

JAEA-Technology 2016-011 DOI:10.11484/jaea-technology-2016-011

低アルカリ性セメント系材料の長期浸漬試験

Long-term Immersion Experiments of Low Alkaline Cementitious Materials

瀬野 康弘 野口 聡 中山 雅 杉田 裕 須藤 俊吉 棚井 憲治 藤田 朝雄 佐藤 治夫

Yasuhiro SENO, Akira NOGUCHI, Masashi NAKAYAMA, Yutaka SUGITA Shunkichi SUTOU, Kenji TANAI, Tomoo FUJITA and Haruo SATO

> 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 and Radioactive Waste Management

C

July 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発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大字白方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, 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

低アルカリ性セメント系材料の長期浸漬試験

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

瀬野 康弘^{*1},野口 聡^{*1},中山 雅⁺,杉田 裕,須藤 俊吉^{**}
 棚井 憲治⁺,藤田 朝雄⁺,佐藤 治夫^{*2}

(2016年3月29日受理)

放射性廃棄物の地層処分では、地下施設の建設にセメント系材料の使用が想定されている。一 般に、土木・建築分野で使用されている普通ポルトランドセメント(以下, OPC)を用いた場合、 セメント起源の高アルカリ性間隙水(pH=12.5以上)が浸出し、周辺の緩衝材や岩盤の性能を 低下させる可能性がある。そこで、セメント系材料に起因する浸出水の pH を低下させることを 目的として、低アルカリ性セメントが開発されている。

日本原子力研究開発機構では、低アルカリ性セメントの候補として、フライアッシュ高含有シ リカフュームセメント(High-volume Flyash Silicafume Cement,以下,HFSC)を開発した。 これまでに幌延深地層研究センター地下研究施設の坑道で、HFSCを用いた吹付けコンクリート の原位置施工試験を通じ、吹付けコンクリートとしての施工性を確認してきた。

本報告は、実際の地下施設の施工において適用可能と考えられる配合で作製された HFSC セメ ントペースト硬化体について、その長期的な pH 挙動を把握することを主な目的として実施して いる浸漬試験について、これまでに得られた結果を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

- + 幌延深地層研究センター
- ※ 技術開発協力員
- *1 東急建設株式会社(元 技術開発協力員)
- *2 岡山大学(2014年4月迄 福島環境安全センター)

Long-term Immersion Experiments of Low Alkaline Cementitious Materials

Yasuhiro SENO^{*1}, Akira NOGUCHI^{*1}, Masashi NAKAYAMA⁺, Yutaka SUGITA , Shunkichi SUTOU^{*}, Kenji TANAI⁺, Tomoo FUJITA⁺ and Haruo SATO^{*2}

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

> > (Received March 29, 2016)

Cementitious materials are expected to be used for the construction of an underground repository for the geological disposal of radioactive wastes. Ordinary Portland Cement (OPC) would conventionally be used in the fields of civil engineering and architecture, however, OPC has the potential to generate a highly alkaline plume (pH>12.5), which will likely degrade the performance of other barriers in the repository such as the bentonite buffer and/or host rock. Low alkaline cementitious materials are therefore being developed that will mitigate the generation of a highly alkaline plume.

Japan Atomic Energy Agency has developed a High-volume Flyash Silicafume Cement (HFSC) as a candidate low alkaline cementitious material. The workability of the HFSC shotcrete was confirmed by conducting *In-situ* full scale construction tests in the Horonobe Underground Research Laboratory.

This report summarizes the results of immersion tests to assess the long-term pH behavior of hardened HFSC cement pastes made with mix designs that are expected to be able to be used in the construction of an underground repository in Japan.

Keywords: Low Alkaline Cement, HFSC, OPC, Immersion Experiment, pH

+ Horonobe Underground Research Center

*Collaborating Engineer

*1 Tokyu Construction Co. Ltd. (Former Collaborating Engineer)

*2 Okayama University (Fukushima Environmental Safety Center until April, 2014)

目次

1	はじめに1
2	粉体浸漬試験2
2.1	粉体試料の作製及び浸漬方法2
2.1.1	使用材料2
2.1.2	試料の作製2
2.1.3	粉体試料の分析結果4
2.1.4	試料の浸漬・保管5
2.2	測定・分析手順
2.2.1	固液分離7
2.2.2	液相の評価7
2.2.3	固相の評価
2.3	分析結果9
2.3.1	液相の分析結果
2.3.2	固相の分析結果10
3	おわりに
参考文献	
付録1 浸	漬液のpH低下が顕著な浸漬試験20

