

公益財団法人 日本化学繊維研究所

第1回 新高分子材料研究会 報告書

『高分子と環境・資源』をテーマとして専門家による講演および討論を下記のように実施した。産学の研究者・技術者・大学院生等から広く参加者を募り、オンラインで公開した。
総参加者数は160名であった（スタジオ会場の出席者13名を含む）。

日時： 2025年9月1日（月）13:30～15:30

形式： 無料公開型セミナー、ハイブリッド（京都技術科学センター会議室をスタジオ会場としてZOOM使用；一般参加者は原則オンライン参加）

講演題目： 環境・資源循環に配慮した高分子材料創製 ～Green Chemの進展～

講師： 齋藤 敬 教授（京都大学大学院 総合生存学館）

コメンテーター：

清水 史彦 氏（三菱ケミカル（株）グローバルリサーチパートナーシップ部長）

清水 敏之 氏（東洋紡（株）フィルムGX推進グループマネジャー）

西尾 嘉之 氏（京都大学名誉教授 日本化学繊維研究所常務理事）

司会： 佐々木 善浩 氏（京都大学大学院工学研究科教授）

以下には、講演の部および討論の部の各々について抄録を掲載します。

— 講演の部 —

環境・資源循環に配慮した高分子材料創製 ～ Green Chem の進展 ～

京都大学 総合生存学館
教授 齋藤 敬

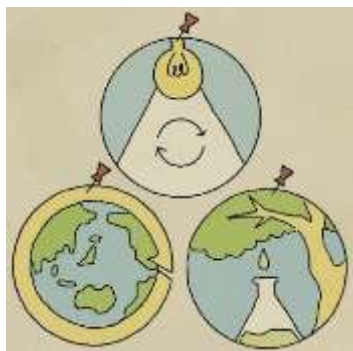
講演概要：

「サーキュラーエコノミー(循環型経済)」の実現に向けた取り組みが、世界各地で本格化している。高分子材料の分野でもこの流れは顕著であり、特に使い捨てプラスチックの削減に向けた規制が各国で進行中である。

今後は国際連携の強化やグローバルなプラスチック条約の制定が進み、高分子材料の利用そのものを持続可能な形へと転換していく動きが加速すると予測される。

欧州では、製品の耐久性や修理可能性の明示、再生材使用比率の表示を義務づける新たな法制度が整備されつつある。

こうした時代の潮流を受け、高分子材料の今後の創製について、近年再び注目を集めているグリーンケミストリーの考え方を基盤に、“再生可能資源の活用”や“製品の長寿命化等”(cf. 添付イラスト)を軸とした最新の研究動向を紹介したい。



発表内容 目次：

1. サーキュラーエコノミーとは？
 - 1.1 現在の各国プラスチック規制について
 - 1.2 サーキュラーエコノミーの世の中で必要な材料について
 - 長寿命材料、リペア、リユース、リサイクル、オンデマンド生産

- 2. グリーンケミストリーについて
 - 2.1 グリーンケミストリー12 カ条の紹介
 - 2.2 サーキュラーエコノミー、グリーンケミストリーからみた高分子材料創成
- 3. 環境評価指標の紹介
 - 3.1 アトムエコノミーの計算方法の紹介
 - 3.2 LCA の紹介と課題
- 4. 循環型高分子材料の紹介
 - 4.1 リサイクルに特化したダイナミックポリマーの紹介
 - 4.2 長寿命材料としての自己修復高分子材料の紹介
- 5. 再生可能資源を用いた長寿命材料の紹介
 - 5.1 植物油を用いた自己修復高分子材料
 - 5.2 多糖類を用いた自己修復性高分子
 - 5.3 リグニンを用いた自己修復性高分子

まとめ

講演スライド資料：

次々頁以降にスライド資料（掲載用抜粋・編集版）を収録しています。

（注）なお，本スライド資料の無断複製による転載は禁じます。

— 討論の部 —

出席者：

清水史彦氏（三菱ケミカル）・清水敏之氏（東洋紡）・西尾嘉之氏（日本化学繊維研究所）
齋藤 敬氏（京大院総合生存学館）
佐々木善浩氏（京大院工）

討論概要：

始めに、3 名のコメンテーター（清水(史)氏，清水(敏)氏，および西尾氏）より齋藤講演に対する総体的な所見が述べられ，一部専門用語について補足説明があった。

次いで，司会の佐々木氏より討論用のサブテーマ 4 件（下記 1）～ 4））が提示された。これらは齋藤講演に使用された幾つかのキーワードを織り込んで設定されたものである。

- 1) 生分解性プラスチックは本当に“環境にやさしい”のか？
（Green Chem. 第 10 条の“響きの良さ”と現実のリスク，市場ニーズとの齟齬など）
- 2) CFP(Carbon Footprint)や LCA(Life Cycle Assessment) って？どこまで信じていい？
（計算手法の正確さ，標準値のあり方，欧米と日本の制度差など）
- 3) 自己修復材料・超/長寿命素材 vs サーキュラーエコノミー
（壊れない素材と循環設計は対立か共存か？）
- 4) 今いちばんホットな“グリーン素材”を一つ挙げるとしたら？
（LCA や社会実装の観点からブレイクスルー素材を即答で [希望的で可]）

各サブテーマに関して，コメンテーター 3 氏，齋藤氏，および佐々木氏による掛け合い論議を中心に，熱の入ったパネルディスカッションが展開された。今般参加した多くの視聴者にとっても，“環境・資源循環に配慮した今後の高分子材料の創製”について学習や再認識ができる好機になったと思われる。

「新高分子材料研究会」は，高分子材料がもつ社会的役割や意義，重要性を本財団が積極的に発信し，産学間学術交流の促進，ならびに高分子科学分野の振興に資することを目的とした公益事業です。

（公財）日本化学繊維研究所（〒606-8305 京都市左京区吉田河原町 14，京都技術科学センター内）

E-mail: institute.for.chemical.fibers@gmail.com

HP: <https://www.kasenken.jp/>

京都大学
KYOTO UNIVERSITY

環境・資源循環に配慮した
高分子材料創製
～Green Chemの進展～

齋藤 敬
教授
総合生存学館
京都大学
saito.kei.1y@kyoto-u.ac.jp



思修館

1

京都大学
KYOTO UNIVERSITY

環境に良い
材料とは？

齋藤 敬 (Prof. Kei Saito)
総合生存学館(GSAIS)
saito.kei.1y@kyoto-u.ac.jp

Website



思修館

2

京都大学

経歴

2004 早稲田大学 博士課程修了(高分子化学)

2004-2005 早稲田大学
21COE 実践的ナノ化学教育研究拠点 客員研究助手

2005-2007 University of Massachusetts Lowell, MA, USA
Postdoctoral fellow, Asst. Director of Research
Center for Green Chemistry

2007-2010 Monash University, Australia
School of Chemistry PIデニユアトラック教員

2010-2020 Monash University, Australia
School of Chemistry, Associate Professor

2015-2019 科学技術推進機構(JST) さきがけ研究員(兼任)

2020-present 京都大学大学院総合生存学館教授

思修館

3

京都大学



思修館

4

京都大学

- プラスチック規制

- 「使い捨てプラスチック指令 (Single-Use Plastics Directive, 2019/904)」プラスチック製のストロー、カトラリー(フォーク・スプーン等)、皿、綿棒、マドラー、風船のスティックなど使い捨てプラスチック製品の一部が域内で販売禁止。また発泡スチロール製食品容器やカップ、および酸化分解性プラスチックの禁止。
- 包装及び包装廃棄物規則 (PPWR)については、2025年2月に発効し2026年8月から適用開始となる予定。全ての包装を2030年までにリサイクル可能にすることや、小売・外食部門でのリユース容器比率達成義務、過剰包装禁止などが順次施行される。
- ESPR(EU Ecodesign for Sustainable Products Regulation: 持続可能な製品のためのエコデザイン規則)。製品ごとの素材・リサイクル情報をデータベースで管理する「デジタル製品パスポート」を導入予定。2026年7月19日から衣類・衣料品アクセサリ・履物未販売品の破棄が禁止。

