

海水から放射性セシウムを除去するための フェロシアン化金属微粒子担持吸着繊維での担持メカニズムの解明

齋藤 恭一

千葉大学大学院工学研究科共生応用化学専攻

概要 2011年3月11日に起きた東日本大震災に伴って、東京電力福島第一原子力発電所でメルトダウンが起きた。その後、Cs-137やSr-90といった放射性物質が放出され、その一部が河川、湖沼水、あるいは海水といった地表水に溶け込んだ。水中でセシウムはセシウムイオン Cs^+ の形態で溶存している。除染作業によって発生するCs-137を含んだ汚染水はタンクに貯留されている。水中に溶存するセシウムを除去するためのセシウム吸着材には、(1)極低濃度のセシウムイオンを吸着できること、(2)吸着材の取り扱いが容易であること、および(3)放射性セシウム吸着済み吸着材を減容できることが求められる。

本研究グループは、Cs の高速除去をめざし、放射線グラフト重合法を適用して、不溶性フェロシアン化コバルト微粒子 (Co-FC) 担持繊維を開発し、市販の吸着材と比較して、Cs を高速吸着できることを実証してきた。本研究では、Co-FC の繊維への担持の仕組みを解明した。不溶性フェロシアン化金属を担体へ担持する研究は多くあるが、その担持の仕組みを解明した研究はない。

Co-FC 担持繊維を3つの工程を経て作製した。まず、ナイロン繊維に放射線グラフト重合法を適用してアニオン交換繊維を作製した。つぎに、アニオン交換繊維を $K_4[Fe(CN)_6]$ 溶液、 $CoCl_2$ 溶液の順に浸漬し、Co-FC を担持させた。 $CoCl_2$ 溶液浸漬前後の Co を定量し、繊維に吸着していた $[Fe(CN)_6]^{4-}$ が Co-FC に転化した割合を算出した。また、走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型 X 線分析装置を使って、アニオン交換繊維、 $[Fe(CN)_6]^{4-}$ 吸着後の繊維、および Co-FC 担持繊維の繊維断面方向での Cl、Fe および Co 元素分布を測定した。

まず、 $[Fe(CN)_6]^{4-}$ はアニオン交換繊維内部まで吸着した。つぎに、繊維周縁部の $[Fe(CN)_6]^{4-}$ から Cl^- とイオン交換し、その $[Fe(CN)_6]^{4-}$ は Co^{2+} と沈殿反応を起こして繊維周縁部で Co-FC を形成した。さらに、繊維内部に吸着している $[Fe(CN)_6]^{4-}$ も Cl^- とイオン交換し、繊維内部ではなく、繊維周縁部で Co^{2+} と沈殿を形成した。初めに吸着していたすべての $[Fe(CN)_6]^{4-}$ が繊維周縁部に担持されることを明らかにした。

アニオン交換基をもつグラフト鎖を付与した繊維へ、不溶性フェロシアン化コバルトの微結晶が担持される仕組みを定量化できた。こうした成果は、不溶性フェロシアン化コバルト担持繊維のセシウム除去性能の向上や再現性の高い吸着作製法の確立に役立つ。

1. 緒言

2011年3月11日の東日本大震災に伴って、東京電力福島第一原子力発電所のメルトダウン事故が起きた。その後、Cs-137やSr-90といった放射性物質が放出され、その一部が河川、湖沼水、あるいは海水といった地表水に溶け込んだ。水中でセシウムはセシウムイオン Cs^+ の形態

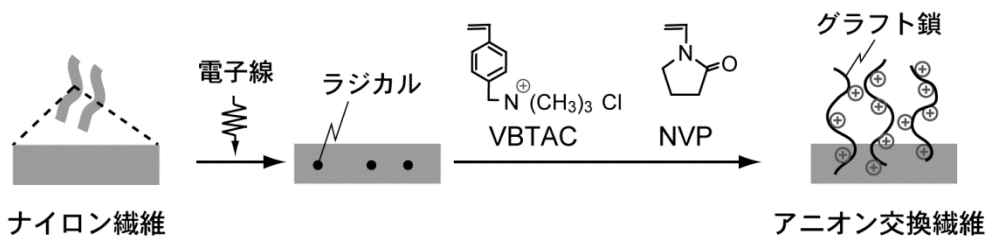
で溶存している。除染作業によって発生する Cs-137 を含んだ汚染水はタンクに貯留されている。水中に溶存するセシウムを除去するためのセシウム吸着材には、(1)極低濃度のセシウムイオンを吸着できること、(2)吸着材の取り扱いが容易であること、および(3)大量の放射性セシウム吸着済み吸着材を減容できることが求められる。

