

焼却灰のセメント固化試験手引書

User's Guide of Cement Solidification Test for Incinerated Ash

中山 卓也 川戸 喜実 大杉 武史 嶋崎 竹二郎
花田 圭司 鈴木 眞司 榊原 哲朗 中澤 修
目黒 義弘

Takuya NAKAYAMA, Yoshimi KAWATO, Takeshi OSUGI, Takejiro SHIMAZAKI
Keiji HANADA, Shinji SUZUKI, Tetsuro SAKAKIBARA, Osamu NAKAZAWA
and Yoshihiro MEGURO

バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所
環境技術開発センター
基盤技術研究開発部

Radioactive Waste Processing and Disposal Research Department
Nuclear Backend Technology Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Sector of Decommissioning Radioactive Waste Management

March 2015

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

焼却灰のセメント固化試験手引書

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター
基盤技術研究開発部

中山 卓也、川戸 喜実、大杉 武史、嶋崎 竹二郎、花田 圭司^{※1}、鈴木 眞司^{※2}、
榊原 哲朗、中澤 修、目黒 義弘

(2014 年 12 月 15 日受理)

日本原子力研究開発機構では、保有する原子力施設等の研究開発活動で発生した放射性の可燃性及び難燃性廃棄物を減容のため焼却処理をしている。焼却処理により発生した焼却灰はセメント固化して処分する計画としている。

焼却灰は各拠点で発生するが、焼却炉型や廃棄物により特徴が異なるため、セメントの固化条件を設定するための基礎試験を拠点毎に行い、データを取得する必要がある。また、セメント固化試験においては、共通に評価すべき項目があるため、統一した手順で試験を進めていくことが重要である。

基盤技術研究開発部廃棄物処理技術グループでは、いくつかの拠点の焼却灰を用いて、基礎的なセメント固化試験を行い、圧縮強度の違いや溶出性の違いについてのデータを取得してきた。この試験の中で、焼却灰のセメント固化試験では用いる試薬の化学形や混練の手順によっても固化体の性質が影響を受けることを確認した。

本手引書は、セメント固化処理設備の設計に向けた基礎的なデータ取得を計画する際に、試験方法や条件設定の参考として利用するために作成した。焼却灰のセメント固化試験において評価すべき項目として、法規制において廃棄体に求められる要件について整理し、一軸圧縮強度や流動性などの技術的な 7 つの評価項目を抽出した。試験を計画する際に必要となる焼却灰、セメント、水、混和材料の選定方法の項目、試験固化体の作製手順の項目及び膨張、一軸圧縮強度、溶出量等の評価の方法の項目については、これまでの知見から注意すべき点を記載した。同時に、固化条件の最適化に向けた試験フロー及び調整の指針についてまとめた。最後に、各拠点でセメント固化試験に着手する際の助けとなるよう、目標とする固化条件を満足する固化可能な範囲の目安及び固化技術開発の課題について取りまとめたものである。

核燃料サイクル工学研究所：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

※1 技術開発協力員

※2 特定課題推進員

User's Guide of Cement Solidification Test for Incinerated Ash

Takuya NAKAYAMA, Yoshimi KAWATO, Takeshi OSUGI, Takejiro SHIMAZAKI,
Keiji HANADA^{※1}, Shinji SUZUKI^{※2}, Tetsuro SAKAKIBARA, Osamu NAKAZAWA and
Yoshihiro MEGURO

Radioactive Waste Processing and Disposal Research Department
Nuclear Backend Technology Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Sector of Decommissioning Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 15, 2014)

The combustible and flame-retardant radioactive wastes generated as a result of the research activities in Japan Atomic Energy Agency (JAEA) are incinerating to reduce their volume. The incinerated ash is planned to be solidified using cement for disposal.

Since the properties of ashes generated in each institute of JAEA are varied with the type of incinerator and the wastes to be incinerated, it is necessary to do fundamental solidification tests in each institute to decide operating conditions of the planning cement solidification facility. It is important to standardize evaluating methods of cement and solidified waste because some characters depend on measuring method.

Fundamental solidification tests for ash generated in several institute have ever been carried out in Radioactive Waste Processing and Disposal Research Department to obtain some characters e.g. a difference of compressible strength or solubility between ashes. It was found that properties of solidified product were affected by chemical form of additive reagent and by orders on procedure. This user's guide have been prepared how to decide the cement solidifying conditions of ash to design the cement solidification facility in JAEA. Requirements on the regulations of solidified radioactive waste have been examined and seven technical criteria, e.g. compressive strength, fluidity, have been selected as characters to be evaluated. Some empirical notes about selection of cement, admixtures, procedure on making a test piece, evaluation of expanding, compressive strength, solubility have been described. The strategy of tests and tips for finding optimized solidification condition has been summarized. Finally the example of optimized conditions satisfied the requirements and some problems to be solved have been described.

Keywords: Incinerated Ash, Cement Solidification, User's Guide

※1 Collaborating Engineer

※2 Special Topic Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. 焼却灰のセメント固化試験で評価すべき項目	2
2.1 固化体に求められる要件に係る項目	2
2.1.1 埋設規則で定められる技術基準	2
2.1.2 埋設施設に依存する要求事項	3
2.2 固化体の作製条件に係る項目	4
2.3 焼却灰のセメント固化試験で評価すべき項目のまとめ	5
3. 焼却灰のセメント固化試験における材料	7
3.1 セメント及び混練水	7
3.1.1 セメント	7
3.1.2 混練水	12
3.2 焼却灰	13
3.2.1 焼却灰の取扱い方法	13
3.2.2 固化試料に影響がある焼却灰の特性	17
3.3 混和材料	18
4. 焼却灰のセメント固化試験における固化試料作製作業上の注意事項	23
4.1 秤量	23
4.2 混練	23
4.3 養生	26
5. 焼却灰のセメント固化試験における評価項目とその評価方法	27
5.1 流動性	27
5.2 硬化時間	27
5.3 ブリーディング	28
5.4 膨張	28
5.5 圧縮強度	29
5.6 溶出量	30
5.7 材料及び固化試料の分析	30
5.7.1 分析の前処理	30
5.7.2 分析方法	31
6. 焼却灰のセメント固化試験フローと固化可能な範囲の目安	34
6.1 焼却灰のセメント固化試験フロー	34
6.2 セメント固化試験手順	37
6.3 目標とする固化要件を満足する固化可能範囲の目安	44
6.4 現状におけるセメント固化技術開発の課題	48
7. 終わりに	51
参考文献	52
付録 用語集	54

Contents

1. Preface.....	1
2. Characters to be evaluated on ash solidification test	2
2.1 Required characters on solidified waste package.....	2
2.1.1 Technical criteria in the regulation of radioactive waste disposal	2
2.1.2 Technical requirements on the disposal facility	3
2.2 Solidifying conditions.....	4
2.3 Summary of characters and conditions of solidification.....	5
3. Working materials	7
3.1 Cement and mixing water	7
3.1.1 Cement.....	7
3.1.2 Mixing water	12
3.2 Incinerated ash	13
3.2.1 Handling of incinerated ash.....	13
3.2.2 Properties to affect solidification.....	17
3.3 Admixtures.....	18
4. Precautions on making test pieces	23
4.1 Weight measuring	23
4.2 Mixing.....	23
4.3 Curing	26
5. Characters to be evaluated and evaluating methods	27
5.1 Fluidity.....	27
5.2 Hardening time	27
5.3 Bleeding.....	28
5.4 Expansion.....	28
5.5 Compressive strength.....	29
5.6 Elution.....	30
5.7 Analysis of working materials and solidified test pieces	30
5.7.1 Pretreatment of analysis.....	30
5.7.2 Methods of analysis	31
6. Guideline of test procedure and conditions	34
6.1 Test procedure.....	34
6.2 Procedure of cement solidification	37
6.3 Solidifying conditions.....	44
6.4 Challenge remains.....	48
7. Afterword.....	51
References.....	52
Appendix Glossary	54

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下「機構」という）の各拠点の原子力施設における研究開発活動で発生した放射性の可燃性及び難燃性廃棄物は、各拠点において減容のために焼却されている。焼却により発生した焼却灰はセメント固化して処分する計画としており、将来のセメント固化処理設備の設計に向けてプロセスフローや基本的な設備仕様等についての検討が進められている。しかしながら、放射性廃棄物を焼却した焼却灰のセメント固化技術に関して、これまで機構において実施した経験がなく、技術的な知見が乏しい。また、電力会社における知見など利用できるものも少ない。他方、産業廃棄物の分野では、焼却灰中の重金属の溶出を抑える方法の一つとしてセメント固化処理が行われている。しかし、産業廃棄物のセメント固化処理は、原子力施設から発生した放射性廃棄物とは適用される法律や規制が異なり、参考となる点が少ない。原子力施設から発生した焼却灰のセメント固化体は、原子炉等規制法の関係法令に定められているセメント材料や作製した固化体の圧縮強度等の技術基準を満足しなければならない。加えて、埋設施設から要求がある場合には、規則で定められている性能以上の固化体を作製しなければならない。

このような背景から、基盤技術研究開発部廃棄物処理技術グループ（以下「基盤部」という）では、焼却灰のセメント固化処理設備の設計に資するため、セメントの固化処理における基本的な固化条件を把握することを目的に、基礎試験を進めてきた¹⁾。これまでの基礎試験により、焼却灰は焼却対象物の種類や焼却温度等により元素組成や物理的性状が異なることで、セメントで固化した際に、混練のしやすさや固化体の強度などに大きな違いが生じることを確認した。このことから、元素組成や物理的性状が異なる焼却灰を同一条件で固化することは容易ではない。従って、機構で発生する全ての焼却灰に対して統一した固化条件でセメント固化体を作製することは難しく、各拠点の焼却灰ごとに最適なセメント固化処理条件を設定する必要がある。このため、各拠点において、発生する焼却灰に対してセメント固化試験を実施し、データを取得しなければならない。

本手引書は、各拠点で焼却灰のセメント固化試験を実施する際に、取得すべきデータや試験方法、操作手順及び注意事項について言及するとともに、これまでの試験結果から得られた知見、参考及び根拠となる文献調査結果をまとめたものである。

焼却灰のセメント固化試験は、固化条件を変えて作製した固化試料の評価・分析作業を繰り返し、最終的に固化体に求められる要件を満足する固化条件を見いだす一連のプロセスである。本手引書では、まず焼却灰のセメント固化体に求められる要件を整理する。引き続き、固化試料を作製し、評価・分析を行う際の個別の作業について、これまでに実施した試験から得られた知見を基に作業の方法と注意点を示す。最後に、固化試料を作製する作業フロー及び混和材料などを使用して混練性、固化性能を向上させるための固化試験フローを示した。また、各拠点において、今後実施する焼却灰のセメント固化試験の参考となるように、いくつかの焼却灰についての固化可能な固化条件の目安及び固化技術開発に必要な課題についても示した。なお、現時点で解決できていない課題や解明できていない現象も残されており、本手引書の利用に際してはこの点を留意願いたい。

2. 焼却灰のセメント固化試験で評価すべき項目

焼却灰のセメント固化試験の目的は、各拠点で発生する焼却灰をセメントで固型化処理したものが、廃棄体として埋設処分できるよう、セメント固化処理設備の設計及び運転条件を設定するための基礎的なデータを取得することにある。当然のことながら、最終的に運転条件の設定は、セメント固化処理のモックアップ設備等を用いて行う。しかしながら、セメント固化処理設備の設計前に、各拠点がそれぞれの焼却灰の特性を評価し、セメント固化試験によって得られた結果を設備設計及び運転条件の設定に反映させることは、固化設備の計画的な整備・運転にとって重要である。焼却灰の特性は拠点ごとに異なるとしても、焼却灰のセメント固化試験では、各拠点ともに共通的に評価すべき項目がある。

焼却灰のセメント固化試験で評価すべき項目としては、廃棄体として埋設処分するために固化体に求められる要件から評価すべきものと、セメント固化処理設備の設計や運転条件を設定するために評価すべきものの大きく2つに分けられる。これらの評価すべき項目について、以下に述べる。

2.1 固化体に求められる要件に係る項目

現行の法体系では、廃棄体の要件は技術基準として「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」²⁾（以下「埋設規則」という）及び「核燃料物質等の第二種廃棄物埋設に関する措置等に係る技術的細目を定める告示」³⁾（以下「埋設告示」という）において定められている。廃棄体の区分は埋設告示の第四条に定められており、次の2つに分類されている。告示第四条の2項に定められているもので、通常「均質・均一固化体」と呼ばれるものと、告示第四条の3項に定められているもので、通常「充填固化体」と呼ばれるものである。均質・均一固化体を定める告示第四条2項では、「液体状の放射性廃棄物又はイオン交換樹脂、焼却灰、フィルタスラッジその他の粉状若しくは粒状の放射性物質若しくはこれらを成型した放射性廃棄物については…」と定められており、焼却灰を固めた固化体は均質・均一固化体の区分となる。

埋設しようとする廃棄体は申請に基づいて、原子力規制庁（以下「規制庁」という）による廃棄体の確認が行われ、埋設規則、埋設告示に定める廃棄体基準及び埋設事業の許可に合致していることが確認される。国内において実際に埋設処分を行っている事例に倣って、焼却灰のセメント固化体に求められる要件を以下に述べる。

2.1.1 埋設規則で定められる技術基準

焼却灰のセメント固化体に求められる要件は、廃棄体の技術基準として埋設規則及び埋設告示において定められている。これらは、法的に定められている基準であり、これらを満たすことを示す必要がある。埋設規則（第八条）に示される技術基準を以下に示す。

- ・放射線障害防止のため、放射性廃棄物を原子力規制委員会の定める方法により容器に封入し、又は容器に固型化してあること。
- ・放射能濃度が申請書等に記載した最大放射能濃度を超えないこと。
- ・表面の放射性物質の密度が原子力規制委員会の定める表面密度限度の十分の一を超えないこと。
- ・廃棄体の健全性を損なうおそれのある物質を含まないこと。

- ・埋設された場合において受けるおそれのある荷重に耐える強度を有すること。
- ・著しい破損がないこと。
- ・容易に消えない方法により、廃棄体の表面の目につきやすい箇所に、放射性廃棄物を示す標識を付け、及び当該廃棄体に関して前条の申請書に記載された事項と照合できるような整理番号を表示したものであること。

埋設告示では「原子力規制委員会の定める方法」が具体的に示されている。そのうち焼却灰のセメント固化に係るものを以下に示す。

- ・固型化材料は、日本工業規格 JIS R 5210(1992)若しくは JIS R 5211(1992)に定めるセメント又はこれらと同等以上の品質を有するセメントであること。
- ・容器は JIS Z 1600 に定める金属容器又はこれと同等以上の強度及び密封性を有するものであること。
- ・セメントを用いて放射性廃棄物を固型化する場合は、固型化された放射性廃棄物の一軸圧縮強度が 1,470 kPa 以上であること。
- ・固型化に当たっては、固型化材料若しくは固型化材料及び混和材料と放射性廃棄物を均質に練り混ぜ、又はあらかじめ均質に練り混ぜた固型化材料若しくは固型化材料及び混和材料と放射性廃棄物を均一に混合させること。この場合において、容器内に有害な空隙が残らないようにすること。

埋設規則及び埋設告示の中では、使用するセメント材料に関する「固型化材料は、日本工業規格 JIS R 5210(1992)若しくは JIS R 5211(1992)に定めるセメント又はこれらと同等以上の品質を有するセメントであること。」及び、セメント固化体の強度に関する「セメントを用いて放射性廃棄物を固型化する場合は、固型化された放射性廃棄物の一軸圧縮強度が 1,470 kPa 以上であること。」が具体的に示されている。

その他の項目については、埋設施設の許可、固化処理設備の性能及び廃棄体の取扱い等に依存する項目となっており、具体的な基準については、各々の要求事項を確認する必要がある。

2.1.2 埋設施設に依存する要求事項

埋設規則及び埋設告示の中では、埋設施設の許可に依存する項目がある。該当するものは、「放射能濃度が申請書等に記載した最大放射能濃度を超えないこと。」及び「埋設された場合において受けるおそれのある荷重に耐える強度を有すること。」である。また、埋設施設を運営するに当たって、与えられた許可に定められた項目も満たす必要がある。

