

# 論文 パルスパワー放電法における電極位置が骨材再生時の消費エネルギーに及ぼす影響

前田 誠司\*1・高木 基志\*2・重石 光弘\*3・浪平 隆男\*4

要旨：パルスパワー放電による骨材再生時の消費エネルギーに電極位置が及ぼす影響について調べた。放電エネルギー量一定の下で、高電圧電極と低電圧電極間の距離を変化させ、放電 80 回毎に再生粗骨材を回収した結果、本研究において用いた実験装置では、放電エネルギー量 1.6kJ/回、放電 160 回、高電圧電極の稼働距離 3cm にて最も少ないエネルギー量で再生骨材 H 規格を満たす再生粗骨材を回収することができた。この放電条件によりコンクリート塊 1t から、コンクリート用再生粗骨材 H を満たす再生粗骨材を回収する際のエネルギーの二酸化炭素排出量換算値は 7.24 kg-CO<sub>2</sub>/t となり、既往の骨材回収技術と比較して約 2/3 であった。

キーワード：骨材，リサイクル，パルスパワー放電法，消費エネルギー，二酸化炭素排出量

## 1. はじめに

現在、世界規模で環境への意識が高まっており、様々な環境保全活動が行われている。欧州では、個人や企業、または物質の様々な活動にかかった消費エネルギーを温室効果ガスの一つである二酸化炭素に換算し、記載するカーボンフットプリント制度が始まっており、日本でも導入が検討されている<sup>1)</sup>。京都議定書<sup>2)</sup>では、地球温暖化の原因となる各種温室効果ガスの削減が求められ、日本は 1990 年を基準として、温室効果ガスの排出量を 6%削減することが求められている。しかし、2008 年に発表された資料<sup>3)</sup>によると逆に 7.1%増加していることから、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量の増加を抑制し、更に削減していくためのより効果的な方策が求められている。

CO<sub>2</sub>排出量を削減する方法の一つとして、非エネルギー起源二酸化炭素排出量を削減する方法がある。非エネルギー起源二酸化炭素排出量としてセメントや骨材などの工業製品の生産及び廃棄時に排出されるものである。つまり、燃料としての利用でなく、原材料として使用する工業プロセスや廃棄物の処分より生じる CO<sub>2</sub>のことである。そこで、建設現場より排出される廃コンクリート塊に再生処理を行い、再生骨材を循環利用することで CO<sub>2</sub>排出量の削減につながると考えられる。また廃コンクリート塊をリサイクルすることで、増大する廃コンクリート塊排出量への対処及び天然骨材の枯渇懸念への対策ともなる。しかし、既往の骨材再生処理では、回収される骨材自体が破壊され、あるいは骨材表面にモルタルが付着した状態であるため、骨材の品質が低下し、構造用コンクリートへの再利用は普及していない。また、その処理時に大量の微粒分が発生し、二次廃棄物となる

ために処理コストが増加する。

そこで、コンクリート内パルスパワー放電を用いた骨材再生技術を、既往の技術における一次破碎(破碎処理)及び二次破碎(骨材再生)の代替技術として提案する。コンクリート内パルスパワー放電を用いた骨材再生技術は、高電圧パルスを利用した制御破壊技術によって、骨材とモルタルの境界部分に選択的に破壊を起こし骨材を回収するため、無駄な破壊を起こさない。つまりモルタルが過度に破碎されないために微粒分が生じにくい。そして最大の特徴として、エネルギーを時間的に圧縮・重畳することで大きな仕事を得ることができる。そのため、本技術を活用することで再生骨材回収における消費エネルギーを削減することが可能であると考えられる。またパルスパワー放電法は、加熱などの前処理を必要としない。これまでの研究により、パルスパワー放電法を用いた骨材回収技術により、JIS に定められている再生骨材品質規格のうち H 規格を満たすものを回収できている<sup>4)5)</sup>。表 - 1 にコンクリート用再生粗骨材 H を示す<sup>6)</sup>。