本研究グループは、さまざまな形状の吸着材に成型できるセシウム除去用繊維状吸着材を 2011 年に提案した¹⁾。6-ナイロン繊維を出発材料にして、放射線グラフト重合を適用し、セシウムを選択的に吸着する不溶性フェロシアン化コバルト²⁻⁶⁾を担持したセシウム除去用の吸着繊維を作製した。フェロシアン化コバルト担持繊維を、ワインドフィルタに成型してポンプを使って汚染水を流通させる、あるいは組み紐に成型して汚染水に投入して所定時間後にそれを容易に回収するなど自在に形を変えて使用できる。

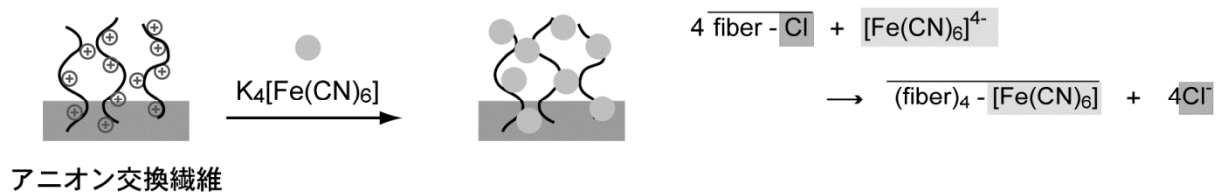
不溶性フェロシアン化コバルト担持繊維の作製経路を Fig. 1 に示す。アニオン交換基として第四級アンモニウム塩基を有するビニルモノマーをグラフト重合して、6-ナイロン繊維をアニオン交換繊維に変えた (Fig. 1(1))。つぎに、

フェロシアン化物イオン ($[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$) をアニオン交換繊維にイオン交換吸着させた後 (Fig. 1(2))、塩化コバルト (CoCl_2) との沈殿生成によって不溶性フェロシアン化コバルト ($\text{Co}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) を繊維に担持した (Fig. 1(3))。フェロシアン化コバルトの結晶は、体心立方構造で、格子内のコバルトイオンがセシウムイオンとイオン交換することによってセシウムイオンを除去できる。これまで、アニオン繊維への不溶性フェロシアン化コバルトの担持量や吸着繊維のセシウム除去速度を調べてきた^{7,8)}。しかしながら、不溶性フェロシアン化コバルトのアニオン繊維への担持の仕組みについては未解明である。他の担体への不溶性フェロシアン化物の担持の仕組みについて、先行研究にも言及はない。

(1) ナイロン繊維へのアニオン交換モノマーのグラフト重合反応



(2) アニオン交換繊維への $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ のイオン交換反応



(3) $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ と Co^{2+} とのフェロシアン化コバルト沈殿生成反応

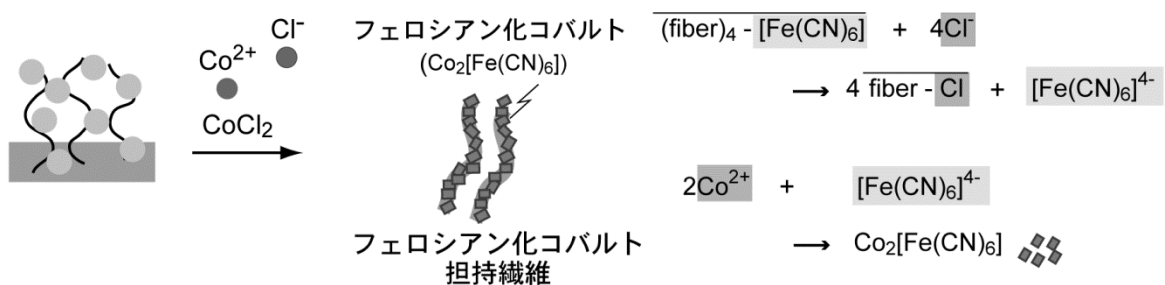


Fig. 1. フェロシアン化コバルト担持繊維の作製経路

不溶性フェロシアン化コバルト担持繊維のセシウム除去性能の向上のため、そして再現性の高い作製法の確立のため、不溶性フェロシアン化コバルトのアニオン交換繊維への担持の仕組みを解明することが必要である。本研究の目的は、アニオン交換基をもつグラフト鎖を付与した繊維へ、不溶性フェロシアン化コバルトの微結晶が担持される仕組みを定量的に明らかにすることである。

