

論文内容の要旨

論文題目: Development of a new total recycling process of waste concrete with a carbonic acid treatment
(二酸化炭素処理によるコンクリート廃棄物のトータルリサイクル技術開発)

氏名 飯塚 淳

第1章 研究の背景

コンクリートは、セメントと水、骨材から製造される建築材料である。世界中で広く使用されており、我が国でも年間数億tが製造されている。コンクリート原料となるセメントは、石灰石（主成分 CaCO_3 ）と粘土（主成分 SiO_2 ）等の焼成反応により製造される。セメントの主成分は、水硬性を持つケイ酸カルシウム塩（ $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ 等）であり、これが水和することで強度を発現する。水和後のセメントの主成分は、水酸化カルシウムやケイ酸カルシウム水和物等の塩基性カルシウム化合物である。

日本においては約 3500 万tの廃コンクリート塊が毎年排出されており^[1]、今後も増加傾向が見込まれている^[2] (Figure 1 参照)。廃コンクリート塊は、建設リサイクル法（平成 12 年公布）によりその再利用が義務付けられており、現在 100%近い再利用率を達成している。しかし、その利用先は主に路盤材である。新規道路建設需要は著しく減少しており、また、一方で廃コンクリート塊自体の排出量が増加している。このため新規な廃コンクリート塊の再利用技術確立が急務となっている。

そこで、本研究では、炭酸水処理による新規なコンクリート塊再資源化プロセスの提案を行い、その評価を行うことを目的とする。

第2章 二酸化炭素処理による新規なコンクリート廃棄物リサイクルプロセスの提案

本研究では、コンクリート塊から再生骨材を製造する際に廃棄物として排出される廃セメント微粉末を原料として想定する。廃セメント微粉末の主成分は水和したセメントであ

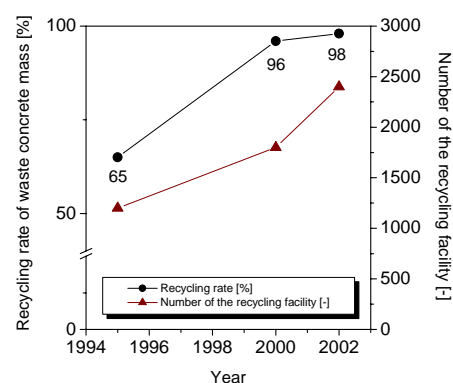


Figure 1 Variation over time of the waste concrete recycling rate and recycling plant numbers^[2]

り、この部分はコンクリート塊の重量の約 3 割を占める。微粉末を水中に分散させ、二酸化炭素を高圧で供給することで炭酸によるカルシウムの抽出を行う。抽出されたカルシウムは二酸化炭素常圧下で炭酸カルシウムとして析出する。これによりコンクリート塊から炭酸カルシウムを生産し、セメント水和物部分の再資源化を行う。提案するプロセスでは二酸化炭素が消費されるため、二酸化炭素排出量削減効果も期待される。

第3章 実験

3.1 試験装置図

本研究で用いた試験装置図を Figure 2 に示す。直列に連結した二槽のバッチ式攪拌槽(共に内容積 500 mL) からなる。二酸化炭素はシリンダーから気相で供給される。反応溶液の攪拌はモーターを用いた二枚パドル翼で行われる。両反応槽からはステンレス製の焼結フィルター(5 μm)で内部の溶液をろ過しつつサンプリングすることができる。

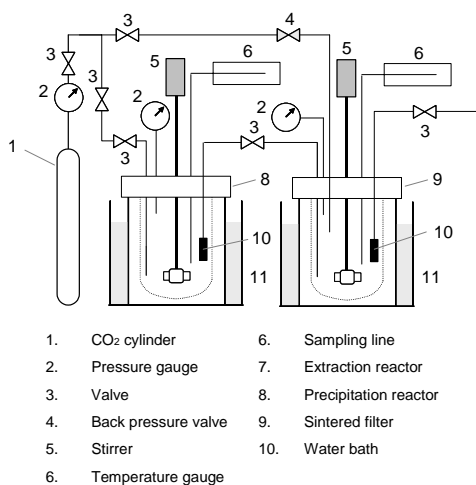


Figure 2 Schematic drawing of the experimental apparatus

3.2 廃セメント試料の性状

試験に用いた廃セメント微粉末は(株)立石建設から提供を受けた。試料は廃コンクリートから骨材を粉砕・選別処理によって再生した際に排出された廃セメント微粉末であり、実際に廃棄予定であったものである。廃セメント微粉末の粒径は約 10 ~ 200 μm に分布していた。また、廃セメント微粉末中のカルシウム含量は 27.3 wt% と測定された。

