

放射能汚染した廃棄物処分におけるコンクリートのアルカリ骨材反応の抑制の意義

山田 一夫^{1*}、大迫 政浩²

¹ 国立研究開発法人 国立環境研究所 福島支部 (〒963-7700 福島県田村郡三春町深作 10-2)

² 国立研究開発法人 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター (〒305-0053 茨城県つくば市小野川 16-2)

Significance of Suppressing Alkali-aggregate Reaction of Concrete for Radioactive Contaminated Wastes Disposal

Kazuo YAMADA^{1*} and Masahiro OSAKO²

¹Fukushima Branch, National Institute for Environmental Studies

(10-2 Fukasaku, Mihar, Fukushima 963-7700, Japan)

²Center for Material Cycles and Waste Management Research, National Institute for Environmental Studies

(16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-0053, Japan)

Summary

A candidate facility of final disposal for relatively highly contaminated wastes with radioactive cesium by the Fukushima-Daiichi nuclear power station accident in the off-site is a closed-type equivalent one made of reinforced concrete specified in the Wastes Disposal and Public Cleansing Act. The concrete used in this closed-type final disposal facility is assumed to have a dimension of 5 m width - 10 m length - 5 m depth with more than 35 cm thickness and to be water-tight. In general, with several reasons such as thermal stress by hydration heat of cement, drying shrinkage of concrete, reinforcing steel corrosion induced by neutralization of concrete or chloride attack from environments, sulfate and salts attack, and alkali-aggregate reaction (AAR), etc., concrete gradually cracks in long-term. Based on the mechanism of cracking by most of these phenomena, it is possible to estimate quantitatively the risk of cracking and to be suppressed by some specific countermeasures to the acceptable level for structures. However, it is difficult to estimate the expansion by AAR quantitatively and the effective duration of time of suppressing countermeasures is unknown. AAR is caused by the reaction between aggregate and alkalis in concrete and the reaction is called as alkali-silica reaction (ASR). The effectiveness of the countermeasures is assumed to be effective for general concrete structures but the effective duration of time is unclear. Moreover, academic research committees have pointed that those traditional countermeasures are not perfect in some cases. In this paper, the background of this imperfectness of present countermeasures specified by JIS is summarized and a new approach to certify the safety of concrete used for disposal facilities from the viewpoint of AAR is introduced.

Key Words: Contaminated wastes, Alkali-aggregate reaction, Concrete, Final disposal facility

1. はじめに

東京電力福島第一発電所事故により環境に放出された放射性セシウム (r-Cs) で比較的高濃度 (例えば、10 万 Bq/kg 超) に汚染されたオフサイトの廃棄物に対して、その最終処分方法の候補に、廃棄物の処理及び清掃に関する法律 (廃掃法) に定める遮断型に相当する処分方法がある。いわゆる放射性物質汚染対処特措法 (特措法) に従い、福島県外の特定

廃棄物の最終処分に環境省は遮断型相当の処分方法を提案している。中間貯蔵施設では可燃物については焼却、減容化し、さらに熱処理により一層の減容化をする。この減容化により発生する r-Cs が濃縮した廃棄物の最終処分は未定であるが、遮断型相当の処分方法も候補となる可能性は考えられる。

ここで、この最終処分場の構造について着目すると、特措

*Corresponding author: TEL: 0247-61-6114, E-mail: yamada.kazuo@nies.go.jp



図1 鉄筋コンクリート製の遮断型構造の処分場の例¹⁾

出典：環境省会議資料

(http://shiteihaiki.env.go.jp/initiatives_other/conference/pdf/conference_02_01.pdf)

法は、廃掃法の技術基準に放射線防護の考え方を加えて制定された経緯があり、最終処分場は廃掃法に準じたものとなっている。構造物のコンクリートに関する主要な要件は、「日本工業規格A1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）により測定した一軸圧縮強度が25 N/mm²以上で、水密性を有する鉄筋コンクリートで造られ、かつ、その厚さが35 cm以上であること又はこれと同等以上の遮断の効力を有すること」である。特措法上は、遮断型処分場であることは明記されておらず、遮断型処分場の区画埋立（50 m²もしくは250 m³等）についても記載されていないが、環境省が提示したイメージ図では、幅5 m奥行き10 m高さ5 mのコンクリートピット(図1¹⁾参照)であり、コンクリートの厚さは1 m程度と考えられる。関連する情報は、国立環境研究所が主催した「汚染廃棄物等最終処分場へのセメント・コンクリート技術適用に関する研究会」が技術資料としてまとめている²⁾。法的背景についてはこの技術資料の第I部において解説されている。

遮断型相当の最終処分場は、遮断の機能が前提となっている。処分施設内部から外環境への物質移動を遮断することが求められる。遮断性能を実現するため、コンクリートに求められる性能として水密性がある。水密性を担保するには当然、有害なひび割れがあってはならない。一般にコンクリートは種々の原因でひび割れる。セメントの発熱による温度応力、乾燥収縮、中性化や塩害による鉄筋の膨張、硫酸塩や塩類によるコンクリートの膨張、アルカリ骨材反応(AAR^{注A)})によるコンクリートの膨張などである。ひび割れリスクは、構造物の許容範囲に抑制する対策が取られ、ひび割れ機構に基づ

き定量予測も可能である場合も多い。

しかし、AARは現状の技術では定量的膨張予測が困難なため、発生防止対策がコンクリートに施される。ただし、この対策は、一般の建設物には経験に基づき十分に有効と考えられているが、その有効期間は分かっていない。たとえば、長期耐久的コンクリートとして100年の供用期間をあげることができるが、最終処分場はより長期間の安全性が前提となっていると考えられる。さらに、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に関する研究委員会をはじめとするいくつかのコンクリート工学会の研究委員会では、それら従来の対策が不完全である場合があることを指摘している⁴⁻⁶⁾。

