



ENEOS

CONFIDENTIAL

マルチネットワークエラストマーの開発 「熱可塑性・高耐クリープ性・高破断物性の共存」

2024年5月13日@ナノ構造ポリマー研究協会

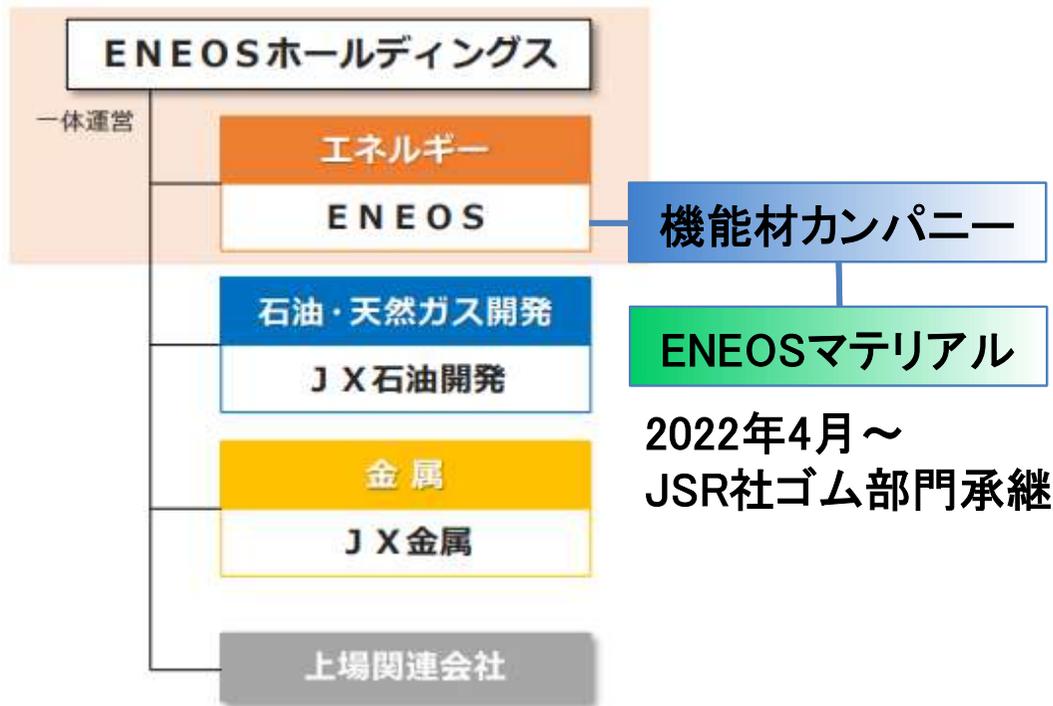
株式会社ENEOSマテリアル

先端素材開発部

知野圭介

ENEOSグループ運営体制

～2024年3月



現体制 (2024年4月～)

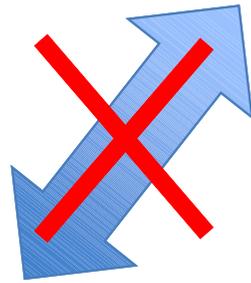


1. 熱可塑性・耐クリープ性・破断物性の関係について
2. 熱可逆架橋技術について
3. 水素結合架橋ゴム(THCラバー・HBE)
4. マルチネットワーク技術
5. マルチネットワークエラストマー

1. 熱可塑性・耐クリープ性・破断物性の関係について

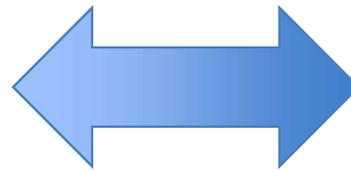
ゴム・エラストマー

熱可塑性
(流動性・リサイクル性・自己修復性)



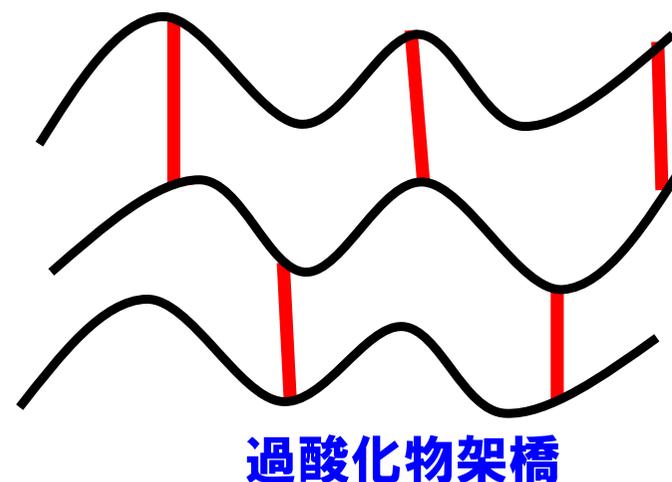
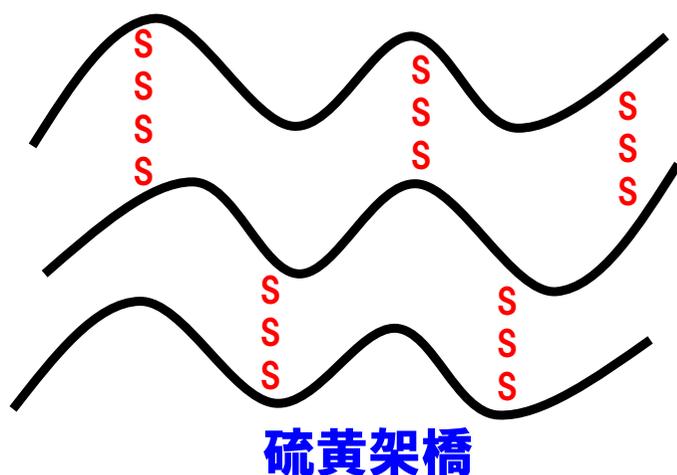
トレードオフ

破断物性
(短時間変形)



耐クリープ性
(長時間変形)

トレードオフ



物性比較 (NR, SBR, EPDM・フィラー未配合系)

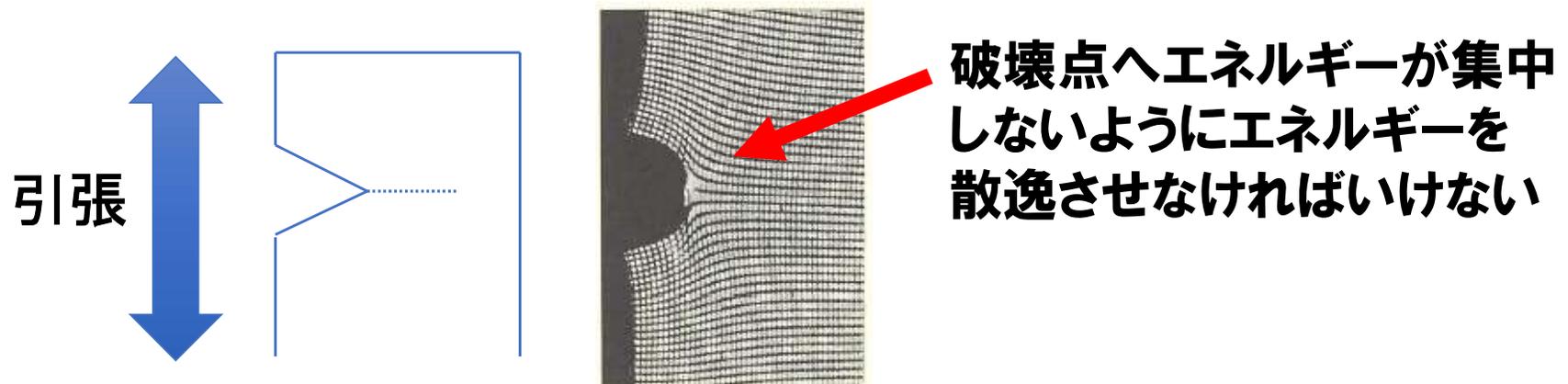
	破断物性 (短時間変形)	耐クリープ性 (長時間変形)
硫黄架橋	高	低
過酸化物架橋	低	高

短時間変形(破断強度) : ヒステリシスエネルギーが支配

Andrews理論

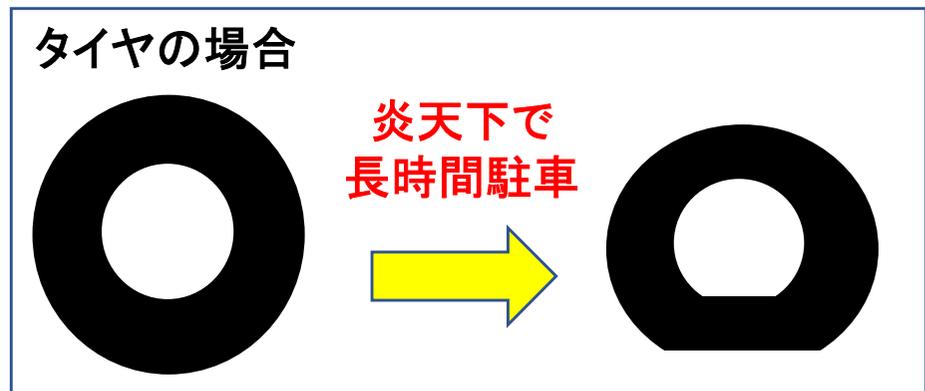
$$T_c(\text{破壊靱性値}) = T_0(\text{分子鎖切断}E) * \text{ヒステリシス関数}$$

⇒ 破壊点において、いかにエネルギー散逸させるかが重要

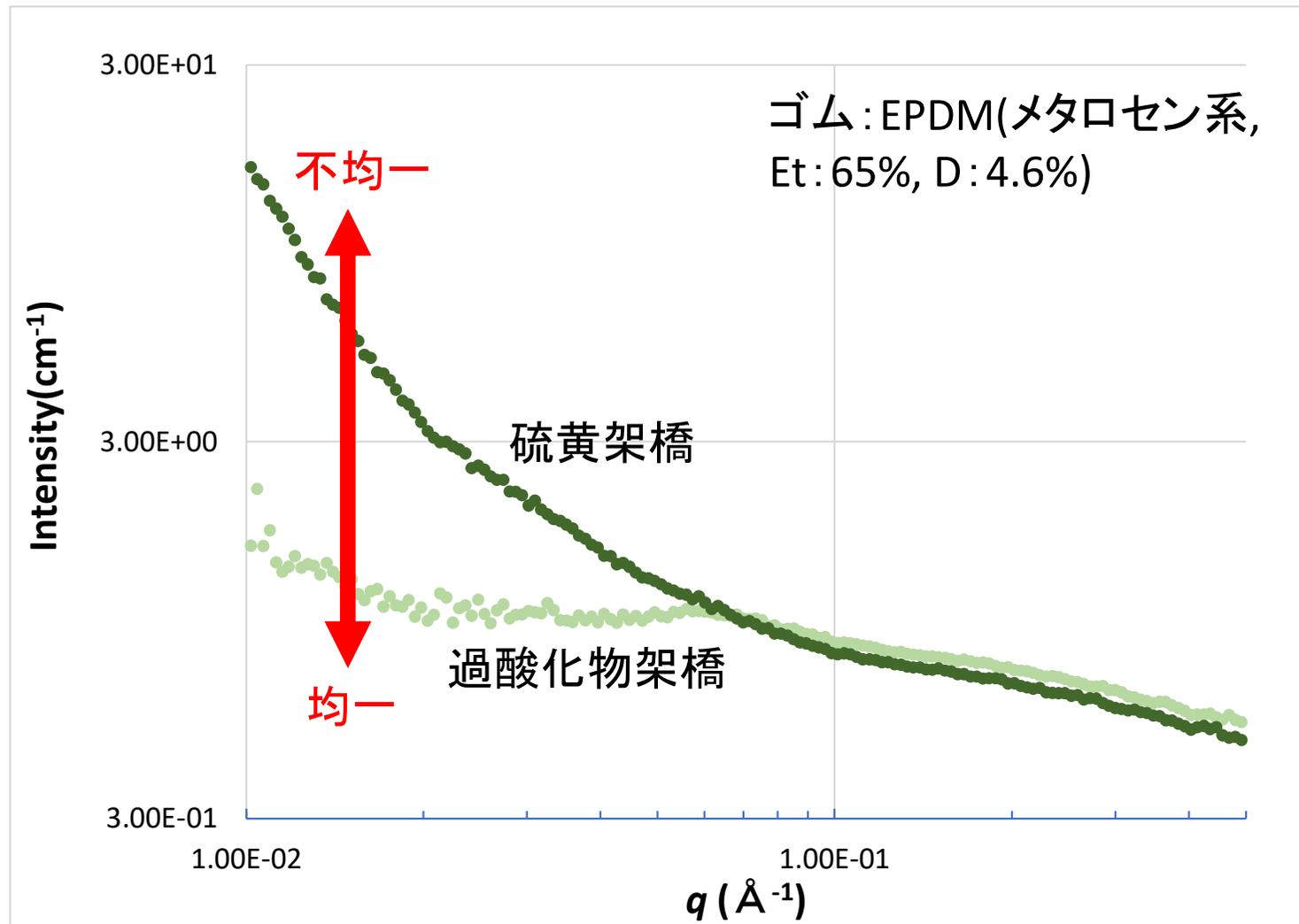


長時間変形(耐クリープ性)

- ・物理クリープ° : 鎖のあそび
- ・化学クリープ° : 鎖の切断
- ・拡散クリープ° : 可塑剤の移動

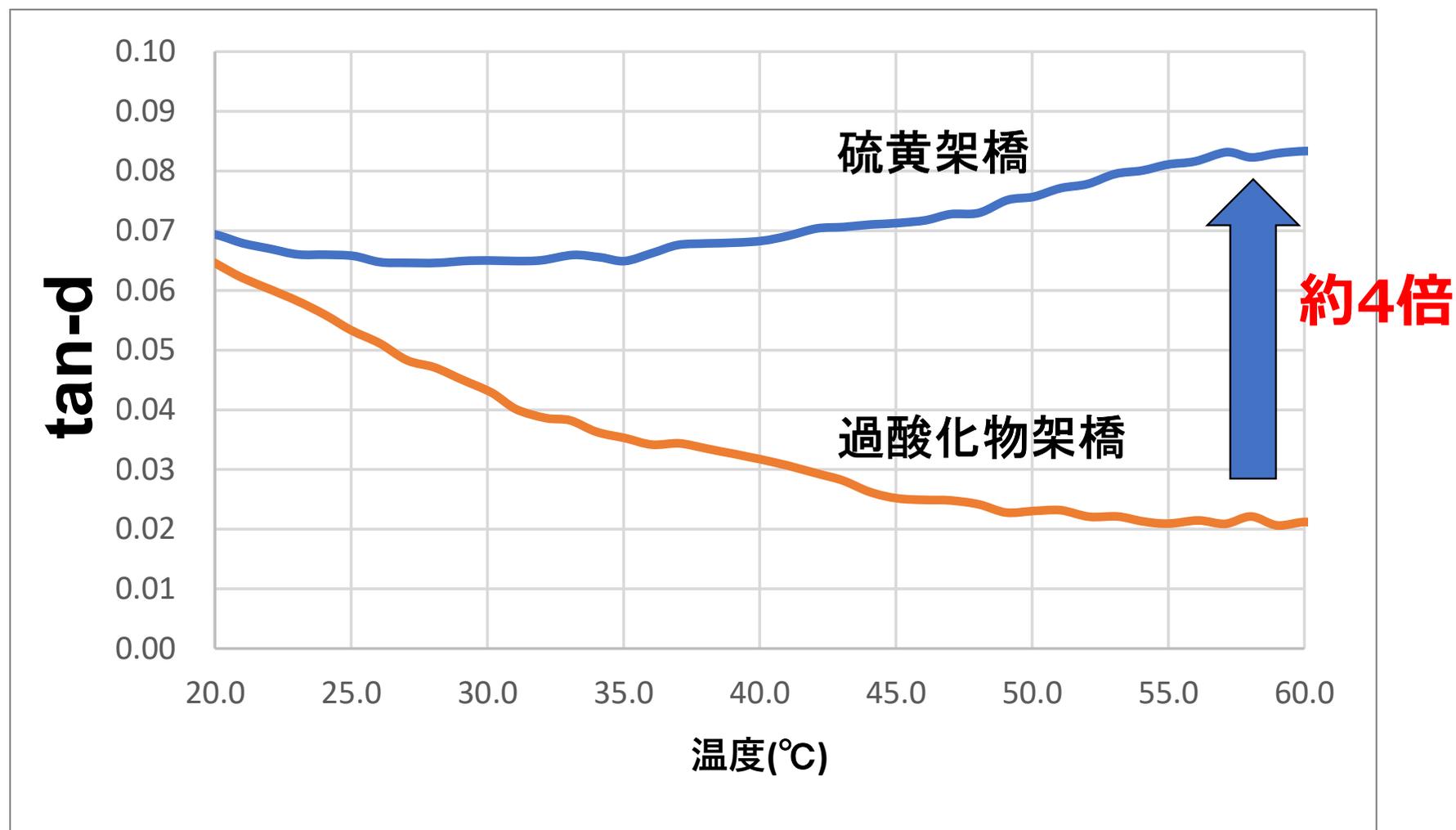


小角中性子散乱(SANS)データ @J-PARC with 茨城大 協力:解析Gr



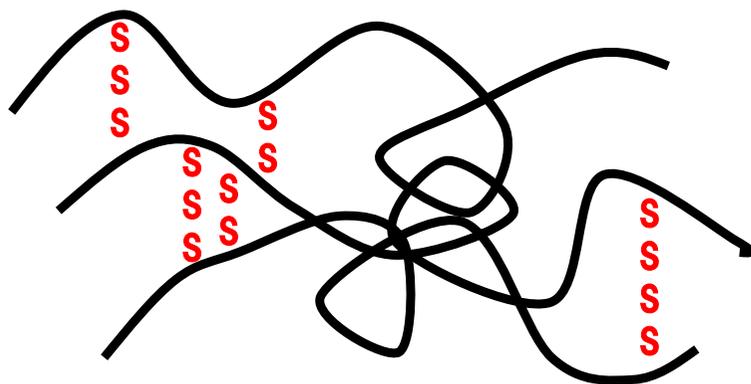
硫黄架橋は過酸化物架橋より架橋配置が不均一

ゴム：EPDM (メタロセン系, Et:65%, D:4.6%)

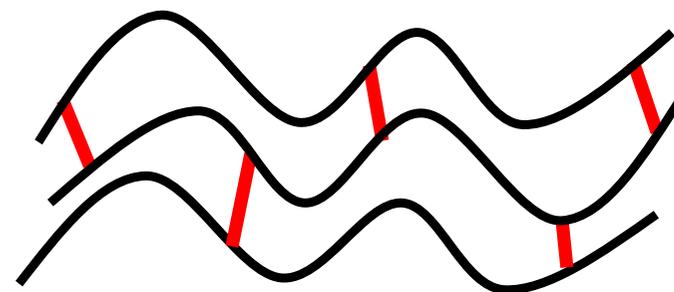


硫黄架橋はヒステリシスエネルギー大

硫黄架橋



過酸化物架橋



架橋配置

不均一

均一

鎖のあそび**多**

鎖のあそび**少**



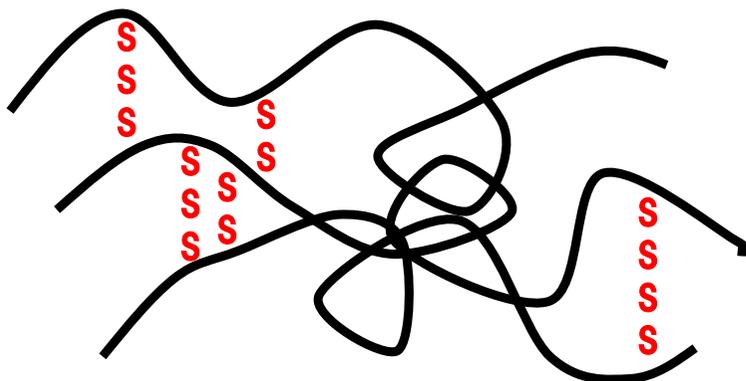
ヒステリシスE**大**

ヒステリシスE**小**

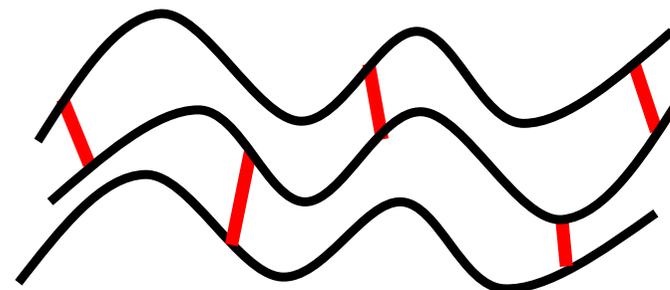
破断強度**高**

破断強度**低**

硫黄架橋



過酸化物架橋



配置

不均一

鎖のあそび多



物理クリープ°大

均一

鎖のあそび少



物理クリープ°小

結合力

S-S結合E低(213 kJ/mol)



化学クリープ°大

C-C結合E高(348 kJ/mol)



化学クリープ°小

圧縮永久歪高

圧縮永久歪低

①短時間変形
(破断強度)



②長時間変形
(耐クリープ性)

トレードオフ

ヒステリシスE↑

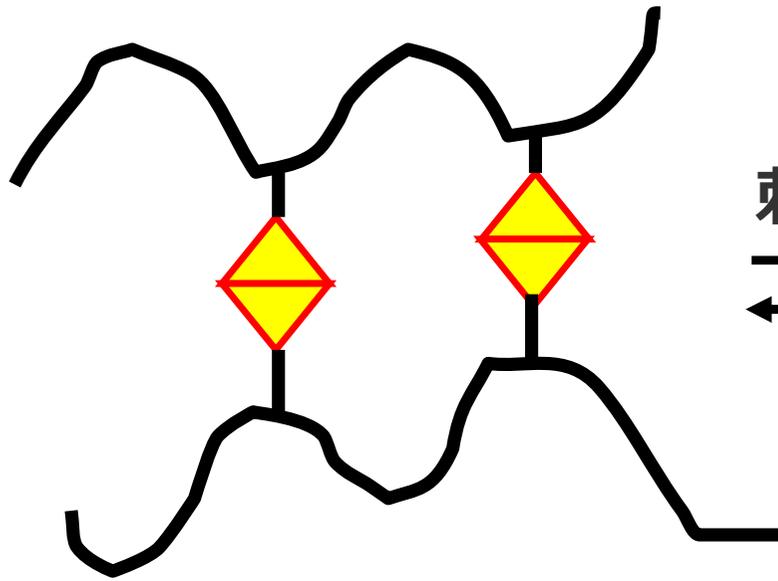
- ・鎖の遊び増やす
- ・架橋のエネルギー吸収能を高める
(相互作用を増やす：水素結合)
- ・架橋鎖を長く

物理・化学クリープ↓

- ・物理クリープ：架橋均一化
- ・化学クリープ：架橋を強く

2. 熱可逆架橋技術について

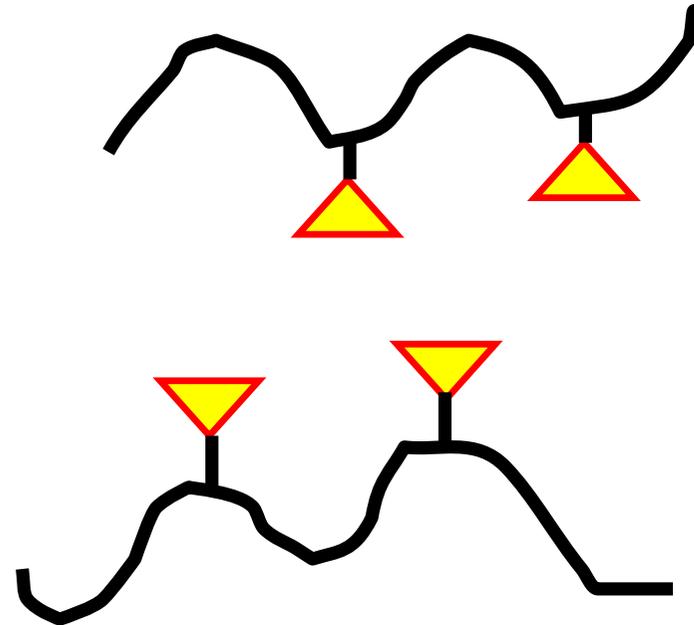
使用時



刺激(熱)



成形時



相互作用が減少→再成形可能

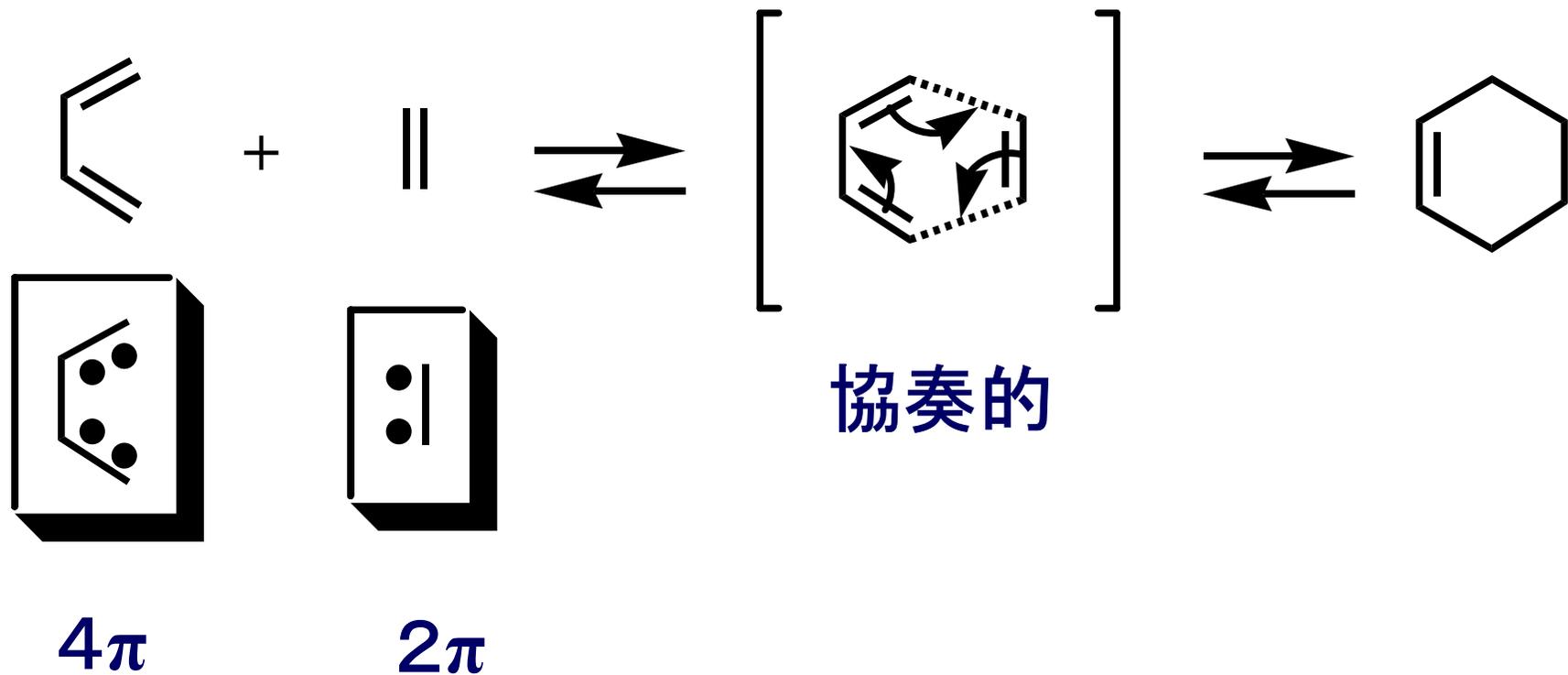
- ①動的共有結合(Dissociative)
- ②動的共有結合(Associative)=ビトリマー
- ③イオン結合
- ④水素結合

①熱可逆的架橋：動的共有結合(Dissociative)の例

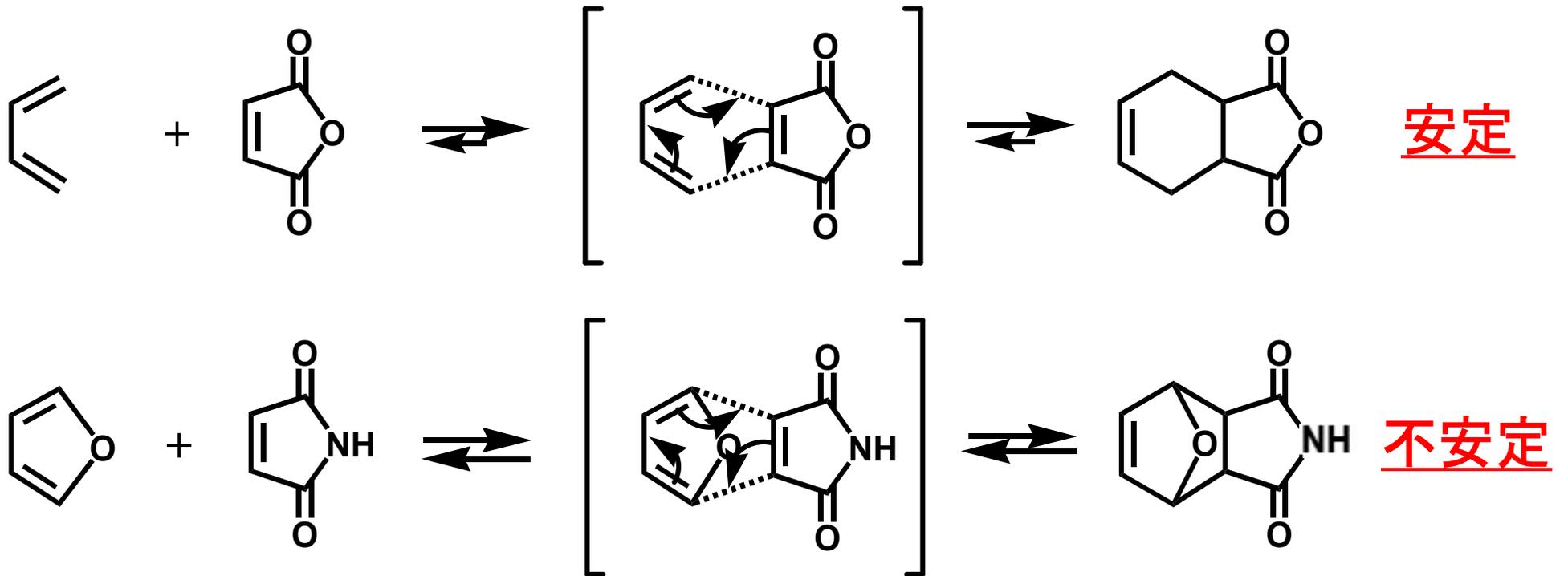
- 1) Diels-Alder反応
- 2) エステル結合
- 3) イミン結合
- 4) 4級アンモニウム塩
- 5) ジスルフィド結合
- 6) N-O結合

