

# 超薄膜化・強靱化 「しなやかなタフポリマー」の実現

**ImPACT**  
プログラム・マネージャー  
伊藤 耕三

## 作り込み

ハイリスクな目標、  
テーマを設定

通常の企業研究では設定しない**トレードオフ**打破の目標・テーマ  
(ImPACTだから設定可能)

## PM制度

大胆な裁量権  
運営の自由度

## [ 企業意識の変化 ]

### 参画時

- ・当初は**ハイリスク目標**の設定に戸惑い、恐れ  
(参画企業の選定が困難)
- ・マトリクス運営による情報漏れ懸念
- ・**当初からマッチング**  
(企業も負担)での参加

### 取組み期間中

- ・企業では取り組めないマトリクス運営、**大型研究施設の活用**等に活路  
→**基盤技術の原理実証(POC)**を目指す
- ・開発進展に対応し、体制見直し、要員増強が進み、**加速度的にマッチングが増大**
- ・経営層に成果が浸透し、**社内認知度up**

### 最終年度(企業からの声)

- ・**企業単独では成果獲得が不可能、または莫大な予算と時間が必要**
- ・研究費の柔軟使用が効果的
- ・アカデミアとの人脈形成、人材育成が将来の大きな財産
- ・Only1, No1材料の手詰まり感に風穴が空けられた

## ImPACT取組み

新規科学技術で  
**トレードオフ**を打破

目標

現状

非連続イノベーション  
トレードオフ

## 成果展開へ

事業化に向け、  
企業が開発継続

獲得した**原理実証(POC)**の**成果**は、設定テーマの事業化に加え、テーマを超えて広く活用可能

## 産学連携マトリクス運営

横断的共通課題(学のオープン領域) + 企業のクローズ領域  
1企業-複数アカデミア(同時)、1材料-1企業

連携仕掛

自主的な  
連携促進

連携深化  
新しい連携

産学人脈形成・若手育成



# 様々な課題を解決する材料：ポリマー

3大材料：金属、セラミック、**ポリマー**

**ポリマー**：プラスチックやゴム、繊維、ジェル・・・

**ポリマーの特徴 = 薄く、軽く、柔軟**

航空機

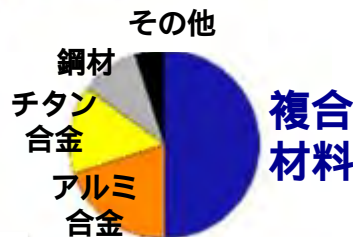
合金材料 複合材料  
(強化繊維 + **ポリマー**)



自動車

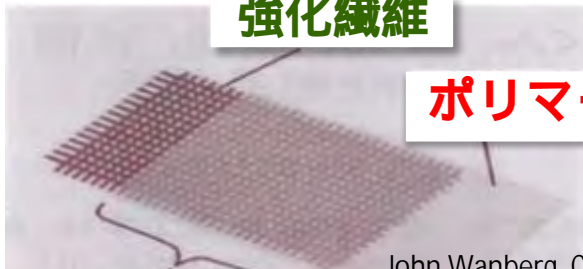
複合材料・**ポリマー**化により  
市場拡大へ \* 日本主導が期待

炭素繊維市場  
2,000億程度  
(日本が60-70%)



強化繊維

**ポリマー**



複合材料

John Wanberg, Composite materials fabrication handbook, Wolfgang Productions, 2009, p6図1を元に手を加えた



提供：東レ

車重半分・燃費2倍

課題

高生産性、低コスト  
タフネス  
(硬さとしなやかさの両立)

# しなやかなタフポリマーの実現

薄くても破れない、硬くても脆くない

- 強靱性の向上 → 亀裂が入っても進展しない (壊れにくい)
- 柔軟性・形状回復性 → 力を分散して 躲(かわ)す
- 自己修復性 → 劣化を食い止めて破壊を未然に防ぐ



最先端化学

総合科学技術・イノベーション会議 (平成27年9月)



放射光施設



スーパーコンピュータ

提供：理化学研究所・北海道大学 龔劍萍 研究室

日本のポリマー基盤技術は世界のトップレベル

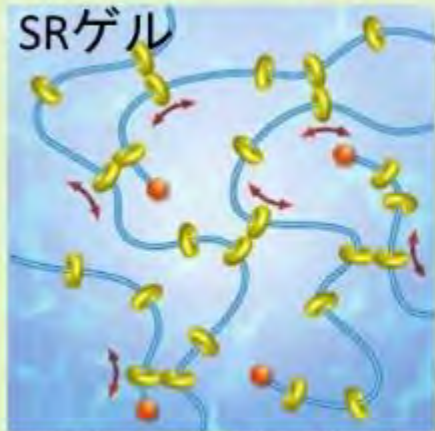
産業応用として、自動車だけでなく、電子機器、ロボット、医療、農業をはじめ広範な分野の課題を一挙に解決



# タフポリマーを実現する分子設計

超分子+高分子

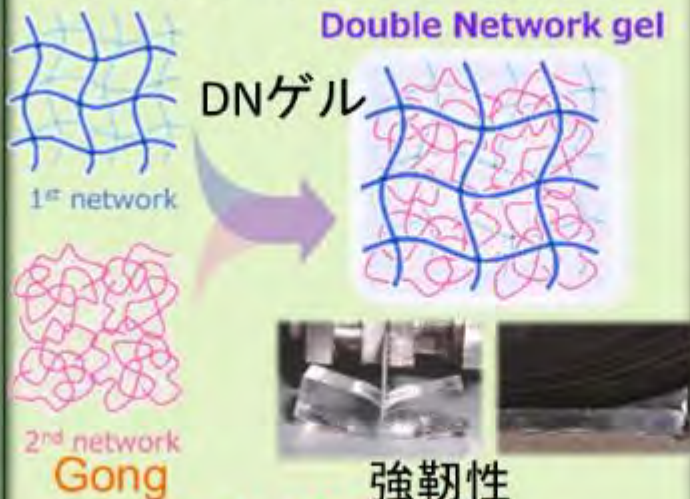
SRゲル



柔軟性/形状回復性  
伊藤(東京大学)

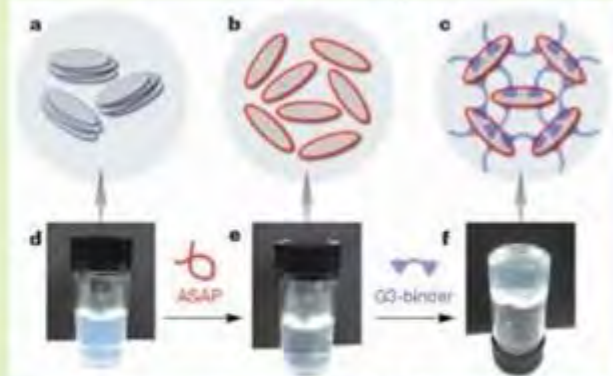
(柔らかい+硬い) 高分子

Double Network gel



強靱性  
龔(北海道大学)

クレイ+超分子(水素結合)



自己修復性  
相田(理研)

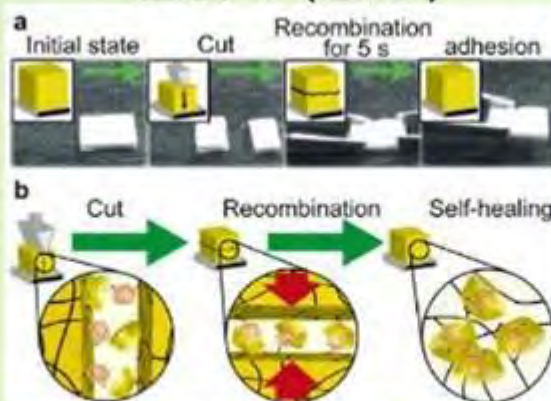
タフにする≠硬くする  
= 壊れにくい



しなやかなタフネス

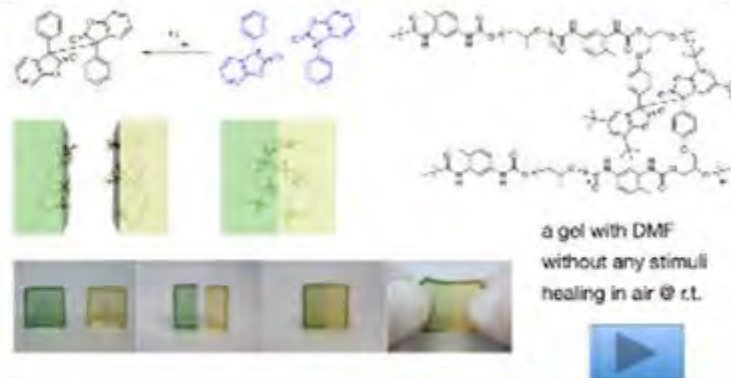
「柔能く剛を制す」  
出典：三略

超分子(包接)



自己修復性  
原田(大阪大学)

動的共有結合



自己修復性/強靱性  
大塚(東京工業大学)

# 破壊機構の分子的解明

mm 高分子材料

成形プロセス



理論・FEM

奥村(お茶大)・梅野(東大)

亀裂進展過程の観察

浦山(京都工繊大)・龔(北大)

新規成形プロセス

伊藤浩(山形大)

局所的な破壊エネルギーの測定

高原 / 田中(九大)・中嶋(東北大)

高次構造(結晶化、相分離、架橋、複合化)  
破壊・疲労・劣化にとって支配的要因

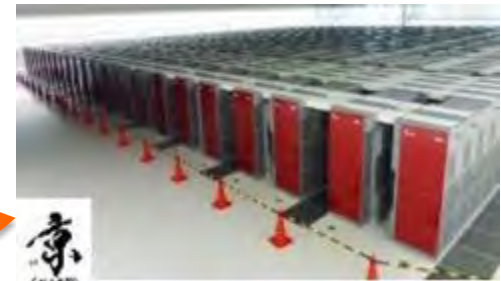
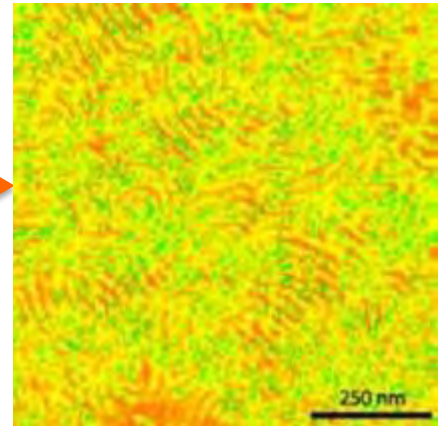
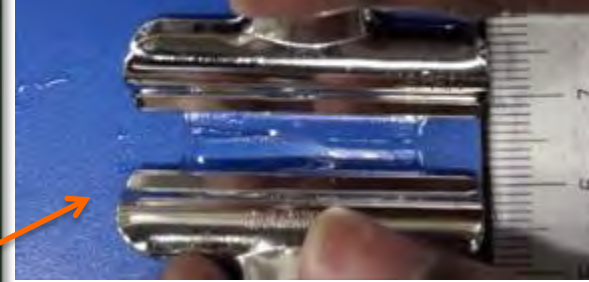
破壊過程の構造解析

高田(東北大)・高原(九大)

分子の壊れる様子を  
シミュレーションで再現

岡崎(名大)

動画: 龔研究室(北大)提供



nm



# 「タフポリマー」がクルマを進化させる

車体構造用ポリマー  
(東レ)  
透明ポリマー  
(住友化学)

5材料をそれぞれ企業が検討  
材料の評価を日産自動車が担当

車体構造の強靱化



鉄球落下試験

軽量化・強靱化  
安全性・信頼性

G4: タフポリマー化の  
汎用性検証  
宇部興産、旭化成



タイヤ断面

タイヤの薄ゲージ化

軽量化・省資源

タイヤ  
(ブリヂストン)

燃料電池

(AGC)

リチウムイオン電池  
(三菱ケミカル)



セパレータの薄膜化

高出力・大容量  
小型化

システム化・評価  
(日産自動車)