原子力発電所から発生する放射性廃棄物処分施設にもコンクリートは使用される⁷⁾。そのコンクリートには、AARを発生しないと考える石灰石骨材を使用することが前提となっている。しかし、学術観点から述べればどのような石灰石でもAARを発生しないわけではなく、無害と見なすことができる技術要件の提示が必要である。石灰石が純粋な炭酸CaのみからなるのであればAARの懸念はないが、シリカ成分が一定以上含有される場合にはAARのリスクがある。日本では高純度石灰石が広く流通しているため、石灰石を用いることがAARを回避する対策となりえるが、海外では不純な石灰石であることも多く、極めてAARのリスクが高い場合もある。

本稿では、放射能汚染した廃棄物を鉄筋コンクリート製の遮断型相当の最終処分場で処分することを考え、特にAARの観点から、技術の現状と今後の研究の必要性について解説する。なお、r-Csは物質質量としてはごく微量であり、コンクリートの特性に影響を与えるものではない。AARについては非常に多くの研究がなされてきている。それにもかかわらず、オフサイトの放射能汚染した廃棄物の処分施設コンクリートについて、あえてAARを解説する意義は、少なくとも日本の放射性廃棄物処分場では石灰石がAARを起こさないとみなしていること、多くあるAARの研究や基準類では、抑制対策の有効期間に関する記述がほとんどないことから、AARの最先端研究の立場から、現状の技術の限界と今後の研究課題を示すことにある。

2. アルカリ骨材反応とは

AARについては、いくつかの解説がある^{8,9)}。AARの定量予測の説明の前に、ここではコンクリートという材料、およびAARという現象、および水密性への影響について、図書⁹⁾をもとに説明する。

(1) コンクリートとは

コンクリートとは、骨材(粒度調整した岩石、砂)をセメントで結合させたものである(図2)。セメントの多くはポルトランドセメント、もしくは高炉スラグ微粉末や石炭火力発電所から

A) アルカリ骨材反応(Alkali-aggregate Reaction, AAR)は、主に骨材中のシリカがセメントからもたらされるアルカリと反応し、元の体積よりも大きいアルカリシリカゲルを生成することで、骨材からひび割れが起し、コンクリートに膨張ひび割れをもたらす現象である。反応がアルカリとシリカによるものであるため、アルカリシリカ反応(Alkali-Silica Reaction, ASR)とも呼ばれる。国内では、最近、コンクリート工学の分野ではASRと称されることが多いが、国際的にはAARと称されることも多い³⁾。本稿では、特に反応を意味する場合にはASR、劣化現象としての記述にはAARを用いる。

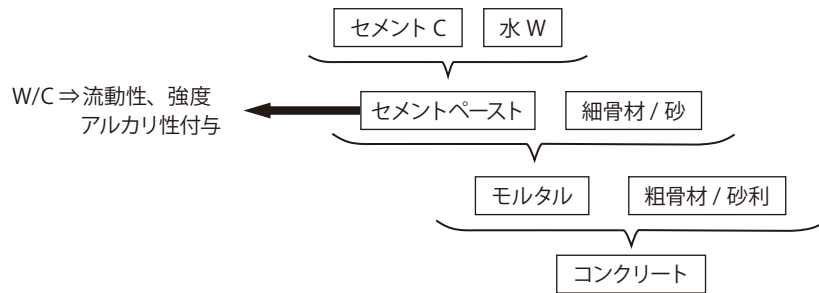


図2 コンクリートの構成材料

発生する石炭灰（フライアッシュ）を混合した混合セメントが用いられる。セメントは水と反応し硬化する性質をもち、その混合物であるセメントペーストがコンクリートに流動性を与え、任意の形状の型枠内に充填することを可能としている。コンクリートが強度を持つのは、セメントの水和反応により生成する珪酸Ca水和物による空隙の充填と骨材の結合による。セメントの硬化後、コンクリートは、安定な骨材、微細な空隙を含むセメント水和物、空隙に残存するアルカリ溶液から構成される。単位体積コンクリート中のセメント質量をC、水の質量をWとすると、経験的にコンクリートの強度はW/C比に依存する。これは、添加した水の一部は空隙として、セメントが水和反応した後も残存するためである。したがって、練混ぜ時の水を少なくすると強度が高まる。ただし、水の量はコンクリートの流動性に関わるため、一定量は必要であるし、W/Cを下げるとセメントペーストの流動性も低下する。

(2) アルカリ骨材反応とは

ポルトランドセメントは水和生成物として水酸化カルシウムを副生成し、0.1 mass% オーダーで含有されるアルカリ金属の溶解もあり、pH=13.0～13.5程度の強アルカリ性を示し、このアルカリ性は、鉄筋コンクリートの鉄筋表面に不動態皮膜を形成し、防食性を与える。一方で、ある種の骨材と反応し、膨張ひび割れを引き起こす場合もある。

骨材として多様な種類の岩石が用いられる。ある種の岩石

にはアルカリと反応しやすい鉱物（反応性鉱物）が含有される。多くの反応性鉱物はシリカ質であるため、アルカリ骨材反応（AAR）は、アルカリシリカ反応（ASR）と称される場合も多い。これらの名称は同じ現象を表すが、コンクリートの素材としての骨材に着目するか、反応の原因物質であるシリカに着目するかの違いである。最近の日本のコンクリート工学では、ASRと称されることが標準とされている。

アルカリ骨材反応は、シリカ（ SiO_2 ）がアルカリおよび水と反応し、珪酸アルカリ水和物という一種の水ガラスを生成する反応である（図3）。この珪酸アルカリ水和物はアルカリシリカゲル、あるいは通称としてASRゲルと称される。反応に必要な水はセメントの水和の消費残分に加え、外部から供給されることもある。ASRに必要な程度の水の移動に対して、通常の強度のコンクリートは十分にポーラスである。この反応により骨材中のシリカの体積が増加する。ASRゲルは高粘度であり、反応初期は骨材内部の空隙を充填していくが、骨材を取り巻くセメントペーストはASRゲルを閉じ込める程度には緻密であり、骨材内部に圧力が蓄積する。この化学反応の圧力は熱力学的計算によると400 MPaと試算され、コンクリートの引張強度の100倍にも達する。したがって、反応に応じた体積膨張は骨材から進展するひび割れとなってコンクリートを膨張させ、結果としてコンクリートに著しい場合には幅数cmに達するようなひび割れを生じさせる。