1) Diels-Alder反応

4π+2πの環形成反応

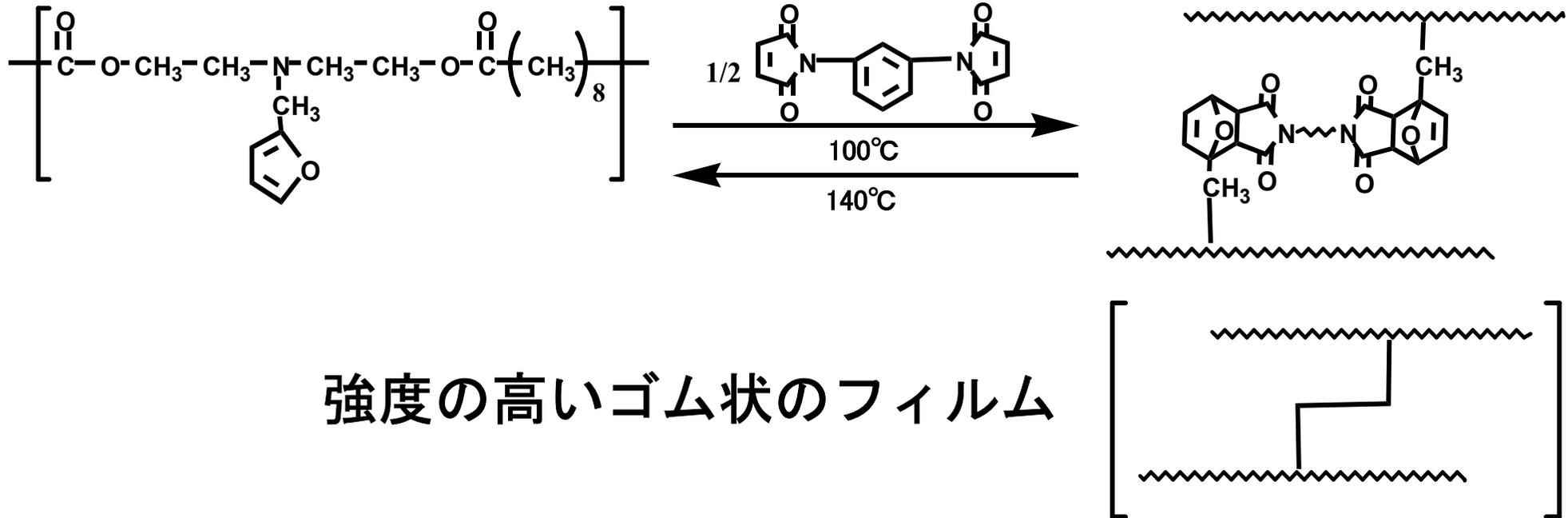


1) Diels-Alder反応

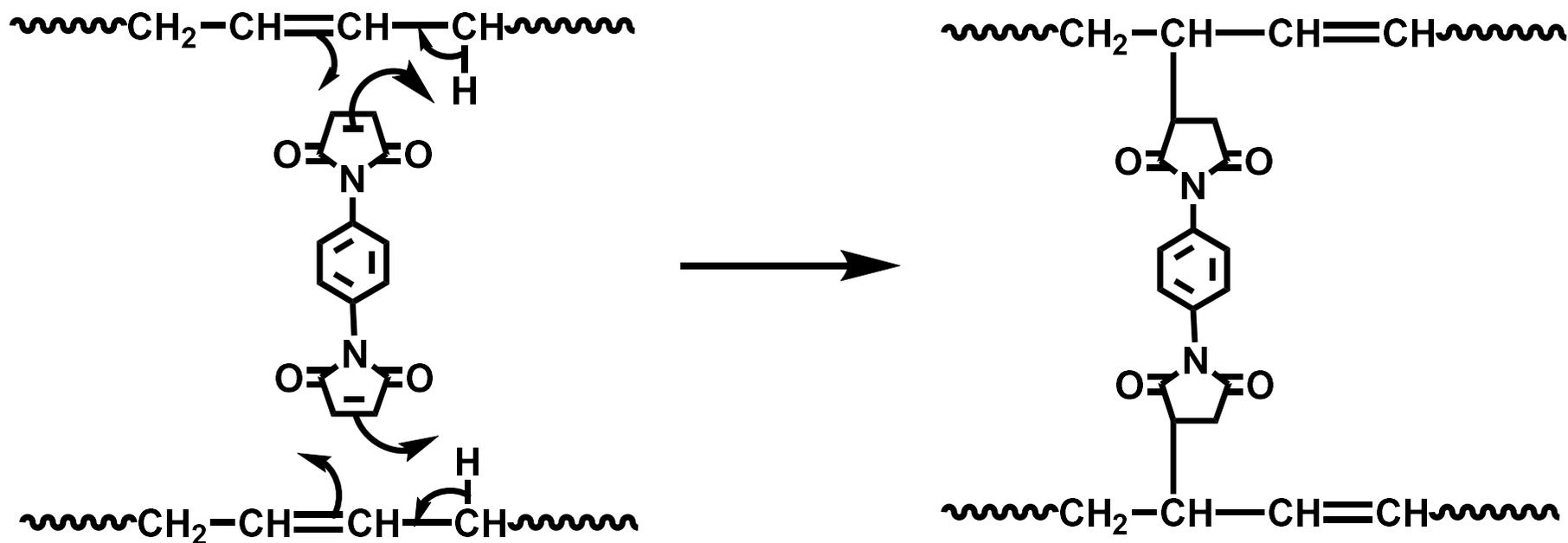


1) Diels-Alder反応

フラン-マレイミド系

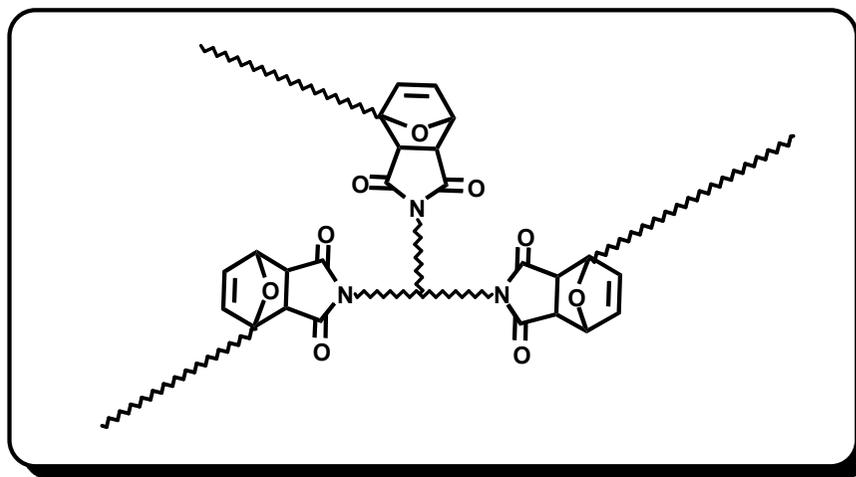
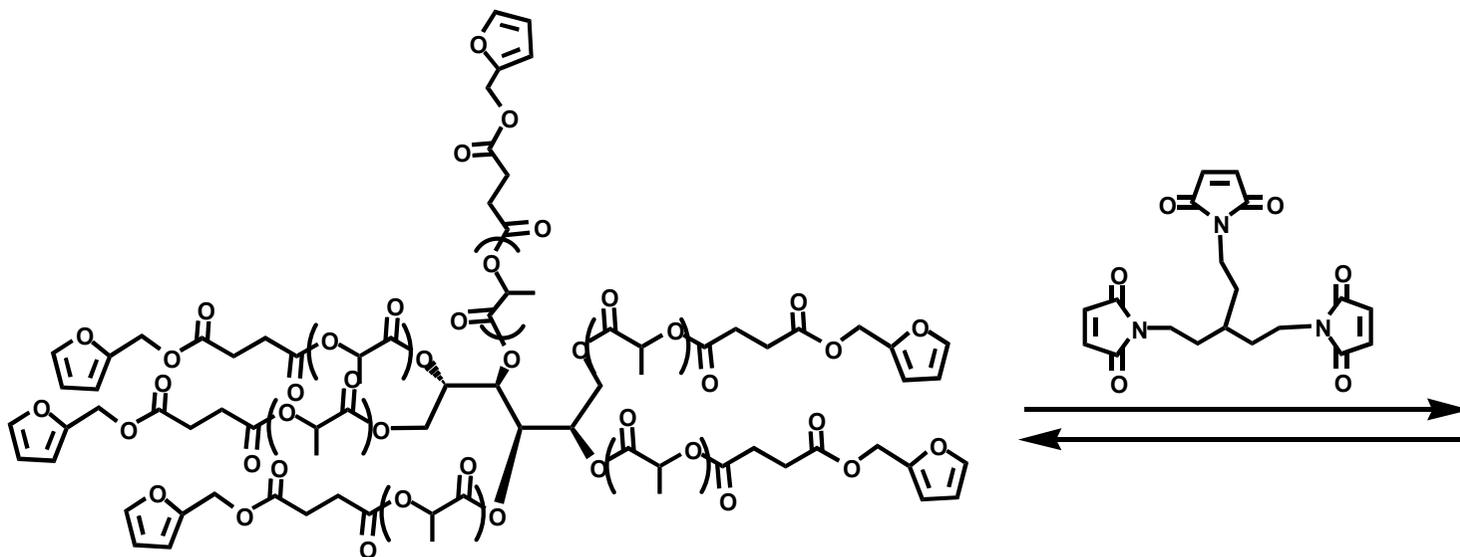


- ・飽和系ポリマーに対しては非常に有用
- ・主鎖に不飽和結合を持つとエン反応により永久架橋

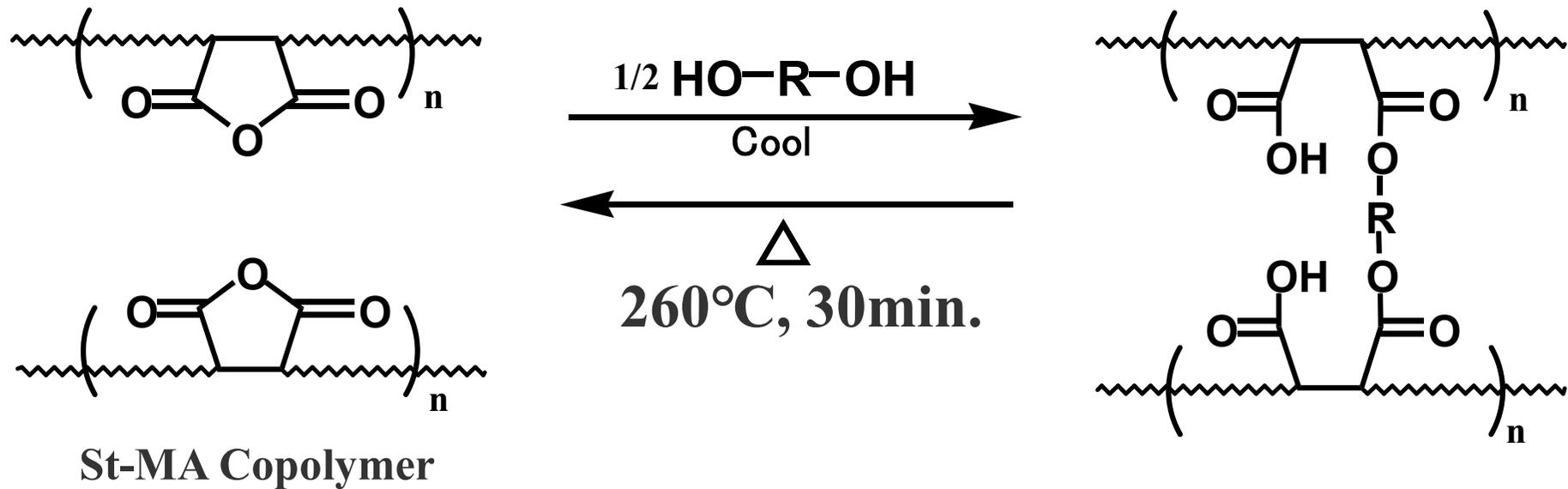


永久架橋

NEC 形状記憶性とリサイクル性を併せ持つバイオプラスチック



2) エステル形成反応

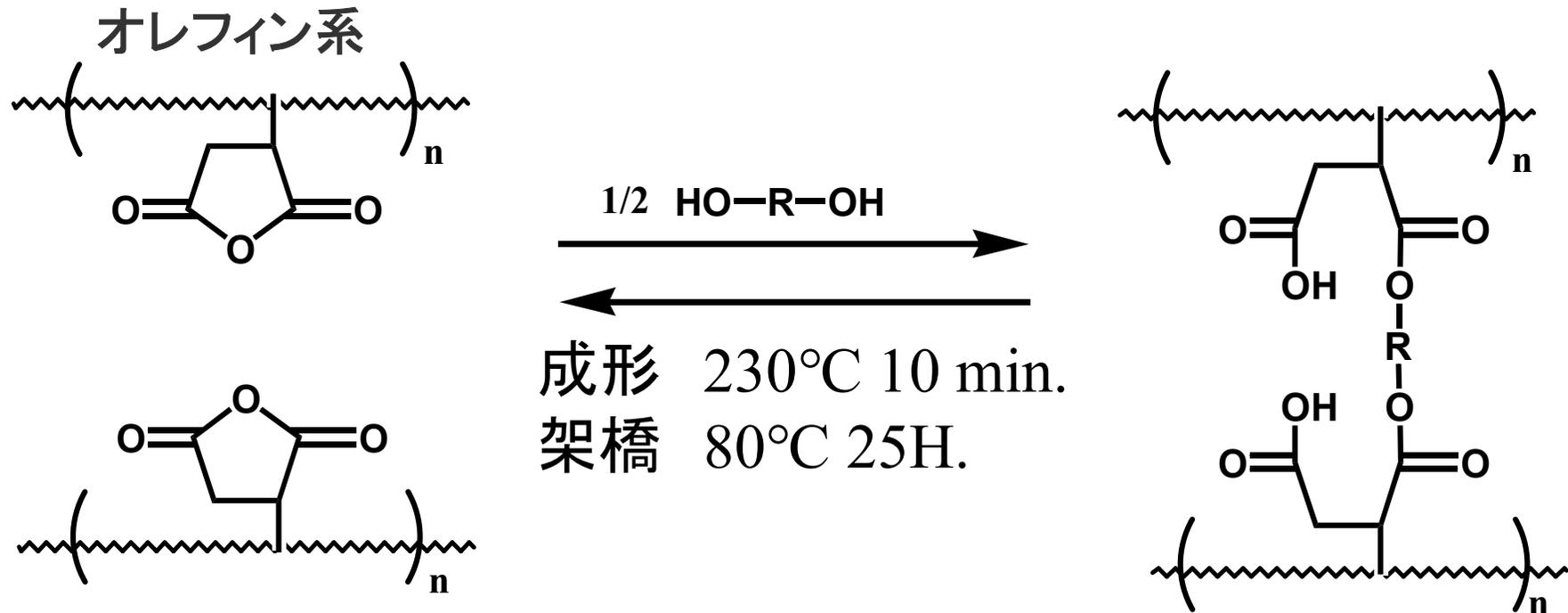


解架橋することを溶解性、流れ性、赤外分光分析などから確認

高温のため、側鎖や主鎖の分解が起こり、
リサイクルの回数に従って、物性が急激に低下

2) エステル形成反応

三菱ケミカル (TRCポリマー)



80%の物性回復

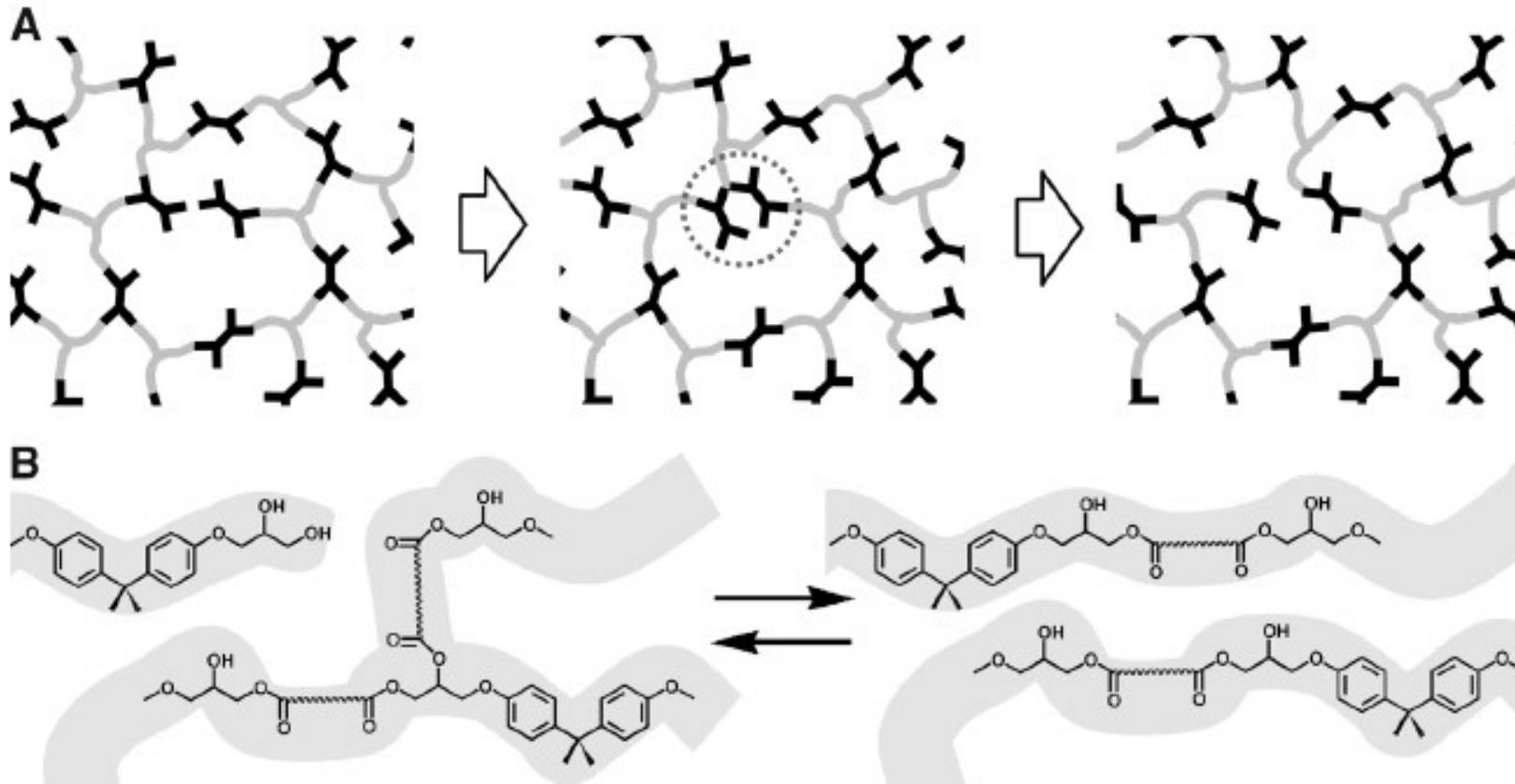
清水雄一, 化学と工業, **54**, 32 (2001). 特開2003-192855, 他8件

Dissociative動的共有結合は、完全に架橋が外れるためクリープが起こる

②熱可逆的架橋：動的共有結合(Associative)の例

24/82

- ・Leiblerらは、2010年代初頭に、外部刺激下で結合と解離が同時に起こり、完全に解離することがないAssociativeな可逆的共有結合を架橋に用いたビトリマーを開発
- ・不溶性でありながら、高温にすると容易に加工でき、自己修復性を有する。



結合の組み換えが頻繁に起こっており、クリープや応力緩和が起こってしまう

Montarnal, D.; Capelot, M.; Tournilhac, F.; Leibler, L. *Science* **2011**, 334 965.
Reprinted with permission from Science. Copyright 2011 Science.

アイオノマー樹脂

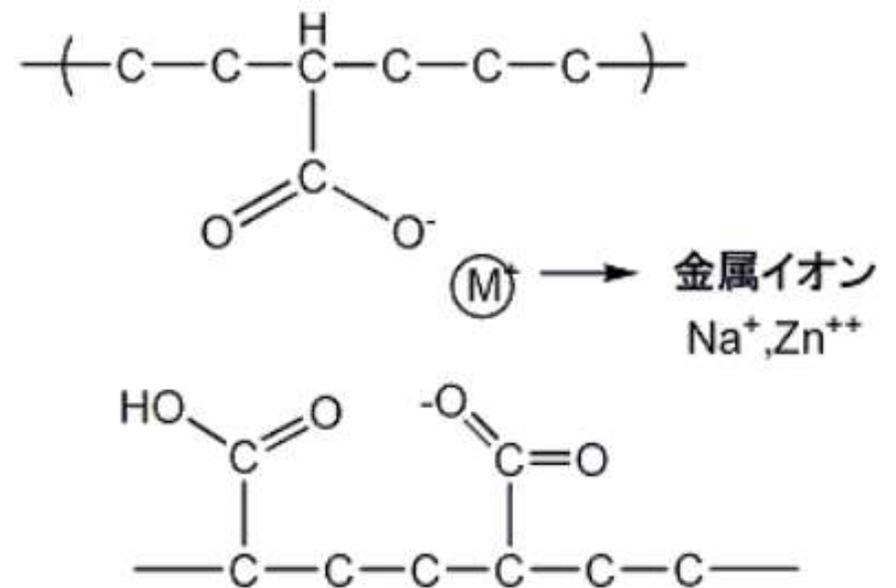
- ・エチレン-(メタ)アクリル酸共重合体の分子間をナトリウムや亜鉛などの金属イオンで分子間結合したポリマー
- ・1964年にDupont社が工業化(SURLYN A)

性質

- ・融点が低く、溶融粘度が高い
- ・アルミニウム箔・紙・ナイロンへの接着性がよい
- ・透明で光沢がある
- ・強靱で弾力性、耐摩耗性がある
- ・耐油性、耐薬品性、着色性に優れる

用途

- ・多層フィルム・シート
- ・アルミニウム箔とのラミネート



イオン凝集構造の解離によりクリーブが起こる

水素結合とは

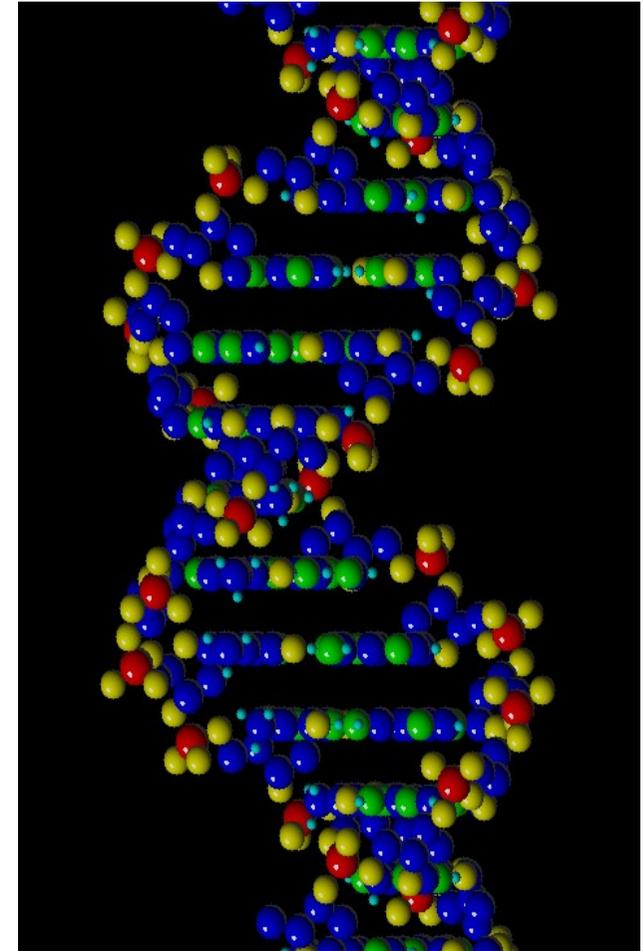
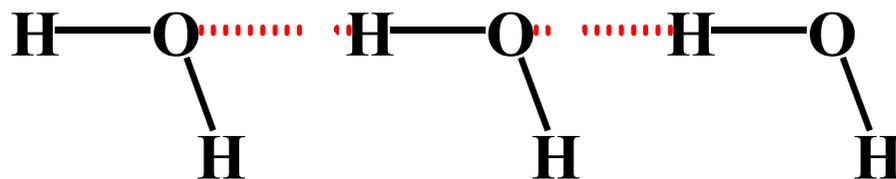
電気陰性度の高い原子と分極の大きな水素原子との間の引力的相互作用

