

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	コンペティティブ・インテリジェンスの有効活用の要因分析とプラス チックリサイクル分野における事例研究
Title(English)	
著者(和文)	土本 一郎
Author(English)	Ichiro Tsuchimoto
出典(和文)	学位:博士（技術経営）, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12608号, 授与年月日:2023年9月22日, 学位の種別:課程博士, 審査員:辻本 将晴,後藤 美香,日高 一義,杉原 太郎,笹原 和俊,梶川 裕矢
Citation(English)	Degree:Doctor (Management of Technology), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12608号, Conferred date:2023/9/22, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

コンペティティブ・インテリジェンスの有効活用の要因分析と
プラスチックリサイクル分野における事例研究

東京工業大学
イノベーションマネジメント研究科
イノベーション専攻

土本 一郎

要旨

本研究では、企業や産業の競争力にとって重要なコンペティティブ・インテリジェンス（CI）について、プロセスやスコープの明確化、成功要因分析などを行った上で、近年、社会的関心が高まっているプラスチックリサイクル問題を事例として取り上げ、CIの幅広いスコープ等の観点から、そのシステム転換を実現するための課題や方策について考察を行った。

CIについては、先行研究ではCIのスコープは競合分析に限定されるという説と広くビジネス環境全般を対象としているという説に分かれていたが、今回の調査では製品、技術、顧客、市場、サプライヤー（供給）、政府・規制、環境問題、競合関係など広くビジネス環境全般であることが判明した。CI結果を吸収能力（AC）につなげ有効活用するためには、促進要因として、①外部知識の吸収に貪欲な組織文化・風土、②CI結果を意思決定に反映するプロセス、③CI部門とCI結果を活用する部門との間の信頼関係の構築が重要であることが明らかとなった。

プラスチックリサイクルに関する技術調査を中心とした公開情報調査として、世界のプラスチックリサイクルに関する論文 35,519 本について書誌情報分析を行い、その結果、特に顕著な萌芽的トピックとして生分解性プラスチックとバイオプラスチックに関する研究が近年急増していることが判明した。また、多くの研究領域において先進国が論文数のリーダーであるが、プラスチック再生素材の建設分野での利用に関する研究については、発展途上国で熱心に行われていることが明らかとなった。このような用途は発展途上国だけでなく、先進国においても有意義である。プラスチックリサイクルを進める上で、廃棄物が発生した国で責任を持ってリサイクルを行う発生国消費原則と、発展途上国に廃棄物を輸出しグローバルなリサイクルシステムを構築する国際分業原則があり、これらについてのメリット・デメリットを議論した。

上記の研究成果を基に、我が国でプラスチックリサイクル問題のシステム転換を促進する上で重要な三つの論点を抽出し、CI的な方法での有識者インタビューによる非公開情報の収集を行った上で、CIの幅広いスコープの観点から考察を行い、論点毎の課題とそれを解決するための方策について議論した。

発生国消費原則と国際分業原則については、そのベストミックスを追求すべきであり、発生国消費原則を推進する上では、CIスコープである技術・顧客の面で考察すると、マテリアルリサイクルの劣化を防止する技術の実用化、ケミカルリサイクル等も活用したアップサイクルの実現、消費者の受容性を高めるためのマーケティング方法や表示・認証制度などの方策が重要である。

生分解性プラスチックとバイオマスプラスチックの普及については、CIスコープである技術・市場・顧客の観点で考察すると、生分解性プラスチックやバイオマスプラスチックの選別技術の高度化、コンポスト化による分解技術の確立とコンポスト施設の普及拡大、混合プラスチックのリサイクル技術の商業化、需要の大きい発展途上国市場の開拓、プラスチックの種類によってリサイクル方法が異なることの消費者への普及啓発などの方策が重要である。

プラスチック再生素材の建設分野での利用推進については、CIスコープである規制・競合・環境・製品の視点で考えると、廃棄物処理法の規制の明確化、道路の品質規格の見直し、既存のリサイクル事業者と建設業者との間の競合問題の解決、建設分野での利用による環境負荷低減効果の認知拡大、建設分野で利用する再生素材製品の品質基準の明確化などの方策が望まれる。

目次

第一章： 緒言	5
1. はじめに	5
2. 研究目的	9
3. 研究手法	9
4. 博士論文の構成	10
第二章：日本企業におけるコンペティティブ・インテリジェンスについてのケーススタディ研究	13
要旨	13
1. 緒言	13
2. 先行研究調査	14
3. 研究手法	16
4. 結果	18
4.1. CI プロセスと SA プロセスの比較	19
4.2. CI のスコープと SA のスコープの比較	20
4.3. 結果の要約	22
5. 考察	23
5.1. 組織的 CI と非組織的 CI	24
5.1.1. 組織的 CI のメリット	24
5.1.2. 組織的 CI のデメリット	25
5.1.3. 非組織的 CI のメリット	25
5.1.4. 非組織的 CI のデメリット	26
5.1.5. 組織的 CI と非組織的 CI の要約	26
5.2. CI 結果の有効活用の要因としての吸収能力の重要性	26
5.3. CI 結果の知識吸収を促進する要因	28
6. 結論	30
付録： インタビュー調査のメモ	31
第三章： プラスチックリサイクルについての書誌情報分析を用いた体系的レビュー	57
要旨	57
1. 緒言	57
2. 研究手法	60
2.1. データ収集	60
2.2. 方法論	60
3. 結果	61
3.1. プラスチックリサイクルに関する研究の概観	61

3.2. クラスタ 1 : プラスチックリサイクル全般.....	63
3.2.1. サブクラスター1-1 : 熱分解によるリサイクル (ケミカルリサイクル)	64
3.2.2. サブクラスター1-2 : プラスチックリサイクルの LCA.....	64
3.2.3. サブクラスター1-3 : マテリアルリサイクル	66
3.2.4. サブクラスター1-4: プラスチックの生分解性.....	67
3.2.5. サブクラスター1-5: バイオプラスチック	68
3.2.6. サブクラスター1-6: PVC のリサイクル.....	70
3.3. クラスタ 2 : WEEE とプラスチック廃棄物の選別技術	71
3.3.1. サブクラスター2-1: WEEE のリサイクル	72
3.3.2. サブクラスター2-2: 分光選別	74
3.3.3. サブクラスター2-3: 浮上選別	75
3.3.4. サブクラスター2-4: 静電選別	76
3.4. クラスタ 3 : 建設分野でのプラスチック再生素材の利用.....	76
3.4.1. サブクラスター3-1: プラスチック再生素材のコンクリートでの利用	77
3.4.2. サブクラスター3-2: プラスチック再生素材のアスファルトでの利用.....	78
3.5. クラスタ 4 : PET のケミカルリサイクル	79
3.6. クラスタ 5 : 木材・プラスチック複合材料への利用	80
3.7. クラスタ 6 : FRP のリサイクル	80
4. 考察.....	81
5. 結論.....	90
第四章 : 考察と結論	94
1. 前二章に基づく論点抽出.....	94
2. 論点 1 についての考察 (発生国消費原則と国際分業原則)	98
3. 論点 2 についての考察 (生分解性プラスチックとバイオマスプラスチック)	103
3.1. 生分解性プラスチック	103
3.2. バイオマスプラスチック.....	106
4. 論点 3 についての考察 (プラスチック再生素材の建設分野での利用)	107
5. 結論.....	109
謝辞	112
参考文献	113

第一章： 緒言

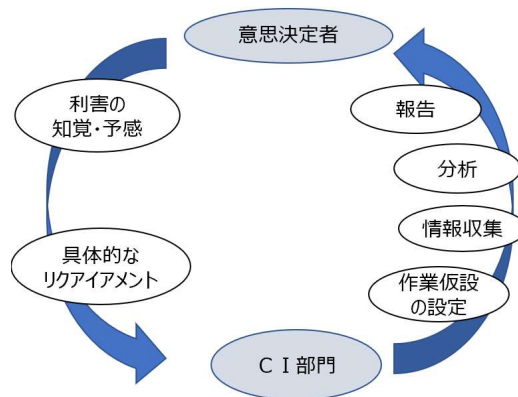
1. はじめに

近年、企業を取り巻く環境は急速に変化するとともに、その先行きに関する不確実性が増加している。デジタル化、Digital Transformation（DX）推進、Social Networking Services（SNS）の進歩により企業経営の在り方は大きく変化しつつある。消費者のニーズや価値観も情報入手経路とともに多様化・進化している。新型コロナウイルスのまん延は長期化の様相を見せ、国民の行動変容や企業の働き方に大きな影響を与えている。一部の覇権主義国による一方的な現状変更の試みは、資源を始めとした身の回りの製品の価格の高騰や急速な為替変動をもたらしている。地球温暖化問題やプラスチック汚染の問題は深刻化し、国民的関心事項として企業活動においても、その解決に貢献できる戦略を取ることが大前提となっている。これらの激しい環境変化や先行きの不確実性が高まる中で、企業が的確な判断を行い最適な戦略を取るためには、情報の収集・分析力を高め、先読み能力を研ぎ澄ますことが必要であり、この観点からコンペティティブ・インテリジェンス（competitive intelligence：CI）を活用することは極めて有意義である。

CIは諜報機関のインテリジェンス手法を、合法的、倫理的に実業界の世界にも適用した分析手法であり、大企業を始めとして、中小企業、大学、スポーツのパフォーマンス、ヘルスケアなど幅広い分野で使われている。CI導入に至る経緯や概念は米国と欧州で多少の違いはあるものの、数十年の歴史を持ち、進化・拡大が続けている。最近では、中国でもCIへの精力的な活動が行われている。我が国においても近年取組事例が増えている。

CIは一般的には自らを取り巻く事業環境を調査分析し、意思決定に必要な戦略の策定に活用されている。CIという用語は研究者や実務者によって異なった意味合いで使われ、学術的にもビジネス的にも確たる定義はない。この背景として、CIのスコープは競合企業分析に限られるとする研究者と、幅広い範囲を対象としているとする研究者で意見が分かれていることもCIの定義が確定しない要因の一つとなっていると考えられる。CIとは何かとか、CIにできて他の方法でできないことは何かということが不明確であるとの認識からこの研究は出発している。本研究によって、始めてCIにおいては①製品、技術、顧客、市場、サプライヤー（供給）、環境問題、競合関係、政府・規制、政治などの幅広いスコープで分析することが必要であること、②公開情報に加えて、人づてのネットワークで非公開情報を集めるヒューマン・インテリジェンスが必要であること [1]、が明らかとなった。これらの点がCIと他の分析方法との主な相違であると考えられる。CIプロセスには諸説あるが、代表的なものは図1-1に示すように、①調査分析のテーマ設定（リクワイアメントと呼ばれる）、②作業計画（作業仮説の設定）、③情報収集、④分析、⑤報告をサイクルとして回して行って分析結果の精度を上げていくものである [2]。合法かつ倫理的に情報を収集して分析することはCIにおける大原則である。一度に成果が得られることはなく、定性的な情報も交えた断片的な情報を収集し、その信頼性を評価した上で、情報を繋ぎ合わせて仮説を作り、再度、仮説に基づき調査を行うことが必要となる。このため、CIプロセスはサイクルを繰り返す地道なプロセスとなる。CIにおいてはリクワイアメントの具体化が最初のステップとして極めて重要である。

図 1-1 : CI サイクル



CI の事例としては、1970 年代にロイヤルダッチシェル社が行った CI 活動がある [3]。同社は、当時の中東におけるイスラエルとアラブ諸国の対立が深刻な事態に発展するのではないかと危機感を持ち、CI 活動を開始した。多くの調査員を現地に派遣し、イスラエルとアラブ諸国の政治、社会、宗教、経済、石油政策などの多方面にわたって詳細な情報収集を行った。集められた情報はシナリオ分析手法によって事業戦略を決めるための知識であるインテリジェンスに加工された。この分析により、同社は近い将来中東地域において大規模な紛争が発生するリスクが極めて高く、そのシナリオが現実となった場合には同社の経営に深刻なインパクトを及ぼすという結論を得た。これを受け、同社は中東地域における石油開発投資案件を大きく絞り込んだ。結果的に第一次中東戦争が勃発し、他のオイルメジャーは手痛い損失を被ったが、同社の被害は最小限にとどめることができた。これにより同社は当時のオイルメジャー 6 位から 2 位に躍進することができた。第二章におけるインタビュー調査でも CI の成功事例が報告されている。日本の製薬企業 A 社は、治療用の輸液を海外の軍隊に販売している。ある時、某国の軍隊からこの輸液の異常なほどの大量注文が来た。不信に思った A 社経営陣は CI 部門に調査分析を命じ、顧客との情報交換を始めとして、現地への調査員派遣による某国の政治・経済情勢や徴兵の動きの把握、他のサプライヤーへのヒアリング、軍人 OB への取材などを行い、某国が戦争の準備段階にあると判断した。A 社は市場獲得のために某国への支社設立を検討していたが、それを中断した。その後、A 社の読み通り某国は隣国と戦争状態に突入し、国内の安全が脅かされる状態となった。A 社は支社への派遣予定職員の安全を確保するとともに、無駄な海外投資を避けることができた。

このように CI は競合企業の動向分析のみならず、企業を取り巻く幅広い環境の分析と先読みに活用できる。CI をより積極的、効果的に活用することにより、社会、経済、技術のシステム転換を促し、企業や産業の競争力を高めることが重要である。近年、CI については盛んに研究が行われているが、CI のプロセスやスコープは必ずしも明らかとなっておらず、スコープについては研究ごとに主張が分かれている。また、CI を有効活用するための方策についての研究はほとんどない。本研究では、CI のケーススタディを通じて CI のプロセスとスコープを明らかにし、CI を有効活用するための成功要因を分析するとともに、CI の事例としてプラスチックリサイクル問題を取り上げ、プラスチックリサイクル問題のシステム転換を図るための課題と解決に向けた方策を考察することとする。

プラスチックは、軽い、丈夫、腐らない、安価で大量生産ができるなど多くの優れた特性を有し、我々の身の回りの生活や社会を支える重要な素材として、なくてはならない存在である。一方、使い終わったプラスチック廃棄物が陸域で適切に処理されず、海洋に多量に流出し巨大な塊りとなって漂流する海洋プラスチック問題が深刻になっている。海亀の鼻にストローがささったショッキングな写真とともに海洋プラスチック問題はマスコミで大きく取り上げられている。また、直径 5 ミリメートル以下の微細なプラスチック片が海洋や河川に大量に存在しており、生態系への深刻な悪影響や食物連鎖を通じての人間の健康被害への懸念から、マイクロプラスチック問題としてこれもマスコミで盛んに報道されている。更に、2020 年 7 月より日本でもレジ袋の有料化が始まり、国民の間にプラスチックの使用を抑制しようとの機運が生まれている。国際的には、2022 年 2 月の国連環境計画総会（UNEA5.2）において、プラスチック汚染を終焉させることを目標として、法的拘束力のある国際条約を制定することが決議され、2024 年末までに条約案を作成すべく政府間交渉委員会に約 160 か国が参加して精力的な議論が行われている。政府間交渉委員会においては、欧州各国からリサイクルのできないプラスチックの生産を規制すべきとの提案があり、発展途上国を中心にこれに賛同する声が大きくなっている。これらの結果、日本国民のプラスチックに対する問題意識が著しく喚起され、「プラスチックを他の素材に代替することにより、プラスチックはなくすべき素材である」、「プラスチックの生産や使用を規制すべき」といった厳しい世論に直面している。

我が国では、過去二回、プラスチック廃棄物が社会問題として取り上げられており、今回のプラスチックへの厳しい世論は三度目の社会問題化となる。一度目は 1970 年代の高度成長期に石油化学プラントの新設が相次ぎ、プラスチックの生産・使用量が増加し、それにとまってプラスチック廃棄物が爆発的に増加した頃である。当時の大阪万博では使い捨てプラスチックの使用が禁止され、自民党ではプラスチックの生産・消費への課税が議論された。これらの社会動向を受けて、プラスチック廃棄物の適正処理方法を開発するとともに政府に対する政策提言を行うために、政府のリーダーシップの元、産業界が一丸となってプラスチック循環利用協会が設立された（当時の名称はプラスチック処理促進協会）。二度目は、1990 年代にプラスチック廃棄物の埋立が社会問題となった。当時は焼却施設の技術的制約によりプラスチックを焼却処分できず、全量を埋立処分しており、プラスチック廃棄物による埋立処分場の圧迫が大きな問題となった頃である。食品残渣のついた包装用プラスチックも全て埋立処分場に運ばれ、ハエの大量発生など衛生面でも深刻な問題を引き起こした。その後、焼却施設の技術革新が起き、地方自治体による焼却施設の増設努力も相まって、プラスチック廃棄物を焼却して発生した熱を電気や温水として利用できるエネルギーリカバリーへの道が開かれた。我が国ではプラスチックの処分方法としてエネルギーリカバリーが最も主流となっているのはこのような歴史的経緯にも影響されている。

現在は三度目の社会問題化の只中にあるが、我が国では、エネルギーリカバリーをサーマルリサイクルと位置付けて、マテリアルリサイクル（機械的リサイクル）、ケミカルリサイクルとサーマルリサイクルを合計したプラスチックの有効利用率が 87%に達し [4]、世界的に見ても極めて高い水準にある。エネルギーリカバリーは、追加の二酸化炭素の発生なしに電気や熱の形でエネルギーの有効利用を実現できる。同量のエネルギーをエネルギーリカバリーなしに得ようとすると大量の化石資源の燃焼と二酸化炭素の発生が余儀なくされることから、エネルギーリカバリーには二酸化炭素の大きな排出抑制効果があり、この点でエネルギーリカバリーはプラスチック廃棄物の優れた処理方法である [5]。一方、焼却の段階で二酸化炭

素を発生することも事実であり、エネルギー以外のプラスチック再生材料や化学原料を生産できないという点では、マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルの方がより優れた処理方法とみなすこともできる。西欧諸国では、エネルギーリカバリーからマテリアルリサイクルやケミカルリサイクルへ移行すべきとの論調がかねてから強く、我が国でも国民の間で徐々に同様の価値観となってきた。

表 1-1 はプラスチックリサイクルに関する論文が多い 10 か国について、リサイクル率、埋立率などをまとめたものである。表 1-1 についての詳細な分析と議論は第三章で述べるが、我が国の特徴として、エネルギーリカバリーの率が高く、埋立率は低いものの、リサイクル率では西欧諸国や中国よりも低い水準にある。エネルギーリカバリーは製紙業などでの化石資源の代替燃料として使われ二酸化炭素の排出量の削減効果が高いことが特徴であるが、カーボンニュートラルへの移行が日本全体の目標となっている中では、いずれはエネルギーリカバリーからリサイクルにシフトしていくことが望まれる。上述のようにプラスチックによる環境汚染が世界的な問題となり、我が国においてもプラスチックに対する厳しい世論がある中で、国民的な理解のもとでプラスチックが社会と共生していくためには、我が国におけるプラスチックリサイクル問題のシステム転換を促進することが必要であることが本研究においてプラスチックリサイクル問題を取り上げた理由である。

表 1-1：プラスチックリサイクルの論文数の多い国についてのプラスチック廃棄物の処理状況

論文 順位	国名	論文数 シェア	データ 取得年	一般 廃棄物量 (百万トン)	リサイクル 率	エネルギー リカバリー率	単純焼却 率	埋立率	未処理率	環境 意識	人口 (百万人)
1	中国	12.4%	2020	130.3	28.0%	N.A.	32.0%	34.0%	6.0%	92%	1410.9
2	米国	11.1%	2018	35.7	8.7%	15.8%	0.0%	75.6%	<1.0%	71%	331.5
3	イタリア	7.5%	2018	3.6	31.4%	32.8%	0.0%	35.8%	<1.0%	86%	59.4
4	ドイツ	6.9%	2018	5.3	38.6%	60.7%	0.0%	0.7%	<1.0%	81%	83.2
5	英国	6.7%	2018	4.0	32.0%	45.7%	0.0%	22.4%	<1.0%	86%	67.2
6	スペイン	6.2%	2018	2.6	41.9%	19.3%	0.0%	38.8%	<1.0%	85%	47.4
7	インド	5.9%	2016	8.5	5-25%	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	82%	1380.0
8	日本	5.2%	2021	4.2	25.1%	62.0%	7.6%	5.4%	<1.0%	56%	125.8
9	ブラジル	4.7%	2018	7.9	2.2%	N.A.	N.A.	59.5%	24.4%	86%	212.6
10	オランダ	3.2%	2018	0.9	33.7%	65.8%	0.0%	0.4%	<1.0%	73%	17.4

プラスチックのリサイクルを進めるための研究が各国で盛んに行われている。2021 年末時点で、プラスチックリサイクルに関して約 56,000 本もの論文が発表され、毎年 7,700 の新たな研究が行われている。例えば、マテリアルリサイクルについては、リサイクルの過程で素材の強度や品質が劣化することが課題と指摘され [6]、多くの研究が行われている。ケミカルリサイクルはマテリアルリサイクルの欠点をカバーする特性を有しているが、リサイクルの過程で多量のエネルギーを必要とし、二酸化炭素の排出量が多いことが

課題であり [7,8]、これらの解決に向けてプロセスの改良や新たな方策が盛んに研究されている。また、近年では、生分解性プラスチックやバイオプラスチック、建設分野でのプラスチック再生素材の利用などの新たなリサイクル手法に関する研究が大きな注目を集めている。これらの研究を一層発展させ、その実用化を図ることによって、我が国のリサイクルが進展することが期待される。

本研究においてプラスチックリサイクル問題を事例として取り上げた理由は二つある。一つ目は、我が国のプラスチック問題のシステム転換のための方策や関係機関の役割を明らかにするためには、プラスチック問題が直面する様々な現状や課題を CI の幅広いスコープの観点から分析・考察することが必要であるためである。例えば、以下の現状や課題を（ ）の CI スコープの観点から分析する必要がある：海洋プラスチック問題（環境問題）、レジ袋の有料化やプラスチック循環利用促進法の成立（政府・規制）、国民の環境意識の変化（顧客・市場）、再生プラスチックとバージンプラスチックの競合（競合問題）、廃プラスチックの再生利用による化石資源の中東依存度の低下（サプライヤー）、日進月歩で進化するリサイクル技術の動向（技術）。二つ目の理由は、プラスチックリサイクル問題のシステム転換のための方策や関係機関の役割を明らかにするためには、公開情報の収集のみならず、有識者を入り込んで探して、非公開情報を収集し、公開情報と非公開情報を組み合わせて分析することが必要であるためである。第四章の分析・考察では、例えば、バイオプラスチックの一般的な特徴や生産量については公開情報である日本政府の公式文書が役に立ったが、生分解性プラスチックとバイオマスプラスチックをマテリアルリサイクルする上での課題などについては公開情報では必ずしも明らかとならず、非公開情報が有益であり、公開情報と非公開情報を組み合わせて分析・考察を行っている。また、発生国消費原則と国際分業原則の選択、建設分野での再生材料の利用などの論点については公開情報では有意な情報が少なく、非公開情報が分析・考察において非常に有益となっている。

2. 研究目的

本研究においては、以下の3点を研究目的として設定する。

- ① CI の活用状況やスコープを明らかにするとともに、CI 結果の有効活用方法などの成功要因について分析する。
- ② プラスチックリサイクル問題を事例として取り上げ、技術調査を中心とした公開情報調査の観点から、プラスチックリサイクルの研究動向を体系的に俯瞰し、その全体像や萌芽的な研究トピックを明らかにするとともに、プラスチックリサイクルを進める上での科学的・社会的課題や論点を明らかにする。
- ③ これらの結果を踏まえ、我が国においてプラスチックリサイクル問題のシステム転換を促進するための論点を抽出し、課題と方策を考察する。

3. 研究手法

まず、我が国での CI の活動状況や、そのスコープとプロセス、CI を有効活用するための方策を明らかにするために、CI 活動を行っている日本企業と CI 活動を行っていない日本企業についてインタビューによるケーススタディを行い、比較分析を実施する。

次に、プラスチックサイクルの研究分野の動向を把握するため、技術調査を中心とした公開情報調査を行う。具体的には、Web of Science のデータベースを活用し、プラスチックサイクルに関する論文を集め、書誌情報分析を行い、どのような研究分野が存在するか、研究分野ごとの特徴は何か、萌芽的な研究トピックは何か、プラスチックサイクルのシステム転換を進めるために必要な課題は何かについて分析、考察する。

最後に、上記の分析・考察の結果をもとに、我が国においてプラスチックサイクル問題のシステム転換促進する上で必要となる論点を洗い出し、CI 的な方法でのインタビューによる非公開情報の収集を行った上で、CI の幅広いスコープの観点から論点毎に課題と必要な方策について考察を行う。

4. 博士論文の構成

本研究における各章の構成を図 1-2 に示す。第一章では、緒言として、まず CI とその重要性、プラスチックサイクル問題のシステム転換の必要性について述べた上で、研究目的と研究手法について記述している。

第二章では、CI について、我が国での活動状況、そのスコープとプロセス、CI を有効活用するための方策・課題について分析し、議論している。先行研究で議論が分かれていた CI のスコープについては、競合企業分析だけにとどまらず、製品、技術、顧客、市場、サプライヤー（供給）、環境問題、政府・規制、政治など広くビジネス環境全般を対象としていることが判明している。また、CI を行っている企業と CI は行っていないが調査分析を行っている企業との間で、スコープとプロセスに大きな相違はないことも明らかとなっている。CI を効果的に行う上で、組織内に CI 部門を設置する組織的 CI と、CI 部門を普段は設置せずに CI が必要な場合だけアドホックにタスクフォースを立ち上げる非組織的 CI では、その役割が大きく異なり、それぞれメリット・デメリットがあることを指摘している。また、CI 結果を効果的に活用するためには、組織の吸収能力（absorptive capacity : AC）が重要であり、AC を機能させるための促進要因についても考察している。

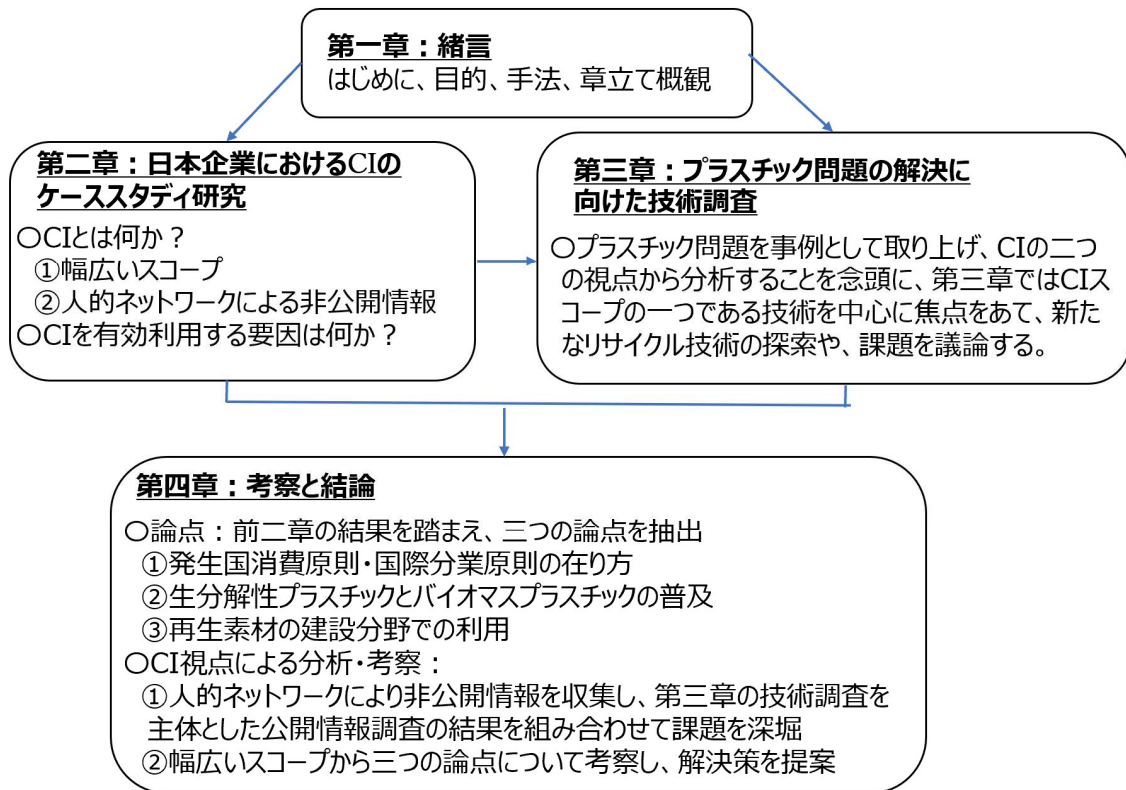
第三章においては、本研究のもう一つの命題である我が国のプラスチックサイクル問題のシステム転換を事例として取り上げた。我が国のプラスチックサイクル問題のシステム転換を図る上では、新たな技術の発掘が重要であるとの考えに基づき、第三章では技術を中心にして情報収集と分析・考察を行った。プラスチックサイクル研究に関する情報量は膨大であることも第三章を技術に限定して分析した理由の一つである。なお、第四章では、第三章の技術調査を中心とした公開情報調査の結果と併せて、それ以外の製品・顧客・競合関係・サプライヤー・政府規制などの CI 的な幅広い観点から、我が国のプラスチックサイクル問題のシステム転換を図るための方策を考察している。技術の探索においても非公開情報は重要な意味を持つため、第四章において、人づての人づてを頼ってインタビュー対象を特定し、技術面も含めた非公開情報を収集して、公開情報と組み合わせ分析・考察を行っている。第三章では、プラスチックサイクルに関する技術調査を中心とした公開情報調査として、世界の研究者の関連する論文について書誌情報分析を行い、どのような研究分野が存在するか、研究分野ごとの特徴は何か、萌芽的な研究トピックは何か、プラスチックサイクルを推進するために必要な課題は何かについて分析とレビューを行い、考察を実施している。プラスチックサイクルに関連する 35,519 本の研究について分析を行っ

た結果、プラスチックの生分解性、バイオプラスチック、ライフサイクル・アセスメント（life cycle assessment : LCA）、電気・電子製品廃棄物（electrical and electronic equipment waste : WEEE）、プラスチック再生素材の建設分野での利用に関する研究が、近年、特に 2016 年以降急速に増加していることが判明している。中でもプラスチックの生分解性は平均出版年数が 2018 年と最も若く、萌芽的な研究トピックである。プラスチックリサイクルの多くの研究分野では先進国が論文数でリーダーとなっているが、プラスチック再生素材の建設分野での利用に関する研究については、発展途上国や新興国（以下、「発展途上国等」という。）で熱心に行われていることが判明したことは重要な発見である。プラスチックのリサイクルを廃棄物が発生した国で完結させるのか（発生国消費原則）、発展途上国等などの他国に廃棄物を輸出してグローバルなリサイクルシステムを構築するのか（国際分業原則）について議論を行っている。

第四章では、前二章の結果を踏まえ、我が国においてプラスチックリサイクル問題のシステム転換を推進するために必要となる以下の論点を抽出し、人づての人づてで有識者を探してインタビューによる非公開情報の収集という CI 的な情報収集を行った上で、製品、技術、顧客、市場、サプライヤー（供給）、環境問題、競合関係、政府・規制、政治などの CI の幅広いスコープの観点から、論点毎に課題と方策を議論している。

- （論点 1）我が国はプラスチック廃棄物の処理にあたって、発生国消費原則と国際分業原則のどちらを追求すべきか。それぞれを推進する場合の課題と方策は何か。
- （論点 2）プラスチックの適正処理の観点から、生分解性プラスチックとバイオマスプラスチックの意義は何か。また、これらの普及を進めるための課題と方策は何か。
- （論点 3）我が国においても、プラスチック再生素材の建設分野での利用を進めるための課題と方策は何か。

図 1-2 : 博士論文の構成



第二章：日本企業におけるコンペティティブ・インテリジェンスについてのケーススタディ研究 (コンペティティブ・インテリジェンスの成功要因分析)

要旨

研究目的： 第二章の研究では、コンペティティブ・インテリジェンス（competitive intelligence :CI）のプロセス、スコープ、組織構造などについて探求する。これらの側面は専攻研究では十分に議論されておらず、第二章の研究では以下の点を明らかにすることを研究目的としている。

- ① CI のプロセスとしてどのようなタイプが採用されているか。
- ② CI のスコープは、競合企業分析に限定されているか、それともより広範なビジネス環境全般を対象としているか。
- ③ CI のプロセスとスコープは、CI の組織構造によって異なるかどうか。

研究手法： CI 部門を設置して CI を実施する企業と、CI 部門を設置せずアドホックに CI を実施する企業の 2 種類の日本企業にインタビューを行った。様々な組織構造を持つ企業を調査するために、複数のケーススタディを実施した。

分析結果： CI のスコープは、競合企業分析だけでなく、幅広い対象（製品、技術、顧客、市場、サプライヤー（供給）、環境問題、政府・規制、経済、社会、政治など）が含まれていた。CI 部門を設置することは、適切な CI プロセスが行われることを保証しなかった。CI 部門がないからといって、CI の体系的なプロセスや活動が妨げられることはなかった。

学術的貢献： 調査した企業の CI を、CI 部門を設置する「組織的 CI（Organized CI）」と CI 部門を設置せずにアドホックに CI を行う「非組織的 CI（Unorganized CI）」に分類し、両方のメリットとデメリットについて議論した。CI 結果を CI プロセスから吸収能力のプロセスに反映させ、組織が知識吸収するための促進要因を明らかにした。

1. 緒言

コンペティティブ・インテリジェンス（competitive intelligence :CI）は、企業の情報分析力を強化し、競争が激しく、不確実性が増すビジネス環境での正確な意思決定をサポートする重要な機能である。CI に関する包括的なフレームワークは、Bergeron と Hiller によって提唱された [9]。このフレームワークには、用語と定義、CI の進化、CI プロセス、分析手法、CI システム、CI の主要な関係者、CI の組織と実装、CI の倫理、及び CI の教育とトレーニングが含まれている。CI の重要性が高まるにつれて、CI 研究への関心が高まり、CI が産業界で採用されるようになった。CI は、スポーツのパフォーマンス [10]、ヘルスケア [11]、大学 [12,13]、中小企業 [14]、海外直接投資 [15]などの幅広い分野で活用されている。

CI の方法として、特許分析 [16-21]、特許オーバーレイマッピング [22]、ソーシャルメディア分析による企業のポジションマッピング [23,24]、企業の相互リンク分析 [25]等がある。

CI の有効性は、インフォメトリック手法だけでなく、CI のプロセスと組織の構成にも依存する。CI プロセスでは IT ツールが不可欠だが、より正確な意思決定のためには、IT ツールと組み合わせた人によるヒューマンコミュニケーションが必要である [26-28]。CI は、人工知能 (AI) が普及しても有効で価値のある分析手法であり続けるとの指摘がある [29]。CI ツールは、縦と横の人間関係の中でも知識共有をサポートする [30]。さらに、組織の意思決定モデルと CI ツールは、ナレッジワーカーの知性と洞察力を高めるが、CI においては特許などの形式知に加えて暗黙知を収集する必要がある [31]。

CI 部門の組織的位置付けは重要な研究テーマである。研究者は、CI 部門を設立するかどうか、及びそれが他の部門とどのように関係するかを検討してきた。Bergeron 他によると、米国の大企業の 66% が CI 部門を設置して CI 活動を行っている [9]。Calof がカナダの CI 実務者を調査したところ、カナダの企業の 61% が中央集中型の CI 部門を持っていることが分かった [32]。一方、中小企業は、CI 部門なしで CI を実施している [33-35]。Yap 他は、マレーシアの上場企業の半数以上が CI 部門を持っていると報告している [36,37]。彼らはまた、それらの企業が他の企業と比較して、大幅に収益性が高く、より成長していることも指摘している。Jin 他は、CI 専門家のための企業図書館と情報センターの重要性を確認した [38]。Wang 他は、中国における CI と情報収集のアウトソーシングとの関係を研究し、情報収集を外部組織にアウトソーシングすることが CI の有効な方法であると結論付けた [39]。

一方、組織が CI の結果を効果的に利用することを妨げる要因についての研究はほとんどない。Powell 他 は、事業部門が CI 結果を評価することが多く、CI 結果の取り扱いをめぐって事業部門と CI 部門の間で衝突が発生することを確認した [40]。Pirttila は、多国籍企業のケーススタディで、専門の CI 部門が事業部門で行われている実際の作業方法を無視するという有害な傾向を指摘した [41]。これらの疎外要因の分析は、CI 結果を効果的に使用するための方法を検討するために有益である。他の研究では、CI 結果の効果的な使用について指摘している。組織文化は CI に有意なプラスの効果を及ぼし [42]、環境および組織の特性は CI の取り組みと活用に影響を与える [43]。さらに、ナレッジマネジメントと CI 結果の相乗効果は、効果的な意思決定において重要である [44,45]。

2. 先行研究調査

CI の定義は、研究者によって異なっており [46]、組織で使用される CI プロセスとその有効性は不明なままである。多くの企業は、CI とは何かを認識せずに CI を実施している [47]。典型的な CI プロセスは、①調査分析のテーマ設定（リクワイヤメントと呼ばれる）、②作業計画（作業仮説の設定）、③情報収集、④分析、⑤報告から構成されるサイクルであるが [2]、プロセスにおいて他の構成要素を入れている報告もある [48-51]。Bernhardt によると、CI プロセスにおいてヒューマン・インテリジェンスによって収集された非公開情報は CI 結果に不可欠であり、公開情報は CI プロセスで収集・使用される全ての情報のせいぜい 80%しかない [1]。ヒューマン・インテリジェンスとは、人的ネットワークによる活動（面識のない人との意見交換、知人への質問、非公式のインタビューなど）による非公開情報の収集である。

リクワイヤメントの発出は、CI プロセスの開始のトリガーである。CI のクライアントは、多くの場合、主要な意思決定者であり、明確で具体的なリクワイヤメントを CI 部門に提示する必要がある。但し、これは常に行われるとは限りらないので、CI 担当者は、意思決定者の CI のニーズについて深く理解している必要がある [52]。さらに、上級管理職は、主要なインテリジェンスのトピックと要件を開発し、レビューする必要がある [2,49]。

McGonagle 他は、CI サイクル、主要なインテリジェンス・トピックやインテリジェンスの質問に対する理解が不十分であると、CI の失敗を引き起こすことが多いことを示した [53]。Tsitoura 他は、CI プロセスの最初のフェーズでの詳細なリクワイヤメントの欠如が、CI の失敗につながる主要な要因であると結論付けた [54]。これらの不明確なリクワイヤメントは、経営陣と CI 部門間のコミュニケーションが不十分であったことが原因であった。CI の失敗は、CI 結果を活用する部門と CI 部門との間の不十分なコミュニケーションによっても引き起こされる [55,56]。但し、これらの議論を支持する実証研究はほとんどなく、意思決定者と CI 担当者間のコミュニケーション以外の要因が CI の実行と活用を妨げた可能性があるかもしれない。

CI のスコープについては先行研究において議論が分かれている。Bernhardt は、CI は競合企業分析のためのものであると主張した [1]。Bergeron 他は、CI のスコープには、幅広い分野が含まれると述べている（例えば、競合企業、技術、製品・サービス、環境問題、経済、政府・規制、M&A、顧客、サプライヤー（供給）、市場、パートナー・協力者、社会的・歴史的・政治的環境、組織の内部環境）。Marin 他、及び Bose は、その後の研究で CI のスコープを競合企業分析に限定した [26,57]。Strauss 他によると、CI は、担当者の競争力とスキル開発を改善するための最も重要なツールの一つであり、CI 専門家は競争力のための戦略的優位性を生み出すことができる [51]。Amarouche 他は、競合企業に関する知識を得ることが CI の基本原則であると指摘した [58]。

Sewdass 他によると、CI の最も重要なスコープは、政府の規制の動向を把握することである [59]。最近の幾つかの研究では、イノベーションが CI の重要なスコープであることが報告されている [60-63]。一方、Poblano-Ojinaga は、CI とイノベーションの関係は間接的であると指摘した [64]。競争力は、競合企業だけでなく、他の要因にも依存する。しかし、それを裏付ける証拠はほとんどない。Yap 他は、マレーシアの企業が CI のスコープとして技術と経済を重視していると報告している [65]。Bao は、顧客とサプライヤーについての CI の重要性を指摘した [66]。これらのことから、企業における CI のスコープがどこまでを対象としているかについて調査することは価値がある。

CI のプロセスとスコープを明確にすることは、CI を効果的に活用し、最善の意思決定を行うために不可欠である。これらを踏まえ、第二章での研究は、CI のプロセスとスコープに焦点を当てている。第二章の研究のリサーチクエスションは以下の 2 点である。

- 1) 企業はどのようなタイプの CI プロセスを実行しているか。
- 2) CI のスコープは競合企業分析に限定されているか、それともより広いビジネス環境を対象にしているか。

小久保 (1992, 1993) は日本企業の CI をレビューしたが [67,68]、詳細は報告されておらず、不明のままである。

また、CI の有効性とそれを妨げる可能性のある要因についても考察する。組織における CI 部門の有無による違いについても議論する。CI を実行する上では、組織化された CI と組織化されていない CI の 2 つの方法がある。組織化された CI とは、企業が他の事業部門から独立して CI を実行する常設の CI 部門を設立し、自らの行為が CI であると認識して活動することである。組織化されていない CI とは、企業が必要に応じてビジネス部門の専門家を含むタスクフォースをアドホックに編成して、常設の CI 部門なしで CI 的な活動を実行する、ないしは自らの行為は CI ではないと認識して活動することである。組織内で CI を効果的に活用するための要因についても議論する。

第二章の研究では、上位概念の理論として、March による組織学習における探索・活用理論 [69] を採用する。探索とは、CI プロセスにおける情報の検索とインテリジェンスの作成である。意思決定プロセスにおいて CI の結果を利用することは活用である。第二章の研究では、CI のスコープについての理論は Begeron 他による研究に基づいている。彼らは CI のスコープが幅広いビジネス環境を対象としていると主張している [9]。CI プロセスに関する理論は、Bernhardt と Herrings による研究に基づいている [1,2]。Bernhardt はヒューマン・インテリジェンスの重要性を強調し、Herrings は意思決定者からの具体的かつ詳細なリクワイアメントの重要性を強調している。

3. 研究手法

第二章においては、Yin によるマルチケーススタディの方法論 [70] を使用して、様々な組織構造を持つ日本企業を調査した。Glaser と Strauss による研究成果があるものの [71]、ここでは Yin の方法論に基づいて、二つの作業仮説を設定した。最初の作業仮説は、CI のプロセスとスコープは、調査分析 (survey and analysis : SA) のプロセスとスコープとは異なるというものである。SA は、CI 部門を設置せず、CI 活動を行っていない企業による情報収集と分析に関する活動である。二番目の作業仮説は、CI のスコープには、競合企業分析だけでなく、幅広いビジネス環境要因が含まれるというものである。

調査対象企業は次の二つのグループに分類される。

(グループ I) CI 部門を設置して CI 活動を行う企業。

(グループ II) CI 部門を設置せず、CI 活動を行っていないが、SA 活動を精力的に行っている企業。

表 2-1 に示すように、グループ I は 4 社、グループ II は 2 社で構成されている。インタビュー対象の選定方法について説明する。グループ I の CI を実施している企業は、CI に関する日本で唯一の学術的コミュニティである日本 CI 学会にインタビュー候補の選定を依頼したところ、A～D の 4 社しか見つからなかったとの回答となったため、これら 4 社をインタビュー対象とした。グループ II の SA を実施している企業については、調査開始時点での時価総額上位 20 社の中から各業界で最も収益性の高い企業を第一次選抜として選んだ。その上で調査分析能力の観点から、分析力が高い企業として E 社を選定した。また、調査分析部門を経営陣の肝いりで立ち上げた F 社を調査分析に会社をあげて力を入れている企業として選定した。意思決定構造は、企業によってトップダウン型やボトムアップ型と異なっている。調査結果と議論を有意義なものとするために、グループ I と II の企業に加えて、補足的な調査として G 社、H 社、及び I 社の 3 社のインタビューを行った。日本の業界のリーダーである医療機器メーカーの G 社は、通常

は CI を行っていないが、例外的にある案件で CI を経験した。G 社の海外売上高比率は 50%である。外資系の H 社と I 社にインタビューを行い、日本と海外の CI 導入を比較した。H 社は日米企業での CI 導入実績に精通した米国系のコンサルティング会社である。I 社は日欧企業の CI 導入実績に精通したフランスの CI エージェンシー（CI 受託機関）である。G 社、H 社、および I 社の情報は、表 2-1 の「その他」の欄に掲載している。

表 2-1：インタビュー対象企業の概要

会社	業種	海外売上高 比率	インタビュー対象者	インタビュー 時間	インタビュ ー人数	インタビューの 日付
グループ I（CI 部門を設置して CI を実施している日本の大手企業）						
A	製薬	70%	CI 部門長	3 時間	1 人	2015 年 2 月
B	製薬	60%	CI 部門長	2 時間	1 人	2015 年 2 月
C	海運	70%	CI 部門長	2 時間	1 人	2015 年 3 月
D	ビジネスホテル	低い	CI 部門長	2 時間	1 人	2015 年 2 月
グループ II（CI を実施していないが SA を実施している日本の大手企業）						
E	機械製造	70%	調査分析部門長	2 時間	1 人	2015 年 6 月
F	電気機器製造	70%	研究企画部門長	1.5 時間	1 人	2015 年 5 月
その他						
G	医療器械製造	50%	調査分析部長	2 時間	1 人	2015 年 5 月
H	コンサルティング	不明	シニア・パートナー	2 時間	1 人	2015 年 6 月
I	CI エージェンシー	不明	シニア・コンサルタント	4 時間	1 人	2016 年 6 月

インタビューでは、CI のプロセスとスコープについて以下の観点から調査した。

1. プロセス：以下の 3 点が行われているかどうか。

①意思決定者からのリクワイヤメントが具体的であること。

②Bergeron 他によって提唱されている体系的な CI プロセスが採用されていること。

CI ニーズの計画/特定、データ収集、整理/分析、普及 [9]。

③非公開情報がヒューマン・インテリジェンスによって収集されていること [1]。

2. スコープ: CI のスコープの範囲は何か。競合企業分析に限定されているか。Bernhardt、Marin 他、Bose、及び Amarouche 他は、CI のスコープが競合企業分析に限定されると指摘しているが [1,26,57,58]、Bergeron 他は、広くビジネス環境全般を対象としていると指摘している [9]。

主な質問事項は以下の通りである。

- ・意思決定者（つまり、CI 又は SA クライアント）からのリクワイヤメントは具体的で明確か？
- ・CI 又は SA の結果を有益なものとするためには、具体的なリクワイヤメントが重要であると認識しているか？
- ・体系的な CI 又は SA のプロセスが採用されているか？
- 非公開情報がヒューマン・インテリジェンスによって収集されているか？
- ・効果的な CI 又は SA 結果とするためには、ヒューマン・インテリジェンスが不可欠か？
- ・貴社の CI 又は SA のスコープは何か？
- ・貴社の意思決定メカニズムはどのようなものか？
- ・CI 又は SA の結果が意思決定に有効に活用される条件は何か？
- ・CI 又は SA の結果を効果的に活用する上での阻害要因は何か？
- ・CI 又は SA の結果は貴社で有効に活用されているか？

第二章の方法論は、インタビューに基づく定性調査になっている。グループ I と II のインタビュー対象者は、それぞれ社内で CI と SA を行っている。調査は 2015 年から 2016 年にかけて実施され、インタビュー時間は 1.5 時間から 4 時間の範囲であった。インタビューは、現地訪問の形で実施された。インタビュー対象者は全員が CI または SA に従事しており、インタビュー対象者は 1 社につき 1 人であった。インタビューでは、会社の意思決定プロセスなど、幅広いトピックが取り上げられた。そのため、一部のインタビュー結果は、会社の公式見解ではなく、インタビュー対象者の経験に基づく個人的な意見とみなされる。一方で、CI 又は SA 活動は通常、各企業にとって重要性和秘匿性が高いものであるため、企業内での CI 又は SA を学術研究の対象とすることは通常は困難であり、本研究は CI 又は SA 担当者の視点から CI 又は SA 活動を調査分析したものとして希少性が高いと考えられる。各インタビュー対象者は CI または SA のいずれかで豊富な経験を持ち、それぞれの部門の責任者であるため、インタビュー対象者の回答は有益なものであると考えられる。インタビューにあたっては、インタビュー対象者が自由に語り、著者が新たな論点を発見できるよう半構造化した質問事項を用意した。その結果、インタビュー間の厳密な比較が常に可能というわけではない。インタビューの内容は録音し、その後手作業により逐語的な議事録を作成した。インタビュー前に設定した研究上のキーワードである「プロセス」、「スコープ」、「リクワイヤメント」、「ヒューマンインテリジェンス」などに基づき発言内容を整理するとともに、「倫理」、「CI 又は SA 部門の位置づけ」、「意思決定メカニズム」などの発言内容から新たに CI における重要な論点として抽出したキーワードを基に比較分析を行った。これらのキーワードに沿って逐語的な議事録から論点毎に整理した議事メモを作成した。分析の妥当性を確保するために、分析結果と議事メモをディスカッション・ペーパーにまとめ、インタビュー対象者に内容の確認を求めた。

4. 結果

前述のとおり、CI を実施する日本企業 4 社（グループ I）と SA を実施する日本企業 2 社（グループ II）を調査した。両方のグループで採用されているプロセスとスコープを比較した。セクション 4.1 でプロセスを比較し、セクション 4.2 でスコープを比較する。

4.1. CI プロセスと SA プロセスの比較

表 2-2 に、各企業の CI プロセスと SA プロセスを示す。プロセスは、①リクワイヤメントが具体的であること、②体系的なプロセスが採用されていること、③ヒューマン・インテリジェンスによって非公開情報が収集されていることの三つの要件が各企業で満たされているかどうかで評価した。例えば、リクワイヤメントが具体的であれば「○」、具体的でない場合は「×」と表記している。

表 2-2：CI プロセスと SA プロセスの比較

	グループ I (CI 実施企業)				グループ II (SA 実施企業)	
	A	B	C	D	E	F
会社 プロセス要件						
① 具体的なリクワイヤメント	○	×	○	×	○	○
② 体系的なプロセス	○	○	○	○	○	○
③ ヒューマン・インテリジェンス	○	○	×	○	○	○

製薬会社 A では、会社のオーナー経営者から具体的なリクワイヤメントが出されていた。これにより、計画、データ収集、分析、報告のプロセスが体系的に実行されていた。さらに、ヒューマン・インテリジェンスが積極的に実行されていた。例えば、製品開発に欠かせない未知の技術を探すため、知人の知人の知人をたどって専門家を探してヒアリングするという長いプロセスを経て情報収集を行っていた。三つの要件全てが A 社で行われていた。

製薬会社 B は最近 CI を開始したばかりであり、意思決定者からのリクワイヤメントは必ずしも常に具体的というわけではなかった。CI の国際学会である SCIP（Strategic and Competitive Intelligence Professionals）の方法論に従って、体系的な CI プロセスが採用されていた。同社は、ヒューマン・インテリジェンスを通じて非公開情報を収集することに熱心であった。CI 部門の責任者によると、「製薬業界は狭い世界であり、この業界では転職が多いため、ヒューマン・インテリジェンスが盛んに行われている。その結果、重要な情報が個人的なネットワークで非公式に取得されることが良くある。」と指摘している。B 社は国際カンファレンスを積極的に開催し、人脈を広げていた。同社では①の要件は必ずしも満たしていないが、②と③は積極的に行われていた。

海運会社 C は、事業部門のトップや会社幹部からのリクワイヤメントを具体化した上で、計画、データ収集、分析、伝達などの体系的な CI プロセスを計画的かつ意識的に実行していた。同社はヒューマン・インテリジェンスによる非公開情報の収集をほとんど行っていなかった。CI の結果は、ビジネス部門からの新しい提案とともに意思決定者に報告されていた。C 社では①と②のプロセスは実行されていたが、③の要件を満足していなかった。

ビジネスホテルチェーンの D 社の経営陣は、新しいホテル物件の候補が見つかるとその収益性を予測するリクワイヤメントを出し、CI プロセスを命じているが、常にリクワイヤメントが発出されるわけではなかった。CI 部門は、個々のケースに応じてリクワイヤメントを具現化し、計画、データ収集、分析、および配布プロセスを体系的に実施していた。ヒューマン・インテリジェンスによる非公開情報の収集が積極的に実行されていた。例えば、リネンなどのサプライヤー企業からの競合企業の動向のヒアリング、転職者への質問、バス停や電車内でのビジネスマンとの雑談などを活用して、ユーザーニーズ、競合ホテルのコスト、および新規物件の収益性を分析していた。新しいプロジェクトの提案とともに CI 結果は必ず取締役会に報告されていた。従ってプロセス②と③は実行されていたが、プロセス①は完全には実行されていなかった。