26年度

27年度

28年度

29年度

30年度



## プログラム



	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
■ 予算	35億		38億(+3)	48.5億(+10.5)	
■ 機関数	15	26	29	30	33
企業	6	8	8	9	11
大学	9	18	21	21	22
■ テーマ	5				10

①コンセプトカー製作、車以外の横展開  
②タフポリマー化の汎用性検証

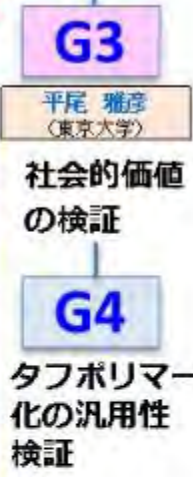
プログラムの変更



2016 ~ 新PJ「コンセプトカー製作」

2017 ~ タフポリマーの分子設計・材料設計指針の汎用性の検証[G4]

PJ	燃料電池 電解質膜 薄膜化	Li電池 セパレータ 薄膜化	車体 構造用樹脂 強化	タイヤ 薄ゲージ化	透明樹脂 強化	システム化・ 評価	横断的 共通課題	
PL	AGC 立松 伸	三菱ケミカル 玉田 源典	東レ 小林 定之	ブリヂストン 角田 克彦	住友化学 永松 龍弘	日産自動車 坂元 宏規	東京大学 伊藤 耕三	
<b>G1</b> 破壊機構 の 分子的解明	高原 淳 (九州大学)	○	○	○	○	材料開発企業 との連携を 個別に推進	○	
高田 昌樹 (理化学研究所)	○	○	○	○	○			
クニ 剣洋 (北海道大学)	○	○	○	○	○			
岡崎 進 (名古屋大学)	○	○	○	○	○			
奥村 剛 (お茶の水女子大学)	○	○	○	○	○			
<b>G2</b> 分子結合制御 の 新手法開発	原田 明 (大阪大学)	○	○	○	○			○
相田 卓三 (理化学研究所)	○	○	○	○	○			
伊藤 浩志 (山形大学)	○	○	○	○	○			
伊藤 耕三 (東京大学)	○	○	○	○	○			
コンセプトカー 製作	東レ・CM 竹林 康仁	○	○	○	○			○



指名：15機関[6]  
 公募：9機関[1]  
 追加指名：8機関[3]  
 [企業数]

(2019/1時点)

## ImPACTスタート時点の企業のマッチング状況

: 具体的テーマ検討

PJ	タフポリマー材料開発					材料評価	共通課題解決
	燃料電池 電解質膜 薄膜化	Li電池 セパレータ 薄膜化	車体 構造用樹脂 強靱化	タイヤ 薄ゲージ化	透明樹脂 強靱化	システム化 評価	横断的 共通課題
PL	旭硝子 立松 伸	三菱樹脂 高木 潤	東レ 小林 足之	ブリヂストン 角田 克彦	住友化学 北山 威夫	日産自動車 原田 宏昭	東京大学 伊藤 耕三
破壊機構 の 分子的解明	高原 淳 (九州大学)						
	高田 昌樹 (理化学研究所)						
	クン 剣萍 (北海道大学)						
	岡崎 進 (名古屋大学)						
	奥村 剛 (お茶の水女子大学)						
分子結合制御 の 新手法開発	原田 明 (大阪大学)						
	相田 卓三 (理化学研究所)						
	伊藤 浩志 (山形大学)	◎					
	伊藤 耕三 (東京大学)			◎			
	沢田 英夫 (弘前大学)	◎竹内 久雄 (MCHC/RDSC)	中嶋 健 (東北大学)	◎浦山 健治 (京都工芸繊維大学)			竹岡 敬和 (名古屋大学)
		◎河井 貞彦 (群馬大学)	榎野 宣崇 (東京大学)	田中 敬二 (九州大学)			濑宮 和男 (理化学研究所)
			林 祐樹 (アドバンスト・ソフマテリアルズ)				大塚 英幸 (東京工業大学)

(材料開発企業)

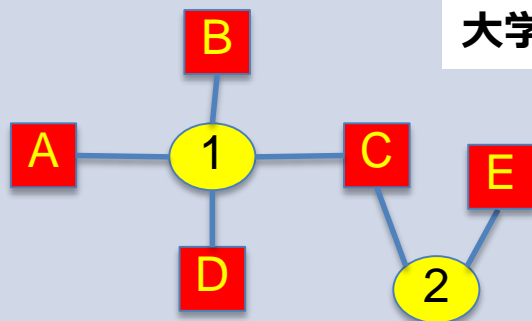
アカデミアとのマッチング (共同研究、委託研究等) は少ない  
 高分子学会等を通じて、関連アカデミアと顔見知り、情報交換は盛ん



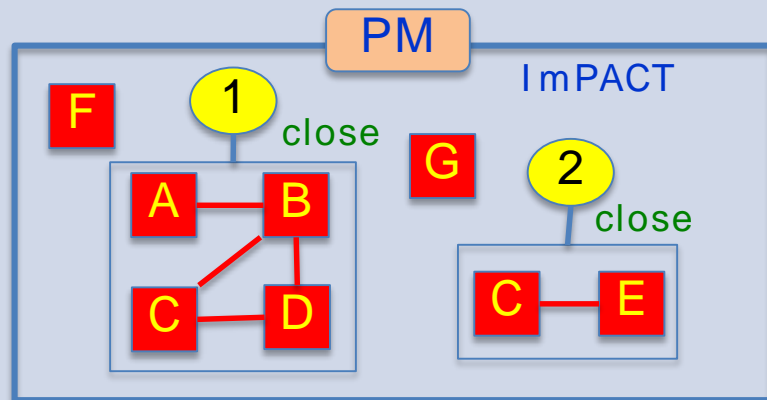
従来

ImPACTマトリクス運営

構成図



企業：1, 2  
大学：A ~ G



契約

産学個別契約

ImPACT実施規約 (PM権限, 秘密保持)

