_チャート [骨材種類 : HE (遅延膨張性、四国)]



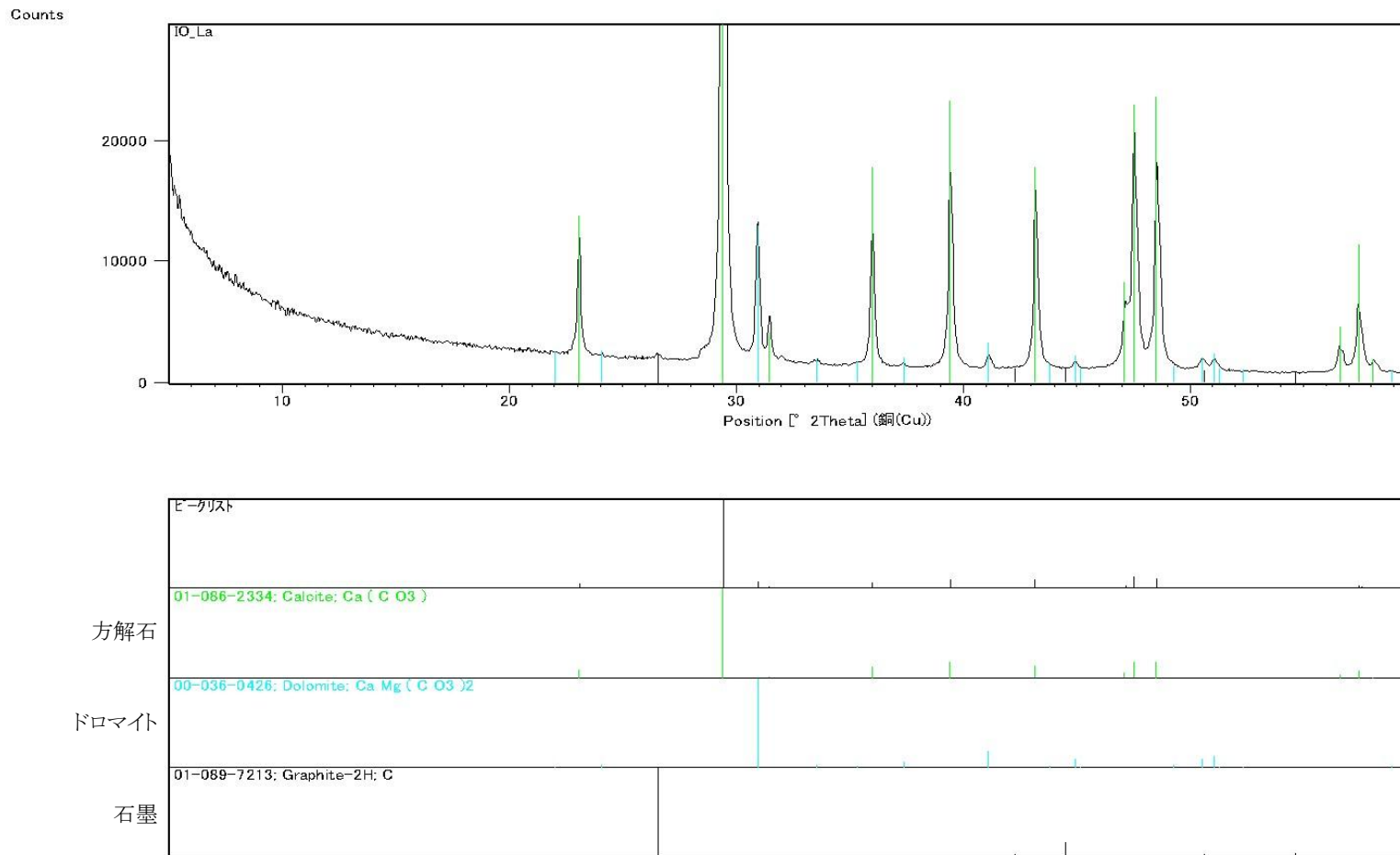
添付図 4-9 粉末 X 線回折図 [骨材種類 : GK (遅延膨張性、九州)]



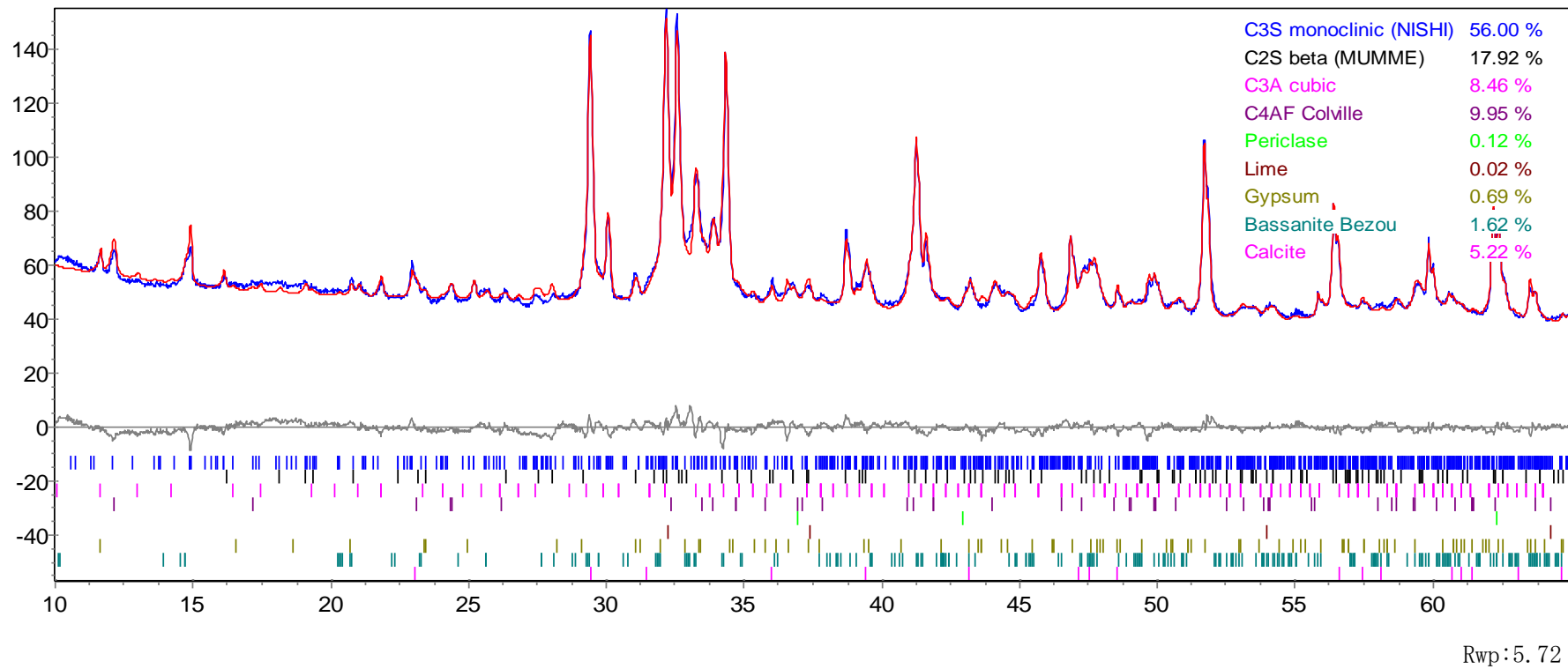
添付図 4-10 粉末 X 線回折図_チャート [骨材種類 : GK (遅延膨張性、九州)]



添付図 4-11 粉末 X 線回折図 [骨材種類 : IO (非反応性骨材、九州)]



添付図 4-12 粉末 X 線回折図_チャート [骨材種類：IO (非反応性骨材、九州)]



添付図 4-13 粉末 X 線回折／リートベルト解析のフィッティング結果（普通ポルトランドセメント）
（青線：実測値、赤線：予測値、灰色：実測と予測との差分）

添付資料 5 CPT 試験用供試体の製作状況

1. フレッシュ性状測定状況



添付図 5-1 骨材種類: T0 (急速膨張性)、アルカリ総量: 5.50kg/m^3



添付図 5-2 骨材種類: T0 (急速膨張性)、アルカリ総量: 4.25kg/m^3



添付図 5-3 骨材種類：T0（急速膨張性）、アルカリ総量：3.00kg/m³



添付図 5-4 骨材種類：SI（急速膨張性）、アルカリ総量：5.50kg/m³



添付図 5-5 骨材種類：WI（遅延膨張性）、アルカリ総量：5.50kg/m³



添付図 5-6 骨材種類：WI（遅延膨張性）、アルカリ総量：4.25kg/m³



添付図 5-7 骨材種類：WI（遅延膨張性）、アルカリ総量：3.00kg/m³



添付図 5-8 骨材種類：HE（遅延膨張性）、アルカリ総量：5.50kg/m³



添付図 5-9 骨材種類：HE（遅延膨張性）、アルカリ総量：4.25kg/m³



添付図 5-10 骨材種類：GK（遅延膨張性）、アルカリ総量：5.50kg/m³

2. 成型供試体外観



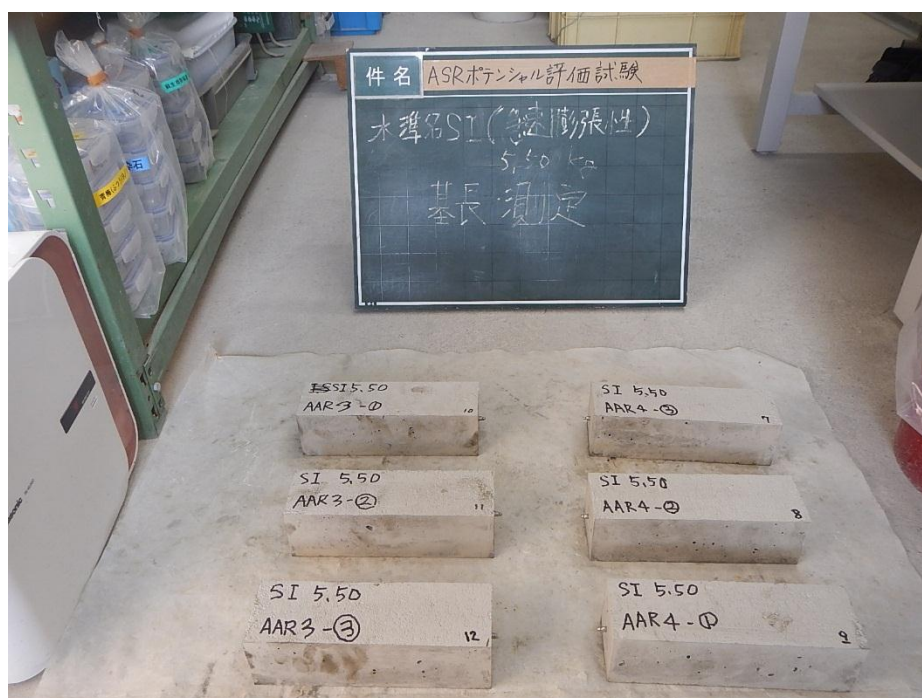
添付図 5-11 骨材種類：T0（急速膨張性）、アルカリ総量：5.50kg/m³
[20℃用：3本、38℃用：3本、60℃用：3本、60℃アルカリラッピングなし用：3本]



添付図 5-12 骨材種類：T0（急速膨張性）、アルカリ総量：4.25kg/m³
[38℃用：3本]



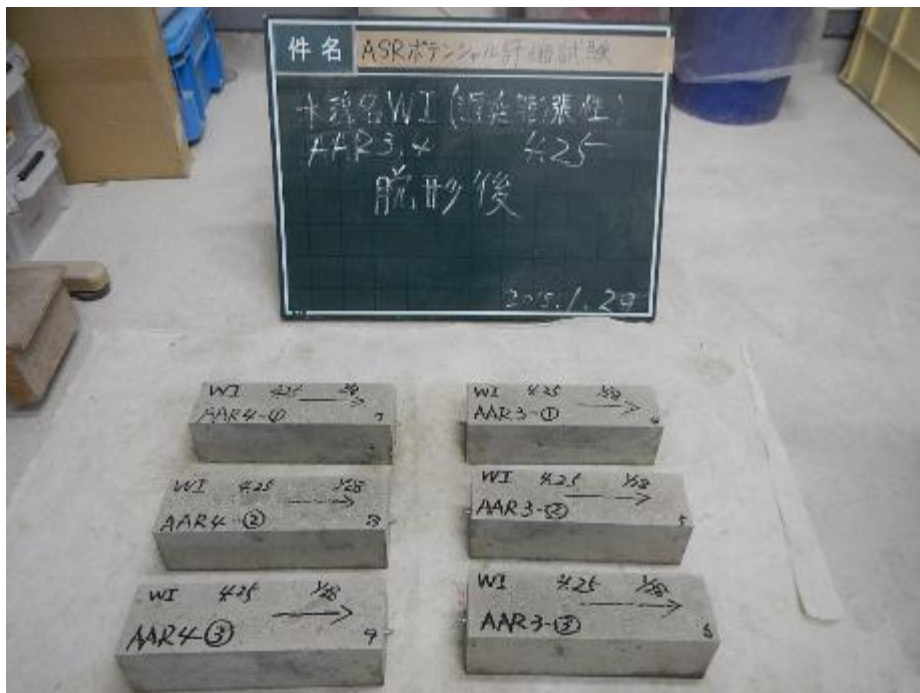
添付図 5-13 骨材種類：T0（急速膨張性）、アルカリ総量：3.00kg/m³
[38℃用：3本]



添付図 5-14 骨材種類：SI（急速膨張性）、アルカリ総量：5.50kg/m³
[38℃用：3本、60℃用：3本]



添付図 5-15 骨材種類：WI（遅延膨張性）、アルカリ総量：5.50kg/m³
 [20℃用：3本、38℃用：3本、60℃用：3本、60℃アルカリラッピングなし用：3本]



添付図 5-16 骨材種類：WI（遅延膨張性）、アルカリ総量：4.25kg/m³
 [38℃用：3本、60℃用：3本]



添付図 5-17 骨材種類：WI（遅延膨張性）、アルカリ総量：3.00kg/m³
[38℃用：3本]



添付図 5-18 骨材種類：HE（遅延膨張性）、アルカリ総量：5.50kg/m³
[20℃用：3本、38℃用：3本、60℃用：3本]



添付図 5-19 骨材種類：HE（遅延膨張性）、アルカリ総量：4.25kg/m³
[38℃用：3本]



添付図 5-20 骨材種類：HE（遅延膨張性）、アルカリ総量：4.25kg/m³
[60℃用：3本]



添付図 5-21 骨材種類：GK（遅延膨張性）、アルカリ総量：5.50kg/m³
[38℃用：3本、60℃用：3本]

添付資料 6 CPT 測定データシート

<長さ変化および質量変化測定結果>

1. 骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：20℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有
2. 骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：3.00kg/m³、アルカリラッピング有
3. 骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有
4. 骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）
5. 骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）
6. 骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング無（AAR-4）
7. 骨材種類：SI（急速膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）
8. 骨材種類：SI（急速膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50 kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）
9. 骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：20℃、アルカリ総量：5.50 kg/m³、アルカリラッピング有
10. 骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有
11. 骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）
12. 骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：3.00kg/m³、アルカリラッピング有
13. 骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有
14. 骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）
15. 骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング無（AAR-4）
16. 骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：20℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有
17. 骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有
18. 骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）
19. 骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有
20. 骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）
21. 骨材種類：GK（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）
22. 骨材種類：GK（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）

試験水準：骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：20℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.435	0.002	0.434	0.000	0.042	0.001	0.042	0.000	0.208	0.002	0.207	0.000	0.000
	下	0.433				0.041				0.206				
30分 水中浸漬後	上	0.435	0.000	0.435	0.000	0.042	0.001	0.042	0.000	0.201	0.000	0.201	-0.003	-0.001
	下	0.435				0.041				0.201				
2週	上	0.450	-0.002	0.451	0.008	0.064	0.001	0.064	0.010	0.220	-0.001	0.221	0.007	0.008
	下	0.452				0.063				0.221				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：20℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3444.1	0.00	3420.1	0.00	3416.9	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3449.9	0.17	3426.3	0.18	3423.9	0.20	0.18
2週	3461.0	0.49	3438.0	0.52	3435.6	0.55	0.52
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：3.00kg/m³、アルカリラッピング有

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.391	0.001	0.391	0.000	0.368	0.001	0.368	0.000	0.141	0.000	0.141	0.000	0.000
	下	0.390				0.367				0.141				
30分 水中浸漬後	上	0.396	0.001	0.396	0.002	0.370	0.000	0.370	0.001	0.149	0.001	0.149	0.004	0.002
	下	0.395				0.370				0.148				
2週	上	0.371	0.002	0.370	-0.010	0.351	-0.001	0.352	-0.008	0.126	-0.001	0.127	-0.007	-0.008
	下	0.369				0.352				0.127				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：3.00kg/m³、アルカリラッピング有

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3436.6	0.00	3429.0	0.00	3434.3	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3444.9	0.24	3439.6	0.31	3444.5	0.30	0.28
2週	3456.3	0.57	3449.8	0.61	3455.2	0.61	0.60
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.033	0.002	0.032	0.000	0.129	0.000	0.129	0.000	0.390	0.001	0.390	0.000	0.000
	下	0.031				0.129				0.389				
0.5時間	上	0.034	0.003	0.033	0.000	0.129	0.000	0.129	0.000	0.402	0.003	0.401	0.005	0.002
	下	0.031				0.129				0.399				
2週	上	0.014	0.001	0.014	-0.009	0.111	0.001	0.111	-0.009	0.371	-0.001	0.372	-0.009	-0.009
	下	0.013				0.110				0.372				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3424.2	0.00	3388.4	0.00	3394.4	0.00	0.00
0.5時間	3432.4	0.24	3398.4	0.30	3403.6	0.27	0.27
2週	3441.9	0.52	3407.0	0.55	3413.3	0.56	0.54
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.236	0.001	0.236	0.000	0.067	0.000	0.067	0.000	0.013	0.000	0.013	0.000	0.000
	下	0.235				0.067				0.013				
30分 水中浸漬後	上	0.236	0.001	0.236	0.000	0.065	0.000	0.065	-0.001	0.013	0.000	0.013	0.000	0.000
	下	0.235				0.065				0.013				
2週	上	0.259	0.001	0.259	0.011	0.088	0.000	0.088	0.010	0.033	0.000	0.033	0.010	0.010
	下	0.258				0.088				0.033				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3421.8	0.00	3429.3	0.00	3397.2	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3428.4	0.19	3435.8	0.19	3403.0	0.17	0.18
2週	3437.8	0.47	3444.0	0.43	3412.6	0.45	0.45
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.295	0.002	0.294	0.000	0.253	0.002	0.252	0.000	0.285	0.001	0.285	0.000	0.000
	下	0.293				0.251				0.284				
30分 水中浸漬後	上	0.296	0.002	0.295	0.000	0.255	0.002	0.254	0.001	0.286	0.000	0.286	0.000	0.000
	下	0.294				0.253				0.286				
2週	上	0.446	-0.002	0.447	0.073	0.411	0.000	0.411	0.076	0.486	0.001	0.486	0.096	0.082
	下	0.448				0.411				0.485				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3443.0	0.00	3422.2	0.00	3401.9	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3449.8	0.20	3427.9	0.17	3408.0	0.18	0.18
2週	3458.8	0.46	3435.3	0.38	3417.0	0.44	0.43
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング無（AAR-4）

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.211	0.000	0.211	0.000	0.382	0.001	0.382	0.000	0.275	0.002	0.274	0.000	0.000
	下	0.211				0.381				0.273				
30分 水中浸漬後	上	0.211	-0.002	0.212	0.000	0.384	0.001	0.384	0.001	0.277	0.001	0.277	0.001	0.001
	下	0.213				0.383				0.276				
2週	上	0.467	0.001	0.467	0.122	0.580	-0.001	0.581	0.095	0.465	-0.001	0.466	0.091	0.103
	下	0.466				0.581				0.466				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：T0（急速膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング無（AAR-4）

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3428.5	0.00	3419.8	0.00	3382.5	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3436.0	0.22	3426.7	0.20	3389.2	0.20	0.21
2週	3435.9	0.22	3423.8	0.12	3387.2	0.14	0.16
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：SI（急速膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.134	-0.002	0.135	0.000	0.261	-0.002	0.262	0.000	0.391	0.001	0.391	0.000	0.000
	下	0.136				0.263				0.390				
30分 水中浸漬後	上	0.138	0.002	0.137	0.001	0.262	-0.001	0.263	0.000	0.391	-0.001	0.392	0.000	0.000
	下	0.136				0.263				0.392				
2週	上	0.112	-0.001	0.113	-0.010	0.240	-0.001	0.241	-0.010	0.371	0.000	0.371	-0.010	-0.010
	下	0.113				0.241				0.371				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：SI（急速膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3400.3	0.00	3404.0	0.00	3398.6	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3410.1	0.29	3413.3	0.27	3407.8	0.27	0.28
2週	3418.6	0.54	3421.5	0.51	3416.4	0.52	0.52
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：SI（急速膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.182	-0.001	0.183	0.000	0.261	-0.002	0.262	0.000	0.249	0.000	0.249	0.000	0.000
	下	0.183				0.263				0.249				
30分 水中浸漬後	上	0.183	-0.002	0.184	0.000	0.269	0.000	0.269	0.003	0.249	0.000	0.249	0.000	0.001
	下	0.185				0.269				0.249				
2週	上	0.255	-0.001	0.256	0.035	0.351	-0.001	0.352	0.043	0.328	-0.001	0.329	0.038	0.039
	下	0.256				0.352				0.329				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：SI（急速膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3401.1	0.00	3398.7	0.00	3404.8	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3411.5	0.31	3409.7	0.32	3414.7	0.29	0.31
2週	3418.0	0.50	3417.4	0.55	3422.4	0.52	0.52
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：20℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.332	0.001	0.332	0.000	0.263	0.000	0.263	0.000	0.141	-0.001	0.142	0.000	0.000
	下	0.331				0.263				0.142				
30分 水中浸漬後	上	0.331	0.001	0.331	0.000	0.262	-0.002	0.263	0.000	0.146	-0.001	0.147	0.002	0.001
	下	0.330				0.264				0.147				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：20℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3411.1	0.00	3398.3	0.00	3409.8	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3419.1	0.23	3405.7	0.22	3417.9	0.24	0.23
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.144	-0.002	0.145	0.000	-0.007	0.001	-0.008	0.000	0.218	0.003	0.217	0.000	0.000
	下	0.146				-0.008				0.215				
30分 水中浸漬後	上	0.138	0.001	0.138	-0.003	-0.016	0.001	-0.017	-0.004	0.211	0.003	0.210	-0.003	-0.003
	下	0.137				-0.017				0.208				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3344.4	0.00	3354.5	0.00	3361.7	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3351.3	0.21	3360.9	0.19	3368.0	0.19	0.20
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.146	0.003	0.145	0.000	0.186	-0.001	0.187	0.000	0.167	-0.001	0.168	0.000	0.000
	下	0.143				0.187				0.168				
30分 水中浸漬後	上	0.151	-0.001	0.152	0.003	0.193	-0.001	0.194	0.003	0.174	0.000	0.174	0.003	0.003
	下	0.152				0.194				0.174				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3407.9	0.00	3395.6	0.00	3357.2	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3415.9	0.23	3403.5	0.23	3365.4	0.24	0.23
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：3.00kg/m³、アルカリラッピング有

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.145	-0.003	0.147	0.000	0.351	0.001	0.351	0.000	0.240	0.000	0.240	0.000	0.000
	下	0.148				0.350				0.240				
30分 水中浸漬後	上	0.142	-0.003	0.144	-0.001	0.349	-0.001	0.350	0.000	0.241	0.001	0.241	0.000	0.000
	下	0.145				0.350				0.240				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：3.00kg/m³、アルカリラッピング有

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3323.7	0.00	3365.3	0.00	3355.7	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3329.8	0.18	3371.7	0.19	3363.6	0.24	0.20
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.216	-0.002	0.217	0.000	0.176	0.000	0.176	0.000	0.187	-0.001	0.188	0.000	0.000
	下	0.218				0.176				0.188				
30分 水中浸漬後	上	0.220	0.001	0.220	0.001	0.180	0.001	0.180	0.002	0.185	-0.001	0.186	-0.001	0.001
	下	0.219				0.179				0.186				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3371.9	0.00	3360.4	0.00	3344.1	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3379.8	0.23	3367.5	0.21	3350.9	0.20	0.21
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	-0.204	0.002	-0.205	0.000	-0.057	0.000	-0.057	0.000	0.033	-0.002	0.034	0.000	0.000
	下	-0.206				-0.057				0.035				
30分 水中浸漬後	上	-0.197	0.002	-0.198	0.003	-0.051	-0.001	-0.051	0.003	0.039	-0.002	0.040	0.003	0.003
	下	-0.199				-0.050				0.041				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3409.0	0.00	3388.6	0.00	3405.5	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3418.4	0.28	3396.7	0.24	3414.6	0.27	0.26
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング無（AAR-4）

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	-0.198	0.000	-0.198	0.000	-0.023	-0.001	-0.023	0.000	0.143	0.001	0.143	0.000	0.000
	下	-0.198				-0.022				0.142				
30分 水中浸漬後	上	-0.192	0.000	-0.192	0.003	-0.014	-0.001	-0.014	0.004	0.151	0.001	0.151	0.004	0.004
	下	-0.192				-0.013				0.150				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：WI（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング無（AAR-4）

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3400.6	0.00	3367.8	0.00	3384.8	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3410.1	0.28	3376.0	0.24	3394.1	0.27	0.26
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：20℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.143	-0.001	0.144	0.000	0.213	0.000	0.213	0.000	0.300	0.000	0.300	0.000	0.000
	下	0.144				0.213				0.300				
30分 水中浸漬後	上	0.147	-0.001	0.148	0.002	0.218	0.000	0.218	0.002	0.306	0.001	0.306	0.003	0.002
	下	0.148				0.218				0.305				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：20℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3444.2	0.00	3409.0	0.00	3410.5	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3450.4	0.18	3414.5	0.16	3415.9	0.16	0.17
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.131	-0.001	0.132	0.000	0.167	-0.001	0.168	0.000	0.244	0.001	0.244	0.000	0.000
	下	0.132				0.168				0.243				
30分 水中浸漬後	上	0.121	-0.002	0.122	-0.005	0.160	0.000	0.160	-0.004	0.238	0.002	0.237	-0.003	-0.004
	下	0.123				0.160				0.236				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3415.2	0.00	3421.5	0.00	3407.7	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3420.2	0.15	3426.6	0.15	3412.6	0.14	0.15
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.228	-0.001	0.229	0.000	0.117	-0.001	0.118	0.000	-0.055	-0.001	-0.055	0.000	0.000
	下	0.229				0.118				-0.054				
30分 水中浸漬後	上	0.234	0.001	0.234	0.002	0.123	0.001	0.123	0.002	-0.049	-0.001	-0.049	0.003	0.002
	下	0.233				0.122				-0.048				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3386.1	0.00	3396.7	0.00	3412.4	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3392.6	0.19	3403.4	0.20	3419.6	0.21	0.20
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.410	0.001	0.410	0.000	0.453	0.002	0.452	0.000	0.256	0.000	0.256	0.000	0.000
	下	0.409				0.451				0.256				
30分 水中浸漬後	上	0.413	-0.002	0.414	0.002	0.456	-0.001	0.457	0.002	0.262	0.001	0.262	0.003	0.002
	下	0.415				0.457				0.261				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：4.25kg/m³、アルカリラッピング有

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3396.2	0.00	3398.7	0.00	3416.9	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3401.7	0.16	3404.1	0.16	3422.6	0.17	0.16
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.128	0.000	0.128	0.000	-0.065	0.000	-0.065	0.000	-0.063	-0.002	-0.062	0.000	0.000
	下	0.128				-0.065				-0.061				
30分 水中浸漬後	上	0.135	0.000	0.135	0.003	-0.058	-0.001	-0.058	0.003	-0.052	0.000	-0.052	0.005	0.004
	下	0.135				-0.057				-0.052				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：HE（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3395.4	0.00	3414.6	0.00	3401.4	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3402.5	0.21	3421.3	0.20	3408.8	0.22	0.21
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：GK（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.227	0.000	0.227	0.000	0.198	0.002	0.197	0.000	0.348	0.001	0.348	0.000	0.000
	下	0.227				0.196				0.347				
30分 水中浸漬後	上	0.221	-0.001	0.222	-0.002	0.188	0.000	0.188	-0.004	0.338	0.001	0.338	-0.004	-0.003
	下	0.222				0.188				0.337				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：GK（遅延膨張性）、温度：38℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-3）

<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3436.9	0.00	3445.4	0.00	3470.4	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3443.9	0.20	3452.0	0.19	3477.1	0.19	0.19
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

試験水準：骨材種類：GK（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）

<長さ変化測定結果>

材齢	上下	試験体1				試験体2				試験体3				変化率 平均値 (%)
		測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	測定値 (mm)	測定誤差 (mm)	平均値 (mm)	変化率 (%)	
0日(基長)	上	0.366	0.001	0.366	0.000	0.135	0.002	0.134	0.000	0.410	0.000	0.410	0.000	0.000
	下	0.365				0.133				0.410				
30分 水中浸漬後	上	0.355	0.001	0.355	-0.004	0.123	-0.001	0.124	-0.004	0.402	0.000	0.402	-0.003	-0.004
	下	0.354				0.124				0.402				
5週	上													
	下													
10週	上													
	下													
15週	上													
	下													
20週	上													
	下													
26週	上													
	下													

※基準棒長さ：270mm、プラグゲージ長：30mm

試験水準：骨材種類：GK（遅延膨張性）、温度：60℃、アルカリ総量：5.50kg/m³、アルカリラッピング有（AAR-4）

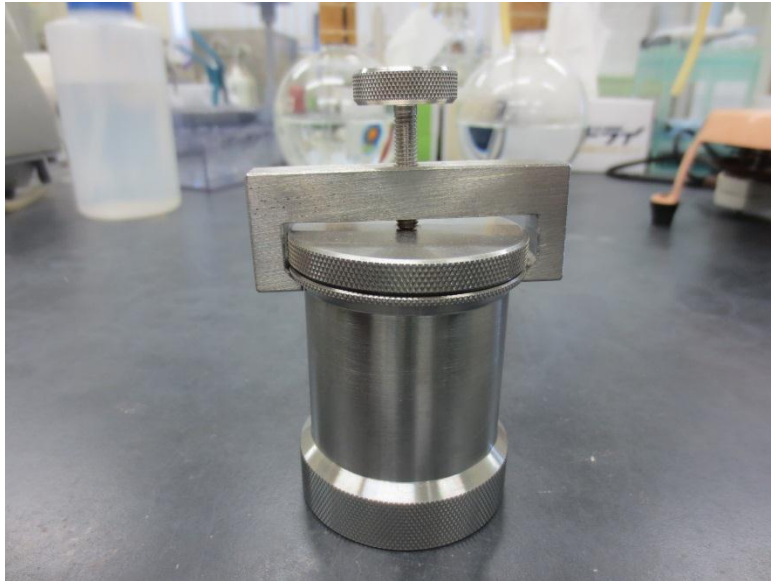
<質量変化測定結果>

材齢	試験体1		試験体2		試験体3		変化率 平均値 (%)
	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	測定値 (g)	変化率 (%)	
0日(基長)	3453.8	0.00	3443.8	0.00	3447.7	0.00	0.00
30分 水中浸漬後	3460.5	0.19	3450.0	0.18	3455.4	0.22	0.20
5週							
10週							
15週							
20週							
26週							

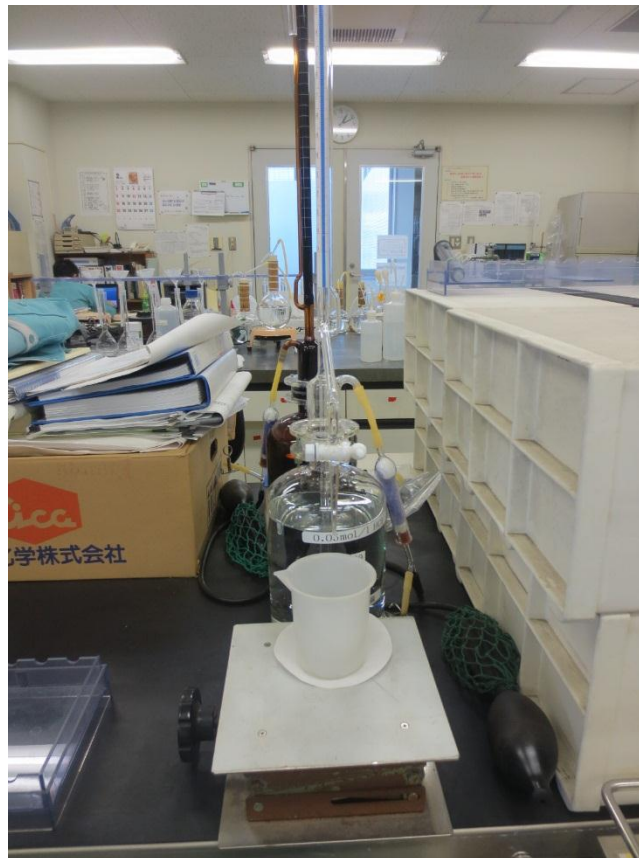
添付資料 7 使用測定器具

添付表 7-1 使用測定機器一覧

試験方法	使用測定機器名称	用途	型番 (器物番号)	掲載 図番号
JIS A 1145 (化学法)	丸東製作所社製 アルカリ骨材反応容器	アルカリと骨材試料 との反応	C45	添付図 7-1
	滴定装置	アルカリ濃度減少量 の定量	-	添付図 7-2
	メトラートレド社製 電子天秤	溶解シリカ量の定量 (質量法)	PB602-S (1125430089)	添付図 7-3
JIS A 1146 (モルタルバー法)	丸東製作所社製 コンパレーター および標準棒 (JIS A 1129-3 仕様)	JIS モルタルバーの 長さ変化測定	CB-55-1	添付図 7-4
	A&D 社製電子天秤	JIS モルタルバーの 供試体重量の測定	EK-610i (Q2705768)	添付図 7-5
ASTM C1260 (RILEM AAR-2)	丸東製作所社製 セメント・コンパレーター および標準棒 (ASTM C490 仕様)	ASTM モルタルバー の長さ変化測定	(S/N6600920)	添付図 7-6
	メトラートレド社製 電子天秤	ASTM モルタルバー の供試体重量の測定	MS16001L102 (1230320185)	添付図 7-7
RILEM AAR-3 および AAR-4	丸東製作所社製 スランプ試験器具 (JIS A 1101 仕様)	コンクリートの スランプ測定	-	添付図 7-8
	丸東製作所社製 普通型エアメーター (JIS A 1128 仕様)	コンクリートの 空気量測定	C13 (C13-9591XT)	添付図 7-9
	丸東製作所社製 コンクリートバー試験用 コンパレーター および標準棒	RILEM AAR-3/AAR-4 のコンクリートプリ ズムの長さ変化測定	(S/N6600094)	添付図 7-10
	A&D 社製電子天秤	RILEM AAR-3/AAR-4 のコンクリートプリ ズムの重量測定	FP-12K (6501427)	添付図 7-11