本研究では、これらの特徴を持つコンクリート内パルスパワー放電法による再生骨材回収技術の開発を目的とし、本論文ではコンクリート内パルスパワー放電法に

表 - 1 原粗骨材及びコンクリート用再生粗骨材 H<sup>6)</sup>

	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率(%)	粗粒率
原粗骨材	3.04	0.49	6.66
再生粗骨材 H	2.5 以上	3.0 以下	—

\*1 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科 修(工) (正会員)

\*2 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科 (正会員)

\*3 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科准教授 博(工) (正会員)

\*4 国立大学法人熊本大学 バイオエレクトリクス研究センター准教授 博(工) (非会員)

よる再生粗骨材回収時の消費エネルギーに電極位置が及ぼす影響を調べ、消費エネルギーをCO<sub>2</sub>排出量に換算を行い、評価を行った。

以後、本論文ではパルスパワー放電法により回収された再生粗骨材は、パルスパワー再生粗骨材と呼ぶことにする。

## 2. パルスパワー放電による再生粗骨材分離回収

### 2.1 パルスパワー放電法の仕組み

コンクリートの破碎に使用したパルスパワー発生装置は、マルクスバンク方式パルスパワー発生装置と呼ばれるものである。これはコンデンサ 10 基を並列接続の状態に充電した後、放電ギャップを通じて直列接続として放電させる装置である。本研究では、水中にてコンクリートに高電圧パルス放電を加える。水中にてコンクリート破碎を行う理由として、水と固体の電気誘導性は固体の方が高く、水中にて高電圧パルス放電を行うことで、コンクリート内へ放電路が形成されやすくなるためである。水中でコンクリートに高電圧パルスを加えることで、コンクリート中に存在する気泡をプラズマ化し、その膨張圧及び電氣的衝撃により破壊現象を起こし、骨材を回収するものである<sup>7)</sup>。本研究では、水中に置かれた5mm角開口のステンレス製半球状鋼製メッシュにコンクリート供試体を設置し、ポリエチレン皮膜された直径5mmの銅線を高電圧電極、ステンレス製半球状メッシュを低電圧電極とし、銅線の下端とコンクリート供試体を接触させ、パルス放電を繰り返し行った(図 - 1)。5mm角開口のステンレス製メッシュを使用する理由として、骨材の大きさが5mm程度以上のものを分離回収するためである。また本研究にて使用するマルクス発生装置では、3秒間に1shotのパルス放電を行うことができる。