特徴

1企業 1大学

1企業多大学(同時)、1テーマ1企業

課題点

企業成果が限定的  
大学関連が難しい

情報漏洩の懸念

情報がゴリ設定  
open/close明確化

利点

・ 情報管理容易

当初  
想定

・ 臨機応変に連携  
・ 課題解決力向上

ハイリスク・ハイリパの外な  
研究開発に有効

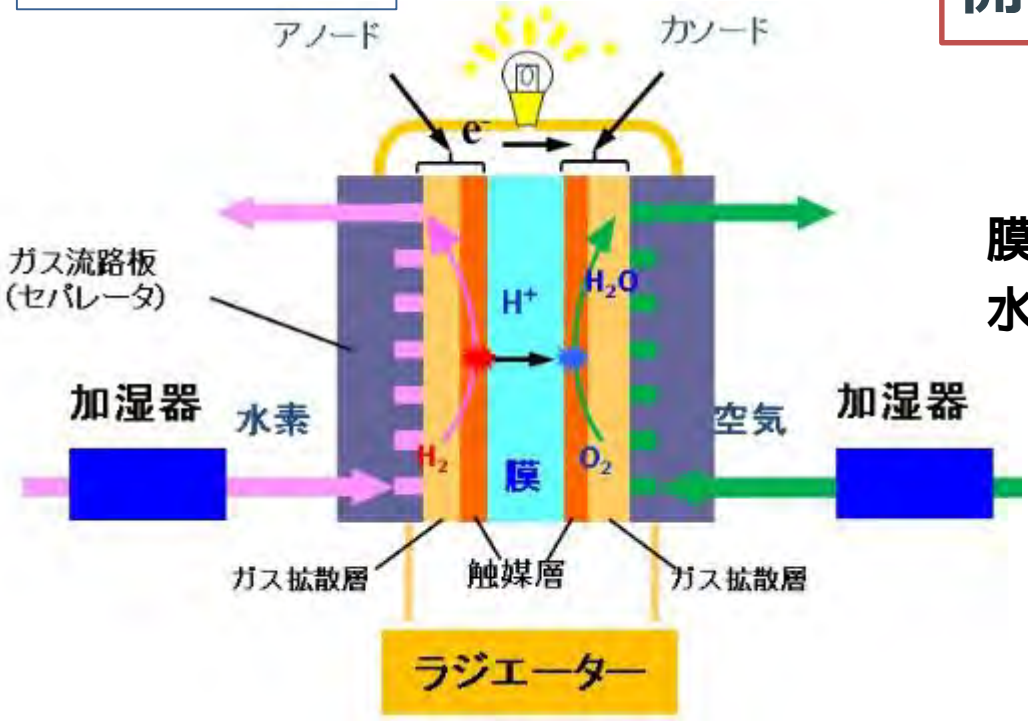
成果

・ 企業個別の成果に貢献

予想  
超の  
成果

・ 新しい産学、学学連携で思わぬ成果  
・ 企業間競争、企業内認知度アップ  
・ 横断的人脈形成、若手育成  
・ マトリクス運営の有効性実証

## 燃料電池の基本構造



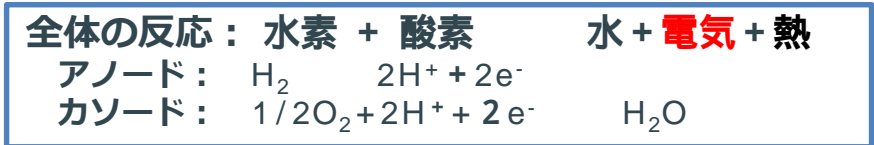
開発目標： 25μm    5μm

## 電解質膜の薄膜化によるメリット

- 膜抵抗低減
- セル出力（効率）向上
- 水移動度向上
- セル内湿潤環境均一化



小型・低コストな  
次世代燃料電池システムを実現



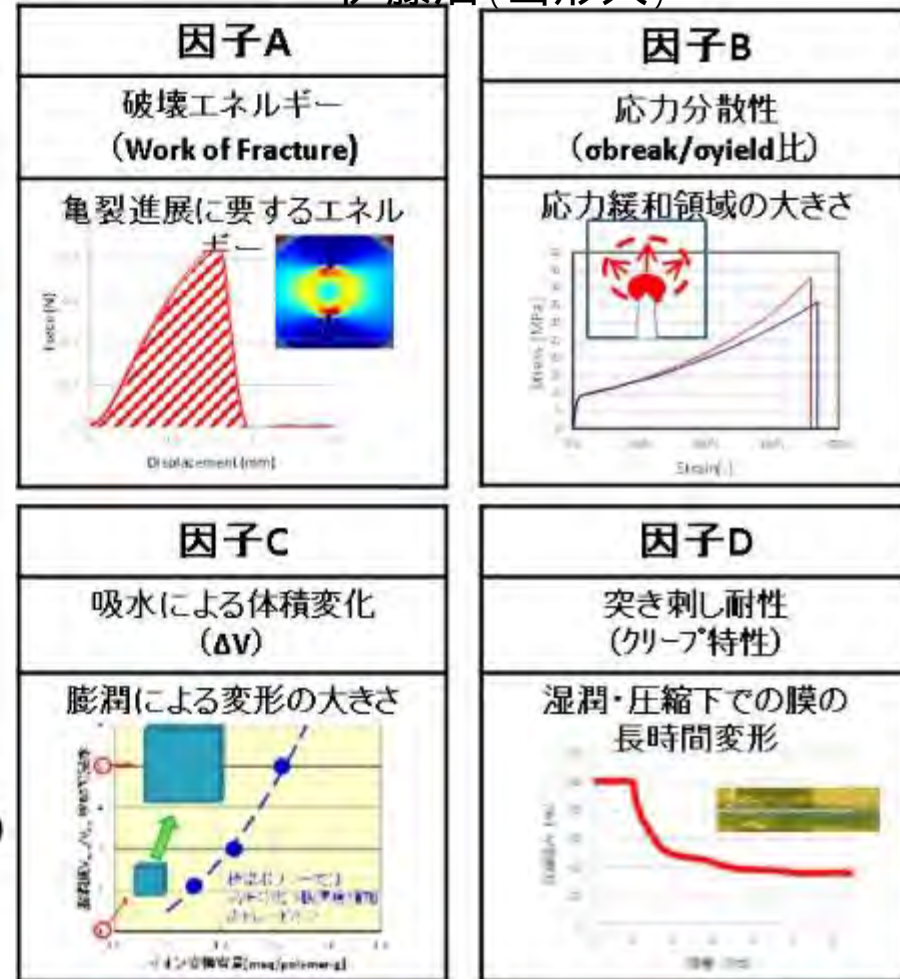
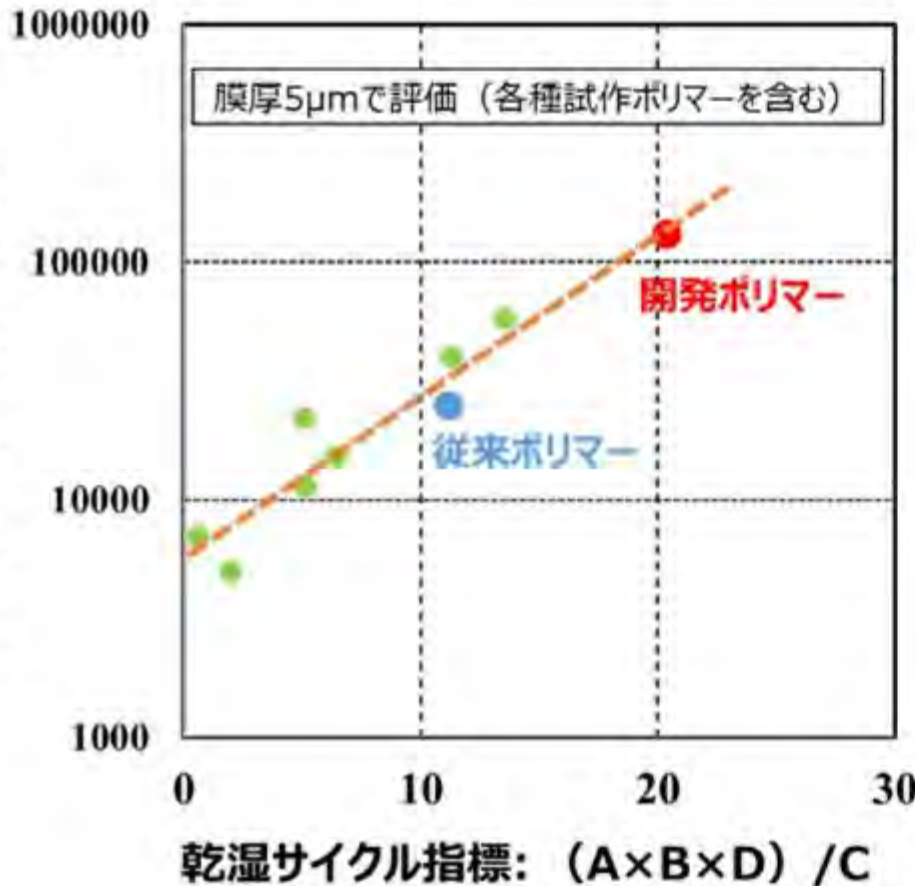
スタックの小型化  
(部材低減、スペース捻出)

システムの簡略化  
(レーザー小型化、補機の簡素化)

水素社会の実現に向けた燃料電池車の本格普及に期待

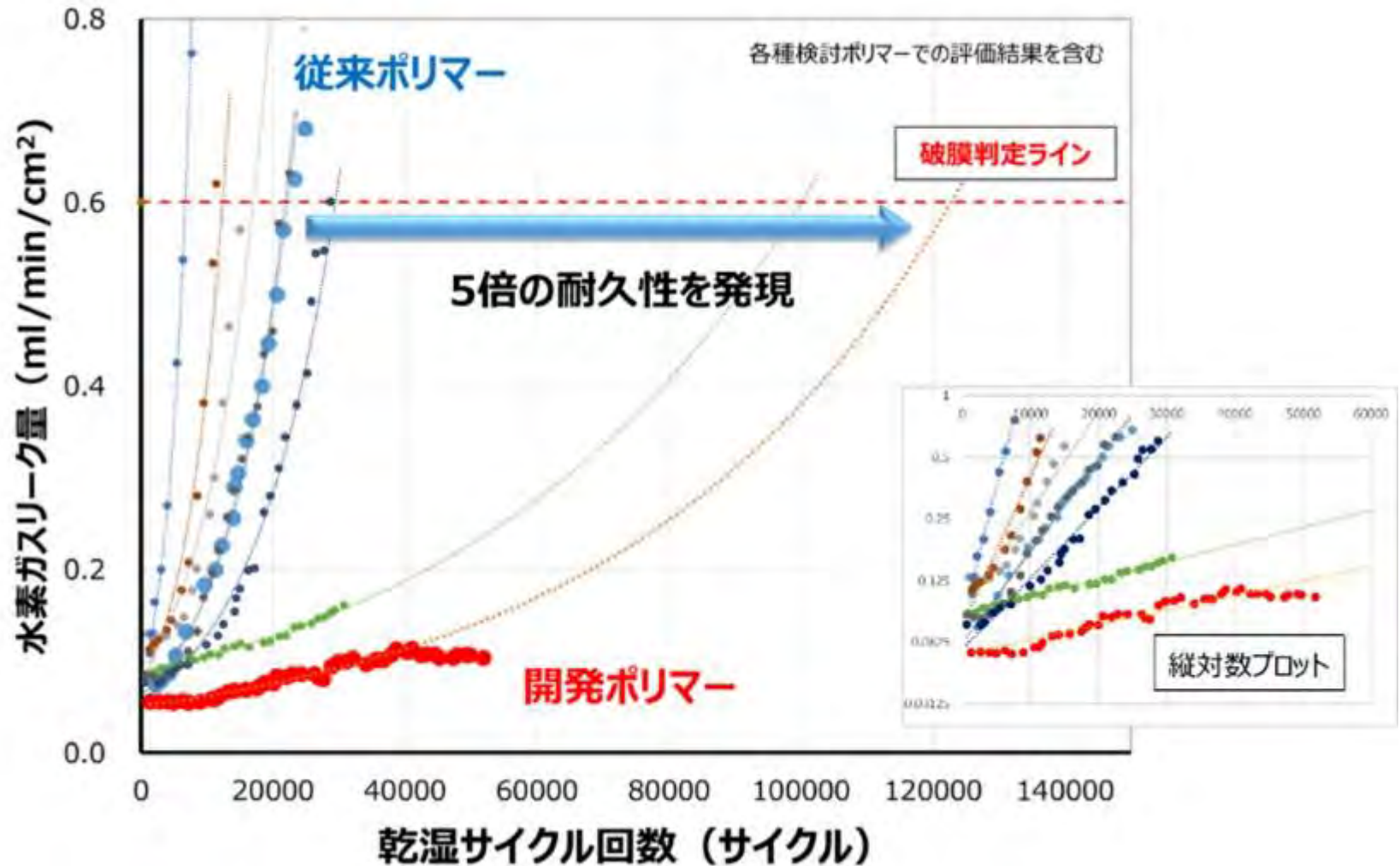


伊藤浩(山形大)



劣化を支配するマクロな膜物性の中から、“乾湿サイクル指標”を導出  
ポリマー物性から乾湿サイクル耐性の予測が可能

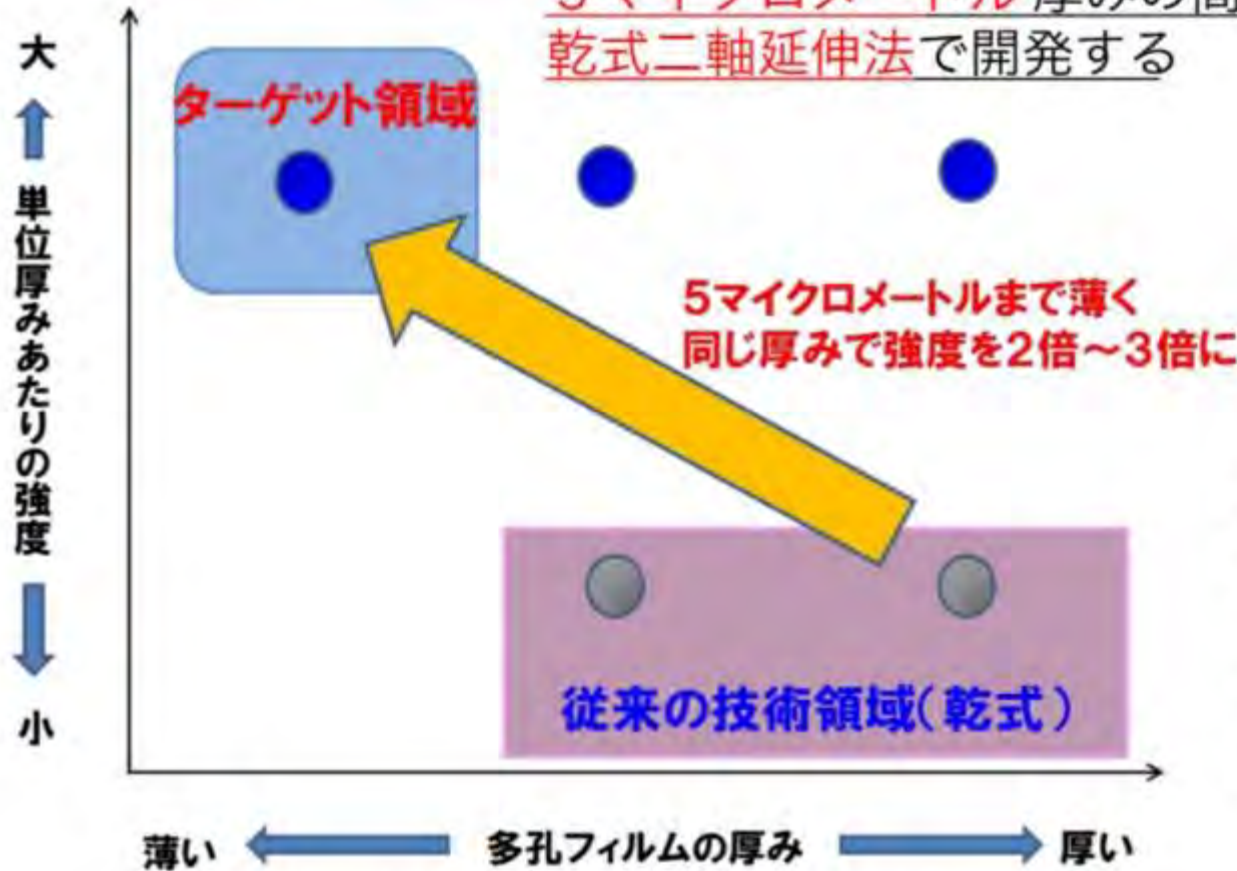
### 無補強 5 $\mu\text{m}$ 薄膜の乾湿サイクル耐久性



開発ポリマー膜(無補強 5  $\mu\text{m}$  薄膜)は、従来ポリマー膜の5倍の耐久性を発現



リチウムイオンの透過性 (透気度)を十分確保しつつ、  
5マイクロメートル厚みの高強度セパレーターを  
乾式二軸延伸法で開発する



ナノメートルサイズ孔

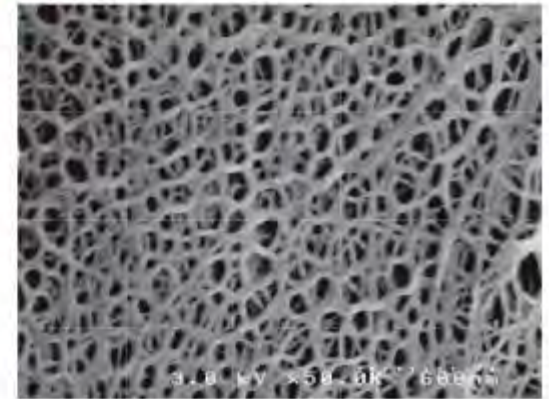
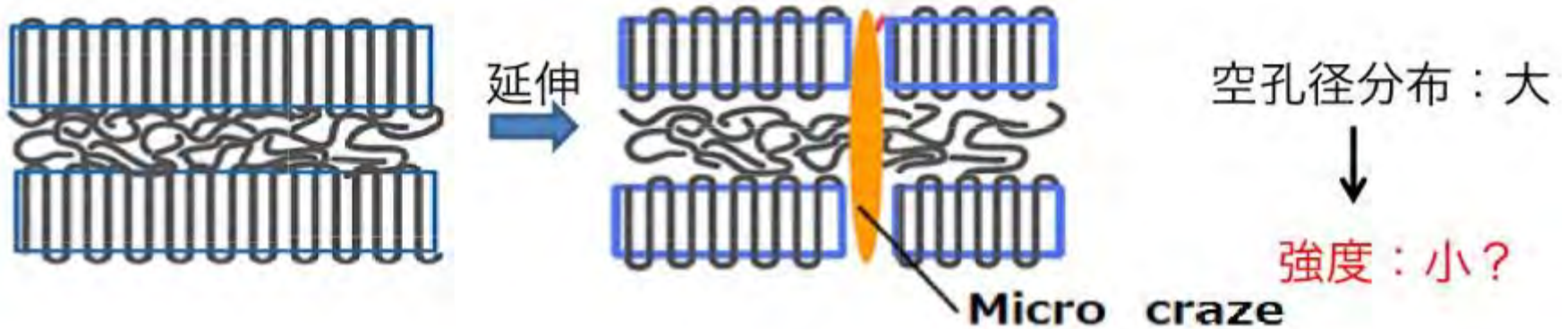


