



技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight

2023年10月

## 繊維リサイクル分野の技術戦略策定に向けて

Vol. 116

はじめに.....	2
1章 解決すべき社会課題と実現したい将来像 .....	4
1-1 社会課題と将来像の定義.....	4
1-2 解決・実現のための方法.....	7
1-3 環境分析とベンチマーキング.....	12
2章 解決・実現手段の候補.....	18
2-1 解決・実現のための課題.....	18
2-2 分析から得られた具体的実現手段の候補 .....	20
2-3 技術開発の方向性 .....	25
3章 おわりに.....	29

TSCとはTechnology Strategy Center(技術戦略研究センター)の略称です。

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構  
技術戦略研究センター(TSC)

## はじめに

日本の繊維産業は長い歴史を有しており、衣食住の“衣”として人々の生活に寄り添って発展してきた産業である。さらに繊維産業は産業革命と深い関係にあり、近代産業の発展にも貢献してきた。今では、繊維に係る技術が衣料品のみならず多くの産業に活かされている。

近年、国内外におけるデジタル化やサステナビリティの動き等が産業構造に影響をもたらしつつある中で、日本の繊維産業も大きな転換期を迎えている。経済産業省が2022年5月に取りまとめた『2030年に向けた繊維産業の展望(繊維ビジョン)』<sup>1</sup>では、2030年に向けた日本の繊維産業の方向性を検討し、新市場開拓のための分野を戦略分野、サステナビリティやデジタル化等のビジネスの前提となる分野を横断分野と位置付け政策を進めていくとしており、サステナビリティの推進に向けた施策の一つとして、資源循環の取り組み強化が掲げられている(図1)。また時期を同じくして策定された『繊維技術ロードマップ』(経済産業省、2022)<sup>2</sup>では、重点的に取り組むべき項目として、資源循環の実現に向けた繊維製品の水平リサイクル技術「繊維 to 繊維リサイクル」が挙げられている。

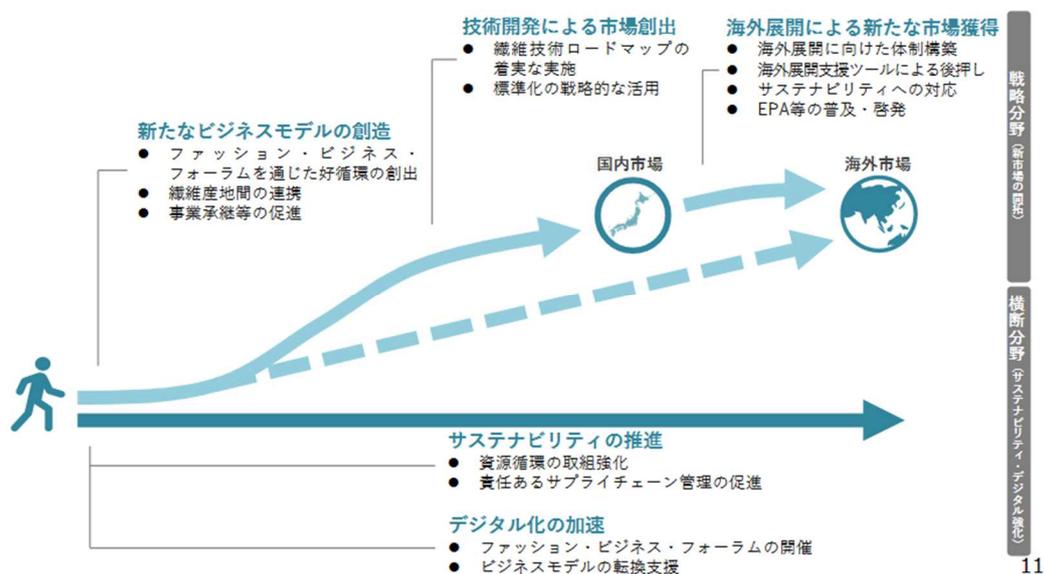


図1 今後の繊維産業政策

出典: 2030年に向けた繊維産業の展望(繊維ビジョン)(経済産業省、2022)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> <https://www.meti.go.jp/press/2022/05/20220518006/20220518006.html>

<sup>2</sup> <https://www.meti.go.jp/press/2022/05/20220518005/20220518005.html>

最近は世界的にも繊維製品の資源循環に関する政策提言の動きが活発になっている(表1)。2022年3月に欧州委員会では『持続可能な循環型繊維製品戦略』<sup>3</sup>が発表され、2030年までにEU域内で販売される繊維製品に対し、耐久性があり、リサイクル可能で、リサイクル済み繊維を大幅に使用するなどの目標を掲げている。また2022年4月には、中国でも2030年までに繊維廃棄物における循環利用体系を確立させることを主旨とする『繊維廃棄物のリサイクル推進の加速に関する実施意見』<sup>4</sup>が発表されている。日本においても、こうした海外の動向を踏まえ、繊維製品における資源循環に関する施策の検討が求められている。

表1 繊維製品に関する政策動向

国/地域	政策	政策の概要
 <b>欧州</b>	<b>持続可能な循環型繊維製品戦略</b> (欧州委員会、2022年3月)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 現在、EU域内における繊維製品の消費は、気候変動を含めた環境への悪影響の原因として、4番目に大きな原因となっていると認識。</li> <li>● 2030年までに耐久性があり、リサイクル可能で、リサイクル済み繊維を大幅に使用し、危険な物質を含まず、労働者の権利などの社会権や環境に配慮したものにする目標を掲げる。</li> </ul>
 <b>中国</b>	<b>繊維廃棄物のリサイクル推進の加速に関する実施意見</b> (国家発展改革委員会・商務部・工業情報化部、2022年4月)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 繊維品廃棄物の生産、回収、综合利用の3つにフォーカスをあて、9つの具体的措置を明確化。</li> <li>● リサイクル率を2025年に25%、2030年に30%、リサイクル繊維の生産量を2025年に200万t、2030年に300万tなどを主な目標に掲げる。</li> </ul>
 <b>日本</b>	<b>2030年に向けた繊維産業の展望(繊維ビジョン)</b> (経済産業省、2022年5月)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 繊維産業の現状や環境変化を踏まえ、今後の新市場開拓、サステナビリティやデジタル化に向けた方向性を整理。</li> <li>● サステナビリティ推進の一環として、リサイクル素材の活用など資源循環取り組み強化を掲げる。</li> </ul>
<b>米国</b>	(繊維製品の循環利用に対しては民間主導で取り組みが進行)	

出典:文献<sup>1,3,4</sup>等を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

本レポートでは、日本の繊維産業政策にとって喫緊の課題となっているサステナビリティ推進について、繊維製品の資源循環システム構築に資する繊維 to 繊維リサイクル技術の課題や開発の方向性を検討した。なお、本レポートでは、繊維製品の中で割合が最も高いアパレル品(衣類)を対象としている。

<sup>3</sup> Communication From Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of The Regions(European Commission、2022) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0141>

<sup>4</sup> [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202204/t20220411\\_1321822.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202204/t20220411_1321822.html?code=&state=123)

# 1章 解決すべき社会課題と実現したい将来像

## 1-1 社会課題と将来像の定義

国内のアパレル市場規模は1990年代の約15兆円から減少傾向であったものの、2000年代以降は10兆円規模で横ばいの状態を維持している(図2)。この間消費者からは低価格商品が人気を集めるようになり、海外からのファストファッション参入などの動きも見られている。これにより消費者は流行のファッションを安価に購入できる恩恵を享受できるようになった。



図2 国内アパレル供給量、市場規模、衣類の購入単価の推移

出典: SUSTAINABLE FASHION これからのファッションを持続可能に(環境省)<sup>5</sup>

<sup>5</sup> [https://www.env.go.jp/policy/sustainable\\_fashion/](https://www.env.go.jp/policy/sustainable_fashion/)

他方で、国内では手放された後の多くの衣類が有効利用されず埋め立て・焼却処分されている現状が、社会課題となっている。図 3 に 2020 年時点の国内における衣類のマテリアルフローの現状認識を示す。繊維の原料は主に天然資源や化石資源を活用しているが、近年は余剰バガス(サトウキビ搾りかす)等のバイオマス資源由来のバイオ繊維、ペットボトル由来のリサイクルポリエステルなども一部で普及しつつある。衣類の国内新規供給量は 81.9 万トンに対し、その約 9 割に相当する 78.7 万トンが事業所や家庭から使用後に手放されている。このうち熱回収も含め廃棄される量は 51.0 万トンで、手放される衣類の 64.8%に相当する。しかしリユースされる量は 15.4 万トン、リサイクルされる量は 12.3 万トンにとどまっている<sup>6</sup>。現在のリサイクルはウェス(機械類の清掃などに用いられる布切れ)やフェルトなどのカスケード利用が主となっている<sup>7</sup>。新しく繊維製品にリサイクルされる繊維 to 繊維リサイクルの割合は、国内の正確なデータは算出されていないものの極めて小さく、世界全体でも 1%に満たないとされている<sup>8</sup>。

