

汚染焼却飛灰廃棄物等の保管に用いる
コンクリート容器の技術要件

平成 28 年 12 月

コンクリート容器耐久性研究会

まえがき

東北地方太平洋沖地震に伴う、福島第一原子力発電所事故により発生した放射性物質を含む各種の災害廃棄物(以下、汚染廃棄物とする)の量は膨大であり、放射能レベル 8000Bq/kg 超えの指定廃棄物の保管量は、福島県内で約 13 万 8 千トン(2015.12 末時点)に達する^[1]。これらの適切な処分方法について、鋭意検討が進められており、8000Bq/kg を超え 10 万 Bq/kg 以下の指定廃棄物は、原則、セメント固化処理を行って県内の既存の管理型処分場にて処分される。10 万 Bq/kg 超えの指定廃棄物と、除染に伴う土壌・廃棄物は国が整備・運営を行う中間貯蔵施設へ移送される。中間貯蔵施設の候補地決定を受け、施設内への試験輸送が進められる一方、仮置の長期化によるフレコン袋の破損等が報じられており、内容物を飛散・漏洩させないよう十分な配慮が必要である。中間貯蔵施設では、焼却できるものは減容化処理され、放射性物質がかなり濃縮された状態で最長 30 年間保管され、その後、最終処分場へと搬出される計画である。

また、福島県外で発生した汚染廃棄物は、各県ごとに処理施設を建設し、1 ヶ所に集めることになっているが、候補地の選定は難航しており、仮置き保管が長期化する見込みである。こうした状況の下、茨城県は濃度の高い廃棄物は県内 1 ヶ所での保管を原則としつつも、保管強化と遮蔽の徹底を図ることを前提に現地保管を継続する方向性を打ち出し、環境省もこれを容認した。そして、措置の一例として、ボックスカルバートの設置やコンクリート容器への入れ替え、コンクリート構造の強固な既存施設への移送等が挙がっており、国が費用を負担することが明示された。

汚染廃棄物の中間貯蔵施設への輸送、あるいは仮置場所や中間貯蔵施設での長期保管においては、近隣住民の安全・安心の確保が何より大切である。高い遮蔽性を持ち、内容物の飛散・漏洩を多重に防護できるコンクリート容器の活用は、これらに貢献できる一つの方策と考えられる。

こうした背景の下、汚染廃棄物を安全に保管することを目的に、事故後多くの団体・企業から廃棄物保管用コンクリート製容器(以下、コンクリート容器と称す)の提案がなされてきた。日本コンクリート工学会の放射性物質の封じ込めとコンクリート材料の安全利用調査研究委員会は、コンクリート容器の特徴、想定される対象廃棄物、容器に求められる性能等を報告書^[2]にまとめている。

国立研究開発法人国立環境研究所は、汚染廃棄物の持つ様々な特性を十分に踏まえた上で、主に構造面・材料面に着目した技術的な議論・検討を行い、その検討結果をもとに、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^[3]をまとめた。その中で、耐久性への対策からフライアッシュセメントと膨張材を用いたコンクリートを取り上げ、一般的に用いられる普通コンクリートとの比較検討を行っている。このコンクリートは、容器製造に用いるコンクリートとしても有用だと考えられるが、コンクリート製品の耐久性、すなわち、汚染廃棄物の特性を考慮した耐久性に関するデータはほとんど無い。

コンクリート容器耐久性研究会は、コンクリート容器の耐久性を実証するとともに、必要となる技術的要件を整理することを目的として、2014年8月に発足した民間5社で構成される研究会である。2014年11月より、コンクリート容器が遭遇する最も過酷な条件を想定して、実物大のコンクリート容器の中に加水した焼却飛灰を投入し、屋外での暴露試験を行った。その概要と結果については、当研究会ホームページで公開する資料^[4]および文献^{[5],[6]}を参照頂きたい。

本技術資料は、暴露期間1年の検証結果を踏まえ、決して内容物を漏洩させてはならない場合に、多重防護の観点から必要となるコンクリート材料面の対策と耐久性照査の方法について述べ、処理対象物に応じたコンクリート容器の技術的要件を整理したものである。

(国研)国立環境研究所の関係各位には、実験計画、実験遂行、公開見学会の開催、技術資料とりまとめにおいて、多大なご指導・ご協力を頂戴した。また、同研究所の「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」に設置されたコンクリート容器部会(主査：日本大学岩城一郎教授、山梨大学齊藤成彦准教授、広島大学半井健一郎准教授)には、内容構成(目次、章立て)、性能設計の考え方、耐久性照査方法、遮水対策等の仕様の取り扱いについて、適切なお助言を頂いた。関係各位にはここに謹んで謝意を表す。

コンクリート容器耐久性研究会 会長 田中 敏嗣

コンクリート容器耐久性研究会 構成委員

会長	田中 敏嗣	太平洋セメント（株）
副会長	池田 正行	前田製管（株）
監事	橘 修	昭和コンクリート工業（株）
事務局長	多田 克彦	太平洋セメント（株）
委員	氏家 和弘	旭コンクリート工業（株）
委員	坂口 周示	旭コンクリート工業（株）
委員	平岡 浩志	昭和コンクリート工業（株）
委員	上原 伸郎	住友大阪セメント（株）
委員	草野 昌夫	住友大阪セメント（株）
委員	東 洋輔	太平洋セメント（株）
委員	森 寛晃	太平洋セメント（株）
委員	齊藤 誠一	前田製管（株）

目次

第1章	コンクリート容器に求められる性能と区分	1
1.1	コンクリート容器の特長	1
1.2	想定される処理対象物	1
1.3	コンクリート容器に求められる性能	3
1.4	容器区分および要求性能	5
第2章	コンクリート容器の設計	8
2.1	設計一般	8
2.2	放射線遮蔽性	8
2.3	物質漏洩防止性	8
2.4	耐荷性	9
第3章	容器向けコンクリートの耐久性に関する照査	11
3.1	鋼材腐食に対する照査	11
3.2	コンクリートの劣化に対する照査	12
第4章	容器向けコンクリートの水密性に対する照査	14
4.1	水密性	14
4.2	乾燥収縮ひび割れ	14
第5章	コンクリート容器の製造	16
5.1	材料	16
5.2	配合	16
5.3	製造	16
5.4	品質管理	17
5.5	製品検査	18
第6章	コンクリート容器の維持管理上の留意点	19

