

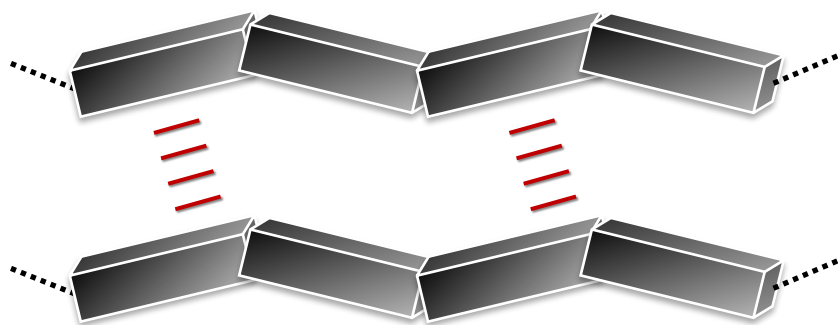
# 剛直-柔軟、親水-疎水など 相反する性質を切替え可能な高分子

東京科学大学 物質理工学院  
助教 高橋 明

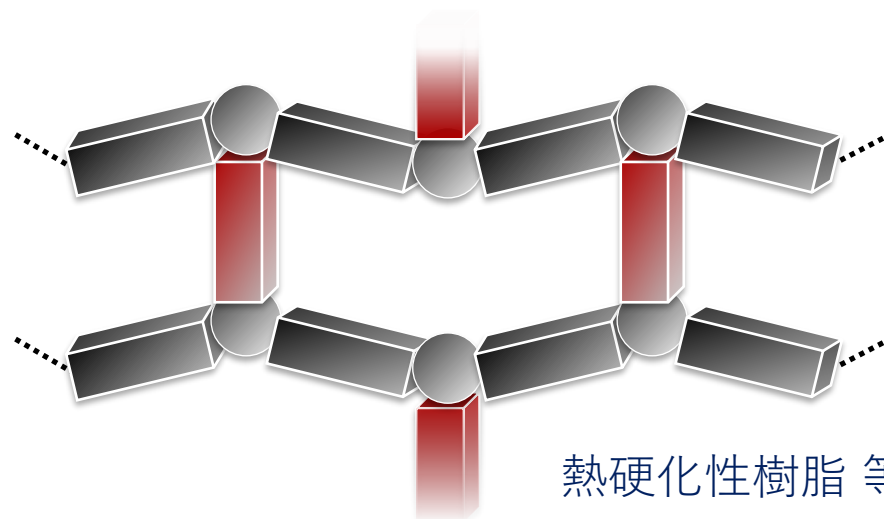
2025年9月19日

# 従来技術とその問題点

## 優れた物性を示す高分子の構造と課題

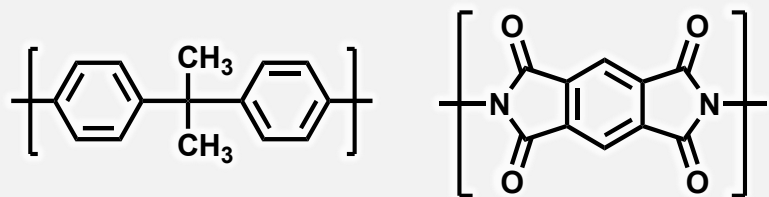


芳香族系高分子 等.

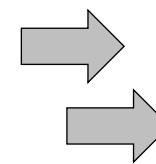
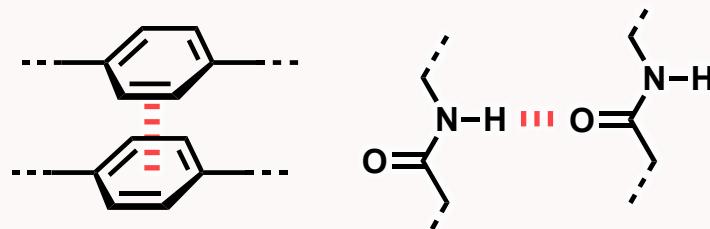


熱硬化性樹脂 等.

剛直な主鎖構造



強力な分子間相互作用



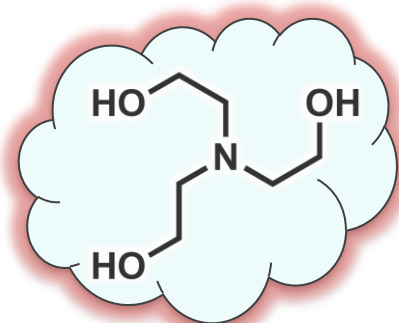
再利用を困難化

- ・ 物性を大きく変えるほどの化学構造変化を起こすには一般に**煩雑な工程を要する**
- ・ 優れた物性の要件と加工・分解を困難化する原因は同じ → **単一の化学構造での両立は困難**