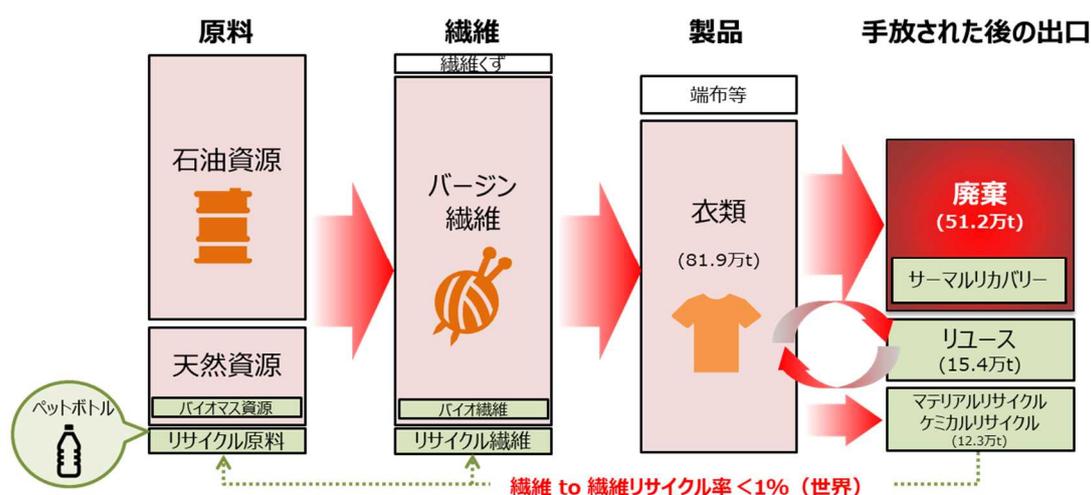


図 3 衣類のマテリアルフローの現状認識 (2020 年)

出典: 環境省令和 2 年度ファッションと環境に関する調査業務『ファッションと環境』調査結果(日本総研、2021)<sup>6</sup>を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

<sup>6</sup> 環境省令和 2 年度ファッションと環境に関する調査業務『ファッションと環境』調査結果(日本総研、2021) <https://www.env.go.jp/content/000044547.pdf>

<sup>7</sup> サーマルリカバリー(熱回収)は、リサイクルの内数には含まれていない。

<sup>8</sup> A New Textile Economy: Redesigning Fashion's Future (Ellen Macarthur Foundation、2017) [https://emf.thirdlight.com/file/24/uiwtaHvud8YIG\\_uiSTauTIJH74/A%20New%20Textiles%20Economy%20A%20Redesigning%20fashion%E2%80%99s%20future.pdf](https://emf.thirdlight.com/file/24/uiwtaHvud8YIG_uiSTauTIJH74/A%20New%20Textiles%20Economy%20A%20Redesigning%20fashion%E2%80%99s%20future.pdf)

衣類の循環利用が進まないことによる環境負荷の影響も看過できない。『ファッションと環境』(日本総研、2021)<sup>6</sup>によると、繊維産業における環境影響のネガティブインパクトとして CO<sub>2</sub> 排出や水の消費、水質汚染や生物多様性への影響が挙げられている。CO<sub>2</sub> 排出量を例にとると、衣類の廃棄時には国内で 117 万トン、さらに国内に供給される衣類の生産に必要なバージン材料調達時には国内外で 4,456 万トンが排出されている。

そのため本レポートでは、衣類のリユース・リサイクル等の繊維の循環利用を促進し、国内の衣類廃棄量を削減するとともに CO<sub>2</sub> 排出や水消費等の国内外の環境負荷低減に貢献することで、日本の繊維産業の国際競争力維持・強化を図ることを目指すべき将来像と定義した。

## 1-2 解決・実現のための方法

前節で述べた衣類の廃棄量削減に向けては、①リユースやリペア等による衣類の着回し、②繊維 to 繊維リサイクルによる新たな繊維や原料への再資源化(再生)が挙げられる。現状の取り組み事例を図4に示す。

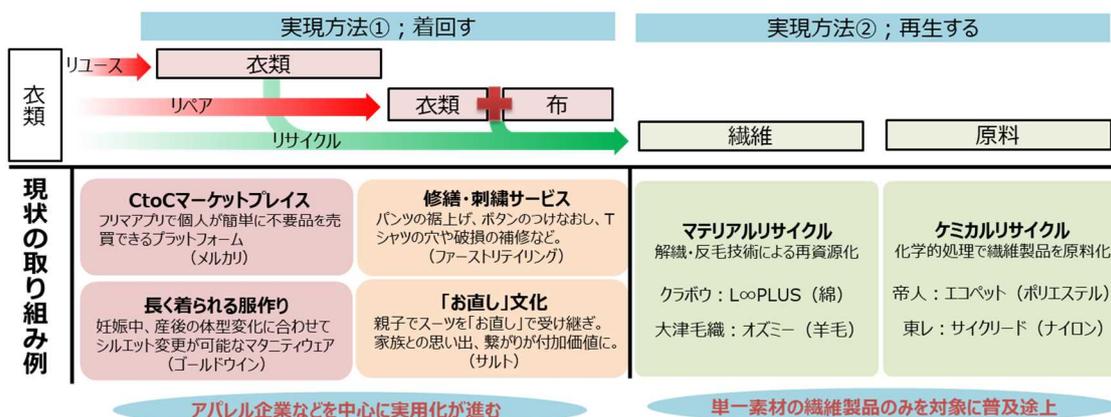


図4 解決・実現のための方法に係る現状の取り組み例

出典：各社のホームページを基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

### ① リユース・リペア(着回す)

現状、リユース品の多くは古着屋等から再販売されるか、故繊維企業(繊維を回収する企業)を介して海外に輸出されている。これに加えて、フリマアプリなど個人が簡単に自身の所有物を売買取引できるデジタルサービスが普及しつつあり、リユース市場は今後も伸びていくと予想されている<sup>9</sup>。また体型変化に合わせたサイズなどのカスタマイズが可能な設計や繊維素材の耐久性向上など、消費者が衣類を長く着用できるデザインを取り入れていく手法も有効と考えられる。

またパンツの裾上げやボタンのつけなおし、修繕・補修などによるリペアも長く着回す手段として有効である。例えばファーストリテイリングでは「RE.UNIQLO STUDIO」を国内に設置するなど、リペアサービスにも近年力を入れている<sup>10</sup>。

<sup>9</sup> 2020 ファッション業界のリユースマーケット動向(矢野経済研究所、2020)

[https://www.yano.co.jp/press-release/show/press\\_id/2395](https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/2395)

<sup>10</sup> [https://www.uniqlo.com/jp/ja/contents/sustainability/planet/clothes\\_recycling/re-uniqlo/studio/](https://www.uniqlo.com/jp/ja/contents/sustainability/planet/clothes_recycling/re-uniqlo/studio/)

## ②繊維 to 繊維リサイクル(再生する)

前述のとおり、繊維 to 繊維リサイクル率は 1%未満と世界的に実用化は進んでいないが、綿 100%からなる衣類をはじめとした単一素材製品においては、一部の繊維企業で繊維 to 繊維リサイクルの実用化が進みつつある。繊維 to 繊維リサイクルは、生地を針状の機具等でわた状に戻し(反毛と呼ばれる)再紡績するマテリアルリサイクルと、化学処理により繊維の原料にまで分解し再紡糸するケミカルリサイクルに分けられる。マテリアルリサイクルは主に綿やウールなど天然繊維を主成分とする素材を対象に紡績企業で、ケミカルリサイクルはポリエステルやナイロンなどの化学繊維の単一素材を対象に化学繊維企業を中心に取り組みが進んでいる。

繊維 to 繊維リサイクルの実用化が進まない主な理由として、衣類の構成素材の多様性が挙げられる。衣類は、吸湿性や速乾性、耐久性など消費者のニーズに合った機能性を実現するため、混紡などと呼ばれるような複数種類の繊維を複合化させる技術が開発されてきた(例えば図 5)。こうした複数種類の繊維が使用されている衣類の割合は近年増加傾向にあり、故繊維企業のナカノ(株)が 2022 年 6 月に回収した衣類においては点数ベースで約 65%を占めているとされる(図 6)。

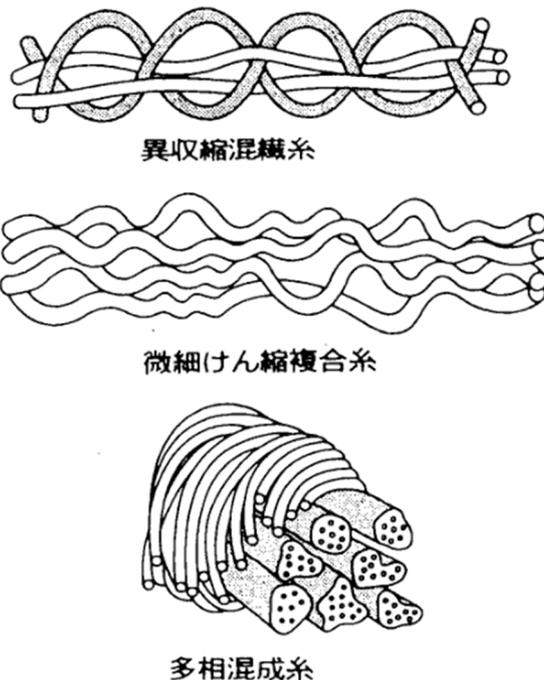


図 5 複合糸の例

出典: 渡辺正元「複合化機能繊維について」(甲南女子大学研究紀要 30 号、1993 年)<sup>11</sup>

<sup>11</sup> [https://konan-wu.repo.nii.ac.jp/?action=pages\\_view\\_main&active\\_action=repository\\_view\\_main\\_item\\_detail&item\\_id=689&item\\_no=1&page\\_id=13&block\\_id=17/](https://konan-wu.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=689&item_no=1&page_id=13&block_id=17/)