強さ: S結合の 1/6~1/15



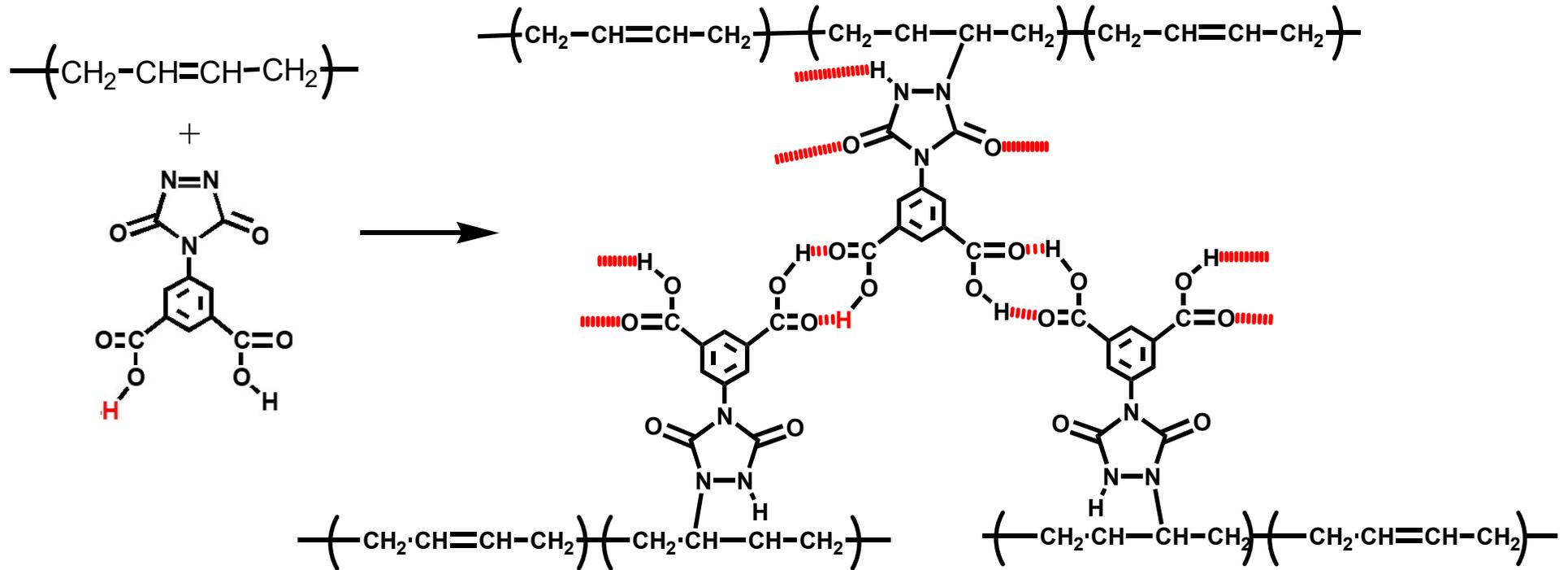
- ・熱可逆性、コントロールが可能
- ・集合することにより強い力を発揮

水の水素結合



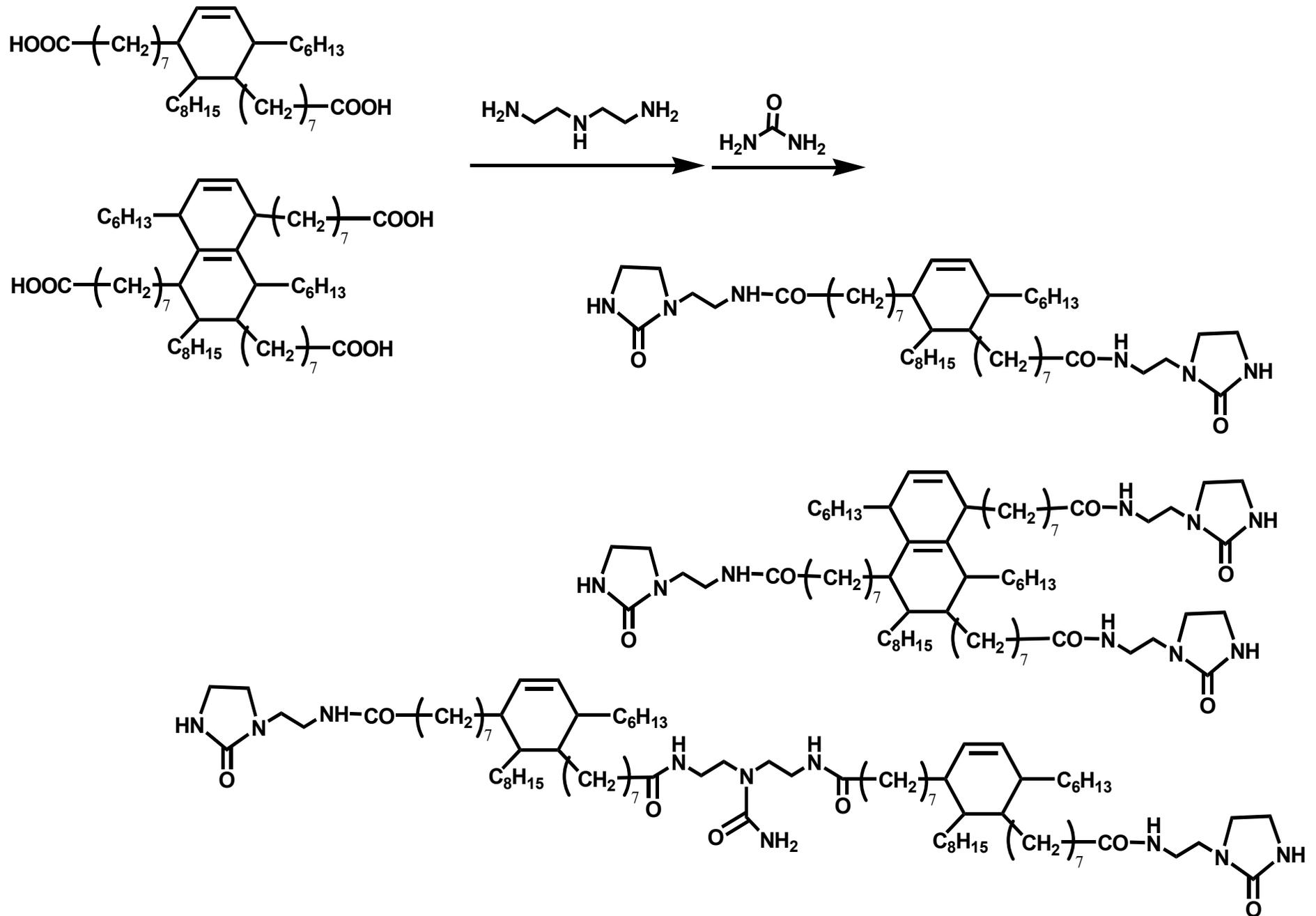
水素結合を巧妙に利用したDNAの二重らせん

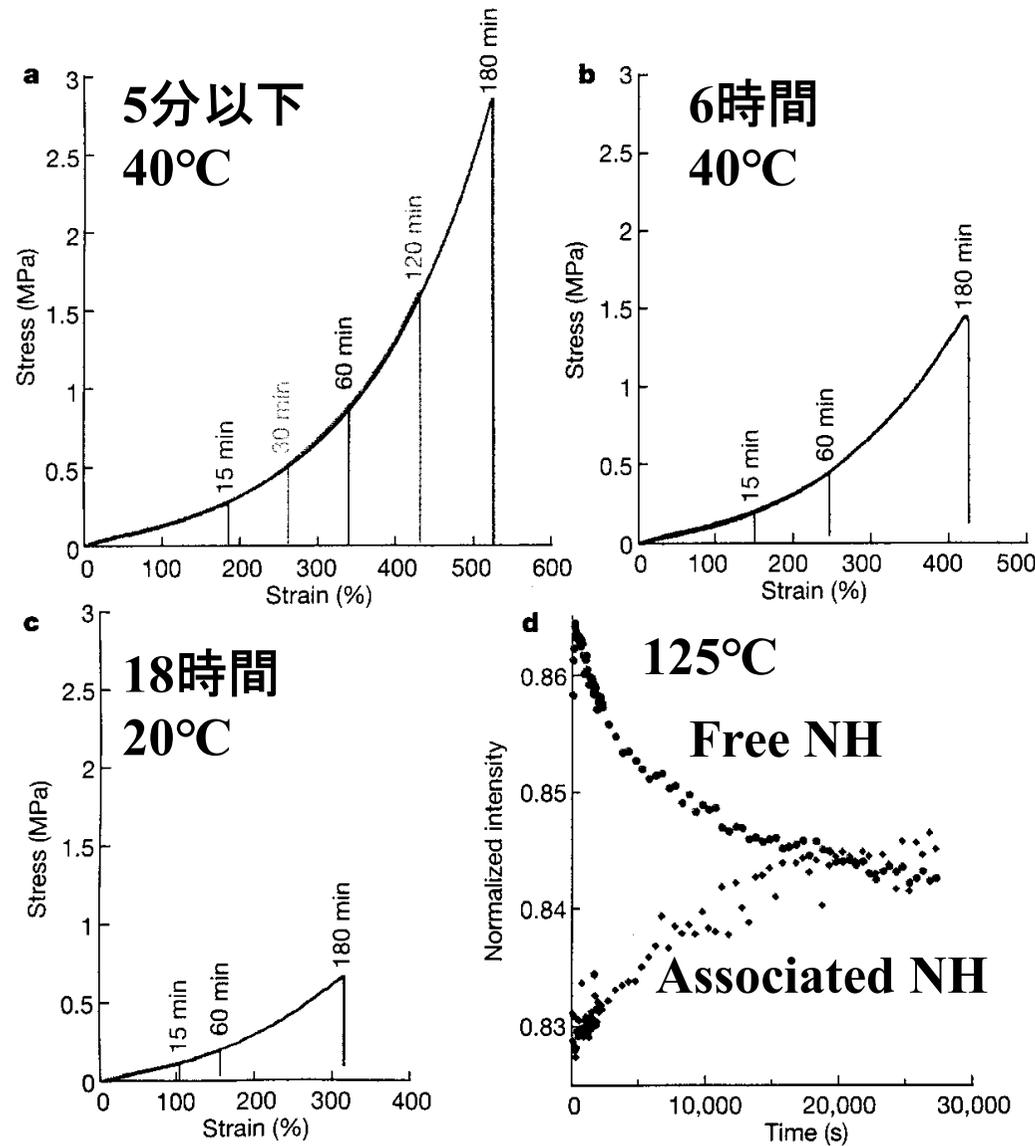
エラストマーの水素結合架橋の例



J. Hellman, C. Hilger, R. Stadler, *Polym. Adv. Tech.* **5**, 763 (1994).

水素結合が弱く強度が不十分、コストが高い

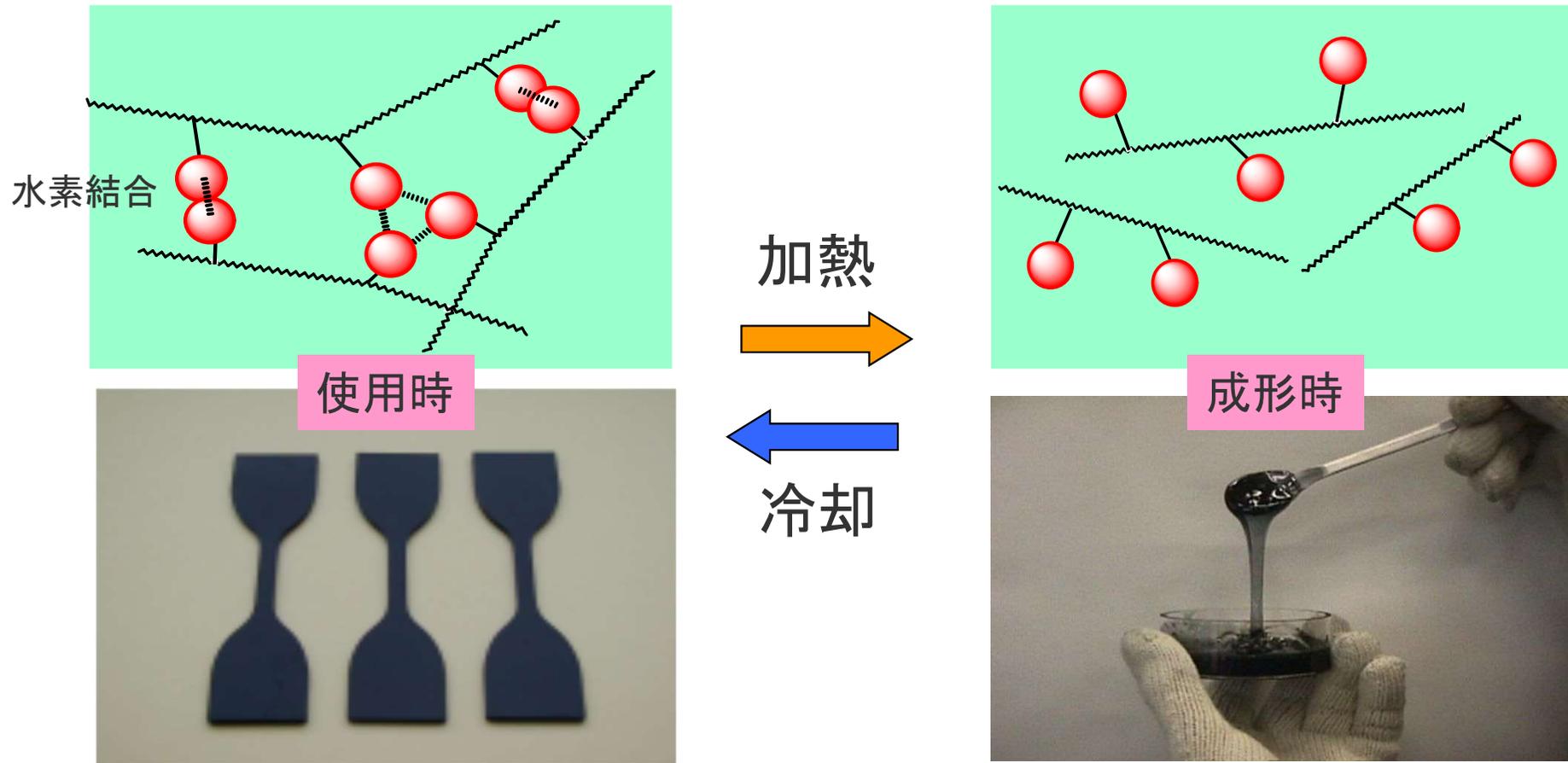




$T_b=3.5\text{MPa}$, $E_b=600\%$, $T_g=28^\circ\text{C}$, 160°C 以上で流動
アルケマから販売⇒中止(クリープ?)

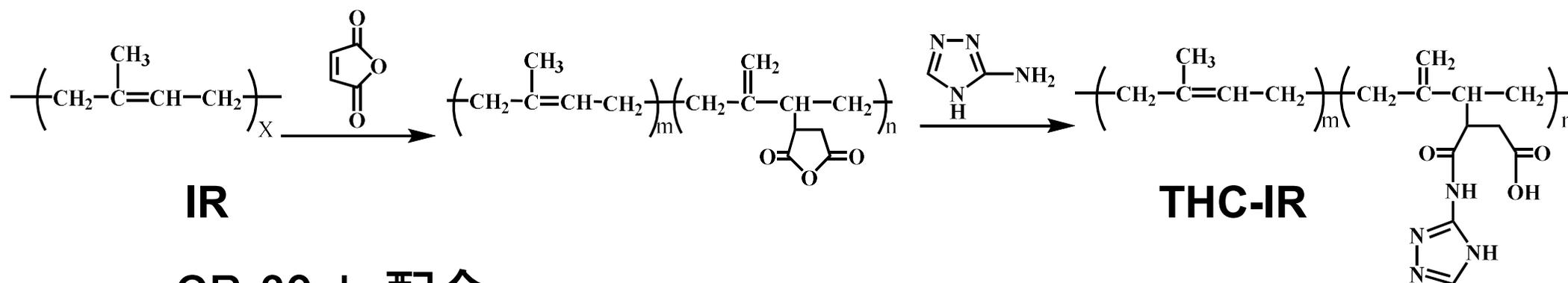
3. 水素結合架橋ゴム(THCラバー・HBE)

『リサイクルできる加硫ゴム』



- 架橋に可逆的な水素結合を応用
- 使用時には加硫ゴムと同等の物性
- 加熱すると再成形が可能

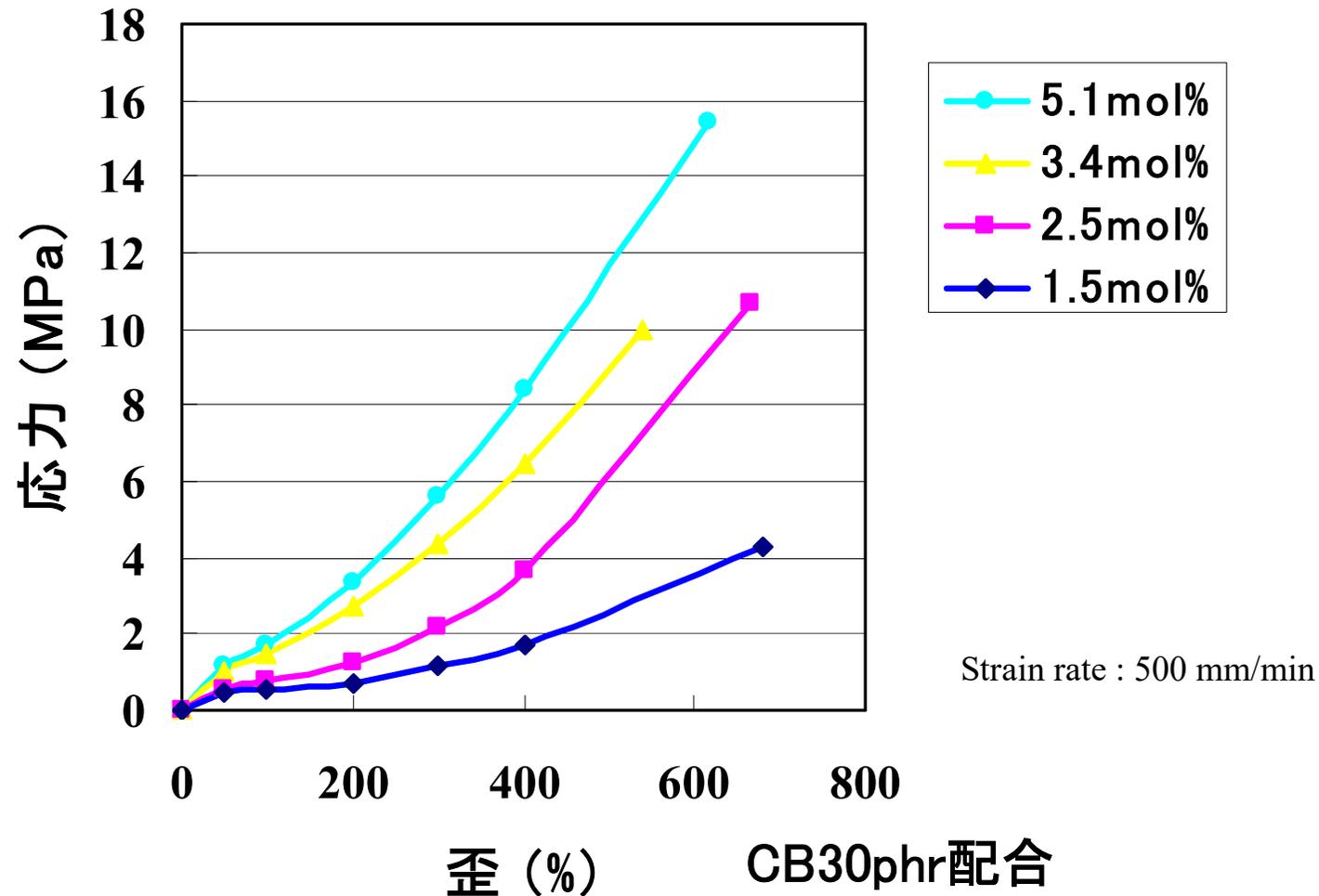
- 1. 加熱により性能を落とさず、リサイクル可能
熱可塑性、加硫工程が不要**
- 2. 加硫ゴムに近い性能を持つ
柔軟性、低温特性、フィラー補強性**
- 3. 広い応用性を持つ
様々なゴムに適用可能、接着性、透明性**



CB 30phr配合

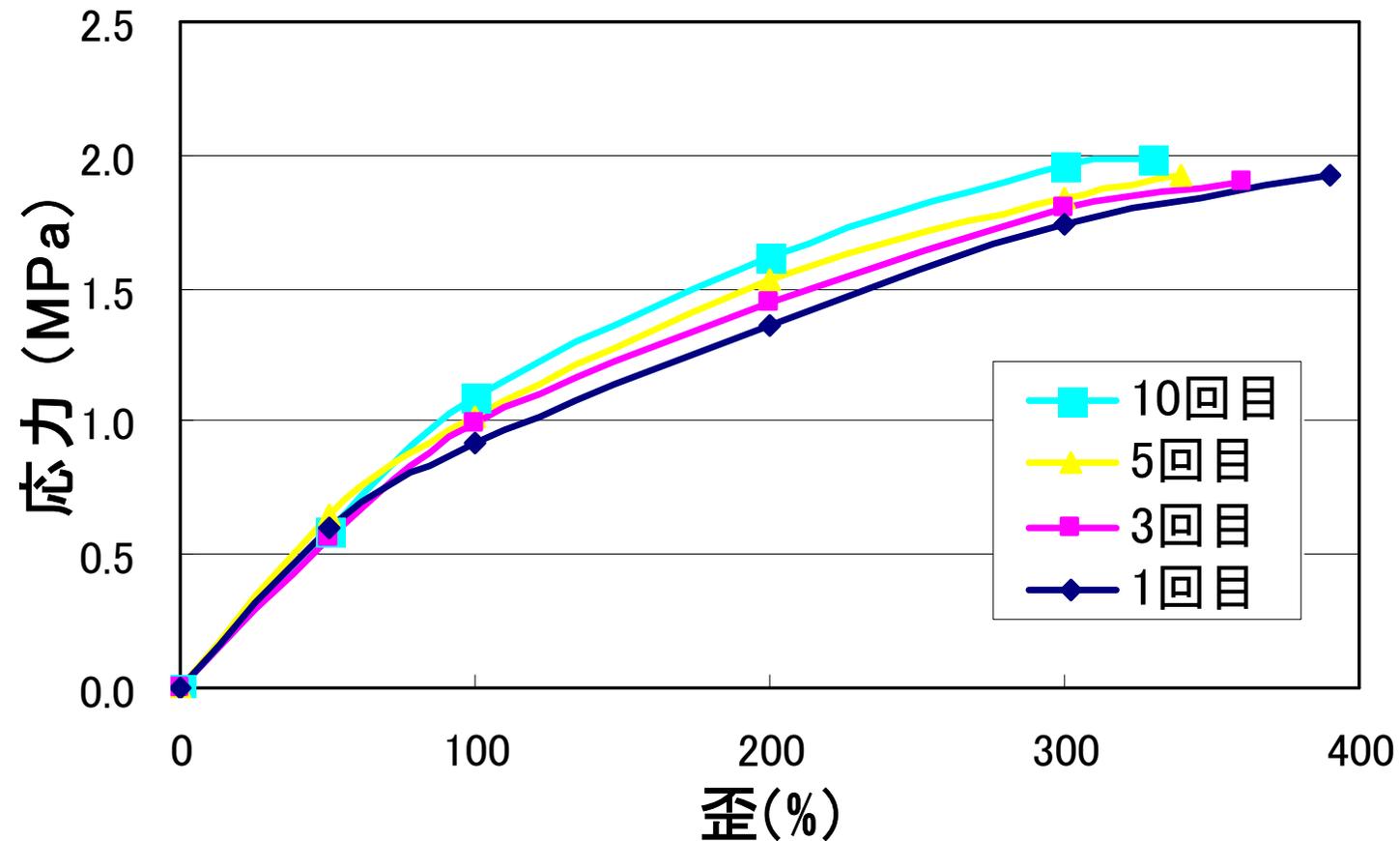
	熱可逆ゴム (IR)	加硫IR
架橋結合	水素結合	イオウ結合
架橋量	5.1mol%	1.0phr
100%モジュラス(MPa)	1.7	1.3
300%モジュラス(MPa)	5.6	6.1
破断強度(MPa)	15.4	30.1
破断伸び(%)	616	630
リサイクル性(200°C)	OK	NG

- ① リサイクル性を確認(10回以上)
- ② 低変形時のS-Sカーブは加硫ゴムと同等
- ③ 大変形時の応力は低い

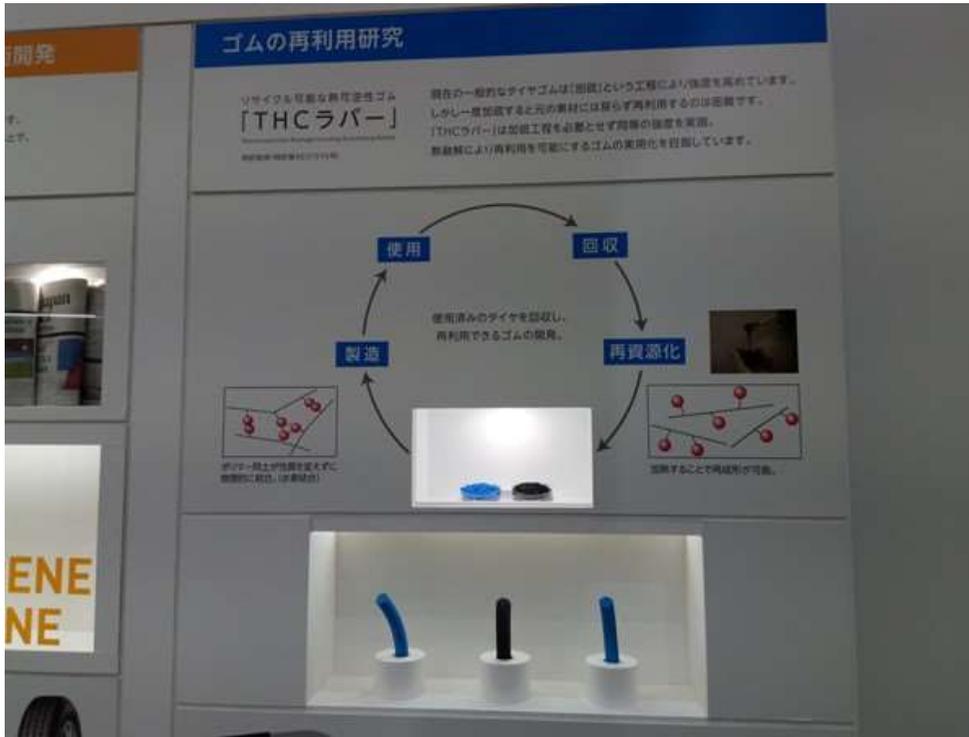


導入率の増加に従って、応力歪み曲線の傾きが増加
→水素結合による架橋部位の増加

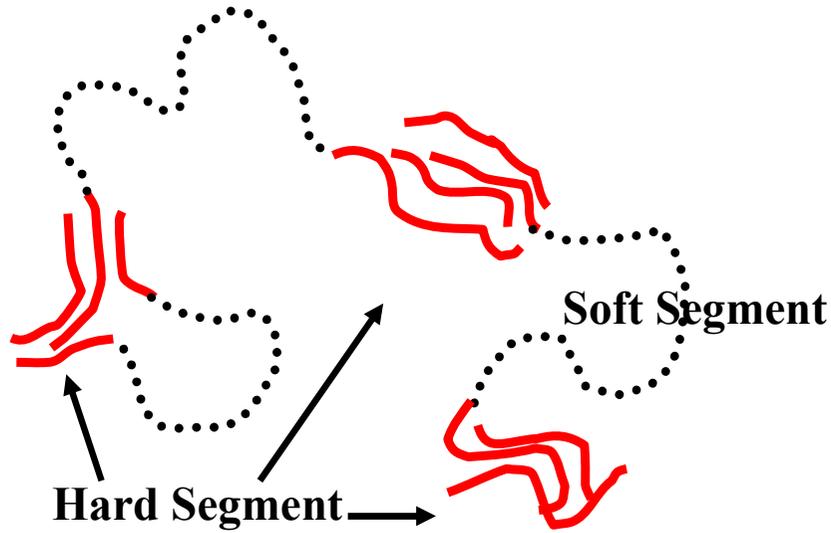
繰り返しプレス後のTHC-EPM



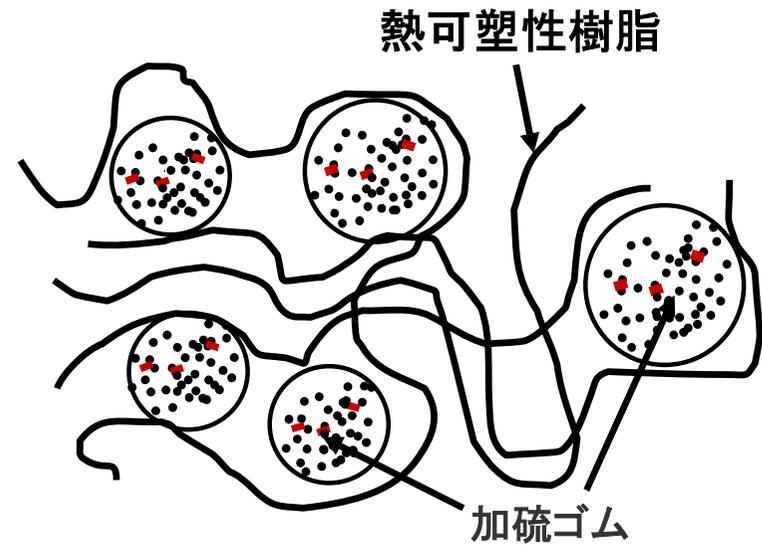
プレスを10回繰り返した後も、物性の変化が少ない
例) $T_B +3\%$ 、 $E_B -15\%$ (10th vs. 1st)



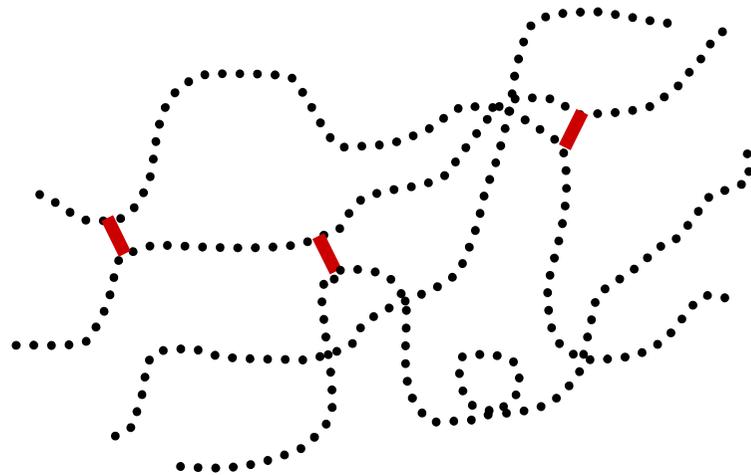
第46回東京モーターショー2019 @東京ビッグサイト



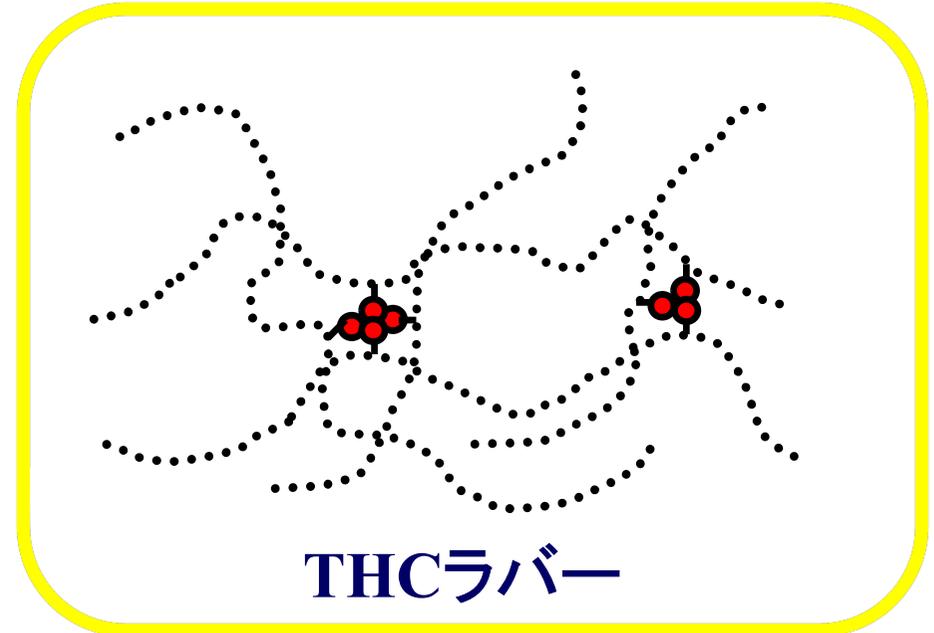
非アロイ系TPE (ブロックポリマー)