# 新技術の概要と特徴

## プロセス時と使用時での高分子物性の変換

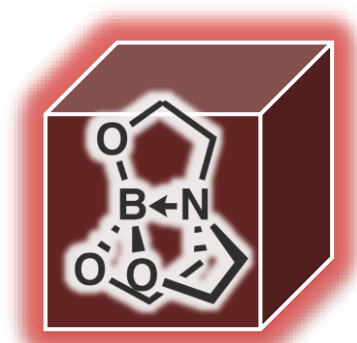
### <プロセス時>



柔軟状態

低温でも加工容易

### <使用時>

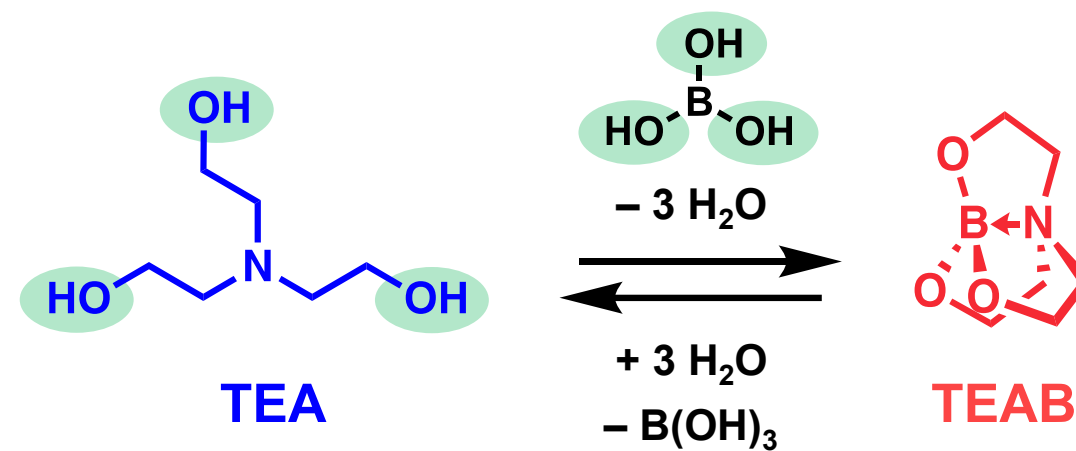


剛直状態

耐熱性・高

### 鍵反応

### トリエタノールアミン (TEA) の可逆的ホウ素化



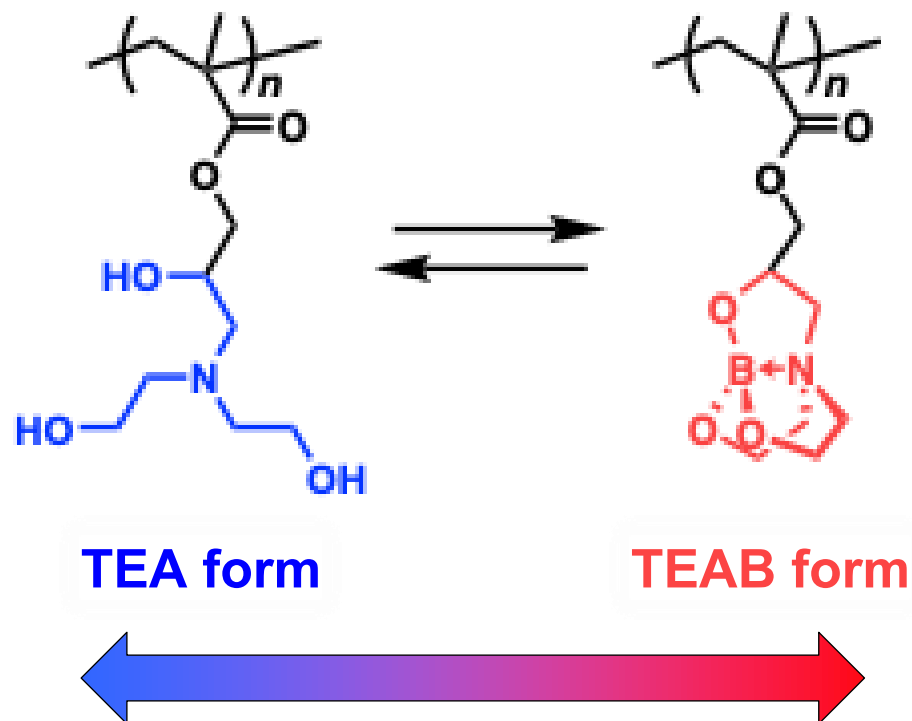
- ・ 多点での環の開閉により構造の剛直/柔軟性が劇的に変化
- ・ 正反応/逆反応ともに高選択的・高効率

