

放射性廃棄物処分におけるセメント系材料のバリア機能評価について[†]広永道彦^{††}

放射性廃棄物におけるセメント系材料の人工バリアとしての核種閉じ込め機能評価手法を確立するために、筆者はその機能を物理的な核種閉じ込め機能としての止水性能と化学的な核種閉じ込め機能としての吸着性能として捕らえた。

本報告は、このうち止水性能については、筆者が提案した長期止水性能評価手法の紹介と評価結果の一例について記し、吸着性能についてはセメント組織の化学特性の把握の一環として検討した低 pH セメントの特徴を試験結果に基づいて纏めたものである。

Keywords: 放射性廃棄物、処分、セメント材料、人工バリア

In order to establish the method of assessment for barrier function for cementitious materials in radio-active wastes disposal, in this report, barrier function should be separated into physical barrier function and chemical barrier function. This report presents long term permeability at concrete structure and low level pH cement constructed by author.

Keywords: radio-active wastes, disposal, cementitious materials, barrier

1. はじめに

現在、我が国で初めての放射性廃棄物の処分が青森県の低レベル放射性廃棄物埋設センターで行われている。低レベル放射性廃棄物の埋設処分に関する基本概念は、人工・天然バリアの多重防護によって核種の移行を抑制するとともに、天然バリアの核種の拡散・移行によって生活環境への影響が十分小さくなるまで安全に放射性物質を閉じ込め、段階的に管理を軽減するというものであり、埋設処分施設を構成する人工バリア材料には、廃棄物の放射能濃度、特性および評価に応じた核種閉じ込め機能に対する耐久性が要求される。

セメント系材料は、現在の低レベル放射性廃棄物の埋設処分および将来行われる TRU 放射性廃棄物の処分において、施設構成部材あるいは人工バリアとして評価されているが、施設構成部材としての長期耐久性、または人工バリアとしての核種移行抑制機能に関しては検討の余地があると考えられる。

低レベル放射性廃棄物の埋設処分では、セメント系材料は人工バリアによって十分核種の遅延効果が期待できる設計・評価となっているが、それは処分される廃棄体中に含有されている放射性核種の放射能レベルが低いことによる。一方、今後地下埋設処分が計画されている TRU 放射性廃棄物の放射能レベルを勘案すると、人工バリアと天然バリアの核種閉じ込め機能の分担を合理的に設計・評価し、処分施設の過剰設計・保守的な安全評価にならないようにすることが、経済的効果が増加する。

そのため、今後の処分動向を考慮すると、セメント系

材料を人工バリアとして使用する場合、その要求機能を踏まえた上で既存の技術での評価の限界と、今後必要とされる技術開発事項を整理しながら検討していくことが重要と考えられる。

本報告は、上記に示した観点から、セメント系材料の人工バリアとしての要求機能に対する現状における評価および、今後必要とされると思われる研究課題の紹介および、その成果の一部を取りまとめたものである。

2. セメント系材料の人工バリアとしての要求機能

セメント系材料は、従来より構造部材としてその耐力および劣化対策が課題とされ、かつ現在の一般的なコンクリート構造物の供用年数も 50~100 年程度であり、その間に発生するひびわれ等の劣化に対しては従来より研究がなされ、配合、材料、設計・施工により対応してきた。

さらに、構造物を維持するために、基本的に保守・補修で対応してきた。しかし、放射性廃棄物の処分施設は浅地層あるいは深地層に建設されるため、処分場閉鎖後は、保守・補修を行うことが困難であり、設計段階で構造物としてできるだけ長期的に機能するように配合、材料仕様を決める必要がある。さらに、人工バリアとして核種移行を抑止するという役割を担うために、化学的な検討も必要とされる。

このような観点から、放射性廃棄物処分においてセメント系材料に要求される機能を以下のように取りまとめた。

我が国で行われている低レベル放射性廃棄物の浅地中埋設処分の基本的な考え方は、時間の経過に伴って、放射能が減衰して人間環境への影響が十分に軽減されるまでの間、施設等の人工バリアによって核種移行を抑止し、土壤等の天然バリアによって核種の移行遅延をはかると

[†] The Assessment of Barrier Characteristic for Cementitious Materials in the Disposal of Radioactive Waste, by Michihiro Hironaga (hironaga@criepi.denken.or.jp)

^{††} (財) 電力中央研究所バックエンドプロジェクト天然バリアチーム Central Research Institute of Electric Power Industry Abiko Research Laboratory, Nuclear Fuel Cycle Back-End Project Natural Barrier Team. 〒270-11 我孫子市我孫子 1646

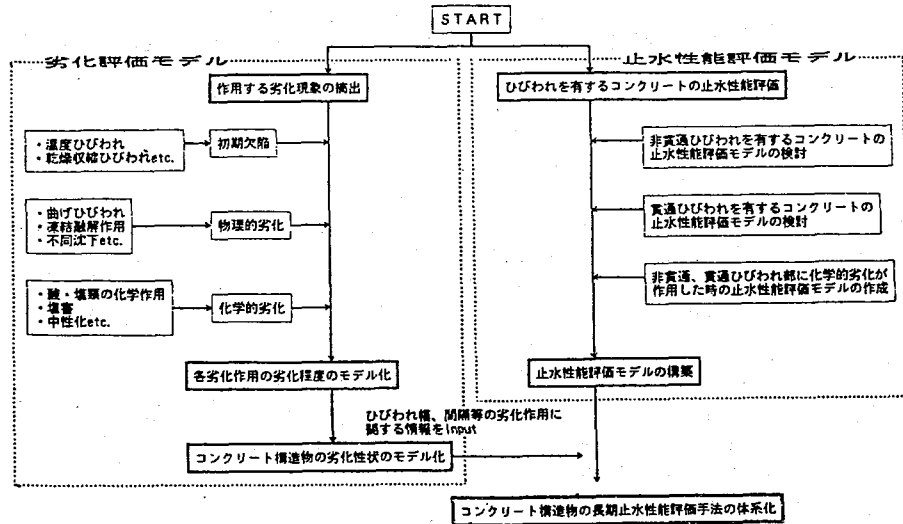


図1 コンクリート構造物の長期止水性能評価手法構築概念図

いうものであり、段階的に管理を軽減していく方法が取られている。

そのため、処分施設を構成するセメント系材料には、廃棄物の放射能レベルにより重要度の違いはあるものの基本的には構造物としての①耐力の他に、人工バリアとして、②地下水の移行を遅延させるための低透水性（以下「物理的な核種閉じ込め機能」と記す）と、③地下水によって移行する核種を遅延させるための吸着性（以下「化学的な核種閉じ込め機能」と記す）が要求される。