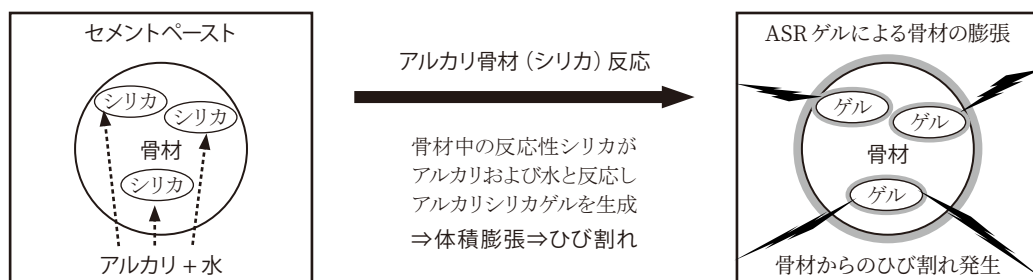


図3 アルカリ骨材（シリカ）反応によるひび割れ発生

(3) 水密性への影響

前項にて著しいひび割れ発生の可能性を指摘したが、このひび割れがどの程度水密性を低下させ、処分施設の遮断機能を損なうかについては明確な答えを示すことはできない。もちろん、有害なひび割れを発生させる膨張を抑制することができれば、AARによる影響を無視しえるが、AARによりコンクリート表面にひび割れが発生したとしても、水密性が損なわれなければ、施設の遮断機能は損なわれない。AARによる膨張でなぜコンクリートにひび割れが生じるのかを考えると、コンクリート全体で不均一な膨張を起こすためと考えられる。AAR劣化した構造物を観察すると、外部には著しいひび割れが認められるものの、内部には開いたひび割れは存在しない場合が多い。つまり、内部がより膨張し、外部は局所的に変形が集中し目に見えるひび割れとなる。内部のひび割れはASRゲルにより充填されている。つまりAARにより表層部分の水密性は著しく低下するが、コンクリート構造物全体としては遮断の機能を保持している可能性はある。ただし、このような状況がどの程度の期間継続するのかについては予測できない。

一方で、一般に、コンクリート構造物を完全な遮水体とすることは困難である。遮断とは、遮水も含むと考えられるので、そもそも遮断の機能を有するコンクリート構造物を建設することは現在の工学レベルでは容易ではない、ということになる。廃掃法制定時は、コンクリート工学において、ようやくコンクリートの耐久性や各種性能には限界があることが学会レベルで認識され始めた時期であり、コンクリートに水密性を求めたことは合理的であったといえる。コンクリートとは、素材の試験を行えば、十分に水密性を示し、遮断の効力を有するのであるが、一定規模以上の構造物とした場合に、必ずしも素材の持つ性能がそのまま発揮されるわけではないという特性を有している。

遮断型相当の処分場建設に関する技術資料²⁾でも提案したが、コンクリート構造物は漏水があることを前提に、その検知と排水機構を検討とする必要がある。遮断型処分場には、異常を検知できる機能が求められるが、AARに関しては、いつ

たん異常が認められた場合には修復が極めて困難であるのは、遮断型処分場に限らず一般コンクリート構造物でも同様である。AARは発生すると進行を止める有効な方法は開発されていない。

したがって、コンクリート構造物に遮水性能を求める場合、AAR抑制対策を行い、かつ、漏水を前提とした対策を講じていくことが求められる。

3. アルカリ骨材反応の抑制方法

AARは反応性骨材、十分なアルカリ濃度、水の3要素がそろって初めて発生する。したがって、これらを排除することが抑制対策となる(図4)。現在の日本での標準的な対応状況を説明する。対策の序列としては、アルカリ量制御として、コンクリート中のアルカリ総量を 3.0 kg/m^3 以下に制御、アルカリ吸収能がある混和材(主には高炉スラグ微粉末、フライアッシュ)の添加、ついで反応性骨材の除外、である。一般に吸水の制御は困難であるため、対策としては用いられない。また、厚さのある部材(例えば1 m)では、もともと保有している水分のみでAARは発生すると考えられており、対策にはならない。これらの方法は、JIS A 5308(レディーミクストコンクリート)に定められているが、JR東日本など、より厳しい基準を独自に制定している場合もある。

(1) 反応性骨材の検出

反応性骨材中の反応性シリカの存在を、アルカリ溶液と高温(80℃)で24時間反応させて調べる化学法と呼ばれる方法がある(JIS A 1145)。骨材に粘土鉱物が含まれている場合、アルカリを吸収する性質があり、AARを抑制する作用もある。そこで、判定は、溶解シリカ量と吸収アルカリ量のバランスで決定する。判定基準は、多くの種類の骨材に次に述べるモルタルバー法で調べた結果に基づく。なお、JIS化学法は、ASTM規格を参考に制定されたが、北米ではこの方法は適切に反応性を評価できないと考えられており、現在ではASTMから削除されている。