図1 ImPACTにおけるターゲット



河井 (群馬大)  
SPring-8 BL05SS



提言

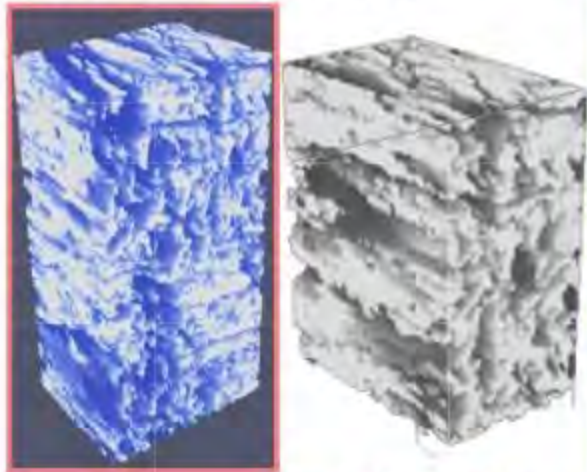
- ①ラメラの配向を揃える
- ②配向に垂直に延伸する



高強度化

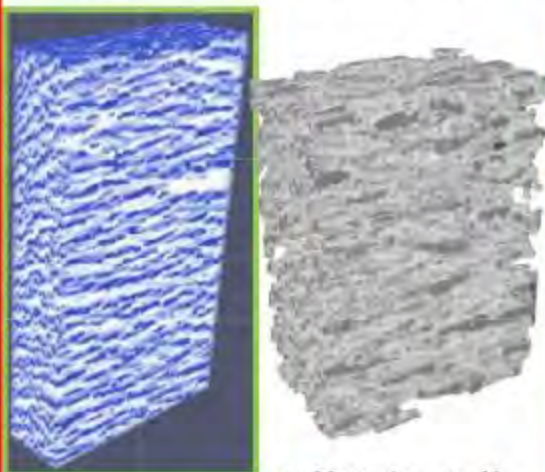


乾式法（二軸延伸）



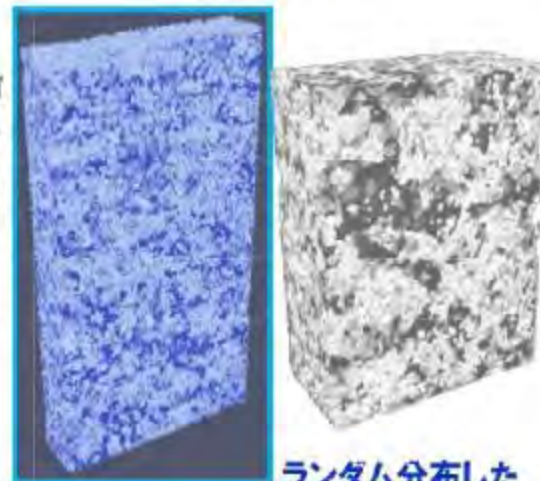
MD方向に太い幹

乾式法（一軸延伸）



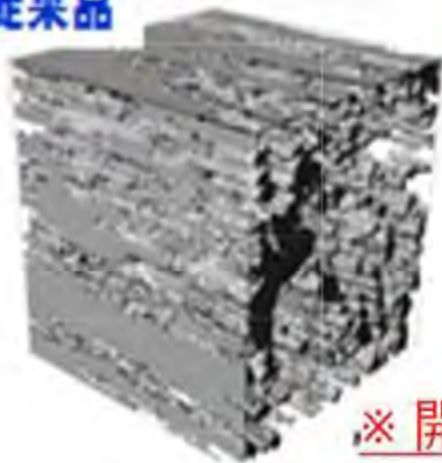
比較的均一網状  
細孔構造

湿式法

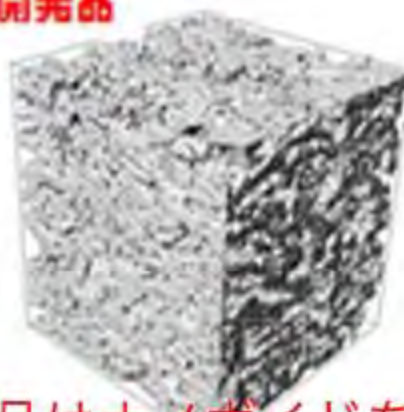


ランダム分布した  
細かい細孔構造

従来品



開発品



- ①空孔構造の解析
- ②空孔径、空孔率等の計算

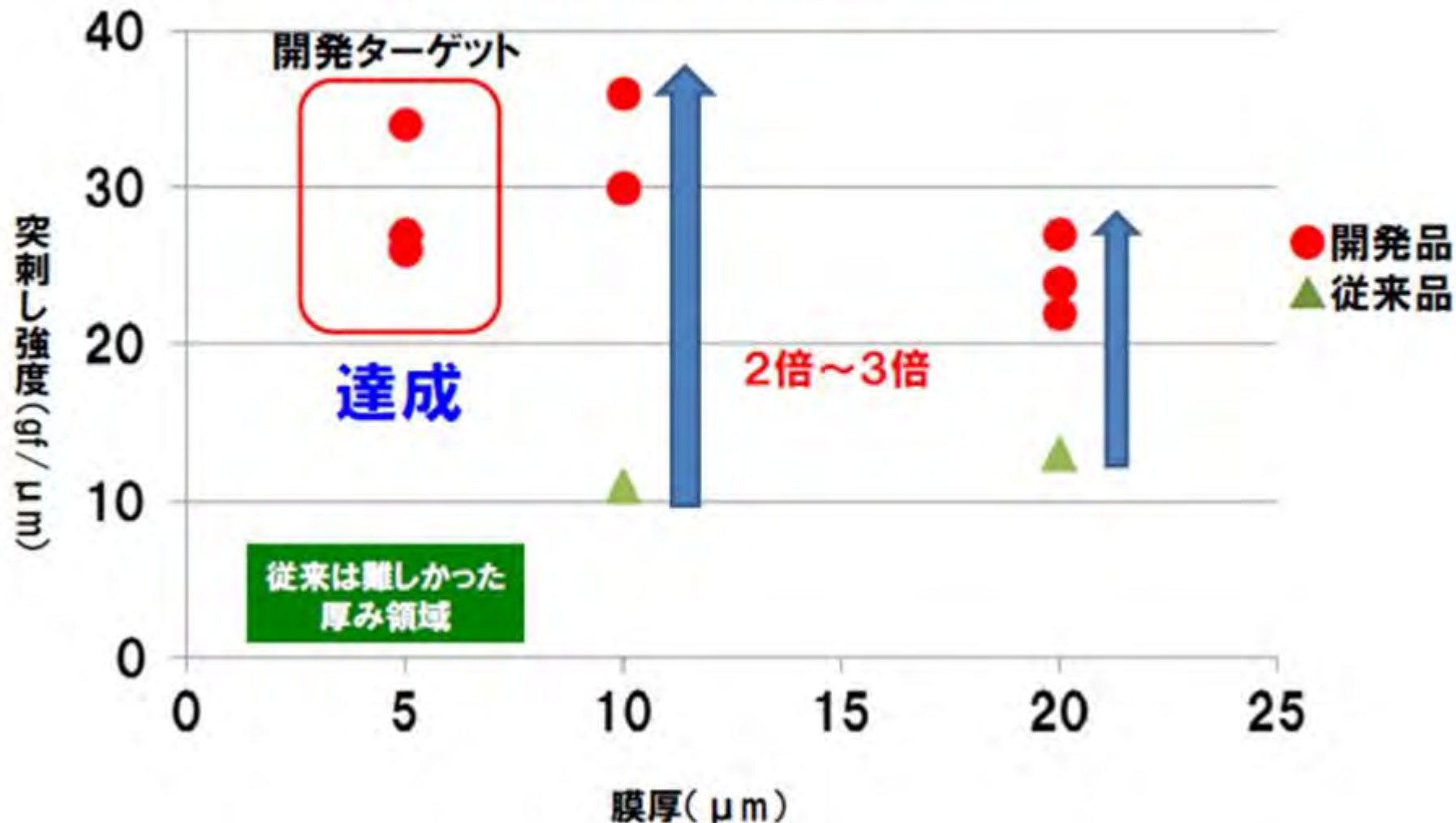