また、グループ II の企業の SA プロセスも調査した。機械メーカーの E 社は CI を実施していない。インタビュー対象者によると、CI は同社の企業文化に合わないため、CI を導入することはないとしている。但し、会社の経営陣は、CI のリクワイヤメントに相当する具体的な調査指示を出していた。E 社は調査対象企業の中で、膨大な情報をグローバルに体系的に収集・分析できる最大の SA 部門を持っていた。海外の渉外部門が集めて来る政府関係の公式・非公式な情報は断片的であることが多く、解釈が難しい。SA 部門は、作業仮説を作り、断片化された情報を組み合わせ、更に情報を集めて分析することにより、情報の意味すること（例えば、新しい規制の兆候）を推測していた。ヒューマン・インテリジェンスに相当する人的ネットワークによる非公開情報の収集も積極的に行い、定性・定量情報による分析を行っていた。得られた結果は経営陣に報告されていた。E 社は 3 つのプロセス要件の全てを実行していた。

電気機器メーカー F 社は、CI を行っておらず、CI の概念を認識していなかった。著者がインタビュー対象者に CI について説明すると、インタビュー対象者は F 社で同様の活動が行われていると述べた。同社には CI の概念に関する知識がなく、専門の CI 部門は存在していなかった。しかし、経営陣が重大なリスクやオポチュニティを予感した場合には、SA の具体的な指示が出されていた。これらの調査指示はリクワイヤメントに相当する具体性と明確性を持っていた。調査指示は、所属する部門に関係なく、経営陣が最も信頼する人物達に与えられていた。指示を受けた後は、人的ネットワークを介した非公開の情報収集を含む、綿密で包括的な SA が体系的に実施された。インタビュー対象者は、F 社での活動が CI に該当すると指摘した。F 社は三つのプロセス要件の全てを満足していた。

4.2. CI のスコープと SA のスコープの比較

表 2-3 に、各企業の CI と SA のスコープの範囲を示す。スコープは Bergeron 他⁹⁾の定義 [9]に従って、①競合企業（競合関係）から③の内部環境まで、13 の分野に分類し、各企業のスコープが何を対象としているのか調査を行った。例えば、インタビュー対象者がスコープとして技術が対象となっていると

言う場合、技術の欄に「○」が記載してある。空白は、そのフィールドにスコープがないことを意味する。まず、グループ I の企業の CI スコープについて記述する。

製薬会社 A の CI は全ての領域をカバーしていた。A 社の意思決定はトップダウン型である。トップマネジメントがリクワイアメントを発出すれば、全ての範囲が CI のスコープとなる。例えば、製造装置メーカーとのやり取りで得られた情報から、未知の競合他社の存在を推定した。軍隊と警察は、同社の CI スコープの対象である。同社の医薬品は軍事用途に使用されることが多く、同社は CI 活動として、顧客である海外の軍隊や警察の動きを常に監視していた。ある時、某国の軍隊に販売された製品の量が異常な水準となったため、現地の政治・軍事情報をヒューマン・インテリジェンスも駆使して収集し、近く紛争が発生する可能性が高いとの CI 結果を得た。CI 結果を基に、A 社は当該国での子会社の設立を延期した。その後、CI 結果の通り、某国は隣国との戦争状態に突入し、国内の安全が脅かされる事態となった。A 社は駐在予定者の安全を確保し、不必要な投資経費を避けることができた。

表 2-3 : CI のスコープと SA のスコープの比較

会社 スコープ	グループ I (CI 実施企業)				グループ II (SA 実施企業)	
	A	B	C	D	E	F
① 競合企業（競合関係）	○	○		○	○	○
② 製品・サービス	○	○		○	○	○
③ 技術	○	○	○			○
④ 顧客	○	○	○	○	○	○
⑤ 市場	○	○	○	○	○	○
⑥ サプライヤー（供給）	○			○		○
⑦ パートナー・協力企業	○			○		○
⑧ 経済	○	○	○	○	○	
⑨ 社会・歴史・政治	○	○	○		○	○
⑩ 政府・規制	○	○			○	○
⑪ 環境問題	○		○		○	○
⑫ M&A	○	○		○		○
⑬ 組織内環境	○					

製薬会社 B は、A 社と同じ業界に属していたが、その CI スコープは狭かった。B 社は組織管理的な雰囲気強く、CI 部門の業務範囲は組織によって事前に決められていた。同社は新興市場での需要開拓に注力していたが、新興国の医療保険制度の持続性と展望について CI を実施していた。例えば経済成長が著しい国であっても、健康保険制度が健全であるとの CI 結果が得られなければ、同社はその国に進出しなかった。

海運会社の C は、調査対象企業の中で CI のスコープが最も狭かった。これは、同社の CI の主な目的が事業部門の提案を評価し、事業部門の勝手な動きをけん制することであり、他の多くの企業とは異なり、競合他社の分析をカバーしていなかったためであると考えられる。世界の海運業界には競合企業が無数にあり、あまたの競合他社の状況を理解することよりも、貨物の出荷国、輸出先国や経由国の政治、経済、市場、需要に影響を及ぼす技術の将来を予測することの方が重要でであると同社では認識していた。例えば、同社は CI を利用して、中国の資源財の輸入拡大（「爆食」）がどのくらい続くかを予測していた。

ビジネスホテルチェーン会社 D の CI スコープは、他の多くの企業がスコープしている技術や規制をカバーしていなかった。同社の事業では、技術の進歩が遅く、政府の規制の影響を受けにくいホテルの建設・運営であったためと考えられる。同社にとっては新規ホテルの建設予定地として、利便性の高い駅近の空き地の取得が非常に重要である。しかし、このような空き地には暴力団が関与していることが多いため、同社では CI を活用してこの問題を事前に解決していた。暴力団の関与のない便利な空き地の探索は、表 4-3 のスコープ「⑤市場」とみなされた。

グループ I の企業は様々な CI スコープを対象としており、これらの企業間でスコープに類似点は見つからなかった。グループ II の企業のスコープは次の通りである。機械メーカー E の SA 部門は、それぞれ 15 人からなる 四つのチームで構成されていた。各チームは、①競合分析、②顧客、③需給予測、④経済というように優先すべき調査範囲（スコープ）を割り当てられていた。SA 部門のスコープは、組織内で事前に決定されていた。他のほとんどの企業で対象となっていた技術のスコープは、E 社の範囲には含まれていなかった。例えば、進出先国の今後 5～10 年間の需給予測などは、SA として実行されていた。

電気機器メーカーの F は、SA のリクワイアメントがトップダウン型で決定されるため、幅広いスコープとなっていた。今までの経験上、SA のスコープから経済および組織的な問題を除外していたが、経営陣が望む場合はこれらを含めることができると指摘していた。例えば、空調機器に使う冷媒の規制動向の予測や、今後の規制で許容される可能性の高い代替冷媒の探索と評価をスコープとして SA を実施していた。

4.3. 結果の要約

表 2-2 に示めされるように、二つのグループのプロセスに大きな違いは見られなかった。グループ II の 2 社は三つのプロセスの全てを実行したため、グループ II はグループ I よりも多くの条件を満たした。表 2-3 に示されるように、二つのグループは CI と SA のスコープが類似していた。二つのグループのスコープに大きな相違がないとする理由として、①どちらのスコープも競合分析に限らず、13 種類のスコープを幅広く対象としていること、②13 種類のスコープのうち何割をカバーしているか各社毎に割合を求めると、CI を行う

ている4社の平均カバー率が69.2%、SAを行っている2社の平均カバー率も69.2%と同程度であること、③カバーしているスコープの種類のばらつき度合いについてCIとSAで有意な差が見られなかった、ことがあげられる。グループIIの二つの企業のスコープに類似性は見られなかった。一方、A社とF社のスコープは類似していた。これは、トップダウン型の指示によりCI又はSAのスコープが決められていることが原因であると考えられる。また、B社とE社もスコープが類似していたが、これは両社とも組織的管理色彩が強く、CI又はSA部門のミッションがあらかじめ組織内で決められているためであると考えられる。

グループIもグループIIもスコープに共通点となる特徴はなかった。一部の企業は、グループに関係なく類似していた。企業のスコープに影響を与える主な要因として次の3つが考えられる。

- ①業界の特徴。例えば、規制や技術進歩のスピードは企業経営に大きな影響を与える。
- ②意思決定のタイプ。トップダウン型の企業はより広いスコープを持っていたが、組織管理的色彩の強いボトムアップ型の企業のスコープはより狭い傾向があった。
- ③後述する組織的CIと非組織化CI。CI又はSA部門が組織化されていないCI企業は、より広いスコープを持つことができた。

要約すると、CIとSAの間にプロセスとスコープについての相違はなかった。このため、SAを実施している企業は、CI類似の活動を行っていると考えられる。SA企業のうち、E社は自らの行為がCIではないと主張している。F社は常設のCI類似部門はないが、経営陣からの調査分析指示があれば、CI部門に匹敵するようなタスクフォースを立ち上げてCI類似の活動を行っている。これ以降の議論においては、グループIの企業を組織的CIと呼び、グループIIの企業は非組織的CIと呼ぶべきものであるとみなして議論を行う。

5. 考察

調査にあたって、二つの作業仮説を設定していた。作業仮説(1)は、CIのプロセスとスコープがSAのプロセスとスコープとは異なるというものである。調査結果は、作業仮説(1)が正しくないことを示している。Dinuが指摘するように[47]、企業は自分たちの活動がCIであることを認識せずにCIを実行している。また、プロセスにおいては、効果的なCI結果を得るためには非公開情報の収集が重要であることが示された。

作業仮説(2)は、CIのスコープには、競合企業分析だけでなく、幅広い対象が含まれるというものである。調査結果は、作業仮説が(2)正しいことを示した。多くの研究では、CIのスコープが競合企業分析に限定されていると報告している[1,26,51,57,58]。しかし、この調査では、調査対象の6社全てが、競合企業分析に加えて、様々な範囲(製品、技術、顧客、市場、サプライヤー(供給)、環境問題、政府・規制、経済、社会、政治など)にCIを適用していることが明らかとなった。従って、CIのスコープはもはや競合企業分析に限定されない。作業仮説(2)は正しいことが判明した。

E社とF社はどちらも非常に競争力があり、グローバルに活動している。コンサルティング会社Hによると、競争力が高い多くの日本企業はCIを意識せずに優れたCI的な活動を行っている。これは、経営トップの強力なリーダーシップを持つ日本企業にも当てはまる。

今回の調査では、E 社や F 社のように自社の活動を CI として認識しているかどうかは重要ではないことが分かった。前述した様に、CI を実施する上では、組織化された CI と組織化されていない CI の二つの方法がある。どちらを適用するかが重要である。両方のメリット・デメリットについて議論する。

企業にはビジネスに直結する多くの部門がある（ビジネス、商品企画、営業、販売、研究開発など）。以下では、これらを「事業部」という。今回の研究の前提では、CI プロセスとは意思決定者と CI 担当者の間のコミュニケーションに基づくものである。しかし、例えば、C 社は CI プロセスに事業部門を含めていた。また、CI 結果を有効活用することは、事業部門の運用と能力に大きく依存していた。調査対象の企業では、事業部門が意思決定プロセスに大きな影響を与えていた。Powell 他は、CI 結果に利害関係のある事業部門が CI の結果を評価することが多く、これらの結果の処理をめぐる対立が生じることを指摘している [40]。第二章では、CI の結果が事業部門に拒否された事例を分析している。CI 結果の有効活用方法を考察するために、吸収能力（absorptive capacity: AC）の概念を適用し、CI 結果への事業部門による拒否反応が起きた事例などをもとに、議論を行う。

5.1. 組織的 CI と非組織的 CI

5.1.1. 組織的 CI のメリット

組織的 CI のメリットには次のものがある。

- ① CI 部門の事業部門からの独立性
- ② CI 部門の能力向上
- ③ 倫理規定の徹底

CI の機能の一つは、事業部門からの提案の採算性や成功確率を独立的な立場で検証することである。例えば、D 社では、CI 部門が事業部門から提案された新規ホテル建設プロジェクトの収益性を独自に分析し、その結果を事業部門からの提案とともに取締役会に報告していた。このように、独立した CI 部門にはチェック・アンド・バランス機能がある。

CI 部門を設置するためには、CI に対する組織的なコミットメントが必要である。組織的 CI では、CI 部門にヒト・モノ・カネを割り当てることができ、CI 部門の能力を向上させることができる。E 社の事例などから分析すると、CI への組織的なコミットメントが、CI 部門の担当者の積極性を引き出し、担当者による自発的な CI 技術・ノウハウの学習に向けた動機付けの効果があることが示唆される。ヒューマン・インテリジェンスは CI プロセスで重要な役割を果たすが [1]、それは難しい作業である。CI の担当者は、外部コミュニティへの関与など継続的な努力を通じて強力な人的ネットワークを確立し、維持する必要がある。B 社は人的ネットワークの構築に多大な努力を払っている。面識のない人にアクセスして情報を引き出す技術も必要になる。非公開情報を扱う場合、公開情報との比較による検証・評価が重要になる。また、CI 担当者は断片的な情報と定性的な情報をつなぎ合わせて作業仮説を立てなければならないため、情報分析の高度な専門知識も必要である。これらの CI 技能の取得・向上にとって CI への組織的コミットメントが重要な役割を果たす。

CI においては、ヒューマン・インテリジェンスは合法的でかつ倫理的な方法で実行されることが大前提である。非倫理的な CI 活動は、満足のいく結果が得られたとしても、容認できない企業行動である。組織

化された CI により、CI 部門への倫理規定の徹底が容易になる。B 社はヒューマン・インテリジェンスを積極的に活用しているが、CI 部門において倫理に関する行動規則の適用が徹底化され、情報の倫理的な収集が確保されている。

5.1.2. 組織的 CI のデメリット

組織的 CI のデメリットとして次のようなものがある。

- ①CI という名称の怪しげなイメージ
- ②経営陣およびコーポレート部門からのバイアスの可能性
- ③事業部門の持つ専門性（業務知識、価値観、制約要因）の不足

倫理的な情報収集は CI の大前提であるが、諜報機関のノウハウがビジネスに適用されたという経緯があるため、CI への懐疑的な見方は避けられない。スパイ活動を連想させる「インテリジェンス」という言葉は、評判が悪く、怪しげなイメージを与える。CI 部門を設置することは、企業にとって外部へのマイナスのイメージを与える可能性がある。グループ I においては、CI 部門の名称として CI という用語を使用した企業はなかった。A 社は経営推進部、B 社は市場調査部、C 社は調査部、D 社は顧客満足推進部という組織名であった。E 社が事実上、優れた CI 活動を行っているにもかかわらず、インタビュー対象者が同社は CI 活動を行うことはないと言明した理由は、CI という名称が同社の企業イメージを損なうためではないかと考えられる。

組織的 CI では、CI 部門は経営陣やコーポレート部門（経営企画部門など）から独立していない。例えば、経営陣が CI のリクワイアメントに関連して既にアイデアやイメージを持っている場合、CI 部門が経営陣の意向に忖度しながら CI を実行するケースが考えられる。このため、組織的 CI は、経営陣やコーポレート部門からのバイアスを受ける傾向がある。C 社ではコーポレート部門に CI 部門が設置されていたが、経営陣やコーポレート部門からのバイアスを避けるため、事業部門と頻繁にコミュニケーションを取り、信頼関係の構築に努めていた。

結果の章で述べたように、CI のスコープは広範である。その結果、CI 部門は広いスコープをカバーするのに十分な専門知識を欠き、浅い分析結果につながる可能性がある。Pirttila 他によると、CI 部門は事業部門における専門知識や仕事の進め方を無視する傾向がある [41]。A 社の CI 部門の責任者は、CI の経験が 15 年以上あり、社内ネットワークが広く、各事業部門に関する知識を持っていた。このような広範な専門知識により、A 社はこれらのデメリットを克服している。

5.1.3. 非組織的 CI のメリット

組織的 CI のデメリットが、非組織的 CI のメリットになる。CI 部門がないため、企業イメージに問題はない。経営陣やコーポレート部門が CI の結果にバイアス进行ける可能性は低くなる。非組織的 CI は、必要な部門から優秀な人材を柔軟に動員し、十分な専門知識を備えたタスクフォースを編成することもできる。特に、経営陣の強力なリーダーシップは、F 社の場合のように優れた CI タスクフォースを結成することにつながる。非組織的 CI は、トップダウン型意思決定プロセスから大きな恩恵を受ける。F 社は、

非組織的 CI は、CI を企業の重要な意思決定（例えば M&A）のみに使用する企業にとって効率的であるとしている。

CI は企業の意思決定プロセスに深く関与しているため、CI 担当者は多くの企業秘密を知ることになる。また、CI で得た知識や企業秘密を形式知に変換（外部化）し、CI 部門の専門知識に変換できる。形式地化は、組織的 CI の長所でもあり短所でもある。CI 結果の過剰な形式知化と知識共有は企業秘密の流出につながる可能性があるため、ナレッジマネジメントと CI の間にはトレードオフがある [72]。CI 担当者が競合企業に流出すると、企業秘密が漏洩するリスクが高くなる。F 社が指摘しているように、企業秘密を保護する最善の方法は、一部の限定された人物だけが暗黙知として頭の中で保持し、形式知に変換しないことである。従って、非組織的 CI には企業秘密の保護に優れているというメリットがある。

5.1.4. 非組織的 CI のデメリット

組織的 CI のメリットが、非組織的 CI のデメリットにつながる。独立した CI 部門がないということは、事業部門への検証能力が弱まり、CI 機能が制限され、倫理規定の徹底が不十分になる可能性があることを意味する。

また、タスクフォースが解散された後は、CI の専門知識を高度化できない可能性が高い。CI への組織的コミットメントがなければ、CI 担当者はスキルを磨くことができず、組織は CI に必要な人材を獲得できない可能性がある。その結果、組織の CI 機能が制限される。

CI の結果を効果的に利用するためには、ナレッジマネジメントと CI の統合が重要である [73,74]。非組織的 CI では、ナレッジマネジメントと CI の連携関係を確立することは困難である。

5.1.5. 組織的 CI と非組織的 CI の要約

組織的 CI と非組織的 CI のメリットとデメリットについて議論を行った。組織的 CI のメリットは、CI 部門が事業部門から独立していること、CI 部門の能力が向上しやすいこと、及び倫理規定が徹底されることである。組織的 CI のデメリットは、CI の怪しげなイメージ、経営陣やコーポレート部門からのバイアスの可能性、及び事業部門の専門知識の不足である。非組織的 CI のメリットは、十分な専門知識を持つ優秀な人材を動員できること、企業秘密を保護できることである。非組織的 CI のデメリットは、検証能力の弱体化、CI 機能の制限、倫理面での徹底が十分でないことである。企業が組織的 CI と非組織的 CI のどちらを選択するかは、意思決定プロセスにとって重要である。企業は、両方のアプローチのメリットとデメリットを理解し、組織の文化や戦略に最適な CI 組織構造を選択することで、意思決定能力を向上させることができる。

5.2. CI 結果の有効活用の要因としての吸収能力の重要性

CI エージェンシー I は、日本のクライアント企業の多くが CI の結果を受け入れることに消極的であると主張している。CI の結果に対するクライアントの反応を分析した結果、CI 結果への消極姿勢の原因が NIH 症候群（not-invented-here syndrome）にあると C 社は結論付けた。A 社は、NIH 症候群のせいで、事業部門が提案の作成において不都合な外部知識を無視することがあると指摘している。

NIH 症候群は、安定した構成を持つプロジェクト・グループが、必要な知識を独占的に所有していると信じる傾向にある [75]。Katz と Allen によると、内部のプロジェクト・グループが、部外者からの新しいアイデアがパフォーマンスを損なう可能性が高いと考える場合、その外部知識は拒否される。医療機器メーカー G 社で起きたそのようなケースを分析する。

G 社は 10 年前から新しい医療機器の開発を行っており、その技術は同社の収益にとって非常に有益であると期待されていた。開発の最終段階で、類似の機能を持ち、より高度な技術が欧州で開発されているという未確認の情報を同社は入手した。同社の欧州オフィスは未確認の情報を調査したが、競合する技術が存在するかどうかは明らかにならなかった。このため、同社内では未確認情報を無視して開発を続けるべきであるという意見が支配的であった。

しかし、同社の調査分析部長がフランスの CI エージェンシーである ADIT (Agence pour la diffusion de l'information technologique) に CI による調査を依頼したところ、競合する技術は確かに存在することが判明した。また、競合する技術は G 社の新製品よりも先に上市され、機能的にも G 社よりも優れていた。医療機器市場では、先に発売された技術がより大きな市場シェアを獲得するのが一般的である。つまり、G 社は欧州市場を取れないことを意味していた。競合する技術は欧州市場の次に米国市場に参入すると見込まれた。G 社が新製品を発売しても、日本国内でのシェアしか取れず、開発投資金額を回収できないとの結果であった。ビジネス部門や欧州オフィスは CI の結果を拒否し、研究開発部門は CI の結果を受け入れずに開発を続けることを主張した。G 社は、同社の医療機器技術が世界で最も先進的であるという誇りを強く持っていた。調査分析部長の上司である研究開発部門長は、同社の技術に自信を持っており、開発を継続するつもりであった。CI の結果は、多くの事業部門にとって不都合で不満足なものであるため、社内で激しい拒否反応が起きた。

CI の結果は、医療機器事業ユニットの責任者である上席執行役員に報告された。その役員は最近、別の事業ユニットから医療機器ユニットに異動してきたため、G 社が開発中の医療機器の技術へのこだわりがなく、CI 結果を客観的に評価することができた。最終的に、当該役員は CI の結果を受け入れ、開発は中断されることとなった。

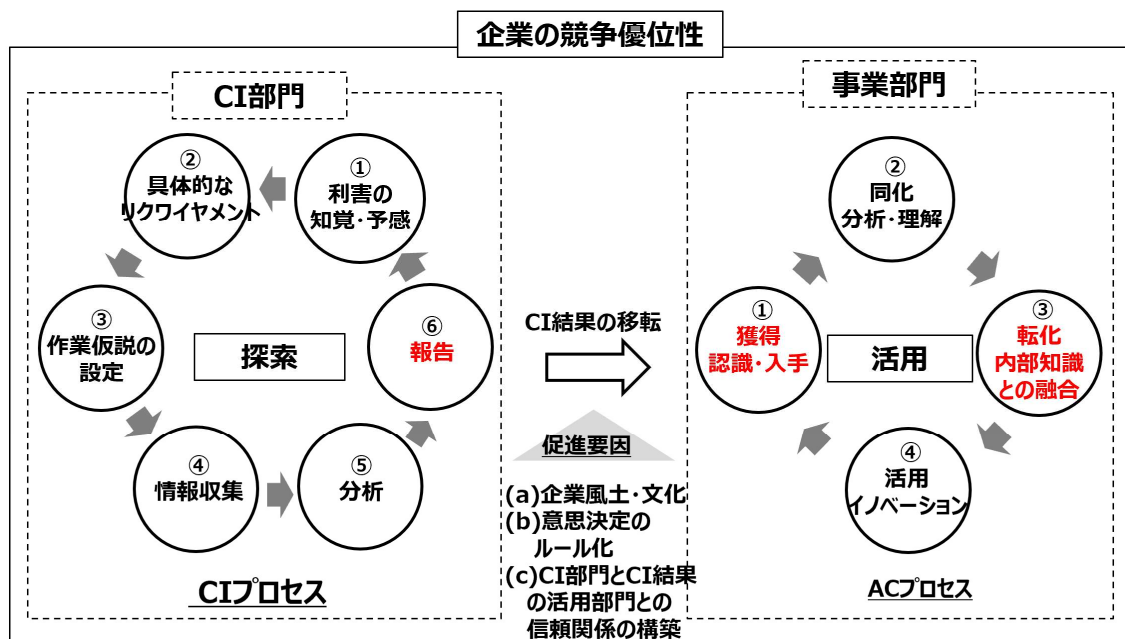
G 社の事例は、CI の結果が関係する事業部門にとって不都合または不利益である場合、CI の結果は拒否される可能性があることを示している。このような拒否反応は、CI 結果の効果的な利用を妨げるものであり、NIH 症候群によるものである可能性がある。G 社の上席執行役員は、別の事業ユニットから異動してきたため、NIH 症候群の影響を受けにくかったと考えられる。

このような問題を克服するために、CI エージェンシー I は、組織の外部知識への吸収力 (AC) の重要性を指摘している。I 社は、日本のクライアント企業における CI の知識の蓄積が低すぎるため、CI の結果を理解し吸収する能力が不足していると述べている。NIH 症候群を克服し、CI の結果を有効に利用するには、AC を高めることが必要であると考えられる。AC はもともと「研究開発分野における外部知識の吸収能力」を意味する概念として、1990 年に Cohen と Levinthal によって提唱されたものであり、吸収力は組織における情報や知識の蓄積の程度に依存するとされている [76]。その後の研究において、AC は研究開発だけでなく、その他の企業活動全般に適用できると報告されている [77-79]。

5.3. CI 結果の知識吸収を促進する要因

イノベーションのパフォーマンスに対する CI の貢献度合いは、AC に依存しているとの報告がある [62]。Heras-Rosas 他は、企業の経営管理の高度化、AC の推進及び CI の活用により、イノベーションを改善できると主張した [63]。これらの先行研究においては、イノベーションの実現のために CI の活用とその結果に対する AC の重要性が言及されてるが、CI のプロセスと AC のプロセスを関連付けた研究は見つかっていない。本章においては、CI のプロセスから AC のプロセスにつなげ、CI 結果の知識吸収を促進する促進要因について議論する。今回の調査事例を基に考察すると、知識吸収を促進する促進要因として、①外部知識の吸収に貪欲な組織文化・風土、②CI 結果の意思決定プロセスでの取扱ルールの明確化、③CI 部門と事業部門等の CI を活用する部門の間の信頼関係の構築、の三つ要件が重要であると考えられる。図 2-1 に、CI プロセスと Zahra 他が提唱した AC プロセス [79]を結びつけ、CI 結果の知識吸収を促進する仕組みを示す。以下では、調査結果に基づく三つの促進要因について議論する。

図 2-1：CI 結果の知識吸収を促進するための全社的な CI プロセス



E 社の事例の分析からは、CI 結果を組織が吸収する上では、①「外部知識の吸収に貪欲な組織の文化や風土」が重要な役割を果たすと考えられる。同社は、数十年にもわたって、何万人もの職員が参加するボランティア勉強会を開催してきた。これらの勉強会では、外部講師による講演、輪読会、グループ単位での研究成果発表などが精力的に行われている。勉強会での多くの優れたアイディアや成果が同社のビジネスに実際に応用されてきている。ボランティア組織の形式をとっているが、この勉強会は経営陣の強力なサポートを受けて運営されている。外部の知識を学び、吸収することの重要性が同社の組織文化のステートメントに明示され、職員は入社以来、組織文化のステートメントを理解するように徹底的に

教育されている。E 社では CI 結果への拒絶反応はほとんど見られず、客観的に評価し受け入れられている。E 社の優れた業績と高い競争力の源泉の一つが、外部知識の吸収に貪欲な組織文化・風土にあると E 社は語っている。

C 社の事例の分析からは、②「CI 結果の意思決定プロセスでの取扱ルールの明確化」、③「CI 部門と事業部門等の CI を活用する部門の間の信頼関係の構築」、の二つの要件が CI 結果の知識吸収に有益であると考察される。C 社はボトムアップ型の意思決定プロセスであるため、意思決定プロセスにおいて CI の結果をどのように取り扱うかについてのルールを決めている。事業部門は CI の結果を無視するのではなく、経営陣に新しい事業提案を行う際には CI 結果を参照・活用することになっている。経営陣は、事業部門と CI 部門との間の頻繁なコミュニケーションと信頼関係の構築を強く求めている。経営陣に事業部門が提案書をプレゼンする前には、経営企画部門が両部門が十分に連携しているかどうかをチェックし、連携が十分でない場合には事業提案を止めることができる。C 社においては、CI 結果の取扱ルールの設定・徹底の仕組みと CI 部門と事業部門との信頼関係構築によって、CI 結果に対する高い AC が実現し、CI 結果が経営陣による的確な意思決定につながっている。

一方、G 社は外部知識に対する積極的な組織風土はなく、CI 結果に関する取扱ルールも存在せず、調査分析部と事業部門との間の信頼関係も十分ではなかった。G 社における事業部門の CI 結果への強い拒否反応は、Zahra 他が提唱した AC プロセスの「転化」プロセスでの外部知識と内部知識の融合を妨げたことになる。図 2-1 に示すように、CI のプロセスと AC のプロセスは、促進要因を通じて有機的に連携することができ、組織内での外部知識と内部知識の融合を通じて「活用」のフェーズに進むことができる。

上記の三つの促進要因は、各インタビュー事例の中での企業における具体的な取組から導出されたものである。例えば、「外部知識の吸収に貪欲な組織風土」については、E 社において、外部講師による勉強会が長年にわたって継続され、その成果が経営陣の判断で実際のビジネスに応用されてきている。また、外部知識の吸収が重要であることを新入社員の頃から教育し、それにコミットすることを求めている。「CI 結果の意思決定プロセスでの取扱ルールの明確化」については、C 社において事業部門の経営陣への新規提案に際して CI 結果を反映するというルールが経営陣により決められている。「CI 部門と事業部門等の CI を活用する部門の間の信頼関係の構築」については、C 社における CI 結果のユーザーである事業部門が CI 結果を無視することを防止するために、CI 部門と事業部門の間で日ごろから頻繁で濃密なコミュニケーションを行うことが経営陣から求められており、経営企画部門はこれらの連携がうまく機能しているかをチェックしている。

図 2-1 は、全社的な CI プロセスにおける CI 部門と CI 活用部門（事業部門）とのあるべき有機的な関係を示し、本章における理論的および社会的貢献の意味を持つ。CI 部門は、CI プロセスに従って、情報とインテリジェンスを収集調査する、つまり「探索」することによって CI を実行する。促進要因により、CI の結果が事業部門に吸収される、つまり「活用」につながる。図 2-1 の全社的な CI プロセスは、インタビューの結果を CI プロセス、AC プロセス、及び探索・活用理論と統合することによって提案されたものである。このような全社的な CI プロセスは、正確な意思決定を実現し、企業の競争力を向上させる。CI

部門における CI プロセスと事業部門における知識吸収の仕組みの連携に関する先行研究は見つかっていない。

なお、上記においては、CI 結果を吸収していることは吸収能力があることであるとみなして議論を行っているが、本研究は限られたインタビュー事例に基づき帰納法的に分析したものであり、吸収能力以外の要因で CI 結果が吸収された可能性もある。この点については、更なる研究が必要である。

6. 結論

コンペティティブ・インテリジェンス（competitive intelligence : CI）のプロセス、CI のスコープの範囲、CI 部門の組織内での位置付け等について、企業活動の実態を調査した。今回の調査では、グループ I（日本企業 4 社）は独立した CI 部門を設置して CI を実施し、グループ II（日本企業 2 社）は CI を実施せず調査分析（survey and analysis : SA）を実施していた。これら全ての企業に対してインタビューを行った。分析結果では、CI と SA はプロセスとスコープの点で大きな違いはないことが示された。このため、本研究ではグループ II の企業も非組織的 CI を実施しているとして扱って考察を行った。

本研究では CI のスコープとプロセスに関して二つの理論的貢献を行った。第一に、先行研究では CI のスコープの範囲について主張が分かれていたが、今回の調査は CI のスコープが競合企業分析にとどまらず、製品、技術、顧客、市場、サプライヤー（供給）、環境問題、政府・規制、経済、社会、政治など幅広くビジネス環境全般を対象としていることを明らかにした。第二に、CI 結果を活用する事業部門への吸収能力（absorptive capacity : AC）による知識吸収メカニズムの重要性を指摘した。先行研究では、意思決定者と CI 部門との関係に焦点を当てていたため、この問題は見過ごされてきた。CI 理論を拡張し、探索・活用理論も適用して、AC プロセスと CI プロセスのそれぞれの役割について議論した。

企業経営に役立つ貢献として、組織的 CI と非組織的 CI を分類し、それぞれのメリット・デメリットを議論した。また、CI プロセスから AC プロセスへの知識吸収を促進する促進要因について提案した。促進要因の詳細については、今後、更なる研究が必要である。

なお、第二章は、以下の学術誌で出版した論文に基づいている。

Tsuchimoto, I.; Kajikawa, Y. Competitive intelligence practices in Japanese companies: multicase studies. *Aslib Journal of Information Management*. **2022**, 74, 631-649, doi:10.1108/ajim-05-2021-0133. 2022/1

付録：インタビュー調査のメモ

表 2-1：インタビュー対象企業の概要（再掲）

会社	業種	海外売上高 比率	インタビュー対象者	インタビュー 時間	インタビュー 人数	インタビューの 日付	ページ
グループ I（CI 部門を設置して CI を実施している日本の大手企業）							
A	製薬	70%	CI 部門長	3 時間	1 人	2015 年 2 月	30
B	製薬	60%	CI 部門長	2 時間	1 人	2015 年 2 月	33
C	海運	70%	CI 部門長	2 時間	1 人	2015 年 3 月	34
D	ビジネスホテル	低い	CI 部門長	2 時間	1 人	2015 年 2 月	37
グループ II（CI を実施していないが SA を実施している日本の大手企業）							
E	機械製造	70%	調査分析部門長	2 時間	1 人	2015 年 6 月	41
F	電気機器製造	70%	研究企画部門長	1.5 時間	1 人	2015 年 5 月	44
その他							
G	医療器械製造	50%	調査分析部長	2 時間	1 人	2015 年 5 月	47
H	コンサルティング	不明	シニア・パートナー	2 時間	1 人	2015 年 6 月	49
I	CI エージェンシー	不明	シニア・コンサルタント	4 時間	1 人	2016 年 6 月	52

【A 社】

（会社概要）

製薬、ヘルスケア関連など幅広い業種を展開する大企業。海外進出も盛ん。
上場企業であるが、オーナー経営者のリーダーシップが極めて強い。

（業界背景）

製薬業界は、ブロックバスターの特許切れに備えて、絶えず大型の研究開発投資や M&A が必要とされる。研究開発費は巨額でハイリスク。スケールメリットを求めて企業の合併・提携も盛ん。競争が厳しい業界。

（CI の目的）

大きな目的は、経営トップの意思決定のためのサポート。

競合環境、社内の新製品開発などに関するリスクの評価、社内の意思決定におけるけん制機能の役割を果たしている。

新製品開発にあたり、研究開発者は自分で研究開発した成果の有効性を疑わない。自分の仮説が正しいと信じている。自分で研究開発した成果への強いこだわりが背景にある。製品化に向けての社内競争が厳しい。研究開発者は、自分で研究開発した成果の弱みが分かっているが、強みを特に強調してトップの了承を得ようとする傾向もある。これを見極める組織が会社内に必要。

マーケット調査部門は、数字を追いかけすぎて数字にごまかされることがある。今売れていても、市場が変わればいずれ負ける。市場がどう変わるのかの将来の予測が重要。トップが事業部門の市場戦略に疑問を感じたら、CI 活動が始まる。

その他の CI の目的は、利益の獲得のための情報収集、研究開発に不可欠な外部技術の探索（CI 部門内でも技術評価について意見が大きく分かれることが多い）、大型受注案件獲得のための情報収集、新規医薬品の承認のための当局情報の収集など。

（CI のスコープ）

経営トップがリクワイアメントを出せば、どのような範囲でも CI のスコープとなる。

（CI 部門の体制、位置づけ）

経営トップ直属の CI 部門がある。部門名に「CI」とは付けていないが、担当者は CI を担っているとの自覚がある。CI 部門のヘッドは CI の経験が長い。スタッフは数名程度。トップからの信頼は厚い。トップからの信頼は CI 部門という組織単位というよりは、誰が担当しているかという個人的な信頼関係に基づく傾向もあり、トップが代替わりすると CI 責任者も代替わりすることがある。

（情報入手方法、CI 事例）

多くは公開情報。但し、ネット検索ではうまく拾えない情報が多い。サプライチェーン前後の取引先の経営動向、業界環境など。人事異動は常時フォロー。

平時は、悪いニュース、客先動向、規制当局の動きを中心としたクリッピング・サービスを経営トップに提供。一般紙に加え、業界紙、地方紙など幅広い情報ソースをモニターしている。経営トップが気になることがあると、これを調べるとリクワイアメントが出る。

公開情報を広く収集するとともに、人的ネットワークを駆使した非公開情報の入手にも積極的。

規制業種であることから、海外に進出している製薬企業ではどの企業も各国の規制当局の動きは絶えず見ているが、日本人主体の組織としないことが重要と考えている。規制当局の委員会のメンバーの誰がキーパーソンか、誰と誰がつながっているのか、などの情報は重要で、その国の子会社の現地人材とは本社は緊密な連絡並びに意見交換を行うことが重要と考えている。日本本社からも各国に出張した際には当局への挨拶は欠かさない。足しげく通うことが大切。そこでの日常会話の中でキーワードがぼそっと出てきて、そこからインテリジェンスが回ることもある。海外では、中央政府のみならず地方政府とのネットワー

クも重要である。海外で工場等の進出を行う場合に、中央政府と地方政府との各種法的手続きや解釈が異なることがある。そのような場合、地方政府の意向が無視できないことがある。

A 社では、自社のネットワークのみでは、新興国等の各種情報は大きく不足していることが多いので、必要とする情報は各種取引や提携している企業から入手している。

見本市会場は、重要な情報収集手段。印刷物だけでなく、出展社の人物から重要な情報が入手できる。海外の見本市はトップオフィサーが集まるので有益だが、日本の見本市は役に立たない。

サプライチェーンの前後からの非公開情報は結構役立つ。他社の情報を取ることを目的として中途採用することはない。採用はあくまで能力、人物本位だが、採用すれば問題のない範囲内で情報を教えてもらうことはある。

売り込みや提携を提案する会社から、望まずして他社情報が入る。ただ、最近は他社情報入手に関して法的問題がないかをより吟味する傾向にあるとのこと。

ある製品開発においてどうしても必要な製造技術で社内にはないものを探索したことがある。技術を保有する企業が小さいと論文も出ていない。論文や特許などの公開情報は役に立たなかったので、海外の知り合いの知り合いを通じて情報収集といったような長いプロセスを経て、ようやく国内の中小企業が保有していることを突き止めた。これもインテリジェンス活動の一環と認識している。

（倫理面の配慮）

法的、倫理的に許される範囲内での情報収集は大前提。各国の文化に根付いた付き合いの中で、種々の人間関係を構築するように心がけている。そもそもお金で情報を買う文化がない。

（意思決定メカニズム）

一応稟議制を採用しているが、重要事項は経営トップが決める。事業部門や研究開発部門からの提案が却下されることも多い。稟議制は調整に時間がかかる、無責任体制になりやすいという問題がある。3つの案を上げて選んでもらうのではなくて、一つの案を上げる。やるか、やめるか。やるとしても、どこまで行ったら、又はどうなったら止めるかというコンティンジェンシー・プランを決める。それ故、撤退も早い。決まったことをひっくり返せる力が重要。稟議制が日本の企業の競争力を弱めているのではない。

CI の結果通りに経営トップが決めるとは限らない。予想外の判断を何度も見てきた。経営トップは CI 部門よりも広いネットワークを持ち、良質の情報を持っている。経営トップが多くの顧客とのネットワークを構築してきた実績がある。

研究を始める前に、研究者は目標点を見つけて、経営陣と話をしなければいけない。オープンイノベーションが企業文化として根付いている。自社の技術で全ては作れない。自分の技術を活かすために、どうやって外部と協力していくか、集合体という発想が重要。

（CI を機能させるための要素）

A 社では、経営トップの強いリーダーシップ、CI 部門への信頼、具体的なリクワイヤメントの発出という CI を機能させる諸条件が揃っていると考えられる。

【B 社】

（会社概要）

日本の製薬企業大手。グローバルでの開発・販売に注力。

（業界背景）

ブロックバスターの特許切れに備えて、絶えず大型の研究開発投資や M&A が必要とされる。研究開発費は巨額でハイリスク。スケールメリットを求めて企業の合併・提携も盛ん。競争が厳しい業界。

（CI の目的）

CI の主な目的は、競合他社の新薬の開発状況、上市タイミングの推測、競合環境分析など。自社の開発状況が不利な場合は、上市時の営業経費、製造規模を圧縮したり、開発の初期段階では最悪の場合開発中断もあり得る。

（CI のスコープ）

競合企業（競合関係）、製品・サービス、技術、顧客、市場、経済、社会・歴史・政治、政府・規制、M&A など

（CI 部門の体制、位置づけ）

経営陣直属（社内ナンバー2 のチーフストラテジックオフィサー）のマーケットリサーチ部門（カスタマーインサイト）の中に CI 機能を立ち上げ。CI に対する組織的なコミットメントがある。マーケットリサーチ部門の責任者は海外の競合企業から移籍。CI 担当者として米国 SCIP のサーティフィケートを取得した経験者を採用。

CI 機能の立ち上げは数年前からと歴史が浅く、業界内では後発との認識。

（情報入手方法、CI 事例）

公開情報を中心に情報収集を行うが、人的なネットワークによる非公開情報の収集にも熱心。証券会社の IR セミナーや学会発表でも未公開の競合情報が入手できる。

各国ごとの規制当局の方針、法律改正、健康保険の仕組み、GDP 成長率の予測など競争環境に関する情報を広く収集。エマージングマーケットであっても、健康保険が破たんする可能性の高い国は相手にしない。各国ごとの情報を日本のコーポレートに集約することに注力している。これは競合他社でも十分にできていないことと認識。

製薬業界は狭い世界でジョブホッピングも多いので、個人的なネットワークによる非公式な場で有意な情報が得られることが多い。アフターファイブの会食は良い機会。ネットワークを広げるために国際的なコンファレンスを積極的に開催。

外部の調査会社（エージェンシー）を使って CI 的な調査も行う。

マーケット調査はサイエンティフィックな方法が確立しているが、CI はそこまで行っていない。色々な断片的な情報を多方面から集めて、つなぎ合わせて、分析して、推測することになる。可能性しか言えない。おそらく競合企業はこうゆうことをしているのではないか、こうゆう方向に走っているのではないかといった推測をもとに、10 年後にどう勝つかというところに役立てたい。技術力、営業力、製品についての競合企業と自社との比較にも注力。競合企業の重点分野や経営方針から M&A の可能性を推測。CI はリスクとベネフィットの両方の予測に使える。

CI は外部情報の収集分析であり、ビジネスインテリジェンス（BI） は内部情報の活用分析。

長期売り上げ予測と CI を合わせることによって、業界内での自社の位置づけが見えてきた。

欧米では CI が盛んだが、日本企業の CI はまだまだの状況。欧米企業では主要な開発製品毎に CI 部隊がある。

（倫理面の配慮）

法律面は当然として、倫理面でも情報の取り扱いには慎重に行っている。会社の Standard of Practice に厳格に従って情報を取り扱っている。個人的なネットワークで入手した情報は、会社のために使って良いものと、良くないものに峻別している。

（意思決定メカニズム）

経営陣に直結の部門なので、CI の結果は経営陣に判断してもらうことになる。開発中の新薬が競合品の開発に劣っていると予測できた時には、経営陣による的確な判断がなされることを期待している。新薬の開発は膨大な開発資金と長い年月を投じるので、難しい判断となる。自分が以前勤めていた米国の大手製薬企業でも、自社開発品が競合品に比べて上市タイミングで遅れることが予測されたが、経営陣が果敢な判断をせずに手痛い経験をした例がある。経営陣からの CI 部門へのミッション設定はあるが、具体的なリクアイヤメントはこれからと考えている。

（CI を機能させるための要素）

マーケティング、CI とも専属の部隊を設置し、経験者を外部から採用しており、組織的な取り組みとなっている。経営陣直結であることも CI の活用において有意義に働く。

個人的なネットワークは会社と異なるコミュニティに参加することによって生まれていると考えられる。

【C 社】

（会社概要）

海運業界大手。自動車、石油・LNG、鉄鉱石などの幅広い物資を世界各国間で輸送。当社は全世界で約 900 隻の船を運行。貨物の種類や顧客業界ごとに 7～8 の事業部門に分かれている。

（業界背景）

運ぶ荷物・商品ごとに船の種類が変わる。作った船は最低 10～15 年働く。長い船だと 30 年働く。安い船でも一隻 40～50 億円、LNG 船だと 200 億円以上かかる。作った後に市場が変わり荷物がなくなると恒常的な赤字に。海運業界ではブームになると各社が船を作り、その結果供給過剰になって、マーケットが悪くなり、船の整理を行おうとするが、高価な船の整理は簡単にはいかない。マーケットが良くなると再度、各社が群がって船を作るというサイクルの繰り返し。建造期間も 3 年と長く、好況時に発注して不況時になってもキャンセルできない。チャーターという方式もあるが、何年契約するかという判断が必要であり、チャーター期間が短いほど費用は割高となる。自前で作るか、借りるか、借りるとしたら何年で借りるかでコスト構造が大きく変わり、需要を過少に見積もった場合には機会損失が発生する。

（CI の目的）

CI の目的は、将来のビジネス環境、特に長期にわたる海運需給の先読み。

時代のニーズの先読み、世界の政治経済の先行き予測、顧客や商社が気づかないトレンドの予測など。政治経済の動きに大きく左右される業界。例えば、中国の爆食がいつまで続くか、シェールガス・シェールオイル革命、温暖化に伴う北極海航路、電気自動車が普及すれば自動車生産がプラモデル化されて新規参入が増加など。スエズ運河が封鎖されれば世界の海運が変わる（中東リスク）。

（CI のスコープ）

技術、顧客、市場、経済、社会・歴史・政治、環境問題など

（CI 部門の体制、位置づけ）

C 社の BI は、社長のイニシアティブで始まったものであり、調査部が BI を担当するという組織的な取り組み。

社内では CI と言わずに BI と呼んでいるが、情報システムを使った内部情報の活用というよりも、外部情報の収集分析により世界の政治・経済の先行き、顧客業界の将来動向を予測しようとするものであり、CI に近い概念であると考えられる。

インテリジェンスという言葉は色んな人が色んな意味に使っている。BI、CI、コーポレート・インテリジェンスとか。確立された定義や概念がない中で、有識者から話を聞きながら自社なりの定義化をしていった。

海運会社の習性として、貨物がどうなるかは政治経済によって左右されるものだから、当たるも八卦、当たらぬも八卦という感じがあったが、そこを変えて、できる限りの分析をし、先読みをした上で判断したいとの思いがあった。そのような意識を高めるべしということでインテリジェンスという言葉を持ってきた。

当社のインテリジェンスとは、「経営の勝率を高めるための知識、判断実行のための知識」。クライアントのニーズを踏まえて、テーマを絞って情報を収集し分析している。分析した成果物が判断行動に足りる知識となった段階でインテリジェンスになるが、そのような行動プロセス自体もインテリジェンスと言っている。インテリジェンスとインフォメーションの違いは、クライアントとインテリジェンス部門がお互いにインテリジェンス・サイク

ルを意識して行動を起こすという点。マーケティングとインテリジェンスの違いを説明するのも難しいが、両者の違いは上記の点にあると思う。

インテリジェンス部門（調査部）と経営陣や事業部門との間の信頼関係とコミュニケーションを重視。インテリジェンス部門はクライアントである経営陣や事業部門のニーズ（リクアイヤメン）を把握してインテリジェンスを実施。クライアントはインテリジェンスの結果を無視せずに、インテリジェンス・サイクルとしてしっかりと受け止めて、判断実行の材料にすることになっている。クライアントがインテリジェンスの担当者を俗人的に信頼しないとか、好き嫌いを理由に拒否したり、忙しいから成果物を見れないということがないよう、インテリジェンスの成果物がクライアントの判断において活用されることを確保するためのプロセス、仕組み、手続きを整備している。

経営陣や部門のトップは何を求めているかを明確にして発信することとしている。その上で、クライアントとインテリジェンス部門で議論してテーマが決まる。

以前は、案件を通したい事業部門が、あえて言えば主観的とも思える分析をしてベストシナリオだけを提示するという傾向があったが、今では CI 結果も踏まえてメイン、ワースト、ベストのシナリオを作成することを習慣化している。

インテリジェンスは、リスクとオポチュニティの両方を予測することが原則であるが、実際には行き過ぎの防止（リスク回避）により使われるという傾向がある。

（情報入手方法、CI 事例）

公開情報の収集が主体である。情報の 9 割は世界に prevail しているとの認識。分析に使う情報の選択が重要。インテリジェンス的な意味を持った情報なのか、通り一遍の情報なのかの見極めが重要かつ難しい。人的ネットワークを通じた情報収集については、顧客などのコミュニケーションを通じた特ダネ情報が得られることもあるが、稀なケースであり、組織的な取り組み強化はしていない。

リーマンショックを契機として、大きな経済変動や危機が発生する前に予兆となる先行指標を見つける重要性を痛感した。例えば、米国を初めとした世界各地の自動車の販売台数は、リーマンショックの少し前から陰りが出ていた。そこから自動車輸送台数の伸びが鈍化することをもし読むことができていれば、調子に乗って発注していた何隻かの一隻は止められた。一隻で 100 億円なので経営への影響は大きい。予兆は顧客や商社も気づいていないことがある。

自動車の輸送は一大分野であり、自動車会社がどの国で作ってどこに売るかによって、用意する船種が変わる。日本から米国への輸送とメキシコから米国への輸送でも船の大きさが違う。現地生産なった場合には荷物は自動車部品になるが、船種や大きさが変わり、事業部門も変わる。中国の自動車マーケットは巨大であり、国産化が進むと海運業界にも大きな影響がある。電気自動車が本格化した場合には業界地図が大きく変わる。誰が、どこで、何を作って、どこに運ぶのかという流れを予測することが重要。

顧客・取引先・提携先に胸襟を開いてもらうために足しげく通ったりとか、いろいろな情報を提供して信頼関係を構築してギブ・アンド・テイクの関係で特ダネ情報を得て、双方のビジネスに活かしていくというのは昔からの定石ではあるが、インテリジェンス活動を契機として、そのような人間関係による情報収集能力を研ぎ澄ませようというところまで来ていない。

同業者間での情報交換は不活発。競争に総合的に勝っていくためには競合情報も重要という見方もあるかも知れないが、独占禁止法に抵触する可能性あるし、そもそも同業者が多すぎて競合企業の情報を集めるよりも、むしろいかに競合に先回りして顧客ニーズ、将来ニーズをつかむことの方が圧倒的に重要。競合情報が無意味とは言わないが、将来の貨物がどのようにクリエイトされていくのかという実態の分析や予測がまだまだできていないので、こちらの方が優先順位が高い。

（倫理面の配慮）

人的ネットワークによる情報収集が十分にできていない理由は優先順位が低いということに加えて、どこまでの行為ならば独占禁止法、不正競争防止法、米国の FCPA 法などに抵触しないのか分からないということがある。国からガイドラインのようなものが出されるとありがたい。

（意思決定メカニズム）

事業部門が需給見込みやシナリオを書くときにインテリジェンス部門が協力する形が基本。協力するというのは、事業部門が好き勝手な情報を作るのを防止、是正するという役割が一義的にはある。インテリジェンス部門主体で需給見通しを作って、事業部門と経営陣にも提供しているが、インテリジェンス部門が事業部門と切り離された形で直接経営陣に報告するというよりも、インテリジェンス部門が事業部門を啓蒙、けん制しながら、事業部門主体で客観的なインテリジェンス活動を通して分析し、シナリオを作れるようにインテリジェンス部門が協力して進めるという体制。本当に大きな案件は、インテリジェンス部門がセカンドオピニオンのように経営陣に直接報告することはあるが、そのようなケースは極めて少ない。

主要な投資計画の場合、社長に上げる前の役員レベルの会合で、社長の経営の事務局である企画部が、インテリジェンス部門との議論の有無、インテリジェンス部門の意見を確認するフェーズがある。企画部が社長になり替わって、提案された計画が事業部門の身勝手なものではなく、インテリジェンス部門との調整が完了したものであることを確認することになっている。これらの意思決定プロセスに積極的にインテリジェンス部門が関与することは少ないが、インテリジェンスの成果が意思決定に反映されるプロセスにはなっている。

（CI を機能させるための要素）

インテリジェンスの効果測定が難しいことが課題。インテリジェンスによって行われた判断が正しかったのか、間違っていたのか結果のレビューができるようになると、よりインテリジェンスの意義が高まる。

人的ネットワークによる情報収集に力は置いていないものの、日本企業に多いボトムアップ型の意思決定プロセスに CI を組織的に絡ませる体系を構築している。経営トップが CI を重要と位置付けていることが推進力となっている。

