解 説

J. Jpn. Soc. Colour Mater., 82 [1], 9-15 (2009)

高分子プロセッシングにおける電子ビームの応用

貴家恒男^{*,†}

1. はじめに

1895年にW. C. レントゲンがX線を発見し、透過性が高いことおよび腫瘍等の治療効果があることが注目され、すぐに診断や治療への応用が始まった。さらにベックレルの γ 線の発見、キュリー夫妻のラジウムの単独分離の成功が続ぎ、放射線を生活に積極的に役立てるための基盤が整った。

放射性同位元素 (RI) 製造技術とその利用技術の進展とともに、X線や γ 線のもつ透過性は計測・分析・診断の分野で高度に利用されている。一方、治療効果は、放射線の電離・励起作用に起因していることが明らかにされ、腫瘍治療の高度化のみならず、その非熱的作用を用いて新しい材料の創製・加工技術、農業、環境保全技術などの研究開発が進展し、新産業の創生を促している。近年、電子加速装置の高性能化が進み材料の創製・加工用放射線源としての地歩を固めている。本稿では、放射線架橋反応を応用した高分子加工について概説する。

2. 放射線の種類と特徴

放射線は電磁波放射線と粒子放射線に大別される。電磁波放射線は γ 線やX線で、波長の極端に短い光（電磁波）である。RIから発生する場合を γ 線と呼び、高エネルギー電子を重い元素に衝突させることなどにより発生させる場合をX線と呼んでいる。どちらも透過力が大きく、 γ 線は工業利用に、X線は診断に用いられることが多い。

表-1 放射線利用における γ 線と電子線の特徴

	Co-60 γ 線	電 子 線
透過力	大；200 mmの水を通過すると半減	小；1 MeVの電子の飛程は水中約4 mm
線量率	最大で10 kGy/h	10 kGy/sも工業的に可能
用 途	滅殺菌，グラフト重合，材料改質	材料改質，グラフト重合，薄物の滅殺菌
その他	線量率の管理が必要，廃棄が困難	スイッチoffで放射線ストップ

受付日：2008年10月2日 受理日：2008年10月9日

Application of Electron Beam on Polymer Processing

Tsuneo SASUGA ^{*,†}

^{*}NHV コーポレーション

前橋市総社町2121 (〒371-8515)

[†]Corresponding Author, E-mail : sasuga.t@nifty.ne.jp

粒子放射線は高速の電子・陽電子、高速の水素イオン・ヘリウムイオン、さらに重い原子のイオンである。また、電荷をもたない高速の中性子も分子を励起したりイオン化したりするので粒子放射線の仲間である。これらは電磁波放射線に比べて透過力は小さい。放射線の工業利用に使われるのはおもにCo⁶⁰ γ 線と電子線で、用途に合わせて使い分けている。両者の特徴を表-1に示す。

3. 電子線と γ 線の電離・励起作用¹⁾

電子線および γ 線の物質との相互作用を図-1に概念的にまとめた。

高エネルギーの電子が物質中を通過するときのエネルギー損失は原子核との相互作用と媒体分子の核外電子とのクーロン力を介した非弾性散乱による。両者の割合は電子のエネルギー(E；MeV単位)と媒質の原子番号(Z)に依存し、電子のエネルギーが1 MeV程度のときは、原子核との相互作用の割合はEZ/800程度である。したがって、炭素や水素などの軽元素で構成されている有機化合物では原子核との相互作用は無視でき、エネルギー損失は核外電子とのクーロン相互作用がほとんどである。この相互作用によりエネルギーの高い二次電子を発生さ

図-1 γ 線および電子線と物質との相互作用の概念

〔氏名〕 さすが つねお
〔現職〕 ㈱NHV コーポレーション 技術顧問
〔趣味〕 写真撮影、模型工作
〔経歴〕 1966年東京理科大学理学部応用化学科卒業。1966年日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）入所。1978年理学博士号取得。1998年退職、(財)放射線利用振興協会。2002年から現職。

せ、これが媒体分子をイオン化したり電子励起させたりする。

γ 線が物質を通過するときには、Compton 散乱、電子対生成、光電効果と呼ばれる過程で多数のエネルギーの高い二次電子を発生させる。この二次電子は高速の電子と同様に、周りの分子をイオン化したり、励起したりして反応活性種を生成させる。ごく初期の過程は異なるが、 γ 線的作用も高エネルギーの電子の作用にはかならない。