使用時は剛直な分子構造、プロセス時は柔軟な構造に変換することで物性を最適化  
→ **加工・リサイクル容易な耐熱性高分子を設計可能**

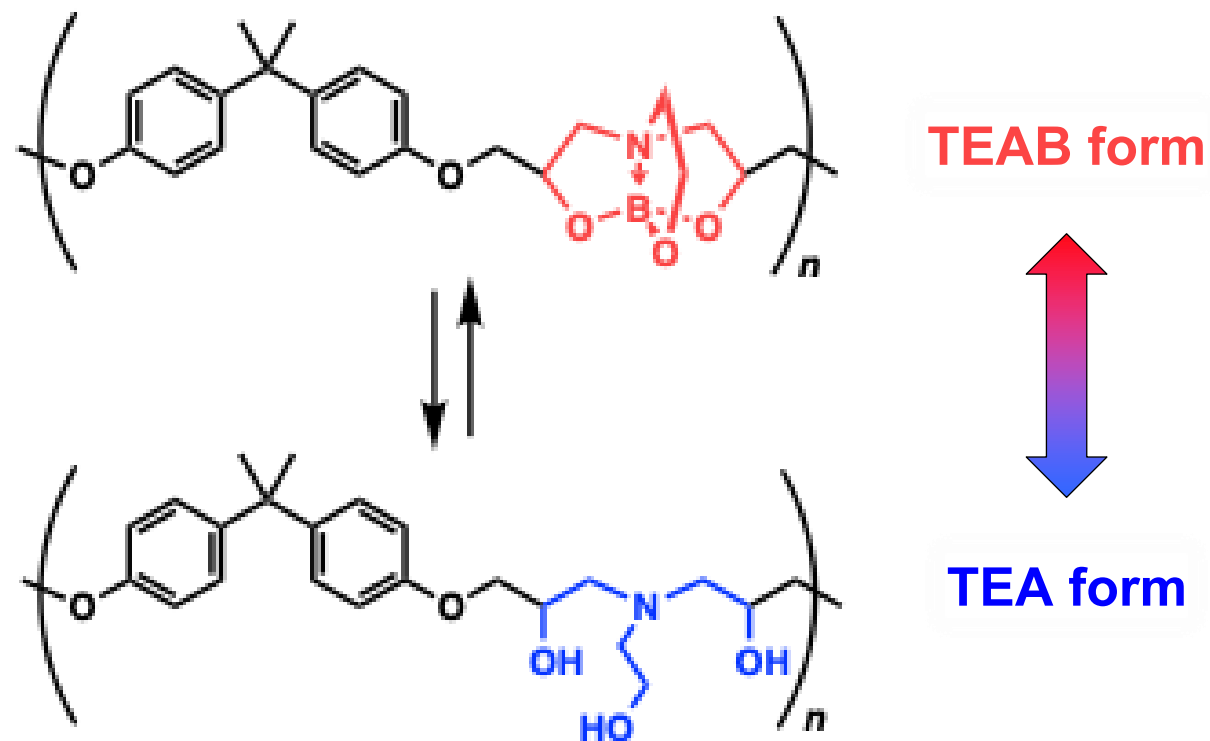
# 新技術の概要と特徴

## トリエタノールアミン (TEA) とそのボレート体 (TEAB) の可逆変換

### 側鎖への導入例



### 主鎖への導入例



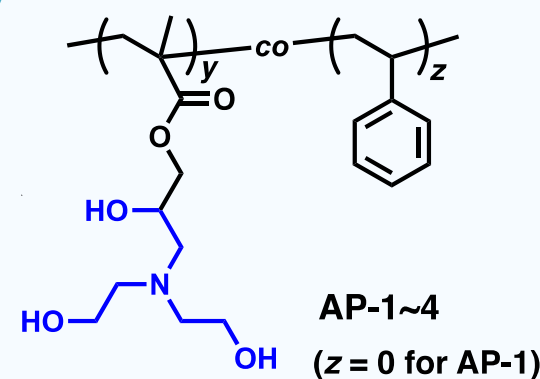
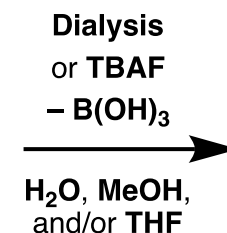
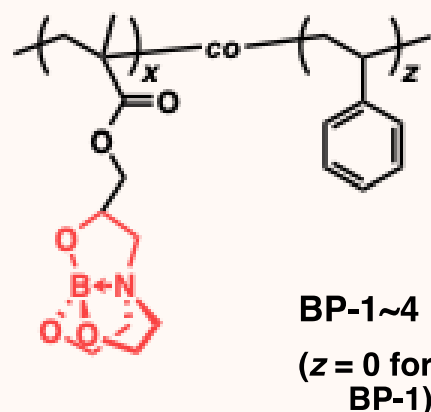
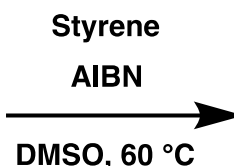
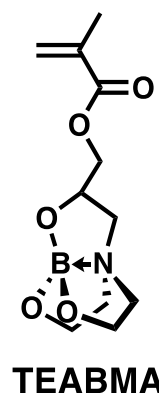
高分子の主鎖・側鎖を問わず導入が容易

A. Takahashi et al. *Chem. Lett.* **2021**, 50, 1993;  
*ACS Macro Lett.* **2022**, 11, 766; *Polym. J.* **2025**, 57, 259.

# 新技術の具体例：高分子（側鎖型）の合成

・モノマーは市販の原料から2段階で合成

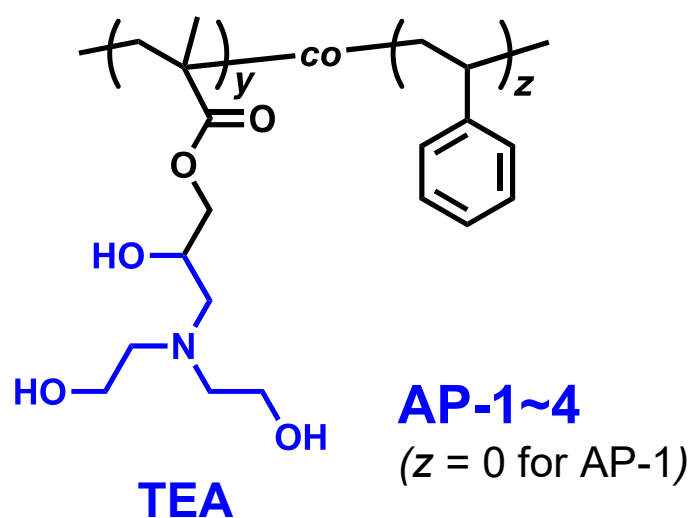
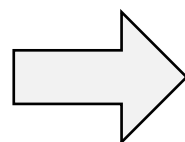
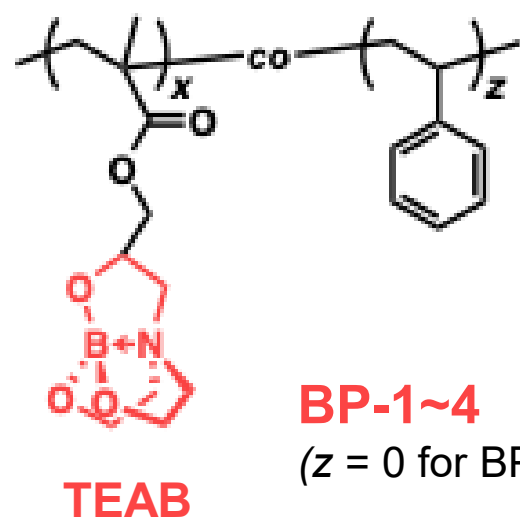
・カラム精製不要、スケールアップ容易 (≥ kg)