3.3 カルシウム抽出試験

廃セメント微粉末からのカルシウムの抽出試験を、廃セメント/水比が 0.29 ~ 2.9 wt%、二酸化炭素供給圧 0.9 ~ 3.0 MPa、温度 291 ~ 353 K の範囲で行った。結果の一例を Figure 3 に示す。廃セメント/水比の大きい場合には、カルシウム抽出は平衡計算から予想される系の飽和カルシウム濃度を越えて速やかに起こることが観察された。しかし、カルシウム抽出率は約 20% に留まった。廃セメント/水比が小さい場合には抽出率は 90% 近くに達したが、単位時間あたりの Ca 抽出量は低くなった。系に供給する二酸化炭素の圧力は水相中のカルシウムの飽和溶解度に影響を与える。供給圧力を変化させたところ、供給圧力の増加に伴いカルシウム抽出も速やかに起こることが確認された。抽出温度の影響は複雑であった。また、廃セメント微粉末の細粒分からカルシウム抽出を行ったところ抽出速度の向上が確認された。

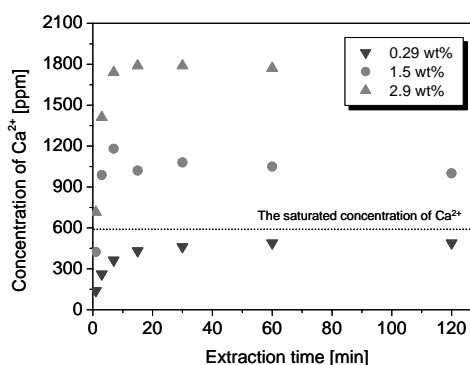


Figure 3 The influence of the initial ratio of waste cement to water on the time course of calcium concentration in the water phase

3.4 炭酸カルシウムの析出試験

炭酸カルシウムの析出試験を、二酸化炭素供給圧が 0.9 ~ 3.0 MPa、析出温度 30 ~ 80 °C、種結晶投入量 0 ~ 1.0 g / 300 mL-水の範囲で行った。結果の一例を Figure 4 に示す。種結晶の投入のない場合、水相中カルシウム濃度は、過飽和状態であったが、ほとんど減少しなかった。これは活性な析出表面のない場合には炭酸カルシウムの析出がほとんど生じないことを示している。また、投入する種結晶量を増加させることで炭酸カルシウムの析出速度を促進することが可能であることが分かった。

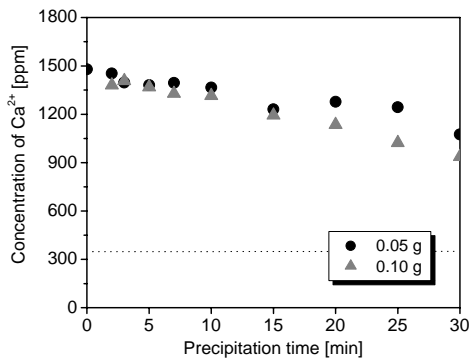


Figure 4 The influence of the amount of seed crystal on the time course of the calcium concentration in the water phase

3.5 得られる炭酸カルシウムの純度と粒度

種結晶投入による炭酸カルシウム析出を試験を行ったところ、純度約98%、粒径:約17 μ m (種結晶粒径: 約15 μ m)の炭酸カルシウムが得られた。これは、重質炭酸カルシウム(良質の石灰石を微粉碎したもの)として15円/kgで売却可能なスペックである^[3]。また、二酸化炭素分圧0(N₂バブリング)での再結晶化を行ったところ、純度約99%、粒径約8.4 μ m(軽質炭酸カルシウム: 27円/kg相当^[3]の品質)の炭酸カルシウムが得られた。尚、粒径は光散乱径であり体積基準の中間値で示した。