放射線が物質中を通過すると、その飛跡に沿って次々にイオン対を作るが、この直接作用によるイオン化（一次イオン化）の全イオン化に占める割合は少なく、一次イオン化で放出された二次電子によるイオン化が大半を占める。この二次電子の作用により、一次イオン化によって生成したイオン対に近接して数個のイオン対ができる。このようなイオン対の集落をスーパーあるいはスプールと呼んでいる。

このように、電子線と γ 線のごく初期の過程は異なるが、その後の過程は両者で同じである。放射線エネルギーの吸収の程度（吸収線量）が同じであれば、細部は異なるが、ほぼ同じ効果を物質に与えると考えてよい。 γ 線照射で得られた結果を電子線照射に置き換えて工業的に応用した例は多い。

4. 放射線照射で誘起される初期のイベント

金属や無機物質では、それを構成する原子がどんな結晶を作っているかにより物性が決定される。放射線照射を受けると結晶格子にある原子が弾き飛ばされ、結晶欠陥が生じる。欠陥が少ないときには、機械特性などの巨視的な性質は変化しない。欠陥がある閾値を超えると、物性に影響を与えるようになるが、放射線には安定な材料である。

有機材料は炭素、酸素、水素などの軽元素が共有結合で結びついており、そのつながり方により物性が支配されている。この結合は放射線に敏感に反応してイオンやラジカルなどの反応活性種が生成し、図-2に示すようないろいろな反応が起こる。

放射線化学の黎明期には、ベンゼンなどの連鎖的酸化反応によるフェノールの合成、低分子化合物のハロゲン化反応、エチレンその他の重合反応が研究されたが、これら一次製品の製造には、触媒法に比べて照射施設の建設・維持管理などに費用が嵩み、経済的メリットが少ない場合が多かった。今日では、温度などの環境因子に左右されることが少ない放射線化学反応の特徴を利用した高分子材料の放射線加工が産業として定着している。

図-2 初期過程に続くおもな反応

5. 架橋型と崩壊型

放射線照射により誘起される反応のうち分子鎖切断と架橋が種々の物性に影響を及ぼす。古くから、架橋が優先的に起こる架橋型高分子と、主鎖切断が優先的に起こる崩壊型（切断型）高分子の分類がなされている。代表例を表-2に示す。

架橋型か、崩壊型かは分子構造に依存する。一例として、図-3に示すような架橋／崩壊と分子構造との経験的な関係が得られている²⁾。

α 位の炭素に1個のメチル基をもつポリプロピレンは架橋型に分類されるが、2個のメチル基をもっているポリイソブチレンは主鎖切断が優先して起こる。ポリアクリレートは架橋型であるが、 α 位にメチル基をもつポリメタクリレートは切断型である。このように置換基がついた炭素原子の電子状態に支配され架橋／切断の確率が変化する。

ポリエチレンは架橋が優先的に起こるが、水素をすべてのフッ素に置き換えたポリテトラフルオロエチレン（PTFE）は切断だけが起こる。プロピレンと四フッ化エチレンの交互共重合体は架橋型であることを考えると、C-HとC-Fの電子状態の違いだ

表-2 代表的な架橋型／崩壊型高分子

架橋型高分子	崩壊（切断）型高分子
ポリエチレン	ポリテトラフルオロエチレン
ポリスチレン	ポリ α メチルスチレン
ポリプロピレン	ポリイソブチレン
ポリフッ化ビニリデン	ポリアクリロアミド
ポリメチルアクリレート	ポリメチルアメタクリレート
ポリ塩化ビニル	ポリカーボネート
ポリブタジエン	ポリオキシメチレン
天然ゴム	ポリアラニン
ビニルアルコール	セルロース
ポリアミド	DNA

図-3 架橋型と切断型の高分子の典型的な分子構造例

けではなく、大きなフッ素原子をもつPTFE分子鎖の撓み難さも架橋／切断の確率に大きな効果を及ぼしていることがわかる。分子構造を知れば、これらの知見の蓄積に基づき、架橋が優先して起こるか切断が優先的に起こるかを類推することができる。