【D 社】

（会社概要）

「駅前立地」、「ビジネス客向けのリーズナブルな価格設定」を売りとするビジネスホテルチェーンの大手。国内に約 250 のホテルを展開。欧米、アジアなどへの海外進出も展開中。ビジネスモデルとして、地主との間で 20～30 年間の土地の賃貸契約を結び、地主の資金でホテルを建設。ホテル運営は D 社が行い、地主に一定の利回り支払いを約束。賃貸契約終了後は更地にして返還。オーナー一族が経営する非上場企業。現在、二代目が社長であるが、新規案件建設などの重要事項は創業者の意向が強く働いている。

（業界背景）

地主からの賃貸契約でホテル建設・運営を行うビジネスモデルは D 社が草分けであったが、今では同業種が乱立。ビジネスホテル業界は大手であっても非上場企業が主流のため公開情報は必ずしも多くない。サラリーマンの出張者を主な客層とするため、駅前の至便な土地の確保が最重要ポイントとなるが、このような土地の物件は賃貸マンション、マンションアパート、雑居ビル、ショッピングセンター、コンビニなどの異業種との奪い合いとなっている。土地確保の競争においては利回りの高さが求められるが、D 社はサラリーマン向けの単価設定（7000 円代）のため、集客力のある物件でないと収益性が成り立たない。

（CI の目的）

候補となる土地物件の集客力、収益性の調査分析。新規物件候補を発掘してくるのは営業部門の役割であり、その候補物件の収益性を検証するために CI を活用している。

その他には、物件獲得のための地主に関する情報収集、競合ホテルの収益性・競争力の調査分析、問題物件（反社会的勢力など）か否かの調査など。

（CI のスコープ）

競合企業（競合関係）、製品・サービス、顧客、市場、サプライヤー（供給）、パートナー・協力企業、経済、M&A など

（CI 部門の体制、位置づけ）

コーポレートの顧客満足度を上げる部門に CI 担当が 1 名だけいる。CI の経験年数は 7 年。創業者の意向で CI 機能を設置。社内に CI 機能があるとの認識は経営陣にある。

経営陣からのリクワイヤメントで動くこともあるが、新規案件獲得に役立つ情報が欲しい営業部隊、既存ホテルの採算性悪化で悩んでいる運営部門などからもリクワイヤメントが出る。

（情報入手方法、CI 事例）

○競合企業調査分析

公開情報で集められるのは、競合企業のプレスリリース、業績報告、経営者の業界紙でのインタビュー記事などで多くはない。インタビューでは経営戦略が語られることが多く参考になる。全国紙では当たり前のことしか言わないが、業界紙や地方紙のインタビューでは、くだけた話載っていて有益。オーナー企業が多

い業界であり、世継ぎの可能性なども分かることがある。世継ぎすると基本的に社内がまとまらなくなってくる。

ホテルが建設されると地元では一大事なので大抵地元紙の記事になる。多くの場合、総工費などが記事から入手できるので原価償却費は算定可能。どのホテルもリネン、清掃などは地元の業者から調達しているので、地元業者からのヒアリングで原価構造は推測できる。これに客単価を合わせれば収益性などは推測可能。

ホテルの支配人の転職は多い。D 社では情報入手目的での中途採用はせず、人物本位で採用しているが、採用した場合には問題のない範囲で、情報を入手する。支配人レベルでは会社の経営情報までは知らないが、食事、リネン、清掃などのオペレーションをどこから、いくらで仕入れて、何人でどのようにして回しているかといった情報は有益。例えば、D 社では清掃を 3 人で回しているが、競合が 2 人で回しているとすれば、その情報はオペレーション改善に役立つ。会社の雰囲気、上下関係、現場の意見を吸い上げる会社なのかなども、自社の改善に役立つ。D 社から他社に引き抜かれる支配人もいるので、D 社の情報も競合企業に流れていると考えている。

公開情報として、転職サイトの口コミは参考になる。D 社を辞めた人の書き込みは結構正確なので、他社についての書き込みも役立つと考えている。

情報入手のために競合ホテルに泊まり、設備の豪華さやサービスレベルを確認している。従業員との世間話も重要な情報源。別のホテルから転職してきた人だと話が弾む。景気の話から始まって話が弾むと、給料や前の会社の情報も教えてくれることがある。本社勤務の経験がある人だと、どのような部門があって、どんな動きをしていたのかなどを話してくれることがある。海外展開とか、競合の次の動きの予測にもつながる。

最近のお客さんはアンケートに答えてくれないので、お客さんの本音を直接聞くことは重要。例えば、駅前のバス停で小型のスーツケースを持っている人がいれば、世間話をする。単身で出張しているサラリーマンは寂しいので、世間話はすぐに始まる。出張の多い人は、自分が気に入ったホテルを探すためにその町のホテルを色々泊まり歩いている。設備、サービス、値段など D 社も含めた各社の比較が聞ける。会社からいくらの日当が出ているかも重要。D 社の潜在顧客の支払余力（一泊 7000 円代）の推測に使える。アンケートやインタビューはバイアスがかかるが、世間話の時にはお世辞や嘘は少なく本音の話が聞ける。新幹線で小倉を過ぎて乗っている出張サラリーマンは博多に泊まることになるので、その時には博多談義が聞ける。バス停、新幹線の中、タクシー乗り場、喫煙所など、相手が動けない時を狙って世間話をするというのはインテリジェンスの基本的なテクニック。

ホテルレストラン展示会のような展示会が年何回かある。出展ブースに他社から転職してきた人がいたら、前職の話を聞く。但し、100 集めても 98 は使えない無意味な情報。そこを精査するかしらないかがインテリジェンスだと思う。

○候補物件の収益性調査

駅前の一等地が空き地になっている場合は、暴力団が所有している可能性があるので、事前調査を行う。登記などの公開情報を取ることはあるが、ほとんどが周辺住民への丹念な聞き込みで調査。

狙う客層はサラリーマンなので、サラリーマンの宿泊客が多い場所であることが重要。周辺の飲食店での聞き込み、地元のホテル関係の清掃業者やリネン業者などからの取材で概ねのことは分かる。

地方都市では旅館業組合がどこまで強いかが重要になる。D 社のような大手が出店すると脅威になるので、旅館業組合から地主オーナーに売らないようにとのプレッシャーがかかる。建てた後でも地元のスポーツ団体、自治体などの大手顧客への営業活動に支障が出る。ホテルで色々な問題を起こすお客さんを意図的に送り込んでくることもある。事前に旅館業組合の結束力を把握するために、地元で地道な聞き込みをする。場合によっては地元の旅館に泊まりに行く。お客さんと先方も色々な話をしてくれる。

○物件獲得のための調査

土地オーナーの発掘に最も役立つのは、既存ホテルのオーナーの人脈。既存オーナーから別のオーナーを紹介されたり、既存オーナーが持っている別の土地を教えてもらったりしている。金持ちはつながっている。既に 250 の既存オーナーがいることが強みとなっている。

紹介があっても、なくても商談成立までは大変。駅前の良い立地は競合が多く、利回り勝負になると薄利多売の D 社としては厳しい戦いになる。個人の事業主が土地オーナーの場合、オーナーの趣味趣向を調べて営業部隊につなげることが重要。個人オーナーの場合、趣味趣向が合って意気投合すれば、利回りだけの勝負にならないことがある。オーナーが企業経営者の場合には、業界紙や地方紙でのオーナーのインタビュー記事が参考になる。周辺からの聞き込みも重要。

（倫理面の配慮）

法的、倫理的に許される範囲内での情報収集は大前提。世間話する時に録音はしない、尾行もしない。

（意思決定メカニズム）

インテリジェンスの成果は、リクアイヤメントを出した各部門に返す。競合企業分析によるホテルのオペレーション改善、暴力団物件などについては、インテリジェンスの成果は受け入れられやすい。新規物件の可否の判断は、基本的に創業者が決めている。地主から過大な利回りを要求されている、収益性が低い、競合が厳しいといったようなリスク情報を聞いてはくれるが、ほとんどの場合、立地さえ良ければ他社に土地を取られる前に建てるという判断になっている。要因として、①立地さえ良ければ、ほとんどのケースで何とかこなってきたという成功体験（訪日観光客の増大）、②ホテル数を増やすという戦略への創業者のこだわり、③建てたホテルの運用は二代目の社長が担うという役割分担などがある。

インテリジェンスの結果、定性的なリスクを示すことはできるが、定量的に何%のリスクということまででは言えない。都合の悪い情報、リスク情報に対する組織的な吸収力が低いのが実態。

取締役会、役員会には CI 担当者は毎回出席している。

新規事業の海外展開については、失敗事例が多い。ビジネス環境が全く異なる国に日本のビジネスモデルをそのまま輸出したことが原因。進出前に現地のエージェンシーと組んで、ビジネス環境についてのインテリジェンスを行うべきだが、会社の方針で海外でのインテリジェンスを行っていない。

（CI を機能させるための要素）

単一業種なのでインテリジェンスはやりやすい。多業種展開している企業は大変だろうとの指摘があった。非公開企業が多いので、公開情報が少ない。結果的にヒューマン・インテリジェンスを積極的に活用。

【E 社】

（会社概要）

E 社は機械業界の大手企業である。50 年以上前から海外生産を開始し、今では 30 か国近くの国で生産を行い、販売先は 170 か国に及んでいる。海外での売上高は全体の 8 割を超え、売上高、利益ともに世界の業界他社と比べてもトップ水準にある。E 社の企業理念として、業績の追求のみならず、展開国での地域社会への貢献を重視している。E 社は設立以来、企業理念や企業文化を大切にしてきた。外部知識の吸収や形式知化による社内での情報共有を重んじる企業理念がある。グローバル化に伴って世界中の従業員が理解できるよう企業理念の英語化や知識の形式知化による共有（ナレッジマネジメント）も積極的に進めている。

（業界背景）

同業界では多くの競合企業がグローバルでの競争を行っている。製品単価が高いことから顧客の購買力が落ちると業績悪化につながる。このため、他社との競合に加えて展開国の経済の先行きが業績に大きな影響を与える。また、規制業種でもあることから展開国の政府の動向にも注意が必要となっている。

（CI の目的）

E 社では、グローバルな経済動向や競争環境を調査する調査部門が存在するが、インテリジェンス活動を行っているとの意識はなく、また今後もインテリジェンス活動を行う予定もないとしている。他方で、E 社の調査分析活動は極めて大規模かつ組織的に行われていることから、インテリジェンスの研究を行う上で極めて有意義であると考えられるため、本稿では CI に類似する調査分析活動として E 社の状況を紹介することとする。

調査分析活動の目的は、経済、需要、競合企業、顧客ニーズなどに関する将来予測。取材対象者は「先読み」という言葉を何度も繰り返して説明した。

（CI のスコープ）

競合企業（競合関係）、製品・サービス、顧客、市場、経済、社会・歴史・政治、政府・規制、環境問題など

（調査分析部門の体制、位置づけ）

日本の本社に調査分析部門が存在し、日本のみならず世界中の展開国に関する調査分析を日本の調査分析部門が担っている。展開国には調査分析部門はない。調査分析部門は数十人の陣容を抱

え、4つのチームに分かれて業務を分担している。4つのチームとは、①各国の経済・為替動向、②需給予測、③競合企業の分析、④顧客の動向・ニーズ把握である。どこで何を作ってどこに売るかという事業戦略の一手手前の段階を担っている。

需給予測は5年先、10年先を見ている。この分析結果はサプライヤーにも提供され、長期の投資戦略策定に使われている。現場で良い製品を作ってもらうために顧客の動きを把握することは重要。顧客動向分析は、E社の長年の顧客重視の姿勢が表れている。競合分析の対象は、グローバルコンペティター。競合企業の財務や戦略の分析をしている。

調査をアウトソースすると、時間が経ってから履歴や経緯が分からずに戻れないといったことがあるので、アウトソースは積極的でない。

調査分析部門は、経営陣直轄であり、どの事業部門や本部にも属していない。調査分析部門の成果は、経営陣に加えて、各事業部門や本部などにも発信される。経営陣は、その分析結果を経営方針の策定に使うことは当然として、財界活動にも活用している。E社には経営企画部門も存在する。

E社は規制業種であることから、展開国での政治・行政の動向を把握するための渉外部門が存在する。各国ごとに状況が異なるため、渉外部門は主要国の首都に置かれており、情報収集・分析を行い、脅威やリスクが予測される場合などに情報発信をしている。各国の渉外部門はグローバルな情報交換を日々の中で行い、本社に集約される。渉外部門と調査分析部門では異なる役員が管掌しているが、両部門間では密接に情報交換をしている。渉外部門からの情報は定性的で断片的なものが多く、それを定量化するのが調査分析部門の役割。最近は政治と経済が融合している。例えば、新興国で投資誘致策を行うと経済やビジネスはガラリと変わる。政治と経済の情報を集約して分析する必要性が高まっている。

（情報入手方法）

入ってくる定性的な情報や断片的な情報の中で、見過ごしてはいけない将来に大きな影響を与えるものがある。それを見つけることをリスクマネジメントと言ったり、オポチュニティ探しと言っている。「先読み」が大切。定性的で断片的な情報をいかにつなぎ合わせて分析し、幹部に分かるようにするかが難しい。定量化したインパクトが本当かと聞かれても確度は言えない。

使用している情報の多くは公開情報。政府の統計情報、他社のニュースリリースや報道情報など。経済や文化の先読みをするために、グループ傘下にシンクタンクを作って分析・研究を行い、情報を吸い上げている。色々なところから情報を集めて、比較して、本質が何かを見つけようとしている。なお、渉外部門も同様に傘下にシンクタンクを設立し、分析・研究を行っている。

分析では、シナリオ分析が良く使われている。「ビジネス環境変化とリスクシナリオ分析」とか「2050年以降の新興国市場分析」とか。長期予測ではシナリオ分析の世界になる。通常、シナリオは3パターン作成する。メイン、リスク、オポチュニティ。大切なのはシナリオの方向性を決める要因を何にしたのかということ。その要因次第でシナリオは上にも下にも行く。この条件が重なった時にはメインシナリオではなくてリスクシナリオに入るとか言ったパスやチャートを分かりやすく整理して、E社にとっての脅威は何かを幹部に提案する。

個人的なネットワークによる非公開情報の重要性は認識している。本当に質の高い情報を早く得る方法はレポートなどの書き物ではない。書き物だと 1 年遅れる。本当に役に立つ情報で書き物になっているのは 2 割程度かも知れない。組織的な取り組みとしては、政府の経済統計を作成する部門との意見交換を毎月行っている。個人的な取り組みとしては、異業種他社でしっかりした調査部門を持っているところとの意見交換。個人的ネットワークとの会話の中で、新しい分析の視点とか、先読みの中で大きく情勢を左右する要因といったものを探している。それを自分の引き出しの中にいれておいて、機会がやってきた時に、それを「えいっと頑張って使うか、使わないか」を判断している。

欧米企業のインテリジェンスで個人的なネットワークで得た情報は、社内でシェアされないのではないか。ここぞという時に自分のために使う情報ではないか。

日頃のお付き合いで重要なことはギブ・アンド・テイクの関係を構築すること。またお互いに信頼関係がないとうまく行かない。自分だけかも知れないが、志をもった人、ベンチャー精神を持った人だと意気投合して信頼関係が構築しやすい。ネットワークの構築は経営陣や先輩の紹介によるところが大きい。経営陣は社外のネットワークを公的にも私的にも作っている。先輩が骨のある若手を社外の知人に紹介するというのもある。付き合いを壊す人物は紹介してもらえない。その中でギブ・アンド・テイクの関係と信頼関係ができれば自分のネットワークになる。コンソーシアムとか勉強会のような同じ目的をもった人々が集まる機会だと話がしやすい。その中で、何か感じる人とは付き合いができる。

E 社の業界では日本企業は先読み能力が低い。他方、欧州特にドイツの企業は先読み能力が高い。競合分析については、東アジアの後発企業は、同業界で働いた日本人を雇って愚直に情報を吸収した。経営企画部門がコーポレートガバナンス機能を働かせており、現場中心に実施していることに加え、グローバルな環境変化については経営陣に情報が入るように活動を高めている。現場と経営企画部門・経営陣が双方向のコミュニケーションを通じ、変化の萌芽を見逃さないように活動している。それぞれの部門毎でもリスクマネジメントを実施している。リスクマネジメント、気づき、先読みは、部門毎に現場でやっている。会社の理念として、できるだけ現場に近いところで迅速に判断しようというのがある。モニタリングと情報共有が重要。それぞれの部門がリスク情報を発信して、良い意味で牽制し合っている感じがある。これらを組織化、つまり現場に落とし込んでしっかりと運営が回っていく仕組みを作ることが大切で、それを進める部門はある。現場での気づきや先読みを支援するための情報提供も調査分析部門の仕事。インテリジェンスという言葉の定義や概念が良く分からない。その場その場で使い分けられているように感じる。

（倫理面の配慮）

個人的ネットワークで集めた情報は、会社のために使う情報と使わない情報に峻別している。

E 社への取材の中ではインテリジェンスへの拒絶反応のような姿勢が見られた。恐らくインテリジェンスという言葉の中に倫理に反した諜報活動というニュアンスを感じ取っての反応であり、E 社の倫理面の配慮への強い意向が示されたものと推察される。

（意思決定メカニズム）

経営者の中には、調査分析部門から上がってくる情報を見て、「気づき」ができる人がいる。これとこれを調べておけと言った具体的な指示が出る。例えば、穀物価格や食品価格の動きを見て、変異を感じて、穀物輸出で成り立っている国の経済の先行きを分析しろといったような「気づき」と指示が出る。

渉外部門が集めてきた定性的、断片的な情報だけで経営陣に判断してくれと言っても無理があるので、調査分析部門が何とか定量化して判断を仰ぐことになる。例えば、ある国で E 社製品の市場がこれだけ下がる、GDP が何%下がると言った分析が必要になる。

会社が大きくなって、各部門の専門知識が深くなるほど、膨大な量の情報が経営陣に襲い掛かってくる。また、経営陣の双肩にかかっている責任は、時代とともに複雑さと重大さを増している。経営陣は調査分析部門とキャッチボールしながら、アクションブルな情報を吸い上げて判断していく必要性が増している。その際、経営陣は中長期的な観点から判断をしている。

（CI を機能させるための要素）

インテリジェンスは実施していないとの説明であったが、事実上、同等の活動を行っているものと考えられる。リスクマネジメント、外部知識吸収力、形式智化、ナレッジマネジメント・知識共有の強みが活かされている。これらを企業文化として定着させる試みに熱心。

気づき、先読み、個人間の信頼関係などがキーワード。

【F 社】

（会社概要）

F 社は、電気機器メーカー大手である。海外の生産拠点は 70 か国以上、展開国は 140 か国以上で海外売上高比率は 70%を超える。カリスマ性の高い経営者が長年にわたって強いリーダーシップを発揮している会社。

F 社はインテリジェンスや戦略よりも実行力を大切にする会社。会社の経営理念には、「一流の戦略よりも実行力」とある。

（業界背景）

F 社の製品は新興国市場などでは事業拡大の余地が大きい。他方で、機能面での成熟化が進み、差別化が難しくなっている。IT と社会との融合が F 社の市場にとって新しい世界感を作り出す可能性がある。製品に使う化学物質が環境問題を引き起こすことが懸念され、新たな規制のたびに新規物質の探索・評価が必要となる。

（CI の目的）

F 社では、インテリジェンスという概念を意識した活動は行われていないが、利用している化学物質に新規規制がかけられる時や、大型 M & A のような時には、新技術探索、競合環境分析などを行っている。

（CI のスコープ）

競合企業（競合関係）、製品・サービス、技術、顧客、市場、サプライヤー（供給）、パートナー・協力企業、社会・歴史・経済、政府・規制、環境問題、M&A など（経営者の意向次第で広がる）。

（CI 部門の体制、位置づけ）

インテリジェンスの専門組織があったり、体系的にやっているわけではないが、個別案件で、トップから具体的にこれを調べろといったリクエストが下りてきたときには、もの凄く深く入り込んで調べることが多い。この場合の徹底的に調査するという徹底力は、CI に近いことがやれていると思う。通常から組織だって、体系的にかまえてはやっていない。経営トップがトップダウンで何か重要なことを決める時に徹底して調べているというのが正直な感じ。

組織的には、経営企画室、マーケティングリサーチ本部、テクノロジーイノベーションセンターと色々な部門があるが、トップは組織ありきで仕事をさせない。この案件なら彼、この案件なら彼といったように、トップが信頼している特定の個人に調査指示が下りる。そういう人のことを社内では「目利き」と呼んでいる。CI という概念は知らずとも、トップはしっかりとリクワイアメントを出して、インテリジェンス的な活動をやってきたということだと思う。

研究開発の企画とか戦略系でやっている人間は、シナリオ分析、ブラインドスポット、ブルーオーシャンといった手法は理解しているし、実際に良く似た分析はやっている。但し、そのままトップに上申したら怒られる。コンサル用語に聞こえるようなカタカナ言葉が資料にあった段階で聞いてもらえなくなる。コンペティター分析でも文句がたくさん出るが、最後にライバルはどうしているんだと聞かれる。外来のストラテジー系の言葉に対するアレルギーがある。インテリジェンスについても話せば同様の反応になるだろう。

（情報入手方法）

トップからリクエストがあった時には、ありとあらゆるコネを使って情報収集をしている。

調査は公開情報から始めるが、重要な情報は個人的なネットワークでとっている。ギブ・アンド・テイクを前提に、相手に迷惑をかけたり、信頼を失わないよう注意しながら情報を収集するし、情報の使い方も考える。相手からの信頼を失えば、以降その情報ルートは使えなくなる。相手に気を使うという点では相当良識的にやっている。

倫理面にも当然配慮するが、トップが信頼している人間は、ギリギリのところまでやって重要な情報を取ってくるからトップから頼られるようになる。公開情報だけ持って行っても頼られない。どれだけ他人が知らない情報をとってくるか、普通取れない情報をとってくるか。インテリジェンスまで行かなくても、インフォメーションそのものに価値があることがある。

技術探索であれば、論文は 1 年遅れ、学会は半年遅れで、それだけでは使えない。論文や学会で面白い技術をみつけたら、アポイントをとって 1 対 1 で直接会って話を聞いて生きた情報を見つけている。IOT とかスマートシティといった新分野の情報を集める時が一番困る。世の中に自称、専門家というのはたくさんいるが誰が本物か分からない。どこに当たるかは、自分の直感とリテラシーで決めるしかない。そこからは人の紹介の紹介と数珠つなぎに人を探していく。

新規分野では予測するよりも、ビジネスモデルを創造して寡占をとって、デファクトスタンダードを握るしか方法がない。業界トップなので、分析してキャッチアップする相手がいない。予測ではなくて本当の意味での創造が必要。

製品のコンセプトは成熟しているので、顧客に何が欲しいかと聞いても出てこない。自分で仮説を作って提案して、実証していくしかない。

大学との連携では、課題解決型から課題設定型に移りつつある。どう解決するかではなくて、将来をどう予測して、どんなビジョンを描いて、何を研究するかを決めることが重要。課題設定では、理系の先生だけでなく、文系の先生に入ってもらっている。文系の先生の感覚は頼りになるし、思考の幅が随分違ってくる。今までは考えもしなかった価値のアイデアが出てくる。

スマートシティとか IOT になってくると、F 社の企業秘密になっている制御プロトコルをオープンにするかというかの戦略が重要になってくる。その際に、誰と組んで、誰と戦い、どこまでオープンにして、何を取るかということを決める必要に迫られる。

（倫理面の配慮）

コンプライアンス研修というのが定期的にあって、こういう情報は入手してはいけないと教えられるが、実際の運用は現場での判断となる。

（社内情報の漏えい防止）

社内の企業秘密の漏えいについては、どんなルールを作っても、OB や部長クラスの人間を引き抜かれるので、防止できない。不正競争防止法では秘密を特定しないと守れないが、秘密を特定するために暗黙知を形式知にする方が怖い。暗黙知のままであれば、多少人が引き抜かれても全体を真似されることはない。形式知にしたとたんに辞めていく、中国人従業員などにすぐにコピーされてしまうことがある。

モノづくりのノウハウは特許化すると逆に真似されるので出さない。液晶などのエレクトロニクス分野でキャッチアップされたのは、設備メーカーにノウハウやレシピを見せ過ぎたから。トヨタだったら、絶対にそんなことはしないといていた。

陳腐化が早い技術は漏えいを気にする必要がない。人を引き抜かれても、真似できる前に陳腐化している。

（意思決定メカニズム）

経営トップのリーダーシップが強く、トップダウン型の意思決定メカニズムの色彩が強い。

（CI を機能させるための要素）

経営トップから具体的なリクワイアメントが出ること、徹底的な調査分析力を持つことから CI 的な活動ができて企業と考えられる。

【G 社】

（会社概要）

G 社は、難病などの特殊な疾患に焦点を当てた医療機器の開発、販売を行う大手医療機器メーカー。海外展開にも積極的。40 年以上の歴史を持つ医療機器メーカー。非オーナー会社。

（業界背景）

新製品開発までに長期間が必要であり、臨床試験段階では更に大きなコストが必要となる。規制当局の審査というリスク要因を抱えている。国内だけではマーケットが小さいため、開発コストを吸収するためには海外展開が望まれる。病気を治す方法は薬で治す方法と医療機器で治す方法があり、医療機器メーカーにとって製薬企業は競合相手となることもある。

（CI の目的）

自社が開発中の新製品と競合する技術・製品の探索、開発状況の把握。
新製品につながる外部技術の探索。

（CI 部門の体制、位置づけ） G 社では、インテリジェンス部門は存在せず、インテリジェンスという概念を意識して活動もしていない。また、研究開発本部や事業部から独立した、調査部門やマーケティング部門もない。

取材対象者は、研究開発部門に属し、開発全体のマネジメントの一環として、研究開発部門で開発された成果を事業部につなぐための市場調査や、社外の新規技術の探索・導入の役割を担っていた。手法のプロセス化、役割の明確化といった組織的な活動というよりも、どちらかというと属人的な活動と位置付けられ、担当者が変わると手法や役割も微妙に違ってくる環境にあった。

取材担当者は、後述する事例を経験した後は、インテリジェンスの有効性を認識しており、社内にインテリジェンス的な意識を持った調査部門の設置の必要性を感じているが、古い企業体質が残る企業では難しいと考えている。G 社では、実業である「モノづくり」を大切に、外資系コンサルタントなどを虚業として使いたがらない会社であることから、インテリジェンスのような外来の概念は到底社内では通らないだろう。

（情報入手方法、CI 事例）

○CI 事例

G 社は、手術時に使う医療材料を患者の自己細胞を原料にして完全自動で製造する医療機器を 10 年間にわたって開発してきた。従来の医療材料は、動物の細胞を原料にしているが、G 社が開発中の装置は自己細胞を使うことから拒絶反応や副作用がないということが強みであった。開発の最終段階で、欧州で同様の機能を狙った技術が開発されているのでは、との未確認情報をつかんだ。G 社の欧州事務所を使って調べたが詳しいことは判明しなかった。医療機器に関する欧州の規制では、自己認証によってとりあえずの上市ができる。このため、取材担当者は知人の知人というネットワークを使って、フランスの CI

エージェンシー（ADIT）を見つけ、ADIT に対して、競合技術の特定、医療現場での強み、メカニズム上の問題点、上市タイミングに加え、欧州の医療規制や保険制度についても調査を委託した。

ADIT 社の調査分析の結果、競合技術は確かに存在し、効果も高く、目的となる医療材料も手術室で製造できるという点で、G 社の開発中の製品に比べて使い勝手が良いものであった。開発フェーズもより進んでおり、少なくとも欧州での上市タイミングは、G 社の日本での上市タイミングよりも早い可能性が示された。メカニズムとしては、動物由来成分を触媒的に用いる技術であるが、副作用はないと推測された。日本では、C 型肝炎の問題などを契機として、異物を使うことに対する拒否反応がかなり強いが、欧州では文化的にそのような拒否反応は強くないことも判明。

G 社では、日本で医療機器の認可を取得した後に欧州市場や米国市場への参入を予定していた。取材担当者は、ADIT の情報をもとに、少なくとも、欧州市場では勝てないと分析。競合も米国市場への展開を図るものと予測し、残る日本市場だけでは仮に勝ったとしても市場規模が十分ではないし、欧米を抑えた技術が日本に進出してきた際のリスクは大きいものと予測。これを受け、開発を中断すべきと考えた。

○取材担当者の情報収集方法

外部の有望な技術を導入するための技術探索を行っている。自分には医療機器マーケットの土地勘があるので、この技術だったらあの商売に使えるだろうといった感じで技術を探している。例えばナショプロの研究発表会に行き、おもしろそうな技術があったら個別にアクセスして詳しく聞いてみる。学会も使っている。論文や特許の検索よりも話を聞きに行き、市場感覚で選んでいた。自分の動き方は完全に属人的であり、他社や後任にやれといってもできないだろう。そういう意味で形式知化や教育は遅れており、組織的な取り組みになっていない。

（倫理面の配慮）

ADIT はフランスでも多くの実績のある会社であり、倫理面での心配はなかった。

（意思決定メカニズム）

10 年の期間と多額の開発投資を行ってきたプロジェクトであることから、経営レベルの判断が必要であった。G 社は日本の典型的な古い体質の会社であり、ボトムアップで意思決定が行われる。長い期間と費用を投入したプロジェクトについては、G 社でも一般的には、開発関係者は積極的な肯定化を行い、プロジェクトの承認を得ようとする傾向があり、中断する方向で経営陣に上げることは難しい環境にあった。

本事例については、事業部門、欧州事務所や、社内の海外事情通の人達からは ADIT の調査結果に対する批判的な意見が暗に陽に寄せられた。たまたま取材担当者と本プロジェクトの開発担当者との間では信頼関係が従前より存在した。取材担当者は開発担当者と意見交換を行い、CI 調査結果を踏まえた分析シナリオも含めたレポートを作成し、上層部に判断を仰いだ。海外では苦しいが、日本だけならここまでやれるかも知れないといった内容であった。部門トップの開発本部長は開発継続の意向であった。その上の技術管掌役員は、G 社とは別のグループ会社（医療関係）から移ってきた人物であり、過

去の無駄になる開発投資と、継続して上市後にこむる損失リスクの両方を冷静に考えて、中断の判断を下した。

（CI を機能させるための要素）

今回のケースでは、クライアントは意思決定権者ではなく、取材担当者である。

ADIT の調査結果は、自社にとって都合の悪い外部知識であり、開発本部長を含めた色々なところで知識吸収を妨げる NIH に似た傾向が見られた。技術管掌役員が開発中断を決断できた要因については判然としないが、外部から移動してきた人物であり、自社開発ということへのこだわり（NIH）が少なかったことが影響した可能性がある。

【H 社】

（会社概要）

米国発の戦略系コンサルティングファーム。世界 48 各国にオフィスを設置。

CI に関する知見も多く、クライアント企業から CI に関する問い合わせも増えている。

（製薬業界の CI）

製薬業界は他の業界に比べて CI が進んでいる。その理由の一つは、ある薬に関してある製薬会社が何回プロモーションを行っているかという統計情報（IMS）がある。売上だけでなく、営業活動まで含めて定量的なデータがたくさんあると、統計的に競合分析がしやすい。二つ目の理由は、医療関係者向けに講演会、説明会、フォーラムが開かれるので、そこに参加すれば競合情報が手に入る。三つ目の理由は、マーケティングの観点でいうと、製薬は BtoB と BtoC の中間ぐらいのマーケットになる。日本中のドクターが 20 万人だとして、そのうちの 2 割のドクターが新薬全体の 8 割を使っている。4 万人の顧客を相手にすれば良いので BtoC よりも攻略しやすい市場で、色々なデータが整備されやすい。

日本でも 2010 年ぐらいから各社が CI 部門みたいな機能を作り始めた。

CI はリスクマネジメントとも裏腹の関係にある。製薬は長期にわたる莫大な研究開発投資の割に成功率が低いという大きなリスクを抱えている。石油開発のシェル、重工長大の GE、データベース開発のシスコといった企業は、いずれも大きなリスクを抱えており、リスクマネジメントと CI がセットになった事例として頻繁に取り上げられている。

（CI の定義）

競合企業分析に重点を置いた狭義の CI と、競合優位性を構築するための情報収集・分析とした広義の CI がある。後者の場合は、競合企業だけでなく、市場、経済、社会環境といったマクロの話も含めての競合優位性を作っていくという話になるので、経営戦略の策定につながる話になる。

BI は社内情報の有効活用、CI は社外情報の収集分析という意味で一般的に使われている。

（日本の CI）

広義の CI とした場合、日本の大手企業では、CI と意識せずにやっていることが多い。例えば、中期計画の策定だと経営企画部門が担っている。提携先がおかしいとか、展開国で何か事件が起きた時とかは、プロジェクトチームとかタスクフォースのような組織ができて、調査分析を行う。最近では、公開情報の収集だけでなく、参考になりそうな企業へのヒアリングとかもしている。ある意味で、「お祭り」の時には CI のような調査分析をやっている状況。競合企業の情報を集めるために外部のエージェンシーも使われている。例えば、競合企業の組織図は絶対に手に入らない。外部エージェンシーの中には、知り合いを通じて色々質問したり、競合企業を訪問して何階に何の部署があったかといった情報を 2〜3 か月かけて集めて、組織図を推測してくれる。分析や戦略策定に関しては、当社のような戦略系のコンサルタントも良く使われている。特に H 社のクライアントになるような大手企業の経営企画部門は、外来の分析手法を良く勉強している。日本企業の経営企画の人から「CI とは何か」との質問は良く受ける。米国で流行っているのをご存じで、勉強熱心だから質問される。

他方で、日本の企業が米国の企業のようにできていない点としては、中期計画とか事件が起きた時以外では、リクワイヤメントを具体的に絞り込んで出していないことである。また、CI と呼ぶかどうかは別として、そのような機能を意識して社内に設立し、日頃からの人的ネットワークの構築を組織的に推奨し、体系的に調査分析を行っていないこと。

CI という機能を作って、恒常的に組織や人のケイパビリティの向上に努めるとか、経営陣が CI 的なマインドセットを持って、絞り込んだ問いを出していくという点では日本企業は遅れている。

日本で人的ネットワークの構築ができていないのは、組織的として CI 機能に人モノ金といった資源を投入せず、ネットワーク構築も推奨されていないことに加えて、個人のモチベーションの違いもある。米国の企業では、一般的に生涯を一つの会社にかけるわけではないから、一人ひとりが絶えずアンテナを張っている。実際、色々な会社を転々としているのでネットワークもできる。営業職とかだけでなく、調査分析職の人物も良く渡り歩く。日本では調査分析職という職業類型をあまり聞かない。

なお、サムソンは、100 人規模の人が世界中にアンテナを張って絶えず情報収集をして本社に集めて分析をしている。CI に人モノ金をかけている会社。

分析手法については、少なくとも日本の大手企業では、シナリオ分析、ウォーゲームといった米国流の手法を取り入れるところが多くなったので、あまり違いは感じない。

（CI 部門の位置づけ、役割）

大型 M&A などの会社の大きな方向性を決めるような場合は経営陣からリクワイヤメントが CI 部門へ来るが、多くは日々の事業部門の動きの中からのリクワイヤメントが多いと思う。例えば、製薬会社の場合、新製品を上市する 3 年前ぐらいからローンチチームができて、色々な情報を集めることになるが、CI 部門もその一翼を担うことになる。

ボトムアップで上がってくる積極的肯定化された提案を牽制するという点では、CI に限った話ではない。例えば、P&G では、マーケットリサーチ部門は全ての事業部門から独立していて、社内の提案ではマーケットリサーチ部門が作成して社内でオーソライズされた数字しか使えないようになっている。CI 部門もマーケット

リサーチ部門の機能の一部を担っているのではないと思う。客観的になるように、我田引水のにならないように、データや情報の正当性や根拠をしっかりと担保して、正しい経営判断をすることはマーケティングでも CI でも同様。

日本では経営企画部門が事業部門に対して強いが、米国では経営企画のようなコーポレート機能よりも事業部門の方が強い傾向がある。日本では、事業部門から上がってきた提案に対して、経営企画部門が社長に成り替わってその実現性やリスクを詰めることが一般的。米国の場合は、事業部門が結果責任を負っているため、経営企画部門に比べて力が強い。日本の経営企画部門には優秀な人が多く配置されているが、米国はむしろ事業部門に優秀な人がいる。日本はジョブローテーションが一般的だが、米国では個人の成功とビジネスの成功がほぼ一緒になっている。米国では事業部門の業績が個人のインセンティブとつながっていて、逆に一定期間内に成果が出せなければ首という厳しい世界。このため責任と権限の両方を持っている。これに対する牽制力は、経営企画部門が個別に提案を詰めるのではなくて、P&G のマーケティング部門のオーソライズされた数字というような仕組みやプロセスで担保している。

「お祭り」の時に一斉に調査分析する日本に比べて、牽制機能も持たせた CI 部門を設置して、体系的、恒常的に資源を投入して組織と人のケイパビリティを上げて、組織の意思決定のプロセスに組み込むという点で米国の方が進んでいる。

事業部門の立場から見ても、社内で提案を通すためには CI 部門に調査分析を頼んで、オーソライズされた情報を使った方が効率的というようになる。CI 部門はトップのサポート部隊でもあり、事業部門のサポート部隊にもなっている。

米国はトップダウンだから CI が必要で、日本はミドルアップだから CI がないというのではなくて、事業部門は強いがコーポレートの経営企画部門が弱く、牽制機能というか、より正しい意思決定をするための仕掛けとして、トップと事業部門の中間のところに CI 部門を置いているという整理の方が正しいのではないと思う。

	事業部門が強い	事業部門が弱い
経営企画部門が強い		日本
経営企画部門が弱い	米国	

経営トップからのリクワイアメントが出ないのはリーダーシップに関係している可能性がある。日本でもオーナー企業のような経営トップのリーダーシップが強い会社では、これが知りたい、あれが知りたいという指示が出ていると思う。

あるオーナー企業の社長は、ビッグデータ時代になっても相関関係しか分からない。だから、ありとあらゆるネットワークを使って因果関係を探せと言っている。これは CI みたいな話。強い日本企業はそういう感覚で経営してきている。他方で、弱い日本企業はそういう感覚もなく、CI 機能もないのではないか。

もしかしたら、日本企業は国内では CI 的な情報収集と分析ができているが、グローバルではできていない可能性がある。マルチナショナルな製薬企業はグローバルレベルの CI 機能を持っているが、日本の製薬企業はグローバルでの CI 機能はまだ薄いかも知れない。

（倫理の配慮）

CI は、合法でコンプライアントな形で進めるというのが大原則になっている。倫理面への配慮については日米で違いを感じない。日本で CI というと、どうしてもサムソンみたいなグレーな会社を思い浮かべる。

（日本企業への示唆）

どの業界も異業種格闘技になってくる。昨日の提携企業が明日の競合企業になり得る。今までの業界に限定した競合分析ではなくて、社会、経済、文化、テクノロジーといったようにもう一段広く世の中をとらえて情報収集をする。パラダイムシフトを考える

その中で自社にとって大事な論点やビジネスモデルを考えて、特定のテーマを一気に調べて掘っていく。T 字型の二段階の情報収集・分析が大切。

更には、新しいビジネスモデルの創造力の強化。これは知識ではなくて知恵の領域。そのために必要な情報収集は何かを日々心がける。

最後に、CI と名付ける必要はないが、リクワイヤメント、人的ネットワークへの組織的なコミットメントといった CI 的な機能に光を当てて、組織と人のケイパビリティを向上させること。

【I 社】

（会社概要）

欧州系の CI エージェント大手。日本企業もクライアントとして抱えている。体系的な情報収集と分析能力に強みがある。

（業界背景）

欧州では、近年 CI エージェントの業界が成長している。例えば I 社が本社を置く国だけでも年間の市場規模は 1 億ユーロ程度と推定されている。I 社のような大手から、中小の CI エージェント、フリーランスのまで入れて大小 200 以上の CI 業者が存在。最近では、米国系の CI エージェントも欧州市場に参入し積極的に事業展開している。また、グローバルなコンサルティングファームが CI ビジネスに参入する動きも活発化。

（CI の目的）

ビジネス環境分析全般。競合企業に加えて、政治・経済動向、社会の変化、顧客ニーズの変化、規制動向など幅広い分野で活動。

イノベーション関係では、競合企業の研究開発、所属業種や異業種の研究開発ロードマップ、知的財産の分析による個別技術の評価、新規技術探索なども手掛ける。

リスク分析では、取引先・提携先のリスク、海外拠点のリスク、規制変更のリスク、社内のコンプライアンス違反リスクなどがある。

リクワイアメントは、経営トップだけでなく、クライアント企業の色々な部門から出てくる。研究開発、生産・品質、流通・販売、マーケティング、購買・調達、提携先関係、IT など。

（情報入手方法、CI 事例）

入手できる情報の 8 割は公開情報。2 割がヒューマン・インテリジェンス。ヒューマン・インテリジェンスは貴重な情報が得られることが多いが、主観性のチェックなどの評価をしないと間違った答えになるので注意が必要。

海外での情報収集は、公開情報、非公開情報ともに現地語能力が必要。出版物の内容確認、インターネット検索などでも現地語能力が不可欠。

プライマリー情報から得られた情報の詳細部分の補完、重要性の識別などのために、セカンダリー情報が有用なことが多い。

情報収集までの主なプロセスは以下の通り。

- ・予備段階：KIT（キー・インテリジェンス・トピック）の設定
- ・戦略課題の理解
- ・重要課題に分解
- ・仮説を設定
- ・仮説を個別の質問に落とし込む

主な情報入手方法については以下の特徴がある。

○インターネットの活用

一般的に現地語での対応が必要。必要に応じて言語学者も活用。一般的な検索オプションに加えて、深層 Web により、検索エンジンのクローラーがインデックス化できない領域にある文書やページが入手できる。

Linked-In などの SNS 情報を活用している。人と人とのつながりを解析することによって、企業組織図の推定、インタビューしたい専門家の特定とその専門家へのアプローチ方法を見つけられる（知人の知人の知人ルート）。これをエキスパートマッピングと呼んでいる。

○取材すべき専門家の選別

専門データベース（新聞、特許、論文）での頻度や引用回数、コンファレンス（専門会議）やセミナーでの発表回数、Web のインフルエンサーのブログ、ツイッターなどの（アップデート回数、フォロワー数、内容の専門性）を活用している。

専門家の活動理解、専門家への接近方法の探索を体系的に行っている。自分の人的ネットワークの中に専門家への紹介者がいないか確認。会議、ショー、イベントで面会できるか。アポイントを取るためにどのようなギブ・アンド・テイクができるかが重要。これがないと専門家との良い関係が維持できない。

○展示会の活用

展示会は重要な情報源となる。競合企業、新規参入者、サプライヤー、クライアント、パートナーなどの幅広い関係者の情報が入手できる。パンフレット、説明者による解説、質疑応答、録音・録画に加えて、出店ブースでの社員や元社員との意見交換・雑談で希少性の高い情報が入手できる。

入手した情報の評価が極めて重要。評価は、調査方法の質、分析・解釈の質の面から行う。評価作業を踏まえて、新しい情報収集にあたる、従って、CI プロセスはリニアではなく、繰り返しのループ（インテリジェンス・サイクル）になる。

（CI に関する各国の状況）

I 社では、社員に日本での数年間の駐在経験を積ませるなど、日本語や日本の企業文化に精通したアナリストを計画的に育成している。欧米企業にとって、日本企業は CI の対象になっている。

日本は欧米に比べて CI が低調。I 社でも、最近、日本企業のクライアントの発掘に力を入れているが、売り上げ全体の 10%未満。主なクライアントは、製薬、ヘルスケア、自動車、航空機部品などの業界。日本企業は、CI を委託する際に、問題点が明確でなく、調査目的がはっきりしない傾向がある。リクワイメントの具体化ができないと良い成果が出ない。

日本企業は CI の成果を吸収して、役立てることが少ない。NIH のような外部からの知識への拒否感を感じる。依頼の際の問題意識が低いことに加えて、外部からもたらされた知識を評価する能力が低いことが影響していると考えられる。調査分析能力が低いことと、CI に関する知識蓄積が少ないことから、CI への Absorptive Capacity が低くなっていることが CI 結果を有効利用できない原因ではないか。CI への組織的なコミットメント、CI に関する社員教育が進めば改善するのではないか。

CI といっても概念に幅がある。米国は SCIP の影響もあり、競合企業分析に力を入れている。欧州は、競合企業分析に加えて、広くビジネス環境を把握するための PESTEL 分析のニーズが高い。フランスでは CI という用語に加えて、経済インテリジェンスという概念でとらえている。最近では、アクションブル・インサイトという言葉も良く使われる。

日本企業は SWOT 分析への関心は強いが、PESTEL 分析への関心が薄い。特に、社会面の変化を軽視しがち。社会の変化が市場の価値観やビジネスモデルを大きく変える。例えば、スマートフォンを新しい技術ととらえるのではなく、人々の価値観やライフスタイルを変える社会的な変化の要因としてとらえるべきだった。日本企業が技術や製品品質で勝って、ビジネスで負ける原因の一つと考えている。

I 社から見ると、日本の経済産業省や JETRO は優れたインテリジェンス機関。企業の競争力向上のために有意な情報を集めている。欧州にはそのような機関はない。

（倫理面の配慮）

非公開情報を正確に集めることは無理であると認識。仮にできた場合には、何らかの違法行為やコンプライアンス違反が起こっているとみなしている。法律面、倫理面で問題のある情報は、仮に相手が教えてくれそうでも質問しない。問題のある情報は入手しない方針。

従って、入手できた全ての非公開情報に確実なものはないとの前提で、評価プロセスが重要となる。

CI エージェンシーの中には、倫理的にグレーな領域に入っている会社もあるように感じている。P&G のユニリーバに対する CI の不祥事には外部の CI エージェンシーが関与していたと認識している。

第三章： プラスチックリサイクルについての書誌情報分析を用いた体系的レビュー (技術調査によるプラスチックリサイクル研究の現状と課題)

要旨

研究目的： 第三章では、プラスチックリサイクル問題を事例として取り上げ、技術調査を中心とした公開情報調査の観点から、プラスチックリサイクルの研究動向を体系的に俯瞰し、その全体像や萌芽的な研究トピックを明らかにするとともに、プラスチックリサイクルを進める上での科学的・社会的課題や論点を明らかにすることを研究目的としている。

研究手法： 論文データベースの Web of Science において「(plastic* OR chemical*) AND (recycl* OR “circular economy”)」をキーワードにしてプラスチックリサイクルに関する論文 56,408 本を選出し、これらについて書誌情報分析を行い、35,519 本の論文を六つのクラスターに分類した。論文数の多い上位三つのクラスターについては、さらにサブクラスターに分割して、これらのクラスターとサブクラスターについて分析と詳細なレビューを行った。

分析結果： プラスチックの生分解性、バイオプラスチック、ライフサイクル・アセスメント、電気電子機器廃棄物のリサイクル、建設分野におけるプラスチック再生素材の利用に関する研究が、近年、特に 2016 年以降急速に増加していることを示した。中でもプラスチックの生分解性とバイオプラスチックは、論文数の伸びが著しい萌芽的な研究トピックであった。プラスチックリサイクルの多くの研究分野が先進国、特に中国と米国によって主導されている一方で、建設分野でのプラスチック再生素材の利用に関する研究については発展途上国で積極的に研究されていることを明らかにした。

学術的貢献： プラスチックリサイクルに関する研究動向を包括的に俯瞰、レビューするとともに、プラスチック廃棄物が発生する国における責任あるリサイクルと（発生国消費原則）、先進国と発展途上国の間の国際分業によるリサイクル（国際分業原則）という二つのタイプのリサイクルシステムについて議論した。両方のアプローチのメリットとデメリットを考察し、廃棄物のトレーサビリティ・システムや先進国と発展途上国間の技術移転など、持続可能で責任あるプラスチックの生産と消費に必要な対策を提案した。

1. 緒言

プラスチックは、軽量で耐久性があり、安価な素材であるなどの特性から、様々な用途で利用される幅広い製品に適用されている。我々の日々の暮らしを取り囲む食品包装や日用品にプラスチックは使われ、また、建設、エンジニアリング、医療、自動車、航空宇宙などの多くの産業で不可欠な素材になっている。各国の経済の開発と成長により、プラスチックの需要とプラスチックへの依存度が高まり、その世界的な生産と消費は過去数十年で劇的に増加した。毎年生産されるプラスチックのほとんどは、使い捨ての食品包装など、製造後 1 年以内に廃棄される寿命の短い製品に使用されている。このプラスチック廃棄物

の多くは、埋立地に送られるか、自然の生息地に投棄され、耐久性が高いために大量に蓄積される。その結果、地下水汚染や衛生問題など深刻な環境汚染問題を引き起こし、人の健康や生態系に大きなリスクをもたらしている。また、廃棄物の不適切な処理により、大量のプラスチック廃棄物が海洋に流出し、深刻な海洋プラスチックごみ問題を引き起こしている [80]。

このような問題を解決するためには、プラスチック廃棄物の持続的かつ効率的な処理が不可欠であり、プラスチック廃棄物のリサイクルへの関心が世界中で急速に高まっている。プラスチックを循環的に利用するという考え方にに基づき、欧州連合（European Union：EU）はサーキュラーエコノミー（circular economy：CE）の概念を提唱し、EU 域外の国々でも CE を追求する動きが活発になっている。国際標準化機構（The International Organization for Standardization：ISO）は、多くの国が参加して CE の国際標準を策定しようとしている [81]。

このような状況の下、研究者によってプラスチックのリサイクル方法の分類は異なるが、プラスチックリサイクルに関する多くの論文が発表されている。幾つかの論文では、リサイクルを一次リサイクル（再押出）、二次リサイクル（機械）、三次リサイクル（化学）、四次リサイクル（エネルギーリカバリー）の四つのカテゴリに分類している [82]。一次リサイクルと二次リサイクルの違いは主に、使用されるプラスチック廃棄物の汚染度によるものであり、これらをまとめてマテリアルリサイクルと呼ぶ研究は数多くある。エネルギーリカバリーは、新しい素材や原料を再生するのではなく、熱の形でエネルギーを抽出するため、通常はリサイクルではなくリカバリー（回収）と見なされる。ISO は、プラスチック廃棄物の処理方法に関する国際基準を作成しており、プラスチックのリサイクルは、マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、及び生物学的リサイクルの三つのタイプに分類されている [83]。第三章では、この ISO 分類に従ってリサイクル方法を分類し、分析・レビューを行う。

マテリアルリサイクルは、プラスチック廃棄物をプラスチックに再生できる点で望ましい方法であるが、再生プラスチックはバージンプラスチックに比べて品質が劣る、強度が低いなどの弱点がある [84]。特に先進国では、バージンプラスチックから再生プラスチックへの代替を促進するために、再生プラスチックの環境価値に対する消費者の理解を促進する必要がある。ケミカルリサイクルは、マテリアルリサイクルを補完する有効な手段であるが、主に燃料やアンモニアなどの工業製品に再生しており、このプロセスでは再生プラスチックを生産することは一般的に困難であるケースが多い。しかし、最近一部の先進国では、オレフィン系プラスチック廃棄物からプラスチックを再生できる技術が開発されており、近い将来、その実用化が望まれている [85]。

埋立は CE の観点から最も好ましくないプラスチック処理であり、欧米（特に東欧、南欧諸国）では埋立率が高く、大きな課題となっている [86,87]。埋立は、地下水汚染や生態系破壊などの二次被害の原因にもなる。先進国では埋立からリサイクルへの転換が強く望まれている。日本や欧州の一部の国では、エネルギーリカバリーの割合が高くなっている。エネルギーリカバリーは、産業界において化石資源による発電や熱源の代替手段として使用され、二酸化炭素排出量の削減に高い効果があり、プラスチックの処理方法として有用である。但し、再生プラスチックの生産を優先する考え方に立つと、エネルギーリカバリーよりもマテリアルリサイクルやケミカルリサイクルの方が望ましい処理方法である。先進国のこれらのリサイクル能力を向上させることで、年間 32 億ユーロの環境コストを削減できるとの試算がある [88]。

それぞれのリサイクル方法には長所と短所があるため、プラスチック廃棄物のリサイクルに普遍的な解決策はない。プラスチックの一般廃棄物、または産業廃棄物を使用したマテリアルリサイクル方法は理想的であるが、多くの問題が残されている。マテリアルリサイクルの欠点は、強度、臭い、純度、色などの材料特性の点で、再生プラスチックがバージンプラスチックに劣ることである [6]。汚れたプラスチック廃棄物やプラスチック複合材料の廃棄物をリサイクルすることは困難であるため、廃棄物を事前に分別する必要がある [89]、コストの増加要因となる。

熱分解 [90] とガス化 [91] を含むケミカルリサイクルは、マテリアルリサイクルが苦手とする汚れた廃棄物や複合材料のリサイクルへの適応性が高い。一方で、ケミカルリサイクルは一般的に大量のエネルギーを必要とするため、マテリアルリサイクルよりも二酸化炭素の排出量が多くなるという欠点がある。