第1章 コンクリート容器に求められる性能と区分

1.1 コンクリート容器の特長

放射性物質により汚染された廃棄物(以下、汚染廃棄物と称す)を安全に保管することを目的に、事故後多くの団体、企業から廃棄物保管用コンクリート製容器(以下、コンクリート容器と称す)の提案がなされている。その特長は以下のとおりである。

- ・適切なコンクリート厚さ、材質によって放射線遮蔽が可能
- ・取り扱いが容易な形状とサイズに製造でき、積み重ね保管や容器の移動・運搬が可能
- ・鉛板や鉄板と比べて低コストで製造可能であり、耐久性が高い
- ・内壁塗装や遮水シートによる遮水対策が可能

なお、文献^[3]では、最終処分場(遮断型)のコンクリートピットの構造例の一つとして、これらのコンクリート容器を内部仕切として活用したコンクリート容器併用型コンクリートピットを取り上げており、場所打ちコンクリートピットと比べた場合の維持管理上の利点として、ピット内への雨水進入の有無やコンクリートの劣化等の確認が容易なこと、補修の観点から、コンクリート容器の交換で対応でき、大規模な改修工事が不要なことが示されている。

1.2 想定される処理対象物

コンクリート容器での保管を想定しているのは、汚染廃棄物のうち放射能レベルが8000Bq/kgを超え、10万Bq/kg以下の指定廃棄物である。指定廃棄物の種類としては、可燃物を焼却した際に発生する一般焼却灰(主灰・飛灰)、浄水発生土(上水・工水)、下水汚泥(焼却灰含む)、農林業系副産物(稲わら・たい肥)等がある。これら指定廃棄物の数量は、平成27年12月31日時点で、約17万トンとされている(表1.1参照)。

この他にも、福島県では除染に伴い発生した大量の除染廃棄物(除染土壌・草木類)が仮置保管されており、これらは、今後、中間貯蔵施設へ輸送、焼却減容化され、最長で30年間保管されることになる。

指定廃棄物の中で飛灰と呼ばれる焼却灰(以下、焼却飛灰と称す)には可溶性のCsが濃縮し、一般に、塩分濃度も高いため、その処分には注意を要する。可燃性の一般廃棄物は、塩素を含有しており、燃焼により発生するHClを除去するために、Ca(OH)₂を吹き込むことが多い。これにより、塩化物イオンはCaCl₂として回収される。アルカリとしては、NaとKが主体であるが、Csも放射性と安定性の区別なく、焼却飛灰に濃集する。一般廃棄物の性質に依存するが、CaCl₂は5~30%、NaClとKClはそれぞれ5%前後、安定Csは0.1~10ppm

程度含まれる。焼却飛灰の組成例を表 1.2 に示す。

焼却飛灰に含まれる CaCl_2 は、外部からの給水がなくても、大気中の湿分からの吸湿・潮解現象によって漏出水が発生する可能性があり、長期保管においては、十分な漏洩防止対策が必要となる。

表 1.1 指定廃棄物の数量^[1]

都道府県	焼却灰				浄水発生土(上水)		浄水発生土(工水)		下水汚泥 ※焼却灰含む		農林業系副産物 (稲わらなど)		その他		合計	
	焼却灰(一般)		焼却灰(産廃)		件	数量(t)	件	数量(t)	件	数量(t)	件	数量(t)	件	数量(t)	件	数量(t)
	件	数量(t)	件	数量(t)												
岩手県	8	199.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	275.8	10	475.6
宮城県	0	0	0	0	9	1,014.2	0	0	0	0	3	2,271.5	23	120.1	35	3,405.8
山形県	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2.72	3	2.7
福島県	362	109,473.2	115	3,367.5	35	2,261.2	5	203.1	71	10,183.4	35	3,688.1	102	12,962.5	725	142,139.0
茨城県	20	2,380.1	0	0	0	0	0	0	2	925.8	0	0	2	226.9	24	3,532.8
栃木県	24	2,447.4	0	0	14	727.5	0(1)	0(66.6)	8	2,200.0	27	8,137.0	6	21.3	79	13,533.1
群馬県	0	0	0	0	6	545.8	1	127.0	5	513.9	0	0	0	0	12	1,186.7
千葉県	47	2,723.6	2	0.6	0	0	0	0	1	542.0	0	0	13	424.1	63	3,690.2
東京都	1	980.7	1	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	981.7
神奈川県	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2.9	3	2.9
新潟県	0	0	0	0	4	1,017.9	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1,017.9
静岡県	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8.6	1	8.6
合計	462	118,204.8	118	3,369.1	68	5,566.6	6	330.1	87	14,365.1	65	14,096.6	155	14,044.9	961	169,977

※栃木県の浄水発生土(工水)(1 件、66.6t)は、上水と兼用の施設で発生したものであり、浄水発生土(上水)に含めた。

表 1.2 焼却飛灰の組成例^[3]

	ストーカ炉飛灰	流動床炉飛灰
含有元素	重量%(内、可溶成分)	重量%(内、可溶成分)
Ca	23.3(8.5, CaCl_2 として 23.6)	21.3(1.8, CaCl_2 として 5.0)
K	4.0(3.6, KCl として 6.8)	3.1(8.5, KCl として 3.4)
Na	3.2(2.3, NaCl として 5.8)	4.1(1.9, NaCl として 5.8)
Cs	2.7ppm(1.7ppm)	不明
Cl	25.2(19.5)	10.7(7.0)
Al	2.3	5.5
Si	7.7	9.2

1.3 コンクリート容器に求められる性能

コンクリート容器には、一般のコンクリート製品に要求される性能の他に、放射線遮蔽性と物質の漏洩防止性が求められる。

放射線遮蔽性は、コンクリート用骨材として放射線吸収性能の高い(密度の高い)骨材を使用し、コンクリート密度を高くすること^[7]、あるいは部材厚さを大きくすること^[8]で遮蔽能力を高めることができる。つまり、コンクリート密度と部材厚さを適切に設定することで所定の要求性能を満足させることが可能である。

続いて、物質の漏洩防止性は、コンクリート容器に求められる最も重要な性能である。ここで、物質の漏洩とは、焼却飛灰等に含まれる放射性物質がコンクリート容器から外部に漏れ出すことを意味する。内容物が決して容器の外に漏れ出すことがないように、ひび割れが無く、高い水密性を有するコンクリート容器を製造しなければならない。なお、水密性に関しては、環境省告示の法的要件があり、これを満たす必要がある。