2. 実験

2.1 基材

基材として6-ナイロン製の繊維(平均直径 40 μm , 東レ(株)製)を用いた。放射線グラフト重合を適用し、ビニルベンジルトリメチルアンモニウムクロライド(VBTAC)およびN-ビニルピロリドン(NVP)を、6-ナイロン繊維に共グラフト重合した繊維(アニオン交換繊維)が、(株)環境浄化研究所から提供された。このアニオン交換繊維のグラフト率およびアニオン交換基密度は、それぞれ式(1)および(2)によって定義され、31%および0.61 mmol/gに設定した。

$$\text{グラフト率 [\%]} = 100(\text{グラフト鎖の重量}) / (\text{ナイロン繊維の重量}) \quad (1)$$

$$\text{アニオン交換基密度 [mmol/g]} = (\text{アニオン交換基のモル数}) / (\text{アニオン交換繊維の重量}) \quad (2)$$

2.2 フェロシアン化物イオンのアニオン交換繊維への吸着

アニオン交換繊維を1.4~14 mM $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 溶液に30分浸漬し、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ を吸着させた。得られた繊維を $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}(x)$ 吸着繊維と呼ぶ。xは $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 濃度である。誘導結合プラズマ発光分光分析装置(ICP-AES)を使って、残存溶液中のFeを定量し、Feの減少量からアニオン交換繊維への吸着した $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 量を算出した。アニオン交換繊維のアニオン交換基に対して吸着した $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ のモル比を、式(3)によって定義し、算出した。

$$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}\text{吸着モル比 [-]} = (\text{アニオン交換繊維へ吸着した}[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}\text{のモル数}) / (\text{アニオン交換繊維中のアニオン交換基のモル数}) \quad (3)$$

2.3 アニオン交換繊維への不溶化フェロシアン化コバルト担持

$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}(10)$ 吸着繊維を62.5~250 mM CoCl_2 溶液(Cl濃度125~500 mM)に浸漬した。フェロシアン化コバルト($\text{Co}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 以下、Co-FC)が生成し、繊維上に担持された。得られた繊維をCo-FC(x,y)担持繊維と呼ぶ。なお、yは CoCl_2 濃度である。ICP-AESを使って、繊維浸漬後の溶液中のFeを定量し、溶液中に $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ が溶出していないことを確認した。また、繊維浸漬後の溶液中のCoを定量した。 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ および Co^{2+} は、 $\text{Co}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ として沈殿生成するとし、Coの減少量からアニオン交換繊維に吸着していた $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ がCo-FCへ転換した量(転換 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 量)を算出した。ここで、アニオン交換繊維に吸着していた $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 量に対する、転換 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 量の比率を $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 転換率として式(4)によって定義し、算出した。また、Co-FC担持繊維に対するCo-FCの重量割合を担持率として式(5)によって定義し、算出した。

$$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}\text{転換率 [\%]} = 100(\text{Co}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6] \text{に転換した}[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}\text{のモル数}) / (\text{アニオン交換繊維へ吸着していた}[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}\text{のモル数}) \quad (4)$$

$$\text{担持率 [\%]} = 100(\text{Co-FCの重量}) / (\text{Co-FC担持繊維の重量}) \quad (5)$$

2.4 繊維断面の元素分布の測定

アニオン交換繊維、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}(10)$ 吸着繊維、およびCo-FC(10, 250)担持繊維を細かく裁断し、それぞれの繊維断面方向のCl、Fe、およびCo分布を走査型電子顕微鏡およびエネルギー分散分光器(SEM-EDS)を使って測定した。

2.5 繊維の含水率の測定

ナイロン繊維、アニオン交換繊維、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}(10)$ 吸着繊維、Co-FC(10, 250)担持繊維、および10 mM $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 溶液、500 mM KCl溶液の順に浸漬させた繊維(K-FC繊維)をそれぞれ純水に浸漬させた。アニオン交換繊維の乾燥重量(W_{dry})に対する各繊維の湿潤重量(W_{wet})の比率を、各繊維の含水率として式(6)に定義し算出した。また、ナイロン繊維の含水率を算出する場合は、乾燥重量に W_{dry} を用いず、ナイロン繊維の乾燥重量を用

いた。

$$\text{含水率 [\%]} = 100(W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}}) / W_{\text{dry}} \quad (6)$$