上記のアプローチに加えて、生物学的リサイクルへの関心が高まっている。一つの方法は、化石資源由来のプラスチックを微生物を使って生物分解することである [92]。もう一つは、一部のプラスチックは生分解性を持つため、特定の自然条件下で自然分解する方法である [93]。生物学的リサイクルはエネルギーをあまり使わないため、分解条件によっては環境負荷が少ないというメリットがある。前者の代表例として、ポリエチレン・テレフタレート (polyethylene terephthalate : PET) の生分解に関する研究が盛んに行われているが、まだ工業化の段階には至っていない。後者については、バイオプラスチックを分解する方法と化石資源由来の生分解性プラスチックを分解する方法があり、幾つかの種類の生分解性プラスチックが工業化されている。

プラスチックリサイクルの研究動向を総合的に把握することは、簡単な作業ではない。プラスチックの消費量と適用範囲が年々急速に増加しているため、プラスチック廃棄物の適切なリサイクルシステムを確立することが急務であり、これを達成するための研究に多大な努力がはらわれている。Web of Science で「(plastic* OR chemical*) AND (recycl* OR “circular economy”)」の検索用語でプラスチックに関する論文を検索すると、2021 年時点で約 56,000 の論文があり、1 年間で約 7,700 の新しい論文が発表されている。

書誌情報分析法は、広い研究領域を俯瞰的にとらえ、概観を把握するのに有効である。この方法は、公開データをもとに研究領域を分析するために開発されたものである [94]。書誌情報分析法では、論文、特許、新聞、Web ページなどの文書の書誌レコードを分析する。書誌情報分析には、統計、教師あり学習 (supervised learning)、自然言語処理、及び引用分析が含まれる。先行研究では、著者、出版日、キーワード、要旨、参考文献に関する情報などの書誌レコードを分析している。

幾つかの先行研究では、プラスチック廃棄物に関連する書誌情報分析が行われてきた。de Sousa は、「“waste management” AND plastic*」を検索用語にして文献分析を行い、プラスチック廃棄物、特にマイクロプラスチックによる水域の汚染が深刻な問題であると報告した。彼はまた、この汚染の解決が CE を実現する上での大きな課題であると指摘している [95]。但し、この研究では、プラスチックリサイクル研究に関する動向を分析したり、プラスチックのリサイクル方法に関する新たな研究トピックを探索したりはしていない。Tsai 他は、書誌情報分析法を使用して都市固形廃棄物の管理の在り方を分析し、将来の研究のための五つのテーマを特定した (焼却、ライフサイクル・アセスメント、プラスチック廃棄物、固形廃棄物の分別、持続可能性) [96]。この研究でも、プラスチックリサイクルに関する研究動向

の分析は行われていない。Armenise 他は、書誌情報分析法を用いてプラスチックの熱分解技術に関する研究を分析し、重要な研究課題として、触媒の性能の向上、プラスチックとバイオマスの混合物の熱分解、及び反応経路の設計があることを指摘した [97]。しかし、熱分解以外のプラスチックリサイクル方法に関する分析はない。Wang 他は、COVID-19 (Corona Virus Infectious Disease, emerged in 2019) パンデミックがプラスチック汚染に及ぼす影響について文献分析を行い、パンデミック以降、プラスチック汚染が深刻化していること、発展途上国におけるプラスチック汚染に関する研究が活発になっていることを指摘した [98]。彼らは、パンデミックの影響以外に、プラスチックのリサイクル方法に関する調査を行っていない。Sandanayake 他は、書誌情報分析法を使用して、リサイクルされる廃棄物の五つのカテゴリ（プラスチック、ガラス、フライアッシュ、スラグ、建設廃棄物）を分析した。リサイクルされた廃棄物は、コンクリートの原料の一部として有効であると報告しているが、再生プラスチックをコンクリート以外の目的で使用する方法については検討されていない [99]。このように、プラスチックリサイクル研究の全体像を分析しようとする研究はほとんどない。本章では、プラスチックリサイクル問題のシステム転換を図る観点から、書誌情報分析法を用いて技術調査を中心とした公開情報調査を行い、プラスチックリサイクルに関する研究の全体像を体系的に分析・解明し、これまでの研究では触れられなかった最新の研究動向をレビューするものである。

本章での研究目的は、プラスチックリサイクルの研究動向を体系的に俯瞰し、その全体像、存在する研究領域の動向、萌芽的研究トピックなどを明らかにするとともに、プラスチックリサイクル問題のシステム転換を促進するための科学的・社会的課題や論点を明らかにすることである。

2. 研究手法

2.1. データ収集

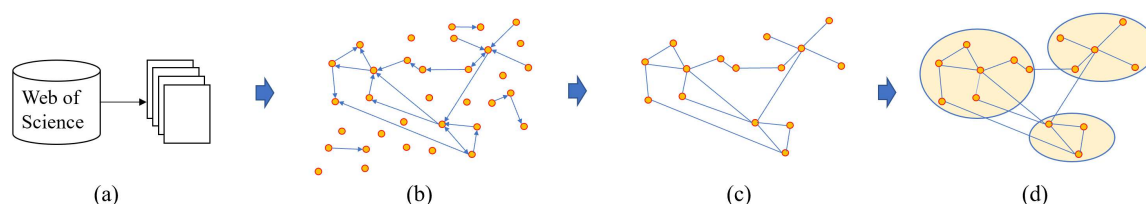
プラスチックリサイクルに関連する学術出版物から書誌データを収集した。「(plastic* OR chemical*) AND (recycl* OR “circular economy”）」という検索用語で学術出版物のデータを抽出した。アスタリスクを使用すると、タイトル、要旨、キーワード、または全てのフィールドで「plastic」、「chemical」、または「recycl」で始まる用語 (recycle, recycles, recycled, recycling など) を探すことができる。Web of Science を使用して、Science Citation Index Expanded、Social Sciences Citation Index、Conference Proceedings Citation Index、及び Book Citation Index から上記のキーワードで書誌データを取得した。データ収集は 2022 年 2 月に実施した。本章での分析のために収集された学術出版物の数は 56,408 であった。

2.2. 方法論

図 2-1 に方法論を模式的に示す。関連する出版物を取得した後（図 2-1 (a)）、論文をノードとして扱い、引用をリンクとして扱うことにより、引用ネットワークを作成した（図 2-1 (b)）。柴田他の 2009 年の研究によると、直接引用は新たなトレンドを見つけるための最良のアプローチである [100]。従って、本章でも、直接引用法を使用した。引用ネットワークの最大のコンポーネントに含まれる論文と引用関係のない論文を削除した（図 2-1 (c)）。このコンポーネントには、35,519 件の論文

(63.0%) が含まれている。最大の接続コンポーネントを取得した後、ニューマンのアルゴリズムであるトポロジカル・クラスタリング法を使用して、ネットワークをクラスターに分割した (図 2- 1(d)) [101]。このアルゴリズムを使用して、過去の書誌情報分析研究にならって、モジュール性を最大化する規則に従って、クラスターをサブクラスターに分割した。[102-106]。

図 2-1：方法論の概要



[脚注]： (a) Web of Science からのデータ取得。(b) 論文の引用関係に基づく引用ネットワークの構築。(c) 最大連結成分の抽出。(d) 引用ネットワークのクラスターへの分割。図(b)-(d)において、丸は論文を示し、丸と丸の間の線は引用関係を表している。

モジュール性は、クラスター内の接続の強さを表す。モジュール性が高いということは、クラスター内の接続が密で、クラスター間の接続がまばらであることを意味する。サイズが数百を超える引用クラスターにうまく適用できる [107]。用語頻度-逆ドキュメント頻度 (term frequency-inverse document frequency : tf-idf) を分析することにより、各クラスターを特徴付けた [108,109]。但し、論文間の対応関係を分析するためには、テキストベースのアプローチは引用ベースのアプローチよりも劣っている [103]。このため、引用ベースのアプローチを補完するためにテキストベースのアプローチを使用した。また、クラスター間の相対的な重要性を評価するために、各クラスター内の論文数の引用数に対する比率を計算した。クラスターが作成された後、クラスター内で最も引用された論文の内容に従って、各クラスターに名前を付けた。

プラスチックリサイクル研究は、引用トポロジーに依存するクラスターに分割された。論文数が 500 を超える 21 のクラスター (総論文数は 32,962。92.8%) を分析し、プラスチックリサイクルに関連する六つのクラスターに注目した。検索用語が非常に広いため、21 個のクラスターには、プラスチックリサイクルに関係のないもの (例：触媒のリサイクル、二酸化炭素の化学変化、鉄鋼スラグ、地殻やマントルのリサイクル) が含まれていた。プラスチックリサイクルに関連する六つのクラスターの論文数は 13,248 であった。

3. 結果

3.1. プラスチックリサイクルに関する研究の概観

表 2-1 は、プラスチックリサイクル研究の六つのクラスターをまとめたものである。クラスター1 は最大のクラスターで、プラスチックのリサイクル全般に関するものである。クラスター2 は、電気電子機器廃棄物 (waste electrical and electronic equipment : WEEE) とプラスチック廃棄物の選別技術に関するものである。クラスター2 は二番目に論文数が多いが、近年の論文数の増加は緩やかである。クラス

ター1 とクラスター2 は論文あたりの引用数が比較的高く、これらの分野で重要な科学研究であることと優れた知識共有が行われたことを示している。クラスター3 は、建設分野でのプラスチック再生素材の利用に関するものである。クラスター3 は、新しいクラスターであり、平均出版年（2016.8）が若い。クラスター3 は論文数が三番目に多いが、論文あたりの被引用数の比率が比較的低く（3.5）、研究テーマが非常にスペシフィックであり、知識の共有が進んでいないことを示している。

表 2-1：六つのクラスターの概要

番号	クラスター名	平均出版 年数	論文数	引用数	引用数/ 論文数 比率	キーワード
1	プラスチックリサイクル 全般	2015.2	4,442	20,342	4.6	Plastic, pyrolysis, packaging, polyethylene, PET
2	電気電子機器廃棄 物 (WEEE)と プラスチック廃棄物の 選別技術	2014.6	2,287	10,771	4.7	PBDEs, plastic, WEEE, electronic, polybrominated
3	建設分野での プラスチック再生素 材の利用	2016.8	2,023	7,075	3.5	concrete, asphalt, aggregate, mortar, cement
4	ポリエチレン・テレフタ レート (PET)の ケミカルリサイクル	2013.9	1,393	7,455	5.4	PET, terephthalate, ethylene terephthalate, glycolysis, depolymerization
5	木材・プラスチック 複合材料への利用	2013.9	1,266	3,458	2.7	composite, wood, fiber, plastic composite, wood plastic composite
6	繊維強化 プラスチック (FRP) のリサイクル	2017.0	1,072	5,627	5.2	vitrimers, epoxy, carbon fiber, CFRP, fiber

クラスター4 は、PET のケミカルリサイクルに焦点を当てている。クラスター4 は、一論文あたりの被引用率が最も高く（5.4）、平均出版年が最も古いことから（2013.9）、研究テーマとしてより成熟している

り、知識共有が良好であると考えらる。クラスター5 は、木材とプラスチックの複合材料へのプラスチック廃棄物の利用に関するものである。最も古いクラスター(2013.9)であり、引用/論文の比率が最も低くなっている(2.7)。クラスター6 は繊維強化プラスチック (fiber reinforced plastic : FRP) のリサイクルに関するもので、各クラスターの中で最も若い(2017.0)。これら六つのクラスターの平均出版年は約2015 年であり、ほとんどのクラスターで2015 年頃から論文数が大幅に増加している。EU は2015 年12 月にCE に関する行動計画を発表しており、これが論文数の増加のトリガーとなった可能性がある。特に、クラスター1、クラスター3、クラスター6 の論文数の増加が著しい。次のセクションでは、各クラスターの詳細な調査とレビューを行った。以下では、論文数が2,000 以上のクラスター(クラスター1～3)をサブクラスターに分割してレビューを行い、クラスター4～6 はサブクラスターに分割せずにレビューした。

3.2. クラスター1：プラスチックリサイクル全般

クラスター1 は六つのサブクラスターに分類された。六つのサブクラスターの概要を表2-2 に示す。サブクラスター1-1 (熱分解によるリサイクル) の論文数が最も多く、論文あたりの引用率も最大(4.8)であるため、このサブクラスターがクラスター1 の中心的なテーマとなっている。サブクラスター1-2 は、プラスチックリサイクルのライフサイクル・アセスメント(life cycle assessment : LCA)に関するもので、比較的若いクラスターである(2015.7)。近年、プラスチック廃棄物のリサイクルに対する社会的関心の高まりを受け、リサイクルの方法毎の環境負荷を様々な角度から定量化するLCA 研究が盛んに行われている。サブクラスター1-3 のマテリアルリサイクルは、論文数で三番目にランクされているが、近年は緩やかにしか増加していない。サブクラスター1-4 のプラスチックの生分解性は、六つのサブクラスターの中で最も若い(2018.7)。論文あたりの引用率も高く(3.9)、研究活動が活発になっていることを示している。サブクラスター1-5 のバイオプラスチックは、クラスター1 の中で二番目に若いサブクラスターである(2017.9)。サブクラスター1-6 はポリ塩化ビニル (polyvinyl chloride : PVC) のリサイクルに関するもので、かなり古いものである(2012.3)。

表 2-2： クラスター1 の六つのサブクラスターの概要

番号	研究トピック	平均出版 年数	論文数	引用数	引用数/論文数 比率
1	熱分解によるリサイクル	2013.5	772	3,736	4.8
2	プラスチックリサイクルの ライフサイクル・アセスメント (LCA)	2015.7	568	1,839	3.2
3	マテリアルリサイクル	2009.9	547	1,593	2.9
4	プラスチックの生分解性	2018.7	521	2,028	3.9
5	バイオプラスチック	2017.9	396	885	2.2
6	ポリ塩化ビニル (PVC)のリサイクル	2012.3	190	501	2.6

3.2.1. サブクラスター1-1：熱分解によるリサイクル（ケミカルリサイクル）

最初のサブクラスターは、熱分解と熱化学リサイクルによるリサイクルである。プラスチックは、炭素と水素の繰り返し構造であり、燃料などの炭化水素、モノマー、または化学産業の中間生成物に分解できる。このプロセスは熱化学リサイクルとして知られており、熱分解、ガス化、解重合、アップサイクルに大別される [89]。以下、熱化学リサイクルを広義の熱分解と呼ぶ。マテリアルリサイクルは、プラスチック廃棄物からプラスチックを再生する理想的なリサイクル方法である。しかし、食品の容器包装などに使われる汚れたプラスチック廃棄物や、複合材料からなるプラスチック廃棄物のリサイクルには適用しにくいというデメリットがある [82,110]。マテリアルリサイクルには、プラスチック廃棄物の徹底した洗浄・分別・選別が必要となる [89]。熱分解には、汚れた廃棄物や複合材料に対する耐性が高いという利点がある。マテリアルリサイクルと熱分解によるリサイクルを統合する包括的アプローチは、プラスチックリサイクルの課題に対処するための最も効果的なアプローチである可能性がある [89]。熱分解技術の世界市場規模は、2019年に約9億7,280万米ドルであり、2020年から2027年の間に年平均成長率8.2%で成長すると推定されている [111]。

世界中の熱分解における最も顕著な研究動向の一つは、プラスチック廃棄物からの燃料の生産であり、多くの商業化されたプラントがこの方法を既に利用している [112]。ポリエチレン

(polyethylene : PE)、ポリプロピレン (polypropylene : PP)、ポリスチレン (polystyrene : PS)、PETなどのプラスチックの種類に応じて燃料を生産するために、最適な反応条件（温度、滞留時間、圧力、装置、プロセスなど）や適切な触媒（コバルト、白金、ゼオライト、塩化アルミニウム、有機物など）について、かなりの研究が行われてきた [7,82,90,113-115]。燃料以外に、潤滑油などの精製油にリサイクルする研究も行われている [110]。最近では、燃料以外の化学原料を生産するアップサイクルの研究が増えており [7,116,117]、ガス化によりアンモニアと一酸化炭素を生成する商用プラントも出現している [118]。PSやPETは比較的モノマー化が容易であり、これらの廃棄物からPSやPETを再生する研究が行われてる [89,119,120]。PET用の商業化プラントもある [120]。PEやPPなどのオレフィン系プラスチック廃棄物はモノマー化が難しく、これに関する論文は多くない。一方、最近、オレフィン系のプラスチック廃棄物から生成された油を化石資源と混合して石油精製プロセスに導入し、燃料でなくプラスチックに再生するパイロットプロジェクトが準備段階にある [85]。

熱分解の主な課題はその高いエネルギー消費であり [7,8]、これは、カーボンニュートラルを達成する上で障害となる可能性がある。これを軽減するためには、より低温での熱分解を実現する高効率で安価な触媒の開発が重要である [89]。新しい触媒の開発や高効率な反応プロセスの設計には、プラスチック廃棄物の変換メカニズムに関する詳細な研究が必要である [121]。さらに、プラスチック廃棄物からリサイクルされた原材料やプラスチックは、多くの場合、化石原料やその他の原材料から生成されたバージン材料よりも高価であり、この解決が大きな研究課題となっている [89,122]。

3.2.2. サブクラスター1-2：プラスチックリサイクルの LCA

二番目のサブクラスターは、プラスチックリサイクルの LCA である。プラスチック廃棄物の処理方法は、マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、生物学的リサイクル、エネルギーリカバリー、埋立に大別される。地

球温暖化係数、酸性化係数、富栄養化係数、エネルギー消費効率、生態系への影響係数など、様々な観点から、これらの処理方法に関する LCA の研究が数多く行われている [123-127]。収集・運搬・分別方法など、廃棄物や処理の内容は国や地域によって異なり、先行研究の LCA にもこうした地域特性が反映されている [124,128]。また、システム境界の設定方法も研究によって異なるため、各研究の結果を厳密な意味で比較・要約することは困難である [128]。

このような制限はあるものの、文献レビューにより観察される一般的な傾向がある。主にエネルギーリカバリーを分析のベンチマークとして使用し、他の処理方法との大まかな違いを地球温暖化係数 (global warming potential : GWP)、エネルギー消費効率 (energy use : EN)、埋立用の残留固体廃棄物 (residual solid waste for landfill : SW)、酸性化係数 (acidification potential : AP)、および 富栄養化係数 (eutrophication potential : EP)の観点から把握することができる。マテリアルリサイクルとエネルギーリカバリーを比較すると、マテリアルリサイクルは GWP、EN、SW、AP、及び EP の点で環境への影響が少ない [123,126]。ケミカルリサイクルとエネルギーリカバリーを比較すると、ケミカルリサイクルは AP、EP、EN の観点から環境負荷が小さく、エネルギーリカバリーは GWP と SW の環境負荷が小さくなる [123]。一方、一部の研究ではケミカルリサイクルの方が GWP への影響が小さいことが報告されている [129,130]。マテリアルリサイクルとケミカルリサイクルを比較すると、マテリアルリサイクルは、GWP、AP、EP、EN では環境への影響が少ないが、SW では影響が大きくなる [123]。エネルギーリカバリーと埋立を比較すると、エネルギーリカバリーは AP、EP、EN では環境への影響が小さく、GWP では影響が大きくなる [123,126,131]。LCA だけの視点では、マテリアルリサイクルが最も望ましい選択肢と考えられ [123,124,126-129,131]、ケミカルリサイクルが二番目に望ましいと考えられる [128]。但し、ケミカルリサイクルは SW の点で問題がある [127,131]。マテリアルリサイクルには、汚れたプラスチック廃棄物や複合廃棄物をリサイクルできないという欠点があり、さらに、マテリアルリサイクルでは、通常はリサイクルできない残渣 (残留物) が常に発生する。従って、LCA だけでマテリアルリサイクルとケミカルリサイクルを比較すべきではなく、これら二つのリサイクル方法を補完的に活用していくことが最も望ましい [131,132]。エネルギーリカバリーは、マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルが適さない廃棄物を処理するための望ましいオプションと考えられている。エネルギーリカバリーに欠点はあるものの、この処理方法はリサイクルしない処分方法よりも環境への影響が少ない [127,128,133]。埋立地でのプラスチック廃棄物の劣化は、100 年で約 1~5%であり、大気および地下水への排出につながる可能性がある [128,134]。長期的に考えると、埋立は環境への影響が大きくなる可能性が高く、最も望ましくない処理オプションであると考えられている [123,131]。

リサイクル技術の向上により、これらの結果が変わる可能性がある。例えば、廃棄物の自動分別技術が高度化すれば、マテリアルリサイクルが有利になる。ケミカルリサイクルの研究も進化している。例えば、低温での熱分解の利用技術が急速に進歩している。これらの研究成果次第では、ケミカルリサイクルの環境への影響は小さくなる。このような研究開発は促進されるべきであり [131]、その進捗状況をモニターしながら LCA の研究を継続していくことが重要である [132]。別々に研究された LCA の結果を比較、要約できるようにするには、システムの境界条件を可能な限り標準化する必要がある [132]。ま

た、消費者が排出する一般廃棄物に関する LCA 研究は多いが、産業廃棄物に関する LCA 研究は少なく、さらなる研究が必要である。

3.2.3. サブクラスター1-3：マテリアルリサイクル

三番目のサブクラスターはマテリアルリサイクルである。マテリアルリサイクルとは、物理的な方法を用いてプラスチック廃棄物をプラスチックや原材料に再処理することである [135]。マテリアルリサイクルには、一連の前処理と準備の手順が必要となる [136]。リサイクルプロセスの最初の段階は、収集、選別、細断、製粉、洗浄、及び乾燥である。廃棄物は、リサイクルされたプラスチックのペレット、粉末、またはフレークに成形される [82,135]。第二段階では、プラスチックのペレット、粉末、またはフレークを溶融し、樹脂成形によって最終製品に加工する。樹脂の成形方法には、押出成形、射出成形、ブロー成形、真空成形、インフレーション成形、溶融紡糸がある [135]。

マテリアルリサイクルの利点は、分散型の設備配置に適していることである。マテリアルリサイクルのプラントは、ケミカルリサイクルと比較して、シンプルで安価であり、操作に必要なエネルギーとリソースが少なく済む [6]。一方で、マテリアルリサイクルによる再生プラスチックは、強度、臭い、純度、色などの材料特性の点でバージンプラスチックに劣っている [6]。

バージンプラスチックと比較して、マテリアルリサイクルされた再生プラスチックは、品質と価格に基づいて三つのグループに分けられる [6]。最初のグループは、最低品質のリサイクル素材である。このグループでは、リサイクルされた材料の品質を維持することよりも、廃棄物として処理する観点が重要となる。リサイクル業者は、廃棄物の排出業者からのリサイクル（処分）の受注とリサイクル製品の販売の両方で収益を得ることができる。このグループのリサイクル製品は、単純なフィラーなどの非機能用途に使用される。二番目のグループは、品質はさほど低くはないものの、性能の割にバージンプラスチックよりも価格が低いリサイクル製品となる。価格競争力を維持しながら再生品の品質を向上させるには限界がある。バージンプラスチックの価格低下も、このグループのリサイクル製品の価格に大きな影響を与える。三番目のグループは、バージンプラスチックと同等の高性能を備えているが、バージンプラスチックよりも価格が高いリサイクル製品である。食品包装などの高機能分野で使用されている [6]。その代表例が、廃棄されたペットボトルからの再生ボトルである。「リサイクルのための環境配慮設計」（プラスチックをリサイクルしやすいようにその開発段階から設計すること）がプラスチック業界に着実に導入され、混合プラスチックの分別技術がより高度になれば、二番目と三番目のグループの幾つかの問題は大幅に改善され、再生素材のコストが削減され、品質が向上する可能性がある [137]。

マテリアルリサイクルのデメリットの中でも、強度の低下は大きな問題である。これらの制限は、高温高压での押出プロセス中のせん断によるポリマーの分子構造の劣化によって引き起こされる [135]。分解メカニズムはポリマーの種類によって異なるが、ポリマーの鎖の長さや機械的特性の変化は一般的な課題である [84]。「ダウンサイクル」という用語は、リサイクル後の材料品質の低下を表す包括的な用語として使用される [138]。安定剤、酸化防止剤、鎖延長剤、配合技術、充填剤、重合剤などは、マテリアルリサイクルの劣化を防止するために活用されている [6,84,135,139]。例えば、安定剤は PE の溶融プロセス中の熱酸化劣化を制御し、リサイクル製品の品質を維持するために頻繁に使用されている

[140]。安定剤は、押出プロセス中のポリマー鎖の激しい劣化を防ぐために PP にも使用される。これらの抑制メカニズムは共通である [84,141]。PVC では、生成された塩化水素を中和し、ポリマー鎖の劣化を防ぐために、一般的に安定剤が使用される [84,142,143]。PS は、人の健康や製品の品質に有害な物質を生成する可能性がある。他の包装用ポリマーとは異なり、フィラーを使用すると PS のポリマー構造を強化できる [144]。マテリアルリサイクルにおける強度低下は大きな問題であり、低コストで効果的な新規添加剤の研究開発にさらなる努力が必要である [84,139]。

3.2.4. サブクラスター1-4: プラスチックの生分解性

四番目のサブクラスターは、プラスチックの生分解である。生分解は、微生物の助けを借りた材料の生物学的分解である [145]。このプロセスは、微生物の代謝によって物質を二酸化炭素、メタン、および塩に変換する環境に優しいサイクルである [146]。プラスチックは共有結合でつながれた固体ポリマーであるため、自然界ではゆっくりと分解され、長寿命となる [147]。近年、生分解に関する研究が盛んに行われているが、化石資源から生産される既存のプラスチックを生分解できる実用的なシステムはまだ開発されていない [147]。

既存の化石資源由来のプラスチックは、生分解メカニズムに基づいて次の三つのカテゴリに分類できる [148]。一つ目は、PE、PS、PP、PVC などの炭素骨格を持つポリマーのカテゴリである。二つ目は、主鎖と側鎖がエステル結合した PET などのポリマーのカテゴリである。三つ目は、ポリウレタン

(polyurethane : PU) などのヘテロ・カーボネート (ウレタン) 結合を持つポリマーである。

最初のカテゴリの例として PE についてレビューすると、PE は、カルボニル基の形成 [148]、カルボン酸への変換 [149]、加水分解または断片化 [150]、微生物代謝 [151] の四つの段階で生分解されるが、詳細なフローはまだ不明である [148]。炭素骨格を持つプラスチックが様々な微生物によって分解されることが多くの研究で報告されているが、生分解プロセスの鍵となる解重合酵素を特定するために研究を継続する必要がある。この酵素が特定されると、産業利用への道が開かれる [152]。

二番目のカテゴリの例として、PET の生分解メカニズムに関する研究は、主に PET とその機能酵素を消化できる細菌に焦点を当ててきた。2016 年に吉田他は、PET を加水分解する二つの酵素 (PETase と MHETase) を分泌する *Ideonella sakaiensis* 201-F6 と呼ばれる細菌株の発見を報告した [153]。この発見は、研究者を刺激して重要な進歩をもたらし、構造、動力学、工学、及び進化研究の急速な進化をもたらした [147]。例えば、摂氏 70 度 (°C) で熱的に安定な好熱性加水分解酵素が同定されている [154]。この温度は、PET のガラス転移温度に近く、PET の分解に有利である。細菌 *Pseudomonas putida* は、PET を酵素的に加水分解して、界面活性剤の原料であるポリヒドロキシアルカノエート (polyhydroxyalkanoate : PHA) を生成することが示されている [148]。HR29 株によって生成される酵素は、その優れた活性と熱安定性により、PET 廃棄物を加水分解するための最も堅牢な方法であることが最近示された [155]。バクテリアの代わりに真核微細藻類を使用することにより、海水ベースの環境で PET 廃棄物を生分解するシステムも提案されている [156]。

第三のカテゴリでは、PU のウレタン結合が生分解中に加水分解される [157]。菌類やバクテリアは、エステル結合を加水分解できる酵素の助けを借りてポリエステル-PU ブレンドを分解できることが報告されている [158]。

既存の化石資源由来プラスチックの生分解システムは実用化されていないが、化石資源由来の生分解性プラスチックは実用化されている。これらは主にデンプンや他のバイオプラスチックと組み合わせて使用される。組み合わせた化合物の生分解性と機械的特性により、デンプンやその他のバイオプラスチックの性能が向上する [145]。

バイオプラスチックからの生分解性ポリマーも工業化されている。生分解性バイオプラスチックであるポリ乳酸 (polylactic acid : PLA) は、既存の化石資源由来のプラスチックと比較すると、機械的なバリア特性が劣っており、PLA の適用範囲が制限される。一方、強靱なポリマーとのブレンドまたは可塑化ブロック共重合により、PLA の脆弱性が改善される [159]。これにより、破断時のひずみが増加するが、引張強度が低下する [160]。これらの制約にもかかわらず、PLA は有望な生分解性プラスチックである。PLA の機械的特性は PS の機械的特性に似ているため、より持続可能な代替品になる可能性がある [159]。

生分解性のある PHA は、PLA よりも優れた機械的なバリア特性を備えているが、バイオプラスチック市場の 1.4%しか占めていない [161]。但し、その生産レベルは 2023 年までに 4 倍になると予測されている [162]。PHA の欠点は、製造コストが高いことである [163]。PHA は、その生分解性と優れたバリア特性により、ボトル用途で PET を代替する可能性がある [164]。

微生物の応用性をさらに高めることで、プラスチック廃棄物の生分解を人為的に制御する微生物細胞工場の開発が可能になる。これには、様々なタイプのプラスチック廃棄物の生分解メカニズムを解明し、最適な微生物を特定して操作するための研究が必要である [148]。画期的な生分解プロジェクトが実用化されようとしている。このプロジェクトは、プラスチック廃棄物を含む一般廃棄物をガス化して不純物を除去し、微生物によって生分解してエチルアルコールを生成した後に [165]、最終的にエチルアルコールを処理してプラスチックを製造するものである [166]。新しい生分解技術を用いた革新的な取り組みがなされれば、プラスチック廃棄物処理は大きく進歩することが期待される。

3.2.5. サブクラスター1-5: バイオプラスチック

五番目のサブクラスターはバイオプラスチックである。近年、深刻なプラスチック汚染問題や化石資源からの脱却を背景に、バイオプラスチックに関する研究が急速に進んでいる。但し、バイオプラスチックの定義は研究毎に異なっている [145,159]。主な定義は三つある。一つ目は、バイオプラスチックは再生可能な資源や材料に由来するポリマー、または微生物の代謝によって合成されるポリマーであるというものである [148]。簡単に言えば、これらはバイオマスから生産されるものであり、以下、バイオマスプラスチックと呼ぶ。二番目の定義は、バイオマスプラスチックのポリマーに加えて、化石資源由来のポリマーを含むすべての生分解性ポリマーをバイオプラスチックと呼ぶというものである [167]。三番目の定義は、バイオマスプラスチックであり、かつ生分解性のポリマーのみがバイオプラスチックと呼ばれるというものである [145,159]。これには、バイオマスプラスチックの非生分解性ポリマーおよび石油資源由来の生分解性ポ

リマーは含まれない。研究者間の意見の相違が消費者の混乱を招いている可能性がある。オーストラリアでの調査によると、消費者は消費する製品の多くが生分解性であることを望んでおり、調査対象者の62%がバイオプラスチックを雑多にゴミ箱に捨てている [168]。オーストラリアの消費者は、全てのバイオプラスチックが生分解性であると誤解している可能性がある。本章においては、最初の定義を採用し、バイオマスプラスチックを非生分解性ポリマーと生分解性ポリマーに分ける。以下ではこれらのリサイクル可能性を中心にレビューしていく。

バイオプラスチックは二酸化炭素を吸収する植物などの非化石資源に由来するため、バイオプラスチック廃棄物がエネルギーリカバリーまたは焼却されても、一般的にカーボンニュートラルであるという利点がある [159,169]。しかしながら、エネルギーリカバリーは、多くの種類のバイオプラスチックの生分解性という特徴が利用できないため、望ましい処理法ではない [159]。

非生分解性バイオプラスチックの代表例として、バイオ PET とバイオ PE がある。コカ・コーラ、ペプシ、ネスレなどの一部の飲料会社は、既に一部の飲料（30%）をバイオ PET ボトルで販売している [170]。バイオ PET の製造方法として、その前駆体であるテレフタル酸（terephthalic acid : TA）は化石資源に由来するが、製造に必要なモノマーは再生可能な資源から得ることができるため、バイオマスプラスチックの PET と呼ぶことができる [171]。現在生産されているほとんどのバイオ PET では、そのモノマーの一つであるエチレングリコール（ethylene glycol : EG）のみがバイオマスから得られており、バイオ PET はその点で部分的なバイオマスプラスチックである。技術的な問題により、TA は化石資源からしか生産できない [172]。森林残渣からリグノセルロース系バイオマス抽出してバイオ TA を生成することは、100%バイオマスプラスチックの PET を製造するための解決策になる可能性がある [173,174]。

理論的には、既存の石油化学ベースの PE プラントを利用して、バイオ PE を生産できる [175]。有機機廃棄物の汚染が少ないバイオ PET 廃棄物は、できればマテリアルリサイクルすることが望ましい。低品位の廃棄物はケミカルリサイクルにより処理することが適切である。セルロースと PE の間には強い相互作用があるため、熱分解の前に PE をリグノセルロース廃棄物と混合すると、効率的な反応が得られる [176]。

バイオ PET やバイオ PE は、化石資源由来の PET や PE と同じ物性・特性を持ち、同じリサイクル方法で、同じ設備が利用可能である [169]。このため、バイオプラスチック廃棄物と化石資源由来の PET 廃棄物を分別してリサイクルする必要がなく、実用上大きなメリットがある。一方、生分解性バイオプラスチックを他のプラスチック廃棄物と一緒にリサイクルしようとすると、課題がある。特にマテリアルリサイクルの場合、生分解性バイオプラスチックのみを他の廃棄物から分別する必要がある [169]。

生分解性のバイオプラスチックである PLA は、水を通す性質があるため食品包装に適しているが、ボトルにもある程度使用されている。PLA ボトルと PET ボトルは透明で外観が似ているため、消費者が区別するのは困難である [169]。PET を適切にリサイクルするためには、PLA と PET を分離することが重要である [169]。PLA を 2~5%の濃度で PET に混合すると、PET が凝集して装置内の壁に付着してしまう。0.1%の PLA がリサイクル PET を不透明にし、PLA 含有量が 0.3%を超えると、リサイクル PET は黄色に変色してしまう [177]。

PLA や PHA の廃棄物は、他の廃棄物と分別できる場合、原則的にはマテリアルリサイクルできるが、廃棄物収集の現場でそのような分別がどの程度達成できるかは疑問である。これらの廃棄物を分別できれば、家庭や産業レベルでコンポスト化できる [169]。しかし、家庭レベルの装置では、コンポスト化システムが適切に管理されていないと、嫌気性になり、環境に有害なメタンを生成することに注意が必要がある。また、生分解性とコンポスト化可能性は必ずしも同じではないことにも注意が必要である。生分解性ポリマーとは、生分解できるポリマーであるが、時間制限はない。コンポスト化可能とは、コンポスト化の制限時間内にポリマーが分解され、食品廃棄物の分解に間に合うように無機化が開始されることを意味する。コンポスト化可能なポリマーのみが、環境への影響が不明な成分を生成しない [169]。廃棄物管理の観点から、廃棄物の生物分解に必要な合理的に短い時間で分解することは、適切な処理の前提条件である [178]。

2018 年の世界のバイオプラスチック生産量は 211 万トンで、2023 年までに 262 万トンに達すると予測されている [161]。この急速な市場の成長にもかかわらず、バイオプラスチックはまだ全プラスチック生産の 1%未滿しか占めていない [179]。バイオプラスチックは環境に優しい反面、既存のプラスチックに比べて製造コストが高く、機械的特性が劣っている。また、生分解性プラスチックは、分解を担う微生物の種類が限られていることや、環境条件や生分解速度を制御できないことなどの問題もあり、これらの問題を解決するために、さらなる研究が必要である [180,181]。

3.2.6. サブクラスター1-6: PVC のリサイクル

六番目のサブクラスターは PVC のリサイクルである。PVC は、最もよく使用される熱可塑性材料の一つである [182]。PVC のユニークな特性、高性能、低コスト、及び様々な処理条件と方法論による幅広い用途との組み合わせにより、PVC はユニバーサルポリマーとなっている [183-185]。PVC は、食品に使用される包装材料、洗浄剤、飲料包装ボトル、繊維、医療機器など、様々な短寿命製品に使用されている。さらに、PVC は、パイプ、床材、窓枠、壁紙、ケーブル絶縁、屋根ふきシートなどの長寿命製品にも使用されている [186]。近年、PVC 廃棄物が急速に増加しており、効果的な処理がますます重要になっている [142,183]。長寿命の PVC 製品は、使用から廃棄までのタイムラグが長い、最終的には廃棄される [130,184,187,188]。そのため、今後、長寿命 PVC 製品の寿命が終わりに近づくにつれ、廃棄物量が急激に増加することに注意が必要である [189]。

塩素の存在は、PVC の構造と主要な特性を特徴付けるものであるが、塩素が含まれていることで PVC 廃棄物の処理が困難になる。PVC 処理工程での塩化水素発生による機器の損傷、エネルギーリカバリー・埋立工程での有害物質発生など、克服しなければならない課題がある [183,190,191]。現在、PVC の現実的なリサイクル方法はマテリアルリサイクルに限定されており、PVC 廃棄物のリサイクルされる量は世界中でわずかな割合に過ぎない [186]。

PVC の一般廃棄物は他のプラスチック廃棄物と混合されており、分別の課題があるため、経済的かつ効率的なマテリアルリサイクルを確立することは難しい [190]。実際、混合廃棄物から機械的にマテリアルリサイクルされた製品は、機械的特性が低く、適用性がほとんどない [192]。また、PVC を混合したプラスチック廃棄物をケミカルリサイクルする場合、リサイクルの過程で可能な限り塩素を除去する必要がある

ある [186]。このようなマテリアルリサイクルの制約を回避するため、近年、PVC のケミカルリサイクル技術の研究や塩素除去方法の研究が盛んに行われている [193,194]。

ポリマーの密度の違いで選別する技術も研究されている [186]。一例として、遠心力による選別の原理に基づく液体サイクロンを用いる方法がある。問題は、PVC と PET の比重が非常に似ているため、密度だけでは区別できないことである。PVC と PET の自動分離には、溶融ろ過システムを追加する必要がある。PVC と PET は、PET の融点よりも低い 204℃の温度で分離できる。PVC は PET の融解温度で劣化するため、高温は不向きである [192,195]。

物理的に分離する別の方法として、様々な分光法の利用がある [142,196-198]。例えば、X 線蛍光を使用して、PVC 中の塩素原子からの特徴的な後方散乱を検出できる。塩素原子から反射される X 線はエネルギーが低く、PVC 廃棄物によく見られる紙ラベルを通過できないため、レーザー誘起プラズマ分光法などの代替方法が最近提案されている。但し、レーザーベースの分光法には、コストがかかるという欠点がある。

静電分離は、摩擦静電プロセスを使用して混合プラスチックの分離を可能にするものであり、分光選別の潜在的な代替手段として最近注目されている [199-201]。プラスチックは種類に応じて、様々な仕事関数を持ち、正または負に帯電する可能性があり、電界を使用してこれらの帯電したプラスチックを分離できる。

PVC の塩基加水分解に低温脱塩素とメカノケミカル処理を併用することで、塩素化合物の含有量の少ない製品が得られる。得られた生成物は、有毒な塩素化誘導化合物を生成しない。水溶性媒体を有機溶剤と塩素に置き換えることで、プロセスの温度と時間を大幅に削減できる [202-206]。

亜臨界水中での PVC の熱水処理の主な利点は、塩素化を誘発する化合物が生成されないことである。これは、PVC から放出された塩素が完全に水溶性の塩化水素に変換されるためである [207-214]。

接触水素化による脱塩素化は、塩素化合物から有機塩素を除去するための環境に優しいアプローチである。水素化脱塩素の主な利点は、水素の存在によって有機塩素が効果的に除去され、製品の品質が大幅に向上することである [215-218]。

ガス化とは、酸化剤の存在下で高温 (1000~2000℃) に加熱することにより、固体または液体の有機化合物を可燃性ガスに変換することである。PVC 廃棄物を空気、蒸気、一酸化炭素、二酸化炭素、水素中でガス化することにより、発電に使用できる有機塩素含有量の少ない水素リッチなガスを製造することができる [187,219-233]。

PVC の実用的なリサイクル方法は現在、マテリアルリサイクルに限定されている。効果的かつ経済的な事前選別は課題である。PVC のリサイクルと無害化のために、多くのケミカルリサイクル法が提案されているが、工業化には至っていない。今後の研究では、これらの問題を解決するために、PVC の事前選択とケミカルリサイクルに焦点を当てる必要がある。

3.3. クラスター 2 : WEEE とプラスチック廃棄物の選別技術

クラスター2 は四つのサブクラスターに分類された。四つのサブクラスターの概要を表 2-3 に示す。サブクラスター2-1 の WEEE のリサイクルには、クラスター内の一般的なトピックが含まれており、論文の数が最も多くなっている。WEEE は先進国、発展途上国を問わず急速に増加しており、その適正処理が大きな社会問題となっている。後述するように、WEEE からプラスチックのリサイクルでは、臭素系難燃剤を含むプラスチックの事前選別方法とケミカルリサイクルの安全な処理方法が重要な課題となる。このような挑戦的な研究課題の存在と社会的関心の高さが、この分野で発表される論文数の急増の要因であると考えられる。

サブクラスター2-2、2-3、及び 2-4 は、マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、及び WEEE のリサイクルにおいて重要となる、プラスチック廃棄物をリサイクルする前に必要な事前選別方法に関する研究トピックである。サブクラスター2-2 の分光選別技術は、クラスター 2 内で二番目に論文が多い。分光法による選別には、様々な方法が提案されている。分光法は多くの種類のプラスチック廃棄物を扱うことができるため、最近の論文の増加の要因になっている可能性がある。サブクラスター2-3 の浮上分離技術では、論文あたりの引用率が最も高くなっている (6.9)。浮上分離は、プラスチックの疎水性と濡れ性を利用して分離する技術で、原理は比較的単純である。サブクラスター2-4 は、静電分離に焦点を当てている。この技術では必要な機器が比較的単純なため、プラスチック廃棄物を分離する上で経済的に効率的な方法である。また、浮上選別のように排水処理の問題もない。サブクラスター2-4 は成熟した研究分野 (2011.2) であり、静電選別技術が実用化の段階に達したことを示していると考えられる。クラスター2 のサブクラスターは、一般的にクラスター1 のサブクラスターよりも平均出版年数が古く、一論文あたりの引用率が高く、クラスター2 はクラスター1 に比べて長い間注目を集めてきた研究トピックであることが示唆される。

表 2-3 : クラスター 2 の四つのサブクラスターの概要

番号	研究トピック	平均出版 年数	論文数	引用数	引用数/論文数 比率
1	WEEE のリサイクル	2014.8	340	1,283	3.8
2	分光選別	2014.1	260	977	3.8
3	浮上選別	2014.3	187	1,292	6.9
4	静電選別	2011.2	141	546	3.9

3.3.1. サブクラスター2-1: WEEE のリサイクル

最初のサブクラスターは WEEE のリサイクルである。WEEE からプラスチックは、発展途上国を含めて急速に増加しており、WEEE の処理技術が盛んに研究されている。WEEE は、鉄および非鉄材料、ガラス、プラスチックなど、様々なリサイクル可能なコンポーネントで構成されている。プラスチック部品は WEEE の 10~30 重量%を占め、鉄に次いで二番目に大きな構成要素である [234]。電気電子機器 (electrical and electronic equipment : EEE) には様々なプラスチックが使用されるが、アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン (acrylonitrile-butadiene-styrene : ABS)、耐衝撃性ポリスチ

レン (high impact polystyrene : HIPS)、及び PS が最も一般的に使用されるポリマーである。難燃剤 (flame retardants : FR) は、火災規制を満たすために EEE プラスチックに使用されている。FR は、発火を抑制し、製品の可燃性を低下させるためにポリマー構造に添加される化学物質である [235]。FR は、EEE プラスチック廃棄物の処理に大きな課題をもたらす。無機化合物から有機化合物まで、様々な化学物質が FR として使用される。有機 FR には、リン系 FR とハロゲン系 FR の 2 種類がある。ハロゲン系の FR には、臭素系 FR (brominated FR : BFR) と塩素系 FR が含まれる [236]。EEE に使用されるプラスチックの約 30% に FR が含まれている [237]。BFR という用語は、臭素系 FR を意味する一般的な用語である。BFR には脂肪族化合物や芳香族化合物などの化合物が含まれる。BFR には 75 種類以上あり、それらの主な違いは化学構造における臭素原子の位置だけである [238]。

ハロゲンベースの FR は問題があることが知られており、特に広く使用されている BFR は体内に蓄積し、人の健康や生態系に有害であることが分かっている [238]。このため、BFR の一部の化学物質は、国際条約により製造または使用が禁止されている [238-240]。これらの禁止された BFR (以下、「レガシー添加物」という) は、新しい EEE では使用されなくなった。しかし、古い EEE にはまだレガシー添加剤が含まれている [240]。規制されていない古い EEE のリサイクルにより、BFR は埋立地で有害な低分子量化合物に分解される。これは、環境への BFR 漏出の原因となる [241]。有害な BFR 廃棄物は、人件費が安い地域に合法的または違法に輸送される。レガシー添加剤を含むプラスチックの発展途上国への国境を越えた移動は禁止されているが、輸出申告の改ざんと国境を越えた不適切な管理により、これらの有害物質は依然として廃棄物管理システムが十分に整備されていない地域に運ばれている [240]。有害な臭素化低分子量化合物は、毎年世界中で 1,818 kg もの量が環境に放出されており、特にアジアの処分場で放出が顕著となっている [242]。EEE については、BFR 含有プラスチックを処理する際に細心の注意を払う必要がある [240,243]。

マテリアルリサイクルは EEE プラスチック廃棄物を処理するための最も望ましい方法であり、現在行われているリサイクルのほとんどはマテリアルリサイクルである [243,244]。マテリアルリサイクルには、BRF 含有プラスチックの事前の分離が必要であり、処理コストが増加する。最も一般的な自動選別方法は、比重の違いによる分離である [245]。近年、赤外線や X 線を利用した選別方法が盛んに研究されている [246-250]。また、マテリアルリサイクルでは、ABS、HIPS、PS などのプラスチックの種類毎に事前に分別する必要があり、処理コストが高くなる。このため、EEE で使用されることが多い混合プラスチックを、分別せずにマテリアルリサイクルする技術の研究が数多く行われている [247,248,251-253]。

BFR のケミカルリサイクルに関する研究は大きく三つの方法に分けられる [254]。一つは、熱分解する前にプラスチックを脱ハロゲン化する方法である。プラスチックを脱ハロゲンしてから分解する方法を二段階熱分解法と言う [254-256]。二つ目は脱ハロゲンと熱分解を同時に行う方法である [254,257,258]。三つ目の方法は、最初にプラスチックを熱分解し、次に熱分解された油を除染するものである [254,259,260]。

非ハロゲン系 FR としてリン系 FR が用いられている。しかし、リン系 FR も人体に有害であることが指摘されており、安全で汎用性の高い FR はこれまで見つかっていない。このため、今後も主力の FR として

BFR が使用されることが想定され、BFR の安全で経済的かつ環境に優しいリサイクル方法について、さらなる研究が必要である。

3.3.2. サブクラスター2-2: 分光選別

二番目のサブクラスターは、分光法(spectroscopy sorting : SS)による選別技術である。SS はセンサーを利用して、廃棄物内のリサイクル可能なプラスチックの存在と場所を検出し、自動化された機械またはロボットを使用して、検出されたりリサイクル可能なプラスチックを分類する [261]。SS は大きく三つのタイプに分類できる。一つ目はスペクトル・イメージング・ベースの選別、二つ目は X 線ベースの選別、三つ目はレーザー誘起ブレイクダウン・スペクトロスコピー(laser-induced breakdown spectroscopy : LIBS)による選別である [261]。

スペクトル・イメージングは、画像処理技術と分光反射率測定技術で構成されている [262]。この分野では、近赤外線 (near infrared radiation : NIR)、可視画像分光法 (visual image spectroscopy : VIS)、及びハイパースペクトル・イメージング (hyperspectral imaging : HSI) に関するかなり数の研究が行われている。分光法ベースの技術では、特定の周波数の光がプラスチック廃棄物に投射される。光とプラスチックの相互作用により、異なる種類のプラスチックは異なる波長の光を反射する。反射光を NIR センサーなどの各種センサーで読み取り、プラスチックの種類を判別し、選別する [261]。VIS を用いて混合廃棄物中の PP を同定する技術が開発されている [263]。HSI ベースのアプローチは、NIR の範囲(1000~1700nm)で高純度の PP 及び PE を回収することを目的としている [264]。近赤外分光法と独立成分分析法を組み合わせ、PET、PE、PP、PS、PLA を迅速に分類する方法が開発されている [265]。但し、この手法では黒色は吸収率が高いため、黒色のポリマー材料を効果的に検出することはできない。

X 線画像はミリ秒以内に取得できるため、X 線ベースの選別は高速である [261]。イメージング機器には、高強度の X 線ビームが使用される。X 線は物質を透過し、物質に吸収された後、下部の検出器に当たる。物質の原子密度に関する情報は、検出された放射線の分析によって得られる。プラスチック廃棄物の選別には、蛍光 X 線 (X-ray fluorescence : XRF) 式の検出器が使われている。XRF では、外部レーザー源が個々の原子を励起し、X 線光子を放出する。この技術は、PET や PP などのプラスチックから PVC を回収する場合にしか適用できないと指摘されているが [266]、これは PVC のリサイクルにとって非常に重要な技術である。エネルギー分散型蛍光 X 線(energy dispersive X-ray fluorescence : EDXRF)は、PP 選別の精度を向上させることができる革新的な技術として提案されている。EDXRF は黒いポリマーと表面の汚染を認識できる [267]。

LIBS は、最も有望な新しい元素分析方法であると考えられている [268-270]。LIBS は通常、プラズマを生成する強力なパルスレーザー、光を集光する光学系、及び分光計で構成される [268]。LIBS は、PE、PP、PS、PET、さらには PVC などの様々なプラスチックを選別できることが報告されている [271]。また、臭素が検出できることが報告されており [269]、WEEE の分別・リサイクルへの応用が注目されている。

SS は、リサイクルの現場で最も広く使用されている選別方法の一つである。しかし、プラスチックには多くの種類があり、プラスチック廃棄物の形状や特徴は様々である。SS は、多種多様なプラスチック廃棄物の分別精度と経済性をさらに向上させる可能性を秘めた技術であり、今後とも積極的な研究が期待される。

3.3.3. サブクラスター2-3: 浮上選別

三番目のサブクラスターは浮上選別（以下「浮選」という）である。浮選とは、プラスチックの持つ疎水性を利用して、水に浮く性質の違いで選別する技術である。原理は、プラスチック表面を選択的に疎水化又は湿潤化して、気泡との接触を制御することである。異なるプラスチック間の疎水性と湿潤性は、気泡との選択的な接触のために十分に異なる必要がある [272]。浮選には主に二つのアプローチがある [273]。一つは、疎水性プラスチックを湿潤性を選択的に変換することである。もう一つは、湿潤性プラスチックを選択的に疎水性に変換することである [272]。プラスチック浮選の主な難点は、プラスチックを選択的に濡らす効果的な方法を見つけることである。例えば、気液の表面張力を下げる方法（ガンマ浮選と呼ばれる）、化学条件を変える方法、表面処理の方法などがある [274]。浮選分離は、ガンマ浮選、試薬の吸着、表面改質、及び物理的調節の四つのグループに分類される [272]。

最初のカテゴリであるガンマ浮選は、液体の表面張力を二つのプラスチックの間のある値まで下げることによって実現できる [272]。可塑剤の助けを借りて、PVC を疎水性にし、PET から分離することができる [275]。ドデシル硫酸ナトリウムなどの様々な湿潤剤が、PET、PVC、ポリカーボネート (polycarbonate : PC)、及び PS の浮選分離用に研究されている [276]。ガンマ浮選は、二つ以上のプラスチックの選別にはうまく機能しないことがよくある [272]。

二番目のカテゴリである親水性試薬の吸着は、プラスチックの疎水性を選択的に低下させる有望なオプションである。浮選試薬は、プラスチック表面を選択的に濡らすために使用され、湿潤剤と呼ばれる。適切な湿潤剤は、プラスチック表面に吸着して疎水性を下げる能力を持つ分子群である [272]。プラスチック浮選に適した湿潤剤に関する研究には、タンニン酸 [277]、メチルセルロース [278] とリグノスルホン酸塩 [272]が含まれる。

