流動電位法による限外ろ過膜の細孔径と表面荷電密度の評価

中村一穂*・平山稚子・新田見 匡・松本幹治

横浜国立大学 大学院工学研究院 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5

Estimation of Pore Size and Surface Charge Density of Ultrafiltration Membrane by Streaming Potential Measurement

Kazuho Nakamura*, Wakako Hirayama, Tadashi Nittami, Kanji Matsumoto

Yokohama National University Graduate School of Engineering, Department of Chemical Engineering
79-5, Tokiwadai Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan

Electric conductivity (λ) dependency of streaming potential (SP) was measured to estimate the pore size and the surface charge density of the commercial ultrafiltration (UF) membranes having different nominal molecular weight cut-off (NMWCO). At the same λ value the absolute value of SP decreased with the decrease in NMWCO in the range of $\lambda > 1 \times 10^{-2}$ S/m. The pore size and surface charge density of UF membrane could be determined by the analysis of λ dependence of streaming potential in the range of $\lambda > 1 \times 10^{-2}$ S/m applying a mathematical equation of space charge model. In order to obtain the relation between two pore sizes estimated by SP measurement and the actual separation performance of UF membrane, the MWCO of the UF membrane was measured with 0.03wt% PEG solution. The pore size estimated by SP measurement showed a good linear relation with the Stokes diameter of PEG which has the molecular weight corresponding to MWCO of UF membrane tested. These observations mean the pore size estimated by SP measurement is correlated with the separation performance of UF membrane.

Key words : ultrafiltration membrane / streaming potential / molecular weight cut-off / pore size / surface charge density

1. はじめに

限外ろ過膜は、コロイドや高分子物質を分離対象物質としており、その分画性能は分画分子量で評価される場合が多い。限外ろ過膜の分画分子量は、タンパク質やポリエチレングリコール (polyethylene glycol : PEG) などの溶解性高分子を用いて膜の分離性能を測定し、溶質の分子量と阻止率の関係 (分子量分画曲線) を求め、阻止率が90%となる分子量として求められている¹⁾。この測定方法は、使用する溶質の種類^{2~4)}、圧力、物質移動係数^{5,6)} など多くの測定条件の影響を受けることが知られており、これらの条件を一定にして測定を行う必要がある。また、

実際に溶質のろ過を行う分離結果に基づく測定であるため、測定に使用した膜は測定に伴う溶質の膜への付着・吸着によりその細孔構造が変化することも予測される。このように分画分子量の測定では多くの因子の影響を受けるにも関わらず統一された測定方法が無いため、得られた値が測定者間で異なることが問題となっている。しかしながら、分画分子量は、環境分野における自然由来有機物 (Natural organic matter : NOM) 分離やバイオプロセスにおけるタンパク質分離など限外ろ過膜の多くのアプリケーションで膜の選定指標として広く用いられており、限外ろ過膜の細孔構造と分画分子量の関係の明確化が求められている。これまで、分子サイズに基づく解析²⁾、原子間力顕微鏡による細孔観察との比較⁸⁾、細孔径分布との関係⁹⁾ などが検討されている。我々は流動電位法による精密ろ過膜の評価法に関する開発を行い、圧力の加圧方法、電極の種類の影響¹⁰⁾、

* Corresponding Author

Tel : 045-339-3980 Fax : 045-339-4012

E-mail : k_naka@chemeng.bsk.ynu.ac.jp

Table 1 Specification of ultrafiltration membrane (Advantec Toyo Co.)

Cat.#	Nominal MW cut-off [kDa]	Material
Q0100	10	Polysulfone
P0200	20	Aromatic Polyamide
Q0500	50	Polysulfone
Q2000	200	Polysulfone

流動電位の測定液の電解質濃度（電気伝導度）依存性と膜の細孔径および表面荷電密度の関係¹¹⁾について検討した．その結果，流動電位の電気伝導度依存性は膜細孔径を反映して変化することを明らかにし，それを解析することにより，膜細孔径および表面荷電密度が評価できることを明らかにした．この方法では，測定には KCl の溶液を透過させるだけなので測定に伴う膜の汚れの影響がなく，非破壊的に測定が可能であること，また，全有機炭素計や高速液体クロマトグラフィーなどによる溶質の分析が不要であり，自動化も容易である特徴がある．応用としてファウリングした精密ろ過膜の洗浄効果を細孔径の変化によって評価することが可能であることを明らかにしている¹²⁾．流動電位法を限外ろ過膜の評価に適応するにあたり，精密ろ過膜に比べて流動電位の絶対値が低くなり測定が難しくなると予測されること，また，流動電位法により求めた細孔径は実際の膜の分離径に基づくものではないので，実際の分離性能との関係を明らかにすることが必要と考えられる．