思修館

https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/packaging-waste_en

5

京都大学

- 国際プラスチック条約 (UN Plastics Treaty)

- 国連プラスチック条約交渉とは、プラスチック汚染を終息させるための初の国際法的枠組みを策定する政府間プロセス
- INC-5.2 (2025年8月5日～15日、スイス、ジュネーブ) 条約案本文へのコンセンサスは得られず閉幕。正式合意は2025年内に達成できず、今後の追加交渉が必要な状況。INC-5.2には183か国・約1,400名の政府代表団と1,000名近いオブザーバーが参加。
- 一次プラスチック(バージン樹脂)の生産量抑制を国際目標として設定すべきか否かが最大の争点。
- レジ袋やストローなど問題のある使い捨てプラスチックの削減・禁止措置を条約に組み込むのか？
- プラスチック中の危険な化学添加剤や有害ポリマー(例: 難燃剤、フタル酸など)をグローバルに規制・禁止するのか？

思修館

<https://www.unep.org/inc-plastic-pollution>

6

京都大学

- 人類と地球社会の調和生存

- サーキュラーエコノミー
循環型経済。従来廃棄されていたもの、活用されていなかったものを「資源」と捉え、リサイクルシステムをビジネスに取り入れることで、環境にも経済にも持続可能性を持たせる新しい経済活動。

From a linear to a circular economy

<https://www.government.nl/topics/circular-economy/from-a-linear-to-a-circular-economy>

7

京都大学

The amount of C we can use might be capped.

<https://epthinktank.eu/2022/11/30/advancing-the-circular-economy-in-the-eu/>

8

京都大学

サーキュラーエコノミー(Circular Economy)

- 製品寿命の延長
- シェアリング
- リユース
- リサイクル
- オンデマンド生産
- デジタル化

9

京都大学

グリーンケミストリー

「環境に優しい化学」「汚染防止につながる新しい化学」等に言い換えられます。化学物質を合成する(作る)人達が、環境に配慮してものを作るためにはどうすれば良いかを考える、現実的な化学の概念です。

10

京都大学

19-22 May 2025, The Nobel Symposium on
"Chemistry for Sustainability: Fundamental Advances"

11

京都大学

材料、製品

12

京都大学
京都大学

グリーンケミストリー

- グリーンケミストリーの12カ条
- リスクの管理

今迄のリスク管理

$$\text{リスク} = \text{危険物} \times \text{曝露}$$

グリーンケミストリーのリスク管理

$$\text{リスク} = \text{危険物} \times \text{曝露}$$

京都大学
京都大学

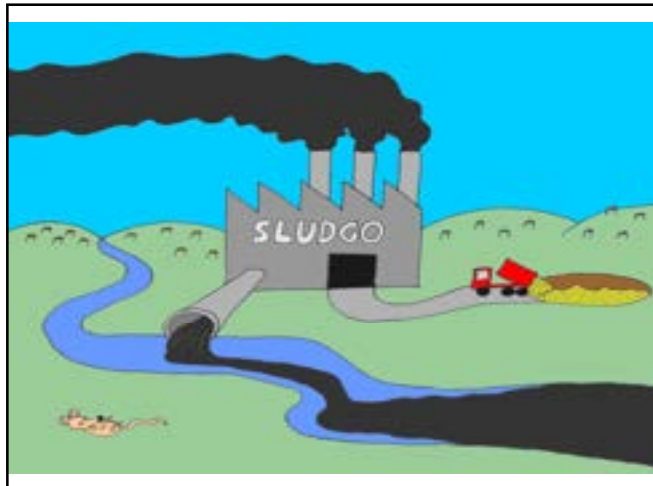
13

グリーンケミストリーの12箇条

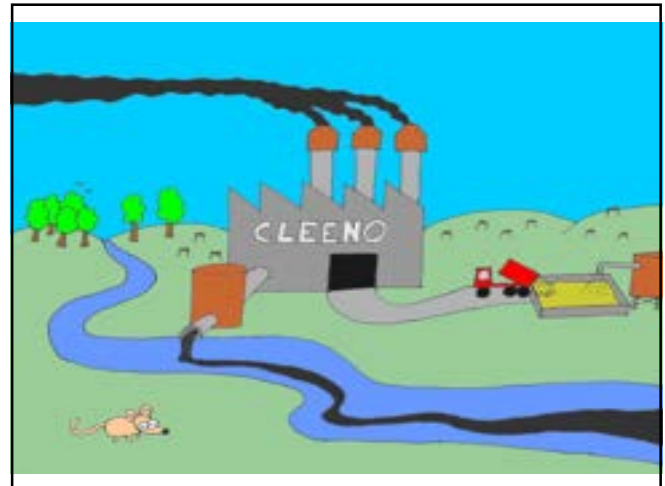
1. 廃棄物は”出してから処理”ではなく、出さない。
2. 原料をなるべく無駄にしない形の合成をする。
3. 人体と環境に害の少ない反応物・生成物にする。
4. 機能が同じなら、毒性のなるべく小さい物質をつくる。
5. 補助物質(溶媒、分離剤)はなるべく減らし、使うにしても無害なものを。
6. 環境と経費への負担を考え、省エネを心がける。
7. 原料は、枯渇性資源ではなく、再生可能な資源から得る。
8. 途中の修飾反応はできるだけ避ける。
9. できるかぎり触媒反応を目指す。
10. 使用後に環境中で分解するような製品を目指す。
11. プロセス計測を導入する。
12. 化学事故につながりにくい物質を使う。

Paul T. Anastas, John C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, New York, 1998.

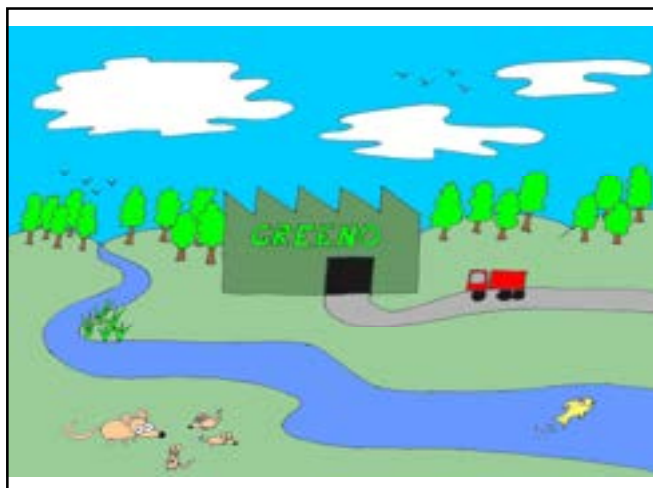
14



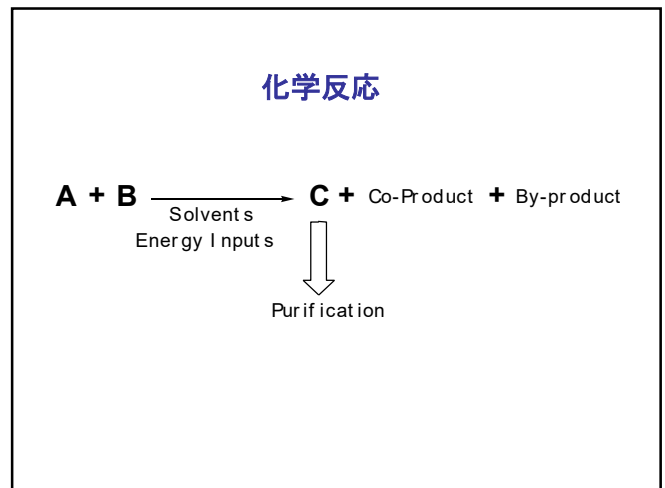
15



16



17



18

収率:

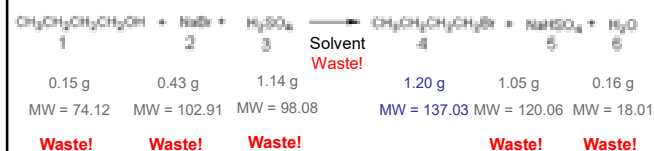
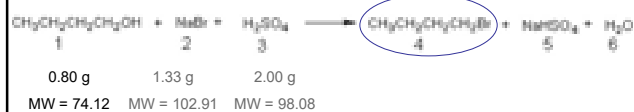
$$\% \text{ yield} = (\text{actual yield} / \text{theoretical yield}) \times 100$$

Example: nucleophilic substitution reaction



product	MW	moles (theoretical)	expected yield (g)	actual yield (g)	% yield
C ₄ H ₉ Br	137.03	0.0108	1.48	1.20	81%

19



20

アトムエコノミー

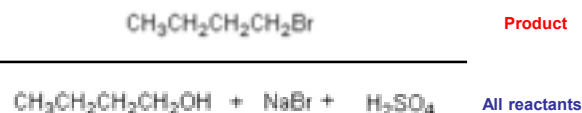
Atom Economy (Barry Trost)

$$= (\text{FW of atoms utilized} / \text{FW of all reactants}) \times 100$$

Atom economy describes the conversion efficiency of a chemical process in terms of all atoms involved.

Trost, Barry M., The Atom Economy-A Search for Synthetic Efficiency. *Science* **1991**, 254, 1471-1477.

21



22

E-ファクター

Roger Sheldon's Environmental Impact Factor (**E-factor**):

$$\text{E-ファクター} = \text{kg waste} / \text{kg desired product}$$

Industry Sector	Annual product tonnage	E-factor
 Oil Refining	10 ⁶ - 10 ⁸	<0.1
 Bulk chemicals	10 ⁴ - 10 ⁶	1 - 5
 Fine chemicals	10 ² - 10 ⁴	5 - 50
 Pharmaceuticals	10 - 10 ³	25 - 100

Sheldon, R. A. *ChemTech*, 1994, 24, (3), 38.
Sheldon, R. A. *Chem Ind (London)*, 1992, 903.
Sheldon, R. A. *Chem Ind. (London)*, 1997, 12.

23

Other metrics

Roger Sheldon's Environmental Impact Factor (**E-factor**):

$$\text{E-ファクター} = \text{kg waste} / \text{kg desired product}$$

$$= \text{廃棄物の量 kg} / \text{製品の量 kg}$$

Focus is on waste.

Sheldon, R. A. *ChemTech*, 1994, 24, (3), 38.
Sheldon, R. A. *Chem Ind (London)*, 1992, 903.
Sheldon, R. A. *Chem Ind. (London)*, 1997, 12.

24

Other metrics

Roger Sheldon's Environmental Impact Factor (E-factor):

$$\begin{aligned} \text{E-factor} &= \text{kg waste} / \text{kg desired product} \\ &= (\text{TEA} + \text{Toluene} + (10.81 + 21.9 - 23.6)) / 23.6 \\ &= (15 + 500 + 9.11) / 23.6 \quad \text{by-product} + \text{unreacted starting material} \\ &= 22 \end{aligned}$$

Sheldon, R. A. ChemTech, 1994, 24, (3), 38.
Sheldon, R. A. Chem Ind (London), 1992, 903.
Sheldon, R. A. Chem Ind. (London), 1997, 12.

25

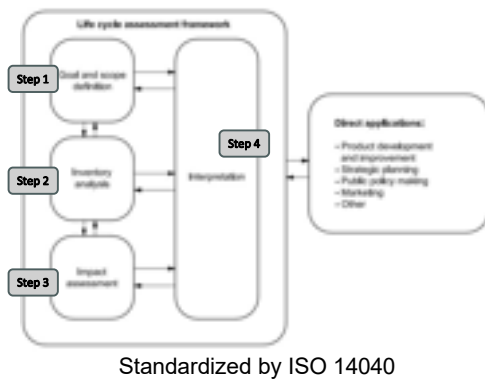
ライフサイクルアセスメントとは？

Life cycle (寿命) (評価) Assessment



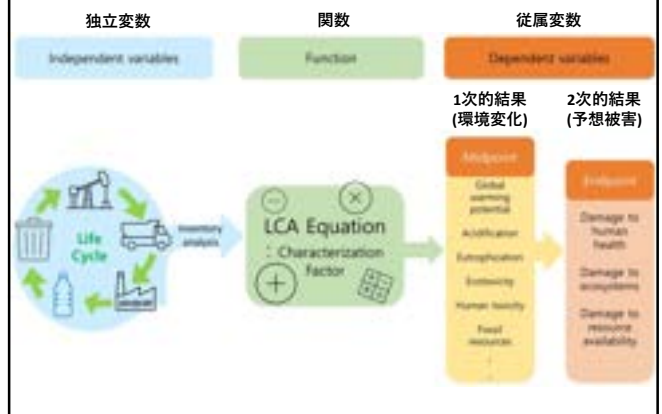
26

LCAの計算方法



27

LCAの計算方法



28

京都大学

まずLCAの目的と調査範囲を設定する。具体的には

- 調査をする理由(目的)を明らかにし、「製品機能」を特定する。
- 調査結果を誰に伝え、どのように利用するか(用途)を明らかにする。
- 「目的」に従い、「システム境界」(対象とするプロセス全体を含む自然界との境界)を区分する。

図3: プラスチック製品におけるシステム境界の例

出展: 一般社団法人 プラスチック循環利用協会 <https://www.pwmi.or.jp/pdf/panf6.pdf>

29

京都大学

プラスチックのLCA (ライフサイクルアセスメント)

出展: 一般社団法人 プラスチック循環利用協会 <https://www.pwmi.or.jp/pdf/panf6.pdf>

30

37

The diagram illustrates the circular economy model. It features a central circular flow with four main stages: 'Raw materials' (purple arrow pointing right), 'Production' (red arrow pointing down-right), 'Use' (blue arrow pointing down-left), and 'Recycling' (green arrow pointing up-left). The text 'Circular economy' is written above the cycle. The entire slide is framed by a dark blue header and footer containing the University of Tsukuba logo and name in Japanese.

38

京都大学

光循環型高分子(プラスチック)

The diagram illustrates a photocyclical polymer process. It features a central cycle of three green boxes connected by green arrows. The top box contains several short, disconnected blue and red polymer chains. The bottom box contains a single, long, continuous blue and red polymer chain. The right box contains a single, long, continuous blue and red polymer chain. The cycle is driven by light energy, represented by light bulbs and green arrows. The top arrow points from the top box to the right box, and the bottom arrow points from the right box to the bottom box. The left arrow points from the bottom box back to the top box, completing the cycle.

京都大学

39



京大

京都市立大学

可逆ポリマー

マジックテープ











.....







.....






.....