添付図 7-1 アルカリ骨材反応容器 (JIS 化学法で使用)



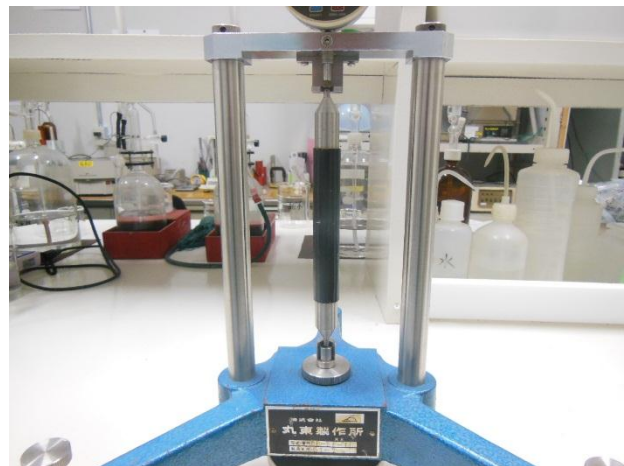
添付図 7-2 滴定装置 (JIS 化学法で使用)



添付図 7-3 電子天秤 (JIS 化学法で使用)



(a) コンパレーター外観



(b) 標準棒測定時の状況

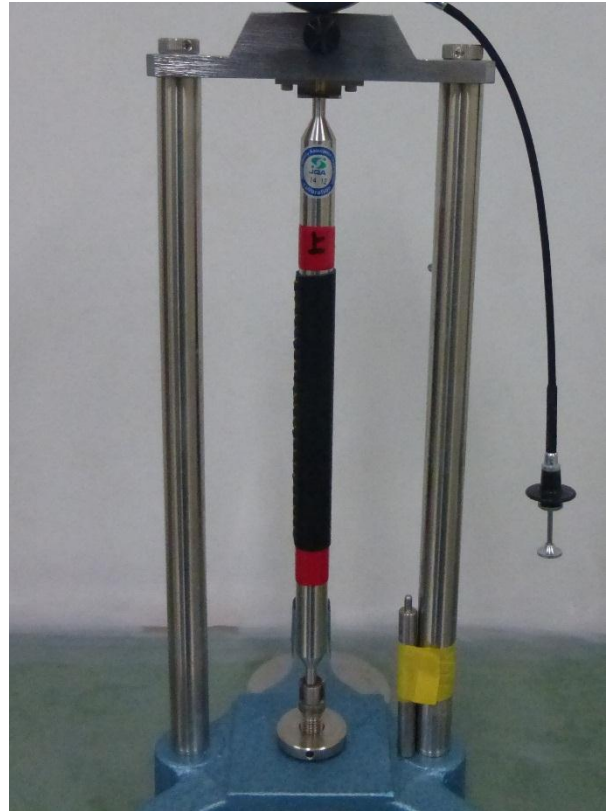
添付図 7-4 JIS モルタルバー用コンパレーターおよび標準棒



添付図 7-5 電子天秤 (JIS モルタルバー供試体重量の測定用)

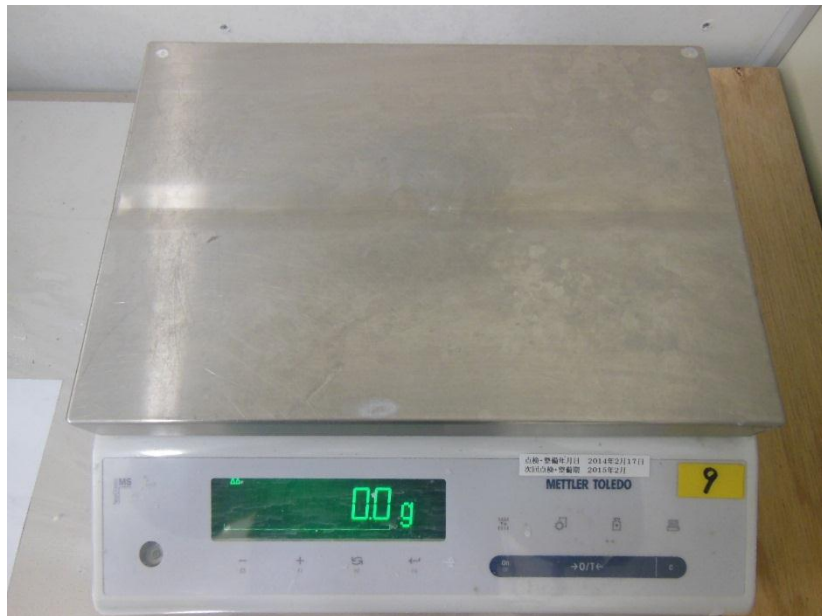


(a) コンパレーター外観



(b) 標準棒測定時の状況

添付図 7-6 ASTM モルタルバー用コンパレーターおよび標準棒



添付図 7-7 電子天秤 (ASTM モルタルバー供試体重量の測定用)



(a) 側面



(b) 上面

添付図 7-8 スランプ試験器具 (CPT 成型時、コンクリートのスランプ測定に使用)

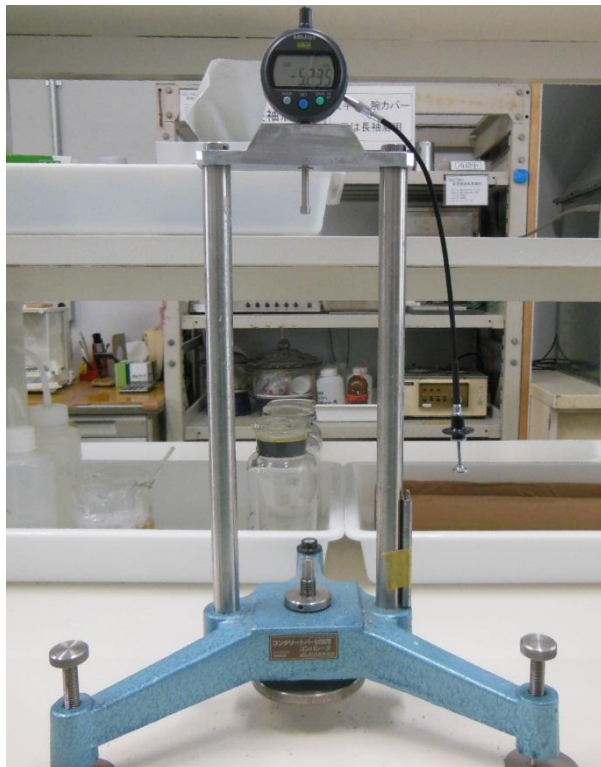


(a) 側面

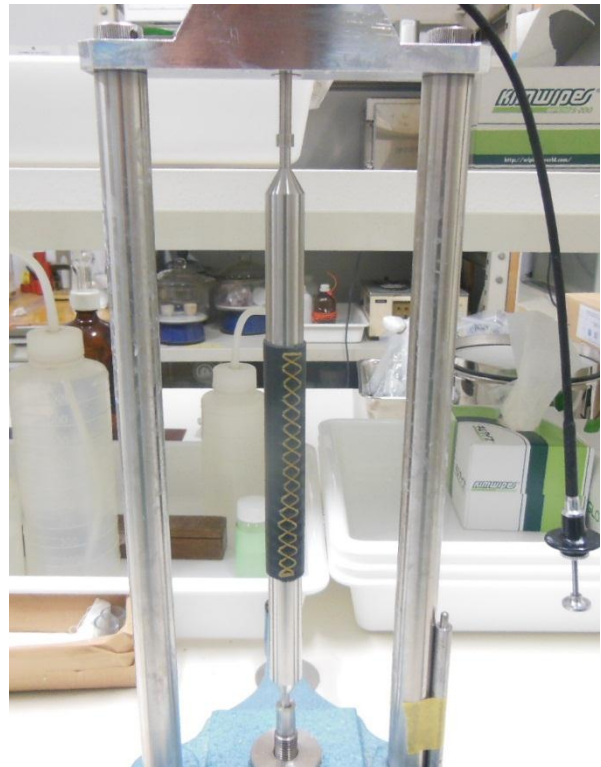


(b) 内部

添付図 7-9 エアメーター (CPT 成型時、コンクリートの空気量測定に使用)



(a) コンパレーター外観



(b) 標準棒測定時の状況

添付図 7-10 CPT 用コンパレーターおよび標準棒



添付図 7-11 電子天秤 (CPT 重量の測定用)

4.3 ASR 診断方法に関する課題抽出

4.3.1 既存の ASR 診断・健全性評価フロー調査

本節では、ASR に関する高経年化技術評価の高度化のために、原子力発電施設における ASR が疑われる場合に関する総合的な健全性評価フローの策定に必要な現状の課題を抽出することを目的とする。

日本建築学会「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説」によると、1991 年版以降の JASS5N に準拠して建設された原子力発電施設の建築物では、ASR 発生を防止する措置が施されているため ASR は着目する劣化要因としないとされている。ただし、それ以前の原子力発電施設の建築物では劣化要因とするか否かは個別に判断するとされている。

現在、原子力発電施設の高経年化評価の対象の多くは 1991 年以前に建設された建築物であり、1991 年以降に建設された施設においても ASR の発生可能性はゼロではないことが最新の研究で分かってきたことから、ASR によって原子力発電施設のコンクリート構造物が要求機能を失う可能性はすべての原子力発電施設について常に注視し、現在及び将来の健全性を適切に評価する手法が必要である。

ここで、原子力発電施設の要求機能及びそれを満たすための性能は、上記指針では以下のように明記されている。

- A：維持管理において原子力施設の建築物に要求される機能は、使用機能、支持機能、遮蔽機能、漏えい防止機能、負圧維持機能および波及的影響の防止機能とする
- B：要求性能に関連する性能は構造安全性、使用性、遮蔽性とし、確保すべき性能水準は、建築物に対する要求機能、環境条件、使用条件などを考慮して定める

ここに、

要求機能：原子力発電施設としての目的または要求に応じて建築物がそなえなければならない機能

支持機能：通常時や地震時において主要な設備・機器を支持する機能

遮蔽機能：一般公衆や放射線業務従事者に対し、放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう放射線量を所定のレベルまで低減する機能

漏えい防止機能：設定した区域から外へ液体の放射性物質が漏えいすることを防止する機能

負圧維持機能：放射性物質の放出を伴うような事故の際に、その外部放散を抑制するために、換気空調設備により建築物の一部のエリアを負圧に維持する機能

波及的影響の防止機能：建築物の破損、落下または転倒により、設備・機器を阻害しない機能である。

原子力発電施設のコンクリート構造物において、ASR に関する健全性評価を行うためには、コンクリートに ASR が生じているか及びその進行度評価という診断に加えて、コンク

リート部材が上記の機能を確保するための性能、— 構造安全性、使用性、遮蔽性 —を有するか、というのが健全性の一つの判断基準にならなければならない。

コンクリート構造物の各種性能を確保するために必要な要件として、「原子力施設における建築物の維持管理指針・同付録」では、劣化事象ごとに評価基準を設けている。劣化事象としては、ひび割れ、鉄筋腐食、剥離・剥落、たわみ、すりへり、漏水、火害が列挙されており、ASRに直接関連する項目としては、ひび割れ、剥離・剥落、たわみ、漏水が挙げられる。ASRに直接関連する各劣化事象の評価基準は以下の通りである。

表 4.3- 1 各性能に対するひび割れの評価基準

性能	評価区分と評価基準		
構造安全性	(健全)	構造安全性に影響を与えるひび割れがない	
	(要検討)	構造安全性に影響を与えるひび割れがある	
使用性	屋内	(健全)	0.4mm 未満
		(経過観察)	0.4mm 以上 1.0mm 未満
		(要検討)	1.0mm 未満
	屋外	(健全)	0.3mm 未満
		(経過観察)	0.3mm 以上 0.8mm 未満
		(要検討)	0.8mm 未満
使用性 (水密)	(健全)	0.05mm 以下	
	(経過観察)	0.05mm を超えて 0.2mm 未満	
	(要検討)	0.2mm 以上	
遮蔽性	使用性を確認することにより担保可能		

表 4.3- 2 剥離・剥落の評価基準

評価区分	評価基準
(健全)	剥離、剥落が認められない
(要検討)	剥離または剥落が生じている箇所がある

表 4.3- 3 たわみの評価基準

評価区分	評価基準
(健全)	顕著なたわみが生じていない たわみスパン比が 1/300 未満である (計測を行った場合)
(要検討)	顕著なたわみが生じている たわみスパン比が 1/300 以上である (計測を行った場合)

表 4.3- 4 漏水の評価基準

評価区分	評価基準
(健全)	漏水および漏水痕がない
(要検討)	漏水または漏水痕がある

つまり、コンクリート構造物に ASR の可能性が疑われた場合においても、上記の評価基準を満たしていれば、現状の部材性能は満たされていると考えることができる。以上をふまえて、ここでの原子力発電施設における ASR に関する総合的な健全性評価フローとは、原子力発電施設が有していなければならない機能が、ASR による部材の性能低下によって満たされなくなる状況を判定することをさす。

本節では既存の ASR に関する診断・健全性評価フローを整理して、原子力発電施設のコンクリート構造物に対して適切な ASR 評価システムの策定に際し課題を抽出することを目的とする。本節で調査対象とした既存の ASR 診断・健全性評価フローは表 4.3-5 に示す 11 の診断・評価法である。

表 4.3-5 既存の ASR 診断・健全性評価フローの調査対象

	学協会・団体	文献名	発表・発行年
1	建設省	コンクリート構造物におけるアルカリシリカ反応の実態調査法(案)	1986
2	国土交通省道路局	道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領(案)	2003
3	土木研究所	非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル	2003
4	道路橋梁中央研究所(仏国) (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux)	内部膨張反応の影響を受けた構造物のマネジメント支援 (Aide a la gestion des ouvrages atteints de reactions de gonflement)	2003
5	RILEM	AAR-6 診断委員会	2004
6	土木学会	コンクリート標準示方書 維持管理編	2007
7	阪神高速道路公団	アルカリ骨材反応に関する調査研究 委員会報告書 ASR 構造物の維持管理マニュアル	1986 2007
8	日本建築学会	原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説 ※	2008
9	日本コンクリート工学会	アルカリ骨材反応調査研究委員会報告書 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書	1989 2008
10	連邦高速道路局(米国) (Federal Highway Administration)	道路構造物におけるアルカリシリカ反応の診断・予測・低減に関する報告書 (Report on the Diagnosis Prognosis, and Mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Transportation Structures)	2010
11	原子力安全基盤機構	原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案	2014

上記に示される診断・評価法の道筋や手法は互いに異なっているものの、診断・評価に使用している各段階は、概ね表 4.3-6 に示す 5 つの要素に分類できる。

表 4.3- 6 既存の診断・評価法の各要素

1	2	3	4	5
資料調査	構造物の目視点検	採取コアでの詳細調査	現地モニタリング	対策
配（調）合 使用材料、種類・産 構造物の様式 構造物の周辺環境 損傷記録	外観変状の有無 ひび割れ幅 ひび割れ密度 ひび割れ分布 ひび割れ深さ ひび割れ指数 シリカゲルの滲出 錆汁の滲出	促進膨張試験 機械的特性試験 中性化深さ アルカリ含有量分析 岩石学的分析	非破壊試験 ひび割れ追跡 変形・歪み計測 構造の一体性評価	止水・防水工事 補強工事 緩和・治療

ここで、ASR 診断・健全性評価フローの具体的な例として、ASR 診断事例を多く有する国であるフランスの道路橋梁中央研究所 (IFSTTAR) 及び、アメリカの連邦高速道路局 (FHWA) の ASR 診断・健全性評価フローをそれぞれ、図 4.3- 1、図 4.3- 2 に示す。

また参考として、国内の構造物の ASR に対する維持管理のため実際に使用されているフローのうち、阪神高速道路公団の ASR 診断・健全性評価フローを図 4.3- 3 に示す。なお、図 4.3- 1、図 4.3- 2 に関しては、原語（フランス語、英語）を適宜日本語に翻訳して記載した。

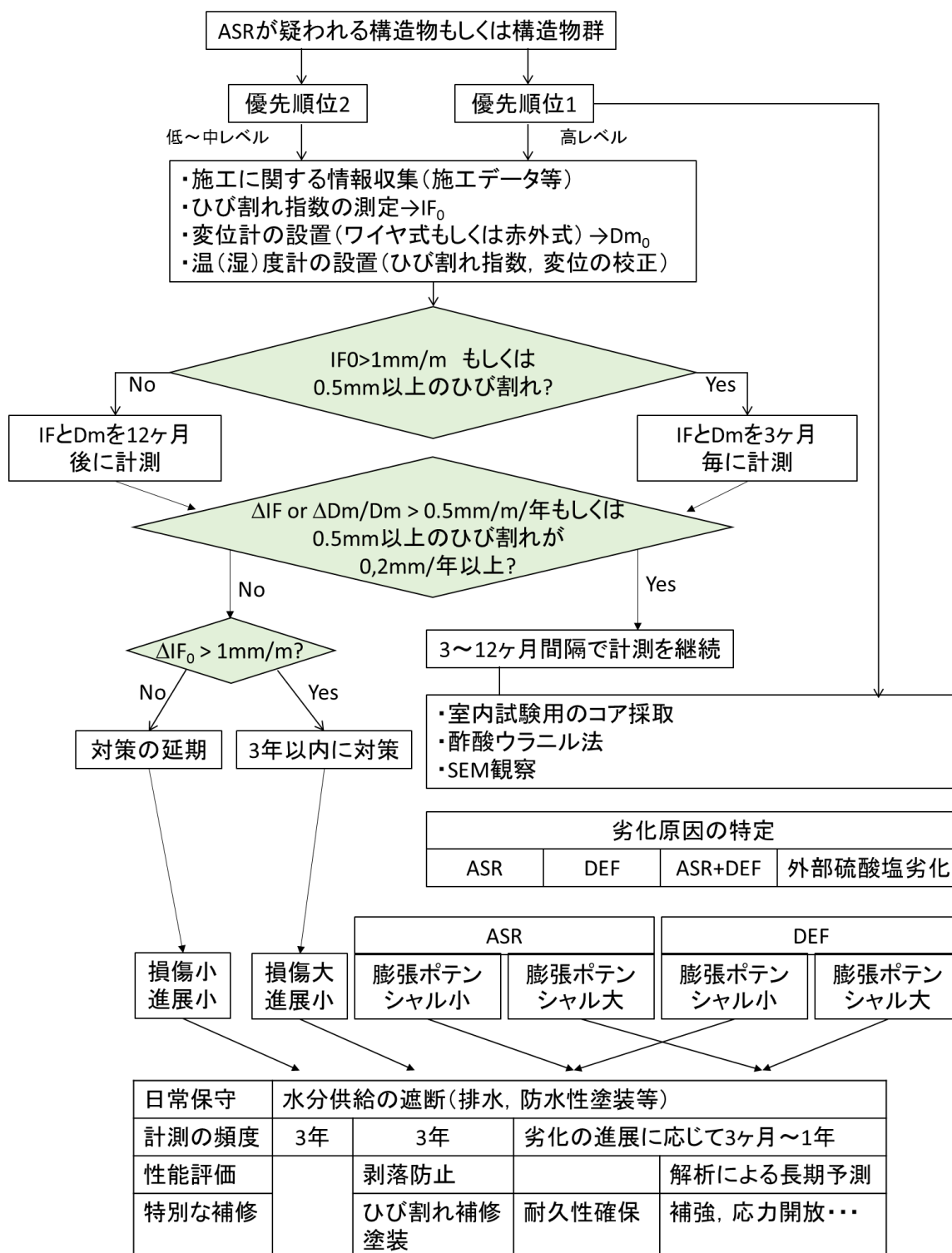


図 4. 3- 1 フランス・道路橋梁中央研究所 (IFSTTAR) の ASR 診断・健全性評価フロー

(内部膨張反応の影響を受けた構造物のマネジメント支援 (2003) より抜粋)

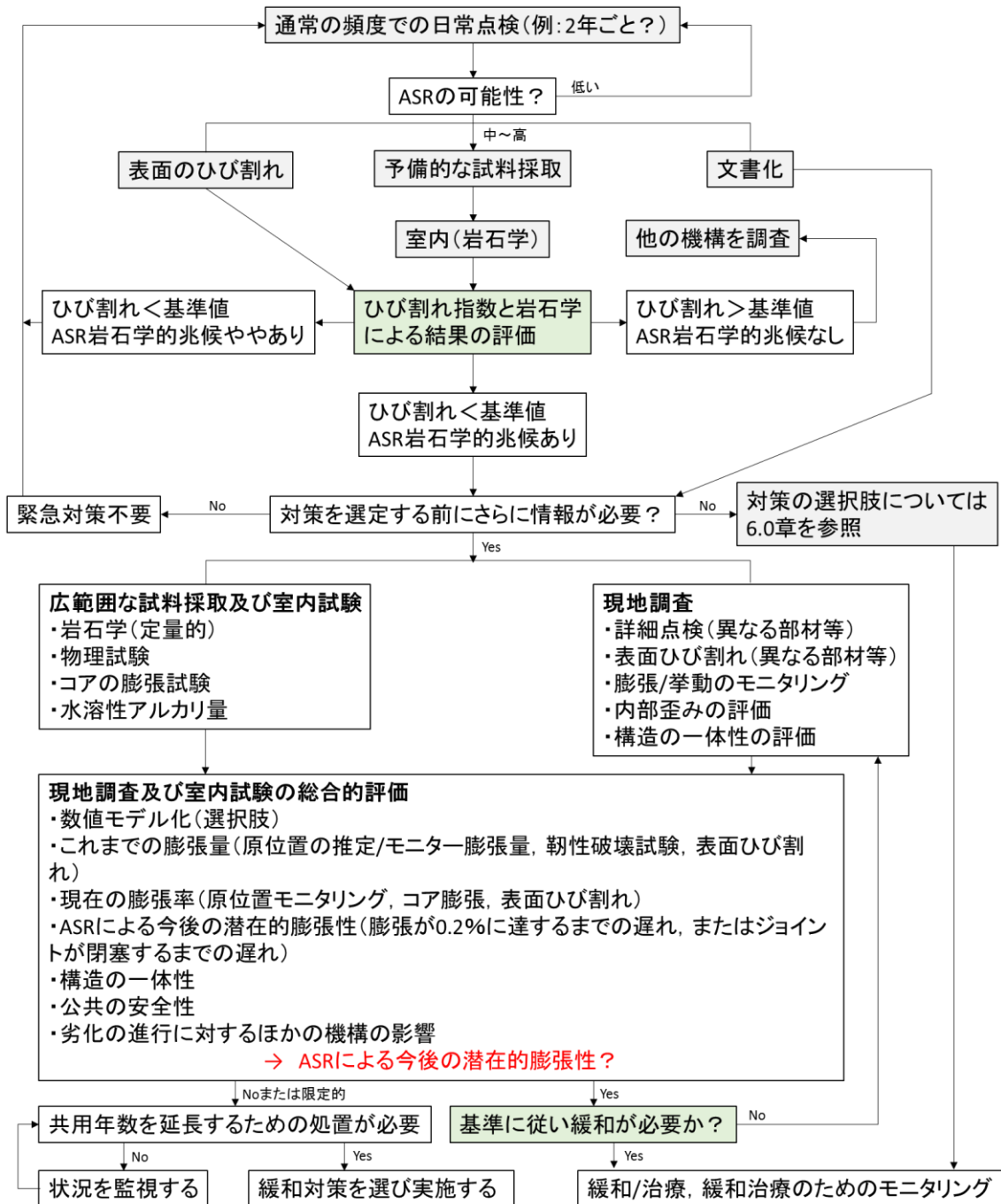


図 4.3- 2 アメリカ・連邦高速道路局 (FHWA) の ASR 診断・健全性評価フロー

(道路構造物におけるアルカリシリカ反応の ASR 構造物の診断・予測・低減に関する報告書 (2010) より抜粋)

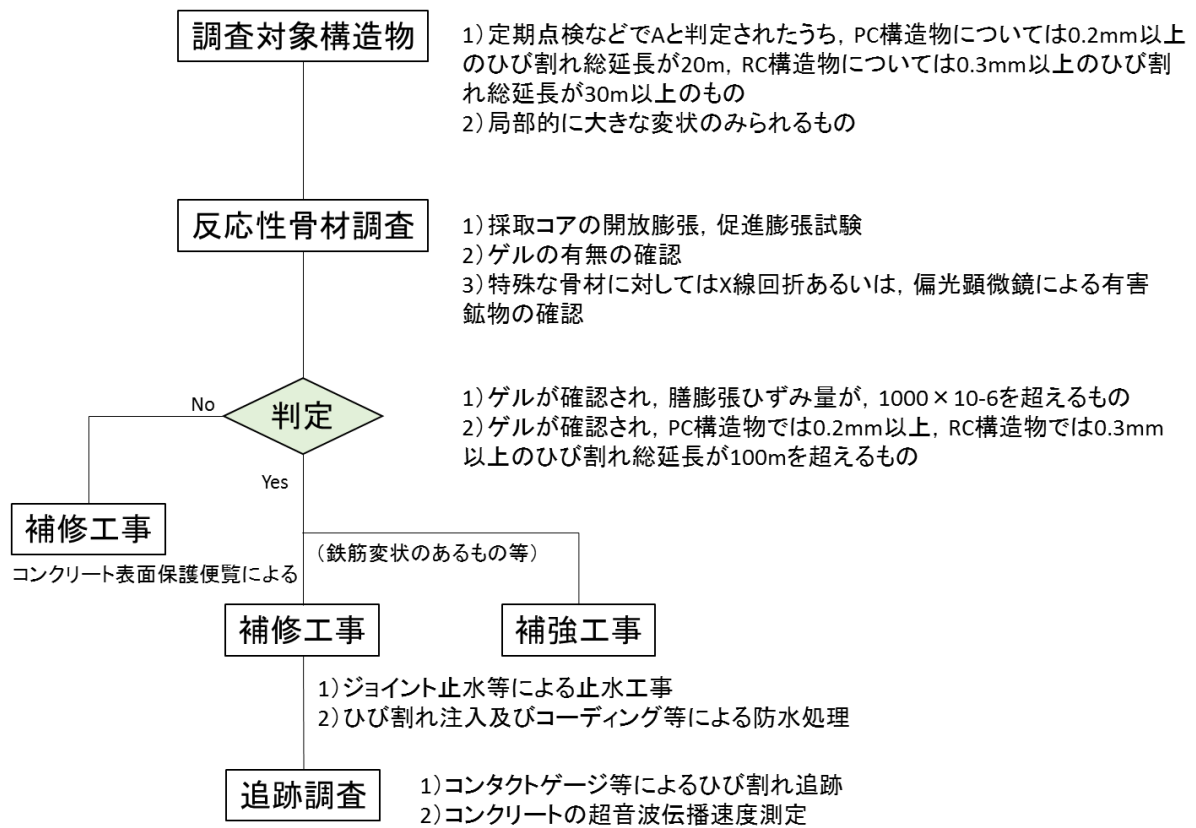


図 4. 3- 3 阪神高速道路公団の ASR 診断・健全性評価フロー

(ASR 構造物の維持管理マニュアル (2007) より抜粋)

図 4. 3- 1 に示す IFSTTAR の ASR 診断・健全性評価フローで、国内のフローと異なる特徴的な点は、構造物の現地モニタリングを重視している点である。すなわち IFSTTAR のフローでは、ASR が疑われた場合に、当該構造物に優先順位をつけ、優先順位が低い箇所であれば施工に関する情報収集及び、構造物の現在のひび割れ指数を計測することと併せて、変位計・温湿度計を現地構造物に設置し今後の膨張傾向を実測する。そして、その後の変形の進展、ひび割れの開閉の経過をみてから、コア採取による詳細調査や各種対策を実施することになっている。

この ASR 診断・健全性評価フローで参考にするべき点は、ひび割れの進展や構造物の変形を現地で実際に計測し、構造物コンクリートの劣化の進行速度や現在の劣化度合を把握することを重要視しているところである。ASR 膨張はコンクリートの調合が ASR ポテンシャルを有していたとしても、環境条件によって、膨張の発生や膨張量の程度が異なる現象である。このことから、補修が急がれない場合であれば、現地モニタリングのデータを収集した後に今後の対応を検討するというのは合理的である。

加えて、現地モニタリングの優位点として、ほとんどの場合コア採取やはつりといった構造物を傷つける作業が必要ではない点が挙げられる。つまり、ASR 診断・健全性評価時に構造物に損傷を与える可能性が小さいといえる。ただし、ASR が疑われる部材で、優先順位が高いものであれば、即座に対応を精査する必要があるため、コアを採取し詳細調査を行い、膨張の原因を特定したうえで今後の対応を講じることになっている。

次に、図 4.3-2 に示す FHWA の ASR 診断・健全性評価フローをみると、日常点検で ASR が疑われた際には、ひび割れ形状を調査しひび割れ指数を導出するとともに、予備的な試料（コア）採取を行うことになっている。そして、ひび割れ性状と採取コアによる岩石学的診断から、更なる詳細調査の必要性、あるいは補修やモニタリング等の対策を検討するとしている。

その後の ASR に対する対策を決定するための詳細調査では、ASR の最新の知見を駆使した現地調査や室内試験が実施されることになっており、将来の膨張予測を行う場合もある。また、「構造の一体性」、「公共の安全性」や「劣化の進行に対するほかの機構の影響」といった構造物の性能の観点からも調査を実施する点は特徴的であり、原子力発電施設の要求機能を満たすための部材の健全性評価策定という方針と合致するため参考にすべき点と考えられる。

FHWA のフローで、予備的なコア採取を急ぐ背景としては、アメリカ国内では ASR の原因となり得る骨材岩種が複数存在し、岩種によって ASR 膨張挙動が異なることから、早期のコア採取、岩石学的診断を推奨しているものと考えられる。これに対して、先述の IFSTAR が対象としているフランスでは、北部の反応性の高い岩石を除いては、反応性が限定的で同様な岩石とみなされているようであり、そのためコア採取が優先されていないと考えられる。

最後に、図 4.3-3 に、阪神高速道路公団が採用しているフローをみると、まず、ひび割れの総延長からコア採取を行うかどうかを判定し、採取コアを使用して、開放膨張量、促進膨張の試験、岩石学的診断を実施して、ひび割れの総延長及び今後の ASR 進展性から講じる対策を決定し、場合によっては、対策後も追跡調査を行うことで長期的な健全性を確保するというものになっている。

以上に示した既存の ASR 診断・健全性評価フローを簡略的に記したものが図 4.3-4 である。図に示されるように、フローの手順や内容はそれぞれ異なっており、国内の原子力発電施設に適した健全性評価フローを策定に際し、これらを参考にすることができる。

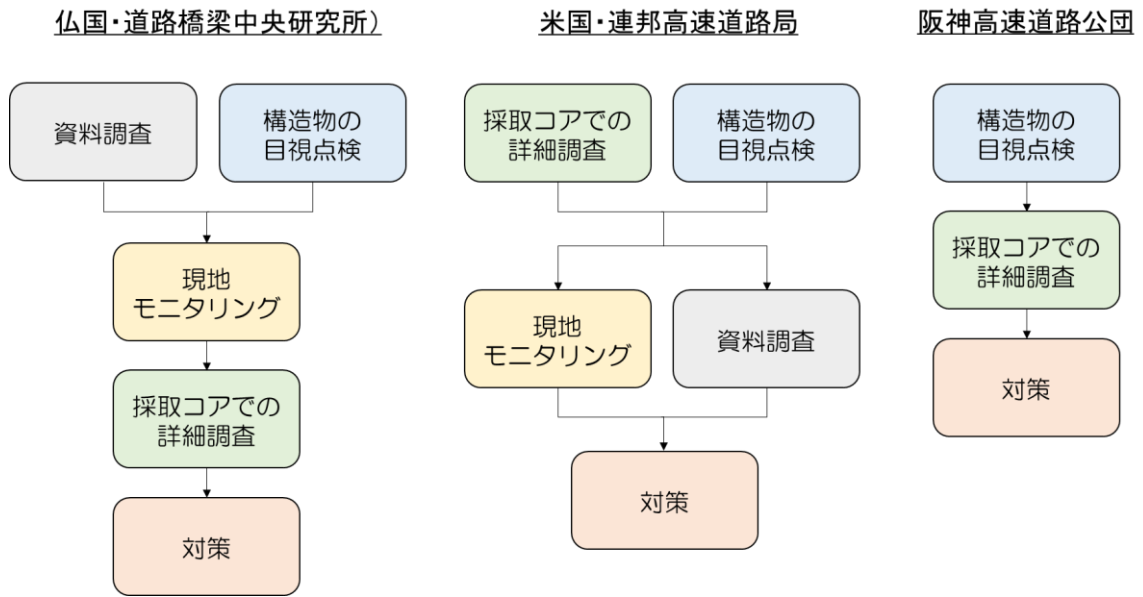


図 4.3- 4 既存の診断・評価法の模式図

調査対象の既存の ASR 診断・健全性評価フローのなかで、最新の知見を取りまとめたものとして、旧原子力安全基盤機構（JNES）「原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案」の ASR 診断フロー（以下、JNES フローと称す）がある。図 4.3- 5 はその一部分である。