6. 放射線分解を用いた工業化

高分子の高分子らしさは、分子量がきわめて大きいことによるところが大きい。そのため放射線分解（切断）が起こると低分子量化することになり、改質という面ではあまり歓迎されない。しかし、分子量が大きすぎて成型し難い、あるいは溶媒に溶け難い高分子を低分子量化して成型しやすくしたり、可溶化したりするのは有効である。

甲殻類・海藻由来のキトサンやアルギン酸などの天然の多糖類は容易に放射線分解され、低分子量化される。低分子量化されたこれら多糖類の水溶液は植物の生育促進効果、抗菌性があることが明らかにされている³⁾。変わったところでは、放射線照射で絹糸の分子切断・低分子量化して粉碎しやすくして、それを種々の添加剤に用いる検討もされている³⁾。その他、ガラス転移温度近傍で数kGy照射すると、ポリカーボネートの表面硬度が改善されるという報告もある⁴⁾。

放射線分解を利用した工業化の例は多くはないが、PTFE（テフロン）の微粉末化が典型的な例である。PTFEは融解温度以上でも流動せず、製品は特殊な方法で成形し焼き固めた（焼成）ロッドや角材から削りだして作っている。削り屑や使用後の製品などの廃テフロンは再成形できないので、ごみとして処分されていた。テフロンは比較的低線量の放射線照射で分解し低分子量化し微結晶が沢山できる。その結果、硬く・脆くなり粉碎しやすくなるので、微粉末化することができる。微粉末化されても、自己潤滑性や耐薬品性は保存されているので、固体潤滑剤やエンジニアリングプラスチック等の摩耗を大幅に低下させる添加剤（図-4）、インクジェットプリンタインクの添加剤などに使用されている⁵⁾。

7. 放射線架橋を用いた工業化

7.1 各種ポリエチレンの放射線架橋

典型的な架橋型高分子であるポリエチレンは最も単純な繰返し単位をもっているが、重合条件を変えることで分子量や分岐構造を変化させることができ、多様な分子構造（一次構造）の重合体を合成できる。一次構造の違いは溶融成型過程に影響を及ぼし、固体構造とそれに支配されるマクロな物性を変化させる。

分子構造が異なるポリエチレンを同じ条件で照射し、同じ条件で照射効果を評価した結果が報告されている⁶⁾。得られた結果は、高分子の放射線架橋の基本的な特質を示すものと思われる。表-3に示す特性のポリエチレンのインフレーションフィルム試料（厚さ約100 μm）に対して、放射線酸化が起こらないγ線照射（窒素気流中、線量率8 kGy/h）を行い、ゲル分率の測定、引張り試験、DSCを用いた熱分析を行った。なお、酸化防止剤などの添加物は含まれていない。

7.1.1 分子構造と架橋効率

図-5に試料A, B, D, E, Fについてのゲル分率の線量依存性

図-4 耐摩擦剤として微粉末テフロンを添加した部品の例

表-3 実験に使用したポリエチレンフィルムの特長

名称	種別・重合法	粘度平均 分子量	密度 g/cc	融解熱 J/g	結晶化度* %
A	超高分子量	2×10^6	0.935	151.9	53.0
B	高密度（チグラ法）	1×10^5	0.954	166.8	58.2
C	同上	2×10^5	0.956	177.6	61.9
D	高圧法低密度	4×10^4	0.923	98.9	36.0
E	ブテン1との共重合	1×10^5	0.923	87.6	30.6
F	4メチルペンテンと共重合	8×10^4	0.922	82.6	28.8

*：融解熱量から計算（結晶化度100%＝286.8 J/g）

図-5 試料A, B, D, E, Fについてのゲル分率と膨潤率の線量依存性

を示す。試料BとEについては膨潤率の線量依存性も併記した。超高分子量ポリエチレン（UHMWPE）Aと密度がほぼ同程度で分子量が小さいDおよびFを比べると、分子量が大きいほど低い線量で高いゲル分率に到達する。これは初期の分子量が大きければ、架橋点がわずかに生成するだけで巨大分子になり、溶解しにくくなるためである。

