

令和5年度 脱炭素型循環経済システム構築促進事業
(うち、プラスチック等資源循環システム構築実証事業)

(使用済み衛生用品の再資源化を可能とする、米でんぷん由来バイオ
SAP (高吸水性樹脂) の開発及び社会実装) 委託業務

成果報告書

令和6年3月

SDP グローバル株式会社

概要

1.1. 申請事業名

使用済み衛生用品の再資源化を可能とする、米でんぷん由来バイオ SAP（高吸水性樹脂）の開発及び社会実装

1.2. 業務の目的

(1) 米でんぷん由来のバイオ SAP 製造技術

化石燃料由来の現行の石化 SAP をバイオ素材へ代替するため、当社では本事業の開始前にトウモロコシ由来のカルボキシメチルスターチ（CMS）を用いて架橋反応させることで、石化 SAP 吸収性能（保水量）の約 70%程度を達成した。一方、当事業で社会実装を目指す、米でんぷん由来のバイオ SAP 製造に向けた実証実験はまだできておらず、理論上の試算段階である。加えて、現行品の紙おむつ用石化 SAP と比べ、同等あるいはより少ないエネルギー起源 CO2 排出量となる製造プロセスを確立することも、検討が必要となる事項である。

(2) リサイクル・再資源化に向けた米でんぷん由来バイオ SAP の改良

さらに、使用済み米でんぷん由来バイオ SAP を資源循環させるため、使用済みバイオ SAP をリサイクル・再資源化し、バイオ SAP の原材料生産で利用可能な農業用汚泥肥料とすることを想定している。同時に、より汎用性の高いバイオマス化も検討している。これら汚泥肥料化・バイオマス化に必要なバイオ SAP の構造改良も、

米でんぷん由来バイオ SAP 製造技術と合わせて検討が必要となる。

(3) 米でんぷん由来バイオ SAP の量産体制構築

石化 SAP と同等の吸水性能やリサイクル・再資源化可能な構造を有し、かつエネ起 CO2 排出量削減を達成した後、米でんぷん由来バイオ SAP を商品化するためには、紙おむつメーカーの協力が必須となる。その際、現行品と比較した吸水性能や価格が導入の主要な障壁になることが想定される。特に、日本の子供用紙おむつ市場では、非常に高い吸水性能が求められるため、新規開発する米でんぷん由来バイオ SAP が紙おむつメーカーの要求する水準を満たすことができるか、が課題となる。

(4) 使用済み紙おむつのリサイクルループモデル構築

将来的な社会実装には、米でんぷん由来バイオ SAP を用いた紙おむつを商品化するだけでなく、使用済み紙おむつを回収し、再資源化まで実践しなければ、本質的な CO2 排出量削減含む環境負荷の低減にはならない。使用済み紙おむつのパルプや PP/PE については、一部自治体にてリサイクルモデルの構築が実施されているが、SAP については分離の困難さからリサイクル・再資源化が進んでいない。

1.3. 業務の内容

(1) 米でんぷん由来のバイオ SAP 製造技術

米でんぷん由来バイオ SAP プロトタイプ製造、吸水性向上に向けた原材料の最適化、

さらに米から米でんぷん精製プロセスの最適化に向け、複数米粉を用いた CMS からコメでんぷん由来バイオ SAP をラボスケールにて製造した。結果、目標としている吸水性能（保水量 30g/g）を確認したが、自社評価による紙おむつ吸収体の試験結果から、保水量のみならず荷重下吸収量が重要であることが判明した。表面架橋処理を行うことで、吸収体評価で石化 SAP と比べて約 83%まで吸収性能を改善した。

(2) リサイクル・再資源化に向けた米でんぷん由来バイオ SAP の改良

上記にて開発した米でんぷん由来バイオ SAP に対し、ラボスケールにてリサイクルしやすい構造設計を実施した。他の不織布やパルプなどの部材と SAP を分離するため、米でんぷん由来バイオ SAP が水に可溶化する旨を確認できた。

また、使用済み米でんぷん由来バイオ SAP 肥料化に向け、生分解性試験を実施したところ、60 日時点で生分解が止まり、目標とする「6 ヶ月間にて 60%の生分解性」は未達であり、今後も生分解の進行が期待できなかつたことから試験を中止した。引き続き、目標達成に向けて CMS の置換度と生分解率のバランスといった組成の再設計を検討していく。一方、米でんぷん由来バイオ SAP のバイオマス度については、バイオマス度試験を実施した結果、目標とする 80%を達成した。

(3) 米でんぷん由来バイオ SAP の量産体制構築

米でんぷん由来バイオ SAP の量産体制構築に向け、実機装置を使用して条件検討を実施し、米でんぷん由来 CMS 混練工程において生産性目標（100kg/時間）を達成し

た。一方、生産速度に見合うゲル取出し・成形・乾燥工程の具現化に課題が残存している。

(4) 使用済み紙おむつのリサイクルループモデル構築

自治体と連携した使用済み紙おむつの回収・素材分離に向け、主要ステークホルダーであるリサイクル装置メーカー、自治体、汚泥肥料メーカーと定期的な情報交換を行い、モデル構築に向けた協議を続けている。

(5) LCA の検証・評価

製造工程ごとに LCA を試算し、現行の石化 SAP と比較を行った。判明した課題について、現状不足している一次データの収集とともにデータ精度の向上を引き続き検証する。

1.4. 今後の方針

本事業にて目標とするリサイクルループの各工程構築を、バイオ SAP 製造～紙おむつ製造～消費～回収・分離～再資源化まで直列で進めた場合、一部工程で課題に直面した際に、事業期間内に目標到達できなくなる可能性があることから、次年度以降は、各工程最低限達成すべき目標を再設定した上で、リサイクルループ構築に向けた実証に取り組む。

事業実施 2 年目となる令和 6 年度では、実機による米でんぷん由来バイオ SAP 製造

及びバイオ SAP 搭載紙おむつの試作品製造を、実施期間前半にて効率的に進める。

令和 5 年度のラボスケールにおける実証結果を鑑み、バイオ SAP の原料となる米粉を用いた米でんぷん由来 CMS の量産体制を構築する。また、令和 5 年度の課題として残存している生分解性の担保についても、バイオ SAP 原材料 CMS の置換度との相関性を鑑みた上で生分解性の向上を目指す。

上記米粉を用いた CMS の量産体制構築に目処がたち次第、米でんぷん由来バイオ SAP の量産体制の構築に向け、実機にて米粉 CMS からバイオ SAP 製造に取り組む。同時並行にて、米でんぷん由来バイオ SAP 搭載紙おむつを自社ラボで製造し、紙おむつメーカーによるラボ評価や上市に向けた協議を実施する。

さらに量産体制構築と同時並行にて、自治体との協議を進め、市内認可保育園 1 カ所程度を対象としたリサイクルループモデルの小規模での実証実験に着手する。自社ラボあるいは紙おむつメーカーにて米でんぷん由来バイオ SAP 搭載紙おむつを試作した上で対象保育園へ無償配布し、使用感や使用済み紙おむつの回収フローなどに関するテストマーケティングを実施する。

また、現時点具現化できていない製造工程およびスケールアップ時の LCA についても引き続き検証する。

Summary

1.1. Project title

Development and implementation of rice-starch-derived bio-based super absorbent polymers for recycling of sanitary products.

1.2. Objectives of the project

(1) Development of production technology for rice-starch-derived bio-based super absorbent polymers (SAPs),

To replace fossil-fuel-derived SAPs with biomaterials, the project achieved approximately 70% of the conventional SAP absorption through a crosslinking reaction using corn-derived carboxy methyl cellulose (CMS). However, bio-based SAPs using rice-starch-derived CMS remain in the theoretical trial phase. In addition, an approach to establish a manufacturing process with energy-derived CO₂ emissions lower than or equal to those of conventional fossil-fuel-derived SAPs for single-use disposable diapers should be considered.

(2) Structural improvement of rice-starch-derived bio-based SAPs for recycling.

To encourage a higher recycling rate of bio-based SAPs derived from rice starch, used bio-based SAPs must be properly collected, recycled, and then used again as agricultural sludge fertilizer suitable for rice production. Rice-starch-derived bio-based SAPs must also be supplied with a high biomass content for application in various products.

(3) Establishment of a mass-production system for bio-based SAPs derived from rice starch.

Manufacturers of sanitary products, particularly baby diapers, must consider using rice-starch-derived bio-based SAPs in their products. However, the absorption performance of bio-based

SAPs and their cost competitiveness will be barriers to entry in the current baby diaper production system. Given that Japanese manufacturers and consumers require high absorption performance, determining whether bio-based SAPs derived from rice starch can satisfy their requirements is imperative.

(4) Recycling loop model for disposable diapers.

For the future implementation of rice-starch-derived bio-based SAPs, both a recycling loop and the commercialization of disposable diapers using bio-based SAPs derived from rice starch are necessary. Otherwise, the environmental burden of diaper consumption will not be alleviated. Although some local governments have established recycling models for pulp and polypropylene (PP)/ polyethylene (PE) from disposable diapers, recycling and reuse of SAPs have not been tested because SAPs are generally difficult to separate from the other parts of used diapers.

1.3. Results of the project

(1) Development of production technology for rice-starch-derived bio-based SAPs.

A laboratory-scale experiment was conducted to produce rice-starch-derived SAPs using rice powder varieties, where results confirmed the targeted absorption performance (water retention capacity of 30 g/g). However, in-house evaluation test results for the diaper absorbent revealed that both water retention and absorption under pressure were critical factors. Accordingly, surface cross-linking treatment was conducted for absorbent evaluation and showed an improved absorbent performance by approximately 83% as compared with that of petrochemical SAPs.

(2) Structural improvement of rice-starch-derived bio-based SAPs for recycling.

Structural redesign of the bio-based SAPs was also conducted to produce more recyclable materials. To separate SAPs from other materials such as non-woven fabrics and pulp, the bio-based SAPs derived from rice starch were determined to be soluble in water.

However, a biodegradability test determined that the bio-based SAPs developed in our laboratory did not meet the six-month target of 60% biodegradability. To achieve higher biodegradability, a redesigned SAP must be considered while balancing the degree of substitution of CMS with carboxymethyl groups and the biodegradability of bio-based SAPs. A biomass content test was performed that achieved a target of 80%.

(3) Establishment of a mass-production system for bio-based SAPs derived from rice starch.

Factory-scale experiments were conducted to identify the production conditions and capacity for the establishment of a mass-production system for rice-starch-derived bio-based SAPs. Results showed that the productivity target (100 kg/h) was achieved in the rice-starch-derived CMS kneading process. However, issues related to gel extraction, molding, and drying processes remained.

(4) Establishment of a recycling loop model for disposable diapers.

To establish a recycling loop in cooperation with local governments for the collection and separation of disposable diapers, discussions with key stakeholders such as municipalities, recyclers, and manufacturers of agricultural sludge fertilizers were conducted.

(5) Verification and evaluation of life cycle assessment (LCA).

LCA was estimated for each manufacturing process and compared with current petrochemical SAPs. The identified issues will be revisited and reexamined to improve the accuracy of the data, and the collection of primary data will also continue.

1.4. Plan for the coming year

One remaining concern is that the goal for establishing a recycling loop model with bio-based SAPs within the project term may not be reached if each process of the recycling loop is examined, starting from bio-based SAP production and ending with recycling using bio-based SAPs step-by-step. Therefore, project targets for the next year will be reconsidered, and the minimum goals for each process will be reset to build a more efficient recycling loop.

In 2024, the second year of the project, the production of rice-starch-derived CMS at a factory scale will first be prioritized. Based on the results of the lab-scale experiments, a mass production system for CMS derived from rice starch will be established. The biodegradability of bio-based SAPs will also be improved.

Once the production of rice-starch-derived CMS at a factory scale is established, the goal to build a mass-production system for bio-based SAPs from CMS derived from rice starch will proceed as planned. In addition, discussion with diaper manufacturers in Japan about a diaper prototype containing bio-based SAPs will commence, with the intent of developing an effective product for fast market entry.

Moreover, in parallel with the establishment of a mass production system for bio-based SAPs, the recycling loop model will be pilot-tested under small-scale collaboration with a specified municipality. During the pilot testing, baby diapers containing bio-based SAPs will be used in several nursery schools in the municipality, and issues related to product improvement and collection flows will be identified.

Finally, LCA for manufacturing processes and scale-up that have yet to be realized will continue to be examined.

目次

図表リスト	12
略語表	15
1. 会社概要.....	16
1.1. SDP グローバル株式会社.....	16
1.2. 株式会社バイオマスレジソールディングス	19
1.3. 事業実施体制	22
2. 目的・背景.....	23
2.1. 目的	23
2.2. 背景	25
3. 実証内容.....	38
3.1. 目標	38
3.2. 結果	48
4. 令和 6 年度以降の実証内容	100
5. 出口戦略・波及効果	106
6. 環境負荷の低減.....	116
6.1. エネルギー起源 CO2 排出削減量等環境負荷の低減.....	116

6.2. その他の環境影響の低減・循環型社会への貢献の見込み127

図表リスト

図 1	SAP の構造	16
図 2	SAP メーカーシェア（生産力換算）	18
図 3	バイオマスレジンはホルディングスの製品	20
図 4	将来的に構築されるリサイクルループ	24
図 5	国内おむつ生産量	27
図 6	各国における衛生用品一人当たり使用量と各国の一人当たり GDP 比較	29
図 7	子供用紙おむつの構造	30
図 8	現行石化 SAP の反応スキーム	32
図 9	現行石化 SAP の製造プロセスと課題	34
図 10	子供用おむつの構成材料比率の変化	36
図 11	本事業での実施内容（再掲）	38
図 12	でんぷん系バイオ SAP 反応スキーム	55
図 13	DS と保水量の関係	62
図 14	架橋剤種類と保水量の関係	65
図 15	架橋剤添加量と保水量の関係	68
図 16	玄米の構造と精米過程のイメージ図	69
図 17	吸収体試験方法（自社試験方法）	75
図 18	吸収体の試験結果	77
図 19	表面架橋反応概念図	79
図 20	でんぷん SAP（表面架橋有無）と市販おむつとの吸収体試験の比較	82
図 21	ラボで合成したでんぷん系バイオ SAP	83
図 22	可溶化前・後の様子	85
図 23	生分解試験結果（（一財）化学物質評価研究機構の測定結果）	87
図 24	バイオマス度試験結果（（株）加速機分析研究所の測定結果）	89

図 25	現在想定しているバイオ SAP 製造プロセス	91
図 26	二軸混練装置セッティングとスクリュウデザイン (第 1 回試作時) ...	93
図 27	ホッパー下部 (材料投入口) における材料閉塞による様子 (第 1 回試作時)	93
図 28	液体添加用ノズル.....	95
図 29	二軸混練装置セッティングとスクリュウデザイン (第 2 回試作時) ...	95
図 30	混練物からのストランド外観 (第 3 回試作時)	97
図 31	二軸混練装置セッティングとスクリュウデザイン (第 3 回試作時) ...	97
図 32	LCA 測定箇所 : 混練機分電盤内の様子 (第 3 回試作時)	98
図 33	混練機一部に確認された錆の様子 (第 3 回試作時)	98
図 34	令和 6 年度事業実施スケジュール.....	105
図 35	自社開発の紙おむつ評価装置.....	106
図 36	Little Big Change の仕組み.....	113
図 37	Little Big Change のブランドサイト	113
図 38	gDiapers おむつ使用方法.....	114
図 39	gDiapers の商品ライン	114
図 40	LCA のシステム境界	117

表 1	事業実施期間（3 ヶ年）における目標.....	39
表 2	令和 5 年度の目標.....	44
表 3	令和 5 年度実証結果（サマリー）	49
表 4	吸収力発現のための検討内容.....	52
表 5	混練、乾燥条件概要.....	57
表 6	検討に使用した市販の CMS（当社洗浄済み）	59
表 7	各社 CMS を使用して合成した SAP 物性.....	61
表 8	検討した架橋剤種類.....	64
表 9	試験に使用した米の種類と性状.....	71
表 10	合成した米由来 SAP の吸水性能	72
表 11	表面架橋前後の物性変化.....	80
表 12	リサイクルループ各工程における技術目標（令和 5~7 年度）	101
表 13	令和 6 年度に向けた課題と実施内容.....	104
表 14	米でんぷん由来バイオ SAP 量産化目標	107
表 15	本年度検討した範囲.....	120
表 16	機能単位（石化 SAP 1 kg 相当）当たりの GHG 排出量（kg-CO2/機能単位 比較）.....	123
表 17	現状と課題・対策.....	126

略語表

略語	正式名称	日本語名称
CMS	Carboxymethyl Starch	カルボキシメチルスター チ
DS	Degree of Substitution	置換度
PP/PE	Polypropylene/Polyethylene	ポリプロピレン／ポリエ チレン
SAP	Super absorbent polymer	高吸水性樹脂

1. 会社概要

1.1. SDP グローバル株式会社

- ・ 会社名：SDP グローバル株式会社
- ・ 所在地：東京都港区西新橋
- ・ 設立年月日：2001 年 4 月
- ・ 事業内容：高吸水性樹脂の研究開発・製造・販売

SAP とは、水溶性高分子の分子鎖をわずかな量の架橋剤で部分的に 3 次元架橋することにより吸収力を発する樹脂であり、1978 年に三洋化成工業株式会社（当社の親会社）が世界で初めて工業化した材料である。