また、物質の漏洩防止性を確保するためには、耐久性の高いコンクリートで容器を製造する必要がある。焼却飛灰を保管する場合には、飛灰の吸湿によってコンクリートに乾燥収縮が生じ、それに伴うひび割れが発生するリスクがある。さらに焼却飛灰からの漏出水が高濃度で塩分を含む場合には、 CaCl_2 に起因する化学的侵食(塩劣化)での部材断面の欠損、塩水の作用による塩害あるいはアルカリ骨材反応の促進等も懸念される。この他にも、使用環境によっては凍害への対策、あるいは長期保管を前提としたアルカリ骨材反応への対策も必要となる。

コンクリート製品は、できるだけ小断面で製造することを目指しているため、十分なかぶりを設定することが難しい。このため、コンクリート材料の対策を取るだけでは、所要の物質の漏洩防止性を確保することが出来ない可能性もある。したがって、灰からの種々の劣化因子の侵入を防ぐため、コンクリート材料の対策に加えて、防水塗装や遮水シートを容器内側に施す、あるいは透水性の低いフレキシブルコンテナ(内袋)に入れて容器に格納する等の遮水対策を併せて取る必要がある。

この他にも、福島県内の中間貯蔵施設でのコンクリート容器の適用を想定すると、保管期間は最長で30年間に及ぶこと、さらに、県外で最終処分されるため再度移動が生じること等も考慮しなければならない。上記性能以外には、容器を運搬・移動する際の吊上げ時、あるいは段積み時の耐荷性、万が一、落下した場合の衝撃に対する耐荷性、そしてこれらをコンクリート容器併用型コンクリートピットに使用する際には、地震時の耐荷性等も必要である。

以上、コンクリート容器に求められる性能をその対策例と併せて表1.3に示す。同表は文献^[9]を参考に、一部加筆して作成したものである。なお、対策例については、2章から5章の中で詳述する。

表 1.3 コンクリート容器に求められる性能

要求性能		対策例
● 放射線遮蔽性		
		コンクリート密度を高くする(重量骨材の使用等)
		部材厚さを大きくする
● 物質漏洩防止性		
・ 容器仕様(遮水対策)		逆蓋構造
		止水材
		防水塗装、遮水シート、内袋等
・ コンクリートの水密性	透水性※1	水セメント比を下げる、混和材使用
	乾燥収縮	膨張材、収縮低減剤の利用
・ コンクリートの耐久性	鋼材腐食(塩害)	混和材使用、耐食性鉄筋の使用
	塩劣化	混和材使用、空気連行等
	アルカリ骨材反応	混和材使用
	凍害	適正空気量の確保
● 耐荷性		
・ 吊上げ時、段積み時		コンクリート強度、配筋
・ 衝撃に対して※2		本体と蓋の接合構造、配筋
・ 地震時		金物や PC 鋼材による連結等

※1 環境省が告示する特別措置法に定められた要件で、強度 $25\text{N}/\text{mm}^2$ で厚さ 35cm と同等以上の水密性を有することが要求される。

※2 文部科学省が告示する放射性輸送物に関する基準に定められる IP-2 型輸送物、すなわち重量 5t 未満の場合、高さ 1.2m から落下させた時に内容物の漏洩がないことが要求される。

1.4 容器区分および要求性能

本節では、放射能レベルが 8000Bq/kg を超え、10 万 Bq/kg 以下の指定廃棄物を処理するコンクリート容器を対象に、その処理対象物に応じた容器区分の考え方を示す。容器区分に応じて必要となる対策と照査項目を表 1.4 にまとめて示す。なお、表 1.3 に示す性能の中で放射線遮蔽性と耐荷性、および法的要件である水密性に関する照査は、処理対象物によらず全てのコンクリート容器に必要なため、表 1.4 の照査項目からは除外している。

コンクリート容器の設計耐用期間は、処理対象物、保管環境および保管目的に応じて定めなければならない。福島県の中間貯蔵施設での保管期間は最長で 30 年間とされていること等を考慮して、50 年以上を標準とする。

容器としては、高耐久仕様(D グレード)および標準仕様(S グレード)の 2 つを設定し、処理対象物が一般焼却灰(飛灰・主灰)の場合には D グレード、それ以外の処理対象物の場合には S グレードの適用を想定する。S グレードでは、処理対象物の含水有無によって容器区分 S1 と S2 を設定し、含水の可能性のある処理対象物では、防水塗装や遮水シート等の遮水対策を必須とした S1 の使用を推奨する。

一般焼却灰の中でも、飛灰は塩化物含有量が高く、かつ含水している可能性も高いため、これらからの漏出水がコンクリートに作用すると、コンクリート自体の劣化およびコンクリート中の鋼材腐食が比較的早期に生じる可能性がある。したがって、高耐久仕様(D グレード)の容器では、焼却飛灰等からの漏出水が直接コンクリートと接触するのを防ぐため、防水塗装や遮水シート等の遮水対策は必須としている。その上で、表 1.4 に示す材料耐久性に関する照査を行い、高い材料耐久性を有することを確認したコンクリートで製造することとした。ここで、塩害および塩劣化の照査をクリアできない場合、あるいは照査自体を行わない場合には、追加対策を行った D#グレードの使用を推奨する。なお、追加対策とは、エポキシ樹脂塗装鉄筋やステンレス鉄筋等の耐食性鉄筋を使用すること、さらに、凍害や塩劣化への抵抗性を高めるため AE コンクリートにすることを指す。

なお、表 1.4 に示されない中性化および凍害に関する照査は、2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編]に示される方法に準拠して行うこととする。

処理対象物に応じた容器仕様の決定フローを図 1.1 に示す。

表 1.4 容器区分に応じて必要となる対策と照査項目

容器区分	記号	処理対象物 ※1	遮水対策 ※2	追加対策 ※3	材料耐久性の照査			
					塩害 ※4	塩劣化 ※5	ASR ※6	収縮 ※7
高耐久仕様 (Durable type)	D#	一般焼却灰	有り	有り	○	○	○ (CPT)	○
	D	一般焼却灰	有り	無し	○	○	○ (CPT)	○
標準仕様 1 (Standard type 1)	S1	上記以外で 含水有り	有り	/	×	×	○ (通常)	×
標準仕様 2 (Standard type 2)	S2	含水無し	無し	/	×	×	○ (通常)	×