三番目のカテゴリである物理的手法は、プラスチック表面の濡れ性を変えることができ、この方法は表面改質または表面処理と呼ばれる。プラスチック表面の疎水性を高めるための物理的方法として、火炎処理 [279]、湿潤酸化 [272]、オゾン処理 [280]、プラズマ処理 [273]などの研究が行われている。他のプラスチックからの PET の分離は、アルカリ処理を含むベンチスケールで達成された [281]。アンモニア処理を施すことにより、浮選を使って ABS と PC を分離することができ、この方法を使用した ABS と PC の最高純度は、それぞれ 99.72%と 99.23%であった [282]。

四番目のカテゴリは物理的な調節である。表面改質とは異なり、物理的調節は本質的な物理的特性に基づいており、化学反応を伴わない。沸騰処理は ABS の表面を効果的に疎水性に変えることができる [283]。PVC または PVC フィルムを選択的にねじることにより、塩素化プラスチックを他のプラスチック廃棄物から分離する可能性に関する研究がある [284]。

浮選分離研究の主な課題は、研究の多くがプラスチック廃棄物ではなくバージンプラスチックで行われていることである [272]。バージンプラスチックと比較して、プラスチック廃棄物は異なる特性を持ち、浮上メカニズムの挙動も異なるため、これらの違いをよりよく理解して研究を進める必要がある。

3.3.4. サブクラスター2-4: 静電選別

四番目のサブクラスターは静電選別である。異なる表面特性を持つ二つの物質が接触すると帯電することはよく知られている。これが摩擦帯電現象であり、接触帯電または摩擦帯電とも呼ばれる [285]。静電選別とは、摩擦帯電の原理を利用してプラスとマイナスに帯電させ、異なる二種類のプラスチックを分離する方法である。プラスチックは通常、異なる表面特性（有効な表面仕事関数）を持っているため、静電分離によりプラスチック廃棄物の分別を確実に行うことができる [286]。粗い表面を持つ全てのプラスチック廃棄物の仕事関数を正確に測定することは困難であるが、異なるプラスチック廃棄物間の相対的な仕事関数の違いにより、静電分離を使用して正と負の帯電を決定することができる [287]。

PVC は、処理方法によっては危険である可能性があり、その分別とリサイクルが重要な課題となっている。一方、PVC はポリテトラフルオロエチレンを除いて最も負に帯電しやすい性質を持っており、静電分離により容易に分離できる [288]。浮遊の様に水を使用しないため、排水処理による汚染の心配がないのもメリットの一つである。さらに、静電選別は装置が比較的単純であり、経済的で効率的に分離できる技術である [286]。

プラスチック廃棄物は通常、適切なサイズに粉砕され、ふるいにかけられ、混合された粒子は摩擦帯電器によって帯電される。次に電場をかけて偏向させ、粒子を捕集する。装置内では、粒子の電荷に影響を与える主に三種類の接触がある。異なるプラスチックの粒子間の接触、同じプラスチックの粒子間の接触、及び粒子とデバイスの壁材料間の接触である [289]。プラスチック表面の電荷の極性と大きさは、これら三つのメカニズムの組み合わせによって影響を受ける。最も重要なメカニズムは、異なる種類のプラスチック間の接触である。摩擦帯電はプラスチック表面のわずか 30nm の深さでのみ発生する [290]。

湿度制御は静電分離の課題の一つである。ほとんどの場合、低湿度は高効率につながる [286]。しかし、一般的に工場の除湿機の性能には限界があり、湿度を 20% 以下に保つことは困難である [291]。静電選別では、三種類以上のプラスチックを一度に分離することは困難である。一連の二回以上の静電選別の繰り返しが解決策になる可能性がある [287]。

帯電ステップにおける粒子接触のメカニズムについての理解を深める必要がある。マイクロレベルの接触モデルを構築してプラスチック粒子の帯電挙動をよりよく理解する能力は、摩擦帯電効率の制御に役立つ。幾つかの数値モデルが提案されているが、より多くの数値モデルの研究が必要である。

3.4. クラスター 3 : 建設分野でのプラスチック再生素材の利用

クラスター3 は二つのサブクラスターに分かれており、どちらも比較的若いサブクラスターである。二つのサブクラスターの概要を表 2-4 に示す。サブクラスター3-1 はコンクリートへのプラスチック再生素材の利用に関するもので、論文あたりの引用率 (6.4) はサブクラスター3-2 (3.1) よりも高くなっている。この方法の

利点は、コンクリートの骨材としてプラスチック再生素材を利用できれば、大量のプラスチック廃棄物を処理できることであり、この分野の研究が非常に活発である理由となっていると考えられる。しかし、コンクリートにプラスチックを混入すると、既存の骨材に比べて強度などの力学特性が低下する。また、コンクリートの流動性が低下するため、建設現場での取り扱いが困難になる。これらの問題の解決策を提案する研究がいくつかある。サブクラスター3-2は、アスファルトでのプラスチック再生素材の利用に関するものである。プラスチック再生素材をアスファルトに組み込むことは、アスファルト舗装の性能と耐久性を向上させる傾向があり、道路でのより広い適用のために集中的に研究されている。建設分野でのプラスチックの利用に関しては、アスファルトへの利用がコンクリートへの利用よりもより実現可能な方法であると考えられる。コンクリートへの利用は、現実世界への応用が難しい挑戦的なテーマであるため、より多くの研究者が関心を持っていると考えられる。

表 2-4： クラスター 3 における二つのサブクラスターの概要

番号	研究トピック	平均出版年数	論文数	引用数	引用数/論文数 比率
1	プラスチック再生素材の コンクリートでの利用	2017.1	316	2,028	6.4
2	プラスチック再生素材の アスファルトでの利用	2017.5	236	734	3.1

3.4.1. サブクラスター3-1: プラスチック再生素材のコンクリートでの利用

最初のサブクラスターは、コンクリートの原料としてプラスチック再生素材を利用することに関する研究である。一般的に、コンクリートは骨材と混合される（通常は砂または砂利が使用される）。砂や砂利の一部をプラスチックに置き換えることで、コンクリート打設現場でプラスチックを骨材としてコンクリートに混入させることができる。コンクリートに骨材としてプラスチックを混入することで、コンクリートが硬化する際の発熱や収縮を抑え、ひび割れの防止に役立つ。また、コンクリートの主原料であるセメントペーストやモルタルは高価であるため、これらの高価な原料の使用量を削減し、プラスチックを混合することで建設費を抑えることができる。コンクリートへのプラスチック再生素材の利用については多くの研究が行われているが、現場での応用に関する論文はほとんどない。コンクリートの需要は世界中で大きく、プラスチック再生素材を骨材として利用できれば、大量のプラスチック廃棄物を処理できる。このため、この分野において建設現場での探索も含めて活発な研究が行われている [292-294]。コンクリート中のプラスチックの割合が増えると、圧縮強度、曲げ強度、引張強度、弾性率などの機械的特性が低下する [292]。既存の骨材の20%をプラスチックに置き換えると、圧縮強度が72%低下する。但し、5%代替では圧縮強度は23%しか低下しない [295]。15%の割合で PET に置換すると、曲げ強度がペレット型 PET で16%、薄型 PET で60%減少した [296]。細骨材を10%置換すると引張強度が8.7%低下し、20%置換すると引張強度が54%低下する [297]。幾つかの研究では、プラスチックの含有量が増加するにつれて、コンクリートの品質の指標である超音波パルス速度（ultrasonic pulse velocity : UPV）も低

下することが報告されている [292]。UPV の値は、コンクリート中の PVC の含有量が増加すると減少する。但し、PVC の代替率が 45% までの場合、減少は 16% 未満である。85% まで交換すると、UPV 値が 30% 減少する [298]。プラスチックを骨材として利用することで、コンクリートのスランプ値が小さくなり（即ち、流動性が低下し）、建設現場で扱いにくいコンクリートになる。細骨材の 20% をプラスチックに置き換えると、スランプ値が最大 50% 減少することが報告されている [299]。これらの特性は、プラスチックの低密度、不規則な形状とサイズ、リサイクルされたプラスチック破片の鋭いエッジによるものと考えられている。プラスチックは既存の骨材とうまく混ざらず、コンクリートの吸水性、透過性、及び炭酸化は、プラスチック含有量の増加に伴い増加し、コンクリートの耐久性に悪影響を及ぼす [292]。

再生プラスチックを使用したコンクリートは、多くの点で既存のコンクリートよりも劣っている。しかし、高強度を必要としない非構造物や高耐久性を必要としない用途には、プラスチックを含むコンクリートが使用されることが予想される。考えられる用途には、高速道路の中央分離帯、仮設構造物、汎用のレンガやブロック（川岸など）などがある [292,293]。コンクリート舗装やスポーツコートでの適用についても言及されている。樹脂骨材入りコンクリートは吸水率が高く、雨水の排水を良好にする。高性能減水剤などの添加剤を使用すると、プラスチック含有コンクリートの柔軟性が向上し、コンクリートの作業性が向上する可能性があるため、建設現場での課題が軽減される。プラスチックを含むコンクリートは密度が低くなるが、軽量のコンクリートは新しい用途を開く可能性がある。さらに、新しい添加剤の適用は、プラスチック含有コンクリートの機械的特性を補完する可能性がある [292]。

プラスチック廃棄物問題の解決において、コンクリートの骨材としてプラスチック再生素材を利用することは大きな可能性を秘めている。機械的性質の改善や長期的な挙動変化、耐久性の向上、これらの欠点を補う添加剤の開発、性能劣化を緩和するためのプラスチックの最適な形状とサイズの解明、断熱性能や遮音性の改善など、多くの研究課題が残されている [292-294]。

3.4.2. サブクラスター3-2: プラスチック再生素材のアスファルトでの利用

二番目のサブクラスターは、アスファルトでのプラスチック再生素材の利用に関する研究である。アスファルトは、プラスチックと化学的に類似した炭化水素含有材料である。研究者の間では、リサイクルされたプラスチックを最適な条件下でアスファルトと適切に混合すると、アスファルト舗装の性能と寿命が大幅に向上するというコンセンサスがある [300]。例えば、エチレン・ビニル・アセテート (ethylene vinyl acetate : EVA) は、変形に抵抗する頑丈で剛性のある 3 次元ネットワークを形成することによって、アスファルトを改質する性質があり、バージン EVA は道路建設で長年使用されてきた [301]。アスファルトへのプラスチック再生素材の利用は、廃棄物処理の問題を解決するとともに、アスファルト舗装の性能と経済性を改善し、長期的にはコスト削減につながる可能性がある [302]。例えば、プラスチック再生素材を使用したアスファルトで全長 1km（幅 3.75m）の道路を建設すると、約 1 トンのアスファルトを節約できると報告されている [303]。これらの理由から、プラスチック再生素材をアスファルトに利用する研究が増えている。

アスファルト含有プラスチックで舗装するには 2 つの方法がある [304]。一つは乾式法で、結合剤を添加する前にプラスチックを熱骨材に組み込む方法である。この方法は、ほとんどの場合、高密度ポリエチ

レン (high-density polyethylene : HDPE) や PET などの高融点の硬質プラスチックのタイプに適用される。再生プラスチック粒子の硬度と剛性は、アスファルト混合物の骨格である細骨材と同様の役割を果たし、アスファルト混合物の結合性に貢献する [304]。もう一つの方法は、骨材と混合する前にアスファルトバインダーに改質剤としてプラスチックを直接添加する湿式法である。低密度 PE (low-density polyethylene : LDPE) や PP などの低融点プラスチックは、この方法に適している。

アスファルト混合材は、使用するプラスチックの種類によって効果や特性が異なるため、プラスチックの種類に応じた研究が行われてきた。PET は主に乾式法で使用され、アスファルト混合物の代替骨材として使用されると、剛性が増し、わだち掘れ抵抗と疲労抵抗の両方が改善される [305]。一方で、熱割れや耐湿性が損なわれることが報告されている [306]。PET による改質アスファルトは、アスファルト混合物中の骨材とアスファルト間の結合を弱める可能性がある [307]。これは、プラスチックの高い安定性と不活性な性質によるものであり、酸化剤を添加してプラスチック表面を活性化することが推奨されている [308]。HDPE は高密度で剛性が高いため、主に乾式法で使用される。PS も主に乾式法で使用される。PS はアスファルトの硬度を高め、わだち掘れ抵抗を改善する [309]。PS を追加すると、アスファルト混合物が硬化し、湿気による損傷に対する耐性が向上するが、わだち掘れ抵抗や疲労亀裂に対する耐性への影響は結論が出ていない。

LDPE は主に、LDPE をアスファルトに完全に溶解させるために高いせん断速度と高温を必要とする湿式法で使用される。アスファルトに LDPE を添加すると、わだち掘れ抵抗、疲労抵抗、耐湿性が向上することは一般的に認められているが、耐熱亀裂性の結果は研究毎に異なる [304]。PP は主に湿式法で使用され、アスファルトに添加すると硬度が増し、わだち掘れ抵抗の向上に寄与する。一方、PP はアスファルトの延性を低下させ、空気の間隙を増やす。ある研究では、間隙が増えるとわだち掘れ抵抗が損なわれることが示された [310]。

実験レベルの研究として、再生プラスチックと混合されたアスファルトは硬くなる可能性が高く、その結果、粘度、強度、わだち掘れ抵抗、および疲労抵抗が全体的に改善されることが報告されている。但し、再生プラスチックを混合したアスファルトの性能検証は、最終的には道路舗装に使用するフィールドプロジェクトで確認する必要がある。これまでに、インド、南アフリカ、ニュージーランド、オーストラリア、カナダ、英国、米国などで幾つかのフィールドプロジェクトが実施され、作業性、建設性、持続可能性の面で良好な結果が得られている [304]。しかし、長期的な性能を研究したフィールドプロジェクトはほとんどなく、プラスチック再生材料を混合したアスファルトの性能が長期間維持されるかどうかは明らかではない。プラスチック含有アスファルトの長期的な実行可能性、疲労耐性、熱亀裂耐性、耐湿性などのパラメーターに関するさらなる研究が必要である。

3.5. クラスター 4 : PET のケミカルリサイクル

クラスター 4 では、PET、PLA、PU、PC などの様々なプラスチックのリサイクル方法が研究されている。その中でも、PET のケミカルリサイクルの研究数が最も多く、近年研究数が増加している。従って、ここでは PET のケミカルリサイクルに焦点を当てる。PET のケミカルリサイクル法は、熱分解、加水分解、メタリシス、グリコリシス、アミノリシスに大別される [311,312]。

加水分解は、PET 鎖を付加価値製品、特に TA 及び EG に変換する。加水分解には、中性加水分解、酸化加水分解、アルカリ化加水分解の三種類がある [313]。加水分解プロセスの大きな欠点は、200～250℃の高温と最大 1.4～2MPa の高圧が必要なことである。酸化加水分解には、腐食性と汚染性があるという欠点もある [311]。

PET は高温高圧のメタリシスで分解され、EG とテレフタル酸ジメチルが主生成物として得られる [314]。このプロセスの欠点は、アルコール、グリコール、テレフタレート誘導体などの反応生成物を分離・精製する必要があり、非常に費用がかかることである [314]。

グリコリシス（解糖）は、反応時間が短く、温度範囲が広いため、PET の最良のリサイクル方法であると考えられている。しかし、解糖系では、ジエチレングリコールや EG の二量体などの望ましくない生成物が生成され、分離と精製の点で課題が生じる [312]。

PET のアミノリシスにより、TA と EG のジアミドが生成される。反応は、メチルアミン、エチルアミン、エタノールアミンなどのアミンと水を使用する方法により、20～100℃の温度範囲で行われる [315]。アミノリシスは穏やかな条件下で行われるという利点があるが、最適な反応時間に到達するには分解速度の加速化が必要である [316]。

それぞれのケミカルリサイクル方法には、長所と短所がある。PET のケミカルリサイクルのためのより穏やかな反応条件を開発し、リサイクル方法をより実現可能にするために、様々な研究方法を追求する必要がある [311]。

3.6. クラスタ 5 : 木材・プラスチック複合材料への利用

五番目のクラスタは、木材・プラスチック複合材料 (wood-plastic composites : WPC) のためのプラスチック廃棄物の利用である。WPC は、フロアカーペット、花瓶、くずかご、公園用ベンチ、ピクニックテーブルなどの用途に使用されている。近年、WPC に使用される再生プラスチックの量は、先進国と発展途上国で大幅に増加している [317]。再生プラスチックを使用した WPC は、バージンプラスチックを使用した WPC と同等の曲げ強度と引張強度を備えている [318]。自然環境での最終用途を考える場合、WPC による水の吸収とその結果としての厚さの膨張は最も重要な特性である [317]。再生プラスチックを使用した WPC とバージンプラスチックを使用した WPC の吸水率の比較について、異なった研究結果が得られている。二つが同等であるという報告がある [319]。一方で、バージンプラスチックを使用した WPC が優れているという報告もある [320]、または再生プラスチックの方が優れているという研究結果もある [321]。

曲げ強さ、引っ張り強さ、吸湿性とは対照的に、ほぼすべての研究で、再生プラスチックから作られた WPC の衝撃強さの値は、バージンプラスチックから作られたものよりも低いことが示されている [318]。再生プラスチックは、様々なソースから入手できる。また、再生プラスチックは保管期間や再生処理条件が異なるため、材質によって性能が異なる場合がある。再生プラスチックを使用した WPC の研究はまだ課題が多い。

3.7. クラスタ 6 : FRP のリサイクル

六番目のクラスターは FRP のリサイクルである。FRP に使用されるプラスチックは、熱可塑性樹脂（PE、PU、PP など）と熱硬化性樹脂（エポキシ、ビニールなど）に分類される。熱可塑性樹脂は、枝分かれした粒子構造、柔らかい特性、及び基本的な形状を保持する能力を備えている。一方、熱硬化性樹脂は、しっかりと結合し、架橋した構造のため、形状を変更したり、モノマーに戻したりすることが困難である [317]。

FRP のリサイクルには、マテリアルリサイクルとケミカルリサイクルの二つの方法がある [317]。マテリアルリサイクルでは、選別、切断、細断、破碎の後、高速ミルまたはロータリーカッターで 50 μm 未満から 10 mm までの粒子にサイズが縮小される。次に、サイクロンとふるい、または静電分離機を使用して、粗い成分(繊維)と細かい成分(粉末)に分離される。通常、大部分が繊維質である粗い粒子は、バルク成形コンパウンド複合材料で再利用できる。微粒子、主に粉末は、バルク・モールドディング・コンパウンド及びシート・モールドディング・コンパウンドの複合材で再利用できる [322]。破碎した FRP 廃棄物をコンクリート骨材として使用する可能性についての多くの研究がある。FRP 廃材をコンクリートに練り込むことで、圧縮強度、耐衝撃性、曲げ強度を高めることができる。FRP 廃材のコンクリートへの混合比率を高めることで、これらの特性が向上する。

ケミカルリサイクルには、低温加溶媒分解、亜超臨界加溶媒分解、解糖、加水分解などの方法がある [323]。FRP のケミカルリサイクルの主な目的は、プラスチックではなく繊維の回収とリサイクルであり、このプロセスに関する幾つかの研究が行われている。一方、プラスチックもケミカルリサイクルの過程で分解・回収できるという研究報告がある。例えば、熱硬化性 FRP から解重合されたエチレンオリゴマーは、高強度と弾性率を備えた高度なエポキシ材料を生成するための反応成分として再利用できる [324]。触媒として塩化亜鉛とエタノールを使用したケミカルリサイクルは、分解されたマトリックス・ポリマー（decomposed matrix polymer : DMP）をオリゴマーとして生成する。反応成分として DMP を使用し、FRP 再生のために 15 重量%の DMP を添加すると、得られる架橋ポリマーは、DMP を含まないバージンポリマーと比較して、高い強度と弾性率を維持する [325]。解糖は、エポキシ樹脂をモノマーに分解し、化学物質の生成に使用できる可能性がある [326]。

リサイクル FRP は、航空機、自動車、風力タービン、建設、家庭用品、スポーツ用品などの用途で使用され始めている。その適用範囲を拡大し、様々な FRP 廃棄物の安全で経済的なリサイクル方法を開発するためにさらなる研究が必要である。

4. 考察

前のセクションでは、プラスチックリサイクル研究の主な分野と傾向を体系的にレビューした。以下では、議論を大きく三つの視点に分けて展開する。最初に、萌芽的なクラスターの特徴と研究動向について考察する。二番目に、持続可能性と処理コストの視点から、代表的なリサイクル方法について考察する。三番目に、ナショナルとグローバルの視点からプラスチックのリサイクルの在り方について考察する。

最初の視点として、プラスチックリサイクルの萌芽的な研究分野について議論する。表 2-5 に、平均出版年数が 2017 年以降の新しいサブクラスターを示す。

表 2-5：萌芽的なサブクラスターの概要

番号	研究トピック	平均出版年数	論文数	引用数	引用数/論文数 比率
1-4	プラスチックの生分解性	2018.7	521	2,028	3.9
1-5	バイオプラスチック	2017.9	396	885	2.2
3-1	プラスチック再生素材の コンクリートでの利用	2017.1	316	2,028	6.4
3-2	プラスチック再生素材の アスファルトでの利用	2017.5	236	734	3.1

表 2-5 の各サブクラスターに共通する点は二つある。一つ目は、現在主流のリサイクル方法であるマテリアルリサイクルでもケミカルリサイクルでもない、第三のリサイクル方法を追求するために研究が行われていることである。マテリアルリサイクルの平均出版年数は 2009.9 年、ケミカルリサイクル(熱分解)の平均出版年数は 2013.5 年であり、どちらも表 2-5 に示したクラスターよりも古い。二つ目は、表 2-5 で研究されているリサイクル方法は二酸化炭素の排出量が少ないことである。生分解性プラスチックが微生物の働きで分解されるとき、排出される二酸化炭素の量は、マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルよりもはるかに少なくなる。バイオプラスチックは、植物などの再生可能な資源と微生物の働きによって生み出される、本来的にカーボンニュートラルな素材である [159,169]。プラスチック再生素材をコンクリートまたはアスファルトに混合することにより、追加の二酸化炭素排出量を少なくすることができる。

これらの萌芽的な研究にはまだ課題が残されている。サブクラスター 1-4 の「プラスチックの生分解」については、プラスチックの種類別に生分解機構を解明し、最適な微生物や操作条件を探索する必要がある。サブクラスター 1-5 の「バイオプラスチック」については、より安価な製造方法と機械的特性を改善したバイオプラスチックの開発が必要である。サブクラスター 3-1 の「プラスチック再生素材のコンクリートへの利用」については、強度や耐久性の向上、物性劣化を補う添加剤の開発が重要な課題として残されている。サブクラスター 3-2 の「プラスチック再生素材のアスファルトへの利用」については、実際のフィールドプロジェクトで道路の耐久性を実証することが重要である。

二つ目の視点として、持続可能性と加工コストの観点からリサイクル方法について考察する。マテリアルリサイクルは、プラスチックからプラスチックをリサイクルできる理想的なリサイクル方法である。一方で、マテリアルリサイクルされた再生素材は一般的に品質や強度が低下し、使用後の再生プラスチックを再度マテリアルリサイクルすることは困難である [6]。特に、一般廃棄物のプラスチックをマテリアルリサイクルする場合には、著しい品質や強度の低下が生じる。マテリアルリサイクルは、同じ材料を何度もリサイクルできないという点で、持続可能性の面で課題がある。マテリアルリサイクルは比較的小規模な設備で生産できるため、設備投資の負担が軽く、エネルギー使用量も比較的小さいため、ケミカルリサイクルや生物学的リサ

イクルに比べて処理コストが安価である [6]。再生プラスチックのユーザー企業は、再生プラスチックに対してバージンプラスチックよりも安い価格を要求しており、この点でマテリアルリサイクルは完全に商業ベースに乗っている。

熱分解などのケミカルリサイクルは、再生プラスチックの品質や強度の低下がほとんどなく、同じ材料を何度でもリサイクルできるという点で、より持続可能性が高く優れている。一方で、現在の技術では、ケミカルリサイクルはより多くのエネルギーを消費し [7,8]、より大量の二酸化炭素を排出することからマテリアルリサイクルや生物学的リサイクルと比べて持続可能性の点で課題が残されている。ケミカルリサイクルには化学プラントの建設が必要であり、生産規模の大きなプラントでない限り、一般的に処理コストが高くなる [89,122]。現在は比較的小規模なケミカルリサイクル工場が多く、処理コストがマテリアルリサイクルに比べて高くなる傾向にある。

生物学的リサイクルは、大きく二つのタイプに分類できる。一つの方法として、微生物を利用して化石資源由来のプラスチックを生物分解する方法がある。もう一つは、一部のプラスチックは生分解性であるため、特定の自然条件下で自然分解させる方法である。どちらの方法も、プラスチックの分解に大きなエネルギーを必要としないため、持続可能性の観点から優れている [146]。前者はまだ最適な微生物や分解メカニズムの研究段階であり、工業化されていないため、処理コストも不明である。後者については、PLA などの生分解性プラスチックはリサイクル方法が他のプラスチックと異なる。このため、消費者による分別排出が重要となるが、見た目だけではプラスチックの種類を判別することは困難である [169]。リサイクル方法が確立されていないという点で持続可能性の観点からの課題がある。生分解性プラスチックの工業化は進んでいるが、市場規模はまだ小さく [179]、一般的なバージンプラスチックに比べて生産コストが圧倒的に高い水準にとどまっている [163]。

第三の視点として、プラスチックのリサイクルを四つの課題に分け、ナショナルとグローバルの観点から議論する。一つ目の課題として、プラスチックリサイクルの論文数の多い国について、リサイクル率や埋立率などのプラスチック廃棄物の処理状況を比較しながら議論を行う。

現在および過去のプラスチック廃棄物およびリサイクル研究に関するデータを収集し、それらの間の関係を分析し、各国の論文数を数値化した。表 2-6 は、クラスター1 の論文数を国別にカウントし、論文数の多い国から順に並べ、プラスチック一般廃棄物の排出量、リサイクル率、エネルギー回収率、焼却率、埋立率、未処理率、環境意識、及び人口を記載している。

論文数で第 1 位の中国は、掲載されている欧州諸国よりもリサイクル率が低く、上位 10 か国の平均よりも埋立率が高くなっている。中国のプラスチック廃棄物の 6%が適切に処理されておらず、環境に放出されている可能性がある。一人当たりのプラスチックの一般廃棄物量は、米国に次いで 2 番目に多い。これらの点で、中国は CE を実現する上で大きな課題に直面している。一方、国民の環境意識は非常に高い。これらの課題に対処するために、中国政府は近年、プラスチック廃棄物に対する規制を強化し、プラスチック廃棄物を処理する方法に関する研究への資金を増やしていると、中国のプラスチック産業の業界団体である「中国プラスチック加工産業協会」の責任者は述べている。このような中国政府の取り組みも、論文の掲載数を押し上げる要因になっていると考えられる。

表 2-6 クラスター 1 の論文数の多い 10 か国におけるプラスチック廃棄物の処理状況

論文 順位	国名	論文数 シェア	データ 取得年	一般 廃棄物量 (百万トン)	リサイクル 率	エネルギー リカバリー率	単純焼却 率	埋立率	未処理率	環境 意識	人口 (百万人)
1	中国	12.4%	2020	130.3	28.0%	N.A.	32.0%	34.0%	6.0%	92%	1410.9
2	米国	11.1%	2018	35.7	8.7%	15.8%	0.0%	75.6%	<1.0%	71%	331.5
3	イタリア	7.5%	2018	3.6	31.4%	32.8%	0.0%	35.8%	<1.0%	86%	59.4
4	ドイツ	6.9%	2018	5.3	38.6%	60.7%	0.0%	0.7%	<1.0%	81%	83.2
5	英国	6.7%	2018	4.0	32.0%	45.7%	0.0%	22.4%	<1.0%	86%	67.2
6	スペイン	6.2%	2018	2.6	41.9%	19.3%	0.0%	38.8%	<1.0%	85%	47.4
7	インド	5.9%	2016	8.5	5-25%	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	82%	1380.0
8	日本	5.2%	2021	4.2	25.1%	62.0%	7.6%	5.4%	<1.0%	56%	125.8
9	ブラジル	4.7%	2018	7.9	2.2%	N.A.	N.A.	59.5%	24.4%	86%	212.6
10	オランダ	3.2%	2018	0.9	33.7%	65.8%	0.0%	0.4%	<1.0%	73%	17.4

データソース: 米国のデータは米国環境保護庁から取得 [86]。欧州諸国のデータは Plastics Europe から取得 [87]。日本のデータは、プラスチック循環利用協会から取得 [327]。中国のデータは、Luan 他の論文から取得 [328]。インドのデータは、Liang 他の論文 [329] 及び Siddiqui 他の論文から取得 [330]。ブラジルのデータは、Sandro 他の論文から取得 [331]。年の列には、これらの参考文献でデータが取得された年が記載されている。環境意識は、できるだけプラスチック包装の少ない製品を購入したい人の割合を示している [332]。

論文数で第 2 位の米国は、上位 10 か国の中で埋立率が最も高い。論文数は上位にあるものの、その高い研究力がプラスチックのリサイクル率向上に活かされていない。米国は国土が広いと、埋立が最も経済的な処分方法とみなされていると考えられる。一人当たりのプラスチックの一般廃棄物量は、上位 10 か国の中で最も高くなっている。埋立は CE において最も好ましくない処理方法であり、この問題を解決するために米国はプラスチックリサイクルの研究に今まで以上に積極的に取り組むべきである（例えば、埋立よりも経済的なリサイクル方法の確立に向けた研究）。また、米国における先進的なリサイクル研究の成果を積極的に活用し、リサイクル率や埋立率を向上させる必要がある。埋立よりも経済的なリサイクル技術が実行可能になるまでの間は、米国は埋立てられる廃棄物の蓄積と環境への影響を軽減する政策を通じて、既存の技術を集中的に商業化する必要がある。

表 2-6 に掲載された欧州の 4 か国（イタリア、ドイツ、イギリス、スペイン）は論文数の点で中間にランクされており、掲載されたアジア諸国やアメリカよりもリサイクル率が高い。一人当たりプラスチックの一般廃棄物の量は、上位 10 か国の平均に近い。総じて環境意識が高く、これらの要因が論文数の増加につながっていると考えられる。

論文数 7 位のインドは、幅はあるもののリサイクル率が低い。一人当たりのプラスチックの一般廃棄物の量は、上位 10 か国の中で最も少なくなっている。インドは 10 か国の中で一人当たりの国内総生産

(Gross Domestic Product : GDP) が最も低く、その経済規模を考えるとインドの論文は多いと言える。インドでは、埋立率、エネルギーリカバリー率、未処理率など不明な数値が多く、政府が統計制度を整備しデータを収集する必要がある。インド政府は最近、使い捨てプラスチックの禁止を発表しており、プラスチックのリサイクルに関する研究を奨励している可能性がある。

論文数 8 位の日本は、欧州 4 カ国や中国よりもリサイクル率が低い。エネルギーリカバリー率は高く、埋立率が低いのが特徴である。一人当たりのプラスチックの一般廃棄物の量は、10 か国の中で 2 番目に少ない。日本の環境意識は上位 10 か国の中で最も低く、環境への関心が低いことが論文数の少ないことと関係している可能性がある。

論文数で 9 位にランクされているブラジルは、上位 10 か国の中で最もリサイクル率が低く、米国に次いで 2 番目に埋立率が高い。プラスチック廃棄物の 24.4% が適切な処理なしに環境に放出されている可能性があり、これは環境と人間の健康にとって重大な問題である。これらの点でブラジルは、CE の実現において大きな課題を抱えている。国の経済力は小さく、10 か国の中で 2 番目に小さい一人当たり GDP であるにもかかわらず、論文数でトップ 10 にランクされていることは、研究者がこれらの問題を解決したいと考えていることを示唆している可能性がある。

論文数で 10 位にランクされたオランダは、上位 10 か国の中でリサイクル率が高く、埋立率が最も低くなっている。欧州諸国の中で CE の進展度合いは、ドイツに匹敵していると考えられる。論文数が 10 位にとどまっているのは、上位 10 か国の中で最も人口が少ないためと考えられる。

二番目の課題は、プラスチック廃棄物を国内で完結して処理するか、グローバルに処理するかについての議論である。根本的な問題は、現在の研究動向が、個々の国だけでなく世界全体のプラスチック廃棄物に関する問題を解決できるかどうかである。表 2-6 では、各国内の廃棄物処理のみに焦点を当てているが、国際貿易が多くの国で廃棄物の処理に影響を与えていることに注意する必要がある。

プラスチック廃棄物の処理の負担は、各国が均等に負っておらず、主に中国が引き受けてきた。2010 年代半ばまで、中国は世界で輸出されるプラスチック廃棄物の 40~50% を輸入しており、そのことにより、米国、欧州、日本などの先進国で排出されたプラスチック廃棄物は安定的に処理されてきた [333]。先進国で報告されているリサイクル率の数値には、海外に輸出された後にリサイクルされた廃棄物の量が含まれていると推測される。中国は 2017 年からプラスチック廃棄物などの輸入規制を段階的に強化し、2018 年にはプラスチック廃棄物の輸入量はほぼゼロになった [329]。その結果、中国のプラスチック廃棄物の輸入禁止後、米国のプラスチックのリサイクル率は 2015 年の 9.1% から 2018 年には 4.4% にまで減少した [334]。中国への輸出に依存していた先進国では、プラスチック廃棄物の処理能力が大幅に不足し、リサイクルの原料となるプラスチック廃棄物の価格が暴落している [335,336]。中国のかつての輸入量に一つの国で取って代わることができる国がないため、東南アジアなどの多くの発展途上国がプラスチック廃棄物の輸出先国になっている [337]。2019 年のプラスチック廃棄物の輸出量の上位国は、降順でドイツ、日本、米国である [338]。これらの国々は現在、中国への輸出ではなく、それぞれの地域内で経済規模が比較的小さい国への輸出を増やしている（ドイツから東ヨーロッパ、日本から東南アジア、米国からメキシコとアジア） [338]。

これに対し、東南アジア諸国などでは、自国の環境汚染を懸念して政府がプラスチック廃棄物の輸入を制限する動きがあり、これらの発展途上国への輸出は年々困難になっている [329]。2021 年には、バーゼル条約という国際条約が発効し、汚れたプラスチック廃棄物を輸出する際には輸入国の同意が必要になった。これは先進国から発展途上国へのプラスチック廃棄物の輸出にとってさらなる逆風となる [334]。

プラスチック廃棄物の理想的な解決策の一つは、廃棄物の発生国でリサイクルされ、再生素材として消費されることである。本研究では、この考え方を発生国消費原則と呼ぶ。発生国消費原則では、廃棄物の発生国が廃棄物を適切にリサイクル・処理し、再生素材として消費する責任を負うべきである。この原則の利点は規範的なものである。先進国は発展途上国よりも多くのプラスチックを消費し、廃棄している。前者は、廃棄物とそれに伴う環境的および社会的負担を後者に課すべきではない。この原則のデメリットは、経済的な実現可能性に欠けることである。再生プラスチックは、強度と品質の点でバージンプラスチックに劣る場合が多いため、再生プラスチックの国内需要を喚起することが難しく、再生プラスチックへの需要が少ないことによって、リサイクルされる廃棄物の量が制限される傾向にある。また、発展途上国の市場ではプラスチック素材の価格が安いことが強く求められており、再生プラスチックへの需要が先進国よりも高い。さらに、プラスチック廃棄物を処理するコストは、一般的に先進国で高くなるため、先進国ではプラスチック廃棄物の処理能力を高め、処理コストを削減する必要がある [339]。このような状況で、輸出国の廃棄物処理業者が経済合理性のみを追求すると、プラスチック廃棄物が輸出される可能性が高くなる。しかし、発生国での廃棄物処理は必ずしも経済的に実行不可能というわけではない。一部のプラスチック廃棄物は、依然として資源としての経済的価値を持っている。さらに、廃棄物を排出する国は（主に先進国）、多くの場合、廃棄物を適切に処理するのに十分な能力を備えている。

もう一つの原則は、グローバルに廃棄物の処理を行う国際分業原則である。この原則によれば、プラスチック廃棄物を排出する国は、国内でそれを処理する責任はないが、最も経済的に効率的な方法を模索する必要がある。これには、廃棄物の国際取引が含まれる。これまでの幾つかの先行研究では、先進国と発展途上国が協力して、高品質の廃棄物がリサイクルのために発展途上国に輸出され、適切に処理されるグローバルな循環経済システムを構築する必要があることを示唆している [336,337]。国際分業原則が実現すれば、輸出国と輸入国の両方の総処理コストを最小限に抑えることができるというメリットがある。先進国から発展途上国への経済協力とビジネスマッチングは、後者のリサイクルシステムの精度と能力を向上させる可能性がある。国際貿易を阻害すると、経済の均衡が望ましくない方向にシフトする。例えば、マテリアルリサイクルされたプラスチック再生素材は中国では値段が安いことから、人気が高い。従って、原料としてのプラスチック廃棄物には大きな需要がある。中国では、プラスチック廃棄物を輸入できない現状において、回収率（リサイクル率）の向上によるプラスチック廃棄物の供給拡大が喫緊の課題となっている [339]。最近、中国のマテリアルリサイクル事業者がプラスチック廃棄物を確保するために日本に進出している。日本のプラスチック廃棄物を日本国内においてベレットやフレークなどの再生プラスチック原料に加工し、中国に輸出している [340]。原料に加工されたプラスチックはもはや廃棄物とは見なされないため、中国はそれらを輸入することができる。近年、このような取り組みが急増している。国際分業原則のデメリットは、輸入国の多くが発展途上国であり、プラスチック廃棄物の適切な処理を確保

するために必要な法制度、インフラ、財政能力、専門知識、および人的資源が不足している傾向があることである。このため、人間の健康と生態系の健全性を損なう不適切な方法で廃棄物が環境に放出されるリスクがある。

国際分業原則が機能するためには、輸出国は、廃棄物処理自体ではなく（またはそれに加えて）、輸出先国の廃棄物処理の能力開発に責任を持つべきである。また、廃棄物の流れや廃棄物処理のトレーサビリティを確保することも重要である。現在、先進国は、発展途上国に輸出された廃棄物がどのようにリサイクルされ、リサイクルの結果として発生する残渣（残留物）がどのように処理されるかを把握していない。これら幾つかの問題は、発展途上国が解決すべき懸念事項と考えられている。発展途上国の政府でさえ、自国の領域内でのプラスチック廃棄物のリサイクルの実態を認識していないことが懸念されている。輸入企業がプラスチック廃棄物を適切に処理するためには、処理の実態を明らかにすることが重要である。従って、輸出者と輸入者の双方が責任を持ってプラスチック廃棄物を処理するためのトレーサビリティシステムを構築する必要がある。例えば、輸入国におけるプラスチック廃棄物の動きを追跡する国際的なマニフェストシステムは効果的である。輸出者はマニフェストと呼ばれる管理票を廃棄物とともに輸入者（運搬者）に発行する。輸入者はマニフェストに、廃棄物がいつ、誰によって、どのように輸送され、どのように処理されたかを記載する。輸入者は、一定期間内にマニフェストを輸出者に返却しなければならない。マニフェストの内容の正確性を確保するために、輸出者または第三者機関が定期的な監査を実施する必要がある。輸出国および輸入国の政府は、このシステムの確立に関与する必要がある。あるいは、例えば国際的な NGO（Non-Governmental Organization）がシステムの運用に責任を負うことが考えられる。このようなマニフェストシステムは、プラスチック廃棄物の国際的なトレーサビリティを確保するのに大いに役立つ。

第三の課題として、国別の各サブクラスターの論文数のランキングに注目し、各サブクラスターの特徴と国別の傾向について考察する。表 2-7 は、クラスターとサブクラスターにおける各国の出版物のシェアと順位を示している。

クラスター1 全体で論文数が 2 位の米国は、幾つかのサブクラスターで 1 位にランクされており、これらのサブクラスターはいずれも平均出版年数が若く、近年論文数が急増している。米国が 1 位にランクされているサブクラスターとその平均出版年数は、「サブクラスター 1-4：プラスチックの生分解（2018.7）」、「サブクラスター 1-5：バイオプラスチック（2017.9）」、「サブクラスター 1-2：プラスチックリサイクルの LCA（2015.7）」と全体的に若い。対照的に、クラスター1 全体の論文数で 1 位にランクされている中国は、比較的古い平均出版年数を持つ一つのサブクラスターのみで 1 位にランクされている。即ち、「サブクラスター 1-1：熱分解によるリサイクル（2013.5）」という古いサブクラスターでのみ 1 位である。米国は、中国よりも新しい学術分野の研究が進んでいると考えられる。米国の埋立率が高いことを考えると、埋立てられたプラスチックの環境に配慮した処分を目的として、プラスチックの生分解性とバイオプラスチックに関する熱心な研究が行われている可能性がある。

表 2-7：クラスター 1、2、3 における論文数シェアと国別順位

クラスター 番号	研究トピック	順位									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	プラスチック	中国	米国	イタリア	ドイツ	英国	スペイン	インド	日本	ブラジル	オランダ
	リサイクル全般	12.4%	11.1%	7.5%	6.9%	6.7%	6.2%	5.9%	5.2%	4.7%	3.2%
1-1	熱分解による	中国	スペイン	インド	米国	英国	日本	イタリア	ポーランド	ドイツ	マレーシア
	リサイクル	11.0%	10.0%	9.5%	8.0%	6.0%	5.3%	4.1%	3.8%	3.5%	3.5%
1-2	プラスチックリサイクル	米国	中国	イタリア	ドイツ	英国	スペイン	日本	オランダ	デンマーク	スイス
	の LCA	16.4%	14.6%	9.0%	7.0%	6.5%	6.5%	6.3%	4.4%	3.7%	3.3%
1-3	マテリアル	ブラジル	米国	中国	イタリア	スペイン	ドイツ	インド	フランス	日本	スウェーデン
	リサイクル	9.7%	8.2%	8.0%	6.9%	5.7%	4.6%	4.2%	4.2%	4.0%	3.7%
1-4	プラスチックの	米国	中国	ドイツ	インド	英国	イタリア	ブラジル	日本	スウェーデン	カナダ
	生分解性	17.7%	17.1%	13.8%	6.7%	6.5%	4.6%	4.4%	3.8%	3.6%	3.6%
1-5	バイオ	米国	イタリア	英国	スペイン	中国	ドイツ	オランダ	ポーランド	インド	ポルトガル
	プラスチック	13.6%	12.4%	9.3%	8.3%	8.1%	7.8%	5.8%	5.6%	5.1%	3.8%
1-6	PVC の	日本	中国	インド	韓国	米国	ジョルダン	ドイツ	ロシア	オーストラリア	イタリア
	リサイクル	29.5%	17.9%	8.4%	5.3%	4.2%	3.2%	3.2%	2.6%	2.1%	2.1%
2	WEEE と	中国	米国	ドイツ	インド	日本	フランス	イタリア	韓国	英国	オーストラリア
	選別技術	25.8%	11.0%	6.5%	6.4%	6.4%	6.2%	6.1%	4.5%	4.2%	3.7%
2-1	WEEE の	中国	ドイツ	英国	米国	ベルギー	フランス	インド	イタリア	スイス	ブラジル
	リサイクル	13.2%	12.6%	9.4%	7.9%	7.4%	7.4%	6.8%	6.5%	5.0%	4.7%
2-2	分光選別	イタリア	ドイツ	フランス	中国	米国	スペイン	ブラジル	マレーシア	韓国	日本
		17.3%	13.8%	10.4%	10.0%	9.6%	5.0%	4.6%	4.6%	3.8%	3.8%
2-3	浮上選別	中国	日本	韓国	イタリア	オーストラリア	米国	ポルトガル	英国	トルコ	スペイン
		31.0%	15.0%	7.5%	6.4%	4.8%	4.8%	4.3%	4.3%	4.3%	3.2%
2-4	静電選別	フランス	アルジェリア	米国	ルーマニア	中国	韓国	ポーランド	日本	イタリア	カナダ
		39.0%	26.2%	15.6%	15.6%	9.2%	6.4%	4.3%	3.5%	2.8%	2.8%
3	プラスチック再生素材	中国	米国	オーストラリア	インド	スペイン	イタリア	ブラジル	マレーシア	英国	ポルトガル
	の建設分野での利用	17.5%	13.1%	8.4%	7.2%	7.0%	6.0%	4.7%	4.0%	4.0%	3.3%
3-1	プラスチック再生素材	インド	米国	イラク	中国	マレーシア	サウジアラビア	英国	イタリア	オーストラリア	アルジェリア
	のコンクリートでの利用	12.7%	7.0%	6.3%	5.7%	5.4%	5.4%	5.1%	4.7%	4.7%	4.4%
3-2	プラスチック再生素材	中国	米国	スペイン	オーストラリア	インド	イタリア	マレーシア	サウジアラビア	トルコ	ポルトガル
	のアスファルトでの利用	14.0%	11.4%	10.6%	10.6%	8.1%	7.6%	5.9%	4.2%	4.2%	3.8%

インドとブラジルは、「サブクラスター1-2：プラスチックリサイクルの LCA」において上位 10 か国に含まれておらず、一人当たりの GDP が低い国では、プラスチックリサイクルの LCA に関する研究が熱心に行われていない可能性がある。ブラジルは、「サブクラスター1-3：マテリアルリサイクル」において論文数 1 位となっている。この結果は、リサイクル率が低く、埋立率が高いブラジルでは、マテリアルリサイクルの推進が大きな課題であることが示唆している。「サブクラスター1-6：PVC のリサイクル」では、米国と欧州以外の国が上位を占めており、他のクラスターとは傾向が大きく異なる。サブクラスター1-6 では、出版数の順に、日本、中国、インド、韓国、ヨルダン、ロシアがトップ 10 に入っている。特に、日本は 1 位と論文数が最も多く、このサブクラスターの論文数が多いおかげで、日本はクラスター1 全体で 8 位にランクされている。日本では、PVC の処理がリサイクル推進の大きな課題として認識されていると推察される。対照的に、欧州と米国では、PVC が混入することはリサイクルの大きな障害とはみなされない可能性がある。

「サブクラスター2-1：WEEE のリサイクル」では、中国が 1 位にランクされ、欧州の幾つかの国がそれに続き、インドとブラジルが上位 10 位までにランクされた。この点で、サブクラスター2-1 はクラスター1 と似ている。プラスチックのリサイクルが社会問題になっている国は、WEEE も社会的関心が高いことを示している可能性がある。「サブクラスター2-2：分光選別」は、欧州諸国、特にイタリア、ドイツ、フランスが上位 3 位を占め、中国と米国がそれぞれ 4 位と 5 位であるという点で特徴的である。分光選別技術は、欧州で集中的に研究されている。マレーシア、韓国、日本などのアジア諸国もよく健闘している。「サブクラスター2-3：浮上選別」は、日本（2 位）、韓国（3 位）、トルコ（9 位）が精力的に取り組んでいるのが特徴である。「サブクラスター2-4：静電選別」は、フランス、ルーマニア、ポーランド、イタリアなど欧州諸国が突出しているのが特徴である。CE を実現し、循環の範囲をローカルからグローバル、そして地球規模にシフトするには、リサイクル能力を向上させる必要がある。本章でレビューした様に、マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクルの様な確立したリサイクル技術と、生物学的リサイクルの様な萌芽的なリサイクル技術が存在する。さらに、クラスター1 内のプラスチックリサイクルに関する最近のサブクラスターは、地球規模での CE に焦点を当てている。既に見たように、クラスター1 の萌芽的なサブクラスターは「サブクラスター1-4：プラスチックの生分解（2018.7）」と「サブクラスター1-5：バイオプラスチック（2017.9）」であり、これらは、「サブクラスター1-1：熱分解によるリサイクル（2013.5）」などよりも若い。

第四の課題として、プラスチックリサイクルの研究成果の世界的な技術移転の必要性について議論する。分析を通じて明らかになったもう一つの点は、国際的な技術協力の必要性である。リサイクルと廃棄物処理の能力は各国で均等に備わっていないため、効率的かつ効果的な廃棄物処理のための世界的な技術移転が必要である。

中国や米国などの先進国では、プラスチックのリサイクル（クラスター1）に関する研究が活発に行われていることが明らかになった。もちろん、このような研究成果は中国や米国（特に、リサイクル率が低く埋立率が高い米国）において実用化されることが望ましい。しかし、国際分業原則を推進するためには、これらの研究成果を廃棄物を輸入する発展途上国に移転することが重要である。技術移転の方法としては、先進国から発展途上国への専門家派遣、先進国の人材招聘による発展途上国のキャパシティ・ビルディング、研究開発成果に関する国際カンファレンスの開催などが考えられる。中国や米国などの先進国のリサイクル技術を持つ研究者や企業は、発展途上国への技術移転に積極的に取り組むことが期待

される。また、発展途上国の資金不足問題を解決するために、先進国の企業が途上国に進出し、プラスチックのリサイクル事業を立ち上げることも期待される。

クラスター 1 や 2 とは対照的に、クラスター 3 の上位 10 位には中国、米国、欧州以外の国（主に発展途上国）が含まれており、クラスター 1 及び 2 との乖離が顕著である。例えば、「サブクラスター 3-1：プラスチック再生素材のコンクリートへの利用」では、インドが 1 位で、次いでイラク（2 位）、マレーシア（5 位）、サウジアラビア（6 位）、アルジェリア（10 位）と続く。「サブクラスター 3-2：プラスチック再生素材のアスファルトへの利用」では、インドが 5 位で、マレーシア（7 位）、サウジアラビア（8 位）、トルコ（9 位）が続く。発展途上国や新興国では、建設分野でのプラスチックのリサイクル方法の研究が盛んに行われている。プラスチック廃棄物を建材に混合するリサイクル方法は、処理コストが比較的安く、大量のプラスチック廃棄物を処理できるという特徴がある。経済力の低い国は、これらの技術に大きな期待を寄せていると考えられる。インドのプラスチック産業団体「Plastindia Foundation」の会長によると、インド政府は、道路建設にプラスチック廃棄物を積極的に使用する政策を採用している（規制により、インドで発生する全プラスチック廃棄物の最大 20% を道路建設に使用する必要がある）。さらに、これらのサブクラスターの平均出版年数は比較的若く（サブクラスター 3-1：2017.1、サブクラスター 3-2：2017.5）、これらの研究トピックへの注目度は高く、活発な研究が行われている分野である。

このような現実には、これらの技術が発展途上国から先進国に移転するリバースイノベーションにつながる可能性がある。コンクリートへのプラスチック再生素材の利用については、強度や建設現場での取り扱いに課題が残っている。しかし、高い強度を必要としない構造物への適用や、コンクリートの軽量性を活かした新たな用途への期待は大きい。アスファルトにプラスチック再生素材を混入すると、強度と耐久性が向上することが数多くの研究で報告されており、道路建設における実際の適用例さえある。また、アスファルトにプラスチック再生素材を使用することで、道路建設コストが削減され、道路建設の経済性が向上するという研究結果も報告されている [302,303]。別の研究では、プラスチック再生素材をアスファルトと混合すると、アスファルト混合物の強度と耐久性が向上し、道路の寿命が延び、道路建設の環境への影響が軽減されることが報告されている [304]。

一方、建設分野でのプラスチック再生素材の利用は循環的ではなく一方向の使用であるとの指摘もできる。しかし、先進国で循環性を優先する場合であっても、可能な限りマテリアルリサイクルやケミカルリサイクルによって廃棄物を再生し、リサイクルしきれなかった廃棄物については先進国においても建設分野で利用することが望ましいことにも注意する必要がある。プラスチック廃棄物を環境に放出せず（埋立を含む）、できるだけ低コストで再利用するという観点から、プラスチック再生素材を建設分野で利用することは有力な選択肢であり、発展途上国では大きな期待が寄せられている。

5. 結論

本章においては、書誌情報分析を使用して、プラスチックリサイクルに関する 35,519 の出版物の概観をまとめ、萌芽的な研究トピックを特定し、包括的なレビューを実施して、研究の傾向と鍵となる重要な課題を解明した。具体的には、プラスチックリサイクルに関連する学術出版物から書誌データを収集した。学術データベース「Web of Science」から、検索用語「(plastic* OR chemical*) AND

(recycl* OR “circular economy”)」で収集されたデータを使用した。関連する学術出版物を取得した後、論文をノード、引用をリンクとして扱うことにより、引用ネットワークを作成した。直接引用法を採用した。引用ネットワークの最大のコンポーネントの中の論文に接続されていない無関係な論文を削除した。最大の連結成分を取得した後、ニューマンアルゴリズムであるトポロジカル・クラスタリング法を使用して、ネットワークをクラスターに分割した。このアルゴリズムを使用して、以前の書誌情報分析研究で適用されているモジュール性を最大化する規則に従って、クラスターをサブクラスターに分割した。