※ 開発品はナノポイドを有する等方的・均一化した空孔構造

# 目標の定量化と到達度

三菱ケミカル・セパレータ薄膜化

## 多孔質フィルムの薄膜高強度化を実現

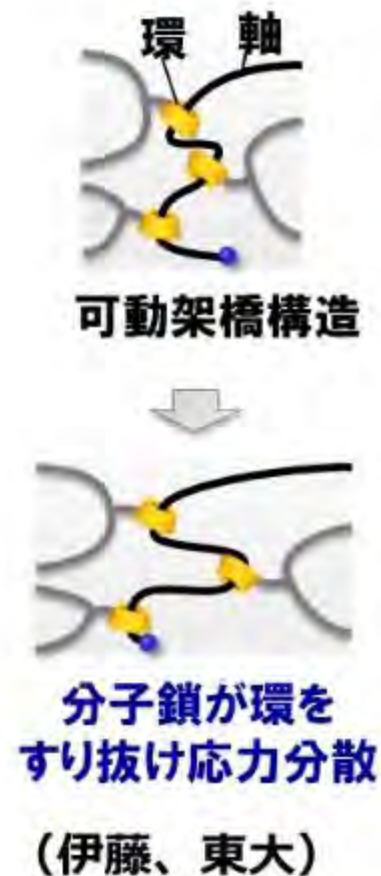
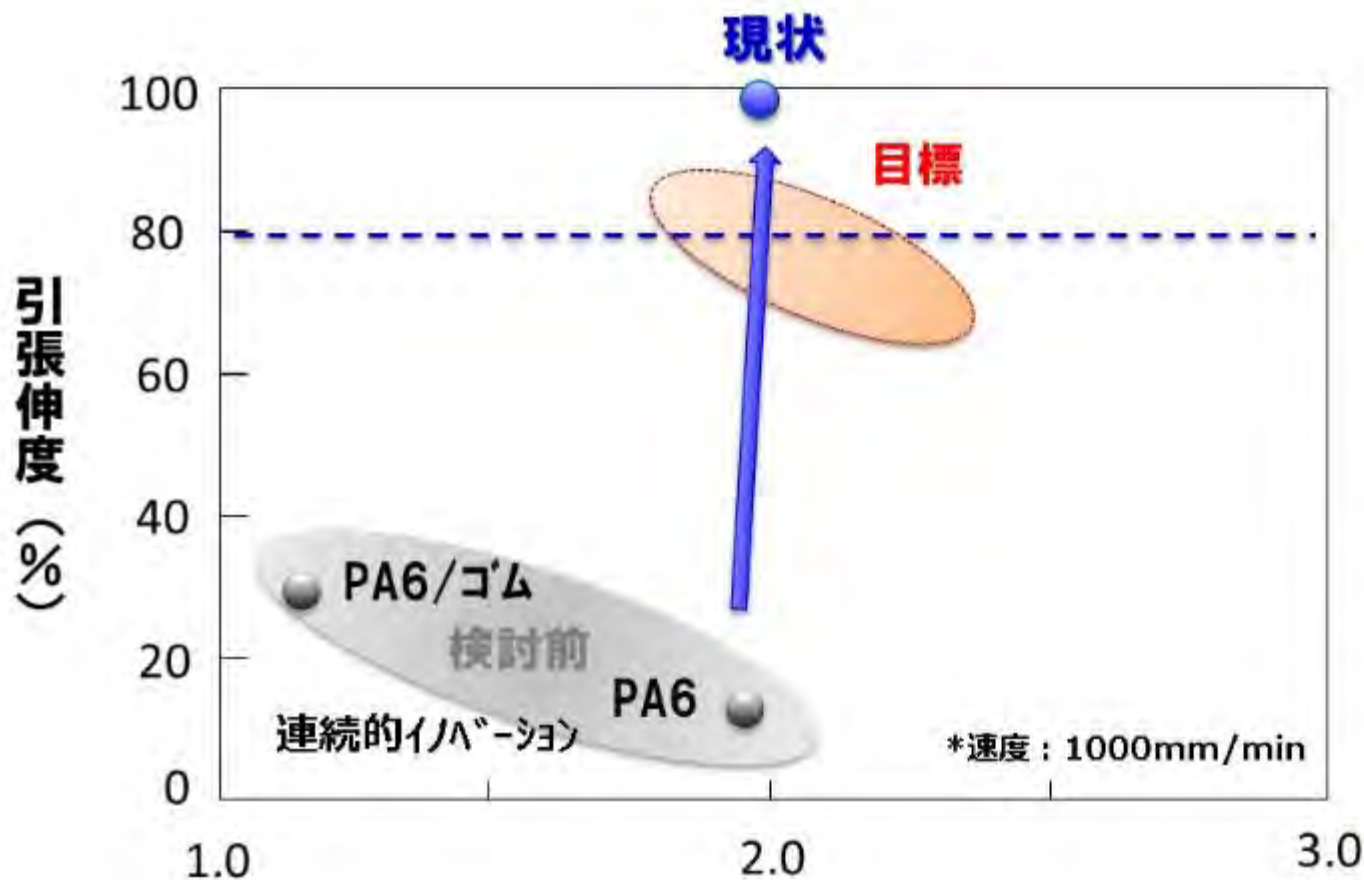
【目標】 突刺し強度(単位厚み換算): **2倍~3倍**に  
薄膜化: **5マイクロメートル( $\mu\text{m}$ )**に





# 目標の定量化と到達度

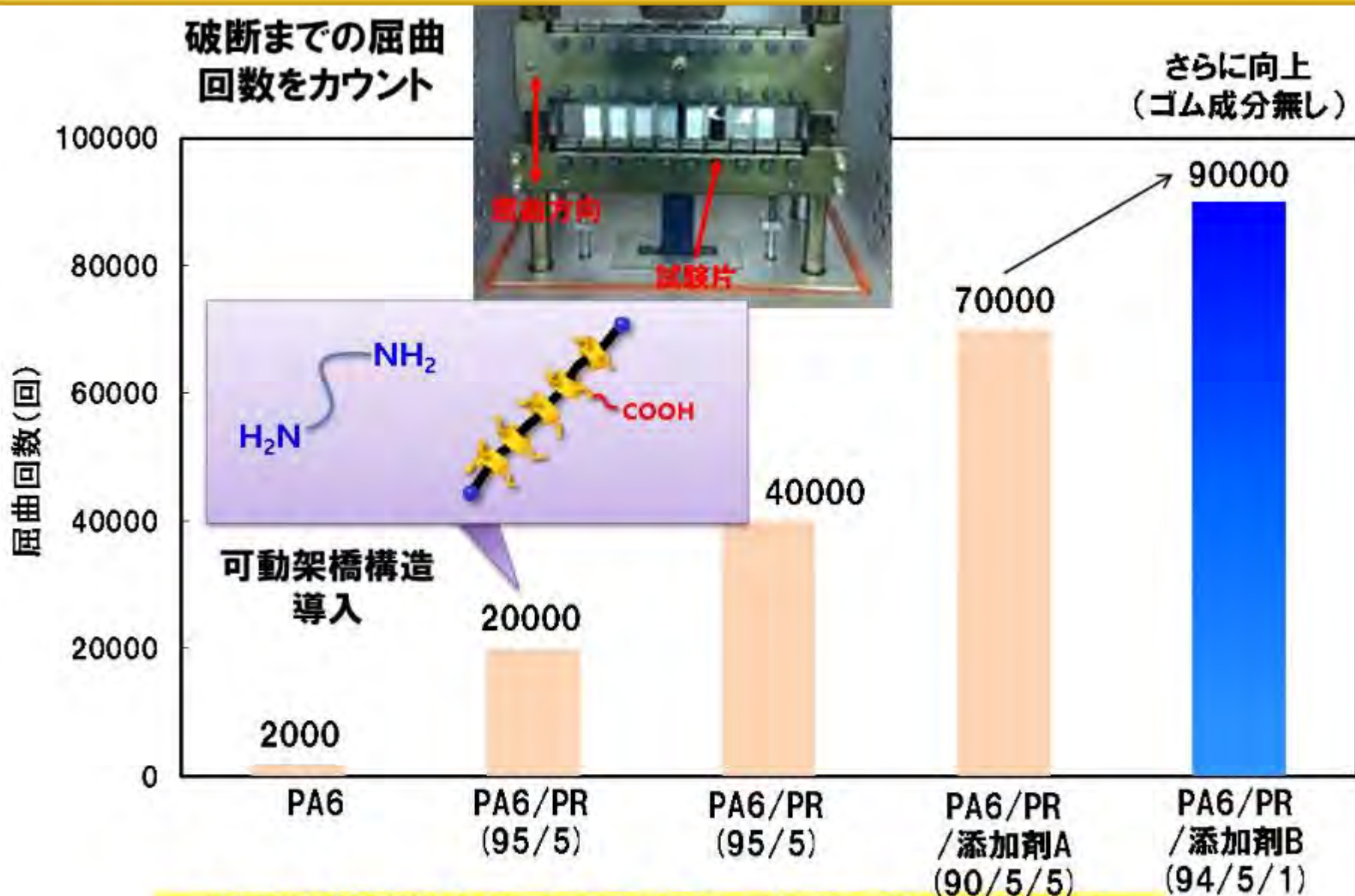
**達成目標** 引張弾性率2GPa以上かつ破断伸度80%以上（非強化系）  
破壊靱性値130%（強化系）



PA6: 6ナイロン

\*速度: 1000mm/min

# 屈曲試験(非強化系)

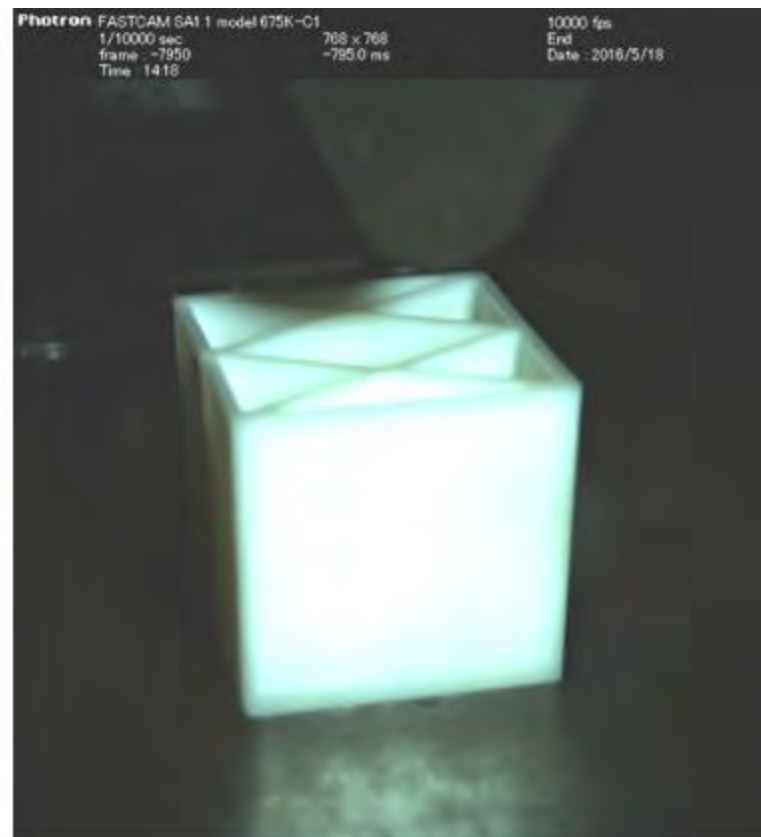
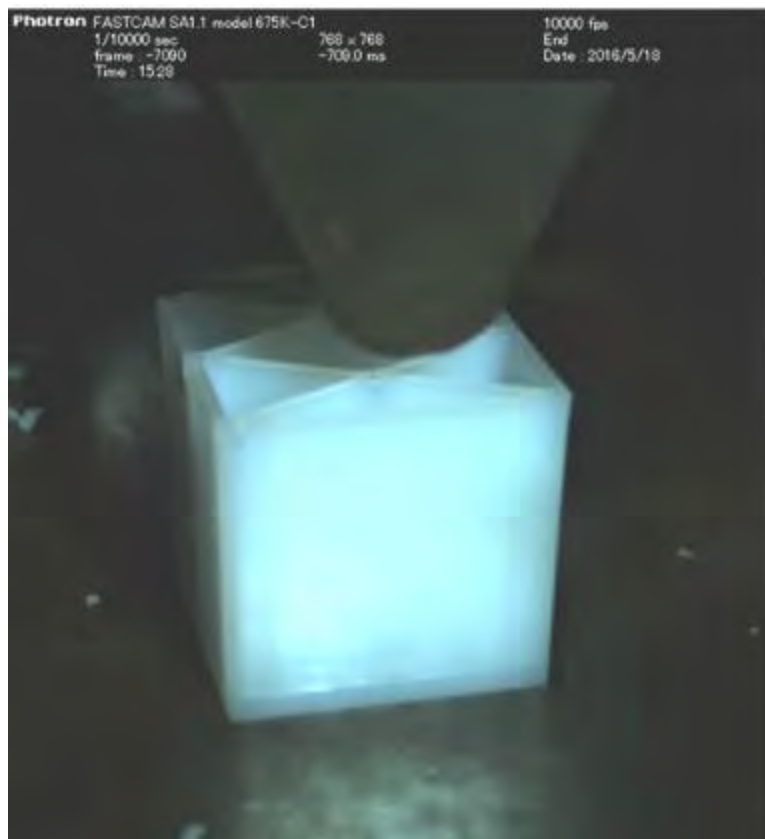


