

溶存二酸化炭素の固定化 -陽イオン交換樹脂のカチオン交換特性について-

柴田勝¹・佐藤直樹²・岩田實³

物質工学科 (Department of Materials Engineering, Nagaoka National College of Technology)

FIXATION OF CARBONE DIOXIDE DISSOLVED IN WATER USING CATION-EXCHANGER RESINS

Masaru S. SHIBATA¹, Naoki SATO² and Minoru IWATA³

Abstract

Continuous promotion of CO₂ dissolution from the gas phase to the water phase is required for construction of a high-efficiency CO₂ withdrawal system using liquid absorbent. To fix CO₂ as CaCO₃ produced by reaction of calcium ions with CO₂ dissolved in water, cation-exchanger resins that can retain cations, such as calcium and magnesium ions, were examined. On four cation-exchanger resins (Amberlight series 200CT, IR200, IRC50, and IRC76) and combinations of these resins, the rates and capacities of the replacement of protons to calcium or of calcium to protons were determined as changes in proton and calcium concentrations measured with a pH meter and by high performance liquid chromatography. Strong cation-exchange resins (SCER) were superior to weak cation exchange resins (WCER) in exchange rate and capacity from protons to calcium on resins. In contrast, the properties of SCER were inferior to those of WCER in calcium to proton exchange. Resins consisting of a combination of SCER and WCER had average exchange rate and capacity from proton to calcium. However, the calcium to proton ion-exchange rates on the combined resins were faster than the average of the component resins. Furthermore, the ion-exchange capacities of the combined resins were greater than the average capacities. These results suggest that low-CO₂ solubility water is applicable as an adsorbent solution for high-efficiency CO₂ withdrawal systems to reduce the levels of CO₂ in the atmosphere using combined resins.

Key Words : carbone dioxide, ion-exchange resin, recycle, green house effects, global warming

1. 緒言

地球温暖化の主な原因として、温室効果ガス（二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素など）による保温効果が挙げられる。温暖化は、気温の上昇を引き起こし、生態系に大きな変化を及ぼす。このことから、温室効果ガスの中で温暖化に最も大きく寄与してい

る二酸化炭素の排出量の削減が必要不可欠であるが、ここ数十年間に大気中の二酸化炭素濃度は著しく増加している。このことから、二酸化炭素の大きな吸収源である森林の保護、樹木乱伐の禁止などと共に国際的な二酸化炭素の排出規制に関する京都議定書が取りまとめられた。日本は京都議定書の批准により、2012年までに二酸化炭素の排出量を1990年レ

ベルの約 6% (7700 万トン) の削減義務が課せられている¹⁾。これらの目標をクリアするために、二酸化炭素ガス分離システムとして低エネルギー消費・低環境負荷・固定回収した二酸化炭素の再利用について精力的に研究されている。しかし、いずれも反応装置もリサイクル効率や炭酸ガス分離回収に大量のエネルギーを必要とするなど、数多くの問題が残っている。

効率の良い二酸化炭素ガスの分離回収システムを構築するためには、高い分離効率と安定な形での貯蔵技術が必要とする。分離技術は吸収法、吸着法、膜分離法、蒸留法の 4 種に大別されている²⁾。吸収法・吸着法・蒸留法は、高い効率で二酸化炭素を回収できるが、高圧の維持や吸着剤・吸収液の再生に多大なエネルギーを必要とする³⁻⁹⁾。膜分離法は、設置面積が小さく、エネルギー消費も少ない点で有利であるが、高精度のガス分離が困難であり、膜の安定性にも問題がある。一方、貯蔵技術には大気や排ガス中の二酸化炭素を無機化合物の構造の一部として取り込ませる方法や包接化合物に二酸化炭素分子を包接させる方法などがある。自然界では二酸化炭素の貯蔵として炭酸塩鉱物や海水への溶解などの形で行われているが、人工的な方法としての研究はあまり行われていない。これらの欠点を克服するために、分離回収した二酸化炭素を再利用可能な形に固定化すると共に大気圧、常温下での低二酸化炭素分圧時の分離・回収が可能な物理吸収・化学吸収の特徴を合わせ持つ環境低負荷型装置の開発を目的として基礎的な実験を行った。低環境負荷の観点から、吸収法で用いる吸収液として天然に大量に存在する水を選択した。しかし、大気圧下での二酸化炭素ガスの水への溶解量は塩基性吸収液に比べかなり小さい。そこで吸収量を上げるために Ca^{2+} (カルシウムイオン) を陽イオン交換樹脂上に担持させ、二酸化炭素を炭酸カルシウム (CaCO_3) として固定し、回収する方法について実験を試みた。