第4章 コンクリート廃棄物リサイクルプラントのプロセス設計

次に、コンクリート廃棄物リサイクルプラントのプロセス設計を行った。第3章で得られた速度データは経験式化し、プロセス設計に反映させた。プラントの条件設定は我が国において可能な限り現実的な条件設定となるように設定を行った。主要な仮定を以下に列挙する。尚、プラントの概要図をFigure 5に示す。

- ・ 二酸化炭素源を石炭火力発電所とする。
- ・ コンクリート塊の年間処理量が30,000t, 90,000t, 300,000t/年のケースを想定する。これは、コンクリート塊の年発生量の0.1, 0.3, 1%に相当する。コンクリート塊の3割がセメント微粉となる。
- ・ カルシウムの転化率: 80%とする。再資源化技術である以上、高い転化率が現実に要求される。

- ・ 製造された炭酸カルシウム: 市場に売却し利益を得る。より売却益を高くするために、再結晶プロセスを導入する。
- ・ 抽出残渣: 再生砂として売却し利益を得る。
- ・ Ca抽出処理の1バッチの時間を10分と設定し、その他の処理速度はその時間を基準に設定した。バッチ処理開始のための準備時間を10分、処理後の清掃のための時間を10分とした。

以上の仮定に基づき基本ケースとして、Table 1に示す6ケースを設定した。

尚、コスト試算においては、以下の項目を考慮した。

収入項目:

- (1) CaCO₃ 販売額
- (2) 残渣販売額

支出項目:

- (1) 人件費
- (2) 資材費
- (3) 減価償却費
- (4) 保守費
- (5) ユーティリティ費(電力費+水道費)
- (6) 排水処理費
- (7) 異物処分費
- (8) 二酸化炭素分離・回収費

二酸化炭素の分離・回収費は、共同研究先機密事項のため独立に計上した。試算の詳細はここでは割愛する。

Table 1 Example cases

		The amount of recycled waste concrete [t/year]		
		30,000	90,000	300,000
Calcium conversion rate to CaCO ₃ [%]	50	1-a	1-b	1-c
	80	2-a	2-b	2-c

第5章 コンクリート廃棄物リサイクルプロセスの評価

以上の前提のもと、セメント微粉末を受け入れ炭酸処理によって炭酸カルシウムを製造するリサイクルプロセスの経済性評価を行った。結果をTable 2に示す。再資源化プラント1施設あたりの年間の再資源化量を増加させることでプロセスの経済性は向上することが見て取れる。これは特に設備費と二酸化炭素の回収費においてスケールメリットが大きく働くためである。また、廃セメント微粉末内のカルシウムの転化率を50%と設定したケース1では、再資源化施設の採算が取れないことが分かった。また、転化率を80%と設定したケース2においても再資源化施設の採算が

取れるのはケース 2-b,c の場合のみであった。

これを日本全国でのコスト（コンクリート廃棄物 3500 万 t 処理の際の総コスト）、廃セメント微粉末 1t あたりの廃棄物処理コスト、二酸化炭素消費量 1t あたりの処理コストで表し直したものが Table 3 である。まず、日本全国での再資源化コストであるが、日本全体でこの額だけの何らかの経済的援助があれば、経済的に成り立たないケースでも日本全体での再資源化処理が行えることを意味している。二酸化炭素消費量 1t あたりの処理コストは、再資源化処理による二酸化炭素排出量削減コ

ストを表す。再資源化技術導入がもたらす年間の二酸化炭素排出削減量は、日本全体で約 200 万 t であり、その他の削減技術と遜色ないコストで削減が可能であることが示唆された。

第 6 章 結言

これまで技術的に困難であった、コンクリート塊のセメント水和物部分の新規な再資源化技術を提案し、その実現可能性を確認した。現在、我が国がおかれている境界条件のもと、セメント微粉末の再資源化を行った場合、十分に採算が取れる可能性を指摘した。