京大

京都市立大学

豊橋館

40

京都大学

京都大学

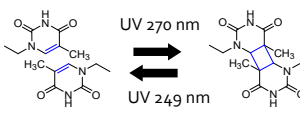
41



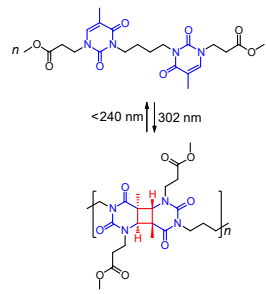
清华大学

Dynamic Polymers

Dynamic (Reversible) Polymers



Bioinspiration from thymine crosslinking in DNA



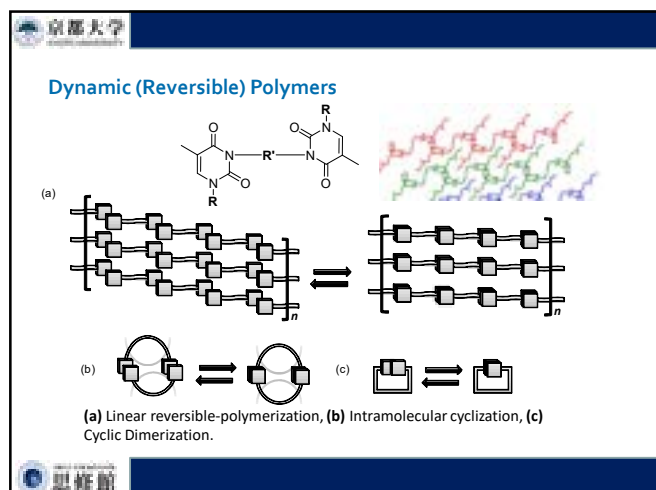
P. Johnston, C. Braybrook, K. Saito, *Chem. Sci.*, **2012**, 3, 2301-2306, P. Johnston, E. I. Izgorodina, K. Saito, *Photochem. Photobiol. Sci.*, **2012**, 11, 1938-1951, G. Kraus, P. Johnston, K. Saito, *Polym. Chem.*, **2014**, 5, 2173-2186, P. Johnston, D. Wheldale, C. Braybrook, K. Saito, *Polym. Chem.*, **2014**, 5, 4375-4384