モルタルバー法は、骨材を一定粒度に調整し、アルカリを

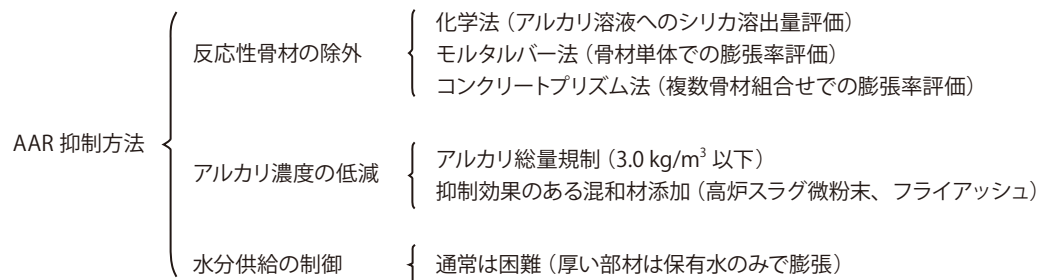


図4 アルカリ骨材(シリカ)反応の抑制方法

加えたモルタルを作製し、40℃環境で半年間促進膨張させる。判定基準は膨張率 0.100% である。化学法よりも長時間を有するため、化学法で無害と判定されなかった場合に用いられることが多い。化学法と矛盾する結果が得られた場合、モルタルパー法が優先される。

AARには、反応性の異なる骨材を組み合わせた場合、ある混合割合で膨張が最大となるペシマム現象と呼ばれる性質があることが分かっている。組み合わせる骨材それぞれがモルタルパー法単独では無害となった場合も、混合利用した場合には著しい劣化を引き起こす場合がある。この現象に対応するには、コンクリート角柱を用いた試験が用いられる。規格としては、建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事に、T603 アルカリ骨材反応試験方法が定められており、原子力発電所施設に用いられるコンクリートは他の建設用コンクリートよりも追加の試験が実施される。この方法は骨材単独の反応性ではなく、組み合わせた条件での反応性を評価するため、より現実に近い結果を与えるとして期待できる。一般にこの試験方法はコンクリートプリズム試験 (CPT) を呼ばれる。

(2) アルカリ濃度の低減

反応性シリカの溶解反応はアルカリ性に強く依存する。コンクリートの空隙水の pH は、主にはセメントから供給されるアルカリにより決定される。コンクリート中の骨材量はおおよそ一定であるので、その骨材に対するアルカリ総量（セメントからもたらされる主なアルカリ金属として Na と K があるためアルカリ総量と称し、K 量は、原子量により Na 量に換算する）という意味で、コンクリート中のアルカリ総量を規制する方法が最も簡単である。一般には 3.0 kg/m^3 という規制値が用いられる。ただし、 2.5 kg/m^3 でも著しい劣化を示した大規模実構造物の事例はあり、必ずしも十分な対策とはなっていない。

ポルトランドセメントに、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを添加すると、生成する珪酸 Ca 水和物の化学組成が変化し、アルカリを吸収ようになる。ポルトランドセメントの主要水和物は珪酸 Ca 水和物（セメント・コンクリートの材料科学分野では C-S-H と略記する）であるが、水酸化 Ca を副成することからもわかるように Ca 過剰であり、C-S-H にアルカリ吸着能はほぼない。ポルトランドセメントに比べ、高炉スラグ微粉末やフライアッシュから生成する C-S-H は低 Ca/Si であり、C-S-H がアルカリ吸着特性を示すようになり、空隙水の pH を低下させ、AAR を抑制できる。ただし、この機構は、混和材の反応の結果、C-S-H の Ca/Si が低下する、というものである。混和材の化学組成と反応性に依存する。すなわち、同じ反応性を仮定すると、高炉スラグは Ca リッチなため、AAR 抑制には、Ca 含有率が数 % 以下の珪酸質フライアッシュよりも多量に添加する必要がある。フライアッシュの抑制効果も、Ca 含有率に依存する。また、混和材の粒度は反応

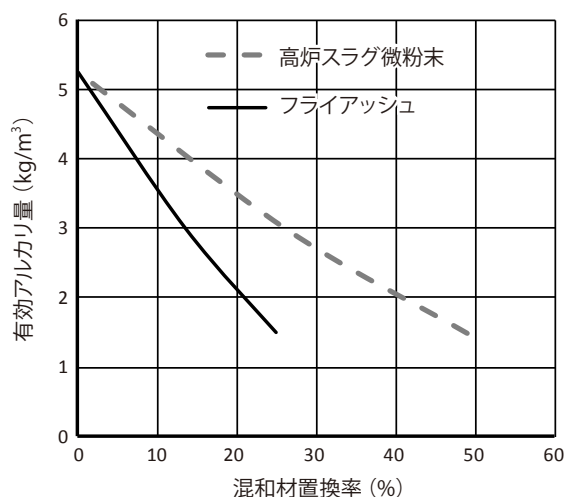


図5 混和材置換率のアルカリ量への換算例

注：文献 (Y. Kawabata and K. Yamada, J. Adv. Concr. Technol., 13, 538-553 (2015)) をもとに編集

率に依存し、フライアッシュでは水和反応に寄与する非晶質相の割合も重要となる。日本では、流通している材料の特性が制御されているため、高炉スラグ微粉末では、40 mass % 以上、フライアッシュでは 15 mass % 以上が推奨されている。図 5 に、混和材によるポルトランドセメントの置換効果をアルカリ総量減少に変換した関係の例を示す¹⁰⁾。この事例では、高炉スラグ微粉末 40% 置換とフライアッシュ 15 mass % 置換により、アルカリ量をそれぞれ 3.1 kg/m^3 と 2.5 kg/m^3 低減する効果を有する。

(3) 遮水

部材厚さが十分に厚く、乾燥によりコンクリートから水分が失われない場合、練り混ぜ時にコンクリートが保有している水分だけから AAR は発生しえる。また、橋脚などに遮水塗料を適用したり、橋梁のアスファルト舗装面下部のコンクリート表面に防水処理を施したりすることもあるが、一定の効果は期待されるものの、完全に遮水するのは容易ではない。したがって、遮水を AAR 抑制対策とはしにくいのが現実である。