現段階では、機構から発生する廃棄物を埋設する埋設施設に関して、天澤ら⁴⁾、仲田ら⁵⁾によって埋設施設及び埋設環境の安全を確保する観点から以下のように共通事項等の検討が行われている。

この中で、廃棄物の処理及び清掃に関する法律（以下「廃棄物処理法」という）に定められる有害物質については、埋設施設の許可に記載される可能性がある技術基準と考えられており、加えて考慮する必要がある。最終的に、埋設施設に依存する要求事項としては、以下のとおりである。

- ・廃棄物処理法に規定される管理型産業廃棄物処分場の有害物質に係る溶出率の基準を満足すること。
- ・埋設された場合において受けるおそれのある荷重に耐える強度を有すること。

具体的な数値として、有害物質の溶出率の基準については、「金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令（昭和48年2月17日総理府令第5号）」に記されている⁶⁾。また、埋設された場合において受けるおそれのある荷重については、仲田らの試験からセメントを充填したドラム缶中のセメントの一軸圧縮強度約6 MPaが荷重に耐えることができる強度として記されている⁵⁾。ただし、最終的に満足すべき値は、埋設施設の許可によって決定される。現段階では、あくまでも試験を行う上での参考値であることに注意が必要である。

2.2 固化体の作製条件に係る項目

埋設規則及び埋設告示の中では、固化処理設備の運転条件に依存する項目がある。「固型化に当たっては、固型化材料若しくは固型化材料及び混和材料と放射性廃棄物を均質に練り混ぜ、又はあらかじめ均質に練り混ぜた固型化材料若しくは固型化材料及び混和材料と放射性廃棄物を均一に混合させること。この場合において、容器内に有害な空隙が残らないようにすること。」の項目がそれに当たる。この項目について新規に作製される廃棄体の確認は、固化体の性状を一本一本確認するのではなく、固型化に用いた設備とその運転条件の記録により、確認する方法が取られる。これは、固化体要件にある均一な練り混ぜや有害な空隙は、セメント固化処理設備の設計及び焼却灰とセメントを混ぜた際 conditions によって左右されるものであり、性能を満足することができる運転条件を標準的な作製方法として定める必要がある。

このことから、セメント固化処理設備設計と運転条件の設定は廃棄物を埋設する上で重要になる。これらの項目は、当然の事ながら実機を用いてデータを取得する必要があるが、セメント固化処理設備の設計にあたっては、先に小規模な試験において物性変動の大きさなど必要な項目を把握しておく必要がある。

実際にセメント固化処理設備の設計としてどのような点に注意を払うべきかを考える上で、類似の既存設備の情報は有用である。セメント固化処理設備については、原子力科学研究所（以下「原科研」という）に設置されている廃液のセメント固化処理設備が参考になる。セメント固化処理設備は、外部混練式（アウトドラム方式）であり、ホッパーからセメントと廃液が混練槽内に投入された後、攪拌翼を用いて機械的に混練される。その後、混練槽下部のノズルからドラム缶内に流し出される。ドラム缶は、コンベア上を移動し静置される。予定された運転が終了した後、設備の洗浄が行われる。これが基本的な設備の運転である。

セメント固化プロセスの主工程を単位操作に区分すると、液体の混合・攪拌操作及び流体輸送操作である。この単位操作において、セメント固化処理設備の設計時に最も重要な物性値は、流動性（粘性）である。流動性は、流れやすさを表すだけでなく、混練のしやすさ、攪拌のしやすさを支配する。流動性が低すぎれば混練が難しくなり、均一化するまでの時間や混合のための動力が多く必要である。逆に流動性が高過ぎると、流下ノズルの閉塞しない口径の設計や流下量の制御が難しくなる。流動性の変動が大きいというのも設計上の問題となる。また、設備の一連の流れを見ると、最終的にドラム缶内でセメントが

固型化することが必要であることから、どの程度の時間で硬化するのかと言った点も重要となる。硬化が早すぎれば、十分な混練時間が取れない、洗浄が困難であるなどの問題が発生し、硬化が遅すぎれば、ドラム缶内のセメントが流出しないような措置が必要となるかもしれない。このように、セメント固化処理設備を設計し、固化体の標準的な作製方法として運転条件を定めるためには、流動性、硬化速度、発熱量などの情報とその変動の把握が必要となる。

その他に、セメント材料や焼却灰自体が持つ性質がセメント固化に与える影響を考慮すべき項目もある。例えば、セメントが硬化する過程で、余剰な水分が分離するブリーディングや焼却灰と水が接触した際に発生する気体などである。ブリーディングは、固体と液体の混合物であるセメントにおいて、固体と液体の密度差で、密度の小さい水が上部へ移動する現象であり、ほとんどのコンクリートで発生する自然な現象である。しかしながら、ブリーディング水と同時にセメント中の成分が上部表面に移動することから、放射性廃棄物を含む場合には放射性物質がブリーディング水とともに上昇し、表層に移動することで、放射性物質が不均一に分布する原因となる。また、ブリーディング自体が、材料分離であり均一な練りまぜが行われたかの指標となるという考え方もあるため、試験において考慮すべき項目である。また、焼却灰については、焼却対象物、炉の形式、加熱方式などにより元素組成、化学形や粒径などの性状が複雑に変化する。一部の焼却灰成分は水と接触することで、ガスを発生することが知られている。セメント混練時のガス発生は、セメント固化体を膨張させる原因となるため、考慮すべき項目である。

以上のように、固化体の作製条件に係る項目は、法的に明確な基準が定められているものではなく、満たすべき条件は廃棄体確認の方法や基準、設備構造に左右される。しかもこれらの方法、基準、構造については、いくつもの選択肢が考えられるため、試験時の評価項目やその基準を決めることは難しい。しかしながら、少しでも実際のセメント固化処理設備の運転に対して影響が懸念される事項は、設計による解決方法が想定できたとしても、小規模な試験において変動の大きさや範囲などに関する基礎データを取得することで、より堅実に廃棄物処理処分の計画を進めることに貢献できるため、試験時に考慮すべきである。

2.3 焼却灰のセメント固化試験で評価すべき項目のまとめ

以上に述べてきたように、焼却灰のセメント固化体を廃棄体として埋設するためには、法的に記載された要求事項及びセメント固化処理設備の設計・運転上の条件を同時に満足させる必要がある。

法的に記載された要求事項としては、固型化された放射性廃棄物の一軸圧縮強度が 1,470 kPa 以上であること。

また、埋設施設からの要求事項としては、以下のとおりである。

- ・ 廃棄体が埋設された場合において受けるおそれのある荷重に耐える強度を有すること。
- ・ 埋設施設の健全性（放射性核種の移行挙動、ガス発生）に著しい影響を与える量の物質を含まないこと。
- ・ 廃棄物処理に規定される管理型産業廃棄物処分場の有害物質に係る溶出率の基準を満足すること。

さらに、セメント固化処理設備の設計上の事項としては、以下のとおりである。

- ・混練物の均一な練り混ぜができること。
- ・廃棄体容器内に有害な空隙が残らないようにすること。
- ・セメント固化処理設備の設計・運転に支障のない流動性があり、硬化時間が適切であること。
- ・セメント固化処理設備の設計・運転において障害となりうる現象（ブリーディング、膨張）が見られないこと。

このことから、焼却灰のセメント固化試験において評価すべき項目としては、固化試料の圧縮強度、ガス発生量、有害物質の溶出量、混練物の流動性、固化試料の膨張量、混練物の硬化時間、ブリーディングの発生が抽出される。また、定めた一定範囲内の条件で、基準を満たす固化体を作製する必要があることから、対象となる焼却灰物性の変動や評価項目の変動についても知見として重要である。

さらに、新しい固型化材料の品質に関するデータ、圧縮強度を間接的に示すための超音波伝播速度のデータ、健全性を損なう物質に関するデータなど、各拠点の目的や制約に応じて評価項目を追加する必要がある。

3. 焼却灰のセメント固化試験における材料

焼却灰のセメント固化試験において使用する材料について、その種類、特徴及び取扱いで注意すべき点を以下に述べる。

3.1 セメント及び混練水

焼却灰のセメント固化試験において、セメント及び混練水は、固化体性能及び固化体作製条件を左右する重要な条件である。故に、その選定と使用する材料の管理は、適切に行うべきである。

3.1.1 セメント

セメントについては、埋設告示に日本工業規格 JIS R 5210(1992)若しくは JIS R 5211(1992)に定めるセメント又はこれと同等以上の品質を有するセメントと定められている。定められているセメント種類を表 3-1 に示す。このことから、焼却灰のセメント固化試験においても定められたセメントを用いることが望ましい。ただし、規制庁の運用要領では、JIS に定めるセメントと同等以上のものも規定されていることから、焼却灰のセメント固化に効果的と考えられる新規のセメント材料にも選択の余地はある。

表 3-1 埋設告示に定められているセメント

規格	セメント
JIS R 5210(1992) 「ポルトランドセメント」	普通ポルトランドセメント 早強ポルトランドセメント 超早強ポルトランドセメント 中庸熱ポルトランドセメント 耐硫酸塩ポルトランドセメント
JIS R 5211(1992) 「高炉セメント」	A 種 B 種 C 種

これまでに、普通ポルトランドセメント（以下「OPC」という）、高炉セメント B 種（以下「BB」という）及びアーウィン系低アルカリセメント（以下「LAC」という）を試験に用いた実績がある。以下に、用いた実績のあるセメント材料の特徴を示す。

(1) 普通ポルトランドセメント（OPC）

コンクリート工事など一般的に広く使用されているセメントである。日本で使用される全セメントの約 80%が普通ポルトランドセメントである。また、高炉セメント等の混合セメントの母体としても使用されている。

日本で製造されているポルトランドセメントは、エーライトと呼ばれる $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 系鉱物(C_3S)、ビーライトと呼ばれる $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 系鉱物(C_2S)、一般的にアルミネート相と呼ばれる $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 系鉱物(C_3A)、フェライト相と呼ばれる $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 系鉱物(C_4AF) の 4 種類の主要クリンカーとせっこう ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) の 5 種の基本鉱物で構成されてい

る。JIS R 5210 に規定されている 6 種類と白色ポルトランドセメント及び油井セメント等は、その用途にあわせて、基本鉱物の配合調整、成分の添加及び粒度調整が行われている所に違いがある。ポルトランドセメントの化学成分の一例を表 3-2、化合物組成の一例を表 3-3 に示す。

その中で OPC は、主要クリンカーである C_3S や C_2S の含有量がポルトランドセメントの平均的な値で、中間程度の強度発現をもつように配合した代表的なポルトランドセメントである。

表 3-2 ポルトランドセメントの化学成分の例⁷⁾

種類	(wt%)							
	Ig.loss.	Insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
普通	0.6	0.2	22.0	5.5	3.0	64.8	1.4	1.9
早強	0.8	0.2	20.8	5.0	2.8	66.0	1.2	2.8
超早強	0.9	0.3	20.0	5.2	2.6	66.2	1.2	3.4
中庸熱	0.3	0.1	23.0	5.0	3.5	64.7	1.3	1.5
低熱	0.7	0.1	26.6	2.7	2.4	63.7	0.7	2.2
耐硫酸塩	0.5	0.1	22.4	3.5	5.3	64.8	0.7	1.9

ig.loss.: Ignition Loss(強熱減量)加熱により減少する重量

Insol.:insoluble residue(不溶残分)水に溶解しない成分重量

表 3-3 ポルトランドセメントの化合物組成の例⁷⁾

種類	(wt%)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
普通	50	26	8	9
早強	66	10	8	9
超早強	70	5	10	8
中庸熱	44	35	5	11
低熱	29	55	2	8
耐硫酸塩	57	23	2	13

(2) 高炉セメント B 種 (BB)

高炉セメントは、普通ポルトランドセメントに高炉スラグを混合したもので、高炉スラグの混合量により A 種、B 種及び C 種の 3 種類がある。高炉セメントの化学成分の一例を表 3-4 に、JIS R 5211 に規定されている品質を表 3-5 に示す。使用した B 種は、30~60%の高炉スラグが混合されている。高炉セメントでは、ポルトランドセメントの水和により発生した水酸化カルシウムによって高炉スラグが徐々に水和反応する。したがって、ポルトランドセメントに比べると水酸化カルシウムの生成量が少なく、硬化体の組織が緻密になるため、OPC に比べ弱酸、塩類溶液、海水などに対する抵抗性がある。一方、高炉セメントは OPC に比べ養生初期の強度発現性は小さいが 3 ヶ月以上の長期では上回る。また、乾燥収縮、中性化速度が大きいといった特徴がある。

表 3-4 高炉セメントの化学成分⁸⁾

		(wt%)								
セメント	種類	Ig.loss	Insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	total
高炉セメント	B 種	1.2	0.2	25.9	8.5	1.9	54.8	3.7	1.9	98.1

ig.loss.: Ignition Loss(強熱減量)加熱により減少する重量

Insol.:insoluble residue(不溶残分)水に溶解しない成分重量

表 3-5 高炉セメントの品質⁹⁾

種類		A 種	B 種	C 種
混合割合	wt%	5 を超え 30 以下	30 を超え 60 以下	60 を超え 70 以下
比表面積	cm ² /g	3,000 以上	3,000 以上	3,000 以上
凝結	始発 min	60 以上	60 以上	60 以上
	終結 h	10 以下	10 以下	10 以下
安定性		良	良	良
圧縮強さ	3 日	12.5 以上	10.0 以上	7.5 以上
	7 日	22.5 以上	17.5 以上	15.0 以上
	28 日	42.5 以上	42.5 以上	40.0 以上
酸化マグネシウム	wt%	5.0 以下	6.0 以下	6.0 以下
三酸化硫黄	wt%	3.5 以下	4.0 以下	4.5 以下
強熱減量	wt%	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下

(3) 低アルカリセメント(LAC)

セメントの製造過程において用いるクリンカーの材料設計を変更し、生成される主要水和物の特徴を改良した低アルカリ性セメントである。クリンカー粉砕物に、高炉スラグの微粉末、無水セッコウ、シリカフュームが混合されている。このことは、OPC とは含まれる鉱物自体が異なることを示している。結果として、生成する水和物が異なり、OPC 等の主要水和物が水酸化カルシウムや高カルシウム型のカルシウムシリケート水和物であることに對して、エトリンガイト等の低カルシウム型水和物が生成する。電力中央研究所-太平洋コンサルタントで開発されたものであり、JIS に定められたセメントではない。しかしながら、混練物の pH が低いこと、生成する水和物が異なることから、特定の反応などを明らかにするために比較対象として試験に用いることにはメリットがある¹⁰⁾。

以上に述べたように、セメント材料の選択に関しては、使用するセメントによって性質が異なるので、注目している項目に対して適切なセメントを利用する必要がある。高炉セメントは OPC をベースとしているが、固化試験試料で用いた場合には異なる結果が得られる。焼却灰のセメント固型化材料として、OPC と BB を用いた場合の例を表 3-6 に示す¹¹⁾。試験では、都市ゴミ一般焼却炉底灰にカドミウム及びクロムを元素組成比で 1% となるように試薬で加え、灰割合 40%、水セメント比 1.2 とし、OPC 及び BB それぞれ混練固化を行った。項目により、OPC と BB が同様の結果を示す場合と異なる結果を示す場合があった。LAC については、混練物の pH が低いという点で、OPC や BB とは異なる挙動が見られる。各セメント混練物の pH 測定値例を表 3-7 に示す。焼却灰成分とセメント材との反応があり、そのメカニズムを特定する試験などを実施する場合、セメント混練物中の pH を変化させることができる LAC を用いることは効果的である。

以上のように、セメント材料の選定は、埋設告示に定められたセメントや pH が異なるセメントなど多くの選択肢がある。それぞれに固化試料へ与える影響が異なることから、試験目的に応じた種類を選定すべきである。

