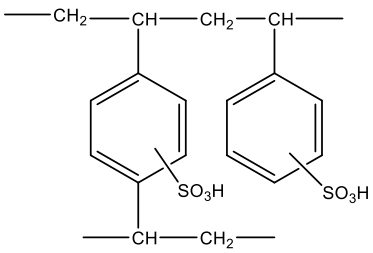
イオン交換樹脂
（陽イオン交換樹脂、陰イオン交換樹脂）
の基本原理と再生方法

イオン交換樹脂の基本構造は、高分子の架橋によって形成された網目構造と、そこに共有結合した荷電基（イオン交換基）から成り立っており、液相中の荷電分子を静電気的に結合・分離することが可能です。マトリクスに用いられる素材には、主にスチレンとジビニルベンゼンを共重合させたスチレン系、アガロース糖鎖を架橋したアガロース系の他、セルロース、デキストランベースのものがあります。 スチレン系のマトリクスは均一な粒子径（単分散）でポアサイズを制御しやすく、精製時の圧力も安定するのが利点で、高流速でのすぐれた分離能を発揮します。一方アガロース、セルロース、デキストラン系のマトリクスは天然物であり、非特異的吸着が極めて小さい親水性ポリマーである点から、タンパク質の精製に適しています。イオン交換樹脂の使用方法は大きく分けて、バッチ式とカラム式があります。

イオン交換樹脂と再生方法

スチレン-ジビニルベンゼン系イオン交換樹脂の例を用いて、イオン交換のメカニズムと再生方法について示します。

強酸性陽イオン交換樹脂（スチレン-ジビニルベンゼン系）



強酸性陽イオン交換樹脂のイオンの選択性は次の順番になっています。

$H^+ < Na^+ < NH^{4+} < K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+}$

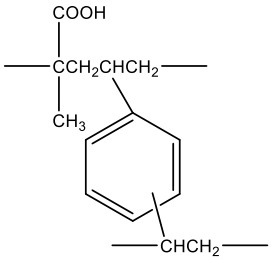
交換されにくい ⟶ 交換されやすい

価数の大きなイオンがより交換されやすく、同じ価数であれば原子番号が大きいものがより交換されやすくなります。
例えば Na 型の樹脂は Ca^{2+}を含む水が流れると、Na^+を放出して Ca^{2+}を吸着します。

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the U.S. and Canada..

ただし、交換されにくいイオンについても、濃度を高くすることで交換が促進されるため、系内を強酸性にすることで H 型への再生が可能です。また一旦 Ca^{2+}→K^{+}に交換し、さらに K^{+}→Na^{+}に交換するなど、段階的に交換する方法が有効な場合もあります。

弱酸性陽イオン交換樹脂（アクリル酸、メタクリル酸系）



弱酸性陽イオン交換樹脂のイオンの選択性は基本的には強酸性陽イオン交換樹脂と同様ですが、弱酸性陽イオン交換樹脂の場合、pH が酸性側に傾くと容易に H+に交換されてしまうため、使用可能な pH 領域が狭く、イオンの保持には適さない場合があります。一方でイオンをリリースしやすいため、一旦保持したものを溶出回収する場合には適しています。

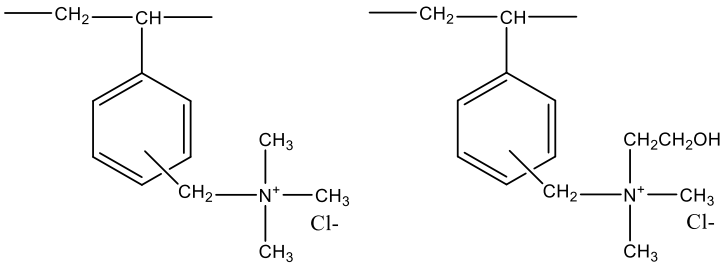
陽イオン交換樹脂の一般的な再生（前処理）方法：

(1) 脱イオン水で樹脂を満たします。
(2) 1 分間ゆるやかに撹拌し、15〜20 分間静置します。
(3) デカンテーションし、フレッシュな脱イオン水で再び満たします。
(4) (2)〜(3)の手順を 3 回以上繰り返します。
(5) 2N の HCl 水溶液で樹脂を満たします。
(6) 1 分間ゆるやかに撹拌し、5〜10 分間静置します。
(7) デカンテーションし 、(5)~(6)の手順を 2 回繰り返します。
(8) 脱イオン水で少なくとも 10 回以上洗浄します。溶出液が pH>5 になるのを目安とします。
(9) 蓋を密閉して保存します（冷蔵可・冷凍不可）。滅菌する場合は、20%エタノールで洗浄してから保管します。

その他別のイオンフォームに交換する場合

H -> Na form：　0.5-2.0% NaCl or NaOH でイオン交換を行います。
H -> K form：　0.5 molar (~3%) KOH でイオン交換を行います。