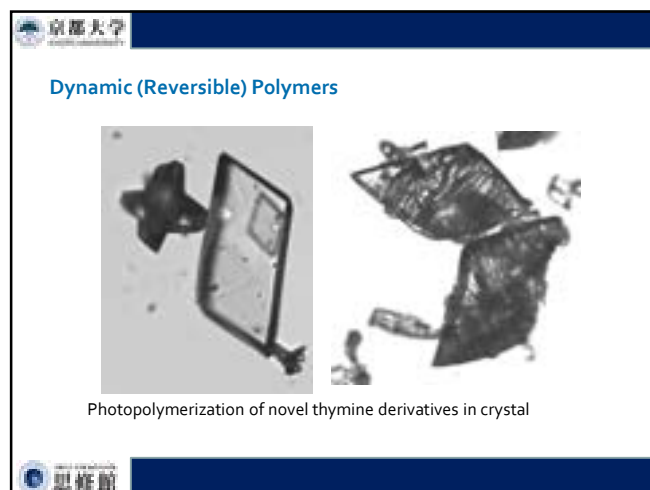
清华大学

Dynamic Polymers

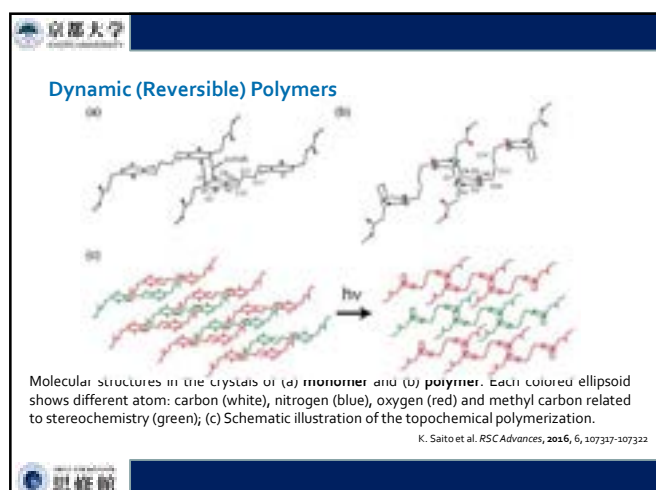
42



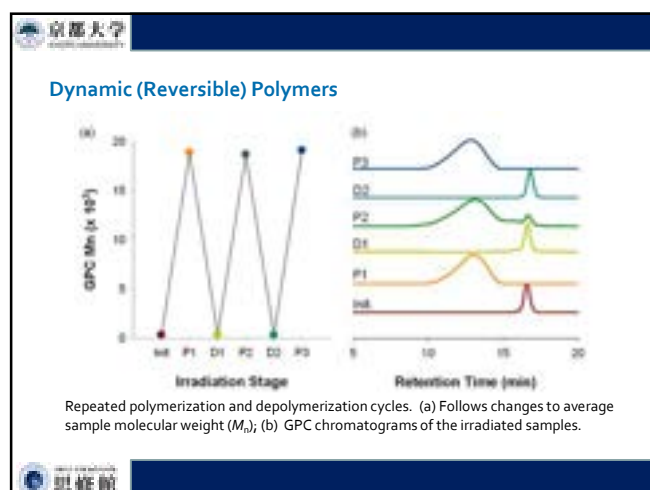
43



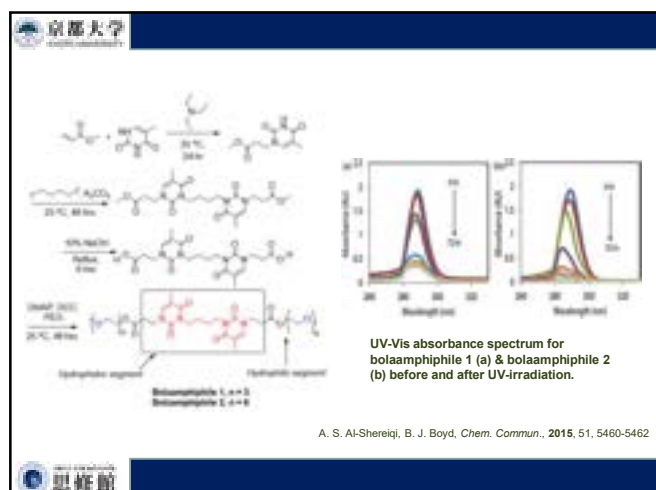
44



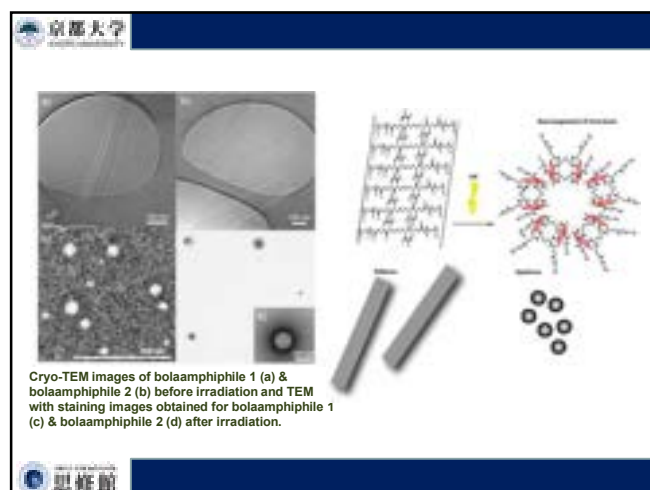
45



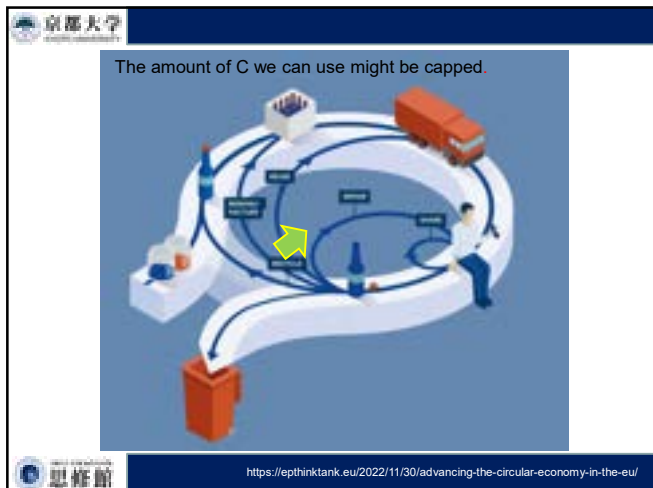
46



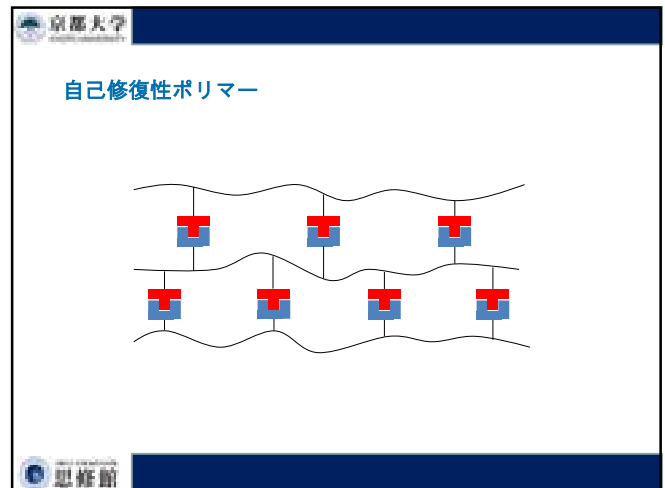
47



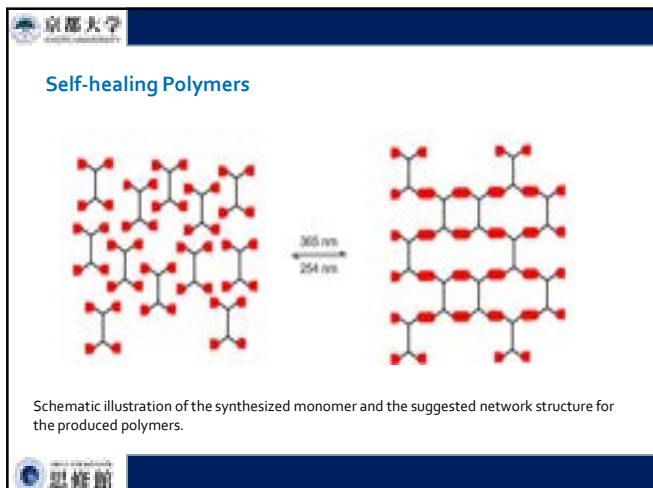
48



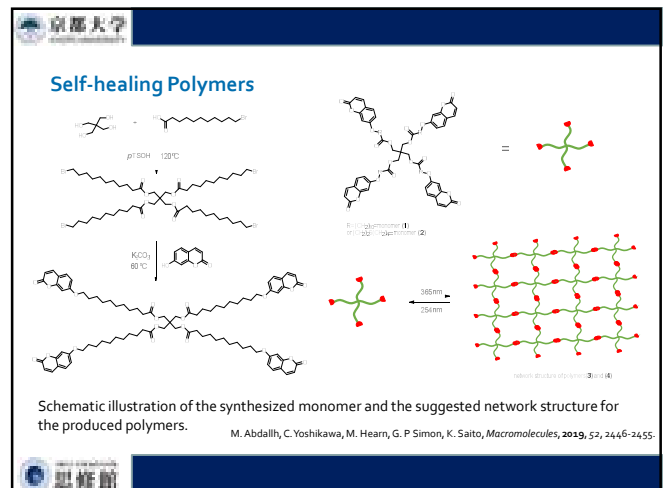
49



50



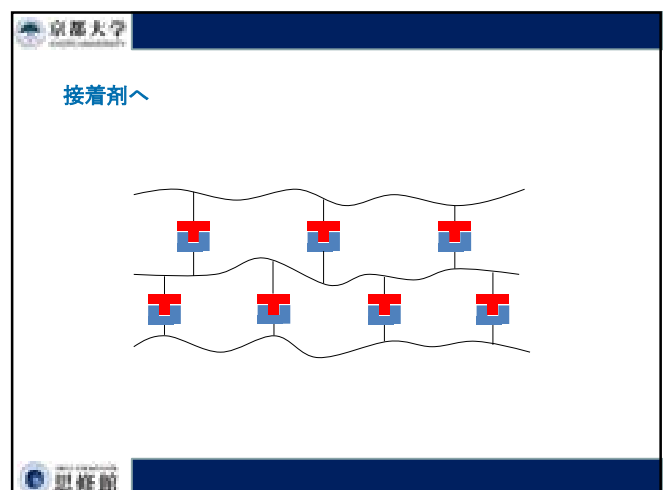
51



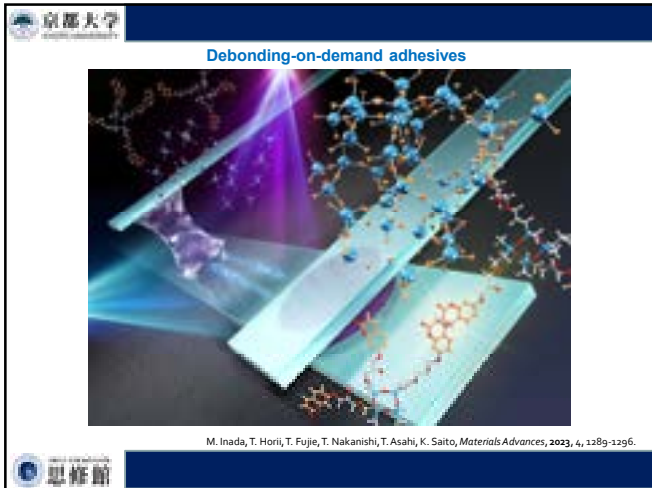
52



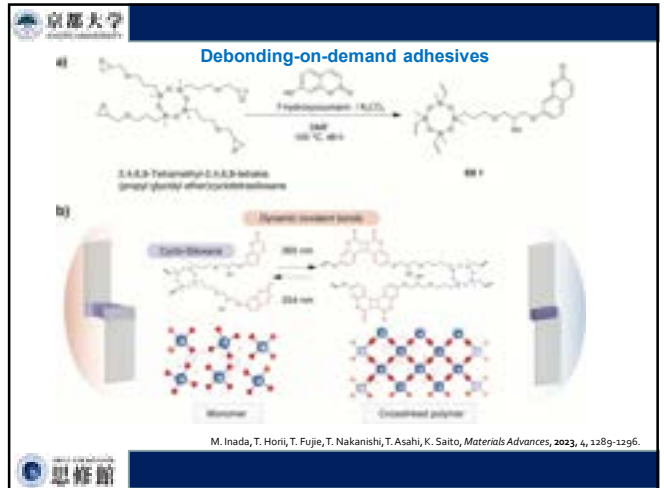
53



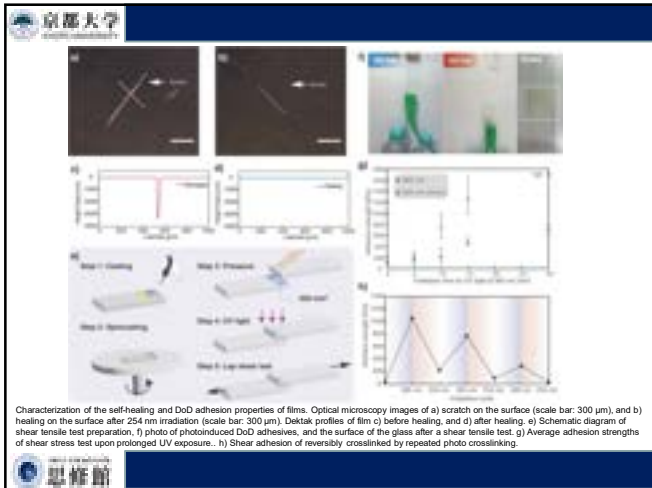
54



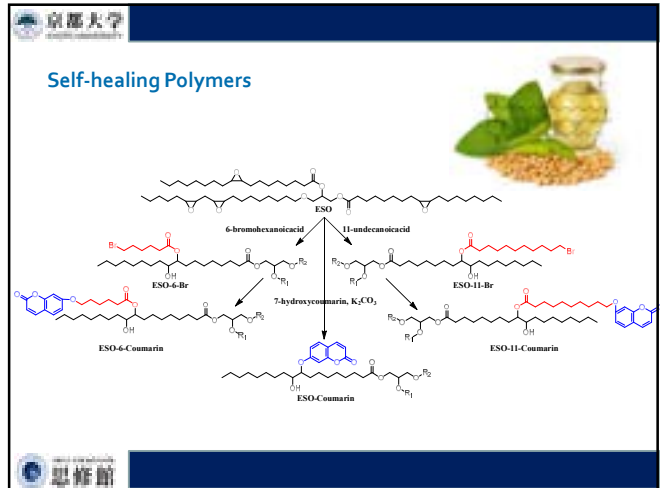
55



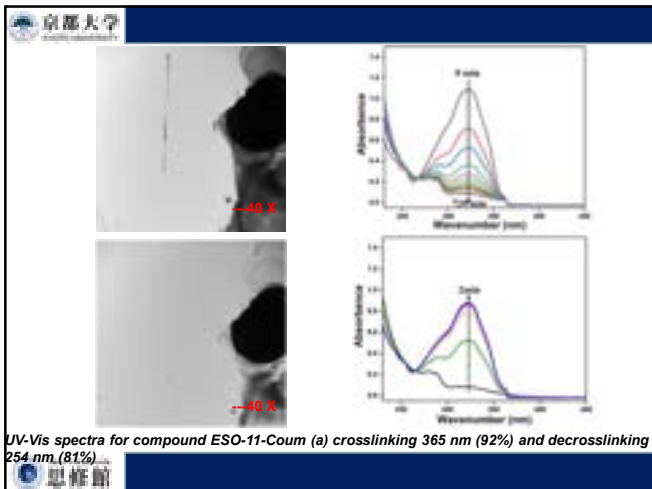
56



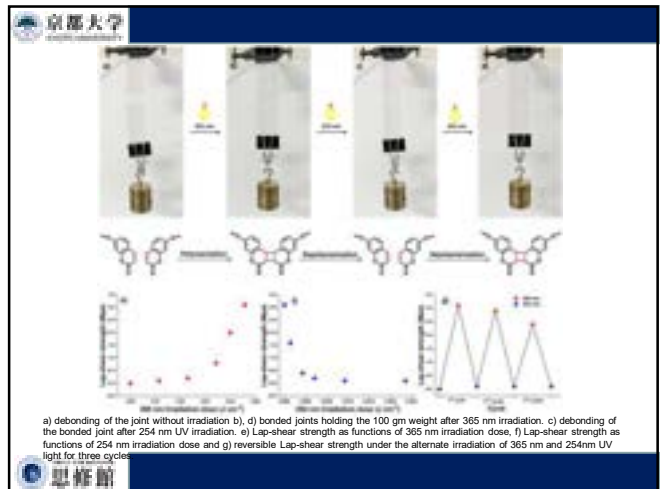
57



58



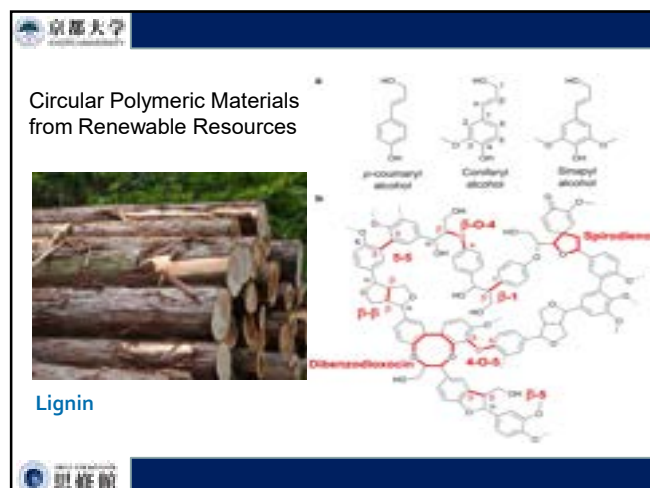
59



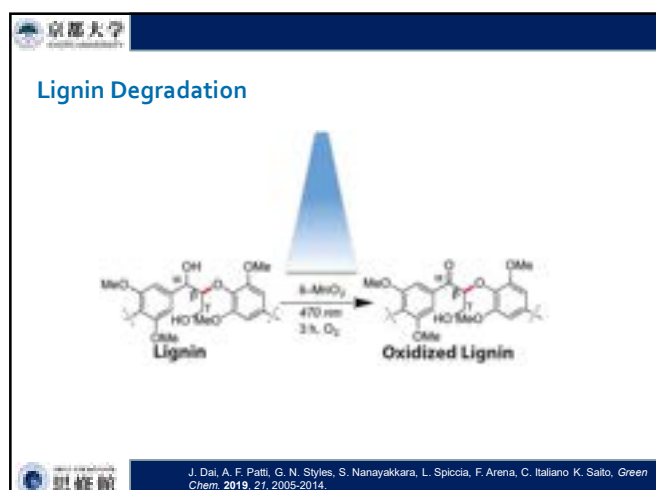
60



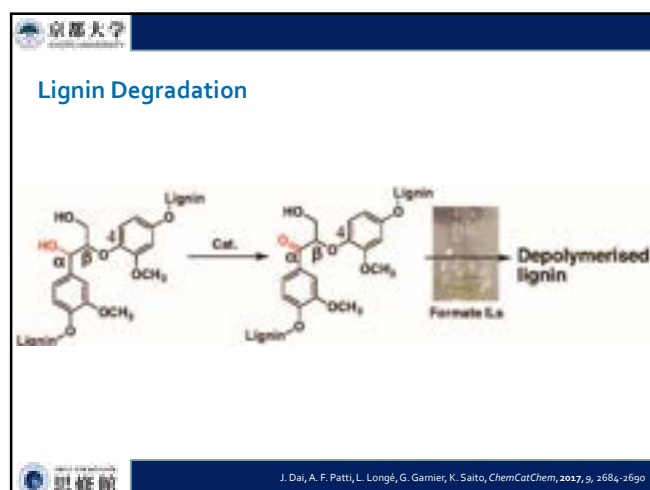
61



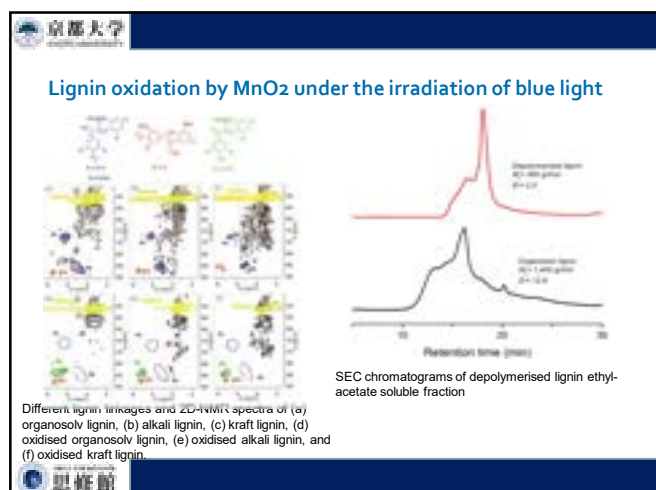
62



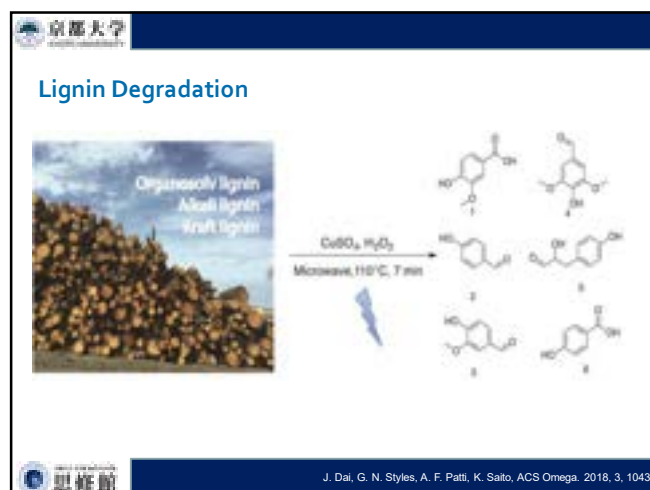
63



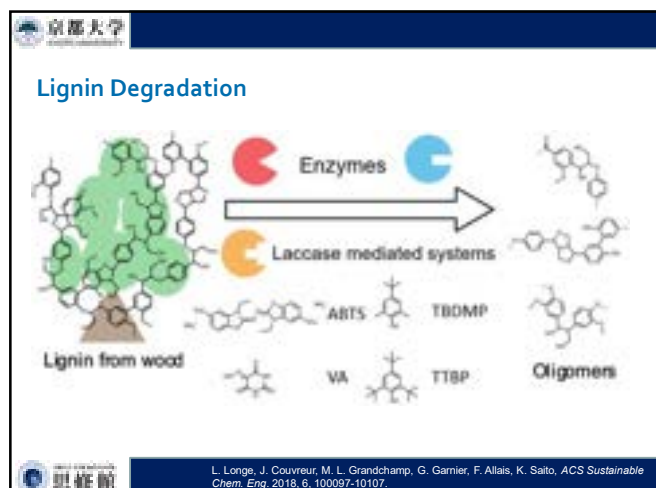
64



65



66



67

京都大学

12 Principles of Green Chemistry

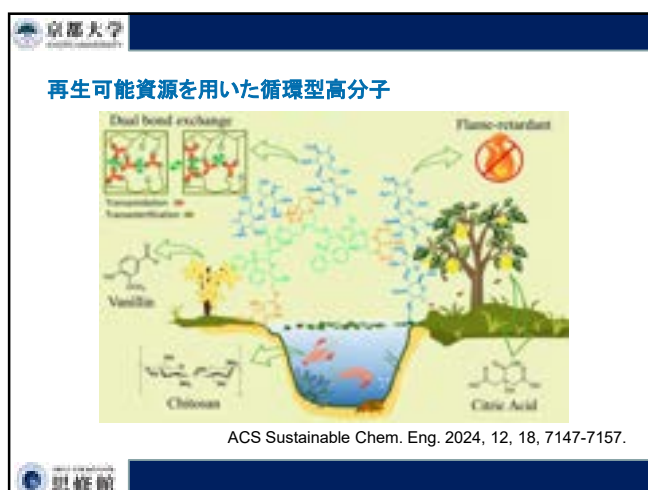
- 1. Prevention.** It is better to prevent waste than to treat or clean up waste after it is formed.