3. 結果

3.1 アニオン交換繊維へのフェロシアン化物イオンの吸着

アニオン交換繊維への $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 吸着モル比および $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 濃度の関係を Fig. 2 に示す。 $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 濃度の増加に伴い、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 吸着モル比は増加し、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 吸着モル比の最終値は 0.33 となった。 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ およびアニオン交換基は、1:3 で結合していることがわかった。 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 交換反応前後で溶液中の K^+ が減少していないことから、交換反応には H^+ が関与していると考えられる。

3.2 不溶性フェロシアン化コバルトの沈殿生成速度

$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 吸着後のアニオン交換繊維を各濃度の CoCl_2 溶液に浸漬したときの、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 転換率の経時変化を Fig. 3 に示す。 CoCl_2 62.5、125、および 250 mM (Cl 濃度 125、250、および 500) のとき、それぞれ 0.5、5 および 24 時間で $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 転換率はほぼ 100%となった。 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 転換率の増加速度は、 CoCl_2 濃度に依存した。しかしながら、最終的に $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 交換率は、 CoCl_2 濃度に依存せず、100%に達した。アニオン交換繊維に吸着していた $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ はすべて、 $\text{Co}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ へ転換できることがわかった。

作製した Co-FC(10, 250)担持繊維の担持率は 6.6%であった。アニオン交換繊維に吸着していた $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ がすべて Co-FC に転換し、繊維上に担持される場合、アニオン交換繊維に吸着していた $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 量から理論的に Co-FC 量を算出できる。その理論担持率は、6.8%である。担持率が理論担持率とほぼ一致し、重量変化率からもアニオン交換繊維に吸着していた $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ はすべて、 $\text{Co}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ へ転換したといえる。

3.3 繊維断面の元素分布

アニオン交換繊維、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ (10)吸着繊維、および Co-FC(10, 250)担持繊維の Cl、Fe、および Co 元素分布を Fig. 4 に示す。アニオン交換繊維には、アニオン交換繊維内部にまで Cl が分布していた。したがって、アニオン交換モノマーが繊維内部まで共グラフト重合していることが

わかった。また、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ (10)吸着繊維には、アニオン交換繊維内部にまで Fe が分布していた。2つの繊維の結果から、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ が Cl とイオン交換反応し、繊維内部にまで吸着していることがわかった。

Co-FC(10, 250)担持繊維断面方向の Cl、Fe、および Co 元素分布では、Fe および Co が繊維周縁部に存在し、Cl は繊維全体に存在した。したがって、アニオン交換繊維全体に吸着していた $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ は、 Co^{2+} と繊維周縁部

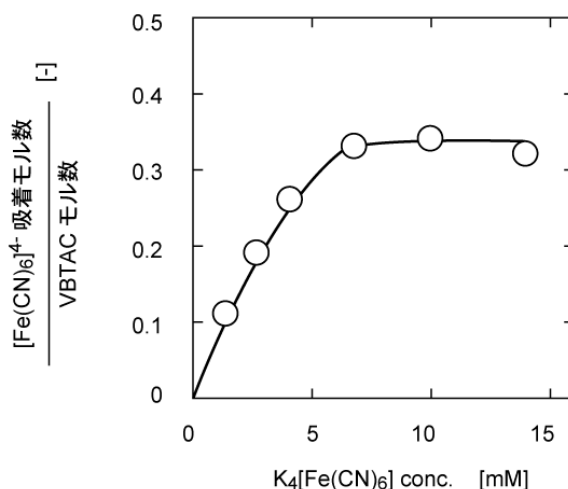


Fig. 2. $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 吸着モル比の $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 濃度依存性

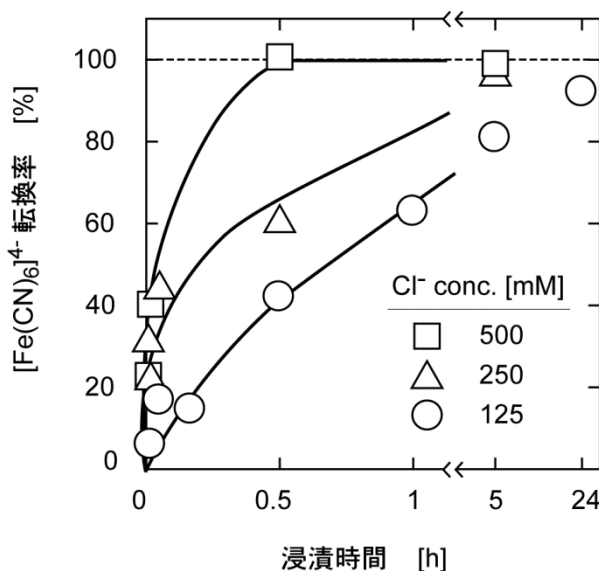


Fig. 3. アニオン交換繊維に吸着した $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ のフェロシアン化コバルトへの転換率の経時変化