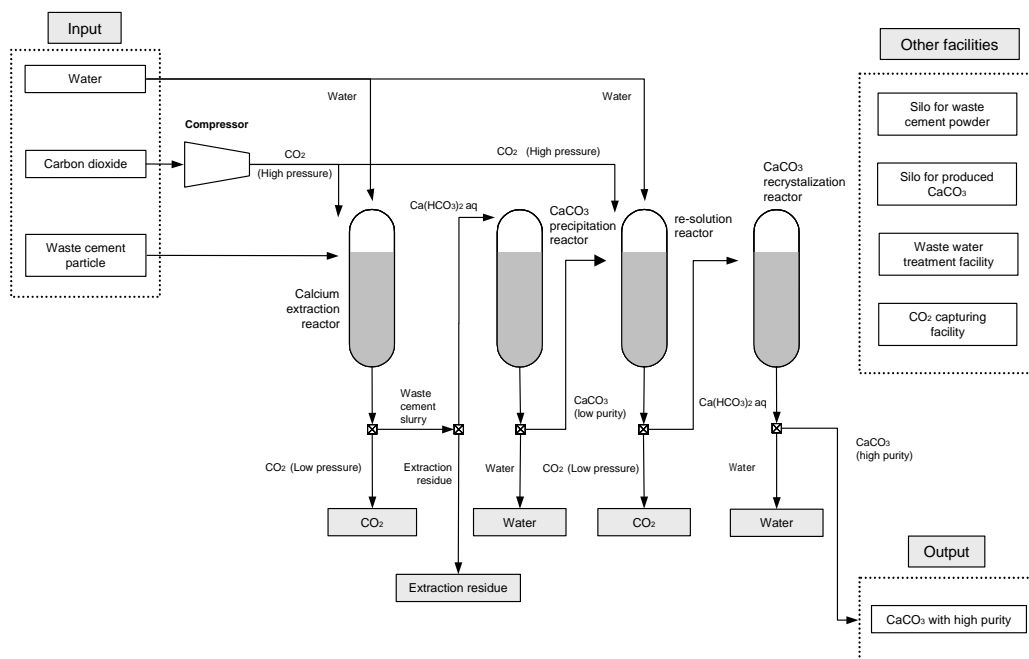


Figure 5 The schematic drawing of a proposed recycling plant for the example cases

Table 2 Breakdown of revenue and costs of the proposed waste concrete recycling plant

No.	Item	Cost [10 ⁶ JPY/year]					
		1-a	1-b	1-c	2-a	2-b	2-c
1- Revenue							
1)	Sale of CaCO ₃	54.2	162.7	542.4	86.8	260.4	867.9
2)	Sale of extracted residues	0.7	2.1	7.0	0.7	2.1	7.0
2- Cost							
1)	Employment costs	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
2)	Material costs	18.0	54.0	180.0	18.0	54.0	180.0
3)	Depreciation cost	16.6	35.8	87.6	17.0	36.2	87.6
4)	Maintenance costs	21.4	47.9	119.5	21.9	48.5	119.6
5) Utility costs							
-1	Electricity	1.6	4.8	15.9	2.4	7.1	23.7
-2	Water	0.3	0.8	2.6	0.1	0.3	1.1
6)	Wastewater treatment costs	0.9	2.7	8.9	0.4	1.1	3.8
7)	Waste disposal costs	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8)	Testing costs	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9)	CO ₂ capturing costs	19.4	43.0	104.3	27.4	58.1	131.5
Total		-79.3	-80.2	-25.4	-55.7	1.2	271.6

Table 3 Environmental impact of the proposed recycling process

Treatment amount of waste concrete	[Mt/year]	35.0
Treatment amount of waste cement	[Mt/year]	10.5
Reduction amount of waste	[Mt/year]	10.5 (35.0)
Reduction amount of CO ₂ emission	[Mt/year]	1.65
Waste water amount	[Mt/year]	2.15
Power consumption	[TWh/year]	25.1
Power supply	[TW]	3.49

References

- [1] 国土交通省, 平成 14 年度建設副産物調査結果, 2004
- [2] 国土交通省, 建設廃棄物排出量の将来予測, 2002
- [3] 富士キメラ総研, 粉体市場の現状と将来展望, 2004