表 3-6 焼却灰の固化材料として OPC 及び BB を使用した場合の比較

評価項目		評価基準/目安	OPC	BB	備 考
流動性		250 mm 以上	○	◎	減水剤を添加した状態で比較
硬化日数		1 日	○		目視（接触）観察
一軸圧縮強度		1.47 MPa 以上	○	◎	
溶出性	Cd	1.5 mg/L 以下	○		ブランク試料で比較
	Cr	0.3 mg/L 以下	×	◎	ブランク試料で比較

※：表中の記号は、評価基準を満足したものを「○」又は「◎」（性能の高い方に「◎」を記載）、評価基準を満足しなかったものを「×」としている。

表 3-7 セメント混練物の pH 測定値例

セメント	pH
OPC	12.55
BB	12.51
LAC	11.22

3.1.2 混練水

混練水については、廃棄体の作製上、特段の決まりはない。工程から発生する排水処理の合理化などの目的で、セメント混練にセメント固化処理設備の洗浄水を用いる等も可能である。しかしながら、セメントの硬化過程は、混練水中へのカルシウムの溶解と混練水中での成分の移動などに支配されるため、混練水の成分による影響は大きいと容易に推察される。

試験等に用いることができる水の種類としては、工水、上水、純水など、含有物量や精製の方法により区別されている。いずれの水も、セメント固化試験に使用可能である。しかしながら、セメントの硬化過程において、含有成分とその含有量の違いにより、どのような物性が変化するかについては明確になっていない。コンクリート総覧には、10,000 ppm程度から変化がみられるとの記載がある¹²⁾ことから、水中の成分の変動が小さく、出来る限り同一と見なせる水を利用することが望ましい。

実際のセメント固化処理設備では、混練作業後の混練タンクや攪拌翼に付着したセメントを高圧洗浄等により洗浄する必要がある。この洗浄後の回収水は、セメント固化処理に伴う二次廃棄物となるため、セメントの混練水として利用することができれば、二次廃棄物の低減につながる。しかし洗浄後の回収水を混練水として利用した場合、混和材料の性能、セメントの凝結・硬化、強度発現、膨張、流動性の品質に悪影響を与える可能性がある。一般のセメント業界においても、混練器具を洗浄した後の回収水を使用する際についての検討がなされている。建築工事標準仕様書(JASS 5)、コンクリート標準示方書(RC 示方書)及び JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」附属書 3 に回収水の品質規定が定められており、JCI 回収水研究委員会の調査研究によれば、回収水を混練水として使用する場合には、上澄水は混練水として上水と同様に使用できるが、スラッジ水については、以下の項目を満たすことが必要とされている¹³⁾。

- ・スラッジ固形分はコンクリートの単位セメント量の 3%以下とする。
- ・水セメント比及びコンシステンシーを一定とするためには、スラッジ固形分 1%につき単位水量、単位セメント量を 1~1.5%増やす。
- ・細骨材率をスラッジ固形分 1%につき約 0.5%減らす。
- ・混和材料の一種である AE 剤は空気量を上水を用いたコンクリートと同じにするために、必要に応じて増量する。減水剤についても同様の傾向があるので、必要に応じて空気量調整剤を増量する。

これまでに、実際の処理工程を考慮し、洗浄後の回収水を混練水に用いた場合に固化試料に変化が生じるかを確認している。試験は、核燃料サイクル工学研究所（以下「サイクル研」という）の一般焼却炉底灰を灰割合 30%、水セメント比 1.5 とし、OPC を使用した。結果として、流動性などには変化が見られなかったが、洗浄回数が増す毎に強度が低下し、2 回洗浄後の回収水を混練水として使用した場合には、10%以上の強度差が見られた。

以上のように、混練水として使用可能な水の候補には、多くの選択肢があるが、使用する水により、結果が異なる可能性が大きいことから、試験目的に応じた混練水を選定するとともに、同一のものをを用いて試験を行う必要がある。

3.2 焼却灰

焼却灰のセメント固化試験において、焼却灰は固化する対象であり重要である。加えて、焼却灰は潮解性を持つ化合物や小さな粒子が含まれている物も含むため、その取扱いには注意を要する。

焼却灰は、可燃物を焼却処理した後、炉底から排出される残渣（以下「炉底灰」という）と、排気系のフィルターなどで除去され回収されるばいじん（以下「飛灰」という）の大きく2種類に分類される。炉底灰は、主に焼却物中の無機成分から構成されている。一方、飛灰は、焼却物中の無機成分及び焼却中の雰囲気成分が、焼却炉の熱により揮発し、凝集した化合物である。いずれも、焼却物、焼却温度や焼却炉形式によって、その粒径や組成といった特性が変化するため、試験に用いる際には、注意が必要である。

これまでに、サイクル研の一般焼却炉から採取した焼却灰及び原子炉廃止措置研究開発センター（以下「ふげん」という）や原科研の放射性廃棄物焼却炉から採取した放射性焼却灰（以下「放射性焼却灰」という）を用いて試験を行ってきた。その知見として、焼却灰のセメント固化試験において、実際に行っている焼却灰の取扱い方法を紹介するとともに、焼却灰の違いが固化試料に与える違いの例について以下に示す。

3.2.1 焼却灰の取扱い方法

(1) 焼却灰の前処理（混入物の除去）

焼却処理される廃棄物は主に紙、布、ゴム、プラスチック類などの可燃物であるが、ホチキス針やクリップなどの小さな金属も混入している場合がある。また、焼却灰中には灰化されていない未燃物も含まれている。金属や大きな未燃物の混入は、セメント固化試験時に試料間の反応の違いや固化条件の違いに影響を与えるため、好ましくない。これら金属や大きな未燃物の混入は、焼却処理前の廃棄物の分別状態、焼却処理の条件に依存する。実際に、試験用で採取した一般焼却炉の焼却灰には、多くの金属片や未燃物が含まれていた。このため、試験に使用する前に、全ての焼却灰について目視と人手により比較的大きな金属類及び未燃物の除去を行った。細かな金属などは、磁石を用いて除去するとともに、ふるいを用いて分級し、1,180 μm 以下の焼却灰のみを使用した。磁石を用いた除鉄の様子について、図 3-1 に示す。ふげんや原科研から発生した放射性焼却灰では、未燃物や金属片が少なかったことから、ふるい分別などはせず比較的大きなもののみを人手で除去して使用した。



図 3-1 磁石を用いた除鉄の様子

(2) 焼却灰の均一化

焼却灰は、同じ焼却炉から採取したものでも、その発生時期等により組成が変動する。そのため、試験に用いる焼却灰の採取には注意が必要である。例としてふげん放射性焼却灰の組成変動を図 3-2、図 3-3 に示す。発生時期の異なる焼却灰について、炉底灰は 6 本のドラム缶、飛灰は 4 本のドラム缶からそれぞれ 1 サンプルを採取し、エネルギー分散型 X 線分析装置で元素分析したものである。ドラム缶内の組成変動は考慮せず、採取サンプルがドラム缶を代表しているとみなした。炉底灰と飛灰の各々のサンプル間に含まれる元素に対して、大きな違いは見られないが、各々の成分含有率にはばらつきが見られる。

固化条件に対する元素や成分含有率の影響については、明確になっていないことから、試験に用いる焼却灰については、一定と見なせる状態に均一化をはかる必要がある。故に、試験に用いる焼却灰は、タンブラーミキサを用いて攪拌混合を行い、成分を均一化させたものを用いた（図 3-4）。

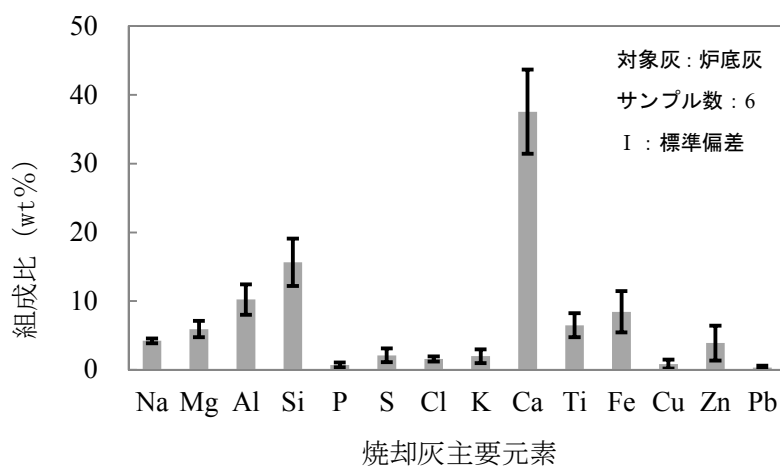


図 3-2 ふげん放射性焼却灰（炉底灰）の成分調査

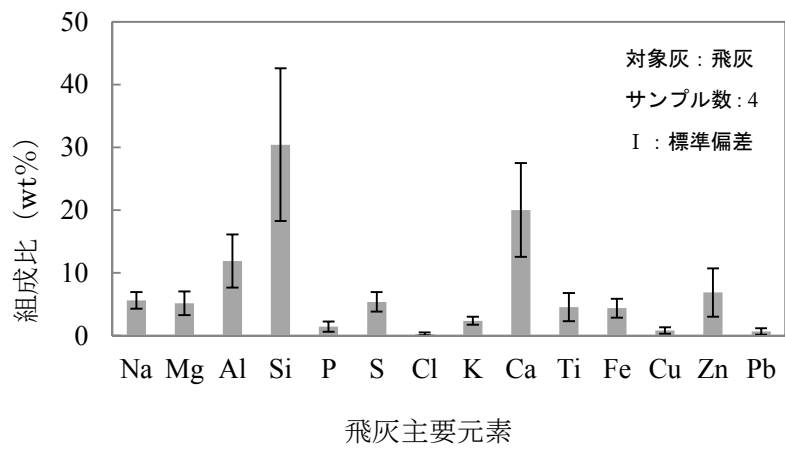


図 3-3 ふげん放射性焼却灰（飛灰）の成分調査

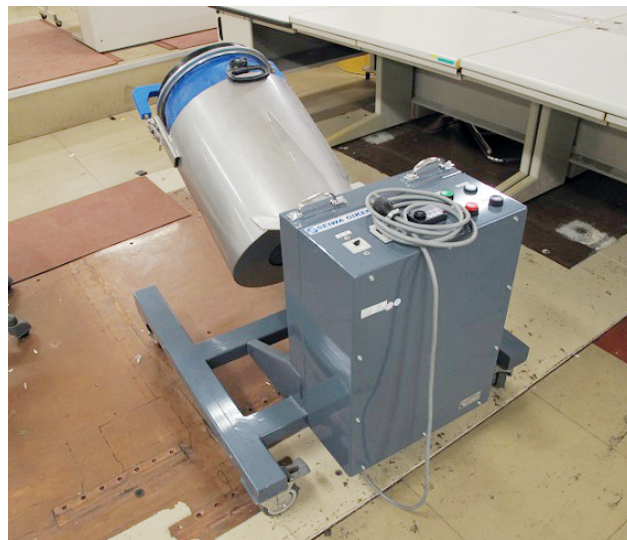
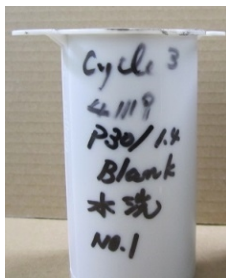


図 3-4 タンブラーミキサ

(3) 水洗処理

焼却灰には多くの元素が含まれており、その化学形も様々である。故に、焼却灰の取扱い方によっては、焼却灰の特徴が変化し、固化試験の結果に影響を及ぼす。これまでに、焼却灰に含まれる金属アルミニウムの反応を調査するために、焼却灰の水洗処理を行い、未処理の焼却灰との比較を行った¹⁴⁾。水洗処理の方法は、焼却灰を純水に数日間浸漬し、105℃で乾燥させるというものである。元になる焼却灰は、サイクル研の一般焼却炉底灰を用いた。OPCを使用し、未処理及び水洗処理を行った焼却灰をそれぞれ灰割合30%、水セメント比1.4の条件で固化試料を作製し比較した。その結果、固化試料の膨張率が10%以上異なる結果が得られている。固化試料の写真を表3-8に示す。この結果は、単純に水分と接触させるだけでも、固化試験に影響を与えるため、取扱いに注意が必要であることを示している。言い換えれば、水と反応させることで、焼却灰の性質をそろえる処理としても利用できる。

表 3-8 水洗処理試験結果

	未処理の固化試料	水洗処理の固化試料
写真		
膨張率 (%)	13	0

(4) 成分を調整した模擬焼却灰の作製

焼却灰中に含まれる特定の成分が固化条件に与える影響を調べるには、注目する成分の濃度が異なる焼却灰を用意する必要がある。注目する成分を添加した焼却物を加熱し、模擬焼却灰を作成する方法もあるが、加熱中の物質移動なども明確にわかっていないことから、現実的な方法ではない。そこで、注目する成分の試薬を添加することで、模擬焼却灰を作製し試験を実施した。焼却灰が固化試料に与える影響の項で後述するが、添加する元素だけでなく、その化学形により固化試料物性及び硬化時の反応が異なるため、模擬焼却灰の作製に用いる試薬には十分な注意が必要である。

3.2.2 固化試料に影響がある焼却灰の特性

(1) 炉底灰と飛灰の違い

焼却灰は、燃焼後に焼却炉の燃焼室内に残る炉底灰と焼却オフガスに同伴してオフガス処理系で回収される飛灰に区別される。同じ焼却炉から排出される灰ではあるが、この2種類はセメント固化試験において明確に違いが生じるという結果が得られているため、区別して扱うべきものである。飛灰は炉底灰よりも粒径が小さく、蒸気圧の低い元素や硫黄や塩素等の陰イオン成分を多く含む。例として、原科研の焼却炉から採取した放射性の炉底灰と飛灰の元素組成を表 3-9 に、炉底灰と飛灰の混合試験結果を表 3-10 に示す。フロー値を同程度とするために必要な水セメント比や減水剤の添加量、圧縮強度にも違いが生じる。

炉底灰と飛灰の排出割合は焼却炉形式により異なり、ストーカ炉では炉底灰が 85~90%、飛灰が 10~15%であるのに対し、流動床炉では炉底灰が 30~40%、飛灰が 60~70%である。焼却炉の運転状況によっては、炉底灰と飛灰を同じ容器に保管する場合などが想定されるため、試験に用いる焼却灰については、焼却炉での灰の回収や保管の方法を十分確認する必要がある。

表 3-9 原科研放射性焼却灰の元素組成

	元素 (wt%)													
	Si	Al	Fe	Ca	Mg	S	Na	K	Ti	P	Cl	Cr	Zn	Ig.Loss
炉底灰	12.3	5.0	3.0	68.8	3.3	0.6	1.5	0.8	2.0	0.6	1.0	0.4	0.8	0.0
飛灰	7.7	10.7	2.0	49.9	1.5	8.2	-	0.7	1.3	0.3	3.7	-	13.9	0.1

表 3-10 炉底灰・飛灰の混合試験結果

混合割合(炉底灰：飛灰)	10：0	5：5	0：10
水セメント比	0.6	1.0	1.2
膨張	膨張(全体)	膨張(縦)	膨張(縦)
圧縮強度 【MPa】	>15.3	5.4	2.9

(2) 含まれる元素の化学形による違い

焼却灰のセメント固化試験において、焼却灰の元素組成が影響することは、容易に想像される。しかしながら、これまでに進めてきた試験の結果、元素組成だけではなく化学形の影響も大きいという結果が得られている。その結果を表 3-11 に示す。焼却灰にカドミウムなどの重金属元素を添加する際に、化学形の異なる試薬（塩化物と酸化物）を用いた結果、硬化日数や圧縮強度に違いが見られた。加えて、飛灰に混ぜた場合と炉底灰に混ぜた場合で、圧縮強度に与える影響が異なった。従って、模擬元素として焼却灰に試薬を添加する場合には、その化学形にも注意が必要である。

表 3-11 化学形による違い

焼却灰の種類	重金属の化学形	硬化日数(日)	圧縮強度 (MPa)
飛灰	無添加	1	4.1
	塩化物※1	1	20.8
	酸化物※2	5	8.4
炉底灰	無添加	1	5.9
	塩化物※1	1	0.8
	酸化物※2	2	4.9