本研究では，流動電位法に基づく限外ろ過膜の細孔径および表面荷電密度評価法について，市販の限外ろ過膜を用いて検討した．また，流動電位法により得られた細孔径の妥当性を検討するため，PEG を用いて使用した膜の分画分子量の測定を行い流動電位法により求めた細孔径と比較した．

2. 実験

2.1 使用膜

実験には公称分画分子量（Nominal molecular weight cut-off : NMWCO）10 k, 20 k, 50 k, および 200 kDa の 4 種類の市販限外ろ過膜を使用した．使用した膜の特徴を Table 1 に示す．

(A)

(B)

Fig. 1 (A) Experimental apparatus for streaming potential measurement. 1. N₂ gas cylinder, 2. KCl solution reservoir, 3. Pressure controller, 4. Pressure holding tank, 5. Temperature control bath, 6. Prefilter, 7. Pressure transducer, 8. Electrodes, 9. Digital multi meter, 10. Test membrane holder, 11. Electric conductivity flow cell, 12. Filtrate reservoir, 13. Electric balance, 14. Personal computer. (B) Determination of streaming potential from the relation between P_{TM} and E_{TM} .

2.2 流動電位測定

流動電位の測定には Fig. 1 (A) に示す測定装置を用いた．測定装置は，KCl 水溶液貯槽，ペリスタリックポンプ，加圧タンク（Advantec PR2），メンブレンホルダー（Sartorius 25 mm ポリカーボネートフィルターホルダー），圧力センサ（Kyowa PVL-5KB），デジタルマルチメータ（Advantest R6441），電子天秤（Shimadzu EB3300SW），窒素ボンベ，圧力制御装置，電気伝導度用フローセル，電気伝導度計（TOA CM40G），計測制御用パーソナルコンピュータから

Fig. 2 Gel permeation chromatograms of PEG. (TSK gel G5000PW_{XL}, flow rate : 5 mL/min, 25 °C, PEG : 4 kDa (Wako), 8 kDa (ICN Biochemical), 10 kDa (Merck), 20 kDa (Wako), 35 kDa (Merck), 70 kDa (Wako), 500 kDa (Wako))

構成されている。膜間電位差測定用の白金黒電極は、直径0.2 mmの白金線材に白金黒をメッキして作成した。作成した電極は、フィルターホルダーの加圧・透過の両側にあるフィルター支持体に設置した。メンブレンホルダーは恒温槽にて25 ± 0.5 °Cに保った。測定用電解質としてKCl (和光純薬工業 特級) を用い、測定液は超純水を用いて大気雰囲気下で調整し、pH調整は行わなかった。測定液のpHは5.5 ± 0.1であった。

実験は以下のような手順で行った。(1) 加圧タンクに超純水を入れ、メンブレンホルダーに膜をセットした。(2) 加圧圧力を、(a) 約15秒の間に0 ~ 0.41MPaに加圧し、(b) 約45秒間加圧圧力を一定に保ち、(c) 約15秒の間に0 MPaまで減圧した。この(a) ~ (c) の操作を繰り返した。(3) 加圧タンク内にKCl水溶液を添加し、測定液の電気伝導度を連続的に上昇させながら(2)の測定を繰り返した。流動電位 (Streaming Potential : SP) $\Delta E_{TM} / \Delta P_{TM}$ の算出には、加圧過程における膜間電位差 E_{TM} と膜間圧力差 P_{TM} の測定値をFig. 1 (B) に示すように直線近似し近似直線の傾きとして求めた。予備実験にて膜を重ね合わせて測定を行いその影響を検討した結果、SPは膜の重ね合わせの影響を受けなかったことより、SPは膜厚の影響を受けないことを確認した。