Sample	Feed		Time (h)	Conv. (%) <sup>a)</sup>		Yield (%)	Molar comp. (x / y / z)	M <sub>w</sub> (DOSY)
	TEABMA	St		TEABMA	St			
BP-1	1.0	0.0	5	93.9	—	94	1.00 / — / —	182,000
AP-1	—	—	—	—	—	85	— / 1.00 / —	188,000
BP-2	0.55	0.45	6	57.6	60.4	59	0.56 / — / 0.44	134,000
AP-2	—	—	—	—	—	90	— / 0.55 / 0.45	174,000
BP-3	0.29	0.71	6	44.8	35.7	35	0.35 / — / 0.65	81,000
AP-3	—	—	—	—	—	87	— / 0.35 / 0.65	95,300
BP-4	0.12	0.88	23	78.2	58.3	41	0.18 / — / 0.82	47,400
AP-4	—	—	—	—	—	84	— / 0.21 / 0.79	54,200

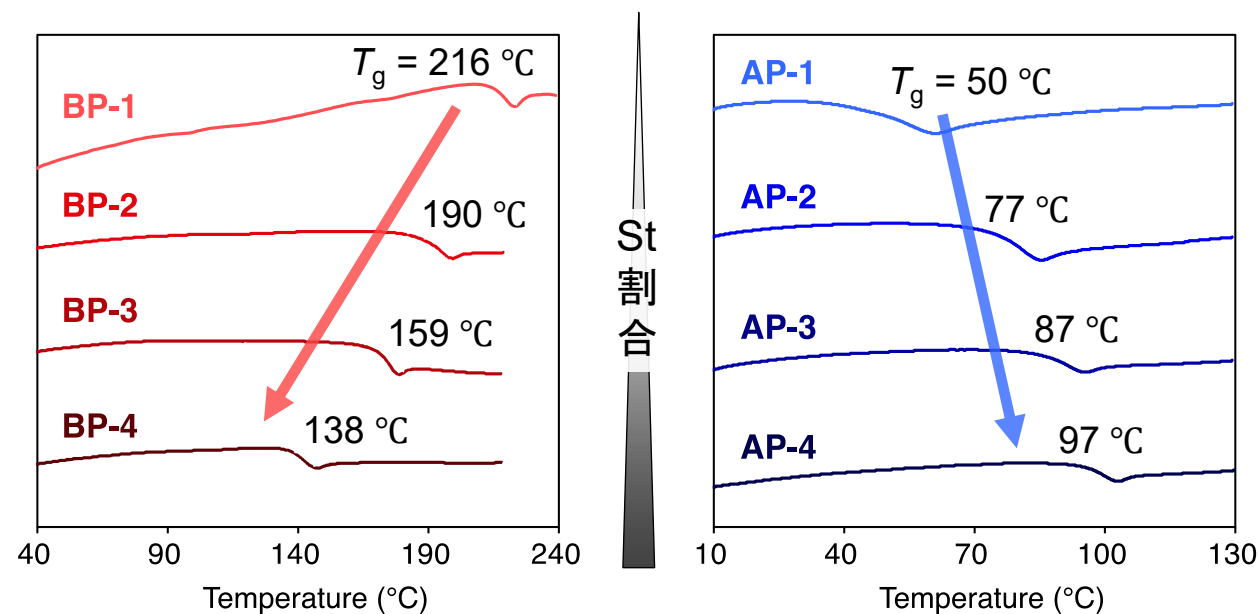
a) Calculated by <sup>1</sup>H NMR of reaction mixture.