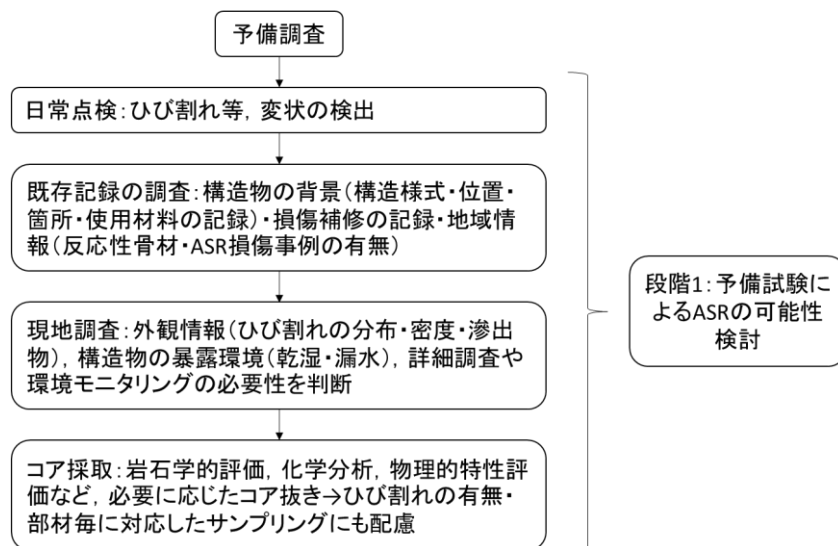


図 4.3- 5 旧原子力安全基盤機構のコンクリート構造物の ASR 診断フロー（案）

（原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案（2014）より抜粋）

JNES フローは3つの段階に分かれており、①予備試験による ASR の可能性検討フロー、②材料試験による ASR 検出フロー（採取コアによる岩石学的試験を主とした ASR 診断フロー）、そして③ASR 抑制対策へのフィードバックフローからなっている。このうち、図 4.3-5 に示したものは、予備試験による ASR 診断フローである。

図 4.3-5 の予備試験による ASR 可能性検討フローには、先に紹介した既存のフローの各要素のうち「対策」を除くすべての要素（資料調査、構造物の目視点検、採取コアの詳細調査、現地モニタリング）が網羅されており、また、②の岩石学的試験を主とした ASR 検出フローは、岩石学の観点から最新の知見を組み込んだ先端的な ASR 診断フローになっている。

一方で、JNES フローは、ASR であるかどうか、あるいは ASR の原因および進行度を評価するためには、有力な手法ではあるものの、原子力発電施設の要求機能から考慮した部材の健全性評価としてみた場合には、不足している点が挙げられる。すなわち、構造物の健全性評価に際しては、まず構造物が機能を満足するために必要な部材の性能を把握する必要がある。これは具体的には使用性、構造安全性、遮蔽性といった性能であり、これらの性能を満たすための必要条件としては、圧縮強度のほかに、ひび割れ幅やたわみ等の評価基準が設けられることが多い。

現在の健全性を評価するためには、これら評価基準と、目視点検やコア採取等の調査によって得られる現在の性能を比較検証することが必要である。また、ASR 膨張は数十年の長期間に渡って継続する場合もあるため、将来の健全性を評価するためには、今後の膨張挙動（残存膨張挙動）やそれに伴うひび割れの進展、機械的特性の変化を把握しなければならない。これらが揃って将来の健全性が評価可能となる。

そこで、JNES レポートのフロー中に、現在および将来のコンクリート部材の性能評価を組み込むことで、ASR に関する総合的な健全性評価フローが提案できると考え、国内外で運用されている構造物の ASR 診断フローを精査することによって、この JNES フローを原子力発電施設の部材の健全性評価フローへ応用するために必要な5つの技術的課題を抽出した。以下の5項目が現状の課題である。

① ひび割れ等、変状の検出に必要な基準値

多くの ASR 診断・健全性評価フローでは、ASR が疑われた場合、当該構造物のひび割れ性状の調査を行い、ひび割れ指数やひび割れ総延長などの指標を ASR 可能性の判断基準としている。原子力発電施設においても、ASR が疑われるひび割れを何らかの基準に従って判別する必要があると考えられる。

② 既存記録の調査による対象部材の要求性能の確認

ASRによる部材の性能劣化を評価するにあたり、ASRが疑われる箇所を含む部材の要求機能を整理し、構造物の要求機能を満たすために必要な所定の性能(使用性、構造安全性、遮蔽性)を示す必要がある。

また、性能を満たすために必要な条件に関して、「原子力施設における建築物の維持管理指針・同付録」では、表 4.3- 1 から表 4.3- 4 に示した評価基準が挙げられているが、ASRによって生じるひび割れは他の要因のひび割れと形状が異なることが考えられるため、他の要因と同一の判定基準でよいかどうかの判断も併せて必要となる。

③ 現地モニタリング手法の確立

ASRによるコンクリート構造物の劣化が、他の劣化要因と大きく異なるのは、構造物全体が大きく変形する可能性があることである。原子力発電施設においては、コンクリート構造物の変形によって、配管等の機械類の要求機能が満たされなくなる可能性が考えられる。その点からも構造物の変形を取得することは極めて有意義である。しかしながら、現地モニタリングによる当該部材の変形計測や、ひび割れ幅の変動に関しては、橋梁などの構造物で実績があるが、原子力発電施設については、伊方発電所第1号機のテーブルデッキ部分で実施した例のみである。ASRによる膨張は局所的である場合も考えられるため、モニタリングの手法によっては、部分的なひずみ変化にとらわれ、部材全体の変形挙動を見逃す可能性がある。そのため原子力発電施設に適したモニタリング手法を確立することが必要と考えられる。

④ 残存膨張挙動予測の精度向上

ASRが疑われる事例が発生した場合に、ASRの現在の進行程度を知り、今後の進行を予測することは将来の健全性を評価するうえで極めて重要である。従来の方法、例えば飽和NaCl溶液浸漬法(通称:デンマーク法)や80℃の1N-NaOH溶液浸漬法(通称:カナダ法)は、膨張のポテンシャルを把握することはできるが、当該環境下での膨張予測には直接適用ができない。また、JCI-DD2も乾燥やアルカリ溶脱の影響から信頼性に疑問が持たれている。現状、ASRの残存膨張挙動を予測することは困難とされており、汎用性の高い膨張予測モデルが求められる。

⑤ ASR膨張による機械的特性の変化の把握

ASRによって圧縮強度や静弾性係数といった機械的特性が低下することは良く知られている。通常の診断では採取コアを強度試験に供することによって現状の機械的特性を把握することになっているが、コア採取は、1) 採取場所に限りがある、2) 躯体を傷つけるといったデメリットも存在するため、非破壊試験等で機械的特性の変化を取得する要求がある。一例として、各種非破壊試験の精度が確保されて

いることや、膨張の進展と機械的特性の関係性が把握されていれば、現地モニタリング等の情報と組み合わせて、非破壊で機械的特性を推定することが可能になり、部材の性能を評価する上で重要な情報を得ることができる。

以上を踏まえ、旧原子力安全基盤機構のコンクリート構造物の ASR 診断フローを基にした、原子力発電施設における部材の健全性評価フローの例を図 4.3-6 に示す。

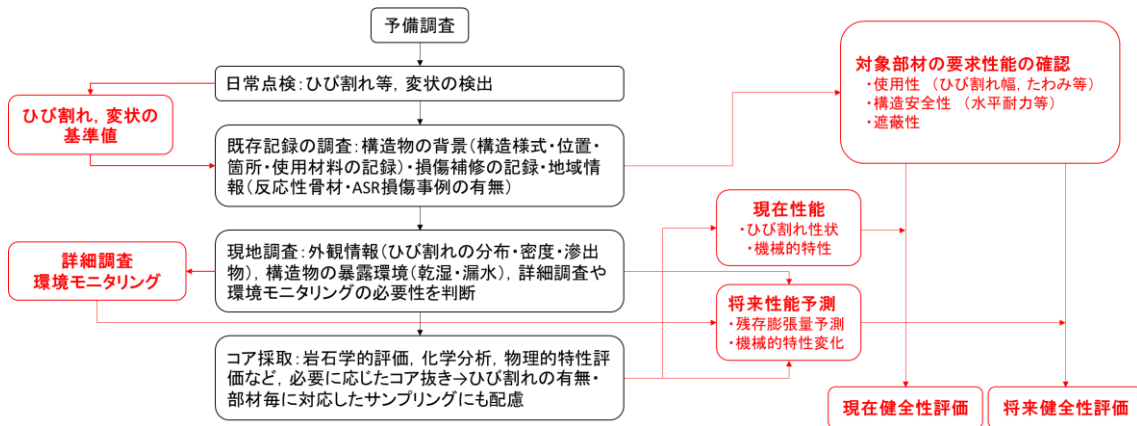


図 4.3-6 旧原子力安全基盤機構のコンクリート構造物の ASR 診断フローを基にした原子力発電施設における部材の健全性評価フローの一例

4.3.2 ASRに係る健全性評価事例

本節では、国内の原子力発電施設のコンクリート構造物で唯一 ASR の発生が報告されている伊方発電所第 1 号機の ASR 診断・健全性評価の内容について記すとともに、同構造物で行われたその他の検討について調査を行い、4.3.1 で述べた健全性評価フローと比較検証する。

伊方発電所第 1 号機での ASR に対するコンクリート構造物の健全性評価は、まず、対象を「ASR を示唆する表面ひび割れが見られない構造物」と「表面ひび割れが見られる構造物」に分けて、両者に対して材料的評価を行い、さらに後者については構造物の耐震安全性評価を実施している。

① 表面にひび割れが見られない構造物

表面にひび割れがみられない構造物については、以下の 3 点を確認している。

- 1) 日本コンクリート工学協会（現日本コンクリート工学会）のグレード分類でも軽微な「状態 I」と考えられること
- 2) コア抜き試験による圧縮強度が設計基準強度を上回ること
- 3) 採取したコアによる促進膨張試験の結果が JIS 判定値材齢（6 ヶ月で 0.1%）を下回っていること

1)、2) より、現状の支持機能に問題がないこと、3) より今後の ASR の発生又は進展が考えられないことを示して、現在及び長期健全性評価上問題ないとしている。

② 表面ひび割れが見られる構造物

脱気器基礎とタービン架台が、ASR を示唆する表面ひび割れが見られる構造物に該当するとしている。

表面ひび割れが見られた脱気器基礎では、コンクリート材料の健全性評価として以下の 3 点を確認している。

- 1) コア抜き試験による圧縮強度が設計基準強度を上回ること
- 2) ASR による基礎の膨張変形は、脱気器と基礎との取り合い部がスライド構造となっていることから、脱気器に影響を与えないこと
- 3) 採取したコアによる促進膨張試験の結果が JIS 判定値材齢（6 ヶ月で 0.1%）を下回っていること

また、タービン架台では以下の 4 点を確認している。

- 1) コア抜き試験による圧縮強度が設計基準強度を上回ること
- 2) タービン・発電機とテーブルデッキは軸方向にスライドする構造とするとともに、車軸長さの調整のために設置しているスペーサの厚さを変更するなどにより、膨張変形を吸収する構造としていること
- 3) 採取したコアによる促進膨張試験の結果が JIS 判定値材齢（6ヶ月で0.1%）を下回っていること
- 4) 図に示すように実測しているテーブルデッキ部の膨張傾向が、ここ十数年収束状態にあること

4) に関して、技術評価報告書に記載されているテーブルデッキの現地モニタリングによる変形の経時変化を図 4.3-7 に示す。図より、50m のテーブルデッキ全長に対して、2006 年時点で 10 から 25mm 程度の膨張変形がみられるものの、1990 年以降は膨張が収束傾向であることが確認できる。なお、膨張変形が収束傾向である理由としては、ASR が収束した可能性のほか、温度、湿度といった周辺環境条件が変化した可能性が考えられ、後者の場合、環境条件の変化によって ASR が再進展する可能性もあり得るため、現状の温湿度を保全することが「ASR が収束状態にある」といえる条件となる。

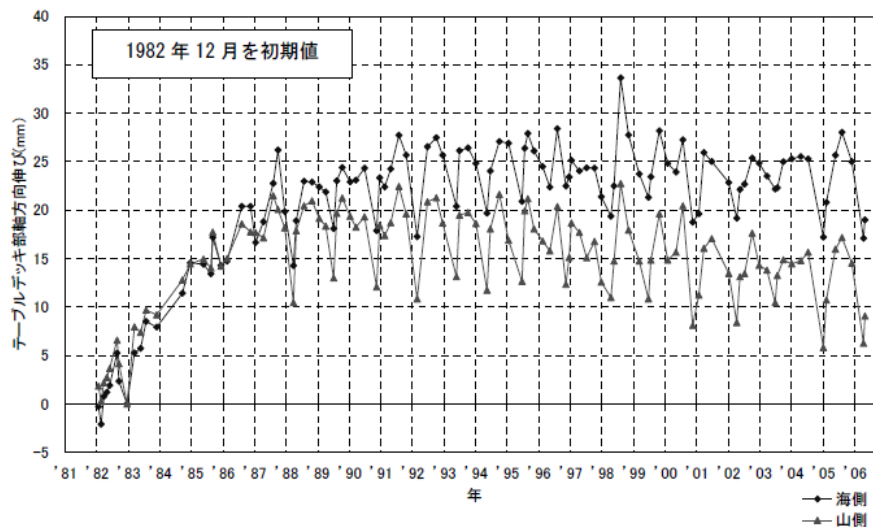


図 4.3-7 テーブルデッキの軸方向伸び

(伊方発電所 1 号機コンクリート構造物の ASR に関わる技術的評価より抜粋)

上記の健全性評価と併せて、ASR が顕在化しているコンクリート構造物については、現状保全項目にリバウンドハンマー等の非破壊検査を追加し、強度の急激な変化傾向が生じていないことを確認していくとしている。

更に、タービン架台については、テーブルデッキ部膨張変形計測にあわせ、柱傾斜等の計測を追加して現地の変形モニタリングを強化するとともに、研究開発中の非破壊による鉄筋破断調査手法の精度を向上させ、実機への適用を図っていくとしている。

次に、コンクリート構造物の耐震安全性評価として、ASRを示唆するひび割れがみられたタービン架台のせん断破壊に対する解析評価を実施している。解析には、架構の変形を考慮して、解析上のコンクリートの物性値には、実構造物から採取したコアによる試験結果を反映している。

設計相当地震力作用時の解析結果から、設計相当地震動が作用した場合のせん断応力は、最大せん断耐力の0.7倍程度であり、作用地震力が設計相当地震動の4.7倍の時点でせん断耐力に達する程度の裕度を有していることを確認している。

また、ASRが再進展することを想定して、膨張変形量が現在の1.2倍に増加した場合の解析を行っている。このとき、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数は下限と考えられる値に低減している。そして上記解析結果についても、設計相当地震力作用時の最大せん断力は約0.77倍であることを確認している。

以上から、テーブルデッキ部は十分な耐震安全性を有しており、ASRが再進展した場合においても、タービン架台の耐荷性能に大きな問題はなく、架構全体として十分な水平耐力を有しているとしている。

また、上記に示した健全性評価に加え、将来の健全性を確保するために、伊方発電所第1号機でのコンクリート構造物で実施されているその他の保全策は以下の通りである。

- ① タービン・発電機とテーブルデッキは、軸方向にスライドする構造に変更
- ② 車軸長さの調整のために設置しているスペーサの厚さを変更
- ③ ASRに関する新たな知見を注視しつつ、考慮すべき知見が認められる場合には、健全性について再評価を実施し、必要に応じ対応を検討する
- ④ ASRが顕在化しているコンクリート構造物については、現状保全項目に追加して、リバウンドハンマー等の非破壊検査を実施し、強度に急激な経年変化傾向が生じていないことを確認していく
- ⑤ タービン架台については、テーブルデッキ部膨張変形計測に加えて、柱傾斜等の計測を追加する
- ⑥ 非破壊検査による鉄筋破断調査手法の精度を向上し実機へ適用する

上記の①、②はASR膨張による部材の変形を吸収することが可能な構造であることを維持する保全策であり、③～⑥は、今後、健全性が損なわれないことを継続して観察していくことを保証するものである。以上、伊方発電所第1号機で行われた健全性評価は図4.3-8のようにまとめることができる。

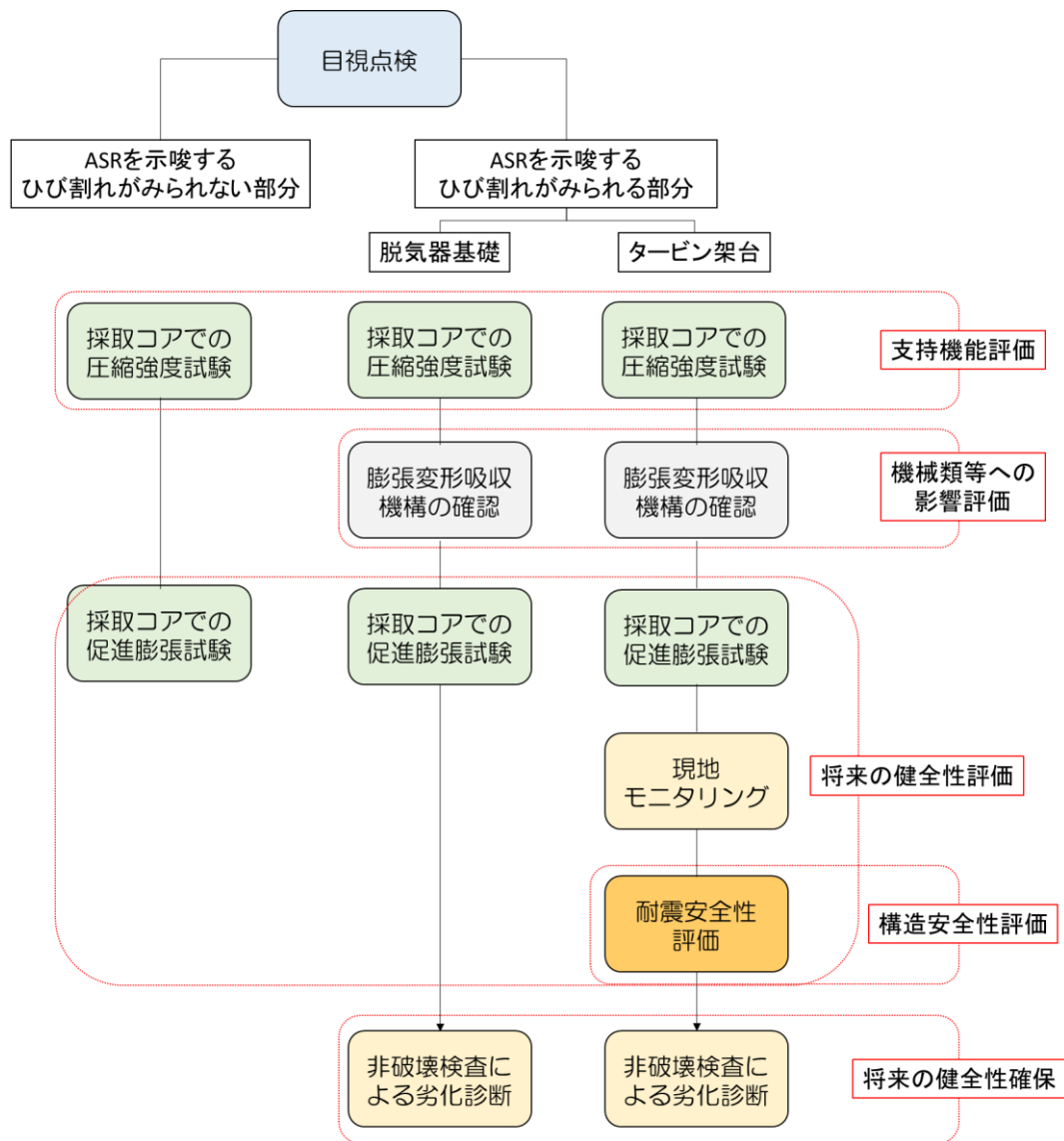


図 4.3-8 伊方発電所第1号機で行われた健全性評価概要

図より、伊方発電所第1号機で行われた健全性評価は、単に ASR 発生の有無についての診断やコンクリートの膨張量予測ではなく、コンクリート構造物が設計時の要求機能を確保できているかどうかを考慮した健全性評価となっている。

すなわち、現状のコンクリート構造物の支持機能や構造安全性が健全であり、膨張変形が機械類に及ぼす影響もないことを確認している。また、現在の健全な状態が、将来にわたって確保されることを、促進膨張試験や現地モニタリング結果、非破壊検査による定期的な劣化診断によって保証している。

このように、伊方発電所第1号機の健全性評価は、ASR の影響が要求機能上、許容しえることが示すものであり、この方法は、4.3.1 で述べた要求機能を満たすための部材の健

健全性評価策定という方針と合致している。

一方で、伊方発電所第1号機の事例は、促進膨張試験、現地モニタリングによる変形挙動から分かるように、ASR膨張の収束状態が見られる時点での健全性評価であるため、将来的には劣化がこれ以上進展しないということを確認することで問題は生じないが、今後考えておかなければいけないのは、例えば促進膨張試験で判定値を上回っている場合や、現地モニタリングで膨張の収束傾向が確認されない場合の健全性評価手法であり、このような場合に将来の健全性評価を行うためには、ASR膨張予測や、機械的特性の変化予測を行う技術が重要となる。

以下に示すのは、ASR膨張や機械的特性の変化といった将来の劣化予測に関する詳細な調査結果である。この内容は学術論文等^{1, 2, 3}で報告がなされている。

<固有振動数変化の把握>

ASRによってコンクリートの弾性係数が低下した場合、架構全体の固有振動数が低下することが考えられる。構造物の振動特性は、地震動に対する応答や、機械振動に対する防振性にも関わってくる重要な指標であるため、伊方発電所第1号機では、テーブルデッキの固有振動数を得るために起振機による加振や、常時微動の測定を実施して、固有振動数の時間的な変化を取得している。

報告によると、ASR劣化が見られる1号機の固有振動数は、健全な2号機のそれと比較して88～95%になっている。このうち、3%程度はコンクリートの比重によるものであり、2.5～8.5%程度がASRによる固有振動数の低下と推定されている。また、1989年から2004年までの間の固有振動数の低下は小さく、今後の経時変化はほとんどないものと考察している。

<振動試験のシミュレーション解析による弾性係数の推定>

タービン架台を構成する柱、梁、壁、床をモデル化し、定常加振解析を行い、推定された固有振動数が、上記で実施している振動試験結果の固有振動数と一致するようにコンクリート部材の弾性係数を調整することで、ASRで劣化したコンクリート部材の弾性係数を推定している。推定によって得られた弾性係数は、健全な部材に対して0.5～0.6程度である。上記の手法は、振動計測という非破壊試験によって、コンクリート部材の平均的な弾性係数を得ることができる。

<非破壊・微破壊検査による躯体の弾性係数測定>

¹ 関本恒，清水弘，渡部雄一，石川達也：アルカリ骨材反応が生じたタービン発電機架台の強度評価に用いる物性の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27, No. 2, pp. 1555-1560 (2005)

² 高倉正晴，渡部雄一，細川高志，日比野浩：アルカリ骨材反応が生じた鉄筋コンクリート構造物の実機試験及びシミュレーション解析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27, No. 2, pp. 1567-1572 (2005)

³ 高倉正晴，清水弘，梶田佳寛，松本直樹：アルカリシリカ反応を起こした鉄筋コンクリート構造物の変形に関する考察，コンクリート工学論文集，Vol. 20, No. 3, pp. 1-10 (2009)

架台コンクリートの物性及びその分布を調査するために、検層法、透過法という2種類の弾性波速度試験を実施している。検層法はφ65mmのボーリング孔を設け、孔内に設置した加速度センサにより、躯体内部の伝播速度を算定する方法で、検層法は部材を挟んだ背面に設置した加速度センサで弾性波の透過速度を取得する方法である。透過法は、コア採取時の孔径を利用することで測定が可能であり、透過法は測定箇所が限定されるものの非破壊で検査が可能である。上記検査結果を示したものが図4.3-9である。測定結果より、図中No.1、No.6のテーブルデッキ部で弾性係数の低下が見られるが、デッキより下部では損傷劣化の割合は小さくなっており、ASRの劣化度合は部材中に分布をもっていることが確認できる。

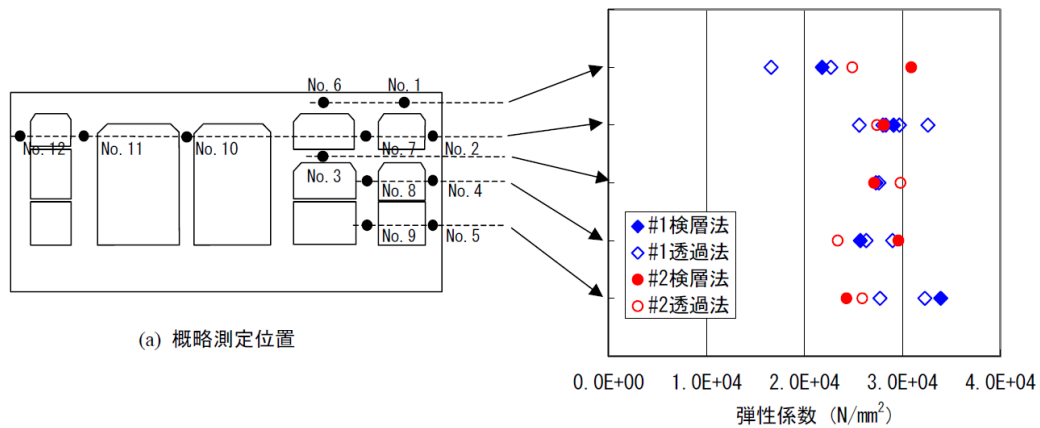


図 4.3- 9 弾性波速度試験により得られた弾性係数の分布

<残存膨張挙動の予測方法の提案>

長期間にわたる変形観測や残存膨張量試験の結果をもとに、ASRの残存膨張量予測を行っている。膨張モデルは指数曲線を仮定して、膨張の計測開始時点を原点とした10年後、13年後、16年後、26年後に採取コアによるJCI-DD2に準拠した残存膨張量を計測し、潜在膨張量曲線を以下のようにフィッティングにより求めている。フィッティングにより得られた式は以下の通りである。

$$\varepsilon_p = 0.202 \cdot (1 - e^{-2.55E-4t}) \quad (4.3-1)$$

ここで、

ε_p : 残存膨張量

t : 経過年

である。

フィッティングに使用した実験値と回帰曲線を図4.3-10に示す。

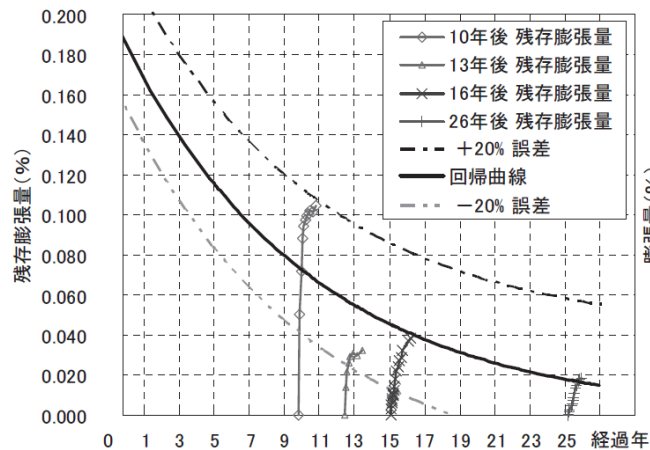


図 4.3- 10 残存膨張量の経年変化の予測結果

図より、残存膨張量が経年によって低下していく傾向は見られるものの、回帰曲線と測定値のばらつきは大きく予測精度はあまりよくないことがわかる。また、この手法は数十年にわたるデータを使用しているため、限られた事例にしか使用することができない。

残存膨張挙動の予測手法に関しては、未だ有効な手法は提案されておらず、ASR 膨張の将来予測には技術的課題が残っている。

以上、国内の原子力発電施設のコンクリート構造物で唯一 ASR の発生が報告されている伊方発電所第 1 号機における健全性評価方法およびその他の調査について取りまとめた。伊方発電所第 1 号機での健全性評価は、要求機能を満たすための部材の健全性評価策定という方針と合致しており、特に以下の点は現在の最新情報から考えても有効であった。

①現地モニタリングによる膨張変形計測

将来の ASR ポテンシャルを評価する上で、促進膨張試験だけではなく、当該部材の変形が実際に収束傾向であるという結果を示していることは、将来の健全性評価において重要な判断基準となるものであった。また、耐震安全性の解析においても全体の変形挙動が既知であることから、解析精度の向上にも寄与していると考えられることから、現地モニタリングによる膨張変形計測は、健全性評価のうえで、今後も推奨すべき手法であるといえる。

③ 破壊試験によるコンクリート部材の性能把握

コア採取によってえられた機械的特性によって、コンクリート構造物の現在の支持機能が問題ないことを示したうえで、リバウンドハンマーという非破壊手法によって推定強度を経時的に取得し、ASR によって材料特性が大きく変化しないことを確認するとし

ている点や、弾性波速度試験による弾性係数の取得、振動測定による固有周期の取得が実施されており、可能な限り構造物からコアを採取せずに機械的特性を把握している。

一方では、ASRの健全性評価の精度を向上させるため、以下のような検討を実施する必要があると考える。

①岩石学的診断による将来の膨張挙動の把握

JCI-DD2の実験データを使用した残存膨張挙動の予測は、コアの採取場所によって拘束条件や環境条件が異なるため、精度の点から不十分であると思われる。また、乾燥とアルカリ溶脱の可能性を避けられないことから試験法自体の限界も指摘されている⁴。この点に関しては、岩石学的診断による反応性骨材の同定や、残存アルカリ量の検出などを含め、ASRの反応機構に基づく詳細な調査手法の確立が求められる。

②膨張と機械的特性の把握

複数個所で実施している弾性波速度試験の結果から分かるように、ASRによる機械的特性の低下程度は、部材の場所によって異なるようである。このことはASR膨張が一樣ではなく局所的に生じている可能性を示唆するものである。架構全体の変形挙動は取得できているものの、ひずみ分布、機械的特性の分布については、合理的に取得する手法が求められる。

⁴ 山田一夫，川端雄一郎，小川彰一，丸山一平：原子力発電施設におけるアルカリ骨材反応の一考察，セメントコンクリート論文集，Vol. 68，pp. 457-464，（2015）

4.3.3 ASR 診断・健全性評価に関する今後の課題

4.3 では、原子力発電施設における ASR に関する総合的な健全性評価フローの策定に際し、現状の技術的課題を抽出することを目的として、国内外における既存の ASR 診断・健全性評価フローの調査および、国内の原子力発電施設における唯一の ASR 発生事例である伊方発電所第 1 号機の高経年化技術評価のうち、ASR によるコンクリート構造物の健全性評価部分についての調査を実施した。ここでの原子力発電施設における ASR に関する総合的な健全性評価フローとは、ASR の診断だけではなく、原子力発電施設のコンクリート構造物が有していなければならない機能が、ASR による部材の性能低下によって満たされなくなる状況を判定することをさしている。

国内外の ASR 診断・健全性評価フローの調査を実施し、国内で整備された最新の ASR 診断・健全性評価フローである旧原子力安全基盤機構 (JNES) 「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 レポート) に記載のコンクリート構造物の ASR 診断フロー (JNES フロー) と比較検討した結果、当該フローに各国の様々な診断法、評価法がある程度網羅されていることが確認された。特に、ASR であるかどうか、あるいは ASR の原因および進行度を評価するための、岩石学的診断は最新知見を取り入れた有力なフローであるといえる。

一方で、原子力発電施設の要求機能から考慮した部材の健全性評価としてみた場合、構造物の健全性評価に際しては、まず構造物が機能を満足するために必要な部材の性能 (ひび割れ幅やたわみ等の評価基準) を把握する必要がある、これら評価基準と、目視点検やコア採取等の調査によって得られる現在の性能を比較検証することが必要である。加えて、ASR 膨張は数十年の長期間に渡って継続する場合もあるため、将来の健全性を評価するためには、今後の膨張挙動 (残存膨張挙動) やそれに伴うひび割れの進展、機械的特性の変化を把握しなければならない。

そこで、JNES レポートのフロー中に、現在および将来のコンクリート部材の性能評価を組み込むことで、ASR に関する総合的な健全性評価フローが提案できると考え、国内外で運用されている構造物の ASR 診断・健全性評価フローを精査することによって、この JNES フローを原子力発電施設の部材の健全性評価フローへ応用するために必要な 5 つの技術的課題を抽出した。以下の 5 項目が現状の課題である。

- ① ひび割れ等、変状の検出に必要な基準値
- ② 既存記録の調査による対象部材の要求性能の確認
- ③ 現地モニタリング手法の確立
- ④ 残存膨張挙動予測の精度向上
- ⑤ ASR 膨張による機械的特性の変化の把握

課題の概要と今後実施すべき項目を記す。

①ひび割れ等、変状の検出に必要な基準値

国内外の多くの ASR 診断・健全性評価フローでは、当該構造物のひび割れ性状の調査を行い、ひび割れ指数やひび割れ総延長などの指標を ASR 可能性の判断基準としている。原子力発電施設においても、ASR が疑われるひび割れを何らかの基準に従って判別する必要があると考えられる。

— 今後実施すべき項目 —

文献調査によって原子力発電施設に適した評価基準を選定する。

②既存記録の調査による対象部材の要求性能の確認

ASR による部材の性能劣化を評価するにあたり、ASR が疑われる箇所を含む部材の要求機能を整理し、要求機能を満たすために必要な所定の性能（使用性、構造安全性、遮蔽性）を示す必要がある。

また、性能を満たすために必要な条件（ひび割れ幅、たわみ等）に関しては、「原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説」の付録に詳しいが、ASR によって生じるひび割れは、他の要因のひび割れと形状が異なることが考えられるため、他の要因と同一の判定基準でよいかどうかの判断も併せて必要となる。

— 今後実施すべき項目 —

建築学会の指針では、性能を満たすために必要な条件としてひび割れ幅が使用されており、使用性（屋内：1mm 以下、屋外：0.8mm 以下）、水密性（0.2mm 以下）といった評価基準が設けられている。

一方で、ASR は拘束条件下では膨張があまり進展せず、表層部分にひび割れが集中する可能性を有する現象であるため、表層のひび割れ幅を評価基準とした場合、部材の性能を過小評価する場合が考えられる。原子力発電施設のコンクリート構造物のように、大断面を有し、かぶり大きいコンクリートにおいても上記の評価基準が適切であるか否かに関しては、実験的、解析的に確認する必要がある。

③現地モニタリング手法の確立

現地モニタリングによる当該部材の変形計測や、ひび割れ幅の変動に関しては、橋梁などの構造物で実績があるが、原子力発電施設については、伊方発電所第 1 号機のテーブルデッキ部分で実施した例のみである。