4. アルカリ骨材反応の予測の最先端

(1) 判定値の妥当性と室内試験の限界

前章で述べた試験方法は、あくまでも室内試験であり、試験で得られた結果は現実のコンクリート構造物の挙動と対比して限界値を決定する必要がある。AAR が化学反応に基づくものであり（つまり温度依存性がある）、水分供給に依存するのであるから、当然、使用する環境によって試験法の条件もしくは反応性のリスクの有無の判定値を変更する必要があると考えられる。日本では、促進試験である各手法で反応しないのであるから、現場でも反応しないと考えていたのかもしれない

いが、室内試験が現実の環境でのAARを反映しているかどうかの検証が不十分であり、抑制対策を講じていても実構造物で劣化が認められる事例も少なくない⁴⁾。海外では、地道な実構造物調査が行われ、その結果を反映させる判定値や試験条件変更の努力が継続されている⁵⁾。ただし、試験と現実の対比を行ったとしても、現実のコンクリートの経験は長くとも100年程度に限定される。しかも過去に使用した骨材には有効であるが、新しい骨材を異なるアルカリ総量や環境条件で使用した場合の参考には必ずしもならない。

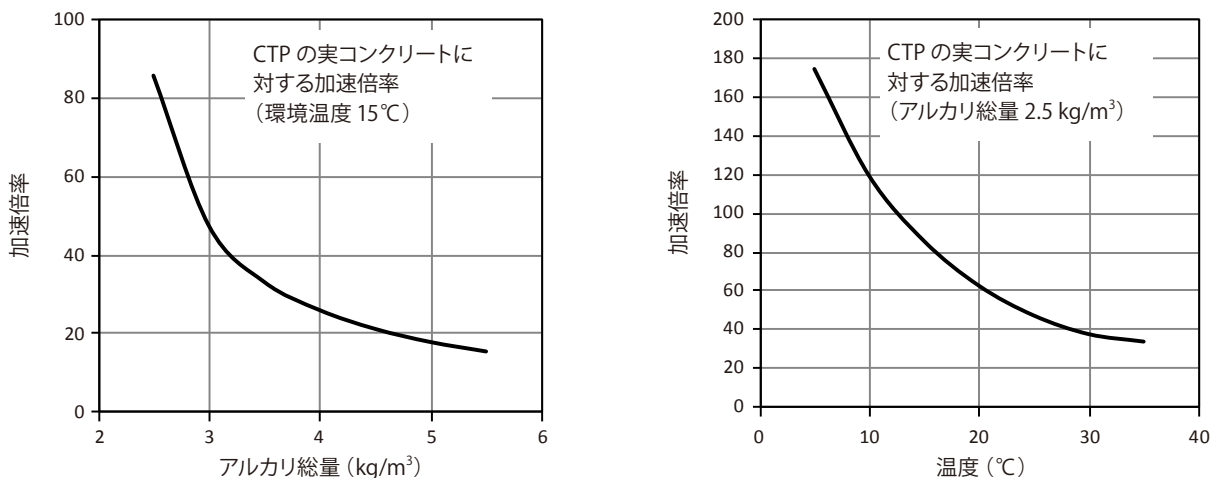
ここで、放射能汚染した廃棄物の処分におけるAAR対策に求められる有効期間について考える。放射性廃棄物の処分を考えた場合、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（炉規法）による放射能レベルの比較的低い廃棄物（L2）はコンクリートピットでの処分が示されており⁶⁾、この施設（浅地中ピット処分施設）が参考になると考えられる。この施設は、埋設開始後約30年程度まで物理的な能力に期待した放射性物質の「閉じ込め」の機能を担う。その後、さらに300年間は段階的管理を行うとし、その後は、化学的な収着のみに期待した放射性物質の「移行抑制」の機能を担う。遮断型相当の処分場と直接比較できるものではないが、あえて対比するなら、約30年間で遮断に相当すると類推できる「閉じ込め」を期待している。その後については、管理により状況を確認していく。

L2とする放射能濃度について、10万Bq/kgが提示されている。炉規法のピット処分と特措法の遮断型相当の処分方法では、要求される機能も放射能限度の考え方も全く異なる点には注意が必要ではあるが、適用する放射能濃度下限値としては同じ10万Bq/kgが設定されているので、両者を比較して考える。

参考のため、処分する放射性物質の濃度限界を考えておく。ピット処分で300年間管理する場合、300年後に10万Bq/kgとなる放射能汚染した廃棄物の処分時の放射能濃度を考える。 ^{137}Cs の半減期は約30年であり、300年はその10倍にあたるので、300年間に放射能濃度は、 $(1/2)^{10} \approx 1/1000$ となるので、10万Bq/kgの1000倍、つまり1億Bq/kgまでの放射能濃度の廃棄物が許容できることになる。特措法の遮断型相当の処分方法にも同様の想定が当てはまるとすれば、中間貯蔵後に最終処分するために高度に減容化し、1億Bq/kgまで放射能濃度を高めた場合は、300年間のAAR抑制が必要となる。より高濃度の廃棄物を処分する場合にはより長期間の抑制が必要となる。また、処分対象物を熱的減容化後の飛灰そのものと想定すると、重金属などの有害廃棄物も考慮しなければならない可能性もある。この場合に求められる耐久性には当面、定まった上限はない。

一方で、前述のように一般構造物の経験は長くとも100年程度であり、300年間のAAR抑制の妥当性を経験から考えるのは容易ではない。このため、現状のピット処分施設に用いるコンクリートのAAR対策としては、AARの発生原理から考えてAARのリスクはないとみなすことができる石灰石骨材を用いている。中間貯蔵後の放射能汚染した廃棄物の最終処分場建設にも石灰石骨材を使用できればよいが、立地によっては多量の骨材の輸送はコスト面から非合理的となる可能性もある。

この問題に対処するには、室内試験の実コンクリートに対する加速倍率を算定することは有効であると考えられる。図6に、温度とアルカリ量を変化させたCPTの結果をもとに、膨張挙動をある数式にフィッティングし、その数式を記述する定数の温度とアルカリ量依存性を算出することで、試験の加速倍