Contents

1	Introduction	1
2	Immersion Experiment of the Powdered Specimens	2
2.1	Outline of the Immersion Experiment	2
2.1.1	Used Materials	2
2.1.2	Preparation of Test Samples	2
2.1.3	Analyzed Results of Samples before Immersion	4
2.1.4	Immersion of Test Samples	5
2.2	Procedure of Measurement and Analysis	6
2.2.1	Solid-Liquid Separation	7
2.2.2	Evaluation of Liquid Phase	7
2.2.3	Evaluation of Solid Phase	8
2.3	Analyzed Results	9
2.3.1	Analyzed Results of Liquid Phase	9
2.3.2	Analyzed Results of Solid Phase	10
3	Concluding Remarks	18
References	s	19
Appendix	1 Immersion Experiments whose pH Decreasing were Remarkable	20

表リスト

表2.1	使用材料	2
表2.2	使用材料の化学組成	2
表2.3	セメントペーストの配合	3
表2.4	粉体試料の熱重量示差熱分析(TG-DTA)の結果	4
表2.5	粉体試料の化学組成	4
表2.6	試料と測定・分析項目	6
表2.7	液相のpH測定結果	9
表2.8	液相の化学成分分析結果1	0
表2.9	固相の浸漬前後の化学組成分析結果1	0
表2.10	バッチ式浸漬試験における固相の化学組成の例1	0
表2.11	固相の浸漬前後の熱重量示差熱分析(TG-DTA)の結果1	2

図リスト

OPC 粉体試料のX線回折分析(XRD)の結果	5
HFSC424粉体試料のX線回折分析(XRD)の結果	. 5
測定・分析のフロー	7
OPCの浸漬前後のX線回折分析(XRD)の結果	11
HFSC424の浸漬前後のX線回折分析(XRD)の結果1	$\lfloor 2$
	OPC粉体試料のX線回折分析(XRD)の結果 HFSC424粉体試料のX線回折分析(XRD)の結果

写真リスト

写真2.1	セメントペーストの練り上がり状況	3
写真2.2	粉体試料の調製状況	3
写真2.3	粉砕状況	4
写真2.4	浸漬試料の保管状況	6
写真2.5	浸漬試料(振とう後)	6
写真2.6(1)	浸漬2年後のOPCのSEM像(視野1)	14
写真2.6(2)	浸漬2年後のOPCのSEM像(視野2)	14
写真2.7(1)	浸漬5年後のOPCのSEM像(視野1)	15
写真2.7(1)	浸漬5年後のOPCのSEM像(視野2)	15
写真2.8(1)	浸漬2年後のHFSC424のSEM像(視野1)	16
写真2.8(2)	浸漬2年後のHFSC424のSEM像(視野2)	16
写真2.9(1)	浸漬5年後のHFSC424のSEM像(視野1)	17
写真2.9(1)	浸漬5年後のHFSC424のSEM像(視野2)	17

This is a blank page.

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分施設には、支保工などにモルタルやコンクリートといったセメント系 材料の使用が想定されている。モルタルやコンクリートの主要材料であるセメントとして、土木・ 建築分野で広く使用されている普通ポルトランドセメント(以下,OPC)を用いた硬化体では、 間隙液が高アルカリ性(pH=12.5以上)となることが知られている。したがって、地層処分施設 においてセメント系材料として OPC を用いた場合には、その高アルカリ性間隙水が浸出するこ とにより、周辺の緩衝材や岩盤が長期的に変質する可能性が指摘されている^{1,2)}。OPC を用いた 場合における周辺の緩衝材や岩盤の長期的な変質を抑制するため、その間隙水の pH を低下させ ることを目的として、低アルカリ性セメントが開発されている。

日本原子力研究開発機構(以下,原子力機構)では,低アルカリ性セメントとして,フライア ッシュ(以下,FA)とシリカフューム(以下,SF)を混合することで間隙水や接触液のpHを 低下させた,フライアッシュ高含有シリカフュームセメント(High-volume Flyash Silicafume Cement,以下,HFSC)を開発した³⁾。HFSCは,FAとSFのポゾラン反応を通じて,OPCの みを用いたセメントペースト硬化体に含まれるポルトランダイトを消費するとともに,ケイ酸カ ルシウム水和物(以下、C-S-H)のCa/Siモル比を低下させることを指向したセメントである。

支保工の材料としての施工性については,幌延の地下研究施設に対する設計基準強度を上回る 強度発現が可能であることが,模擬トンネルへの吹付け試験を通じて確認された⁴⁾。さらに,実 際の掘削サイクルの中での施工性を確認することを目的として,幌延の深度140m及び深度250m 調査坑道において原位置施工試験が実施され,地下坑道へ適用可能であることが確認された^{5,6)}。

