2026 / 10 / 21
3R先進事例発表会
@ 機械振興会館

高安定エポキシ樹脂の低温化学分解技術の開発による有機原料再生および複合繊維材料の回収

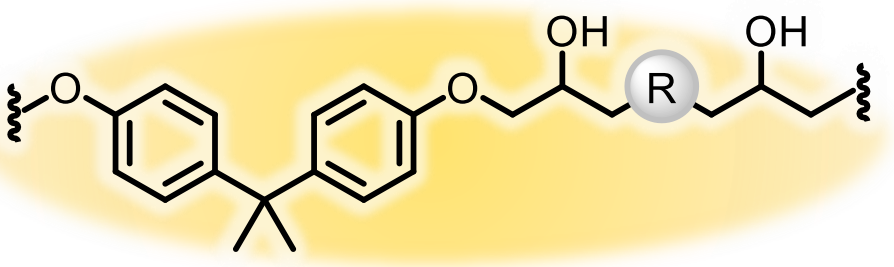
南　安規

産業技術総合研究所　サーキュラーテクノロジー実装研究センター（主）
化学プロセス研究部門（兼）
上級主任研究員

筑波大学　連携大学院　准教授

研究の背景・目的

エポキシ樹脂（硬化物）



市場規模　120億米ドル (2024)