以下に、上記②、③についてこれまでに筆者が実施してきた研究成果の一部を示す。なお、①については従来から現在に渡って土木・建築の分野で検討が進められているため、本研究では対象外とした。

3. 放射性廃棄物処分施設（鉄筋コンクリート構造物）の物理的な核種閉じ込め機能（止水性能）評価[1]

3.1 評価手法の概念

評価手法の概念は、次の通りである。

まず、①評価すべきコンクリート構造物が置かれた環境条件から、その構造物の長期にわたる止水性の維持に影響を与えると考えられる劣化作用を抽出する。次に、②個々の劣化評価を行い、劣化評価モデルを構築する。さらに、③各劣化作用を考慮した各部位毎のコンクリートの止水性能評価を行い、④これらの各部位を集合して全体構造物の止水性を評価する。

この概念図を図1にフローで示す。

3.2 地中コンクリート構造物の長期止水性能評価

3.1 に示した評価概念にしたがって、図2に示すような地中コンクリート構造物の0~300年に渡る透水係数の経年変化を評価した。

その結果を以下に示す。

3.2.1 劣化因子の抽出

本評価において抽出した劣化因子は、図2に示すような施設を評価の対象として、建設後20~30年で地中に埋設されることを想定し、かつ良質な材料を用いて入念な施工を行うという条件を仮定し、材料・施工に起因する劣化作用は生じないものとした。そのため、この評価で取り上げた劣化因子は使用・環境条件に起因するものとして抽出し、次の通りとした。

- ①初期欠陥：温度ひびわれ、乾燥収縮ひびわれ
- ②物理的劣化：曲げひびわれ
- ③化学的劣化：硫酸塩による浸食（地下水溶存イオンとして考慮）

3.2.2 劣化評価モデルの構築

止水性能を評価するためには、その性能に影響を与える劣化作用をモデル化し、定式化することが重要である。

そのため、発生するひびわれの幅、間隔については既往の研究に基づいて定式化を行い、また、化学的劣化速度については新たに提案して定式化を行った。

各劣化作用の定式化は次の通りである。

(1) 初期欠陥モデル

温度ひびわれの劣化モデルは、調査の結果から小野の式[2]を採用し、ひびわれ幅、間隔などの特性値を評価した。

乾燥ひびわれの劣化モデルは、調査の結果から阪田らの式[3]を採用し、ひびわれ幅、間隔などの特性値を評価した。

これらの式を選定した理由は、いずれも実構造物との検証、あるいはその他の評価式との比較評価で、最も適合性があることが既往の研究で示されていたからである。

小野の式、阪田の式は以下の通りである。

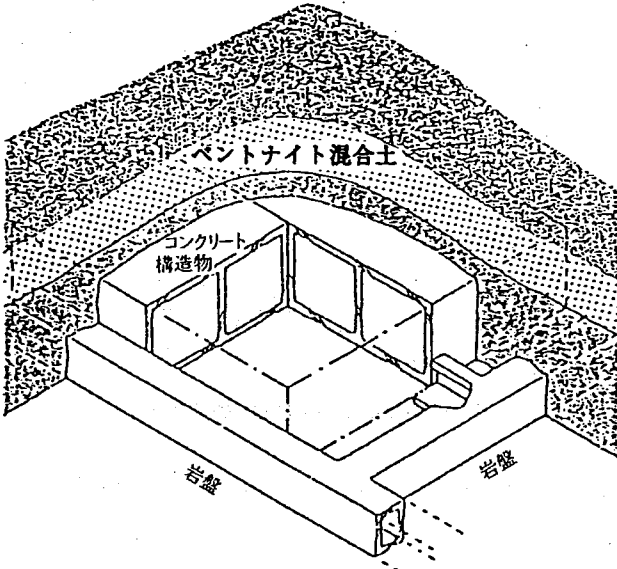


図2 地中コンクリート構造物概念図

$$W_{max} = K \times L \times R \times MAC \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 W_{max} : 最大ひびわれ幅 (mm)
 K : 定数(1.59)
 L : ブロックの長さ (m)
 R : 外部拘束度
 MAC : 温度ひびわれ幅に関する特性値

$$L_c = (1000 \cdot L \cdot R / UCA + 1000 \cdot R) \times MAC \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 L_c : 平均ひびわれ間隔
 L : ブロックの長さ (m)
 R : 外部拘束度
 MAC : 温度ひびわれ幅に関する特性値
 UCA : ひびわれ面積に関する特性値

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = (1 - \exp(-0.108(t - t_0)0.56)) \cdot \epsilon_{sh}^\infty$$

$$\epsilon_{sh}^\infty \cdot \epsilon_{sh}^\infty = -60 + 78(1 - \exp(RH/100)) + 38 \log W - 50 \log (V/S)^2 + 4 \log t_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\epsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥収縮予測値 ($\times 10^{-5}$)
 ϵ_{sh}^∞ : 乾燥収縮最終値 ($\times 10^{-5}$)
 RH : 環境湿度 (%)
 W : 単位水量 (kg/m^3)
 V : コンクリート体積 (cm^3)
 S : 乾燥表面積 (cm^2)
 t_0 : 乾燥開始材齢 (日) $t_0 \geq 28$ のとき $t_0 = 28$
 $t_0 \leq 7$ のとき $t_0 = 7$
 t : 乾燥期間 (日)