2. 実験

2.1 陽イオン交換樹脂

本実験では Ca^{2+} 結合に関与する樹脂の構造や官能基の違いにより Ca^{2+} 結合・放出特性がどのように異なるかを明らかにする。このためにオルガノ社のアンバーライト IR120、200CT、IRC50、IRC76 の 4 種類を用いて実験を行った。

IR120 と 200CT の官能基は強酸性 ($-\text{SO}_3\text{M}$) であり、IRC50 と IRC76 の官能基は弱酸性 ($-\text{COOM}$) である。これらの樹脂を用いて樹脂上の置換基を H^+ から Ca^{2+} ($\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+}$) へ、または、 Ca^{2+} から H^+ ($\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{H}^+$) へ交換させた時の交換速度および交換容量の測定を行った。樹脂は予め H^+ 、 Ca^{2+} 形へ十分に置換調整したものを実験に用いた。

2.2 二酸化炭素の溶解反応

(1) 平衡状態

平衡状態での二酸化炭素の溶解量について調べた。純水 50ml を入れた 200ml のフタ付ガラス容器に各濃度の二酸化炭素ガスを吹き込み、密封した。二酸化炭素ポンプとエアープンプの流量を調節することより、二酸化炭素濃度 0, 3, 6, 10, 20, 40, 75, 100% を含む空気を 30 秒間一定量で吹き込んだ後に密封し、二酸化炭素の気液平衡のために 25°C の恒温槽中で 24 時間静置した。 H^+ 濃度の測定を pH メータにより行った。

(2) 非平衡状態

100% 二酸化炭素ガスの吹き込み量と水への溶解速度を調べるために、純水 20ml を入れたビーカーに二酸化炭素ガスを流量 0.5, 1.0, 3.5, 5.0 L/min で吹き込み、各時間での pH 測定を行った。

2.3 陽イオン交換反応

(1) $\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+}$ 交換反応

陽イオン交換樹脂における H^+ から Ca^{2+} 交換 ($\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+}$) のイオン交換速度、交換量を測定するために次の操作を行った。置換基を H^+ 形に調整した陽イオン交換樹脂 10g を純水 300ml に懸濁し、0.1M CaCl_2 を 6.0ml 加えて攪拌した。25°C の反応容器から経時的に pH 測定とサンプリングを行い、水溶液中の H^+ 、 Ca^{2+} 濃度の測定を行った。 Ca^{2+} 濃度測定を高速液体クロマトグラフィー (HPLC) により行った。分離カラム TOSOH IC-Cation SW (50mm, ϕ 4.6mm, カラム温度 40°C, 溶離液 3.4mM EDTA を含む 10mM クエン酸, 流速 1.5ml/min の条件により Ca^{2+} を分離し、電気伝導を測定することにより検出を行った。

樹脂として 4 種類の陽イオン交換樹脂 (IR120, 200CT, IRC50, IRC76)、各陽イオン交換樹脂の 50% 混合物 (IR120+200CT, IRC50+IRC76, 200CT+IRC50) を使用した¹⁰⁾。

(2) $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{H}^+$ 交換反応

$\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{H}^+$ への陽イオン交換速度、交換容量の測定のために次の操作を行った。このときの実験装置を図1に示す。

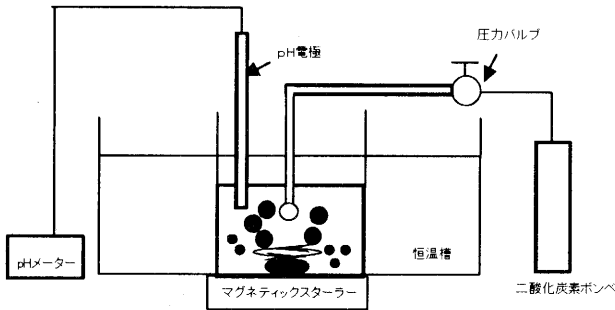


図-1. 陽イオン交換の装置図

Ca^{2+} 形に調整した樹脂 10g を純水 300ml の入ったビーカーに懸濁し、攪拌しながら 100%二酸化炭素ガスを流量 3.5L/min で 2 分間吹き込んだ。25°C の反応容器から経時的に pH 測定とサンプリングを行い、水溶液中の H^+ 、 Ca^{2+} 濃度の測定を行った。