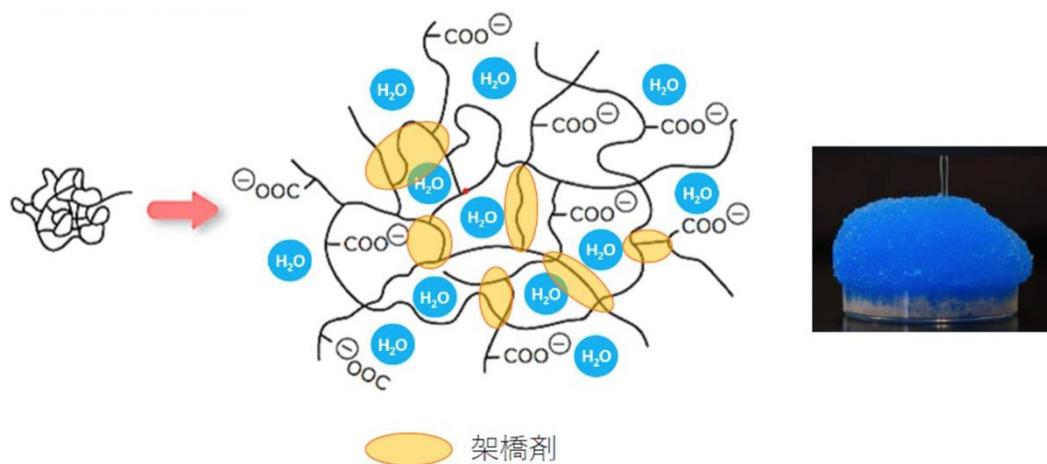


図 1 SAP の構造

(出所) SDP グローバル作成

その後、日本で子供用の紙おむつに初めて採用されてから、国内外で順調に市場が拡大し、2022年時点において国内需要は22万トン、世界では約330万トンにまで成長した。今では、子供用紙おむつだけでなく、女性用生理用ナプキンや大人用紙おむつといった衛生用品のみならず、ペット用シート、緑化用保水剤、農業用土壌改質剤、保冷剤、災害用土嚢、芳香剤、使い捨てカイロ、海底ケーブル用止水テープなど数多くの用途に展開されている。

いまだ SAP の成長率には陰りがなく、市場の伸び率は世界で約6%とされている（straits research レポート 2021）。当社は、2001年に三菱化学（当時）とのJV（出資比率：三洋化成/三菱化学=60/40）であるサンダイヤポリマー株式会社を前身とし、その後、2012年に SAP 事業化時からの販売パートナーである豊田通商を新たな出資者とする SDP グローバル株式会社と改名、現在は三洋化成工業の100%子会社である。SAP の開発から製造、販売まで事業展開している。生産拠点は、国内（愛知県東海市）に加えて、中国（江蘇省南通市）、マレーシア（ジョホールバル市）に生産工場を有する。生産能力は42万トン/年、能力換算のシェアとしては世界第6位である。

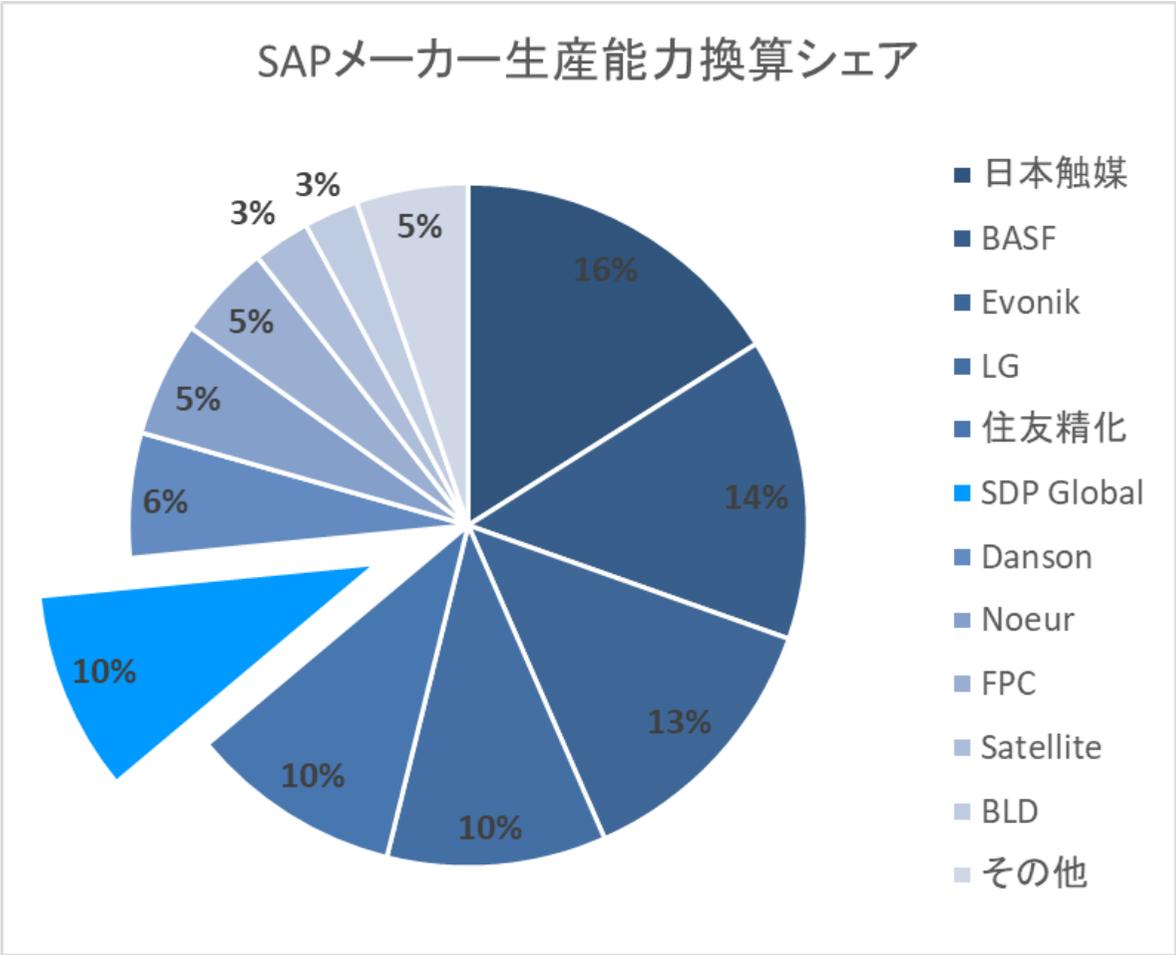


図 2 SAP メーカーシェア (生産力換算)

(出所) SDP グローバル作成

1.2. 株式会社バイオマスレジソホールディングス

- ・会社名：株式会社バイオマスレジソホールディングス
- ・所在地：東京都千代田区丸の内
- ・設立年月日：2020年3月
- ・事業内容：国産バイオマス資源を利用したプラスチック樹脂原料の製造・販売など

バイオマスレジソホールディングスは、2017年南魚沼に最初の工場を設立し、非食用米を使ったバイオマスプラスチック樹脂の製造・販売を実施している。現在は、バイオマスプラスチック樹脂に用いる非食用米を国内の耕作放棄地（福島県など）で生産するなど、農業分野でも事業に取り組んでいる。

バイオマスレジンはホールディングスの製品		
商品		
	<p>バイオマスプラスチック樹脂 「ライスレジン」</p>	<p>生分解性バイオマスプラスチック樹脂 「ネオリザ」 (本事業での提案製品)</p>
概要	<ul style="list-style-type: none"> ● 非食用米由来のバイオマスプラスチック樹脂 ● 食用に適さない古米、米菓メーカーなどで発生する破砕米など、飼料としても処理されず廃棄される米と、PP/PEを混練し製造するプラスチック樹脂。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 非食用米由来の生分解性バイオマスプラスチック樹脂 ● 自然界に存在する微生物の働きにより、最終的にCO2と水に完全分解されるプラスチック樹脂
導入に適している商品	<ul style="list-style-type: none"> ● ワンウェイ製品 <ul style="list-style-type: none"> - 非耐久財で、回収はできているが焼却処分されるため、CO2を排出するもの（例：ゴミ袋、レジ袋、ストロー、食品トレーなど） ● リサイクル製品 <ul style="list-style-type: none"> - 耐久財で、プラスチックが分解されることは望ましくないもの - かつ、PCや家電製品など現在回収できているもの 	<ul style="list-style-type: none"> ● 自然環境への流出が見られる製品 <ul style="list-style-type: none"> - 非耐久財で、使用後に回収できないもの（例：釣り糸、漁網など） - 回収できているが、生分解性のメリットがあるもの（例：農業用マルチなど）

図 3 バイオマスレジンはホールディングスの製品

(出所) バイオマスレジンは作成

バイオマスレジソールディングスでは、余剰米（くず米、破米、災害米など）等の食用に適さない農産物残渣等を PP/PE と混練させたバイオマスプラスチック樹脂を製造している。米と PP/PE を混練したバイオマスプラスチック樹脂の製造に加え、生分解性バイオマスプラスチック樹脂（微生物の働きにより、分子レベルまで分解し、最終的には二酸化炭素と水となって自然界へと循環していく性質を有したバイオマスプラスチック樹脂）を利用した複合材料の製造・加工技術も有している。

また、京都大学との共同研究開発により余剰米と生分解性プラスチック樹脂による複合材料の製造技術開発に成功しており、全組成材料が 100%生分解性素材であるバイオマスプラスチックを調製し、余剰米含有の生分解性インフレーションフィルム等の調製技術を有している。また、独自のノウハウを所有しており、異質の材料を均一に混ぜ、石油系樹脂同等に成形加工できる独自の混練技術を開発し、複数の特許を取得、出願中である。

さらには、当該技術を用い、複合材料中の余剰米含有率を調整することにより、最終製品の生分解性速度をコントロール可能とすることは、他社にはない革新的な技術である。

1.3. 事業実施体制

当事業では、SDP グローバルを代表者とし、共同実施者あるバイオマスレジソホールディングスと連携しながら事業推進する。両者の役割は、以下の通り。

- 代表者（受託者）：SDP グローバル
 - プロジェクト全体総括
 - 全体事業計画策定
 - ステークホルダー連携
 - バイオSAP研究開発共同統括
 - LCA評価・分析
- 共同実施者：バイオマスレジソホールディングス
 - プロジェクトマネジメント
 - バイオSAP研究開発共同統括
 - 報告書とりまとめ

2. 目的・背景

2.1. 目的

当事業では、紙おむつの素材のうち、し尿吸収という重要な役割を持つ SAP の原料を、石油由来からバイオマス原料（米由来のでんぷん）へ代替し、製造工程を改善することにより、石油由来紙おむつと比べ、CO2 排出量の低減を目指す。また、紙おむつ用 SAP を設計する上で、使用済み SAP を容易に分離可能かつ生分解性を有する構造とすることで、使用済み SAP の農業用汚泥肥料への再資源化を実現し、紙おむつ利用に起因する廃棄物の削減及び資源循環型社会の構築を推進していく。

当事業にて開発する米でんぷん由来バイオ SAP は、まず子供用紙おむつをターゲットとする。これまでラボレベルでの実証が完了している CMS 系 SAP をベースとしながら、米でんぷん由来バイオ SAP を開発し、子供用紙おむつメーカーへの導入を促進する。中期的には、使用済み米でんぷん由来バイオ SAP を回収・再資源化するリサイクルループを、自治体（市区町村）レベルで構築する。さらに長期的には、大人用紙おむつや女性用生理用ナプキン含む衛生用品へ米でんぷん由来バイオ SAP を導入し、衛生用品の廃棄物削減や地域循環型社会を構築する。

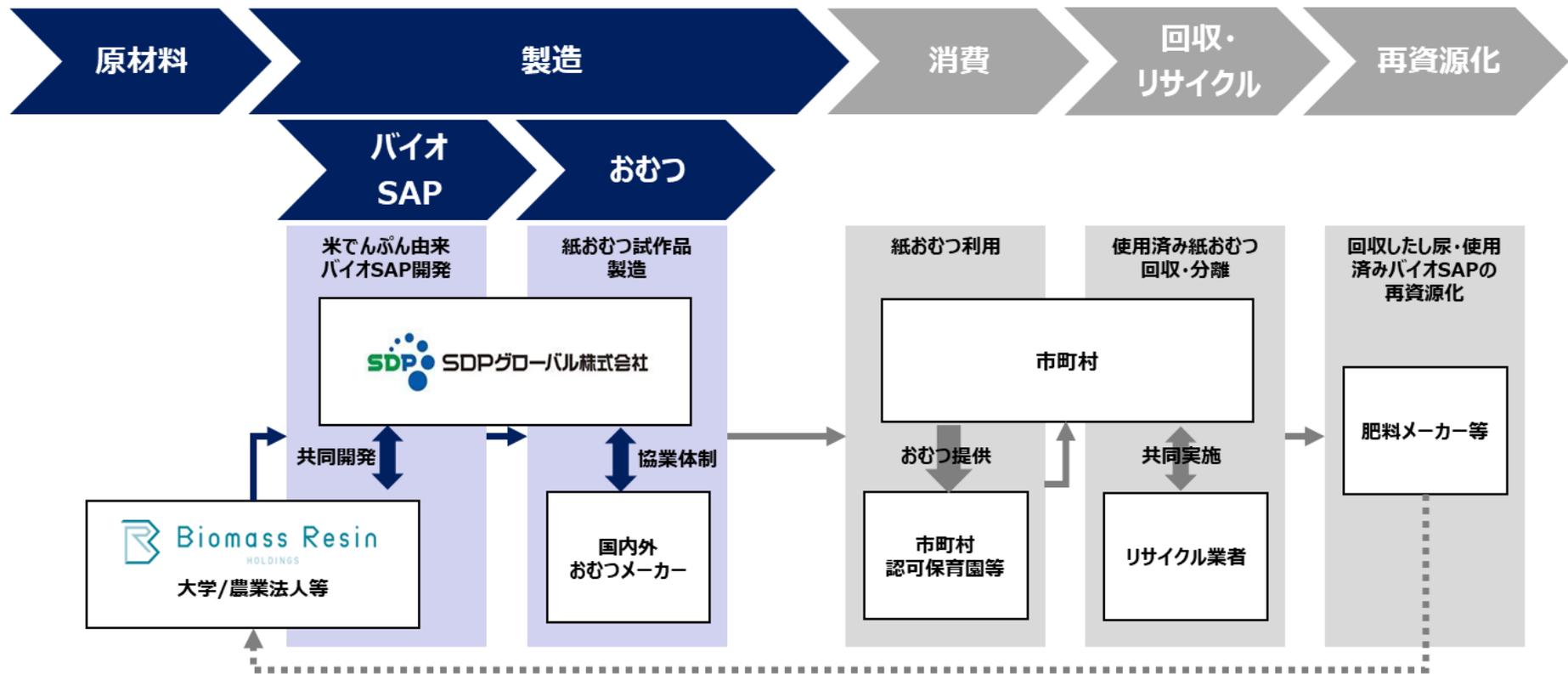


図 4 将来的に構築されるリサイクルループ

(出所) SDP グローバル作成

2.2. 背景

① 紙おむつ含む衛生用品の需要拡大に伴う環境負荷の増大

日本国内では、少子高齢化の影響により高齢者向けの大人用紙おむつは今後も増加傾向にあり¹、一般家庭ごみの中に占める紙おむつも、約5%（2020年）から7%（2030年）に達すると報告されている²。一方、そのリサイクル技術は未だ発展途上であり、廃棄される使用済み紙おむつの多くは焼却処分されている。SAPは一旦水を吸収すると、圧力をかけても吐き出しにくいという性質があることから、ごみの排出から処理時において大きな課題を抱えている。国内ではほとんどが焼却されているが、多量の水を含むため燃えにくく、自治体によっては新たに燃料（助燃剤）を投入している場合がある。このような含水率の高いごみは、炉内の温度を変動させ、焼却炉の耐用年数の寿命に影響を与えることが懸念されている。また、焼却炉を持たない自治体は、埋め立て地の逼迫といった課題にも直面している。また既存のSAPを含む紙おむつの構成素材は、生分解性に乏しいため自然界に流出した場合にはマイクロプラスチックとなる懸念もあるため、海洋埋め立てには適さず廃棄場所も限られる。いずれの処理においても、焼却時の二酸化炭素発生および埋め立て地のメタンガス発生は、地球温暖化に繋がる課題となっている。国内では、出生率の低下から子供用紙おむつの使用量は今後減少傾向にあるが、一方で高齢者向けの紙おむつは今後も増え続けるとい

¹ 日本衛生材料工業連合会 HP

² 環境省「使用済紙おむつの再生利用等に関するガイドライン」啓発パンフレット、
<https://www.env.go.jp/content/000043593.pdf>

われている。

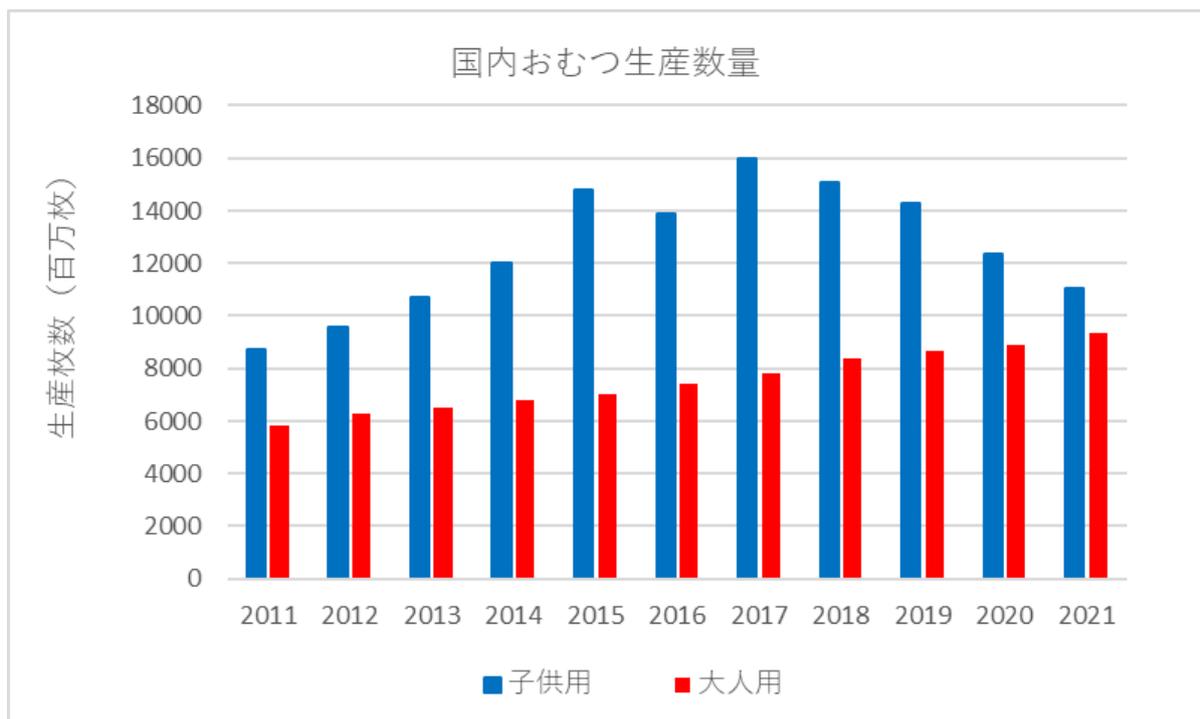


図 5 国内おむつ生産量

(出所) 日本衛生材料工業連合会ウェブサイトのデータを元に SDP グローバル作成

現在一般家庭ごみの中に占める紙おむつは約 5%程度とされるが、2030 年には 7% に達するとされる結果も国土交通省から報告されており、喫緊の課題となっている。