プラスチックリサイクルに関する研究テーマは、大きく次の六つのクラスターに分類できることが分かった。即ち、プラスチックリサイクル全般、電気電子機器廃棄物 (waste electrical and electronic equipment : WEEE)、建設部門におけるプラスチック再生素材の利用、ポリエチレン・テレフタレート (PET) のケミカルリサイクル、木材とプラスチックの複合材料への利用、繊維強化プラスチックのリサイクルである。これらのクラスターを抽出した後、より大きな三つのクラスターのサブクラスターと各クラスターについて包括的なレビューを実施した。

最大のクラスター (クラスター 1) はプラスチックリサイクルの全般的な課題に関するもので、プラスチックの生分解性、バイオプラスチック、熱分解、ライフサイクル・アセスメント (life cycle assessment : LCA) などのサブクラスターが含まれる。その中で、プラスチックの生分解性は、最も新しいサブクラスター (平均出版年、2018.7) であり、最も活発なトピックである。化石資源由来のプラスチックの生分解に関する多くの研究が行われているが、同時に生分解性プラスチックの研究も注目されている。前者はまだ研究段階で工業化には至っていないが、後者のポリ乳酸 (polylactic acid : PLA) やポリヒドロキシアルカノエート (polyhydroxyalkanoate : PHA) などは工業化されている。しかし、これらの製造コストが非常に高く、市場シェアは低い。一般的に、生分解性プラスチックは、他のプラスチックとはリサイクル方法が異なるため、消費者による分別が必要である。外観だけではプラスチックの種類が分かりにくく、リサイクル方法が確立されていないなどの問題点を指摘した。バイオプラスチックは二番目に新しいサブクラスター (平均出版年、2017.9) であり、論文数が急速に増加している。バイオプラスチックの定義は論文によって異なり、主に三つの異なる定義が使用されていることを指摘した。本章では、バイオプラスチックを再生可能な資源や材料に由来するポリマー、または微生物代謝によって合成されるポリマーと定義した。バイオプラスチックは本来的にカーボンニュートラルな素材であるが、エネルギーリカバリーや焼却などの処理に回されるとその環境的特性を発揮できないという問題がある。熱分解は比較的古いサブクラスター (平均出版年、2013.5) であるが、クラスター 1 の中で論文数が最も多い (論文数、772)。論文あたりの引用率も最大 (4.8) であるため、このサブクラスターはクラスター 1 の中心的なテーマとなっている。LCA は比較的新しいサブクラスター (平均出版年数、2015.7) であり、クラスター 1 の中で二番目に多くの論文 (論文数、568) がある。LCA に関する多くの研究結果を総合すると、マテリアルリサイクルは地球温暖化係数の点でケミカルリサイクルよりも優れているが、埋立てられる残留固形廃棄物の排出という点では劣っている。マテリアルリサイクルとケミカルリサイクルは競合するものではなく、プラスチック廃棄物の種類や状態に応じて補完的に利用すべきであることを指摘した。

二番目に大きいクラスター (クラスター 2) では、WEEE リサイクルに関する研究が急速に増加している (平均出版年、2014.8)。WEEE プラスチックに使用されている臭素系難燃剤 (brominated flame

retardants : BFR) は、人間の健康と生態系に有害である。有害な BFR 廃棄物は、人件費が安いアジア諸国などの地域に合法的または違法に輸送される。有害な臭素化低分子量化合物は、毎年世界中で 1,818 kg も環境に放出されており、特にアジアの処分場ではその課題が顕著である。BFR の処理はリサイクルを困難にし、これに対処するためかなりの努力が払われている。マテリアルリサイクルは WEEE プラスチックを処理するための最も望ましい方法であり、現在行われているリサイクルのほとんどはマテリアルリサイクルである。ケミカルリサイクルによる WEEE からの BFR の分離は、集中的に研究されているが、工業化されていない。

三番目に大きいクラスター（クラスター3）では、建設分野でのプラスチック再生素材の利用に関する研究が増加している。クラスター3 は、「プラスチック再生素材のコンクリートへの利用」（平均出版年数：2017.1）と「プラスチック再生素材のアスファルトへの利用」（平均出版年数、2017.5）の二つのサブクラスターで構成されており、どちらも若い研究分野である。コンクリートへの利用に関する論文の数（2028）は、アスファルトへの利用に関する論文の数（734）よりも多い。コンクリートへの利用に関する引用数/論文数比率は 6.4 で、アスファルトの 3.1 よりも高い。コンクリートへの適用は、アスファルトへの適用よりも熱心に研究されている研究テーマである。一方、コンクリートにプラスチック再生素材を混ぜて使用すると、強度や耐久性に劣り、現場での使用実績も少ない。アスファルトへの利用の場合、強度や耐久性、経済性が向上するという研究報告が多く、実際の道路工事での実用例がある。

国別では、中国と米国の論文数が最も多いことが判明した。具体的には、クラスター1 では、中国が 12.4%の論文数シェアで 1 位にランクされ、米国が 11.1%のシェアで 2 位にランクされた。クラスター2 では、中国が 1 位（25.8% のシェア）、米国が 2 位（11.0% のシェア）であった。本章におけるキー解明点の一つは、中国と米国が多くの研究分野で世界のリーダーであるということである。

対照的に、クラスター3 の上位 10 位には中国、米国、欧州以外の国（主に発展途上国）が含まれており、クラスター1 及び 2 との乖離が顕著であった。例えば、「サブクラスター3-1：プラスチック再生素材のコンクリートへの利用」では、インドが 1 位で、次いでイラク（2 位）、マレーシア（5 位）、サウジアラビア（6 位）、アルジェリア（10 位）と続く。「サブクラスター3-2：プラスチック再生素材のアスファルトへの利用」では、インドが 5 位、続いてマレーシア（7 位）、サウジアラビア（8 位）、トルコ（9 位）となった。これらの研究は発展途上国や新興国で活発に行われており、リサイクル方法としての経済性の高さから注目されていると考えられる。これらの技術は、先進国においても、他の方法でのリサイクルに適さない廃棄物の利用方法として考えるべきリバーシノーションである。本章における二つ目のキー解明点は、プラスチック再生素材の建設分野での利用に関する研究が発展途上国等で活発に行われていることである。

グローバルな循環経済を実現するために、プラスチック廃棄物についての発生国消費原則と国際分業原則、及びグローバルな技術移転について提案し、議論した。発生国消費原則では、プラスチック廃棄物は、それが発生した国で責任を持って適切に処理する必要がある。この原則によれば、廃棄物処理に伴う環境負荷は最小限に抑えられる可能性が高いが、経済合理性には疑問がある。国際分業原則では、廃棄物資源の国際取引を前提としており、先進国と発展途上国の間での分業が必要である。国際分業原則には、プラスチック廃棄物のグローバルな処理コストを最小限に抑えるという利点があるが、輸入国での不適切な廃棄物処理により、環境汚染を促進するという可能性が高い。ここでは、廃棄物のトレ

ーサビリティシステムの構築や先進国と発展途上国の間の双方向の技術移転など、両方の原則を促進するために必要な措置を議論した。

輸入国におけるプラスチック廃棄物の動きを追跡する国際的なマニフェストシステムは、トレーサビリティシステムを構築し、適切なプラスチック廃棄物処理を確保するための有効な方法であると提案した。具体的には、輸出者はマニフェストと呼ばれる管理票を廃棄物とともに輸入者（運搬者）に発行する。輸入者はマニフェストに、廃棄物がいつ、誰によって、どのように輸送され、どのように処理されたかを記載する。輸入者は、一定期間内にマニフェストを輸出者に返却しなければならない。マニフェストの内容の正確性を確保するために、輸出企業または第三者機関は定期的な監査を実施する必要がある。このようなマニフェストシステムは、プラスチック廃棄物の国際的なトレーサビリティを確保するのに大いに役立つ。国際マニフェストシステムは、世界のプラスチック廃棄物処理に対する本章での研究貢献である。両方の原則を現実的に進めるための手段を特定するには、さらなる研究が必要である。

また、グローバルな技術移転の必要性についても議論した。特に、プラスチック再生素材の建設分野での利用に関する研究は発展途上国で盛んに行われていることが明らかとなった。プラスチック再生素材の建設分野における利用は循環的ではないという批判もあるが、建設分野での利用に伴う経済性や環境改善効果を考慮すると、その意義は大きい。先進国でさえ、建設分野での利用には一定の合理性がある。このため、この分野の研究の発展途上国から先進国への技術移転（リバーシノベーション）も積極的に進めるべきである。国際協力の理論では、プラスチック廃棄物の適切な処理とリサイクルシステムを実現し、循環経済の実現を促進するために、先進国と発展途上国の間の双方向の技術移転が不可欠である。

なお、第三章は以下の学術誌で出版した論文に基づいている。

Tsuchimoto, I.; Kajikawa, Y. Recycling of Plastic Waste: A Systematic Review Using Bibliometric Analysis. *Sustainability* **2022**, *14*, doi:10.3390/su142416340.

2022/12

第四章：考察と結論

1. 前二章に基づく論点抽出

第三章では、CI の事例としてプラスチックリサイクル問題を取り上げ、技術調査を中心とした公開情報調査を行った。方法論としては、論文データベースの Web of Science において「(plastic* OR chemical*) AND (recycl* OR “circular economy”)」を検索用語にしてプラスチックリサイクルに関する論文 56,408 本を選出し、これらについて書誌情報分析を行った結果、35,519 本の論文をクラスターに分類した。クラスターの情報を基に、どのような研究分野が存在するか、研究分野ごとの特徴は何か、萌芽的な研究トピックは何か、プラスチックリサイクルを進めるために必要な課題は何かについて分析とレビューを行った。

最大のクラスター（クラスター 1）は、プラスチックリサイクル全般に関わる研究であり、プラスチックの生分解性、バイオプラスチック、熱分解（ケミカルリサイクル）、LCA 等のサブクラスターが含まれていた。これらのサブクラスターの中で最も若いものはプラスチックの生分解性であり（平均出版年：2018.7）、最もアクティブに研究されている。生分解性プラスチックは既存のプラスチックが混ざった状態ではリサイクルができず、消費者がプラスチック製品の外観だけで生分解性プラスチックとその他のプラスチックを分別することは難しいことから、生分解性プラスチックはリサイクル可能性の観点で大きな課題を抱えていることを指摘した。バイオプラスチックは二番目に若いサブクラスターであり（平均出版年数 2017.9）、近年急速に論文数が増加している。バイオプラスチックの定義は論文ごとに異なっており、大きく 3 つに分類されるが、総じて生分解性プラスチックを含めるか含めないか、生分解性プラスチックの範囲をどのように扱うかという点に違いがある。バイオプラスチックという総称は定義によってその特徴やリサイクル方法が異なっており、消費者にも混乱を引き起こしていることが報告されている。第三章では、バイオプラスチックを「再生可能な資源や材料に由来するポリマー、または微生物の代謝によって合成されるポリマー」と定義し（以下、「バイオマスプラスチック」という）、主にリサイクル可能性の観点からレビューした。バイオマスプラスチックはエネルギーリカバリー処理をしないとカーボンニュートラルという特性が活かせないなどの課題がある。

二番目に大きいクラスター（クラスター 2）は、電気電子機器廃棄物のリサイクルに関するサブクラスターと、プラスチック廃棄物の選別技術に関するクラスター群から構成される。電気電子機器に用いられるプラスチックには臭素系難燃剤が混入されることが多いが、臭素系難燃剤は人体に有害であり、またリサイクルを難しくする要因となっている。プラスチックの選別技術は、マテリアルリサイクルの品質劣化の抑制、臭素系難燃剤入りのプラスチックの選別などの観点で非常に重要な研究テーマであり、分光選別、浮上分離、静電選別などの研究が盛んに行われている。

三番目に大きいクラスター（クラスター 3）は、プラスチック再生素材の建設分野での利用に関する研究である。このクラスターは、プラスチック廃棄物から再生された素材をコンクリートの骨材の代替として活用するサブクラスター 1（平均出版年数 2017.1）と、再生素材をアスファルトの添加剤として活用するサブクラスター 2（平均出版年数 2017.5）から構成される。いずれのサブクラスターも若く、近年論文数が伸びている。プラスチック再生素材のコンクリートやアスファルトでの利用は、大量のプラスチック廃棄物を処理できる可能性があり、また、そのコストも他のリサイクル方法に比べて低いと考えられることから、有

望な処理補法として期待される。クラスター 1 とクラスター 2 を国別の論文数で見ると、先進国のシェアが高く、中でも中国と米国のシェアが突出して高くグローバルリーダーとなっている。一方、クラスター 3 においては、インド、イラク、マレーシア、サウジアラビア、アルジェリア、トルコといった発展途上国や新興国（以下、発展途上国等）という）が論文数上位 10 位内にランクインしており、発展途上国等において積極的に研究されていることが判明したことは大きな解明点である。再生素材の建設分野での利用は、先進国においても意義があるものであり、これらの利用を促進する技術は発展途上国等から先進国に移転されるリバースイノベーションと考えることができる。

プラスチック廃棄物を発生した国内でリサイクル処理する方法と、海外に輸出して輸出先国でリサイクル・処理する方法が考えられ、第三章では前者を発生国消費原則、後者を国際分業原則と定義し、そのメリットとデメリットを考察した。発生国消費原則のメリットの一つは、発生国の責任でプラスチックが適切にリサイクルされることからプラスチックによる環境汚染の問題を最小化できることである。一方、プラスチック廃棄物の処理を発生国内に限定すると、廃棄物の量に国内の再生素材の需要が追いつかない、処理費用が高くなることなどがデメリットである。国際分業原則におけるメリットは、プラスチック再生素材及びその原料である廃棄物に対するニーズは輸出先国（多くの場合、発展途上国等）の方が高く、輸出によりニーズとシーズが合致し、処理コストを最小化できることである。デメリットは輸出先国の廃棄物処理能力が発生国よりも劣っていることが多く、不適切に処理された廃棄物が環境中に流出し、海洋プラスチック問題などを深刻化させる可能性が高いことである。国際分業原則を機能させるには、輸出先国での廃棄物の適正処理を促進するための発生国（先進国）からの技術、制度、インフラ、資金、人材、ノウハウなどの支援が必要である。また、輸出された廃棄物が適切に管理・処理されたことを確認するために廃棄物のトレーサビリティの確保が必要であり、廃棄物の国際的なマニフェスト制度の確立が望まれる。

第三章の結果ならびに考察を踏まえると、我が国におけるプラスチックリサイクル問題のシステム転換を促進するために以下の論点について考察することが重要である。

（論点 1）「我が国はプラスチック廃棄物の処理にあたって、発生国消費原則と国際分業原則のどちらを追求すべきか。それぞれを推進する場合の課題と方策は何か。」

プラスチックのリサイクルを進める上で、国内で完結させるのか、グローバルに展開するのかによって、必要となるインフラや制度が異なり、各ステークホルダーが果たすべき役割も違う。どちらの原則が日本にとって良い選択なのか、この論点を考察することは重要である。

（論点 2）「プラスチックの適正処理の観点から、生分解性プラスチックとバイオマスプラスチックの意義は何か。また、これらの普及を進めるための課題と方策は何か。」

第三章の分析によると、プラスチックの生分解性とバイオプラスチックは、近年最も精力的に研究されている萌芽的領域であり、研究動向から判断するとプラスチックリサイクルを進める上で特に将来性のあるテーマである可能性がある。一方で、生分解性プラスチックのリサイクルは容易でない、バイオマスプラスチックはエネルギーリカバリー処理をしないとカーボンニュートラルという特性が活かせないなどの課題も指摘されている。これらの意義と課題を考察し、解決に向けての方策を議論することは、我が国におけるプラスチックリサイクル問題のシステム転換を促進する上で重要である。

（論点３）「我が国においても、プラスチック再生素材の建設分野での利用を進めるための課題と方策は何か。」

第三章の分析によると、海外、特に発展途上国等ではプラスチック再生素材の建設分野での利用に関する研究が盛んに行われている。建設分野での利用は大量のプラスチック廃棄物を安価に処理できる可能性があり、我が国においてプラスチックリサイクル問題の転換を促進する上で議論すべき重要な論点である。

また、第二章では、我が国の CI の活用状況を明らかにするとともに、CI を有効活用する方策や成功要因について考察を行った。方法論としては、CI 活動を行っているとしている日本の製薬企業 A 社、製薬企業 B 社、海運企業 C 社、ビジネスホテルチェーン D 社の 4 社（グループ I）、CI 活動は行っていないものの調査分析活動（Survey and Analysis：SA）を行っている競争力の高い日本の機械メーカー E 社、電気機器メーカー F 社の 2 社（グループ II）についてインタビューを行った。また、分析を深めるために、普段は CI を実施していないが例外的に CI を経験した日本の医療機器メーカー G 社、米系コンサルティング会社の日本支社で、米国の CI と日本の CI に精通している企業 H 社、フランスの CI 受託企業（CI エージェンシー）で、欧州の CI と日本の CI に精通している企業 I 社にもインタビューを行った。

インタビュー調査の結果、グループ I の企業とグループ II の企業のプロセスとスコープに相違はないことが判明した。H 社によると、日本の競争力のある大手企業では、意識せずに CI 類似の活動を行っているとしており、第二章においては、グループ II の企業も CI 活動を行っているとみなして考察を行った。先行研究では CI のスコープは競合分析に限定されるという説と広くビジネス環境全般を対象としているという説に分かれていたが、今回のグループ I とグループ II の企業に関する調査では、CI のスコープは表 4-1（再掲）に示すように、競合関係にとどまらず、製品、技術、顧客、市場、サプライヤー（供給）、環境問題、政府・規制、政治など広くビジネス環境全般であることが判明した。

A～E 社は、事業部門から独立した専任の CI 部門を設置して CI 活動を行っている。一方、F 社は CI 部門を設置せずに、必要な時だけ社内の各部門から人を集めてアドホックなタスクフォースを設置して CI を行っている。本研究では、前者を組織的 CI、後者を非組織的な CI と定義して、それぞれのメリット・デメリットを考察した。例えば、組織的 CI のメリットの一つは事業部門から独立して制約なく事業部門の提案を評価できることであるが、デメリットとして CI 部門は事業部門で前提とされている業務知識や制約条件の知識が不足するため妥当性に欠ける CI 結果となる恐れがある。非組織的 CI のメリットの一つとして、事業部門も含めた各部門から有為な人材を集めることができるので、専門知識の不足と言った問題が起きにくいことがあげられるが、デメリットとして事業部門への検証能力が弱まり、CI 機能が制限され、倫理規定の徹底が不十分になるなどが考えられる。

表 4-1 : CI のスコープ (再掲)

会社 スコープ	グループ I (CI 実施企業)				グループ II (SA 実施企業)	
	A	B	C	D	E	F
(a) 競合企業(競合関係)	○	○		○	○	○
(b) 製品・サービス	○	○		○	○	○
(c) 技術	○	○	○			○
(d) 顧客	○	○	○	○	○	○
(e) 市場	○	○	○	○	○	○
(f) サプライヤー (供給)	○			○		○
(g) パートナー・協力企業	○			○		○
(h) 経済	○	○	○	○	○	
(i) 社会・歴史・政治	○	○	○		○	○
(j) 政府・規制	○	○			○	○
(k) 環境問題	○		○		○	○
(l) M&A	○	○		○		○
(m) 組織内環境	○					

I 社は多くの日本企業から CI の受託を受けているが、日本企業は CI 結果を受け入れることに後ろ向きな傾向があると報告している。この原因として、日本企業には CI の知識の蓄積が少な過ぎるので知識吸収力 (Absorptive Capacity : AC) が低いことを I 社は指摘している。例外的に CI を行った G 社の事例では、CI 結果に対する激しい拒否反応が事業部門などで起きて、CI 結果が無視されようとしていた。B 社や D 社でも事業部門が CI 結果を無視しようとするケースが指摘されている。このような拒否反応を防止し、CI 結果を AC につなげ有効活用するためには、促進要因として①知識吸収に貪欲な組織文化・風土、②意思決定ルールの明確化、③CI 部門と CI を活用する部門 (事業部門等) との間の信頼関係の構築が重要であると考えられる。

第四章の考察を行う上で、第二章から得られる重要な視点は次の二点である。

(1) CI のスコープは、技術のみならず、製品、顧客、市場、サプライヤー（供給）、環境問題、競合関係、政府・規制、政治など幅広い分野を対象としている。第三章においては主として技術の視点から分析を行ったが、第四章の各論点について課題を解決するための方策を検討する際には、CI の観点からこの幅広いスコープについて考察を行うべきである。

(2) CI 的な分析を行う上では、公開情報に加えて、非公開情報を収集し、両者を組み合わせることが重要である。非公開情報を収集するためには、ひとづての人づてを介して有識者を探し出し、インタビューすることが必要である。

これらのそれぞれの論点において CI 的な分析を深めるため、公開情報の収集のみならず、有識者を入づての人づてで探し、非公開情報を収集し、公開情報と非公開情報を組み合わせて考察を行った。表 4-2 に示す有識者の多くとは筆者は直接の面識がないが、各論点についての専門的な知見を持つ人物として人的ネットワークを駆使して探し出し、非公開情報を収集している。第四章の分析・考察では、例えば、バイオプラスチックの一般的な特徴や生産量については公開情報である日本政府の公式文書が役に立ったが、生分解性プラスチックやバイオマスプラスチックをマテリアルリサイクルする上での課題などについては公開情報では必ずしも明らかとならず、リサイクル事業者 C からの非公開情報が有益であり、公開情報と非公開情報を組み合わせて分析・考察を行っている。また、発生国消費原則と国際分業原則の選択、建設分野での再生材料の利用などの論点については公開情報では有意な情報が少なく、中央省庁 A やリサイクル事業者 C、D、E からの非公開情報が分析・考察において非常に有益であった。

表 4-2：各論点に関する有識者インタビューの概要

対象組織	インタビュー対象者	インタビュー時間	インタビューした日付
中央省庁 A	課長補佐	1 時間	2022 年 12 月
プラスチック業界団体 B	専務理事	1 時間	2022 年 12 月
リサイクル事業者 C	社長	1 時間	2022 年 12 月
リサイクル事業者 D	社長	1 時間	2022 年 12 月
リサイクル事業者 E	社長	1 時間	2022 年 12 月

2. 論点 1 についての考察（発生国消費原則と国際分業原則）

プラスチック廃棄物は発生した国においてリサイクルされ再生プラスチックとして消費されること（発生国消費原則）が一つの理想形である。発生国消費原則の最大のメリットは、廃棄物の発生国において責任をもって全量適切に処理できる点である。発生国は自国内で適正にプラスチック廃棄物を処理すべき義務を有するとの見方もできる。CI スコープである環境面で見ると、プラスチック廃棄物の輸出先国は主として発展途上国等であり、これらの国におけるリサイクルも含めたプラスチック廃棄物の処理の実態は極めてずさんであることが一般的である。海洋プラスチック問題を引き起こす環境流出プラスチック廃棄物の主な発生源はアジアの発展途上国等であると指摘されており [341]、これらの国々へのプラスチック廃棄物の

輸出は、直ちに海洋プラスチック問題の深刻化をもたらす可能性が極めて高い。発生国消費原則では、発生国（特に先進国が発生国の場合）が責任を持って処理することから、不法投棄や不適切な処理による海洋プラスチック問題の深刻化を防止できる。また、CI スコープであるサプライヤー（供給）の観点で見ると、我が国のように石油資源の乏しい国にとっては、使い終わったプラスチックは単なる廃棄物ではなく、貴重な国産資源であるとみなすことができる。使い終わったプラスチックを再度プラスチックやその他の化学原料に再生できれば、政治的に不安定でかつ販売姿勢が強硬な中東諸国のサプライヤーへの依存を減らし、国内での資源循環に貢献できる。

発生国消費原則のデメリットとしては、CI スコープである技術面で見ると、マテリアルリサイクルの原料が均質でなく、汚れた廃棄物の選別・洗浄が完璧にはできないことから、再生素材は強度や品質がバージンプラスチックよりも劣っていることが多い。このため、CI スコープである顧客面で見ると、再生素材の国内需要が喚起されにくく、リサイクルされるプラスチック廃棄物量が制限されやすいことが発生国消費原則のデメリットである。現状、日本のプラスチックリサイクル率が 25.1%にとどまっている理由は、その太宗を占めるマテリアルリサイクルによる再生素材に対するユーザー企業、ひいては消費者のニーズが高くないことにある。CI スコープである競合・市場の面で見ると、再生素材はバージン素材に比べて競合優位性に乏しい。日本のユーザー企業はプラスチック素材の品質や強度を重視しており、リサイクルされた再生素材の環境価値を認めることは多くない。このため、再生素材の価格がバージン素材に比べて安いことが取引の前提条件となる。プラスチックのリサイクルは、廃棄物による環境汚染を防止し、二酸化炭素の削減にも大きく貢献することから、再生素材の価格には環境価値が含まれるべきであり、バージン素材よりも高い価格が付けられることが望ましい。飲料業界のようにボトル・ツー・ボトル（廃 PET ボトルから新たな飲料用ボトルを再生）に熱心な業界では、廃 PET ボトルから再生した素材の価格がバージン素材の価格よりも上回って取引されているが、その他のユーザー業界では再生素材の環境価値を認める状況にはない。このように発生国消費原則においては、再生素材のユーザー企業や消費者の環境意識の低さがリサイクルを国内で完結させる上での大きな障害となる。また、プラスチック廃棄物の処理コストは一般的に先進国よりも発展途上国等の方が安く、発展途上国等の方が競合優位性に優れている。輸出国の廃棄物の排出・処理業者が経済合理性だけを追求する場合には、プラスチック廃棄物が発展途上国等へ輸出されやすいという問題もある。プラスチック廃棄物を輸出しない場合には、輸出国側での処理に係る経済的コストが増大することもデメリットである。

このようなデメリットを解消するのが、国際分業原則である。プラスチック廃棄物の主たる輸入国は発展途上国等である。CI スコープである顧客・市場の面で見ると、これらの国々の顧客はプラスチックの品質が良いことよりも価格が安いことを重視している。このため、バージン素材に比べ再生素材へのニーズが大きく、輸入国における再生素材やその原料の価格は、輸出国（主として先進国）の価格よりも高いことが一般的である。国際分業原則は、プラスチック廃棄物や再生素材を先進国から発展途上国等への輸出を前提とし、輸出国は輸入国でのプラスチック廃棄物の適正処理に協力するものである。国際分業原則のメリットは、CI スコープである市場の点で見ると、プラスチック廃棄物の需要と供給がマッチできる点であり、再生素材として再利用されるプラスチック廃棄物の量が、発生国消費原則に比べて多くなる。また、再生利用量が増えることから、輸出国と輸入国でのトータルのプラスチック廃棄物の処理コストは最

小化されることが期待できる。国際分業論のデメリットは、CI スコープである環境面での課題にある。輸入国である発展途上国等での廃棄物の処理の実態が輸出国に比べて極めて劣っており、発展途上国等へのプラスチック廃棄物の輸出が海洋プラスチック問題などをより深刻化させる可能性が高い。また、輸出国が廃棄物の輸出に安住し、輸出国内でのリサイクルを進める気運を阻害する恐れもある。

プラスチック業界団体 B は、プラスチックの国内リサイクルは発生国である我が国の責任であり、また使い終わったプラスチックが貴重な国内資源であるとの理由から、発生国消費原則を強く主張している。第三章で述べたように、近年中国政府はプラスチック廃棄物の中国への輸入を禁止しており、中国のマテリアルリサイクル事業者は深刻な原料不足の状態にある。CI スコープである市場の点で見ると、業界団体 B によると、この状態を打開するため、中国のマテリアルリサイクル事業者が次々と日本にマテリアルリサイクル施設を建設し、日本のプラスチック廃棄物を安価で（中国よりも安価だが、日本の相場よりは高価で）大量に購入した上で、ペレットやフレークなどのマテリアルリサイクル製品の材料の形に加工して中国に輸出する動きが活発化している。これらの日本に進出している中国企業は 200 社を超えており、日系のマテリアルリサイクル事業者数よりも多くなっていると業界団体 B は指摘している。プラスチック循環利用協会が公表しているプラスチックのマテリアルフロー図によると、2021 年時点でペレットなどのマテリアルリサイクル材料の形で輸出されている量は我が国全体のマテリアルリサイクル量の 42% を占め、その割合は年々増加している。材料の形に加工される前のリサイクル原料（プラスチック廃棄物）の形で輸出される量が 32% あり、結果的に国内で循環利用されるマテリアルリサイクル量は 22% しかないのが実情である[4]。業界団体 B はこのように国内で利用されるマテリアルリサイクル量がわずかである実態を問題視し、中央省庁 A などに対してマテリアルリサイクル材料の輸出禁止の措置を取るよう提案している。

中央省庁 A は、輸出先国でのプラスチック廃棄物の管理への懸念から、日本が責任をもって国内でリサイクルを行えるよう発生国消費原則が実現できることが望ましいとしているが、WTO（The World Trade Organization：世界貿易機構）の自由貿易原則によりマテリアルリサイクル材料などの輸出規制は不可能であると指摘している。国内ユーザー企業の再生素材への需要の伸びが緩やかで、かつ低価格な再生素材へのニーズが大きいことを考えると、より高価格でマテリアルリサイクル材料や廃棄物を販売できる輸出という形態が選ばれることは経済原則からやむを得ないとのスタンスである。中央省庁 A によると、輸出規制はできないものの、中国系企業などによるマテリアルリサイクル材料を輸出するための国内工場新設に対する設備投資補助金（「事業再構築補助金」）の申請案件が近年急増しているが、これらの申請案件については全て拒絶しているとのことである。一方、アジア諸国などに日本のユーザー企業の製造拠点が移り、日本向けの製品が生産されている中で、これらの日本企業の製品の原料として日本から輸出されたマテリアルリサイクル材料が活用され、その結果生まれた製品が日本に輸入されることは歓迎されるべきことであり、これらの動きを支援したいとしている。省庁 A の主張を裏付ける観点から、マテリアルリサイクル材料（廃プラスチックをペレットのような中間財に加工したもの）が現地日系ユーザー企業による日本向けの再生製品に使われグローバルなリサイクルとなっていることを確認するために、今回のインタビュー調査では人づての人づてを介してリサイクル事業者 E を見つけ出し、インタビューを行った。この結果、リサイクル事業者 E がタイにマテリアルリサイクルの工場を有し、日本から輸出した材料をもとにマテリアルリサイクル製品を日系の文房具メーカーに販売し、これらの文房具が日本に輸出されて

いることを確認した。今回、同様の他の事例がないか探したが、リサイクル事業者 E の事例にとどまっていた理由は、再生材料の形で日本からの輸出がつい最近本格化したことと関係があると考えられる。今後も再生材料の輸出が増えれば、ユーザー企業のサプライチェーンのグローバル化と相まって、リサイクル事業者 E のようなトレースデータが増えるものと考えられる。実際、リサイクル事業者 E はタイでの事例と類似のビジネスを同国及び他国でも展開する計画を表明している。また、リサイクル事業者 C や D も、E 社のようなグローバルなリサイクルビジネスの実施可能性を指摘している。

今回インタビューした全ての者が発生国消費原則が望ましいとの意見を有しているものの、再生素材に対する国内需要の伸びが緩やかな現状においては、マテリアルリサイクルの材料や原料をより高価格で販売できる輸出形態を止めることは難しい。また上記のリサイクル事業者 E のタイでの事例のように、日本企業のサプライチェーンがグローバル化し、再生素材の活用された製品が海外から国内に還流している実態も考えると、国際分業原則によって日本での再生素材の活用が進む面も否めない。このように CI スコープである規制・製品・市場・環境の観点でトータルに考えると、国内消費原則と国際分業原則は二者択一ではなく、そのベストミックスを追及していくべきである。以下では、国内消費原則と国際分業原則のそれぞれを推進していく上での課題・論点とそれを解決するための方策について考察する。

まず、国内消費原則を推進する上で有益な、マテリアルリサイクルの劣化を防止する技術、ケミカルリサイクル等も活用したアップサイクル、消費者の受容性を高めるためのマーケティング方法や表示・認証制度に関する論点について考察する。マテリアルリサイクルの劣化を抑制するための方策を CI スコープである技術の点で見ると、第三章で述べたように、酸化防止剤、鎖延長剤、混合技術、充填剤、重合剤などの添加剤の使用は有効な方法である [6,84,135,139]。また、モノマテリアル化のような環境配慮設計をしたバージンプラスチックが生産されれば、選別の作業を減らすことができ、マテリアルリサイクルの劣化を最小化できる [137]。リサイクル事業者による方策として、政府の支援制度も活用しながら、生産能力の増強とともに、再生素材の品質の向上に向けて、プラスチック廃棄物の自動選別装置の開発・投資を積極的に行うことが望まれる。最近では、選別を精緻化するための手法として、フォトルミネッセントラベル（UV-vis 有機および無機フォトルミネッセンスマーカー、赤外線アップコンバージョン、X 線蛍光マーカーなど）やデジタルマーカー（バーコードの電子すかし）などの新たな技術を活用したラベルをプラスチックに組み込む方法が研究されている [342]。いずれの技術も認識能力が万全でないなどの技術的な課題があり、研究開発の途上にある。また、これらのラベルをプラスチック製品に組み込む方法も、押し出し、表面コーティング、外部ラベルへの組み込みなど様々な選択肢があるが、それぞれ一長一短で、全ての製品の選別工程に適用できる組み込み方法は開発されていない。これらの技術が商業段階を迎えた場合には、選別作業の自動化が大幅に進み、マテリアルリサイクルの品質が飛躍的に向上することが期待される。また CI スコープである顧客の観点では、再生素材の品質を向上させ、マテリアルリサイクルされる量を増やすためには使い終わったプラスチック製品を消費者が適切に洗浄、分別、排出することが有効であり、消費者のこれらの行動を促すよう情報発信することも望まれる。最近、飲料業界ではボトル・ツーマスターを進めるため、消費者に分別排出の必要性を訴える TV コマーシャルを行っており、他の業界でも同様の活動が期待される。

アップサイクルについて CI スコープである技術の観点で見ると、第三章で述べたように、ケミカルリサイクルは基本的に再生素材の品質劣化がなく、品質劣化を抑えるための重層的な廃棄物の選別工程がほとんど不要であることから、マテリアルリサイクルの弱点を補える特徴を持つ。ケミカルリサイクルには、再生素材としてプラスチックを再生産するクローズドループと、ファインケミカルや航空機燃料などのより高付加価値な製品に再生するアップサイクルがあり [343]、近年新たな研究成果が公表されている。前者はサーキュラーエコノミーに貢献するが、後者は貢献しない。しかし、後者はプラスチック廃棄物がより高価な製品に再生することから、廃棄物処理がより進みやすくなる、今までエネルギーリカバリー処理されていた廃棄物が高付加価値製品にリサイクルされる、などの効果がある。現在我が国におけるケミカルリサイクルの割合は 3.5%に過ぎず [4]、また再生される素材はプラスチックではなく、アンモニアや一酸化炭素などの化学原料に限定されている。最近ではケミカルリサイクルによるプラスチック製再生素材の生産技術も確立しつつある。プラスチック生産企業における方策として、今後、プラスチックを再生できるケミカルリサイクルの実装に向けて、積極的な設備投資が期待される。学術機関による方策として、多くのエネルギーを消費し多量の二酸化炭素を排出するというケミカルリサイクルの欠点を改善するため、新規触媒の開発を始めとした革新的な生産プロセス技術に関する研究が必要である。また、第三章で指摘したように微生物による分解で混合物をリサイクルする技術も実証段階を迎えている。例えば、積水化学と住友化学は、プラスチック廃棄物の混合物も含んだ一般ごみを微生物により分解しエタノールを生成した後に [165]、エタノールからプラスチックを再生する技術を開発中である [166]。この方法はケミカルリサイクルに比べて二酸化炭素の排出量が少ない可能性がある。一方、原料が一般廃棄物であるため原料供給面で提携してくれる地方自治体を見つけることが課題である。

消費者の再生素材に対する受容性について CI スコープである顧客・市場の観点で考察すると、第三章で述べたように、プラスチック問題に関する日本の消費者の環境意識は他国に比べて低く、消費者啓発のための情報発信（プラスチック問題の深刻性の認知拡大）、マーケティング、表示・認証制度が必要である。プラスチック再生素材の環境価値を消費者に認識してもらい、コストアップを受け入れてもらうためのマーケティング方法として、環境意識が高い若者にターゲティングし、若者向けの製品への再生素材の活用を検討する方法が考えられる。例えば、ナイキはリサイクルの重要性を盛んに PR し、サステナブル素材として再生繊維でできた靴を販売して、好評を得ている。消費者にプラスチック廃棄物由来の再生素材であることを認識してもらうための認証制度及びラベルが民間団体ベースで登場している。

International Sustainability and Carbon Certification (ISCC)、RedcertII など、元々はバイオマスプラスチック向けの認証制度がケミカルリサイクルにも適用され始めている。最近では民間認証制度が乱立状態にあり、消費者に分かりにくい状況になっている。認証制度間の競争の結果、いずれ淘汰されていくと考えられるが、勝ち残った認証制度は消費者に再生素材の環境価値を認識させるのに有益な存在となる。ケミカルリサイクル向けの認証制度の課題として、ケミカルリサイクルはナフサ製造プラントで生産された製品が化石原料由来か廃棄物由来かを区別することができないため、これらの原料の投入割合で廃棄物由来品の生産量を決めるマスバランス法が採用されているが、このようなバーチャルな計算方法が消費者から受け入れられるか不透明である。また、CI スコープであるサプライヤーの視点で考えると、消費者に認証情報を届けるのはサプライヤーであるプラスチックの加工・成形業者であるが、これらの

業種は中小企業の割合が高い。ケミカルリサイクルの認証制度は要件が厳しく、中小企業がその対価を負担できるか疑問視されている。再生素材の環境価値に関する消費者啓発の方策について、CI スコープである政府・規制の観点で考察すると、ユーザー企業が生産する製品に使われている再生素材の割合を表示するようユーザー企業に義務付けることが考えられる。再生素材の利用を義務付けなくとも、含有割合を表示させれば、競合企業と比較されることによりユーザー企業の取組が促進される。

一方、国際分業原則を進めるために CI スコープである環境や技術の面から考察すると、輸入国である発展途上国等でのプラスチック廃棄物の適正処理を促進することが大前提である。政府における方策としては、政府開発援助（ODA）等を活用し、制度整備、インフラ建設、人材育成、技術移転を積極的に行うことがあげられる。また、第三章で述べたように、発展途上国等において輸入されたプラスチック廃棄物が適正に処理されることを担保するためには、グローバルなマニフェスト制度が必要であり、日本政府において現地政府と連携しながら、これらの制度整備に努力していく方策が考えられる。リサイクル事業者やプラスチック生産企業が講じる方策としては、ユーザー企業の発展途上国等への進出に合わせて現地でリサイクルビジネスを立ち上げ、日本から輸出されたプラスチック廃棄物を自ら適切に処理することが指摘される。また、現地企業によるプラスチック廃棄物の処理能力を向上させるために、現地企業との資本・技術提携等を進め、リサイクル技術の移転を積極的に行うことは有力な方策である。これらにより発展途上国等における海洋プラスチック問題の深刻化に歯止めがかかるとともに、リサイクル事業者 EC の事例のようにグローバルなプラスチック資源循環が進み、再生素材が使われた製品の日本への還流を促進することができる。学術機関においては、国際コンファレンスの開催などグローバルな学会活動を通じて、我が国でのプラスチックリサイクルに関する研究成果を積極的に発展途上国等の学術機関や企業に移転する方策を講じることが期待される。

3. 論点 2 についての考察（生分解性プラスチックとバイオマスプラスチック）

3.1. 生分解性プラスチック

生分解性プラスチックの意義としては、自然界での微生物の働きなどにより最終的には水と二酸化炭素に分解され自然界へ循環することが期待できる点である。CI スコープである環境面で見ると、海水中での生分解性を有するプラスチックは、不法に自然界に投棄され海洋に漂着するプラスチックによる汚染の解決に有効である。また、土壌中での生分解性を有するプラスチックは、埋立処分されたプラスチック廃棄物の減量化に有益である。海洋プラスチック問題の汚染源のほとんどは発展途上国等であり [341]、また、これらの国においては大量のプラスチック廃棄物が埋立処分されており、現在のプラスチック処理の実情を前提とすると、生分解性プラスチックは発展途上国等において極めて有効な存在である。国連環境計画総会（UNEA5.2 : United Nations Environment Program）の決議に基づきプラスチック汚染を終焉させるための国際条約交渉が 160 か国以上の政府の参加のもとで行われているが、発展途上国等の政府からは生分解性プラスチックの使用を義務付けるべきとの意見が多く出されている。このような背景から、第三章で述べたように、プラスチックリサイクルの研究の中で、近年、生分解性プラスチックの研究が最も精力的に行われ、新たな生分解性技術や製品が次々と生み出されている。

一方、生分解性プラスチックの課題については、CI スコープである技術面から見ると、生分解性プラスチックがその環境調和性を発揮するためには、自然界における微生物の働きが実現できる環境中にプラスチック廃棄物が置かれる必要がある。我が国の場合、陸域から海洋中に流出するプラスチック廃棄物の量は、先行研究によって幅があるものの 210~57,000 トンと推計されており [341,344]、プラスチック廃棄物の全体量 824 万トンの 0.0025%~0.69%に過ぎず [4]、海洋生分解性プラスチックがその特性を発揮できる余地は極めて小さい。また、プラスチック廃棄物のうち埋め立てられる量は 30 万トンであり全体量の 3.6%しかなく [4]、土壌生分解性プラスチックが有効活用される余地も小さい。我が国においては、コンポスト化処理施設は産業界でも家庭でも普及しておらず、この点でも土壌分解性プラスチックの役割はほとんどない。我が国のプラスチックリサイクルの最も大きな割合を占めているマテリアルリサイクルにおいては、在来型のプラスチック廃棄物に生分解性プラスチックが混入すると、再生素材の品質の低下、予期せぬ生分解機能の発現などの問題が発生することを、リサイクル事業者 C は指摘している。このため、マテリアルリサイクルの前に在来型のプラスチックと生分解性プラスチックの選別が不可欠となるが、現状ではこのような選別を自動的に行える技術が開発されていないと指摘している。CI スコープである製品の観点で見ると、仮に選別が可能であったとしても、生分解性プラスチックもその種類によって分解を担う微生物の種類、分解が起きる自然環境、生分解のスピードが異なり、これら複数の生分解性プラスチックを混ぜ合わせた再生素材が使用にあたりどのような挙動（微生物の種類、必要な自然環境、分解スピード）をとるか予測できないことから、商品としての販売が見込めない。リサイクル事業者 C によると、生分解性プラスチックの選別に経済的意義はなく、選別技術の開発や設備投資を行うリサイクル事業者はいないとしている。近年、生分解性プラスチックがコンビニやスーパーなどで手渡されるカトラリー（スプーン、フォークなど）やストローに使われる例が増えているが、これらの生分解性プラスチックの多くは一般廃棄物として回収され、その多くはマテリアルリサイクル処理にまわされる。これらの用途に使われる生分解性プラスチックは生分解の特性を活かせず、リサイクル製品の品質劣化を引き起こす選別不可能な異物でしかない。生分解性プラスチックがその特性を活かせる用途は、漁網、漁具、農業用マルチフィルム、肥料用の被覆材など自然条件の中で使われ、そのまま廃棄されるものに限定されると考えられる。

CI スコープである製品の経済性の観点で課題を分析すると、プラスチック業界団体 B は、生分解性プラスチックの普及にあたっての大きな課題の一つとしてコストをあげている。現状、化石資源由来の汎用プラスチックに比べて、生分解性プラスチックのコストは 2 ~ 5 倍高い [345]。生分解性プラスチックの生産方法は化石資源由来とバイオマス由来があるが、特にバイオマス由来のコストが高い。高コスト故に需要が伸びず、需要の増加が見込めないために大量生産によるコスト低下が進まない悪循環にある。CI スコープである顧客の面からは、生分解性プラスチックに対する消費者の誤解も課題である。環境中で自然に分解するので、ポイ捨てしても構わないといった消費者の誤解によりポイ捨てが助長される懸念がある。

これらの課題に対応するための方策について、生分解性プラスチックの選別、コンポスト化による分解、混合プラスチックのリサイクル技術、生分解プラスチックの市場拡大についての論点から考察する。まず、生分解性プラスチックの選別について、CI スコープである技術の面から考察すると、論点 1 で述べたようにフォトルミネッセントラベルやデジタルマーカのような新たな識別技術が実用化されると、生分解性プラスチック

チックの種類に応じたきめ細かな選別が可能となる。また、幾つかの生分解性プラスチックについては、選別方法があるとの研究がある。例えば、近赤外線選別により PLA（ポリ乳酸）と PET の分離ができたとの報告がある [346]。第三章で述べたように PLA と PET は用途（ボトル用）が似ており、外観からの選別が不可能なため、これは大きな意義を持つ。近赤外線選別は PLA と PCL（ポリε-プロラクトン）の混合物の分離にも活用できる。静電選別によって PLA、PCL、PHA（ポリヒドロキシアルカノエート）、及びこれらの混合物の選別ができるとの報告がある [346]。生分解性プラスチックにはたくさんの種類があり、新たな生分解性プラスチックの次々と開発されているため、これらについても選別方法を研究することが必要である。リサイクル事業者は、生分解性プラスチックの選別技術はないと指摘しているが、上記の研究結果を参考に、近赤外線選別、静電選別などの方法の商業的適用性について検証していくことが望まれる。

コンポスト化による分解について、CI スコープである技術面で見ると、生分解性プラスチックの種類によってコンポスト化に向いているもの、向いていないものがある。例えば、PLA は高温、アルカリ性などの条件下では肥料化される。これらの条件は工業コンポストでは実現できるが家庭用コンポストには向いていない。チオリジン等の触媒の添加がコンポスト化を促進するとの研究結果がある [346]。PLA の分解速度は分子量、結晶化度、プラスチックの厚み等によって影響を受け、コンポスト化を可能にするためにはこれらの条件を満たす製品設計が必要となる。一方、PBAT（ポリブチレンアジペートテレフタレート）は、工業用・家庭用コンポストにおける肥料化の速度が非常に遅く、コンポスト処理に課題を残している。分子量や結晶化度の最適設計、フィラー（充填剤）の添加などにより分解速度が向上するとの報告がある [346]。生分解性プラスチックの識別・選別技術が高度化する前の段階では、工業用コンポストや家庭用コンポストといった肥料化施設で分解処理する方策は選択肢の一つとして検討されることが望ましい。欧州ではコンポスト施設の普及が進んでおり、我が国でもこれらのコンポスト施設の普及に向けて政府や地方自治体が財政面や普及啓発面で支援する方策が望まれる。リサイクル事業者が工業用コンポストへ新規事業進出する方策も期待される。

生分解性プラスチックを含む混合プラスチックのリサイクルについて、CI スコープである技術の視点で見ると、論点 1 で記述したケミカルリサイクルの活用方策があげられる。第三章で述べたようにケミカルリサイクルには熱分解、ガス化、加水分解、メタノロシス、グリコリシス、アミノリシスなどがあるが、混合プラスチックに向いているのは熱分解とガス化である。ガス化については昭和電工が商業運転を行っているが、再生素材が水素・アンモニアであり、プラスチックにリサイクルする技術は確立していない。熱分解によるプラスチックの再生技術については、近年急速に進歩しており、三菱ケミカルグループとエネオスによる超臨界技術、出光興産と環境エネルギー社による触媒による接触分解方式など複数の技術が実証段階を迎え、実証プラントの建設が予定されている。しかし、いずれの技術でもバージンプラスチックよりもコストが高い、二酸化炭素の排出量が多いといった課題を有しており、商業プラント建設に向けて一層の研究開発が必要である。これらとは全く別のケミカルリサイクルとして、複数の触媒を段階的に適用することにより、混合物からモノマーを段階的に取り出す技術についても研究されている [343]。また、異なる生分解性プラスチックの混合物については、論点 1 で指摘した近赤外線選別や静電選別による適用範囲の拡大に向けた研究が重要である。

生分解性プラスチックの市場拡大について、CI スコープである技術や市場の面で見ると、プラスチック業界団体 B は、我が国は生分解性プラスチックの開発生産において他国に対して技術的優位性があり、競争力のある生分解性プラスチックが製造されていると指摘している。このため、生分解性プラスチックの生産企業においては、低コスト化に向けた技術開発と設備投資を進め、大きな需要の見込める発展途上国等に供給していく方策が有望である。これにより国内向けの生分解性プラスチックの価格低下も見込める。学術機関においては、コストを低減させるため、新たな生産プロセス技術の開発が期待される。

3.2. バイオマスプラスチック

バイオマスプラスチック意義は、CI スコープである環境面で見ると、主に植物を原料としたバイオマス由来の糖や油脂から生産されており、大気中の二酸化炭素を吸収した植物を原料とするという点で、基本的にカーボンニュートラルなプラスチックであることである。このため、バイオマスプラスチックを焼却処分又はエネルギーリカバリー処理しても追加の二酸化炭素は発生しないことが最大の利点である。また、CI スコープであるサプライヤー（供給）の観点では、バイオマスプラスチックは化石資源由来でないため、政情不安定なサプライヤーである中東産油国への依存度を下げる効果もある。CI スコープである技術面では、バイオマスプラスチックのうちバイオ PE、バイオ PET、バイオ PP などは、化石燃料から生産される汎用のプラスチックと同等の性状を有しており、同じ使い方ができるという点も利点である。これらの汎用プラスチックと同等の性状を持つバイオマスプラスチックは、リサイクルにおいても汎用プラスチックと一緒に選別・処理することができることは重要な特徴である。これらの理由からバイオマスプラスチックの国内消費量は 2018 年で約 4 万 1 千トンと、生分解性プラスチックの国内消費量約 3700 トンの 10 倍以上となっている [345]。政府は、2019 年に公表した「プラスチック資源循環戦略」において、2030 年までにバイオマスプラスチックの国内導入量を 200 万トンに増大させる目標を設定している [347]。このような背景から、第三章で述べたように、国際的にもバイオマスプラスチックの研究は著しく増加している萌芽的な研究領域である。

バイオマスプラスチックの課題の一つは、一般廃棄物となるバイオマスプラスチックはエネルギーリカバリー処理又は焼却処分されないことが多く、カーボンニュートラルの特性を活かせないことである。これは CI スコープの一つである政府による規制に原因がある。例えば、容器包装リサイクル法に基づき家庭から分別収集される容器包装プラスチックは、マテリアルリサイクル又はケミカルリサイクルのいずれかの方法でリサイクルされることが政府の方針で決まっており、エネルギーリカバリーされるものはほとんどない。容器包装プラスチック以外のその他の製品プラスチックも 2023 年からプラスチック資源循環促進法に基づき、容器包装プラスチックと一緒に分別回収され、同様にエネルギーリカバリー処理が行われないことが一般的である。このため、CI スコープである製品性の観点で見ると、一般廃棄物の分野でバイオプラスチックがカーボンニュートラルの特性を発揮できる用途は、焼却による滅菌処理が必要な衛生用品や燃えるゴミ用のゴミ袋などに限定されてしまう。CI スコープである技術の面では、バイオプラスチックのうち汎用プラスチックでないバイオ PC（バイオ・ポリカーボネート）やバイオ PA（バイオ・ポリアミド）は、汎用プラスチックと一緒にのリサイクルが困難であるにもかかわらず、選別技術が開発されていない。プラスチックの外観からバイオ PC やバイオ PA を消費者が識別して分別排出することもできない現状にあり、これらのバイオプラスチックはマテリア

リサイクルによる再生素材の品質低下要因となる。また、バイオマスプラスチックと生分解性プラスチックを消費者が識別し、分別排出することもできないため、生分解性プラスチックをコンポスト処理する際にバイオマスプラスチックが分解されず残存してしまう問題もある。CI スコープである原料供給の観点で見ると、バイオマスプラスチックの代表的な原料は砂糖きび、とうもろこし、キャッサバなどの可食資源であることが多い。現状のバイオマスプラスチック製造において原料が不足しているという情報は少ない。例えば、ブラジルにおいて、200 千トンのバイオ PE の製造に必要な砂糖きびの栽培面積は、国内の耕作可能地の 0.02% であり、全体に占める割合は小さい [345]。しかし、将来的な原料需要の拡大に当たり、食料供給の障害となる可能性や、逆に持続可能な原料調達が難しくなる恐れがある。CI スコープである製品の経済性の観点で見ると、バイオマスプラスチックは、原料調達の効率性、製造の特性（生物プロセスを経ている場合が多いこと）等により高コストとなっている。従来の化石資源由来プラスチックと比べた単価は、例えばバイオ PE が約 3 倍、バイオ PET が約 1.5 倍となっており、バイオマスプラスチックの需要が増加しない大きな要因となっている [345]。