### 2.2 骨材分離回収時の消費エネルギー量の算出

骨材分離回収時の消費エネルギーの算出は以下の式(1)を用いて行う。

$$E = \frac{1}{2}CV^2 \times M \times N \quad (1)$$

ここで、Eは総エネルギー量(J)、Cはコンデンサの電気容量(F)、Vはひとつのコンデンサに充電した電圧(V)、Mはコンデンサの個数、Nは放電回数である。

### 2.3 パルスパワー出力条件の設定

これまでの研究により、表 - 1 に示す原粗骨材を使用し、表 - 2 に示す配合表を基に作成したコンクリート供

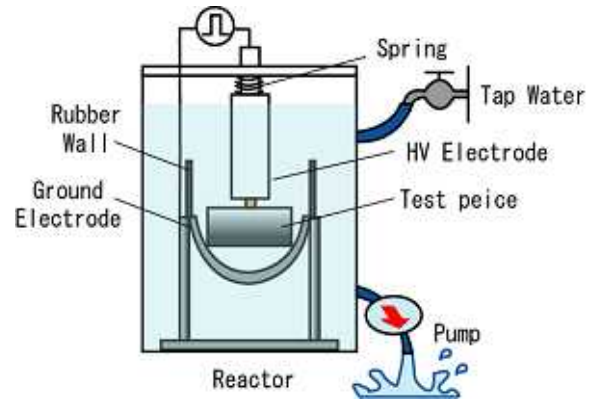


図 - 1 骨材回収の仕組み



図 - 2 使用したコンクリート供試体

試体(図 - 2)をコンクリート内パルスパワー放電法により破碎し、再生粗骨材を分離回収した際、最もすくないエネルギーでコンクリート用再生粗骨材Hを充たす再生粗骨材を回収できるパルスパワー出力条件がわかっている<sup>8)</sup>。パルスパワー出力を0.8kJ、1.6kJ、3.2kJ、6.4kJに設定し、パルスパワー出力条件毎に総エネルギー量が128、256、384、512、640kJになる時に再生粗骨材を回収し、骨材品質試験を行った。その結果、パルスパワー出力条件を1.6kJに設定し、160回のパルス放電を行った時、回収された再生粗骨材が最も少ないエネルギー量で再生粗骨材Hの絶対密度、吸水率の品質規格を満たすことがわかった。

## 3. 電極位置による消費エネルギーの変化

### 3.1 電極位置が放電路形成に及ぼす影響

高電圧パルス放電をコンクリートへ印加する際には様々なパラメータがある。その内、高電圧電極(銅線)と低電圧電極(ステンレス製半球状メッシュ)間の距離による影響は大きいと考えられる。これは、パルス放電により放電路が形成される際、電気伝導性の高い部分(エネルギーロスの低い部分)に優先的に放電路が形成されるためである。放電路が形成されることによって、パルスパワー出力条件によって設定されたエネルギー量

表 - 2 コンクリート配合表

組骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	8	55	6	44	175	318	742	1134	0.095

分の仕事(熱膨張, 空気のプラズマ化, 衝撃波, 光, 音)が行われる。電極間にて形成される放電路が短い場合には, パルスパワーのエネルギーが十分に放出されず, 低電圧電極へと流れるためエネルギーロスが生じる。そのため, エネルギーロスを極力少なくするには, 電極間の距離を十分にとり, 形成される放電路の長さを確保する必要がある。

本研究では, マルクス装置を用いて水中にてコンクリートの破碎を行う。高電圧電極と低電圧電極の間には水とコンクリートが存在するが, その場合でも同様に, 二つの電極間にて最もエネルギーロスの少ない経路に放電路は形成される。水と固体であるコンクリートでは, コンクリートの方が電気伝導性は高く, エネルギーロスが少ないため, コンクリートを通る形で放電路が形成されやすい。それはコンクリートが破碎され, コンクリート破砕片や骨材となっても同様である。図 - 3 はパルス放電 1 回目の放電路形成図である。この時の高電圧電極と低電圧電極間の距離は全て等しいが, コンクリートと水の電気伝導性の違いより, コンクリートと高電圧及び低電圧電極が接地している部分に放電路が形成されると考えられる。図 - 4 はパルス放電によりコンクリートの破碎が進展した状態での放電路形成図である。図 - 4 の状態でもエネルギーロスの少ない高電圧電極から固体(骨材, モルタル)を通り, 低電圧電極へと抜ける方向で放電経路が形成されると考えられる。

コンクリートを破碎する際, 主要な破碎要因となるものは, コンクリートに放電路が形成されることによって, コンクリート中の気泡がプラズマ化し, 急激な膨張圧により生じた衝撃波が骨材とモルタル間の境界面を分離させることである。以上のことより, パルスパワー放電を行う際, 電極間距離を十分にとりコンクリートに放電路が形成され, コンクリート中の空気がプラズマ化するためのエネルギー交換が行われればよい。その際, コンクリート中に形成される放電路長さは長いほど良い。しかし, 本研究では水中にて処理を行うため, 電極間距離をとりすぎると, 水中に形成される放電路部分においてエネルギーロスが生じる。このエネルギーロスは音もしくは衝撃波として放出され, 衝撃波はコンクリート破碎に寄与されると考えられるが, その影響はプラズマ化したコンクリート内の空気の膨張圧による衝撃波と比較して小さいと考えられる。そのため, 高電圧電極(銅線)とコンクリート間距離によって, 同じ品質の再生粗骨材を回収する場合の消費エネルギーに差が生じると考えられる。