さまざまな用途に使用，有価材を複合化，私たちの生活に必須

エポキシ樹脂製品のライフサイクル全体での徹底循環（再原料化、有価物の再利用）は動静脈産業，環境政策が切望している革新的技術

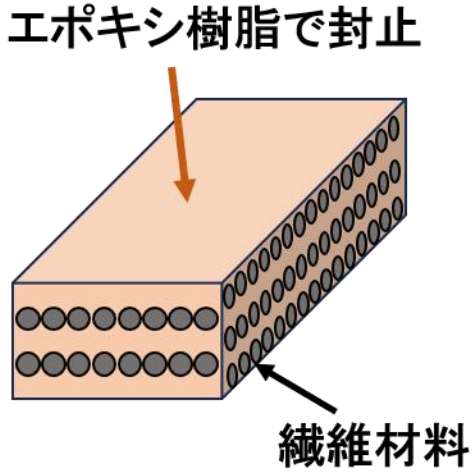
従来法は高温，高圧条件が必要
～大スケール化が困難，有価物の損傷～

→

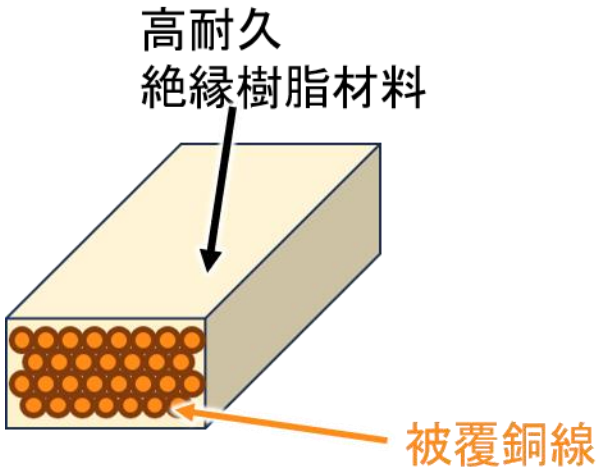
穏和で扱い容易な
樹脂分解技術の開発要求

有機成分の再利用

有機原料の再利用，有価物の回収を両立した技術開発



繊維強化樹脂



複合化機器

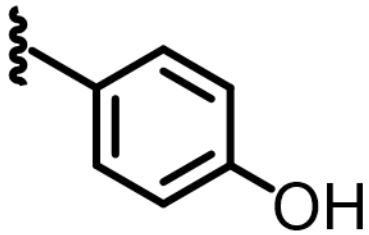
エポキシ樹脂の
温和な化学分解





有価物の回収

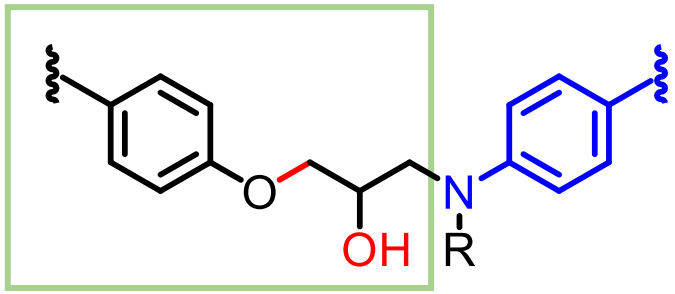
分離回収



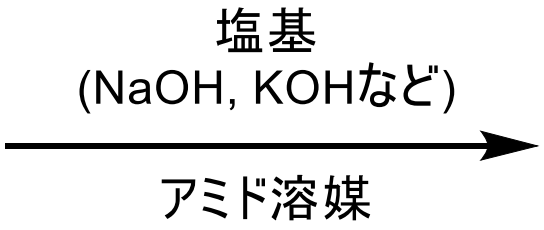
ビスフェノールなど樹脂の原料

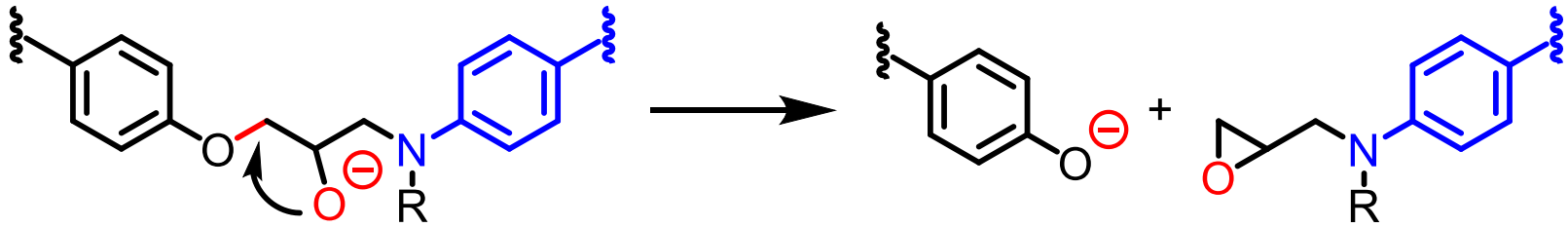
高級な有機原料の回収・再利用

塩基法による分解　―日立化成の先駆的研究―



エポキシ硬化物の主鎖の一部





たとえば、特開 2002-363339

研究初期は，樹脂を溶解させ、炭素繊維など高価値部材を回収することに主眼.