○：照査が必要である ×：照査は不要

※1：一般焼却灰以外のものに、浄水発生土(上水、工業用水)、下水汚泥(焼却灰含む)、農林業系副産物(稲わら、たい肥)等がある

※2：防水塗装や遮水シート等がある

※3：塩害および塩劣化の照査をクリアできない場合、あるいは照査を行わない場合に行う対策であり、耐食性鉄筋(エポキシ樹脂塗装鉄筋またはステンレス鉄筋)を使用し、かつ AE コンクリートとする。いずれの照査もクリアすれば追加対策は不要

※4：3.1.2 項参照

※5：3.2.2 項参照

※6：3.2.3 項参照。ここで、CPT とは、ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会(日本コンクリート工学会)より提案された「小型コンクリートプリズムを用いた ASR 促進試験方法(案)」^[10]を表す

※7：4.1 節参照

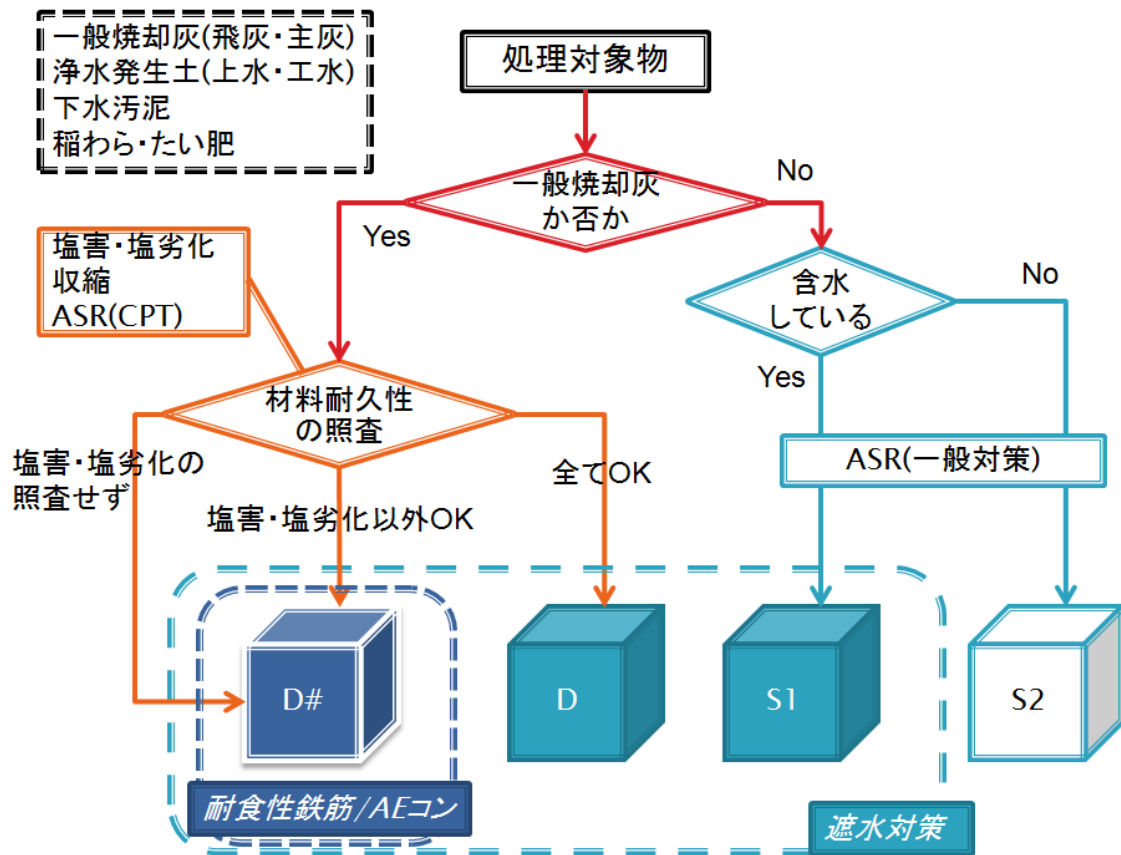


図 1.1 処理対象物に応じた容器仕様の決定フロー

第2章 コンクリート容器の設計

2.1 設計一般

本章では、コンクリート容器の設計において、汚染廃棄物を扱う観点から特に留意すべき事項について示す。なお、一般のコンクリート製品の設計に関する事項については、適用示方書等^{例えば^[11]}が示す法令、基準および指針に従うものとする。

汚染廃棄物を保管するコンクリート容器の設計は、基本的には下記の事項について行うものとする。

- 1) 放射線遮蔽性の検討
- 2) 物質漏洩防止性の検討
- 3) 耐荷性の検討

2.2 放射線遮蔽性

コンクリートによる放射線遮蔽性は、コンクリート密度および部材厚さを適切に設計することで所定の要求性能を満足させることが可能である。放射線遮蔽率は、国際原子力機関(IAEA)の方法に従って、容器表面の放射線量を測定して求めることとする。

簡便には、「市町村による除染実施ガイドライン(原子力災害対策本部，平成23年8月26日)」に示されたコンクリート厚さと放射線遮蔽率の関係を用いることで、所要の性能が得られるようコンクリート厚さを適切に設定すれば良い(表2.1参照)。

表2.1 コンクリート厚さと遮蔽率(ガイドラインより引用)

x: コンクリート厚さ(cm)	y: 減衰量(放射線遮蔽率)
5.0	0.43(57%)
10.0	0.21(79%)
15.0	0.11(89%)
30.0	0.01(99%)

※コンクリート密度：2.3g/cm³

2.3 物質漏洩防止性

コンクリート容器は、焼却飛灰等に含まれる放射性物質が容器の外に漏れ出さないよう、漏洩防止性に優れた構造としなければならない。

(1) 容器仕様(遮水対策)

外からの雨水侵入を防ぐとともに、万が一、焼却飛灰等から漏出水が発生しても、コンクリートと直接接触することがないように、防水塗装や遮水シート等の遮水対策を施すこととする。

物質漏洩防止性を確保するために必要となる仕様を以下に示す。

- ① コンクリート容器は本体と蓋から構成されるものとし、本体は継ぎ目のない一体成型とする。
- ② 蓋構造は、雨水等の侵入しにくい逆蓋構造とする。
- ③ 遮断性向上のため、蓋と本体をボルト等により固定して、一体化する。
- ④ 容器内部には、廃棄物とコンクリートの接触を防止するため防水塗装あるいは遮水シート等を設ける。
- ⑤ 外部からの容器内への雨水等の侵入を防止するため、蓋と本体との間には止水材を設ける。