D : ひびわれ深さ σ : 圧縮応力

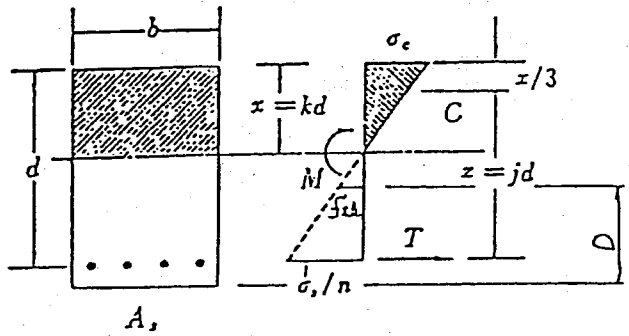


図3 矩形断面の応力分布

$$\Delta T msh = \epsilon msh(t, t_0) \alpha \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\Delta T msh$: 任意材齢 t 日における乾燥収縮ひずみの温度換算値 ($^\circ C$)

α : コンクリートの線膨張係数 ($10 \times 10^{-6} / ^\circ C$)

(2) 物理的劣化モデル

曲げひびわれの劣化モデルは、調査の結果から土木学会コンクリート標準示方書[4]で規定されている曲げひびわれ幅の算定式を採用し、ひびわれ幅、間隔などの特性値を評価した。

ひびわれ深さについては、図3に示す矩形断面の応力分布において、中立軸から下の引張領域のうちコンクリートの引張強度よりも大きな引張応力が作用する位置までをひびわれ深さとした。

(3) 化学的劣化モデル

化学的劣化モデルについては、濃度の異なる硫酸ナトリウム溶液中へのモルタルの浸漬試験の結果[5]から、膨張生成物のエトリンガイトの生成深さと浸漬日数との関係(図4参照)を求め、その劣化速度を(1)式のように設定した。

$$X = k \cdot t^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 X : 劣化深さ (mm) (エトリンガイトの生成深さ)

k : 劣化速度であり、セメントの種類、配合によって決まる速度定数

(本研究の中では、図4から、溶液濃度5%の結果に基づいて $5.0 \times 10^{-3} cm/day$ とした)

t : 日数 (day)

3.2.3 止水性能評価モデルの構築

劣化評価モデルにより評価したコンクリート構造物の劣化状態に対する止水性能評価モデルについて検討する。なお、初期欠陥としての温度ひびわれは貫通ひびわれとして、曲げひびわれによるひびわれは貫通しないひびわ

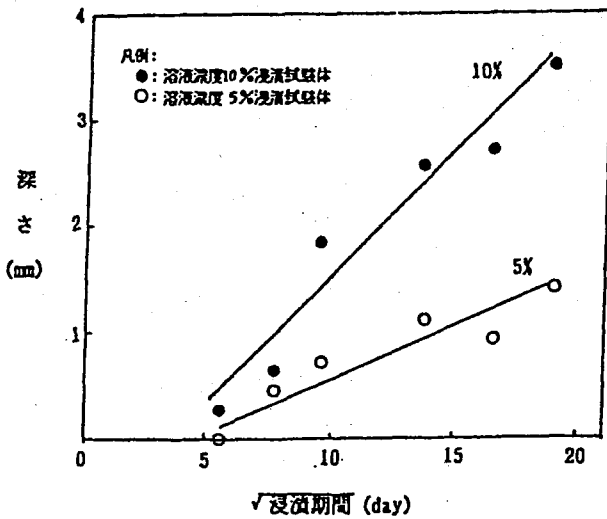


図4 エトリンガイトの生成深さと浸漬期間の平方根との関係

れ(以下「表面ひびわれ」と記す)、化学的な劣化は浸食による部材厚の減少として止水性能評価を行った。

この理由は、初期欠陥に関する既往のひびわれ性状に関する研究のうち、とくにひびわれ深さについては研究の事例がなく、温度ひびわれの深さが同定できないために、安全側を見て貫通ひびわれとし、曲げひびわれについては、引張応力が作用している領域のみひびわれが発生することから、表面ひびわれとした。また、化学的な劣化は表面から進行していくため、劣化領域は止水性能については効果がないと考え、劣化とともに断面が欠損していくとし、部材厚の減少として止水性能評価モデルに組み込むこととした。

(1) 貫通ひびわれによる止水性能評価モデル

貫通ひびわれによる漏水量評価では、調査の結果から伊藤らの提案している式[6]を採用した。

この伊藤の式は、透水係数に影響を与えるひびわれ幅を「限界ひびわれ幅」として、その影響を考慮できる評価式であり、試験により評価式の適用性が示されているものである。

(2) 表面ひびわれ止水性能評価モデル

表面ひびわれがあるコンクリートの止水性に関する既往の研究はないため、表面ひびわれがあるコンクリート構造物の透水性については、飽和・不飽和の浸透流解析理論に基づく二次元有限要素法を用いて、表面ひびわれが発生していないコンクリートと発生している場合のものとの浸透流量比を、ひびわれ深さ、部材厚およびひびわれ間隔を変数とした(6)式で表した。