2.3 分画分子量測定

分画分子量測定用の実験装置は、メンブレンホルダー、加圧タンク、ペリスタリックポンプ、窒素ボンベから構成されており、クロスフローろ過方式に

より測定を行った。測定液は、分子量4 kDa (Wako), 8 kDa (ICN Biochemical), 10 kDa (Merck), 20 kDa (Wako), 35 kDa (Merck), 70 kDa (Wako), 500 kDa (Wako) のポリエチレングリコール (PEG) を所定の割合で混合して調製した0.03 wt% PEG水溶液を用いた。PEG水溶液の分子量分布は、原液と透過液を凍結乾燥法により濃縮した後、ゲルろ過クロマトグラフィー (Tosoh TSK gel G5000PW_{XL}, 流速5 mL/min) により求めた。使用したPEGのクロマトグラムをFig. 2に示す。

3. SPの解析方法

毛細管におけるSP [V/Pa]は、毛細管半径 r_p [m], 表面荷電密度 q_p [C/m²], 電気伝導度 λ [S/m]の関数として次式で示される¹³⁾。

$$SP = \frac{\Delta E_{TM}}{\Delta P_{TM}} = \frac{q_p}{\lambda_{eff} \kappa \mu} \frac{I_2(\kappa r_p)}{I_1(\kappa r_p)} \quad (1)$$

$$\kappa^{-1} = \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_r RT}{F^2 \sum_i z_i^2 C_i} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$\lambda_{eff} = \lambda_{avg} + \frac{q_p^2}{\mu} \left(1 - \frac{I_0(\kappa r_p) I_2(\kappa r_p)}{I_1^2(\kappa r_p)} \right) \quad (3)$$

$$\lambda_{avg} = \lambda_0 \left(1 + \frac{q_p \kappa^{-1} F}{\epsilon_0 \epsilon_r RT} \left(\frac{2}{\kappa r_p} - \frac{1}{I_1(\kappa r_p)} \right) \frac{\sum_i z_i^3 u_i C_i}{\sum_i z_i^2 u_i C_i} \right) \quad (4)$$

ここで、 R は気体定数[J K⁻¹ mol⁻¹], T は絶対温度[K], F はファラデー定数[C mol⁻¹], z_i はイオン種 i の価数, C_i は毛細管の中心におけるイオン種 i の濃度 [mol m⁻³], u_i はイオン種 i の移動度[m² mol J⁻¹ s⁻¹], ϵ_0 は真空中の誘電率[F m⁻¹], ϵ_r は比誘電率[-], κ^{-1} はデバイ長[m], λ_0 は毛細管の中心における電気伝導度[S m⁻¹], λ_{avg} は毛細管の平均電気伝導度[S m⁻¹], λ_{eff} は有効な電気伝導度[S m⁻¹], I_0 , I_1 , I_2 はそれぞれ0次, 1次, 2次の第1種修正ベッセル関数を示す。本研究では、限外ろ過膜がKClの阻止性を示さないこと、また比較的イオン強度の高い条件に対して式を適応することを想定しているため、 λ_0 は測定液の電気伝導度 λ に等しいと仮定した。SPの計算は、まず r_p および q_p の値を仮定し、ある λ に対する λ_{eff} を

Fig. 3 Correlation coefficient in the linear relation between P_{TM} and E_{TM} measured in UF membranes of NMWCO 50 kDa.

式 (3), (4) を用いて求め, 更に SP を式 (1) を用いて求めた. 測定した範囲の電気伝導度について同様の計算を行い電気伝導度と SP の関係を求め, 実測値に対してカーブフィッティングを行い r_p および q_p をフィッティングパラメータとして求めた.

4. 結果と考察

4.1 限外ろ過膜の流動電位測定

SP の測定精度は測定した E_{TM} と P_{TM} の直線性に依存するため, E_{TM} と P_{TM} の関係を直線近似する際に相関係数を求め測定の妥当性を評価した (Fig. 1 (B) 参照). Fig. 3 に E_{TM} と P_{TM} の直線関係の相関係数に及ぼす電気伝導度の影響の例を示す. 今回測定した UF 膜では SP は全て負の値を示したため, 相関係数が -1 に近い値を示すほど直線性が高い関係にある. 相関係数は, 電気伝導度が約 1×10^{-3} S/m 以下と約 1×10^{-1} S/m 以上で上昇する傾向があった. 相関係数が上昇した理由として, 低濃度側では溶解した二酸化炭素の影響, 高濃度側では E_{TM} の絶対値が低下するため電位差計の分解能に起因する測定限界が原因として考えられる. 電気伝導度が, $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$ S/m の範囲では安定して -0.995 以下の値が得られ, この範囲では精度が高い SP の測定が行えていることが分かった.