遮水シートは、日本遮水工協会基準に適合したものを使用し、シート厚さは 1.5mm 以上とする。材質は、コンクリート容器内に設置するため紫外線劣化が生じにくいこと、設置時の取扱が容易なこと(伸びやすい)等から、低弾性タイプ(塩化ビニル等)を標準とする。

(2) コンクリートの水密性

容器製造に用いるコンクリートについて、法的要件に示される水密性に対する照査を行うこととする。また、コンクリートの水密性を低下させる原因となる乾燥収縮ひび割れについての照査を行う。照査方法の詳細は第 4 章に示す。

(3) コンクリートの耐久性

容器製造に用いるコンクリートについて、焼却飛灰等から漏出水が発生するような偶発的な作用を想定して、所定の耐久性を有することを確認しなければならない。照査方法の詳細は第 3 章に示す。

2.4 耐荷性

(1) 吊上げ時、段積み時

コンクリート容器の構造計算においては、収納物と容器本体の自重を考慮して、静置時および吊上げ時の側壁と底版の断面力を算定し、それぞれについて使用状態でのひび割れ発生、および終局耐力に対する照査を行う。段積み時には、上部の容器重量と最下段の蓋の自重が側壁に作用すると考え、側壁圧縮破壊に対する照査を行う。

保管場所に制限がありコンクリート容器を段積みする場合には、容器の耐荷性(部材厚、鉄筋配置等)により積み重ね段数を決定する。

コンクリート容器の移動・運搬用に吊上げ用の金具を配置する。また、吊上げ時に蓋を開けることなく本体と蓋を一体化した状態で吊上げ可能な構造とする。

(2) 衝撃に対して

コンクリート容器は、万が一、輸送中に荷台から落下する等の事故にあっても、容器が破壊して放射性物質が漏れ出さないよう強固な構造とする。必要に応じて、容器の落下試験を行い、内容物の漏洩がないことを確認しなければならない。

【解説】

・国際原子力機関(IAEA)安全基準／放射性物質安全輸送規則(IP-2 型輸送物)に従い、落下試験を行うものとする。

・文部科学省は、「放射性同位元素等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告知」で、放射性輸送物の基準を示している。汚染廃棄物を運搬する今回のケースは IP-2 型輸送物に相当し、重量 5t 未満の容器であれば、1.2m の高さから最大の破損を及ぼすよう落下させ、放射性物質の漏洩がないことを確認する。なお、コンクリート容器の落下抵抗性試験の実施は、文献^{[12], [13]}を参考にすると良い。

(3) 地震時

コンクリート容器の耐震設計に関しては、十分な知見が無いため、ここではコンクリート容器併用型コンクリートピットに適用する場合を想定して示された考え方の一例を示す^[3]。

- ① コンクリート容器は地震動に対する安定性を確保するために、滑動および転倒防止対策(金物や PC 鋼材による連結等)を講じる。ただし、対策装置の腐食は容器を破損させる恐れがあるため、防食性・耐久性に十分留意する。
- ② 容器の安定確保は水平のみならず、鉛直間においても対策を講じる。
- ③ コンクリート容器併用型コンクリートピットに適用する場合は、ピット本体の設計において、底版にはコンクリート容器の地震時発生力(反力等)を、縦壁にはコンクリート容器の地震時発生力(水平等)を考慮する。

第3章 容器向けコンクリートの耐久性に関する照査

本章では、一般焼却灰を保管する高耐久仕様(D および D#グレード)の容器に用いるコンクリートの耐久性に関する照査の考え方を示す。

3.1 鋼材腐食に対する照査

設計耐用期間中に、中性化や塩化物イオンの侵入等に伴う鋼材腐食によって容器の所要の性能が損なわれてはならない。なお、コンクリート表面のひび割れ幅に対する照査は、2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]の通りとする。

3.1.1 中性化に対する照査

・容器製造に用いるコンクリートについて、2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]に示される方法で中性化の照査を行う。

3.1.2 塩害に対する照査

・焼却飛灰等から発生した漏出水がコンクリートに直接作用する場合(偶発作用)を想定して、容器製造に用いるコンクリートについて、2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]に示される方法で塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査を行う。照査に用いる特性値(表面塩化物イオン濃度、塩化物イオン拡散係数)は、焼却飛灰への埋設あるいは焼却飛灰模擬溶液への浸漬試験等の実験に基づき定めることを原則とするが、実験等によらない場合には、文献^[3]を参考に定めると良い。

・上記の照査をクリアできない場合、あるいは照査を行わない場合は、耐食性の高いエポキシ樹脂塗装鉄筋あるいはステンレス鉄筋を使用したD#グレードの仕様とする。

・なお、高耐久仕様の容器では、多重防護の観点から、防水塗装や遮水シート等による遮水対策を必ず行い、焼却飛灰からの漏出水がコンクリートに直接接触することが無いようにする。

【解説】

・焼却飛灰からの漏出水は、極めて塩分濃度が高いため、コンクリートに直接接触すると、早期にコンクリート内部へ塩化物イオンが浸透し、鋼材位置に到達する可能性がある。

・材料面での対策には限界があるものの、フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の混和材を活用することで、塩化物イオンの浸透速度を遅らせる効果が期待できる。

・焼却飛灰との接触で塩劣化(3.2節で詳述)が生じた場合、モルタルの浮き・剥離によって、塩化物イオンの浸透がさらに促進される可能性があるため、留意が必要である。

3.2 コンクリートの劣化に対する照査

3.2.1 凍害に対する照査

・容器製造に用いるコンクリートについて、2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]に示される方法で耐凍害性の照査を行う。ただし、蒸気養生後、試験開始までの所定期間水中養生を行うこととする。

・内部損傷に対する照査として、「コンクリートの凍結融解試験方法(JIS A 1148)」に記載されるA法(水中凍結融解試験方法)あるいはB法(気中凍結水中融解試験方法)による評価を行い、得られた相対動弾性係数の設計値が最小限界値以上であることを確認する。