# 新技術の具体例：構造変換に伴う熱物性変化

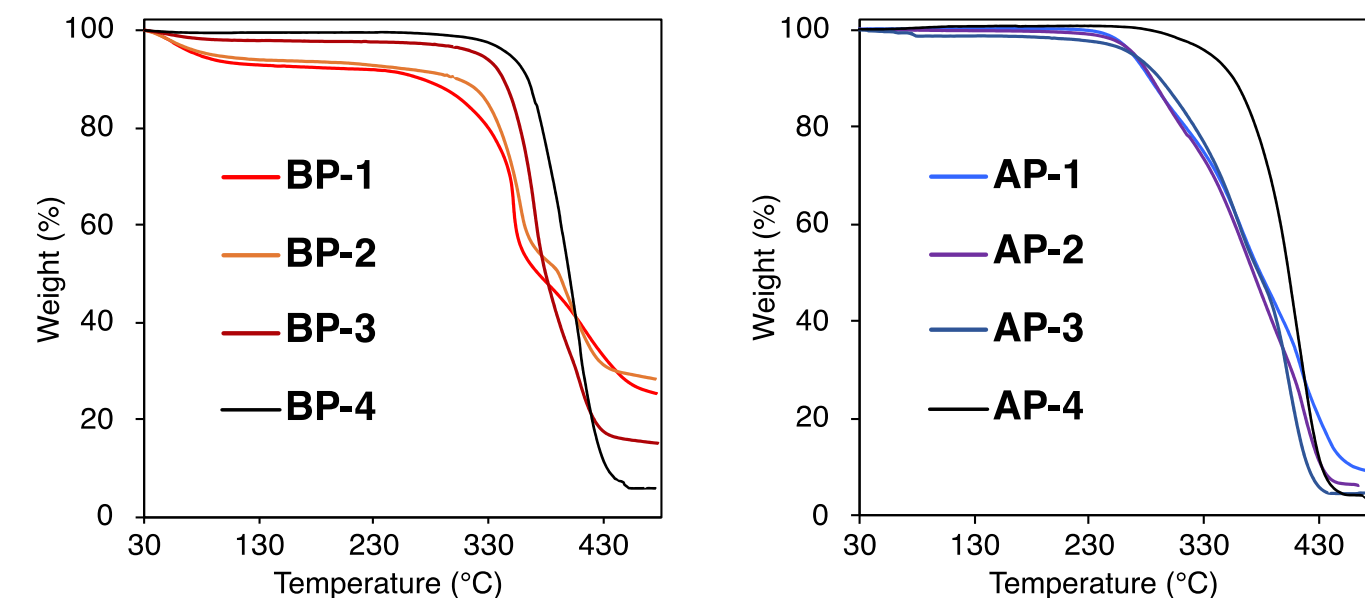


Sample	Molar comp. ( <i>x</i> / <i>y</i> / <i>z</i> )
BP-1	<b>0.980</b> / — / —
AP-1	— / <b>1.00</b> / —
BP-2	<b>0.56</b> / — / 0.44
AP-2	— / <b>0.55</b> / 0.45
BP-3	<b>0.35</b> / — / 0.65
AP-3	— / <b>0.35</b> / 0.65
BP-4	<b>0.18</b> / — / 0.82
AP-4	— / <b>0.21</b> / 0.79

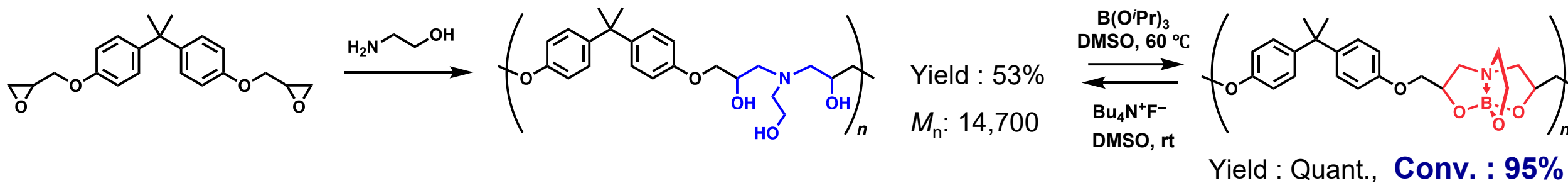
DSC profiles (10 °C/min, N<sub>2</sub>)



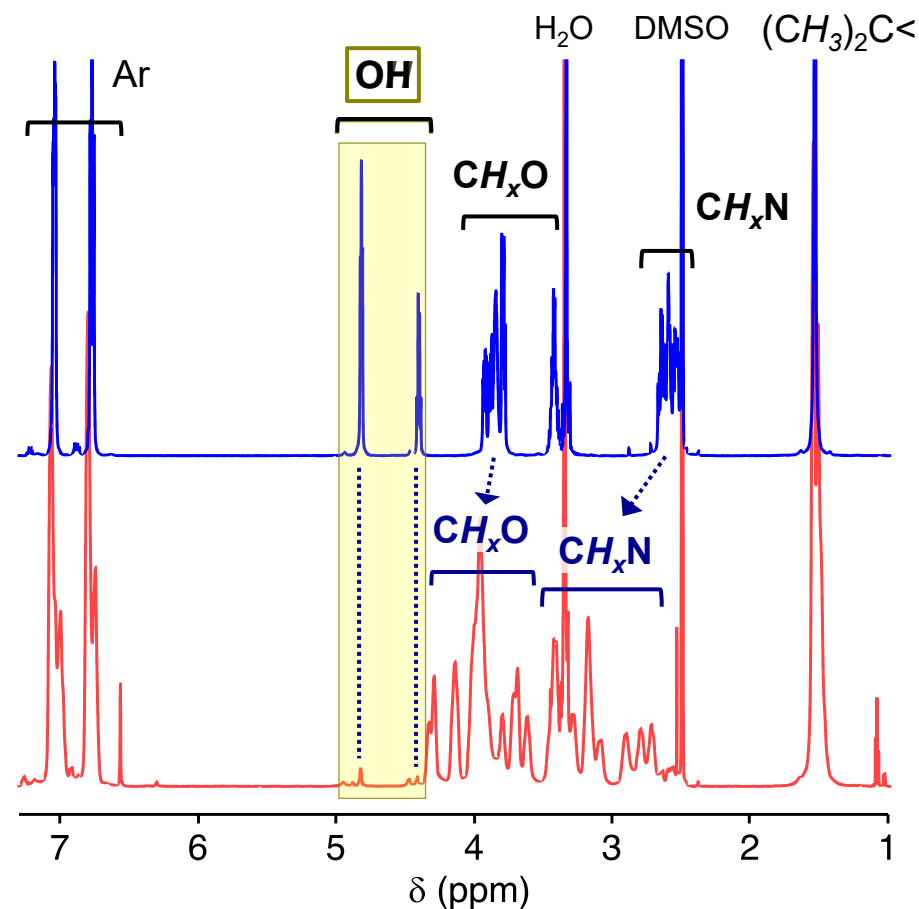
TGA profiles (10 °C/min, N<sub>2</sub>)