(左：環境温度 15°Cでアルカリ総量が異なる場合、右：アルカリ総量が 2.5 kg/m^3 で環境温度が異なる場合)

図6 CPTの実コンクリートに対する加速倍率

出典：国立環境研究所、汚染焼却飛灰廃棄物等の最終処分場（遮断型構造）に用いるコンクリートに関する技術資料（2015）

率を求めた結果を示す。60℃アルカリ総量 5.5 kg/m³ のCPTの与える結果は、例えば、アルカリ総量 2.5 kg/m³、平均温度 15℃の環境での利用に対して、85倍の加速倍率となる²⁾。したがって、この条件で4年間試験すれば300年の挙動を推測できることになる。ただし、この手法の精度についてはさらなる検証が必要であり、現時点では一つの考え方の提示にとどまる。

(2) 室内試験の改善

海外での報告によると、室内での促進試験による膨張率は早期に収束し、より大きな試験体の暴露試験や実構造物の膨張挙動に比べると、数分の1の膨張率しか与えないことが報告されている⁹⁾。この原因は種々あるが、主には室内試験の不備（小型試験体では試験体からアルカリが系外に失われたり、水分供給が不十分であったりする）、そして、促進による膨張反応メカニズムの変化にあると考えられる。

試験法改善に関して、国立環境研究所では、九州大学、港湾空港技術研究所ほかと連携し、室内試験の不備を解消する新しいCPTを提案している¹¹⁾。改善案では、コンクリートプリズム（角柱）をコンクリートの空隙水相当のアルカリ溶液でラッピングすることで、アルカリの系外への溶出を抑制し、定期的に水のみを供給することで、十分な吸水条件を実現する。この方法をアルカリラッピング（AW）と称し、AWを施したCPTをAW-CPTと称する。RILEM（国際材料構造試験研究機関・専門家連合）のTechnical Committee 258 AAA（Avoiding alkali aggregate reaction in concrete）にて、国際学会規準として、この方法AW-CPTを標準化する活動を行っている。

AW-CPTは従来のCPTよりも大きな膨張率を与える促進試験である。しかし、もし室内試験での促進条件を過酷にしすぎると、現実の構造物の劣化反応と異なる現象になるとすると、単純に考えると、加速倍率には限界があることになる。したがって、基礎研究として、試験法の改善とともに、AARによる膨張機構解析も重要となる。先に述べたように、ある種の反応性の高い骨材は、混合量と線形性を示さない（ベシマム現象）。さらに、アルカリ量、温度、評価材齢、粒径についても非線形性を示す。これらを記述するには、反応機構を解析し、数値モデルを導入し、室内の促進試験の結果から、環境影響を評価し、屋外暴露試験による膨張率を再現していくことが重要である。前節では、促進試験の加速倍率によるAARリスクの有無の評価という考え方を示したが、ここで提示した開発中の手法はより汎用的であり、材料特性から任意の時間のASR膨張挙動を予測するというさらに進歩的なものである。

RILEMの活動は、EU圏を中心として行われている経緯があり、日本や北米の特に反応性が高い骨材、あるいは島国特有の複数の骨材の混合という問題（東京や大阪だけでなく、

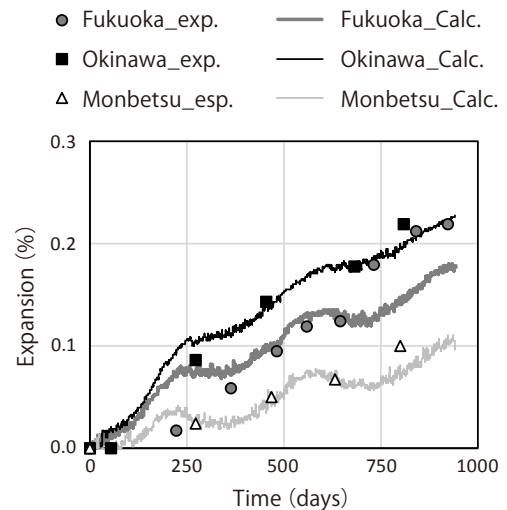


図7 室内試験の結果に基づく各地での暴露試験での膨張挙動の再現

出典: Y. Kawabata et. al., Proceeding of the Internal Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019), Durability, Monitoring and Repair of Structures, PRO128, RILEM Publications S.A.R.L., pp. 230-238 (2019)

海送骨材を使用する事例は、香港、シンガポール、ジャカルタなど相当数ある）を除外して行われる傾向にあり、国際規格だからといって万能なわけではなく、日本への適用には十分な注意が必要である。日本の反応性骨材は、高反応性の安山岩とチャートが主体と見なされてきた。現実には、ゆっくりと膨張するEUと類似のタイプの骨材も実構造物で劣化を呈しており、このタイプの骨材に対応する試験法開発も必要である。このためには、日本骨材とEU圏の典型的反応性骨材を比較することも有効であると考えられる。また、EU圏は、日本と比べると寒冷地が多く、判定基準は同一とはならない可能性がある。したがって、環境依存性の研究も必要である。

作用機構解明はまだ研究途上であるものの、反応機構を想定し、数値モデルを構築し、曝露の温度と降雨条件を反映して予測した結果を図7に示す¹²⁾。年平均気温が7.7℃の紋別、18.8℃の福岡、24.3℃の沖縄では、曝露試験体は異なる膨張挙動を示した。わずか3年程度に限られるが、室内試験の結果からの推定は暴露試験体の膨張挙動を一定精度で再現できている。

(3) 原子力関連施設での新しいAAR対策

日本の原子力関連施設のコンクリート構造物は前述のJASS5Nに規定されている。国内のAAR抑制対策に限界があること、また国内外の原子力施設でもAARによる劣化が顕在化したことによる国際的なAARへの関心の高まりから、新しいAAR対策が検討されている。旧原子力安全基盤機構は、RILEMやカナダ規格CSAの考え方を参考にした新しい