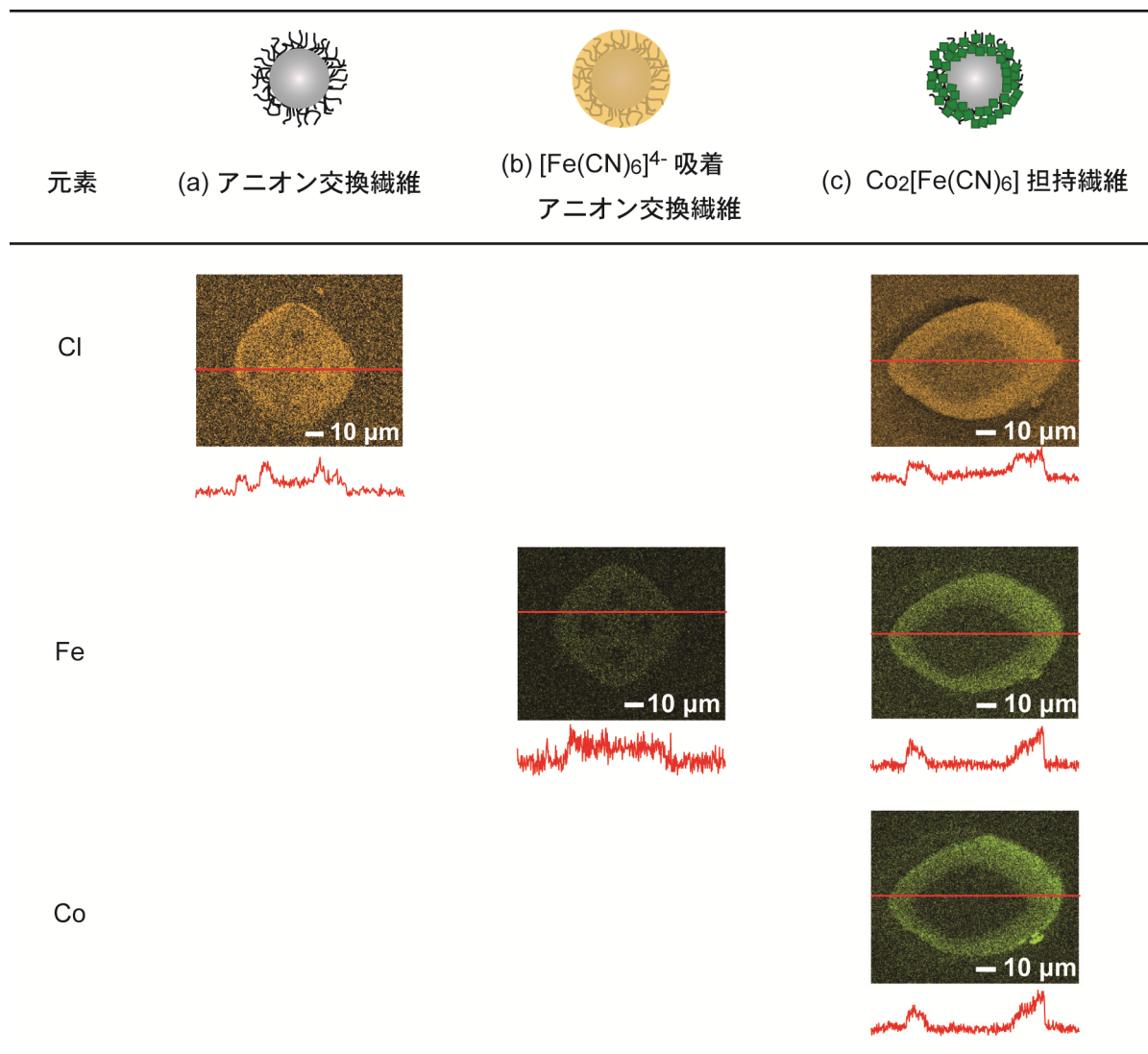


Fig. 4. さまざまな繊維断面方向での塩素, 鉄, およびコバルト元素分布

で沈殿生成反応し、担持されることがわかった。また、繊維内部のアニオン交換基に Cl が吸着することがわかった。

3. 4 繊維の含水率

さまざまな繊維の含水率を Fig. 5 に示す。含水率は、アニオン交換繊維、K-FC 繊維、Co-FC(10,250) 担持繊維、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ (10) 吸着繊維、およびナイロン繊維の順に低い値となった。したがって、ナイロン繊維に VBTAC および NVP を共グラフト重合すると含有できる水が増加することがわかった。K-FC 繊維には、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ および Cl が吸着している。アニオン交換基の対イオンを変化させると含水率が変化することがわかった。