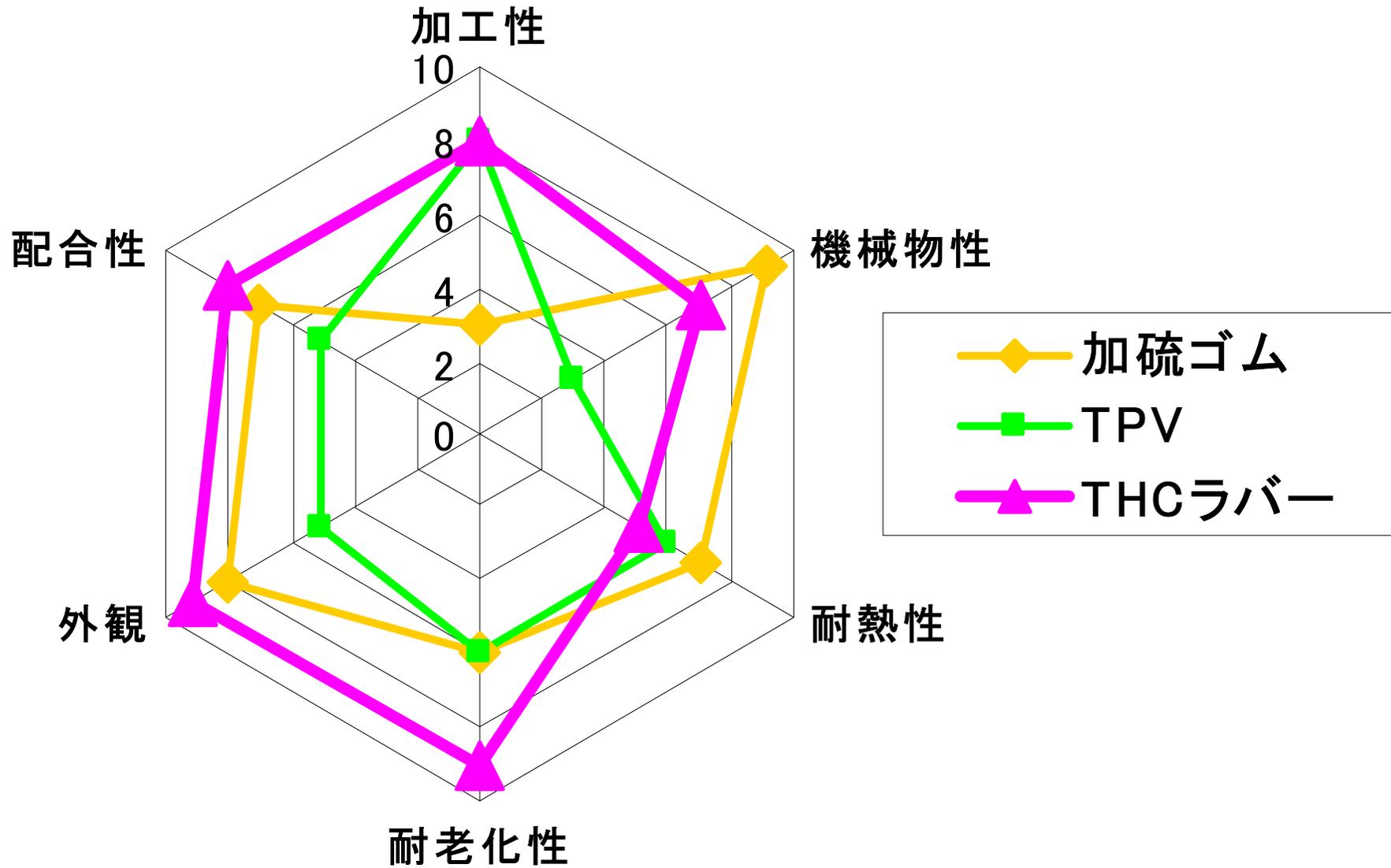
アロイ系(ポリマーブレンド)



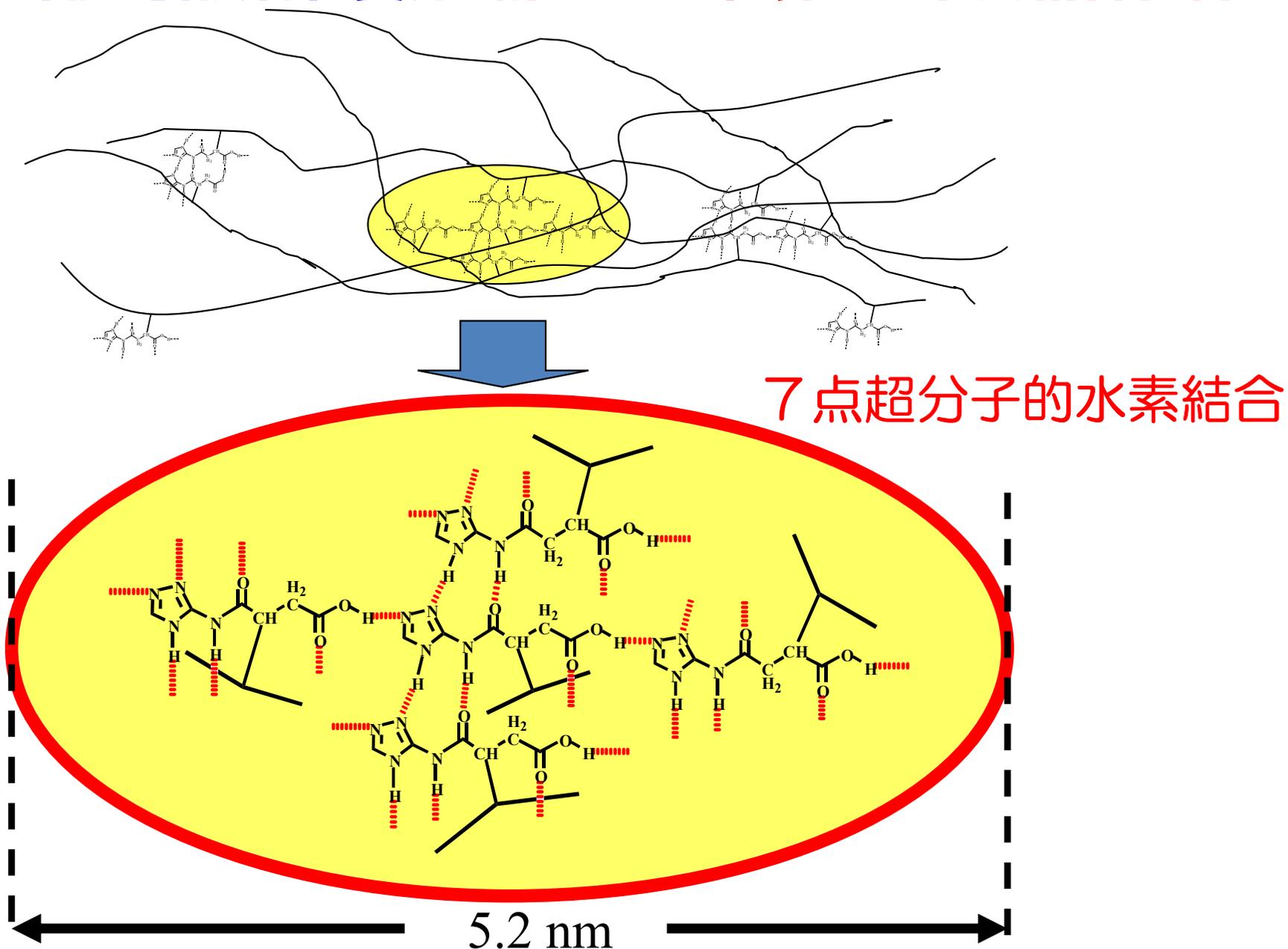
架橋ゴム

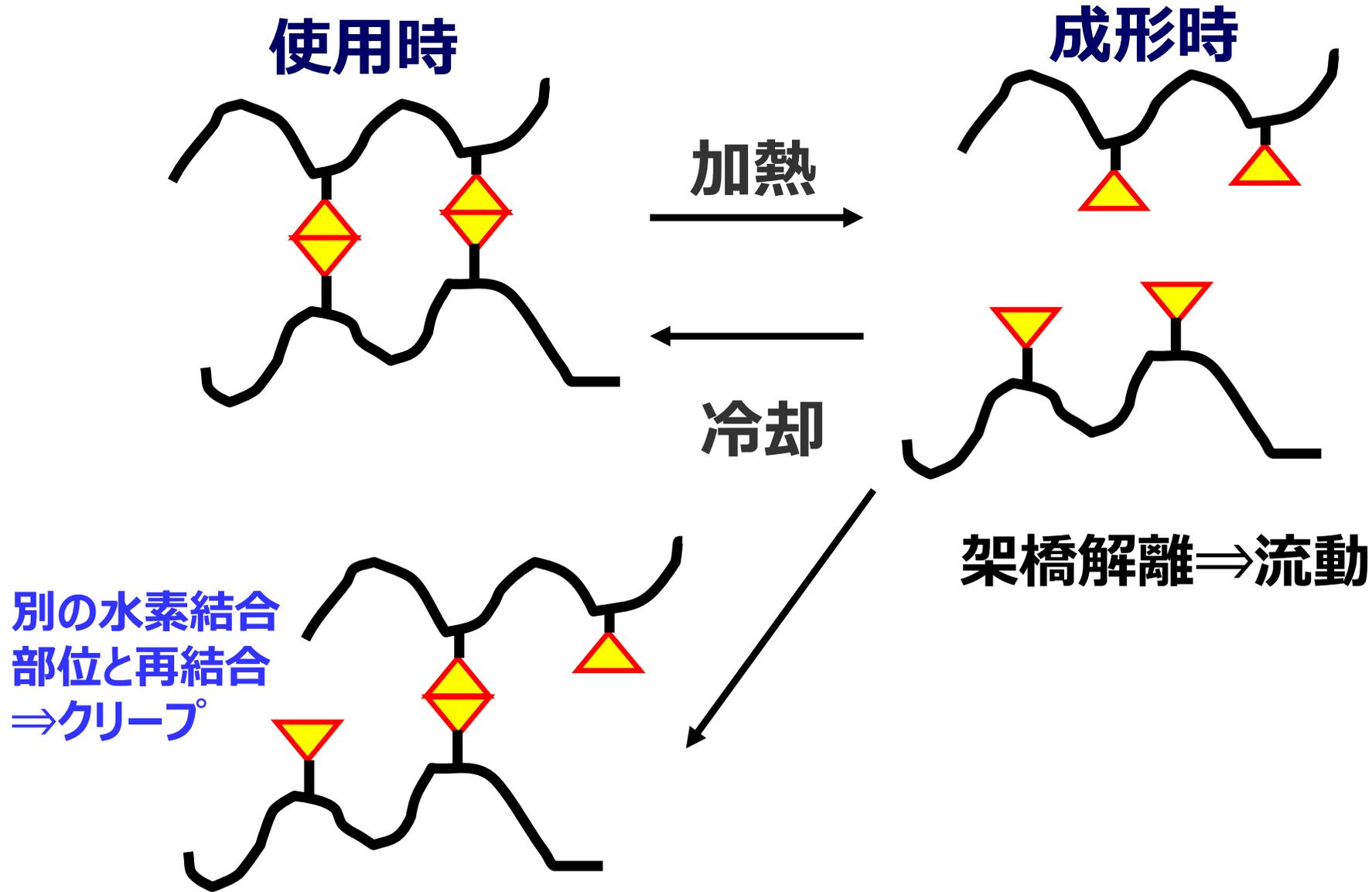


THCラバー

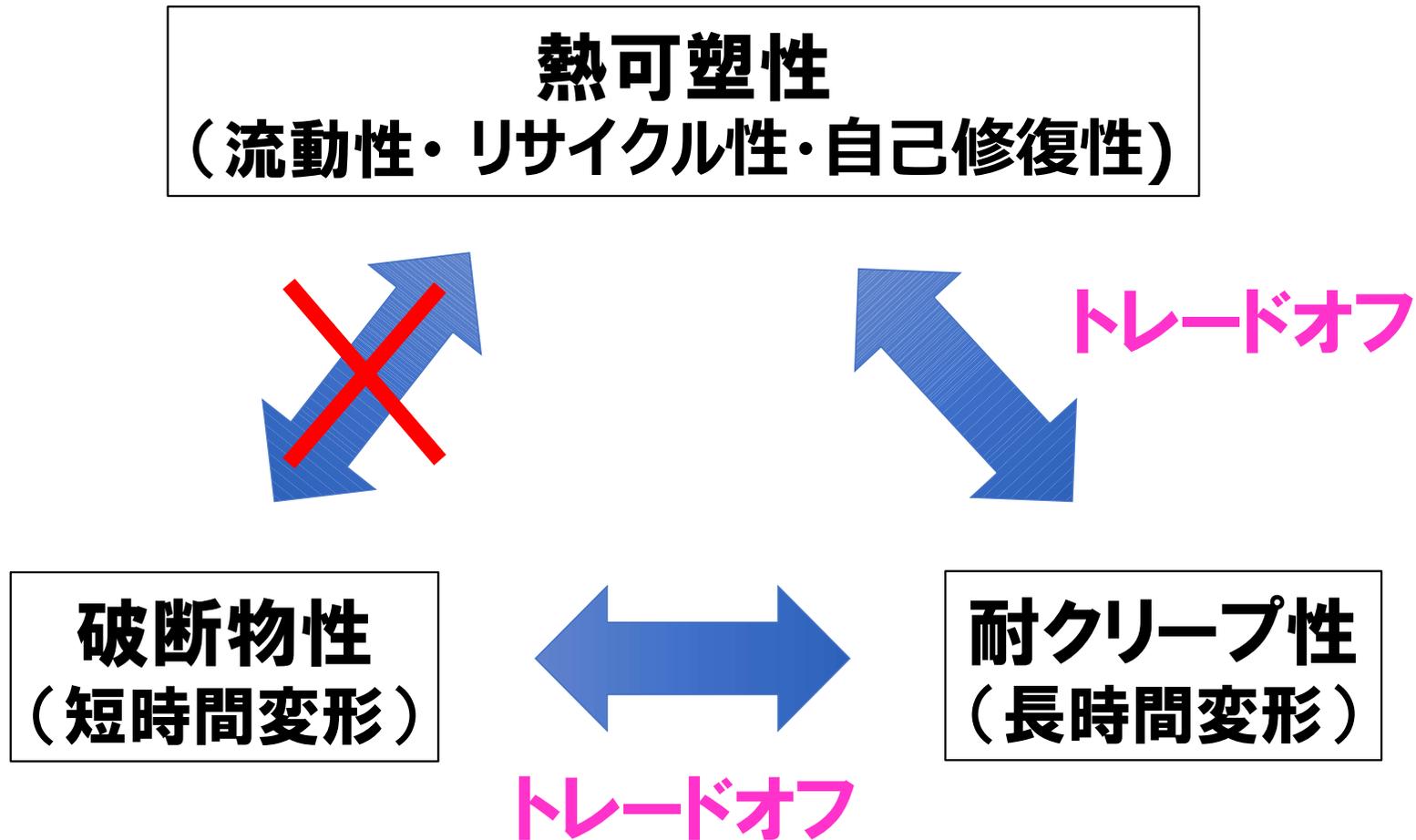


リサイクル可能・引張物性良好 耐クリープ性劣る←水素結合組替





単独の架橋種では、熱可塑性と耐クリープ°性のトレードオフを打破できない



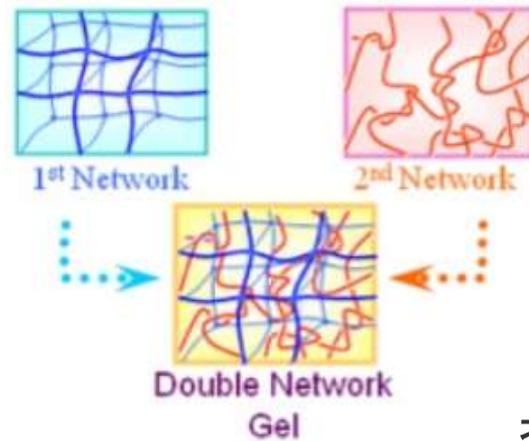
単独架橋では三者を並立させることは難しい

本日のテーマ

マルチネットワーク (多重) 架橋によって達成できないか

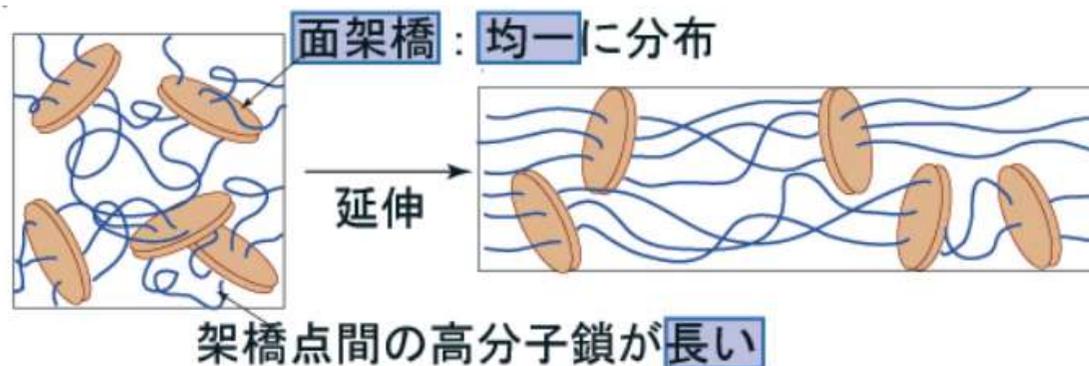
4. マルチネットワーク技術 (多重架橋)

- ・架橋ゴム：硫黄架橋と過酸化物架橋を併用⇒強度上昇
- ・ダブルネットワークゲル：弱い架橋と強い架橋併用



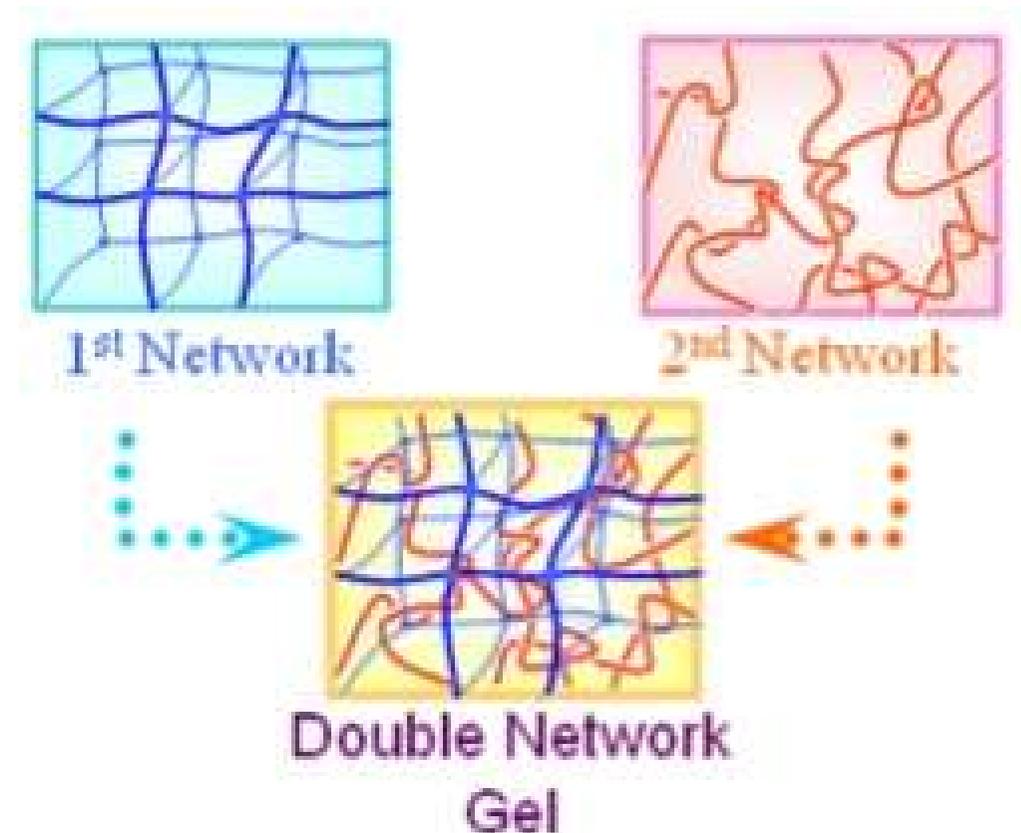
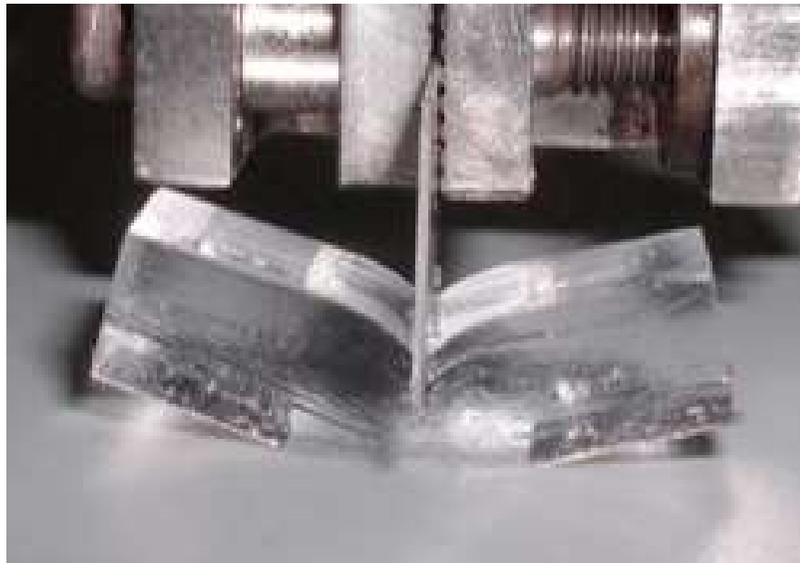
北海道大学ソフト&ウェットマター研究室ホームページ

- ・ポリマークレイナノコンポジット：クレイが分散⇒高強度化



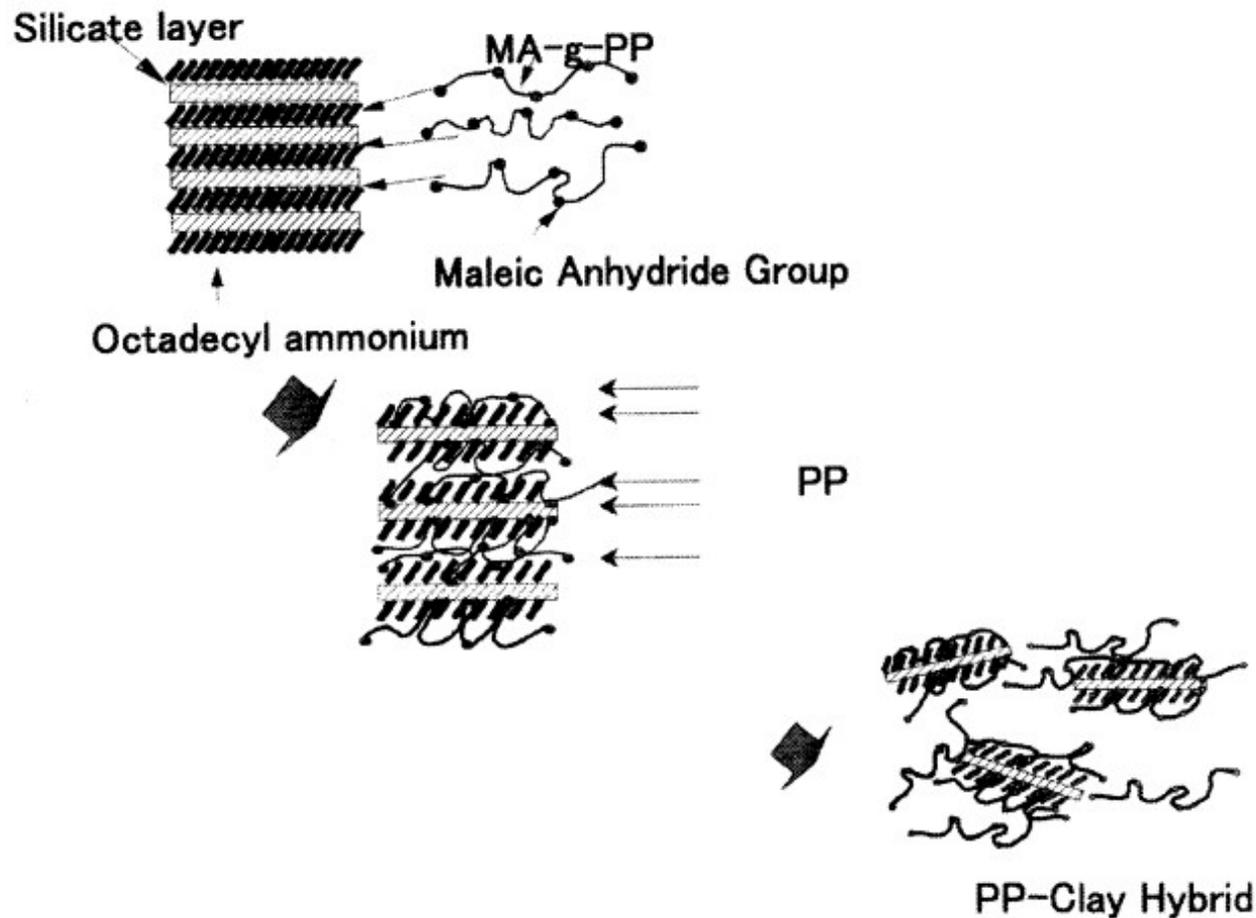
弱い結合と強い結合が併存(IPN)していることが重要

強電解質で硬くてもろいPAMPSゲルと、中性でよく伸びるPAAmゲルを組み合わせることによって、水分を90%も含んでいてもゴムに匹敵する強さを示す



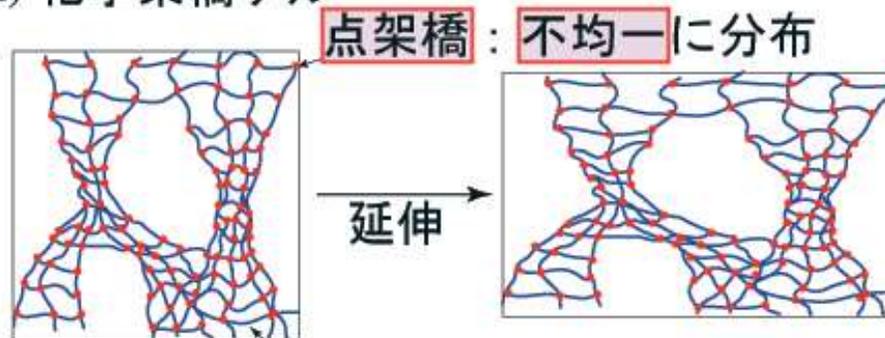
種々のポリマー(ナイロン・ポリオレフィン等)とクレイをナノコンポジット化

- ・モノマー重合法
- ・相溶化法
- ・溶融混練法: 無水マレイン酸変性ポリオレフィン(PP・EBM)使用⇒補強



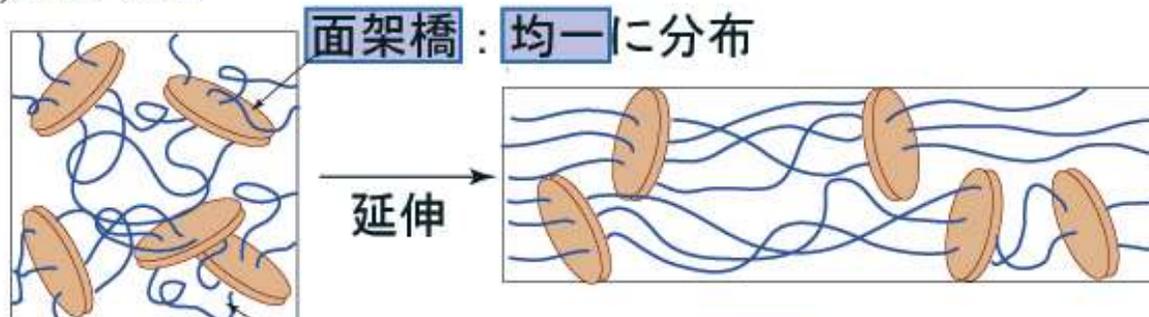
(N-イソプロピルアクリルアミド) (PNIPA) と無機クレイ(ヘクトライト)

(a) 化学架橋ゲル



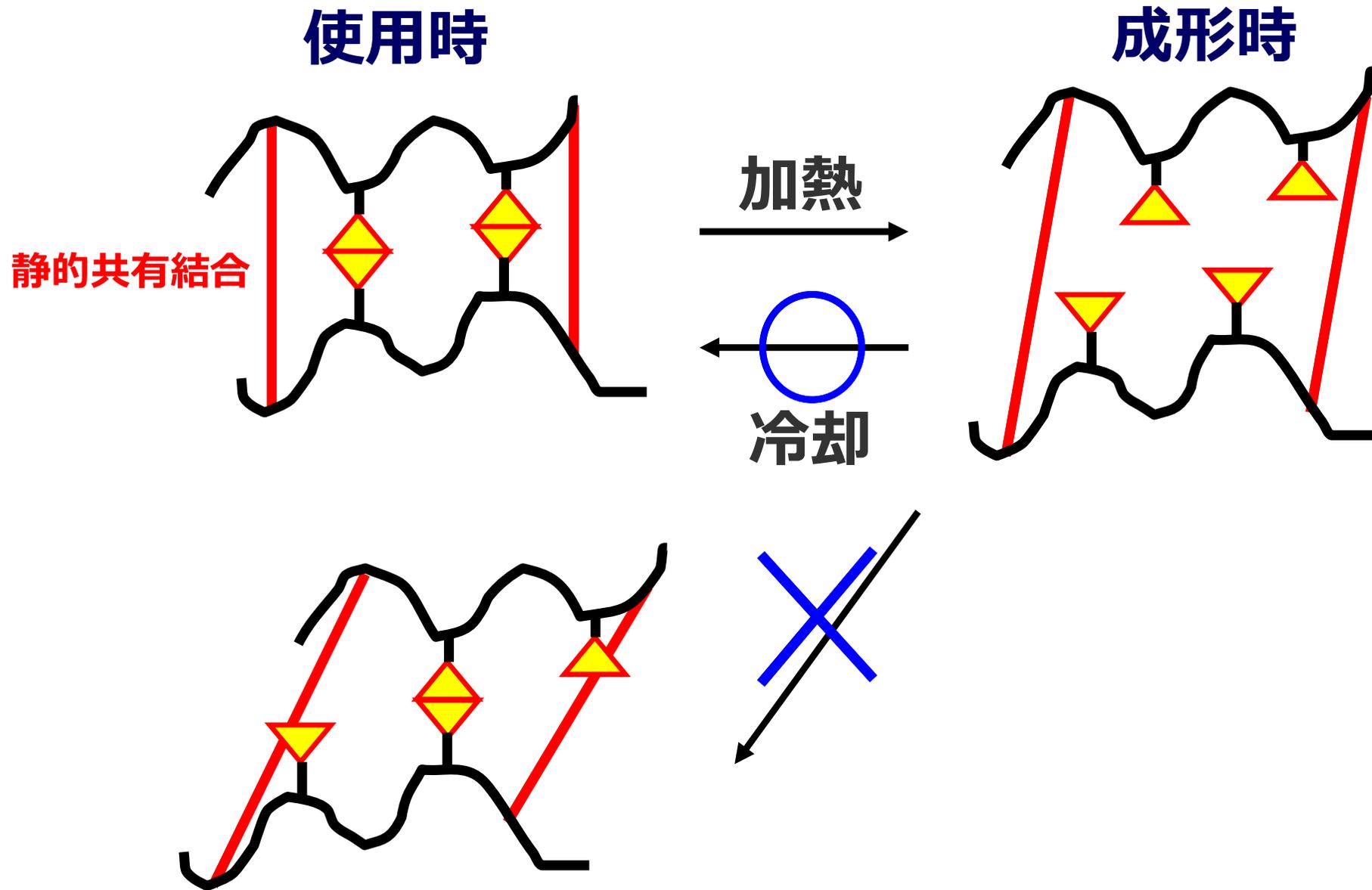
架橋点間の高分子鎖が短い

(b) NC ゲル



架橋点間の高分子鎖が長い





**静的共有結合の導入⇒元の形に戻りやすい⇒耐クリープ性改善？
熱可塑性は維持できる？**

フローリー・ストックマイヤー理論

- ・線状高分子を架橋⇒ある臨界架橋密度を超えると、高分子全体が網目状にゲル化
- ・ P.J.Flory: 臨界架橋密度は重合度の逆数で与えられる
- ・ W.H. Stockmayer: 多分散系に拡張