「骨材のアルカリ骨材反応の試験フロー」、「構造物のASR診断フロー」、および「抑制対策の選択フロー」を提案し、今後の課題を提示した¹³⁾。この課題は後続の事業においてさらに検討され、改善提案がなされた^{14,15)}。

改善提案では、骨材単独での反応性判断よりも、コンクリートが本来有すべき性能をASRの観点からいかに担保していくかという考え方、総合的なASR評価が示された。具体的な試験方法としては、骨材の岩石学的特徴を偏光顕微鏡観察によって把握し、ゆっくり反応する骨材には厳しい促進条件で比較的短期間に予備判定を行い、反応性が高い急速に膨張する骨材とともに緩い促進条件の1～2年を要するAW-CPT（前節で提案した改良した方法）により最終判断をする。既存構造物の診断では、構造物への損傷を考慮しサンプル採取を抑制し、変異・変形測定を主体に据え、劣化進行が認められるときのみ、詳細な岩石学的診断やコアの促進膨張試験を行う方法が提案された。ただし、原子力施設では反応容器を囲む部材厚さ1 m以上の生体遮蔽壁といった高温部材（60℃に達する）があり、その使用環境での長期挙動を予測することを考えると、60℃での試験は促進試験とはならない。アルカリ量を増加させることが促進条件となるが、ここでも加速倍率を考え、共用期間内での安全性を予測しなければならぬが、これは現在も残された課題である。

なお、コンクリート構造物から採取したコアの促進膨張試験については、試験の範囲では、採取したコアと元のコンクリートの膨張挙動が一致しない現象が認められ、試験法としての確立や結果の解釈についてはさらなる研究が必要である。また、AARによる膨張と構造物の機能の関連を理解することも重要である。たとえ、構造物にAARによる変状が認められたとしても、その変状の進展が十分に緩慢であれば機能に与える影響は無視しえる可能性はある。さらに機能の種類によって影響の度合いは異なる。見かけでは著しいひび割れが認められたとしても、耐荷性能については低下が認められないという研究結果も示されている¹⁶⁾。つまりAARは耐荷性能には強い影響を及ぼさない。ただし、変形がコンクリート構造物に設置している機器に及ぼす影響は重大であり、変形予測は重要な課題である。カナダにおけるダム本体の変形挙動（水門が開かなくなったり水力発電タービンが作動できなくなったりする）予測が極めて難しい課題であること、原子炉格納建屋の気密性が低下した事例（定期的耐圧試験でリークの経時増加を検出）もあることが紹介されている¹⁷⁾。

(4) 今後のAAR研究

前節の原子力関連施設に関する最新の方法論は、放射能汚染した廃棄物の処分施設においても参考とすべき内容である。遮断型相当の最終処分施設に求められる機能、要件を明確にし²⁾、その上で定量的にAARの影響を予測し、設計供用期間中にその機能を担保できる性能をコンクリートに付与

する必要がある。このために必要となる、今後のASR研究の方向性は、以下になると考えられる。

- 作用機構の解明と骨材の反応性に応じた促進条件の適切な設定

AARの長期予測には、促進試験が必要であるが、促進がAARによる膨張の作用機構を変化させていないか、検証が求められる。もしくは、作用機構を理解したうえで、化学反応と膨張を結びつける数値計算など新しい手法の導入が必要である。したがって、AARによる膨張機構の研究がまずは重要である。

- 多様な骨材を用いた比較試験

世界各国でAAR対策は検討されているが、それぞれの地質学的特徴と機構を反映したものであり、試験法開発と基準値設定には、多様な岩石を比較評価することが重要である。日本で反応性が高いと考えられてきた安産とチャート以外の岩石も劣化を現実に起こしていることが分かっていること、海外の試験法は日本にはあまり産出しない種類の岩石で検討がなされていることから、世界の多様な骨材による比較試験が望まれる。

- 数値モデルによる各種ペシマム現象、あるいは非ペシマム現象の再現

種々の理由により、膨張が最大となるペシマム現象があるが、すべての因子を取り込んで試験を行うには膨大な労力と時間を要する。その現象を統一的に説明できるモデルを構築することで、骨材の基本情報から長期予測が可能とすることが求められる。

- 環境条件を考慮した長期膨張挙動の予測

温度や水分供給条件がAARに強く影響することは明らかであるが、その定量評価は現在も研究中である。標準状態での挙動が再現できた後、現実の環境条件を反映した予測が求められる。

- 構造物からの採取コアによる将来膨張の予測手法の開発
既に存在している構造物、あるいは今後建設し、一定期間経過した後の構造物に関して、さらに将来のAARの進行を予測するには、既に現場環境の影響を受けたのちの試験体を用いて評価することが合理的であると考えられる。この手法は未確立であり、維持管理における重要な研究課題である。

- 拘束条件下における変形挙動の数値シミュレーション
コンクリートには、物質浸透抵抗性が求められるため、ひび割れ制御は重要である。さらに、コンクリートがAARにより膨張することで、機械設備の位置に影響したり、他の部材を押すことで変形させたりする。この挙動の予測には、無拘束状態での膨張を三軸応力下での変形に変換することが必要で、現状では容易ではない¹⁷⁾。

- 放射能汚染した廃棄物の処分施設

一般建設物に求められる AAR 対策は、放射能汚染した廃棄物の処分施設や原子力発電所施設では十分とは言えない。求められる機能を設計期間にわたり維持できるよう、AAR を長期にわたり定量的に予測する技術が必要である。

5. まとめ

放射能汚染した廃棄物を遮断型相当の処分場で処分する際の課題の一つとして、コンクリートのアルカリ骨材反応 (AAR) の抑制に焦点を当て、現状と検討課題について整理した。