4.2 SP の電気伝導度依存性とその解析

SP の電気伝導度依存性の再現性および膜の個体差の影響を検討した. Fig. 4 に異なる条件の NMWCO

Fig. 4 Influence of membrane condition on the relation between λ and SP before and after filtration of PEG by UF membrane (NMWCO 50 kDa). (The upper panel shows an enlargement of the lower panel.)

50 kDa の限外ろ過膜を用いて SP の電気伝導度を測定した結果を示す. Fig. 4 の上図は下図を拡大したものである. SP は電気伝導度の上昇に伴い上昇し, ゼロに近づく傾向を示した. 同一個体の膜を 2 回測定した結果, SP の電気伝導度依存性はほぼ等しい曲線を示し, 同一個体の膜に対して本測定方法が高い再現性を有することが分かる. また, 同一ロットの異なる膜を用いて膜の個体差の影響を検討した結果, SP は, 電気伝導度が約 1×10^{-2} S/m より高い領域では若干高い値を示したもののほぼ同様の変化を示したが, 1×10^{-2} S/m より低い電気伝導度では SP は異なる個体の膜では異なる変化を示した. NMWCO 10 k, 20 k, および 200 kDa の膜に関しても同様に同一膜における測定再現性と同一ロットで異なる膜間の差異を検討した結果, 50 kDa の膜の結果とほぼ同様に, 同一膜では高い再現性が得られたが, 異なる膜では低電気伝導度において SP に差が見られた. この低電気伝導度域における膜個体間の SP の挙動の差異の原因は明らかではないが, 膜個体間の膜細孔径分布の違いが原因の一つとして考えられる. これらの結果より,

Fig. 5 Effect of NMWCO of UF membranes on the relation between λ and SP. (The upper panel shows an enlargement of the lower panel.)

電気伝導度が 1×10^{-2} S/m 以上では、比較的安定した測定が行うことができることが分かった。Fig. 4にはPEGによる分画分子量測定後の限外ろ過膜の流動電位の電気伝導度依存性も示した。測定後の膜は測定前の膜に比べてその絶対値が低くなる傾向を示しており、PEGのろ過による膜の細孔構造の変化を反映したものと考えられる。

Fig. 4中の実線は式(1)～(4)による計算線である。これらの式によりSPの電気伝導度依存性に特有のS字型カーブを表現することができるが、SPの電気伝導度依存性を調べた全濃度域の測定結果に対して計算結果をフィッティングさせることはできなかった。そこで、SP測定の精度および測定再現性の検討結果より、電気伝導度 1×10^{-2} S/m 以上の範囲が解析範囲として適当であると考え、表面荷電密度 q_b および細孔半径 r_p をフィッティングパラメータとして測定結果へのカーブフィッティングを行い、 q_b および r_p を決定した。以下、この電気伝導度の範囲に対して解析を行うこととした。

4.3 SPの電気伝導度依存性に及ぼすNMWCOの影響

Fig. 5にSPの電気伝導度依存性に及ぼすNMWCOの影響を示す。Fig. 5の上図は下図を拡大したものである。SPは膜のNMWCOに関わらず電気伝導度の増加に伴い上昇しゼロに近づく傾向があり、その上昇

Table 2 Fitting parameters and MWCO measured with PEG

Nominal MWCO [kDa]	$2 r_p$ [nm]	Coefficient of variation of r_p [%]	$q_b \times 10^3$ [C/m ²]	Coefficient of variation of q_b [%]	MWCO (PEG) [kDa]	Stokes diameter [nm]
10	12.6	33	-1.43	48	3.9	3.2
20	15.8	5	-1.95	61	6.8	4.4
50	23.4	14	-1.45	67	10	5.6
200	34.6	7	-1.43	19	41	9.6

の様子はNMWCOに依存し、 $\lambda < 1 \times 10^{-2}$ S/mではNMWCOに対する明確な傾向は見られなかったが、 $\lambda > 1 \times 10^{-2}$ S/mではSPはNMWCOが小さくなるのに伴いその絶対値が小さくなり、UF膜の分画分子量すなわち細孔径の差異を反映することが分かった。