また、新興国・開発途上国（アジア・アフリカ・南米諸国）においては、紙おむつなどの衛生用品は未だに普及率が低く、消費者にとっては高価な製品とされる。一人当たりの使用量は、各国の一人当たりの GDP と相関があることが知られており、今後より一層の使用量の増加が見込まれている。しかし、日本のような自治体による廃棄物収集・処理の仕組みが存在していないため、今後大きな廃棄物発生源となることが懸念されている。不法投棄などにより自然界に流出し、マイクロプラスチックの発生源になっているとの指摘もある。このため、紙おむつに使用される材料も生分解性であることが望まれている。

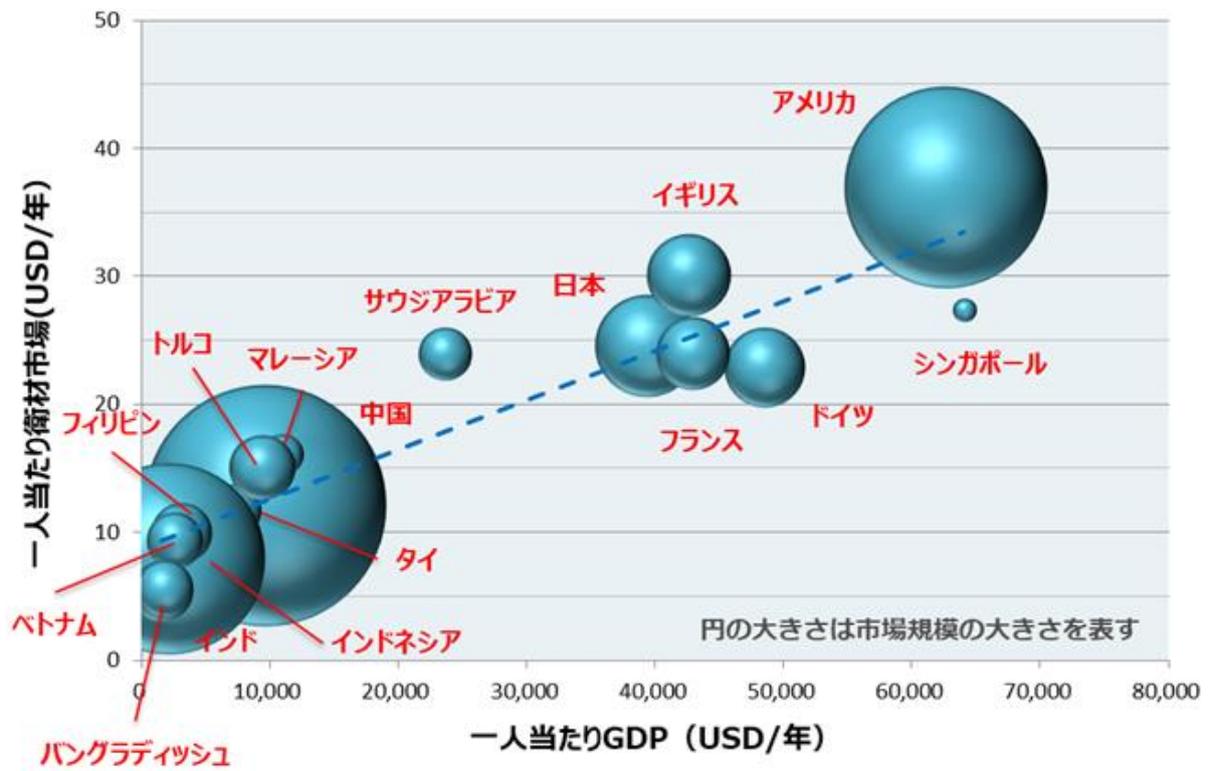


図 6 各国における衛生用品一人当たり使用量と各国の一人当たり GDP 比較

(出所) Statista のデータを元に SDP グローバル作成

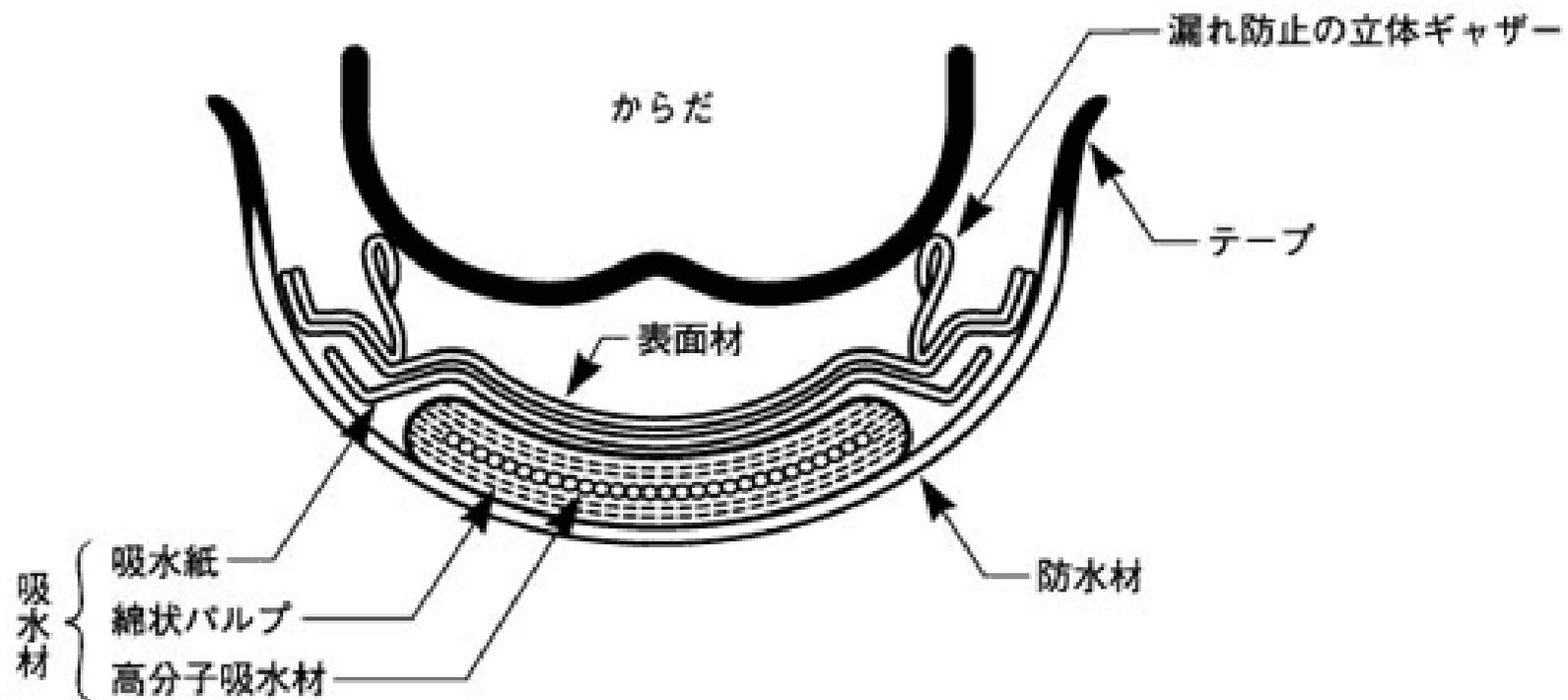


図 7 子供用紙おむつの構造

(出所) 日本衛生材料工業連合会ウェブサイト

このように、紙おむつ含む衛生用品の需要は、国内外で拡大傾向にあるが、それによって引き起こされる環境負荷も甚大である。特に環境への負荷が大きいポイントとして、以下が挙げられる。

石油由来原材料への高依存

図7に示す通り、紙おむつの構成は、パルプ以外の素材全重量の約70%が石油系プラスチック由来であり、その中でSAPは20~30重量%を占め、おむつの中で最も使用量の多い主要部材である³。

SAPの主原料は、ナフサクラッカーから得られるプロピレンを酸化反応することで得られるアクリル酸である。化学産業は、産業部門からのエネルギー起源CO₂ 排出量で鉄鋼産業に次ぐ国内第2位を占め、その約半分がナフサクラッカーで使用されるエネルギーとなっている。

³ 環境省「使用済紙おむつの再生利用等に関するガイドライン」啓発パンフレット,
<https://www.env.go.jp/content/000043593.pdf>

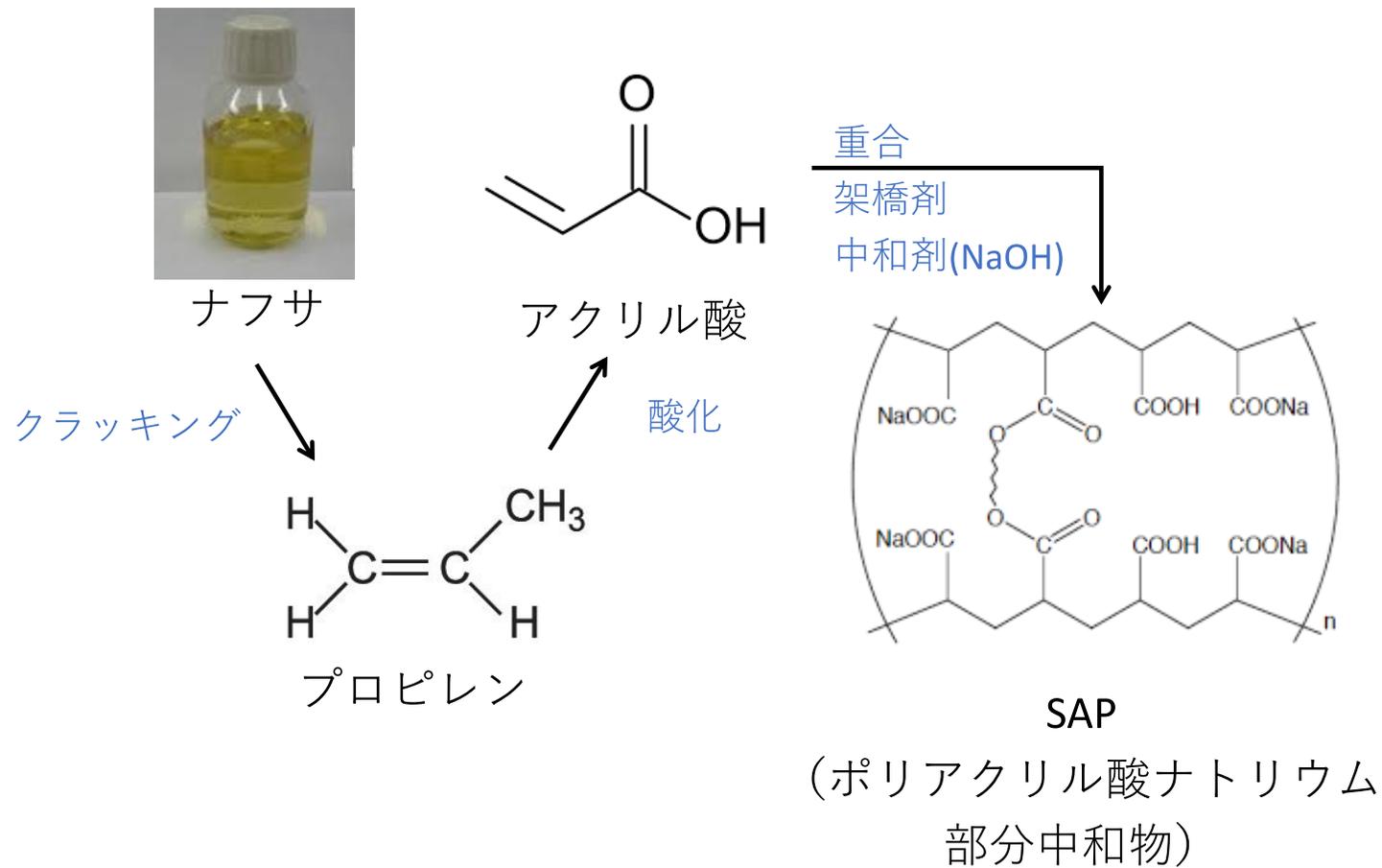
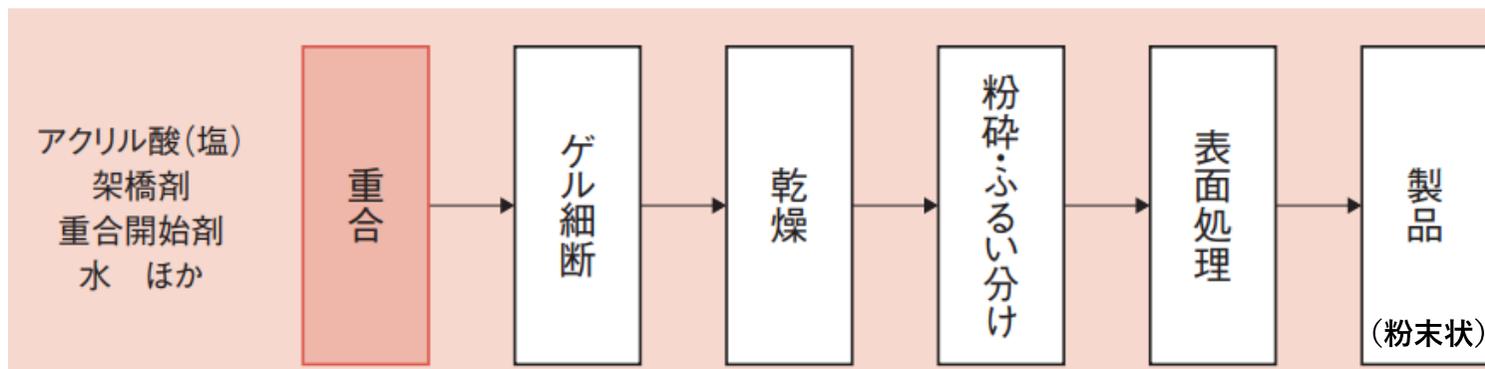


図 8 現行石化 SAP の反応スキーム

(出所) SDP グローバル作成

製造時のエネルギー使用量増大

SAP製造工程において、アクリル酸を水溶液中で重合するために、多量の水を蒸発させ50～70%の水を含んだゲルを粉末状にする必要がある。短時間で水を蒸発させるためには、高温の熱風（250℃～400℃）を使用するため、乾燥工程のLNG使用量が甚大である。SAP製造に要するエネルギーのうち、乾燥工程がエネルギー使用量を増大させている主要因である。安全面からSAP原料であるアクリル酸の保管時にも、冷却（-10～-5℃）する必要があり、製造工程全般におけるエネルギー削減は喫緊の課題である。



アクリル酸系SAPの製造フロー（水溶液重合法）

【課題】

- ・アクリル酸を水溶液中で重合し、50～70%の含水したゲルを得た後に、短時間で水を蒸発させるため、高温の熱風（250℃～400℃）を使用。乾燥工程のLNG使用量が甚大であり、エネルギー使用量を増大させている主要因となっている。
- ・安全面からSAP原料であるアクリル酸の保管時にも、冷却（-10～-5℃）する必要がある。

図 9 現行石化 SAP の製造プロセスと課題

（出所）SDP グローバル作成

廃棄時の高い環境負荷

SAPは、一旦水を吸収すると、圧力をかけても吐き出しにくいという性質から、ごみ排出・処理時の課題が大きい。日本国内では、SAP含む使用済み紙おむつのほとんどが焼却されているが、多量の水を含むため燃えにくく、焼却処理のために燃焼時間・燃料を多く要する。焼却炉を持たない自治体では、埋立処理されているが、埋立地の逼迫やSAP含む紙おむつからマイクロプラスチック流出または埋立地からメタンが発生するといった懸念もある。