さらに、その検証試験を行い、その有効性を確認[7] (図5参照)した。

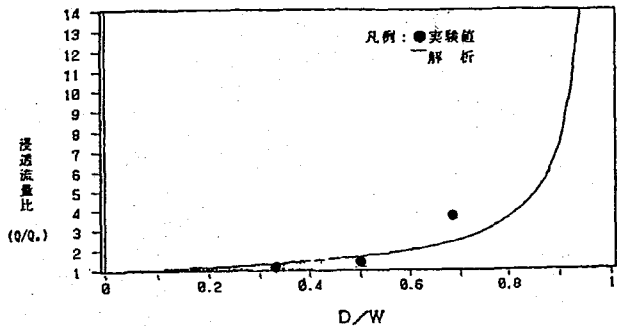


図5 実験値と解析結果との検討

$$Q/Q_0 = D/w / ((0.0793H + 0.5672) - (0.0831 + 0.5340)D/W) + 1 \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 Q : 任意のひびわれ深さ、部材厚におけるひびわれの単位奥行き当たりの浸透流量 ($\text{cm}^3/\text{sec}/\text{cm}$)
 Q_0 : ひびわれが発生していない場合の単位奥行きあたりの浸透流量 ($\text{cm}^3/\text{sec}/\text{cm}$)

$$Q_0 = k \cdot P/W \cdot A \dots\dots\dots (7)$$

- k : 透水係数 (cm/sec)
- D : ひびわれ深さ (cm)
- W : 部材厚 (cm)
- H : ひびわれ間隔 (cm)
- k : コンクリート透水係数 (cm/sec)
- P : 水圧 (cm/sec)
- A : 透水面積 (cm^2)

3.2.4 透水係数の経年変化評価

3.2.2, 3.2.3 のモデルを用いて図2に示した地中コンクリート構造物の外壁部を対象として図6に示すような評価フローにしたがって、止水性能を透水係数で評価した。その0~300年間の経年変化の結果を図7に示す。

その結果、地中コンクリート構造物の止水性能は、長期にわたっても大きく低下しないことが示された。したがって、処分施設を建設する際に、良質な材料および入念な施工を行えば、長期的な止水性能をある程度期待することはできると考えられる。

4. セメント系材料の化学的な閉じ込め機能について

セメント系材料の間隙水は高アルカリ性であり、吸着性能が期待される核種がいくつかある[8]。そのため、現在行われている低レベル放射性廃棄物の埋設処分では、3.で示した物理的なバリア材としてよりも、むしろ化学的なバリア材として安全評価上考えられている。しかし、

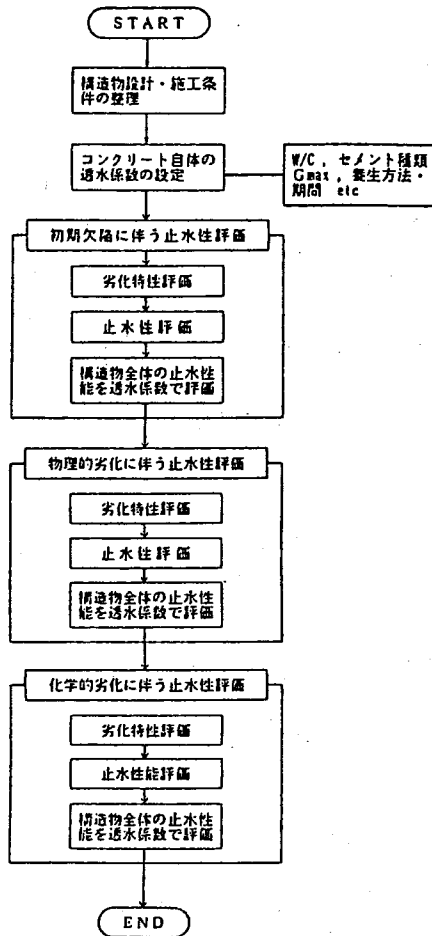


図6 止水性能評価フロー

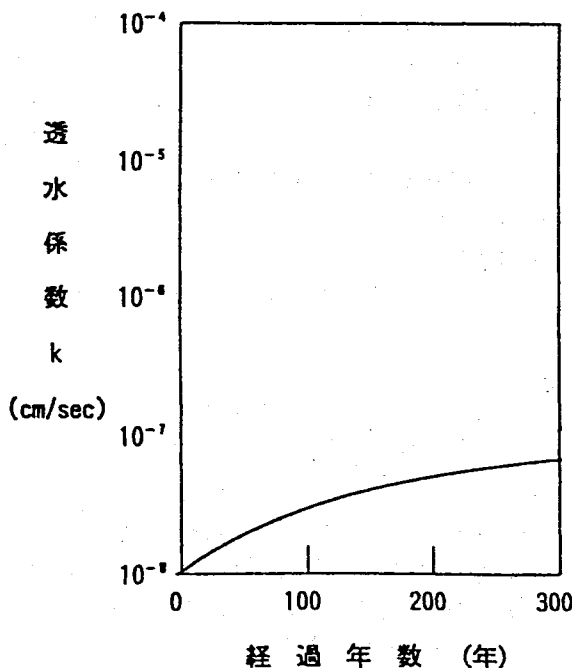


図7 透水係数の経時変化

セメント系材料の化学的な評価は、現在まで盛んに行われているとは言い難く、今後の研究開発が期待される。

このような課題に対して筆者は、「将来の TRU 放射性廃棄物の処分においてセメント系材料を核種移行抑制機能、即ち、吸着性の優れたバリア材として有効に活用していくためには、吸着性能に大きく影響を与える①セメント間隙水の pH 挙動評価手法の確立と、②セメント間隙水の pH を自由に調整できる技術の開発が必要である。」と考えた。

とくに、セメントの間隙水 pH 調整技術が必要になると考えた理由は、2つあり、1つはベントナイト等と人工バリアシステムを構成する場合、ベントナイトのカルシウム型化に対する対策のため、2つ目はセメントに対する核種の吸着性能の特徴が将来的に把握できた場合、効率的なバリアシステムを設計していくには、核種に応じた吸着性能の優れたセメントの開発技術の一助になると考えたためである。