臨界架橋密度以下ならゲル化しない

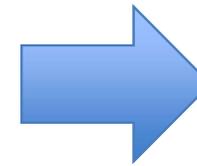
水素結合

イオン結合

動的共有結合

+

静的共有結合



エラストマーへの
応用

機械物性
の改善

- ①水素結合
- ②イオン結合
- ③ Dissociative動的共有結合(DCB)
- ④ Associative動的共有結合(ACB)=ビトリマー
- ⑤多重架橋系(三重以上)

エラストマーの側鎖結合：90件弱(2010～2023年)

	①水素結合	②イオン結合	③Dissociative 動的共有結合	④Associative 動的共有結合
長所	<ul style="list-style-type: none"> 共有結合よりもはるかに弱く、熱エネルギーによる分子の熱運動によって簡単に切れてしまうため、コントロール性の高い架橋が形成できる 引張時に架橋が切れて、エネルギー散逸するため、破断物性良好 	<ul style="list-style-type: none"> 水素結合より強い結合であるため、水素結合よりは高い構造安定性を持つ 引張時に架橋が切れて、エネルギー散逸するため、破断物性良好 	<ul style="list-style-type: none"> 触媒化学種等を添加しなくても、光、熱で簡単に結合が解離するめ、再利用・再成形が容易 溶剤等で結合が解離しないため、耐溶剤性が高い 	<ul style="list-style-type: none"> 可逆的な解離・付加を行う平衡系の結合であり、Dissociative動的共有結合よりは、構造安定性が高い
短所	<ul style="list-style-type: none"> 共有結合やイオン結合よりは弱い結合であるため、高温や強い力が加わると容易に切れてしまい、耐クリープ性が低い 水素結合は極性が高いため、極性溶媒（水など）に溶解しやすく、耐水性が悪い 	<ul style="list-style-type: none"> 水素結合よりは強いが、高温や強い力が加わると容易に切れてしまうため、耐クリープ性が低い イオン性化合物は極性が高いため、極性溶媒（水など）に溶解しやすく、耐水性が悪い 	<ul style="list-style-type: none"> 結合が完全に解離するため、耐クリープ性が低い エネルギー散逸しないため、破断物性があまり良くない 	<ul style="list-style-type: none"> 結合の組み換えが頻繁に起こっており、耐クリープ性が低い 触媒や化学種を添加する必要があるため、解離条件の設定が難しい エネルギー散逸しないため、破断物性が良くない
静的共有結合の導入効果	<ul style="list-style-type: none"> ウレタン、ウレア、アミド結合の導入により破断物性良好 エステル結合の導入により、耐クリープ性の改善が見られるが、破断物性良くない 多重架橋系でエステル結合 + ポクレイの添加により、耐クリープ性を維持した状態で破断物性改善 	<ul style="list-style-type: none"> 概ね高い強度、ウレタン結合の導入により非常に高い強度 C-C結合(過酸化物架橋)を導入した場合も高い強度だが、耐クリープ性は良くない 多重架橋系で水素結合 + ポリスルフィド結合(硫黄架橋)の導入により、破断物性、耐クリープ性良好 	<ul style="list-style-type: none"> C-C結合(過酸化物架橋)を導入した場合は、リサイクル性を有しつつ、耐クリープ性良好 	<ul style="list-style-type: none"> モノスルフィド系結合を導入した場合、熱可塑性を維持した状態で耐クリープ性は改善されるが、破断物性は改善されない

破断物性

エネルギー散逸するウレタン・ウレア系およびイオン結合系
⇒しかし耐クリープ性良くない

耐クリープ性

物理クリープ(分子間相互作用等)や化学クリープ(架橋切断等)の少ない静的共有結合:C-C結合・エステル結合・モノスルフィド結合
⇒しかし破断物性良くない



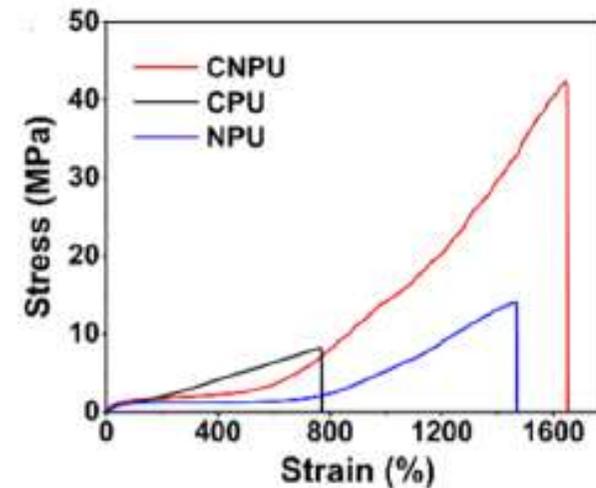
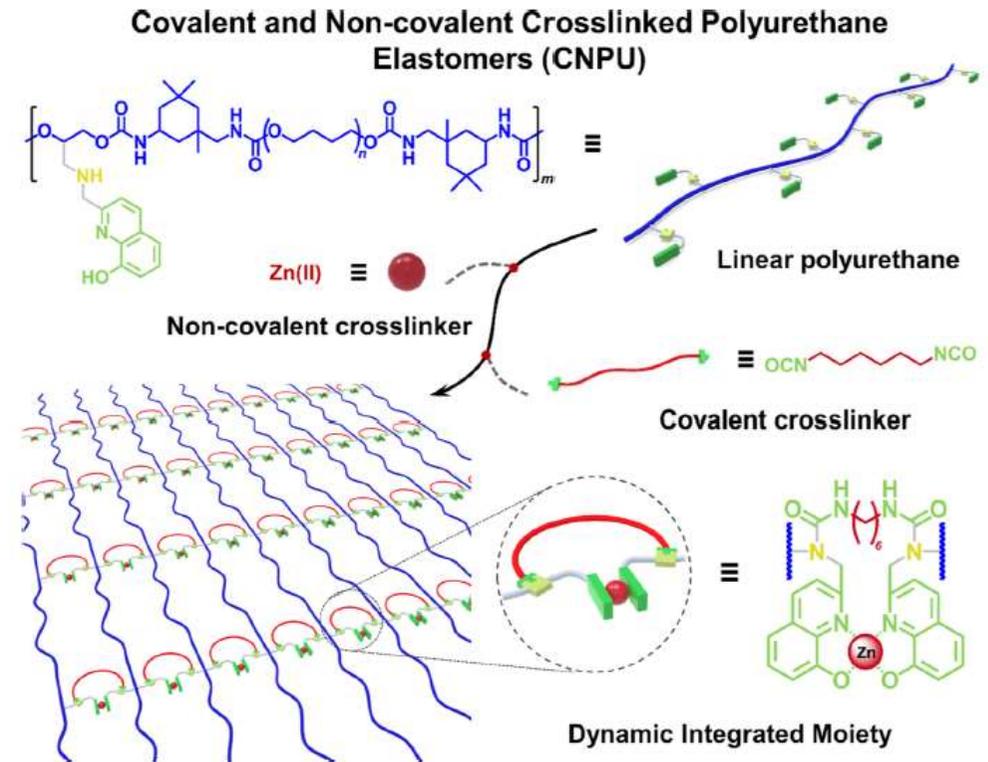
ウレタン・ウレア系・イオン結合系
+ C-C結合・エステル結合・モノスルフィド結合の研究例

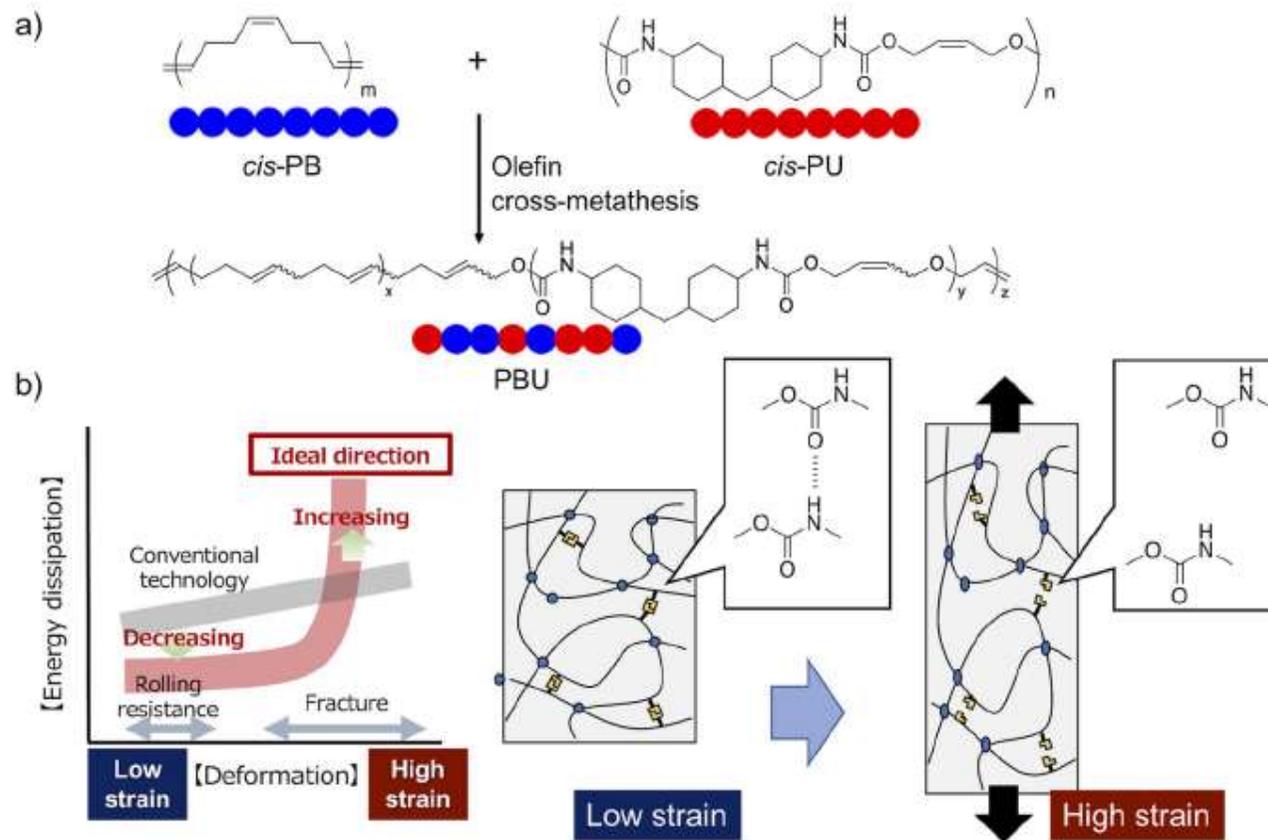
・Znイオン架橋だけの場合：
TB=12 MPa EB=1500%

・静的共有結合だけの場合：
TB=8 MPa EB=750%

・二重ネットワーク：
TB=48.8 Mpa EB=1740%

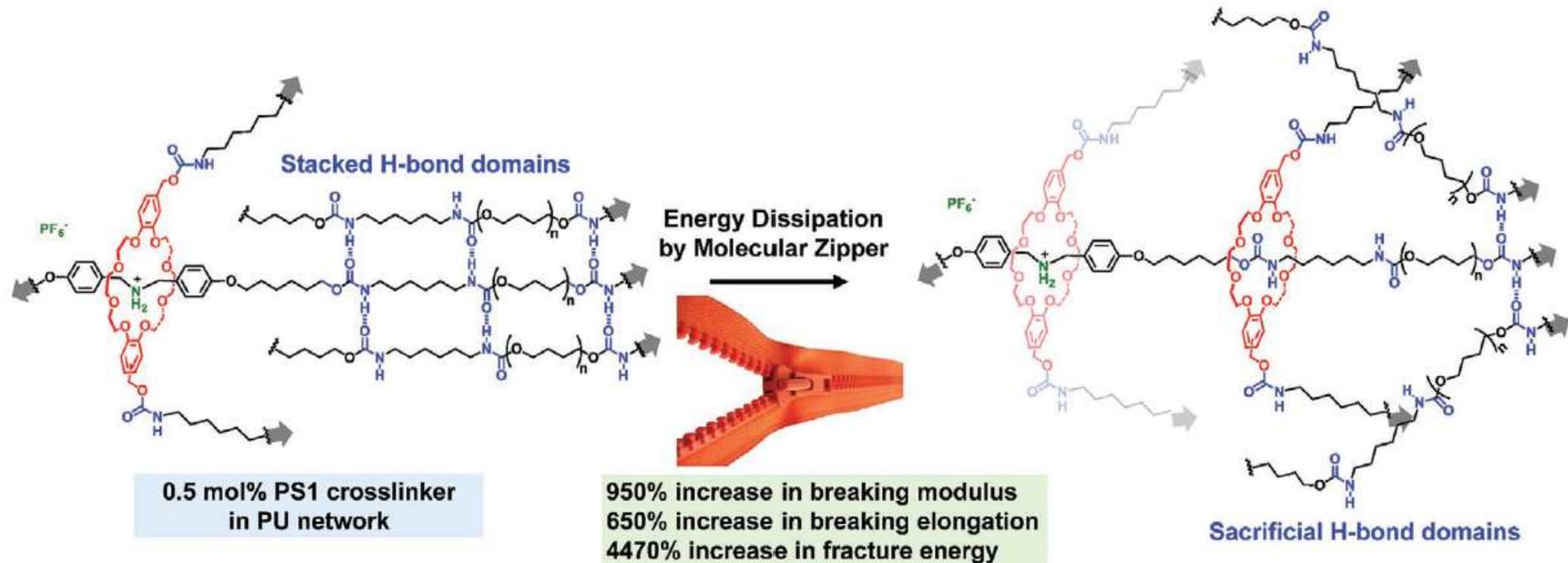
熱可塑性・耐クリープ性言及なし





- ウレタン構造最も多い系 : TB=7.18 MPa EB=277%
- 熱可塑性・耐クリープ[°]性言及なし

二重架橋ではトレードオフの呪縛から逃れることは難しい⇒三重架橋以上の多重架橋系



- 少量(0.5モル%)の擬[2]ロタキサン架橋剤は**機械的強度と伸びを劇的に増加**
破断強度45.06 MPa、破断伸び1890%
⇐リングスライド運動が効率的にエネルギー散逸
- 耐クリープ性:40%伸長時、初期25 MPa⇒1時間後10 MPaまで減少
- 熱可塑性言及なし

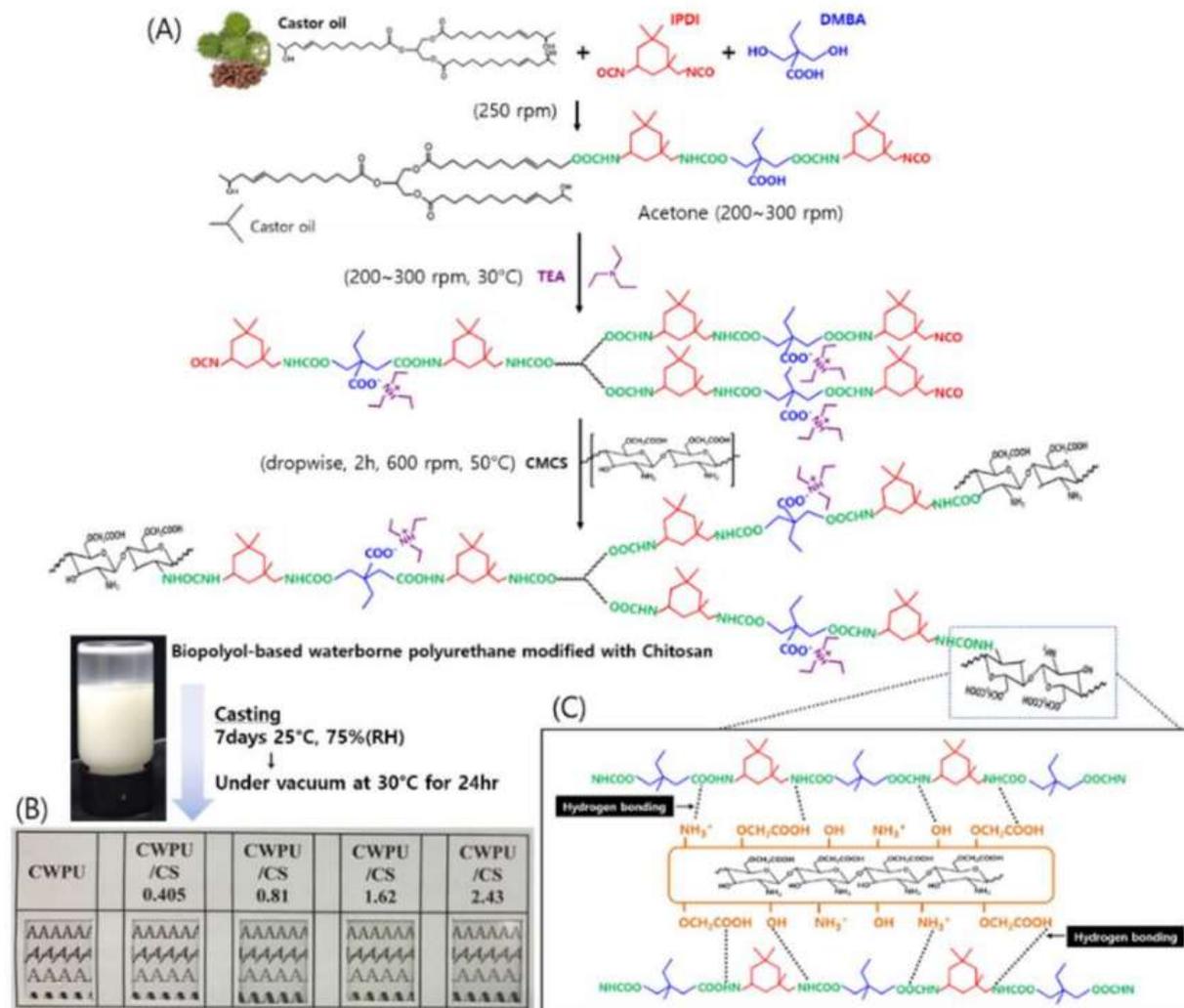
・キトサンなし :

TB=4.7MPa EB=204%

・キトサン2.43g(10%)添加:

TB=13.3MPa EB=120%

・熱可塑性あり、耐クリープ^o性に関する言及なし

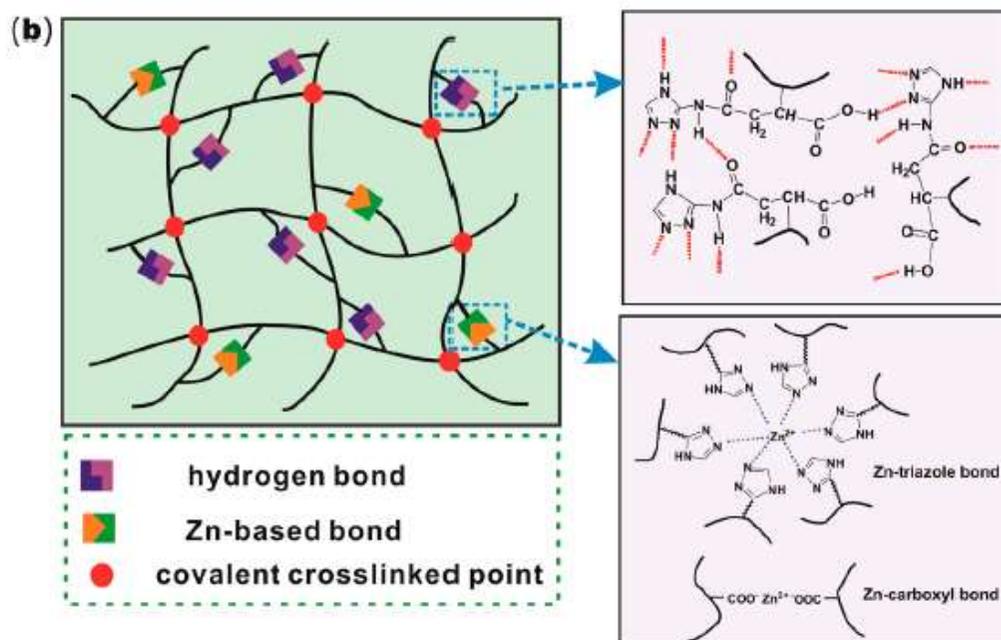
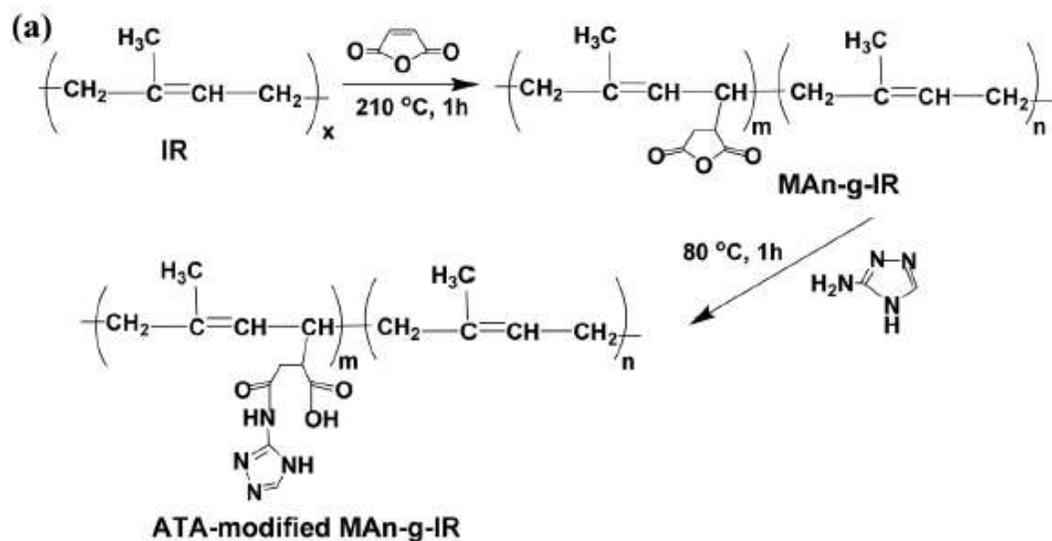
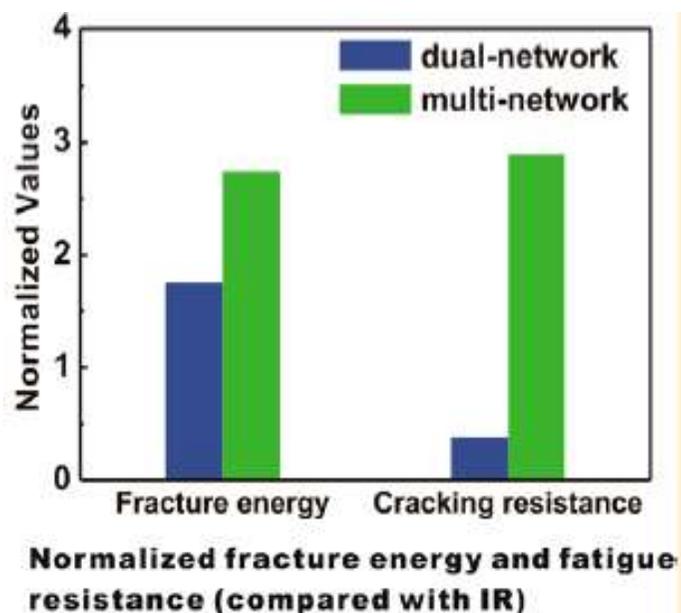


⑤水素結合:ATA + イオン結合:Zn + 共有結合:ポリS結合(硫黄架橋) 56/82

- TB=約18MPa EB=600%
- 塩化亜鉛0.4当量⇒
TB=約29MPa, EB=450%まで増大

- 耐クリープ性:硫黄架橋IR;
初期応力の0.95
塩化亜鉛なし0.75
塩化亜鉛0.2当量添加 : 0.8

- 熱可塑性言及なし

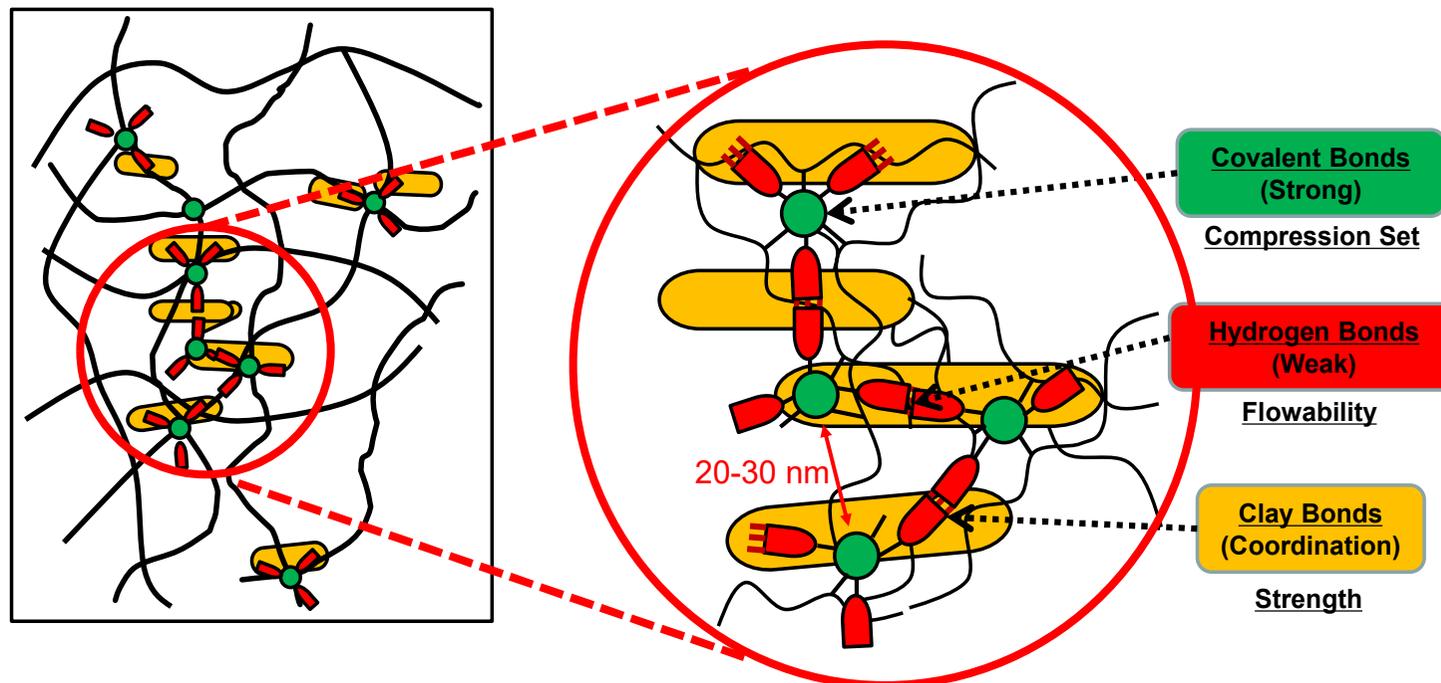


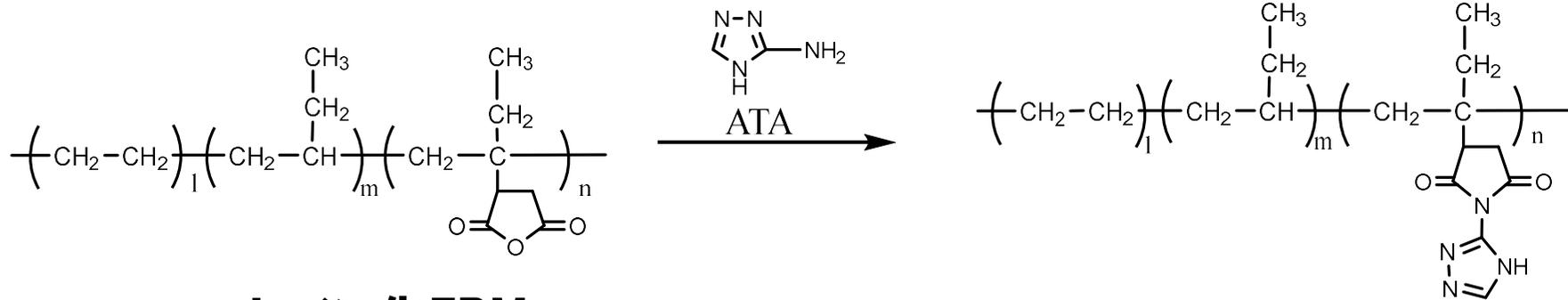
5. マルチネットワークエラストマー

水素結合に加え、
共有結合、面架橋の3種の架橋によるマルチネットワークシステム



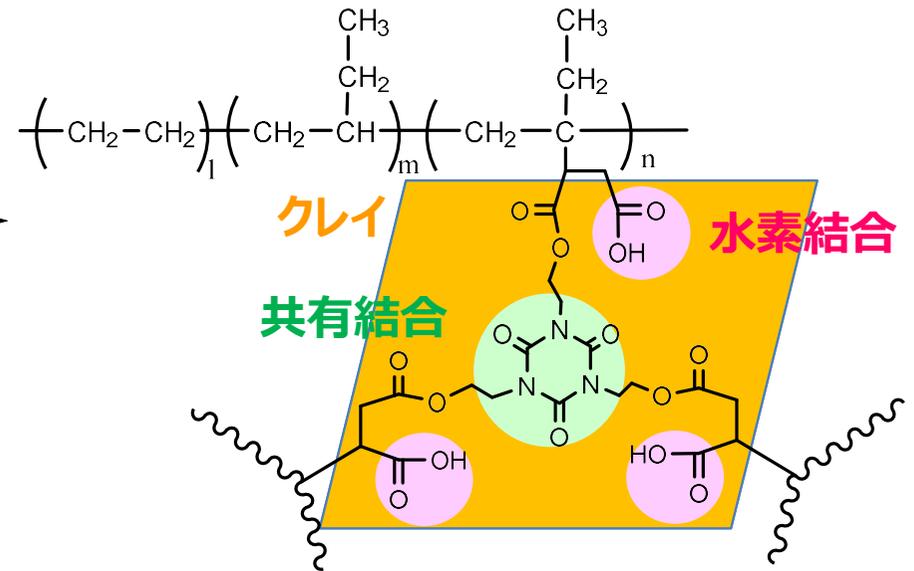
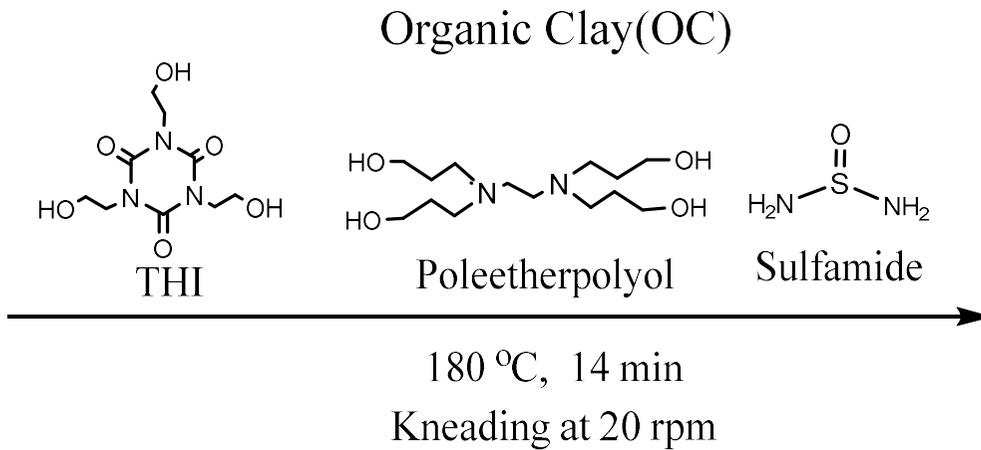
- 共有結合による良好な耐圧縮永久歪性（耐クリープ性）
- 加熱時の水素結合の解離による良好な流動性
- 面架橋(クレイ)のヒステリシスエネルギーの増大による良好な引張特性