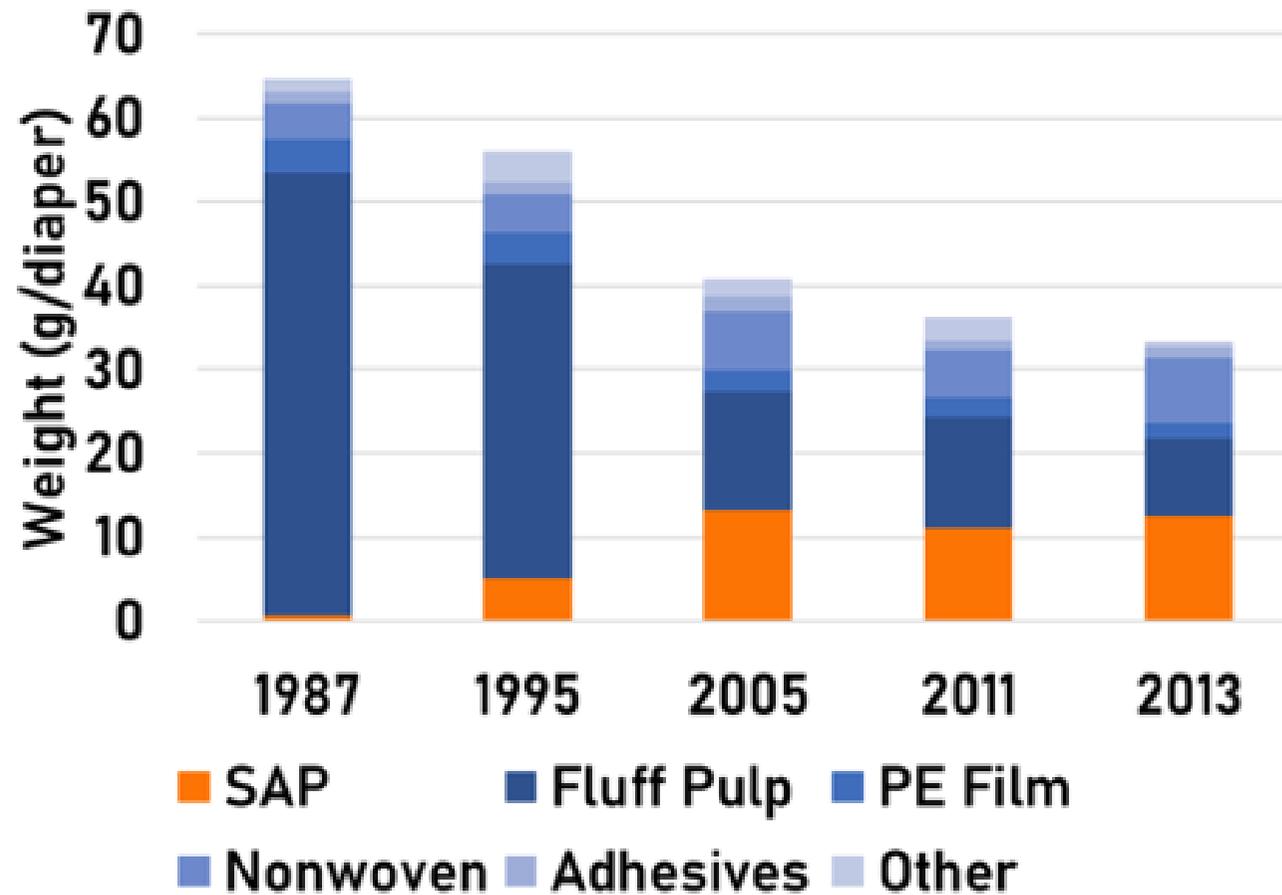


図 10 子供用おむつの構成材料比率の変化

(出所) EDANA Sustainability Report 4th Edition (2015) を元に SDP グローバル作成

② 使用済み紙おむつのリサイクルの困難さ

紙おむつリサイクルガイドラインが環境省により制定されたことで、紙おむつ素材のうち、パルプやPE/PPのリサイクルは進みつつある⁴。パルプは建設材料用途や紙おむつへの水平リサイクルの目途が立ちつつあり、また不織布や不透水性バックシートといったPEやPPなどの熱可塑性樹脂は比較的にリサイクルしやすい。一方SAPは、吸水により軟化しリサイクル工程において破碎されやすいため、他部材へのコンタミネーションが避けられず、他のリサイクル回収物の品質を低下させてしまう性質から、リサイクルが進んでいない。

SAPから容易に素材分離をするため、塩化カルシウムなどを投入してSAP自体が持つ吸収性能を低下させる化学的脱水手法も取り組まれているが、多量の塩化カルシウムの添加が必要になる点が課題である。また一度脱水したSAPはカルシウムが強固に結合するため、再使用が困難である。吸収性能を復元させるために、多量の水や酸を用いてカルシウムを洗浄で取り除く方法もあるが、環境負荷が大きいため運用されていない。

⁴ パルプは建設材料用途や紙おむつへの水平リサイクル、不織布や不透水性バックシートなどPE/PP（熱可塑性樹脂）は他商品へのカスケードリサイクルが実施されている。

3. 実証内容

3.1. 目標

3.1.1. 事業実施期間（3 ヶ年）における目標

当事業実施に際し、実施時間 3 年間を通して、以下を実証し目標達成することで、社会実装することを目指す。

- 米でんぷん由来バイオ SAP 製造技術開発
- 量産体制下における、リサイクル・再資源化に向けた米でんぷん由来バイオ SAP の改良
- 米でんぷん由来バイオ SAP 量産体制構築
- 原料となる米の調達経路の確立
- 使用済み紙おむつのリサイクルループモデル構築

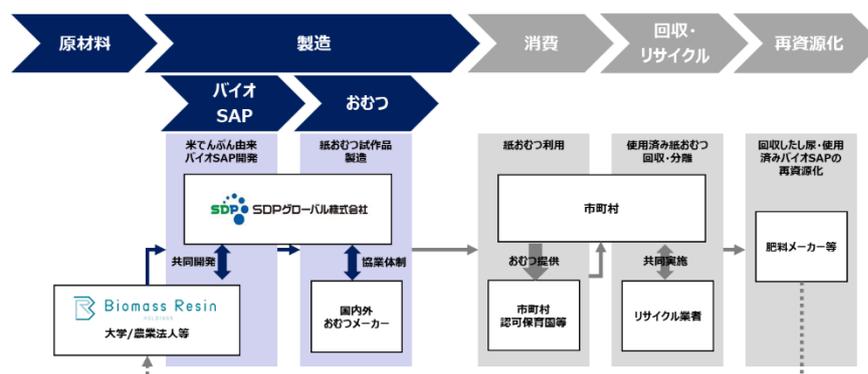


図 11 本事業での実施内容（再掲）

（出所）SDP グローバル作成

実証期間 3 ヶ年における各実証項目の詳細な実証内容及び目標は、以下に示す通り。

表 1 事業実施期間（3 ヶ年）における目標

実証項目	目標	
(1) 米でんぷん由来バイオSAP製造技術	①米でんぷんでのバイオSAP製造	<ul style="list-style-type: none"> • CMS由来バイオSAPと同等の吸水性性能 • 紙おむつ用SAP現行品と同等またはより少ないエネルギー起源CO2排出量
	②吸水性向上に向けた原材料の最適化	<ul style="list-style-type: none"> • 紙おむつ現行品で用いられる化石燃料由来SAPと同等の吸水性性能
	③米から米でんぷん精製プロセスの最適化	<ul style="list-style-type: none"> • 吸収性能とエネルギー起源CO2削減バランス
(2) リサイクル・再資源化に向けた米でんぷん由来バイオSAPの改良	①リサイクルしやすい構造	<ul style="list-style-type: none"> • リサイクル装置内にて水可溶化可能な構造
	②肥料化しやすい構造	<ul style="list-style-type: none"> • 生分解性の達成 • 環境影響、農作物生育へ無害である旨確認
(3) 米でんぷん由来バイオSAP量産体制構築	①子ども用紙おむつ試作品製造	<ul style="list-style-type: none"> • 子ども用紙おむつ現行品と同等品質
	②おむつメーカーとの合意形成	<ul style="list-style-type: none"> • 子ども用紙おむつメーカー1社と合意形成、市場展開に向けた商品開発スケジュール策定
	③量産体制構築	<ul style="list-style-type: none"> • バイオSAP用製造ライン設置 • 2024年度から量産開始可能となる人員配置
(4) 使用済み紙おむつのリサイクルループモデル構築	①自治体と連携した使用済み紙おむつの回収・素材分離	<ul style="list-style-type: none"> • リサイクルループに参画するステークホルダーとの合意形成（公立保育園8箇所、私立保育園13箇所、回収業社、リサイクラー） • 使用済み紙おむつ3.5トン/月を回収・リサイクル
	②使用済みSAPの汚泥肥料化	<ul style="list-style-type: none"> • 使用済みバイオSAPから汚泥肥料化・バイオガス化成功
(5) LCAの検証・評価	リサイクルループ全体におけるCO2排出量削減	<ul style="list-style-type: none"> • 紙おむつ用SAP現行品と同等またはより少ないエネルギー起源CO2排出量 • リサイクルループ全体を通じて環境負荷低減を達成

（出所）SDP グローバル作成

(1) 米でんぷん由来のバイオ SAP 製造技術

米でんぷん由来のバイオ SAP 製造は、これまで当社が実施してきた CMS 由来バイオ SAP での実証実験結果を有効活用できる考えである。トウモロコシ、米それぞれのでんぷん分子構造の類似性から、米でんぷんでも高い吸水性能を有するバイオ SAP は再現可能である想定である。

製造プロセスにおけるエネルギー起源 CO2 排出量削減についても、洗浄工程の省略によりエネ起 CO2 排出量を削減する。当工程省略により、吸水性能の低下リスクが生じるが、架橋剤・製造条件の見直しにより、吸水性能を改善する。さらに、米を原材料として使用する際、でんぷん生成工程を省略して直接米粉から CMS を製造し、かつ精米時に生じる廃棄物を飼料に利用することにより、さらにエネ起 CO2 排出量を削減する。

(2) リサイクル・再資源化に向けた米でんぷん由来バイオ SAP の改良

上記(1)と同時並行にて、使用済み米でんぷん由来バイオ SAP を汚泥肥料やバイオマスなど再資源化するために、米でんぷん由来バイオ SAP の設計段階でリサイクル時に水可溶化が可能な構造とすることで、し尿と SAP の回収効率を向上させることが可能となる。また、農業現場にて汚泥肥料として使用するために、回収・分離されたバイオ SAP が生分解する機能を保有する必要がある。SAP 製造時に、架橋剤種、量の調整および親水性基の導入率をコントロールすることで、生分解

性の担保が可能となる。上記のバイオ SAP 改良は、リサイクル装置メーカー及び汚泥肥料メーカーとも連携しながら、品質改良を実施する。

(3) 米でんぷん由来バイオ SAP の量産体制構築

紙おむつメーカーへ米でんぷん由来バイオ SAP を導入するため、これまでの当社が 40 年以上にわたり実施してきた紙おむつメーカーへの SAP 販売実績から、吸収体を自製し、顧客に評価結果を提案することで推進していく。米でんぷん由来バイオ SAP の販売価格についても、廃棄米の調達など原材料での低コスト化や生産効率の改善により、現行品と同等である販売価格 300 円/kg を目指す。

紙おむつメーカー（現時点では 1 社を想定）との合意形成できた後、共同実施者であるバイオマスレジソホールディングス製造工場にて、SAP 用製造ラインの設置や人員配置を通し量産体制を構築する。

(4) 使用済み紙おむつのリサイクルループモデル構築

製造された米でんぷん由来バイオ SAP 子供用紙おむつは、自治体 A 市と連携し、市内保育所等への提供を実施した上で、使用済みバイオ SAP のリサイクル・再資源化をモデル事業として実証実験する。

A 市では、既に市内保育所（約 30 箇所）へ子供用紙おむつを無償提供しており、将来的な使用済み紙おむつ廃棄物ゼロを目指し、リサイクルシステムの構築を検討している。当事業では、A 市のリサイクル設備や、紙おむつを無償提供してい

る A 市内の保育園との連携を通し、使用済み紙おむつを拠点回収し、リサイクル装置を用いバイオ SAP の分別やし尿・バイオ SAP の分離を実施する。分離した使用済みバイオ SAP は、自治体や肥料メーカー等と連携し汚泥肥料化・バイオガス化を行う。

リサイクルループモデル構築に向け、既に A 市、リサイクル装置メーカー、汚泥肥料メーカーとは協議を開始しており、モデル構築にむけ協働していく旨、三者から合意を得ている。

3.1.2. 令和5年度における実証項目及び目標

米でんぷん由来バイオ SAP の社会実装に向け、令和5年度は主に以下を目標として実証に取り組む。

1. 米でんぷん由来バイオ SAP 製造技術開発
2. ラボスケールにおけるリサイクル・再資源化に向けた米でんぷん由来バイオ SAP の改良
3. 米でんぷん由来バイオ SAP 量産体制構築に向けた製造ラインの検討
4. 使用済み紙おむつのリサイクルループモデル構築に向けたステークホルダーとの合意形成

令和5年度における各実証項目の詳細な実証内容及び目標は、以下に示す通り。

表 2 令和 5 年度の目標

実証項目	令和5年度の目標および検討内容
(1) 米でんぷん由来バイオSAP製造技術	・紙おむつ現行品で用いられる化石燃料由来SAPと同等の吸水性能（保水量 30g/g以上）
	①米でんぷんでのバイオSAP製造 ・トウモロコシ由来CMSを用いた実証実験結果に基づき、分子量、分岐度、カルボン酸基導入量等を確認 ・米に親水性基を導入し親水性材料（CMSなど）に転換 ・親水性材料を2軸押出機にて高濃度で架橋反応させ、微量の水でSAPを連続製造 ・親水性基の導入率（DS）のコントロールによる生分解性の担保
	②吸水性向上に向けた原材料の最適化 ・上記①が確認出来次第、さらなる吸水性向上に向け原材料を検証 ・具体的な検証項目は右記：最適な米の組成（でんぷん分子量、アミロース/アミノバクチン含量など）、架橋剤の選定、反応条件の最適化、表面処理
③米から米でんぷん精製プロセスの最適化 ・上記②で最適化された米でんぷんを米から効率的に生成する方法または米粉を直接用いる方法の検証	
(2) リサイクル・再資源化に向けた米でんぷん由来バイオSAPの改良	①リサイクルしやすい構造 ・リサイクル装置を想定した処理条件においてSAPの水可溶化を確認
	②肥料化しやすい構造 ・架橋剤種、量の調整およびDSのコントロールによる生分解性の担保 ・環境に影響を与える成分を含まない組成設計 ・バイオマス度測定（80%以上）および生分解性試験の確認（JISK6953-1：2011準拠で6ヶ月以内に60%生分解すること）
(3) 米でんぷん由来バイオSAP量産体制構築	①子ども用紙おむつ試作品製造 -
	②おむつメーカーとの合意形成 -
	③量産体制構築 ・バイオSAP用製造プロセスを整備し、実機試験にてプロトタイプを製造すること。 ・量産体制構築にあたっては、実機試験（2回程度）を行うこと。 ・製造した樹脂ペレットの乾燥検討を行うこと。
(4) 使用済み紙おむつのリサイクルループモデル構築	①自治体と連携した使用済み紙おむつの回収・素材分離 ・自治体と連携した使用済み紙おむつの回収・素材分離に向け、リサイクラー候補企業と協議を実施し、リサイクルループに参画するステークホルダーと合意形成すること。
	②使用済みSAPの污泥肥料化 -
(5) LCAの検証・評価	リサイクルループ全体におけるCO2排出量削減 ・吸水性能を担保しながら米でんぷん由来バイオSAP製造する際のCO2排出量を削減するため、シナリオを設定しLCAの検証・評価を実施すること。 ・ラボスケールの実験結果で得られた知見をもとに、吸収性能とエネルギー起源CO2削減バランスの妥当性を確認すること。

(出所) SDP グローバル作成

(1) 米でんぷん由来バイオ SAP 製造技術開発

- 実証項目①：米でんぷん由来バイオ SAP プロトタイプ製造
 - 米でんぷんでのバイオ SAP 製造トウモロコシ由来 CMS を用いた実証実験結果に基づき、分子量、分岐度、カルボン酸基導入量等を確認
 - 米に親水性基を導入し親水性材料（CMS など）に転換
 - 親水性材料を二軸押出機にて高濃度で架橋反応させ、微量の水で SAP を連続製造
 - DS のコントロールによる生分解性の担保
- 実証項目②：吸水性向上に向けた原材料の最適化
 - 上記①が確認出来次第、さらなる吸水性向上に向け原材料を検証
 - 具体的な検証項目：最適な米の組成（でんぷん分子量、アミロース/アミロペクチン含量など）、架橋剤の選定、反応条件の最適化、表面処理
- 実証項目③：米から米でんぷん精製プロセスの最適化
 - 上記②で最適化された米でんぷんを米から効率的に生成する方法または米粉を直接用いる方法の検証
- 目標
 - 紙おむつ現行品で用いられる石化 SAP と同等の吸水性能（保水量 30g/g 以上）
 - 以下に示す関係性明確化

- トウモロコシでんぷん由来 SAP：架橋剤量と保水量の関係
- 米でんぷん由来 SAP：架橋剤量と保水量の関係
- 米の種類、構造と吸収性能の関係
- 表面架橋工程の必要性：おむつ性能（吸収体）との関係

(2) リサイクル・再資源化に向けた米でんぷん由来バイオ SAP の改良

- 実証項目①：上記にて開発した米でんぷん由来バイオ SAP を、ラボスケールにてリサイクルしやすい構造設計を実施
 - リサイクル装置を想定した処理条件において SAP の水可溶化を確認
- 実証項目②：ラボスケールにて肥料化しやすい構造設計を実施
 - 架橋剤種、量の調整および DS のコントロールによる生分解性の担保
 - 環境に影響を与える成分を含まない組成設計
 - バイオマス度測定
- 目標
 - リサイクル装置処理条件にて水可溶化可能な構造を担保：リサイクル装置メーカー設備での可能性
 - 生分解性の達成（ JISK6953-1：2011 準拠で 6 ヶ月以内に 60% 生分解する）：生分解試験結果
 - 環境影響、農作物生育へ害となる成分不使用：使用原材料の安全性

(3) 米でんぷん由来バイオ SAP 量産体制構築

- 実証項目①：米でんぷん由来バイオ SAP の量産体制構築に向け、バイオ SAP 用製造プロセスを整備
- 実証項目②：実機試験にてプロトタイプを製造（実機試験（2 回程度）を実施し、製造した混練ゲルの乾燥方法を検討）
- 目標：バイオ SAP 用製造ライン詳細検討