原子力発電施設のコンクリート構造物のように、部材厚が一定以上あるものであれば、部材内部の温度勾配、水分勾配、アルカリ濃度勾配が生じる可能性を考えることができ、部材内部に ASR 膨張分布が生じることも考えられる。このとき、限定された領域の変形しか計測していなかった場合、構造物全体の変形挙動を見誤る可能性がある。

以上より、原子力発電施設に適したモニタリング手法を確立することが必要と考えられる。

— 今後実施すべき項目 —

伊方発電所第1号機の事例では、テーブルデッキの端部から端部の変形を計測している。これは、ASRのようなひずみ変化が分布をもつ現象に対して効果的である。ただし、現地場所によっては、計測器具を取り付けることができない場合も考えられるため、部材の変形を取得することが可能な、最低限の評点間距離については明らかにする必要はある。そのためには、例えば熱分布、湿度分布、アルカリ濃度分布等を有する比較的大型の試験体を作製し、ASR膨張に分布がある場合の全体の変形挙動と、各所のひずみ分布を取得し、全体の変形挙動が類推できる評点間距離を探索するなどの検討が必要である。

④残存膨張挙動予測の精度向上

ASRが疑われる事例が発生した場合に、ASRの現在の進行程度を知り、今後の進行を予測することは将来の健全性を評価するうえで極めて重要である。従来方法、例えば例えば飽和NaCl溶液浸漬法（通称：デンマーク法）や80℃の1N-NaOH溶液浸漬法（通称：カナダ法）は、今後の膨張可能性を把握することはできるが、当該環境下での膨張挙動の予測には直接適用できないため、汎用性の高い膨張予測モデルが求められる。

— 今後実施すべき項目 —

多様な条件におけるコンクリートプリズム試験により、膨張ポテンシャルに及ぼしうる影響因子を把握し、各因子の影響度合いを定量的に把握する必要がある。因子としては例えば、温度、湿度、アルカリ量が挙げられる。その上で、使用されている骨材の反応性を岩石学的診断によって把握し、既存のASR膨張モデルと組み合わせるなどの手法で将来の膨張挙動の予測精度を向上させる必要がある。

これらの検証には、膨張ポテンシャルが既知であるコンクリートを使用して、暴露試験体を作製し、ある時期においてコアを採取し、促進膨張試験等にかけることによって、コア採取時の膨張量および残存膨張挙動と膨張ポテンシャルの関係を把握することが必要である。この際、促進膨張試験の一つであるJCI-DD2は、乾燥とアルカリ溶脱の影響が指摘されており、適切なアルカリ溶液で濡らした紙で巻いて（アルカリラッピング）養生するなどの方法を検討すべきである。

⑤ASR膨張による機械的特性の変化の把握

ASRによって圧縮強度や静弾性係数といった機械的特性が低下することは良く知られている。通常の診断では支持機能が健全であることを保障する必要から、採取コアを強度試験に供することによって現状の機械的特性を把握することが求められる。しかしながら、コア採取は、1) 採取場所に限りがある、2) 躯体を傷つけるといったデメリットも存在するため、将来の健全性評価に際しては、コア採取による直接的な方法以外の選択肢が求められる。

一つは、非破壊試験等で機械的特性を取得する方法である。非破壊試験であれば、躯体を傷つけるデメリットを避けることができる。国内の原子力発電施設のコンクリート部材で、ASRが生じた唯一の事例である伊方発電所第1号機では、非破壊試験として、弾性波速度試験による弾性係数の取得、振動測定による固有周期の取得、リバウンドハンマーによる推定強度の取得といった方法が実施された経験がある。その他、道路・橋梁等で使用実績が多い非破壊試験として、超音波伝播速度試験があるが、測定箇所が限定される、測定値が鉄筋の影響を受ける、拘束条件の影響が定かではないといった技術的課題が挙げられており、原子力発電施設の適用には更なる知見の収集が必要である。現在、原子力発電施設に対して決定的な非破壊試験は提案されていないが、適正を有する各種非破壊試験を把握しておくことは、将来の健全性を担保していく手法として有用である。

機械的特性の変化を把握するもう一つの手法としては、機械的特性変化のモデル化が挙げられる。ASR膨張の進展との機械的特性のモデルを高精度化する事が可能となれば、現地モニタリング等の情報と組み合わせて、非破壊で機械的特性を推定することが可能になり、部材の性能を評価する上で重要な情報を得ることができる。

— 今後実施すべき項目 —

非破壊試験に関しては、透過法など現地に適用することが難しい方法が多いことから、表面法や振動特性計測など、現地で適用可能な非破壊試験方法について検討を行う必要がある。例えば、ひび割れ深さや表層のひび割れ密度と平均的な機械的特性の関係性を把握するなどの方法が考えられる。

また、ASR膨張量と機械的特性の関係から、機械的特性の下限値が推定できれば部材の健全性評価に有用である。

以上、JNESフローに上記技術を組み合わせることで、原子力発電施設のコンクリート構造物にASRが疑われる外観変状が見られた場合に、ASRであるかどうか、あるいはASRの原因および進行度を評価でき、ASRが疑われたコンクリート部材が現在において要求性能を満たしているかを評価できる。

また、現地モニタリングによる部材の変形挙動結果と、ASRの作用機構を理解したうえで実験的に得られる膨張ポテンシャルを、既存のASR膨張モデルに適用することで将来のASR膨張挙動の予測が高度化でき、これにより、膨張に伴うひび割れ幅の進展、機械的特性の低下予測といった部材の性能に直結する諸量を解析により高精度で予測することができる。

以上の手順によって、現在将来を含めたASRに関する総合的な健全性評価が実現でき、高経年化技術評価の高度化が可能となる。

4.3.4 まとめ

原子力発電施設における ASR が疑われる場合に関する総合的な健全性評価フローの策定に際し、現状の技術的課題を抽出することを目的として、1) 国内外における既存の ASR 診断・健全性評価フローの調査、2) 国内の原子力発電施設における唯一の ASR 発生事例である伊方発電所第 1 号機の ASR によるコンクリート構造物の健全性評価についての調査を実施した。ここでの原子力発電施設における ASR に関する総合的な健全性評価フローとは、ASR の診断のみではなく、原子力発電施設が有していなければならない機能が、ASR による部材の性能低下によって満たされなくなる状況を判定することをさしている。また、現状の技術的課題のうち、3) ASR 膨張モデル、4) ASR 膨張と機械的特性の関係に関しては文献調査を実施した。

以下に、得られた成果を示す。

国内外の ASR 診断・健全性評価フローの調査を実施し、国内で整備されたフローである旧原子力安全基盤機構（JNES）のコンクリート構造物の ASR 診断フロー（JNES フロー）と比較検討した結果、当該フローに各国の様々な診断法、評価法がある程度網羅されていることが確認された。

しかしながら、JNES フローは ASR 診断については詳細が示されているものの、原子力発電施設におけるコンクリート構造物の機能に対する健全性評価として用いるには不足している点がある。

構造物の健全性評価に際しては、まず構造物が機能を満足するために必要な部材の性能を把握する必要がある。これは具体的には使用性、構造安全性、遮蔽性といった性能であり、これらの性能を満たすための必要条件としては、圧縮強度のほかにひび割れ幅やたわみ等の評価基準が設けられることが多い。

現在の健全性を評価するためには、これら評価基準と、目視点検やコア採取等の調査によって得られる現在の性能を比較検証することが必要である。

また、ASR 膨張は数十年の長期間に渡って継続する場合もあるため、将来の健全性を評価するためには、今後の膨張挙動（残存膨張挙動）やそれに伴うひび割れの進展、機械的特性の変化を把握しなければならない。これらが揃って将来の健全性が評価可能となる。

JNES フローに、これらの要素を加え、コンクリート構造物の機能に対する健全性評価のフローとして表現したものが図 4.3-6 である。

4.4 高経年化対策に関する調査

4.4.1 ASR に関する部材の健全性評価

(1) ASR 膨張モデルの文献調査

将来の部材健全性評価を実施するにあたり、ASR によるコンクリートの膨張挙動を予測することは極めて重要である。ASR の膨張予測モデルは過去に複数提案されており、実際に原子力発電施設のコンクリート構造物の健全性評価に使用された例も存在している。本節では、国内外の ASR 膨張モデルに関する文献を調査し、現在の最新知見をとりまとめることを目的とする。本節で得られた ASR 膨張モデルに関する知見は、4.2 節のコンクリートプリズム試験 (CPT) によって得られる実験的事実を用いることで検証および発展が可能と考えられる。

ASR は骨材中に含まれるある種のシリカ鉱物とコンクリート中のアルカリとの間で生じる化学反応であり、生じている反応そのものはマイクロのスケールで考慮する必要がある。一方で、最終的に求められるものはコンクリート構造物の健全性評価であることから、コンクリートのマクロな膨張挙動を説明できるモデルも工学的に有用性が高い。そのため、既存の ASR のモデルは着目しているスケールから大まかに分類することができる。

<マイクロモデル・メソモデル>

マイクロモデルは骨材とセメントペーストを別々にモデル化し、輸送方程式によってアルカリシリカゲルの生成過程を説明するもので、Suwito⁵、Bazant⁶、Bangert⁷、Wu⁸、Saouma⁹らのモデルが提案されている。また、メソモデルはマクロモデルとマイクロモデルの中間のスケールで、骨材のサイズペシマムを説明するために導入された魚本ら¹⁰のモデルや、ASR ゲルのメソ空隙への移動等を考慮した村中ら¹¹のモデルがある。

これらのモデルは ASR 現象を把握するうえで重要な知見ではあるが、構造解析に使用するためには ASR ゲルの生成とコンクリートの膨張を結びつける別のモデルが必要となるた

⁵ Suwito, A., Jin, W., Xi, Y., Meyer, C: A Mathematical Model for the Pessimism Effect of ASR in Concrete, Concrete Science and Engineering, RILEM, V. 4, pp. 23-34, (2002)

⁶ Bazant, Z., Steffens, A.: Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 419-428, (2000)

⁷ Bangert, F., Kuhl, D. and Meschke, G.: Chemo-Hygro-Mechanical Modelling and Numerical Simulation of Concrete Deterioration Caused by Alkali-Silica Reaction, Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, pp. 689-714, (2004)

⁸ Wu, T., Temizer, I., Wriggers, P.: Multiscale Hydro-Thermo-Chemo-Mechanical Coupling: Application to Alkali-Silica Reaction, Computational Materials Science, Vol. 84, pp. 381-395, (2014)

⁹ Saouma, V. E., Martin, R. A., Hariri-Ardebili, M. A., Katayama, T.: A Mathematical Model for the Kinetics of the Alkali-Silica Chemical Reaction, Cement and Concrete Research, Vol. 68, pp. 184-195, (2015)

¹⁰ 魚本健人, 古澤靖彦: アルカリシリカ反応によるモルタルバーの膨張挙動を予測するモデルの構築, コンクリート工学論文集, Vol. 3, No. 1, pp. 109-119, (1992)

¹¹ 村中誠, 田中泰司: 反応機構に立脚した ASR 膨張挙動に関する物理-化学モデルの構築, 土木学会論文集 E2, Vol. 69, No. 1, pp. 1-15, (2013)

め、構造物の健全性評価にはこれまでのところ使用されていない。

<マクロモデル>

マクロモデルは、ASR 膨張がコンクリート材料全体で平均的に生じるとしたモデルである。Chatterji¹²、Pietruszczak¹³、Capra・Sellier¹⁴らは、ASR が化学反応の一種であることから、化学反応速度のモデルとして一般に使用される指数曲線を採用して、ASR 膨張傾向の実験結果をフィッティングにより再現している。

一方、Larive¹⁵は 600 以上の試験体を用いた試験を実施し、温度、相対湿度といった環境条件を ASR 進行速度に反映できる S 字曲線のモデルを提案している。Saouma¹⁶は、Larive の S 字曲線を ASR 進行速度関数に使用して、温度、湿度に加え、拘束条件やひび割れの影響を考慮した ASR 膨張予測モデルを提案している。Farage¹⁷らも同様に速度関数には S 字曲線を採用している。

以上のように、マクロモデルには、膨張量のみを予測して構造解析に使用しているものや、反応解析と構造解析という二つの段階を設けたものまで様々あるが、基本的には、ASR 膨張の実験データをフィッティングして、外挿によって将来予測を行うというものである。

フィッティングに使用される速度関数は前述のように指数曲線と S 字曲線があり、S 字曲線には、使用することで ASR の潜伏期間を表現できる利点がある。

しかしながらいずれの場合においても、ASR による終局膨張ひずみ量は材料定数として、フィッティングから求められ、将来予測を行う場合にはある一定の期間において膨張傾向を実測のうえ把握していることが必須となる。

マクロモデルのうち、実際に ASR 劣化した構造物の健全性評価に使用された ASR 膨張モデルとしては、カナダの Gentilly-2 原子力発電所で採用された Pietruszczak らの研究と重力式コンクリートダムに適用した Saouma らの研究がある。以下に彼らが採用した ASR 膨張モデルを紹介する。

¹² Chatterji, S. and Christensen, P. : Studies of Alkali-Silica Reaction. Part 7. Modeling of Expansion, Cement and Concrete Research, Vol. 20, pp. 285-290, (1990)

¹³ Pietruszczak: On the Mechanical Behaviour of Concrete Subjected to Alkali-Aggregate Reaction, Computers and Structures, Vol. 58, pp. 1093-1097, (1996)

¹⁴ Capra, B. and Sellier, A. : Orthotropic Modelling of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Structures: Numerical Simulations, Mechanics of Materials, Vol. 35, pp. 817-830, (2003)

¹⁵ Larive, C., Coussy, O. : Behavior of AAR-affected Concrete, Modeling, Proceeding 10th AAR International Conference, Quebec, Canada (1996)

¹⁶ Saouma, V. E. : Numerical Modeling of AAR, CRC Press, (2014)

¹⁷ Farage, M. C. R., Alves, J. L. D. and Fairbairn, E. M. R. : Macroscopic Model of Concrete Subjected to Alkali-Aggregate Reaction, Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 495-505, (2004)

<Pietruczak>

ある材齢 t における ASR による自由膨張ひずみを ε 、終局膨張ひずみ ε_{∞} をとすると t のときの膨張ひずみの進行率 $\zeta(t)$ は以下のようにかける。

$$\zeta(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_{\infty}} \quad (4.4.1-1)$$

ここで、 $\frac{d\zeta}{dt} = \gamma \cdot (1 - \zeta)$ と定義すると、膨張ひずみの進行率は以下のように表される。

$$\zeta(t) = 1 - e^{-\gamma(t-t_0)} \quad (4.4.1-2)$$

また、ASR 膨張の進行は温度と相対湿度の影響を受けることが分かっているため、Pietruczak は γ が温度と相対湿度によって決定すると仮定して γ を以下の式で表現した。

$$\gamma(T, RH) = \gamma_0 \cdot g_1(T) \cdot g_2(RH) \quad (4.4.1-3)$$

ただし、

$$g_1(T) = \exp\left[U\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (4.4.1-4)$$

$$g_2(RH) = \left(\frac{RH}{100}\right)^m \quad (4.4.1-5)$$

であり、 γ_0 、 m は材料定数である。

以上をまとめると、材齢 t における ASR による自由膨張ひずみは以下のようにかける。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} \cdot \left(1 - \exp\left[-\gamma_0 \cdot \exp\left[U\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \cdot \left(\frac{RH}{100}\right)^m \langle t - t_0 \rangle\right]\right) \quad (4.4.1-6)$$

式 (4.4.1-6) から明らかなように、将来の ASR 膨張ひずみを求めるためには、終局膨張ひずみ ε_{∞} や、その他の材料定数が必要である。

Gentilly-2 原子力発電所の解析では、現地で計測された膨張ひずみとフィッティングすることで、これらの諸量を得ている。

<Saouma>

一方、Saouma は、ASR 膨張について以下に示す 7 つの実験的事実に基づいて、ASR 膨張ひずみを式 (4.4.1-7) のように表した。

- 1) ASR は体積膨張であり、原因なしに主たる方向性をもたない。
- 2) ASR 反応は温度の影響を受ける。
- 3) ASR 膨張は圧縮力によって抑制され、圧縮力が小さい別の方向へ膨張が進展する。
- 4) ASR によって比較的強い応力が発生し、マイクロクラックが生成されたとき、ASR ゲルの一部はそのひび割れに吸収される。
- 5) 静水圧圧縮力が強く働いているとき、ASR 反応の速度は小さくなる。
- 6) 3 軸圧縮力が働いた場合、膨張量は小さくなるがゼロにはならない。
- 7) ASR 膨張によって、引張強度と弾性係数は低下する。

$$\varepsilon_{vol}^{ASR}(t) = \Gamma_t(f'_t, \sigma_1 | COD) \cdot \Gamma_c(\bar{\sigma}, f'_c) \cdot f(h) \cdot \xi(t, \theta) \cdot \varepsilon^\infty \Big|_{\theta=\theta_0} \quad (4.4.1-7)$$

ここで、

$\varepsilon_{vol}^{ASR}(t)$: 時間 t における ASR 膨張ひずみの増分、

$\Gamma_t(f'_t, \sigma_1 | COD)$: ひび割れ発生時の ASR 膨張の低減係数で COD はひび割れ開閉変位

$\Gamma_c(\bar{\sigma}, f'_c)$: 拘束応力 $\bar{\sigma}$ 条件下での ASR 膨張の低減係数

$f(h)$: 相対湿度条件による ASR 膨張の低減係数

$$\xi(t, \theta) = \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_c(\theta)}}}{1 + e^{\frac{t - \tau_L(\theta, I_\theta, f'_c)}{\tau_c(\theta)}}} : \text{体積膨張を表すシグモイド曲線、}$$

$\varepsilon^\infty \Big|_{\theta=\theta_0}$: 実験的に得られた温度 θ_0 のときの無拘束時の最大膨張ひずみ

である。

式中の $\xi(t, \theta)$ が、Larive が提唱した S 字曲線を表している。この場合も、ASR 膨張を表現するためには、終局膨張ひずみ ε_∞ や、速度の指標となる材料係数 τ_c 、潜伏期の長さの指標となる材料係数 τ_L が必要でありフィッティングにより求めることになる。また、その他の各種低減係数は、既往の研究を参考に設定している。

(2) 既往の ASR 膨張モデルの国内骨材への適用

本節では、(1) で紹介した、Pietruzzak 及び Saouma の ASR 膨張モデルを、国内骨材を用いた場合の ASR 膨張挙動へ適用する可能性を検討する。

適用対象はコンクリートを使用した ASR 膨張試験で鉄筋による拘束がないこと及び養生条件が確認することができる下記の研究を選定した。

表 4.4.1- 1 国内骨材を使用した ASR 膨張実験の調査対象

	第一著者	骨材種類	養生温度 (°C)	養生環境	試験種類 (パラメータ)	発表年
1	矢村 ¹⁸	安山岩 (鳥取)	20 40	湿布 湿気	2 (温度)	1994
2	来海 ¹⁹	安山岩 (-)	40	湿気	1	2000
3	久保 ²⁰	チャート (養老)	40	100%RH	1	2001
4	杉山 ²¹	川砂利 (富山)	50	飽和 NaCl 溶液	1	2008
5	谷口 ²²	安山岩 (-)	40	湿潤封緘	3 (水セメント比)	2008
6	西 ²³	安山岩 (-)	40	湿気	2 (アルカリ総量)	2009
7	宮野 ²⁴	安山岩 (-) チャート (-)	40	100%RH	3 (骨材種類)	2010
8	佐川 ²⁵	安山岩 (-)	40	湿布	9 (アルカリ総量、 骨材混合率)	2014
9	小川 ²⁶	安山岩 (-)	60	湿布	6 (アルカリ総量)	2014

¹⁸ 矢村潔, 長井吾郎, 道廣一利: ASR による損傷に及ぼす鉄筋拘束の影響に関する研究, 材料, Vol. 43, No. 491, pp. 970-975, (1994)

¹⁹ 来海豊: 反応性骨材使用高強度コンクリートの膨張に及ぼす環境条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 2, pp. 997-1002, (2000)

²⁰ 久保善司, 山本晋, 服部篤史, 宮川豊章: ASR がコンクリート曲げ部材の対価性状に与える影響, 材料, Vol. 50, No. 9, pp. 1013-1020, (2001)

²¹ 杉山彰徳, 鳥居和之: 人口軽量骨材のアルカリシリカ反応性とその評価手法の提案, コンクリート工学, Vol. 46, No. 10, (2000)

²² 谷口秀明, 浅井洋, 三加崇, 三上浩: 高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性, プレストレストコンクリート技術協会第 17 回シンポジウム論文集, pp. 87-92, (2008)

²³ 西政好, 濱田秀則, 佐川康貴, 川端雄一郎: フライアッシュ混和コンクリートの ASR による膨張挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 1327-1332, (2009)

²⁴ 宮野暢紘, 久保善司, 鳥居和之: 上記養生したフライアッシュコンクリートにおける ASR 抑制効果の評価方法に関する実験的検討, 材料, Vol. 59, No. 10, pp. 775-780, (2010)

²⁵ 佐川康貴, 山田一夫, 鳥田慎也, 江里口玲: ペシマム現象を示す骨材を用いたコンクリートの加速試験および暴露試験における膨張挙動, コンクリート工学論文集, Vol. 25, pp. 135-145, (2014)

²⁶ 小川彰一, 山田一夫, 大迫政浩, 佐川康貴, 川端雄一郎: コンクリートの ASR による膨張挙動予測に関する研究, コンクリート技術大会 (長岡) 2014 予稿集, pp. 43-46, (2014)

上記文献の試験結果について、式(4.4.1-6)および式(4.4.1-7)を用いて、最小二乗法でフィッティングによって各係数を求めた。フィッティングにより求められる係数は、式(4.4.1-6)では、終局膨張ひずみ ϵ_0 、速度の指標となる材料係数 γ_0 、見かけの活性化エネルギーを意味する U 、及び膨張開始材齢を意味する t_0 であり、式(4.4.1-7)では、終局膨張ひずみ ϵ_0 、速度の指標となる材料係数 τ_c 、潜伏期の長さの指標となる τ_L がフィッティングパラメータとなる。フィッティングにあたり、養生温度には各実験値の値を使用し、相対湿度は上記文献中の養生環境が、湿気、湿布、飽和NaCl溶液の各種であったためすべて100%RHとした。表4.4.1-2にフィッティングにより得られた各係数値を示す。表には実験結果と各モデルの膨張量との決定係数も併せて示した。

表 4.4.1-2 既存の膨張予測モデルでのフィッティング結果

	Pietruzczak					Saouma			
	ϵ_0	γ_0	U	t_0	R^2	ϵ_0	τ_c	τ_L	R^2
矢村_1	0.463	0.008	24.7	0.0	1.00	0.453	0.233	0.000	0.98
矢村_2	0.311	0.004	28.1	53.5	0.98	0.272	0.243	0.566	0.99
来海	0.151	0.021	27.3	13.7	0.96	0.129	0.029	0.118	0.99
久保	0.335	0.020	27.3	21.1	0.99	0.334	0.092	0.123	0.99
杉山	0.415	0.008	28.0	52.9	1.00	0.366	0.137	0.357	0.99
谷口_1	0.275	0.009	527.5	36.1	0.95	0.226	0.067	0.254	0.96
谷口_2	0.326	0.009	19.1	32.1	0.95	0.261	0.081	0.259	0.96
谷口_3	0.260	0.015	26.0	29.7	0.91	0.228	0.034	0.209	0.98
西_1	0.364	0.010	18.5	51.1	0.96	0.339	0.071	0.327	0.99
西_2	0.518	0.018	26.1	39.4	1.00	0.507	0.087	0.203	0.98
宮野_1	0.382	0.012	89.1	34.7	0.99	0.338	0.076	0.227	0.97
宮野_2	0.348	0.009	112.8	42.8	0.92	0.271	0.038	0.263	0.98
宮野_3	458.711	0.000	0.1	65.0	0.90	0.095	0.099	0.420	0.90
佐川_1	0.158	0.007	88.5	11.4	0.98	0.143	0.192	0.112	0.97
佐川_2	0.154	0.018	89.9	11.7	0.97	0.145	0.053	0.128	0.98
佐川_3	0.023	0.161	105.0	8.5	0.70	0.023	0.010	0.040	0.71
佐川_4	0.197	0.017	0.0	0.0	0.99	0.191	0.101	0.000	0.98
佐川_5	0.172	0.019	90.1	0.0	0.98	0.167	0.089	0.000	0.97
佐川_6	0.147	0.063	97.3	2.6	0.99	0.146	0.034	0.000	0.99
佐川_7	0.253	0.017	90.0	0.0	0.99	0.246	0.097	0.000	0.98
佐川_8	0.242	0.020	90.4	0.0	0.99	0.235	0.086	0.000	0.97
佐川_9	0.209	0.064	99.3	0.0	0.97	0.206	0.027	0.000	0.94
小川_1	0.002	0.002	24.6	0.0	0.05	0.001	0.066	0.012	0.21
小川_2	0.018	0.002	23.6	0.0	0.84	0.094	0.165	3.539	0.84
小川_3	0.013	0.031	24.2	17.2	0.97	0.012	0.096	0.003	0.96
小川_4	0.031	0.027	24.2	7.9	0.98	0.026	0.040	0.001	0.90
小川_5	0.076	0.038	24.3	3.0	1.00	0.076	0.000	0.055	1.00
小川_6	0.092	0.045	24.3	0.0	0.99	0.091	0.000	0.038	0.99

表中の決定係数の値をみると、多くのケースで1に近い値を示しており、いずれのモデルを使用した場合でも、国内骨材によるASR膨張を概ね再現可能であることがわかる。このことから、ASR膨張に関する十分なデータが存在する場合には、海外で開発されたASR膨張モデルを国内の例に適用することは可能であるといえる。

次に、両モデルのフィッティングにより得られた最終膨張ひずみを比較したものが、図 4.4.1-1 である。ただし、明らかな異常値を示した試験結果（宮野_3）は図から省いた。

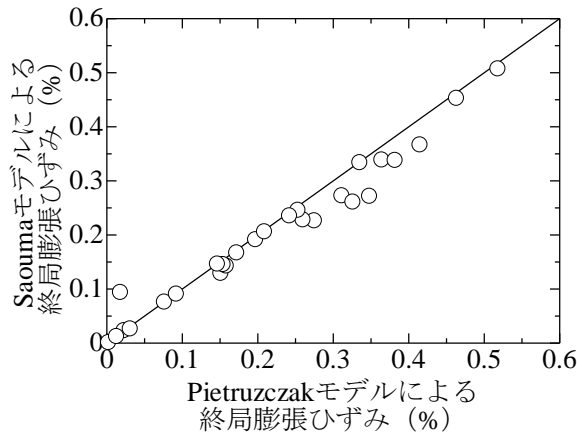


図 4.4.1-1 両モデルによる終局膨張ひずみ値の比較

図より、両者で終局膨張ひずみに大きな差異は見られないが、Pietruzcak らのモデルのほうが、全体的にやや小さい値を見積もるようである。これは、調査対象のデータのほとんどが高温養生による促進試験で、ASR 膨張がほぼ収束傾向にあったことから、最終測定値の結果がより反映されやすい指数曲線のほうが小さくなったものと考えられる。

一方で、終局膨張ひずみのフィッティング値で異常値を出している宮野_3（チャート）の ASR 膨張試験の結果は、図 4.4.1-2 のように膨張開始材齢が遅く、明らかな収束傾向が見えない段階で実験を終了しているため、指数曲線を使用した場合に終局膨張ひずみを過大に評価していることがわかる。

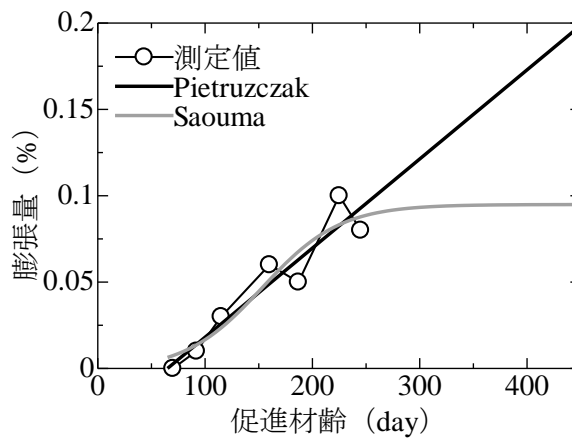


図 4.4.1-2 フィッティング結果の一例

実際の原子力発電施設に膨張予測モデルを適用する場合、ASR が疑われる段階では、ASR 膨張の進行度合いは多くの場合不明であり、ASR 膨張の収束傾向がはっきりしていない段階での測定値を使用して、指数曲線によるフィッティングを行った場合、終局膨張ひずみを過大に評価する可能性があることが上記の結果から想像できる。

また、遅延膨張性骨材による ASR 膨張は、膨張開始時期が遅く、その後急激に膨張が進展するような膨張曲線を描くことが予想されるが、このような骨材に対して、ASR 膨張モデルを使用して、測定値からフィッティングを行うことを想定する場合には、上記と同じ理由で、終局膨張ひずみ量の予測精度が劣る可能性が高い。この点に関しては、4.2 で得られた試験結果を利用するなどして、遅延膨張性骨材に適した膨張モデルを検討する必要がある。

実際の原子力発電施設に上述の手法を適用することを考えた場合、フィッティング精度以外にも課題がある。例えば、図 4.4.1-3 は Pietruzcak モデルから得られた終局膨張ひずみとコンクリート中のアルカリ量の関係を見たものであるが、図より、同一調合では明らかにアルカリ総量が増加するにしたがって終局膨張ひずみが増大していることがわかる。

なお、図中で各マーカーを線で結んだものは、アルカリ総量以外の条件が同一の試験体である。

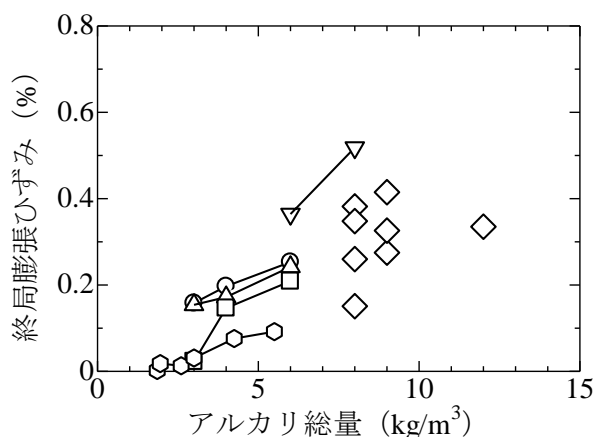


図 4.4.1-3 アルカリ総量と終局膨張ひずみの関係

上図のようにアルカリ量が終局膨張ひずみに影響を与えることは従来指摘されており、アルカリ量から終局膨張ひずみを推定する以下の式を提案されている¹。

$$\varepsilon_{\infty}(R) = \varepsilon_{\infty}(R_{inf}) \cdot \left(1 - \frac{1}{A^{(R-B)}} \right) \quad (4.4.1-8)$$

ここで、

$\varepsilon_{\infty}(R)$: アルカリ量 R のときの終局膨張ひずみ、

$\varepsilon_{\infty}(R_{\text{inf}})$: アルカリ量が無限大のときの終局膨張ひずみ、

A : 終局膨張曲線を決める定数

B : 膨張に寄与しないアルカリ消費量

である。

原子力発電施設のコンクリート部材では、通常のコンクリート構造物では想定されないような環境におかれる場合があり、例えば十分にマッシュな部材や、片側のみ高温にさらされるような部材では、コンクリート内部に温度勾配、水分勾配と併せてアルカリ濃度にも分布が生じている可能性が高い。すなわち、ある一部分の測定値からフィッティングを行い、終局膨張ひずみを予測すると、全体のなかで ASR 膨張分布を見過ごすことになり不適切である可能性がある。

このことから、施設全体の長期的な予測を行う場合には、終局膨張ひずみを決定する作用機構を理解しておくとともに、ある一定程度の寸法を有する鉄筋コンクリート構造物の模擬試験体を用いた実験により、部材中の温度、水分、アルカリ濃度の分布についても高精度で予測する手法を検証することが望まれる。

(3) ASR 膨張と機械的特性の関係の文献調査

ASR の進展は、コンクリートにマクロな膨張やひびわれを生じさせるだけでなく、圧縮強度や静弾性係数といった機械的特性の低下も伴う。そのため、将来にわたって部材の健全性を評価する際には、機械的特性の変化を予測する必要がある。(1)で紹介したモデルの中には、圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比といった機械的特性の変化が膨張の進展度合と関連付けられているものがあり、膨張量に応じて物性が低下していくという論文は既往の研究でも多くみられる。

例えば Pietruzzak は、膨張ひずみの進行率 ζ (t) をとったとき、静弾性係数及びポアソン比の低下率は、下式で表されるとしている。

$$E = E_0 [1 - (1 - B_1) \zeta] \quad (4.4.1-9)$$

$$\nu = \nu_0 [1 - (1 - B_2) \zeta] \quad (4.4.1-10)$$

ここで、

E : ASR 進行度が ζ のときの静弾性係数、

E_0 : 健全時の静弾性係数、

ν : ASR 進行度が ζ のときのポアソン比、

ν_0 : 健全時のポアソン比、

B_1 、 B_2 : 材料定数

である。

Saouma らもまた同様のモデルを、圧縮強度（引張強度、静弾性係数）に適用して構造物の応力解析を行っている。ただし、上記モデルを使用しようとする場合、あらかじめ実験によって材料定数及び終局膨張ひずみを把握しておく必要があり、実際の RC 部材の健全性評価に適用するには相当数のコア採取が必要になる。

本節では、構造物の健全性評価への使用を想定した ASR 膨張の進展と機械的特性の変化の関係を把握することを目的として既往の研究を調査した。調査対象は表 4.4.1-3 の通りである。

表 4. 4. 1- 3 ASR 膨張と機械的特性の関係の調査対象

	筆頭著者	圧縮強度	静弾性 係数	動弾性 係数	超音波 伝播速度	拘束有無	発表年
1	中野 ²⁷	○	○	○	○	有・無	1987
2	Swamy ²⁸	○	○	-	-	無	1988
3	富田 ²⁹	○	○	○	○	有・無	1988
4	小林 ³⁰	○	○	-	○	無	1990
5	尼崎 ³¹	-	-	-	○	有・無	1990
6	Fan ³²	○	-	○	-	有	1995
7	Swamy ³³	-	-	-	○	無	1997
8	Ahmed ³⁴	-	-	-	○	有	1998
9	Ahmed ³⁵	-	-	-	○	有	1999
10	岩波 ³⁶	-	-	-	○	有	2002
11	Mohammed ³⁷	○	○	-	○	無	2003
12	久保 ³⁸	○	○	-	-	無	2006
13	Giaccio ³⁹	○	○	-	-	無	2008