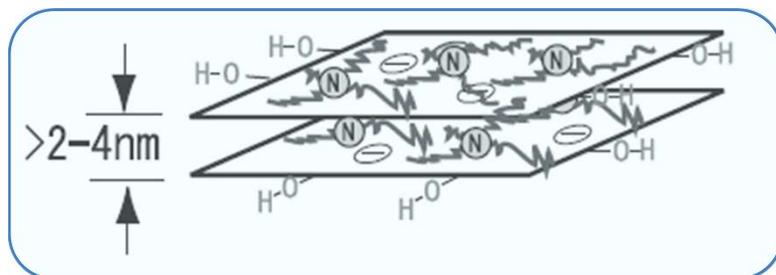


マレイン化EBM

水素結合架橋エラストマー(HBE)



有機化クレイ (OC) の構造



マルチネットワークエラストマー (MNE)

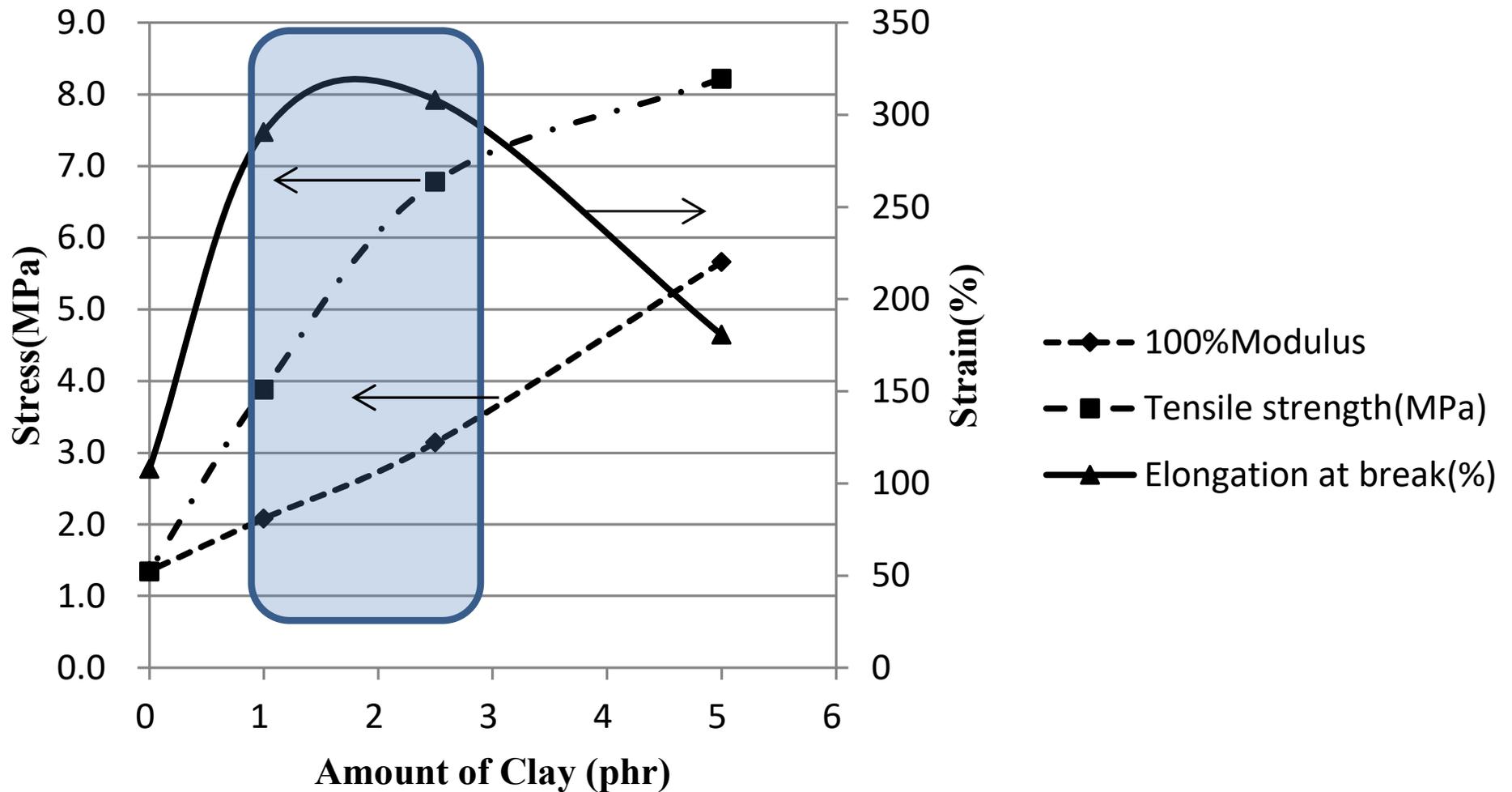
Run	1	2	3	4	5
Maleated Ethylene Butene Rubber	100	100	100	100	100
Organic clay			5	5	5
3-Amino-1,2,4-triazol (ATA)	1.26				
Tris(2-hydroxyethyl)isocyanurate (THI)		1.31	1.31		
Polyether polyol				3.83	
Sulfamide					0.72
Antioxidant ^a	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Hardness	57	39	66	62	66
Tensile strength (MPa)	4.82	1.34	8.22	6.92	5.45
Elongation at break (%)	628	108	181	446	545
Compression set (%)	80	16	17	39	96

^a3-(3,5-ditert-butyl-4-hydroxyphenyl)propanoic acid

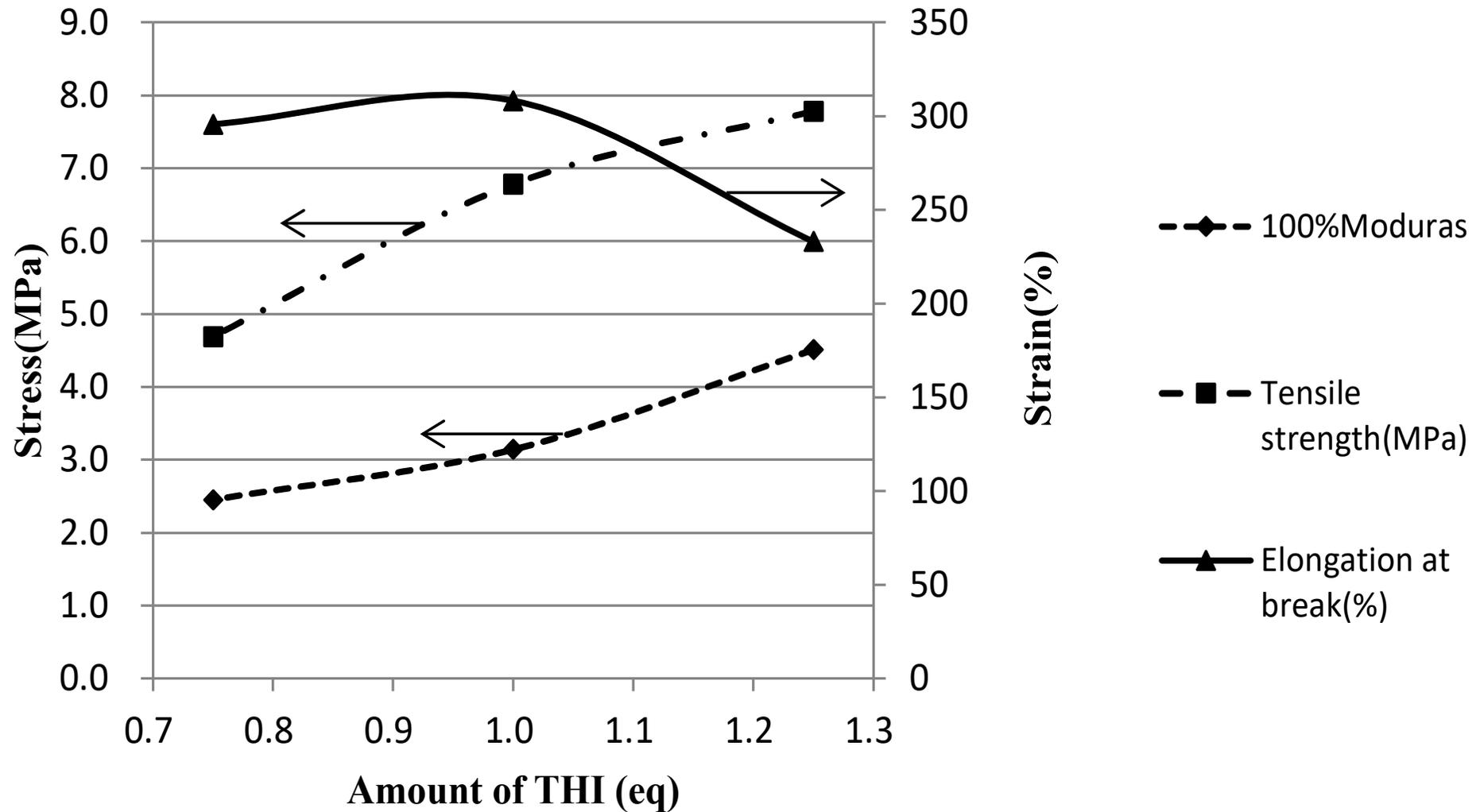
ATA⇒THI: 圧縮永久歪低下 しかしTB/EB低下



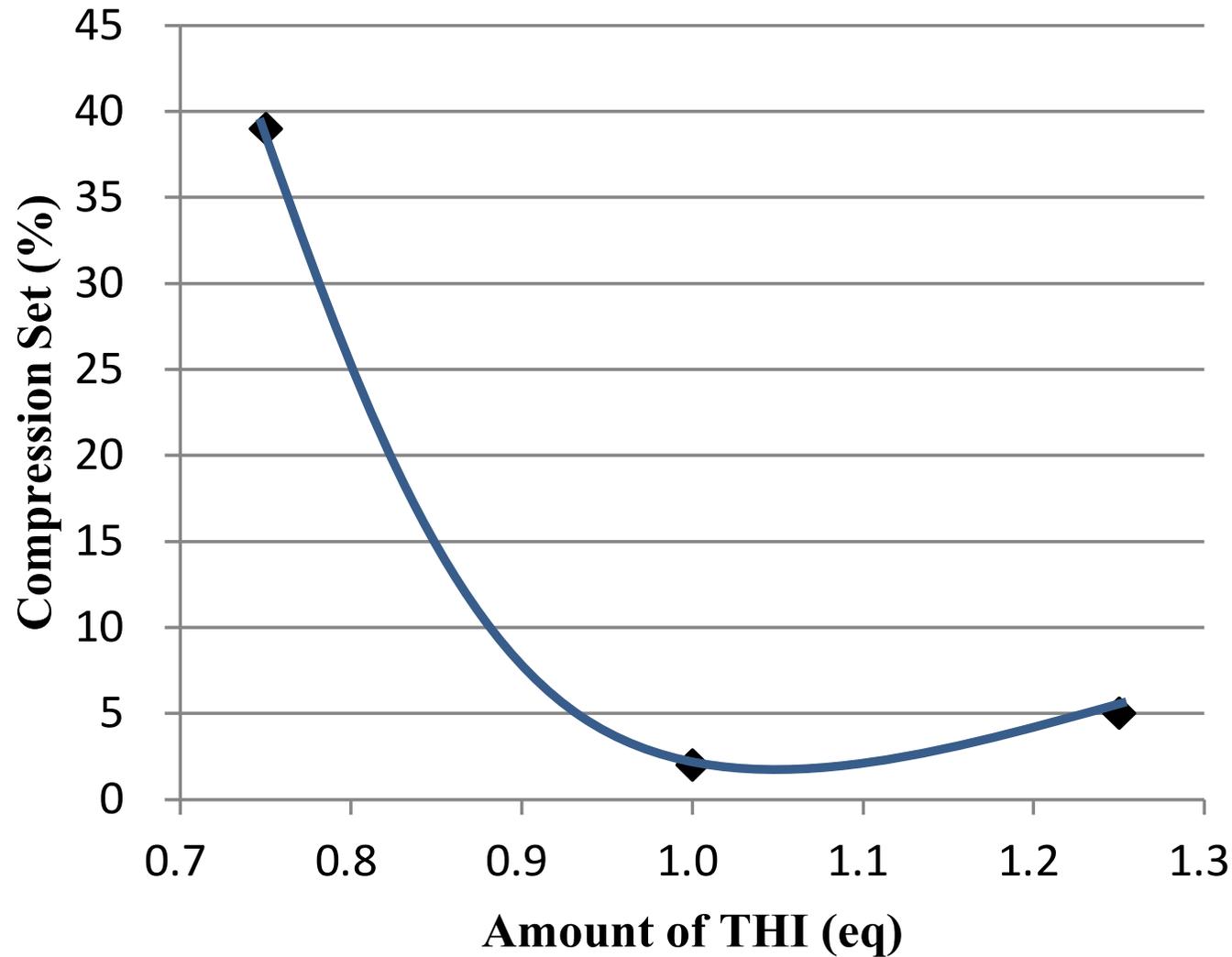
有機化クレイ添加: TB/EB上昇 圧縮永久歪維持



クレイ量：1～3phrがEB最大



THI : 1当量がEB最大



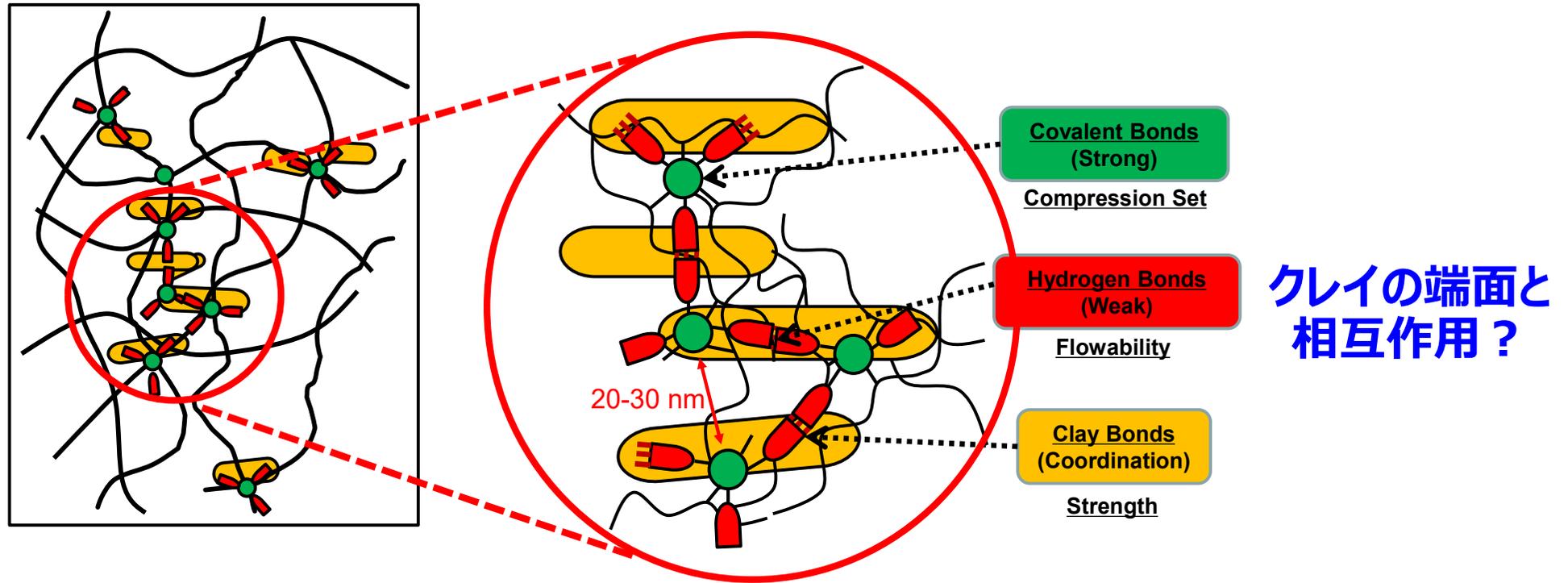
THI : 1当量がC-Set最低

Glass Transition Temperature (°C) ^{*2}	-41.3
5% Weight Loss Temperature (°C) ^{*3}	403
Recyclability ^{*4}	>10 times
Self Healing Temperature (°C) ^{*5}	140

*1 Table 1, Run5 *2 Determined by DSC. *3 Determined by TGA under N₂. *4 Time of Reforming. *5 Self adhesion ability

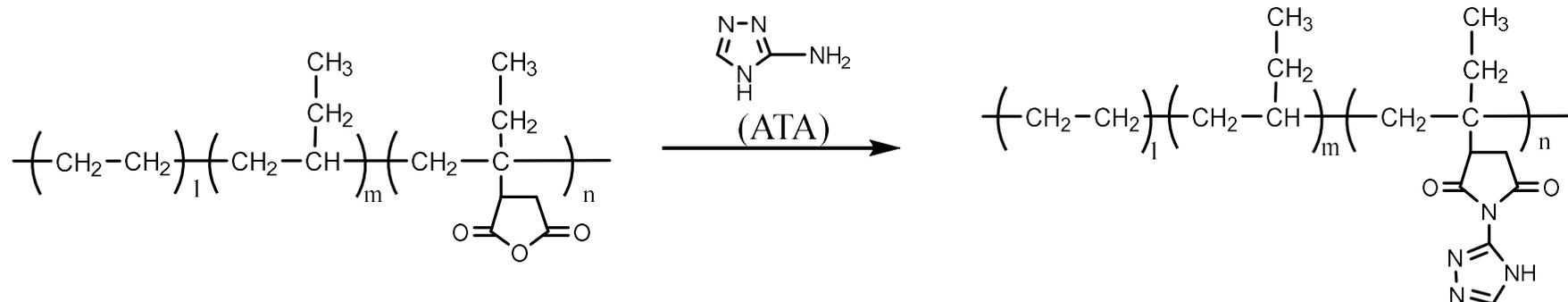
- ・**ガラス転移温度**：元のマレイン化EBM(Tg:-40.4 °C)とほぼ同じ
- ・**5%重量減少温度**：一般のTPEより100 °C程度高い
- ・**リサイクル性**：10回以上再成形可(TB保持率93%)
- ・**自己修復性**：140 °C,10分で5 mmの切込み接着(接着強度保持率73%)

水素結合・共有結合・面架橋の3種の架橋によるマルチネットワークシステム



知野圭介 日本ゴム協会誌 2022, 95, 199.

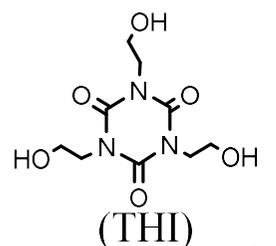
検討内容：MNEの有機化クレーの添加効果←HBEとの比較



マレイン化EBM

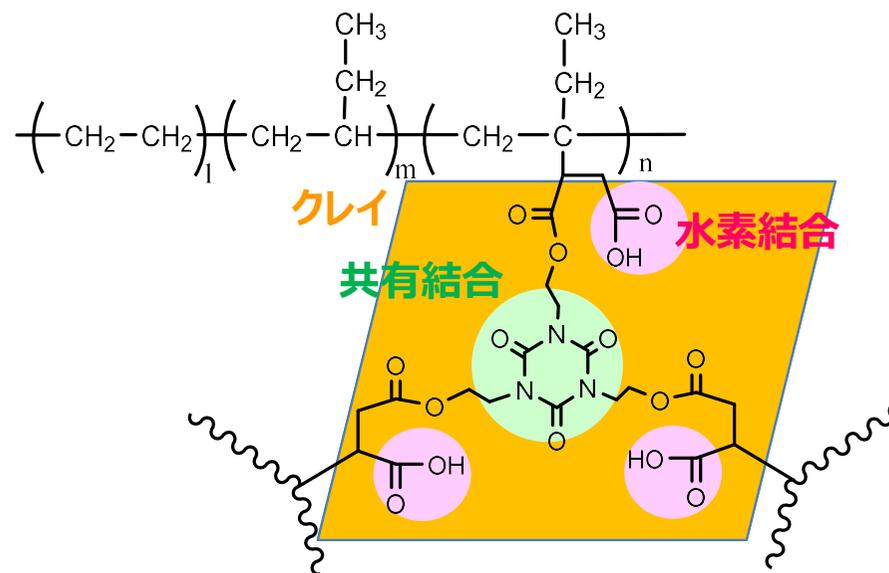
- Run1: +OC
- Run2: +ATA
- Run3: +OC → +ATA
- Run4: +THI
- Run5: +OC → +THI (MNE)
- Run6: +THI → +OC

Organic Clay(OC)

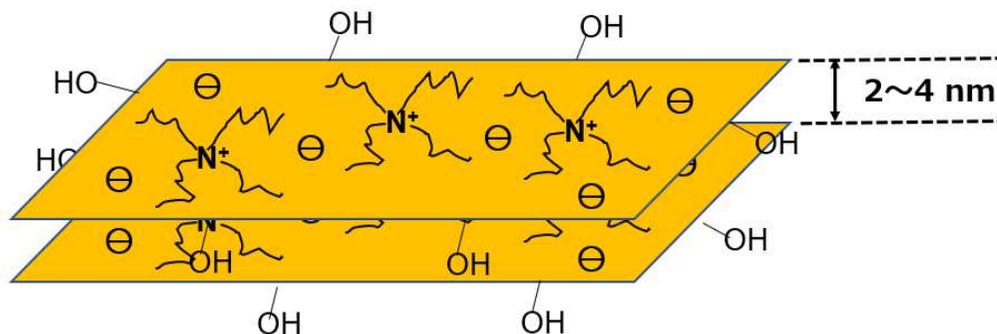


180 °C, 14 min
Kneading at 20 rpm

水素結合架橋エラストマー(HBE)



有機化クレイ (OC) の構造



マルチネットワークエラストマー (MNE)

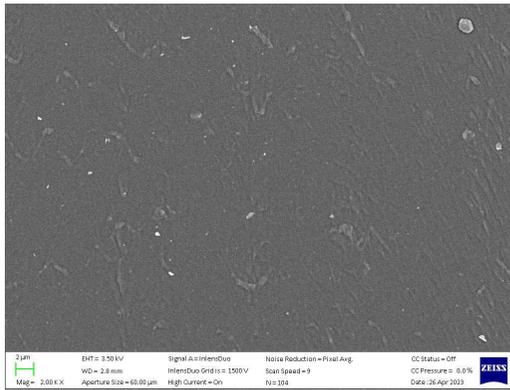
Run	1	2	3	4	5	6 ^{*1}
Crosslinking Type ^{*2}	PB	HB	HB+PB	HB+CB	HB+CB+PB	
Maleated Ethylene Butene Rubber	100	100	100	100	100	100
Organic clay	1.0		1.0		1.0	1.0
3-Amino-1,2,4-triazol (ATA)		1.27	1.27			
Tris(2-hydroxyethyl)isocyanurate (THI)				1.31	1.31	1.31
JIS A Hardness	56	57	57	49	49	50
100%Moduras (MPa)	1.39	1.63	1.67	2.15	1.56	1.54
300%Moduras (MPa)	1.98	2.41	2.41	-	3.41	3.00
Tensile strength (MPa)	5.30	9.62	7.25	4.99	5.02	4.29
Elongation at break (%)	1630	1191	1273	257	448	428
Tear strength (N/cm)	308	314	318	207	223	200
Compression set (%)	90	79	85	38	32	54

*1 Organic clay was added after addition of THI, *2 HB: Hydrogen Bond, CB: Covalent Bond, PB: Clay Plane Bond

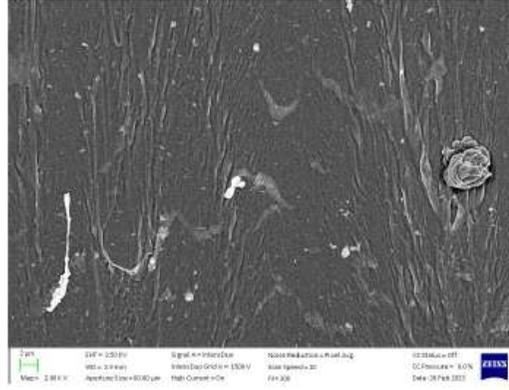
クレイ添加 HBE:物性低下⇔MNE:物性上昇

TEM測定：HBE・MNE中の有機化クレイの分散状態 68/82

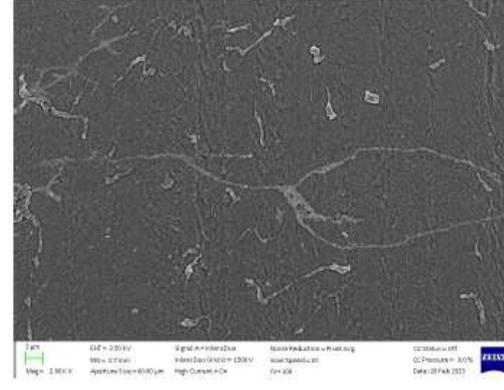
Run1:PB(クレイ)
SEM



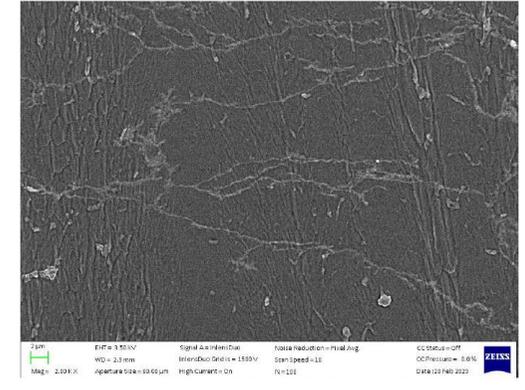
Run3:HB+PB



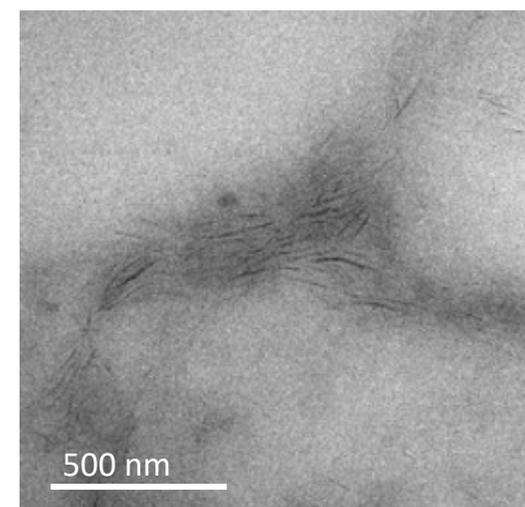
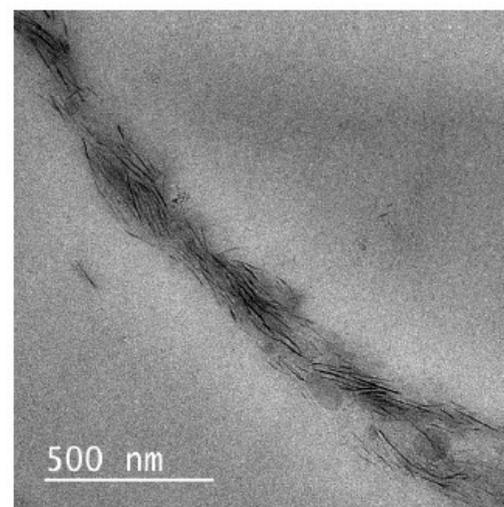
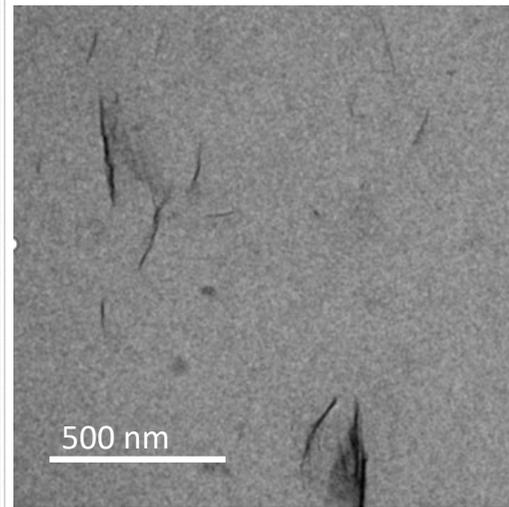
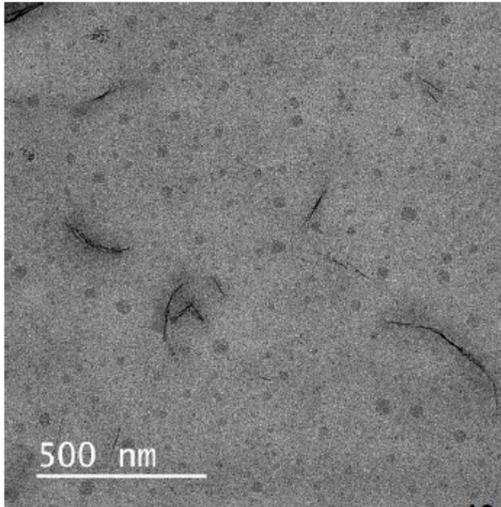
Run5:MNE
(クレイ先入れ)