※1 : CdCl_2 、 PbCl_2 、 Na_2CrO_4 を Cd 、 Pb 、 Cr が元素組成比で 1%、 ZnCl_2 を Zn が元素組成比で 5%となるように添加した。

※2 : CdO 、 PbO 、 Na_2CrO_4 を Cd 、 Pb 、 Cr が元素組成比で 1%、 ZnO を Zn が元素組成比で 5%となるように添加した。

3.3 混和材料

セメント業界では、セメントの物性や反応性などを改善するために、混和材料が使用される。焼却灰のセメント固化試験においても、混和材料による性能改善は大きな試験項目になる。しかしながら、セメント用の混和材料は多種多様であるからその選定には注意が必要である。これまでに使用した混和材料は、大別すると①減水剤、②硬化速度調整剤、③膨張抑制剤の3種類である。本来、混和材料は特定の効果を得るために添加する薬剤であるが、これまでに進めてきた試験では、焼却灰により混和材料の効果の発現が異なるという知見が得られている。以下では、混和材料についてその特徴を紹介し、焼却灰のセメント固化試験で得られた知見から、注意すべき点について示す。

(1) 減水剤

減水剤は、セメント混練時の混練水量を減らすための薬剤である。セメント混練時の混練水の量を減らせば、セメントの流動性を保持した状態で、単位体積あたりのセメント量を増やすことができるため、強度等の特性を変化させることができる。流動性を改善することを目的にした混和材料であり、付随する効果により AE 剤、AE 減水剤、高性能減水剤、流動化剤、高性能 AE 減水剤などの種類がある。減水剤系は、一般にセメント粒子表面に電荷を与えて粒子を分散させることにより、コンクリートの流動性を増大させる。AE 剤系と呼ばれるものは、コンクリート中への微細空気泡の連行作用があり、空気泡の量と作用により、流動性の向上、ブリーディング水の減少、材料分離の低減などの効果がある。AE 減水剤系は、減水剤系と AE 剤系の両方の材料を混合したり、分子中に両方の作用を持つ成分を混在させ両方の効果を持たせたものである。これまでに実施した試験において、使用した実績のある減水剤の一覧表を表 3-12 に示す。使用したいずれの減水剤においても、添加によって流動性が上昇する傾向が見られた。しかしながら、添加した種類により、効果の大きさや効果の継続時間は変化している。また、添加量を変えた場合には、添加量を多くすることで、流動性の上昇だけでなく、膨張が発生したという例もあった。目的の固化条件を達成するためには、減水剤の候補をいくつか用意することが望ましい。

1) 減水剤の種類

(a) 減水剤、AE 減水剤

減水剤、AE 減水剤の主成分は界面活性剤と称される有機高分子化合物であり、リグニンスルホン酸塩、オキシカルボン酸塩、ポリオール誘導体などが用いられる。混練中のセメント粒子は混練水中で正に帯電しており、Van del Waals 力で粒子同士が凝集している。負電荷を持つ減水剤の有機高分子イオンがセメント粒子表面に吸着すると、セメント粒子表面が負電荷で帯電し、静電反発力が作用することでセメント粒子同士が分散する。オキシカルボン酸塩やポリオール誘導体では、静電的反発に加え水酸基を持つことで、水との親和性が高められている。

(b) 高性能 AE 減水剤

1980 年半ばに開発され、1990 年代に広く使用されるようになった高性能 AE 減水剤は空気連行性があり、AE 減水剤よりも高い減水性能と良好な流動性を維持する時間が長い混和材料である。高性能 AE 減水剤には、ポリカルボン酸系、ナフタレン系、メラミン系、アミノスルホン酸系などが知られているが、現在ではポリカルボン酸系が主流である。化学構造的には界面活性剤の一種であり、セメント粒子に楕形、側鎖状で吸着することにより静電反発力、立体障害反発力が生じ、セメント粒子の分散性が良くなり、減水効果が得られる。

表 3-12 比較試験で使用した減水剤

種類	商品名	主成分
高性能 AE 減水剤	レオビルド SP8LS (標準型)	ポリカルボン酸系エーテル系化合物と配向ポリマーの複合体
	レオビルド SP8LSR (遅延型)	ポリカルボン酸系エーテル系化合物と配向ポリマーの複合体
	レオビルド SP8HV (高強度型)	ポリカルボン酸系エーテル系化合物
	レオビルド SP8S (標準型)	ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子間架橋ポリマーの複合体
高性能 減水剤	レオビルド 4000	メラミンスルホン酸系化合物
	マイティ 150	ナフタレンスルホン酸ホルマリン高縮合物

(2) 硬化速度調整剤

硬化速度調整剤は、セメントの硬化速度を制御する目的で使用されている混和材料である。焼却灰の特性により、硬化が早いものと遅いものがあるため、その特性に合わせた混和材料を設定することは、焼却灰のセメント固化試験において、重要な項目である。これまでに実施した試験では、硬化を遅延させるためにショ糖を用いている。しかしながら、ショ糖の添加量が少ない場合には、焼却灰の違いにより効果の違いが見られており、使用にあたっては、焼却灰の特性によってその量を調整する必要がある。

1) 硬化速度調整剤の種類

(a)硬化遅延剤

凝結を遅らせる目的で用いられる混和材料には無機系、有機系があり、主成分としては表 3-13 に示す化合物が知られている。硬化遅延剤の作用機構は、セメント中のカルシウムイオンと反応し、セメント表面に被膜を形成することで、セメント粒子と水の接触が阻害され、セメントからのカルシウムイオンの溶出及び水和反応を遅延させるという吸着説が有力なメカニズムとして知られている。無機系はケイフッ化物を主成分とするものが一般的に用いられるが、フッ素を含むため有害物質の溶出率の観点から廃棄物の処理には不向きであると言える。有機系の硬化遅延剤は、オキシカルボン酸塩及びリグニンスルホン酸塩を主成分とするものが多く用いられており、添加量が少なくても効果が大きいことが特徴である。有機系のものには遅延作用以外に減水作用や空気連行作用を有するものもあるので、減水剤との併用の場合には、硬化遅延剤の選択に注意が必要である。

表 3-13 硬化遅延剤の成分

種類	硬化遅延剤の成分
無機系化合物	ケイフッ化物(MgSiF_6)
	ホウ酸類(H_3BO_3)
	リン酸類(K_2HPO_4)
	亜鉛化合物(ZnO)
	鉛化合物(PbO)
	銅化合物(CuO)
有機系化合物	オキシカルボン酸(グルコン酸、クエン酸、酒石酸)とその塩
	ケト酸(2 ケトカルボン酸)とその塩
	アミノカルボン酸(グルタミン酸)とその塩
	糖類、糖アルコール類
	高分子有機酸(リグニンスルホン酸、フミン酸)とその塩
	水溶性アクリル酸(ポリアクリル酸)とその塩

(b)硬化促進剤

硬化遅延剤とは反対に、凝結を早くする目的で用いられる。硬化促進剤にも、無機系、有機系があり、主成分として表 3-14 に示す化合物が知られている。硬化促進剤はセメントの水和反応を早め、凝結に要する時間を短くするとともに、セメントの初期材齢にお

ける強度発現を大きくするために用いられる。硬化促進剤の作用機構は、セメントのカルシウムイオンの溶出速度を早めることで、水和反応を促進することと考えられている。

表 3-14 硬化促進剤の成分

種類	硬化促進剤の成分
無機系化合物	塩化物(CaCl_2 、 NaCl 、 KCl)
	硫酸塩(CaSO_4 、 Na_2SO_4 、 K_2SO_4)
	チオシアン酸塩(NaSCN)
	亜硝酸塩($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ 、 NaNO_2)
	硝酸塩($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 NaNO_3)
	アルカリ(NaOH 、 KOH)
	炭酸塩(CaCO_3 、 Na_2CO_3 、 K_2CO_3)
	水ガラス アルミナ系($\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 Al_2O_3)
有機系化合物	アミン類(ジエタノールアミン、トリエタノールアミン)
	有機酸(ギ酸、酢酸、アクリル酸)のカルシウム塩

(3) 膨張抑制剤

膨張抑制剤は、セメントの膨張を制御する目的で使用されている混和材料である。セメントの膨張は、生成した鉱物の成長によるものと、焼却灰が反応することで発生するガスによるものがある。鉱物の成長による膨張はガス発生に比べて膨張の程度が小さいため、ガス発生による膨張に比べて影響は少ない。焼却灰に含まれる物質の中には水との反応によりガスを発生するものがある。焼却灰中に金属アルミニウムなど活性な金属が存在する場合、練り混ぜ水の pH が一定以上で必ず発生する。それ以外にも、焼却灰は高温で生成するため構造的に活性な状態を保持していることが知られおり、これら活性な状態にある成分が反応している可能性がある。このため、焼却灰のセメント固化試験において、セメント固化試料の膨張は多く見られる。

そのため、膨張を抑えるための混和材料を設定することは、焼却灰のセメント固化試験において、重要な項目である。これまでの知見から、試験では金属アルミニウムの反応によるガス発生に基づく膨張の抑制剤として亜硝酸リチウム(LiNO_2)を用いている。

1) 膨張抑制剤の種類

一般のセメント・コンクリート業界では、膨張抑制剤はあまり使用されていない。焼却灰を含まない場合、大きな膨張を示さないからである。逆に、断熱性や比重の関係から膨張を促進させる混和材料の使用が見られる。これまでに実施した試験においては、膨張抑制剤に関して、特許や文献を調査したものを用いている。用いた実績のある膨張抑制剤を表 3-15 に示す。膨張抑制剤は、金属アルミニウムの表面に酸化皮膜を作り不働態化させることで、セメント中のアルカリ性の水と金属アルミニウムの反応を抑制しているとされている^{15)・16)}。

表 3-15 膨張抑制剤の成分

種類	膨張抑制剤の成分
無機系化合物	亜硝酸系 (LiNO_2 , NaNO_2)
	リン酸系 (H_3PO_4 , KH_2PO_4)

4. 焼却灰のセメント固化試験における固化試料作製作業上の注意事項

焼却灰のセメント固化試験において、固化試料を作製する際に必要な作業と注意すべき項目を以下にまとめた。

4.1 秤量

秤量は 0.1 g 単位まで測定する。焼却灰やセメントは吸湿するおそれがあるため、秤量後、混練操作をすぐに行う方が好ましい。また、混和材料の量が少ない場合には、秤量容器から混練器への添加の際に容器に付着することによって添加量の誤差が大きくなるため、あらかじめ混練水（純水）を少量加えて溶解させてから添加するなどの注意が必要である。

4.2 混練

コンクリートなどの作製では、固化物の性質は混練条件（ミキサの型式、材料の投入順序、練り混ぜ時間など）によって異なるとされている。コンクリート標準示方書(RC 示方書)¹⁷⁾では、均質なコンクリートを得るためには、混練性能の優れたミキサを用いて適切な材料の投入順序と練り混ぜ時間で十分に混練することが必要とされている。また、材料の投入順序は、ミキサの型式、混練時間、粒度、混練水量、セメント量、混和材料の種類などによって相違し、また、練り混ぜに必要な時間は、ミキサの型式、ミキサの容量、コンクリートの配合、混和材料の種類、投入順序等によって相違する。早川¹⁸⁾によれば混練水を分割した場合、ブリーディング水の減少及び圧縮強度の増加が得られている。また、減水剤の添加時期が遅くなると流動性は大きくなるが、ブリーディング水が増えるとも述べている。この様に、混練条件が異なれば、その他の条件が同一であっても、混練性、固化体特性に影響を与える。

セメントにおいてもコンクリートと同様であり、焼却灰のセメント固化試験では、「焼却灰」、「セメント」、「混練水」、「混和材料」の数種類を混練することから、材料の投入順序や混練時間による影響を把握しておく必要がある。また、配合の条件設定などのために 100 g 程度の小規模試験を実施する場合は、手練りで行うことから、機械練りとの違いについても把握しておく必要がある。

混練性、硬化性のわかっていない焼却灰を固化する場合は、手練りにより予め配合条件を設定する方が好ましい。ある程度の配合条件が決まり次第、機械練りにスケールアップする。これまでに実施した試験では、流動性、硬化時間及びブリーディングに関しては手練りにより硬化性を把握して配合条件を選定している。

(1) 混練量

放射性焼却灰を対象とする場合、試験によって発生する廃棄物を減らす観点から、試験に用いる焼却灰は、必要最低限の量が好ましい。混練量は主に圧縮強度試験に必要な固化試料数で決まる。これまでの試験では、28 日養生で約 9 割の水和が進行すると言われていた¹⁹⁾ことから、28 日経過後の圧縮強度のみを測定することとしており、同一の固化条件に対して、3 本の固化試料を作製している。圧縮強度試験は、JSCE-G 505 (2013)「円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮試験方法（案）」²⁰⁾を参考に、直径 50 mm×高さ 100 mm の円柱供試体で行っており、その容量は約 200 mL である。固化試料の

比重が約 2.0 g/mL であることから、必要な混練量は全重量で 1,200 g 程度である。練り鉢や攪拌翼に付着する量を考慮しても 1,500 g 程度で不足はないと思われるが、焼却灰の性状によっては増減する可能性もあるため、注意が必要である。

手練りによる配合の条件設定では、全量で 100 g 程度が経験上妥当と思われる。10 g 程度の少量であると、練り混ぜ前の粉体や水が容器への付着し損失割合が大きくなる。また、混練性を把握するのも困難である。

(2) 混練方法

機械練り及び手練りの装置・器具及び練り混ぜ方法は JIS R 5201 (1997)「セメントの物理試験方法」に規定²¹⁾されている。その方法によって混練しても、混練性が悪く、目視で分かる程度に練り混ぜが均質にできていない場合は、混練時間を長くとりか、高速攪拌により混練するなどの調整が必要となる。また、攪拌翼は混練鉢の側面及び底部に接触しないため、混練操作は数回（2 回程度）に分け、攪拌翼を停止する都度、混練鉢側面、底部及び攪拌翼に付着した混練物をさじなどで掻き落とす必要がある。この際、空気の混入を減らすため、注意が必要である。著者らが実施している試験の混練操作フローを図 4-1 に示す。

一方、手練り用器具は機械練りが出来ない場合の方法として規定されていることから、練り混ぜ試料量が多く器具も大きい。上述したように、配合の条件設定などの小規模試験では器具が大きいと操作性が悪い。そこで、ステンレス製の薬さじとプラスチック容器を用いて手練りを行っている。柄はミリグラム単位の薬品を扱う程度のものを用いている。柄が大きくなると均質に練り混ぜることが難しくなる。

これまでの経験から投入順序に関して考慮すべき点を以下に示す。

- ・先に混練容器へ粉体（焼却灰とセメント）の全量を入れてその後から混練水を加える方法は、焼却灰の吸水性が高いため、混練水を分散させるべく、混練機の負荷が大きい。また、焼却灰の嵩密度が低いため、混練前の体積が大きく必要以上に大きな混練装置（容器等）を用意しなければならない（混練前後の体積変化は約 1/2 になる）。
- ・先に混練水（全量）を容器内に入れて、その後に粉体（焼却灰とセメント）を少量ずつ、あるいは分割して入れると、混練水中に素早く焼却灰やセメントを分散させることができ、混練機の負荷も小さい。また、混練前後の体積変化も小さく、前述の方法に比べて混練容器を小さくできる。

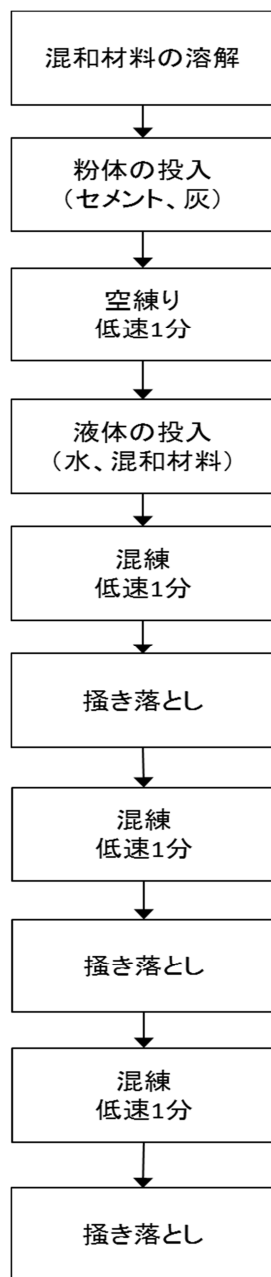


図 4-1 混練操作フロー

4.3 養生

セメントの養生環境により水和反応度、圧縮強度などは影響を受ける。養生の原則はセメントもコンクリートも同様と考えられるため、一般産業界で使用が多いコンクリートにおける養生についての知見が参考になる。コンクリート作製における養生の原則は以下の通りである²²⁾。