このような背景の下で、1つはセメント間隙水の pH の調査と低 pH セメント（鉄筋コンクリート構造物としての成立性も考えて pH 10.0 までの低 pH 化を考えた）の開発に着手した。以下に現在まで得られた成果のうち、とくに試作した低 pH セメントの特徴を試験結果に基づいて示す。

4.1 低pHセメントの性能

4.1.1 低 pH 化の方法

調査の結果から、セメントの低 pH 化を図るためには水和生成物として存在する水酸化カルシウムをできるだけ低減させることが重要であると考えた。

また、水酸化カルシウム以外にも C-S-H ゲルも高い pH を示すことが表 1 からうかがえた。これらのことから筆者は、低カルシウム型のセメントが低 pH 材料として有望であると考えた。また、水和生成物であるカルシウムサルファアルミネート水和物のうち、モノサルフェート (3CaO · Al₂O₃ · CaSO₄ · 12H₂O) の pH が 12 以上の高い値を示し、一方、エトリンガイト (3CaO · Al₂O₃ · 3CaSO₄ · 32H₂O) は 11.5 程度の低い pH を示すことから、低 pH のセメントを製作するには、モノサルフェートの生成を極力抑え、エトリンガイトが安定に生成するように設計す

表1 主要生成物の液相組成および pH

	液相組成 (mmol/l)					pH
	Ca	Al	Si	SO ₃	OH	
AFt	1.47	0.45		1.00	3.3	11.52
AFm	5.05	2.70		0.018	18.6	12.27
1.7 C-S-H	20.34		0.006		40.5	12.61
1.3 C-S-H	9.75		0.012		18.5	12.27
0.9 C-S-H	1.69		0.135		3.13	11.50
Ca(OH) ₂	20.7				41.4	12.52
CaSO ₄	15.2			15.2	10 ⁻⁴	7

AFt: エトリンガイト AFm: モノサルフェート C-S-H: 前の数字はCa/Si

表2 LPHCの化学組成

試料名	化学組成 (%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
LPHC№1	9.8	19.2	0.9	42.4	2.2	25.6
LPHC№2	16.4	18.0	0.5	43.0	4.2	16.4

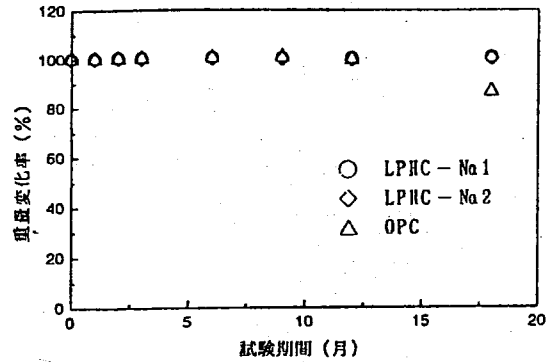


図10 重量変化

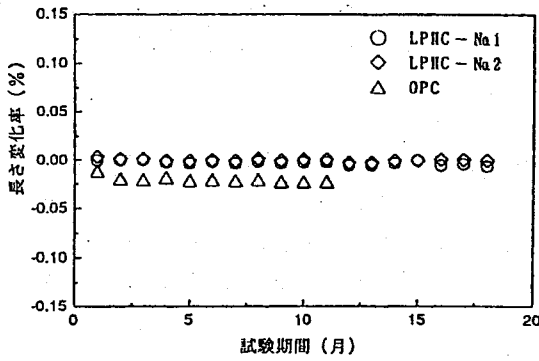


図8 乾燥収縮試験

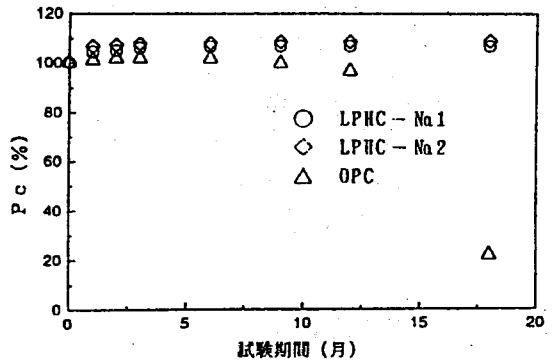


図11 相対動弾性係数(Pc)

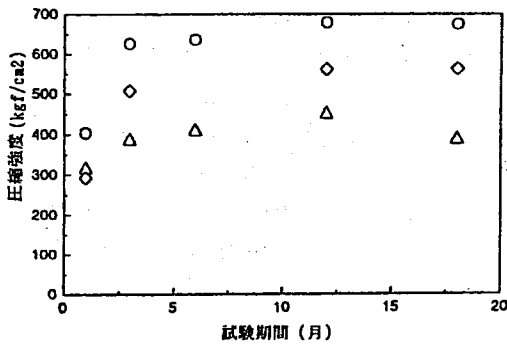


図9 圧縮強度試験

ることが必要であると考えた。この場合、エトリンガイトは高カルシウム条件下ではモノサルフェート水和物に転移することが懸念されることから、水和生成物の安定性の観点からも低カルシウム型にすることが低pHセメントの設計の基本思想になると考えた。

そのため、本報告では低カルシウム型セメント鉱物としてアーウィン(3CaO · 3Al₂O₃ · CaSO₄)[9]に着目し、表2に示すような化学組成の低pHセメントの試作を行った。アーウィンに着目した理由は、石膏の存在下で、6