一方, HFSC のポゾラン反応に起因する低アルカリ性の発現については, 開発初期段階において, ポゾラン反応を促進して作製した HFSC ペースト硬化体に対する浸漬試験により確認された ⁷。こ の浸漬試験でのポゾラン反応の促進方法は, コンクリートの一般的な作製方法とは異なり, 水結 合比を 150%と高く設定し, ボールミルで攪拌 (50rpm)し, 養生温度を 60℃とするものであっ た。そこで, 一般的な方法で作製した HFSC ペースト硬化体について, その水和反応及びポゾラ ン反応に伴う pH の低下挙動を確認することを目的として, 平成 14 年度から浸漬試験を開始し た⁸。

本報告は、これまでに実施してきた浸漬試験のうち、粉砕された硬化体の浸漬試験の概要及び 実験データについてとりまとめたものである。具体的には、材齢期間 28 日まで標準水中養生し たセメントペースト硬化体を 0.5 mm 以下の粒径に粉砕した後、液固比 5 で所定の材齢期間まで 浸漬し、pH 測定や化学分析を行う浸漬試験(平成 22 年 1 月浸漬開始、以下、粉体浸漬試験)で ある。

2. 粉体浸漬試験

粉体浸漬試験は、反応が均一に生じ、試験結果を評価しやすい単純な系として、粉体試料を浸 漬する試験として実施した。

2.1 粉体試料の作製及び浸漬方法

2.1.1 使用材料

長期浸漬試験の試料は, HFSC424 のセメントペースト硬化体及び比較用の OPC のセメントペースト硬化体である。水結合材比(W/B) は 40%であり, 混和剤は用いていない。使用材料の仕様を表 2.1 に示す。また, 使用材料の化学組成を表 2.2 に示す。

材料名		詳細
ODC	並通ポルトランドセイント	試験用普通ポルトランドセメント (セメント協会製)
OPC	〒 通 か ル ト ノ ン ト ヒ メ ン ト	密度 3.18g/cm ³
FA	フライアッシュ	北電興業製 JISII種相当
\mathbf{SF}	シリカフューム	エルケム 940U

表 2.1 使用材料

表 2.2 使用材料の化学組成

使用+ +**	含有量 (wt%)								
使用材料	CaO	${ m SiO}_2$	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K_2O	SO_3	
OPC	65.0	21.4	5.30	2.7	1.50	0.29	0.48	2.10	
FA	1.40	70.0	22.2	2.40	0.65	0.39	1.40	0.20	
\mathbf{SF}	0.16	98.0	0.43	0.13	0.38	0.19	0.49	0.09	

2.1.2 試料の作製

浸漬試料の作製は、セメントペーストとして練り混ぜた後、直径 5cm、高さ 10cm のモールド に打ち込み、テーブルバイブレーターで振動させることにより締め固めた。20℃で 24 時間の養 生後、脱型し、28 日間の標準水中養生を行った。セメントペーストの配合を表 2.3 に、また、セ メントペーストの練り上がり状況を写真 2.1 に示す。

きわれ」々	W/B		空気量			
武州冶	(%)	W	(%)			
OPC	40	562	1405	0	0	0.5
HFSC424	40	504	504	252	504	3.6

表 2.3 セメントペーストの配合



写真 2.1 セメントペーストの練り上がり状況

浸漬に供する粉体試料は,所定期間水中養生した硬化体を粗粉砕後に真空乾燥し,乳鉢で粉砕後,さらに振動ミルで0.5 mm以下の粒径に粉砕することで作製した。写真2.2 に粉体試料の調 整状況,写真2.3 に粉砕状況を示す。

試料名	HFSC424	OPC
供試体		
粗粉砕後		
微粉砕後		

写真 2.2 粉体試料の調製状況



写真 2.3 粉砕状況

2.1.3 粉体試料の分析結果

粉体試料に対する熱重量示差熱分析(TG-DTA)の結果を表 2.4 に,化学組成を表 2.5 に,X 線回折分析(XRD)の結果を図 2.1 にそれぞれ示す。

衣Z.4 材体試料の熟里重示左熟分析(IG-DIA)	熱里重示 差 気約里重 示差 第二 </th
----------------------------	--

学和女		含有量 (wt%)	
武平石	結合水量*1	$Ca(OH)_2 \equiv^{*2}$	CaCO3 量 ^{※3}
OPC	15.97	15.05	3.48
HFSC424	8.73	0.29	0.59

※1:100~1000℃までの重量減少量※2:450℃付近の重量減少量※3:700℃付近の重量減少量

表 2.5 粉体試料の化学組成

試料名				含	有量 (wt	%)			
	ig.loss	CaO	$\rm SiO_2$	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na ₂ O	K_2O	SO_3
OPC	21.8	52.4	18.1	3.1	1.5	1.2	0.2	0.2	1.1
HFSC424	13.4	25.0	48.9	8.1	1.6	0.9	< 0.2	0.6	0.7