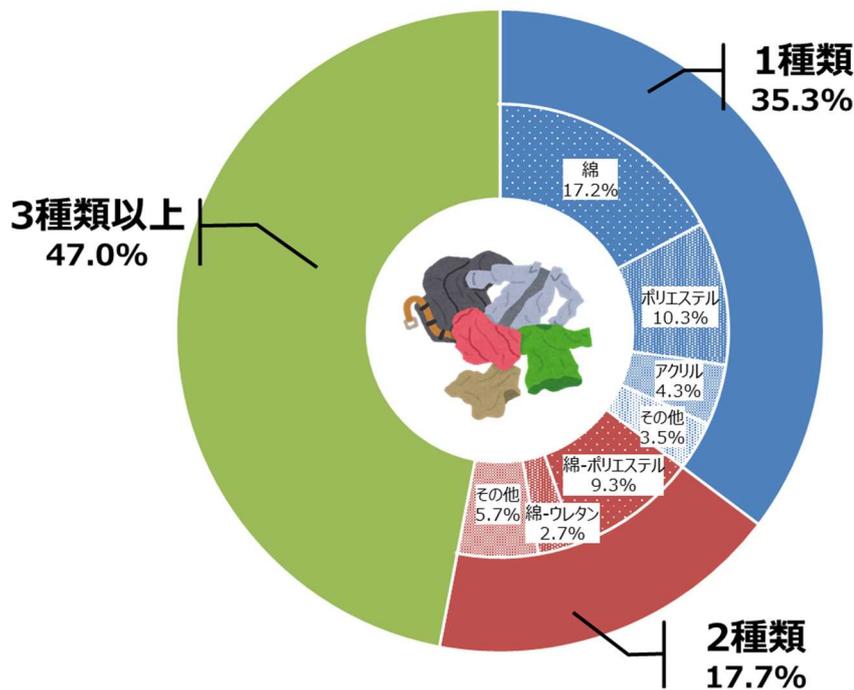


図 6 回収衣類を構成する繊維の割合

出典：第 2 回繊維製品における資源循環システム検討会 資料 3「衣料品リサイクルの現状と課題～サステナビリティとエコソフィ～」(ナカノ株式会社、2023)<sup>12</sup>を基に  
NEDO 技術戦略研究センター作成(2023)

一方、日本の繊維産業を取り巻く環境に目を向けると、日本の繊維企業は海外における生産の割合が高く(図 7)、海外生産された繊維製品は日本向けへの輸出や現地販売のほか、欧州などの第三国に輸出されている(図 8)。また国内工場生産された繊維製品も、多くが中国をはじめとするアジアや欧州などに輸出されており(表 2)、グローバル展開によって日本の繊維産業の競争力を維持してきた。こうした状況に対して、「はじめに」で述べたとおり、最近欧州を中心に繊維製品に対しリサイクル繊維原料を使用する規制が設定される動きがみられることから、リサイクル繊維原料を調達できなければ日系企業の繊維製品が海外市場から排除されるリスクが高まっている。以上から、繊維製品の資源循環を実現するために繊維 to 繊維リサイクルを推進していくことは、日本の繊維業界における国際競争力の維持・強化の観点でも必要不可欠と言える。

<sup>12</sup> [https://www.meti.go.jp/shingikai/mono\\_info\\_service/resource\\_recycling/pdf/002\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/resource_recycling/pdf/002_03_00.pdf)

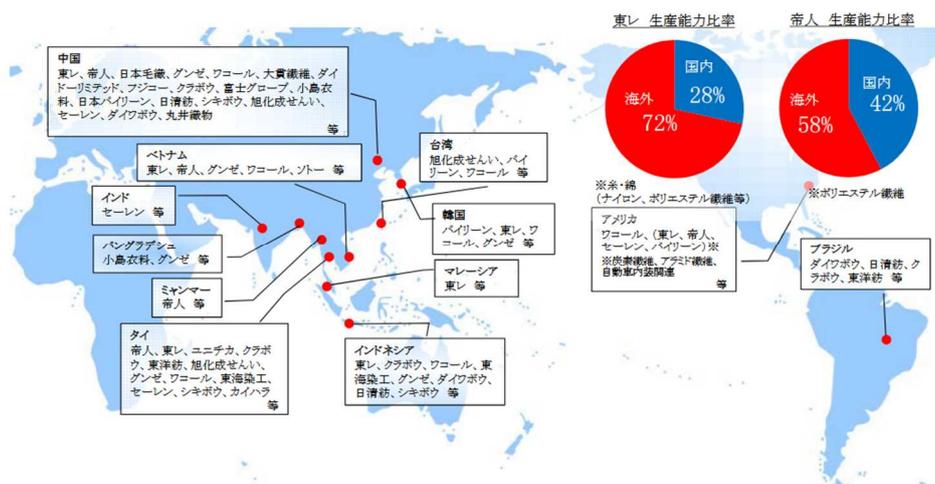


図7 日本の繊維企業の海外進出状況

出典: アパレル・サプライチェーン研究会報告書(参考資料)(経済産業省、2016)<sup>13</sup>

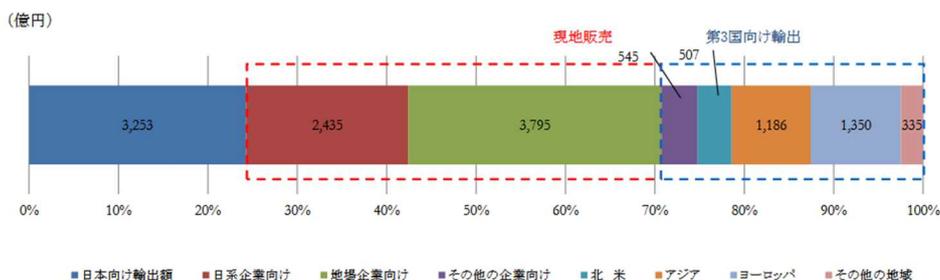


図8 繊維関連の海外現地法人における売上高の内訳

出典: アパレル・サプライチェーン研究会報告書(参考資料)(経済産業省、2016)<sup>13</sup>

表2 2020年における国内工場生産した繊維製品の輸出先の内訳(単位: 億円)

衣料品		生地	
中国	133	中国	767
香港	75	ベトナム	575
台湾	59	UAE	91
米国	52	サウジアラビア	87
韓国	45	香港	80
フランス	31	インドネシア	77
スイス	25	ミャンマー	65
英国	22	米国	64
イタリア	20	イタリア	63
シンガポール	12	バングラデシュ	50
輸出総額	546	輸出総額	2,279

出典: Global Trade Atlas を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

<sup>13</sup> [https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/seizou/apparel\\_supply/report\\_001.html](https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/seizou/apparel_supply/report_001.html)

ここまで述べてきたように、衣類の廃棄量削減に向けた実現方法のうち、①リユース・リペアはアパレル企業などで既に実用化が進んでいるが、②繊維 to 繊維リサイクルは衣類の大半を占める複合素材への対応が進んでおらず、一部の単一素材のみを対象にして普及の途上にある。しかし今後海外の環境規制に対応したリサイクル繊維原料の供給体制構築を進めていくことは、日本の繊維企業の競争力の維持・強化につなげていくことができると考えられるため、本レポートでは②繊維 to 繊維リサイクルを優先的に技術開発していくべき領域と捉え、分析対象とした。

## 1-3 環境分析とベンチマーキング

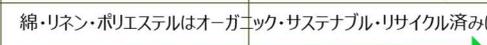
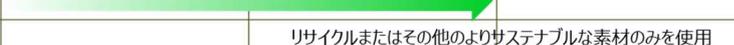
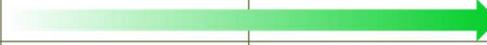
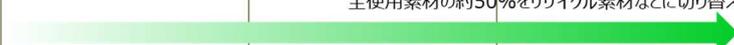
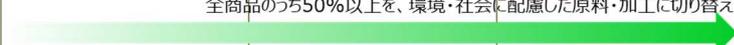
### (1) 市場動向