- ・コンクリートの硬化中、適当な温度を保ち十分な水分を与える。
- ・コンクリートが十分に硬化するまで、衝撃や過大な荷重など有害な外力を加えない。
- ・風、雨、霜、日光などの気象作用に対し、コンクリートの露出面を保護する。

焼却灰のセメント固化処理は、野外では行われないことから、温度、湿度、衝撃などの外力について考慮すれば良い。建築工事標準仕様書(JASS 5)、コンクリート標準示方書(RC示方書)によれば、それぞれに対して以下の通りの指摘がある。

(1)温度の影響

セメントの水和は-1℃を下回ると自由水が氷結して容積が10%ほど膨張するため組織構造が破壊され、以後温度が上がっても十分な強度や耐久性が得られない。一方、高温になるほど水和反応は促進されるが、急激な水和反応は長期強度の発現に対して好ましくない場合が多い。

(2)湿度の影響

セメント混練物が乾燥すると表面にひび割れが発生し、耐久性に影響を及ぼす。また、セメント混練物中の相対湿度が40%以下になると水和が停止する。焼却灰の固化処理の場合、ドラム缶上部の開放部分に関しては、乾燥しやすい状態になっていることから、この部分の乾燥状態によっては養生方法を検討する必要がある。

(3)外力の影響

養生中のコンクリートに振動、衝撃が作用すると、クリープによってたわみが大きくなり、ひび割れが生じるとされる。従って、焼却灰の固化処理でも振動、衝撃が加わると固化試料の偏りやひび割れなどが生じる可能性があるため、軟質な状態にある時間帯では、できるだけ静置させた状態で養生する必要がある。

5. 焼却灰のセメント固化試験における評価項目とその評価方法

焼却灰のセメント固化試験において、評価すべき項目とその評価の方法について以下にまとめた。

5.1 流動性

流動性は、セメント固化処理設備の設計及び運転条件を決定する上で重要な物性値であり、均一性や水和反応にも影響すると考えられる。流動性を評価する方法としては、粘度を測定する方法や工学的に利用されている流動性試験を行うといった方法がある。粘度を測定する方法では、設備設計において必要となる流動を計算するための粘度が測定可能である。セメントの粘度測定は、回転粘度計などで試みられている^{23)・24)}が、凝結や水和に伴い粘度が変化するため、統一した手法は確立されていない。工学的な流動性試験では、比較的簡単な方法で、流動性の相対的な大小を評価することができる。工学的な流動性試験としては、フロー試験やP ロート試験、セルフレベリング材のフロー試験²⁵⁾などがある。

著者らは、フロー試験を実施している。試験方法は、JIS R 5201 (1997)「セメントの物理試験方法」11.フロー試験を参考とした。フロー試験の手順を以下に示す。乾燥したウエスで拭ったフローテーブル中央の位置にフローコーン（内径上 Φ 70 mm、下 Φ 100 mm、高さ60 mm の円錐台型）を設置し、混練物を詰める。次に、フローコーンを真上に取り去り、フローテーブルに15回の落下運動を与え、フローテーブル水平面上に広がった混練物の最大径とその直角な径をノギスで測定し、その平均値を求める。試験に使用したフローテーブル及びフローコーンを図 5-1 に示す。

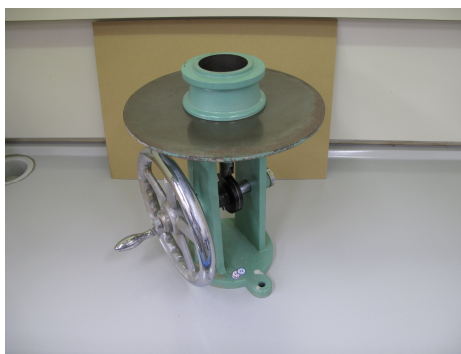


図 5-1 フローテーブル及びフローコーン

5.2 硬化時間

硬化時間は、焼却灰、セメント及び水の混練物をドラム缶に充填した後の施設内輸送のしやすさに影響するため、プロセスフロー及び運転条件を決定する上で重要な物性値である。しかしながら、硬化の判断が難しい。これまでに実施した試験では、焼却灰とセメント、水を混練した直後から、混練物を指で押した場合に変形や型崩れをしない状態となるまでの時間を硬化時間とした。硬化時間は、焼却灰に含まれる成分により、変化する場合があり、また、流動性とも関係する。

5.3 ブリーディング

ブリーディングは、分離現象の一つであり、固体材料の沈降によって混練水の一部が遊離して上昇する現象である。この遊離した水をブリーディング水という。ブリーディング水が多い場合、固化体の均質性が損なわれる他、水みちを形成して密実性を損ない、圧縮強度の低下に影響する。また、ブリーディング水とともに、廃棄物中の放射性物質が上部に偏在する可能性もある。ブリーディング水の発生を抑制することは、廃棄体基準を満足する上で重要な項目であると考えられる。

ブリーディングは、セメントの粉末度、単位水量、混和剤量の影響を受ける。また、環境面では、気温によっても水和速度が異なり、反応が遅いとブリーディングが発現しやすいなどの影響を受けることが知られている²⁶⁾。これまでブリーディングに特化した試験は実施していないが、各試験を行う上でブリーディングの影響を考慮し、焼却灰の割合や減水剤の添加量に応じて水セメント比を設定してきた。ブリーディングの確認方法については、JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に、メスシリンダーを用いて測定する方法がある。しかし、固化試料の作製に当たっては、ブリーディング水が発生しないことを目標としていることから、養生中の試料において容器から目視で観察できるブリーディング水の有無を確認することとした。

5.4 膨張

膨張は、固型化された放射性廃棄物の容器の変形、破損などの要因となる。膨張には、混練直後に発生するガスによるものと、凝結後の膨張性鉱物の成長によるものとが考えられる。これまでに実施した試験でみられた膨張の例を図 5-2 に示す。

膨張量の測定は、固化試料の形状・寸法の測定が可能であれば良く、用いる道具はノギスやレーザー形状計測装置、ひずみ計などが使用できる。 $\Phi 50 \text{ mm} \times \text{H}100 \text{ mm}$ の円柱型枠上面から盛り上がった固化試料の最高部までの高さをノギスで測定した。膨張量は、円柱型枠底面から固化試料の最高部までを計測し、この値から型枠の高さを差し引いて求めた。なお、膨張の判断は、円柱型枠への試料の充填操作において 1 mm 程度の歪み（若干の凹凸が生じる）を生じることから、ここでは 1 mm を超えたものを膨張と判断した。膨張については、ガス発生によって生じる場合があることから、混練中及び養生中に発生するガスを捕集し、分析することも重要である。



膨張なし



膨張あり



膨張あり（全体膨張）

図 5-2 固化試料の膨張例

5.5 圧縮強度

圧縮強度は、廃棄体の技術基準として埋設告示に定められている。故に、固化試料の性能を評価する上で最も重要な値である。圧縮強度の測定方法としては、圧縮試験機を用いた破壊測定や超音波伝播速度の測定が適用できる。超音波伝播速度の測定により圧縮強度を測定する場合には、圧縮強度との関係が既知である必要があるため、圧縮試験機を用いた破壊測定が一般的である。この方法は、固化試料に荷重をかけて、破壊した際の圧力を測定する。圧縮強度試験の試験法については、土木学会に学会標準法が定められている²⁰⁾ことから、この方法に準拠することが望ましい。圧縮強度は、固化試料の大きさ、形状、荷重のかけ方に左右されることがわかっているので、試験に用いる固化試料は同一の仕様にするべきである。

破壊測定で用いる圧縮試験機には、手動で荷重を加えるもの(以下「手動装置」という)と動力駆動で荷重を加えるもの(以下「動力装置」という)がある。手動装置は、小型で持ち運びが可能で動力電源が不要なため(但し、測定器表示用の電源は必要)、設置場所の制約が少ない。しかし、手動で荷重を加えるため、操作者により値のばらつきが生じる可能性がある。そのため、極力ばらつきが発生しないような操作方法を習得させる必要がある。一方、動力装置は、大型で床面にアンカーボルトで据え付け、電源が必要なため、設置場所が限られる。しかし、動力駆動で荷重を加えるため、操作者は装置に固化試料をセットするだけでよく、操作者によるばらつきは少ない。

放射性焼却灰の固化試料の圧縮試験も実施した。放射性焼却灰の固化試料は、圧縮強度測定で飛散する供試体の放射性物質による汚染を防ぐため、フード内で作業をする必要があったため、比較的小型の手動装置で実施した。手動で荷重を加えて固化試料を圧縮していく過程で、油圧レバーのストロークを大きくしすぎると、固化試料の圧縮強度値が大きくなるので、小さなストロークでゆっくりと行うことに注意が必要である。

圧縮強度試験では、JSCE-G 505 (1999)「3.円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法」を参考に、 $\Phi 50 \text{ mm} \times H100 \text{ mm}$ の固化試料を同一条件の試験に対して3本作製し、28日養生後の圧縮強度を測定してその平均値を求めた。固化試料は、JSCE-F 506 (1999)「5.モルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験用円柱供試体の作り方」を参考にした。

動力装置はモルタル全自動試験機ハイアクティス 200L(株式会社マルイ社製)、手動装置は卓上型圧縮強度試験装置 KS-57(関西機器製作所社製)、を使用した。使用した強度試験装置を図 5-3 に示す。固化試料上面の平面度の確保は、「コンクリートの圧縮強度試験方法」(JIS A 1108)に準拠したアンボンドキャッピングを用いた。



動力装置



手動装置

図 5-3 試験に用いた圧縮試験機

5.6 溶出量

溶出量は、埋設施設の許可に記載される可能性がある技術基準と考えられており、加えて考慮する必要がある。溶出量の測定方法としては、固化試料を粉砕したものをを用いて溶出試験を行い、検液を作成後、溶存した注目元素の濃度を測定することになる。溶出試験の方法については、「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」（昭和 48 年環境庁告示第 13 号）に準拠する方法により行うことが望ましい。この方法では、粉砕した固体と溶出用の液体の比、溶出を行う際の振とうの条件、検液の遠心分離及びろ過の方法が定められている。試料の前処理、検液の濃度分析は、次項に述べる材料及び固化試料の分析と同様の方法が適用できる。

これまでに実施した試験では、圧縮試験後の固化試料を 0.5 mm 以上 5 mm 以下に砕いた後、純水中に固液比 10 となるように浸漬し、6 時間水平振とうした。その後、遠心分離及びメンブランフィルターを用いて固体をろ過し、検液を作製した。この検液は、高周波誘導結合プラズマ分光分析装置を用いて分析した。

5.7 材料及び固化試料の分析

焼却灰のセメント固化は、焼却灰の性状により固化条件が異なり、影響する要因としては、焼却灰の粒度、組成、鉱物相及び含有水分量などがある。また、固化試料についても組成、鉱物相、水分量を分析し、固化試料の性状を明らかにすることは重要である。以下に、分析項目を示す。

5.7.1 分析の前処理

養生中に外気及び養生容器に接触していない部位を使用する。基本的には焼却灰と同じように分析を行うが、固化試料は分析するには大きいため乳鉢、乳棒などで破碎しなければならない。一方、エトリングライトなどは試料を細かく破碎すると、結晶構造が崩れることがあるため注意が必要となる。また、水和反応を停止する操作が必要な場合は、固化試料中の水分や空気中の湿気など、水を除去しなければならない。固化試料をアセトン浸漬

させる溶媒抽出方法により水を抽出し、水和を停止させた。アセトン浸漬が長期間に及ぶ場合は、アルドール縮合反応が生じ、揮発性の低い物質にアセトンが変化するため、溶媒の除去が困難になる場合があるので注意が必要である²⁷⁾。

5.7.2 分析方法

(1) 粒度

焼却灰やセメントの粒度は、流動性や圧縮強度に影響する。粒度が小さいと、混練物の空隙に入り込み緻密性が上がるため、粒度が大きい場合に比べると圧縮強度が向上する。しかし、比表面積が大きくなるため、接触する水が多くなり、流動性が低下する。焼却灰の粒度分布の測定方法には、粒子径分布測定装置を用いる測定方法や、金属製ふるい（JIS Z 8801-1）を用いて物理的に分離するふるい分け方法がある。粒子径分布測定装置では、気体や液体中に粒子を分散させ、レーザーなどの光を入射させた場合の散乱から粒子径の分布を測定する。気体に分散させる場合には、装置内への付着等が問題になる。液体に分散させる場合には、焼却灰、セメントともに水溶性であることから、水を溶媒とすることができず、有機溶媒の使用が必要となる。測定を行う試料のサンプリング方法により粒度分布がバラつくことが考えられるため、測定試料のサンプリング方法に留意する必要がある。一方、ふるいを用いる方法は、低コストで容易に焼却灰の粒度分布を測定できる。これまでに実施した試験では、ふるい分け試験による粒度分布測定を多く用いている。詳細な試験方法は JIS A 1102「骨材のふるい分け試験方法」に準じて行なった。

(2) 組成分析

焼却灰やセメントの組成は、水和反応性や硬化速度に影響する。これらを混練前に把握しておくことは、配合条件や使用する混和材料の選定だけでなく、結果の解釈にとっても重要である。組成分析の方法は、一般的な組成分析方法全般から選択できる。機器分析としてエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置「以下（EDXRF）という」、走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置「以下（SEM-EDX）という」、粒子励起 X 線分光分析装置「以下（PIXE）という」などがあり、溶液化の前処理が必要であるが、誘導結合プラズマ発光分光分析装置「以下（ICP-AES）という」、原子吸光分析装置「以下（AA）という」などがある。特定の成分の分析としては、ガスクロマトグラフ「以下（GC）という」やイオンクロマトグラフ「以下（IC）という」などの利用も必要となる。

機器分析は、使用する焼却灰・セメントを直接測定できることから、有用な手段である。EDXRF は、試料に X 線を照射し、蛍光 X 線を測定する分析手法である。蛍光 X 線の分析手法によってエネルギー分散型「以下（EDX）という」と波長分散型「以下（WDX）という」とがある。どちらも X 線を一次線としているため、試料中を数 cm 程度の深さまで侵入することができるので、バルク層の分析に測定できるといった特徴があり、主に焼却灰の元素組成の特定のために本装置を使用した。軽元素の分析に難があるが、ナトリウム～ウランまでの多くの元素を同時に測定することができる。また、理論計算からある程度の定量ができる FP (Fundamental Parameter) 法が開発されていることから、標準試料がなくともある程度正確な組成を得ることができる。

SEM-EDX は、電子顕微鏡に組成を測定する機能が付加された分析装置である。電子顕微鏡観察を用いて、狙った部分の試料表面の組成分布が観察できることから、焼却灰や固

化試料の組成のばらつきなどを評価する上で有用である。しかしながら、電子線を一次線としているため、固化試料の表面近傍の測定となることや、測定視野が狭いことから全体の組成を見るには不向きである。また、測定室内を真空状態にするため、試料が粉体である場合、圧縮成型しペレット化などの処置をしなければならない。粉碎せず塊状の試料の表面分析を行う場合は、なるべく平らな試料を用いる。

試料によっては、測定時の電子線により、帯電（チャージアップ）し適切な結果が得られないことがある。その場合には、試料測定面の裏側を紙やすりなどで平滑にし、導電テープへ密着させできるだけ電荷を逃がすなど、白金や炭素による観察表面の蒸着により、試料のチャージアップを防ぐ必要がある。主に焼却灰や固化試料についての元素組成の特定や鉱物相分析の参考データ採取のために本装置を使用した。