■ 耐疲労特性が向上することで、部材の耐久性が向上



### ポリアミド単体

### タフポリマー

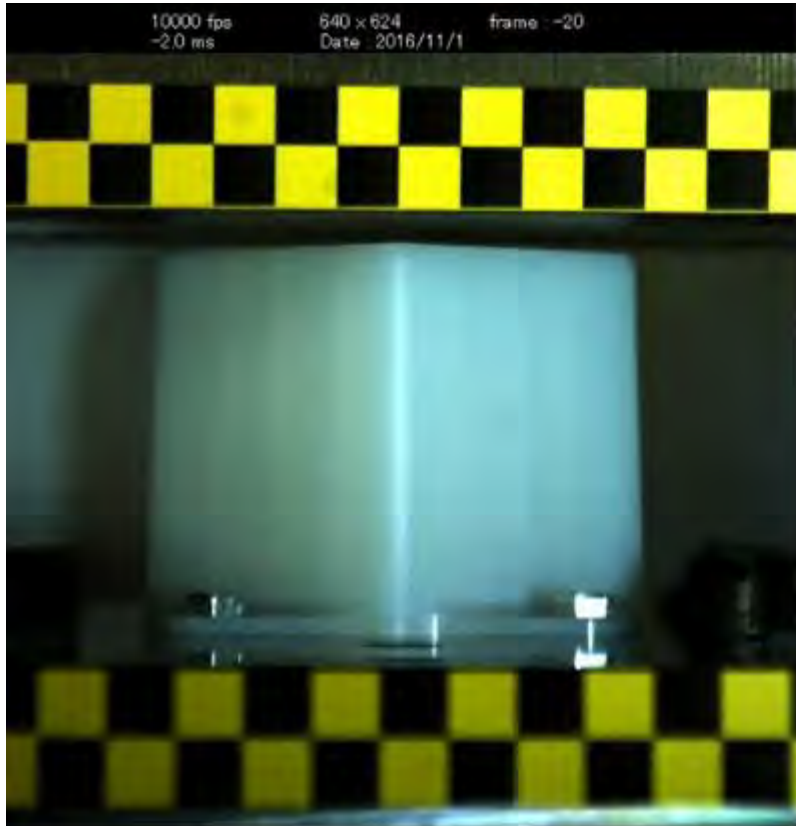


成形品の落錘衝撃試験でも良好な衝撃吸収特性を発現  
これまで使用できなかった自動車用構造部材へ幅広く適用可能

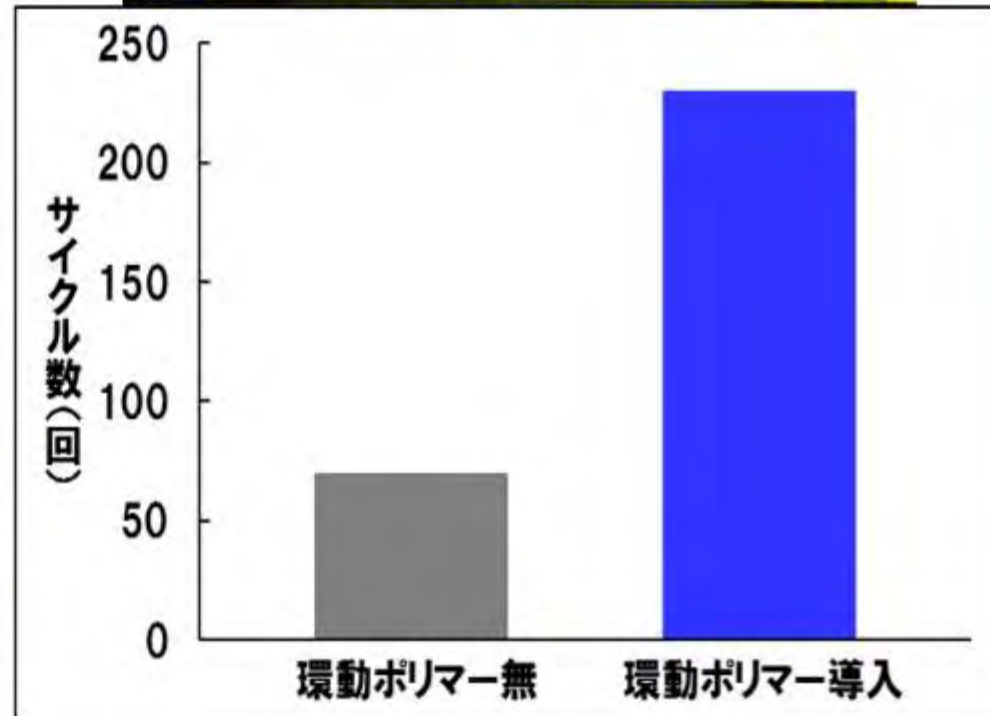
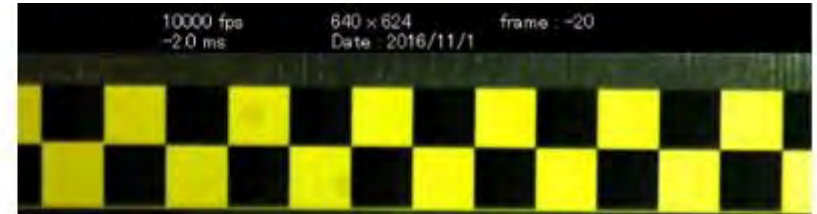
# 落錘評価(強化系)

東レ・車体構造用樹脂強靱化

ポリアミド



タフポリマー



5%の可動架橋構造の添加により劇的な耐衝撃性の向上



# 目標の定量化と到達度

## ブリヂストン・タイヤ薄ゲージ化

【最終目標】

ゴム材重量 (基準対比)

40%

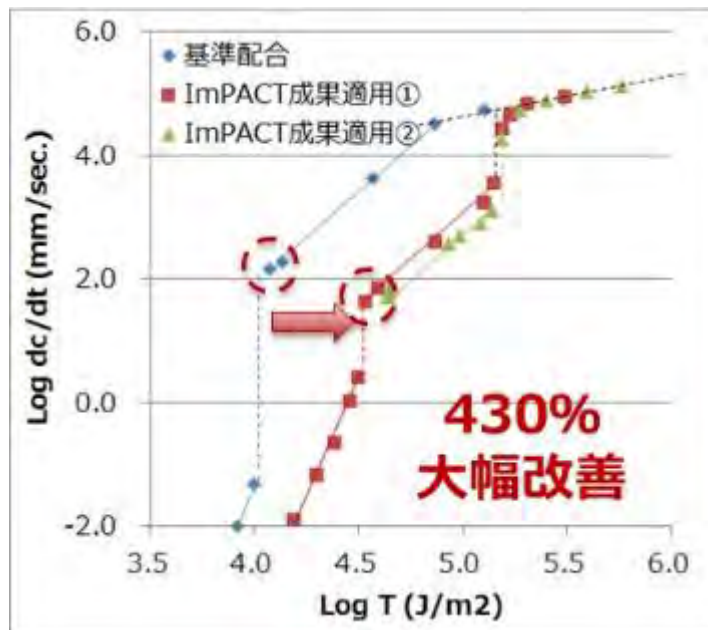


アカデミア指針  
実験・理論・計算  
+  
ブリヂストン固有  
材料技術

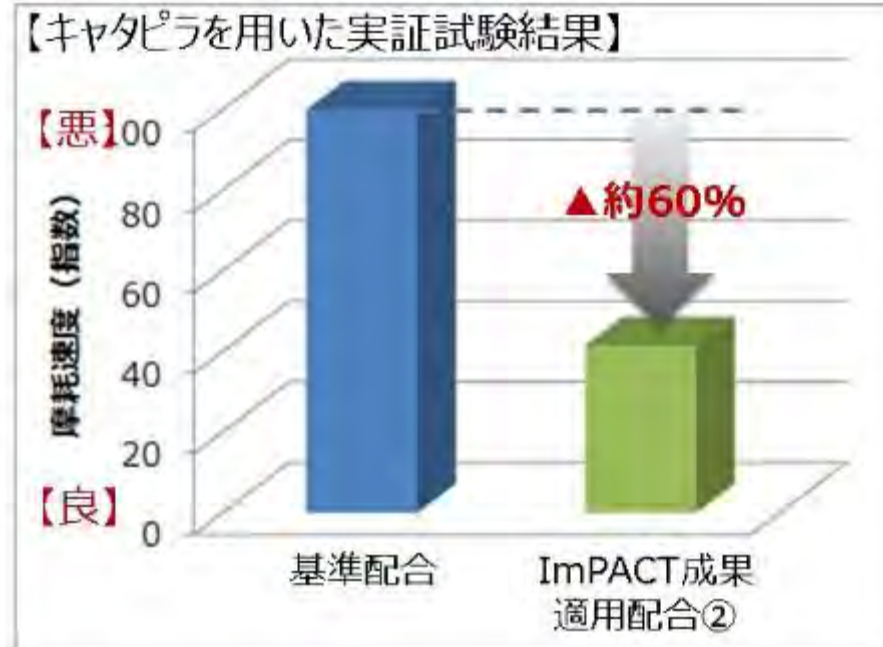
材料の革新的タフ化

タイヤ薄ゲージ化

亀裂の進展が高速化するエネルギー（引裂きエネルギー）を大幅に高くする



実証試験



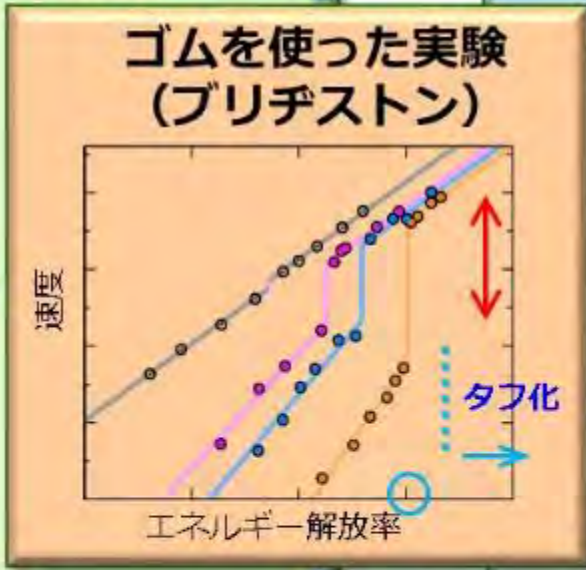
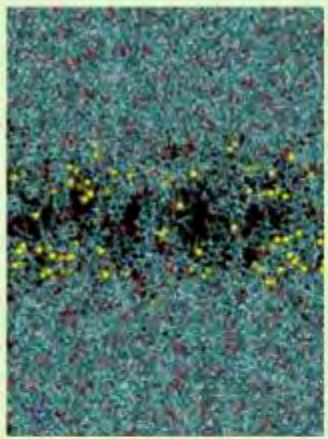
引裂エネルギーが高くなったことで摩擦特性が大幅に改善（耐久性が劇的に向上）

# G1-2 : 亀裂進展におけるマルチスケールシミュレーション・理論

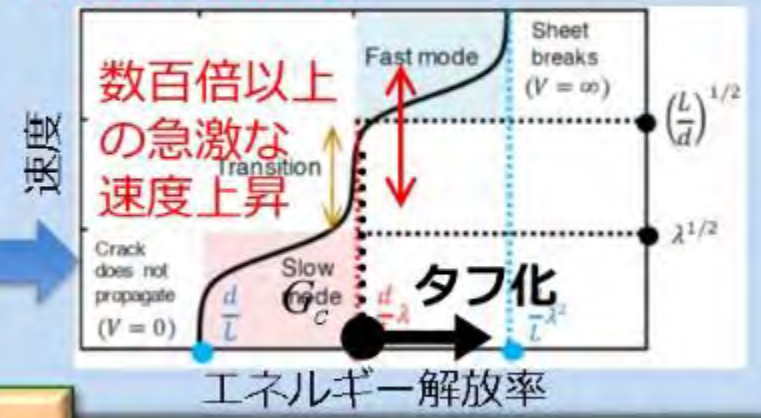
- ・ 衝撃破壊の分子論 (岡崎、名大)  
全原子MDによる直接解析

東レ、ブリジストン、住友化学との連携

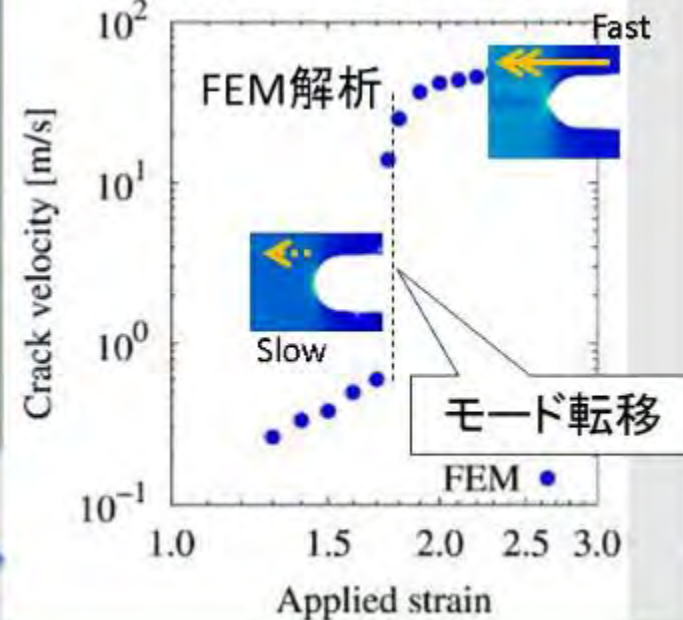
- ・ 分子鎖切断のポテンシャルモデル  
高精度量子化学計算
- ・ 応力による切断を含むMD計算
- ・ 京コンピュータを用いた大規模計算



- ・ 理論 (奥村、お茶大)  
厳密解の発見!