(4) 使用済み紙おむつのリサイクルループモデル構築

- 実証項目：自治体 A 市と連携した使用済み紙おむつの回収・素材分離に向け、リサイクラー候補企業と協議を実施
- 目標：リサイクルループに参画するステークホルダー(自治体、リサイクラー)との合意形成

(5) LCA の検証・評価

- 実証項目：吸水性能を担保しながら米でんぷん由来バイオ SAP を製造する際の CO₂ 排出量を削減するため、以下の通りシナリオを設定し LCA の検証・評価を実施
- 目標：ラボスケールの実験結果で得られた知見をもとに、吸収性能とエネルギー起源 CO₂ 削減バランスの妥当性を確認

3.2. 結果

令和5年度の実証実験を通し、実証項目「(1) 米でんぷん由来バイオ SAP 製造技術開発」及び「(2) ラボスケールにおけるリサイクル・再資源化に向けた米でんぷん由来バイオ SAP の改良」については、ラボスケールにて複数米粉を用いた CMS を米でんぷん由来バイオ SAP を製造した結果、トウモロコシでんぷんと同等の吸収性能を確認した。実証項目「(3) 米でんぷん由来バイオ SAP 量産体制構築に向けた製造ラインの検討」について、バイオマスレジソホールディングス社の実機装置を使用して条件検討を実施し、米でんぷん由来 CMS 混練工程において生産性目標を達成している。一方、生産速度に見合うゲル取出し・成形・乾燥工程の具現化に課題が残存している。

「(4) 使用済み紙おむつのリサイクルループモデル構築に向けたステークホルダーとの合意形成」においては、主要ステークホルダーであるリサイクル装置メーカー、A 市、汚泥肥料メーカーと定期的な情報交換を行い、モデル構築にむけた協議を続けている。

表 3 令和5年度実証結果（サマリー）

実証内容	R5年度目標	成果と達成度	課題
(1)米でんぷん由来バイオSAP製造技術開発	ラボスケールにて以下を達成 <ul style="list-style-type: none"> 米でんぷん由来バイオSAPにて、紙おむつ現行品で用いられる化石燃料由来SAPと同等の吸水性能(保水量 30g/g以上) 	<ul style="list-style-type: none"> 米でんぷん由来バイオSAPにて、保水量のおおむね目標到達を確認(保水量30g/g)。 	<ul style="list-style-type: none"> 紙おむつに搭載した際の吸収体・おむつとしての性能確認(自社評価) おむつメーカーとの合意形成
(2)リサイクル・再資源化に向けた米でんぷん由来バイオSAPの改良	ラボスケールにて以下を達成 <ol style="list-style-type: none"> リサイクル装置処理条件にて水可溶化可能な構造を担保 生分解性の達成(JISK6953-1 準拠で6ヶ月以内に60%生分解する) 環境影響、農作物生育へ害となる成分不使用 	<ol style="list-style-type: none"> リサイクル装置メーカーのリサイクルプロセス条件で、水に可溶であることを確認済み。 生分解性試験実施中。60日間経過時点で約10%分解にとどまる。 現時点で使用していない。 	<ol style="list-style-type: none"> なし 生分解性の改善、生分解性と吸収性能の達成目標・バランス明確化 なし
(3)米でんぷん由来バイオSAP量産体制構築	<ul style="list-style-type: none"> バイオSAP用製造ライン詳細検討 	<ul style="list-style-type: none"> 小型実機設備を使用し、まずはトウモロコシでんぷんCMSを使用した検討に着手。製造プロセス（設備改良による混練プロセス効率化、混練物のハンドリング・運搬方法確立）をほぼ確認済み。 	<ul style="list-style-type: none"> 製造プロセスの再現性確認 米でんぷん由来CMSを用いた量産体制の構築 乾燥工程の具体化
(4)使用済み紙おむつのリサイクルループモデル構築	<ul style="list-style-type: none"> リサイクルループに参画するステークホルダー(リサイクラー)との合意形成 	<ul style="list-style-type: none"> リサイクル装置メーカー、A市、汚泥肥料メーカーと協議継続中。 	<ul style="list-style-type: none"> なし
(5)LCAの検証・評価	<ul style="list-style-type: none"> ラボスケールの実験結果で得られた知見をもとに、吸収性能とエネルギー起源CO2削減バランスの妥当性を確認 	<ul style="list-style-type: none"> 米粉化、混練工程を実測。CMS化、乾燥・粉碎工程は、ラボスケールまたは類似品から類推した。 	<ul style="list-style-type: none"> CMS化、乾燥・粉碎工程の実測

(出所) SDP グローバル作成

各実証項目における結果（詳細）は、以下に示す通り。

(1) 米でんぷん由来バイオ SAP 製造技術開発

(1) -1 組成の最適化検討

(1) -1-1 吸水力発現原理

SAP の吸水力は、P.J.Flory⁵によってイオン網目理論として説明されている。すなわち吸水力が発現する要因は、①高分子電解質と水との親和力および②可動イオン濃度の差（ゲル内部の方が高い）によって発生する浸透圧の2つがある。一方で、吸水力を抑制する要因としては網目構造に基づくゴム弾性力がある。これらの要因のバランスがとれるところでゲルの膨潤度 Q が決定され、次式で示される。

$$Q^{5/3} \simeq [(1/2 \times i/V_u \times C_s^{1/2})^2 + (1/2 - X_1)/V_1] / (v_e/V_0) \quad (1)$$

i : モノマー単位当たりのイオン化度

V_u : モノマー単位のもル体積

C_s : ゲルの外部溶液の電解質濃度

X_1 : 相互作用パラメーター

V_1 : 溶媒のもル体積

⁵ Paul J.Flory, Principles of Polymer Chemistry, Cornell University Press, (1953); 岡小天, 金丸競 共訳, 高分子化学 上, 丸善, (1956)

v_e : 有効架橋数

V_0 : 未膨潤ゲルの体積

この式中の第1項の $(1/2 \times i/V_u \times C_s^{1/2})$ はイオンの浸透圧、第2項 $((1/2 - X_1)/V_1)$ は高分子電解質の水との親和力、第3項の (v_e/V_0) は架橋密度をそれぞれ示すことから、上記式は下記のように表すことができる。

$$\text{膨潤度} = (\text{イオンの浸透圧} + \text{高分子電解質の水との親和力}) \div \text{架橋密度} \quad (2)$$

この式から、吸水性能に影響する因子としては、①浸透圧および水との親和力、②架橋密度があげられる。すなわち、親水基($-\text{COOH}$ 、 $-\text{COONa}$)の数が多いと吸水力が高くなる。架橋密度についても、架橋密度が高いほど吸水力が低下する。SAPの吸水の原理は高分子電解質の分子鎖が水中でカルボキシルイオン同士の反発による分子鎖の広がる作用と、架橋点による分子鎖の広がりを制限する作用との相互作用により発現する。

本事業の目指す米でんぶん由来のSAPにこの理論を適用して考えると、以下の因子に整理することができる。

表 4 吸収力発現のための検討内容

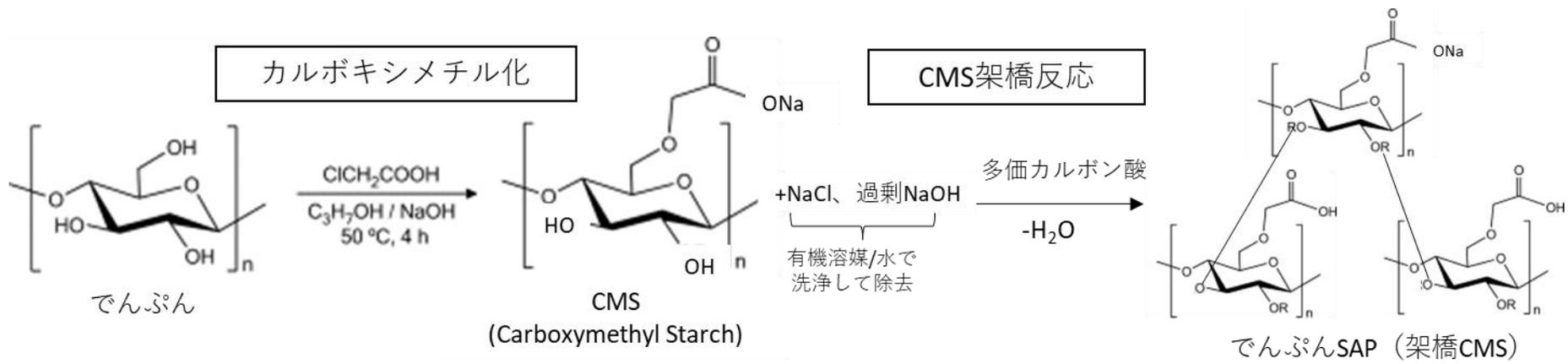
因子	コントロールする方策	検討内容
分子量	分子量、分岐度（アミロース/アミロペクチン含量）	原材料種類（トウモロコシ、米など）
架橋密度	架橋剤調整	架橋剤種類、量
官能基濃度	官能基種類、置換度（DS）調整	カルボキシメチル基導入量

（出所）SDP グローバル作成

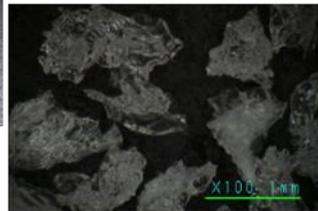
なお、本事業では比較的 low コストででんぷん分子内への導入が容易なカルボキシメチル基を選定した。これらのコントロール因子と吸水性能との関係を把握することで、最適な組成、構造を目指すことにした。また、中和度は衛生材料に用いることから既存の石化 SAP 同様に pH 約 6~7 に調整して評価に使用した。

(1) -1-2 合成方法

本事業で想定する米でんぷん由来の SAP の製造プロセスを図 12 に示す。でんぷんをカルボキシメチル化しカルボキシメチルスターチ (CMS) を得たのちに、続く架橋反応により網目構造を有する SAP を合成する。各合成方法は、既報の方法に準じて行ったが、それぞれのステップについて概略を以下に示す。



CMSの外観



でんぷん系SAPの外観

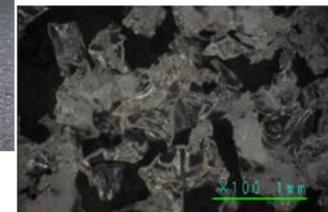


図 12 でんぷん系バイオ SAP 反応スキーム

(出所) SDP グローバル作成

<カルボキシメチル化反応>

攪拌機を備えた 1 L フラスコにでんぷん 100g (含水率約 12 重量%)、及びイソプロパノール 800g、48%水酸化ナトリウム水溶液 82.3g 及びクロロ酢酸ナトリウム 50.3g を入れ、40°Cで 3 時間攪拌した。内容物をメタノール 500m L の入った容器に移し、減圧濾過を行った。得られた固形物を 80%メタノール水溶液 500g に入れ、10 分間攪拌した後に再び減圧濾過を行った。濾液に 1 %硝酸銀水溶液を添加しても沈殿が発生しなくなるまで同洗浄操作を繰り返すことで、副生する水酸化ナトリウムを除去した後、固形物をステンレス製バット上に均一に広げ、40°Cに温調した順風乾燥機内で静置乾燥し、CMS を得た。

<CMS 架橋反応>

架橋反応は、CMS と架橋剤（後述の多価カルボン酸）を水の存在下で均一に混練した後に加熱しながら水を除去する方法をとった。この場合に、架橋剤とでんぷんを均一に混練することが重要になる。混練方法としては、小型二軸押出機を使用して行った。主な条件を表 5 に示す。本事業では、ライフサイクルアセスメント (LCA) の観点から、留去する水の量を最小にし、かかるエネルギーを極力少なくすべく、できるだけ高濃度下での混練を試みた。

表 5 混練、乾燥条件概要

吐出速度	0.8kg/h
混練温度	95°C
ダイ径	5.8mm
乾燥条件	140°C×1 時間
粉碎条件	ジューサーミキサーにて粉碎
粒度調整	150～850μm の粒径で粒度調整
CMS 混練濃度	70%

(出所) SDP グローバル作成

(1) -1-3 置換度 (DS) の調整

市販されているトウモロコシを原料とする CMS を複数メーカーから購入し、種々 SAP を合成して保水量⁶を比較した。なお、各社の CMS 中には水酸化ナトリウム、塩化ナトリウムが残存していたため、前処理として前述した方法によりこれらを洗浄し除去したものを実験に使用した。検討したトウモロコシ由来 CMS の物性を以下に示す。

⁶ SAP ($W_1=0.2\sim 1.0$ g) をティーバッグに入れ全体の重量(W_2)を測定し、生理食塩水 (蒸留水に 0.9wt%となるように塩化ナトリウムを溶解した液) に室温下で1時間浸漬する。浸漬後、遠心分離機に移し、150G~250Gで数分間回転した後取り出して重量(W_3)を測定する。ティーバックのみ(W_4)で同手順を実施し、ブランクの重量 (W_5) を測定する。保水量を以下の式により求める。保水量(g/g)=[(W_3-W_2)-(W_5-W_4)]/ W_1

表 6 検討に使用した市販の CMS (当社洗浄済み)

メーカー	置換度 ⁷ (DS)	粘度 ⁸ (mPa・s)
A 社	0.34	240
B 社	0.40	330
C 社	0.71	3,340

(出所) SDP グローバル作成

⁷ 置換度 (DS) の測定方法は、全自動波長分散型蛍光 X 線分析装置により、ナトリウム (Na) 原子濃度を求め、以下の計算式により、でんぷんを構成する単糖単位当たりのイオン性官能基の数 (DS) を算出した。DS = (162 × Na 原子濃度) / (23 - 80 × Na 原子濃度)

⁸ アルカリ (メタノール (MeOH) / 4% 水酸化ナトリウム水溶液 (NaOH aq.) = 2/8 (重量比)) でバイオ SAP の架橋部位を切断後 (25°C × 60min. 攪拌)、MeOH に 1 度沈降させた後、洗浄液 (MeOH/水 = 8/2 (重量比)) で 5 回洗浄した。再度 MeOH に沈降させ、濾別により固形分を回収し、乾燥する (40°C, 3h)。固形分をイオン交換水に溶かし 1.0wt% 濃度として、50ml のスクリュウ管に 50ml 採り 25°C で 60min. 温調した後、B 型粘度計 (ローター No. 2~4、60rpm) にて測定した。本検討では分子量の代替指標として使用した。

これらのサンプルを用いて、架橋剤として既報の文献で使用されているクエン酸を用いて架橋反応を行った。得られた SAP の保水量を表 7 および図 13 に示す。

表 7 各社 CMS を使用して合成した SAP 物性

メーカー	DS	粘度(mPa・s)	架橋剤添加量(重量%)	保水量(g/g)
A 社	0.34	240	0.30	ゲル形成せず
			0.50	22.8
B 社	0.40	330	0.30	ゲル形成せず
			0.50	27.2
C 社	0.71	3,340	0.15	32.1
			0.50	17.2

(出所) SDP グローバル作成

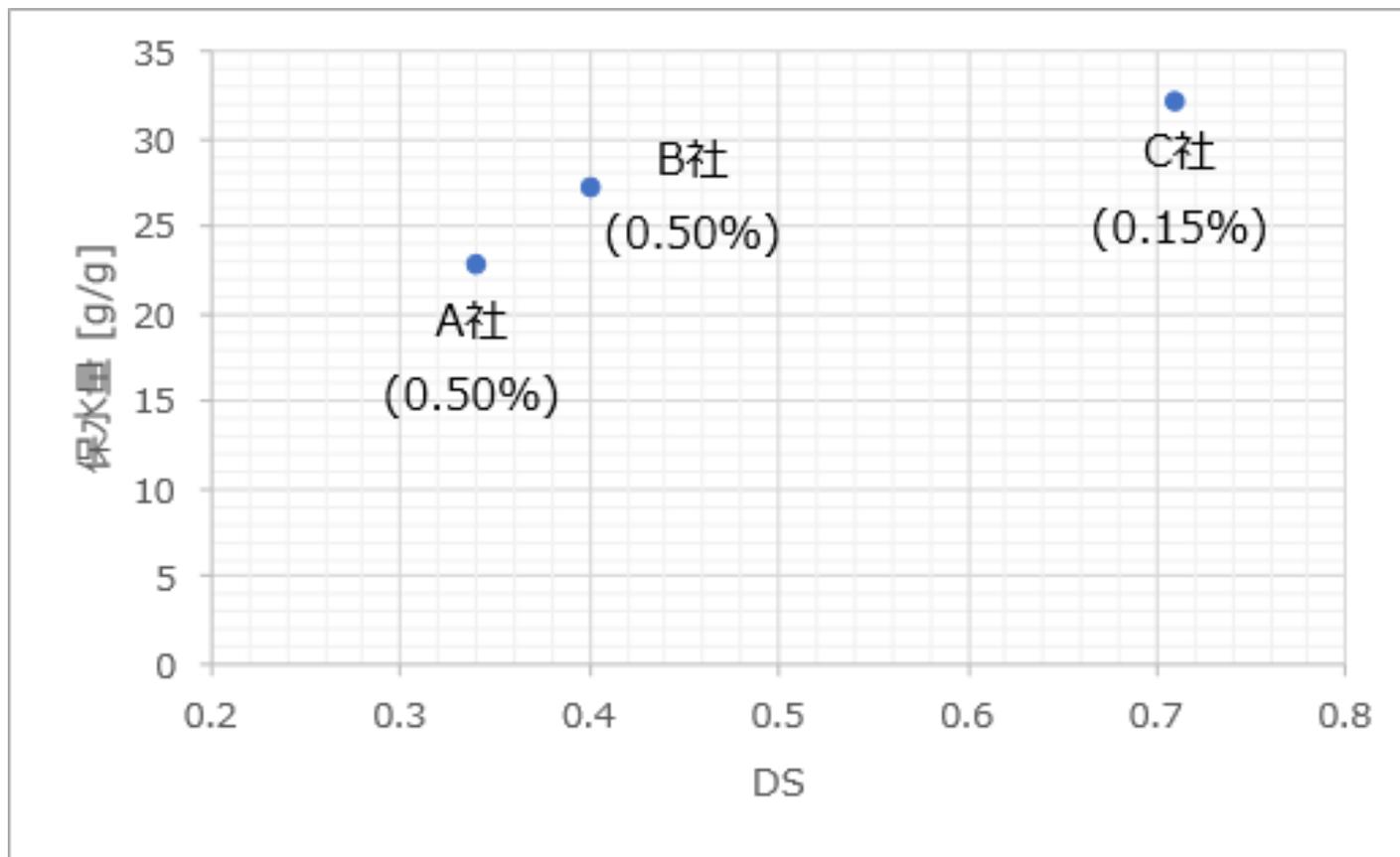


図 13 DS と保水量の関係

(出所) SDP グローバル作成

図中の () 内の数値は使用したクエン酸の添加量を示す。

結果から、厳密には各社使用しているトウモロコシでんぷんの分子量や分岐度の違いが保水量に影響する可能性があるが、総じて DS 置換度が大きいほど保水量が高いことがわかった。このことは、Flory の式からも容易に想定できる。