塩基法は硬化剤によらず主鎖を切断し，再原料化できるのでは？

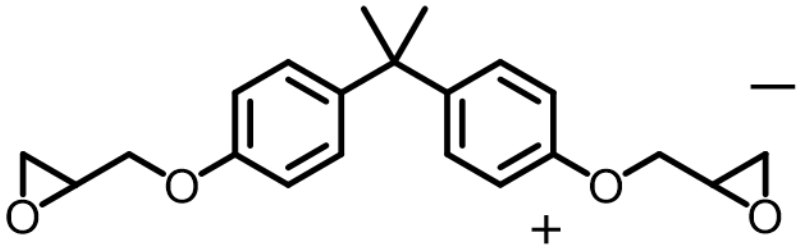
樹脂内部への効率的な反応剤の取り込み

求核性の向上，低温で分解

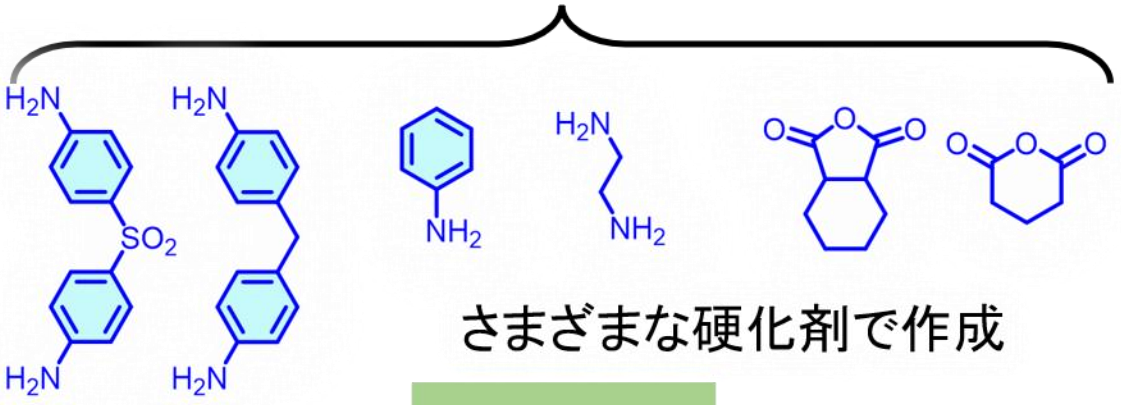
塩基法による再原料化、比較の例

実施組織	A. Ahrens T. Skrydstrup (デンマーク)	G. T. Beckham （アメリカ）	東レ （代表して記載）	**産総研**
対象樹脂	比較的低密度の エポキシ樹脂 （樹脂が限定的）	リニアー型 架橋型は前処理、190 °C が必要 （樹脂が限定的）	炭素繊維含有アミン 硬化エポキシ樹脂、 航空機用CFRP と記載	**さまざまな硬化剤、架橋度合い からなるエポキシ樹脂**
分解条件	NaOH トルエン 24 時間	KO*t*Bu 1,4-ジオキサン or THF + トルエン 24~48 時間	KOH NMP or DMI 5 時間	**NaOH or NaO*t*Bu DMIなどアミド溶媒 7~24 時間 （濃度がポイント）**
反応温度	190 °C	150-190 °C	232 °C	**150 °C**
生成物	ビスフェノール （分解も併発）	ビスフェノール	多数の分解物	**ビスフェノール 触媒付与でアミン硬化剤**
特徴、欠点	トルエン溶媒で実施 耐圧容器が必須 適用可能な樹脂の種類が限定的	エーテル溶媒で実施 耐圧容器が必須 適用可能な樹脂の種類が限定的	CFRPから 繊維回収 非常に高温	**常圧下で可能 CFRPから繊維回収 触媒付与で適用範囲拡大**
文献	*Green Chem.* **2024**, *26*, 815.	*ACS Sustainable Chem. Eng.* **2023**, *11*, 16946.	https://www.env.go.jp/content/000311345.pdf	*Polymer J.* **2025**, *57*, 149.

エポキシ熱硬化物の化学分解、塩基法による原料回収



一般的なエポキシ主剤

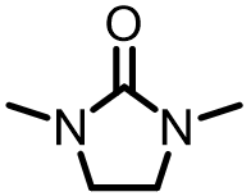


さまざまな硬化剤で作成



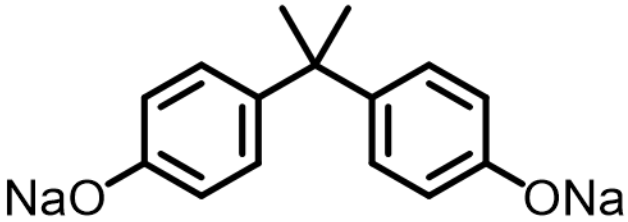
硬化剤，架橋度合いの異なるエポキシ熱硬化物

無機塩基
（NaOH, NaO*t*Buなど）
BPAに対し、2~8モル量



DMI溶媒

150 ºC, 7~24 h



酸で処理後、
ビスフェノールA (BPA)
を収率良く回収，最大95%

Minami, Tsuyuki, Shimoyama, Sato, Yoshida, *Polymer J.* **2025**, *57*, 149.
2024年11月18日にプレス発表「エポキシ樹脂のケミカルリサイクルに新たな道筋」.

繊維強化エポキシ樹脂の分解，炭素繊維の回収



裁断



small piece
(432 mg)

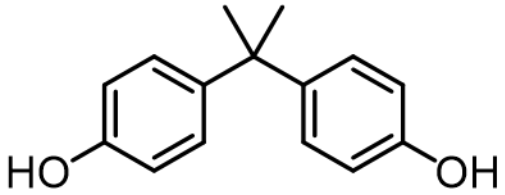
NaO*t*Bu
(1.0 mmol)