回収衣類のリサイクル用途としては、古くからウェスや反毛が知られている。反毛は主に反毛綿を原料に使ったフェルトとして、自動車部品や建築・土木資材として使われている。しかし近年の産業構造の変化等に伴いウェスや反毛の市場は伸び悩んできており、他方で新たに繊維用途にリサイクルされる事例が現れ始めている(表 3)。国内外の多くのアパレル企業ではリサイクル繊維原料を活用するといった環境配慮素材のニーズが急速に高まっており(表 4)、2030 年には回収衣類由来の国内のリサイクル繊維市場は約 150 億円に達すると見込まれている(図 9)。

表 3 衣類のリサイクルにおける用途ごとの市場動向

リサイクル用途	今後の国内市場予測	概要
ウェス		ファクトリーオートメーション化、工場の海外移転など日本の工業そのものが構造的に変化し、国内におけるウェス需要の絶対量そのものが減少している。
反毛 (フェルト・内綿等)		自動車業界を中心とする顧客の品質要求アップへの対応、低コストなプラスチック系素材への代替等により1990年代以降量・価格ともに下落している。
繊維		繊維の水平リサイクル率は現状世界的にも1%未満だが、今後リサイクル技術の研究開発・社会実装を進めることでリサイクル繊維の市場成長につながると推測される。

表 4 サステナビリティに対する国内外のアパレル企業の目標設定

アパレル企業		2020年	2025年	2030年
欧米	パタゴニア	リサイクルした原料、再生可能な原料のみを使用		
	アディダス	可能な限りリサイクルポリエステルを使用		
	インディテックス	綿・リネン・ポリエステルはオーガニック・サステナブル・リサイクル済みに100%切り替え		
	H&M		リサイクルまたはその他のよりサステナブルな素材のみを使用	
日本	ゴールドウィン	環境負荷低減素材の使用率・・・ 60%以上		90%以上
	ファーストリテイリング		全使用素材の約50%をリサイクル素材などに切り替え	
	ユニテッドアローズ			環境配慮製品の割合を50%
	アダストリア	全商品のうち50%以上を、環境・社会に配慮した原料・加工に切り替え		

出典: 各種報道を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2022)

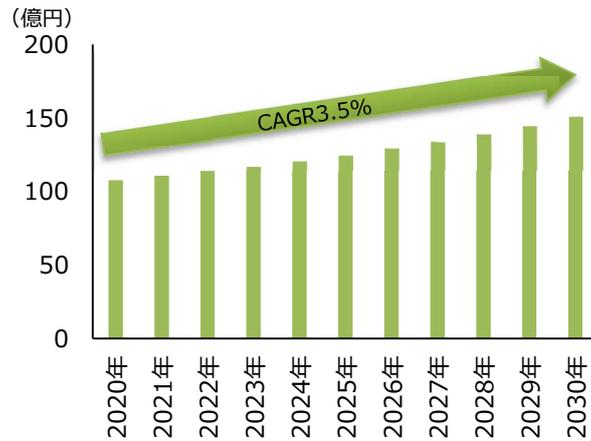


図9 回収衣類由来のリサイクル繊維の国内市場予測

出典: Textile Recycling Market Size, Share & Trends Analysis 2022 (Grand View Research)<sup>14</sup>を基に  
NEDO 技術戦略研究センター作成 (2022)

## (2) 技術動向

まず、環境負荷低減に資する繊維分野の技術を対象として論文発表件数・特許出願件数の分析を行った。

論文発表件数は6年ごとで増加傾向にあり、2015年～2020年における発表件数の中では欧州が21,347件と最も多い(図10)。中国の発表件数も増加傾向にあり、同期間で欧州に次いで14,266件発表されているのに対し、日本の発表件数は2,231件に留まる。

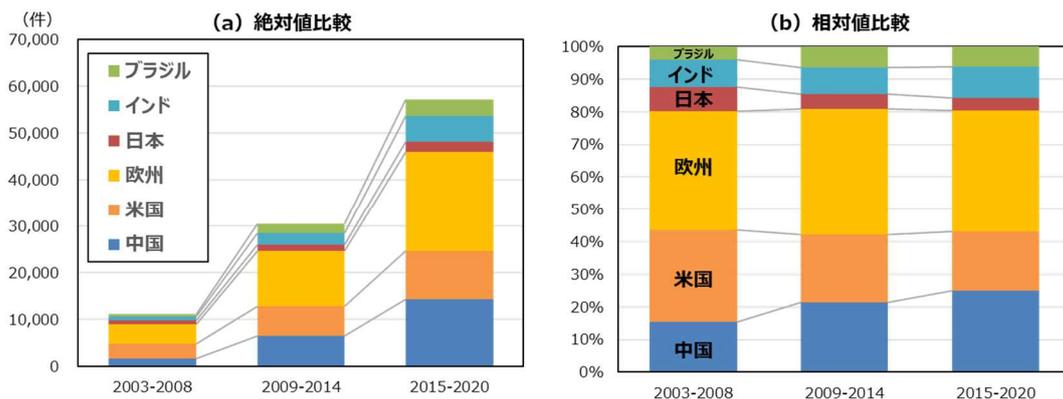


図10 環境負荷低減に資する繊維技術分野の主要国・地域の論文発表件数の年次推移(6年ごと) (a)発表件数の絶対値比較、(b)発表件数の相対値比較

出典: Web of Science<sup>TM</sup>の検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2022)

<sup>14</sup> <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/textile-recycling-market-report>

特許出願件数も6年ごとで増加傾向にあり、特に中国においては2003年～2008年では1,796件であったのに対し、2015年～2020年では60,660件と、約34倍に増加している(図11)。他方で日本の出願件数は2003年～2008年では世界で最も多く2,490件であったが、2015年～2020年では1,131件と約半分にまで減少している。

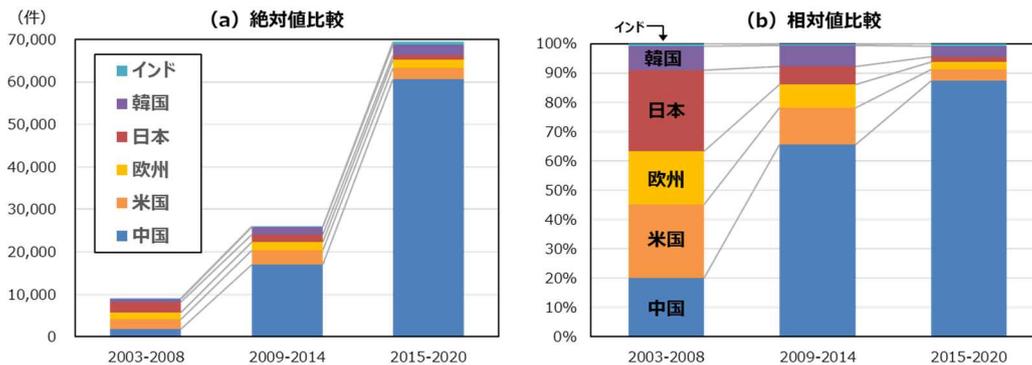


図11 環境負荷低減に資する繊維技術分野の主要国・地域の特許出願件数の年次推移(6年ごと) (a)出願数の絶対値比較、(b)出願数の相対値比較

出典: Derwent Innovation™ の検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

次に、繊維 to 繊維リサイクルの分野における企業の取り組みを述べる。単一素材について、例えば繊維の世界生産量の約 52%を占めるポリエステル<sup>15)</sup>に対しては、表 5 に示すとおりケミカルリサイクルの技術の技術開発が欧州や米国、日本など一部企業で取り組みが進みつつあり、中でも帝人グループや JEPLAN と行った日本企業が事業化に成功している。

表 5 ポリエステルのケミカルリサイクルにおける主なプレーヤーの取り組み

企業		実用化レベル
日本	帝人フロンティア	事業化
	JEPLAN	事業化
欧米	EASTMAN (米)	事業化
	Carbios (仏)	開発中
	Gr3n (スイス)	開発中
	Ioniqa (蘭)	事業化
	Ambercycle (米)	開発中

出典:Harmsen et al. Textile for Circular Fashion: The Logic Behind Recycling Options (Sustainability、2021)<sup>16)</sup>を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

<sup>15)</sup> Preferred Fiber & Materials Market Report 2021 (Textile Exchange、2021)  
[https://textileexchange.org/app/uploads/2021/08/Textile-Exchange\\_Preferred-Fiber-and-Materials-Market-Report\\_2021.pdf](https://textileexchange.org/app/uploads/2021/08/Textile-Exchange_Preferred-Fiber-and-Materials-Market-Report_2021.pdf)

<sup>16)</sup> <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/17/9714>

海外における公的予算による研究開発プロジェクトの概要を表 6 に整理した。2010 年代中頃より欧州、中国を中心に繊維 to 繊維リサイクルに係るプロジェクトが立ち上がっており、繊維製品の回収からリサイクル、製品デザインまで含めた総合的なシステム構築が進められている。特に 2020 年以降に立ち上がったプロジェクト(表 6 中の\*2)では、技術的難易度が高いとされる複合素材のリサイクルも開発課題に含まれるようになっている。