一方で、CMS を製造する工程で使用するカルボキシメチルクロライドは、現時点石油由来原料から製造されているため、DS 導入量が多くなると得られた SAP 中のバイオマス度が低下する。本事業の目標であるバイオマス度 80%以上を達成するためには、計算上 DS は 0.7 以下とする必要がある。このため、以下の検討では DS が最大 0.7 となるように仕込み量を決定し検討を行った。

(1) -1-4 架橋剤種類の選定

前項で保水量の最も大きかった C 社のトウモロコシ由来 CMS を用いて、架橋剤種類を検討した。検討した内容を表 8 に示す。なお、架橋剤としては、肥料としての安全性、生分解性を考慮して、自然界に存在し環境への悪影響のない多価カルボン酸の中から選定した。

表 8 検討した架橋剤種類

種類	検討した化合物
2価カルボン酸	リンゴ酸、コハク酸、イタコン酸、スルホコハク酸
3価カルボン酸	クエン酸

(出所) SDP グローバル作成

図 14 に各架橋剤種類と得られた SAP の保水量を示す。結果として、使用した多価カルボン酸の中では、保水量に大きな差は認められなかった。このため、以降の検討では、比較的安価に入手しやすく、また続く混練、架橋工程でのハンドリングの容易さから、水溶性の高いリンゴ酸を選定した。

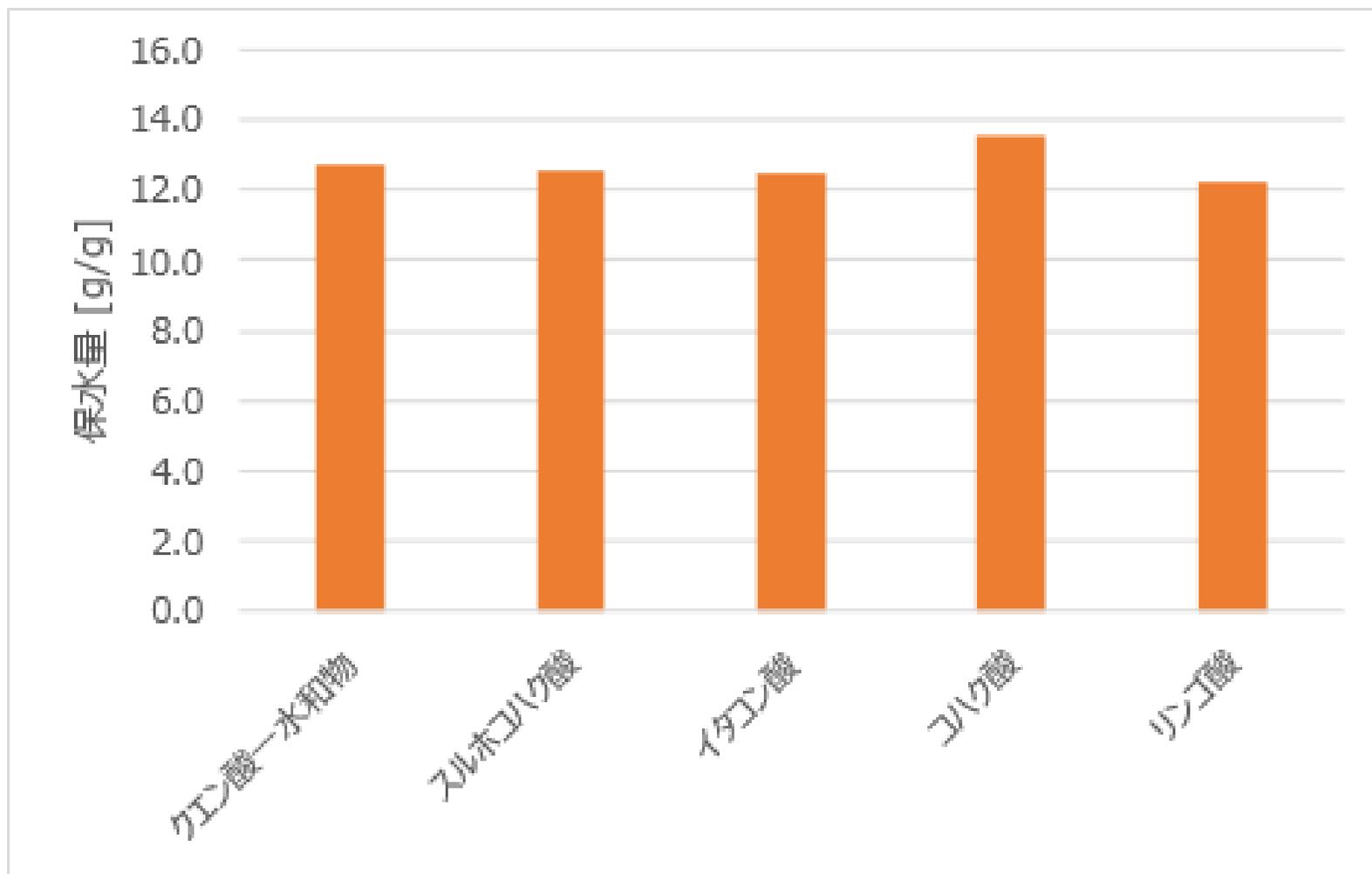


図 14 架橋剤種類と保水量の関係

(出所) SDP グローバル作成

なお、本検討で用いた CMS は、実験の効率化の観点から、市販品（トウモロコシ由来、塩化ナトリウム 13%含有）をそのまま使用したため、保水量は洗浄により塩を除去したものを用的ものよりも低くなっている。また、残留している水酸化ナトリウムは、予め酸塩基滴定により求め、使用する架橋剤による中和分と架橋剤として機能する分を架橋反応時に合算して加えた。

(1) -1-5 架橋剤量の調整

前述した洗浄操作により水酸化ナトリウム、塩化ナトリウムを取り除いた C 社のトウモロコシ由来の CMS を用いて、上で選定したリンゴ酸添加量と保水量の関係を検討した。結果を図 15 に示す。架橋剤量増加に伴い保水量は大きく低下していることがわかる。本事業では、おむつとして機能を果たすために、既存の石化 SAP と同等の吸水性能を目指すことから、目標を 30g/g に設定し、架橋剤量を決定した。

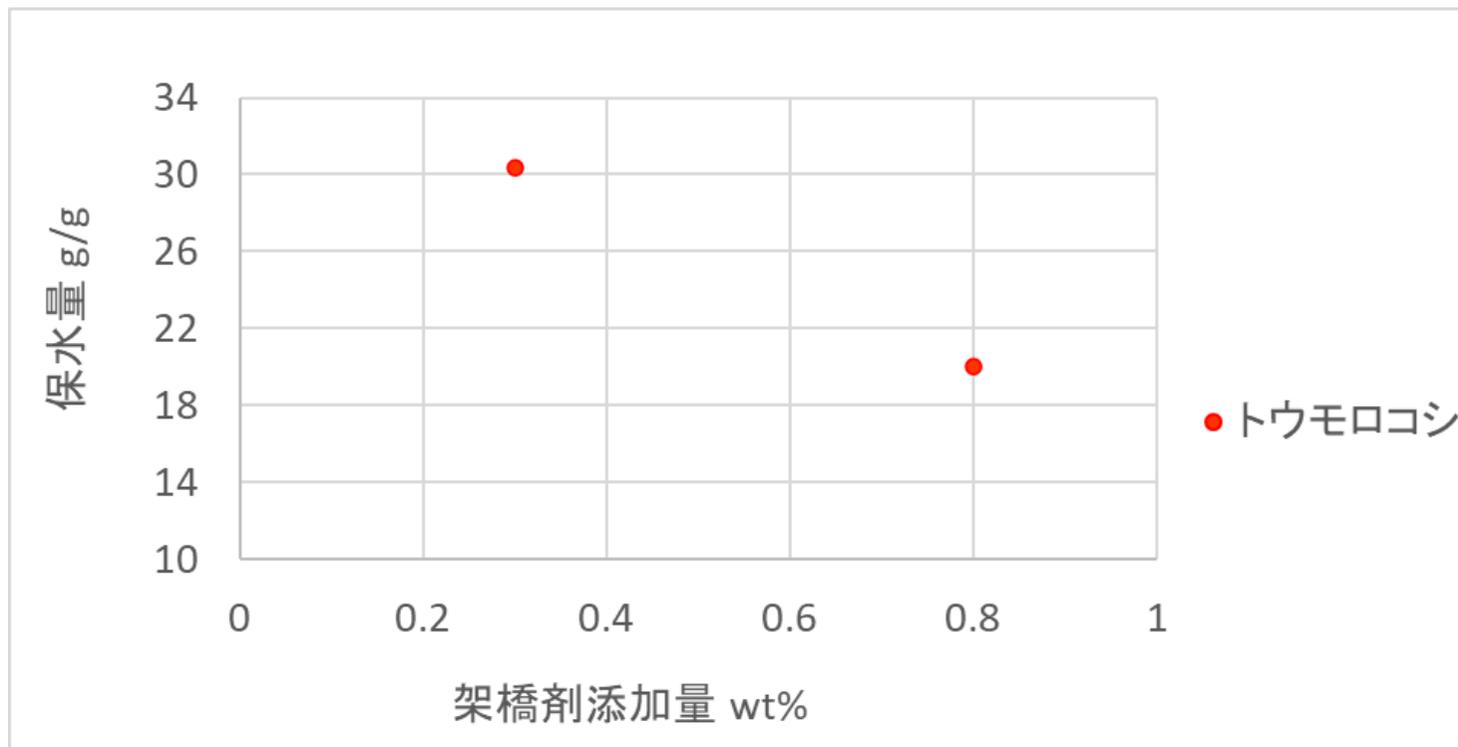


図 15 架橋剤添加量と保水量の関係

(出所) SDP グローバル作成

(1) -1-6 米でんぷんを用いたバイオ SAP 製造

トウモロコシ由来 CMS を用いた検討結果を基にして、米由来でんぷんでの SAP 合成を検討した。米由来の CMS を合成するに当たり、米の構造上の特徴 (図 16) から、胚芽および表面の糠を取り除くことで、中心部は比較的純度の高いでんぷん質を得ることができると考えられるため、玄米から糠層を取り除いた種類の異なる複数の白米をロールミル粉砕機にて平均粒径約 50 ミクロンに粉砕した米粉を直接 CMS 化の原料として用いた。



図 16 玄米の構造と精米過程のイメージ図

(出所) 農山漁村文化協会⁹

次に、でんぷん構造の異なる以下の3種類の米を選定した。これらを使用して得られた米粉を用いて、上述した方法で CMS を合成した。各種米から得られた CMS 性

⁹ 松尾孝嶺, 山崎耕宇, 星川清親, 前田英三, 清水正治: “稻学大成第 1 卷 (形態編)”, 農山漁村文化協会, 1997, pp. 64-69.

状を表 9 にまとめる。これらの米由来 CMS を用いて、トウモロコシ由来 CMS と同様の方法により、SAP を製造した。結果を表 10 に示す。

表 9 試験に使用した米の種類と性状

米の種類	アミロペクチン比率 ¹⁰	DS	粘度(mPa・s)
A	100%	0.70	300.9
B	約 70%	0.64	86.4
C	約 60%	0.63	17.3

(出所) SDP グローバル作成

¹⁰ 比率については、既報の方法によって求めることができるが、表内の数値は提供先にヒヤリングした値を使用している。

表 10 合成した米由来 SAP の吸水性能

米の種類	架橋剤（リンゴ酸）添加量 （重量%/CMS）	保水量(g/g)
A	0.3	27.7
B	0.3	30.1
C	0.3	28.8
参考：トウモロコシ	0.3	30.4

（出所）SDP グローバル作成

結果から、米の種類により保水量に多少の差が認められたが、トウモロコシ由来 CMS を用いた SAP と遜色ない結果が得られた。米の種類によって、保水量に大きな差が生じなかった原因としては、カルボキシメチル化反応時に強アルカリ性の水酸化ナトリウムを使用しているため、分解を受けて低分子量体となり、各米の特性差が減少したものと考えられる。しかしながら、本結果は少数の実験によるものであり、詳細な考察および検討は、今後の課題として引き続き検討を続ける必要がある。また、調達コストおよび調達安定性の観点から、以後の吸収体試験には米 B を用いて実施した。

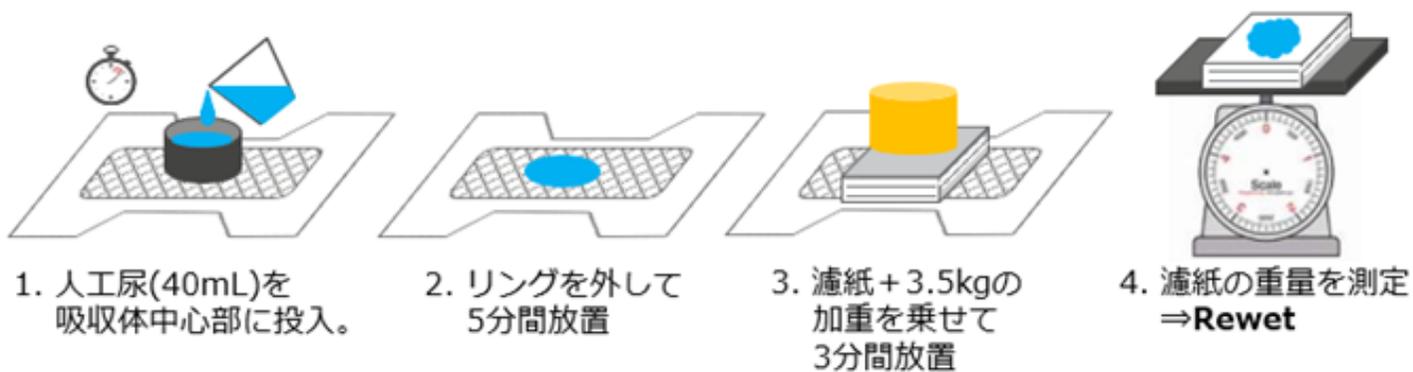
(1) -1-7 吸収体としての確認

これまでの結果から、SAP 自体としては当初目標とした石化由来 SAP と同等の保水量 30g/g が米由来でも達成できることが判明した。続いて、得られた SAP を用いて当社独自の方法による吸収体試験を行った。試験方法を図 17 に示す。

測定器具・材料

1. 人工尿 (食用色素で着色)
2. リング (直径：6cm)
3. 濾紙 (10cm × 10cm) 1回目；20g, 2回目；40g, 3回目；60g
4. 重り (3.5kg)
5. 電子天秤
6. 定規

測定手順



5. 2分放置後、1.～5.の操作を2回繰り返す (計3回)

図 17 吸収体試験方法 (自社試験方法)

(出所) SDP グローバル作成

吸収体の作成方法としては、以下の手順で行った。自社製パッドフォーマーに金属メッシュ付き治具 (38cm×12 cm) を取り付け、治具内部にティッシュペーパー 1 枚をセットした。パッドフォーマーにパルプ 4.5g を解砕しながら投入し、気流下で治具内ティッシュペーパー上にパルプを積層した後、パッドフォーマーから治具を取り出し、SAP 6.8g を均一になるようにパルプ上に撒いた。次に、作成した吸収体を取り出し、吸収体の真ん中部分で折り返した (19 cm×12 cm) 後、プレス機で 10MPa 下 10 秒間、吸収体をプレスした。プレス機から取出した吸収体を、不透水性バックシート (25 cm×16 cm) を敷いた実験台上に重ねて置き、吸収体上部に不織布でできたトップシート (25 cm×16 cm) を載せ、全辺をビニルテープで実験台と固定した後、上記試験方法にて逆戻り量 (リウエット、RW) 測定を実施した。得られた吸収体を用いて、市販のおむつ 5 種類との比較を行った。市販のおむつは、吸収体部分を自社作成のものと同じ大きさになるように中心部を切り取り実験に使用した。結果を以下に示す。