SPの電気伝導度依存性に及ぼすNMWCOの影響を定量的に評価するため、 $\lambda > 1 \times 10^{-2}$ S/mの範囲に対して r_p と q_b を変化させて式(1)～(4)により求めた計算曲線をカーブフィッティングし、測定値と良く適合する r_p と q_b を求めた。Fig. 5中の実線は計算結果を示している。計算結果は測定結果によく一致させることができ、 q_b および r_p を求めることができた。同様の測定・解析を複数の異なる個体の膜について行い、得られた r_p と q_b をTable 2に示す。 r_p はNMWCOが大きくなるにつれて大きくなり、変動係数は5～33%の範囲であった。 r_p の値は細孔径25～800 nmの精密ろ過膜に対して同様の解析を行い得られた値¹¹⁾と同等かそれ以下の値であり、限外ろ過膜の細孔径として矛盾のない範囲の値と考えられる。また、 q_b はPS膜では $-1.43 \times 10^{-3} \sim -1.45 \times 10^{-3}$ C/m²、芳香族ポリアミドでは -1.95×10^{-3} C/m² と評価され変動係数は19～67%であった。 q_b は、セルロース混合エステル製精密ろ過膜に対して同様の解析を行い得られた値¹¹⁾ $-1.2 \times 10^{-3} \sim -3.0 \times 10^{-3}$ C/m² とほぼ同程度の値であった。これらの膜が示す負荷電の起源は主に細孔表面への陰イオンの吸着であると予測され、その荷電量を直接評価することは難しいため、 q_b の値の妥当性を確認するためには、表面に解離基を有する膜における測定やSPのpH依存性などのデータを蓄積して総合的に検討していく必要があると考えられる。

4.4 r_p と分画分子量の関係

SPの電気伝導度依存性の解析により得られた r_p の値と膜の分離性能との関係について検討するため、各限外ろ過膜におけるPEGの90%阻止率における分

Fig. 6 Relation between $2r_p$ and Stokes diameter of PEG corresponding to MWCO of UF membranes.

画分子量を求めた。Table 2に測定した分画分子量を示した。測定した分画分子量は、NMWCOよりも低い値を示したが、NMWCOが大きくなるにつれて大きくなる傾向が示された。詹らは、GPCで評価されるPEGの分子量は同一分子サイズの球形タンパク質分子よりも低く評価される傾向があり、分子量10 kDaの球形タンパク質の分子サイズは分子量約3 kDaのPEGに相当し、分子量500 kDaの球形タンパク質の分子サイズは分子量約50 kDaのPEGに相当すること²⁾、また、大矢らは、PEGを用いたGPC測定に基づく限外ろ過膜の分画分子量の測定では、90%の阻止率はNMWCOの約15～60%の範囲で得られること⁵⁾を報告している。本研究で用いた限外ろ過膜のカタログからはNMWCOは球形タンパク質の阻止率に基づく分画特性から求めたものと考えられるので、本研究でPEGより求めた分画分子量の傾向はこれら既往の研究の報告と一致した傾向を示しており、相対的な指標としては妥当性を有するものと考えられる。

PEGの分子量は分子サイズの指標であるストークス直径と関係づけることができる²⁾。Fig. 6に、SP法により求めた細孔径 $2r_p$ と分画分子量に相当する分子量のPEGのストークス直径の関係を示す。 $2r_p$ とストークス径は良好な直線関係を示すが、ストークス直径は $2r_p$ の約28%程度であることが分かる。ここで用いたストークス直径は分画分子量の測定に伴う誤差が含まれるので、 $2r_p$ と分画性能の関係は今後さまざまな膜および物質を用いて同様の解析を行い、データを蓄積し検討する必要がある。しかしながらこの結果は、SP法から求めた細孔径は限外ろ過膜の分画性能を直接反映していることを示しており、SP法により求めた細孔径がUF膜の分離性能の評価指標として使用できることを示している。

5. まとめ

NMWCOの異なる限外ろ過膜を用いてSPの電気伝導度(λ)依存性を測定した結果、 $\lambda > 1 \times 10^{-2}$ S/mの範囲では、同一の電気伝導度におけるSPの絶対値はNMWCOが小さくなるにつれて小さくなる傾向があった。 $\lambda > 1 \times 10^{-2}$ S/mの範囲の各UF膜におけるSP測定結果に式(1)～(4)を用いてカーブフィッティングを行い、膜の細孔径 $2r_p$ と表面荷電密度 q_p を求めた。求めた細孔径と膜の分画性能の関係を求めるため、各膜のPEG 90%阻止率を示す分画分子量を求めた。SPにより求めた細孔径と分画分子量に相当する分子量のPEGのストークス直径は比例関係を示し、SP法により求まる細孔径は限外ろ過膜の分画性能の評価指標として使用できることが分かった。また、同時に求まる q_p に関してはその妥当性について今後検討を続ける必要があると考えられる。