DMI 溶媒
150 °C, 23 h



aq. HCl

ろ過
洗浄



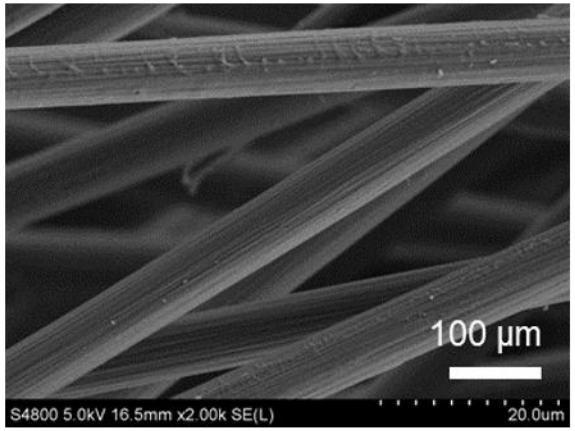
ビスフェノール A

+

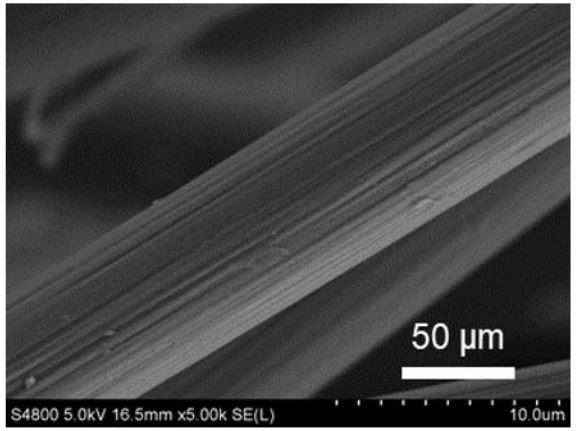


回収した
炭素繊維
(285 mg, 66 wt%)

回収した炭素繊維の
SEMによる
表面観察



× 2,000

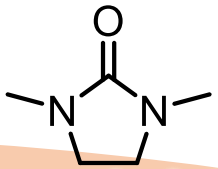


× 5,000

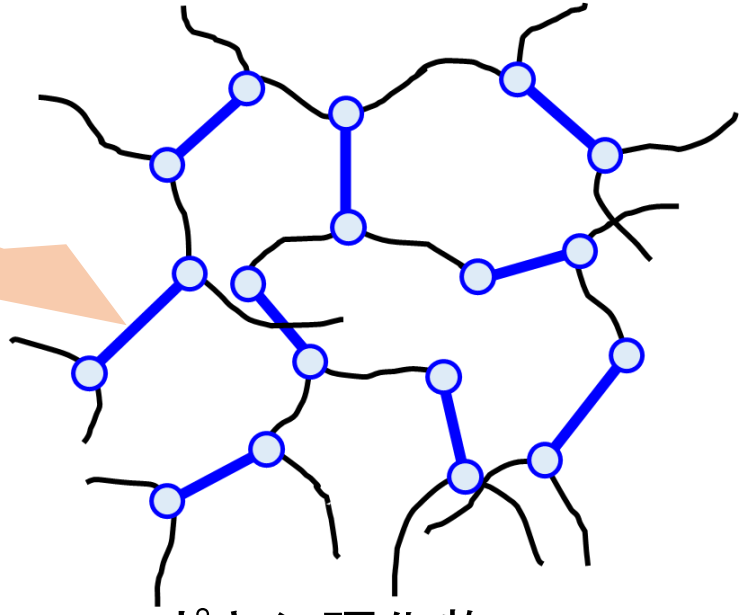
回収した炭素繊維の表面に損傷はなかった.

加溶媒法におけるエポキシ樹脂分解　溶媒の効果について

塩基 (e.g. NaOH)
＋
触媒



アミド溶媒

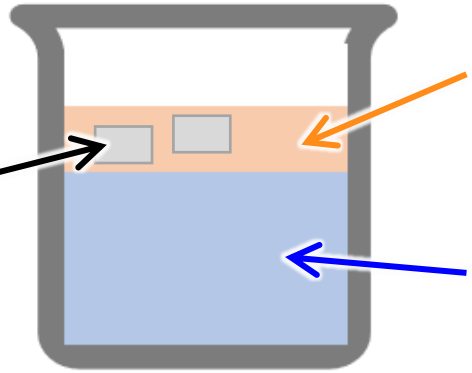


エポキシ硬化物

- 無機反応剤を溶解
- 樹脂表面、また内部へ反応剤を輸送
- 溶媒和による求核性の加速

水溶媒を用いる化学分解に展開

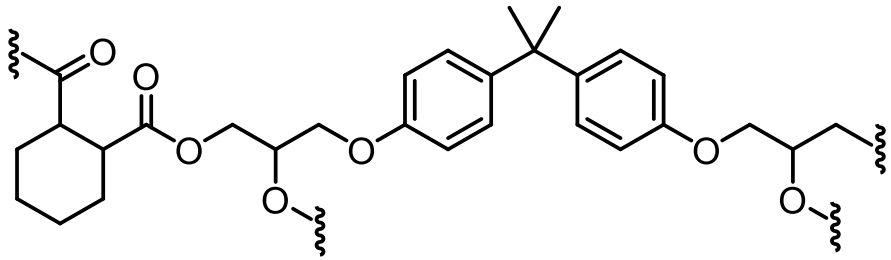
二層溶媒による分解



樹脂固体

高活性有機層
主鎖の切断に関与

水層
無機塩基の格納
水溶性生成物の格納



酸無水物硬化エポキシ樹脂に適用