塩基性陰イオン交換樹脂



イオンの選択性：

$OH^{-} < HCO^{3-} < Cl^{-} < NO_3^{-} < SO_4^{2-}$

$HSO_4^{-} > NO_3^{-} > HSO_3^{-} > NO_2^{-} > Cl^{-} > HCO_3^{-} > HPO_4^{-} >$ ギ酸塩 > 酢酸塩 > プロピオン酸塩 > $F^{-} > OH^{-}$

イオン交換 & カウンターイオン選択性:

カウンターイオン強度の高いものほど、固定相に保持されやすく、よりカウンターイオン強度の高いイオンをバッファーに用いることで、固定相のイオンの溶出が促進されます。

陽イオン交換のカウンターイオン強度:

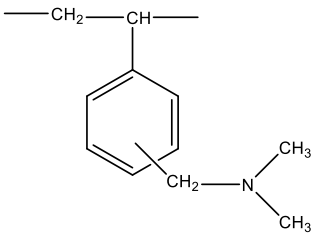
○ $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+} > Mn^{2+} > RNH_3^{2+} > NH_4^{+} > Na^{+} > H^{+} > Li^{+}$

陰イオン交換のカウンターイオン強度:

○ ベンゼンスルホン酸> クエン酸塩> $HSO_4^{-} > NO_3^{-} > HSO_3^{-} > NO_2^{-} > Cl^{-} > HCO_3^{-} > HPO_4^{-}$ > ギ酸塩 > 酢酸塩 > プロピオン酸塩 > $F^{-} > OH^{-}$

OH 型の強塩基性陰イオン交換樹脂はアルカリ性が強く樹脂を分解するため、通常 Cl 型で販売されています。
Ⅰ型に比べ、Ⅱ型は塩基性が低く、イオン交換能は低くなりますが、再生しやすいメリットがあります。

弱塩基性陰イオン交換樹脂



陰イオン交換樹脂の一般的な再生（前処理）方法：

(1) 脱イオン水で樹脂を満たします。
(2) 1 分間ゆるやかに撹拌し、15〜20 分間静置します。
(3) デカンテーションし、フレッシュな脱イオン水で再び満たします。
(4) (2)〜(3)の手順を 3 回以上繰り返します。
(5) 1N NaOH 水溶液で樹脂を満たします。
(6) 1 分間ゆるやかに撹拌し、5〜10 分間静置します。
(7) デカンテーションし 、(5)~(6)の手順を 2 回繰り返します。
(8) 脱イオン水で少なくとも 10 回以上洗浄します。溶出液が pH<9 になるのを目安とします(水酸化物型)。
1N NaOH 水溶液を 0.05N HCl もしくは 1N NaCl に変えて使用することも出来ます (塩化物型)。
脱イオン水の洗浄は pH>5 になるのを目安とします。
(9) 蓋を密閉して保存します（冷蔵可・冷凍不可）。滅菌する場合は、20％エタノールで洗浄してから保管します。

スチレン-ジビニルベンゼン系イオン交換樹脂には、その架橋度の違いにより Gel 型と Macroporous(Macroreticular)型があります。主な特性の違いを下表に示します。

	Gel	Macroporous(Macroreticular)
ポアサイズ	10～15 Å	数 100 Å
架橋度	一般に低い	一般に高い
膨潤度	高い	低い
色	透明	乳白色

タンパク質精製用には、アガロース（Sepharose）、セルロース（Sephacel）、デキストラン（Sephadex）系のイオン交換樹も各種扱っています。荷電基は以下のようなものがあります。

Anion Exchanger		**Functional Group and Counter Ion**	
DEAE (Diethylaminoethyl)	weak	$-OCH_2CH_2N^+H(CH_2CH_3)_2$	Cl^-
Q (Quaternary ammonium)	strong	$-CH_2N^+(CH_3)_3$	SO_4^{2-}
Cation Exchanger		**Functional Group and Counter Ion**	
CM (Carboxymethyl)	weak	$-OCH_2COO^-$	Na^+
SP (Sulfopropyl)	strong	$-CH_2CH_2CH_2SO_3^-$	Na^+

カタログ品につきましては、試験研究用のみを目的として販売されております。ヒトまたは動物用の体外診断薬、食品、医薬品、医療用機器、化粧品その他の試験研究以外の用途に用いることはできませんので予めご了承ください。

シグマ アルドリッチ ジャパン
ライフサイエンス サイエンス & ラボソリューションズ事業本部 〒153-8927 東京都目黒区下目黒 1-8-1 アルコタワー 5F
シグマ アルドリッチ ジャパン合同会社はメルクのグループ会社です。
E-mail: jpts@merckgroup.com Tel: 03-6756-8245

本紙記載の製品は試験・研究用です。ヒト、動物への治療、もしくは診断目的として使用しないようご注意ください。なお、品目、製品情報、価格等は予告なく 変更される場合がございます。予めご了承ください。 記載内容は 2022 年 9 月時点の情報です。 ©2022 Merck KGaA, Darmstadt, Germany. All rights reserved.Merck, the vibrant M, and Sigma-Aldrich are trademarks of Merck KGaA, Darmstadt, Germany or its affiliates. All other trademarks are the property of their respective owners. Detailed information on trademarks is available via publicly accessible resources.

Lit. No. TSM033A-2209-M