(3) 混合樹脂の $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{H}^+$ 交換速度・交換量

異なる性質の樹脂を任意の比率で混合し、その割合が交換速度、交換量に与える影響について検討を行った。樹脂として強酸性樹脂 200CT と弱酸性樹脂 IRC50 を使用した。 $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{H}^+$ 交換反応では樹脂混合溶液に 2 分間二酸化炭素ガスを通気させたが、より正確な値を求めるために純水 300ml に 100%二酸化炭素を気液平衡での pH 値である 3.90 になるまで通気を行い、溶液に樹脂を加えた。200CT : IRC50 の組み合わせ比率を 0 : 100, 25 : 75, 50 : 50, 75 : 25, 100 : 0 で行った。

3. 結果および考察

3.1 二酸化炭素の溶解平衡について

平衡状態での純水への二酸化炭素の溶解特性について調べた。各二酸化炭素濃度の空気を吹き込み、24 時間静置させた溶液の pH を図 2 に示す。図 2 の実線は理論値、黒点は実測値を示している。 $[\text{H}^+]$ の理論値を水へのガス溶解および炭酸イオン、重炭酸イオンの平衡関係式から誘導した式により求めた。

$$[\text{H}^+]^3 - (1.01 \times 10^{-14} + 1.51 \times 10^{-8} P_{\text{CO}_2}) [\text{H}^+] - 1.42 \times 10^{-18} P_{\text{CO}_2} = 0$$

$[\text{H}^+]$ 、 P_{CO_2} は、それぞれ水素イオン濃度(mol/L)および CO_2 分圧を示している。

この式は気相の二酸化炭素濃度の上昇により水溶液の H^+ が増加することを示している。理論値、実測値が一致することから、二酸化炭素の溶解反応を pH 変化を基に説明できることが証明された。

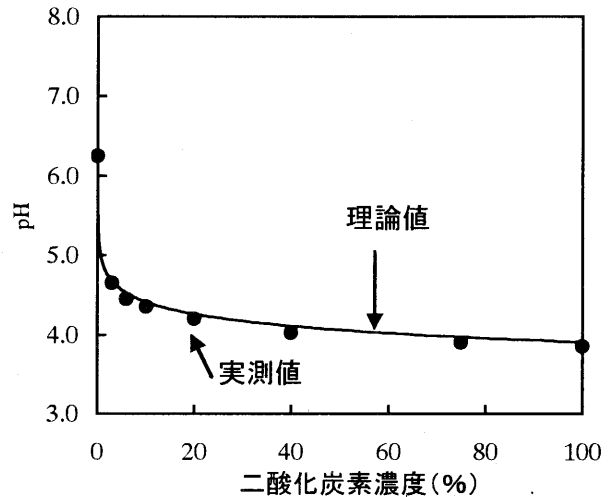


図-2. 二酸化炭素ガスの封入による溶液のプロトン濃度変化

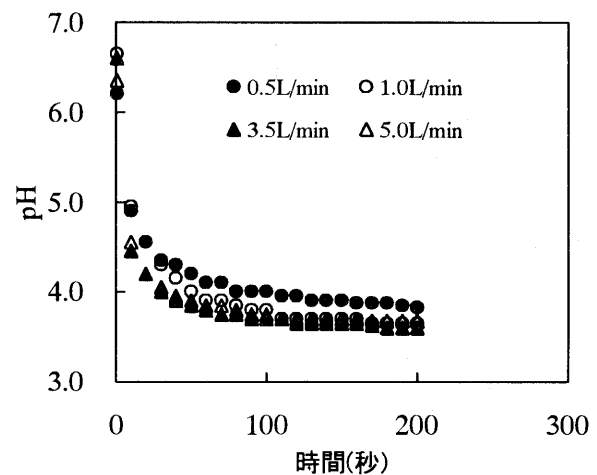


図-3. 二酸化炭素ガスの通気時間に依存した溶液のプロトン濃度変化

3.2 二酸化炭素の溶解について

純水に二酸化炭素ガスを通気し、気液平衡に達する条件を調べた。図 3 に純水に 100%二酸化炭素ガスを任意流量で吹き込んだ時の pH 変化を示す。

水溶液に 100%二酸化炭素ガスを吹き込んだ場合、初期 pH から平衡時での pH の半分に達するまでに要した時間は流量 0.5L/min では 8.0 秒、3.5L/min 以上では 4.9 秒であった。3.5L/min 以上の流量で二酸化炭素ガスを吹き込んだ場合では、120.0 秒後に pH