- ・ FEM解析 (梅野、東大)

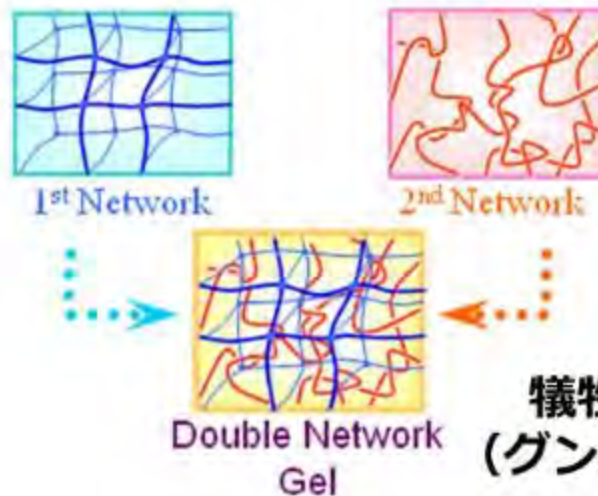
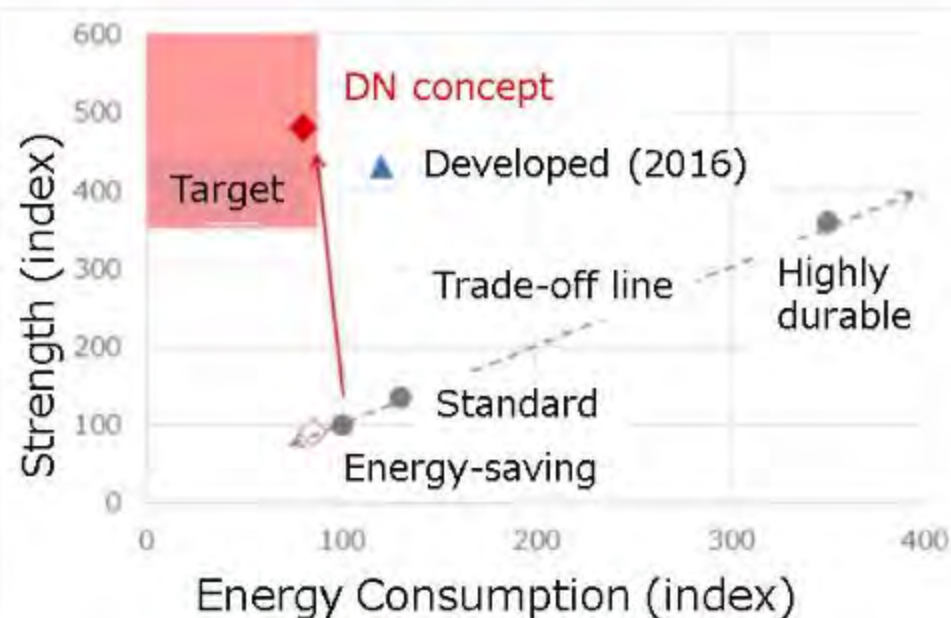


材料設計の指針が確立!



# ゴム亀裂進展の転移挙動

ブリチストン・タイヤ薄ゲージ化



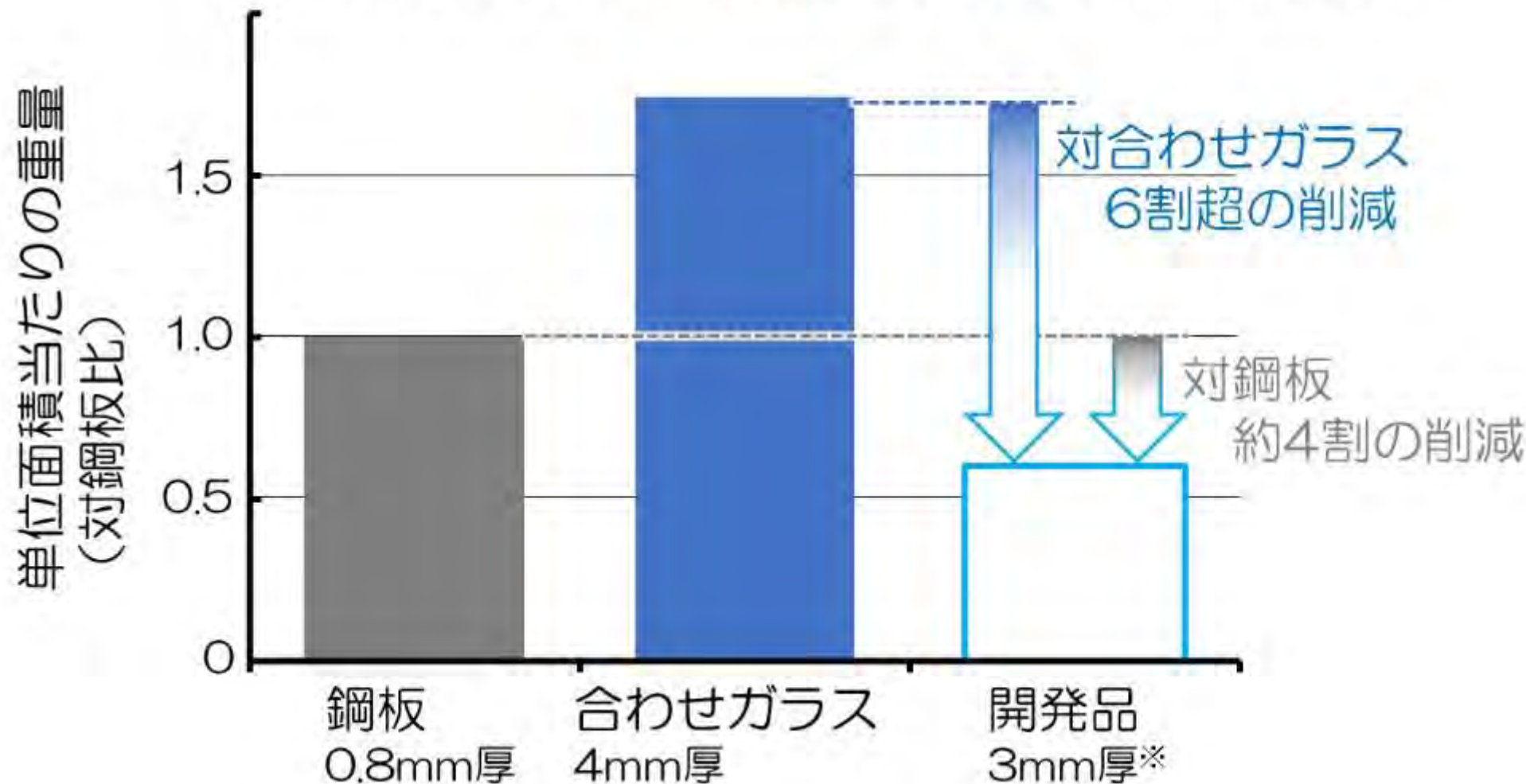
犠牲結合  
(グン、北大)

# 期待される軽量化効果

住友化学・透明樹脂強靱化

自動車ルーフ材料への適用を想定

※開発品の厚み：鋼板0.8mmと同じたわみやすさに設定

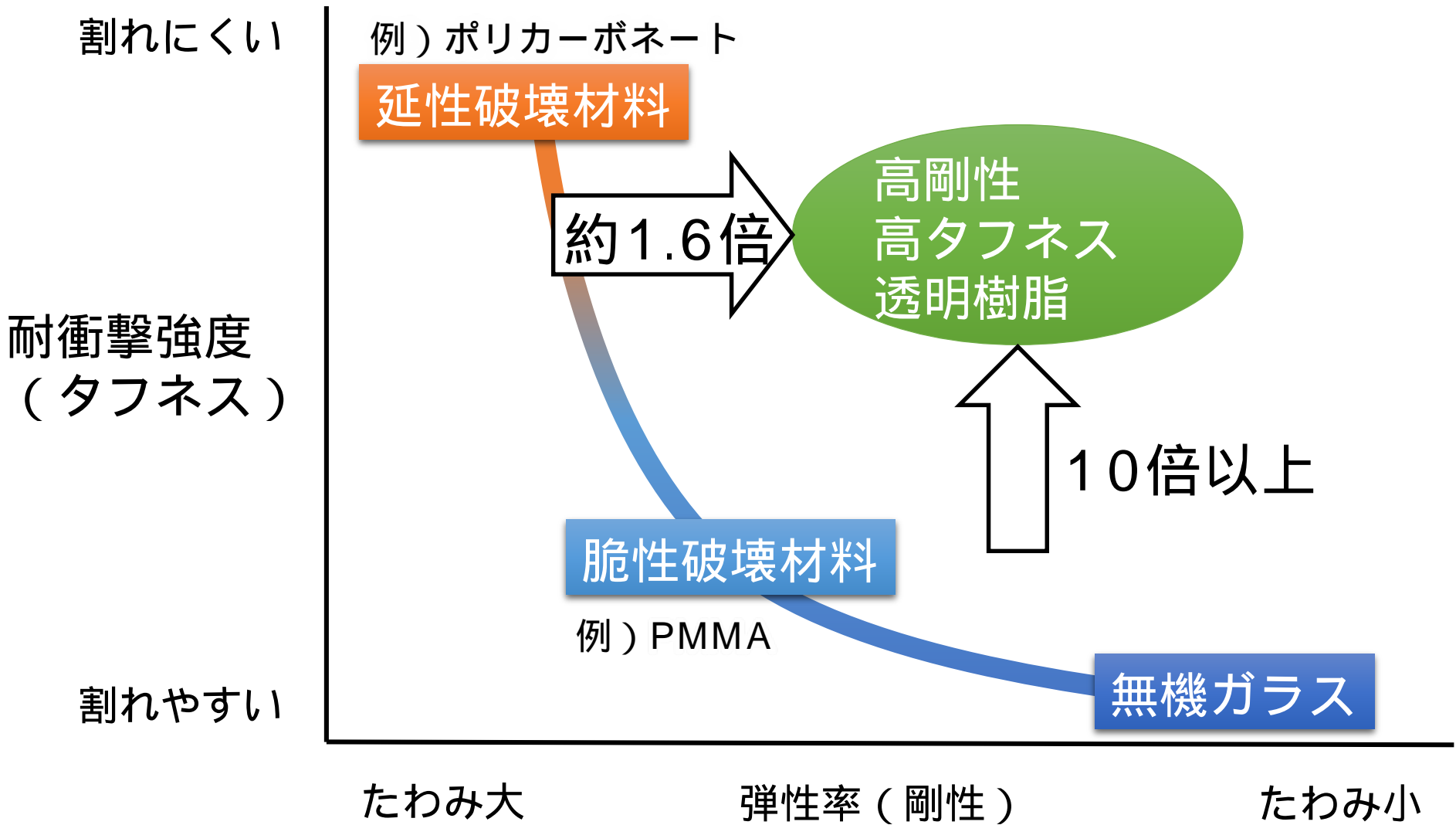


課題) たわみが小さい性質 (高剛性) + 割れにくい性質 (高タフネス)