表 6 繊維リサイクルに係る海外の研究開発プロジェクトの動向

名称	実施国	期間	予算*1	プロジェクト内容
CISUTAC*2	ベルギー主催 (瑞、西、蘭、 独、伊ほかの 24社参加)	2022- 2026	9.2 百万ユーロ (13.0億円)	ポリエステルおよび綿繊維の衣料を対象に、補修・解体、リユース・リサイクルの選別、繊維to繊維によるサーキュラーアパレルデザイン。
T-REX*2	ドイツ主催 (仏、 蘭、芬の10社 参加)	2022- 2025	8.4 百万ユーロ (11.9 億円)	バリューチェーン全体のプレーヤーを巻き込んだ、家庭から出る衣料廃棄物の分別回収と所望原料に変換するデモンストレーション。
SCIRT*2	ベルギー主催 (独、仏、瑞の 17社参加)	2021- 2024	9.2 百万ユーロ (13.0 億円)	繊維産業バリューチェーンの全てのプレーヤーによる使用済み繊維 (天然、合成、複合) を対象とした繊維 to 繊維リサイクル総合システムのデモンストレーション。
Fibersort	オランダ (ベルギー、英 の6社参加)	2016- 2020	3.4 百万ユーロ (4.8 億円)	回収衣料をNIRおよび色識別で高精度仕分けする技術の開発。
SIPTex	スウェーデン	2015- 2022	31.4 百万クローナ (4.0 億円)	衣料廃棄物を対象にNIRと色識別でリサイクル用フィードストックの選別技術を開発。 IVL (国研) Sysav (廃棄物管理者) が主導。
綿/ポリエステル 繊維廃棄物の クリーンリサイクル 及び高付加価値 利用モデルの 実証*2	中国	2020- 2024	16.4百萬元 (3.2億円)	低粘度イオン液体で、廃綿/ポリエステル混紡を効率的かつ選択的な分離プロセスを開発。 国家重点研究開発計画で「固形廃棄物資源化」を重点項目に採択。 (プロジェクト番号2020YFC1910300)
廃ポリエステル繊維 の高効率リサイク ル技術	中国	2016- 2021	22.0百萬元 (4.2億円)	廃ポリエステルのケミカルリサイクルおよび再生ポリエステルの生産技術、NIRによる廃繊維製品の同定技術の開発。 国家重点研究開発計画 (プロジェクト番号2016YFB0302900)

\*1 2023年1月時点の為替相場で計算 (ユーロ/円 = 140.9, クローナ/円 = 12.6, 元/円 = 19.2)

\*2 リサイクルの対象素材として複合素材も含む。

出典: 各種資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2022)

### (3) まとめ

回収衣類は主にウェスと反毛用途にリサイクルされてきたが、最近では欧州や中国を中心に、新たに繊維用途へリサイクルを促す動きがみられる。しかし複合素材のリサイクルは技術的ハードルが高いため、世界的にも繊維 to 繊維リサイクル率は 1%未満と実用化は進んでいない。他方、単一素材に限定すると、例えばポリエステルについては日本企業では事業化に成功しており、ケミカルリサイクルの技術力の高さがうかがえる。

海外では、中国が特許出願数を急激に伸ばしており、また欧州においては繊維 to 繊維リサイクルへの公的資金の投入が相次いでいることから、日本にとって今後の脅威になりうると言える。

## 2 章 解決・実現手段の候補

### 2-1 解決・実現のための課題

繊維 to 繊維リサイクルシステムの構築に向けた主な課題を、衣類の回収から選別、再資源化までを静脈段階、製品開発から消費までを動脈段階として、表 7 に整理した。

表 7 繊維 to 繊維リサイクルシステム構築に向けた課題

フロー	主な課題
回収	衣類の効率的な回収システムの構築
選別	リサイクル用途（繊維原料、ウェス、フェルト等）ごとの選別プロセスの高効率化・低コスト化
再資源化	マテリアルリサイクル・ケミカルリサイクルによるリサイクル繊維原料の品質向上、リサイクルプロセスの環境負荷低減
製品開発	衣類の構成素材のモノマテリアル化等によるリサイクル性と機能性・デザイン性の両立
消費	リサイクル製品の定義や効果的な表記方法等による環境価値の可視化、リサイクルコスト負担

出典：各種情報を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2022）

静脈側においては、衣類の回収量を安定的に確保することが重要となる。現状では手放された衣類に対する回収率は約 34%にとどまっており、廃棄される衣類の大半は一般廃棄物として家庭から手放されている<sup>17</sup>。今後、回収量を拡大し十分量をリサイクルプロセスに供給していくためには、自治体や小売店などからの効率的な回収スキームの整備が求められる。

回収後の衣類は選別されることになるが、リユース用途の古着に分けた後、主にウェスやフェルト用途に、組成表示タグや素材の手触りを基に素材や色ごとに手作業で選別されているのが現状である。この際、衣類の消耗によりタグの記載の読み取りが難しい場合があることや、表地と裏地、ジッパーやボタンなどの付属品における素材の違いに留意が必要になることから、効率が悪いという問題がある。加えて近年の紡糸技術、加工技術などの発達に伴い繊維や生地の高機能化が進んだことで、手触

<sup>17</sup> 『ファッションと環境』（日本総研、2021）において 2020 年に「家庭から手放した衣類」のうち「リユース」と「リサイクル」された割合を合算して算出。

りといった人のノウハウだけでは素材の特定は困難になってきていることから、大幅な効率化が必要である。

さらに、選別後の素材からリサイクル繊維原料を生産するための再資源化については、現状ではリサイクル繊維原料の品質が不安定である点、リサイクルプロセスのコスト・環境負荷が高い点などの問題があることから、今後は品質向上や低コスト・低環境負荷なプロセスの開発が求められる。

一方、繊維 to 繊維リサイクルの実現にあたっては静脈側のみならず、動脈側からのアプローチも重要となる。前述のとおり、現状では構成素材の多様化が繊維 to 繊維リサイクルを進めるうえでの大きな阻害要因の一つになっており、そのため製造段階においては、高機能性と言った消費者のニーズを満たしつつ、リサイクルに適した製品設計を進めていくことが重要となる。

また、消費者に対して衣類の環境価値を訴求する仕組みも重要となる。現状では「リサイクル繊維原料」の定義や表示ルール、組成の評価方法が未整備であるため、各社独自の基準や方法に基づき表記されている。今後は「リサイクル繊維原料を活用した衣類」や「易リサイクル設計の衣類」といった環境配慮型製品の価値を効果的に可視化できる仕組み作りが求められる。

## 2-2 分析から得られた具体的実現手段の候補

繊維 to 繊維リサイクルシステムの構築へ向けて、前節に示した課題のうち技術開発が課題解決に貢献しうる手段としては、「高度選別技術」「高品位原料への再資源化」「易リサイクル製品設計」の三つが挙げられる。本節で個別に詳説する。

### (1) 高度選別技術の開発

繊維 to 繊維リサイクルでは単一素材ごとに再資源化されるため、再資源化の前工程において、繊維の種類ごとなどに素材が選別されている必要がある。今後繊維 to 繊維リサイクル用途の衣類を効率的に回収し、再資源化技術に適用可能な良質な素材を安定して供給するためには、繊維ごとなどの高精度な素材種別の仕分けや、裁断等による付属品除去のプロセスの機械化等の技術開発により、選別プロセスのハイスループット化が求められる(図 12)

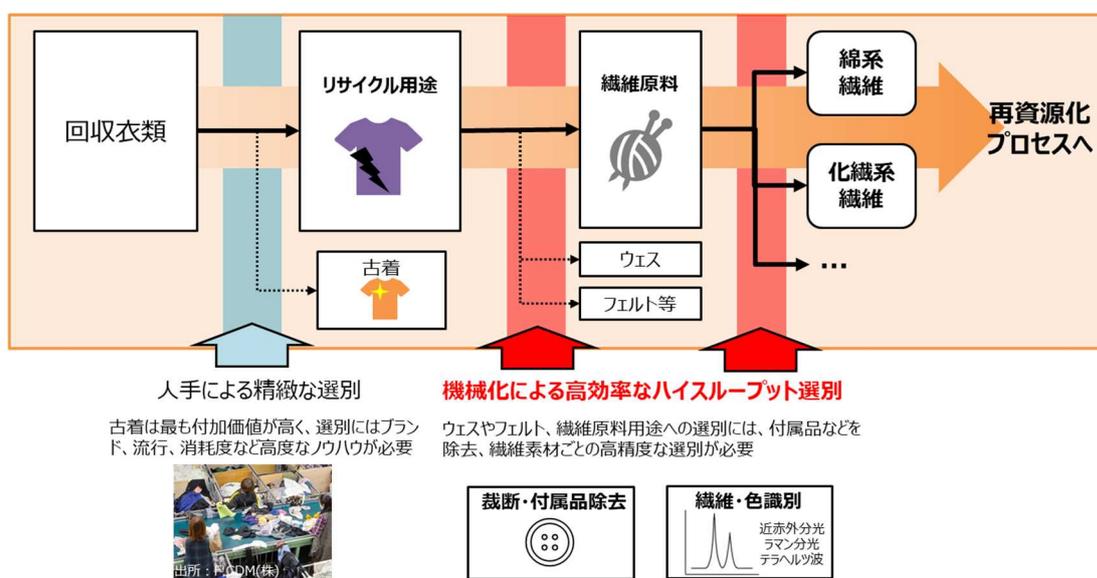


図 12 繊維 to 繊維リサイクル用途の衣類の選別フローのイメージ

欧州では NIR (Near-Infrared Spectroscopy: 近赤外分光)などを搭載した自動選別装置の開発が進められており、例えば Tomra 社などが参画する SIPTex プロジェクトにおいては、世界初の選別プロセスの自動プラントを立ち上げ、1つのラインで1時間当たり最大4.5トンの廃棄物を処理可能としている<sup>18</sup>。NIRでは製品の表面の素材識別が可能となるが、衣類の表地・裏地の異種素材や2種類以上の複合素