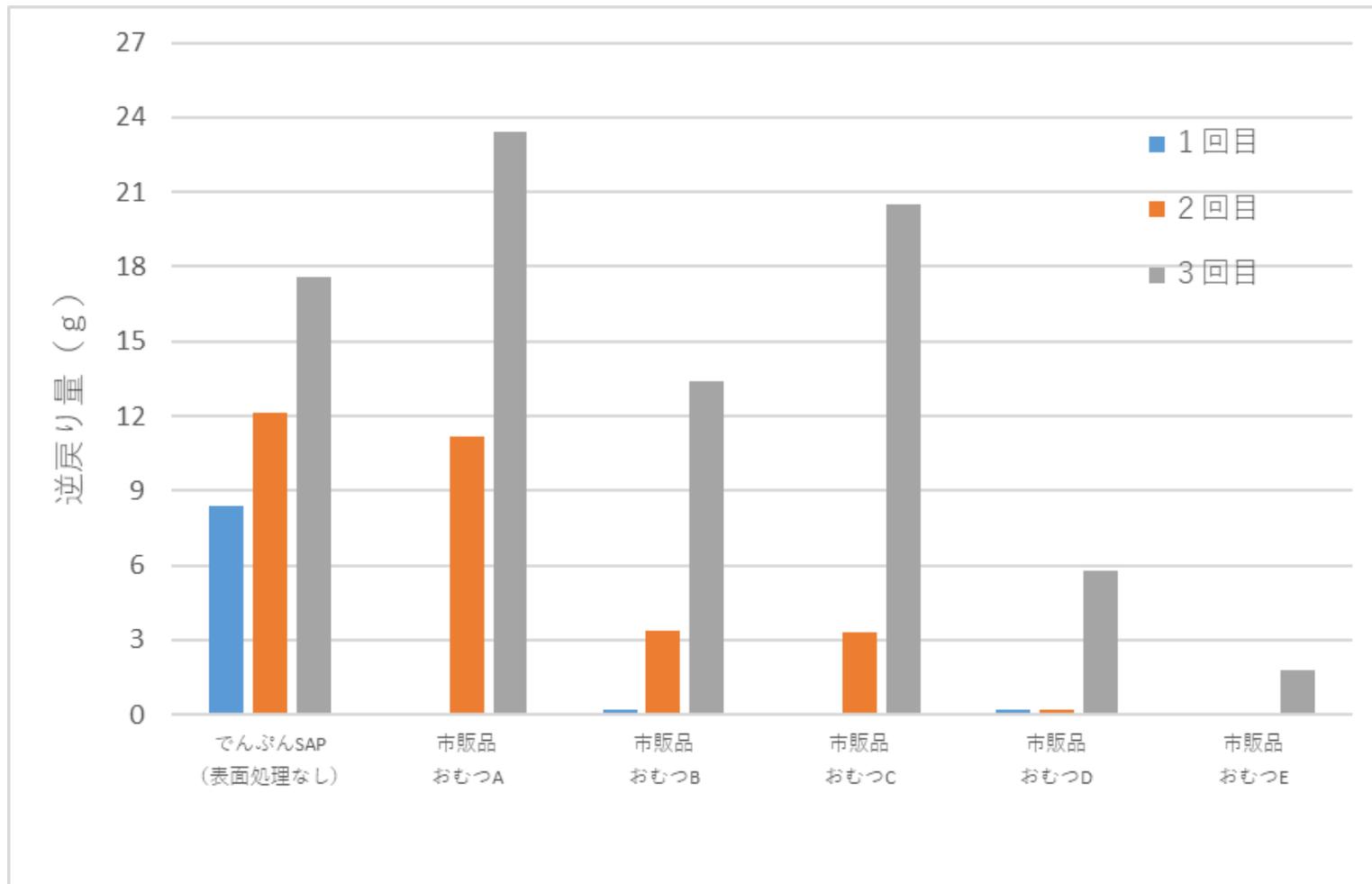


図 18 吸収体の試験結果

(出所) SDP グローバル作成

保水量自体には石化 SAP と大きな差はないが、おむつの機能として重要な項目の一つである RW 試験において、市販のおむつと比べて劣る結果となった。この RW 評価は、おむつ内に排尿した後の着座姿勢など、圧力がかかった際に一旦おむつ内に吸収された液が再び表面に滲み出るといった液の逆戻りを防ぐことで着用時の不快感や肌のトラブル改善に繋ぐことを目的とした指標である。特に、1 回目の RW が大きな差となったことから、荷重をかけたことで一旦 SAP に吸収された液が放出されたと考えられる。このため、ゲルの強度を向上させるべく、以下の方法により表面架橋反応を行った。

<表面架橋反応>

イソプロパノール/水=70/30（重量比）の混合溶媒を調整し、これにリンゴ酸を室温で溶解させて、架橋液（リンゴ酸濃度 15 重量%）を作成した。でんぷん SAP 100g に対して、架橋液 6.67g をスプレーを使って表面に噴霧した後、均一になるように室温で混合した。その後、ステンレスのバット上に広げて、上部に数か所穴を開けたアルミホイルを被せ、順風乾燥機内で 140°C×60 分間加熱した。

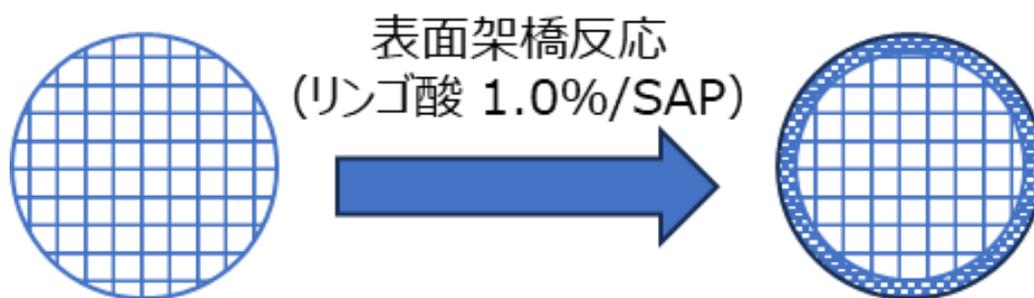


図 19 表面架橋反応概念図

(出所) SDP グローバル作成

表 11 表面架橋前後の物性変化

性能	表面架橋なし	表面架橋あり
保水量(g/g)	33.2	21.8
荷重下0.3psi 吸収量(g/g)	6.1	13.9

(出所) SDP グローバル作成

これにより、元の保水量は 33.2g/g から 21.8g/g まで低下したが、荷重下 (0.3psi) での吸収量¹¹は、6.1g/g から 13.9g/g まで増大した。表面架橋後に得られた SAP を 1.2 倍量増やし同様の評価を行ったところ、市販のおむつ A と同等の RW 性能になることが確認できた。このことから、おむつの RW を改善するためには、SAP の保水量のみならず、荷重下吸収量もある程度必要である。また、RW はおむつに使用する材料 (例えば、トップシート、セカンドシート、パルプなど) や構造 (例えば、液の拡散を促すスリット構造、SAP とパルプの使用比率、吸収体内の Z 軸方向の SAP 存在位置のコントロールなど) などによっても RW 性能が改善できることも、これまでの知見から分かっている。今後、量産化検討で得られたサンプルを使って、吸収体としてのさらなる改良を目指す予定である。

¹¹ 底にナイロンメッシュを取り付けたシリンジにSAP ($W_1=0.1\sim 0.2\text{g}$) を平らになるように入れて、0.3psiの圧力が均一にかかるように重りを乗せる。全体重量(W_2)を測定した後、底部から生理食塩水を供給することができるステージ上に室温下1時間置いて、その後全体重量(W_3)を測定する。荷重下吸収量 (0.3psi) を以下の式により求める。荷重下吸収量(g/g) = $(W_3 - W_2) / W_1$

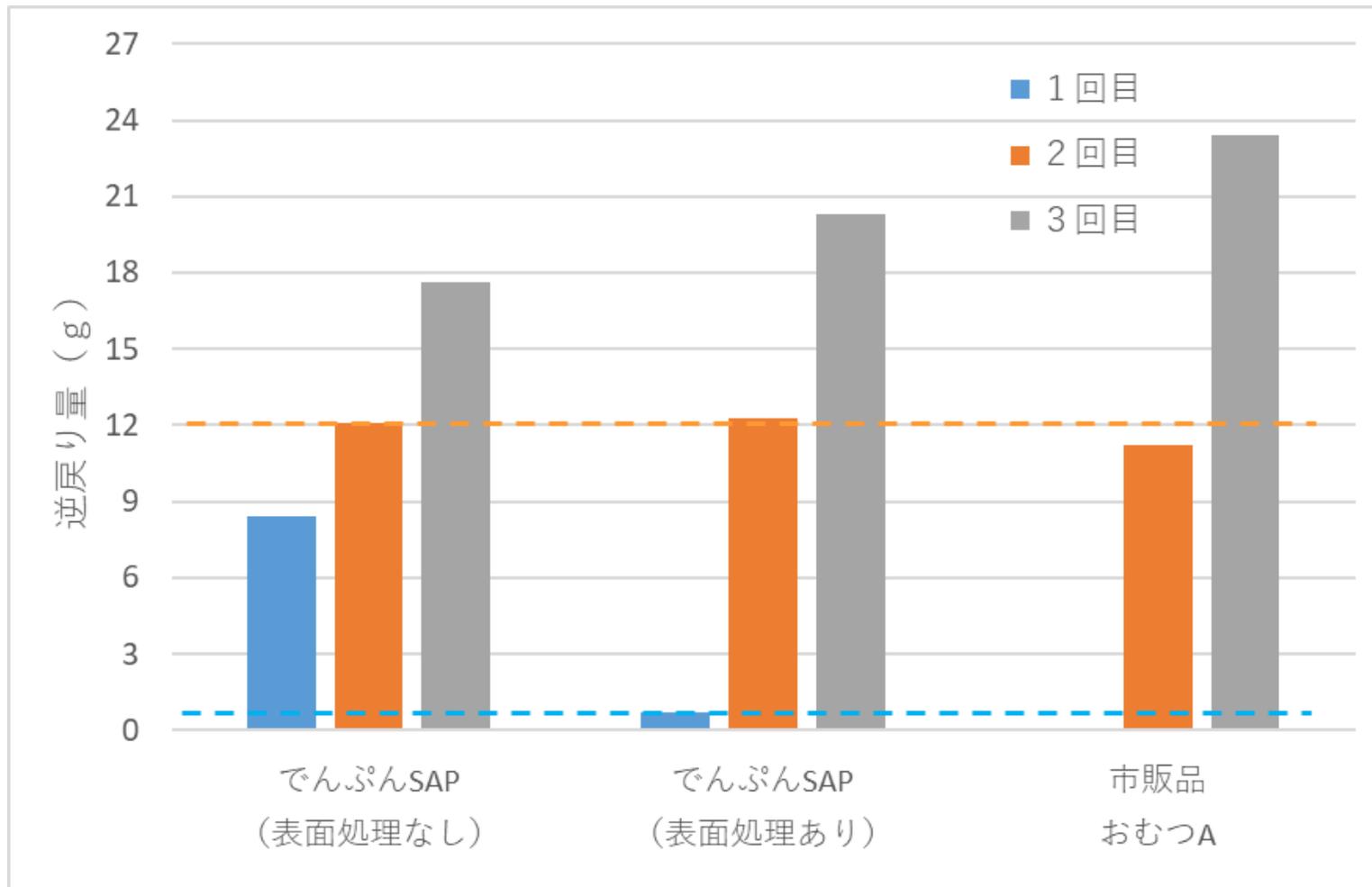
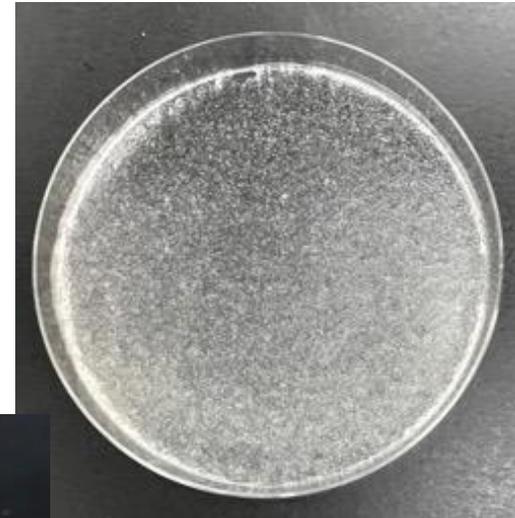


図 20 でんぷんSAP（表面架橋有無）と市販おむつとの吸収体試験の比較

（出所）SDP グローバル作成



外観（吸収前）



外観（吸収後、20倍吸収）



図 21 ラボで合成したでんぷん系バイオ SAP

（出所）SDP グローバル作成

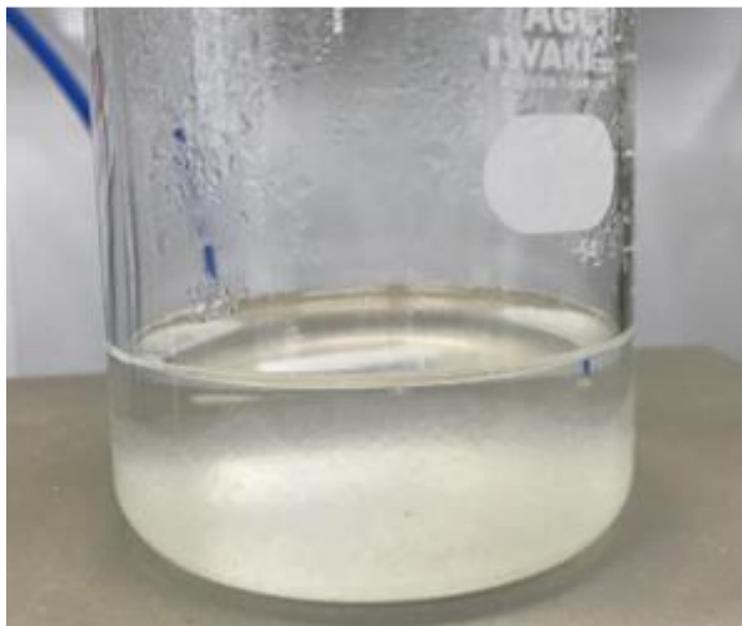
(2) リサイクル・再資源化に向けた米でんぷん由来バイオ SAP の改良

(2) -1 リサイクル装置を想定した処理条件における SAP の水可溶化

本事業では、使用済み紙おむつをリサイクルする際に使用される部材を分離回収することを目標としている。この中で現行の石化 SAP は、リサイクル時に水を使用する場合に多量の水を吸収し、続く部材の分離を難しくする課題がある。不織布やパルプに混入する水を含んだ SAP は、分離条件や装置を複雑にするだけでなく、回収物の品質を低下させる問題がある。このため、SAP がリサイクルの際に分解し、容易に除去できるようにできれば、リサイクル時にかかる負荷の低減が期待できる。本事業では、リサイクル装置メーカー製装置で分離回収する想定で検討を行った。同システムで、材料の滅菌のために使用済み紙おむつを破碎し洗浄する際に SAP が水に可溶化できれば、他の不織布やパルプなどの部材と SAP の分離が容易になると考えた。

実際の処理条件を想定してでんぷん SAP を処理した結果を以下に示す。図に示すとおり、現状の処理条件ででんぷん SAP の架橋部位が切断（加水分解）を受けて、容易に水に可溶化することがわかった。今後、さらに可溶化条件を検討し、処理時間の短縮、リサイクル時のエネルギー削減が可能か、実際に処理する際に効果を検証する予定である。

可溶化前



可溶化後

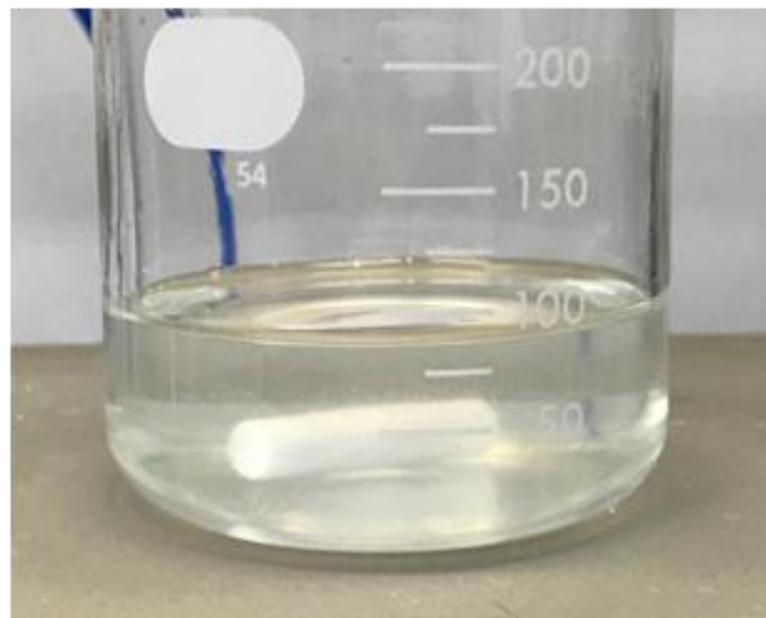


図 22 可溶化前・後の様子

(出所) SDP グローバル作成

(2) -2 肥料化しやすい構造設計

(2) -2-1 生分解試験結果

先の吸収体試験で使用した米でんぷん SAP の生分解試験結果を以下に示す。

JIS K 6953-1:2011 生分解度試験（コンポスト中）【培養期間 60 日間（2023.12.6～2024.2.4）経過報告】

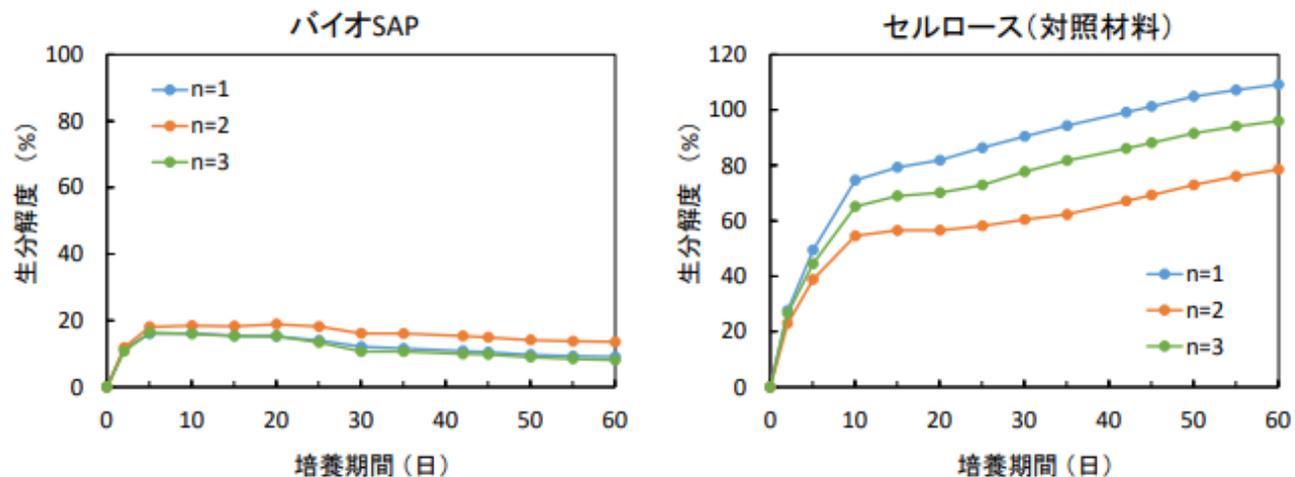


図 生分解度曲線

表 60 日後の生分解度

試料	生分解度 (%)			
	n1	n2	n3	平均
バイオ SAP	9.1	13.6	8.1	10
セルロース (対照材料)	109.2	78.5	96.0	95