高密度ポリエチレン（HDPE）Bと低密度ポリエチレン（LDPE）Eの比較から、分子量が同じであれば密度が小さいほど（結晶化度が低いほど）ゲル化しやすいことがわかる。結晶に組み込まれた分子鎖にラジカルができて、結晶領域では分子鎖の運動が束縛されているので、架橋に関与しにくいと考えられている。

架橋密度の指標である膨潤率の線量依存性は、試料BとEとではほぼ同等とみなせる。このことは、橋架けて溶媒に溶けなくなった部分での架橋密度は両者で同じであることを意味する。非品の少ないHDPEではLDPEに比べて、架橋部分と未架

図-6 非酸化系照射におけるLDPE試料Dの照射によるS-S曲線の変化

図-7 非酸化系照射におけるヤング率と降伏点強度の線量依存性

橋部分の分布が多少まばらになっていることが示唆され、後述するように機械的特性の変化にも影響を与える。

7.1.2 機械的特性変化

図-6に、窒素気流中で照射したLDPE試料Dを200 mm/minという比較的速い引張り速度で試験したときの伸度－ロード曲線(S-S曲線)の変化を示す。未照射試料は降伏点を過ぎるとネッキングしながら伸び続け、伸度700%程度で破断する。これに対して、照射試料では線量が高くなるにつれて降伏後のロードが大きくなり、引き延ばすには大きな力が必要になることがわかる。他方、破断までの伸びは線量とともに小さくなる。

図-6は代表的な例であって、ネッキングして伸びる結晶性高分子でも、そうでない非晶性高分子でも、放射線架橋が起こると、降伏点を越えた領域で強度が大きくなり、破断伸びが小さくなるのが一般的である。

図-7にUHMWPEを除いた試料のヤング率と降伏点強度の線量依存性を示す。HDPE試料BとCではヤング率および降伏点強度は線量とともにやや大きくなるが、その増分はヤング率で4%、降伏点強度で10%程度である。LDPEでは高圧法(D)であっても共重合型(E, F)であっても弾性限界内での引張り特性は照射によりほとんど変わっていない。

HDPEとLDPEにおける放射線照射による力学特性変化の違いは非晶の量によると考えられる。LDPEでは“領域”と呼ばれるよい非晶域が存在する。そのため非晶域に架橋点が生じても、応力に応じて変形できる。これに対して、HDPEでは結晶界面に存在するタイチェーンやヘアチェーンが非晶を形成し

図-8 試料B, C, D, E, Fの破断強度と破断伸びの線量依存性

ているので、ここに架橋が生成すると結晶と結晶が動きにくくなり、変形するのに余分な力が必要になるのでヤング率と降伏点強度が増大すると考えられる。

われわれが、高分子材料をフィルムや成型品として利用するときには、ゴム系の材料を除き弾性限界内の機械的特性を使っている。図-7の結果だけを見ると、ポリエチレンを放射線架橋しても、室温での実用特性が格段に改善されるわけではないと言えそうである。そうであれば、室温での機械特性に対して放射線架橋はそれほどメリットがないになってしまう。S-S曲線の囲む面積は破断までに消費されるエネルギーに対応する。図-6の結果は、架橋が生成すると引き延ばすのに大きな力がかかるようになることを示しており、弾性限界を超える大きな力がかかってもガラガラと伸びないでもちこたえられることを意味する。これは、“LDPEを放射線架橋してもHDPEにはならないが、弾性限界を超える応力がかかってもそれを受け止めるタフな材料に変身する”と言い換えることができる。

大きな力が加わったときにどこまで耐えられるかも高分子を利用するうえで重要な要素である。破断強度と破断伸びの線量依存性を図-8に示す。

LDPE試料D, E, Fの破断強度は800～1000 kGyの照射でHDPEのそれに匹敵するまで大きくなり、その後低下する。高線量域での強度の低下は、ピークを与える線量を境に主鎖切断がおもに起こるようになるなど機構が変化することを意味するのではない。架橋密度が大きくなると応力に対する応答速度が遅くなり、応力集中による破断が起りやすくなる。そのため、見かけ上破断強度が低下したと解釈できる。

HDPE試料B, Cの破断強度はいったん低下した後増大する傾向を示す。これも非晶の量と質がLDPEと違うことによるものである。破断伸びはLDPEでもHDPEでも線量に対して単調に低下するが、HDPEのほうが線量に対する低下の度合いが大きい。