・必要に応じて、表面損傷(スケーリング)に対する照査を行う。

【解説】

・試験方法は、最低温度、凍結融解繰返し回数、飽水度等を考慮して選択する。

・A法(水中凍結水中融解法)で試験を行う場合、供試体が乾燥していると、供試体の吸水の影響で、質量や動弾性係数が変化することがある。このため、試験に供する供試体は、蒸気養生を行い、その後、試験開始までの所定期間水中養生を行うこととする。

・焼却飛灰からの漏出水の塩分濃度によっては、凍結融解に伴うスケーリングが促進される可能性がある。試験方法として、RILEM CDF法や「けい酸塩系表面含浸材の試験方法(案)(JSCE-K 572-2012)」があり、試験液として、凍結防止剤の影響を考慮した濃度3%の塩化ナトリウム水溶液を利用することが規定されている。試験液として、高濃度塩水を用いると3.2の塩劣化によるスケーリングが卓越する可能性があるため、留意が必要である。

3.2.2 化学的侵食(塩劣化)に対する照査

・焼却飛灰等から発生した漏出水がコンクリートに直接作用する場合(偶発作用)を想定して、容器製造に用いるコンクリートについて、2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]の化学的侵食に対する照査を参考に行う。焼却飛灰への埋設あるいは模擬溶液への浸漬試験等によって適切に設定した劣化深さ等の特性値を用いて、設計耐用期間中に所定の深さまで達しないことを確認する。

・上記の照査をクリアできない場合、あるいは照査を行わない場合は、塩劣化を抑制するためAEコンクリートとする。すなわちD#グレードの仕様とする。

・なお、高耐久仕様の容器では、多重防護の観点から、防水塗装や遮水シート等による遮水対策を必ず行い、焼却飛灰等からの漏出水がコンクリートに直接接触することが無いようにする。

【解説】

・コンクリートは焼却飛灰に接触すると、焼却飛灰が含有する CaCl_2 の作用により、膨張性の複塩が生成して劣化が生じることがある。膨張性の複塩とは、例えば、 $3\text{CaO}\cdot\text{CaCl}_2\cdot 15\text{H}_2\text{O}$ 等である。

- ・この複塩はコンクリート中の水酸化カルシウムとの反応で生じるため、フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の混和材使用が有効である。
- ・蒸気養生後にも十分な湿潤養生を行い、混和材を十分に反応させることで、硬化体組織が緻密になり、種々の劣化因子の進入を抑制できる。また、ポズラン反応によって水酸化カルシウムが消費されるため、膨張性複塩の生成を抑制できる。
- ・適正な空気量を連行することにより、複塩生成時の膨張圧が緩和されるため、塩劣化を抑制できる。

3.2.3 アルカリ骨材反応に対する照査

- ・容器製造に用いる配合のコンクリートについて、(社)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より提案された「小型コンクリートプリズムを用いた ASR 促進試験方法 (案)」に準拠して試験を行い、促進期間 20 週における膨張量が 0.04% 以下であることを確認する。
- ・フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の混和材による ASR 抑制を期待する場合には、事前にコンクリートプリズム試験(以下、CPT とする)を実施して、適切な置換率を設定する。

【解説】

- ・本試験方法は、RILEM AAR-4 を参考に提案されたもので、実際に用いるコンクリート配合を用いること、早期に判定結果を得るため、アルカリ総量を 5.5kg/m^3 に増やし、温度を 60°C としていること、試験体からのアルカリ溶脱を防ぐため、1.5N NaOH 水溶液を含ませた不織布で試験体を覆う等の特徴がある。
- ・現状、温度およびアルカリ総量の両者を変えた CPT データは少ないが、文献^[3]では、得られた膨張曲線から実環境における将来予測を行った事例が紹介されている。
- ・焼却飛灰は、 CaCl_2 を 5~30%、NaCl および KCl をそれぞれ 5% 前後含んでおり、これら焼却飛灰由来のアルカリが漏出すれば、ASR は促進される可能性がある。したがって、上記 CPT に加えて、飽和 NaCl 溶液あるいは焼却飛灰抽出模擬液等の高濃度塩水への浸漬により膨張挙動を確認するのが望ましい。
- ・文献^[3]では、種々のフライアッシュを使用したコンクリートを 40°C 飽和 NaCl に浸漬した際の膨張率測定結果に基づき、フライアッシュ置換率を 30% 程度にすることを推奨している。

第4章 容器向けコンクリートの水密性に対する照査

本章では、容器製造に用いるコンクリートの法的要件に示される水密性に対する照査の考え方を示す。また、コンクリートの水密性を低下させる原因となるコンクリートの乾燥収縮ひび割れについて照査の方法を示す。なお、容器製造時に生じる初期ひび割れに対する照査は、一般的なコンクリート製品に対するもので良い。

4.1 水密性

・容器製造に用いるコンクリートについて、インプット法による透水試験を行い、設計水圧に対して、設計耐用期間中に水が容器厚さを透過しないことを確認する。

【解説】

・コンクリートは透水により容器としての性能が損なわれないよう、所用の水密性を有していなければならない。環境省告示の特別措置法に示される法的要件では、強度 25N/mm^2 で厚さ 35cm のコンクリートと同等以上の水密性であることが要求される。

・インプット法とは、一定期間供試体に水圧を作用させて、その間にコンクリート中に圧入した水量または浸透深さ、浸透面積等によってコンクリートの水密性を評価する方法である。DIN 1048 にインプット法による試験方法の記載がある。

・容器コンクリートの設計基準強度は 40N/mm^2 であり、一般コンクリートと比べて緻密で透水し難い。評価に要する時間を短縮するため、インプット法での評価を行うこととした。

・セメントの一部をフライアッシュに置換えた場合のコンクリートの水密性は、初期材齢においてはほぼ同等、材齢 1 年においてはフライアッシュの使用量が多いほど大となることが知られている。マスコンクリートのように十分な養生が期待できる場合には、フライアッシュの有効性が顕著となる^[14]。

4.2 乾燥収縮ひび割れ

・容器製造に用いるコンクリートについて、「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法(JIS A 1129)」による乾燥収縮率を測定し、材齢 6 ヶ月において 800×10^{-6} 以下であることを確認する。

【解説】

・焼却飛灰に含まれる CaCl_2 は大気中の湿分を吸湿するため、コンクリート容器内では著しく乾燥が進む可能性がある。そこで、乾燥によって容器内側のコンクリートに有害なひび割れ等が生じないことを照査することとした。