図 2.1(1) OPC 粉体試料の X 線回折分析 (XRD)の結果



図 2.1(2) HFSC424 粉体試料の X 線回折分析 (XRD)の結果

2.1.4 試料の浸漬・保管

140 mLのアクリル製容器に粉体試料 25gとイオン交換水 125 mL とともに入れ(液固比 5), 溶存した炭酸ガスの影響を排除するため,密封前にアルゴンガスを封入し,試料を浸漬した。保 管温度は 20℃とした。保管においては、タイマーを設定し1日に1回、定刻に振とう機によって 3分間の水平振動(一方向往復,振幅;25mm)を与えることで試料を攪拌した*。振とう速度(周期)は、ダイヤルゲージにより表示が120回/min程度となるように設定した。

保管状況を写真 2.4 に,振とう後の浸漬試料を写真 2.5 に示す。写真 2.5 から,振とうにより 試料が十分に攪拌されたことが分かる。なお,粉砕試料の浸漬・保管は,平成 22 年 1 月に開始 した。



写真 2.4 浸漬試料の保管状況



写真 2.5 浸漬試料(振とう後)

2.2 測定・分析手順

分析対象試料は,701日間及び1851日間浸漬した試料である。以後,それぞれ浸漬2年後の 試料,浸漬5年後の試料と呼ぶ。

測定・分析項目を表 2.6 に、測定・分析のフローを図 2.2 に示す。

封約友	測定	・分析項目
武件名	液相	固相
OPC		・化学組成分析
HFSC424	・pH ・化学成分分析	 ・結晶相解析 ・結晶相観察 ・熱重量示差熱分析

	表 2.6	試料と測定。	・分析項目
--	-------	--------	-------

^{*}週1回はハンドシェイクにより縦方向にも振とうした。

JAEA-Technology 2016-011



図 2.2 測定・分析のフロー

2.2.1 固液分離

浸漬試料の固液分離作業は、試料容器を振とう器で 30 分間振とう攪拌した後、アルゴンガス がパージされた雰囲気制御グローブボックス内において、孔径 0.45µm のメンブレンフィルター (PTFE 製)を用いて吸引ろ過により行った。

2.2.2 液相の評価

(1) pH 測定

液相の温度を一定とするため、20±2℃の環境下で12時間以上静置した。その後、液相のpH をガラス電極法により測定した。pH測定は、アルゴンガスがパージされた雰囲気制御グローブ ボックス内で実施した。pH測定は、pH標準溶液を用いて校正した後実施した。測定に際しては、 測定毎にガラス電極を純水で十分に洗浄した。pHの測定は3回実施し、平均値を算出した。

- ・装置 : 堀場製作所社製 D-53
- ・ガラス電極:堀場製作所社製 6367-10D (pH 測定範囲, 0.00~14.00)
- ・標準溶液 : pH9 堀場製作所社製 pH 標準液(ホウ酸塩標準液) pH12 水酸化カルシウム飽和溶液

(2) 化学成分分析

固液分離後の液相は、イオンクロマトグラフ(IC)による測定試料については速やかに装置の 測定範囲となるように希釈し、測定した。誘導結合プラズマ発光分光分析(ICP-AES)による測 定試料については、炭酸化を抑制するため硝酸を用いて酸性に調整し、測定原液試料とした。各 元素の濃度に合わせて装置の測定範囲となるように希釈操作を実施し,液相濃度を測定した。分 析を実施した化学成分及び装置を以下に示す。

①分析対象イオン:塩化物イオン(Cl⁻),硫酸イオン(SO4²⁻)*

・装置:イオンクロマトグラフ(IC)

東亜電波工業社製 ICA-5000

・条件:陰イオンカラム(PCI-230S),ケミカルサプレッサSPR-AN

溶離液 : 炭酸ナトリウム・炭酸水素ナトリウム混合溶液

除去液 : 硫酸 10mmol/L

②分析対象元素:カルシウム(Ca),ケイ素(Si),アルミニウム(Al),鉄(Fe),マグネシウム(Mg), ナトリウム(Na),カリウム(K),硫黄(S)*

・装 置:誘導結合プラズマ発光分光分析(ICP-AES)

バリアン社製 VISTAAX CCD Simultaneous (浸漬2年後)

PerkinElmer 社製 Optima8300 (浸漬5年後)

2.2.3 固相の評価

浸漬2年後の分析時には、固液分離後の固相試料は、グローブボックス内で2週間乾燥後、分 析に供した。浸漬5年後の分析時には、固液分離後の固相試料を真空乾燥した後、分析に供した。

(1) 化学組成分析

浸漬2年後について,固相試料の化学組成分析を実施した。化学組成の分析は,セメント協会 標準試験方法JCAS I-11「調合原料及びダストの化学分析方法」に準拠して実施した。分析対象 は、以下の通りである。

・定量対象:強熱減量(ig.loss), CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O, SO₃

(2) 熱重量示差熱分析(TG-DTA)