主鎖切断が起きても、架橋が起きても、破断伸びは線量とともに単調に低下するのが一般的である。そのため、放射線環境で使用される高分子材料の耐放射線性の尺度として、破断伸びがある閾値に到達する線量、たとえば伸びが半分になる線量、が採用されることが多い。ちなみに、伸び半減線量は、HDPEで約250～310 kGy、共重合のLEDPでは約600～800 kGyである。この尺度に基づけば、放射線酸化が起らない条件での耐放射線性はLEDPのほうが高いということになる。

図-9 HDPEの未照射と758 kGy照射試料のDSCサーモグラム

図-10 いったん融解し、16℃/minで冷却した後再測定した結果

図-11 結晶性高分子の性質に及ぼす架橋の効果

7.1.3 照射後の熱履歴による物性変化⁷⁾

化学架橋と放射線架橋における最大の相違点は、架橋温度にある。過酸化物質架橋でもシラン架橋でも高温で反応を行わせる必要があるため、ポリエチレンなどの結晶性ポリマーでは融点以上で架橋が進行する。したがって、架橋終了後室温に戻るときの再結晶化過程は架橋点の影響を免れることができない。そのため、架橋前の結晶性・結晶化度とは違った製品となる。これに対して、放射線架橋は室温あるいはそれよりも少し高い温度で行われるのが普通であり、照射前の結晶性・結晶化度と大きく変わらない製品となる。

図-9にHDPEの未照射試料および758 kGyと大線量照射した試料のDSCサーモグラムを示す。両者のピーク温度および熱量にまったく変化がないとみなせる。

照射のみでは結晶部分に存在する分子鎖の架橋や切断はほとんど起こらないので、照射だけでは結晶性や結晶化度の変化はほとんど起きていないためである。

しかし、いったん融解した後、冷却し再結晶化をさせると図-10に示すように融点と融解熱量の低下などの熱的な変化が起こる。これは、再結晶化過程で非晶部分にできた架橋点が生じた結果である。

この現象はほとんどの結晶性高分子に見られるものであり、放射線架橋した製品が融点に近いあるいはそれを越えた熱履歴を受けると、結晶構造が変わり、その結果初期とは違った物性の材料になることを意味している。照射後融解までの熱履歴を受けた材料の機械特性の変化についての報告を見つけないことができなかったが、使用環境によってはあらかじめ熱処理する必要があるのかもしれない。

7.2 架橋を用いた工業化

7.2.1 架橋による物性改善の概念

これまでのポリエチレンの結果を踏まえて、放射線架橋によって結晶性高分子の機械的・熱的性質がどう変わるかを概念的に図-11に示す。

縦軸の特性値とは弾性率、降伏点強度、破断強度などである。架橋が起こるとガラス転移温度は数度上がるが、結晶の融解温度はほとんど変わらない。融解温度を超えると、未架橋物では液状になり流動してしまうが、架橋物では融解した後も架橋点が邪魔をして分子鎖の流動を抑える。そのため変形流動を受けず、ある程度の力学的特性を維持しているので、実使用温度を高めることができる。

右側の図は、照射後いったん融解してそれを冷やして再結晶化させた状態を示す。架橋点が再結晶化を妨げるので、再結晶化過程が阻害され結晶の融解温度は下がってしまう。前述したように、酸化物質架橋にしてもシラン架橋にしても、融点直下あるいはそれ以上で架橋反応を起こさせるので、架橋終了時には実線で書いた状態になっている。放射線架橋物の実使用に当たって注意すべき点である。

7.2.2 放射線架橋助剤

放射線照射により架橋のみ、あるいは切断のみが起こる高分子は少ない。架橋型高分子に分類されていても架橋と同時に切断も起こるのが一般的である。放射線架橋の効率を上げ、分子鎖切断やガス発生などほかの副反応を抑える目的で、1分子中に2個以上のビニル基など反応性基をもつ多官能性モノマー(PFM)が架橋促進剤(助剤)として使用される⁸⁾。代表的なPFMとしてトリメチロールプロパントリメタクリレート