倍モルのカルシウムを固定してエトリンガイトを生成し、他の水和物相のカルシウム量を低減できるセメント鉱物であるためである[9,10]。

4.1.2 低pHセメントの特性

試作した低pHセメント(以下「LPHC」と記す)の基本的物性を把握するために、以下に示す試験を実施した。

また、普通ポルトランドセメント(以下「OPC」と記す)を用いて同様な試験を行った。

- ①乾燥収縮試験
- ②圧縮強度試験
- ③硫酸ナトリウム溶液(10%濃度)への浸漬試験
- ④中性化試験
- ⑤pH測定

図8に乾燥収縮、図9に圧縮強度試験、図10~13に硫酸ナトリウムへの浸漬試験結果のうち浸漬期間と劣化による重量変化の関係、劣化により発生する表面ひびわれを表すたわみ振動数の変化を表した相対動弾性係数Pc、およびその深さ方向へのひびわれの伸展を表す超音波伝搬速度の変化を表した相対動弾性係数Pvと浸漬期間と圧縮強度の関係を表したものを示す。

また、図14に中性化試験、図15にpH測定、図16にLPHCのX線回折結果をそれぞれ示す。

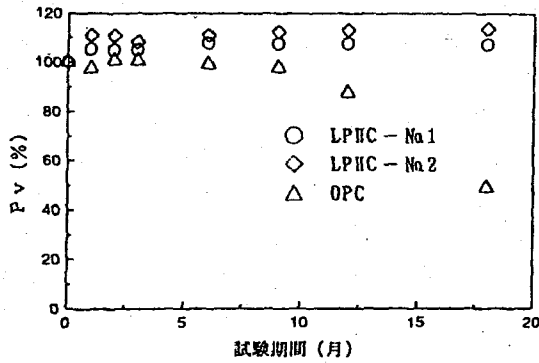


図12 相対動弾性係数(P_v)

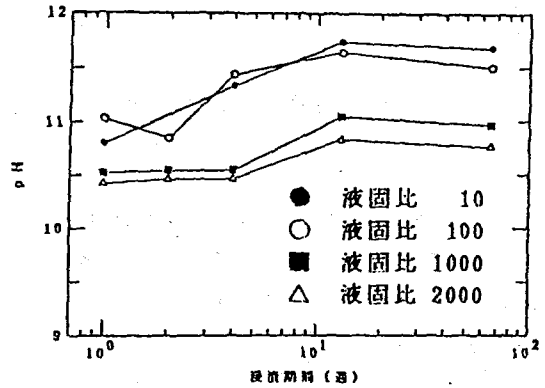


図15 浸漬水の pH 挙動

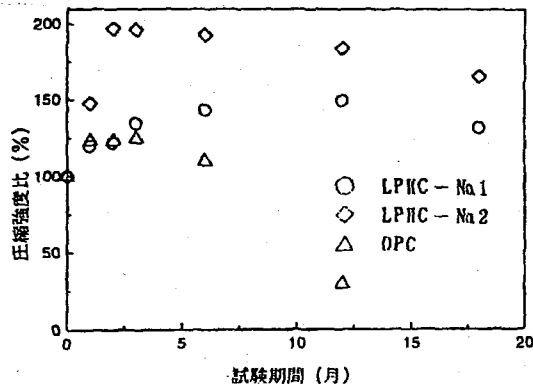


図13 圧縮強度(浸漬試験)

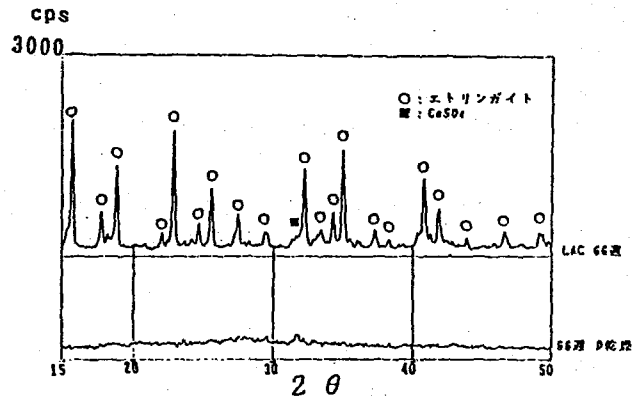


図16 LPHCの固相のX線回折

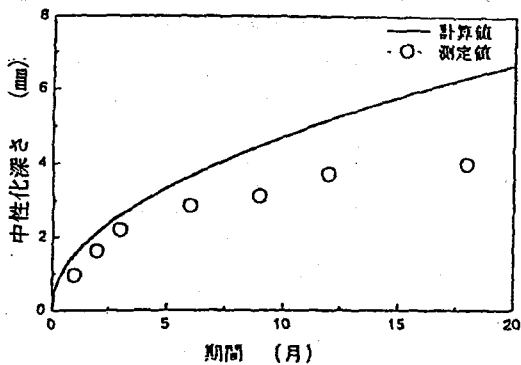


図14 中性化深さ

試験結果および本研究で試作した LPHC の特性をまとめると次のようになる。

本研究で試作した LPHC の設計思想を簡単に集約すると、セメントの pH の支配因子をカルシウムイオンととらえ、水和反応の際に生成する物質から水酸化カルシウムを極力低減することとし、硬化過程でエトリンガイトを生成することとした。

その際、長期的に安定した物性を確保するためにも、できるだけ鉱物の転移が起きないように低カルシウム型のセメントにする必要がある。図 8~16 までの試験結果から、この設計思想に対する検証を行うと次の通りとなる。

まず、水和反応によってできる鉱物は、エトリンガイトが図 16 の分析結果で確認されていることから、ほぼ設計通りの水和反応が進行したと考える。また、図 15 の pH の測定結果から 1 年以上の測定にもかかわらず 11.5 前後の値を示しており、低 pH 化もほぼ設計通りの値と考える。

セメント自体の長期的な安定性については、図 8~13 までの一般的な物性試験および化学的劣化に対する試験結果から、OPC と比較しても同等以上の性能があることがわかる。