3.90 で一定となり、水溶液への二酸化炭素の溶解は比較的すばやく平衡に達していた。この値は図 2 の 100% 二酸化炭素を溶解させたときの理論値 (pH 3.91) と一致することから、二酸化炭素の水溶液への溶解速度は流量に依存し、一定以上の二酸化炭素流量であれば比較的短い時間で平衡に達することが分かった。

3.3 陽イオン交換反応 $H^+ \rightarrow Ca^{2+}$ について

H^+ から Ca^{2+} への陽イオン交換速度と交換容量の測定を行うために、 H^+ 形に調整した陽イオン交換樹脂を懸濁した溶液に $CaCl_2$ を加えて H^+ 、 Ca^{2+} 濃度の測定を行った。図 4 に各樹脂に対する H^+ 濃度変化、図 5 に Ca^{2+} 濃度変化を示す。図 4 に示されるように樹脂懸濁溶液に $CaCl_2$ 添加後、溶液中の H^+ は増加し Ca^{2+} は減少した。これは樹脂に担持されていた H^+ が $CaCl_2$ 由来による Ca^{2+} と陽イオン交換することで H^+ が樹脂から溶液中に放出された結果、溶液中の H^+ 量が増加し、逆に溶液中の Ca^{2+} が樹脂に担持されたために濃度の低下が起きたと考えられる。平衡時の H^+ 濃度は樹脂への Ca^{2+} 担持量に比例することから、 Ca^{2+} 交換容量を溶液中の H^+ 増加量として検討を行った (図 4)。その結果、強酸性樹脂である IR120 が実験に用いた樹脂で最も大きな Ca^{2+} 交換容量を示した。また、弱酸性樹脂の Ca^{2+} 交換容量は小さく、IRC76 の Ca^{2+} 交換容量は IR120 の 1/2 以下であり、IRC50 に至っては IR120 の 1/6 程度であった。しかしながら、弱酸性樹脂である IRC76 の総交換容量は、各樹脂の最適条件下で IR120 に比

べて 2 倍大きいことが示されており、実験と正反対の結果が得られた (表 1)¹⁰⁾。これは樹脂がイオンの選択順位を持ち、弱酸性の樹脂は Ca^{2+} より H^+ を担持しやすい傾向にあるために、 $H^+ \rightarrow Ca^{2+}$ 交換反応が少量しか行われず、その結果、樹脂からの H^+ 放出量が少なかったためだと考えられる。

平衡時の溶液 H^+ 濃度は IR120 (強酸) と 200CT (強酸)，IRC50 (弱酸) と IRC76 (弱酸)，200CT (強酸) と IRC50 (弱酸) を等量含む全ての組合せにおいて樹脂成分となる 2 つの単体樹脂の中間の H^+ 濃度で平衡に達しており、 $H^+ \rightarrow Ca^{2+}$ 交換容量への樹脂混合による影響は見られなかった。

3.4 陽イオン交換反応 $Ca^{2+} \rightarrow H^+$ について

水溶液に二酸化炭素が溶解して発生する H^+ と樹脂に担持させた Ca^{2+} との交換量及び交換速度の測定を行うために Ca^{2+} 形に調整した樹脂溶液に 100% 二酸化炭素を流量 3.5L/min で 2 分間吹き込んだ。図 2 に示されるように同条件で二酸化炭素が気液平衡に達することから、2 分間の二酸化炭素ガスの通気を含めた溶液の pH と Ca^{2+} 濃度の測定と共に樹脂からの Ca^{2+} 放出量を調べた。 H^+ 濃度変化を図 6 に Ca^{2+} 濃度変化を図 7 に示す。二酸化炭素ガスを樹脂溶液に吹き込んだ直後、溶液の H^+ 濃度が上昇し、通気後に H^+ 濃度の低下および Ca^{2+} 濃度の増加が認められた。これは樹脂に担持されていた Ca^{2+} が H^+ と陽イオン交換することより溶液中に Ca^{2+} 放出されたためだと考えられる。