・コンクリートの収縮の特性値は、JIS A 1129(10×10×40cm 供試体、水中養生 7 日後、温度 20°C 、相対湿度 60% の環境下で 6 ヶ月乾燥後の収縮ひずみ)を参考に、容器製造に用いるコンクリートと同じ材料、配合で作製し、所定の蒸気養生を行ったコンクリート供試体での

試験値をもとに定める。蒸気養生後は封緘状態で保管し、材齢 14 日から乾燥を開始する。

- ・乾燥収縮率 800×10^{-6} は、日本建築学会あるいは土木学会が定める指針類に示されるコンクリート収縮量の規定値を参考に決めた。

- ・他の耐久性への対策から、フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の混和材を使用する場合、コンクリート強度確保の観点から水結合材比を下げる必要があり、これら混和材の水和進行に伴う、コンクリートの自己収縮や乾燥収縮が大きくなる可能性がある。

- ・膨張材を標準量 $20 \sim 25 \text{kg/m}^3$ 使用することで、使用しない場合より 150×10^{-6} 以上の低減、収縮低減剤を標準量使用することで、 $15 \sim 30\%$ の低減が期待できる。

第5章 コンクリート容器の製造

5.1 材料

コンクリート容器の製造に用いるセメント、骨材、水、混和材料、鋼材、インサート、吊り金具、連結金具、スペーサ等の材料は、原則として、日本工業規格等に規定されたものを使用する。なお、それらの規格は、追補を含む最新版を適用する。

日本工業規格等に規定のないものは、コンクリート容器への使用に問題の無いことを確認するか、信頼できるデータによる。例えば、遮水対策として使用する遮水シートは、日本遮水工協会基準に示された低弾性タイプ(塩化ビニル等、厚さ 1.5mm 以上)あるいはこれらと同等以上の品質を有するものとする。

5.2 配合

コンクリートの配合は、コンクリート容器に要求される目標性能が得られるよう、2012年制定コンクリート標準示方書[施工編]^[7]を参考に、適切な方法によって設計する。

(1) コンクリート特性値

設計基準強度は、材齢 14 日における圧縮強度で 40N/mm^2 以上を標準とする。また、耐久性および使用性に関する特性値は、3 章および 4 章に示す参考値、あるいは信頼できるデータに基づいて決める。

(2) コンクリートのワーカビリティ

コンクリート容器の製造方法を考慮し、使用材料に適したワーカビリティを設定する。例えば、スランプの場合は 21cm 以下、スランプフローの場合は 60cm 以下で、適宜設定すれば良い。

(3) 配合条件

粗骨材の最大寸法、スランプ、配合強度、水セメント比、空気量等の配合条件を設定し、試し練りによって所要の配合条件を満足することを確認する。コンクリートの水セメント比は、コンクリートに要求される強度、耐久性および水密性を考慮して、これらから定まる水セメント比のうちで最小の値を設定する。コンクリートの空気量は、所要のワーカビリティおよび耐凍害性の確保、さらに、化学的侵食(塩劣化)への抵抗性を得る観点から、練上がり時においてコンクリート容積の 4~7%程度に設定することが推奨される。なお、アルカリシリカ反応への対策は、一般的な抑制対策を行うのは当然だが、高耐久仕様(D グレード)の容器では、加えて 3.2.3 項のコンクリートプリズム試験による照査が必要となる。

5.3 製造

鋼材の組立、コンクリートの練混ぜ、型枠、成形、脱型、運搬および貯蔵、組立および接合等は、2012 年制定コンクリート標準示方書[施工編]11 章工場製品に示される方法で、

適切に行わなければならない。

コンクリート容器の養生方法および期間は、その種類、製造方法、取扱い方法等を考慮して、所要の性能を満足するように定める必要がある。コンクリートにひび割れ、剥離、変形等を生じたり、長期強度、耐久性等に有害な影響を与えるものであってはならない。

(1) 蒸気養生

常圧蒸気養生を行う場合には、コンクリート練混ぜ後、2～3 時間以上経ってから養生を開始する。温度上昇速度は1時間につき 20℃以下とし、最高温度は 65～75℃を標準とする。最高温度および最高温度持続時間は、所要の品質が得られるよう工場ごとに設定する。養生終了後は、養生室内の温度を1時間につき約 10℃で徐々に下げ、外気の温度と大差がないようになってから、次の工程に移る(図 5.1 参照)。

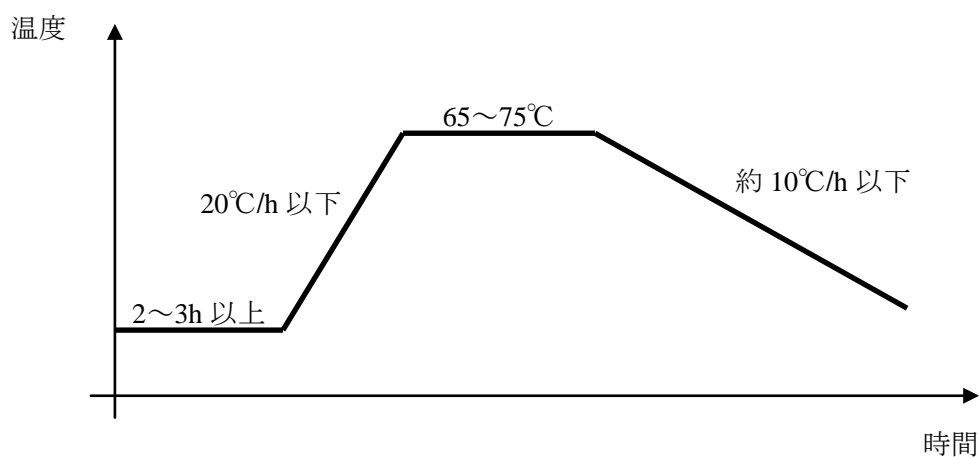


図 5.1 常圧蒸気養生例

(2) 後養生

コンクリートに高い耐久性が要求される高耐久仕様(D グレード)の容器では、所要の性能が得られるまで十分な湿潤養生を行う必要がある。脱型後の後養生としては、水中養生、スプリンクラー等による散水養生、容器内に水を溜める養生等がある。

5.4 品質管理

所要の性能を有するコンクリート容器を製造するため、コンクリートのワーカビリティに関する試験や強度試験等によって品質を管理するのが良い。コンクリートの品質はその養生方法や温度、時間によって左右されることが多いので、特に、最高温度と保持時間、温度の上昇速度および冷却速度等の養生温度の管理を製造計画書に従って行う。なお、品質管理に使用した各種試験の結果は、製造時の養生温度履歴や後養生の有無等と併せて購入者に提出しなければならない。