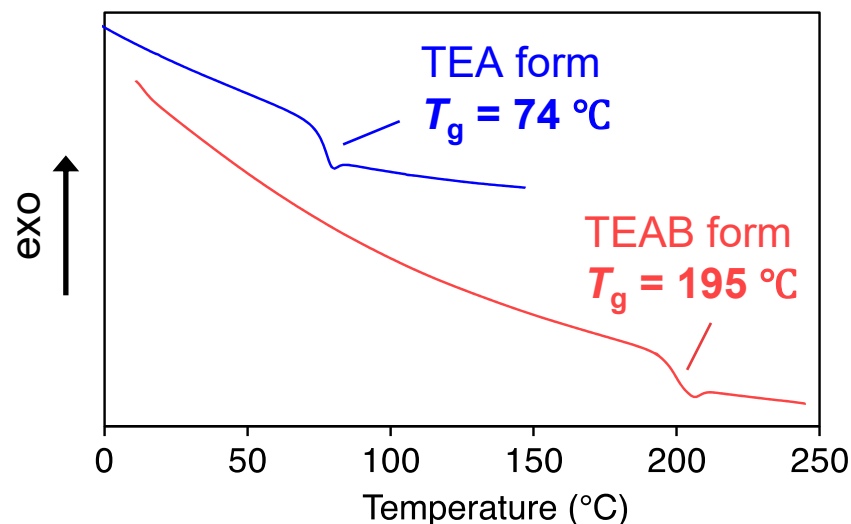
# 新技術の具体例：高分子(主鎖型)の合成と物性



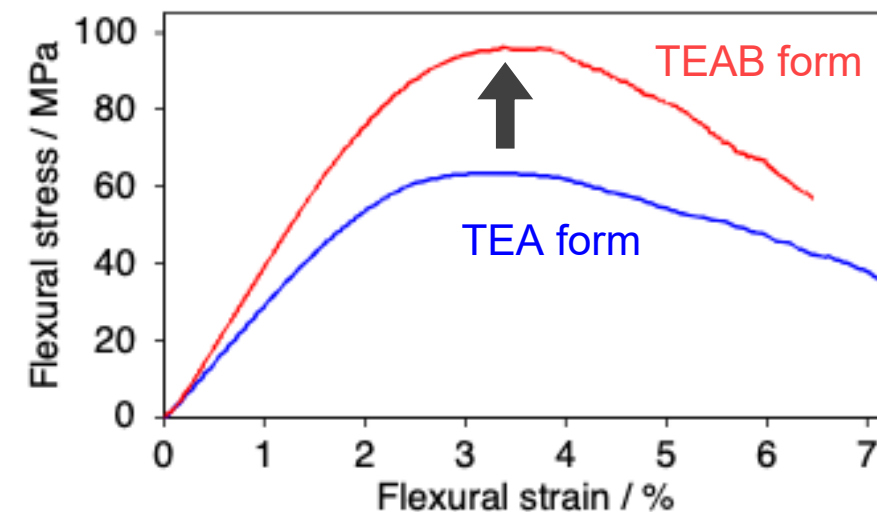
$^1\text{H-NMR}$  (DMSO- $d_6$ , 25 °C)



DSC (in  $\text{N}_2$ , 10 °C/min, 2nd heat)



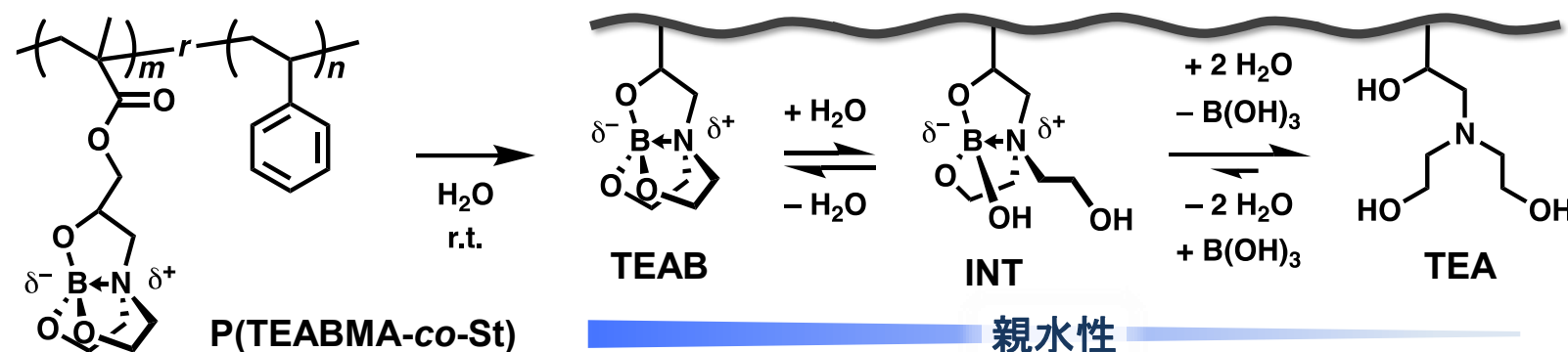
応力—歪み曲線 (3点曲げ法、1 mm/min)