<sup>18</sup> STADLER and TOMRA Deliver the World's First Fully Automated Textile Sorting Plant in Malmö, Sweden (Recyclinginside, 2021) <https://recyclinginside.com/textile-recycling/stadler-and-tomra-deliver-the-worlds-first-fully-automated-textile-sorting-plant-in-malmo-sweden/>

材における組成識別の精度、ウレタンといった微量成分の検出などの課題がある<sup>19</sup>。NIR の他、ラマン分光やテラヘルツ分光といった分光分析の活用や、複合素材を含めた各種繊維のデータベースの整備、スペクトルから繊維を同定するアルゴリズムの構築なども検討の俎上に上がっている。また現状手作業で行われている付属品の取り外し等の解体作業に対しても、今後はロボティクス技術などを活用した効率化が求められる。

## (2) 高品位な繊維原料への再資源化技術の開発

再資源化プロセスに投入する原料は単一素材を対象とすることが前提であるため、まずターゲットとする繊維の素材ごとの生産動向について解説する。世界の繊維生産量のうち 2021 年時点ではポリエステルが 54%、次いで綿が 22%と、ポリエステルと綿を合わせるだけで全体の 76%を占めている。他にはレーヨンなどの MMCF (Manmade Cellulosic Fiber: 人工セルロース繊維) が 7.2%、ナイロンが 5.9%、ウールなどの動物由来繊維が 1.6%生産されている(図 13)。

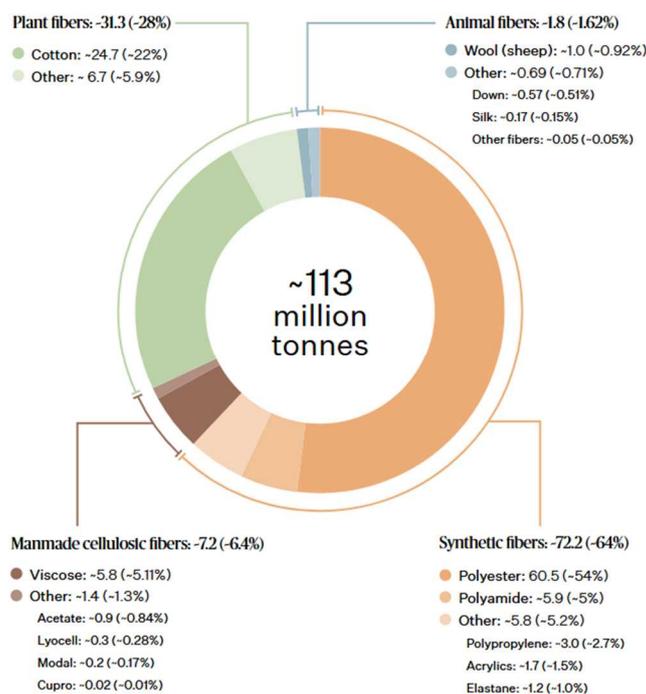


図 13 2021 年時点の世界の繊維生産量の素材内訳(単位:百万トン)

出典: Preferred Fiber & Materials Market Report 2022 (Textile Exchange, 2022)<sup>20</sup>

<sup>19</sup> Technical monitoring on optical sorting and textile recognition technologies at a European level (Terra, 2020) [https://refashion.fr/pro/sites/default/files/fichiers/Terra\\_summary\\_study\\_on\\_textile\\_material\\_sorting\\_VUK300320.pdf](https://refashion.fr/pro/sites/default/files/fichiers/Terra_summary_study_on_textile_material_sorting_VUK300320.pdf)

<sup>20</sup> [http://textileexchange.org/app/uploads/2022/10/Textile-Exchange\\_PFMR\\_2022.pdf](http://textileexchange.org/app/uploads/2022/10/Textile-Exchange_PFMR_2022.pdf)

世界の繊維総生産量は年々増加傾向にある。綿については、図 14 に示す 2000 年代前半までの間は最大の生産量を占めており、それ以降もほぼ一定の生産量を維持している。ポリエステルについては、化石資源から安価に製造できるようになったために生産量が急激に増加しており、2030 年にかけて今後もその生産割合が高まってくると予想されている(図 14)。

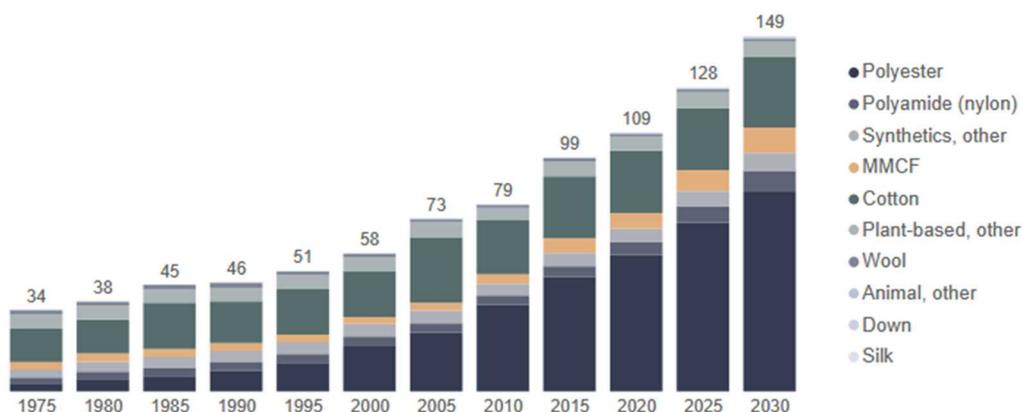


図 14 世界における繊維生産量の推移(単位: 百万トン)

出典: Preferred Fiber & Materials Market Report 2022 (Textile Exchange, 2022)<sup>20</sup>

以上の状況から、今後回収される衣類に主に含まれる素材として綿とポリエステルを対象を絞り、その再資源化について解説する。図 15 に綿・ポリエステルの再資源化スキーム例を示す。

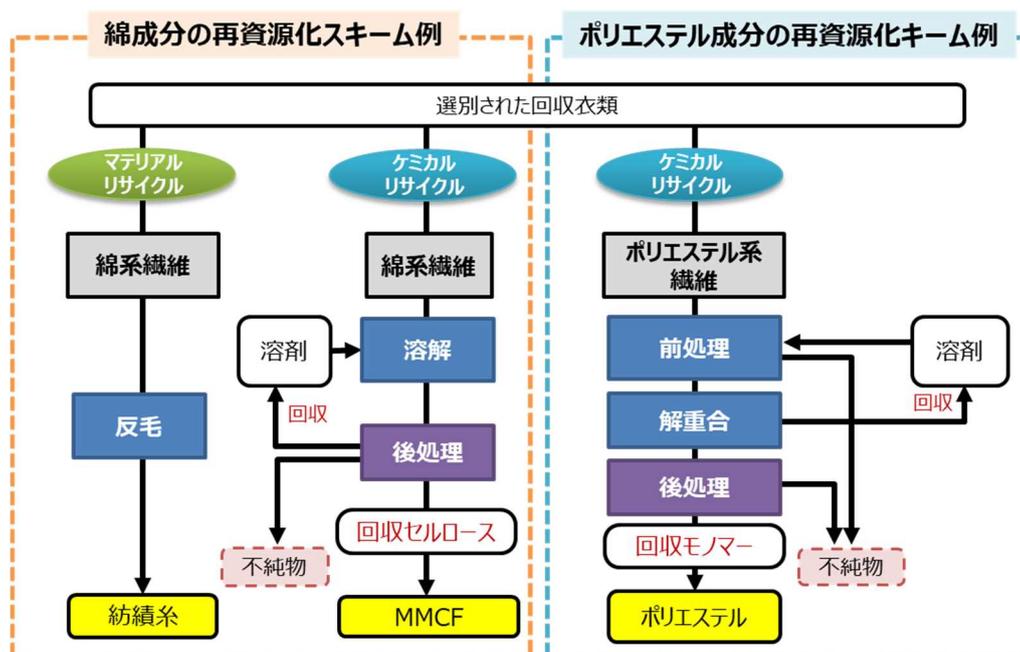


図 15 綿・ポリエステルにおける主な再資源化スキーム

綿は、反毛後に再紡績するマテリアルリサイクルの方法が知られている。綿以外の異種繊維が含まれている場合も技術的に反毛は可能であるが、品質維持などの観点から原料は単一素材であることが望ましいとされる。反毛時の摩擦により繊維長が短くなると紡績糸の強度が低下するため、今後は繊維強度の維持に向けた技術開発が求められる。近年では熱水やイオン液体などで溶解しセルロースとして回収後、MMCF (Manmade Cellulosic Fiber: 人工セルロース繊維) に紡糸するケミカルリサイクルの技術開発も進められており、今後は繊維強度を維持もしくは強化できる溶解・紡糸技術の開発や、プロセスの省エネ化、低コスト化などが求められる。