浄水プロセスや廃水処理プロセスなどで用いられている膜ろ過プロセスでは、膜は常に様々な被分離物質と接触し汚れた状態で使用されるのが普通であり、膜の細孔の状態も清浄な膜の状態とは大きく異なると予測される。SPはろ過中にも測定可能であり、中空糸精密ろ過膜による河川水の膜ろ過においてファウリングに伴うSPの変化が観察されている¹²⁾。予め q_p を求めることができれば、SPの電気伝導度依存性を測定しなくても、ろ過中に測定したSPの変化をファウリングに伴うろ過中の細孔径の変化として評価することができるため、SP法は、清浄な膜の評価法に加えて、 q_p の評価技術と組み合わせることによりろ過中の細孔径のモニタリング技術としても適応が可能であると考えられる。

文 献

- 1) 木村尚史, 中尾真一, 大矢晴彦, 仲川 勤: 「膜学実験シリーズ人工膜編」, pp.92-98, 共立出版 (1993)
- 2) 詹 高白, 中尾真一: 化学工学論文集, **19**, 1105-1112 (1993)
- 3) 柳下 宏, 中根 堯, 高津 晋, 若林勝彦, 吉留 浩: *Membrane*, **15**, 56-61 (1990)
- 4) 大矢晴彦, 橋本智佳子, 灰尾明仁, 根岸洋一, 松本幹治: *Membrane*, **14**, 88-97 (1989)
- 5) 大矢晴彦, 灰尾明仁, 根岸洋一, 松本幹治: *Membrane*, **15**, 62-71 (1990)
- 6) 大矢晴彦, 山中博之, 山浦 豊, 灰尾明仁, 根岸洋一, 松本幹治: *Membrane*, **15**, 203-209 (1990)
- 7) Platt S, Mauramo M, Butylina S, Nyström M: *Desalination*, **149**, 417-422 (2002)
- 8) Bowen W. Richard, Doneva Teodora A: *Surface and Interface Analysis*, **29**, 544-547 (2000)

9) Ren J, Li Z, Wong F-S : *J. Membr. Sci.*, **279**, 558-569 (2006)

10) 劉 惠元, 中村一穗, 松本幹治 : *Membrane*, **28**, 278-287 (2003)

11) Nakamura K, Liu H, Matsumoto K : *Membrane*, **29**, 180-187 (2004)

12) 中村一穗, 深田尚平, 高田綾子, 松本幹治 : 水道協会

雑誌, **75** (2), 2-14 (2006)

13) Newman JS : “Electrochemical System Second Edition”, Chap.9, Prentice Hall, New Jersey (1991)

(Received 28 July 2006 ;

Accepted 13 October 2006)

Nomenclature

c_i	:	Concentration of species ion the center line of pore	[mol m ⁻³]
E_{TM}	:	Electric potential difference across membrane	[V]
F	:	Faraday constant	[C mol ⁻¹]
P_{TM}	:	Pressure difference across membrane	[Pa]
q_p	:	Surface charge density	[C m ⁻²]
r_p	:	Pore radius	[m]
R	:	Ideal gas constant	[J mol ⁻¹ K ⁻¹]
SP	:	Streaming potential	[V Pa ⁻¹]
T	:	Absolute temperature	[K]
u_i	:	Mobility of species i	[m ² mol J ⁻¹ s ⁻¹]
z_i	:	Valence of species i	[-]
ε_0	:	Permittivity of free space	[F m ⁻¹]
ε_r	:	Relative dielectric constant of solution	[-]
κ^{-1}	:	Debye length	[m]
λ	:	Electric conductivity of bulk solution	[S m ⁻¹]
λ_{avg}	:	Average electric conductivity of solution in pore	[S m ⁻¹]
λ_{eff}	:	Effective electric conductivity of solution in pore	[S m ⁻¹]
λ_0	:	Electric conductivity of solution on the center line of pore	[S m ⁻¹]
μ	:	Viscosity of solution	[Pa S]