²⁷ 中野錦一, 小林茂広, 中上明久: アルカリシリカ反応による損傷度とコンクリートの諸物理特性との関連性の検討, セメント技術年報, Vol. 41, pp. 419-422, (1987)

²⁸ Swamy, R. N., Al-Asali, M. M.: Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction, ACI Materials Journal, No. 85-M41, pp. 367-374, (1988)

²⁹ 富田穰, 幸左賢二, 中野錦一, 中上明久: コア採取による ASR 変状構造物診断の基礎的研究, セメント技術年報, Vol. 42, pp. 335-338, (1988)

³⁰ 小林一輔, 森弥広: ASR を生じたコンクリートの動弾性係数および超音波伝播速度に関する一考察, 土木学会論文集, Vol. 420, V-13, pp. 245-250, (1990)

³¹ 尼崎省二: 超音波法によるアルカリシリカ反応の非破壊評価に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, pp. 751-756, (1990)

³² Fan, S., Hanson, J. M.: Effecte of Alkali Silica Reaction Expansion and Cracking on Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, No. 95-S44, pp. 488-495, (1995)

³³ Swamy, R. N.: Assessment and Rehabilitation of AAR-aggected Structures, Cement and Concrete Composites, Vol. 19, pp. 427-440, (1997)

³⁴ Ahmed, T., Burley, E., Rigden, S.: The Static and Fatigue Strength of Reinforced Concrete Beams Affected by Alkali-Silica Reaction, ACI Materials Journal, No. 95-M35, pp. 356-368, (1998)

³⁵ Ahmed, T., Burley, E., Rigden, S.: Effect of Alkali-Silica Reaction on Bearing Capacity of Plain and Reinforced Concrete, ACI Structural Journal, No. 96-S62, pp. 557-570, (1999)

³⁶ 岩波光保, 横田弘, 奥山和俊, 鳥居和之: ASR 損傷を受けたコンクリート柱の力学挙動と補強方法に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol. 704, V-55, pp. 129-142, (2002)

³⁷ Mohammed, T. U., Hamada, H., Yamaji, T.: Alkali-Silica Reaction-Induced Strains over Concrete Surface and Steel Bars in Concrete, ACI Materials Journal, No. 100-M16, pp. 133-142, (2003)

³⁸ 久保善司, 上田隆雄, 黒田保, 野村倫一: アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 1691-1696, (2006)

³⁹ Giaccio, G., Zerbino, R., Ponce, J. M., Batic, O. R.: Mechanical Behavior of Concretes Damaged by Alkali-Silica Reaction, Cement and Concrete Research, Vol. 38, pp. 993-1004, (2008)

14	谷口 ⁴⁰	-	-	○	-	無	2008
15	中川 ⁴¹	-	-	-	○	無	2008
16	幸左 ⁴²	○	○	-	-	無	2009
17	中川 ⁴³	-	-	-	○	無	2010
18	上田 ⁴⁴	○	○	-	-	無	2011
19	Moradi-Marani ⁴⁵	-	-	-	○	有	2014

調査によって得られた各機械的特性と膨張率の関係をそれぞれ図 4. 4. 1- 4 から図 4. 4. 1- 7 に示す。各図において、左図は膨張促進を行う以前の各物性値を 1 とした比率を表し、右図は膨張促進を行う以前の状態から損失された各物性値の比率を意味している。また、図中の凡例は引用文献毎に異なるものを使用し、灰色の点は拘束条件下で養生された試験体を示している。

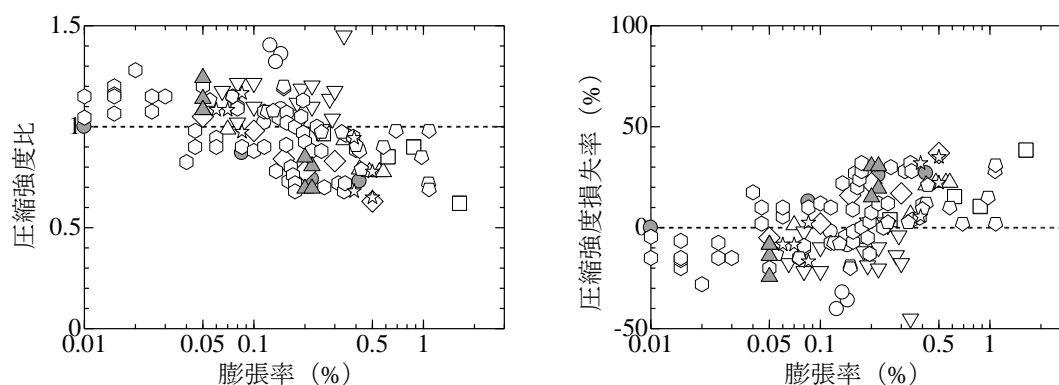


図 4. 4. 1- 4 圧縮強度と膨張率の関係

⁴⁰ 谷口秀明, 三上浩, 浅井洋, 樋口正典, 藤田学: 高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性に関する研究, 三井住友建設技術研究所報告, No. 6, pp. 91-96, (2008)

⁴¹ 中川裕之, 横田優, 長尾和明, 松島学: ASR 劣化状態に関する超音波法による評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 2, pp. 793-798, (2008)

⁴² 幸左賢二, 久利良夫, 川島恭志, 三浦正嗣: ASR 構造物より採取したコアの力学的特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp. 1036-1047, (2009)

⁴³ 中川裕之, 横田優, 長尾和明, 松島学: 超音波法による ASR 既存膨張率の算定, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 1709-1714, (2010)

⁴⁴ 上田尚史, 中村光, 国枝稔, 前野裕文, 森下宣明, 浅井洋: コンクリート構造物における ASR 損傷と損傷後の構造性能の評価, 土木学会論文集 E2, Vol. 67, No. 1, pp. 28-47, (2011)

⁴⁵ Moradi-Marani, F., Kodjo, A. A., Rivard, P., Lamarche, C.-P.: Nonlinear Acoustic Technique of Time Shift for Evaluation of Alkali-Silica Reaction Damage in Concrete Structures, ACI Materials Journal, No. M-2013-004. R1, pp. 1-12, (2014)

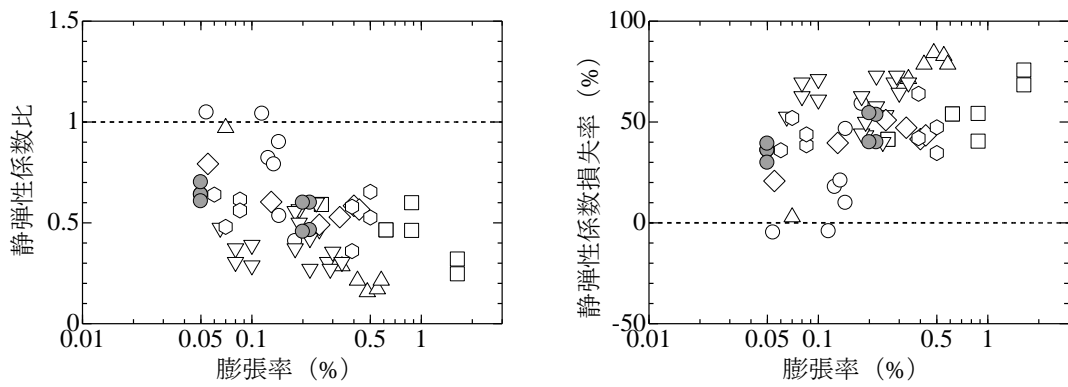


図 4. 4. 1- 5 静弾性係数と膨張率の関係

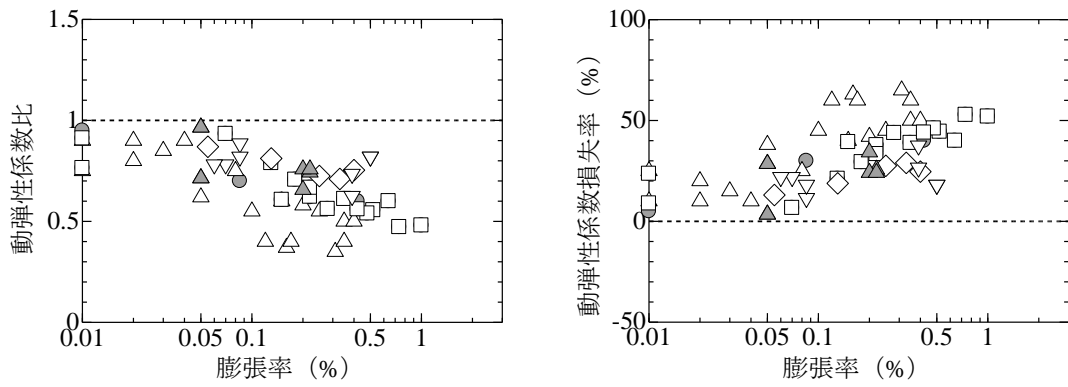


図 4. 4. 1- 6 動弾性係数と膨張率の関係

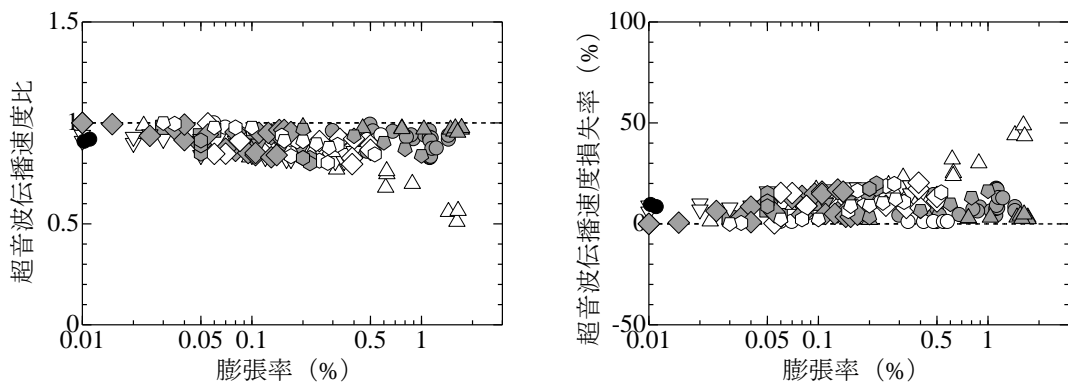


図 4. 4. 1- 7 超音波伝播速度と膨張率の関係

いずれの機械的特性についても、膨張率が增大するにつれて物性値は低下する傾向が見られる。これは、ASR 膨張によってコンクリート内部に空隙（ひび割れ）が発生していることに起因する。この傾向は特に静弾性係数で顕著であり、場合によっては8割以上の低下が生じることもある。

機械的特性の変化は、主にコンクリート中のひび割れによって生じるため、鉄筋等によってコンクリートが拘束され、ひび割れの進展が抑制される場合には、物性値の変化も抑制される可能性が考えられる。そこで、試験体に鉄筋コンクリートを採用し、コンクリートが拘束条件に置かれていた試験体については、図中の灰色の点で示したが、圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数の各値については、拘束の影響はみられないようである。ただし、上記の各物性を得るためにはコア採取などで一度拘束から開放された状態にして強度試験等を実施することになるため、拘束時とコア採取時で物性値が変わっている可能性は否定できない。また、全体的な傾向として、上記物性の低下度合いは実験によるばらつきが大きく、統一的に評価することが困難であった。このことから、膨張量によって機械的特性を予測するためには、例えば、ばらつきの範囲として、下限値と中間値を押さえておくといった手法が考えられる。

一方、超音波伝播速度については、膨張に伴う低下率は小さいものの、実験毎の変化についてのばらつきもまた小さく、同一の試験体であれば精度良く測定できる可能性がある。そして、他の機械的特性と異なり、拘束の有無の影響が見られる。すなわち、鉄筋コンクリートを対象とした超音波伝播試験では、表層コンクリートで膨張が生じているにも関わらず、超音波伝播速度の低下がほとんど生じないものが散見される。この点について、既往の文献では、鉄筋コンクリート内部の鉄筋が超音波の経路となっていて、コンクリートそのものの特性を反映していない可能性があることが指摘されている。なお、ここでの超音波伝播速度は、透過法によってコンクリート内部の伝播速度を計測したものであり、コンクリート中に生じたひび割れを非破壊測定で検出する技術としては、超音波の非線形応答性状を用いた測定手法が研究されているが、本件については4.4.2(3)で詳述する。

実際に原子力発電施設のコンクリート構造物に超音波伝播試験を適用する場合には、鉄筋の影響を把握しておくか、拘束下で鉄筋の影響を排除した、膨張率と物性の関係を把握しておく必要がある。そこで、拘束条件下の超音波伝播速度と膨張率の関係を確認する目的で以下の簡易的な試験を実施した。

確認には、「円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法」(JCI-S-009-2012)で使用される円筒型枠を用いた。この試験は、膨張材を使用した膨張コンクリートの膨張特性を把握するために開発された試験であり、中央部で拘束鋼材比0.7%程度の拘束をコンクリートに与えることができる。また、型枠の両側面から超音波を透過させることで、鉄筋の影響を受けない状態で、拘束条件化のコンクリートの伝播特性を把握することができる。円筒型枠とひずみの測定方法の概要を図4.4.1-8に示す。

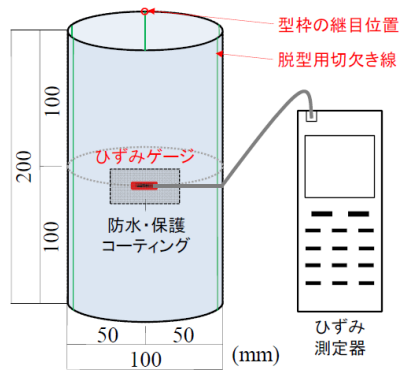


図 4. 4. 1- 8 円筒型枠とひずみの測定方法の概要

図のような試験体を作製し、材齢 28 日まで 20℃封緘養生を行った後、60℃に設定した乾燥炉で ASR 膨張を促進した。なお、ひずみゲージは図中の中央部に加えて下部と上部の表裏両面にも貼付した。これは、円筒型枠は上面が開放されており、高さ方向に拘束の分布が存在し異なるひずみを示すと考えられたためである。

材齢 28 日までの超音波伝播速度の経時変化と、60℃条件下での膨張ひずみの経時変化をそれぞれに図 4. 4. 1-9 に示す。また、本試験で得られた超音波伝播速度比と膨張ひずみの関係は図 4. 4. 1-7 に黒塗りの点で示した。本実験で導入された膨張ひずみは現状 0.01%程度であり、拘束が機械的特性の低下に与える影響に関しては更なるデータの拡充が必要である。

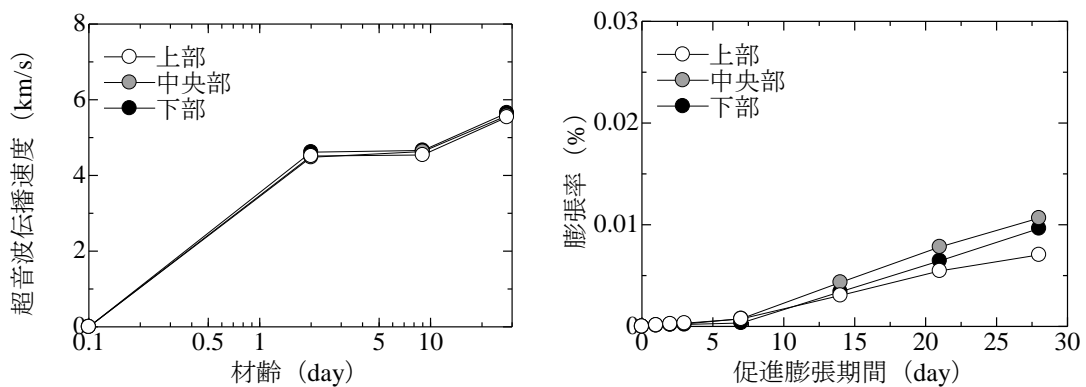


図 4. 4. 1- 9 拘束膨張試験の実験経過

4.4.2 ASR 膨張を評価するための基礎情報

(1) CPT 試験後のコンクリート供試体の薄片観察

ASR について岩石学的評価手法の構築を目的として、コンクリートプリズム試験 (CPT 試験) 終了後のコンクリート供試体から薄片を作製し、偏光顕微鏡観察および FE-SEM 観察を行った。CPT 試験後のコンクリート供試体は、国立環境研究所からの提供を受けた。コンクリート供試体は、急速膨張性骨材を使用したものと遅延膨張性骨材を使用したものの 100×100×400mm コンクリートプリズム試験体がそれぞれ 1 本ずつである。CPT 試験の加速養生条件は、修正 JASS5N 法であり、打設後 24 時間 20℃で養生後、脱型を行い 30 分間吸水後に、60℃、95%RH 環境であり、提供を受けたのは、26 週間養生を終えたものである¹²。

コンクリート薄片の作製は、日本コンクリート工学会 ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会の推奨手法³に準じて行った。急速膨張性骨材を使用した CPT 試験体薄片のスキャナー画像を図 4.4.2-1 に示し、図 4.4.2-1 中に示した枠の箇所について偏光顕微鏡で観察した画像を図 4.4.2-2 に示す。同様に、遅延膨張性骨材を使用した CPT 試験体薄片のスキャナー画像を図 4.4.2-3 に示し、図 4.4.2-3 中に示した枠の箇所について偏光顕微鏡で観察した画像を図 4.4.2-4 に示す。

図 4.4.2-1 および図 4.4.2-2 に示されるように、急速膨張性骨材は、骨材の反応リム、骨材のひび割れ・ゲル充填、セメントペーストへのひび割れの進展・ゲル充填、ひび割れに沿った遠方の気泡へのゲル充填が確認された。一方、図 4.4.2-3、図 4.4.2-4 に示されるように、遅延膨張性骨材は、急速膨張性骨材とは異なり、骨材のひび割れおよび気泡へのゲル充填は確認されたものの、骨材の反応リムおよびセメントペーストへのひび割れは確認できなかった。また、ASR が確認できる骨材はほとんど存在しなかった。片山による偏光顕微鏡観察による ASR の進行状況の分類⁴によれば、どちらの骨材においても気泡へのゲル充填が生じていることから、ASR の進行状況はステージ v であると考えられるが、遅延膨張性骨材を用いた CPT 試験体薄片では、顕著なひび割れは確認できなかった。今後、CPT 試験において異なる調合、加速温度の CPT 試験体の薄片観察を行い、ASR について岩石学的評価手法の構築を進めていく必要がある。

¹ 佐川康貴, 山田一夫, 烏田慎也, 小川彰一, “コンクリートプリズムを用いた 60℃加速養生によるアルカリシリカ反応性の評価に関する研究,” コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 1120-25 (2014)

² K. Yamada, S. Karasuda, S. Ogawa, Y. Sagawa, M. Osako, H. Hamada, and M. Isneini, “CPT as an evaluation method of concrete mixture for ASR expansion,” Construction and Building Materials, Vol. 64, pp. 184-91 (2014)

³ 日本コンクリート工学会, “ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書,” 482p. (2014)

⁴ 片山哲哉, “アルカリシリカ反応入門③アルカリシリカ反応の診断方法,” コンクリート工学, Vol. 52, No. 12, pp. 1083-1090 (2014)

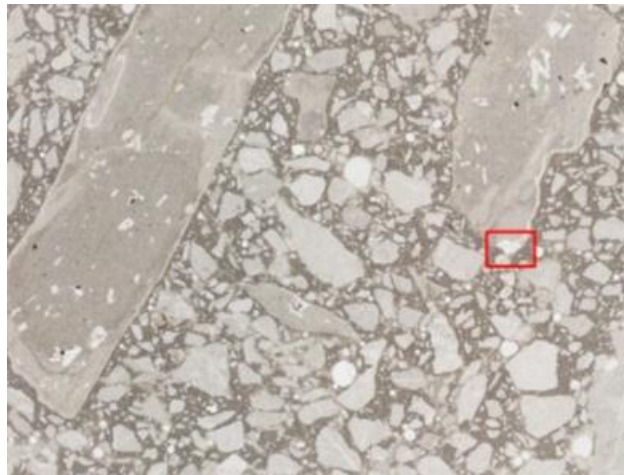
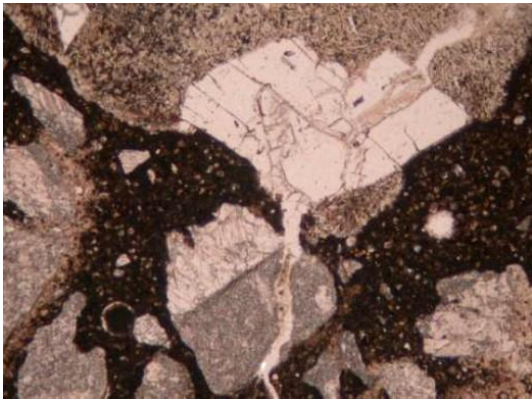
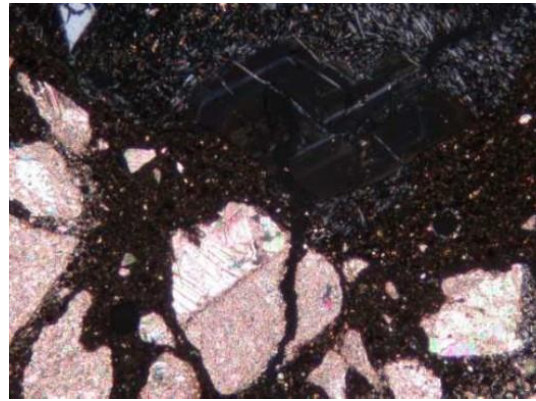


図 4. 4. 2-1 急速膨張性骨材を使用した CPT 試験体薄片のスクャナー画像



オープンニコル

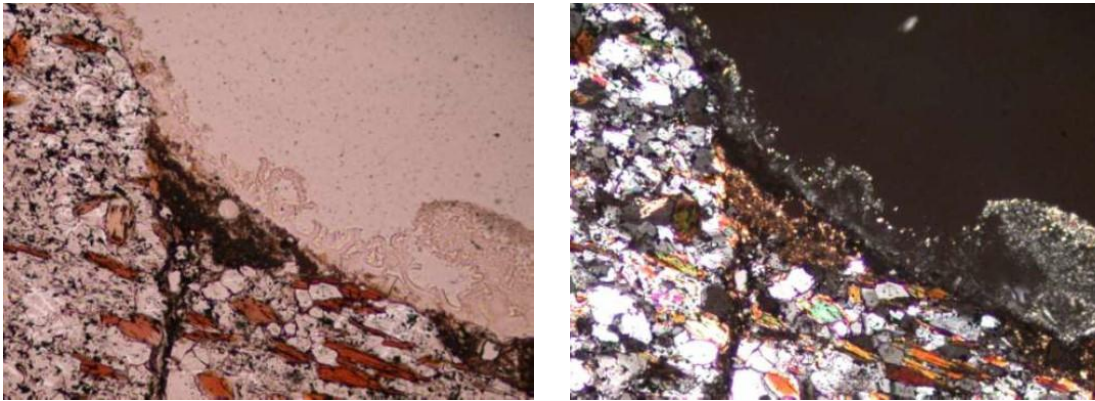


クロスニコル

図 4. 4. 2-2 急速膨張性骨材を使用した CPT 試験体薄片の偏光顕微鏡画像



図 4. 4. 2-3 遅延膨張性骨材を使用した CPT 試験体薄片のスクャナー画像



オープンニコル

クロスニコル

図 4. 4. 2-4 遅延膨張性骨材を使用した CPT 試験体薄片の偏光顕微鏡画像

上記に示した CPT 試験体薄片を用いて、FE-SEM 観察及び ASR ゲルの EDS 分析を行った。急速膨張性骨材を用いた CPT 試験体薄片の FE-SEM 画像を図 4. 4. 2-5 に、遅延膨張性骨材を用いた CPT 試験体薄片の FE-SEM 画像を図 4. 4. 2-6 にそれぞれ示す。併せて、図中に示した箇所の SEM-EDS 定量分析結果について表 4. 4. 2-1 に示す。図 4. 4. 2-5 および表 4. 4. 2-1 に示されるように、急速膨張性骨材のリムに生じた ASR ゲルが観察された。また、図 4. 4. 2-6 におよび表 4. 4. 2-1 に示されるように、遅延膨張性骨材近傍の気泡に生じた ASR ゲルが観察された。

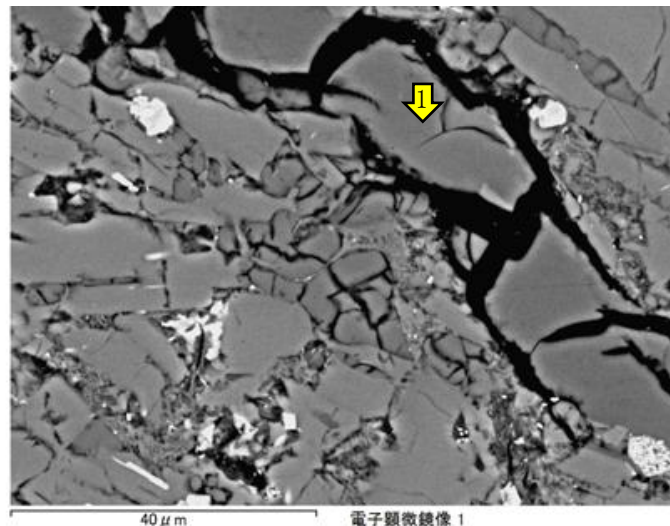


図 4. 4. 2-5 急速膨張性骨材を使用した CPT 試験体薄片の FE-SEM 画像

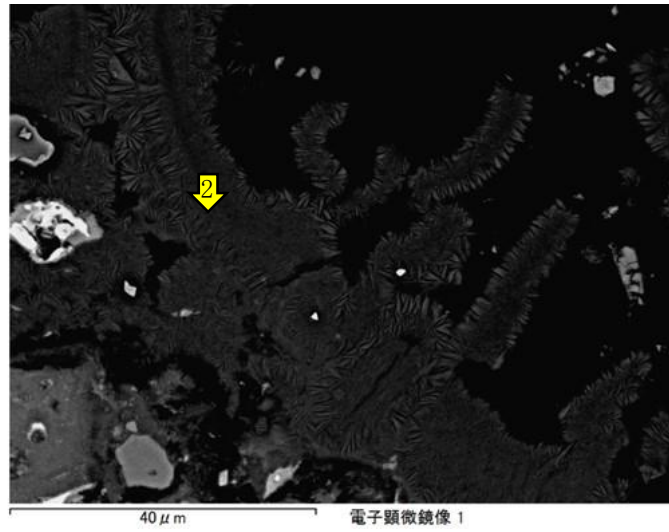


図 4.4.2-6 遅延膨張性骨材を使用した CPT 試験体薄片の FE-SEM 画像

表 4.4.2-1 ASR ゲルの SEM-EDS 結果

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Total	[Ca/Si]	[Ca]/[Na+K]
1	57.36	0.55	-	3.16	-	0.44	6.25	8.64	1.56	-	-	77.97	0.17	0.58
2	44.73	-	-	-	-	-	10.63	6.71	1.23	-	-	63.31	0.36	1.27

(2) ASR 促進試験における温度依存性に関する文献調査

ASR の評価にあたり、高温環境における促進試験を行うことは、試験期間の短縮のために有効であるが、実環境と促進環境による ASR 挙動の違いを把握する必要がある。本項目では、CPT 試験体の終局膨張量の温度依存性について既往の文献の調査を行った。

CPT 試験体の ASR 膨張量の温度依存性は、Oberholster and Davies⁵、小林と野村⁶、大岸ら⁷、Folliard et al.⁸、米倉ら⁹、黒田ら^{10、11}、Lindgård et al.¹²が検討を行っているが、本報告書では、Folliard et al.⁸と Lindgård et al.¹²の測定結果についてそれぞれ図 4.4.2-7、図 4.4.2-8 に示す。図 4.4.2-7、図 4.4.2-8 に示されるように、凡例は加速試験時の環境温度であるが、60℃の促進環境は、38℃の促進環境と比較して、膨張挙動の初期の立ち上がりが早く、その後の膨張挙動の収束も早い。一方、38℃の促進環境は、膨張挙動が持続し、60℃の促進環境において収束した膨張量を上回っていることが確認できる。このことから、60℃における加速環境における CPT 試験体の収束膨張量をそのまま用いて、60℃以下の温度環境におかれたコンクリート部材の膨張量の将来予測をすると、過小評価になる可能性がある。

⁵ R. E. Oberholster and G. Davies, "An Accelerated Method for Testing the Potential Alkali Reactivity of Siliceous Aggregates," *Cement and Concrete Research*, Vol.16, No.2, pp.181-89 (1986)

⁶ 小林一輔, 野村謙二, "アルカリシリカ反応がコンクリートの諸性状に及ぼす影響 (1) : アルカリ量・温度・反応性骨材の粒度がコンクリートの膨張性状に及ぼす影響," *生産研究*, Vol.40, No.3, pp.156-58 (1988)

⁷ 大岸佐吉, 小野博宣, 山下隆司, "アルカリ骨材反応の促進試験および含浸無機ポリマーによる AAR 抑制効果," *コンクリート工学年次論文集*, Vol.11, No.1, pp.129-34 (1989)

⁸ K. J. Folliard, J. Ideker, M. D. A. Thomas, and B. Fournier, "Assessing Aggregate Reactivity Using the Accelerated Concrete Prism Test," *Seventh CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, pp.269-83 (2004)

⁹ 米倉亜州夫, 伊藤秀敏, 政所暢利, "アルカリ骨材反応に起因するコンクリートの膨張に及ぼす温度の影響," *セメント・コンクリート論文集*, Vol.61, pp.302-09 (2007)

¹⁰ 黒田保, 井上正一, 高井伸一郎, 西林新蔵, "コンクリートの ASR 膨張に与える NaOH 溶液濃度と保存温度の影響," *コンクリート工学年次論文集*, Vol.33, No.1, pp.1013-18 (2011)

¹¹ 黒田保, 井上正一, 高井伸一郎, 西林新蔵, "コンクリートの ASR 膨張に与える保存温度とアルカリ総量の影響," *コンクリート工学年次論文集*, Vol.34, No.1, pp.946-51 (2012)

¹² J. Lindgård, M. D. A. Thomas, E. J. Sellevold, B. Pedersen, Ö. Andiç-Çakır, H. Justnes, and T. F. Rønning, "Alkali-silica reaction (ASR)-performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion," *Cement and Concrete Research*, Vol.53, pp.68-90 (2013)

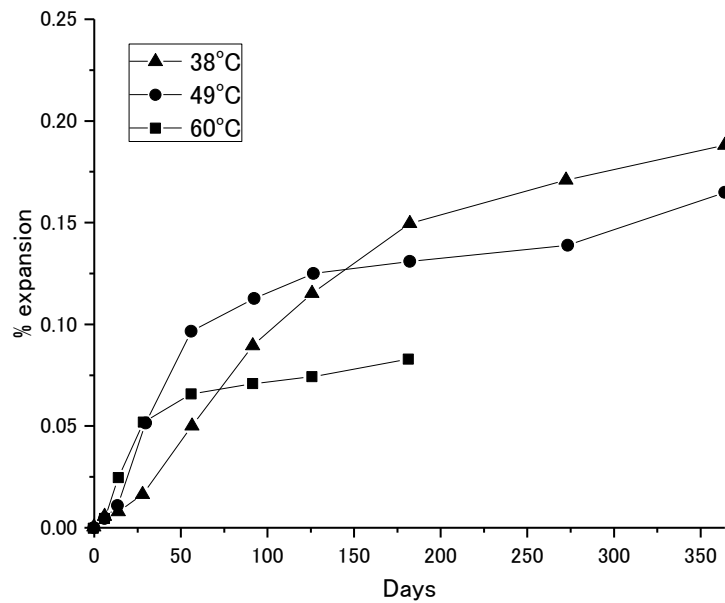


図 4.4.2-7 Folliard et al. による CPT 試験体の ASR 加速試験結果⁸

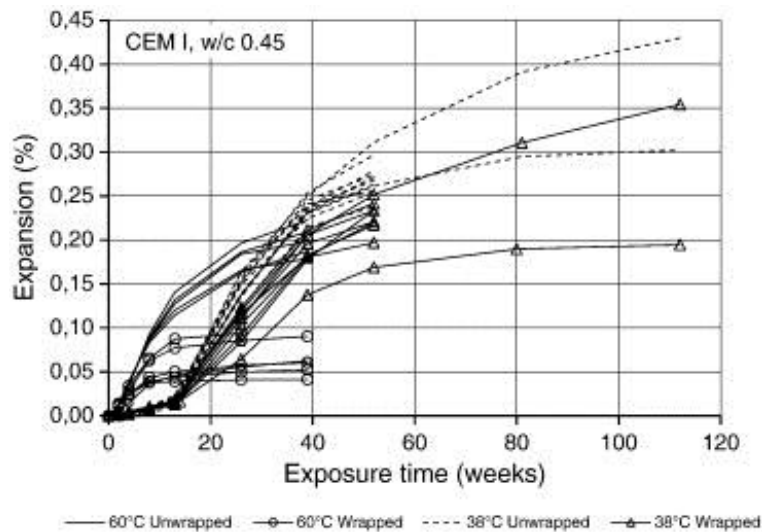


図 4.4.2-8 Lindgård et al. による CPT 試験体の ASR 加速試験結果¹²

上記の問題を解決するにあたっては、加速試験の温度依存性について別の観点から考察する必要がある。ASR による膨張量を変化させる要因としては、反応性骨材の ASR 反応量の変化、セメントペーストマトリクスの剛性の変化、収縮（膨張）量の変化、生成した ASR ゲルの剛性の変化、膨張（収縮）量の変化などが考えられるが、これらを確認するためには、CPT 試験体の薄片観察および ASR に必要となる細孔溶液中のアルカリ量の測定が必要となる。ASR を生じたコンクリートの薄片観察については、2000 年代から電子ジャーナルの普及や薄片作製技術の向上により、ASR ゲルの鮮明な画像が報告されているが^{例えば、13、14、}

¹³ T. Katayama, "The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) - Its mineralogical and

15、16、17、18、19、20、異なる温度で加速試験を行った同一調合の CPT 試験体薄片の観察をしている文献は確認できなかった。一方、アルカリ反応性骨材を用いた試験体の細孔溶液の測定については、川村ら^{21、22、23、24}、小林ら^{25、26、27}、二村ら^{28、29、30、31}、Durand et al.³²、小

geochemical details, with special reference to ASR," *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 4, pp. 643-75 (2010)

¹⁴ T. Katayama, "SO-CALLED ALKALI-CARBONATE REACTION - PETROGRAPHIC DETAILS OF FIELD CONCRETES IN ONTARIO," 13th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Vol.13, pp.1-15 (2010)

¹⁵ 富山潤, 山田一夫, 金田一男, 伊良波繁雄, 大城武, "ASR 劣化したプレテンション PC 桁の岩石学的検討に基づく ASR 診断および耐荷性能の評価," 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 67, No. 4, pp. 578-95 (2011)

¹⁶ M. Beyene, A. Snyder, R. J. Lee, and M. Blaszkiewicz, "Alkali Silica Reaction (ASR) as a root cause of distress in a concrete made from Alkali Carbonate Reaction (ACR) potentially susceptible aggregates," *Cement and Concrete Research*, Vol. 51, pp. 85-95 (2013)

¹⁷ I. Fernandes, A. S. Silva, V. Ramos, J. C. Nunes, F. Noronha, and S. Medeiros, "Identification of alkali-reactive aggregates: some examples," *Proceedings of the ICE - Construction Materials*, pp. 1-10 (2014).