- 2. Atom Economy.** Synthetic methods should be designed to maximize the incorporation of all materials used in the process into the final product.
- 3. Less Hazardous Chemical Synthesis.** Whenever practicable, synthetic methodologies should be designed to use and generate substances that possess little or no toxicity to human health and the environment.
- 4. Designing Safer Chemicals.** Chemical products should be designed to preserve efficacy of the function while reducing toxicity.
- 5. Safer Solvents and Auxiliaries.** The use of auxiliary substances (solvents, separation agents, etc.) should be made unnecessary whenever possible and, when used, innocuous.
- 6. Design for Energy Efficiency.** Energy requirements should be recognized for their environmental and economic impacts and should be minimized. Synthetic methods should be conducted at ambient temperature and pressure.
- 7. Use of Renewable Feedstocks.** A raw material or feedstock should be renewable rather than depleting whenever technically and economically practical.
- 8. Reduce Derivatives.** Unnecessary derivatization (blocking group, protection/deprotection, temporary modification of physical/chemical processes) should be avoided whenever possible.
- 9. Catalysis.** Catalytic reagents (as selective as possible) are superior to stoichiometric reagents.
- 10. Design for Degradation.** Chemical products should be designed so that at the end of their function they do not persist in the environment and instead break down into innocuous degradation products.
- 11. Real-time Analysis for Pollution Prevention.** Analytical methodologies need to be further developed to allow for real-time in-process monitoring and control prior to the formation of hazardous substances.
- 12. Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention.** Substance and the form of a substance used in a chemical process should be chosen so as to minimize the potential for chemical accidents, including releases, explosions, and fires.

Anastas, P. T.; Warner, J.C. Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press: New York, 1998, p. 30

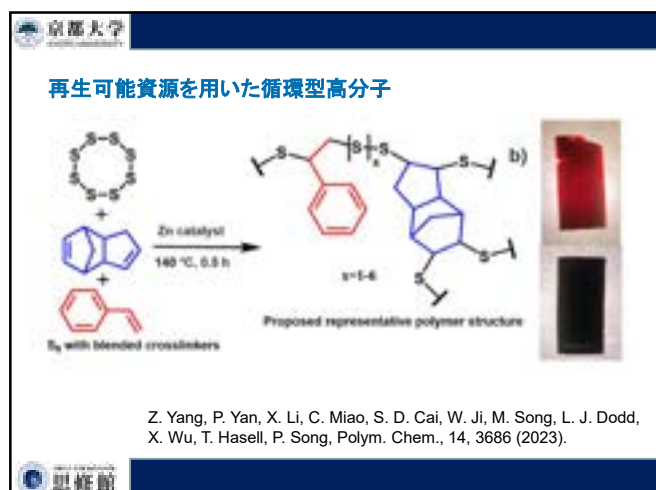
68



69



70



71

京都大学

Green Chemistry

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY

CRITICAL REVIEW

Are lignin-derived monomers and polymers truly sustainable? An in-depth green metrics calculations approach?