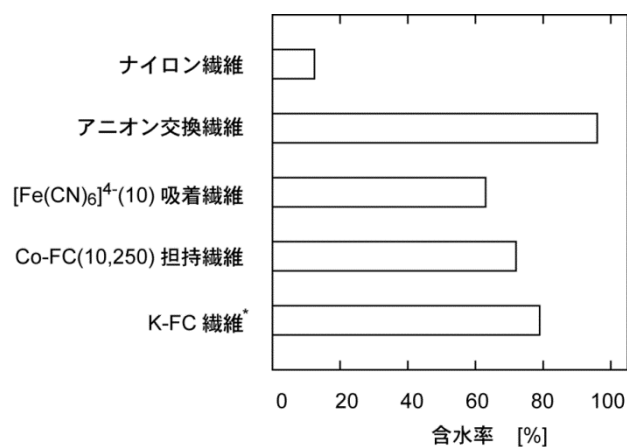


Fig. 5. さまざまな繊維の含水率の違い

*: $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ (10) 吸着繊維を KCl 500 mM, 浸漬時間 40 min

4. 考 察

4. 1 アニオン交換繊維へのフェロシアン化コバルト担持メカニズム

繊維断面方向から見た、Co-FC が繊維に担持されるまでの仕組みを Fig. 6 に示す。ナイロン繊維への共グラフト重合から、フェロシアン化コバルト担持までの流れを3段階に分け、以下に示す。

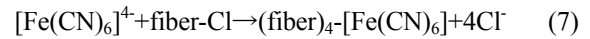
4. 1. 1 ナイロン繊維への共グラフト重合

ナイロン繊維に VBTAC および NVP を共グラフト重合すると、グラフト鎖は繊維内部まで付与される (Fig. 4)。また、アニオン交換繊維の含水率は、ナイロン繊維のそれと比較して高い値となった (Fig. 5)。これは、グラフト鎖付与によって、グラフト鎖のアニオン交換基の水和水が増加するためと考えられる。

4. 1. 2 アニオン交換繊維への $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 吸着

アニオン交換繊維を $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 溶液に浸漬すると、 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ はアニオン交換基に吸着している Cl^- とイオン

交換し、アニオン交換繊維内部まで均一に吸着する (Fig. 4) (式(7))。



$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ (10) 吸着繊維およびアニオン交換繊維の含水率から、アニオン交換繊維に $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ を吸着させると、アニオン交換基の対イオンが 1 価の Cl^- から 4 価の $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ に変化し、グラフト鎖が収縮していると考えられる。

4. 1. 3 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ および Co^{2+} との沈殿生成反応

CoCl_2 溶液に浸漬すると、まず液中の Cl^- が $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ とイオン交換反応し、アニオン交換基から放出される (式(8))。