¹⁸ I. Moundougou, D. Bulteel, E. Garcia-Diaz, V. Thiéry, P. Dégrugilliers, and J. G. Hammerschlag, "Reduction of ASR expansion in concretes based on reactive chert aggregates: Effect of alkali neutralisation capacity," *Construction and Building Materials*, Vol. 54, pp. 147-62 (2014)

¹⁹ F. Locati, D. Falcone, and S. Marfil, "Dedolomitization and alkali-silica reactions in low-expansive marbles from the province of Córdoba, Argentina. A microstructural and chemical study," *Construction and Building Materials*, Vol. 58, pp. 171-81 (2014)

²⁰ 広野真一, 安藤陽子, 山田一夫, 鳥居和之, "タイ国の高速道路で発見された熱帯地域における ASR の実態," *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 36, No. 1, pp. 1084-89 (2014)

²¹ 川村満紀, 竹本邦夫, "混和材による細孔溶液のアルカリ量の低減とアルカリ・シリカ膨張の抑制," *セメント技術年報*, Vol. 40, pp. 328-31 (1986)

²² 川村満紀, 竹本邦夫, "種々のフライアッシュおよび高炉スラグの細孔溶液の組成に及ぼす影響とアルカリ・シリカ反応," *セメント技術年報*, Vol. 41, pp. 431-34 (1987)

²³ M. Kawamura and K. Takeuchi, "Alkali-silica reaction and pore solution composition in mortars in sea water," *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 12, pp. 1809-19 (1996)

²⁴ 鍵本広之, 佐藤道生, 川村満紀, "アルカリシリカ反応により劣化した構造物の劣化度評価と細孔溶液分析による劣化進行の予測," *土木学会論文集*, No. 641, pp. 241-51 (2000)

²⁵ 小林一輔, 瀬野康弘, 河合研至, 宇野祐一, "反応性骨材を用いたモルタル細孔溶液の組成 (1) ~ (3)," *生産研究*, Vol. 40, No. 6, pp. 297-300, 346-349, 441-443 (1988)

²⁶ 小林一輔, 瀬野康弘, 河合研至, 宇野祐一, "反応性骨材を用いたモルタル細孔溶液の組成," *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 10, No. 2, pp. 733-38 (1988)

²⁷ 瀬野康弘, 小林一輔, "反応性骨材を用いたモルタル供試体における細孔溶液の組成と膨張特性," *コンクリート工学論文集*, Vol. 1, No. 2, pp. 29-38 (1990)

²⁸ 二村誠二, 福島正人, "アルカリシリカ反応によるモルタル膨張に及ぼす細孔溶液中のアルカリ量の影響," *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 10, No. 2, pp. 727-32 (1988)

²⁹ 二村誠二, 福島正人, "反応性骨材混入率がモルタル細孔溶液中の化学組成に及ぼす影響," *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 11, No. 1, pp. 99-104 (1989)

³⁰ 村上あい, 二村誠二, 乾義尚, "アルカリシリカ反応における反応性鉱物の違いが細孔溶液の化学組成に及ぼす影響について," *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 20, No. 2, pp. 937-42 (1998)

³¹ 村上あい, 二村誠二, 乾義尚, "潜晶質石英の混入率が ASR による細孔溶液の化学組成に及

早川ら³³、Berube et al.^{34、35}が検討を行っているが、温度依存性について検討を行っている Berube et al. の測定結果を図 4.4.2-9 に示す³⁴。図 4.4.2-9 に示されるように、60°C の促進環境は、23°C、38°C の温度環境と比較して、セメントペースト中に取り込まれた Na₂O 量が多くなっており、ASR 反応に消費される Na₂O 量が低下していることが推察された。以上から、促進環境における CPT 試験を実用化するにあたっては、コンクリート薄片観察による骨材周辺の ASR 挙動や細孔溶液中のアルカリ濃度の温度依存性を実験により取得する必要があると考えられる。

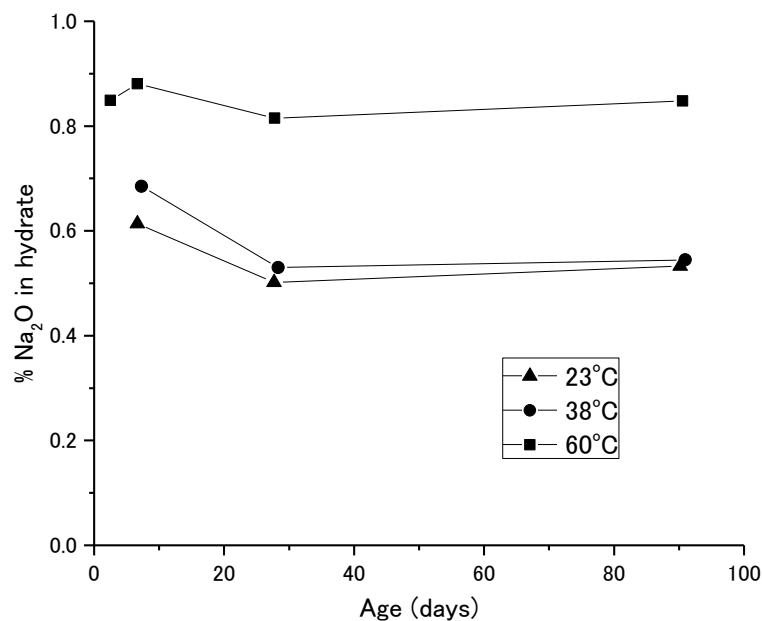


図 4.4.2-9 Berube et al. による細孔溶液の試験結果³⁴

ぼす影響,” コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 2, pp. 271-76 (2000)

³² B. Durand, J. Berard, R. Roux, and J. A. Soles, “Alkali-Silica Reaction - the Relation between Pore Solution Characteristics and Expansion Test-Results,” Cement and Concrete Research, Vol. 20, No. 3, pp. 419-28 (1990)

³³ 小早川真, 小津博, 羽原俊祐, “硬化フライアッシュセメントモルタルの空隙水中の溶存イオン濃度の経時変化,” セメント・コンクリート論文集, Vol. 53, pp. 102-09 (1999)

³⁴ M. A. Berube, C. Tremblay, B. Fournier, M. D. Thomas, and D. B. Stokes, “Influence of lithium-based products proposed for counteracting ASR on the chemistry of pore solution and cement hydrates,” Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 9, pp. 1645-60 (2004)

³⁵ P. Rivard, M. A. Berube, J. P. Ollivier, and G. Ballivy, “Decrease of pore solution alkalinity in concrete tested for alkali-silica reaction,” Materials and Structures, Vol. 40, No. 9, pp. 909-21 (2007)

(3) 非線形超音波応答を用いた非破壊試験に関する文献調査

ASR に伴うひび割れも含めて、コンクリート中に生じたひび割れを非・微破壊試験によって測定していくことが、原子力発電所施設における鉄筋コンクリート造建築物・構造物の高経年化に伴う健全性を評価する上で求められる。本項目では、コンクリート中に生じたひび割れを非破壊測定で検出する技術として、超音波の非線形応答性状を用いた測定手法に関する既往の論文の調査を行った。

一般に知られている超音波を用いたコンクリートの非破壊試験は、超音波の伝搬速度を測定するものである。劣化診断を行うには、コンクリートが健全な状態のときに得られた伝搬速度との相対比較する必要がある。このとき、超音波の伝搬速度は、超音波の入力強度に依存性をもつため、健全な状態時に測定した箇所、同一の入力振幅で測定しなければ、劣化診断の信頼性が低下する。加えて、コンクリート構造物の供用期間中に、新たに劣化診断が必要になった箇所については、健全時の伝搬速度の情報がないため、これも劣化診断の信頼性が低下する。このように、現状の超音波伝搬速度による劣化診断は、簡便で定期的な診断に有効であるものの、伝搬速度単独の劣化診断の結果の確かさにはある程度の限界があると考えられる。

このことから、欧米では、超音波の非線形の応答性状を用いた測定手法の確立について研究が進められている。これは、超音波が非完全弾性体を通過した時に、入力波に対して出力波が減衰する現象を利用したものである。このとき、出力波のエネルギーを利用する測定手法^{36, 37, 38}と、周波数を利用する測定手法^{39, 40, 41, 42, 43, 44, 45}の2種類が挙げられるが、

³⁶ M. Scalerandi, A. S. Gliozzi, C. L. E. Bruno, D. Masera, and P. Bocca, "A scaling method to enhance detection of a nonlinear elastic response," *Applied Physics Letters*, Vol. 92, No. 10, pp. 1-3 (2008)

³⁷ C. L. E. Bruno, A. S. Gliozzi, M. Scalerandi, and P. Antonaci, "Analysis of elastic nonlinearity using the scaling subtraction method," *Physical Review B*, Vol. 79, No. 6, pp. 1-13 (2009)

³⁸ P. Antonaci, C. L. E. Bruno, A. S. Gliozzi, and M. Scalerandi, "Monitoring evolution of compressive damage in concrete with linear and nonlinear ultrasonic methods," *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 7, pp. 1106-13 (2010)

³⁹ K. E. A. Van Den Abeele, J. Carmeliet, J. A. Ten Cate, and P. A. Johnson, "Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part II: Single-Mode Nonlinear Resonance Acoustic Spectroscopy," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, No. 1, pp. 31-42 (2000)

⁴⁰ K. E. A. Van Den Abeele, A. Sutin, J. Carmeliet, and P. A. Johnson, "Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS)," *NDT & E International*, Vol. 34, No. 4, pp. 239-48 (2001)

⁴¹ C. Payan, V. Garnier, J. Moysan, and P. A. Johnson, "Applying nonlinear resonant ultrasound spectroscopy to improving thermal damage assessment in concrete," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 121, No. 4, pp. 1-6 (2007)

⁴² J. Chen, A. R. Jayapalan, J.-Y. Kim, K. E. Kurtis, and L. J. Jacobs, "Rapid evaluation of alkali-silica reactivity of aggregates using a nonlinear resonance spectroscopy technique," *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 6, pp. 914-23 (2010)

⁴³ K. J. Leśnicki, J.-Y. Kim, K. E. Kurtis, and L. J. Jacobs, "Characterization of ASR damage in concrete using nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy technique,"

本報告書では、出力波のエネルギーを利用する測定手法について取り上げる。

出力波のエネルギーを利用した測定手法は、Scaling Subtraction Method (SSM) 法と呼ばれ、総出力エネルギーを、弾性成分と非弾性成分に分離し、コンクリート内部にひび割れが生じると、総出力エネルギーに対して出力非弾性応答エネルギーが増加する現象を利用したものである。測定は、段階的に入力波の振幅を増加させていき、図 4. 4. 2-10 に示されるように、各ステップにおける総出力エネルギーに対する出力非弾性応答エネルギーのプロットを結んで得られるべき乗の曲線の曲率でコンクリート内部のひび割れ量の評価を行う。

この手法は、入力波ではなく、出力波に対する非弾性応答成分によりコンクリート内部のひび割れの評価を行うため、伝搬速度による劣化診断とは異なり、必ずしも健全なときの測定結果を要しない。しかし、超音波測定における全般的な課題である、接触子の測定面への接着の安定性、湿度(コンクリートの含水率)、コンクリート内部の鉄筋などが測定結果に影響を及ぼすため、実用化にはこれらの課題を解決していく必要がある。

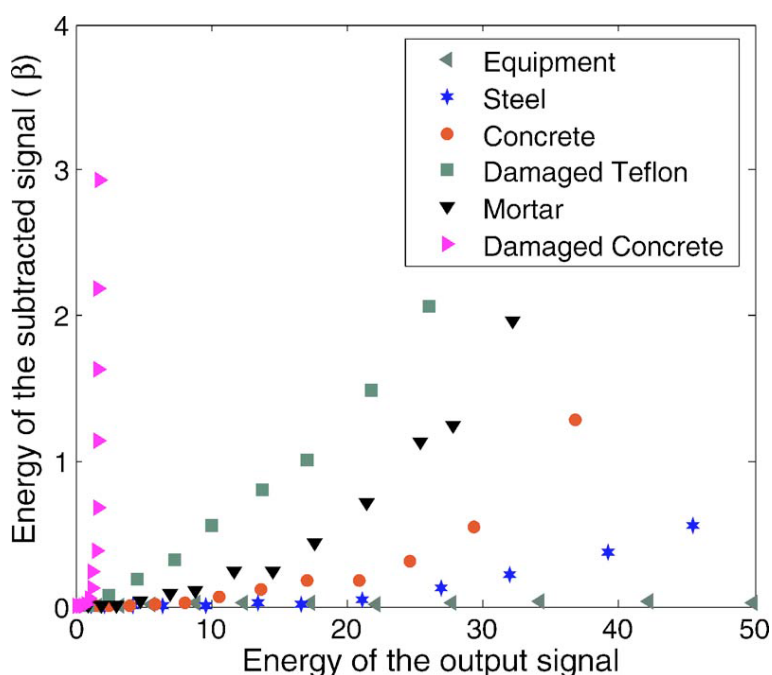


図 4. 4. 2-10 出力非線形応答エネルギーと総出力エネルギーの関係³⁶

NDT & E International, Vol. 44, No. 8, pp. 721-27 (2011)

⁴⁴ K. J. Lesnicki, J. Y. Kim, K. E. Kurtis, and L. J. Jacobs, "Assessment of alkali-silica reaction damage through quantification of concrete nonlinearity," *Materials and Structures*, Vol. 46, No. 3, pp. 497-509 (2013)

⁴⁵ Y. Boukari, D. Bulteel, P. Rivard, N.-E. Abriak, *Cement and Concrete Research*, 67 (2015) 44-51
 Y. Boukari, D. Bulteel, P. Rivard, and N.-E. Abriak, "Combining nonlinear acoustics and physico-chemical analysis of aggregates to improve alkali-silica reaction monitoring," *Cement and Concrete Research*, Vol. 67, No. 0, pp. 44-51 (2015)

(4) 原子力発電所施設におけるコンクリートに使用された骨材産地一覧

原子力発電所施設のコンクリート構造物のASR評価を行うにあたり、岩石学的な評価を付加するためには、まず原子力発電所施設において使用されたコンクリート用骨材の産地を確認し、地質を同定する必要がある。本項目では、各電力会社から提出された高経年化技術評価書⁴⁶に示されたコンクリート骨材の産地について一覧にまとめ、産業技術総合研究所/地質調査総合センター作成の地質図表示システム「地質図 Navi」⁴⁷から地質の同定およびそれに基づく骨材の反応性の可能性についてまとめた。まず、各原子力発電所施設のコンクリート用骨材の産地について、表 4.4.2-2 に示す。表 4.4.2-2 に示されるように、高経年化評価の対象年に至っていない原子力発電所は、情報が得られなかった。表 4.4.2-2 に示した各骨材の産地を地質図上に示したものを図 4.4.2-11～図 4.4.2-19 にそれぞれまとめた。産地名のエリアを細線で囲い、川を太線でなぞってある。図 4.4.2-11～図 4.4.2-19 に示されるように、地質は複雑に入り組んでいるため、産地名だけで完全に地質を特定することはできないが、大まかに地質を同定することが可能である。図 4.4.2-11～図 4.4.2-19 から同定した各骨材産地の地質の凡例番号、地質から推定される岩種、および推定岩種から含まれている可能性のある ASR 反応性鉱物を表 4.4.2-3～表 4.4.2-11 にまとめた。それぞれの凡例番号が示す地質および地質の説明については、表 4.4.2-12 に示す。また、含まれている可能性のある ASR 反応性鉱物の急速・遅延膨張性の補足については、表 4.4.2-13 に示す。表 4.4.2-3～表 4.4.2-11 を参考に、各原子力発電所に使用された骨材の急速・遅延膨張の反応性を予測することができるが、地質は複雑に入り組んでいるため、実際に採石場に行ってサンプルを採取してくるのが重要なのは言うまでもない。また、実際にコンクリート中の骨材がアルカリ骨材反応による膨張を生じ、コンクリート部材に悪影響を及ぼすかは、使用セメント、ペシマム配合、環境温度・湿度に依存するため、必ずしもコンクリート構造物のアルカリ骨材反応による劣化を示すものではないことを付記する。

⁴⁶ 原子力規制委員会：原子力発電所の高経年化技術評価等に係る審査 | 会議 | 原子力規制委員会, <https://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/keinenka/>, 2015.2.13 確認

⁴⁷ 産業技術総合研究所/地質調査総合センター：地質図表示システム「地質図 Navi」, <https://gbank.gsj.jp/geonavi/>, 2015.2.13 確認

表 4.4.2-2 コンクリート用骨材産地一覧

事業者	発電所	号炉	セメント	粗骨材	粗骨材産地	細骨材	細骨材産地
北海道電力	泊	1	情報なし				
		2					
		3					
東北電力	女川	1	FB	碎石	宮城県女川町高白	川砂	宮城県北上川（新田地区）
						陸砂	宮城県鳴瀬町浜市
						砕砂	宮城県女川町高白産
		2	情報なし				
3							
東北電力・東京電力	東通	1	情報なし				
東京電力	福島第一	1	N	川砂利	福島県新田川	川砂	宮城県阿武隈川
				碎石	福島県富岡町滝川		
		2	FB	川砂利	福島県新田川	川砂	福島県新田川
				碎石	福島県富岡町滝川		宮城県阿武隈川
		3	FB	川砂利	福島県新田川	川砂	福島県新田川
				碎石	福島県富岡町滝川		
		4	FB	川砂利	福島県新田川	川砂	福島県新田川
				山砂利	福島県小久・折木	山砂	福島県小久・折木
			N	山砂利	福島県富岡町滝川	川砂	福島県新田川
		5	FB	川砂利	福島県新田川	川砂	宮城県阿武隈川
			N	山砂利	福島県富岡町滝川	川砂	宮城県阿武隈川 福島県新田川
		6	N	川砂利	福島県新田川	川砂	宮城県阿武隈川
			FB	山砂利	福島県小久・折木・ 滝川	川砂	宮城県阿武隈川 福島県新田川
						山砂	福島県小久・折木
福	1	情報なし		福島県小久・折木・	情報	福島県小久・折木・広野	

島 第 二	2	FB	山砂利	広島県小久・折木	山砂	福島県小久・折木			
			山砂利	福島県折木	山砂	福島県折木			
			砕石	福島県富岡町富岡川 原石山	砕砂	福島県富岡町富岡川原石 山			
		3	FB	山砂利	福島県小久・折木	山砂	福島県小久・折木		
	山砂利			福島県折木	山砂	福島県折木			
	砕石			福島県富岡町富岡川 原石山	砕砂	福島県富岡町富岡川原石 山			
	4	情報なし							
	柏 崎 刈 羽	1	N+FA	川砂利 ・砕石	新潟県信濃川水系長 岡	川砂・ 現地砂	新潟県信濃川水系長岡		
		2	情報なし						
		3							
		4							
		5							
		6							
		7							
	北陸 電力	志 賀	1	情報なし					
			2						
日 本 原 子 力	東 海 第 二	2	FB	川砂利	茨城県那珂川	砂	敷地内掘削 (茨城県那珂川東海村)		
			N	砕石	茨城県常陸太田市町 屋				
	敦 賀	1	N	砕石	福井県敦賀市井ノ口 切谷	川砂	福井県福井市布施田		
					福井県敦賀市檜曲	陸砂	福井県坂井郡三国町		
						砕砂	福井県敦賀市檜曲		
2	情報なし								
中 部 電 力	浜 岡	1	MorN	川砂利	静岡県大井川	川砂	静岡県大井川		
		2	MorN	川砂利	静岡県大井川	川砂	静岡県大井川		
				山砂利	静岡県菊川市河東町	山砂	静岡県河東山		
		3	情報なし						
		4							
5									

関西 電力	美 浜	1	FB	碎石	福井県敦賀市葉原	陸砂	福井県坂井郡三国町	
						川砂	福井県九頭竜川	
		2	FB	碎石	福井県敦賀市葉原	川砂	福井県坂井郡三国町新保宿	
		3	M	碎石	福井県敦賀市葉原	川砂	福井県坂井郡三国町新保宿	
	高 浜	1	FB	碎石	福井県敦賀市葉原	川砂	京都府舞鶴市由良川	
		2						
		3	M+FA	碎石	福井県小浜市堅海・ 京都府舞鶴市漆原・ 余部	山砂	福井県坂井郡三国町	
						川砂	滋賀県百瀬川	
						砕砂	福井県小浜市堅海・京都府舞鶴市漆原・余部	
				碎石	福井県小浜市堅海・ 京都府舞鶴市漆原・ 余部	山砂	福井県竹野郡網野町	
		4	M+FA	碎石	福井県小浜市堅海・ 京都府舞鶴市漆原・ 余部	山砂	福井県坂井郡三国町	
						川砂	滋賀県百瀬川	
					砕砂	福井県小浜市堅海・京都府舞鶴市漆原		
					碎石	福井県小浜市堅海・ 京都府舞鶴市漆原・ 余部	山砂	福井県竹野郡網野町
	大 飯	1	M	碎石	福井県小浜市堅海	川砂	京都府舞鶴市由良川	
					滋賀県高島市安雲川町		福井県九頭竜川	
		2	M	碎石	福井県小浜市堅海	陸砂	福井県坂井郡三国町	
					滋賀県高島市安雲川町	砕砂	福井県小浜市	
	3	情報なし						
	4	情報なし						
中国 電力	島 根	1	FB	碎石	島根県松江市八雲町	川砂	島根県斐伊川	
					島根県出雲市古志町	山砂	島根県出雲市園	
	2	情報なし						
四国 電力	伊 方	1	MorN	碎石	山口県柳井市 (安山岩)	海砂	愛媛県今治 (脱塩)	
		2	MorN	碎石	愛媛県大州市	海砂	愛媛県今治	

				(輝緑岩)		(脱塩)	
				山口県下松市 (硬質砂岩)	陸砂	大分県大分市鶴崎	
				山口県柳井市 (安山岩)	陸砂	福岡県糸島市志摩	
		3	情報なし				
九州 電力	玄 海	1	FB	砕石	佐賀県東松浦郡玄海 町有浦	海砂	佐賀県唐津市小川島
						山砂	福岡県糸島市志摩芥屋
		2	FB	砕石	佐賀県伊万里市波多 津町	海砂	佐賀県唐津市小川島
						山砂	福岡県糸島市志摩芥屋
		3	情報なし				
		4	情報なし				
	川 内	1	FB	砕石	鹿児島県川内市川永 野町 (現 薩摩川内 市) (安山岩)	砕砂	鹿児島県川内市川永野町 (現 薩摩川内市) (安山 岩)
						海砂	佐賀県東松浦郡呼子町小 川島 (現 唐津市)
2		FB	砕石	鹿児島県川内市川永 野町 (現 薩摩川内 市) (安山岩)	砕砂	鹿児島県川内市川永野町 (現 薩摩川内市) (安山 岩)	
					海砂	佐賀県東松浦郡呼子町小 川島 (現 唐津市)	

※原子力安全基盤機構・平成 24 年度原子力用コンクリートの反応性骨材に関する調査報告書の表 27 に修正・追記を行った。

ここで、N: 普通ポルトランドセメント、M: 中庸熱ポルトランドセメント、FB: フライアッシュセメント B 種、N+FA: 普通ポルトランドセメント+フライアッシュ、M+FA: 中庸熱ポルトランドセメント+フライアッシュ、MorN: 中庸熱ポルトランドセメントもしくは普通ポルトランドセメントを示す。

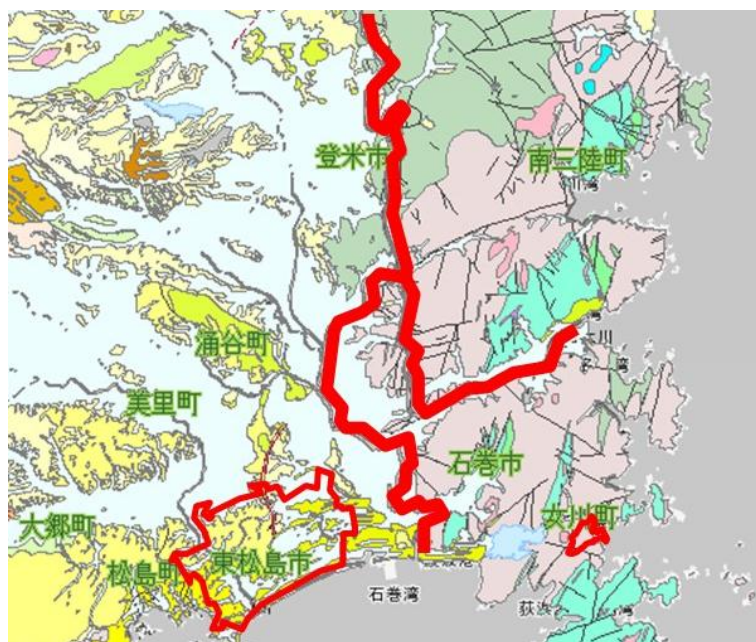


図 4. 4. 2-11 女川原子力発電所の骨材産地の地質図

表 4. 4. 2-3 女川原子力発電所の骨材産地の推定岩種

骨材産地	凡例 番号	推定岩種	反応性鋳物の可能性
宮城県女川町高白	25	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鋳物
宮城県北上川（新田地区）	1	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鋳物
宮城県鳴瀬町浜市	7	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鋳物

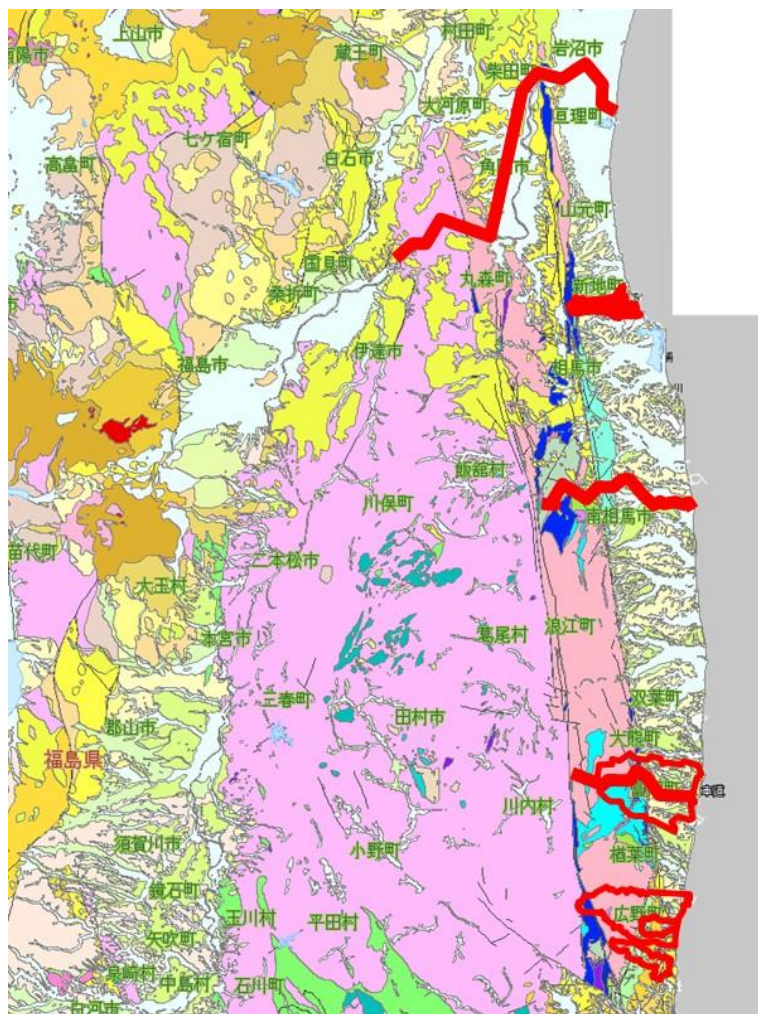


図 4. 4. 2-12 福島第一、福島第二原子力発電所の骨材産地の地質図

表 4. 4. 2-4 福島第一、福島第二原子力発電所の骨材産地の推定岩種

骨材産地	凡例 番号	推定岩種	反応性鉱物の可能性
宮城県阿武隈川	131	火成岩 (深成岩)	変成作用によるシリカ鉱物
福島県駒ヶ峰	161	変成岩	変成岩のシリカ鉱物
福島県新田川	26	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鉱物
福島県双葉郡富岡町滝川・富岡川 原石山	147	火成岩 (深成岩)	変成作用によるシリカ鉱物
福島県双葉郡広野町(折木)・いわ き市大久町小久	132	火成岩 (深成岩)	変成作用によるシリカ鉱物



図 4. 4. 2-13 柏崎刈羽原子力発電所の骨材産地の地質図

表 4. 4. 2-5 柏崎刈羽原子力発電所の骨材産地の推定岩種

骨材産地	凡例 番号	推定岩種	反応性鉱物の可能性
新潟県信濃川水系長岡	1	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鉱物

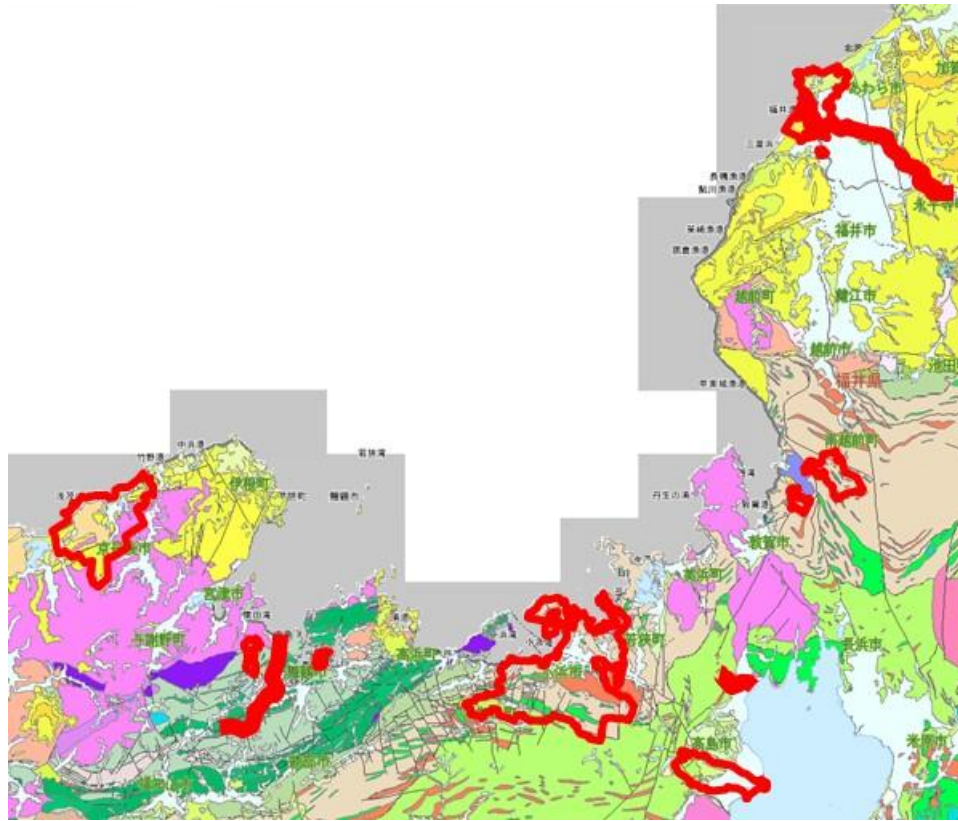


図 4. 4. 2-15 敦賀、美浜、高浜、大飯原子力発電所の骨材産地の地質図

表 4. 4. 2-7 敦賀、美浜、高浜、大飯原子力発電所の骨材産地の推定岩種

骨材産地	凡例 番号	推定岩種	反応性鋇物の可能性
福井県三方上中郡若狭町井ノ口	61	堆積岩 (チャート)	生物起源シリカ
福井県敦賀市樫曲・葉原	60	堆積岩	生物起源シリカ
福井県福井市布施田	1	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鋇物
福井県坂井市三国町	171	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鋇物
福井県坂井市三国町新保	162	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鋇物
福井県九頭竜川	1	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鋇物
福井県小浜市(堅海)	60	堆積岩	生物起源シリカ
京都府竹野郡網野町(現:京丹後市)	87	火成岩 (火山岩)	マグマ起源シリカ
京都府舞鶴市由良川	1	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鋇物
京都府舞鶴市漆原・余部	26	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鋇物
滋賀県高島市安雲川町・百瀬川	52	堆積岩	生物起源シリカ