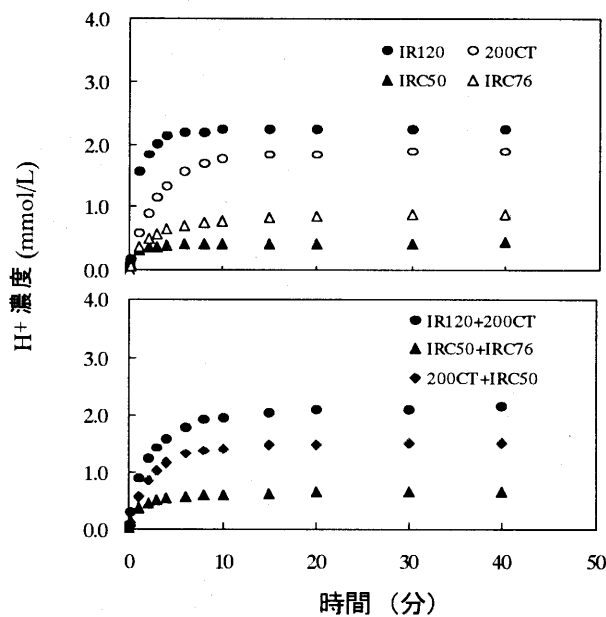


図-4. $H^+ \rightarrow Ca^{2+}$ 交換時間と溶液の H^+ 濃度変化

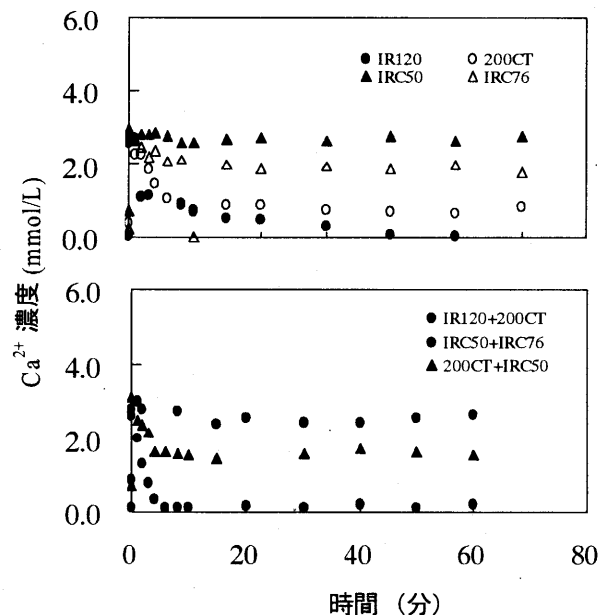


図-5. 樹脂の $H^+ \rightarrow Ca^{2+}$ 交換時間と溶液の Ca^{2+} 濃度変化

$H^+ \rightarrow Ca^{2+}$ 交換で大きな交換容量を示した IR120 (強酸) は、 H^+ よりも Ca^{2+} を担持しやすいために、樹脂担持の Ca^{2+} の 50% を H^+ に交換するのに必要な時間が 68 分と他の樹脂と比較して非常に長く、240 分後においても Ca^{2+} と H^+ との交換反応は平衡に達しなかった。同じ強酸性樹脂である 200CT は 50% 交換までに 132 秒と IRC120 (強酸) と比べて 30 倍速かった。弱酸性樹脂の IRC50 と IRC76 においては、それぞれ 18, 24 秒といずれも強酸性樹脂よりも短時間で $Ca^{2+} \rightarrow H^+$ 交換が行われていた。

IRC50 (弱酸) と IRC76 (弱酸) は共に $Ca^{2+} \rightarrow H^+$ 交換速度が速いことから、両樹脂を組み合わせ使用しても各樹脂と同程度の速さで $Ca^{2+} \rightarrow H^+$ 交換が行われていた。しかし、交換速度が非常に遅い IR120 (強酸) と比較的速い 200CT (強酸) を組み合わせた場合、その $Ca^{2+} \rightarrow H^+$ 交換速度は 200CT (強酸) と同程度であった。また、200CT (強酸) と交換速度の速い IRC50 (弱酸) を組み合わせた場合、その $Ca^{2+} \rightarrow H^+$ 交換速度は IRC50 (弱酸) とほぼ等しく、弱酸性樹脂で見られたすばやい交換反応が起こっていた。

3.5 $Ca^{2+} \rightarrow H^+$ 交換反応における樹脂の混合割合と交換速度の関係

交換速度の遅い樹脂と速い樹脂を組み合わせた場合、交換速度は平均以上を示した (図 6, 7)。樹脂の混合割合がカチオン交換速度に及ぼす影響を定量的に調べるために、樹脂混合溶液に 2 分間二酸化炭素を通気 (pH 3.90) させ、溶液に 200CT と IRC50

の混合樹脂を加えて経時的な pH 測定を行った。この結果を図 8 に示す。上図に時間に対する溶液中の H^+ 濃度変化、下図に樹脂の混合割合に対する溶液中の H^+ を半分交換するまでに要した時間 ($t_{1/2}$) を示す。