固相試料の熱重量示差熱分析装置(TG-DTA)による測定を実施した。測定は、炭酸化の影響 を抑えるため窒素ガス雰囲気下で実施した。TG-DTA 測定結果より、450℃付近の重量減少から 水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)量、700℃付近の重量減少量から炭酸カルシウム(CaCO₃)量を求め た。また、100 ℃から1000 ℃までの重量減少量から結晶水量を求めた。

・装 置:熱重量示差熱分析装置(TG-DTA)

リガク社製 Thermoflex TAS-2000 (浸漬2年後) リガク社製 ThermoPlus RVO2 (浸漬5年後)

^{*}SO4²は浸漬2年後の分析のみ,Sは浸漬5年後の分析のみ。

 ・条件:測定温度:室温~1000℃,昇温速度:20 ℃/min 測定雰囲気:N2ガス雰囲気下

(3) 結晶相解析

固相試料を対象に粉末X線回折(XRD)測定を実施し、結晶相を同定した。

・装 置:粉末X線回折装置(XRD)

パナリティカル社製X'Pert PRO MPD_P

・条 件:ターゲット Cu, 走査範囲:20=5~60°

(4) 形態観察

固相試料を対象に走査型電子顕微鏡(SEM)による試料表面の形態観察を実施した。観察試料の表面には、導電性を確保するために Pt-Pd 蒸着処理を行なった。

・装 置:走査型電子顕微鏡 (SEM)

日立製作所社製 S-4100

・条件:加速電圧:15kV

2.3 分析結果

2.3.1 液相の分析結果

(1) pH 測定

浸漬2年後及び浸漬5年後の固液分離後の液相の pH 測定結果を表 2.7 に示す。pH はひとつの試料について3回測定し、いずれの測定結果も0.01の差に収まっていたことから、表 2.7 には 平均値を示す。浸漬2年後と浸漬5年度の双方で、OPCのpH は約12.7、HFSC424のpH は約 11.2 であった。

分析時期	OPC	HFSC424
浸漬2年後	12.7	11.2
浸漬5年後	12.7	11.1

表 2.7 液相の pH 測定結果

(2) 化学成分分析

液相の化学成分分析結果を表 2.8 に示す。OPC に比べると, HFSC424 の Ca 濃度は一桁小さ く, Si 濃度は高い値を示した。セメントの養生方法や浸漬期間,液固比などの違いはあるものの 既往の報告⁹と同様の傾向である。

⇒+*[夕	八七畦田					濃度(n	nmol/L)				
武州名	万州时期	Ca	Si	Al	Fe	Mg	Na	К	S	$\mathrm{SO}_{4^{2^{*}}}$	Cl-
ODC	浸漬2年後	15.45	0.01	0.02	< 0.001	< 0.002	14.39	13.57	_	0.02	0.09
OPC	浸漬5年後	14.64	0.01	0.02	< 0.005	< 0.01	13.78	13.27	0.50	_	0.01
HFSC	浸漬2年後	1.19	1.44	0.01	< 0.001	< 0.002	3.52	1.90	—	1.90	0.69
424	浸漬5年後	1.52	1.11	0.01	< 0.005	< 0.01	3.52	1.60	2.26	_	0.76

表 2.8 液相の化学成分分析結果

2.3.2 固相の分析結果

(1) 化学組成分析

浸漬2年後の固相の化学組成分析結果を表2.9に示す。表には浸漬前試料の測定結果を合わせて示す。表には、分析結果を用いて求めたCa/Siモル比の計算値も併記した。

セメントの養生方法や浸漬期間,液固比などの違いはあるものの,HFSC424の Ca/Si モル比は,既往の報告⁹⁰で分析された結果から計算された Ca/Si モル比(表 2.10)とほぼ同じ値を示している。

⇒+∞ 々	八七時期	含有量 (wt%)									Ca/Si
武州石	万州时期	ig.loss	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O*	K_2O	SO_3	モル比
OPC	浸漬前	21.8	52.4	18.1	3.1	1.5	1.2	0.2	0.2	1.1	3.10
OPC	浸漬2年後	29.4	46.2	15.2	4.2	1.9	1.0	0.1	0.1	1.5	3.26
HFSC	浸漬前	13.4	25.0	48.9	8.1	1.6	0.9	< 0.2	0.6	0.7	0.55
424	浸漬2年後	26.2	20.2	39.6	9.2	2.0	0.7	0.2	0.5	0.9	0.55

表 2.9 固相の浸漬前後の化学組成分析結果

*浸漬前と浸漬2年後では分析装置が異なるために定量下限が異なる。

表 2.10 バッチ式浸漬試験における固相の化学組成の例*

카이 전	夕 (中				솔	了有量(wt	%)				Ca/Si
武科名	余件	ig.loss	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K_2O	${ m SO}_3$	モル比
	初期試料	—	23.5	43.7	11.0	2.1	1.1	0.3	0.7	0.8	0.58
HFSC 424	液固比 10	_	23.5	44.2	11.4	2.2	1.1	0.2	0.5	0.6	0.57
	液固比 100	_	23.4	44.8	11.7	2.3	1.2	0.2	0.4	0.4	0.56
	液固比 500	_	22.4	45.4	12.3	2.4	1.2	0.1	0.3	0.3	0.53