そこで本研究では, 高電圧電極(銅線)とコンクリートの位置条件の変化が, 消費エネルギーに与える影響について調べた。

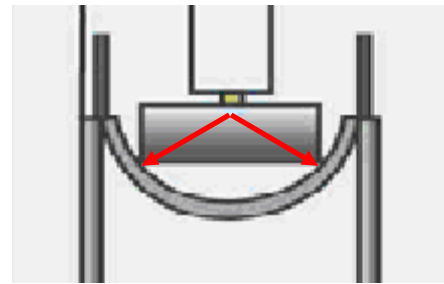


図 - 3 破碎開始時の放電路形成位置

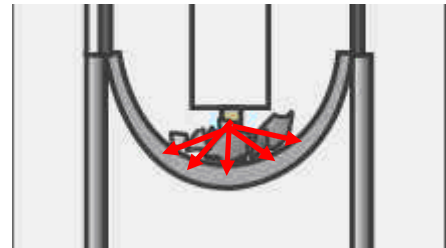


図 - 4 破碎進展過程での放電路形成範囲

### 3.2 実験方法

通常, 高電圧パルスにより破碎を行う際は, 高電圧電極である銅線とコンクリートを接触させ破碎を行う。コンクリート破碎が進むことにより, コンクリートから破砕片, そして骨材へと径が小さくなっていく。破碎対象の径が小さくなることにより, 破碎対象の高さが減少していくが, 高電圧電極はスプリングにより破碎対象に追従していき, 低電圧電極側へと押し込まれていく。

そこで高電圧電極の初期位置を電極位置 0cm とし, その時初めに設置した状態から電極が押し込まれる最大の深さを 0cm, 3cm, 6cm, 9cm になるようにストッパーを取り付けた。この電極位置条件が消費エネルギーに及ぼす影響を調べるため, パルスパワー出力条件(E/N)は先の研究により 1.6kJ とし, 総エネルギー量が 640kJ になるまで 400 回放電を繰り返した。そのとき, 総エネルギー量が 128kJ, 256kJ, 384kJ, 512kJ, 640kJ の時に再生粗骨材を回収し, それぞれ密度・吸水率試験, ふるい分け試験を行った。破碎に使用したコンクリート配合表を表 - 2 に示す。

## 4. 実験結果

### 4.1 密度・吸水率試験

パルスパワー出力を E/N=1.6kJ, 電極位置を 0cm, 3cm, 6cm, 9cm に設定し, 放電回数が 80 回に達する毎に再生粗骨材を回収し密度試験, 吸水率試験をそれぞれ行った。試験結果を図 - 5, 6 に示す。

密度吸水率試験の結果, 電極位置 3cm でコンクリートを処理し, 回収された再生粗骨材が放電回数 160 回において最も早く JIS A 5021「コンクリート用再生骨材 H」

を満たす再生粗骨材を回収できた。この時の消費エネルギーは 256kJ である。他の電極位置条件の再生粗骨材が H 規格を満たした放電回数は、電極位置 0cm の時に放電 240 回、電極位置 6cm の時に放電 320 回において満たした。電極位置 9cm の時では、絶対乾密度の品質規格は放電 240 回の時点で満たしているが、吸水率が H 規格を満たしておらず、放電 320 回から 400 回へ増加しても品質の改善がみられなかった。また放電回数の増加による骨材品質の向上も電極位置 3cm のものがグラフの傾きが最も大きく、少ないエネルギーで破碎が行われたことがわかる。

#### 4.2 ふるい分け試験

パルスパワー出力を  $E/N=1.6\text{kJ}$ 、電極条件を 0cm、3cm、6cm、9cm に設定し、放電回数が 80 回に達する毎に再生粗骨材を回収しふるい分け試験を行った。各電極位置により回収された再生粗骨材の粒度分布を図 - 7、8、9、10 に示す。