全樹脂に対する 200CT の割合が 0, 25, 50% の混合樹脂は 75, 100% に比べて交換速度に明確な違いは見られなかった。混合割合 0~75% 樹脂の交換反応は 30 分ではほぼ平衡に達していたが、100% では 60 分を要した。これらの結果は、交換速度の遅い樹脂に対して交換速度の速い樹脂を一定以上の割合で混ぜることにより、交換速度を各樹脂の平均以上にすることができることを示している。

以上の結果をまとめたものを表 4 に示す。陽イオン交換樹脂を用いた二酸化炭素の分離回収システムを考えた場合、回収効率を上げるために必要とされる樹脂特性には次の様な点があげられる。

- (1) 樹脂再生の時間を短くするために速い交換速度
 . . . [$50\% H^+ \rightarrow Ca^{2+}$ 交換] 値が小さい
- (2) 二酸化炭素の固定のために大きな Ca^{2+} 交換容量
 . . . [$H^+ \rightarrow Ca^{2+}$ 最大交換量] 値は大きい
- (3) 速い $CaCO_3$ 生成のために容易な Ca^{2+} 放出
 . . . [$50\% Ca^{2+} \rightarrow H^+$ 交換] 値が小さい
- (4) 二酸化炭素固定のために大きな H^+ 交換容量
 . . . [$Ca^{2+} \rightarrow H^+$ 最大交換量] 値は大きい