Samir Farhat, 12th Patrick Serrano Eng, 2nd Ed-Garcia, 1st Ben-Sasson, 1st and Florent Alou, 1st

Lignin-derived Compounds

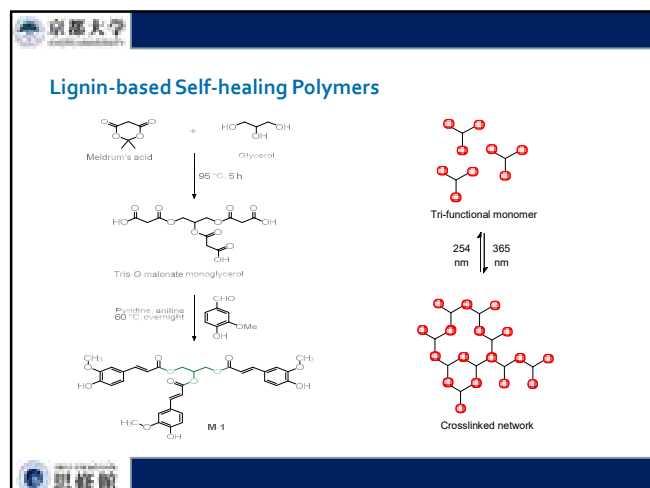
Monomers / Oligomers / Polymers

Green Matrix

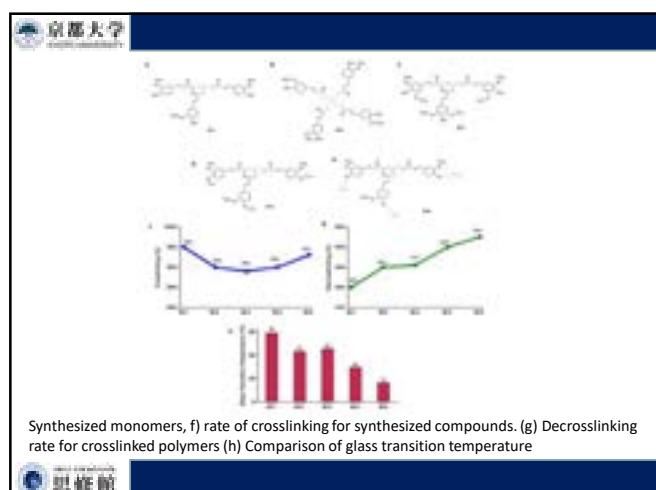
72



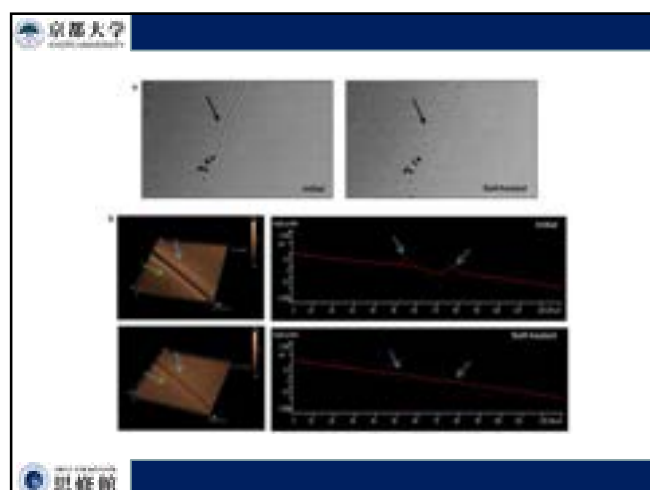
73



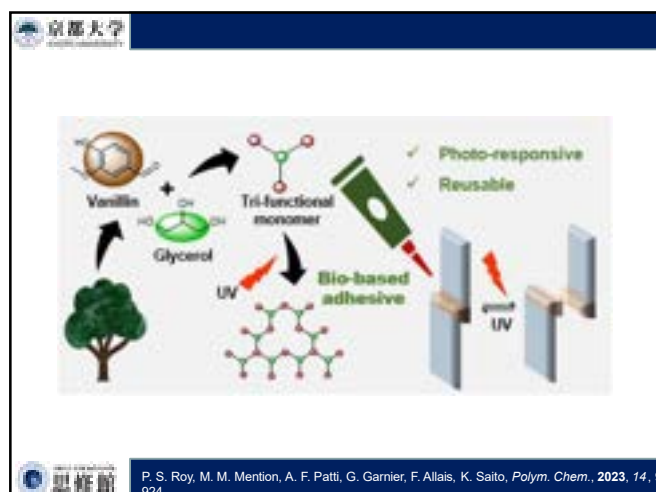
74



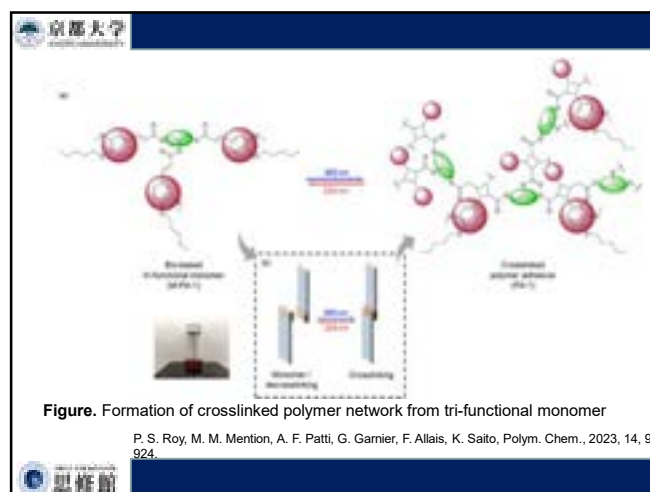
75



76



77



78

Circular Economy

Strategic Approach Towards Plastic Waste Valorization: Challenges and Promising Chemical Upcycling Possibilities

Pallavi Sanku Roy,^{1,2} Gil Garnier,^{1,2} Florent Allard,^{1,2} and Kai Saito^{1,2,3}

High-value application

Chemical Upcycling

Chemical Feedstock

Plastic Waste

79

79

Acknowledgements

- School of Chemistry, Monash University
- My students
- Prof. George Simon, Prof. Gil Garnier, Prof. Tony Patti, Prof. Ben Boyd, Emeritus Prof. Milton Hearn, Monash University
- The financial support of the Australian Research Council – ARC Industrial Research Hub Bioprocessing Advanced Manufacturing Initiative (BAMI) now move to PALS from this year.
- Japan Science and Technology Agency, PRESTO, (JPMJPR1515) are gratefully acknowledged.

MONASH University

80

80

Acknowledgements

81

81

Acknowledgements

- JSPS KAKENHI Grant-in-Aid for Transformative Research Areas(B) JP22H05046
- JSPS KAKENHI Grant-in-Aid for Scientific Research(B) JP22H02121
- JSPS KAKENHI Grant-in-Aid for Challenging Exploratory Research JP22K19868
- NAGASE Science Technology Foundation
- MASUYAKIKEN Basic Research Foundation
- Yashima Environment Technology Foundation
- Tokyo Ohka Foundation for The Promotion of Science and Technology

82

82

京都大学

ご質問やお問合せ等、お気軽にメールください！

e-mail

京都大学 齋藤研究室

83

83

京都大学

齋藤 敬

Professor

Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability

Kyoto University

saito.kei.1y@kyoto-u.ac.jp

<https://www.gsais.kyoto-u.ac.jp/staff/saito/index.html>

グリーンケミストリー&サーキュラーエコノミー研究会

関連するSDGs：

- 9.産業と技術革新の基盤をつくろう
- 12.つくる責任つかう責任
- 14.海の豊かさを守ろう

84

84