これまでに実施した試験では、焼却灰中の元素だけでなく化学形によっても硬化過程に変化が見られている。元素の化学形分析について、個別の元素に対しての分析方法は知られているが、焼却灰に含まれる多くの元素の化学形を同時に分析することは難しい。溶出液など液体の分析においては、ICP-AES や AA が利用できる。しかしながら、セメントの溶出液や硬化中の液相分析では、カルシウムなどの濃度が非常に高いことから、適切な濃度調製が必要である。

(3) 鉱物相

セメントの硬化反応は、セメントの溶解と鉱物相の生成によるため、鉱物相の分析は重要である。鉱物相分析の方法は X 線回折装置「以下 (XRD) という」がある。XRD では、化学組成は同じでも結晶形が異なる場合、結晶形を同定することができる。しかし、未知試料の測定を行う場合、様々な結晶からの回折強度を、積算強度として 1 つの回折線で得るため、解析が難しく事前に存在する元素を調べておくことが望ましい。これまでに実施した試験では、前述の組成分析と併用して焼却灰や固化試料の鉱物相の分析に XRD を使用した。また、試料は粉末試料とし固化試料の場合は 2~3 g 程度粉末化し、専用の試料ホルダー等に試料を充填する。XRD の測定においては、水分や試料表面状態が測定データに影響を与えるため、試料は十分乾燥したものとし、表面を平滑化しなければならない。このため、鉱物相の分析を行う場合には、乳鉢と乳棒を用いて細かく粉碎する必要がある。しかしながら、粉碎によりセメントの水和で生成したエトリンガイト等の結晶は容易に破壊されるため、細かく粉碎しすぎると生成した結晶を測定することができない。試料の粉碎を行う際には、粉碎の程度に注意が必要である。測定する走査範囲については、セメントの水和で形成される結晶を見るため、 $2\theta = 5 \sim 70 \text{ degree}$ の範囲とした。

XRD には、 μ XRD という装置もあり、短時間で高精度な微小部領域の測定が可能である。このような装置を用いることで、焼却灰中に含まれるアルミニウムが金属であるか酸化物であるかといった情報も得ることができる。

(4) 含有水分量

セメントの硬化反応には、水分が強く影響する。原料として用いられる焼却灰、セメントともに、粉体であり、若干の水分を含んでいる。また、固化試料中の自由水は、反応の進行の指標となることから、含有水分量の測定は、重要である。一般的に、含有水分量の測定は、加熱した際の重量減少から計算される。粉体用の水分計は市販されているものが

ある。これまでに、固化試料中の自由水分量を測定するなどしているが、その方法は、恒温槽に固化試料を入れ、加熱した際の重量減少から求めている。

(5) 水和度

水和度は、示差熱分析により、450 °C付近の水酸化カルシウムの脱水分解、750 °C付近の炭酸カルシウムの脱炭酸分解を確認することで分析できる。

(6) その他の分析

セメントの特性として、水と混練した場合に液相がアルカリ性になる。これは、共存元素の反応に関与するため、混練物の pH も重要な分析値となる。また、セメントが水和する際の反応熱を測る装置などもあり、反応の変化を捉える上で重要なデータとなる。

6. 焼却灰のセメント固化試験フローと固化可能な範囲の目安

焼却灰のセメント固化試験は、固化条件を変えて作製した固化試料の評価・分析作業を繰り返し、最終的に固化体に求められる要件を満足する固化条件を見いだす一連のプロセスである。前章までは、固化試料の作製や評価・分析といった個別の作業について解説をした。本章では、セメント固化条件を設定するためのセメント固化試験フローを示し、実際に著者らが実施している試験の作業手順について述べる。実際に試験を行う際に必要な資機材についてもまとめて示すので、参考にしていきたい。加えて、各拠点において実施するセメント固化試験の目安となるように、いくつかの焼却灰について、設定した固化要件を満足する固化可能な範囲について示すとともに、試験で得られた知見を元に、現状におけるセメント固化技術開発の課題をまとめる。

6.1 焼却灰のセメント固化試験フロー

本項では、実際に固化試料を作製し評価するまでの作業フローを示すと共に、焼却灰の特性を把握し、焼却灰のセメント固化条件をある程度絞り込むためのセメント固化試験フローについて述べる。焼却灰のセメント固化試験では、焼却灰の特性にあわせて、目標とする混練性や固化性能を満足するように、固化条件を調整していく必要がある。ある固化条件を変化させると同時に複数の評価項目の値が変化する。このため、固化体の要件を満たす固化条件を見出すためには、固化条件を変えた固化試料の作製と評価・分析を行い、結果をフィードバックして、再調整することを繰り返す必要がある。

固化試料の作製及び評価・分析作業は、固化条件を変えても、基本的には変わらず、同じ作業の繰り返しとなる。固化試料の作製及び評価・分析作業のフローを、図 6-1 に示した。材料の取扱い、操作及び評価・分析に関して選択できる方法と作業上の注意点については、前項で示した通りである。この基本的な作業フローは、多くの回数繰り返すことになるので、資機材を整備するなどして、作業によるばらつきがでないような工夫が必要である。

次に、セメント固化試験では、どのように最終的に固化条件を決定していくのが良いのかという試験全体のフローについて述べる。これまでに行った試験では、条件の調整なしに要件を満たす固化体を作製できる焼却灰は見られていない。また、焼却灰の特性とセメント固化条件の関係は明確に整理されていないため、焼却灰のセメント固化条件の調整は、条件を変えた際の評価値をフィードバックすることを繰り返して行う必要がある。そこで最初に、焼却灰のロット毎に、混和材料を添加せずに、焼却灰とセメント及び水のみで混練したものを作製し、焼却灰が持つ性質を反映した条件を明らかにすると、その後の調整がやりやすい。著者らは、焼却灰、セメント及び水で固化試料を作製し評価・分析する作業を「ブランク試験」と呼んでいる。ブランク試験は、混練性や固化性を把握するだけではなく、その焼却灰に加える混和材料を選択する基準となる。ブランク試験によって得られたデータを基に、各々の評価項目を順に調整すると良い。条件を絞り込むための焼却灰のセメント試験フローを図 6-2 に示す。フローに示す通り、混和材料の使用や焼却灰の割合等の固化条件を変化させた固化試料を作製しデータを取得する。

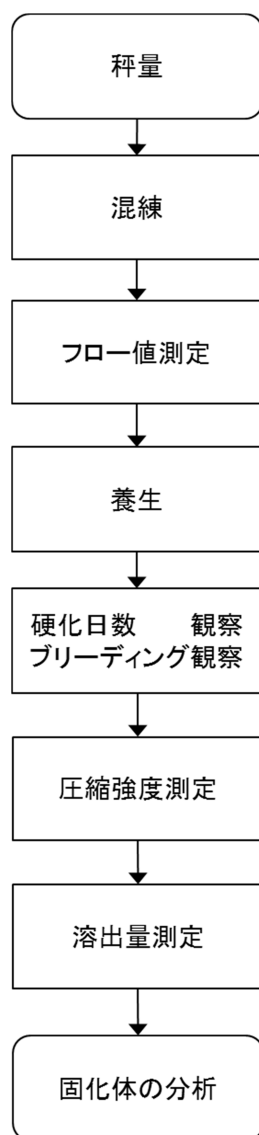


図 6-1 基本的な作業フロー

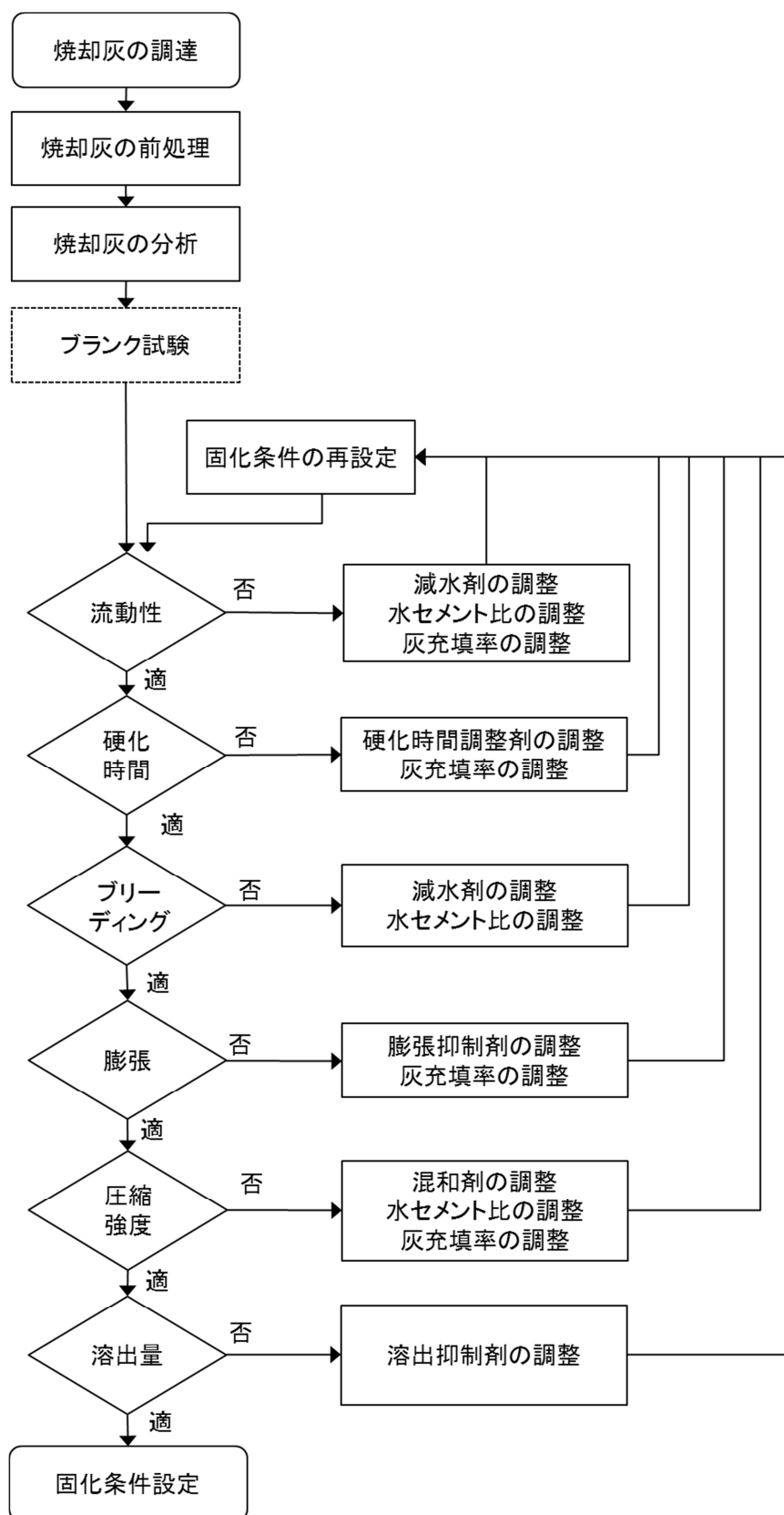


図 6-2 セメント固化試験フロー図

6.2 セメント固化試験手順

実際に、著者らが実施しているセメント固化試験の作業手順について、以下に示す。

(1) 材料の準備

1) 焼却灰の調達

- ・試験対象となる焼却灰を、試験に十分な量調達する。

2) 焼却灰の前処理（金属片、未燃分の除去）

- ・目視と人手により比較的大きい未燃物及び金属類を除去する。
- ・ハンドマグネットを用いて金属片を除去する。
- ・ふるいを用いて分級し、1,180 μm 以下の焼却灰を取り出す。
- ・非放射性的の焼却灰は成分の偏在を防ぐため、タンブラーミキサを使用して均質になるように回転混合する。
- ・放射性的の焼却灰は、機器の汚染や飛散による作業環境の汚染を考慮する必要がある。少量取り扱う場合には、フードを用いて、ポリエチレン製の容器で手動攪拌する。

3) 焼却灰の分析

- ・ふるい分け試験機にて粒度を測定する。使用するふるい目は、1,180 μm 、600 μm 、500 μm 、300 μm 、150 μm 、75 μm である。
- ・EDXRF による元素分析を行う。
- ・XRD による鉱物相の同定を行う。

4) その他の材料の準備

- ・セメント材料を準備する。
- ・混練水を準備する。
- ・混和材料を準備する。
- ・試験器具及び装置を準備する。

(2) 固化試料作製及び評価分析作業

1) 秤量

- ・電子天秤で 0.1 g 単位まで秤量する。
- ・混和材料が少ない場合には、秤量容器に付着することによる誤差が大きくなるため、混練水を少量加えて溶解させておく。

2) 混練

- ・セメント及び焼却灰を混練鉢に投入し、空練りして混合させる。
- ・混練水及び混和材料を混練鉢に投入し、混練機の手動設定を低速にし、1 分間練り混ぜる。
- ・混練機の攪拌が自動停止後、攪拌翼及び混練鉢に付着した混練物をさじなどでかき落とす。
- ・再度、低速で 1 分間練り混ぜる。

3)フロー測定

- ・フロー測定は混練後ただちに行うため、前もって準備をしておく。
- ・フローテーブルを乾いた布などで拭く。
- ・フローコーンをフローテーブルの中心位置に設置する。
- ・混練物をフローコーンに充填させる。この際、突き棒を用いて2回に分けて充填（各層、15回混練物を突く）する。
- ・フローコーンの上端面に合わせて混練物を平滑にする。
- ・フローコーンを持ち上げ、混練物の広がり、最大径とその垂直方向の広がり、ノギスで測定し、平均する。
- ・フローテーブルのハンドルを回し、15回の落下運動をさせる。
- ・混練物の広がり、最大径とその垂直方向の広がり、ノギスで測定し、平均する。

4)養生

- ・フロー試験で使用した混練物及び混練鉢に残っている混練物をプラモールドに充填する。
- ・充填操作により空気が入り込むので、プラモールドごとタップ振動を与えて抜気する。
- ・プラモールドの上端面に合わせて混練物を平滑にする。
- ・プラモールドが入る大きさの密封容器に濡れウェス等を入れ、湿度を高めた状態で充填したプラモールドを封入する。
- ・25℃に設定した恒温槽に密封容器を入れ、静置する。

5)硬化時間確認

- ・固化試料を指で押して変形しないことをもって判断する。
- ・目視で硬化していないと判断できる場合は、指で押さない。
- ・確認は1日ごとに実施する。

6)ブリーディング確認

- ・目視により、プラモールド表面にブリーディング水が発生しているか確認する。

7)膨張確認

- ・28日養生後の固化試料を対象とする。
- ・プラモールドの側面が割れていないか確認する。
- ・ノギスでプラモールド底部から固化試料端面まで最長部を測定する。
- ・プラモールド本体の高さを測定し、差分をとって膨張量とする。
- ・1mm以内の膨張は充填操作等による誤差とみなし、膨張していないと判断する。

8)圧縮強度測定

- ・プラモールドから固化試料を脱型する。
- ・アンボンドキャップを固化試料上部に取り付け、圧縮強度測定装置に設置する。
- ・固化試料を圧縮して破壊し、最大値を測定する。

9)溶出量測定

- ・圧縮強度測定で破壊した固化試料を取り出す。
- ・乳鉢及び乳棒などで固化試料を 0.5 mm 以上 5 mm 以下に砕く。
- ・破碎した固化試料及び純水を用いて、固液比 10（500 mL 以上）となるように調整する。
- ・20 ℃、1 気圧に設定した恒温槽の中で、振とう幅 4 cm~5 cm、振とう回数 200 回/分で 6 時間水平振とうする。
- ・遠心加速度 3,000 G で 20 分間遠心分離させる。
- ・上澄み液を孔径 1 μm のメンブランフィルターを用いてろ過する。
- ・ろ液中の成分を ICP-AES もしくは ICP-MS、IC で分析する。