ふるい分け試験の結果より、電極位置 3cm のものが最も少ないエネルギーで原粗骨材の粗粒率に近づいたことがわかる。また粒度分布のグラフより、電極位置 0cm、3cm の粒度分布は放電回数の増加により、粒が小さくなり破碎がよく行われていることがわかる。その一方、電極位置 6cm、9cm のものは放電回数が増加しても、粒の大きなものが破碎されずに残留していることがわかる。

電極位置 3cm が最も少ないエネルギー量で H 規格を満たす再生粗骨材を回収できた理由として、電極位置 3cm にて形成される放電路ではエネルギーロスが少なかったからだと考えられる。電極位置 0cm と 9cm の結果より考察を行う。エネルギーロスが発生する状況は、水中に形成された放電路から放出される、放電路長さが短いため低電圧電極へと流れる 2 種類である。電極位置 0cm で形成される放電路は高電圧電極から破碎対象間と破碎対象から低電圧電極間の 2 種類で構成される。一方、電極位置 9cm に設定し、破碎処理中を観察した結果、放電回数 400 回の時点においても常に骨材と接触した状態であった。そのため、電極位置 9cm で形成される放電路は高電圧電極と接触した破碎対象から低電圧電極間のみと考えることができる。破碎処理後期においては、どの電極位置条件においても、骨材もしくはモルタル片程度の大きさに破碎されていたため、破碎対象から低電圧電極間に形成される放電路長さは大きな違いはないと考えられる。そのため、電極位置 0cm、9cm の両者において違う条件は、高電圧電極から破碎対象間に形成される放電路長さのみと考えることができる。高電圧電極から破碎対象間に存在するのは水であるため、エネルギーの放出が衝撃波、音、光となって損失がおきる。そのため、電極位置 0cm の条件では、エネルギーロスが生じ、回収