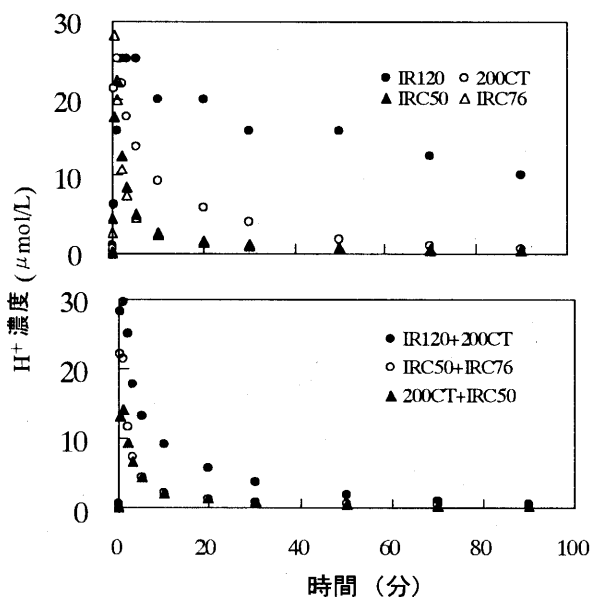


図-6. $Ca^{2+} \rightarrow H^+$ 交換の時間と溶液の H^+ 濃度変化

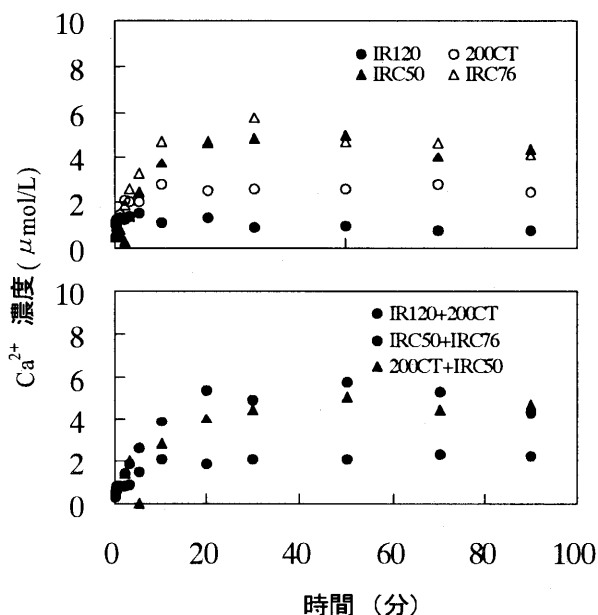


図-7. $Ca^{2+} \rightarrow H^+$ 交換の時間と溶液の Ca^{2+} 濃度変化

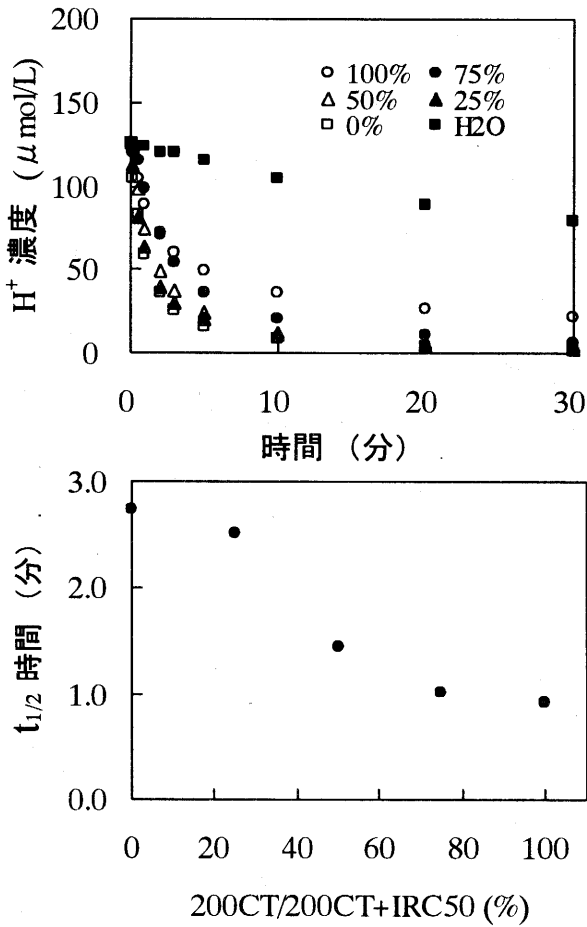


図-8. 樹脂混合比率によるH⁺放出速度と半時間との関係

樹脂には Ca²⁺交換容量が大きく、Ca²⁺を担持しやすく、放出しやすい樹脂が望まれる。しかし、Ca²⁺担持しやすい樹脂の交換容量は大きい、Ca²⁺を放

表-1. 樹脂の陽イオン交換時間と交換量

樹脂名	IR120	200CT	IRC50	IRC76	IR120 200CT	IRC50 IRC76	200CT IRC50
樹脂特性	強酸性	強酸性	弱酸性	弱酸性	強+強	弱+弱	強+弱
総交換容量 (mg/ml) *	1.9	2.2	1.8	3.9	—	—	—
50%H ⁺ →Ca ²⁺ 交換 (s)	45	143	40	89	90	45	100
H ⁺ →Ca ²⁺ 最大交換量 (mM) **	218	1.78	0.36	0.86	2.09	0.62	1.53
50%Ca ²⁺ →H ⁺ 交換 (s) ***	4080	132	18	24	132	30	24
Ca ²⁺ →H ⁺ 最大交換量 (mM) **	1.45	2.58	4.73	4.71	2.11	5.19	4.54

* 湿潤状態における 1.0ml 樹脂あたりの CaCO₃(mg)量 (文献 3)

** 表の値は湿潤樹脂 10gに対するもので 3.4, 3.5 での実測値

*** 2 分間の二酸化炭素ガスを通気した後の時間

出しにくい。また、Ca²⁺放出しやすい樹脂は交換容量が小さく、Ca²⁺を担持しにくい。

H⁺→Ca²⁺交換では、強酸性樹脂が弱酸性樹脂の 2 倍以上の交換容量を持っており、交換容量の点で優れていた。Ca²⁺→H⁺交換反応においては弱酸性樹脂が交換速度、交換容量の点で強酸性樹脂よりも優れていた。興味深いことに、H⁺→Ca²⁺交換では樹脂を混合させた効果は見られなかったが、Ca²⁺→H⁺交換速度の遅い強酸性樹脂(200CT)に弱酸性樹脂(IRC50)を混ぜることで、交換速度が弱酸性樹脂の値に近く、200CT 単体に比べて 5.5 倍速く、交換容量も各樹脂の平均値以上の値を示した。また、強酸性樹脂の中でも特に交換速度の遅い IR120 に交換速度が比較的速い樹脂 200CT を混ぜることで、IR120 の交換速度が 30 倍程度速くなり、200CT のみで得られた値と同程度までに上昇していた。

これらのことから二酸化炭素分離回収システムの実用化には、H⁺→Ca²⁺交換における交換容量、交換速度に優れる強酸性樹脂と、Ca²⁺→H⁺において弱酸性樹脂を組合せた強酸性樹脂を使用することにより、最も効率が良くなることが分かった。

なお、炭酸イオン (CO₃²⁻) は pH 8.5 以下では水中にほとんど存在せず、酸性領域では炭酸カルシウムは生成しない³⁾。二酸化炭素の回収に必要な炭酸カルシウムを生成させるためには、溶液の pH を塩基類などにより 8.5 以上にするか、海水(pH 8.0)などの比較的 pH の高い水溶液を吸収液として用いる必要がある。