ポリエステルは再資源化の手法として、解重合によりポリエステル成分をモノマー化するケミカルリサイクルが必要となる。既に一部では実用化が進んでいる技術ではあるが、今後は新規触媒開発などを通じた解重合プロセスの改善・工程数の削減による省エネ化や、スケールメリットなどによる低コスト化が期待される。

他方で、こうした再資源化スキームに投入される素材は、(1)で述べた選別プロセスで構成素材ごとに衣類が仕分けられても、綿・ポリエステルの混紡品といった繊維レベルで複合化された素材をはじめ、染料や加工剤など様々な成分が含まれていることが多い。そのために図 15 に示したスキームのみでは異種繊維など大量の不純物が発生し、このため生産されるリサイクル繊維原料の品質悪化につながる可能性が高いという課題が残る。

### (3) リサイクルを前提とした製品設計

繊維製品の循環利用に向けては、静脈側の技術のみならず、動脈側でのリサイクルを前提とした製品設計(易リサイクル設計)に資する技術の開発も重要となる。易リサイクル設計の手法を図 16 に例示する。

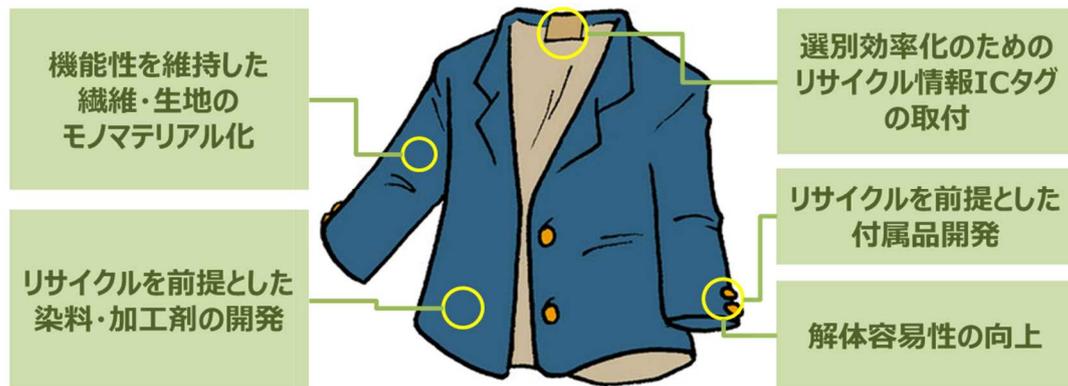


図 16 易リサイクル設計の手法例

具体的な手法として、繊維 to 繊維リサイクルにおける素材分離等のプロセスを効率化するための繊維・生地のモノマテリアル化が挙げられる。消費者が要求する機能性をモノマテリアルでも実現するために、合成繊維の紡糸技術や生地の加工技術等が求められる。また、リサイクルし易い素材からなるジッパーやボタンなどの付属品開発や解体容易性の向上も有効な手法と考えられる。

さらには、衣類の在庫管理等で導入が進んでいる RFID (Radio Frequency Identification) タグ等の電子タグをリサイクルプロセスに活用する手法も挙げられる。衣類の素材等のデータを電子タグに書き込むことで回収後の選別プロセスを効率化できるが、実用化に向けては衣類の洗濯負荷などに耐えうる性能の実現、低コスト化が課題となる。

## 2-3 技術開発の方向性

### (1) 静脈における技術開発の方向性

現状では単一素材からなる製品のみが繊維 to 繊維リサイクルの原料の対象とされている。前章で述べたとおり、原料が綿の単一素材であればマテリアルリサイクルにより紡績糸が作られ、ポリエステルであればケミカルリサイクルによりモノマー化されるプロセスが既に実用化されており、こうした再資源化プロセスは主に繊維企業が担っている。しかし、混紡品などの複合素材からなる製品は、2-2 で述べたとおり既存技術では大量の不純物が生じることが要因となりリサイクル繊維原料の品質低下を招くため、多くの場合ウェスやフェルトなどへのカスケード利用、ないしは廃棄されてしまっており、回収衣類に占める繊維 to 繊維リサイクルの割合は極めて限られているのが現状である。カスケードリサイクルの国内市場が縮小する中、今後衣類の廃棄量削減を目指していくためには、リサイクル繊維原料のニーズが高まりつつある背景を受けて、複合素材といった様々な衣類に対応できる繊維 to 繊維リサイクルのシステムを確立する必要があり、その実現に向けては、再資源化技術に適した素材を速やかに供給できる高度な選別プロセスが繊維業界に共通した課題となっている。

今後繊維 to 繊維リサイクルを推進していくためには、再資源化プロセスは各繊維企業において競争力となる技術の高度化を図りつつ、再資源化プロセスを担う繊維企業に良質な素材を提供すべく、繊維ごとの選別や付属品の除去、さらには染料・異種繊維の分離などの前処理も含めた技術開発を、繊維業界が協調的に進めていくことが求められる(図 17)。

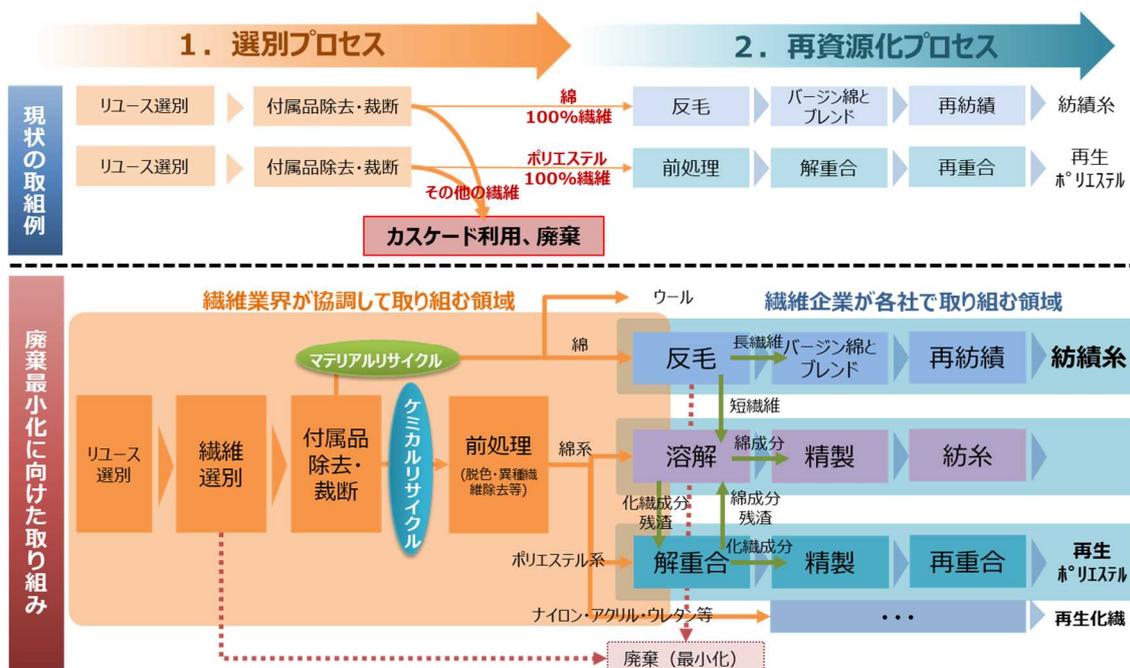


図 17 繊維 to 繊維リサイクル推進に向けた選別・再資源化プロセス

選別プロセスにおいては、センサーなどによる回収衣類の素材識別技術や、付属品の除去効率化に資するロボティクス技術などの開発も必要となる。また選別時に回収衣類の量や形態、素材情報などをデータベースに収集・蓄積することで、回収量の変動による影響予測や素材識別アルゴリズムの高度化など、更なる選別効率化につながる可能性がある。技術領域が多岐にわたるため、繊維業界にとどまらない産学の協力が不可欠となる。

## (2) 動脈における技術開発の方向性

易リサイクル設計については、現状では静脈において繊維 to 繊維リサイクル技術が確立されていないため、動脈において易リサイクル設計の衣類を開発するインセンティブが働きにくい状況にあり、普及には至っていない。そこで今後易リサイクル設計された衣類の普及にあたっては、静脈の開発技術に対応した「易リサイクル衣類」のプロトタイプを開発し、循環モデルを検証することから始めることが望ましい(図 18)。プロトタイプ開発にあたっては、静脈で開発された繊維 to 繊維リサイクル技術に対応できる素材条件などを加味し、繊維・生地・縫製などの各製造段階を担う企業が要素技術を持ち寄り、設計・開発に取り組むことが重要となる。中長期的には、静脈において繊維 to 繊維リサイクルが事業化していく流れと連動し、易リサイクル設計に資する要素技術を各社が一般衣類にも横展開していくことで、衣類の循環利用の更なる加速につなげることができる。また、アパレル業界において易リサイクル設計された衣類の活用を促す仕組み作りとして、リサイクルに適した設計条件のガイドライン<sup>21</sup>の整備を進めることも有効と思われる。