一方、pH が初期から低いため中性化速度が早いという傾向が図 14 により認められ、鉄筋コンクリート構造物としての適用性については課題が残されたと考えられる。

本報告で示した LPHC については、今後、吸着性能等を調査していく予定であるが、本報告で示した内容から、少なくともセメントの水和で生成する鉱物相を設計によ

りコントロールできる技術の確立ができることを示唆したものである。

4.2 セメントの化学的な核種閉じ込め機能に関するその他の研究

TRU 放射性廃棄物および高レベル放射性廃棄物のように、長半減期核種が含まれ、かつ多種多様な核種の移行抑制が必要となる処分施設を設計する場合に、他のバリア材への影響対策 (ex. ベントナイトのカルシウム型化対策) および核種の化学特性に対する吸着のためのバリア材の選定等を考慮した技術が必要であると筆者は考える。

また、セメントの化学的特性を設計して pH を調整する技術の延長線、あるいは平行線上にある技術が、セメント間隙水の pH 挙動長期予測手法であると考えられる。

現在、この評価手法の代表的なものにアトキンソンモデルがあるが、実環境でのセメントの長期の pH 挙動評価を行うには課題があり、未だ解明されていないと認識している。

そのため、筆者は平行してセメント間隙水の長期 pH 挙動予測手法の確立のために、セメントの溶解現象について知見を整理するとともに、その現象の解明を行う予定としている。

参考として、筆者が共同研究者として参加している私的研究会 (平成 6 年度発足、検討会メンバー: 秩父小野田(株)天野中央研究所顧問、同石崎博士、深谷開発第 10 グループリーダー、坂本研究員、芳賀研究員、藤田研究員および東京大学田中教授、長崎助教授) で取得してきたセメント溶解試験の結果[12-14]を図 17~19 に示す。

このような実験は、他の研究機関でも行われているが、現在、筆者らは、セメントの溶解に伴う固相自体の鉱物相の変化を解明することが、このようなモデルの妥当性を示すうえで重要と考え、セメント固相分析もあわせて実施している。この結果により、アトキンソンモデルの大きな課題の一つである化学的平衡論に基づく溶解モデルの妥当性と、個々のデータが適切な化学平衡状態で取得されたものであるかの判断もできると考える。また、セメントの長期耐久性の研究の一つであるナチュラルアナログ的検討で、古代セメントの調査が他の研究機関で行われている。古代セメントと現在のセメントは気硬性セメントおよび水硬性セメントの違いはあるが、数千年

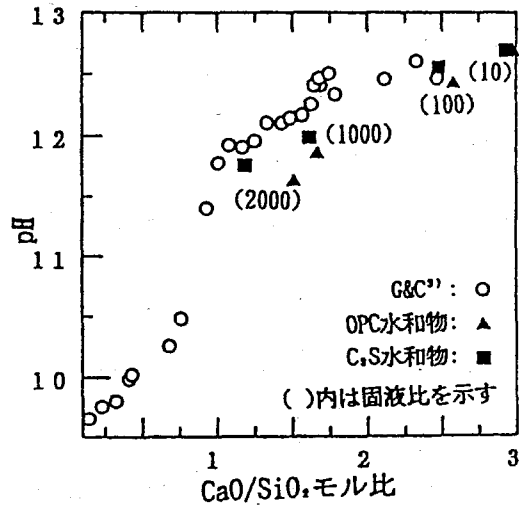


図 18 固液比を変化させた試験の固相の Ca/Si モル比と浸漬水 pH との関係 (浸漬期間 4 週間)

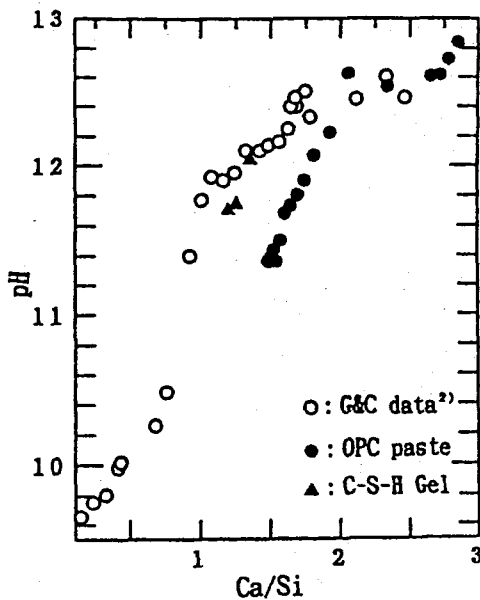
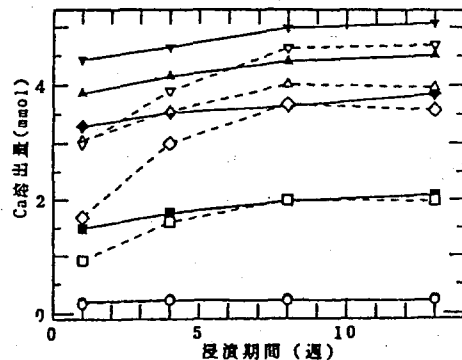


図 17 固相の Ca/Si 比と浸漬水 pH との関係



粒径 (μm)	液固比 (wt/vt)	粒径 (μm)	液固比 (wt/vt)
(A)	10	(B)	10
	100		100
	500		500
	1000		1000
0.125	2000	4.75	2000

図 19 試料 1g あたりの Ca 溶出量

表3 古代セメントの組成

試作セメント種別		a	b	c	d
混合割合		(25 : 75)	(50 : 50)	(75 : 25)	(試察)
主 要 成 分 の 含 量	SiO ₂	20.7	41.3	52.0	0.0
	Al ₂ O ₃	3.7	7.4	11.0	0.0
	CaO	75.6	51.3	27.0	100.0
合計		100.0	100.0	100.0	100.0

環境変化に対してもある程度の強度を発現する古代セメントからその耐久性を定性的にでも説明することができれば、現在の水硬性セメントの長期的な耐久性を評価する上での理論構築にも役立つと考え、数々の古代セメントの組成を集約し、その化学組成の関係を整理した。