10)固化体の分析

- ・圧縮強度測定で破碎した固化試料を用いて、走査型電子顕微鏡で表面観察を行う。この際、なるべく平らな試料を用いる。平滑にする場合は観察する面の裏側を紙やすりなどで削る。
- ・圧縮強度測定で破碎した固化試料を、乳鉢及び乳棒などで細かく砕く。
- ・10 mg 程度の塊を分取し、熱重量測定・示差熱分析する。
- ・蛍光 X 線分析装置で元素分析及び X 線回折装置で鉱物層の同定を行う。

(3) 各特性値の調整方法

1)流動性

混練物の流動性が悪い場合は、減水剤の添加、水セメント比の調整、焼却灰の割合の調整などを行う。焼却灰の割合が高くなると、水セメント比を高くしても、混練水の絶対量が不足することから流動性の向上は見込めなくなる。また、焼却灰の吸水性が高い場合、焼却灰自体が水和することが大いに考えられるので、予め水洗処理をした焼却灰を用いることで流動性を向上させることもできる。

2)硬化時間

混練直後から硬化開始され、フロー試験が実施できない程度に硬化時間が早い場合は、硬化時間調整剤の添加を検討する。混練中は流動状態を保っていたが、混練機を停止させると流動しないといった場合にはショ糖などの硬化遅延剤を添加することで改善が見られた。セメントの硬化開始と終結の時間は品質として規定されていることから、固化試料の硬化時間は焼却灰の成分に依存する。このため、焼却灰の割合を小さくすると影響は小さくなるものと考えられるため、焼却灰割合の調整も硬化時間の調整には有効であると考えられる。この場合は水セメント比、混和材料の調整なども必要となる。

3)ブリーディング

ブリーディング水が発生する場合は、水セメント比、減水剤の添加量等を調整する。増粘剤や粒径の細かなシリカフューム等で、混練物の結合性を高める方法があるため、これらの方法で抑制することも有効であると考えられる。

4)膨張の有無

固化試料が膨張する原因は、ガス圧によるものと膨張性鉱物の生成が想定される。ガス圧によるものは化学反応であるため、その反応を抑制する薬剤の添加で対処することが可能である。焼却灰中の金属アルミニウムのアルカリ腐食により発生した水素ガスで膨張する場合は、酸化皮膜形成剤として亜硝酸リチウムを添加することで膨張を抑制することができる。一方、膨張性鉱物は硬化後に生成して固化試料を膨張させるため、混練前に生成させておく水洗処理や焼却灰の割合を小さくするなどの方法が抑制に期待できる。

5)圧縮強度

圧縮強度が低い場合は、水セメント比の調整及び減水剤の調整、焼却灰の割合を小さくするなどを検討する。焼却灰自体に強度がないことから、強度はセメントの割合に大きく影響される。

6)溶出性

固化試料から溶出する成分は、基本的に pH の影響を受ける。固化試料はアルカリ性であることから、溶出成分に対してアルカリ環境で不溶化する薬剤の添加で対処できると想定される。また、ゼオライトなどの細孔に物理吸着させる方法も想定されるが、この場合は混練性、固化性への影響も調査する必要がある。

表 6-1 に基盤部が試験及び分析に使用した機器・装置について写真及び型番を示す。

表 6-1 試験及び分析に使用した機器・装置(1/3)

ハンドマグネット ・シンワ測定社製 - 型番：73553	
ふるい（ふるい目 1,180 μm） ・関西機器製作所 - 型番：KC-73B	
タンブラーミキサ ・セイワ技研 - 型番：TM-60P 60 リットルプラスチックドラム ・三甲 - 型番：PDO60L-1	
ふるい分け試験機 ・関西機器製作所 - 型番：KS-32	
エネルギー分散型 X 線回折装置 ・日本電子 - 型番：JSM-6010LA	
粉末 X 線回折装置 ・リガク - 型番：UltimaIV	

表 6-1 試験及び分析に使用した機器・装置(2/3)

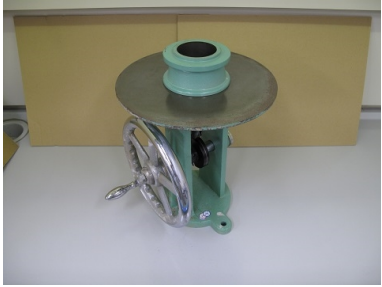
モルタルミキサ ・ 関西機器製作所 - 型番：KC-8	
フロー試験機 ・ 関西機器製作所 - 型番：KC-24	
養生容器 ・ 関西機器製作所 - 型番：KC-316A	
恒温槽 ・ SANYO - 型番：MIR-554	

表 6-1 試験及び分析に使用した機器・装置(3/3)

圧縮試験機 ・ マルイ 型番：ハイアクティス-200L	
ICP 発光分光分析装置 ・ SHIMADZU 型番：ICPS-8000E	
イオンクロマトグラフ ・ DIONNEX 型番：ICS-1000	
示差熱天秤 ・ SII Nano Technology 型番：TG/DTA 7200 EXSTAR	

6.3 目標とする固化要件を満足する固化可能範囲の目安

焼却灰によって、セメント固化時の流動性や固化試料の一軸圧縮強度が変化するため、目標とする固化要件を満足する固化条件は異なる。実際に焼却灰のセメント固化試験を実施する際に、条件設定の目安となるよう、著者らがこれまでに実施した試験によって明らかにしたタイプの異なる3つの焼却灰についての固化可能な水-セメント-焼却灰の混合範囲を示す。セメントは OPC を用いており、混和材料は 3.3 に示したものを使用した。

固化可能範囲は、評価の各項目が一定の基準を満たしている場合に固化可能と判定し、水-セメント-焼却灰の混合割合を変化させた場合に、固化可能と判定された混合割合の範囲を示したものである。これまで実施した試験においては、2 章に述べた評価すべき項目から、表 6-2 に示す項目を使用し、評価基準を設定した上で、固化可能範囲を調べた。

表 6-2 固化条件の良否を判断するための基準

評価項目		評価基準	確認方法の概要	備 考
混練・硬化性	流動性	250 mm 以上	フローテーブル測定 JIS R 5201 に準拠	自主設定
	ブリーディング水	ないこと	外観目視観察	自主設定
	均一性	偏在の有無	外観目視観察	埋設規則 ²⁾
	硬化日数	1 日	指触硬化確認	自主設定
固化性能	一軸圧縮強度	6.0 MPa 以上	圧縮強度機測定 土木学会標準示方書 (JSCE-F506 (1999))を参考に Φ5 cm×H10 cm の円柱 供試体を製作し、混練から 28 日後に測定。測定 方法は土木学会の標準 示方書 (JSCE-G505 (1999)) に準拠	自主設定 埋設規則 ²⁾ (1470 kPa)
	膨張/クラック	ないこと	外観目視観察	埋設規則 ²⁾
	重金属溶出率	廃掃法の基準以下	溶出試験 試験方法は環境庁告示第 13 号に準拠	埋設要求事項 ⁴⁾⁻⁵⁾

- (1)焼却灰に強度がなく吸水性が高い。また、焼却灰自体の水和反応性が高く、アルカリとの反応で水素を発生させる金属アルミニウムが混入している焼却灰
(サイクル研一般焼却炉底灰)

このタイプの焼却灰は、ブランク試験を実施すると、流動性が低く、膨張が見られる。流動性の低さは、水和反応が早く、混練直後から硬化が開始されたためと考えられる。このため、均質性や充填性能を確保し、流動状態を保たせるために減水剤と硬化遅延剤が必要となる。膨張の原因は、焼却灰中の金属アルミニウムとアルカリとの接触による水素の発生と考えられる。固化体が膨張すると、均質・均一固化体ではなくなる可能性があることや、容器の変形、破損が想定されるため、膨張抑制剤の添加が必要となる。

灰割合、水セメント比を変化させて固化した場合において確認された固化可能範囲を図 6-3 に示す。減水剤、硬化遅延剤、膨張抑制剤の添加量を固定して添加した固化範囲を示している。焼却灰の割合が40%になると水セメント比を上げて流動性は得られず、固化範囲から外れた。また、焼却灰の割合が低くなると材料分離や混練性の観点から、固化可能な水セメント比の範囲は狭くなる傾向が見られた。

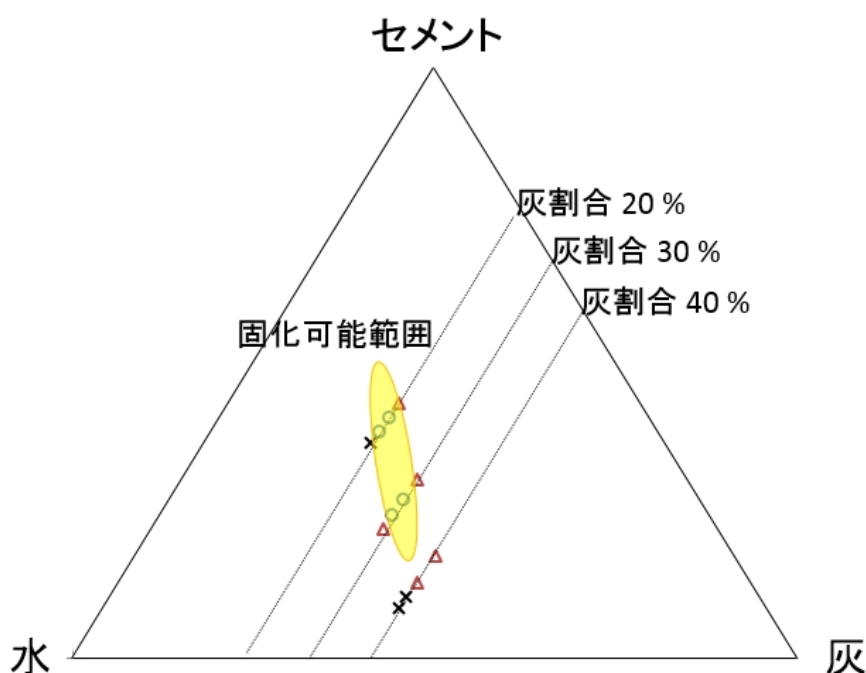


図 6-3 サイクル研一般焼却炉底灰の固化可能範囲三角図

○：良好に練り混ぜ可能、△：固めることはできるが流動性が悪い、×：混練できない

(2)焼却灰の吸水性が低く焼却灰自体の水和反応性が低い、かつ、硬化が遅い焼却灰
(都市ゴミ一般焼却炉底灰)

このタイプの焼却灰は焼却灰の吸水性が低いため、減水剤を添加しなくても流動性が得られる。また、焼却灰の分析をした結果、酸化亜鉛が含まれていることから、カルシウムヒドロキシジンケートを生成し、セメントの水和を阻害するといわれているため硬化が遅い²⁸⁾。セメント固化処理設備によっては促進剤などの硬化速度の調整が必要となる。また、固化試料から水素の発生が認められたが、固化試料が膨張するほど多量の水素は発生していない。

灰割合、水セメント比を変化させた場合の固化可能範囲を図 6-4 に示す。この焼却灰のみ混和材料を添加していない状態での固化範囲を示している。ここでは焼却灰の割合を 50%程度まで上げて目的とする流動性を得ることが可能である。一方、焼却灰自体に強度がないので圧縮強度は低下傾向にある。減水剤を添加することで水量を低減させ強度を向上できる可能性はある。先にも述べたが、混和材料を用いなくとも、灰割合 50%程度まで固化可能であったことから、他の焼却灰と比べて固化可能範囲は広いと言える。

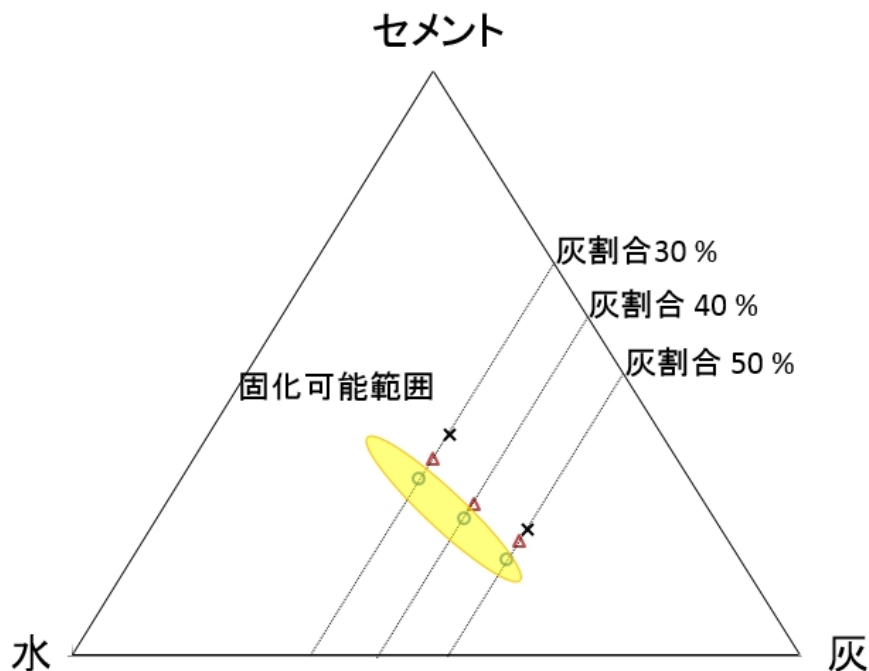


図 6-4 都市ゴミ一般焼却炉底灰の固化可能範囲三角図

○：良好に練り混ぜ可能、△：固めることはできるが流動性が悪い、×：混練できない

(3) 粒径が細かく吸水性が高い焼却灰
(ふげん放射性焼却飛灰)

このタイプの焼却灰は、水セメント比が低いと混練が難しいほど流動性が低い。その理由として、飛灰は一般的に炉底灰に比べると粒径が細かいため、比表面積が高く水が吸着されてしまうということがある。

減水剤の添加量を固定し、灰割合、水セメント比を変化させて固化した場合に確認された固化可能範囲を図 6-5 に示す。減水剤を添加しているにもかかわらず、目標とした混練性、固化性を有する固化試料の作製範囲は非常に狭く、固化が難しいタイプの焼却灰と言える。

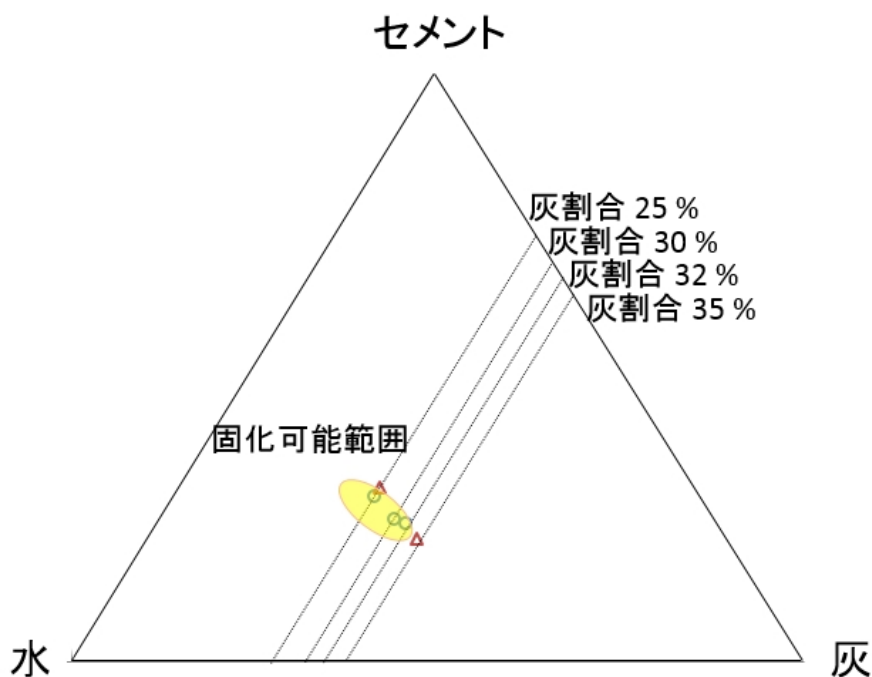


図 6-5 ふげん放射性焼却飛灰の固化可能範囲三角図

○：良好に練り混ぜ可能、△：固めることはできるが流動性が悪い、×：混練できない

6.4 現状におけるセメント固化技術開発の課題

本手引書では、焼却灰を固化するためのプロセス選定において、セメントの固化性と基本的な固化条件を把握しながら、今後実施する実規模試験等の固化条件の設定手順と固化条件を、種々の現象に対する試験により提示してきた。しかしながら、試験によって新たに判明した実施すべき項目や解決できていない課題、並びに解明できていない現象も残されていることから、現時点で解消及び把握しなければならない課題を挙げる。併せて、実規模試験により確認すべき項目についても示す。