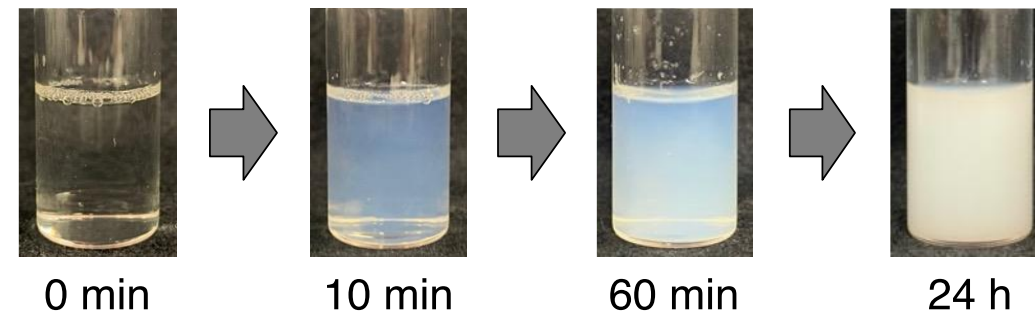
- 主鎖に導入した場合においても熱物性が顕著に変化
- 3点曲げ試験より1.3 ~ 1.5倍の弾性率・強度上昇を確認

# 新技術がもたらす更なる特徴

## ホウ酸有無における高分子の親水性変化

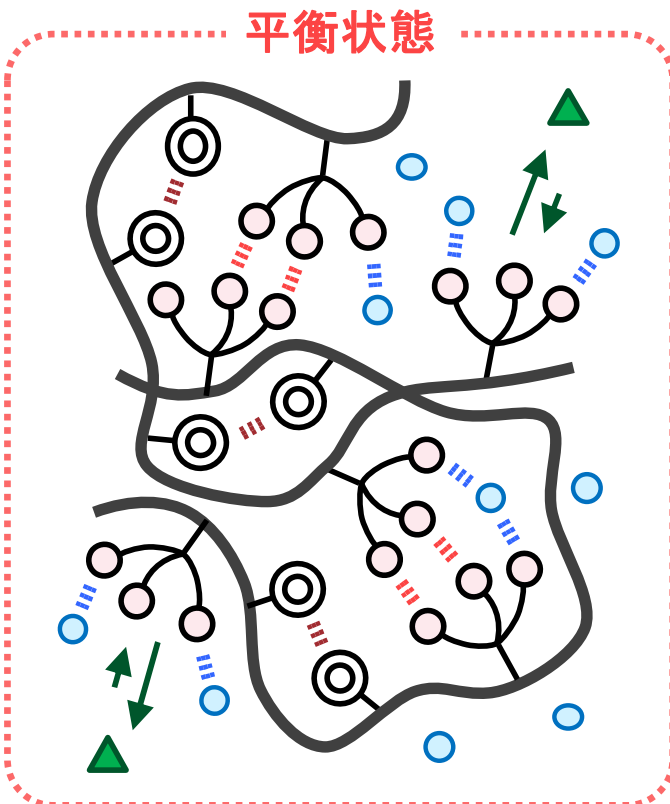
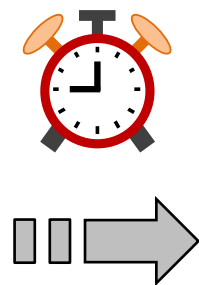
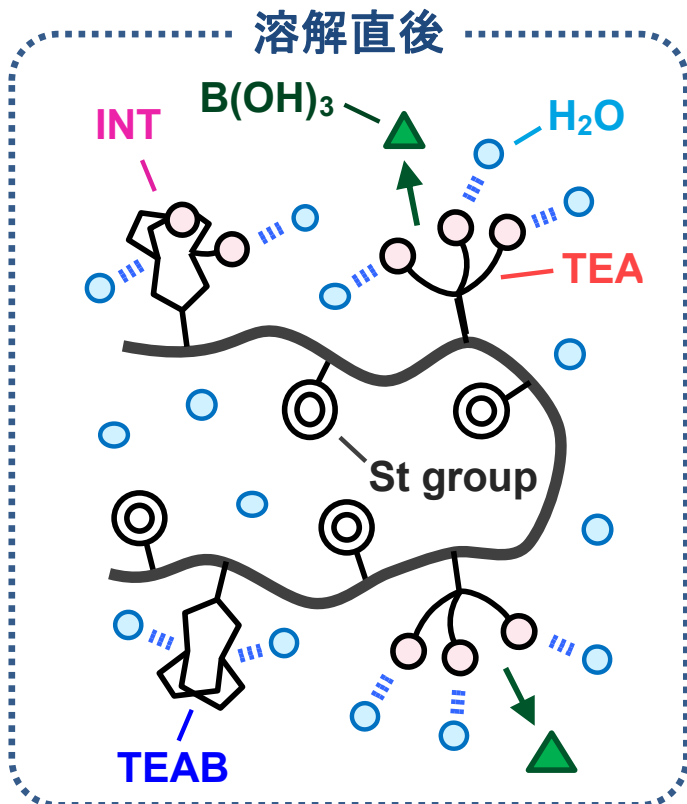