*参考文献 9)の表 4.2.2-9 より HFSC424 の結果を抜粋し、Ca/Si モル比を計算した。

(2) 結晶相解析

OPC の XRD 測定結果を図 2.3(1)に, HFSC424 の XRD 測定結果を図 2.3(2)に示す。図には, 浸漬 2 年後(2y) と浸漬 5 年後(5y) の結果とともに, 浸漬前試料の測定結果(0y) も示す。

図 2.3(1)より、OPC の浸漬 2 年後では、ポルトルトランダイト (Ca(OH)₂)、C-S-H、エトリ ンガイト (AFt: 3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O)、ヘミカーボネート (AFm(0.5C): 3CaO·Al₂O₃· 1/2CaCO₃·1/2Ca(OH)₂·12H₂O) が検出された。浸漬前試料にモノサルフェート (AFm: 3CaO· Al₂O₃·CaSO₄·12H₂O) として検出された AFm 相が、その層間の SO₄²⁻イオンが CO₃²⁻と置換さ れたヘミカーボネートとして検出された理由として、浸漬前試料に含まれていた CaCO₃により、 モノサルフェートの炭酸化が生じたためと思われる。また、浸漬前試料に含まれていた未水和セ メント鉱物である Blite (3CaO·2SiO₂) は、浸漬 2 年後には検出されなかった。浸漬 5 年後にお いても、浸漬 2 年後と同様の鉱物が検出された。

図 2.3(2)より, HFSC424 の浸漬 2 年後では, 未水和の FA に由来するムライト及びクォーツ, セメント水和物である C-S-H 及びエトリンガイトが検出された。浸漬前試料に検出されたポルト ランダイト及び未水和セメント鉱物である Blite (3CaO・2SiO₂)は,浸漬 2 年後には検出されな かった。Blite については浸漬期間中に水和が進行したため消失し, ポルトランダイトについては ポゾラン反応により消費されたものと考えられる。



図 2.3(1) OPC の浸漬前後の X 線回折分析 (XRD)の結果



図 2.3(2) HFSC424 の浸漬前後の X 線回折分析 (XRD) の結果

(3) 熱重量示差熱分析(TG-DTA)

固相の TG-DTA の測定結果を表 2.11 に示す。表には浸漬前試料の測定結果を合わせて示す。 浸漬 2 年後及び 5 年後の OPC では浸漬前の OPC に比較してポルトランダイト (Ca(OH)₂) が 増加した原因として,浸漬前試料に含まれていた未水和セメント鉱物が浸漬中に水和反応したた めと考えられる。このことは図 2.3(1)において浸漬前試料で検出された Blite (3CaO・2SiO₂) が, 浸漬 2 年後及び 5 年後試料から検出されなかったことと整合する。一方,浸漬 2 年後及び 5 年後 の HFSC ではポルトランダイト (Ca(OH)₂) が検出されなかったのは,図 2.3(2)で示した XRD 測定結果と整合する。

封約夕	八七時期	含有量 (wt%)					
武作者	刀仰时旁	結合水量*1	$Ca(OH)_2^{\otimes 2}$	$CaCO_3^{*3}$			
	浸漬前	15.97	15.05	3.47			
OPC HFSC424	浸漬2年後	23.05	20.7	0.60			
	浸漬5年後	18.93	19.2	N.D.			
	浸漬前	8.73	0.29	0.59			
	浸漬2年後	17.55	N.D.**4	N.D.			
	浸漬5年後	11.74	N.D.	N.D.			

表 2.11 固相の浸漬前後の熱重量示差熱分析(TG-DTA)の結果

※1:100~1000℃までの重量減少量※3:700℃付近の重量減少量

※2:450℃付近の重量減少量

※4:N.D. 検出下限以下

(4) 形態観察

浸漬2年後及び浸漬5年後のOPCのSEM像を写真2.6及び写真2.7に,浸漬2年後及び浸漬5年後のHFSCのSEM像を写真2.8及び写真2.9にそれぞれ示す。これらの写真は、それぞれの試料に対して視野の異なる2箇所に対して、倍率を変えて撮影したものである。たとえば、浸漬2年後のOPCに対しては、写真2.6(1)a)及び写真2.6(2)a)で示す箇所においてそれぞれ3通りの倍率で撮影した。いずれの箇所においても、a)→b)→c)の順に倍率が高い。