Run6:MNE
(クレイ後入れ)



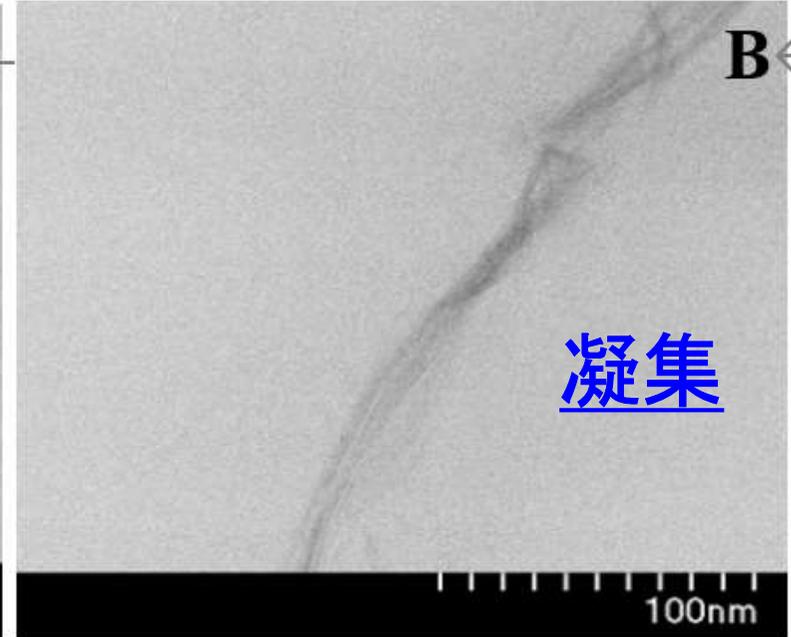
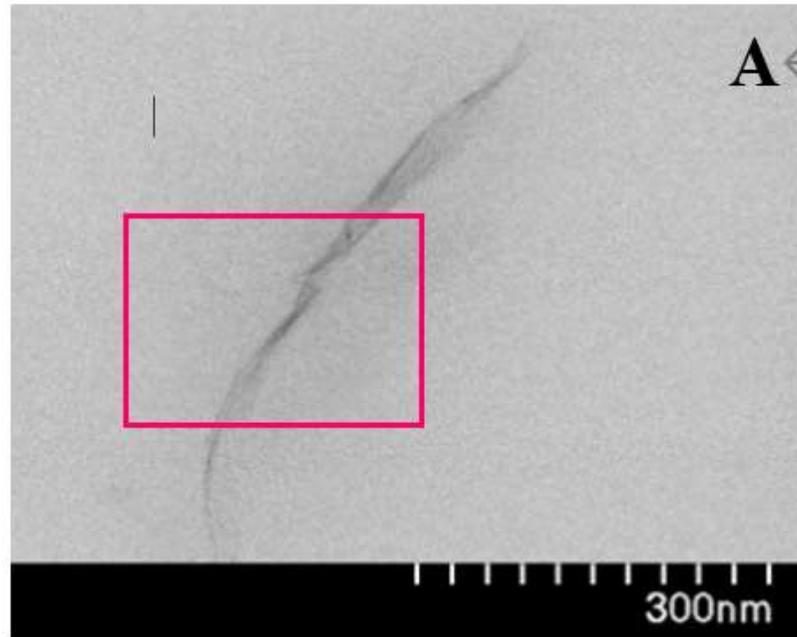
TEM



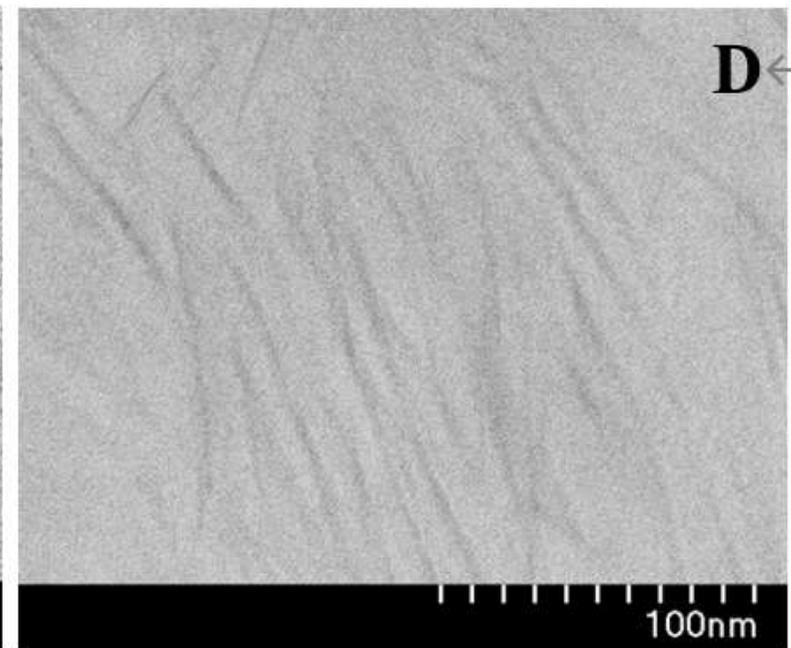
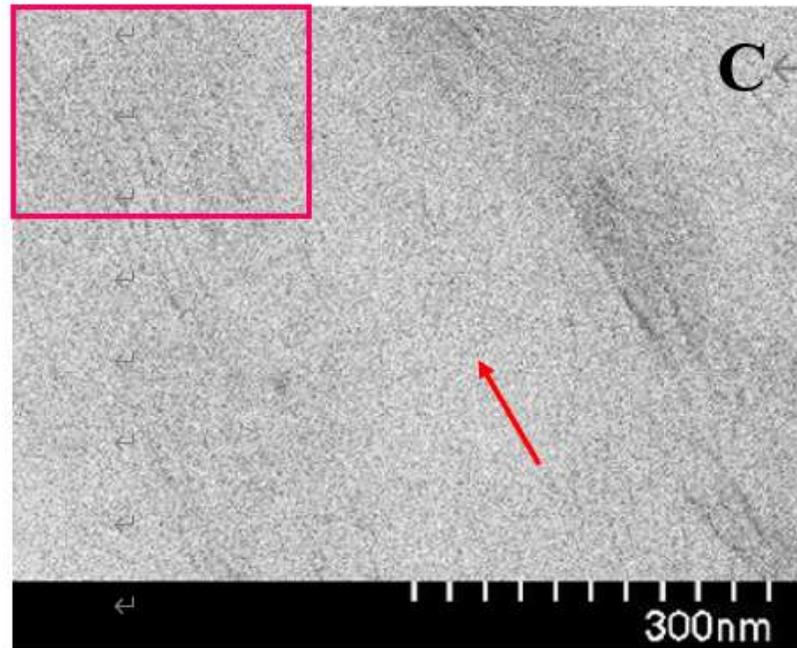
クレイ分散

繊維状会合体

Run3
HB + PB

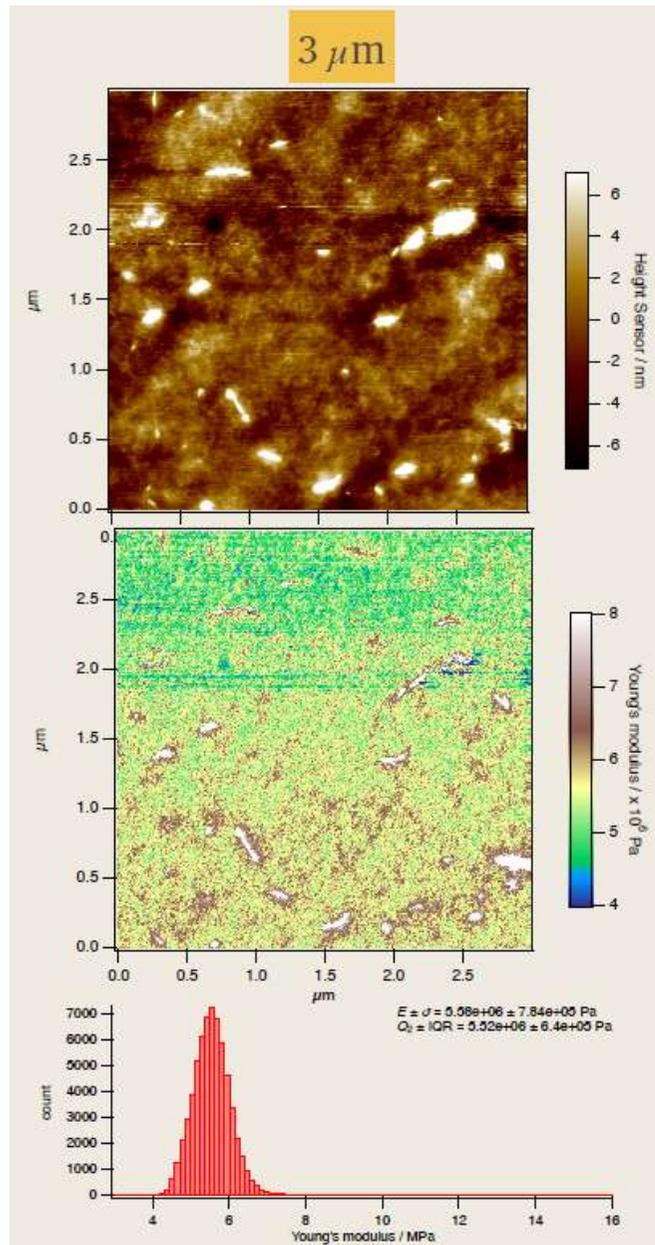


Run5
MNE

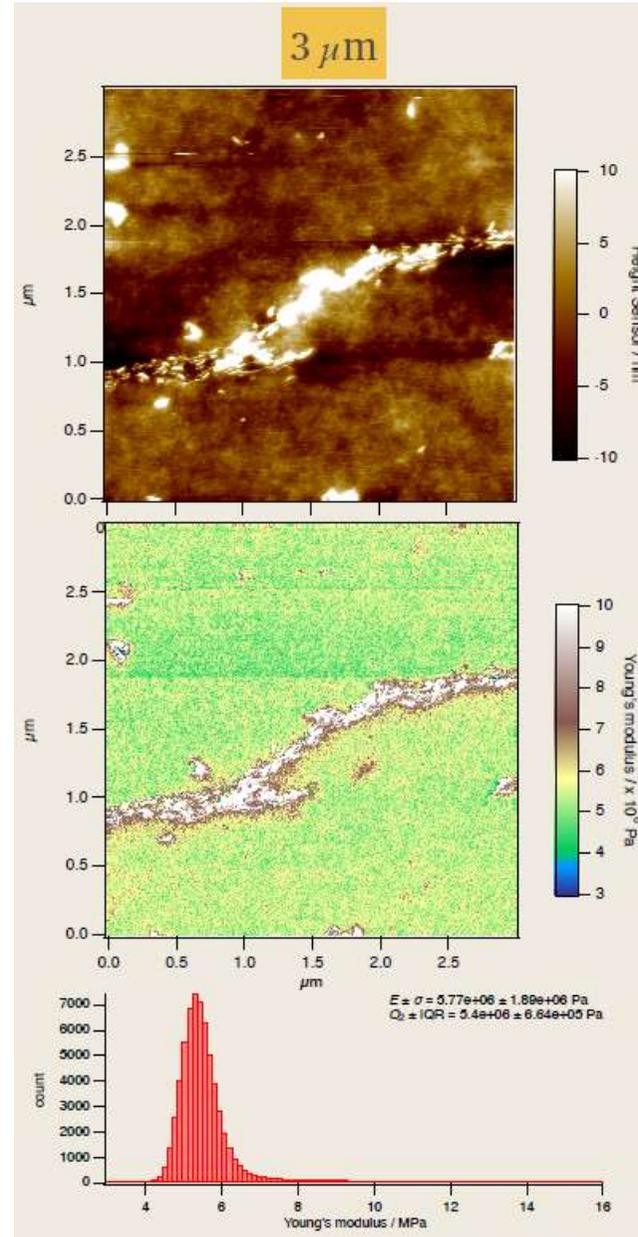


分散前2nm⇒層間隔は15nm程度に広がる

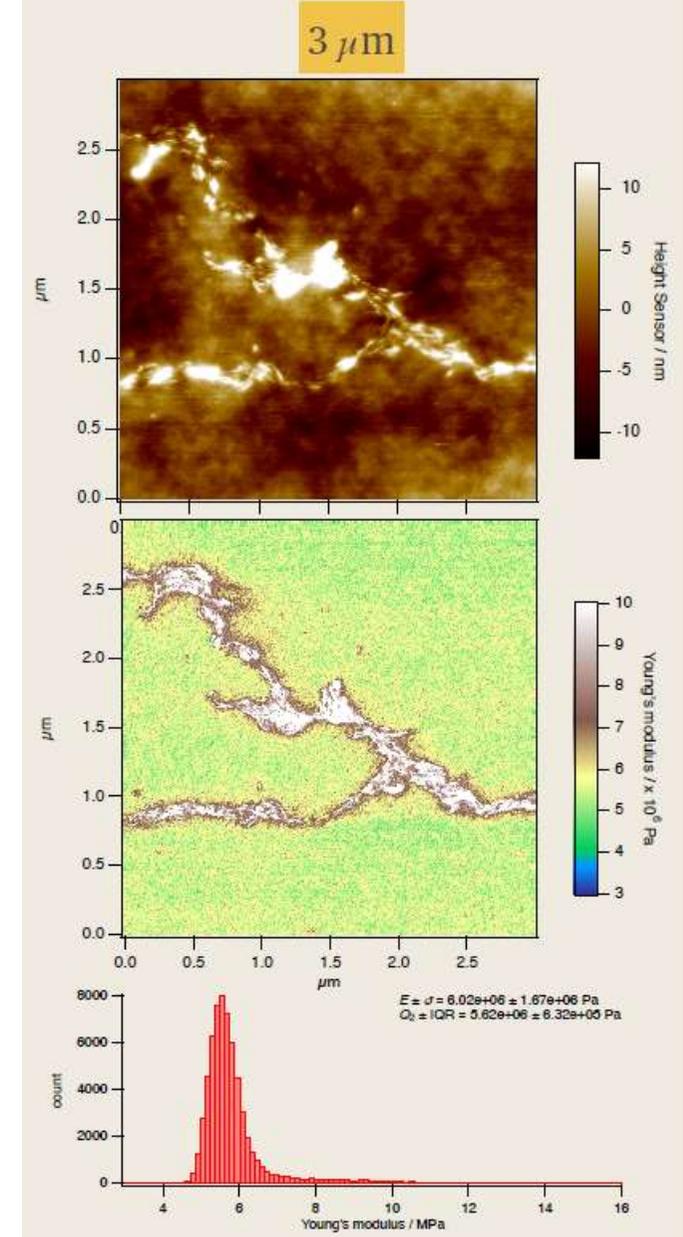
Run1 面架橋(有機化クレイ)



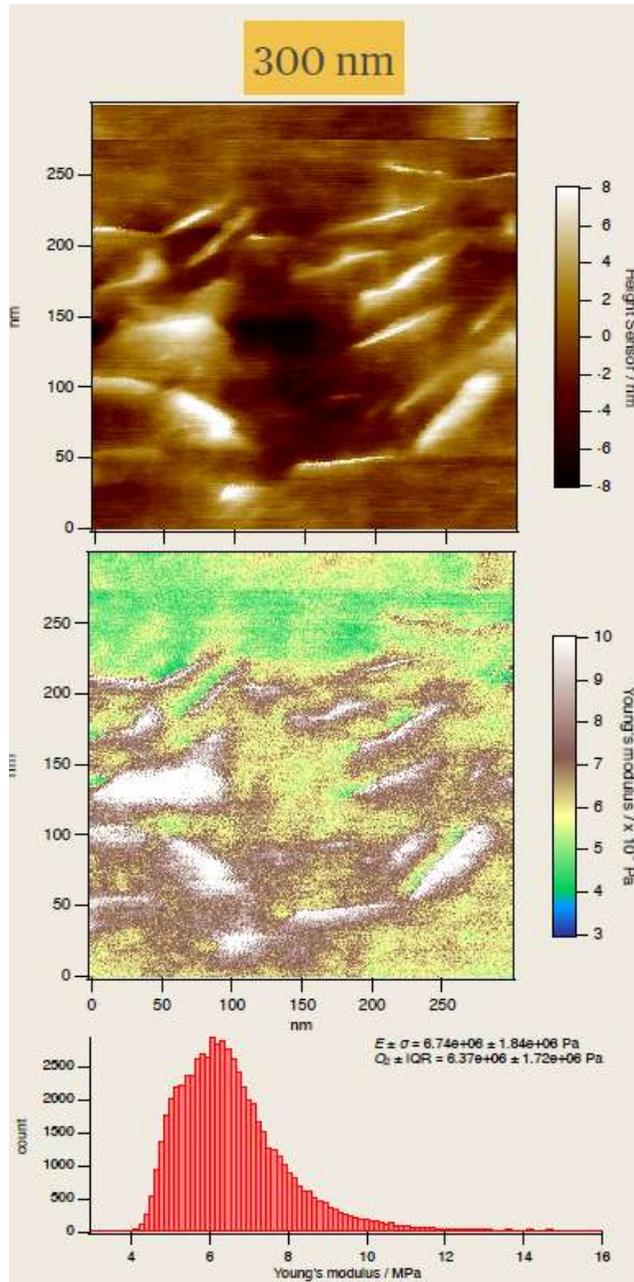
Run5:MNE(クレイ先入れ)



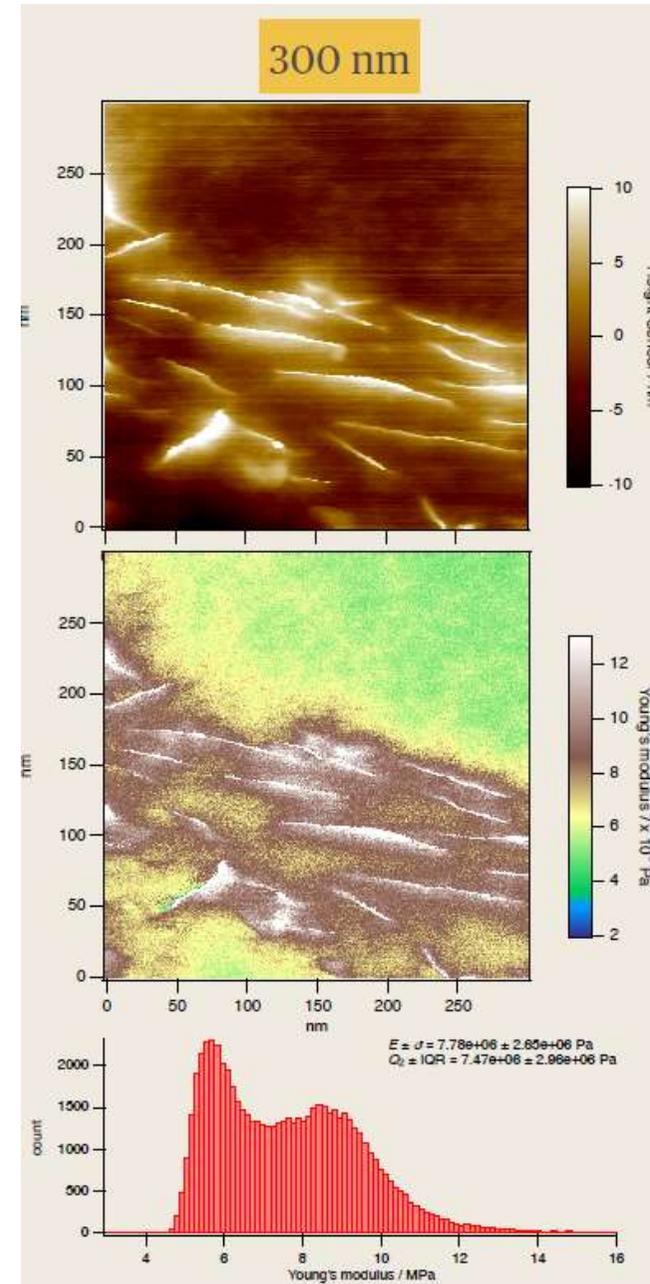
Run6:MNE(クレイ後入れ)



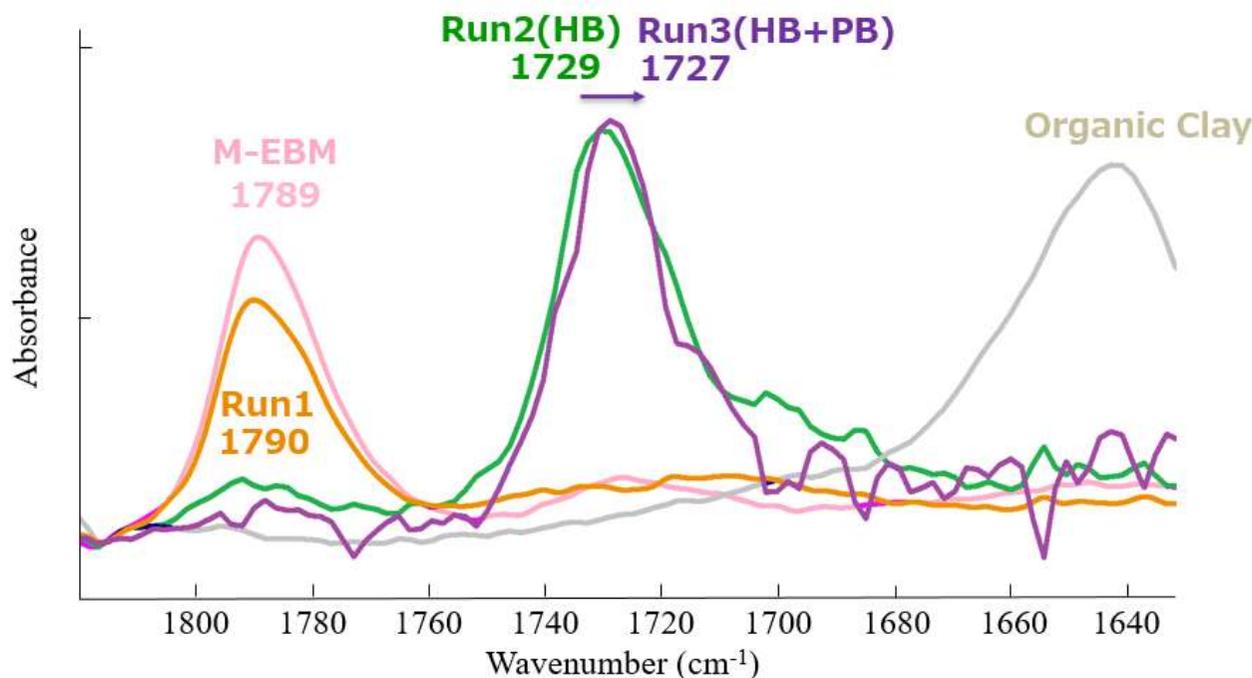
Run5:MNE(クレイ先入れ)



Run6:MNE(クレイ後入れ)