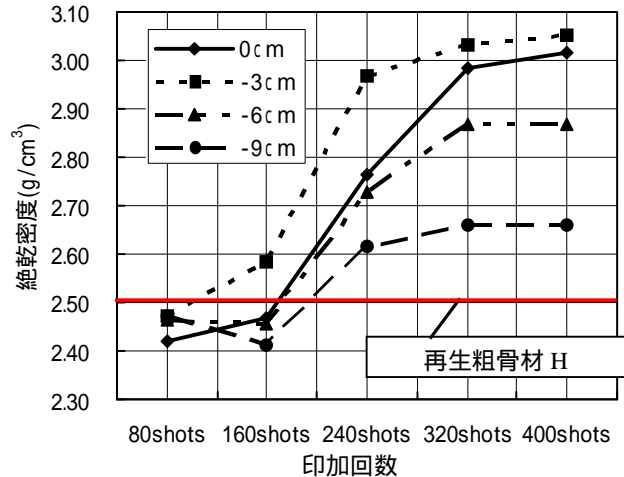


図 - 5 電極位置条件毎の絶対乾密度変化

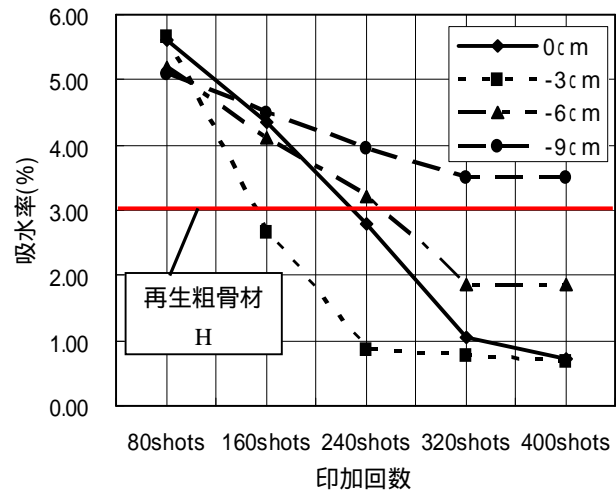


図 - 6 電極位置条件毎の吸水率変化

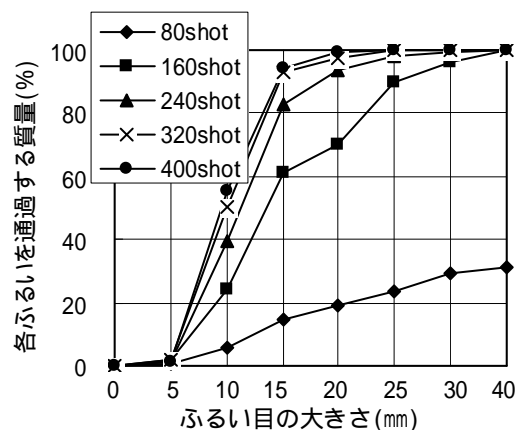


図 - 7 電極位置 0cm 粒度分布

される再生粗骨材の品質は悪くなると思われる。しかし、密度吸水率試験及びふるい分け試験の結果より、電極位置 9cm の条件において回収された再生粗骨材の品質が悪い結果となっている。これは、破碎対象から低電圧電極間に形成される放電路長さが短く、エネルギー損失が生じているためだと考えられる。そのため、常に破碎対象と接触していた電極位置 9cm の条件ではエネルギー損失

が大きかったと考えられる。そして他の電極位置条件では、高電圧電極から破碎対象間に放電路が形成されることにより、水中にて衝撃波、音、光が発生する。通常、これは破碎の主要因となりえないが、破碎対象から低電圧電極間にて形成される放電路長さが不十分なため、エネルギー損失があった。そのため、高電圧電極から破碎対象間に放電路が形成されることにより、エネルギーロスとなっていた分が衝撃波となることにより、コンクリート破碎へ寄与したと考えられる。これは破碎後期において、電極位置 6cm の条件により回収された再生粗骨材の粒度分布が改善されていっていることからわかる。電極位置 0cm, 3cm を比較して、高電圧電極から破碎対象間の距離が十分にあり、衝撃波によるコンクリート破碎が十分に行われていると考えられる電極位置 0cm の条件により回収された再生粗骨材品質が悪い原因としては、電極位置 0cm の条件では、衝撃波として消費されるエネルギーが大きく、主要な破碎要因である熱膨張及びプラズマ化に消費されるエネルギーが小さくなったためだと考えられる。

今回の試験により、供試体寸法(質量):150mm×150mm×75mm(4kg)の破碎を行う場合、E/N=1.6kJ/放電回数 160回、電極位置 3cm の放電条件により、総消費エネルギー 256kJ と最も少ないエネルギーでコンクリート用再生粗骨材 H の規格を充たす再生粗骨材を回収することができた。この結果を基に、水中パルス放電法によりコンクリートを破碎、H 規格を充たす再生粗骨材を回収する際の消費エネルギーを CO<sub>2</sub> 換算し、評価を行った。

## 5. 消費エネルギーの CO<sub>2</sub> 排出量換算

### 5.1 パルスパワー放電法による CO<sub>2</sub> 排出量

パルスパワー放電法によるコンクリート破碎及び再生粗骨材回収時の環境負荷を評価するために、消費エネルギーを CO<sub>2</sub> 排出量に換算した。

CO<sub>2</sub> 排出量を算出するに当たり、パルスパワー放電法によりコンクリートを 1t 処理し、H 規格を充たす再生粗骨材を回収する際の消費エネルギーを算出する。コンクリート供試体質量は 4kg であるため、1t の質量を同様に処理する場合の消費エネルギーは、 $6.4 \times 10^4$ kJ となる。この消費エネルギーより CO<sub>2</sub> 排出量を求めるに当たり、ジュールをワットに変換した。この時の消費電力は 17.8kWh となる。消費電力より CO<sub>2</sub> 排出量を算出するが、その時用いる CO<sub>2</sub> 排出係数は  $0.407 \text{kg-CO}_2/\text{kWh}^9$  となる。よって、最も少ないエネルギー量によりコンクリート 1t を処理、コンクリート用再生粗骨材 H の規格を充たす再生粗骨材を回収した際の CO<sub>2</sub> 排出量は  $7.24 \text{kg-CO}_2/\text{t}$  となる。