・高分子粉末を水に加えた後の変化



溶解直後

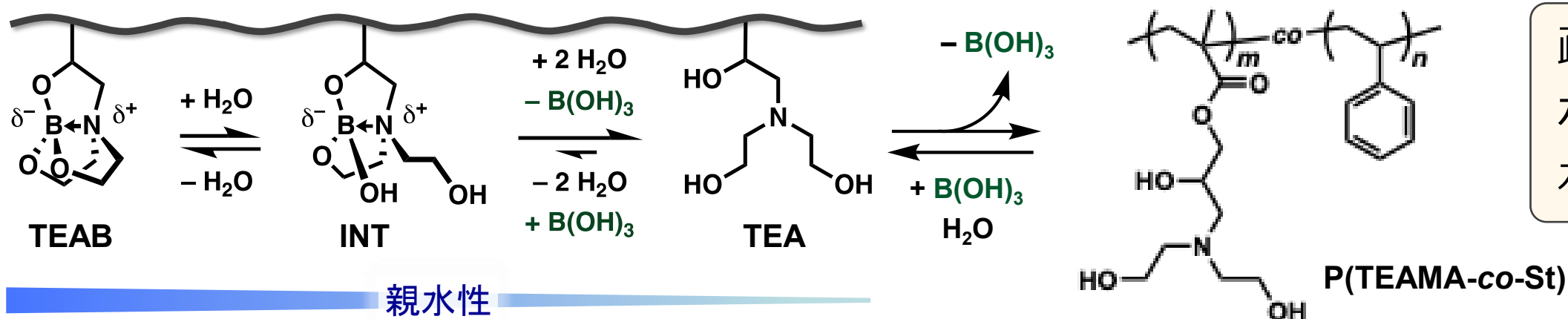
平衡状態



- ・ホウ素化により両親媒性高分子に「**一時的な親水性**」を付与
- ・TEABがTEAと比べて高い極性を有することに由来



# ホウ酸有無における水和状態



疎水構造の割合により  
ホウ酸の有無における  
水和状態を設計可能

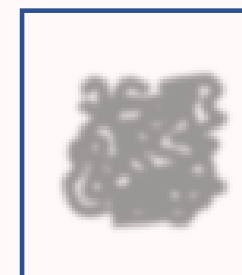
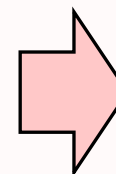
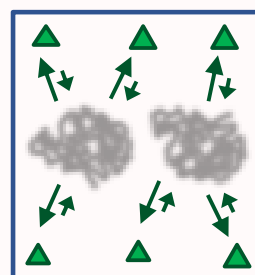
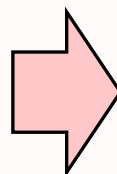
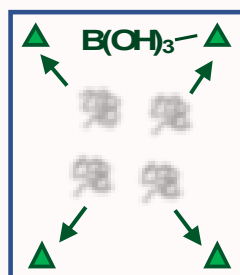
親水性

溶解直後

平衡時

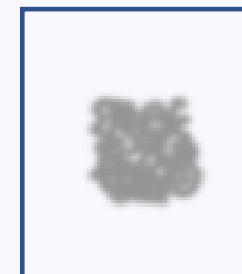
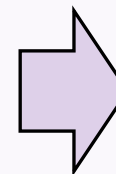
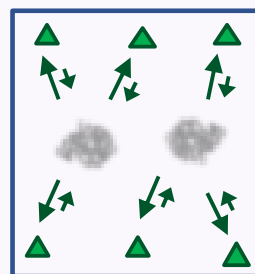
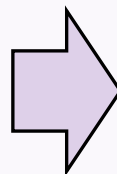
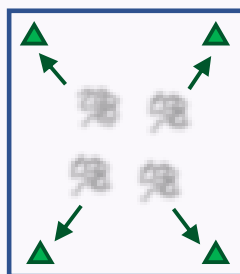
加水分解後(側鎖TEA)

St:  
49%



沈殿 + 懸濁

St:  
40%



懸濁

# 水溶液からの塗布後に不溶化する高分子

高分子水溶液



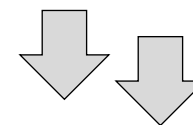
塗布



自然乾燥



水に浸漬 (脱ホウ酸)



ホウ酸有無における親水性を適切に設計することで、  
**水系樹脂のような不溶化挙動**を示す高分子を開発可能



## 想定される用途

- 既存の耐熱高分子材のリサイクル性向上に向けた改質
- 高耐熱性と低環境負荷の双方が求められる高分子材の新規開発  
(厚物部材、接着剤など)
- 界面活性剤を使用しない水系樹脂（コート剤、接着剤など）  
の開発

# 実用化に向けた課題

- ホウ素化後の材料の成形加工条件の最適化
- ホウ素化物の物性データの系統的収集
- より多様な化学構造をもつ樹脂の合成と、  
それによる設計可能な物性幅の解明
- 実用化レベルの高分子量をもつポリマーの合成  
と、  
それを用いた性能検証

## 企業様への期待

- 前半技術は、エンブラ・熱硬化性樹脂を扱う企業様との共同研究を希望
- 後半技術は、水系（水性）樹脂接着剤・コーティングの技術を持つ企業様との共同研究を希望
- 特定材料の代替検証や新規用途の開拓を希望

# 企業様への貢献、PRポイント

- 本資料で紹介したモノマー・ポリマーはいずれも汎用装置で大スケール（ $\geq$ kg）合成可能。
- 耐熱樹脂（エンブラ、熱硬化性樹脂）の再利用化・環境負荷低減を促進している企業様に、新たな材料設計指針を提供できる。
- 本技術と同様のことを達成可能な化学反応は他に無く、独自性の高い分子技術を提供できる。

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：ポリマー化合物、その柔軟性を変化させる方法、それを用いた樹脂の成型方法及び可溶化方法、モノマー化合物、並びにそれを含む重合性組成物
- 出願番号：特願2023-27492  
特開2023-126174
- 出願人：神奈川大学
- 発明者：高橋 明、亀山 敦

# お問い合わせ先

東京科学大学 (Science Tokyo)  
産学共創機構技術プロモーション室

T E L 03－5734－3817

e-mail [consult@cim.isct.ac.jp](mailto:consult@cim.isct.ac.jp)