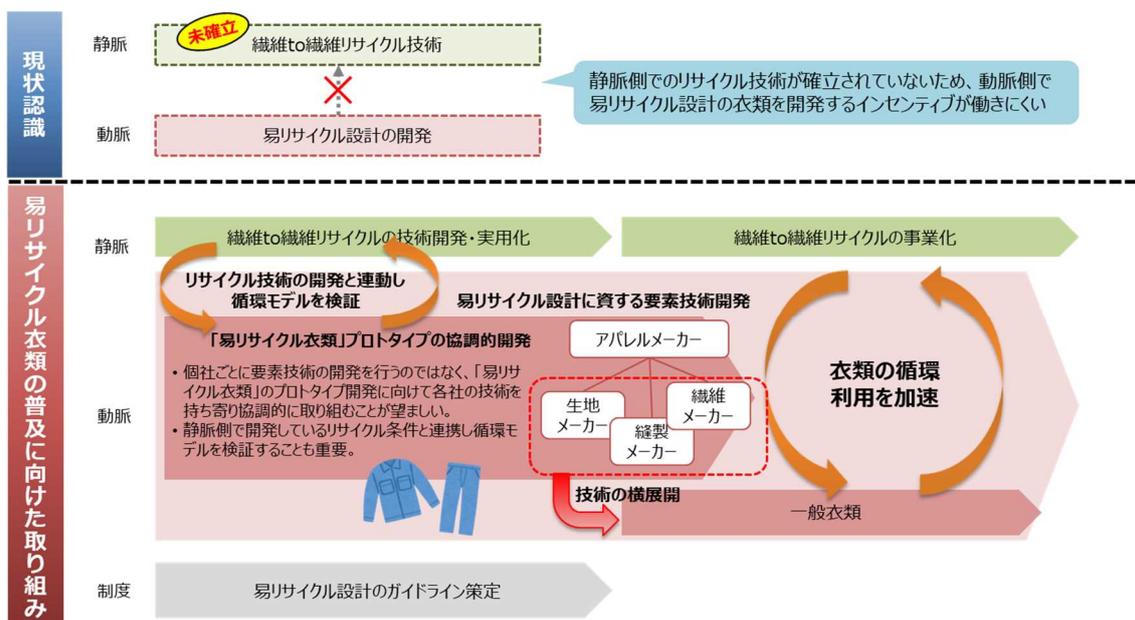


図 18 易リサイクル衣類の普及に向けた取り組みの方向性

<sup>21</sup> 易リサイクル設計のほか、有害化学物質の使用削減や長期使用など、環境に配慮した「環境配慮設計ガイドライン」として、2023年より経済産業省において検討が進められている。

### (3) 資源循環システム全体における連携の方向性

前述の(1)、(2)で示した技術開発の早期社会実装に向けては、衣類の回収・選別・再資源化の静脈と、製品開発・消費の動脈を合わせた、繊維資源循環システム全体での連携が求められる(図19)。

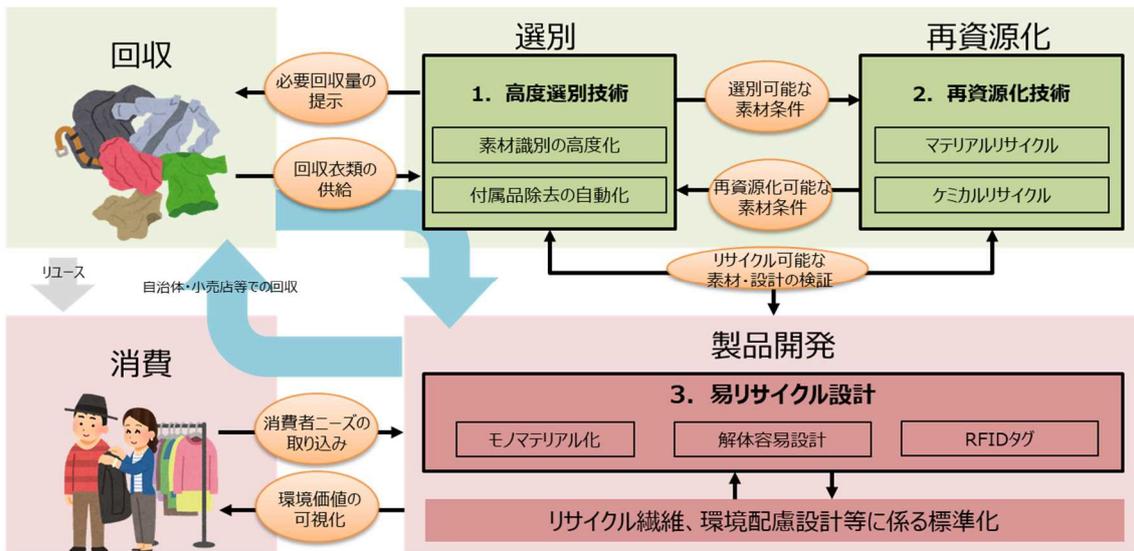


図19 衣類の資源循環システム構築に向けた動静脈連携イメージ

※太枠箇所は技術開発要素

静脈側においては、自治体や小売店の回収スキームを活用して十分量の回収衣類を調達しリサイクルプレーヤーに安定供給できる体制を構築することで、廃棄量の削減のみならず、スケールメリットを生かしリサイクルコストの低減にもつなげられる。またリサイクルプロセス内においても、選別技術と再資源化技術のそれぞれで対応できる素材条件を共有することにより効率的な開発につなげられる。

静脈—動脈間でも、(2)で示した開発中の選別・再資源化技術に連動したリサイクルし易い条件の製品を製造することが望ましく、実効性を高めるためにはガイドラインとして整備していくことも有効である。

リサイクル繊維原料を含む製品を普及していくためには、動脈側において消費者に対して製品の環境価値を訴求できる仕組みが必要になる。また製品開発段階に対しても消費者ニーズを取り込んで易リサイクル性と機能性やデザイン性の両立を目指すことが望ましい。

### 3章 おわりに

本レポートでは、衣類の循環利用を推進し、国内の衣類廃棄量を削減するとともに CO<sub>2</sub>排出・水消費などの国内外の環境負荷低減に貢献することで、日本の繊維産業における国際競争力の維持・強化を図る将来像の実現に向けて、世界的にも未確立である「繊維 to 繊維リサイクル」の技術開発を進めていく必要性を示した。最近の欧州をはじめとする資源循環に向けた規制強化、またアパレル企業における環境配慮素材のニーズが高まる動きがある中で、繊維 to 繊維リサイクル技術の確立によりリサイクル繊維原料の供給体制を構築することは、日本の繊維産業において喫緊の課題となっている。

単一素材からなる回収衣類の繊維 to 繊維リサイクル技術は実用化が進みつつあるが、衣類には消費者のニーズに合った多様性や機能性などが要求されることから、こうした対応に向けて近年複数の繊維素材が複合化された混紡品などの割合が増加傾向にある。繊維産業の分野においては、こうした繊維素材の多様性ゆえに個社の特定素材に対する既存技術をそのまま適用することは難しく、天然繊維や化学繊維などの業界が協調的に開発に取り組む必要がある。

さらに、技術開発のみならず、自治体や小売店などを通じた使用済み衣類の回収率向上や、リサイクル繊維原料を活用した環境配慮製品における環境価値の可視化といった仕組み作りとの連動も欠かせない。このように、産学官が一体となり繊維 to 繊維リサイクル技術の確立、早期社会実装に向けた取り組みを進めることで、日本の繊維産業の国際競争力維持・強化を図ることが今後は重要となる。

技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight Vol.116

繊維リサイクル分野の技術戦略策定に向けて

2023年10月2日発行

TSC Foresight Vol.116 繊維リサイクル分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構  
技術戦略研究センター(TSC)

■センター長 岸本 喜久雄

■センター次長 植木 健司  
飯村 亜紀子 (2023年7月まで)

■ナノテクノロジー・材料ユニット

・ユニット長 藤本 辰雄  
・研究員 大里 武 (2023年6月まで)

岡田 明彦  
花田 亨 (2023年3月まで)  
曹 勇 (2022年3月まで)

・フェロー 川合 知二 大阪大学産業科学研究所 招聘教授  
北岡 康夫 大阪大学共創機構イノベーション戦略部門 機構長補佐/部門長  
井上 貴仁 株式会社 AIST Solutions (アイストソリューションズ) コーディネート事業  
本部事業化推進部 (兼) プロデュース事業本部事業構想部 コーディネータ  
三島 良直 国立研究開発法人日本医療研究開発機構 理事長

●本書に関する問い合わせ先  
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

●本書は以下 URL よりダウンロードできます。  
<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。  
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。  
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。