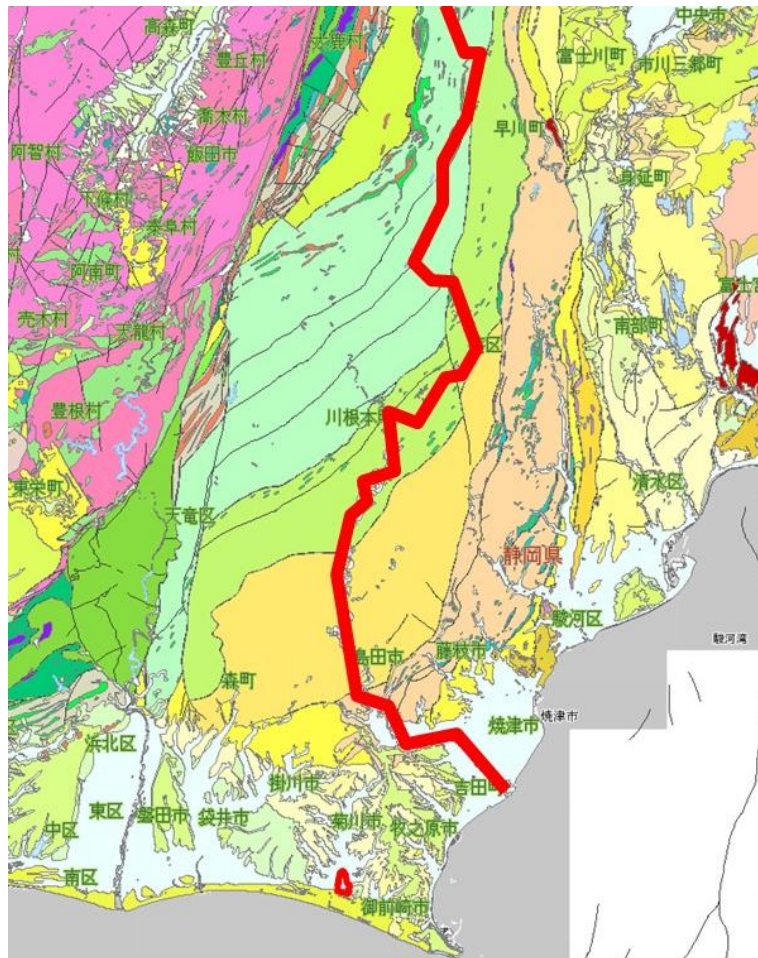


図 4.4.2-16 浜岡原子力発電所の骨材産地の地質図

表 4.4.2-8 浜岡原子力発電所の骨材産地の推定岩種

骨材産地	凡例 番号	推定岩種	反応性鉱物の可能性
静岡県大井川	194	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鉱物
静岡県菊川市河東（河東山）	1	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鉱物

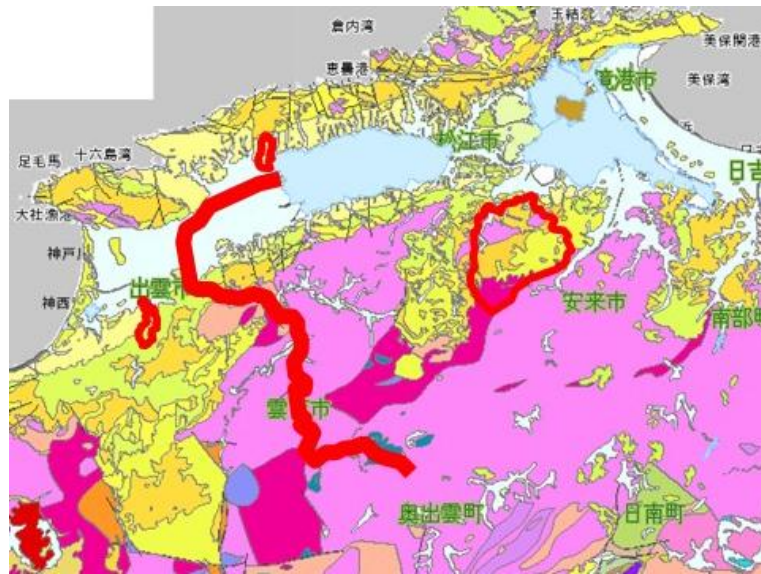


図 4. 4. 2-17 島根原子力発電所の骨材産地の地質図

表 4. 4. 2-9 島根原子力発電所の骨材産地の推定岩種

骨材産地	凡例 番号	推定岩種	反応性鋳物の可能性
島根県松江市八雲町	104	火成岩 (火山岩)	マグマ起源シリカ
島根県出雲市古志町	103	火成岩 (火山岩)	マグマ起源シリカ
島根県出雲市園町	7	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鋳物
島根県斐伊川	1	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鋳物

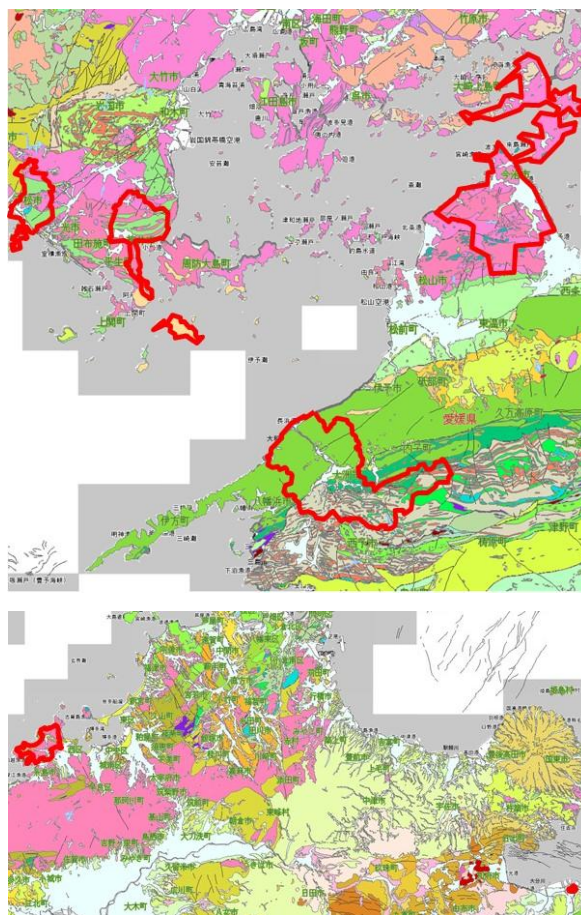


図 4. 4. 2-18 伊方原子力発電所の骨材産地の地質図（上:瀬戸内海周辺、下:九州北部）

表 4. 4. 2-10 伊方原子力発電所の骨材産地の推定岩種

骨材産地	凡例 番号	推定岩種	反応性骨材の可能性
山口県柳井市	87	火成岩（火山岩）	マグマ起源シリカ
山口県下松市	151	変成岩	変成岩のシリカ鉱物
愛媛県大州市	74	火成岩（半深成岩）	マグマ起源シリカ
愛媛県今治市	129	火成岩（変成岩）	マグマ起源シリカ
大分県大分市鶴崎	1	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鉱物
福岡県糸島市志摩	130	火成岩（変成岩）	マグマ起源シリカ

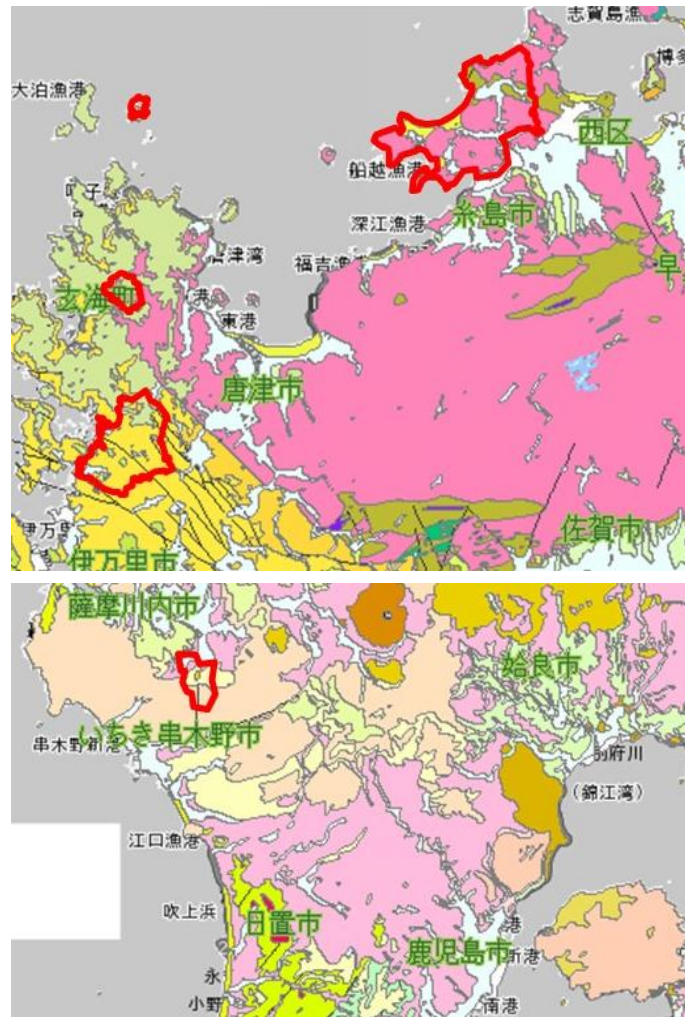


図 4. 4. 2-19 玄海、川内原子力発電所の骨材産地の地質図（上:佐賀県、下:鹿児島県）

表 4. 4. 2-11 玄海、川内原子力発電所の骨材産地の推定岩種

骨材産地	凡例 番号	推定岩種	反応性骨材の可能性
佐賀県東松浦郡玄海町有浦・呼子町小川島（現 唐津市）	118	火成岩 (火山岩)	マグマ起源シリカ
佐賀県伊万里市波多津町	10	堆積岩	堆積粒子としてのシリカ鉱物
福岡県糸島市志摩芥屋	130	火成岩 (変成岩)	マグマ起源シリカ
鹿児島県川内市川永野町（現薩摩川内市）	86	火成岩 (火山岩)	マグマ起源シリカ

表 4.4.2-12 地質の説明

凡例 番号	地質	説明
1	後期更新世-完新世(H)の海成 または非海成堆積岩類	約 1 万 8000 年前～現在までに形成された最も新 しい時代の地層
7	中-後期中新世(N2)の海成また は非海成堆積岩類	約 1500 万年前～700 万年前に形成された地層
10	後期漸新世-前期中新世(PG4) の海成または非海成堆積岩類	約 3200 万年前～2200 万年前に形成された地層
25	中-後期三畳紀(TR1-2)の海成 堆積岩類	約 2 億 5100 万年前～約 2 億 2900 万年前に海で形 成された地層
26	ペルム紀(P)の海成堆積岩類	約 2 億 9900 万年前～2 億 5100 万年前に海で形成 された地層
52	中-後期ジュラ紀(J2-3)の付加 コンプレックスの基質	約 1 億 7600 万年前～1 億 4600 万年前に海溝で複 雑に変形した地層(付加体)
60	前-中期ジュラ紀(J1-2)の付加 コンプレックスの基質	約 2 億年前～1 億 6100 万年前に海溝で複雑に変形 した地層(付加体)
61	前-中期ジュラ紀(J1-2)の付加 コンプレックスのチャートブ ロック(石炭紀-三畳紀後期)	約 2 億年前～1 億 6100 万年前に付加したチャート という岩石(ガラスと類似の成分)
74	ジュラ紀(J1-3)の苦鉄質火山 岩類(付加コンプレックス中の 岩体)	約 2 億万年前～1 億 4600 万年前の付加体中の玄武 岩岩体
86	後期中新世-鮮新世(N3)の非ア ルカリ珪長質火山岩類	約 700 万年前～170 万年前に噴火した火山の岩石 (デイサイト・流紋岩類)
87	中期中新世-後期中新世(N2)の 非アルカリ珪長質火山岩類	約 1500 万年前～700 万年前に噴火した火山の岩 石(デイサイト・流紋岩類)
103	中期中新世-後期中新世(N2)の 非アルカリ苦鉄質火山岩類	約 1500 万年前～700 万年前に噴火した火山の岩 石(安山岩・玄武岩類)
104	前期中新世-中期中新世(N1)の 非アルカリ苦鉄質火山岩類	約 2200 万年前～1500 万年前に噴火した火山の岩 石(安山岩・玄武岩類)
118	後期中新世-鮮新世(N3)のアル カリ苦鉄質火山岩類	約 700 万年前～170 万年前に噴火した K や Na に富 む火山の岩石(安山岩・玄武岩類)
129	後期白亜紀(K2)の珪長質深成 岩類	約 1 億年前～6500 万年前にマグマが地下の深い ところで冷えて固まった花崗岩質の深成岩
130	前-後期白亜紀(K1-2)の珪長質	約 1 億 2000 万～9000 万年前にマグマが地下の深

	深成岩類	いところで冷えて固まった花崗岩質の深成岩
131	前期白亜紀 (K1) の阿武隈花崗岩類	約1億4600万年前～1億年前にマグマが地下の深いところで冷えて固まった阿武隈花崗岩類
132	前期白亜紀 (K1) の北上花崗岩類	約1億4600万年前～1億年前にマグマが地下の深いところで冷えて固まった北上花崗岩類
147	前期白亜紀 (K1) の北上タイプ苦鉄質深成岩類	約1億4600万年前～1億年前にマグマが地下の深いところで冷えて固まった斑れい岩質の深成岩(北上)
151	領家変成岩 (m8/低-中圧型)	約1億年前～6000万年前に地下深くの高い温度で形成された領家変成岩類
153	阿武隈変成岩 (m7/低-中圧型)	約1億2000万年前～約1億年前に地下深くの高い温度で形成された阿武隈変成岩
161	松ヶ平・母体	北上や阿武隈地域に分布する5億年～4億年前に地下深くの強い圧力で形成された変成岩
162	後期更新世-完新世 (H) の砂丘堆積物	約1万8000年前～現在までに砂丘で形成された地層
171	後期更新世 (Q3) の中位段丘堆積物	川沿いのやや高い所に分布している約15万年前～7万年前に形成された段丘層
194	後期白亜紀後期-前期漸新世 (K2-PG3) の付加コンプレックスの基質	約8600万年前～3200万年前に海溝で複雑に変形した地層(付加体)

表 4.4.2-13 反応性鉱物に関する急速・遅延膨張性の補足

反応性鉱物の可能性	備考
堆積粒子としてのシリカ鉱物	主に遅延膨張性の微晶質・隠微晶質石英
変成作用によるシリカ鉱物	主に遅延膨張性の微晶質・隠微晶質石英
変成岩のシリカ鉱物	主に遅延膨張性の微晶質・隠微晶質石英
生物起源シリカ	主に急速膨張性のオパール-A、オパール-CT、カルセドニー
マグマ起源シリカ	主に急速膨張性のクリストバライト、トリディマイト、火山ガラス

4.4.3 ASRの高経年化対策に関する国際動向

(1) はじめに

ASR に関して国際的な動向をまとめる。ASR に関しては、およそ 4 年に一度開催される International Conference on Alkali Aggregate Reaction (ICAAR)がある⁴⁸。表 4.4.3-1 にこれまでの開催一覧を示す。今回は 2016 年にサンパウロで開催予定である。

表 4.4.3-1 ICAAR 一覧

回	開催年	開催国	開催都市
第 1, 6 回	1974, 1983	デンマーク	Koge, Copenhagen
第 2 回	1975	アイスランド	Reykjavik
第 3, 9 回	1976, 1992	イギリス	Wexham, London
第 4, 14 回	1978, 2012	USA	Purdue, Austin
第 5 回	1981	南アフリカ	Cape town
第 7, 11 回	1986, 2000	カナダ	Ottawa, Quebec
第 8 回	1989	日本	Kyoto
第 10 回	1996	オーストラリア	Melbourne
第 12 回	2004	中国	Beijing
第 13 回	2008	ノルウェー	Trondheim
第 15 回	2016	ブラジル	São Paulo

ASR に関する国際的学会活動は RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures) において 1988 年から名称を変えながら続いている。これまでの委員会一覧を国内の活動と合わせて表 4.4.3-2 に示す。2013 年に一区切りを迎えた。そして 2014 年には、新しく二つの委員会が立ち上がった。一つはコロラド大学 V. Saouma 教授が議長を務める TC ISR (Internal Swelling Reaction)であり、もう一つはノルウェー技術科学大学の B. Wigum 教授が議長を務める TC AAA (Avoiding alkali aggregate reactions in concrete - Performance based concept) である。前者は ASR による構造物の劣化シミュレーションまでを考え、後者は ASR に関するコンクリートの性能試験の方法確立を目指す。

日本では、日本コンクリート工学会 (JCI) を中心に ASR の研究がなされてきた。1983～1987 年までの委員会は、国内で ASR の存在が初めて認められ、1985～1987 年の経産省のプロジェクトと合わせ、現在の ASR 抑制対策の基準を定める基となった。2003～2005 年の土木学会の委員会は ASR による鉄筋破断を受けてのものであり、その影響度が限定的であることを示した。2006～2007 年の JCI の委員会では、日本の ASR の抑制対策が完全ではないことを示し、国際的な先端手法をまとめた。2011～2013 年の JCI の委員会で

⁴⁸山田一夫：“RILEM TC 219-ACS の活動状況を考慮した今後の ASR 研究について”、コンクリートテクノ、Vol. 33, No. 6, pp. 1-11 (2014)

は、ASR 診断について最新技術を紹介するとともに、コンクリートプリズム試験の提案などを行っており、本高経年化評価技術の高度化事業の基盤となったものと言える。

国際的活動は、最新の情報を得る場所であり、かつ日本からの情報発信をする場でもある。日本から参加がないとしても多くの国の活動が行われると、国際ルールが知らないうちに制定されていることもあり得る。常に、国際的委員会活動や国際会議などには出席して情報収集し、国内での情報共有を図ることが重要である。

表 4.4.3-2 RILEM 及び日本での ASR に関する委員会活動

RILEM での ASR に関する委員会活動			
開催期間	略称	TC 名称	訳
1988～2000	106-AAR	Alkali aggregate reaction	アルカリ骨材反応
2000～2006	192-ARP	Alkali-reactivity and prevention - Assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity	アルカリ反応性と防止 - アルカリ反応性の評価、仕様および診断
2006～2014	219-ACS	Alkali Aggregate Reaction in concrete structures: performance testing and appraisal	コンクリート構造物中のアルカリ骨材反応:性能試験と評価
2014～2016	ISR	Internal Swelling Reaction	内部膨張反応
2014～2018	AAA	Avoiding alkali aggregate reactions in concrete - Performance based concept	コンクリート中のアルカリ骨材反応の回避 - 性能照査型概念
日本での ASR に関する委員会活動			
開催期間	主催	名称	
1983～1987	日本コンクリート工学協会	アルカリ骨材反応調査研究委員会	
1985～1987	建設省	総合技術開発プロジェクトコンクリート耐久性向上技術の開発	
2003～2005	土木学会	アルカリ骨材反応対策小委員会	
2006～2007	日本コンクリート工学協会	日本コンクリート工学協会 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会	
2011～2013	日本コンクリート工学協会	ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会	

(2) 遅延エトリングイト生成 DEF

RILEM TC ISR の Swelling (膨潤) は、ASR と遅延エトリングイト生成 (Delayed Ettringite Formation, DEF) を含む。欧米では、ASR と並んで、大断面のコンクリートに DEF が広く認められると認識されるようになってきており、TC ISR では両者を検討する。DEF は 60℃を超える蒸気養生を行うコンクリート二次製品において典型的に認められてきた現象であるが、最近は大断面コンクリートで打設初期にコンクリート温度が 60℃を超えるようになると蒸気養生がなされない条件でも発生することが分かっている。

DEF が日本の原子力関連施設で起きたという事例は報告されておらず、その可能性は低いかもしれない。しかし、日本の原子力発電所で DEF の可能性が全くないとも断言はできない。DEF は ASR と全く同じような劣化をする。拘束がない条件では亀甲状のひび割れを生じ、拘束がある条件では拘束に沿ったひび割れが発生する。どちらも湿潤環境で発生する。外観観察で両者を区別するのは困難である。ASR が骨材の膨張であるのに対し、DEF はセメントペーストの膨張であり、両者の区別には岩石学的検討が必要であり、その鑑定には一定の知識と経験が必要である。逆に言えば、ASR 診断ができるためには、DEF の診断ができ、両者を判別することが求められる。これまで日本では DEF はほとんど報告されておらず、劣化コンクリートの診断が適切にできる技術者は限られていると考えられる。したがって、日本の原子力施設の高経年化評価技術においては、ASR に対する一定の理解も必須と言える。

(3) RILEM TC ISR

2014年6月30日にアメリカワシントンの EPRI にてキックオフミーティングが開催された。この会合は、OECD/NEA/CSNI CAPS ASCET (Assessment of Structures subject to Concrete Pathologies) プロジェクトとも合同で開催された。

OECD – Organization for Economic Cooperation and Development

NEA – Nuclear Energy Agency

CSNI – The Committee on Safety of Nuclear Installations

CAPS - CSNI Activity Proposal Sheet

A research program on a specific topic defined and developed in the CSNI

原子力施設の ASR 問題について、すでにフランスの IFSTTAR のプロジェクト、Seabrook プロジェクト、Gentilly 2 NPP プロジェクトなどが実施されており、それらの知見共有化が行われている。Gentilly 2 は ASR により廃炉になったことが明らかになった。Recommendation を作ることを目的として、2015.10 までに State of the art report を作成する。その後、2年かけて Recommendation を作成する。

ASCET には 16 機関が参加し、日本の NRA も参加している。メンバー国にコンクリートの劣化に関して関心がある事項のアンケートがなされ、ASR が 10 票を得た。次点は硫酸塩劣化と鋼材腐食の 5 票であり、ASR への各国の関心が高いことが分かる。このプロジェクトと RILEM TC ISR の成果の区分など曖昧であるが、両者の歩調を合わせて 3 年で成果を出すということである。次回の会合は 2015 年 6 月末にパリで開かれる。

TC ISR は、ASR に影響された構造物の劣化と供用性の損失予測という課題で活動する。4 つの WG があり、それぞれ、材料試験(コア)、数値計算(膨張予測)、モニタリング、大規模実験(耐震)を担当する。以下の 6 個のトピックを検討する。

Topic 1: 膨張している構造物の最適モニタリングシステムの選択と解釈(光学、音響、ほか)。

Topic 2: 反応速度決定の実験室的手法の開発/改良(膨張の時間変化)

Topic 3: 室内部材実験結果の外挿

Topic 4: ASR や DEF が起きている既存構造物からのデータに基づく材料特性の選定

Topic 5: FEM コードの検証方法の開発

Topic 6: FEM コードの指針 ⇒コードが標準化されると日本にも影響があるかもしれない。

この内容は、原子力施設で ASR 劣化を生じた部材の健全性評価そのものであり、国際的活動の成果は、IAEA からの参加メンバー (Alex Polyakov, Div. of Nuclear Installation Safety) もおり、SALTO(Safety Aspect of Long Term Operation)や IGALL(International Generic Ageing Lessons Learned)に関する話題提供もあり、Saouma 教授としては、成果をこのような公的文書に掲載させたい意向があるのかもしれない。

検討内容はいずれも高経年化評価技術高度化事業と関係が深いのが Topic 2 と Topic 3 である。JNES レポートに基づけば、平成 26 年度の事業である骨材の ASR 試験の検証の先には、構造物の診断の検証がある。JNES レポートでは岩石学的試験により ASR であることと進行段階を確認することになるが、TC ISR では、コアを用いて促進膨張試験を行い、さらに将来予測を行うことを試みている。この部分は、Toulouse 大学の Sellier 教授が担当するが、コアを多量に採取し、骨材を取り出して粉砕し、促進膨張試験を行う。構造物からコアを多量採取することは好ましくなく、骨材を粉砕して評価すると粒径ペシマム現象の影響を受けることになり適切な予測ができないことになる。TC ISR の活動は 3 年で成果を出すという制約があるので、問題があるモデルを使って当面の方法を作り上げることになる。日本の高経年化評価技術高度化においては、より長期的展望に足り、TC ISR の活動も参考にしながらより合理的な方向を模索することが妥当である。平成 26 年度事業において、CPT の適切な実験条件に関する検討も始めており、次のステップとしては、構造物からのコアの促進膨張試験を合理的に行えるようになる可能性もある。

(4) RILEM TC AAA

TC AAA では、材料面からの検討を行い、1988 年から続いてきた活動の延長ともいえるが、検討課題は絞り込まれている。3 つの WP から構成される。

WP1: 室内促進試験

WP2: 室内試験と暴露試験の比較

WP3: 骨材からのアルカリ溶出と外来アルカリを含むアルカリ収支の推定

WP1 では、RILEM AAR-4 (アルカリ量 5.5kg/m^3 、 60°C で養生) をコンクリートの性能試験として用いることを考えている。基本配 (調) 合の設計思想が欧州と日本では相当に異なる (単位水量が日本では $160\text{-}180\text{kg/m}^3$ が標準であるが、欧州では 200kg/m^3 を超えることもあり得る) こともあり、RILEM の手法を単純に日本に適用しにくい。また 4.2 節でも記載してきたように、RILEM AAR-4 はアルカリ溶脱と乾燥が起きえる試験であり、

骨材もしくはコンクリートの反応性評価試験としては現実的かもしれないが、本来の目的である将来予測の手法としては、重大な欠陥となる。高経年化評価技術高度化事業としては、アルカリラッピングの効果を確認し、国際的に情報発信していく必要がある。なお、アルカリ量 5.5kg/m^3 は、日本の現実的なコンクリートの特性から考えると加速条件となるが、欧州においては、現実的に起きえる最大アルカリ量とされている。つまり、ある骨材組合せが、極めてアルカリ濃度の高いセメントに組み合わせられて使用された場合を想定した試験と欧州ではとらえられている。この配（調）合を温度を高めて膨張促進している。

室内試験は現場経験との対応が取れて初めて、有害と判定する基準値を設定できる。したがって、室内試験は暴露試験とセットで行われるべきものである。この観点から、TC AAA でも多様な環境で暴露試験が計画されている。寒冷地と熱帯地域を含む複数の機関が参加する。

WP3 のアルカリ溶出は、骨材からアルカリが溶け出してきたり、外環境からアルカリが供給されたりする状況を考え、その効果を明確にしようとするものである。原子力施設においては外来アルカリの影響下にある部材はほとんどないと考えられるが、骨材からのアルカリ溶出は常にリスクがある。弱風化した安山岩中の粘土鉱物、火山ガラスなどが反応すると、相当量のアルカリが溶出する可能性はある。遅延膨張性骨材の場合、粘土鉱物などが含有されるとアルカリと Ca のイオン交換反応により、アルカリが増加し、コンクリート中の当初のアルカリ量が少ない場合も、長期的にはアルカリ量が倍増する状況も生じ、これが長期的な遅延性膨張の一因となる場合があると考えられている。

4.4.4 まとめ

(1) ASRに関する部材の健全性評価

現状、ASRに対する健全性評価の策定に際し、大きな障壁となっているのは、将来の劣化予測が困難な点、すなわち、ASRの現在の進行度合を評価する手法が存在しないこと、ASRの終局膨張量を推定精度が低いことである。

以上の不足点を補うため、国内外で運用されている構造物のASR診断・健全性評価フローを精査し、このJNESフローを原子力発電施設の部材の健全性評価フローへ応用するために必要な5つの技術的課題を抽出した。

- ① ひび割れ等、変状の検出に必要な基準値
- ② 既存記録の調査による対象部材の要求性能の確認
- ③ 現地モニタリング手法の確立
- ④ 残存膨張挙動予測の精度向上
- ⑤ ASR膨張による機械的特性の変化の把握

上記の技術的課題の概要と、課題を解消するために今後実施すべき項目を以下に記す。

①ひび割れ等、変状の検出に必要な基準値

国内外の多くのASR診断・健全性評価フローでは、当該構造物のひび割れ性状の調査を行い、ひび割れ指数やひび割れ総延長などの指標をASR可能性の判断基準としている。原子力発電施設においても、ASRが疑われるひび割れを何らかの基準に従って判別する必要があると考えられる。

— 今後実施すべき項目 —

文献調査によって原子力発電施設に適した評価基準を選定する。

②既存記録の調査による対象部材の要求性能の確認

ASRによる部材の性能劣化を評価するにあたり、ASRが疑われる箇所を含む部材の要求機能を整理し、要求機能を満たすために必要な所定の性能（使用性、構造安全性、遮蔽性）を示す必要がある。

また、性能を満たすために必要な条件（ひび割れ幅、たわみ等）に関しては、「原子力発電施設における建築物の維持管理指針・同解説」の付録に詳しいが、ASRによって生じるひび割れは、他の要因のひび割れと形状が異なることが考えられるため、他の要因と同一の判定基準でよいかどうかの判断も併せて必要となる。

— 今後実施すべき項目 —

建築学会の指針では、性能を満たすために必要な条件としてひび割れ幅が使用されており、使用性（屋内：1mm以下、屋外：0.8mm以下）、水密性（0.2mm以下）といった評価基準が設けられている。

一方で、ASRは拘束条件下では膨張があまり進展せず、表層部分にひび割れが集中する可能性を有する現象であるため、表層のひび割れ幅を評価基準とした場合、部材の性能を過小評価する場合が考えられる。原子力発電施設のコンクリート構造物のように、大断面を有し、かぶりが大きいコンクリートにおいても上記の評価基準が適切であるか否かに関しては、ひび割れ深さの把握も含め、実験的、解析的に確認する必要がある。

③現地モニタリング手法の確立

現地モニタリングによる当該部材の変形計測や、ひび割れ幅の変動に関しては、橋梁などの構造物で実績があるが、原子力発電施設については、伊方発電所第1号機のテーブルデッキ部分で実施した例のみである。

原子力発電施設のコンクリート構造物のように、部材厚が一定以上あるものであれば、部材内部の温度勾配、水分勾配、アルカリ濃度勾配が生じる可能性を考えることができ、部材内部にASR膨張分布が生じることも考えられる

以上より、原子力発電施設に適したモニタリング手法を確立することが必要と考えられる。

— 今後実施すべき項目 —

伊方発電所第1号機の事例では、テーブルデッキの端部から端部（標点間距離50m）の変形を計測している。これは、ASRのようなひずみ変化が分布をもつ現象に対して効果的である。ただし、現地の場所によっては、計測器具を取り付けることができない場合も考えられるため、部材の変形を取得することが可能な、最低限の評点間距離については明らかにする必要がある。

そのためには、例えば熱分布、湿度分布、アルカリ濃度分布等を有する比較的大型の試験体を作製し、ASR膨張に分布がある場合の全体の変形挙動と、各所のひずみ分布を取得することが必要である。

④残存膨張挙動予測の精度向上

ASRが疑われる事例が発生した場合に、ASRの現在の進行程度を知り、今後の進行を予測することは将来の健全性を評価するうえで極めて重要である。従来の方法、例えば飽和NaCl溶液浸漬法（通称：デンマーク法）や80°Cの1N-NaOH溶液浸漬法（通称：カナダ法）は、膨張のポテンシャルを把握することはできるが、当該環境下での膨張予測には直接適用できないため、汎用性の高い膨張予測モデルが求められる。

本報告書では、国内外の既存のASR膨張モデルを調査し、海外の構造物で実際に採用されたASR膨張による応力解析に使用されている2つのASR膨張モデルの概要を取り上

げ、上記 ASR 膨張モデルが国内骨材による ASR 膨張へ適用できる可能性を検討した。検討の結果、十分な実験値がある場合には、精度良くフィッティングが可能である一方、データ数が少ない場合や、膨張が進行中の場合に、**エラー！参照元が見つかりません**。のように、終局膨張ひずみ量を過大に評価する可能性があることが分かった。

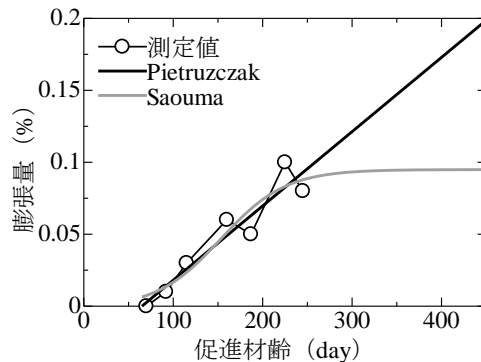


図 4.4.1- 1 フィッティング結果の一例（再掲）

このことから、従来の ASR 膨張モデルを補完する終局膨張ひずみの予測手法の確立が喫緊の課題であるといえる。すなわち ASR 膨張のポテンシャルは、骨材の性質、アルカリ量、調合により決まるが、それぞれの終局膨張ひずみへの依存性を普遍化し現実の膨張予測に適用することが求められる。

更に、原子力発電施設特有の課題として、高温にさらされる部材に対応する、終局膨張ひずみの温度依存性も作用機構を理解しておく必要がある。上記の膨張ポテンシャルを把握した上で、コンクリート部材の温度勾配、水分勾配、アルカリ濃度勾配を計算により算定し、情報を複合することで適切な ASR 膨張予測が可能となると考えられる。

— 今後実施すべき項目 —

多様な条件におけるコンクリートプリズム試験（CPT）により、膨張ポテンシャルに及ぼしうる影響因子を把握し、各因子の影響度合いを定量的に把握する必要がある。因子としては例えば、温度、湿度、アルカリ量が挙げられる。その上で、使用されている骨材の反応性を岩石学的診断によって把握し、既存の ASR 膨張モデルと組み合わせるなどの手法で将来の膨張挙動の予測制度を向上させる必要がある。なお、4.2 節で実施した CPT は、一部、温度およびアルカリ総量をパラメータとしており、ASR 膨張モデルの検証に使用することができる。

これらの検証には、膨張ポテンシャルが既知であるコンクリートを使用して、暴露試験体を作製し、ある時期においてコアを採取し、促進膨張試験等にかけることによって、コア採取時の膨張量および残存膨張挙動と膨張ポテンシャルの関係を把握することが必要である。この際、促進膨張試験の一つである JCI-DD2 は、乾燥とアルカリ溶脱の影

響が指摘されており、適切なアルカリ溶液で濡らした紙で巻いて(アルカリラッピング)養生するなどの方法を検討すべきである。

⑤ASR 膨張による機械的特性の変化の把握

ASR によって圧縮強度や静弾性係数といった機械的特性が低下することは良く知られている。通常の診断では支持機能が健全であることを保障する必要から、採取コアを強度試験に供することによって現状の機械的特性を把握することが求められる。しかしながら、コア採取は、1) 採取場所に限りがある、2) 躯体を傷つけるといったデメリットも存在するため、将来の健全性評価に際しては、コア採取による直接的な方法以外の選択肢が求められる。