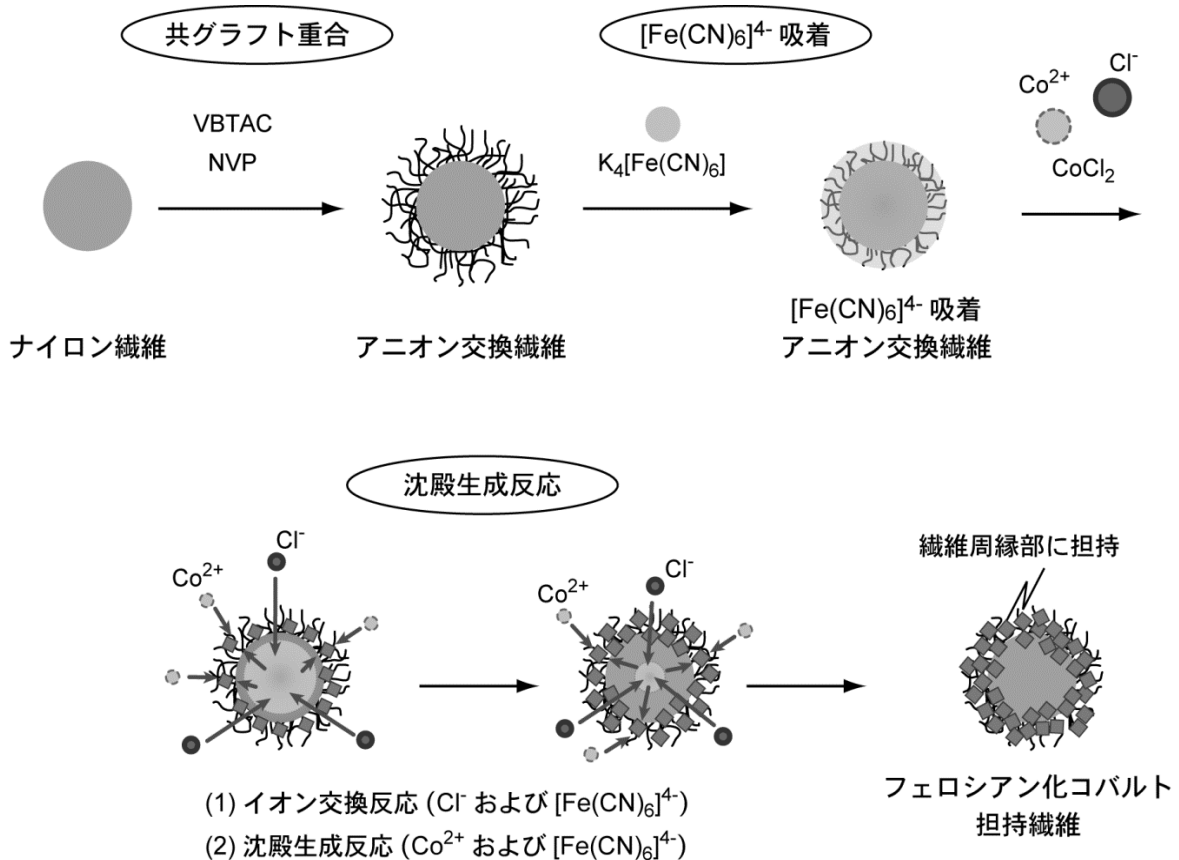
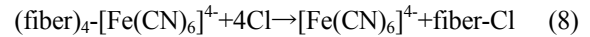
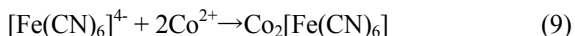


Fig. 6. アニオン交換繊維へのフェロシアン化コバルト担持メカニズム

放出された $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ は Co^{2+} と沈殿生成反応し(式(9))、生成したCo-FCは繊維周縁部に担持される。Co-FCの溶解度積($-\log K_{\text{so}}$)は14.7であり⁹⁾、沈殿生成しやすい。沈殿生成反応によって、溶液中の $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ 濃度が減少すると $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ および Cl^- とのイオン交換反応(式(8))が右へ進行し、さらにCo-FCが生成する。最終的に繊維に吸着していた $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ はすべて Co^{2+} と沈殿生成反応し、アニオン交換繊維の周縁部に担持される。



Co-FC(10, 250)担持繊維の、アニオン交換基に吸着していた $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ がCoとの沈殿生成反応に消費され、アニオン交換基の対イオンは Cl^- にかわるため、水和水が増加すると考えられる。しかしながら、Co-FC担持繊維はもとのアニオン交換繊維と含水率は一致しなかった(Fig. 5)。これは、生成されたCo-FCがグラフト鎖の膨潤を妨げていると考えられる。

4.2 グラフト鎖およびCo-FCとの相互作用

Co-FCがアニオン交換繊維に担持できる理由を考察する。アニオン交換繊維およびCo-FC担持繊維の含水率の変化から、Co-FCは、グラフト鎖を巻き込みながら沈殿生成すると考えられる。また、Co-FCのゼータ電位は-3.4

mVであり¹⁰⁾、アニオン交換繊維(VBTAC:NVP = 90:10)のゼータ電位は+63.2 mVである¹¹⁾。Co-FCは巻き込みに加え、アニオン交換繊維と静電相互作用によって吸着していると考えられる(Fig. 7)。

5. 結言

水中からセシウムイオンを除去するための吸着材として、放射線グラフト重合法を適用して、フェロシアン化コバルト担持繊維を作製してきた。本研究では、アニオン交換基をもつグラフト鎖へのフェロシアン化コバルトの担持の仕組みを明らかにした。次の結論を得た。

- (1) フェロシアン化イオンは、アニオン交換繊維の断面方向に均一に、第四級アンモニウム塩基に対してモル比1:3で吸着した。
- (2) 塩化コバルトと塩化カリウムの水溶液に、フェロシアン化物イオンを吸着して繊維を浸漬し比較したところ、塩化カリウムでは吸着していたフェロシアン化物イオンの一部が塩素イオンによってイオン交換されたのに対して、塩化コバルトではフェロシアン化物イオンが塩素イオンによって追い出されて、コバルトイオンとの沈殿生成に消費された。
- (3) 液中に漏れ出すことなく、繊維の外周縁部に担持された。担持率は6.6%であった。