図-12 放射線架橋電線の例

図-14 熱収縮チューブの例

図-13 自動車の断熱材の発泡PPが使われている

(TMPTMA), トリメチロールプロパントリアクリレート (TMPTA), トリアリルイソシアヌレート (TAIC) などがある。

PFMによる促進機構については、高分子鎖に生成したラジカルにPFMの二重結合が反応し、まだ残っている二重結合を通しての橋かけが起これと考えられている⁹⁾。単純な放射線架橋であれば、C-C結合で橋架けするが、架橋助剤を用いた場合には架橋点間に異種分子が入ることになる。そのため、架橋後の耐熱性が架橋助剤の耐熱性に支配されてしまうこともある。実使用に当たっては注意すべき点であろう。

7.2.3 放射線架橋の実用化例

以下に工業的に実用化されている例および実用化が期待されている例を示す。

①電線材料の架橋¹⁰⁾

ポリエチレンの融点は110～125℃程度であり、ポリエチレン被覆電線をハンダ付けしようとするとき被覆がめくれあがってしまう。架橋して三次元構造をもち込むと、流動性が抑えられるので、作業性が格段に向上する。同時に使用上限温度が上昇するので、高信頼化が実現でき、自動車用、電子機器用の電線ケーブルには放射線架橋電線が使用されている(図-12)。同じ原理を用いてハンダ耐リフロー性材料の開発も行われている。

②発泡プラスチックの製造¹¹⁾(図-13)

断熱材・梱包材料として欠くことのできない発泡高分子材料は、熔融したときの粘度をいかに制御できるかが、泡の大きさ・均一性の善し悪しを決定する要因となる。熔融物の粘度が低いと、せっかく発生したガスが逃げってしまうので、成型時に架橋剤を混合し化学架橋する方法も採られている。この方法では、発泡剤と架橋剤の分解温度をうまく選ぶ必要がある。そのため、限られた材料にしか適用することができず、熔融粘度のきわめて低いポリエチレンやポリプロピレンの発泡材料を作ることができなかった。放射線を用いて架橋を行えば、少なくとも架橋温度に関しては問題がクリアされ、均一な発泡に適し

た分解温度をもつ発泡剤を選択すれば問題は解決される。

③熱伸縮チューブの製造¹²⁾(図-14)

元来、高分子材料には記憶効果(メモリエフェクト)と呼ばれる現象がある。放射線架橋によりこの効果を大きくし、熱伸縮チューブが製造されている。高分子をある形状に成型して放射線架橋する。これを融解温度あるいはガラス転移温度以上で再加熱し、別の形状に再成形し冷却する。こうしてできたチューブを電線やパイプにかぶせ、加熱すると記憶効果のために元の形に戻ろうとして、電線やパイプに密着した絶縁膜や保護膜を形成させることができる。大口径/肉厚の製品は石油パイプラインの保護にも使用される。

袋状で架橋し膨らませたものは精肉の密封包装材に、シート状で架橋したものはテープとして種々の配管の保護用途にも使われる。

④ラジアルタイヤ¹³⁾

タイヤを構成する生ゴム部材を軽く放射線架橋をしておくと、ベタつきが低減したり、応力を受けても変形し難いなど取り扱いしやすくなるため、寸法安定性の向上や材料のロスの低減につながる。タイヤ製造工程に電子線照射を取り入れ、予備架橋した生ゴムを使ってタイヤの形態に組み上げた後、硫黄加硫して製品としている。放射線架橋と加硫架橋の特徴を上手く組み合わせた方法である。

⑤ハイドロゲル¹⁴⁾

放射線法でポリビニルアルコールなどの水溶性高分子を架橋したハイドロゲルは大量の水を吸収する。これをやけどなどの皮膚創傷を保護するフィルムとして用いると治癒の促進を図ることができる。医療現場で使用されている。

デンプンは放射線分解するが、カルボキシメチルでんぷんの濃厚水溶液は放射線架橋・ゲル化する。これを用いた床ずれ防止マットが実用化されている。

8. 架橋・切断以外の放射線の応用

本稿では放射線架橋を主軸に解説してきた。グラフト重合や放射線キュアリングも放射線の重要な応用分野であるが紙面の関係で簡単に触れておくに留める。

既存の高分子に放射線照射によりラジカルを生成させ、これを起点にビニルモノマーを重合させる方法がグラフト重合である。初期にはポリ塩化ビニルの低温特性の改善・耐衝撃性の付与やポリエチレンの挫屈強度を上げることなど機械的・熱的特性の改質に重きを置いていたが、現在は分子の吸着分離性やイオン透過性など機能性の付与に重きが置かれている。これによ