- AAR の原理を説明したうえで、各種抑制対策の原理と効果をまとめた。
- JIS で定められる現状の抑制対策には限界があるうえに、最終処分場を考えると想定する時間スケールが異なる。よって、最終処分場構造物のコンクリートに関しては、廃棄物処分側から独自の視点での研究が必要である。
- AAR の予測の最先端に関連し、反応性の有無の判定値に関わる問題、長期予測のための促進試験の活用例、従来の試験法の欠点と改善方法、室内試験と屋外暴露の膨張率の関係について説明した。
- 日本の原子力関連施設の新しい ASR 対策の考え方を概説した。
- 今後の AAR 研究の課題を提示した。

参 考 文 献

- 1) 環境省: 指定廃棄物処分等有識者会議 (第 2 回), 参考資料 I-1 最終処分場等の構造・維持管理による安全性の確保について. 平成 25 年 4 月 22 日, p. 17 (2013).
- 2) 国立環境研究所: 汚染焼却飛灰廃棄物等の最終処分場 (遮断型構造) に用いるコンクリートに関する技術資料 (2015), <https://www.nies.go.jp/whatsnew/2014/20141203/20141203.html>.
- 3) I. Sims, A.B. Poole: Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review. CRC Press (2017), 767 p.
- 4) 鳥居 和之, 山田 一夫, 古賀 裕久, 久保 善司, 山路 徹: 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に関する研究委員会報告. コンクリート工学年次論文集, **30** (1), 21-28 (2008).
- 5) 山田 一夫, 川端 雄一郎, 久保 善司, 合田 寛基, 佐川 康貴, 広野 真一: ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告. コンクリート工学年次論文集, **36** (1), 1-9 (2014).
- 6) 山田 一夫, 山本 貴士, 佐川 康貴, 上田 尚史, 久保 善司, 小川 彰一: 性能規定に基づく ASR 制御型設計・維持管理シナリオに関する研究委員会報告. コンクリート工学年次論文集, **39** (1), 1-9 (2017).
- 7) 庭瀬 一仁: 低レベル放射性廃棄物の処分について. 土木構造・材料論文集, **32**, 9-18 (2016).
- 8) 日本コンクリート工学会: アルカリ骨材反応. コンクリートの豆知識 (<http://www.jci-net.or.jp/j/public/kiso/ASR.html>).
- 9) 鳥居 和之監修, 山田 一夫編: コンクリート診断 ASR の的確な診断 / 抑制対策 / 岩石学的評価. 森北出版 (2017), 484 p.
- 10) Y. Kawabata, K. Yamada: Evaluation of alkalinity of pore solution based on the phase composition of cement hydrates with supplementary cementitious materials and its relation to suppressing ASR expansion. *J. Adv. Concr. Technol.*, **13** (11), 538-553 (2015).
- 11) Y. Kawabata, K. Yamada: Alkali-Wrapped Concrete Prism Test (AW-CPT) – New testing protocol toward a performance test against alkali-silica reaction--. *J. Adv. Concr. Technol.*, **16** (9), 441-460 (2018).
- 12) Y. Kawabata, K. Yamada, S. Ogawa, Y. Sagawa: Numerical simulation of expansion behavior of field exposed concrete block on the basis of modified concrete prism test. Proceeding of the Internal Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019), Durability, Monitoring and Repair of Structures, PRO128, RILEM Publications S.A.R.L., pp. 230-238 (2019).
- 13) 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. 独立行政法人原子力安全基盤機構, JNES-RE-2013-2050 (2014).
- 14) 三菱総合研究所: 原子力規制庁 平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費 (高経年化技術評価高度化 (アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の長期健全性評価に関する研究)) 事業報告書 (2017).
- 15) 山田 一夫, 江藤 淳二, 渋谷 和俊, 小川 彰一, 五十嵐 豪, 丸山 一平, 寺本 篤史: 原子力施設の新しい ASR 対策の考え方の提案 その 1 ~ 6. 日本建築学会大会学術講演会梗概集, pp. 21536-21541 (2018).
- 16) コンクリート委員会 / アルカリ骨材反応対策小委員会: アルカリ骨材反応対策小委員会報告—鉄筋破断と新たな対応—. コンクリートライブラリー 124 号, 土木学会, 316 p. (2005).
- 17) 性能規定に基づく ASR 制御型設計・維持管理シナリオに関する研究委員会: 同報告書, 日本コンクリート工学会 (2017).

2019 年 1 月 15 日受付

2019 年 4 月 2 日受理

和 文 要 約

福島第一原子力発電所事故による放射性セシウムにより比較的高度に汚染されたオフサイトの廃棄物の最終処分施設候補には、特措法による鉄筋コンクリート製の遮断型相当のものがある。この遮断型処分場のコンクリートは、35 cm以上の厚さで水密性を有し、幅5 m長さ10 m深さ5 mの寸法が想定されている。一般に、セメントの水和熱による熱応力、コンクリートの乾燥収縮、コンクリートの中性化や環境からの塩害による補強鉄筋の腐食、硫酸塩と塩類劣化、アルカリ骨材反応(AAR)ほかによるいくつかの理由から、長期的にはコンクリートは徐々にひび割れる。ひび割れリスクは構造物に許与できるレベルに制御でき、それらほとんどの現象によるひび割れ機構に基づき、ひび割れリスクを定量予測でき、何らかの対策により構造物に許容可能なレベルに抑制できる。しかし、AARによる膨張を定量予測することは困難で、抑制対策の有効な期間も不明である。AARは骨材とコンクリート中のアルカリの反応により発生し、この反応はアルカリシリカ反応(ASR)と称される。抑制対策は一般のコンクリート構造物には有効とみなされている。しかし、その有効期間は不明である。しかも学会の研究委員会は、それら従来の抑制対策は場合によっては完全ではないことを指摘してきた。この報文では、JISに定められる現在の抑制対策の不完全さについてまとめ、AARの観点から処分場施設に使用されるコンクリートの安全性を担保する新しい手法を紹介する。