浸漬2年後の OPC では Ca(OH)₂, C-S-H, エトリンガイト, ヘミカーボネートが確認された。 写真 2.6(1)a)及び写真 2.6(2)a)で確認された 10 µm 以上の比較的大きな板状の組織は Ca(OH)₂ で あると考えられる。写真 2.6(1)c)及び写真 2.6(2)c)で網状〜針状に発達している組織は C-S-H で ある。写真 2.6(2)c)で確認された六角板状の組織は AFm 相であると考えられるが, XRD の結果 と合わせて考えると,モノサルフェートではなくヘミカーボネートであると思われる。セメント 水和物の組織において 10 µm 程度の大きさの針状結晶はエトリンガイト (AFt)と考えられるが, 本試料は粉砕した試料であるため Ca(OH)₂ が破砕されたことにより針状結晶のような形態を成 している可能性もあることから,全体的に観察される針状の組織はエトリンガイトあるいは Ca(OH)₂であると考えられる。写真 2.7(1)及び写真 2.7(2)に示すように,浸漬5 年後の OPC で は、浸漬2 年後の OPC と同じ水和物が観察された。

浸漬2年後のHFSC424では未水和FA, C-S-H, エトリンガイトが確認された。写真2.8(1)b) 及び写真2.8(2)b)の中央付近に見られる5µm程度の球状の粒子がFAである。一方, 0.2µm程 度の小さな球状粒子であるSFは確認できなかった。2年間の浸漬で,SFの水和が進み水和物と の判別ができなかった可能性がある。写真2.8(1)c)及び写真2.8(2)c)で網状〜針状に発達している 組織はC-S-Hである。全体的に観察される針状の組織はエトリンガイトと考えられる。写真2.9(1) 及び写真2.9(2)に示すように,浸漬5年後のHFSCでは,浸漬2年後のHFSCと同じ水和物及 び未水和FAが観察された。



写真 2.6(1) 浸漬 2 年後の OPC の SEM 像(視野 1)

写真 2.6(2) 浸漬 2 年後の OPC の SEM 像(視野 2)



写真 2.7(1) 浸漬 5 年後の OPC の SEM 像(視野 1)

写真 2.7(2) 浸漬5年後の OPC の SEM 像(視野 2)



写真 2.8(1) 浸漬 2 年後の HFSC424 の SEM 像(視野 1)

写真 2.8(2) 浸漬 2 年後の HFSC424 の SEM 像(視野 2)



浸漬5年後のHFSC424のSEM像(視野1)

写真 2.9(2) 浸漬 5 年後の HFSC424 の SEM 像(視野 2)

3. おわりに

本資料では,HFSC 硬化体の pH 挙動を把握することを目的として実施している浸漬試験のうち,粉体浸漬試験のデータを整理した。浸漬後,5 年経過時点での OPC の pH は 12.6 以上であるのに対し,HFSC424 の pH は約 11.1 であった。

HFSCは、処分場の地下坑道の支保工に使用される場合、急結剤を添加した吹付けコンクリートとして施工されることが想定される。一方、場所打ちコンクリートとして適用される場合は急結剤を使用しないことから、両者を比較するためにも条件を統一した浸漬試験を実施することも必要であると考える。今後は、ここで報告した浸漬試験を継続するとともに、追加で実施すべき試験について検討し、必要に応じて実施していく予定である。

参考文献

- 1)久保博,黒木泰貴,三原守弘: "ベントナイト系緩衝材のコンクリート間隙水による長期変質の 基礎研究",土と基礎 46-10, pp.31-34(1998).
- 2)大和田仁, 三原守弘, 黒木泰貴, 有本邦重: "アルカリ溶液中での花崗岩の変質挙動", JNC TN8400 2000-027(2000),19p.
- 3)三原守弘,入矢桂史郎:"放射性廃棄物処分場用セメント系材料",特許公報,第2941269号(1999).
- 4)小西一寛,中山雅,三原守弘,吉田泰,入矢桂史郎,秋好賢治,納多勝:"幌延深地層研究計画 における低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの施工性に関する研究", JAEA-Research 2006-040(2006),53p.
- 5) 中山雅, 佐藤治夫, 杉田裕, 野口聡: 幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメント系材料の適用性 -140m 調査坑道における原位置吹付け施工試験-,JAEA-Research 2010-055(2011),25p.
- 6)中山雅,澤田純之,佐藤治夫,杉田裕:幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメント系材料の適用性-250m 調査坑道における原位置吹付け施工試験-,JAEA-Research 2012-023(2012),65p.
- 7)大和田仁,三原守弘,入矢桂史郎,松井淳:"放射性廃棄物地層処分システムにおけるセメント 系材料の検討-浸出液の pH を低くしたセメント系材料の施工性と機械的特性",JNC TN8400 99-057 (2000),43p.
- 8)中山雅,小林保之,松田武,納多勝,入矢桂史郎,竹田宣典:"幌延深地層研究計画における低 アルカリ性セメントの適用性に関する研究(Ⅱ)", JAEA-Research 2009-035(2009),70p.
- 9) 亀井玄人,本田明,三原守弘,小田治恵,村上裕,増田賢太,山口耕平,松田節郎,市毛悟, 高橋邦明,目黒義弘,山口大美,榊原哲朗,佐々木紀樹: "TRU 廃棄物の処理・処分技術に関 する研究開発 平成 19 年度報告", JAEA-Research 2008-082(2008),84p.