その結果は、表3に示すとおりである。今後は、これらの古代セメントの鉱物相と、現在の水硬性セメントの鉱物相との関係を整理し、既存の材料を用いて実験室レベルで古代セメントを再現し、その基本物性を把握する計画である。

5. あとがき

普通ポルトランドセメントが開発されて約170年程度が経過した。

セメントは手軽に入手でき、誰でも簡単に使用できることから構造部材として、土木、建築の分野で主に利用されてきた。そのため、部材としての耐力に関する評価・研究が主に行われ、人工バリアとしての機能評価に必要

な研究はあまり行われていないのが現状である。しかし、核種移行抑制機能を担う材料としては貴重なものであるため、今後は土木、建築の分野に携わる研究者はもちろんのこと、化学の分野での研究者とも協力しながら幅広い観点で「セメント」の解明を行うことが必要と考えられる(図20参照)。

謝辞

本研究を進める上で、とくにセメントのpHに関する検討では、東京大学の田中教授にご指導を賜り、ここに謝意を表します。また、低pHセメントの開発にあたっては、秩父小野田(株)天野恕博士、石崎寛次郎博士、坂本浩幸、芳賀和子研究員の協力の下で行ったことを記して謝意を表します。

参考文献

- 1] 広永道彦 他：劣化作用を考慮したコンクリート構造物の長期止水性能評価手法の提案. 土木学会論文集, No. 502 (1994).
- 2] 小野定 他：マスコンクリートの温度ひびわれ特性の数量化に関する検討. コンクリート構造物の体積変化によるひびわれ幅制御に関する JCI コロキウム論文集 (1990).
- 3] 阪田憲次 他：コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式の提案. セメント・コンクリート論文集, No 43 (1989).
- 4] 土木学会：昭和61年度制定コンクリート標準仕方書 [設計編] (1886).
- 5] 広永道彦, 遠藤孝夫：モルタルの硫酸ナトリウム反応による劣化機構に関する実験的検討. 電力中央研究所

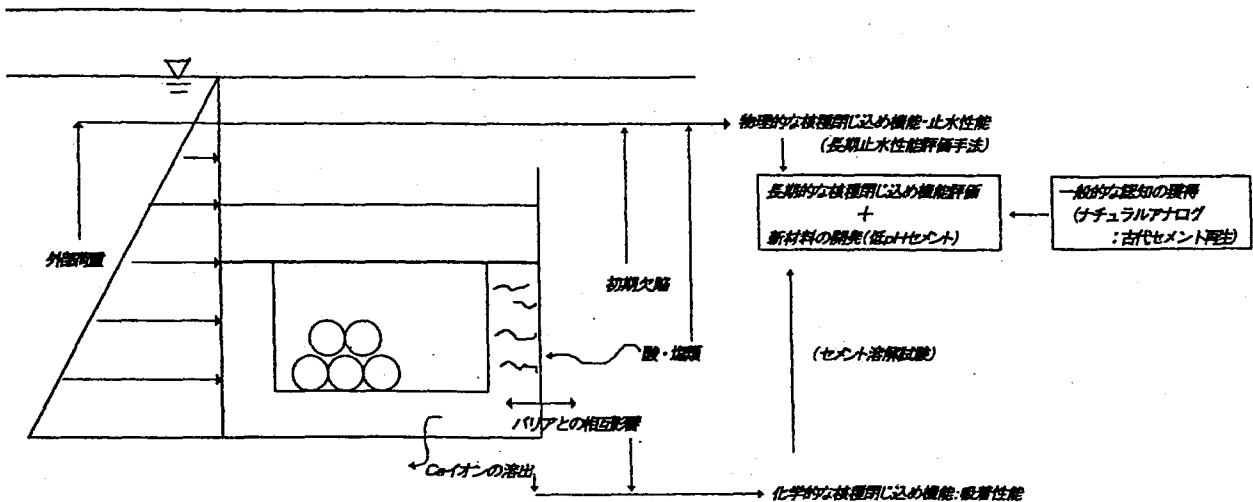


図20 セメント系人工バリア機能評価検討概要

- 報告 (1993).
- [6] 伊藤忠彦 他：ひびわれを有する高水圧下における漏水量について. 土木学会第 44 回年次学会講演会, 昭和 59 年 10 月, pp. 412-413 (1984).
- [7] 広永道彦, 河西基：劣化の進行を考慮したコンクリート構造物の長期止水性能評価手法の提案. 電力中央研究所報告 (1996).
- [8] 廣永道彦, 馬原保典：放射性廃棄物処分におけるセメント系材料の人工バリア性能評価に関する調査. 電力中央研究所報告 (1997).
- [9] 田熊靖久, 白坂徳彦, 金谷宗輝, 小林久美子, 宇智田俊一郎： $C_2S-C_4A_3S-C_4AF-CS$ 系クリンカーの CO_2 低減効果と特質. *J. Ceram. Soc. Japan* **102**, 1115-1121 (1994).
- [10] 原田宏, 太田威, 須藤儀一： $CaO-Al_2O_3-SO_3-SiO_2$ 系クリンカーの生成反応と水和性状. 材料セメント技年報 **33**, 95-98 (1979).
- [11] 田熊靖久, 藤田英樹, 坂本浩幸, 小林久美子, 宇智田俊一郎：アーウィン含有クリンカー, -セッコウ-スラグ系セメントの水和反応と pH 挙動. *J. Ceram. Soc. Japan* (submitted).
- [12] 芳賀和子 他：原子力学会 1996 春の年会, 大阪, M8 (1996).
- [13] 芳賀和子 他：原子力学会 1996 秋の大会, 仙台, L7 (1996).
- [14] 芳賀和子 他：原子力学会 1996 秋の大会, 東京, L31 (1997).