### 5.2 既往の骨材回収技術のとの比較

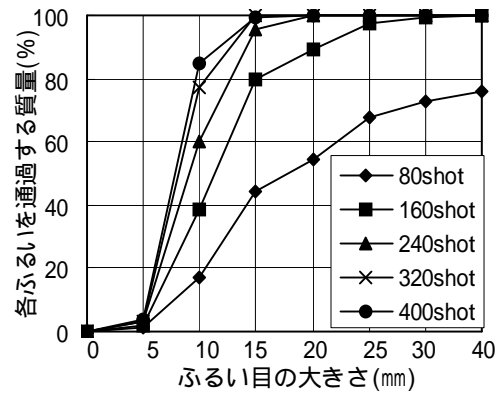


図 - 8 電極位置 3cm 粒度分布

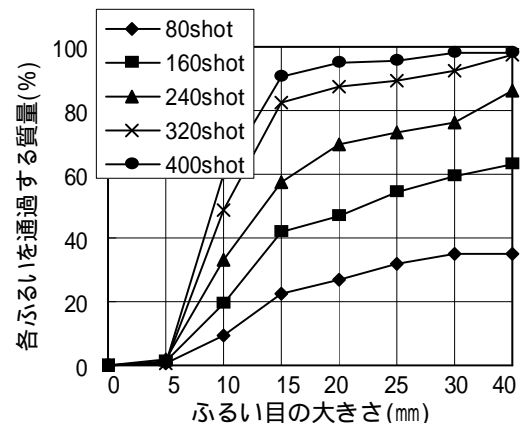


図 - 9 電極位置 6cm 粒度分布

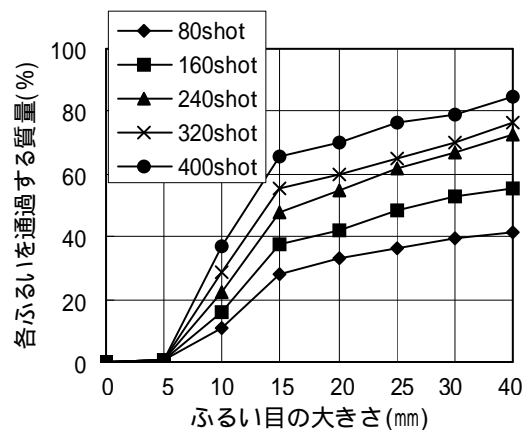


図 - 10 電極位置 9cm 粒度分布

表 - 3 再生骨材回収に伴う二酸化炭素排出量

	処理量 t/h	消費電力量 (kWh/t)	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /t)
パルスパワー 放電法	0.03	17.8	7.24
加熱 すりもみ法 <sup>9)</sup>	5	29	11.32

比較評価のため、加熱すりもみ法により再生粗骨材を回収する際に消費される電力量より CO<sub>2</sub> 排出量を算出する。加熱すりもみ法による CO<sub>2</sub> 排出量を表 - 3 に示す<sup>9)</sup>。

パルスパワー放電法により、 $E/N=1.6\text{kJ}$ 、放電回数 160 回、電極位置 3cm によりコンクリートを 1t 処理した場合に発生する  $\text{CO}_2$  排出量は  $7.24\text{ kg-CO}_2/\text{t}$  となった。一方、高度再生処理である加熱すりもみ法によりコンクリートを 1t 処理し、再生粗骨材を回収した際に発生する  $\text{CO}_2$  排出量は  $11.32\text{ kg-CO}_2/\text{t}$  である。既往の骨材回収技術と比較して、パルスパワー放電法による骨材回収技術の  $\text{CO}_2$  排出量は、約  $2/3$  となることがわかった。