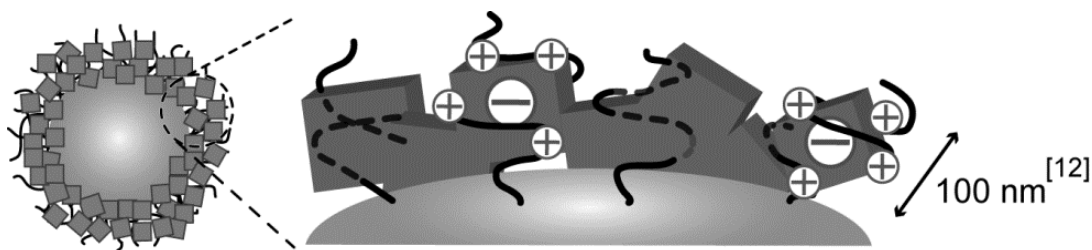


Fig. 7. フェロシアン化コバルト微粒子担持イメージ

引用文献

- [1] R. Ishihara, K. Fujiwara, T. Harayama, Y. Okamura, S. Uchiyama, M. Sugiyama, T. Someya, W. Amakai, S. Umino, T. Ono, A. Nide, Y. Hirayama, T. Baba, T. Kojima, D. Umeno, K. Saito, S. Asai, and T. Sugo, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48**, 1281-1284(2011).
- [2] H. Mimura, J. Lehto, and R. Harjula, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **34**, 484-489(1997). [3] 谷原紘一, 日本化学会誌, **9**, 835-841(1996).
- [4] J. Lehto, A. Paajanen, and R. Harjula, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Letters*, **164**, 39-46(1992).
- [5] W. E. Prout, E. R. Russell, and H. J. Groh, *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **27**, 473-479(1965).
- [6] V. V. Milyutin, V. M. Gelis, V. G. Klindukhov, and A. V. Obruchikov, *Radiochem.*, **46**, 479-480(2004).
- [7] Y. Okamura, K. Fujiwara, N. Iijima, T. Syoda, K. Suzuki, T. Sugo, T. Shimidu, R. Itagaki, A. Takahashi, T. Ono, T. Kikuchi, T. Someya, R. Ishihara, T. Kojima, D. Umeno, K. Saito, *J. Ion Exchange*, **24**, 8-13(2013).
- [8] Y. Hirayama, Y. Okamura, K. Fujiwara, T. Sugo, D. Umeno, K. Saito, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **39**, 28-32(2013).
- [9] L. G. Silen, Stability constants of metal-ion complexes, The Chemical Society, London, UK, 101-102(1964).
- [10] V. Avramenko, S. Bratskaya, V. Zheleznov, I. Sheveleva, O. Voitenko, and V. Sergienko, *J. Hazard. Mater.*, **186**, 1343-1350(2011).
- [11] 株式会社荏原製作所, 花粉吸着材, 特開 2004-204401(2004).

Impregnation of Insoluble Cobalt Ferrocyanide onto Anion-Exchange Graft Chain Appended to Nylon Fiber

Kyoichi Saito

Chiba University

Summary

Radioactive substances such as cesium-137 and strontium-90 were released to the environment by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant of TEPCO, which was damaged by the East Japan Earthquake with a magnitude of 9.0. Some of the cesium-137 and strontium-90 were transported into the surface water such as rivers, lakes, and seawater, to be dissolved as Cs^+ or Sr^{2+} at extremely low concentrations. Water contaminated with radioactive cesium ions, which is being produced during the decontamination operation, is currently stored temporarily in tanks.

The mechanism of the impregnation of insoluble cobalt ferrocyanide onto an anion-exchange fiber was clarified. Vinyl benzyl trimethylammonium chloride and *N*-vinyl pyrrolidone were cografter-polymerized onto a 6-nylon fiber with an average diameter of 40 μm to obtain an anion-exchange group density of 0.61 mmol/g. Ferrocyanide ions were adsorbed onto the anion-exchange fiber uniformly across the fiber. Subsequently, by immersing the fiber into cobalt chloride solution, ferrocyanide ions were quantitatively repelled by chloride ions to form a precipitate of cobalt ferrocyanide at the periphery of the fiber. No leakage of this precipitate to the external solution was detected. The impregnation percentage, defined as the mass content of the precipitate in the anion-exchange fiber, was 6.6%.