一つは、非破壊試験等で機械的特性を取得する方法である。非破壊試験であれば、躯体を傷つけるデメリットを避けることができる。伊方発電所第1号機の事例では、非破壊試験として、弾性波速度試験による弾性係数の取得、振動測定による固有周期の取得、リバウンドハンマーによる推定強度の取得といった方法が実施された経験がある。その他、道路・橋梁等で使用実績が多い非破壊試験として、超音波伝播速度試験があり、超音波伝播速度はASR膨張によってエラー! 参照元が見つかりません。(再掲)のように低下することが分かっている。

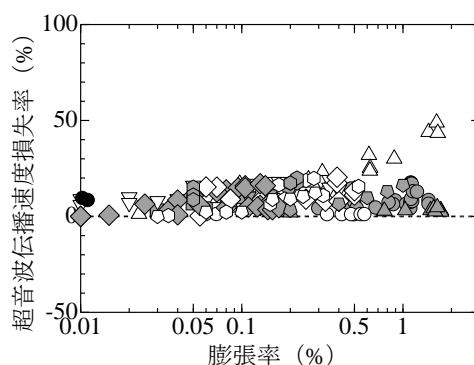


図 4.4.1-2 超音波伝播速度と膨張率の関係 (再掲)

一方で、コンクリートが鉄筋によって拘束されている場合(図中灰色)には、超音波伝播速度が鉄筋の影響を受け低下傾向を示さないこともある。また、超音波伝播速度は多くの場合透過法で使用されるが、原子力発電施設には透過法が適さない場所も多く、原子力発電施設の適用には更なる知見の収集が必要である。

現在のところ、原子力発電施設に対して決定的な非破壊試験は提案されていないが、適正を有する各種非破壊試験を把握しておくことは、将来の健全性を担保していく手法として有用であるため、継続した調査が必要である。

機械的特性の変化を把握するもう一つの手法としては、機械的特性変化のモデル化が挙げられる。ASR膨張の進展との機械的特性のモデルを高精度化する事が可能となれば、

現地モニタリング等の情報と組み合わせて、非破壊で機械的特性を推定することが可能になり、部材の性能を評価する上で重要な情報を得ることができる。

また、④で挙げた ASR 膨張予測モデルと併せることで、将来の部材健全性評価を解析的に行うことが可能となる。

— 今後実施すべき項目 —

非破壊試験に関しては、透過法など現地に適用することが難しい方法が多いことから、表面法や振動特性計測など、現地で適用可能な非破壊試験方法について検討を行う必要がある。例えば、ひび割れ深さや表層のひび割れ密度と平均的な機械的特性の関係性を把握するなどの方法が考えられる。また、ASR 膨張量と機械的特性の関係から、機械的特性の下限值が推定できれば部材の健全性評価に有用である。

(2) ASR 膨張を評価するための基礎情報

原子力施設における ASR に関する総合的な健全性評価フローの策定に際し、現状の技術的課題を抽出することを目的として、図 4.1-2 の想定されるコンクリート部材の健全性評価フローの各ステップにおいて求められる予備実験および既往の文献調査を実施した。

その結果、得られた成果と健全性評価への貢献について以下にまとめる。

まず、コンクリート試験体の薄片観察からは、骨材の急速膨張性と遅延膨張性の反応性の違いによって ASR の進行状況が異なることが確認された。このことから、健全性評価を行う上で、使用骨材の急速・遅延膨張性の判定を行うことが重要であるといえる。

次に、CPT 試験における促進温度環境が ASR 膨張量および細孔溶液に及ぼす影響に関する文献調査からは、促進温度環境によって ASR 膨張量の収束値が異なること、細孔溶液中のアルカリ濃度が異なることが確認された。このことから、健全性評価を行う上で、膨張量の温度依存性について、薄片観察および細孔溶液のアルカリ濃度を併せて測定することで、ASR ゲル生成量およびゲルの析出位置の観点から原因を明らかにする必要がある。これは、健全性評価のための CPT 試験だけに限らず、部材の温度・湿度環境による膨張量の違いを予測する上でも必要な情報といえる。

非線形超音波応答を用いた非破壊試験に関する文献調査からは、出力波のエネルギーを利用した非線形超音波応答の分析手法は、入力波の振幅に依存しないこと、必ずしも健全時の測定結果を必要としないことから、ASR によるひび割れ診断の非破壊測定として利用できる可能性が示唆された。しかし、現在報告されている実験は、透過法による測定であることから非破壊検査としての実用化をするためには、反射法による測定での検証が必要といえる。

既存原子力発電所のコンクリートに使用された骨材産地の地質に関する文献調査からは、既存原子力発電所のコンクリートに使用されている骨材中に含まれている可能性のある反応性鉱物をまとめた。これは、健全性評価を行う上で、急速・遅延膨張性の反応性に則した評価フローの枠組を構築することや、材料特性、コンクリートの調合、環境条件から ASR

膨張量の数値解析による予測を行う上で重要といえる。

上記の結果を統合すると、ASR の岩石学的診断手法を用いて原子力発電所関連施設のコンクリート構造物の健全性評価システムを確立するためには、前段階として促進温度環境を変えた CPT 試験体の薄片観察及び細孔溶液の測定を行い、ASR によるひび割れの進展やアルカリ濃度の変化について物理化学的観点から考察を行い、促進温度環境による ASR 膨張量の収束値の差異の原因を明らかにした上で、CPT 加速試験を ASR 膨張量の予測・評価の枠組に盛り込む検討および高温環境下にさらされている部材の ASR 膨張量の予測・評価の検討をしていく必要があることが示された。

(3) ASR の高経年化対策に関する国際動向

国際会議 ICAAR、RILEM TC ISR、RILEM TC AAA や、遅延エトリンナイト生成 DEF に関する動向概要を整理した。

4.5 まとめ

本節では、全体のまとめとして、得られた成果、今後得られる成果の見通し、今後必要な研究の三つに分けて説明する。

(1) ASR ポテンシャル評価の検討

骨材の反応性評価としての検討を行った。

まず、ASR ポテンシャル評価を行うために必要な急速膨張性と遅延膨張性の骨材をそれぞれ 2 種類及び 3 種類を入手し、岩石学的評価で特徴を明確にした。この研究により、標準的な骨材調査の手法を例示できた。

次に、化学法で無害であっても、国際的には標準試験として多用されている促進モルタルバー法 (ASTM C1260) では有害となる骨材の存在を実証した。海外同様、CPT により最終的な判断を行う。この研究により、国内の標準的な手法では十分に遅延膨張性骨材の反応性を評価できないことが明らかとなった。

今後必要な実施事項として以下のものがある。

- ・骨材の産出場所のばらつきを理解したサンプリング (4.2.1(2))
- ・骨材の岩石学的評価による反応性タイプの理解 (4.4.2(4))
- ・コンクリート調合試験としての CPT による ASR リスクの評価
- ・最適な CPT 条件の結果に基づく長期的 ASR 膨張予測の試験により、最適条件が設定できる。
- ・必要な抑制対策の設計と CPT による検証

将来的には、さらに、以下が求められる。

- ・施設の部材ごとの環境条件と要求性能の明確化 (4.3)
- ・部材に応じた抑制対策の設計 (CSA A23.2-27A では一部考慮されている)

(2) 高経年化対策

- ・CPT の最適化 (4.2.3) を応用したコアの促進膨張試験の設計
- ・CPT の岩石学的反応解析に裏付けられた劣化度の推定 (予備検討として 4.4.2(1))
- ・各機関での ASR に高経年化対策の情報収集 (4.3.1)
- ・コアの促進膨張試験結果からの将来予測手法の整理 (4.4.1)
- ・モニタリングと非破壊検査の手法の調査 (4.4.1、4.4.2(3))
- ・ASR 劣化対応事例の調査 (4.3.2)

(3) 今後の課題

- ・国内外の骨材試験方法の比較により、国内の手法では無害であっても、国際的手法で

は有害判定となる骨材の存在が明確化する。

- CPT の整備により、アルカリ溶脱を排除し、ASR 膨張のアルカリ濃度と温度依存性が明確化する。
- 膨張の詳細解析により、アルカリ濃度と温度依存性の原因が解明でき、膨張予測のモデル化できることを実証する。
- CPT の最適化条件を、コンクリートコアの促進膨張試験に適用し、ASR 診断時における将来予測が可能であることを実証する。
- ASR に関わる健全性評価に必要なモニタリングや NDT の手法と有効性の情報をまとめる。
- ASR に対する高経年化対策の全体像構築のための情報提供を行う。

(4) 今後必要な研究

本項では、高経年化技術評価の高度化を念頭に、総合的な ASR 評価システムの適用性及び有効性を確認するために、今後必要な研究を提案する。まず、4.3.1 で示したように ASR 診断にとどまらず、対策・維持管理までを考えた ASR 評価システムの全体像を、原子力施設に適用することを前提に再構築する必要がある。JNES レポートに示された ASR 診断だけでは、将来の健全性評価には不足である。

ASR 評価システム全体の構築は今後の課題として、当面の個別の技術的課題をまとめる。既設のコンクリート構造物に対し有効な総合的な ASR 評価システムの確立には、既存の手法を組み合わせ応用することになるが、ASR 診断方法として、

- 1) 新設時の骨材試験方法が有効であることを示す根拠となるデータ、
- 2) ASR が発生したコンクリートの残存膨張ポテンシャルの評価
- 3) ASR による部材性能の経年変化

を把握することが必要不可欠である。これらのために必要な研究の枠組みを図 4.5-1 に示す。

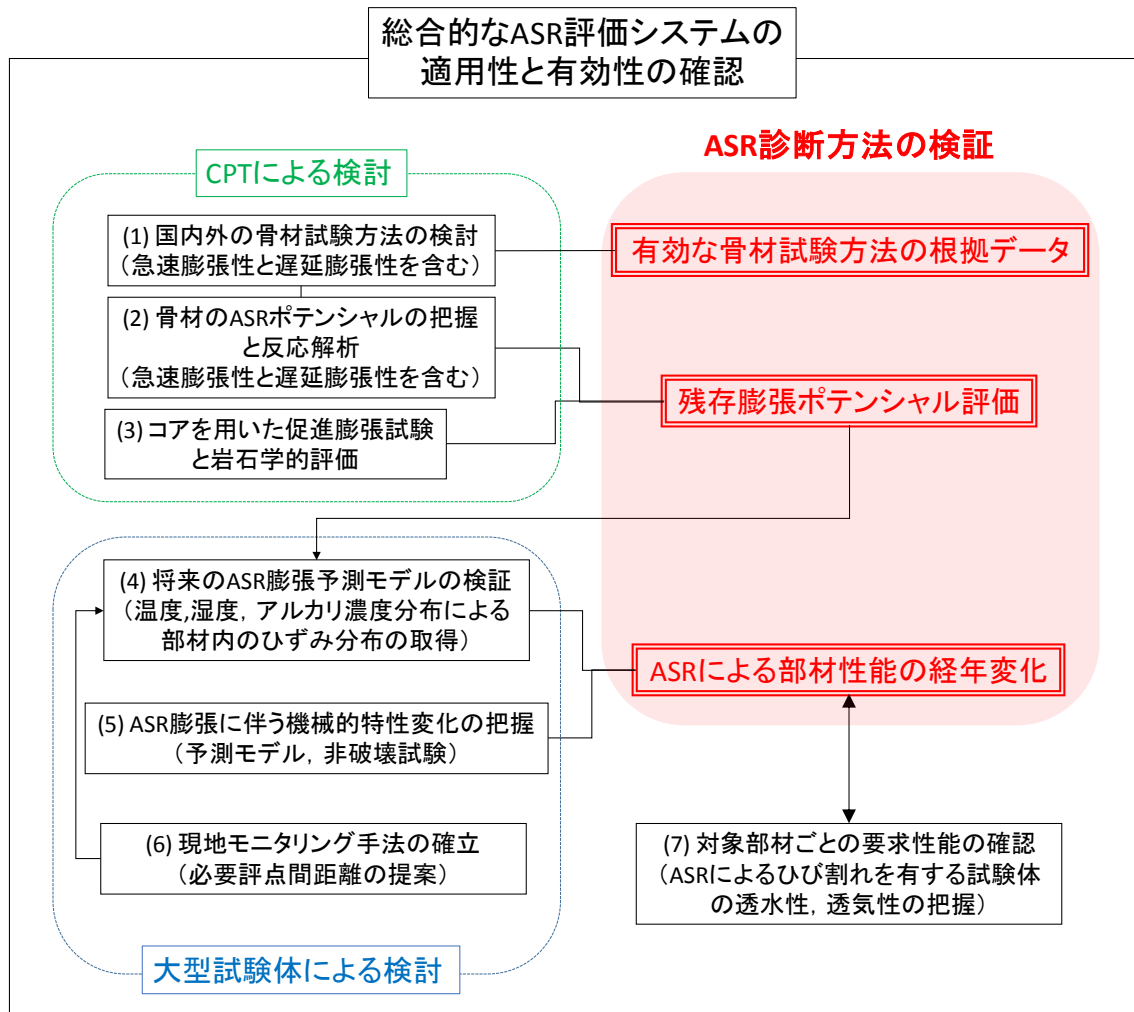


図 4.5-1 今後必要な研究の枠組み

これらの3項目と合わせて、別途、部材ごとの要求性能の確認を行う必要もある。さらにこれらの3項目を実現するための検討課題をより具体的に説明する。大きく分類すると検討は、CPTにより行うものと一定の大きさを有する大型の暴露試験体によるものから構成される。ここでいう一定の大きさとは、アルカリ溶脱の影響を避ける目的の暴露試験体ならば、一辺40cm以上の角柱、コアを複数取得する目的ならば一辺50cm～1m程度、大断面を想定するなら1.5～3m程度のようなイメージである。

(1) 国内外の骨材試験方法の検討

平成26年度に開始した試験の結果を解析し、急速膨張性および遅延膨張性骨材双方に有効な骨材試験方法を提示する。

(2) 残存膨張ポテンシャル評価と反応解析

現状、ASRの進行度および将来の膨張挙動を適切に予測することは困難であるが、コンクリート部材の将来の健全性評価を行うためには、将来の膨張挙動の予測精度を高めるこ

とが重要である。従来の方法、例えば飽和 NaCl 溶液浸漬法（通称：デンマーク法）や 80°C の 1N-NaOH 溶液浸漬法（通称：カナダ法）は、膨張のポテンシャルを把握することはできるが、当該環境下での膨張予測には直接適用ができないため、汎用性の高い膨張予測モデルが求められる。

現在提案されている ASR 膨張予測モデルとしては、マイクロスケールのもものとマクロスケールのものであり、構造物の健全性評価にはマクロスケールのモデルが採用されている。これは、材料試験や現地モニタリングの結果を使用してフィッティングによって将来の挙動を外挿するものであり、十分な実験値がある場合には、精度良くフィッティングが可能である。一方で、データ数が少ない場合や、膨張が進行中の場合には終局膨張ひずみ量を誤って推定する可能性が高く、このことから、従来の ASR 膨張モデルや、現地モニタリングの結果を適切に将来予測に使用するためには、終局膨張ひずみの予測手法の確立が喫緊の課題であるといえる。

このとき、原子力施設特有の課題として、大断面部材ゆえに生じる、湿度分布、アルカリ濃度分布、および高温にさらされる部材における温度分布などの、部材内の環境条件の相違が挙げられる。このような多様な条件の中で、終局膨張ひずみを予測するためには、膨張ポテンシャルに及ぼしうる環境因子を把握し、各因子の影響度合いを定量的に把握することが重要である。

そのため、4.2 節では、日本国内の代表的な急速膨張性骨材と遅延膨張性骨材の各 1 種類については、試験条件（温度、アルカリ総量）をパラメータとして影響を調査することを開始した。環境条件を変えたこの試験によって、膨張ポテンシャルに及ぼしうる環境因子のうち、温度の影響、アルカリ総量の影響を把握することができる。また、各条件で試験を行った後の試験体を用いて、薄片観察による組織解析を行うことで、未だ十分に解明されていない、ASR 膨張の作用機構の点から膨張ポテンシャルについて考察を加える。および ASR 抑制効果があるとされる混和材が膨張ポテンシャルに及ぼす影響についても試験および組織解析等の分析を実施する必要がある。

(3) コアを用いた促進膨張試験と岩石学的評価

次に、膨張ポテンシャルに影響を及ぼす環境因子が整理されたとすると、促進膨張試験を理想的な状況で実施することが可能となる。このことによって、現状の JCI-DD2 のように、乾燥やアルカリ溶脱に影響される可能性が低い残存膨張量試験を実施することが可能となる。これらの検証には、膨張ポテンシャルが既知であるコンクリートを使用して、暴露試験体を作製し、ある時期においてコアを採取し、促進膨張試験等にかけることによって、コア採取時の膨張量および残存膨張量と膨張ポテンシャルの関係を把握することが必要である。この暴露試験体は次に述べる大型試験体を利用可能と考える。

(4) 将来の ASR 膨張予測モデルの検証

また、実際の原子力施設や、上記の暴露試験体には、環境条件によって温度分布、湿度分布、アルカリ濃度分布が生じていると考えられるが、これらは既往の解析モデルによっ

て再現することが可能であるため、環境条件と ASR 膨張の関係が既知であれば、部材全体の膨張挙動を解析によって検証することができる。なお、本解析については、一定の大きさを有する大型試験体による検討、および後述の機械的特性の変化に関するモデルの高度化も必要となる。また、ASR 膨張に及ぼす湿度の影響の定量化も必要である。

(5) ASR 膨張に伴う機械的特性の変化の把握

ASR によって圧縮強度や静弾性係数といった機械的特性が低下することは良く知られている。通常の診断では支持機能が健全であることを保障する必要から、採取コアを強度試験に供することによって現状の機械的特性を把握することが求められる。

しかしながら、コア採取は、1) 採取場所に限りがある、2) 躯体を傷つけるといったデメリットも存在するため、将来の健全性評価に際しては、コア採取による直接的な方法以外の選択肢が求められる。

選択肢の一つとして、現地コンクリート構造物の機械的特性を非破壊試験等で取得する方法がある。非破壊試験であれば、躯体を傷つけるデメリットを避けることができる。伊方発電所第 1 号機の事例では、非破壊試験として、弾性波速度試験による弾性係数の取得、振動測定による固有周期の取得、リバウンドハンマーによる推定強度の取得といった方法が実施された経験があり、そのほかに道路・橋梁等で使用実績が多い超音波伝播速度試験も有力な手法である。一方で、いずれの手法についても、透過法が適用できない場所など、実際の原子力施設の適用には課題が残されている。

また、部材の表面のみから実施可能な非破壊試験としては、表面法によってひび割れ深さを推定する手法がある。ひび割れ深さと目視によって得られるひび割れ密度等の指標によって内部の機械的特性を推定することができれば有意義である。

機械的特性の変化を把握するもう一つの手法としては、機械的特性変化のモデル化が挙げられる。ASR 膨張の進展との機械的特性のモデルを高精度化することが可能となれば、現地モニタリング等の情報と組み合わせて、非破壊で機械的特性を推定することが可能になり、部材の性能を評価する上で重要な情報を得ることができる。4.4.1 で実施した文献調査によると、ASR 膨張と機械的特性の関係は、相関は見られるもののばらつきが大きい。現状考えられる方法としては、ばらつきの範囲で複数パターンの解析を実施し、実際の現地モニタリングや非破壊試験の結果を随時反映させることで解析の精度を向上することであり、これらの検証についても大型の試験体を用いることができる。

(6) 現地モニタリング手法の確立に関する研究

ASR は環境条件によって、膨張の程度が異なるため、原子力施設のような大断面部材では多く場合ひずみ分布が生じていると推測できる。このような背景のもと、伊方発電所第 1 号機の事例では、現地モニタリングとして、テーブルデッキの端部から端部（標点間距離 50m）の変形を計測している。これは、構造物全体の変形挙動を把握するためには効果的な手法である。ただし、原子力施設によっては、計測器具を取り付けることができない

場合も考えられるため、部材の変形を取得することが可能な、最低限の評点間距離については明らかにする必要がある。

そのためには、例えば熱分布、湿度分布、アルカリ濃度分布等を有する比較的大型の試験体を作製し、ASR 膨張に分布がある場合の全体の変形挙動と、各所のひずみ分布を取得することが必要である。なお、このような ASR 膨張に分布をもつ大型の試験体は、後述する非破壊試験や、採取コアの促進膨張試験の検証実験についても利用が可能である。

(7) 対象部材ごとの要求性能の確認

建築学会の指針では、性能を満たすために必要な条件としてひび割れ幅が使用されており、使用性（屋内：1mm 以下、屋外：0.8mm 以下）、水密性（0.2mm 以下）といった評価基準が設けられている。

一方で、ASR は拘束条件下では膨張があまり進展しないため、表層部分にひび割れが集中する可能性を有する現象であり、原子力施設のコンクリート構造物のように大断面を有しかぶりが大きいコンクリートにおいては、表層部と内部でひび割れ性状に大きな差異が生じる可能性がある。このとき、要求性能の評価基準として表層のひび割れ幅を用いた場合、部材の性能を過小評価する場合は考えられる。上記の評価基準が適切であるか否かに関しては、ASR によって生じたひび割れに分布がある状態のモデル試験体等を用いて、実際の透水性、透気性を確認する必要がある。

5. 事業進捗の管理と成果総括に係る活動の実施

5.1 実施履歴

表 5-1 に、事業進捗の管理と成果総括に係る活動の履歴を示す。

表 5-1 事業進捗の管理と成果総括に係る活動履歴

作業項目	平成26年度							
	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1. ASR研究会 照射効果研究会		9/19		11/21		1/14 1/14		
2. 報告会		9/24,26		11/26, 12/5		1/23, 27	2/9,18	
3. 第三者有識者委員会				11/26, 12/5		1/23, 27	2/9,18	
4. 報告書取り纏め等						1/26 経費 中間検査		3/16 ▲
規制庁殿との打合せ 月報提出		△	△	△	△	△	△	△

5.2 報告会

(1) 第1回

今年度実施計画を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：研究成果がどのようにプラント毎の審査に反映されるかが重要となるため、審査における技術的観点を考慮して、研究遂行及び成果の取りまとめを行うこと。

- ・ 2014年9月24日（水） 13:30～14:35 ワーカーズ倶楽部赤坂会議室
照射劣化 出席者7名
- ・ 2014年9月26日（金） 10:00～11:45 弊社 CR-DE 会議室
複合劣化 ASR 出席者14名

(2) 第2回

第一回中間進捗状況を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：評価フローは入力条件や前提条件を明確にして、実験や解析もミクロな評価に偏らず、評価フロー全体の形を意識しながら検討することが重要である。また、データや評価式の根拠や、パラメータを決定するプロセスを整理する。

- ・ 2014年11月26日（水） 10:00～11:40 弊社 CR-B 会議室

照射劣化 出席者 10 名

- ・ 2014 年 12 月 5 日（金） 13:00～15:20 弊社 CR-F 会議室

複合劣化、ASR 出席者 17 名

(3) 第 3 回

第二回中間進捗状況を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：本事業は、事業者が行う評価手法を構築するのではなく、事業者が評価したものを規制側が審査するための根拠や手法を構築することが目的となる。

- ・ 2015 年 1 月 23 日（金） 9:30～11:45 TKP 赤坂駅カンファレンスセンター ・ ミーティングルーム 13A 照射劣化 出席者 9 名

- ・ 2015 年 1 月 27 日（火） 16:00～19:10TKP 虎ノ門ビジネスセンター ・ カンファレンスルーム 3A

複合劣化、ASR 出席者 13 名

(4) 第 4 回

最終成果を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：長期健全性評価をどう実施するかが最終目的であることを意識して、成果や課題を取りまとめてほしい。

- ・ 2015 年 2 月 9 日（月） 13:30～15:30 弊社 CR-B 会議室

複合劣化 11 名

- ・ 2015 年 2 月 18 日（水） 9:50～11:40 TKP 虎ノ門ビジネスセンター カンファレンスルーム 3C ASR あ

- ・ 2015 年 2 月 18 日（水） 16:30～18:35 TKP 虎ノ門ビジネスセンター カンファレンスルーム 3C 照射劣化 出席者 12 名

5.3 第三者有識者委員会

(2) 第 1 回

第一回中間進捗内容に関する意見を聴取した。

要点：原子力で標準的に使用されているデータ等を考慮し、実環境に近い条件での試験が必要である。

- ・ 2014 年 11 月 26 日（水） 12:00～12:40 弊社 MR-C 会議室

照射劣化 出席者 8 名

- ・ 2014 年 12 月 5 日（金） 15:30～16:30 弊社 CR-F 会議室

複合劣化、ASR 出席者 15 名

(3) 第 2 回

第二回中間進捗内容に関する意見を聴取した。

要点：今後、研究成果が引用されることを想定し、試験の前提条件等を明記しておくべきである。

- ・2015年1月23日（金） 12:00～12:50 TKP 赤坂駅カンファレンスセンター ・ ミーティングルーム 13A 照射劣化 出席者7名
- ・2015年1月27日（火） 16:00～19:10 TKP 虎ノ門ビジネスセンター ・ カンファレンスルーム 3A 複合劣化、ASR 出席者13名

(4)第3回

最終成果内容に関する意見を聴取した。

- ・2015年2月9日（月） 13:30～15:30 弊社 CR-B 会議室 複合劣化
- ・2015年2月18日（水） 9:50～11:40 TKP 虎ノ門ビジネスセンター カンファレンスルーム 3C ASR
- ・2015年2月18日（水） 16:30～18:35 TKP 虎ノ門ビジネスセンター カンファレンスルーム 3C 照射劣化

委員は、非原子力分野の専門でかつ本テーマに関係する技術に造詣が深い、第三者の立場の有識者から選任した。

建築関係社団法人・技術顧問、東京工業大学・名誉教授、北海道大学・名誉教授、東京大学・教授、京都大学・教授、東北大学・教授の6名で構成され、テーマにより分担した。

5.4 研究会

(1)ASR 研究会

9/19、11/21、1/14 に開催し、報告会に向けた意見交換や技術情報の共有、研究の進め方の検討等を行った。

研究会は、国研（主査）、大学、国研、民間（委員）の7名で、本事業関係者を中心に構成される。

(2)照射効果研究会

1/14 に開催し、報告会に向けた意見交換を行った。

研究会は、大学（主査）、大学（委員）、民間の6名で構成される。

5.5 定例報告

規制庁殿との打合せや月報提出も、予定通り定期的に行った。打合せは、4回の報告会以外に10/30、12/26、3/2、3/6に行い、月報は翌月の初旬に毎月提出した。

5.6 国際会議への参加

本事業での成果発信等、事業実施期間中に研究代表者等が参加した主な国際会議を以下に示す。

(1) 複合劣化

ICCR : International Conference on Concrete Repair (コンクリートの補修に関する国際会議) 英国 9 月

①腐食劣化した鉄筋の強度低下に関する研究、②コンクリート中の鉄筋腐食の評価に関する研究に関するを発表するとともに、現地で海外の研究者から広く意見を聞き、コンクリートのひび割れ発生メカニズム等に係る研究成果に活用。

DBMC : Durability of Building Materials and Components (建築材料の耐久性に関する国際会議) ブラジル 9 月

複合劣化による鉄筋腐食等に係る研究成果を発表するとともに、現地で海外の研究者から広く意見を聞き、関連する経年劣化評価手法の高精度化に活用。

(2) 照射劣化

ICIE : International Irradiated Concrete Information Exchange Framework (照射影響国際知見交換会)、会議組織 : ICIC : International Committee on Irradiated Concrete ノルウェー 10 月

米国や欧州の規制機関や研究機関が参画する照射劣化に関する国際的な知見を交換する定例会合で、得られた情報を成果に活用。

(3) ASR

RILEM TC AAA : Avoiding Alkali Aggregate (国際材料構造試験研究機関・専門家連合) ノルウェー 10 月

アルカリ骨材反応(ASR)を評価するコンクリートプリズム試験 CPT の詳細方法について国際情報を収集し、成果に活用。

6. 結論

6.1 コンクリート構造物の複合劣化評価

- (1) 中性化、塩害、雰囲気環境に関する複合劣化を受けた場合での部材の曲げ耐力、せん断耐力等に関し、最新の知見および新たな項目を追加して、長期健全性評価の枠組みである劣化ダイアグラム(PDFt 曲線)の高精度化を図った。
- (2) 促進中性化、促進中性化と塩水噴霧、屋外暴露によるコンクリート中の鉄筋腐食期間とコンクリート表面のひび割れ幅の関係を把握した。
- (3) 原子炉建屋などで使用される高強度、太径の鉄筋が腐食した場合の耐力低下について、塩化物を促進作用させた場合の断面減少率について3次元計測により立体的に把握した。
- (4) 横補強筋による補強効果を考慮した付着・定着強度を算出し、原子力施設のRC造建物の長期健全性に対する余裕度の比較評価を可能とした。
- (5) 実際の配筋と環境を再現した促進腐食試を行い、腐食膨張ひび割れは、主に横補強筋に沿って表面に現れ、内部では横補強筋間に腐食生成物が侵入し、かぶりコンクリートが剥離しやすくなることを確認した。

6.2 放射線照射によるコンクリート強度劣化評価

(1) 中性子照射試験

コンクリート試験体(φ4×6cm)について、累積照射量が 0.75×10^{19} 、及び $1.5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ (中性子束は $3.60 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ で一定)に関する照射試験を終え、物理特性について以下の結果が得られた。

- ① 非照射・加熱試験の長さは、試験後の75℃乾燥により若干小さくなっている。一方、 $1.5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ の累積照射試験体では、平均1,500μmm(平均長さ変化率は0.15%)膨張しており、骨材(砕石(凝灰岩)や砂利)の膨張に起因するものと推定される。
- ② 中性子照射環境下では、自由水は分解しやすいが、化学的結合水は非常に分解しにくく、コンクリート材料としての一体性を失うことがないことが確認できた。
- ③ 照射により、圧縮強度が若干小さくなっているようであるが、詳細な傾向を把握するためには、照射中の試験結果を待つ必要がある。
- ④ ヤング係数が3割程度低下している理由として、照射後試験前の75℃加熱による乾燥の影響が考えられるが、中性子照射の影響については明確ではない。
- ⑤ 照射後のコンクリート試験体表面で観察された白色の生成物のSEM-EDS分析を行ったところ、マグネシウムの濃度が高くなっていることを確認した。マグネシウムのソースとしてセメントと骨材が考えられるが、今後、詳細に分析する必要がある。

(2) ガンマ線照射試験

コンクリート試験体(骨材2種類、φ4×6cm)及び骨材試験体(4種類、φ4.5×9cm)について、累積照射量がそれぞれ26,717~107,733kGy、及び27,034~55,027kGy(線量率はそれぞれ2.46~9.91kGy/h、及び10.92~11.15 kGy/h)に関する照射試験を終え、以下

の結果が得られた。

①圧縮強度は、非照射・加熱試験ケースおよび照射試験ケースについては、照射温度、照射期間、累積照射量に伴い緩やかに増加する傾向がみられる。ガンマ線によるコンクリート特性変化の主要因は、温度や放射線分解による水分の逸散と推定されており、ガンマ線自体の影響はないと考えられる。

②一方で、骨材試験体は、骨材の種類により、圧縮強度にばらつきがあった。これは材料の異方性に起因するものと推定される。

(3) 健全性評価に資する数値解析的検討では、照射による影響を考慮する目的でコンクリートの膨張によって生ずるひび割れが考慮可能な数値解析モデルを構築した。また、セメントペーストの長さ変化からモルタルの長さ変化を予測し、骨材とモルタルの体積変化の差異をパラメータとした乾燥・加熱条件下のコンクリートの圧縮強度予測モデルを構築し、実験値を再現した。

(4) 高強度コンクリートの乾燥・加熱による強度変化や、セメントペーストの収縮メカニズムに関わる実験も行った。

6.3 コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する調査研究

(1) 骨材の反応性試験法の検討のために必要な急速膨張性と遅延膨張性の骨材をそれぞれ2種類及び3種類を入手し、岩石学的評価で特徴を明確にした。

(2) 国内で標準的な化学法で無害であっても、国際的な標準試験である促進モルタルバー法 (ASTM C1260) では有害となる遅延膨張性骨材の存在を実証した。海外同様、最終的な判断のためにCPTを開始した。今後、国内の標準的な手法では十分に遅延膨張性骨材の反応性を評価できないことが明らかとなることが期待できる。

(3) アルカリ量、促進温度、アルカリ溶液で湿らせた紙による梱包の有無を要因としたCPTを開始し、長期的ASR膨張予測に最適な条件が今後明らかになると期待できる。

(4) 文献調査からASRへの高経年化対策の全体像構築のために、今後必要な研究事項を明らかにした。岩石学的手法によるASR診断の検証、将来の膨張ポテンシャルと膨張および影響度予測、膨張に伴う部材ごとの性能の経年変化と影響度推定などが必要である。また、暴露試験体による長期的な継続評価により検討の有効性を確認することも重要である。

6.4 事業進捗の管理と成果総括に係る活動の実施

より効果的かつ実効的な研究の推進のため、専門性の高い大学等の研究機関との連携の下、コンクリート構造物の長期健全性評価に係る調査研究を遂行した。連携する複数の研究機関が実施する研究に対して、効率的かつ適切な経費支出の下で実施されていることを含めて適切な管理を行った。また、原子力規制庁殿の出席の下、本事業における各研究の取りまとめ代表者及び研究参画・連携関係者や、適宜、第三者有識者委員が参加する形で、

研究テーマの進捗や方向性の確認、得られたデータの妥当性検討等を行う場としての報告会を設置・運営した。さらに深い検討を行うための個別研究会や個別開催の第三者有識者委員会も併せて設置・運営した。

これら事業管理・総括活動を通じて、平成 26 年度事業は所定の目標を達成し、事業成果を取りまとめた。

謝辞

本研究は、株式会社三菱総合研究所が原子力規制庁より委託を受け、再委託契約の下で、首都大学東京、東京工業大学、名古屋大学、東北大学、広島大学とコンソーシアムを形成して実施したものです。

したがって、本報告書は株式会社三菱総合研究所のクレジットで作成しておりますが、これら再委託先が有するノウハウや知見も含めた研究活動の成果を取りまとめたものです。加えて、専門性の高い知見が必要な研究のとりまとめに際しては、学术界、産業界の方々から構成される個別の委員会や研究会から多大なご協力を賜りました。

あらためて、再委託先の各機関ならびにご協力頂いた関係各所に対し、御礼申し上げます。

平成 27 年 3 月
株式会社三菱総合研究所