付録1:浸漬液のpH低下が顕著な浸漬試験

表1に浸漬液のpH低下が顕著であったHFSC試料の浸漬試験を示す。

これらの試験条件は,温度が高く,ポゾラン反応を促進させる条件¹⁾,W/Bが150%と実用的なコンクリート配合ではないもの²⁾,浸漬方法が液交換式で溶脱反応を促進させるもの³⁾などである。HFSC226の浸漬液のpHは低い³⁾ものの,強度発現が小さいため,実用的な配合は見つかっておらず,採用には至っていない。

また,浸漬水が人工海水の場合 ⁴⁾,液固比が増加すると,すなわち溶脱が促進されると OPC でも pH が低下すること ⁵⁾が確認されている。

文献・報告書	HFSC	W/B		試験条件						
(発刊年)	材料 構成比	材料 (%) 構成比	養生方法,期間	浸漬方法	粉砕試料 サイズ	浸漬水	液固比	温度 (℃)	達成時期	
入矢ら ; JNC TJ1400	226*	40	封かん養生,3日	バッチ式	500μm 以下	(オン交換水	2	50^{*}	浸漬 49 日	
2001-0041) (2001)	226*	40	封かん養生,3日	バッチ式	500μm 以下	(オン交換水	2	$65, 80^{*}$	浸漬3日	
入矢ら;JCI 年次論文 報告集 Vol.25,No.21 ²⁾ (2003)	424	150^{*}	ボールミル内 連続攪拌**, 28 日間	液交換式**	500µm 以下	蒸留水	$2\sim$	20	浸漬直後	
	226*	50	封かん養生,1年	液交換式※	90μm 以下	(オン交換水	$500\sim$	20	積算液固比 1000	
2009-046 ³ (2010)	424	50	封かん養生,1年	液交換式※	90μm 以下	(オン交換水	$500\sim$	20	積算液固比 1500	
平成24年度セメント影 響公募報告書 ⁴⁾ (2013)	424	50	封かん養生, 6ヶ月	バッチ式	90µm 以下	人工海水	2	20	浸漬1ヶ月	

表 1 浸漬液の pH 低下が顕著な浸漬試験

**実用的ではない配合や現実的ではない養生条件(人工海水は除く)。温度については廃棄体が定置される処分深度の地温によっては現実的な場合もある。

参考文献

- 1)入矢桂史郎,三上哲司,保岡哲治,上垣義明: "幌延深地層研究センターにおけるコンクリート 材料の施工性に関する研究", JNC TJ1400 2001-004(2001),150p.
- 2) 入矢桂史郎, 三原守弘: "ポゾラン材料を高含有した低アルカリ性コンクリートの開発", コン クリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.185-190(2003).
- 3) 亀井玄人,本田明,三原守弘,小田治恵,村上裕,増田賢太,山口耕平,松田節郎,市毛悟, 高橋邦明,目黒義弘: "TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発 平成 20 年度報告", JAEA-Research 2009-046(2010),80p.
- 4)日本原子力研究開発機構:"平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 セ メント材料影響評価技術高度化開発 報告書"(2013).
- 5) 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構: "TRU 廃棄物処分技術検討書-第2次TRU 廃棄 物処分研究開発取りまとめ-根拠資料集分冊2 地層処分の安全性の検討", JNC TY1450 2005-001(2)(2005).

_

表 1. SI 基本単位							
甘大昌	SI 基本ì	単位					
本平里	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	Α					
熱力学温度	ケルビン	Κ					
物質量	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
AI 立長 SI 組立単位	
名称	記号
面 積 平方メートル	m ²
体 積 立方メートル	m ³
速 さ , 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 ⁸
質量濃度 キログラム毎立方メートル	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	t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

			SI 租立单位	
組立量	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
立体鱼	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	Ν		m kg s ⁻²
E 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	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
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	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	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
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	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	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH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。
 (h)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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告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

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$
角 加 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
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 辛	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	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	ダレイ毎秒	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	名称	記号	乗数	名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

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=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm 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	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原	子質量単	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=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	ci単位しの粉結的な間接け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	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	
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J	
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N	
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s	
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$	
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$	
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx	
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²	
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$	
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T	
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹	
(a) 3元系の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	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	11		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$