(1)基礎試験

- ・膨張性鉱物の生成による固化試料の膨張抑制対策の検討

ふげん及び原科研放射性焼却灰においては、サイクル研一般焼却炉底灰と違い全体方向へ膨張する固化試料が観察されている。原因の特定と膨張を抑制する対策を検討するとともに、膨張が廃棄体容器に与える影響を調査する必要がある。

- ・膨張要因となるガス発生メカニズムとその発生量の把握

水素等のガスが養生中に発生すると、固化試料が膨張する。焼却灰中のアルミニウムは水と反応し水素を発生させることが分かっている。しかしながら、アルミニウム以外のガスを発生させるメカニズムについては、存在するかを含めて明らかになっていない。加えて、発生量が少なければガス圧が上昇せず、固化試料は膨張しないと予想される。焼却灰中の成分が発生させるガス量を把握し、膨張の閾値を把握する必要がある。

- ・均一性の確認に用いる手法の確立

焼却灰をセメントで混練すると、粘性が高く、また焼却灰の粒径が細かいことから偏在の可能性がある。廃棄体には、均一であることが必要であるため、焼却灰のセメント固化体についても、均一性を確認する必要がある。現行の廃棄体確認では、廃棄体の超音波伝播速度若しくは圧縮強度により混練物の均一性を把握している。このように、測定が容易な物性値と焼却灰のセメント固化体の均一性の関係を整理し、均一性を確認する方法の確立が必要である。

- ・焼却灰成分が混練性、固化性へ与える影響の明確化

焼却灰成分は、対象廃棄物の焼却割合が違っていると異なる。このため、同一の焼却炉であっても焼却灰が発生する都度、成分が異なることが予想される。焼却灰成分の変動幅について調査する必要がある。加えて、焼却灰の成分が変動しても固化体の要件を外れない固化条件を設定するためには、成分変動が焼却灰のセメント固化処理を行う際に、混練性、固化性に対して与える影響について明確にする必要がある。

- ・有害物質の溶出量と固化条件の関係把握

焼却対象廃棄物によっては、環境へ影響する有害物質が含まれる。有害物質の含有量や化学形態によっては、セメントを用いた場合に、溶出基準を満たすことができない場合も予想される。このため、有害物質の溶出量がどの程度になるか、また、固化条件によりどのように変化するかを把握し、許容できる焼却灰中の有害物質含有量を調査する必要がある。また、焼却灰の発生過程によっては複雑な形態で存在する有害物もあるため、形態による変化などについても確認する必要がある。

- ・難燃性廃棄物の焼却灰の固化特性

これまでの基礎研究は可燃性廃棄物の焼却灰を対象としてきた。この焼却灰の成分の影響を調べてきたが、難燃性廃棄物の焼却灰の組成は可燃性廃棄物の焼却灰のそれとは大きく異なることが予想され、今回検討した成分の範囲を超える可能性がある。従って、難燃性廃棄物の焼却灰を対象としたセメント固化試験を行う必要がある。

(2)実規模試験

- ・実規模による検証

小規模試験では把握できない項目については、実規模による固化体性能等の把握が必要である。特に、均質性や充填性については実機でしか判断が出来ないため、重点的に調査する必要がある。また、充填操作による混練物の配管への付着率や、充填中に混練物が硬化して閉塞させないために、硬化時間と充填時間の関係把握、廃棄体容器への割合を確認する必要がある。

以下に、想定される評価項目を示す。

1)混練性

- 攪拌翼の選定
- 攪拌翼の回転数
- 混練時間
- 投入順序
- 作製した固化体の圧縮強度測定及び非破壊による圧縮強度の推定の検討

2)充填性

- 配管を通した混練物の移送
- 充填時間
- 廃棄体容器の空隙率

3)廃棄体確認のためのデータ取得

- 空隙率
- 均一性
- 廃棄体確認手法 等

(3)その他

- ・作製した固化体の安全性に関する調査

放射性廃棄物の管理は、長期にわたるため、廃棄体の安定性についても、今後課題となりうる。埋設後の経時変化や蓄熱による劣化やガス発生による膨張などは考えられる項目を以下に示す。

1)安全性

- 固化体の膨潤圧
- 水素ガス等の廃棄方法
- 固化体の蓄熱

- ・有害物質等に関する検討と対策の立案

有害物質については、埋設施設の受入れ条件として検討中の要件である。埋設施設の要件では、廃棄物処理法に関連して、検討がなされている。しかしながら、廃棄物処理法以外でも、水質汚濁防止法や土壌汚染対策法など環境保護を目的とする法律や自治体が定める条例などにも、排出基準が定められており、関連する基準が多い。また、有害物質の幅についても、人体に有害という意味では毒物及び劇物取締法に定める毒物・劇物、労働安全衛生法に定める特定化学物質、化学的性状的に有害と言う意味では、消防法に定める危険物、放射性廃棄物の廃棄体に有害という意味では、水素を発生させ、膨張要因となる金属アルミニウムや核種溶出を促進するとされているセルロースなど、いくつもの対象物がある。固化対象である焼却灰は、重金属の濃縮やダイオキシンなど過去に一般産業界で問題となった環境汚染物質を多く含むことから、規制の動向をふまえて、含有量や溶出率などの知見の収集と溶出に対する対策の立案といったものも今後必要になると考えられる。

7. 終わりに

機構が保管する放射性焼却灰の合理的な処理処分を行うため、セメント固化技術の具体化を進めている。管理区域で使用した防護資材等が可燃性放射性廃棄物となるため、各拠点とも焼却処理が計画されており、焼却灰は多くの拠点で発生する廃棄物である。焼却灰は、焼却対象廃棄物や焼却炉形が異なると、化学的組成や物理的性状が異なる。このため、機構で発生する全ての焼却灰に対して、統一した固化条件でセメント固化体を作製することは難しい可能性が高い。つまり、各拠点がそれぞれの焼却灰の特性を評価し、装置設計及び運転条件の設定のための基礎的なデータを取得して、最適な焼却灰のセメント固化条件を設定する必要がある。

また、機構においては、過去に焼却灰のセメント固化技術開発の実績がないことから、焼却灰のセメント固化装置の設計に関する知見のみならず、焼却灰のセメント固化試験の試験手順や評価方法も定まっていない。各拠点が個別に試験を行い、別々の手法やデータを報告するよりも、標準的な試験方法が定まっている状態で試験に取り組んだ方が、機構全体として合理的に研究開発を進められることから、著者らがこれまでに実施してきた固化試験の知見を手引書としてまとめた。本手引書には、試験すべき項目や作業手順をまとめるとともに、混練物の操作性や固化性能を向上するための手段についてもこれまでに得られた結果を元に記載している。実際に焼却灰を採取し、固化条件を絞り込むための固化試験の計画策定に活用いただきたい。

しかしながら、これまでに実施してきた試験においても、焼却灰のどの成分が混練性、固化性へ影響を与えるかなど、解明できていない現象は残っている。また、焼却灰を対象とするセメント固化技術については課題も多くあげられることから、引き続き本手引書を充実させていく必要がある。そのためには、入手できる焼却灰に限りがあることから、特性を比較検討し、組成の影響などを明確化するためには、各拠点の協力と検討も不可欠である。

以上のようにまだまだ解決すべき課題も多く存在するが、各拠点の焼却灰を対象にセメント固化試験が実施され、具体的な特性についての相違点や類似点等についての知見が集積されていくことで、機構全体の放射性焼却灰の処理処分の合理化の方策を見出すことも期待できる。今後のセメント固化技術の実現に向け、本手引書を基に機構内のデータ整備が進むことを期待する。

参考文献

- 1) 川戸喜実 他,焼却灰のセメント固化試験 I:模擬焼却灰の基本的固化特性, JAEA-Technology 2010-013, 2010, 38p.
- 2) 総理府, 核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則 (昭和 63 年 1 月 13 日総理府令第 1 号) .
- 3) 科学技術庁, 核燃料物質等の第二種廃棄物埋設に関する措置等に係る技術的細目を定める告示 (昭和 63 年 1 月 13 日科学技術庁告示第 2 号) .
- 4) 天澤弘也, 他, 研究施設等廃棄物浅地中処分施設の概念設計, JAEA-Technology 2012-031, 2012, 338p.
- 5) 仲田久和, 他, 研究施設等廃棄物浅地中埋設処分対象廃棄体等に係る荷重変形特性の検討, JAEA-Technology 2011-036, 2012, 195p.
- 6) 総理府, 金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令 (昭和 48 年 2 月 17 日総理府令第 5 号) .
- 7) 秩父小野田株式会社「図表で見るコンクリートの基礎知識」.
- 8) 笠井芳夫, 「コンクリート総覧 (1998.6.10)」 技術書院, p.14.
- 9) 笠井芳夫, 「コンクリート総覧 (1998.6.10)」 技術書院, p.35.
- 10)原子力発電環境整備機構, 低アルカリ性セメントの処分場における長期適用性に関する検討, pp.3-60.
- 11)Y. Meguro, et al., Elution Behavior of Heavy Metals from Cement Solidified Products of Incinerated Ash Waste, Proc. the ASME 2011 14th Int. Conf. Environ. Remediation Radio. Waste Management, ICEM2011-59102.
- 12)笠井芳夫, 「コンクリート総覧 (1998.6.10)」 , 技術書院, p.245.
- 13)笠井芳夫, 「コンクリート総覧 (1998.6.10)」 , 技術書院, p.248.
- 14)T. Nakayama, et al., Expansion control for cementation of incinerated ash, Proc. 2nd Int. Symp. Cement-based Materials for Nucl. Wastes.
- 15)S. N. Afal, et al., Study of Aluminum Corrosion in Chloride and Nitrate Media and its Inhibition by Nitrite, J. Nepa; Chemical Soc. pp.26-33, Vol.22 (2007).
- 16)S.R. Taylor, Coatings for Corrosion Protection: Inorganic, Encyclopedia of Materials, Science and Technology, pp.1263-1269 (2001).
- 17)2007 年制定 コンクリート標準示方書 施工編, 土木学会, p.99.
- 18)早川光敬, 水を分割添加するコンクリートの練混ぜ技術に関する研究, 東京大学博士論文 (2000) .
- 19)大門正機編, セメントの科学;ポルトランドセメントの製造と硬化, JME 材料科学, p.56.
- 20)2013 年制定 コンクリート標準示方書 規格編土木学会基準および関連基準, 土木学会, p.339.
- 21)2013 年制定 コンクリート標準示方書 規格編 JIS 規格集, 土木学会, p.56.
- 22)セメント協会, エンサイクロペディア「セメント・コンクリート化学の基礎解説」, pp.157-162.
- 23)大村修太郎, 回転粘度計を用いたフレッシュコンクリートのレオロジー性質に及ぼすダイタンスー特性の定量化に関する実験的研究, 三重大学修士論文, 2008.

- 24)三島直生, 他, 試料の変形状態が回転粘度計の測定結果に及ぼす影響に関する基礎的実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, 2007. pp.37-42.
- 25)日本建築学会, 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 15 左官工事, p.354.
- 26)セメント協会, エンサイクロペディア「セメント・コンクリート化学の基礎解説」, p.153.
- 27)社団法人セメント協会, セメント水和物や硬化体の水和停止方法の検討, セメント化学専門委員会報告(2008).
- 28)下坂健一, クリンカーへの添加成分とセメントの諸物性に関する研究, 埼玉大学大学院博士論文 (2005).

付録 用語集

【アウトドラム方式】

廃棄体容器とは別の場所で混練して、廃棄体容器に充填する方法のこと。

【アルカリ骨材反応】

固化体中のアルカリと骨材中の二酸化ケイ素が反応して、ゲル状物質を生成し、それが吸水、膨潤して固化体を内部から破壊させる反応のこと。

【一般焼却灰】

非放射性の焼却灰のこと。

【エトリンガイト】

アルミネート相と硫酸イオンが反応して生成される水和物の名称のこと。 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ で示され、針状結晶として析出し、固化体を膨張させる性質がある。

【外部振動】

容器外から振動を与えて、混練物を充填した際に入り込んだ空気（気泡）を取り除く操作のこと。

【空練り】

混練機を用いて、水を加えない状態で粉体のみを混合させること。

【乾燥収縮】

自由水など、水和に使用されなかった蒸発可能な水が蒸発し、固化体が縮むこと。

【凝結】

混練物が流動状態から固体に変化すること。形を保つが強度を持たない状態のこと。

【クリープ】

固化体の塑性変形が時間とともに増加する現象のこと。

【固化】

セメントで固めること。

【固化性】

固まりやすさや圧縮強さ、膨張の程度などのセメント固化体が硬化する様を表したもの。

【固型化】

セメント等で廃棄体容器に固めること。

【コンクリート】

セメントと水、細骨材及び粗骨材を練り混ぜたもののこと。

【コンシステンシー】

固まる前の混練物の軟らかさの程度を表す用語のこと。

【混練性】

練り混ぜやすさのこと。

【混和材料】

混練物や固化体の性能を向上させるため、廃棄体容器に充填するまでに加える材料のこと。

【焼却灰の吸水性】

焼却灰が取り込む水の速度のこと。

【自由水】

セメント等の水和に使用されず、固化体中に液体の水として残っている遊離水のこと。

【シリカフェーム】

電気炉などで金属シリコンやフェロシリコンを精錬する際の排ガス中に含まれる副産物のこと。非晶質の二酸化ケイ素で、混和材料として用いられることがある。

【ストーカ炉】

傾斜した火格子に上部から焼却物を流下しながら焼却する炉のこと。

【スラッジ水】

洗浄によって発生する洗浄排水で、骨材等を含んだ水のこと。

【静電的反発力】

表面電荷どうしの反発力のこと。

【セメント混練物】

セメントと水のみで練り混ぜたもののこと。

【タップ振動】

数 cm の高さからプラモールドを地面に叩きつけ、外部振動を与える操作のこと。

【単位水量】

混練物 1 m³ あたりに必要な水の量 (kg) のこと。

【中性化】

アルカリ性である固化体が、空気中の二酸化炭素を吸収して細孔溶液の pH を下げること。

【ブリーディング】

混練物の沈降または分離により、混練水の一部が遊離して表面に現れる現象のこと。

【ブリーディング水】

ブリーディングで分離された水のこと。

【フレッシュコンクリート】

練り混ぜ直後から凝結までの未硬化のコンクリートのこと。

【粉末度】

粒子の細かさの程度を示す値。比表面積のこと。

【水セメント比】

セメントに対する水の重量割合のこと。

【密実性】

混練物が緻密に充填されていること。

【モルタル】

セメントと水、細骨材を練り混ぜたもののこと。

【立体障害】

セメント表面に吸着する高分子主鎖から伸びる側鎖が、セメント同士の凝集を抑制すること。

【流動床炉】

加熱した砂などの微粒子を空気の吹き込みにより流動させ、その中で廃棄物を焼却する炉のこと。

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨ	Y	10 ⁻¹	デ	d
10 ²¹	ゼ	Z	10 ⁻²	セ	c
10 ¹⁸	エ	E	10 ⁻³	ミ	m
10 ¹⁵	ペ	P	10 ⁻⁶	マイ	μ
10 ¹²	テ	T	10 ⁻⁹	ナ	n
10 ⁹	ギ	G	10 ⁻¹²	ピ	p
10 ⁶	メ	M	10 ⁻¹⁵	フェ	f
10 ³	キ	k	10 ⁻¹⁸	ア	a
10 ²	ヘ	h	10 ⁻²¹	ゼ	z
10 ¹	デ	da	10 ⁻²⁴	ヨ	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベール	B	
デジベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3 元素のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≡ 」は対応関係を示すものである。

表 10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー) 4.184 J (「熱化学」カロリー)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