このような課題に対応するための方策について、CI スコープである顧客の面で見ると、まずバイオマスプラスチックと生分解性プラスチックの総称であるバイオプラスチックという用語を普及させない方策が求められる。バイオマスプラスチックと生分解性プラスチックは環境面での意義や特性、リサイクルの方法が全く異なっており、プラスチックの使用後において消費者によりきめ細かく分別排出されることが望まれる。政府が策定した「プラスチック資源循環戦略」においてはバイオプラスチックという総称が使われているが [347]、このような総称は消費者の正しい理解と適切な使い方や分別排出を妨げることになる。バイオマスプラスチックと生分解性プラスチックの特徴やリサイクル方法が違ふことを丁寧に消費者に説明していくことが必要である。消費者による適切な分別を促進するためには、きめ細かな識別マークの設定も必要である。バイオマスプラスチックと生分解性プラスチックの識別は当然として、バイオマスプラスチックについても、汎用プラスチックと同様にリサイクルできるバイオ PE、バイオ PET、バイオ PP と、現状ではリサイクルが難しいバイオ PC、バイオ PA を区別する識別マークが望まれる。これらの課題については、生分解性プラスチックと同様にフォトルミネッセントラベルやデジタルマーカのような新たな識別技術の実用化が最も有力な方策である。CI スコープである技術の面で見ると、現状、バイオマスプラスチックの製造の多くは、海外の原料生産国において行われている。汎用バイオプラスチックはリサイクル方法が確立しているため我が国での製造・消費の拡大が望まれるが、低コストで生産できる商用化に適した実証技術が確立していないなどの理由から民間投資の動きは鈍い。企業による生産投資を財政面で後押しする政府による方策が望まれる。企業による方策としては、国内での生産技術の確立と設備投資に加えて、CI スコープである原料供給の面からは、国内のサプライヤーから入手可能な非可食原料による生産方法を開発することが望まれる。プラスチック業界団体 B によると、例えば、伐採木・林地残材、稲わら・もみ殻、古くなって食用に適さなくなった備蓄米、生ごみ・食品廃棄物などが候補としてあげられる。学術機関による方策としては、微細藻類などフロンティア分野での非可食原料化技術、生産コストを飛躍的に引き下げるプロセス技術などの多くの技術的課題での研究が期待される。

4. 論点 3 についての考察（プラスチック再生素材の建設分野での利用）

第三章で述べたように、プラスチック再生素材をアスファルトの添加剤やコンクリートの骨材として活用する方法について、海外では多くの研究が行われている。CI スコープである経済性の観点で見ると、これらの用途は大量のプラスチック廃棄物を安価に処理できる点で優れていると考えられ、発展途上国等での研究が顕著である。道路建設へのプラスチック再生素材の実証事例も多く報告されている [304]。CI スコープである環境面では、これらの用途は循環性に乏しいためサーキュラーエコノミーの観点から望ましくないとの見方もできるが、マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルに適していない廃棄物（その多くは現状エネルギーリカバリー処理されている）については、先進国においても建設分野での利用を進めることは意義がある。我が国においては、マテリアルリサイクルとケミカルリサイクル以外の方法で処分されているプラスチック廃棄物は、全体の 75%にのぼっており [4]、建設分野での利用を進めることは重要である。しかしながら、我が国における建設分野の利用に関する論文数は全世界の 2,023 本に対して 31 本しかなく、世界で 20 位にとどまっており、また、建設分野にプラスチック再生素材が活用された事例もほとんど見つかっていない。ここでは、インタビュー結果などをもとに CI スコープの観点から、我が国におけるプラスチック再生素材の建設分野での利用を進める上での課題を分析し、課題解決に向けた方策について考察する。

リサイクル事業者 C と D によると、プラスチック再生素材を建設分野で利用できないかというアイデアは 20 年以上前からあるが、様々な課題があり実現していないとしている。課題の一つは CI スコープである政府の規制によるものである。リサイクル事業者 C と D は、建設分野での利用にあたっての廃棄物処理法上の扱いが不透明であることを指摘している。我が国においては一般廃棄物はマテリアルリサイクル又はケミカルリサイクルされることが一般的であることから、建設分野で利用される可能性が高いプラスチックは産業廃棄物由来の再生素材である。産業廃棄物についてはかねてから不法投棄の犯罪が多発しており、監督官庁の環境省は建設分野での利用が不法投棄を助長しないか警戒をしているとみられる。未処理のプラスチック廃棄物やその他の廃棄物の混合物をプラスチック再生素材と偽って、道路などに混ぜてしまう悪質業者が出てくるのではないかと懸念が付きまとっている。廃棄物処理法に基づいて適正に処理するためには、建設会社が各地方自治体から産業廃棄物処理業者の許可を取る必要があるが、これには相当な時間と労力が必要となるため、大きな参入障壁となっている。その他の規制面では、海外において道路建設にプラスチック再生素材を活用した事例があるが、日本の国土交通省は道路品質を重視しており、海外と日本の道路の品質規制の違いを指摘する意見もある。また CI スコープである製品の経済性の面では、プラスチック再生素材を建設分野で利用するためには、プラスチック廃棄物について破碎、粉碎、選別（プラスチック以外の異物除去）などの最低限の前処理が必要となり、そのため費用がかかることから、建設会社にとって原料としてのコストが見合い難いという課題も指摘されている。CI スコープである技術的な観点では、プラスチック再生素材の前処理が不十分で再生素材の形状や重さが不ぞろいであると、コンクリートの中で再生素材が浮いたり沈んだりして均質に混ざらないという課題が指摘されている。CI スコープである環境面では、道路に再生素材を利用した場合、時間の経過とともに道路が削れ、プラスチックの粉塵が舞った時の環境への影響が未知数であるとの懸念も示されている。特に、第三章で述べたように、家電製品用プラスチックに使用される臭素系難燃剤が混ざっていると人体に悪影響が及ぶ可能性も残る。建設分野での利用にあたっては、CI スコープの一つである競合問題も指

摘されている。現状、我が国のプラスチック廃棄物の 24%は紙くずと混ぜた RPF 固形燃料（Refuse Paper and Plastic Fuel）として利用されている [4]。RPF の原料となるプラスチック廃棄物は比較的品质が良く、安価であることが特徴であり、建設分野での利用に適していると考えられる。RPF の生産事業者は既得権益意識が強く、RPF 原料を他の業界に奪われることに対する危機意識が高いため、政治力を使って原料確保に奔走する傾向がある。建設分野での利用は大量のプラスチック廃棄物を利用できる潜在力があり、RPF 業界との利害調整の問題が発生する可能性がある。

次に、これらの課題を解決するための方策について考察する。まず、CI スコープである規制面での政府による方策は極めて重要である。廃棄物処理法においては、対価を払って（有償で）廃棄物を引き取る場合には、最早それは廃棄物ではなく、廃棄物処理法の規制を受けないはずである。このため建設業者がプラスチックのリサイクル事業者から対価を払って再生素材を購入すれば、産業廃棄物事業者の許可を取る必要はなくなる。他方、再生素材の品質が低いため、建設業者がリサイクル事業者から処理費用もらって（逆有償で）再生素材を利用する場合には、産業廃棄物事業者の許可が必要となる。有償か逆有償かは、取引される再生素材の品質と価格によって異なることになり、この原則を守っている限り廃棄物処理法上の問題はないはずである。環境省においては、これらの点を明確にし、建設業者やリサイクル事業者に周知する方策を講じることが必要である。建設分野での利用を進めるためには、プラスチック再生素材の道路や建築物での利用にあたっての品質基準を示す方策が望まれる。第三章で述べたように、道路建設でのプラスチック再生素材の利用は、道路の強度や耐久性を向上させ、建設コストの削減やトータルでの環境負荷の低減に効果があるとの指摘がある [302-304]。これらの点を考慮し、国土交通省において建設分野での利用の促進に向けて品質規制の見直しや、環境貢献効果に関する情報発信・支援の方策を行うことが期待される。CI スコープである競合関係の視点では、経産省、環境省、国土交通省においては、RPF 事業者と建設業界との競合問題の回避に向けて、政治ではなく、経済原則に基づき再生素材が有効活用されるよう業界調整を行うことが期待される。CI スコープである環境・製品面では、建設事業者が、リサイクルに適さないプラスチック廃棄物を大量に処理できるという建設分野での利用の環境価値を認識し、再生素材の活用に向けて建設分野で利用するために必要となる再生素材の品質基準を明らかにした上で、リサイクル事業者との間で情報交換・連携を行う方策を取ることが必要である。CI スコープである製品の観点では、リサイクル事業者において、建設事業者が提示した品質の再生製品をできるだけ安価に処理できる体制を整える方策が望まれる。CI スコープである技術の点で見ると、リサイクル事業者 C や D が指摘したように、再生素材を道路に利用した場合の耐久性や粉塵の影響、コンクリート中での不均質性など多くの技術的課題が残されている。また、建設分野で再生素材を利用することの環境インパクトの LCA 評価の深堀も必要であり、これらの課題について学術機関が研究開発を強化・継続する方策が望まれる。

5. 結論

本研究では、企業や産業の競争力にとって重要なコンペティティブ・インテリジェンス（CI）について、プロセスやスコープの明確化、成功要因分析などを行った上で、近年、社会的関心が高まっているプラスチ

ックリサイクル問題を事例として取り上げ、CI の幅広いスコープの観点から、そのシステム転換を実現するための課題や方策について考察を行った。

CI については、CI を行っている日本企業のグループと、CI は行っていないものの調査分析活動を行っている日本企業のグループについてインタビューを行い、そのプロセスとスコープを調査した。その結果、両グループのプロセスとスコープに相違はないことが判明した。一方で、CI を効果的に行う上で、組織内に CI 部門を設置する組織的 CI と、CI 部門を普段は設置せずに CI が必要な場合だけアドホックにタスクフォースを立ち上げる非組織的 CI では、その役割が大きく異なり、それぞれメリット・デメリットがあることを指摘した。また先行研究では CI のスコープは競合分析に限定されるという説と広くビジネス環境全般を対象としているという説に分かれていたが、今回の調査ではスコープは、製品、技術、顧客、市場、サプライヤー（供給）、競合関係、規制、環境問題など広くビジネス環境全般であることが判明した。調査結果を踏まえ、CI 結果を吸収能力（AC）につなげ有効活用するためには、促進要因として、①外部知識の吸収に貪欲な組織文化・風土、②CI 結果を意思決定に反映するプロセス、③CI 部門と CI 結果を活用する部門との間の信頼関係の構築が重要であるということが明らかとなった。

次に、プラスチックリサイクル問題に関する技術調査を中心とした公開情報調査として、世界のプラスチックリサイクルに関する論文 35,519 本について書誌情報分析を行い、どのような研究分野が存在するか、研究分野ごとの特徴は何か、萌芽的な研究トピックは何か、プラスチックリサイクルを進めるために必要な課題は何かについて分析した。その結果、特に顕著な萌芽的トピックとして生分解性プラスチックとバイオプラスチックに関する研究が近年急増していることが判明した。また、多くの研究領域において先進国が論文数のリーダーであるが、プラスチック再生素材の建設分野での利用に関する研究については、発展途上国等で熱心に行われていることが明らかとなった。プラスチックリサイクルを進める上で、廃棄物が発生した国で責任を持ってリサイクルを行う発生国消費原則と、発展途上国等に廃棄物を輸出しグローバルなリサイクルシステムを構築する国際分業原則があり、これらについてのメリット・デメリットを議論した。

上記の研究成果を基に、我が国でプラスチックリサイクル問題のシステム転換を促進する上で重要な以下の四つの論点を抽出した。各論点での考察を深めるために、CI の観点から人づての人づてを頼って各論点についての有識者を探し、インタビューにより非公開情報を集め公開情報と組み合わせることにより分析を行った。また、考察にあたっては CI の幅広いスコープの観点から論点ごとの課題とそれを解決するための新たな施策について議論した。

（論点 1）我が国はプラスチック廃棄物の処理にあたって、発生国消費原則と国際分業原則のどちらを追求すべきか。それぞれを推進する場合の課題と方策は何か。

（論点 2）プラスチックの適正処理の観点から、生分解性プラスチックとバイオマスプラスチックの意義は何か。また、これらの普及を進めるための課題と方策は何か。

（論点 3）我が国においても、プラスチック再生素材の建設分野での利用を進めるための課題と方策は何か。

以下に各論点を解決するために必要な本研究で指摘した新規施策について記述するが、これらの新規施策については先行論文ではほとんど言及されておらず、本研究のオリジナルな研究成果である。論点 1 については、発生国消費原則と国際分業原則のベストミックスが重要であることを論じた。発生国

消費原則を進めるためには、CI スコープである技術・顧客の面で考察すると、消費者が再生素材の環境価値を認めてくれるよう、環境意識の高い若者にターゲティングした再生製品開発、廃棄物由来性を証明する認証・表示制度、製品に使われている再生素材の割合を表示するようユーザー企業に義務化するなど新たな措置が必要である。また、国際分業原則を推進するためには、CI スコープである環境面で考察すると、廃プラ貿易のトレーサビリティを確保するための国際的なマニフェスト制度の創設が望まれる。

論点 2 については、CI スコープである技術・市場・顧客の観点で考察すると、生分解性プラスチックやバイオマスプラスチックを我が国において普及させるための方策として、プラスチックの種類に応じた細かな選別を可能とするため、フォトルミネッセントラベルやデジタルマーカ等等の導入規制、消費者に生分解性プラスチックとバイオマスプラスチックの分別排出の必要性を理解させるため、「バイオプラスチック」というハイブリッド用語を政府は使うべきでない、生分解性プラスチックの需要の伸びが遅くスケールメリットが発揮できない問題を解決するため、潜在的な需要の大きい発展途上国市場の開拓から始めるべき、などの新たな措置を提案した。

論点 3 については、CI スコープである規制・競合・環境・製品の視点で考えると、我が国にいても建設分野での再生素材の利用を進めるための方策として、建設業者の廃プラ利用への参入障壁となっている廃棄物処理法の規制の明確化、我が国の高すぎる道路品質規格の見直し、既存のリサイクル業界と建設業界との間の政治も巻き込んだ廃プラ原料の奪い合いを未然防止するため、政府による利害調整と業界への経済原則で解決すべき必要性の説明などの新たな措置を論じた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、8年以上の長きにわたり終始あたたかいご指導と激励を賜りました東京大学未来ビジョン研究センター 梶川 裕矢教授に心から深謝の意を表します。週末深夜に及ぶご指導には感謝の言葉ありません。東京工業大学環境・社会理工学院 辻本 将晴教授には指導教官として多大なるご指導をいただき、深く感謝いたします。東京工業大学環境・社会理工学院 日高 一義教授、後藤 美香教授、杉原 太郎准教授、笹原 和俊准教授には、審査委員として貴重なご指摘とアドバイスを頂戴しました。心よりお礼申し上げます。

経済産業研究所 森川 正之所長、東京大学先端科学技術センター 元橋 一之教授には、経済産業研究所のポリシーディスカッション・ペーパーの作成に関して温かいご支援・ご協力を頂戴し、心より感謝申し上げます。日本コンペティティブ・インテジエンス学会 菅澤 喜男名誉会長には、インタビュー先企業のご紹介をしていただき、深くお礼申し上げます。本研究では、多くの専門家の方々にインタビューをお願いし、貴重な経験や知見を得ることができました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1. Bernhardt, D.C. I want it fast, factual, actionable - tailoring competitive intelligence to executives needs. *Long Range Planning* **1994**, 27, 12-24, doi:10.1016/0024-6301(94)90003-5.
2. Herring, J.P. *Key intelligence topics: a process to identify and define intelligence needs*, John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, 2001.
3. 喜男, 菅. 連載 情報の価値とインテリジェンス第8回 戦略シナリオを支えるインテリジェンス活動. Available online: <https://www.issj.net/mm/mm06/01/mm0601-8-st.html> (accessed on 2023 年 1 月 8 日).
4. プラスチック循環利用協会. 2021 年 プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況（マテリアルフロー図）. Available online: <https://www.pwmi.or.jp/data.php?p=panf> (accessed on 2023 年 1 月 6 日).
5. 海洋プラスチック問題対応協議会（JaIME）. プラスチック製容器包装再商品化手法およびエネルギーリカバリーの環境負荷評価（LCA）. Available online: <https://www.nikkakyo.org/news/page/7599> (accessed on 2023 年 1 月 8 日).
6. Shamsuyeva, M.; Endres, H.J. Plastics in the context of the circular economy and sustainable plastics recycling: Comprehensive review on research development, standardization and market. *Composites Part C: Open Access* **2021**, 6, doi:10.1016/j.jcomc.2021.100168.
7. Kosloski-Oh, S.C.; Wood, Z.A.; Manjarrez, Y.; de los Rios, J.P.; Fieser, M.E. Catalytic methods for chemical recycling or upcycling of commercial polymers. *Materials Horizons* **2021**, 8, 1084-1129, doi:10.1039/d0mh01286f.
8. Zhuo, C.W.; Levendis, Y.A. Upcycling Waste Plastics into Carbon Nanomaterials: A Review. *Journal of Applied Polymer Science* **2014**, 131, doi:10.1002/app.39931.
9. Bergeron, P.; Hiller, C.A. Competitive intelligence. *Annual Review of Information Science and Technology* **2002**, 36, 353-390, doi:10.1002/aris.1440360109.
10. van den Berg, L.; Ben, C.; Mearns, M. Establishing competitive intelligence process elements in sport performance analysis and coaching: A comparative systematic literature review. *International Journal of Information Management* **2020**, 52, doi:10.1016/j.ijinfomgt.2020.102071.
11. Freyn, S.L.; Farley, F. Competitive intelligence: a prescription for US health-care? *Foresight* **2020**, 22, 617-632, doi:10.1108/fs-02-2020-0011.
12. Garcia-Alsina, M.; Ortoll, E.; Cobarsi-Morales, J. Enabler and inhibitor factors influencing competitive intelligence practices. *Aslib Proceedings* **2013**, 65, 262-288, doi:10.1108/00012531311330647.

13. Garcia-Alsina, M.; Cobarsi-Morales, J.; Ortoll, E. Competitive intelligence theoretical framework and practices The case of Spanish universities. *Aslib J. Inf. Manag.* **2016**, *68*, 57-75, doi:10.1108/ajim-04-2015-0061.
14. Cai, Y.M.; Jia, S.L. Competitive Intelligence for Small-and-Medium-Sized Enterprises in the Globalization of Trade. In Proceedings of the Proceedings of International Conference on Technological Innovation and Competitive Technical Intelligence 2010, Peking Univ, Beijing, PEOPLES R CHINA, Dec 03-05, 2010; pp. 382-390.
15. Tao, Q.J. CI and Global Oriented Chinese Enterprises. In Proceedings of the Proceedings of International Conference on Technological Innovation and Competitive Technical Intelligence 2010, Peking Univ, Beijing, PEOPLES R CHINA, Dec 03-05, 2010; pp. 298-307.
16. Yoon, J.; Kim, K. Identifying rapidly evolving technological trends for R&D planning using SAO-based semantic patent networks. *Scientometrics* **2011**, *88*, 213-228, doi:10.1007/s11192-011-0383-0.
17. Wang, B.; Liu, S.B.; Ding, K.; Liu, Z.Y.; Xu, J. Identifying technological topics and institution-topic distribution probability for patent competitive intelligence analysis: a case study in LTE technology. *Scientometrics* **2014**, *101*, 685-704, doi:10.1007/s11192-014-1342-3.
18. Zhang, Y.; Zhou, X.; Porter, A.L.; Gomila, J.M.V. How to combine term clumping and technology roadmapping for newly emerging science & technology competitive intelligence: "problem & solution" pattern based semantic TRIZ tool and case study. *Scientometrics* **2014**, *101*, 1375-1389, doi:10.1007/s11192-014-1262-2.
19. Yan, B.W.; Luo, J.X. Measuring technological distance for patent mapping. *Journal of the Association for Information Science and Technology* **2017**, *68*, 423-437, doi:10.1002/asi.23664.
20. Sandal, N., Gupta, P., Sharma, R.K., Sepat, N.K., Kumar, A., Chand, S. and Rakesh, K. . Patent search tools for competitive intelligence for product design and development of CBRN decon device. *Desidoc Journal of Library & Information Technology* **2017**, *7*, 135-143.
21. Milanez, D.H., Faria, L.I.L., Amaral, R.M., and Gregolin, J.A.R. Claim-based patent indicators: a novel approach to analyze patent content and monitor technological advances. *World Patent Information* **2017**, *50*, 64-72.
22. Kay, L.; Newman, N.; Youtie, J.; Porter, A.L.; Rafols, I. Patent Overlay Mapping: Visualizing Technological Distance. *Journal of the Association for Information Science and Technology* **2014**, *65*, 2432-2443, doi:10.1002/asi.23146.
23. He, W.; Zha, S.H.; Li, L. Social media competitive analysis and text mining: A case study

- in the pizza industry. *International Journal of Information Management* **2013**, *33*, 464-472, doi:10.1016/j.ijinfomgt.2013.01.001.
24. Kim, Y.; Dwivedi, R.; Zhang, J.; Jeong, S.R. Competitive intelligence in social media Twitter: iPhone 6 vs. Galaxy S5. *Online Information Review* **2016**, *40*, 42-61, doi:10.1108/oir-03-2015-0068.
 25. Vaughan, L.; Gao, Y.J.; Kipp, M. Why are hyperlinks to business Websites created? A content analysis. *Scientometrics* **2006**, *67*, 291-300, doi:10.1556/Scient.67.2006.2.10.
 26. Marin, J.; Poulter, A. Dissemination of competitive intelligence. *Journal of Information Science* **2004**, *30*, 165-180, doi:10.1177/0165551504042806.
 27. Zheng, Z.Q.; Fader, P.; Padmanabhan, B. From Business Intelligence to Competitive Intelligence: Inferring Competitive Measures Using Augmented Site-Centric Data. *Information Systems Research* **2012**, *23*, 698-720, doi:10.1287/isre.1110.0385.
 28. Donohue, D., and Murphy, P. M. Supporting competitive intelligence at DuPont by Controlling Information Overload and Cutting Through the Noise. *Journal of Information & Knowledge Management* **2016**, *15*.
 29. Hoffman, F.P.; Freyn, S.L. The future of competitive intelligence in an AI-enabled world. *International Journal of Value Chain Management* **2019**, *10*, 275-289.
 30. de Almeida, F.C.; Lesca, H.; Canton, A.W.P. Intrinsic motivation for knowledge sharing - competitive intelligence process in a telecom company. *Journal of Knowledge Management* **2016**, *20*, 1282-1301, doi:10.1108/jkm-02-2016-0083.
 31. Heinrichs, J.H.; Lim, J.S. Model for organizational knowledge creation and strategic use of information. *Journal of the American Society for Information Science and Technology* **2005**, *56*, 620-629, doi:10.1002/asi.20152.
 32. Calof, J. Canadian competitive intelligence practices - a study of practicing strategic and competitive intelligence professionals Canadian members. *Foresight* **2017**, *19*, 577-589, doi:https://doi.org/10.1108/FS-07-2017-0024.
 33. Priporas, C.V. Competitive intelligence practice in liquor retailing: evidence from a longitudinal case analysis. *International Journal of Retail & Distribution Management* **2019**, *47*, 997-1010, doi:10.1108/ijrdm-08-2018-0177.
 34. Koseoglu, M.A.; Chan, E.S.W.; Okumus, F.; Altin, M. How do hotels operationalize their competitive intelligence efforts into their management processes? Proposing a holistic model. *International Journal of Hospitality Management* **2019**, *83*, 283-292, doi:10.1016/j.ijhm.2018.11.007.
 35. Calof, J. The impact of firm size on competitive intelligence activities. *Foresight* **2020**, *22*, 563-577, doi:10.1108/fs-08-2020-0080.
 36. Yap, C.S.; Rashid, M.Z.A. Acquisition and strategic use of competitive intelligence.

- Malaysian Journal of Library & Information Science* **2011**, *16*, 125-136.
37. Yap, C.S.; Rashid, M.Z.A. Competitive Intelligence Practices and Firm Performance. *Libri* **2011**, *61*, 175-189, doi:10.1515/libr.2011.015.
 38. Jin, T.; Ju, B.Y. The Corporate Information Agency: Do Competitive Intelligence Practitioners Utilize It? *Journal of the Association for Information Science and Technology* **2014**, *65*, 589-608, doi:10.1002/asi.22993.
 39. Wang, W.J.; Cao, Y.M.; Gan, C.M. Service Mode of Competitive Technical Intelligence Based on KPO. In Proceedings of the Proceedings of International Conference on Technological Innovation and Competitive Technical Intelligence 2010, Peking Univ, Beijing, PEOPLES R CHINA, Dec 03-05, 2010; pp. 200-208.
 40. Powell, J.H.; Bradford, J.P. Targeting intelligence gathering in a dynamic competitive environment. *International Journal of Information Management* **2000**, *20*, 181-195, doi:10.1016/s0268-4012(00)00004-9.
 41. Pirttila, A. Organising competitive intelligence activities in a corporate organisation. *Aslib Proceedings* **1998**, *50*, 79-84, doi:10.1108/eb051487.
 42. Asghari, S.; Targholi, S.; Kazemi, A.; Shahriyari, S.; Rajabion, L. A new conceptual framework for identifying the factors influencing the effectiveness of competitive intelligence. *Competitiveness Review* **2020**, *30*, 555-576, doi:10.1108/cr-05-2019-0054.
 43. Salguero, G.C.; Gamez, M.A.F.; Fernandez, I.A.; Palomo, D.R. Competitive Intelligence and Sustainable Competitive Advantage in the Hotel Industry. *Sustainability* **2019**, *11*, doi:10.3390/su11061597.
 44. Shujahat, M., Hussain, S., Javed, S., Malik, M.I., Thurasamy, R. and Ali, J. Strategic management model with lens of knowledge management and competitive intelligence: a review approach. *Vine Journal of Information and Knowledge Management Systems* **2017**, *47*, 55-93, doi:https://doi.org/10.1108/VJIKMS-06-2016-0035.
 45. Chandan, H.C. Blurred Lines between Competitive Intelligence and Corporate Espionage. In *Corporate Espionage, Geopolitics, and Diplomacy Issues in International Business*; Advances in Finance Accounting and Economics; 2017; pp. 1-12.
 46. Lopez-Robles, J.R.; Otegi-Olaso, J.R.; Porto-Gomez, I.; Gamboa-Rosales, H.; Gamboa-Rosales, N.K. Understanding the intellectual structure and evolution of Competitive Intelligence: a bibliometric analysis from 1984 to 2017. *Technology Analysis & Strategic Management* **2020**, *32*, 604-619, doi:10.1080/09537325.2019.1686136.
 47. Dinu, D.G. The encroachment of the competitive intelligence's functions on the companies' profit. In Proceedings of the 11th Annual Conference of the EuroMed-Academy-of-Business - Research Advancements in National and Global Business Theory and Practice, Valletta, MALTA, Sep 12-14, 2018; pp. 1530-1534.

48. Saayman, A.; Pienaar, J.; de Pelsmacker, P.; Viviers, W.; Cuyvers, L.; Muller, M.L.; Jegers, M. Competitive intelligence: construct exploration, validation and equivalence. *Aslib Proceedings* **2008**, *60*, 383-411, doi:10.1108/00012530810888006.
49. Heppes, D.; du Toit, A. Level of maturity of the competitive intelligence function Case study of a retail bank in South Africa. *Aslib Proceedings* **2009**, *61*, 48-66, doi:10.1108/00012530910932285.
50. Isberg, C.; Nelke, M. *Competitive intelligence*; 2010; pp. 19-41.
51. Strauss, A.C.; du Toit, A.S.A. Competitive intelligence skills needed to enhance South Africa's competitiveness. *Aslib Proceedings* **2010**, *62*, 302-320, doi:10.1108/00012531011046925.
52. du Plessis, T.a.G., M. . Developing a competitive intelligence strategy framework supporting the competitive intelligence needs of a financial institution's decision makers. *South African Journal of Information Management* **2016**, *18*, doi:https://doi.org/10.4102/sajim.v18i2.726.
53. McGonagle, J.J.a.M.-E., M. The changing landscape of competitive intelligence, two critical issues investigated. *Salus Journal* **2016**, *4*, 13-24.
54. Tsitoura, N.; Stephens, D. Development and evaluation of a framework to explain causes of competitive intelligence failures. *Information Research-an International Electronic Journal* **2012**, *17*.
55. Maungwa, T.; Fourie, I. Competitive intelligence failures An information behaviour lens to key intelligence and information needs. *Aslib J. Inf. Manag.* **2018**, *70*, 367-389, doi:10.1108/ajim-01-2018-0018.
56. Maungwa, T.; Fourie, I. Exploring and understanding the causes of competitive intelligence failures: an information behaviour lens. *Information Research-an International Electronic Journal* **2018**, *23*.
57. Bose, R. Competitive intelligence process and tools for intelligence analysis. *Industrial Management & Data Systems* **2008**, *108*, 510-528, doi:10.1108/02635570810868362.
58. Amarouche, K.; El Akrouchi, M.; Benbrahim, H.; Kassou, I. Introduction to Competitive Intelligence: Process, Applications and Tools. In Proceedings of the 27th International Business Information Management Association Conference, Milan, ITALY, May 04-05, 2016; pp. 2876-2885.
59. Sewdass, N.; Du Toit, A. Current state of competitive intelligence in South Africa. *International Journal of Information Management* **2014**, *34*, 185-190, doi:10.1016/j.ijinfomgt.2013.10.006.
60. Calof, J.; Swedass, N. On the relationship between competitive intelligence and innovation. *Journal of Intelligence Studies in Business* **2020**, *10*, 32-43.

61. Atkinson, P.; Hizaji, M.; Nazarian, A.; Abasi, A. Attaining organisational agility through competitive intelligence: the roles of strategic flexibility and organisational innovation. *Total Quality Management & Business Excellence* **2022**, *33*, 297-317, doi:10.1080/14783363.2020.1842188.
62. Hassani, A.; Mosconi, E. Competitive intelligence and absorptive capacity for enhancing innovation performance of SMEs. *Journal of Intelligence Studies in Business* **2021**, *11*, 19-32.
63. de las Heras-Rosas, C.; Herrera, J. Innovation and Competitive Intelligence in Business. A Bibliometric Analysis. *International Journal of Financial Studies* **2021**, *9*, doi:10.3390/ijfs9020031.
64. Poblano-Ojinaga, E.R.; Lopez, R.R.; Gomez, J.A.H.; Torres-Arguelles, V. Effect of competitive intelligence on innovation capability: An exploratory study in Mexican companies. *Journal of Intelligence Studies in Business* **2019**, *9*, 62-67.
65. Yap, C.S.; Rashid, M.Z.A.; Sapuan, D.A. Organizational strategy and competitive intelligence practices in Malaysian public listed companies. *Information Research-an International Electronic Journal* **2012**, *17*.
66. Bao, Y.L. Competitive intelligence and its impact on innovations in tourism industry of China: An empirical research. *Plos One* **2020**, *15*, doi:10.1371/journal.pone.0236412.
67. Kokubo, A. Japanese competitive intelligence for research-and-development. *Research-Technology Management* **1992**, *35*, 33-34, doi:10.1080/08956308.1992.11670793.
68. Kokubo, A. Competitive intelligence. *Ieee Spectrum* **1993**, *30*, 44-46, doi:10.1109/6.223641.
69. March, J.G. Exploration and exploitation in organizational learning. *Organization Science* **1991**, *2*, 71-87, doi:10.1287/orsc.2.1.71.
70. Yin, R.K. *Case Study Research Design and Methods (5th ed.)*; SAGE Publications, Inc: Thousand Oaks, CA, 2014.
71. Glaser, B.G.a.S., A.L. *The Discovery of Grounded theory: Strategy for Qualitative Research*; Sociology Press: Mill Valley, CA, 1967.
72. Erickson, S.; Rothberg, H. Knowledge Asset Potential vs. Vulnerability: Balancing Risks. In Proceedings of the 5th International Conference on Intellectual Capital and Knowledge Management and Organisational Learning, New York Inst Technol, New York, NY, Oct 09-10, 2008; pp. 167-+.
73. Ghannay, J.C.; Zeineb, B.M. Synergy Between Competitive Intelligence and Knowledge Management: A key for Competitive Advantage. In Proceedings of the 13th European Conference on Knowledge Management (ECKM), Univ Politecnica Cartagena, SPAIN, Sep 06-07, 2012; pp. 198-207.

74. Taib, K.M.; Yatin, S.F.M.; Ahmad, A.R.; Mansor, A.N. Knowledge Management and Competitive Intelligence: A Synergy for Organizational Competitiveness in the K-Economy. In Proceedings of the 10th International-Business-Information-Management-Association Conference, Kuala Lumpur, MALAYSIA, Jun 30-Jul 01, 2008; pp. 1165-1174.
75. Katz, R.; Allen, T.J. Investigating the not invented here (NIH) syndrome - a look at the performance, tenure, and communication patterns of 50 r-and-d project groups. *R & D Management* **1982**, *12*, 7-19, doi:10.1111/j.1467-9310.1982.tb00478.x.
76. Cohen, W.M.; Levinthal, D.A. Absorptive-capacity - a new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly* **1990**, *35*, 128-152, doi:10.2307/2393553.
77. Tsai, W.P. Knowledge transfer in intraorganizational networks: Effects of network position and absorptive capacity on business unit innovation and performance. *Academy of Management Journal* **2001**, *44*, 996-1004, doi:10.2307/3069443.
78. Lane, P.J.; Koka, B.R.; Pathak, S. The reification of absorptive capacity: A critical review and rejuvenation of the construct. *Academy of Management Review* **2006**, *31*, 833-863, doi:10.5465/amr.2006.22527456.
79. Zahra, S.A.; George, G. Absorptive capacity: A review, reconceptualization, and extension. *Academy of Management Review* **2002**, *27*, 185-203, doi:10.2307/4134351.
80. Hopewell, J.; Dvorak, R.; Kosior, E. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* **2009**, *364*, 2115-2126, doi:10.1098/rstb.2008.0311.
81. International Organization for Standardization. ISO/TC 323; Circular economy. Available online: <https://www.iso.org/committee/7203984.html> (accessed on 24th August 2022).
82. Al-Salem, S.M.; Lettieri, P.; Baeyens, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management* **2009**, *29*, 2625-2643, doi:10.1016/j.wasman.2009.06.004.
83. International Organization for Standardization. ISO 15270:2008; Plastics - Guidelines for the recovery and recycling of plastics waste. Available online: <https://www.iso.org/standard/45089.html> (accessed on 24th August 2022).
84. Schyns, Z.O.G.; Shaver, M.P. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular Rapid Communications* **2021**, *42*, doi:10.1002/marc.202000415.
85. Idemitsu Kosan Co., L. Started Japan's First Demonstration Study of Waste Plastic Recycling including Mixed waste Plastics at Chiba Complex. - Construct a waste plastics recycling system by new liquefaction technology and our petroleum refining & petrochemical plants. Available online:

- <https://www.idemitsu.com/en/news/2021/0507.html> (accessed on 24th August 2022).
86. United States Environmental Protection Agency. Plastics: Material-Specific Data. Available online: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data#PlasticsTableandGraph> (accessed on 24th August 2022).
 87. Plastics Europe. Plastics – the Facts 2020: An analysis of European plastics production, demand and waste data. Available online: chrome-extension://oemmnndcbldboiebfnladdacbfmadadm/https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/09/Plastics_the_facts-WEB-2020_versionJun21_final.pdf (accessed on 24th August 2022).
 88. Wen, Z.G.; Xie, Y.L.; Chen, M.H.; Dinga, C.D. China's plastic import ban increases prospects of environmental impact mitigation of plastic waste trade flow worldwide. *Nature Communications* **2021**, *12*, doi:10.1038/s41467-020-20741-9.
 89. Soni, V.K.; Singh, G.; Vijayan, B.K.; Chopra, A.; Kapur, G.S.; Ramakumar, S.S.V. Thermochemical Recycling of Waste Plastics by Pyrolysis: A Review. *Energy & Fuels* **2021**, *35*, 12763-12808, doi:10.1021/acs.energyfuels.1c01292.
 90. Sharuddin, S.D.A.; Abnisa, F.; Daud, W.; Aroua, M.K. A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management* **2016**, *115*, 308-326, doi:10.1016/j.enconman.2016.02.037.
 91. Lopez, G.; Artetxe, M.; Amutio, M.; Alvarez, J.; Bilbao, J.; Olazar, M. Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **2018**, *82*, 576-596, doi:10.1016/j.rser.2017.09.032.
 92. Moharir, R.V.; Kumar, S. Challenges associated with plastic waste disposal and allied microbial routes for its effective degradation: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production* **2019**, *208*, 65-76, doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.059.
 93. Hatti-Kaul, R.; Nilsson, L.J.; Zhang, B.Z.; Rehnberg, N.; Lundmark, S. Designing Biobased Recyclable Polymers for Plastics. *Trends in Biotechnology* **2020**, *38*, 50-67, doi:10.1016/j.tibtech.2019.04.011.
 94. Rodriguez, A.; Laio, A. Clustering by fast search and find of density peaks. *Science* **2014**, *344*, 1492-1496, doi:10.1126/science.1242072.
 95. de Sousa, F.D.B. Management of plastic waste: A bibliometric mapping and analysis. *Waste Management & Research* **2021**, *39*, 664-678, doi:10.1177/0734242x21992422.
 96. Tsai, F.M.; Bui, T.D.; Tseng, M.L.; Lim, M.K.; Hu, J.Y. Municipal solid waste management in a circular economy: A data-driven bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production* **2020**, *275*, doi:10.1016/j.jclepro.2020.124132.
 97. Armenise, S.; SyieLuing, W.; Ramirez-Velasquez, J.M.; Launay, F.; Wuebben, D.; Ngadi,

- N.; Rams, J.; Munoz, M. Plastic waste recycling via pyrolysis: A bibliometric survey and literature review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **2021**, *158*, doi:10.1016/j.jaap.2021.105265.
98. Wang, Q.; Zhang, M.; Li, R.R. The COVID-19 pandemic reshapes the plastic pollution research - A comparative analysis of plastic pollution research before and during the pandemic. *Environmental Research* **2022**, *208*, doi:10.1016/j.envres.2021.112634.
 99. Sandanayake, M.; Bouras, Y.; Haigh, R.; Vrcelj, Z. Current Sustainable Trends of Using Waste Materials in Concrete-A Decade Review. *Sustainability* **2020**, *12*, doi:10.3390/su12229622.
 100. Shibata, N.; Kajikawa, Y.; Takeda, Y.; Matsushima, K. Comparative Study on Methods of Detecting Research Fronts Using Different Types of Citation. *Journal of the American Society for Information Science and Technology* **2009**, *60*, 571-580, doi:10.1002/asi.20994.
 101. Newman, M.E.J. Fast algorithm for detecting community structure in networks. *Physical Review E* **2004**, *69*, doi:10.1103/PhysRevE.69.066133.
 102. Kajikawa, Y.; Yoshikawa, J.; Takeda, Y.; Matsushima, K. Tracking emerging technologies in energy research: Toward a roadmap for sustainable energy. *Technological Forecasting and Social Change* **2008**, *75*, 771-782, doi:10.1016/j.techfore.2007.05.005.
 103. Shibata, N.; Kajikawa, A.; Sakata, I. Measuring Relatedness Between Communities in a Citation Network. *Journal of the American Society for Information Science and Technology* **2011**, *62*, 1360-1369, doi:10.1002/asi.21477.
 104. Kajikawa, Y.; Takeda, Y. Structure of research on biomass and bio-fuels: A citation-based approach. *Technological Forecasting and Social Change* **2008**, *75*, 1349-1359, doi:10.1016/j.techfore.2008.04.007.
 105. Ittipanuvat, V.; Fujita, K.; Sakata, I.; Kajikawa, Y. Finding linkage between technology and social issue: A Literature Based Discovery approach. *Journal of Engineering and Technology Management* **2014**, *32*, 160-184, doi:10.1016/j.jengtecman.2013.05.006.
 106. Naoki Shibata, Y.K., Ichiro Sakata. Detecting potential technological fronts by comparing scientific papers and patents. *Foresight* **2011**, *13*, 51-60.
 107. Takeda, Y.; Kajikawa, Y. Tracking modularity in citation networks. *Scientometrics* **2010**, *83*, 783-792, doi:org/10.1007/s11192-010-0158-z.
 108. Salton, G.; Buckley, C. TERM-WEIGHTING APPROACHES IN AUTOMATIC TEXT RETRIEVAL. *Information Processing & Management* **1988**, *24*, 513-523, doi:10.1016/0306-4573(88)90021-0.
 109. Singhal, A. Modern Information Retrieval: A Brief Overview. *Bull. IEEE Comput. Soc. Technol. Comm.Data Eng.* **2001**.

110. Al-Salem, S.M.; Lettieri, P.; Baeyens, J. The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals. *Progress in Energy and Combustion Science* **2010**, *36*, 103-129, doi:10.1016/j.pecs.2009.09.001.
111. Grand View Research Inc. Plastic to Fuel Market Size, Share & Trends Analysis Report by Technology (Pyrolysis, Gasification, Depolymerization), by End-fuel(Sulfur, Hydrogen, Crude Oil), by Region, And Segment Forecasts,2020 – 2027. Available online: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/plastic-to-fuel-market> (accessed on 24 August 2022).
112. Kumar, S.; Singh, E.; Mishra, R.; Kumar, A.; Caucci, S. Utilization of Plastic Wastes for Sustainable Environmental Management: A Review. *Chemsuschem* **2021**, *14*, 3985-4006, doi:10.1002/cssc.202101631.
113. Kumagai, S.; Yoshioka, T. Chemical Feedstock Recovery from Hard-to-Recycle Plastics through Pyrolysis-Based Approaches and Pyrolysis-Gas Chromatography. *Bulletin of the Chemical Society of Japan* **2021**, *94*, 2370-2380, doi:10.1246/bcsj.20210219.
114. Al-Salem, S.M.; Antelava, A.; Constantinou, A.; Manos, G.; Dutta, A. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal of Environmental Management* **2017**, *197*, 177-198, doi:10.1016/j.jenvman.2017.03.084.
115. Kunwar, B.; Cheng, H.N.; Chandrashekar, S.R.; Sharma, B.K. Plastics to fuel: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **2016**, *54*, 421-428, doi:10.1016/j.rser.2015.10.015.
116. Prajapati, R.; Kohli, K.; Maity, S.K.; Sharma, B.K. Potential Chemicals from Plastic Wastes. *Molecules* **2021**, *26*, doi:10.3390/molecules26113175.
117. Chen, H.; Wan, K.; Zhang, Y.Y.; Wang, Y.Q. Waste to Wealth: Chemical Recycling and Chemical Upcycling of Waste Plastics for a Great Future. *Chemsuschem* **2021**, *14*, 4123-4136, doi:10.1002/cssc.202100652.
118. Showa Denko K.K. Showa Denko Got a License to Process Industrial Waste, Aiming to Promote Plastic Chemical Recycling. Available online: <https://www.sdk.co.jp/english/news/2020/38930.html> (accessed on 24th August 2022).
119. Caputto, M.D.D.; Navarro, R.; Valentin, J.L.; Marcos-Fernandez, A. Chemical upcycling of poly(ethylene terephthalate) waste: Moving to a circular model. *Journal of Polymer Science*, doi:10.1002/pol.20220137.
120. Thiagarajan, S.; Maaskant-Reilink, E.; Ewing, T.A.; Julsing, M.K.; van Haveren, J. Back-to-monomer recycling of polycondensation polymers: opportunities for chemicals and enzymes. *Rsc Advances* **2021**, *12*, 947-970, doi:10.1039/d1ra08217e.
121. Jiang, J.; Shi, K.; Zhang, X.N.; Yu, K.; Zhang, H.; He, J.; Ju, Y.; Liu, J.L. From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review. *Journal of Environmental Chemical*

- Engineering* **2022**, *10*, doi:10.1016/j.jece.2021.106867.
122. Quicker, P.; Seitz, M.; Vogel, J. Chemical recycling: A critical assessment of potential process approaches. *Waste Management & Research*, doi:10.1177/0734242x221084044.
 123. Lazarevic, D.; Aoustin, E.; Buclet, N.; Brandt, N. Plastic waste management in the context of a European recycling society: Comparing results and uncertainties in a life cycle perspective. *Resources Conservation and Recycling* **2010**, *55*, 246-259, doi:10.1016/j.resconrec.2010.09.014.
 124. Antelava, A.; Damilos, S.; Hafeez, S.; Manos, G.; Al-Salem, S.M.; Sharma, B.K.; Kohli, K.; Constantinou, A. Plastic Solid Waste (PSW) in the Context of Life Cycle Assessment (LCA) and Sustainable Management. *Environmental Management* **2019**, *64*, 230-244, doi:10.1007/s00267-019-01178-3.
 125. Gu, F.; Guo, J.F.; Zhang, W.J.; Summers, P.A.; Hall, P. From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. *Science of the Total Environment* **2017**, *601*, 1192-1207, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.05.278.
 126. Chen, Y.D.; Cui, Z.J.; Cui, X.W.; Liu, W.; Wang, X.L.; Li, X.X.; Li, S.X. Life cycle assessment of end-of-life treatments of waste plastics in China. *Resources Conservation and Recycling* **2019**, *146*, 348-357, doi:10.1016/j.resconrec.2019.03.011.
 127. Faraca, G.; Martinez-Sanchez, V.; Astrup, T.F. Environmental life cycle cost assessment: Recycling of hard plastic waste collected at Danish recycling centres. *Resources Conservation and Recycling* **2019**, *143*, 299-309, doi:10.1016/j.resconrec.2019.01.014.
 128. Alhazmi, H.; Almansour, F.H.; Aldhfeeri, Z. Plastic Waste Management: A Review of Existing Life Cycle Assessment Studies. *Sustainability* **2021**, *13*, doi:10.3390/su13105340.
 129. Meys, R.; Frick, F.; Westhues, S.; Sternberg, A.; Klankermayer, J.; Bardow, A. Towards a circular economy for plastic packaging wastes - the environmental potential of chemical recycling. *Resources Conservation and Recycling* **2020**, *162*, doi:10.1016/j.resconrec.2020.105010.
 130. Patel, M.; von Thienen, N.; Jochem, E.; Worrell, E. Recycling of plastics in Germany. *Resources Conservation and Recycling* **2000**, *29*, 65-90, doi:10.1016/s0921-3449(99)00058-0.
 131. Davidson, M.G.; Furlong, R.A.; McManus, M.C. Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste e A review. *Journal of Cleaner Production* **2021**, *293*, doi:10.1016/j.jclepro.2021.126163.
 132. Chaudhari, U.S.; Lin, Y.Q.; Thompson, V.S.; Handler, R.M.; Pearce, J.M.; Caneba, G.; Muhuri, P.; Watkins, D.; Shonnard, D.R. Systems Analysis Approach to Polyethylene

- Terephthalate and Olefin Plastics Supply Chains in the Circular Economy: A Review of Data Sets and Models. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering* **2021**, *9*, 7403-7421, doi:10.1021/acssuschemeng.0c08622.
133. Bernardo, C.A.; Simoes, C.L.; Pinto, L.M.C. Environmental and Economic Life Cycle Analysis of Plastic Waste Management Options. A Review. In Proceedings of the Regional Conference of the Polymer-Processing-Society (PPS), Graz, AUSTRIA, Sep 21-25, 2015.
 134. Finnveden, G.; Ekvall, T. Life-cycle assessment as a decision-support tool - the case of recycling versus incineration of paper. *Resources Conservation and Recycling* **1998**, *24*, 235-256, doi:10.1016/s0921-3449(98)00039-1.
 135. Yin, S.; Tuladhar, R.; Shi, F.; Shanks, R.A.; Combe, M.; Collister, T. Mechanical Reprocessing of Polyolefin Waste: A Review. *Polymer Engineering and Science* **2015**, *55*, 2899-2909, doi:10.1002/pen.24182.
 136. Yin, S.; Tuladhar, R.; Shi, F.; Combe, M.; Collister, T.; Sivakugan, N. Use of macro plastic fibres in concrete: A review. *Construction and Building Materials* **2015**, *93*, 180-188, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.105.
 137. Endres, H.-J. Recycling ist nicht gleich Recycling. Available online: https://www.researchgate.net/publication/349694539_Recycling_ist_nicht_gleich_Recycling (accessed on 24 August 2022).
 138. W. McDonough, M.B. *Cradle to cradle: Remaking the Way We Make Things*, 1st ed.; North Point Press: 19 Union Square W, Manhattan, New York, NY, 2002.
 139. Maris, J.; Bourdon, S.; Brossard, J.M.; Cauret, L.; Fontaine, L.; Montembault, V. Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes. *Polymer Degradation and Stability* **2018**, *147*, 245-266, doi:10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.001.
 140. Schwetlick, K.; Habicher, W.D. Antioxidant action mechanisms of hindered amine stabilisers. *Polymer Degradation and Stability* **2002**, *78*, 35-40, doi:10.1016/s0141-3910(02)00116-7.
 141. Maringer, L.; Grabmann, M.; Muik, M.; Nitsche, D.; Romanin, C.; Wallner, G.; Buchberger, W. Investigations on the distribution of polymer additives in polypropylene using confocal fluorescence microscopy. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization* **2017**, *22*, 692-698, doi:10.1080/1023666x.2017.1367120.
 142. Braun, D. Recycling of PVC. *Progress in Polymer Science* **2002**, *27*, 2171-2195, doi:10.1016/s0079-6700(02)00036-9.
 143. Everard, M. Twenty Years of the Polyvinyl Chloride Sustainability Challenges. *Journal of Vinyl & Additive Technology* **2020**, *26*, 390-402, doi:10.1002/vnl.21754.