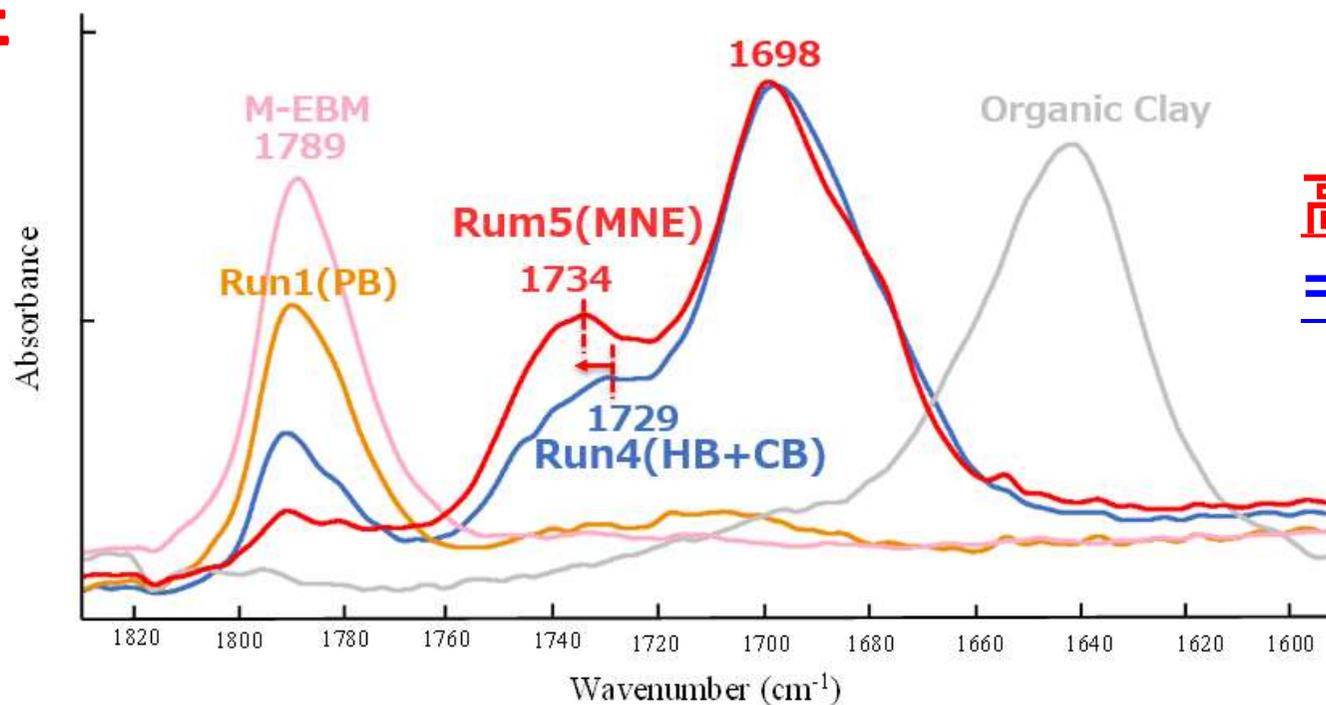


HBE

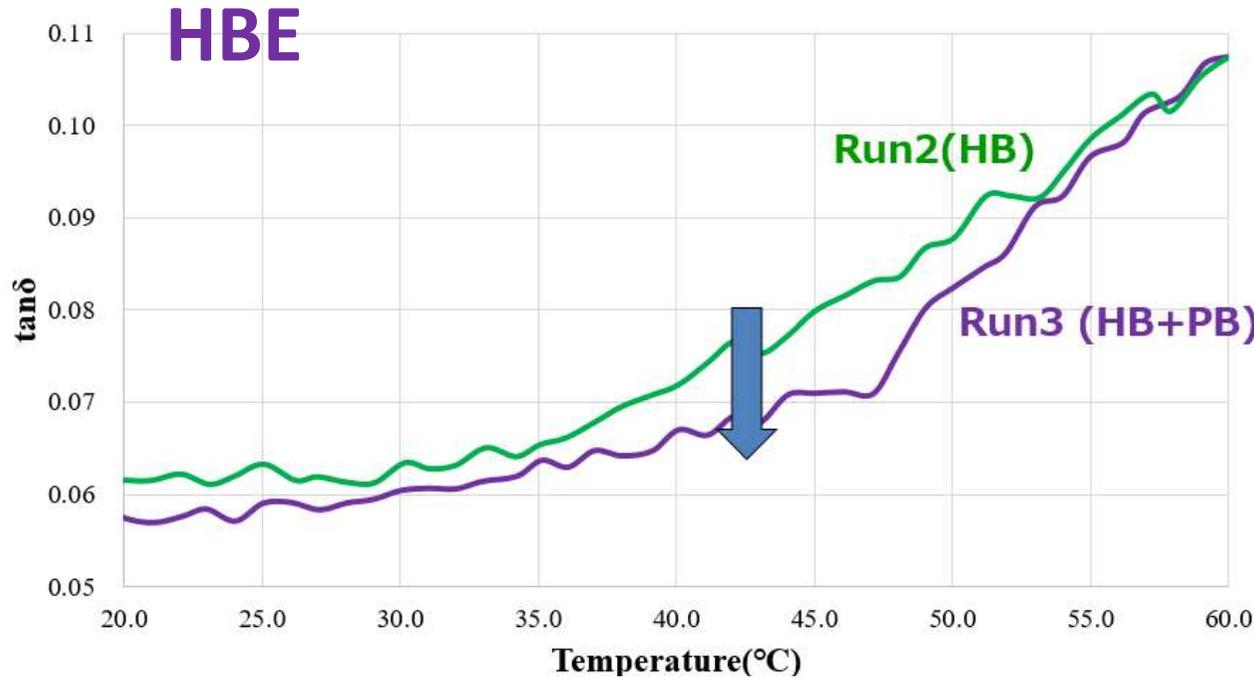


やや低波数シフト
⇒水素結合強まる

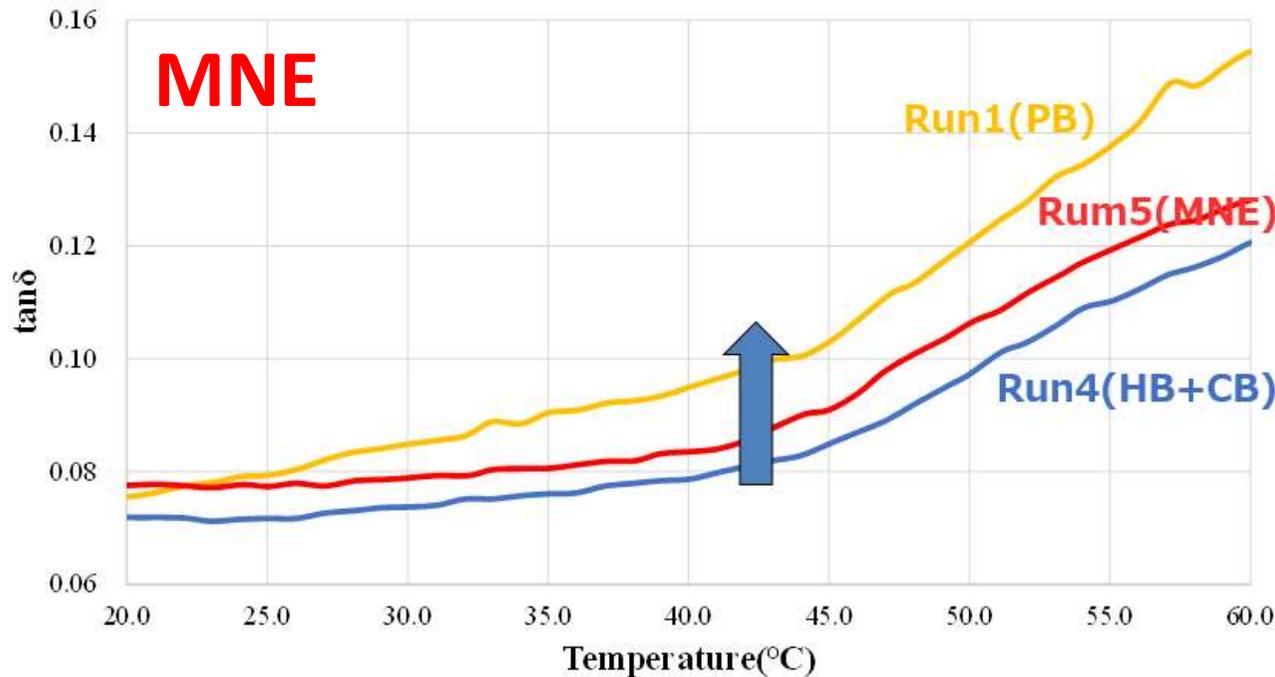
MNE



高波数シフト
⇒水素結合弱まる



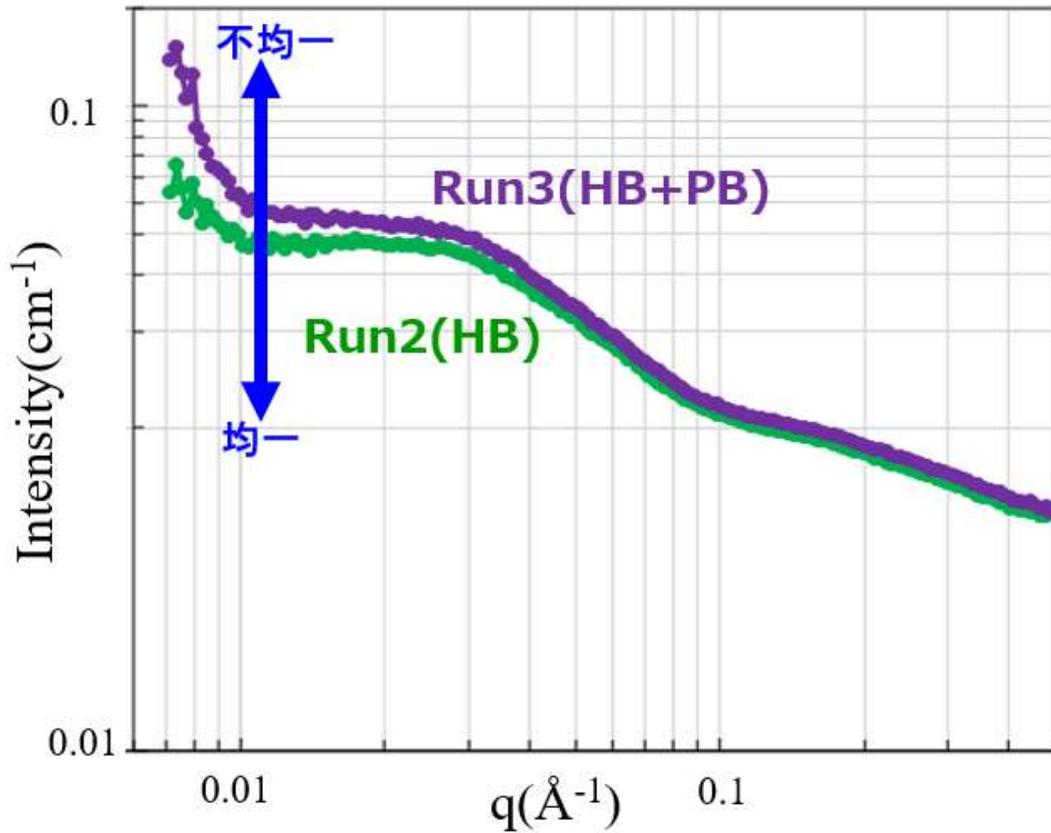
ヒステリシスエネルギー↓
⇒破断強度↓と相関



ヒステリシスエネルギー↑
⇒破断強度↑と相関

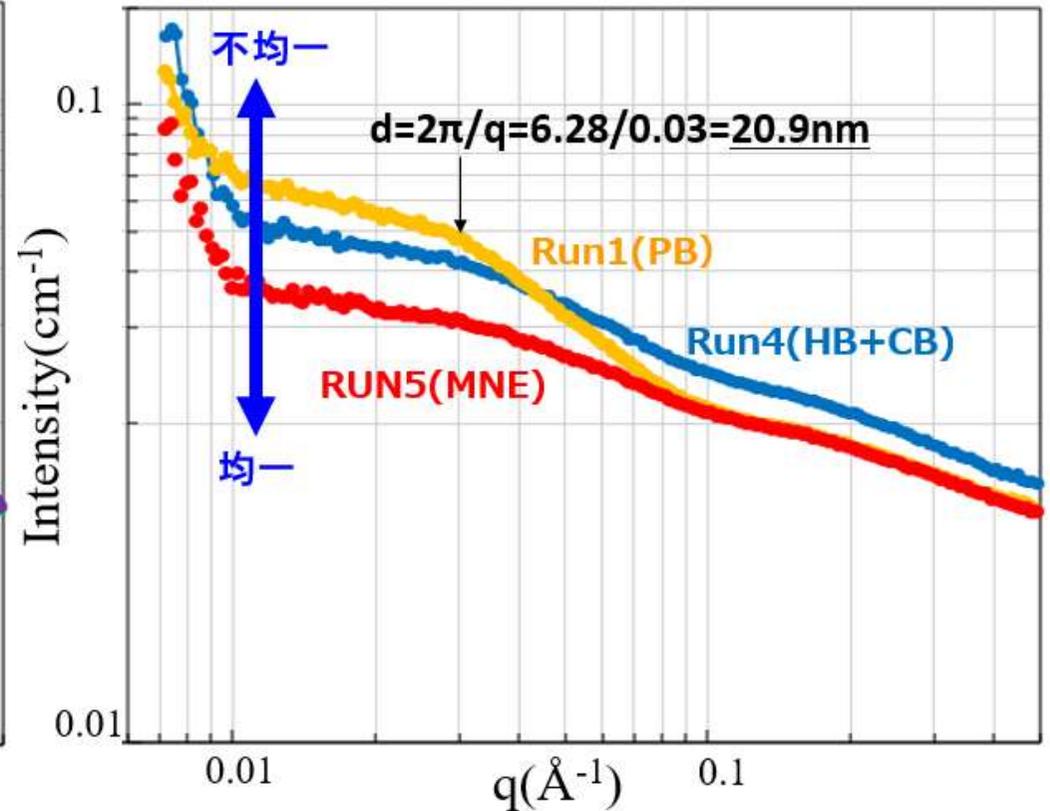
小角中性子散乱(SANS)データ @J-PARC

HBE



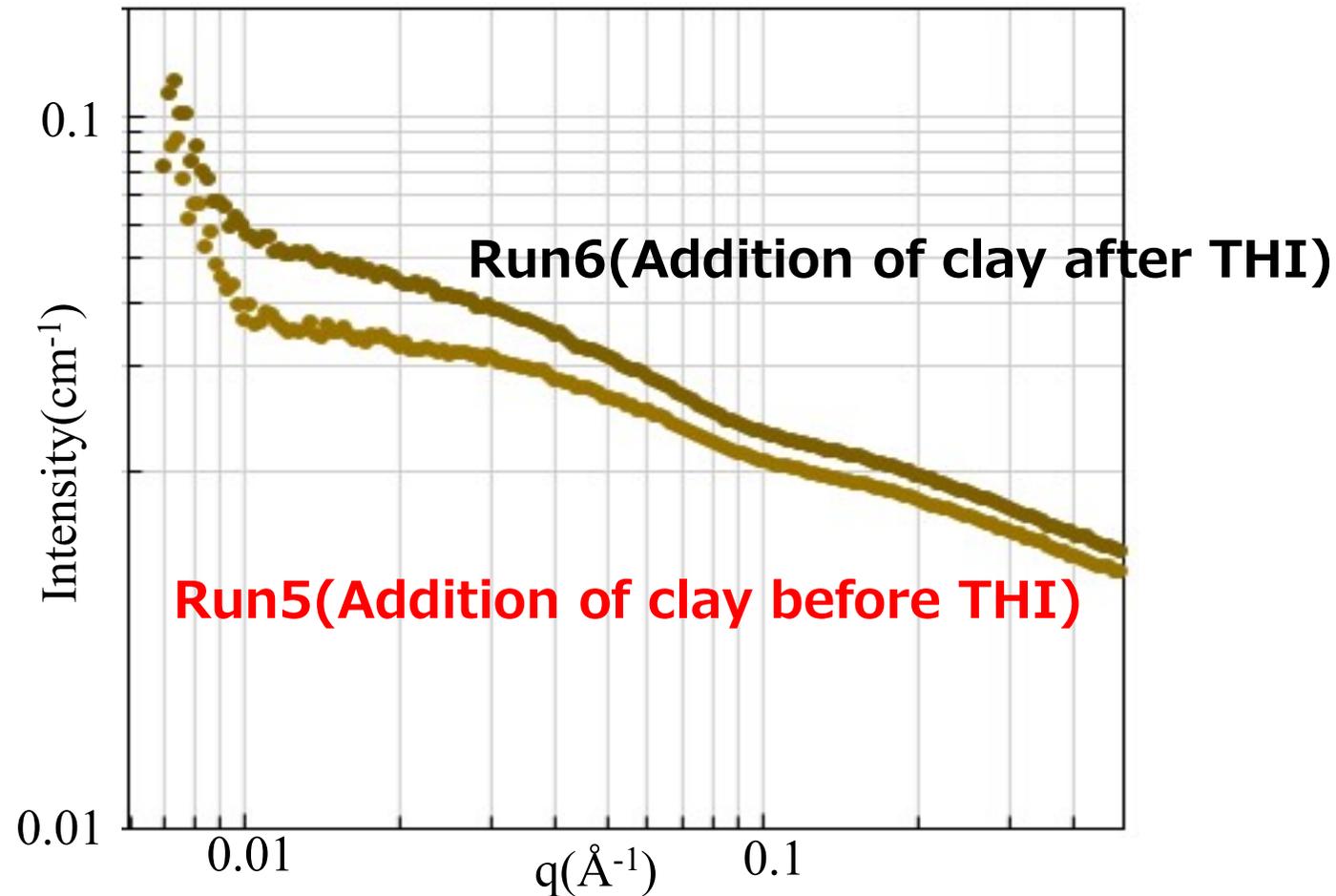
散乱強度 ↑

MNE



散乱強度(20nm構造) ↓
⇒架橋均一化

小角中性子散乱(SANS)データ @J-PARC

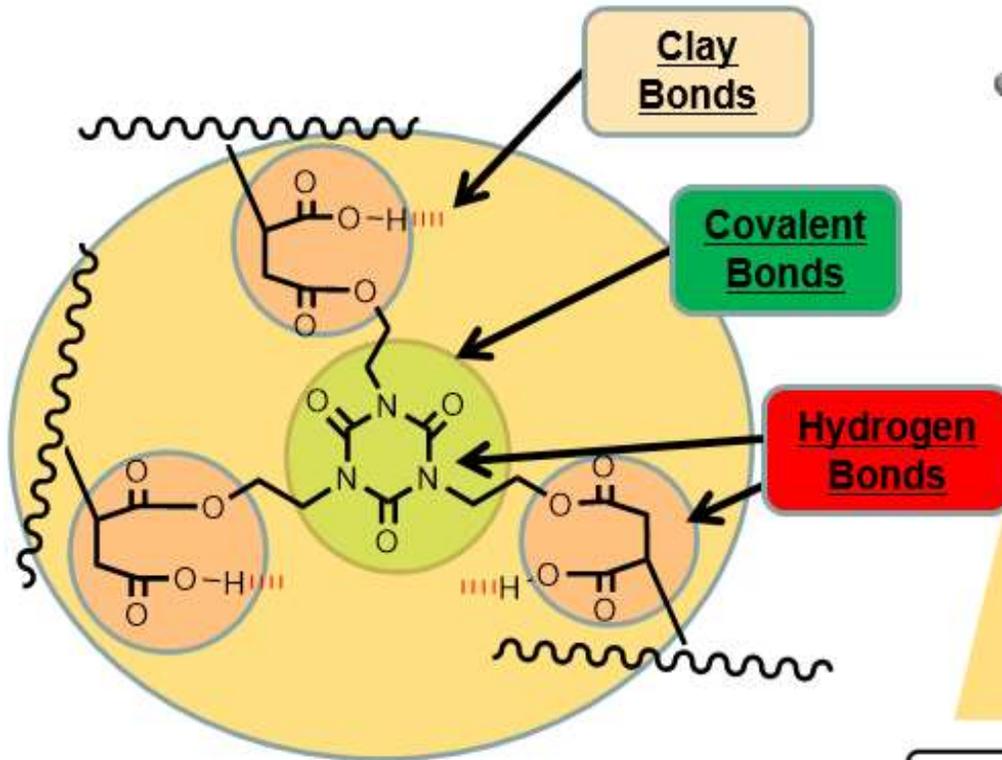


**クレイ先入れ⇒散乱強度↓
⇒架橋均一化⇒物性良**

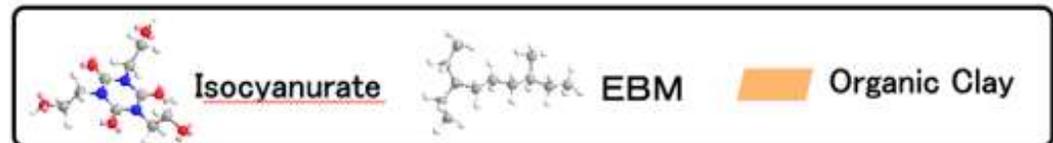
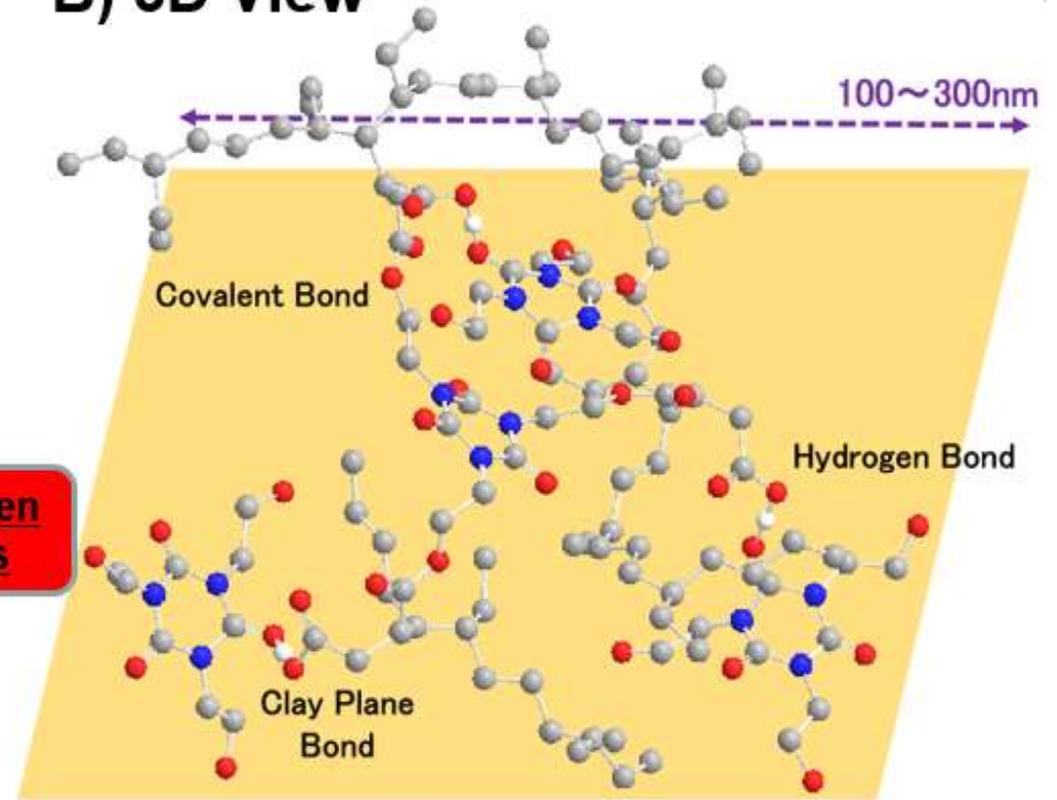
	Run3:HBE + PB	Run5:MNE
破断物性	低下	上昇
圧縮永久歪	上昇	低下
SEM/TEM	繊維状会合体なし 層間の広がり確認できない	繊維状会合体形成 層間距離15nm
AFM	繊維状会合体なし	繊維状会合体形成
IR(CO吸収)	高波数シフトは確認できない	1729 → 1734 cm ⁻¹ シフト ⇒カルボン酸が層間にあるアンモニウム塩と静電相互作用して、カルボン酸同士(2量体)の水素結合が弱まる
DMA	tan-δ低下 ⇒ ヒステリシスE低下	tan-δ上昇 ⇒ ヒステリシスE上昇
SANS	散乱強度上昇	散乱強度低下 ⇒ 架橋点がクレイ面と相互作用して架橋が非局在化

HBE ⇔ MNE: ほぼ逆の傾向

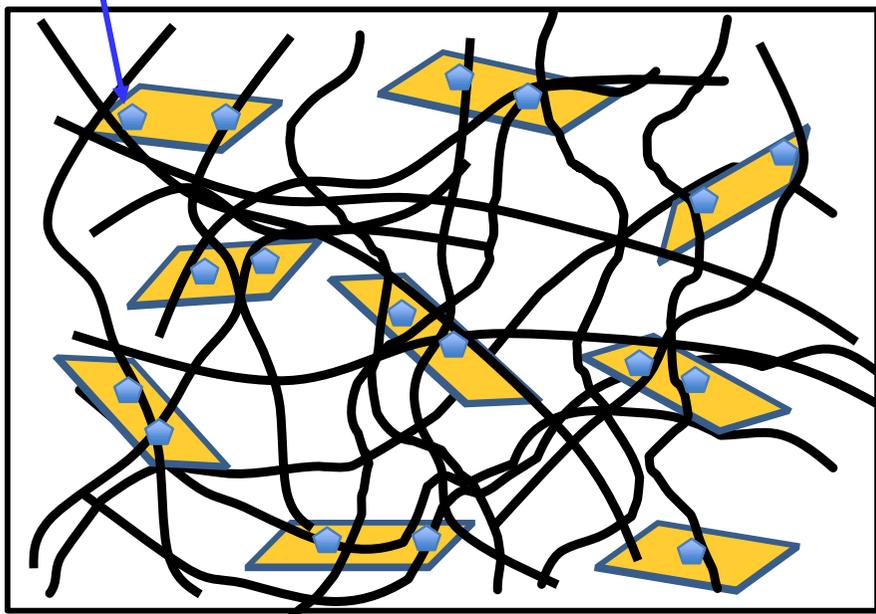
A) Plane View



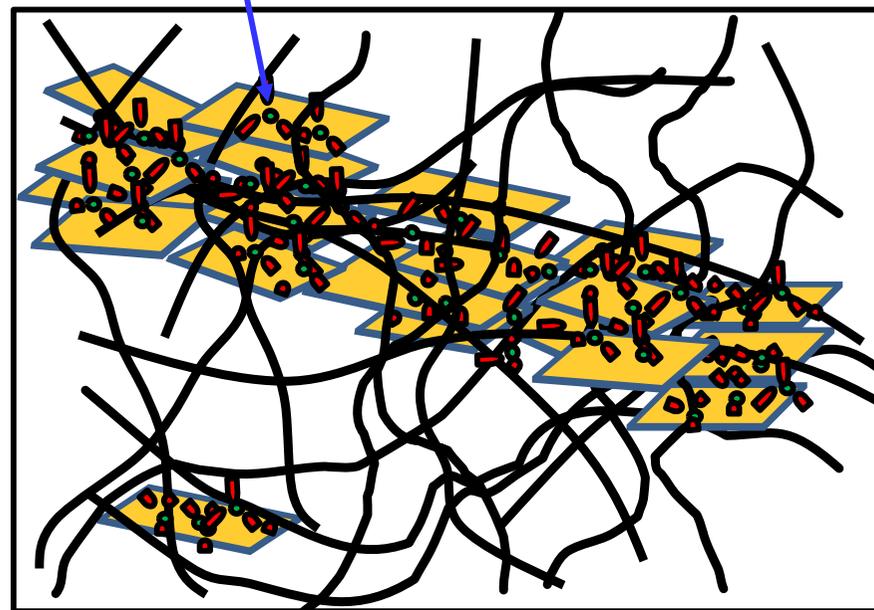
B) 3D View



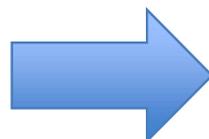
無水マレイン酸基



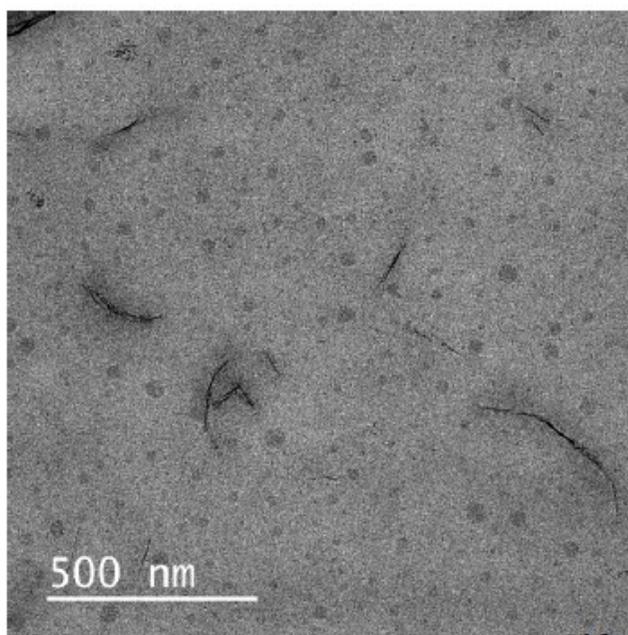
MNE架橋基



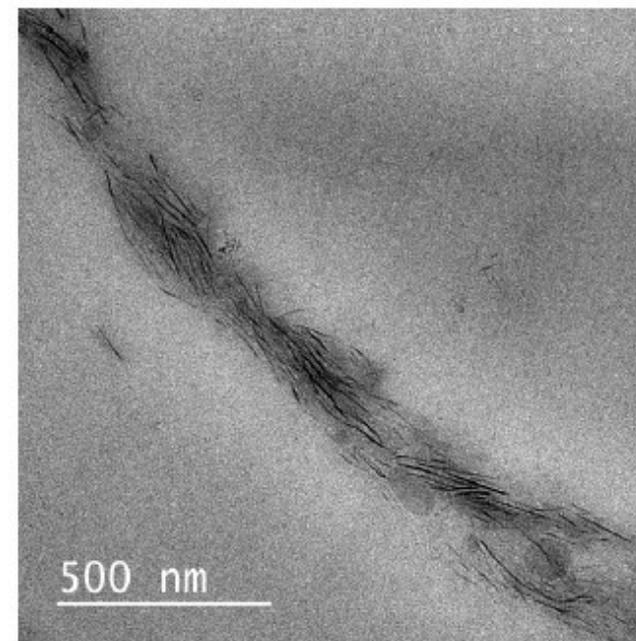
THI
架橋



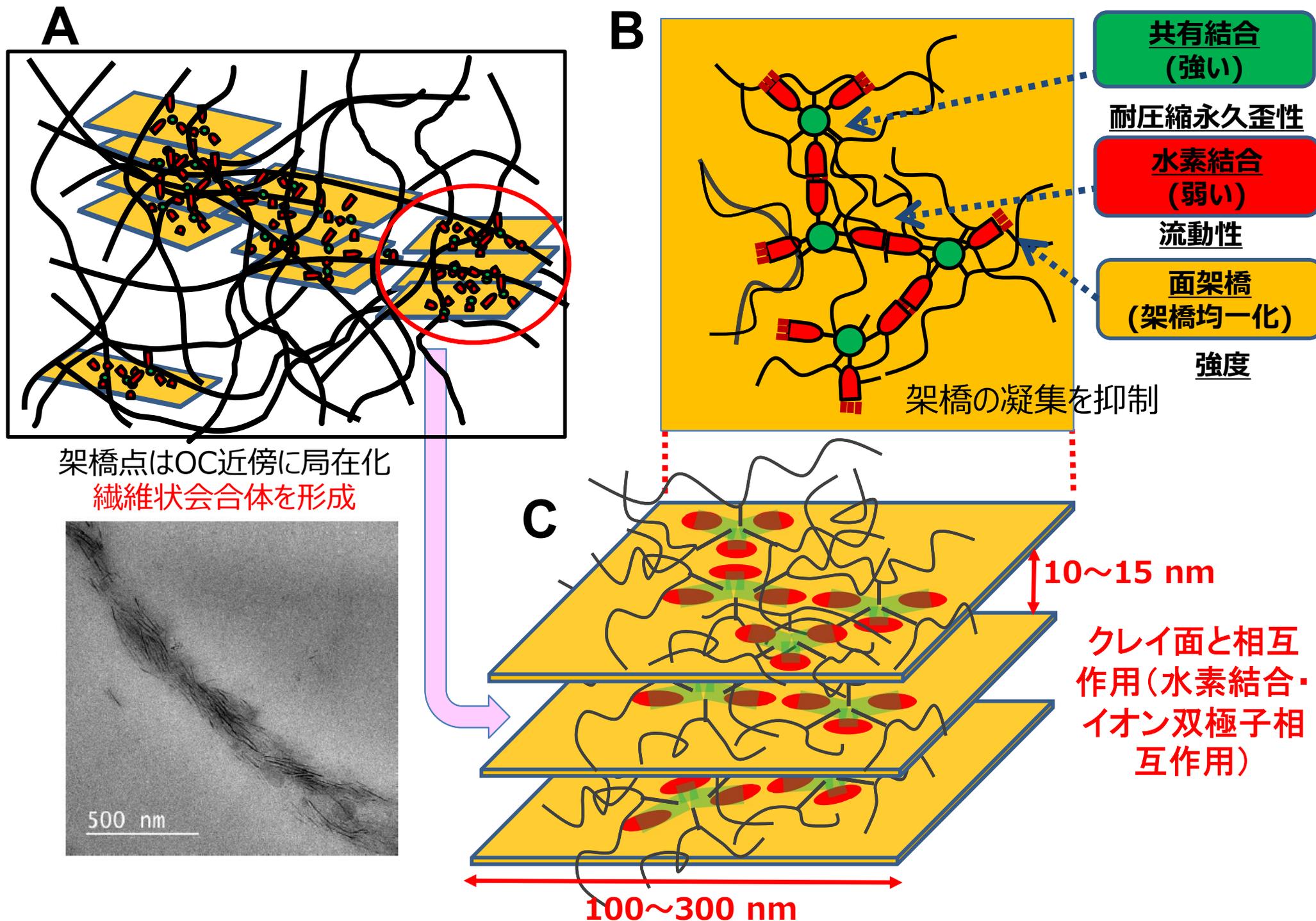
クレイが
集合



クレイが分散



繊維状会合体を形成



HBE : 水素結合エラストマー

- ・クレイの層間に挿入されない⇒繊維状会合体なし
- ・HB架橋だけで物性を発現しているため、クレイ端面の水酸基とHB架橋の相互作用によりHB架橋が阻害⇒物性低下

MNE : マルチネットワークエラストマー

- ・クレイの層間にインターカレート⇒繊維状会合体を形成
⇒ヒステリシスE増大⇒引張物性向上
- ・安定なCB架橋があるため架橋の組み換え起こらず、端面の水酸基とのHB架橋に加えて、層間のアンモニウム塩と静電相互作用して架橋部の非局在化⇒物性向上

熱可塑性・耐クリープ性・引張物性を並立

- ・引張AFM・SAXS測定による繊維状会合体の構造解明
- ・カルボキシ基やイソシヌレート環のイオン双極子相互作用が影響？
- ・種々の架橋基比較→イオン双極子相互作用・水素結合の役割解明
- ・より優れた架橋基を見出し→さらに高性能なTPEを創出

- ・**熱可塑性と耐クリープ性、耐クリープ性と破断物性はトレードオフの関係にある**
- ・**これらのトレードオフを打破するには架橋を機能分離するため、多重架橋の検討が行われてきている**
- ・**二重架橋では、このトレードオフの呪縛から逃れることは難しい**
- ・**三重架橋以上の多重架橋系でこのトレードオフを打破できる兆しが見えてきている。**
- ・**今後、本トレードオフを完全に打破されるアイデアが出てくることを期待したいし、私も努力していきたい。**

謝辞

- ・東京工業大学 中嶋研究室：中嶋教授・伊藤研究員
- ・茨城大学 小泉研究室：小泉教授・前田助教
- ・慶應義塾大学 緒明研究室：緒明教授
- ・ENEOS株式会社 中央技術研究所

心より感謝申し上げます

ご清聴ありがとうございました