4. まとめ

低環境負荷の二酸化炭素分離回収システムの実用化に向けて、水を吸収液とした物理吸収法・化学吸収法の特徴を併せ持つシステムの可能性について検討を行った。二酸化炭素の水への溶解速度および4種類の陽イオン交換樹脂とそれらを組合せた樹脂による H^+ から Ca^{2+} ($H^+ \rightarrow Ca^{2+}$)、 Ca^{2+} から H^+ ($Ca^{2+} \rightarrow H^+$) 交換反応におけるイオン交換容量、交換速度の測定を行った。

まず、二酸化炭素の溶解反応を調べるために、任意の濃度の二酸化炭素ガスを水に吹き込み、平衡時の水溶液の pH の測定を行った。得られた pH と気液平衡式から導かれた理論値の pH が一致しており、二酸化炭素の溶解反応を pH の変化をもとに説明できることを示した。また、非平衡状態での二酸化炭素の水溶液への溶解速度がガス流量と時間に依存しており、二酸化炭素を水に通気させた場合、3.5L/min 以上の流量であれば2分で溶解反応が平衡に達した。二酸化炭素の水への溶解反応は、樹脂の陽イオン交換反応に比べて速い速度で平衡に達することが分かった。以上の結果をもとに、pH メーターによる H^+ 濃度と HPLC を用いた Ca^{2+} 定量により、陽イオン交換樹脂の特性について調べた。

$H^+ \rightarrow Ca^{2+}$ 交換反応では、強酸性陽イオン交換樹脂が大きな交換容量を持ち、交換速度も速く、強酸性樹脂が陽イオン交換容量、交換速度の点で弱酸性樹脂よりも優れていた。これは強酸性樹脂が H^+ より Ca^{2+} を結合しやすいためであり、逆に弱酸性樹脂の交換容量が小さいのは Ca^{2+} よりも H^+ を選択しやすいためであった。樹脂を組合せた場合の陽イオン交換容量は各樹脂の平均値となり、樹脂の組合せによる効果は得られなかった。

$Ca^{2+} \rightarrow H^+$ 反応では $H^+ \rightarrow Ca^{2+}$ 交換反応とは逆に、弱酸性樹脂が強酸性樹脂よりも交換容量が大きく、交換速度も速く、弱酸性樹脂が交換容量・交換速度の点で優れていた。これは強酸性樹脂が弱酸性樹脂に比べて大量の Ca^{2+} を担持しているにもかかわらず Ca^{2+} を放出しにくいことから、見かけ上の Ca^{2+} 交換速度が遅くなり、交換容量が小さくなっていた。樹脂を組合せて使用した場合、イオン交換速度は各樹脂の平均値ではなく、より速度の速い樹脂の値となった。交換容量においても組合せの効果を見ることができ、各樹脂の平均交換容量以上の値を示した。

二酸化炭素分離回収システムの実用化には、 Ca^{2+} 交換容量が大きく、 Ca^{2+} を担持しやすく、放出しやすい樹脂が望まれることから、強酸性と弱酸性の樹脂を組合せにより交換容量・交換速度の調節を行うことで、本実験に用いた湿式二酸化炭素回収システムの効率を上げることが可能であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 茅 陽一：『CO₂ 削減戦略』，日刊工業新聞社（2000）
- 2) 公害資源研究所：地球環境特別研究室，『地球温暖化の対策技術』，オーム社，p199（1990）
- 3) A .S. Holmes, J. M. Ryan, B. C. Price, R. E. Styring : *Hydrocarbon Processing*, **61**, 5, p131 (1982)
- 4) 中川千枝, 丁子哲治, 平井英二：酸性降水の土壌による中和反応におけるCO₂の寄与，水環境学会誌，**第16巻**，pp175（1993）
- 5) 松崎浩司, 長廣雅則, 佐田俊勝：修飾陰イオン交換樹脂を用いる硫酸イオンからの硝酸イオンの分離濃縮，*BUNSEKIKAGAKU*, **Vol. 48**, 999 (1999)
- 6) V. A. Shah, J. McFarland : *Hydrocarbon Processing*, **67**, 3, p43 (1988)
- 7) G. Hochgesand : *Ind. Eng. Chem.* **62**, 7, p37 (1970)
- 8) R .N. Tnnyson, R. P. Schaaf : *Oil & Gas Journal*, **75**, 2, p78 (1977)
- 9) L. J. Kaplan : *Chem. Eng.*, **89**, 24, p30 (1982)
- 10) <http://www.tokyokaken.co.jp/product/ion/anba.html>

(2005. 8.1 受付)