り、電池隔膜や極微量金属の捕集や水浄化・空気浄化用の材料の製造が行われている。

塗膜硬化に放射線を用いた放射線キュアリングは、無溶剤系で表面硬化ができ、硬度も高いという特徴をもっており、工業的に行われている。道路トンネル内の易除染性タイルやプレコート鋼板、壁材などに应用されている。

9. おわりに

放射線の工業利用に関し、架橋の利用を中心に概説した。診断、医療、農業、環境浄化など広い分野で放射線が利用されているが、割愛させていただいた。

高分子は元来多様性に富む材料である。これを放射線加工を加えると、さらに多様性を付与することができる。アイデア次第で新たな材料を創製することも可能と考えられる。弊社は、工業用電子加速器のトップメーカを自負しており、試験用照射加速器システムおよび委託照射用設備を京都と群馬県前橋に有している。さらに、2008年11月から佐賀県鳥栖に九州EBセンターを開設した。ハード面とソフト面で材料開発のお手伝いができれば幸いである。

文 献

- たとえば、志田正二，佐藤 伸：“光化学と放射線化学”，東京化学同人，1965. J. W. T. Spinks and R. J. Woods：“An Introduction to Radiation Chemistry”，Jhon Wiley & Sons Inc., New York (1964). “Fundamental Process in Radiation Chemistry”，Edited by P. Auseloos, Interscience Publication, New York (1968).
- 田川：高分子，**45**，782 (1996).
- 久米：天然高分子の放射線加工，EBS Technology Serise 1 (2001).
- T. Seguchi, T. Yagi, S. Ishikawa, Y. Sano：Radat. Phys. Chem., **63**, 33 (2002).
- Chapiro, Radiation Chemistry of Polymer Systems, Interscience Publisher, p.345 (1962). 中村：放射線と産業，**58**，20 (1993).
- 貴家，工藤，瀬口：第34回放射線化学討論会要旨集 (1992). 貴家：放射線と産業，**107**，39 (2005).
- 貴家：放射線と産業，**108**，61 (2005).
- たとえば，T. N. Bowmer *et al.*：J. Appl. Polym. Sci., **26**, 3669 (1981). R. N. Waldron, H. F. McRae and J. D. Madison：Radiat. Phys. Chem., **25**, 843 (1985). 幕内：ポリマーの放射線加工，p.39，ラバーダイジェスト (2000). 上野山，宿島，早味，西本：SEIテクニカルレビュー，**160**，63 (2002).
- W. A. Saimon, L. D. Loan：J. Appl. Polym. Sci., **16**, 671 (1972).
- たとえば，E. Scalco and W.F. Moore：Radiat. Phys. Chem., **21**, 389 (1983). K. Ueno：Radiat. Phys. Chem., **35**, 126 (1990). 森内，早味，菊池，萩尾，上野：SIEテクニカルレビュー，**159**，115 (2001).
- たとえば，大崎：放射線化学，**51**，40 (1991). T. Kenmotsu, M. Okada and T. Ono：Radiation Physics and Chemistry, **42**, 97 (1993). 向井，中井：日新電機技報，**40**[2] (1995). F. Yoshii, K. Makuuchi, S. Kikukawa, T. Tanaka, J. Saitoh and K. Koyama：J. Appl. Polym. Sci., **60**, 617-623 (1996).
- たとえば，山川，山本：通研実報，**24**，1525 (1975). Ozawa, Noda：Radiat Phys. Chem., **18**, 81 (1981). 水沢：第23回日本アイソトープ・放射線総合会議，B201 (1998).
- S. A. H. Mohammed, J. Walker：Rubber Chemistry and Technology, **59**, 482 (1986). 安藤：“放射線化学の歴史と未来”，30周年記念事業組織委員会編，p.369.
- 吉井，幕内：高分子加工，**43**，209 (1994). 磯部：第9回放射線プロセスシンポジウム講演要旨集，p.43 (2001). 吉井：放射線化学，**78**，26 (2004).