環境負荷項目の一つである  $\text{CO}_2$  排出量での比較では、パルスパワー放電法による骨材回収技術が優れていることがわかった。しかし、今回使用しているマルクス装置でコンクリート 1t を処理すると仮定した場合、33 時間強も時間が必要だと試算された。これは、本研究にて使用しているマルクス装置は実験室規模での破碎を目的としているためであり、現在の試験装置規模では大量処理を想定していないためである。

## 6. まとめ

本研究では、高電圧パルス放電を用いたパルス放電法に、電極位置が再生粗骨材回収時の消費エネルギーに及ぼす影響を調べ、JIS A 5021 に定められる H 規格を満たす再生粗骨材を回収する際の消費エネルギーを  $\text{CO}_2$  排出量換算し、既往の骨材回収技術と比較評価した。以下に今回の実験より得られた結果を示す。

放電一回あたりのエネルギー量を  $1.6\text{kJ}/\text{回}$  として  $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 75\text{mm}$  の大きさのコンクリート塊 (質量  $4\text{kg}$ ) を処理する際、最も少ない消費エネルギーで再生粗骨材 H を回収できたのは電極間距離 3cm の時であった。

上記の場合に要した放電回数は 160 回となり、コンクリート 1t あたりの処理を行うとすると、二酸化炭素排出量換算値は  $7.24\text{ kg-CO}_2/\text{t}$  となった。

更に上記において、要した時間は 33 時間となり、コンクリート 1t あたりの換算処理効率は  $0.03\text{t}/\text{h}$  と算出された。

次にパルスパワー放電法における電極位置が、エネルギー消費に及ぼす影響を調べた結果、次のようなことがわかった。すなわち破碎は、高電圧電極及び低電圧電極間に形成される放電路において生じるが、放電路が短いと破碎が行われる面積が狭いため、破碎効率が低下する。一方、電極間隔が離れていると、電極と破碎対象の間の水が多くなり、その部分でエネルギー損失が起きるため、

できるだけ少なくする必要がある。まとめると、

電極間距離は破碎効率に影響を及ぼす

広い放電路が形成される電極間距離が必要であり、かつ高電圧電極と破碎対象間は少ないほうがいい。

以上の結果を踏まえて、現状の実験装置を用いたコンクリートの時間あたりの処理量は、既往の骨材回収技術と比較して低いことがわかった。そのため今後さらに処理効率を上げるためには、電極数の増加、放電繰り返し時間の短縮などを図る必要がある。

今回、算出したパルス放電法による二酸化炭素排出量は  $7.24\text{ kg-CO}_2/\text{t}$  であったが、これは更に削減できる可能性がある。現在使用しているパルス発生装置では、充電から放電の間にエネルギー損失があるため、この損失量を削減するため、電源の改良を行っている。放電効率が上昇することで、より少ない放電エネルギーで H 規格を満たす再生骨材を回収することが可能だと考えられる。

## 参考文献

- 1) 経済産業省：「第 1 回カーボンフットプリント制度の実用化・普及推進研究会」, 2008
- 2) 外務省：「気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書」, 1997.12
- 3) 環境省：「環境白書平成 20 年度版」, 2008
- 4) 重石光弘, 浪平隆男ほか：「パルスパワーによるコンクリートからの粗骨材の分離、回収」, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1475-1480, 2006.7
- 5) 高木基志, 重石光弘ほか：「パルスパワーにより回収された再生粗骨材の品質について」, 土木学会西部支部研究発表会, pp827-828, 2007.2
- 6) 日本規格協会：JIS A 5021「コンクリート用再生骨材 H」, 2005.3
- 7) 秋山秀典：「高電圧パルスパワー工学」, オーム社, pp.36-38, 2003.12
- 8) 高木基志, 重石光弘ほか：「廃コンクリートより粗骨材を分離回収するためのパルスパワー出力の最適化に関する研究」, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 2008
- 9) (社)土木学会コンクリート委員会：「コンクリート構造物の環境性能照査指針 (試案)」, 2005.11.1