144. Remili, C.; Kaci, M.; Benhamida, A.; Bruzaud, S.; Grohens, Y. The effects of reprocessing cycles on the structure and properties of polystyrene/Cloisite 15A nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability* **2011**, *96*, 1489-1496, doi:10.1016/j.polymdegradstab.2011.05.005.
145. Rujnic-Sokele, M.; Pilipovic, A. Challenges and opportunities of biodegradable plastics: A mini review. *Waste Management & Research* **2017**, *35*, 132-140, doi:10.1177/0734242x16683272.
146. Weber, M.; Makarow, D.; Unger, B.; Mortier, N.; De Wilde, B.; van Eekert, M.; Schuman, E.; Tosin, M.; Pognani, M.; Innocenti, F.D.; et al. Assessing Marine Biodegradability of Plastic-Towards an Environmentally Relevant International Standard Test Scheme. In Proceedings of the International Conference on Microplastic Pollution in the Mediterranean Sea, Capri, ITALY, Sep 26-29, 2017.
147. Ellis, L.D.; Rorrer, N.A.; Sullivan, K.P.; Otto, M.; McGeehan, J.E.; Roman-Leshkov, Y.; Wierckx, N.; Beckham, G.T. Chemical and biological catalysis for plastics recycling and upcycling. *Nature Catalysis* **2021**, *4*, 539-556, doi:10.1038/s41929-021-00648-4.
148. Qin, Z.H.; Mou, J.H.; Chao, C.Y.H.; Chopra, S.S.; Daoud, W.; Leu, S.Y.; Ning, Z.; Tso, C.Y.; Chan, C.K.; Tang, S.X.; et al. Biotechnology of Plastic Waste Degradation, Recycling, and Valorization: Current Advances and Future Perspectives. *Chemsuschem* **2021**, *14*, 4103-4114, doi:10.1002/cssc.202100752.
149. Albertsson, A.C.; Karlsson, S. The influence of biotic and abiotic environments on the degradation of polyethylene. *Progress in Polymer Science* **1990**, *15*, 177-192, doi:10.1016/0079-6700(90)90027-x.
150. Ammala, A.; Bateman, S.; Dean, K.; Petinakis, E.; Sangwan, P.; Wong, S.; Yuan, Q.; Yu, L.; Patrick, C.; Leong, K.H. An overview of degradable and biodegradable polyolefins. *Progress in Polymer Science* **2011**, *36*, 1015-1049, doi:10.1016/j.progpolymsci.2010.12.002.
151. Montazer, Z.; Najafi, M.B.H.; Levin, D.B. Microbial degradation of low-density polyethylene and synthesis of polyhydroxyalkanoate polymers. *Canadian Journal of Microbiology* **2019**, *65*, 224-234, doi:10.1139/cjm-2018-0335.
152. Ru, J.K.; Huo, Y.X.; Yang, Y. Microbial Degradation and Valorization of Plastic Wastes. *Frontiers in Microbiology* **2020**, *11*, doi:10.3389/fmicb.2020.00442.
153. Yoshida, S.; Hiraga, K.; Takehana, T.; Taniguchi, I.; Yamaji, H.; Maeda, Y.; Toyohara, K.; Miyamoto, K.; Kimura, Y.; Oda, K. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* **2016**, *351*, 1196-1199, doi:10.1126/science.aad6359.
154. Bollinger, A.; Thies, S.; Knieps-Grunhagen, E.; Gertzen, C.; Kobus, S.; Hoppner, A.;

- Ferrer, M.; Gohlke, H.; Smits, S.H.J.; Jaeger, K.E. A Novel Polyester Hydrolase From the Marine Bacterium *Pseudomonas aestusnigri* - Structural and Functional Insights. *Frontiers in Microbiology* **2020**, *11*, doi:10.3389/fmicb.2020.00114.
155. Xi, X.X.; Ni, K.F.; Hao, H.L.; Shang, Y.P.; Zhao, B.; Qian, Z. Secretory expression in *Bacillus subtilis* and biochemical characterization of a highly thermostable polyethylene terephthalate hydrolase from bacterium HR29. *Enzyme and Microbial Technology* **2021**, *143*, doi:10.1016/j.enzmictec.2020.109715.
 156. Moog, D.; Schmitt, J.; Senger, J.; Zarzycki, J.; Rexer, K.H.; Linne, U.; Erb, T.J.; Maier, U.G. Using a marine microalga as a chassis for polyethylene terephthalate (PET) degradation (vol 18, 171, 2019). *Microbial Cell Factories* **2020**, *19*, doi:10.1186/s12934-019-1269-8.
 157. Nakajima-Kambe, T.; Shigeno-Akutsu, Y.; Nomura, N.; Onuma, F.; Nakahara, T. Microbial degradation of polyurethane, polyester polyurethanes and polyether polyurethanes. *Applied Microbiology and Biotechnology* **1999**, *51*, 134-140, doi:10.1007/s002530051373.
 158. Howard, G.T. Biodegradation of polyurethane: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation* **2002**, *49*, 245-252, doi:10.1016/s0964-8305(02)00051-3.
 159. Lamberti, F.M.; Roman-Ramirez, L.A.; Wood, J. Recycling of Bioplastics: Routes and Benefits. *Journal of Polymers and the Environment* **2020**, *28*, 2551-2571, doi:10.1007/s10924-020-01795-8.
 160. Lemmouchi, Y.; Murariu, M.; Dos Santos, A.M.; Amass, A.J.; Schacht, E.; Dubois, P. Plasticization of poly(lactide) with blends of tributyl citrate and low molecular weight poly(D,L-lactide)-b-poly(ethylene glycol) copolymers. *European Polymer Journal* **2009**, *45*, 2839-2848, doi:10.1016/j.eurpolymj.2009.07.006.
 161. European Bioplastics Association. *Bioplastics facts and figures*; Berlin, 2019.
 162. Scaffaro, R.; Dintcheva, N.T.; Marino, R.; La Mantia, F.P. Processing and Properties of Biopolymer/Polyhydroxyalkanoates Blends. *Journal of Polymers and the Environment* **2012**, *20*, 267-272, doi:10.1007/s10924-011-0385-2.
 163. Luef, K.P.; Stelzer, F.; Wiesbrock, F. Poly(hydroxy alkanoate)s in Medical Applications. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly* **2015**, *29*, 287-297, doi:10.15255/cabeq.2014.2261.
 164. Bugnicourt, E.; Cinelli, P.; Lazzeri, A.; Alvarez, V. Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging. *Express Polymer Letters* **2014**, *8*, 791-808, doi:10.3144/expresspolymlett.2014.82.
 165. SEKISUI CHEMICAL CO. LTD.; LanzaTech Inc. Turning “Garbage” into Ethanol Establishing a first-in-the-world innovative production technology. Available online:

- https://www.sekisuichemical.com/news/2017/1363956_38399.html (accessed on 24th August 2022).
166. SEKISUI CHEMICAL CO. LTD.; Sumitomo Chemical Co. Ltd. SEKISUI CHEMICAL and Sumitomo Chemical to Cooperate on Circular Economy Initiative Manufacturing Polyolefin using Waste as Raw Material. Available online: <https://www.sumitomo-chem.co.jp/english/news/detail/20200227e.html> (accessed on 24th August 2022).
 167. RameshKumar, S.; Shaiju, P.; O'Connor, K.E.; Babu, P.R. Bio-based and biodegradable polymers - State-of-the-art, challenges and emerging trends. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* **2020**, *21*, 75-81, doi:10.1016/j.cogsc.2019.12.005.
 168. Dilkes-Hoffman, L.; Ashworth, P.; Laycock, B.; Pratt, S.; Lant, P. Public attitudes towards bioplastics - knowledge, perception and end-of-life management. *Resources Conservation and Recycling* **2019**, *151*, doi:10.1016/j.resconrec.2019.104479.
 169. Wojnowska-Baryla, I.; Kulikowska, D.; Bernat, K. Effect of Bio-Based Products on Waste Management. *Sustainability* **2020**, *12*, doi:10.3390/su12052088.
 170. Barrett, A. PepsiCo Goes for bioplastic bottles. Available online: <https://bioplasticnews.com/2018/09/10/pepsi-co-goes-for-bioplastic-bottles/> (accessed on 24th August 2022).
 171. Shen, L.; Worrell, E.; Patel, M.K. Comparing life cycle energy and GHG emissions of bio-based PET, recycled PET, PLA, and man-made cellulose. *Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr* **2012**, *6*, 625-639, doi:10.1002/bbb.1368.
 172. Tabone, M.D.; Cregg, J.J.; Beckman, E.J.; Landis, A.E. Sustainability Metrics: Life Cycle Assessment and Green Design in Polymers. *Environmental Science & Technology* **2010**, *44*, 8264-8269, doi:10.1021/es101640n.
 173. Repo, A.; Kankanen, R.; Tuovinen, J.P.; Antikainen, R.; Tuomi, M.; Vanhala, P.; Liski, J. Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal. *Global Change Biology Bioenergy* **2012**, *4*, 202-212, doi:10.1111/j.1757-1707.2011.01124.x.
 174. Peters M, T.J., Jenni M et al. Integrated process to selectively convert renewable isobutanol to p-xylene. *WO* **2010**, *2011/044243*.
 175. Morschbacker, A.; Campos, C.E.S.; Cassiano, L.C.; Roza, L.; Almada, F.; do Carmo, R.W. Bio-polyethylene. In *Handbook of Green Materials, Vol 4: Biobased Composite Materials, Their Processing Properties and Industrial Applications*, Oksman, K., Mathew, A.P., Bismarck, A., Rojas, O., Sain, M., Qvintus, P., Eds.; Materials and Energy; 2014; Volume 5, pp. 89-104.
 176. Wang, Z.H.; Shen, D.K.; Wu, C.F.; Gu, S. Thermal behavior and kinetics of co-pyrolysis of cellulose and polyethylene with the addition of transition metals. *Energy Conversion*

- and Management* **2018**, *172*, 32-38, doi:10.1016/j.enconman.2018.07.010.
177. Eco Entreprises Québec. Fact Sheet Impact of Packaging on Curbside Recycling Collection and Recycling System: PLA Bottle. Available online: <http://www.eeq.ca/wp-content/uploads/PLA-bottles.pdf> (accessed on 24th August 2022).
 178. Kržan, A. Biodegradable polymers and plastics. *Innov. Value Chain Dev. Sustain. Plast. Cent. Eur.* **2012**, *12*, 12-29.
 179. Niaounakis, M. Recycling of biopolymers - The patent perspective. *European Polymer Journal* **2019**, *114*, 464-475, doi:10.1016/j.eurpolymj.2019.02.027.
 180. Dilkes-Hoffman, L.S.; Pratt, S.; Lant, P.A.; Laycock, B. *The Role of Biodegradable Plastic in Solving Plastic Solid Waste Accumulation*; William Andrew Publishing: Norwich, NY, USA, 2019; pp. 469-505.
 181. Niaounakis, M.; Niaounakis, M. *Biopolymers: Processing and Products Introduction*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2015; pp. 1-77.
 182. Our world in data. Primary plastic production by polymer type, 2015. Available online: <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-production-polymer> (accessed on 24th August 2022).
 183. Garcia, D.; Balart, R.; Crespo, J.E.; Lopez, J. Mechanical properties of recycled PVC blends with styrenic polymers. *Journal of Applied Polymer Science* **2006**, *101*, 2464-2471, doi:10.1002/app.23484.
 184. Yarahmadi, N.; Jakubowicz, I.; Martinsson, L. PVC floorings as post-consumer products for mechanical recycling and energy recovery. *Polymer Degradation and Stability* **2003**, *79*, 439-448, doi:10.1016/s0141-3910(02)00360-9.
 185. Braun, D. PVC - Origin, growth, and future. *Journal of Vinyl & Additive Technology* **2001**, *7*, 168-176, doi:10.1002/vnl.10288.
 186. Sadat-Shojai, M.; Bakhshandeh, G.R. Recycling of PVC wastes. *Polymer Degradation and Stability* **2011**, *96*, 404-415, doi:10.1016/j.polymdegradstab.2010.12.001.
 187. Slapak, M.J.P.; van Kasteren, J.M.N.; Drinkenburg, B. Hydrothermal recycling of PVC in a bubbling fluidized bed reactor: the influence of bed material and temperature. *Polymers for Advanced Technologies* **1999**, *10*, 596-602, doi:10.1002/(sici)1099-1581(199910)10:10<596::Aid-pat913>3.0.Co;2-j.
 188. Patel, M.K.; Jochem, E.; Radgen, P.; Worrell, E. Plastics streams in Germany - an analysis of production, consumption and waste generation. *Resources Conservation and Recycling* **1998**, *24*, 191-215, doi:10.1016/s0921-3449(98)00015-9.
 189. Kou, S.C.; Lee, G.; Poon, C.S.; Lai, W.L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management* **2009**, *29*, 621-628, doi:10.1016/j.wasman.2008.06.014.

190. Ditta, A.S.; Wilkinson, A.J.; McNally, G.M.; Murphy, W.R. A study of the processing characteristics and mechanical properties of multiple recycled rigid PVC. *Journal of Vinyl & Additive Technology* **2004**, *10*, 174-178, doi:10.1002/vnl.20026.
191. Lisk, D.J. ENVIRONMENTAL-EFFECTS OF LANDFILLS. *Science of the Total Environment* **1991**, *100*, 415-468, doi:10.1016/0048-9697(91)90387-t.
192. Garcia, D.; Balart, R.; Sanchez, L.; Lopez, J. Compatibility of recycled PVC/ABS blends. Effect of previous degradation. *Polymer Engineering and Science* **2007**, *47*, 789-796, doi:10.1002/pen.20755.
193. Zakharyan, E.M.; Petrukhina, N.N.; Maksimov, A.L. Pathways of Chemical Recycling of Polyvinyl Chloride: Part 1. *Russian Journal of Applied Chemistry* **2020**, *93*, 1271-1313, doi:10.1134/s1070427220090013.
194. Zakharyan, E.M.; Petrukhina, N.N.; Dzhabarov, E.G.; Maksimov, A.L. Pathways of Chemical Recycling of Polyvinyl Chloride. Part 2. *Russian Journal of Applied Chemistry* **2020**, *93*, 1445-1490, doi:10.1134/s1070427220100018.
195. Caparanga, A.R.; Basilia, B.A.; Dagbay, K.B.; Salvacion, J.W.L. Factors affecting degradation of polyethylene terephthalate (PET) during pre-flotation conditioning. *Waste Management* **2009**, *29*, 2425-2428, doi:10.1016/j.wasman.2009.03.025.
196. Lusinci, J.M.; Pietrasanta, Y.; Robin, J.J.; Boutevin, B. Recycling of PET and PVC wastes. *Journal of Applied Polymer Science* **1998**, *69*, 657-665, doi:10.1002/(sici)1097-4628(19980725)69:4<657::Aid-app4>3.3.Co;2-p.
197. Anzano, J.; Lasheras, R.J.; Bonilla, B.; Casas, J. Classification of polymers by determining of C-1 : C-2 : CN : H : N : O ratios by laser-induced plasma spectroscopy (LIPS). *Polymer Testing* **2008**, *27*, 705-710, doi:10.1016/j.polymertesting.2008.05.012.
198. Gondal, M.A.; Siddiqu, M.N. Identification of different kinds of plastics using laser-induced breakdown spectroscopy for waste management. *Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering* **2007**, *42*, 1989-1997, doi:10.1080/10934520701628973.
199. Park, C.H.; Jeon, H.S.; Park, J.K. PVC removal from mixed plastics by triboelectrostatic separation. *Journal of Hazardous Materials* **2007**, *144*, 470-476, doi:10.1016/j.jhazmat.2006.10.060.
200. Dodbiba, G.; Sadaki, J.; Okaya, K.; Shibayama, A.; Fujita, T. The use of air tabling and triboelectric separation for separating a mixture of three plastics. *Minerals Engineering* **2005**, *18*, 1350-1360, doi:10.1016/j.mineng.2005.02.015.
201. Hearn, G.L.; Ballard, J.R. The use of electrostatic techniques for the identification and sorting of waste packaging materials. *Resources Conservation and Recycling* **2005**, *44*, 91-98, doi:10.1016/j.resconrec.2004.08.001.

202. Singh, R.; Pant, D. Bio-inspired dechlorination of poly vinyl chloride. *Chemical Engineering Research & Design* **2018**, *132*, 505-517, doi:10.1016/j.cherd.2018.01.043.
203. Yoshioka, T.; Kameda, T.; Grause, G.; Imai, S.; Okuwaki, A. Effect of compatibility between solvent and poly(vinyl chloride) on dechlorination of poly(vinyl chloride). *Journal of Polymer Research* **2010**, *17*, 489-493, doi:10.1007/s10965-009-9335-2.
204. Guo, L.; Shi, G.Q.; Liang, Y.Q. High-quality polyene films prepared by poly (ethylene glycol)s catalyzed dehydrochlorination of poly (vinyl chloride) with potassium hydroxide. *European Polymer Journal* **1999**, *35*, 215-220, doi:10.1016/s0014-3057(98)00130-x.
205. Wu, Y.H.; Zhou, Q.; Zhao, T.; Deng, M.L.; Zhang, J.; Wang, Y.Z. Poly(ethylene glycol) enhanced dehydrochlorination of poly(vinyl chloride). *Journal of Hazardous Materials* **2009**, *163*, 1408-1411, doi:10.1016/j.jhazmat.2008.07.047.
206. Ghaemy, M.; Gharaebi, I. Study of dehydrochlorination of poly(vinyl chloride) in solution and the effect of synthesis conditions on graft copolymerization with styrene. *European Polymer Journal* **2000**, *36*, 1967-1979, doi:10.1016/s0014-3057(99)00264-5.
207. Shen, Y.F. A review on hydrothermal carbonization of biomass and plastic wastes to energy products. *Biomass & Bioenergy* **2020**, *134*, doi:10.1016/j.biombioe.2020.105479.
208. Nagai, Y.; Smith, R.L.; Inomata, H.; Arai, K. Direct observation of polyvinylchloride degradation in water at temperatures up to 500 degrees C and at pressures up to 700 MPa. *Journal of Applied Polymer Science* **2007**, *106*, 1075-1086, doi:10.1002/app.26790.
209. Poerschmann, J.; Weiner, B.; Koehler, R.; Kopinke, F.D. Organic breakdown products resulting from hydrothermal carbonization of brewer's spent grain. *Chemosphere* **2015**, *131*, 71-77, doi:10.1016/j.chemosphere.2015.02.057.
210. Soler, A.; Conesa, J.A.; Ortuno, N. Emissions of brominated compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons during pyrolysis of E-waste debrominated in subcritical water. *Chemosphere* **2017**, *186*, 167-176, doi:10.1016/j.chemosphere.2017.07.146.
211. Kubatova, A.; Lagadec, A.J.M.; Hawthorne, S.B. Dechlorination of lindane, dieldrin, tetrachloroethane, trichloroethene, and PVC in subcritical water. *Environmental Science & Technology* **2002**, *36*, 1337-1343, doi:10.1021/es011186k.
212. Yao, Z.L.; Ma, X.Q. A new approach to transforming PVC waste into energy via combined hydrothermal carbonization and fast pyrolysis. *Energy* **2017**, *141*, 1156-1165, doi:10.1016/j.energy.2017.10.008.
213. Ning, X.J.; Teng, H.P.; Wang, G.W.; Zhang, J.L.; Zhang, N.; Huang, C.C.; Wang, C. Physiochemical, structural and combustion properties of hydrochar obtained by hydrothermal carbonization of waste polyvinyl chloride. *Fuel* **2020**, *270*, doi:10.1016/j.fuel.2020.117526.

214. Takeshita, Y.; Kato, K.; Takahashi, K.; Sato, Y.; Nishi, S. Basic study on treatment of waste polyvinyl chloride plastics by hydrothermal decomposition in subcritical and supercritical regions. *Journal of Supercritical Fluids* **2004**, *31*, 185-193, doi:10.1016/j.supflu.2003.10.006.
215. Keane, M.A. Catalytic conversion of waste plastics: Focus on waste PVC. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* **2007**, *82*, 787-795, doi:10.1002/jctb.1757.
216. Ali, M.F.; Siddiqui, M.N. Thermal and catalytic decomposition behavior of PVC mixed plastic waste with petroleum residue. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **2005**, *74*, 282-289, doi:10.1016/j.jaap.2004.12.010.
217. Karayildirim, T.; Yanik, J.; Ucar, S.; Saglam, M.; Yuksel, M. Conversion of plastics/HVGO mixtures to fuels by two-step processing. *Fuel Processing Technology* **2001**, *73*, 23-35, doi:10.1016/s0378-3820(01)00192-8.
218. Karagoz, S.; Karayildirim, T.; Ucar, S.; Yuksel, M.; Yanik, J. Liquefaction of municipal waste plastics in VGO over acidic and non-acidic catalysts. *Fuel* **2003**, *82*, 415-423, doi:10.1016/s0016-2361(02)00250-8.
219. Borgianni, C.; De Filippis, P.; Pochetti, F.; Paolucci, M. Gasification process of wastes containing PVC. *Fuel* **2002**, *81*, 1827-1833, doi:10.1016/s0016-2361(02)00097-2.
220. Kamo, T.; Takaoka, K.; Otomo, J.; Takahashi, H. Effect of steam and sodium hydroxide for the production of hydrogen on gasification of dehydrochlorinated poly(vinyl chloride). *Fuel* **2006**, *85*, 1052-1059, doi:10.1016/j.fuel.2005.10.002.
221. Lin, S.Y.; Suzuki, Y.; Hatano, H.; Harada, M. Hydrogen production from hydrocarbon by integration of water-carbon reaction and carbon dioxide removal (HyPr-RING method). *Energy & Fuels* **2001**, *15*, 339-343, doi:10.1021/ef000089u.
222. Sivakumar, P.; Jung, H.; Tierney, J.W.; Wender, I. Liquefaction of lignocellulosic and plastic wastes with coal using carbon monoxide and aqueous alkali. *Fuel Processing Technology* **1996**, *49*, 219-232, doi:10.1016/s0378-3820(96)01028-4.
223. Zhang, S.Z.; Yu, Y. Dechlorination behavior on the recovery of useful resources from WEEE by the steam gasification in the molten carbonates. In Proceedings of the 10th International Conference on Waste Management and Technology (ICWMT), Mianyang, PEOPLES R CHINA, Oct 28-30, 2015; pp. 903-910.
224. Chen, S.; Meng, A.H.; Long, Y.Q.; Zhou, H.; Li, Q.H.; Zhang, Y.G. TGA pyrolysis and gasification of combustible municipal solid waste. *Journal of the Energy Institute* **2015**, *88*, 332-343, doi:10.1016/j.joei.2014.07.007.
225. Cho, M.H.; Choi, Y.K.; Kim, J.S. Air gasification of PVC (polyvinyl chloride)-containing plastic waste in a two-stage gasifier using Ca-based additives and Ni-loaded activated carbon for the production of clean and hydrogen-rich producer gas. *Energy* **2015**, *87*,

- 586-593, doi:10.1016/j.energy.2015.05.026.
226. Kim, J.W.; Mun, T.Y.; Kim, J.O.; Kim, J.S. Air gasification of mixed plastic wastes using a two-stage gasifier for the production of producer gas with low tar and a high caloric value. *Fuel***2011**, *90*, 2266-2272, doi:10.1016/j.fuel.2011.02.021.
 227. Cho, M.H.; Mun, T.Y.; Kim, J.S. Air gasification of mixed plastic wastes using calcined dolomite and activated carbon in a two-stage gasifier to reduce tar. *Energy***2013**, *53*, 299-305, doi:10.1016/j.energy.2013.02.041.
 228. Cho, M.H.; Mun, T.Y.; Kim, J.S. Production of low-tar producer gas from air gasification of mixed plastic waste in a two-stage gasifier using olivine combined with activated carbon. *Energy***2013**, *58*, 688-694, doi:10.1016/j.energy.2013.06.021.
 229. Cho, M.H.; Mun, T.Y.; Choi, Y.K.; Kim, J.S. Two-stage air gasification of mixed plastic waste: Olivine as the bed material and effects of various additives and a nickel-plated distributor on the tar removal. *Energy***2014**, *70*, 128-134, doi:10.1016/j.energy.2014.03.097.
 230. Zhou, C.G.; Stuermer, T.; Gunarathne, R.; Yang, W.H.; Blasiak, W. Effect of calcium oxide on high-temperature steam gasification of municipal solid waste. *Fuel***2014**, *122*, 36-46, doi:10.1016/j.fuel.2014.01.029.
 231. Baloch, H.A.; Yang, T.H.; Li, R.D.; Nizamuddin, S.; Kai, X.P.; Bhutto, A.W. Parametric study of co-gasification of ternary blends of rice straw, polyethylene and polyvinylchloride. *Clean Technologies and Environmental Policy***2016**, *18*, 1031-1042, doi:10.1007/s10098-016-1092-4.
 232. Wilk, V.; Hofbauer, H. Co-gasification of Plastics and Biomass in a Dual Fluidized-Bed Steam Gasifier: Possible Interactions of Fuels. *Energy & Fuels***2013**, *27*, 3261-3273, doi:10.1021/ef400349k.
 233. Lee, J.W.; Yu, T.U.; Lee, J.W.; Moon, J.H.; Jeong, H.J.; Park, S.S.; Yang, W.; Do Lee, U. Gasification of Mixed Plastic Wastes in a Moving-Grate Gasifier and Application of the Producer Gas to a Power Generation Engine. *Energy & Fuels***2013**, *27*, 2092-2098, doi:10.1021/ef301758z.
 234. da Silva Müller Teixeira, F.; de Carvalho Peres, A.C.; Gomes, T.S.; Visconte, L.L.Y.; Pacheco, E.B.A.V. A Review on the Applicability of Life Cycle Assessment to Evaluate the Technical and Environmental Properties of Waste Electrical and Electronic Equipment. *Journal of Polymers and the Environment***2020**, *29*, 1333-1349, doi:10.1007/s10924-020-01966-7.
 235. Covaci, A.; Harrad, S.; Abdallah, M.A.E.; Ali, N.; Law, R.J.; Herzke, D.; de Wit, C.A. Novel brominated flame retardants: A review of their analysis, environmental fate and behaviour. *Environment International***2011**, *37*, 532-556,

- doi:10.1016/j.envint.2010.11.007.
236. Schreder, E.D.; Uding, N.; La Guardia, M.J. Inhalation a significant exposure route for chlorinated organophosphate flame retardants. *Chemosphere* **2016**, *150*, 499-504, doi:10.1016/j.chemosphere.2015.11.084.
 237. Peeters, J.R.; Vanegas, P.; Tange, L.; Van Houwelingen, J.; Duflou, J.R. Closed loop recycling of plastics containing Flame Retardants. *Resources Conservation and Recycling* **2014**, *84*, 35-43, doi:10.1016/j.resconrec.2013.12.006.
 238. Suresh, S.S.; Bonda, S.; Mohanty, S.; Nayak, S.K. A review on computer waste with its special insight to toxic elements, segregation and recycling techniques. *Process Safety and Environmental Protection* **2018**, *116*, 477-493, doi:10.1016/j.psep.2018.03.003.
 239. Buekens, A.; Yang, J. Recycling of WEEE plastics: a review. *Journal of Material Cycles and Waste Management* **2014**, *16*, 415-434, doi:10.1007/s10163-014-0241-2.
 240. Wagner, S.; Schlummer, M. Legacy additives in a circular economy of plastics: Current dilemma, policy analysis, and emerging countermeasures. *Resources Conservation and Recycling* **2020**, *158*, doi:10.1016/j.resconrec.2020.104800.
 241. UNEP. Guidance for the inventory of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) listed under the Stockholm convention on persistent organic pollutants. Available online: <http://chm.pops.int/Implementation/NIPs/Guidance/GuidancefortheinventoryofPBDEs/tabid/3171/Default.aspx> (accessed on 24 August 2022).
 242. Sun, B.B.; Hu, Y.N.; Cheng, H.F.; Tao, S. Kinetics of Brominated Flame Retardant (BFR) Releases from Granules of Waste Plastics. *Environmental Science & Technology* **2016**, *50*, 13419-13427, doi:10.1021/acs.est.6b04297.
 243. Jaidev, K.; Biswal, M.; Mohanty, S.; Nayak, S.K. Sustainable Waste Management of Engineering Plastics Generated from E-Waste: A Critical Evaluation of Mechanical, Thermal and Morphological Properties. *Journal of Polymers and the Environment* **2021**, *29*, 1763-1776, doi:10.1007/s10924-020-01998-z.
 244. Turner, A.; Filella, M. Bromine in plastic consumer products - Evidence for the widespread recycling of electronic waste. *Science of the Total Environment* **2017**, *601*, 374-379, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.05.173.
 245. The International Bromine Council. Impact of Brominated Flame Retardants on the Recycling of WEEE plastics. Available online: <https://www.bsef.com/> (accessed on 24th August 2022).
 246. Taurino, R.; Pozzi, P.; Zanasi, T. Facile characterization of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) for mechanical recycling. *Waste Management* **2010**, *30*, 2601-2607, doi:10.1016/j.wasman.2010.07.014.
 247. de Souza, A.M.C.; Cucchiara, M.G.; Ereio, A.V. ABS/HIPS blends obtained from

- WEEE: Influence of processing conditions and composition. *Journal of Applied Polymer Science* **2016**, *133*, doi:10.1002/app.43831.
248. Hirayama, D.; Saron, C. Characterisation of recycled acrylonitrile-butadiene-styrene and high-impact polystyrene from waste computer equipment in Brazil. *Waste Management & Research* **2015**, *33*, 543-549, doi:10.1177/0734242x15584845.
 249. Menad, N.; Guignot, S.; van Houwelingen, J.A. New characterisation method of electrical and electronic equipment wastes (WEEE). *Waste Management* **2013**, *33*, 706-713, doi:10.1016/j.wasman.2012.04.007.
 250. Arends, D.; Schlummer, M.; Maurer, A.; Markowski, J.; Wagenknecht, U. Characterisation and materials flow management for waste electrical and electronic equipment plastics from German dismantling centres. *Waste Management & Research* **2015**, *33*, 775-784, doi:10.1177/0734242x15588585.
 251. Brennan, L.B.; Isaac, D.H.; Arnold, J.C. Recycling of acrylonitrile-butadiene-styrene and high-impact polystyrene from waste computer equipment. *Journal of Applied Polymer Science* **2002**, *86*, 572-578, doi:10.1002/app.10833.
 252. Hirayama, D.; Saron, C. Morphologic and mechanical properties of blends from recycled acrylonitrile-butadiene-styrene and high-impact polystyrene. *Polymer* **2018**, *135*, 271-278, doi:10.1016/j.polymer.2017.12.038.
 253. Vazquez, Y.V.; Barbosa, S.E. Process Window for Direct Recycling of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene and High-Impact Polystyrene from Electrical and Electronic Equipment Waste. *Waste Management* **2017**, *59*, 403-408, doi:10.1016/j.wasman.2016.10.021.
 254. Yang, X.N.; Sun, L.S.; Xiang, J.; Hu, S.; Su, S. Pyrolysis and dehalogenation of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review. *Waste Management* **2013**, *33*, 462-473, doi:10.1016/j.wasman.2012.07.025.
 255. Bockhorn, H.; Hornung, A.; Hornung, U.; Jakobstroer, P. New mechanistic aspects of the dehydrochlorination of PVC - Application of dehydrochlorination to plastic mixtures and electronic scrap. *Combustion Science and Technology* **1998**, *134*, 7-30, doi:10.1080/00102209808924123.
 256. Bhaskar, T.; Hall, W.J.; Mitan, N.M.M.; Muto, A.; Williams, P.T.; Sakata, Y. Controlled pyrolysis of polyethylene/polypropylene/polystyrene mixed plastics with high impact polystyrene containing flame retardant: Effect of decabromo diphenylethane (DDE). *Polymer Degradation and Stability* **2007**, *92*, 211-221, doi:10.1016/j.polymdegradstab.2006.11.011.
 257. Miskolczi, N.; Hall, W.J.; Angyal, A.; Bartha, L.; Williams, P.T. Production of oil with low organobromine content from the pyrolysis of flame retarded HIPS and ABS plastics.

- Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **2008**, *83*, 115-123, doi:10.1016/j.jaap.2008.06.010.
258. Hall, W.J.; Williams, P.T. Removal of organobromine compounds from the pyrolysis oils of flame retarded plastics using zeolite catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **2008**, *81*, 139-147, doi:10.1016/j.jaap.2007.09.008.
 259. Shen, M.; Sun, W.H. Hydrodebromination of bromoarenes using Grignard reagents catalyzed by metal ions. *Applied Organometallic Chemistry* **2009**, *23*, 51-54, doi:10.1002/aoc.1470.
 260. Wu, W.H.; Xu, J.; Ohnishi, R. Complete hydrodechlorination of chlorobenzene and its derivatives over supported nickel catalysts under liquid phase conditions (vol 60, pg 131, 2005). *Applied Catalysis B-Environmental* **2005**, *61*, 352-352, doi:10.1016/j.apcatb.2005.08.002.
 261. Gundupalli, S.P.; Hait, S.; Thakur, A. A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. *Waste Management* **2017**, *60*, 56-74, doi:10.1016/j.wasman.2016.09.015.
 262. Picon, A.; Ghita, O.; Whelan, P.F.; Iriondo, P.M. Fuzzy Spectral and Spatial Feature Integration for Classification of Nonferrous Materials in Hyperspectral Data. *Ieee Transactions on Industrial Informatics* **2009**, *5*, 483-494, doi:10.1109/tii.2009.2031238.
 263. Safavi, S.M.; Masoumi, H.; Mirian, S.; Tabrizchi, M. Sorting of polypropylene resins by color in MSW using visible reflectance spectroscopy. *Waste Management* **2010**, *30*, 2216-2222, doi:10.1016/j.wasman.2010.06.023.
 264. Serranti, S.; Gargiulo, A.; Bonifazi, G. Characterization of post-consumer polyolefin wastes by hyperspectral imaging for quality control in recycling processes. *Waste Management* **2011**, *31*, 2217-2227, doi:10.1016/j.wasman.2011.06.007.
 265. Kassouf, A.; Maalouly, J.; Rutledge, D.N.; Chebib, H.; Ducruet, V. Rapid discrimination of plastic packaging materials using MIR spectroscopy coupled with independent components analysis (ICA). *Waste Management* **2014**, *34*, 2131-2138, doi:10.1016/j.wasman.2014.06.015.
 266. Brunner, S.; Fomin, P.; Kargel, C. Automated sorting of polymer flakes: Fluorescence labeling and development of a measurement system prototype. *Waste Management* **2015**, *38*, 49-60, doi:10.1016/j.wasman.2014.12.006.
 267. Bezati, F.; Froelich, D.; Massardier, V.; Maris, E. Addition of tracers into the polypropylene in view of automatic sorting of plastic wastes using X-ray fluorescence spectrometry. *Waste Management* **2010**, *30*, 591-596, doi:10.1016/j.wasman.2009.11.011.
 268. Liu, K.; Tian, D.; Li, C.; Li, Y.C.; Yang, G.; Ding, Y. A review of laser-induced

- breakdown spectroscopy for plastic analysis. *Trac-Trends in Analytical Chemistry* **2019**, *110*, 327-334, doi:10.1016/j.trac.2018.11.025.
269. Zeng, Q.; Sirven, J.B.; Gabriel, J.C.P.; Tay, C.Y.; Lee, J.M. Laser induced breakdown spectroscopy for plastic analysis. *Trac-Trends in Analytical Chemistry* **2021**, *140*, doi:10.1016/j.trac.2021.116280.
 270. Adarsh, U.K.; Kartha, V.B.; Santhosh, C.; Unnikrishnan, V.K. Spectroscopy: A promising tool for plastic waste management. *Trac-Trends in Analytical Chemistry* **2022**, *149*, doi:10.1016/j.trac.2022.116534.
 271. Anzano, J.; Casanova, M.E.; Bermudez, M.S.; Lasheras, R.J. Rapid characterization of plastics using laser-induced plasma spectroscopy (LIPS). *Polymer Testing* **2006**, *25*, 623-627, doi:10.1016/j.polymertesting.2006.04.005.
 272. Wang, C.Q.; Wang, H.; Fu, J.G.; Liu, Y.N. Flotation separation of waste plastics for recycling-A review. *Waste Management* **2015**, *41*, 28-38, doi:10.1016/j.wasman.2015.03.027.
 273. Fraunholcz, N. Separation of waste plastics by froth flotation - a review, part I. *Minerals Engineering* **2004**, *17*, 261-268, doi:10.1016/j.mineng.2003.10.028.
 274. Alter, H. The recovery of plastics from waste with reference to froth flotation. *Resources Conservation and Recycling* **2005**, *43*, 119-132, doi:10.1016/j.resconrec.2004.05.003.
 275. Wang, H.; Zhang, Y.S.; Wang, C.Q. Surface modification and selective flotation of waste plastics for effective recycling-a review. *Separation and Purification Technology* **2019**, *226*, 75-94, doi:10.1016/j.seppur.2019.05.052.
 276. Guo, J.; Li, X.; Guo, Y.W.; Ruan, J.L.; Qiao, Q.; Zhang, J.Q.; Bi, Y.Y.; Li, F. Research on Flotation Technique of separating PET from plastic packaging wastes. In Proceedings of the 10th International Conference on Waste Management and Technology (ICWMT), Mianyang, PEOPLES R CHINA, Oct 28-30, 2015; pp. 178-184.
 277. Abbasi, M.; Salarirad, M.M.; Ghasemi, I. Selective Separation of PVC from PET/PVC Mixture Using Flotation by Tannic Acid Depressant. *Iranian Polymer Journal* **2010**, *19*, 483-489.
 278. Shen, H.T.; Forssberg, E.; Pugh, R.J. Selective flotation separation of plastics by chemical conditioning with methyl cellulose. *Resources Conservation and Recycling* **2002**, *35*, 229-241, doi:10.1016/s0921-3449(02)00003-4.
 279. Pascoe, R.D.; O'Connell, B. Development of a method for separation of PVC and PET using flame treatment and flotation. *Minerals Engineering* **2003**, *16*, 1205-1212, doi:10.1016/s0892-6875(03)00171-7.
 280. Reddy, M.S.; Kurose, K.; Okuda, T.; Nishijima, W.; Okada, M. Selective recovery of PVC-free polymers from ASR polymers by ozonation and froth flotation. *Resources*

- Conservation and Recycling* **2008**, *52*, 941-946, doi:10.1016/j.resconrec.2008.02.003.
281. Okuda, T.; Kurose, K.; Nishijima, W.; Okada, M. Separation of polyvinyl chloride from plastic mixture by froth flotation after surface modification with ozone. *Ozone-Science & Engineering* **2007**, *29*, 373-377, doi:10.1080/01919510701572907.
 282. Wang, C.Q.; Wang, H.; Liu, Q.; Fu, J.G.; Liu, Y.N. Separation of polycarbonate and acrylonitrile-butadiene-styrene waste plastics by froth flotation combined with ammonia pretreatment. *Waste Management* **2014**, *34*, 2656-2661, doi:10.1016/j.wasman.2014.09.002.
 283. Wang, C.Q.; Wang, H.; Wu, B.X.; Liu, Q. Boiling treatment of ABS and PS plastics for flotation separation. *Waste Management* **2014**, *34*, 1206-1210, doi:10.1016/j.wasman.2014.02.005.
 284. Reddy, M.S.; Yamaguchi, T.; Okuda, T.; Tsai, T.Y.; Nakai, S.; Nishijima, W.; Okada, M. Feasibility study of the separation of chlorinated films from plastic packaging wastes. *Waste Management* **2010**, *30*, 597-601, doi:10.1016/j.wasman.2009.11.028.
 285. Lowell, J.; Roseinnes, A.C. CONTACT ELECTRIFICATION. *Advances in Physics* **1980**, *29*, 947-1023, doi:10.1080/00018738000101466.
 286. Wu, G.Q.; Li, J.; Xu, Z.M. Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review. *Waste Management* **2013**, *33*, 585-597, doi:10.1016/j.wasman.2012.10.014.
 287. Park, C.H.; Park, J.K.; Jeon, H.S.; Chun, B.C. Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger. *Journal of Electrostatics* **2008**, *66*, 578-583, doi:10.1016/j.elstat.2008.07.001.
 288. Jeon, H.S.; Park, C.H.; Cho, B.G.; Park, J.K. Separation of PVC and Rubber from Covering Plastics in Communication Cable Scrap by Tribo-Charging. *Separation Science and Technology* **2009**, *44*, 190-202, doi:10.1080/01614940802286040.
 289. Calin, L.; Caliap, L.; Neamtu, V.; Morar, R.; Iuga, A.; Samuila, A.; Dascalescu, L. Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation. *Ieee Transactions on Industry Applications* **2008**, *44*, 1045-1051, doi:10.1109/tia.2008.926689.
 290. Watson, P.K.; Yu, Z.Z. The contact electrification of polymers and the depth of charge penetration. *Journal of Electrostatics* **1997**, *40-1*, 67-72.
 291. Park, C.H.; Jeon, H.S.; Cho, B.G.; Park, J.K. Triboelectrostatic separation of covering plastics in chopped waste electric wire. *Polymer Engineering and Science* **2007**, *47*, 1975-1982, doi:10.1002/pen.20810.
 292. Almeshal, I.; Tayeh, B.A.; Alyousef, R.; Alabduljabbar, H.; Mohamed, A.M.; Alaskar, A. Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review.

- Construction and Building Materials* **2020**, *253*,
doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119146.
293. Babafemi, A.J.; Savija, B.; Paul, S.C.; Anggraini, V. Engineering Properties of Concrete with Waste Recycled Plastic: A Review. *Sustainability* **2018**, *10*,
doi:10.3390/su10113875.
 294. Faraj, R.H.; Ali, H.F.H.; Sherwani, A.F.H.; Hassan, B.R.; Karim, H. Use of recycled plastic in self-compacting concrete: A comprehensive review on fresh and mechanical properties. *Journal of Building Engineering* **2020**, *30*, doi:10.1016/j.jobbe.2020.101283.
 295. Batayneh, M.; Marie, I.; Asi, I. Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management* **2007**, *27*, 1870-1876, doi:10.1016/j.wasman.2006.07.026.
 296. Saikia, N.; de Brito, J. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials* **2014**, *52*, 236-244,
doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049.
 297. Akinyele, J.O.; Ajede, A. The use of granulated plastic waste in structural concrete. *African Journal of Science Technology Innovation & Development* **2018**, *10*, 169-175,
doi:10.1080/20421338.2017.1414111.
 298. Mohammed, A.A.; Mohammed, II; Mohammed, S.A. Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets. *Construction and Building Materials* **2019**, *201*, 232-245, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.145.
 299. Mustafa, M.A.T.; Hanafi, I.; Mahmoud, R.; Tayeh, B.A. Effect of partial replacement of sand by plastic waste on impact resistance of concrete: experiment and simulation. *Structures* **2019**, *20*, 519-526, doi:10.1016/j.istruc.2019.06.008.
 300. Kalantar, Z.N.; Karim, M.R.; Mahrez, A. A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Construction and Building Materials* **2012**, *33*, 55-62,
doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.01.009.
 301. Ameri, M.; Mansourian, A.; Sheikhmotevali, A.H. Laboratory evaluation of ethylene vinyl acetate modified bitumens and mixtures based upon performance related parameters. *Construction and Building Materials* **2013**, *40*, 438-447,
doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.109.
 302. Li, J.; Xiao, F.P.; Zhang, L.F.; Amirkhanian, S.N. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production* **2019**, *233*, 1182-1206, doi:10.1016/j.jclepro.2019.06.061.
 303. Vasudevan, R.; Sekar, A.R.C.; Sundarakannan, B.; Velkennedy, R. A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way - Application in construction of flexible pavements. *Construction and Building Materials* **2012**, *28*, 311-320,

- doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.031.
304. Wu, S.H.; Montalvo, L. Repurposing waste plastics into cleaner asphalt pavement materials: A critical literature review. *Journal of Cleaner Production* **2021**, *280*, doi:10.1016/j.jclepro.2020.124355.
 305. Moghaddam, T.B.; Soltani, M.; Karim, M.R. Stiffness modulus of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixture: A statistical analysis of the laboratory testing results. *Materials & Design* **2015**, *68*, 88-96, doi:10.1016/j.matdes.2014.11.044.
 306. Movilla-Quesada, D.; Raposeiras, A.C.; Silva-Klein, L.T.; Lastra-Gonzalez, P.; Castro-Fresno, D. Use of plastic scrap in asphalt mixtures added by dry method as a partial substitute for bitumen. *Waste Management* **2019**, *87*, 751-760, doi:10.1016/j.wasman.2019.03.018.
 307. Chin, C., Damen, P. *Viability of Using Recycled Plastics in Asphalt and Sprayed Sealing Applications*; Austroads Publication: Sydney, Australia, 2019.
 308. Jafar, J.J. Utilisation of waste plastic in bituminous mix for improved performance of roads. *Ksce Journal of Civil Engineering* **2016**, *20*, 243-249, doi:10.1007/s12205-015-0511-0.
 309. Fang, C.Q.; Jiao, L.N.; Hu, J.B.; Yu, Q.; Guo, D.G.; Zhou, X.; Yu, R.E. Viscoelasticity of Asphalt Modified With Packaging Waste Expanded Polystyrene. *Journal of Materials Science & Technology* **2014**, *30*, 939-943, doi:10.1016/j.jmst.2014.07.016.
 310. Otuoze, H.S.; Ejeh, S.P.; Amartey, Y.D.; Joel, M.; Shuaibu, A.A.; Yusuf, K.O. Rheology and Simple Performance Test (SPT) Evaluation of High-Density Polypropylene (HDPP) Waste-Modified Bituminous Mix. *Jordan Journal of Civil Engineering* **2018**, *12*, 35-44.
 311. Shojaei, B.; Abtahi, M.; Najafi, M. Chemical recycling of PET: A stepping-stone toward sustainability. *Polymers for Advanced Technologies* **2020**, *31*, 2912-2938, doi:10.1002/pat.5023.
 312. Damayanti; Wu, H.S. Strategic Possibility Routes of Recycled PET. *Polymers* **2021**, *13*, doi:10.3390/polym13091475.
 313. Stanica-Ezeanu, D.; Matei, D. Natural depolymerization of waste poly(ethylene terephthalate) by neutral hydrolysis in marine water. *Scientific Reports* **2021**, *11*, doi:10.1038/s41598-021-83659-2.
 314. Sinha, V.; Patel, M.R.; Patel, J.V. Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review. *Journal of Polymers and the Environment* **2010**, *18*, 8-25, doi:10.1007/s10924-008-0106-7.
 315. Paszun, D.; Spychaj, T. Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate). *Industrial & Engineering Chemistry Research* **1997**, *36*, 1373-1383, doi:10.1021/ie960563c.

316. Ubeda, S.; Aznar, M.; Nerin, C. Determination of oligomers in virgin and recycled polyethylene terephthalate (PET) samples by UPLC-MS-QTOF. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **2018**, *410*, 2377-2384, doi:10.1007/s00216-018-0902-4.
317. Najafi, S.K. Use of recycled plastics in wood plastic composites - A review. *Waste Management* **2013**, *33*, 1898-1905, doi:10.1016/j.wasman.2013.05.017.
318. Ghahri, S.; Najafi, S.K.; Mohebbi, B.; Tajvidi, M. Impact strength improvement of wood flour-recycled polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science* **2012**, *124*, 1074-1080, doi:10.1002/app.34015.
319. Adhikary, K.B.; Pang, S.S.; Staiger, M.P. Long-term moisture absorption and thickness swelling behaviour of recycled thermoplastics reinforced with Pinus radiata sawdust. *Chemical Engineering Journal* **2008**, *142*, 190-198, doi:10.1016/j.cej.2007.11.024.
320. Najafi, S.K.; Tajvidi, M.; Hamidina, E. Effect of temperature, plastic type and virginity on the water uptake of sawdust/plastic composites. *Holz Als Roh-Und Werkstoff* **2007**, *65*, 377-382, doi:10.1007/s00107-007-0176-6.
321. Adhikary, K.B.; Pang, S.S.; Staiger, M.P. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B-Engineering* **2008**, *39*, 807-815, doi:10.1016/j.compositesb.2007.10.005.
322. Morin, C.; Loppinet-Serani, A.; Cansell, F.; Aymonier, C. Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the art. *Journal of Supercritical Fluids* **2012**, *66*, 232-240, doi:10.1016/j.supflu.2012.02.001.
323. Gharde, S.; Kandasubramanian, B. Mechanochemical and chemical recycling methodologies for the Fibre Reinforced Plastic (FRP). *Environmental Technology & Innovation* **2019**, *14*, doi:10.1016/j.eti.2019.01.005.
324. Kumar, S.; Krishnan, S. Recycling of carbon fiber with epoxy composites by chemical recycling for future perspective: a review. *Chemical Papers* **2020**, *74*, 3785-3807, doi:10.1007/s11696-020-01198-y.
325. Liu, T.; Zhang, M.; Guo, X.L.; Liu, C.Y.; Liu, T.; Xin, J.N.; Zhang, J.W. Mild chemical recycling of aerospace fiber/epoxy composite wastes and utilization of the decomposed resin. *Polymer Degradation and Stability* **2017**, *139*, 20-27, doi:10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.017.
326. Dang, W.R.; Kubouchi, M.; Yamamoto, S.; Sembokuya, H.; Tsuda, K. An approach to chemical recycling of epoxy resin cured with amine using nitric acid. *Polymer* **2002**, *43*, 2953-2958, doi:10.1016/s0032-3861(02)00100-3.
327. Plastic Waste Management Institute (PWMI). PWMI Newsletter: Plastic Products,

- Plastic Waste and Resource Recovery [2020]. Available online: chrome-extension://oemmndcbldboiebfnladdacbfmadadm/https://www.pwmi.or.jp/ei/siryo/ei/ei_pdf/ei51.pdf (accessed on 24th August 2022).
328. Luan, X.Y.; Cui, X.W.; Zhang, L.; Chen, X.Y.; Li, X.X.; Feng, X.W.; Chen, L.; Liu, W.; Cui, Z.J. Dynamic material flow analysis of plastics in China from 1950 to 2050. *Journal of Cleaner Production* **2021**, *327*, doi:10.1016/j.jclepro.2021.129492.
 329. Liang, Y.Y.; Tan, Q.Y.; Song, Q.B.; Li, J.H. An analysis of the plastic waste trade and management in Asia. *Waste Management* **2021**, *119*, 242-253, doi:10.1016/j.wasman.2020.09.049.
 330. Siddiqui, J.P., G. . A Review of Plastic Waste Management Strategies. *International Research Journal of Environment Sciences* **2013**, *2*, 84-88.
 331. Mancini, S.D.; de Medeiros, G.A.; Paes, M.X.; de Oliveira, B.O.S.; Antunes, M.L.P.; de Souza, R.G.; Ferraz, J.L.; Bortoleto, A.P.; de Oliveira, J.A.P. Circular Economy and Solid Waste Management: Challenges and Opportunities in Brazil. *Circular Economy and Sustainability* **2021**, *1*, 261-282, doi:10.1007/s43615-021-00031-2.
 332. IPSOS. ATTITUDES TOWARDS SINGLE-USE PLASTICS. Available online: <https://www.ipsos.com/sites/default/files/ct/news/documents/2022-02/Attitudes-towards-single-use-plastics-Feb-2022.pdf> (accessed on 24th August 2022).
 333. Japan External Trade Organization (JETRO). Yunyukisei ha genkakumo, kokunaikisei no unyou niha kadai (Japanese). Available online: <https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2019/0101/4e336b896cde689c.html> (accessed on 24th August 2022).
 334. Shi, J.J.; Zhang, C.; Chen, W.Q. The expansion and shrinkage of the international trade network of plastic wastes affected by China's waste management policies. *Sustainable Production and Consumption* **2021**, *25*, 187-197, doi:10.1016/j.spc.2020.08.005.
 335. Kumamaru, H.; Takeuchi, K. The impact of China's import ban: An economic surplus analysis of markets for recyclable plastics. *Waste Management* **2021**, *126*, 360-366, doi:10.1016/j.wasman.2021.03.027.
 336. Li, C.; Wang, L.; Zhao, J.S.; Deng, L.C.; Yu, S.X.; Shi, Z.H.; Wang, Z. The collapse of global plastic waste trade: Structural change, cascading failure process and potential solutions. *Journal of Cleaner Production* **2021**, *314*, doi:10.1016/j.jclepro.2021.127935.
 337. Xu, W.; Chen, W.Q.; Jiang, D.Q.; Zhang, C.; Ma, Z.J.; Ren, Y.; Shi, L. Evolution of the global polyethylene waste trade system. *Ecosystem Health and Sustainability* **2020**, *6*, doi:10.1080/20964129.2020.1756925.
 338. Japan External Trade Organization (JETRO). Haipurasutikku no bouekifuro ni henka (Japanese). Available online:

- <https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2020/2a54b9255db84d8d.html> (accessed on 24th August 2022).
339. Huang, Q.; Chen, G.W.; Wang, Y.F.; Chen, S.Q.; Xu, L.X.; Wang, R. Modelling the global impact of China's ban on plastic waste imports. *Resources Conservation and Recycling* **2020**, *154*, doi:10.1016/j.resconrec.2019.104607.
340. Jun, T. Umino Pulasutikku gomi mondai. Available online: <https://jsil.jp/archives/expert/2020-4> (accessed on 20th October 2022).
341. Jambeck, J.R.; Geyer, R.; Wilcox, C.; Siegler, T.R.; Perryman, M.; Andrady, A.; Narayan, R.; Law, K.L. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* **2015**, *347*, 768-771, doi:10.1126/science.1260352.
342. Larder, R.R.; Hatton, F.L. Enabling the Polymer Circular Economy: Innovations in Photoluminescent Labeling of Plastic Waste for Enhanced Sorting. *Acs Polymers Au*, doi:10.1021/acspolymersau.2c00040.
343. Nicholson, S.R.; Rorrer, J.E.; Singh, A.; Konev, M.O.; Rorrer, N.A.; Carpenter, A.C.; Jacobsen, A.J.; Roman-Leshkov, Y.; Beckham, G.T. The Critical Role of Process Analysis in Chemical Recycling and Upcycling of Waste Plastics. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering* **2022**, *13*, 301-324, doi:10.1146/annurev-chembioeng-100521-085846.
344. Nihei, Y.; Yoshida, T.; Kataoka, T.; Ogata, R. High-Resolution Mapping of Japanese Microplastic and Macroplastic Emissions from the Land into the Sea. *Water* **2020**, *12*, doi:10.3390/w12040951.
345. 環境省、経済産業省、農林水産省、文部科学省. バイオプラスチック導入ロードマップ. Available online: <https://www.env.go.jp/recycle/plastic/bio/roadmap.html> (accessed on 2023 年 1 月 8 日).
346. Gioia, C.; Giacobazzi, G.; Vannini, M.; Totaro, G.; Sisti, L.; Colonna, M.; Marchese, P.; Celli, A. End of Life of Biodegradable Plastics: Composting versus Re/Upcycling GT1. *Chemsuschem* **2021**, *14*, 4167-4175, doi:10.1002/cssc.202101226.
347. 日本国政府. プラスチック資源循環戦略. Available online: <https://www.env.go.jp/press/106866.html> (accessed on 2023 年 1 月 8 日).
348. Gustafsson, K.M.; Lidskog, R. Boundary organizations and environmental governance: Performance, institutional design, and conceptual development. *Climate Risk Management* **2018**, *19*, 1-11, doi:10.1016/j.crm.2017.11.001.
349. 松本雄一. 実学集合型実践共同体の概念的検討. *商学論究* **2020**, *67*, 21-59.
350. 山川肇. 使い捨てプラスチック政策の国際動向. *廃棄物資源循環学会誌* **2018**, *29*, 294-303.