# 目標の定量化と到達度

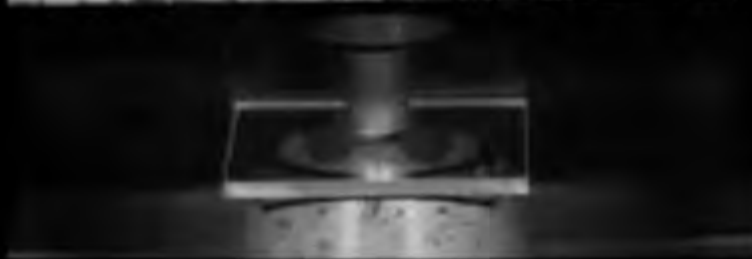
住友化学・透明樹脂強靱化



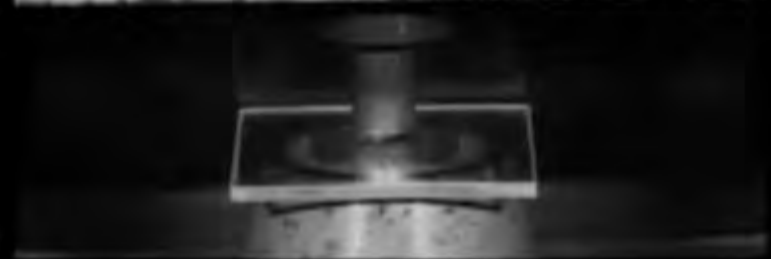
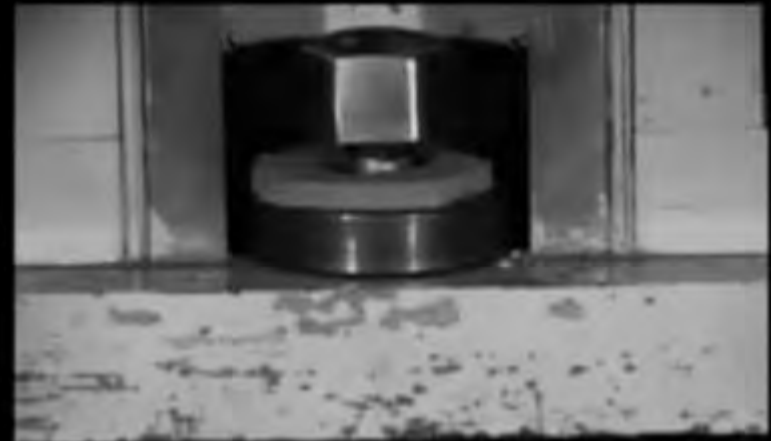
# 衝擊試験

住友化学・透明樹脂強靱化

従来PMMA



開発品





共通課題		目 標
G1-1	モデル樹脂を用いた破壊機構の解明	PC、PMMA、PS、Durabio®の耐衝撃強度や硬度の大きな違いを原子・分子レベルで明らかにすることで、タフ化の分子設計指針を確立する。
G1-2	亀裂進展機構の解明	亀裂進展速度の転移現象の機構を解明することで、タフ化の材料設計指針を確立する。破壊のシミュレーターを開発する。
G1-3	フィラーとポリマー界面での破壊機構	界面における分子鎖の構造と物性に基づき破壊機構を理解し、制御する。また異種樹脂どうしの接着を扱う。
G2-1	自己修復分子結合系の合成	ゲル、エラストマー、樹脂での自己修復機能を実現するとともに、その分子的機構を明らかにする。より硬く、より低温での自己修復性を目指す。
G2-2	疲労、破壊、応力の可視化	疲労、破壊、応力の可視化手法を開発する。IoTのモデルケースとして亀裂発生 of 自動検出(構造部材の故障診断)を目指す。
G3	社会的価値の検証	LCA手法を用い、資源から製造・使用・リサイクル・廃棄までを対象にライフサイクル内変化に加え、社会波及までを捉える。
G4	タフポリマーの分子設計・材料設計指針の汎用性の検証	テーマ数を増やして、分子設計・材料設計指針の汎用性を検証するとともに、本プログラムの詳細データ集の作成、人工知能技術を活用した高分子開発基盤を確立し、Society5.0へ対応する。

# 基盤的共通設備（理研播磨）

タフポリマー専用実験ステーション

高速破壊下での時空間構造を分子レベルで可視化

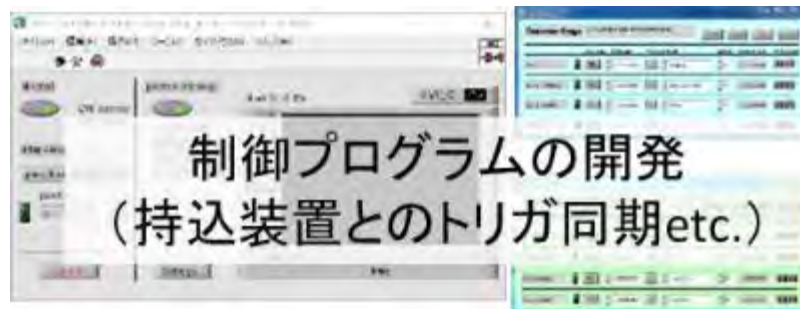


SPring-8,  
BL05

大型切替ステージの導入



変形装置の並行利用



真空封止アンジュレータ導入による  
光源高輝度化



マイクロビーム ( $\sim \phi 5-10 \mu\text{m}$ )  
コヒーレントX線によるダイナミクス観測  
(XPCS)

6企業PJ, 8アカデミアGr.が利用  
AGC、住友化学、東レ、ブリヂストン  
三菱ケミカル、宇部興産  
(283日間)

共通課題		目 標
G1-1	モデル樹脂を用いた破壊機構の解明	樹脂の脆性－延性転移の主要因子はポリマー鎖の絡み合いと密度揺らぎ、可撓性である。特に放射光と全原子シミュレーションの効果が絶大。
G1-2	亀裂進展機構の解明	亀裂進展が不連続に変化するのには亀裂先端領域のガラス転移が原因である。理論とFEMの協力で大きな成果が得られた。ダメージゾーンや樹脂への展開が期待されている。
G1-3	フィラーとポリマー界面での破壊機構	仮説を裏付ける結果が得られているが、体系化や普遍化するまでには至っていない。埋もれた界面を観察することが困難。
G2-1	自己修復分子結合系の合成	様々な新規自己修復材料の創成に成功。分子的機構についても明らかになり、ほぼ目標は達成された。
G2-2	疲労、破壊、応力の可視化	破壊、応力の可視化手法については開発が進んだ。疲労の可視化については未達。
G3	社会的価値の検証	コンセプトカーのインベトリー分析を通じて、目標が達成された。
G4	タフポリマーの分子設計・材料設計指針の汎用性の検証	ウレタンとポリスチレンでタフ化の設計指針が検証された。高分子破壊標準データベースのプラットフォームが完成し、データが集まりつつある。目標がほぼ達成された。



論文 254報(内IF10以上34報)

2014年10月～2019年3月

代表例: Nature, Science(2), Nature Materials, Nature Chemistryなど

特許 出願済: 87件(内企業67件)、外国出願: 15件

招待講演 811件 受賞 165件  
(国内: 403件、海外: 408件)

報道関係 112件

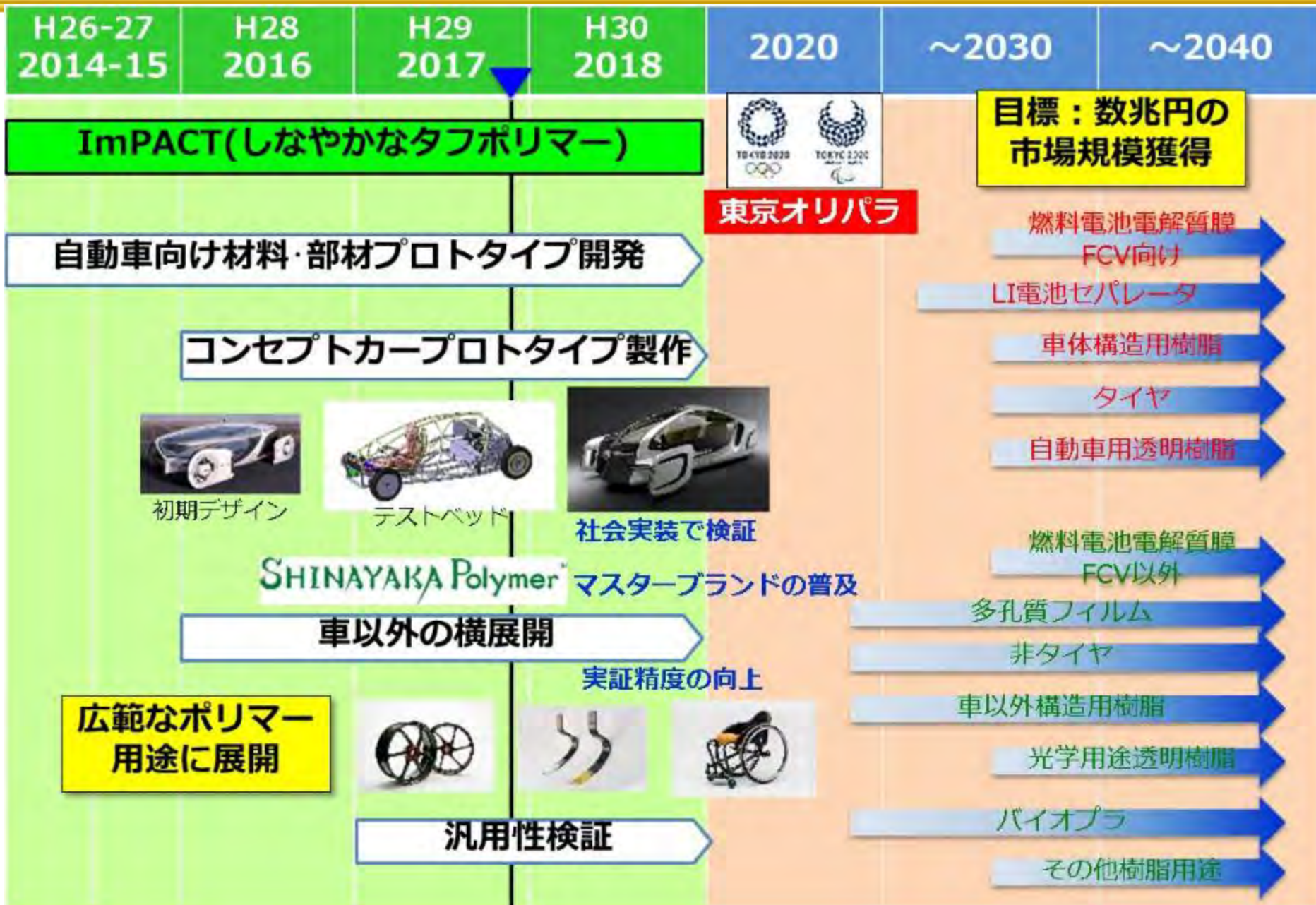
2015/11/30、2016/12/6 TV東京WBS

2017/10/15 NHKサイエンスZERO

2018/9/28 NHKニュース

今後の成果公表予定

論文 Polymer、Elsevir 特集号



## 研究開発状況の総括

- ・ 緊密な産学連携とPJ体制強化により、**各PJとも最終目標をほぼ達成した。**
- ・ タイヤ以外の各材料PJで日産と連携して実証実験を行い、産業適用性を検証した。
- ・ 自動車部品のプロトタイプ作製から、**コンセプトカー製作、車以外の応用分野**に展開し、実用化に向けた研究開発が加速している。
- ・ **高分子の破壊の分子的機構が解明**され、破壊の研究が飛躍的に進展した。
- ・ **高分子破壊標準データベース**のプロトタイプを構築



## 今後の展開

- ・ 研究成果の自動車、電子機器、ロボット、医療などへの波及
- ・ **タフポリマー化のプロトコル**(指針・方法論・手法)の他への展開。たとえば**バイオプラスチック**問題の解決などへの貢献
- ・ 亀裂進展の評価方法の標準化