5.5 製品検査

本節では、製品の出荷前検査、すなわち製造者が製品の性能を保証するために行う検査の方法を示す。出荷前検査の検査項目には、外観、形状、寸法、配筋状況、圧縮強度等があり、処理対象物に応じて適切な項目を定めることとする。

検査項目のうち、外観、形状、寸法、配筋状況は、原則として全数について行う。コンクリート容器にひび割れが生じると、水密性は損なわれ、物質漏洩防止性は著しく低下する可能性がある。このため、全ての製品について、使用上有害なきず、ひび割れ、欠け、そり、ねじれ等がないこと、形状や寸法の誤差、あるいは配筋が、JIS または製造計画書に定められた所定の値以下であることを確認しなければならない。

一方、全ての製品を対象として、水密性やコンクリートの耐久性を確認することは現実的ではない。そこで、3章と4章に示す照査方法により各種耐久性や水密性の照査を行ったコンクリート配合を用いて、十分な品質管理を行って製造した製品は、所要の性能を満足すると見なして良いこととする。したがって、容器と同配合、同養生で作製したコンクリート供試体の圧縮強度を代用特性として所要の品質を確認すれば良い。なお、コンクリートの圧縮強度の判定基準は、JIS A 5364 付属書 A(参考)プレキャストコンクリート製品用コンクリートに準拠して行う。

ただし、焼却飛灰等を保管する場合で、高い材料耐久性が要求される高耐久仕様(D グレード)の容器に対しては、必要に応じて透気試験等を行い、コンクリートの表層品質の良否を確認することが推奨される。

なお、コンクリート容器の受入れ検査については、購入者との協議によって適切な項目を選定して検査を行わなければならない。

第6章 コンクリート容器の維持管理上の留意点

コンクリート容器は、コンクリートのひび割れや漏水等外観上の変化や、コンクリートや補強材の劣化に起因する変状の確認が比較的容易であるといった維持管理上の利点がある。容器の性能低下が確認された場合には、コンクリート容器を交換すれば良く、補修・補強等の大規模な改修工事は不要である。

コンクリート容器の維持管理方法については、例えば、汚染焼却飛灰廃棄物等の最終処分場(遮断型構造)における鉄筋コンクリートの維持管理の考え方^[3]等を参考にして、維持管理計画を定めると良い。

点検では、コンクリートのひび割れ、かぶりコンクリートの剥離・剥落、さび汁、エフロレッセンス、変色等のコンクリート表面の変状のほか、漏水、変位・変形等の外観上の変化を確認することが基本である。

容器仕様である逆蓋構造、防水塗装や遮水シート等は、物質漏洩防止性の確保に不可欠だが、これらの状態を容器外から確認することは難しい。このため、コンクリートの変状を注意深く観察するだけでなく、容器と蓋の接合部の止水材、インサート、吊り金具等の付属設備にも変状が無いことを確認しておく。

なお、放射線遮蔽性は、必要に応じて、容器表面の放射線量を測定し、所定の空間線量以下であることを確認すれば良い。

点検により、容器性能が低下していると判断した場合には、直ちに内容物を取り出し、別の容器に入れ替えることとする。また、現時点の変状は軽微であっても、遮水シートの破損等が疑われる場合には、容器の入れ替えを前提に検討を行うのが良い。

目視点検以外の診断方法には、鋼材腐食やコンクリート中の腐食環境を検知できるセンサ等を予め設置し、これをモニタリングする方法や、コンクリート部材厚さを非破壊試験で測定し、コンクリートの断面欠損等を判定する手法がある。これらは、ひび割れ等の変状が顕在化する前に処理対象物とコンクリートとの接触が生じているかどうかを推定できる可能性があり、予防保全的な対策を検討する上で有用な診断方法と言える。

【参考文献】

- [1]環境省、放射性物質汚染廃棄物処理情報サイト、指定廃棄物の数量(平成 27 年 12 月 31 日時点)、http://shiteihaiki.env.go.jp/radiological_contaminated_waste/designated_waste/
- [2] 日本コンクリート工学会：放射性物質の封じ込めとコンクリート材料の安全利用調査研究委員会報告書、2014.6
- [3]国立環境研究所：汚染焼却飛灰等の最終処分場(遮断型構造)に用いるコンクリートに関する技術資料(第二報)、<http://www.nies.go.jp/whatsnew/2014/20141203/20141203.html>
- [4]コンクリート容器耐久性研究会：コンクリート容器の耐久性実証試験、ダウンロード資料、<http://www.concrete-box.com/index.html>
- [5] 森寛晃、田中敏嗣、橘修、岩城一郎：汚染廃棄物保管用のコンクリート容器の耐久性実証試験、第 71 回土木学会年次学術講演会概要集、CS13-011、pp.21-22、2016
- [6] 森寛晃、東洋輔、多田克彦、橘修、岩城一郎：焼却飛灰との接触によるコンクリートの化学的劣化、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第 16 巻、pp.73-78、2016
- [7]坂本浩幸、肥後康秀：コンクリートによる放射線の遮蔽とコンクリート製容器の開発、太平洋セメント研究報告、第 163 号、pp.59-65、2012
- [8]別府克俊、丸山一平：Cs-137 から生ずるガンマ線に対する各種建築材料の遮蔽データベース、日本建築学会構造系論文集、Vol.79、No.702、pp.1089-1095、2014
- [9]日本コンクリート工学会：放射性物質の封じ込めとコンクリート材料の安全利用調査研究委員会報告書、pp.93-97、2014.6
- [10] 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、2014.7
- [11]土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]
- [12]多田克彦、河野克哉、東洋輔、小室雅人、栗橋祐介、川瀬良司：放射性廃棄物を保管対象とした鉄筋コンクリート製容器の落下抵抗性、土木学会構造工学論文集、Vol.62A、pp.1290-1299、2016.3
- [13]小室雅人、東洋輔、多田克彦、川瀬良司：放射性廃棄物を保管対象とした鉄筋コンクリート製容器の落下挙動解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.38、No.2、pp.805-810、2016
- [14]村田二郎：コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密性設計、技報堂出版、2002.5.22

(執筆者 上原 伸郎、橘 修、森 寛晃)