図 23 生分解試験結果（（一財）化学物質評価研究機構の測定結果）

（出所）（一財）化学物質評価研究機構の測定結果を一部抜粋

結果としては、60日時点で生分解が止まり、目標とする6ヶ月、60%の生分解性は未達であり、今後も生分解の進行が期待できなかったことから試験を中止した。達成できなかった原因としては、①生分解試験中に、分子架橋の加水分解が十分に進行せずに微生物活性が低下したこと、②用いたCMSの置換度(DS)が高く生分解率が低下したことの2点が考えられる。

①については、紙おむつのリサイクル工程で予め架橋点を切断することを想定しているため解決は可能である。一方、②が原因の場合は、生分解できるDSを見極める必要がある。前述した通り、吸収性能の観点からはDSは高い方が好ましいと考えられるため、おむつの吸収性能と相反する可能性がある。官能基の種類、導入量と吸収性能の両立は、今後の検討課題である。リサイクル工程を活用して、生分解しやすい状態に改質することも含めて今後検討していく。

なお、原料となるCMSやリンゴ酸は、国内では食品添加物として認められていること、架橋構造がエステル結合であるため自然界で容易に加水分解を受け原材料に戻ることから、安全性については問題ないと考える。

(2) -2-2 バイオマス試験結果

今回試験に使用したサンプルのバイオマス度を測定した。結果を以下に示す。バイオマス度は80%を確認し、目標を達成した。

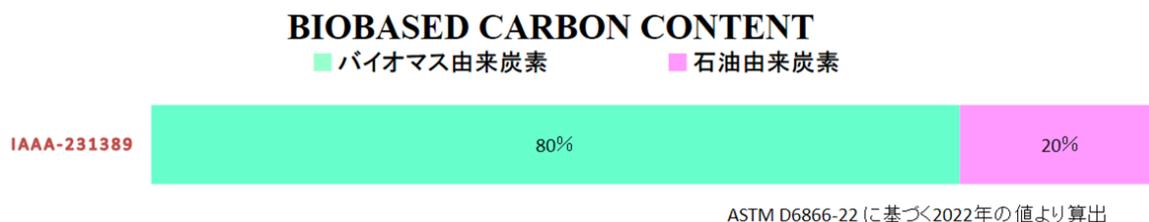


図 24 バイオマス度試験結果（(株) 加速器分析研究所の測定結果）

（出所）(株) 加速器分析研究所の測定結果を一部抜粋

(3) 米でんぷん由来バイオ SAP 量産体制構築

今年度は、量産化の製造工程を確立することに主観を置き、まずはトウモロコシ由来 CMS を出発原料に試験を実施した。

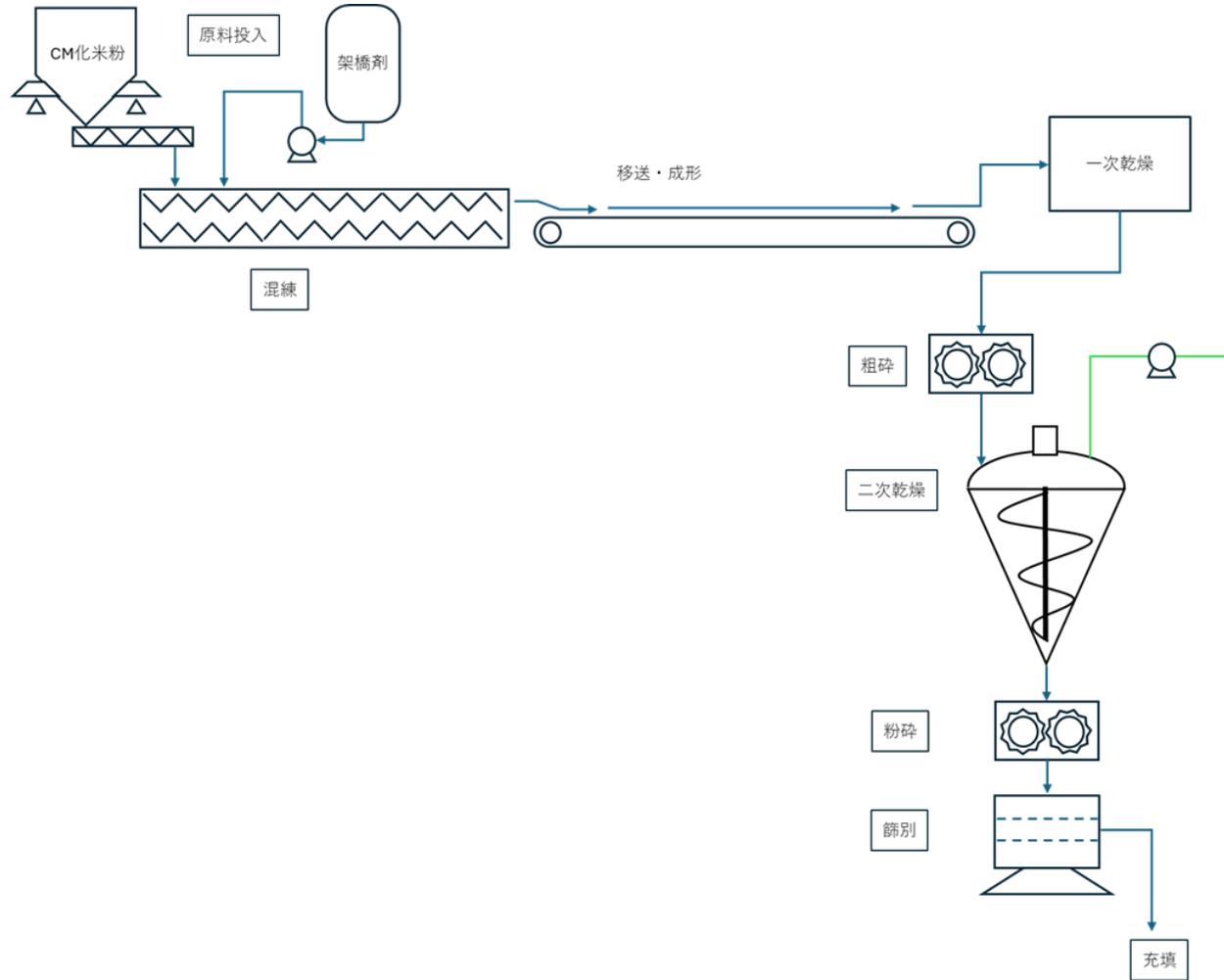


図 25 現在想定しているバイオ SAP 製造プロセス

(出所) SDP グローバル作成

- 第一回実機試験

- 実施時期：2023年10月30日（月）～11月2日（木）
- 実施内容：バイオSAPを量産化するための試験製造として、バイオマスレジ
ン南魚沼の実機にてCMSと水を混練
- 結果：当初、ホッパー内部に仕切り板を設置し（図26）、材料が混練機に投
入される直前までCMSと他の水系添加剤との接触を抑制する手法を試みた
が、CMSが水に触れると短時間で吸着性が高まる、膨潤するという特性から、
混練機内部に材料が封入される前に材料がだんご状になってしまい安定的
に材料を混練機にフィードすることが難しく（図27）、均一な混練ができな
かった。この結果を踏まえ、今年度中に少なくともあと2回実機試験の実施
（混練設備の調整後に、再度混練する、長時間・高吐出量において混練する）
が必要との判断に至る。

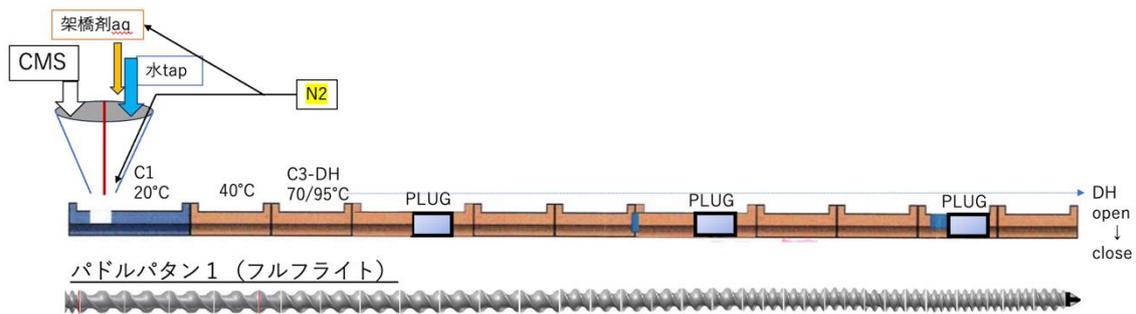


図 26 二軸混練装置セッティングとスクリューデザイン (第1回試作時)

(出所) バイオマスレジジンホールディングス作成



図 27 ホッパー下部 (材料投入口) における材料閉塞による様子 (第1回試作時)

(出所) バイオマスレジジンホールディングス作成

- 第二回実機試験
 - 実施時期：2023年12月18日（月）～22日（金）
 - 実施内容：第一回実機試験の再実施
 - 結果：第一回目以降、CMSと水系添加剤を別々に混練機へ投入する目的で、混練機に液体添加用ノズル（図28）を設置し、CMSと水系添加剤を別々に混練機に投入する設備改良を行った（図29）。その結果、予定する原材料量を混練設備に安定的に投入することができ、CMSと水を含む原材料全てを均一に高効率で混練することができ、混練目標を達成した。また、混練後の乾燥工程においては、混練物の固化成形・運搬方法の効率化に更なる検討が必要である。

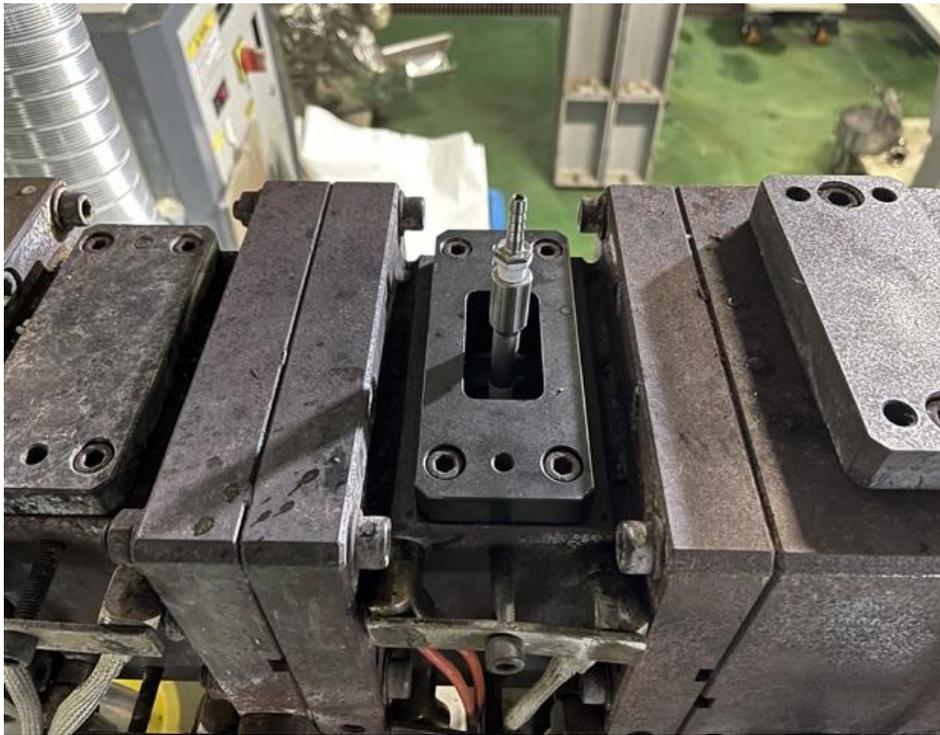


図 28 液体添加用ノズル

(出所) バイオマスレジジンホールディングス作成

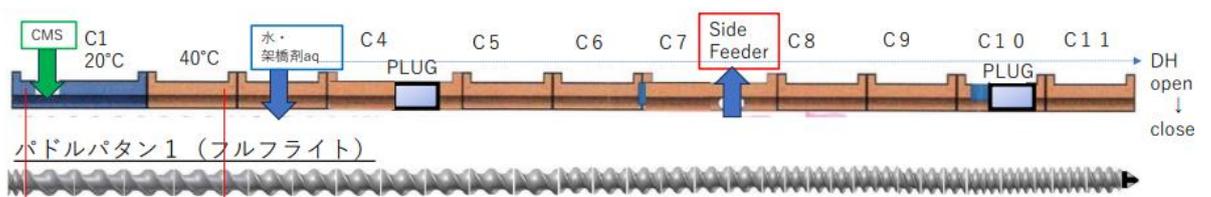


図 29 二軸混練装置セッティングとスクリーデザイン (第2回試作時)

(出所) バイオマスレジジンホールディングス作成

- 第三回実機試験
 - 実施時期：2024年1月29日（月）～2月6日（火）
 - 実施内容：第二回で発生した課題の対処方法の確認、混練の再現性確認、LCA測定の準備・実測定の実施および設備のトータルメンテナンスとオーバーホール
 - 結果：第二回目試作と同様に安定した材料投入、均一混練が可能であり当初の目標であった混練処理量 100kg/hr を達成し、混練機出口からのストランドに関しても安定的な形状を確認できた（図 30）。また、混練設備に設けられている減圧脱水設備を併用する事により、より安定的なストランド形成とストランド表面のベタつき抑制を同時に確認できる結果となった（図 31）。LCA測定に関しては、事前の現地調査と測定準備により、上記安定混練タイミングでの測定が可能であった（図 32）。一方で、今回の一連の試作・生産時において材料特性由来により、一部設備における腐食・錆の発生が確認されており（図 33）、設備のメンテナンスに時間を要した。次回の生産時には、対策が必要である。



図 30 混練物からのストランド外観（第3回試作時）

（出所）バイオマスレジンはホールディングス作成

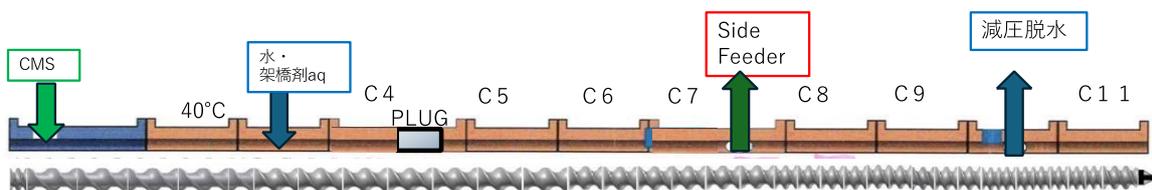


図 31 二軸混練装置セッティングとスクリーデザイン（第3回試作時）

（出所）バイオマスレジンはホールディングス作成



図 32 LCA 測定箇所：混練機分電盤内の様子（第 3 回試作時）

（出所）バイオマスレジソールディングス作成



図 33 混練機一部に確認された錆の様子（第 3 回試作時）

（出所）バイオマスレジソールディングス作成

(4) 使用済み紙おむつのリサイクルループモデル構築

実際のリサイクル検討は、3年目（令和7年度）となる予定であるため、令和5年度はリサイクル装置メーカーとの秘密保持契約書の締結、および実証試験現場見学（2023年10月5日～6日）と現状の課題把握、今後のリサイクルを想定したコンセプト確認（処理条件で水可溶化することのメリット）を行い、検証実験の参考にした（(2) -1 参照）。

また、A市とは、開始時に本事業によって得られたバイオSAPを搭載した紙おむつを公立保育園8箇所、私立保育園13箇所に無償配布し、効果を検証することで合意を得ている。令和6年度に実際の紙おむつプロトタイプができた段階で今後の協業体制について具体化する予定である。

4. 令和6年度以降の実証内容

本事業の目標とするリサイクルループの各工程を、バイオ SAP 製造～紙おむつ製造～消費～回収・分離～再資源化まで直列に進めると、途中の工程で課題に直面した際に事業期間内に最終目標まで到達できなくなるリスクがある。このため、各工程最低限達成すべき目標を再設定した上で、令和6年度以降の実証に取り組む。

表 12 リサイクルループ各工程における技術目標（令和 5~7 年度）

○：方針目途、●：目標達成

リサイクルループ		技術目標	R5 年度	R6 年度	R7 年度
全体		SAP 製造プロセス LCA 検証	○	●	
		リサイクルプロセス LCA 検証			●
技術 開発	原料	米の活用可否判断	●		
		国内安定調達		○	●
	SAP	吸収性能 $\geq 30\text{g/g}$	●		
		組成最適化	○	●	
		製造プロセス最適化	○	●	
		量産設備具体化、生産条件確立	○	●	
		量産化体制構築		○	●
	おむつ	吸収体性能 RW (市販品同等以下)	○	●	
		プロトタイプ作成		○	●
社会 実装	使用	施設テスト (@自治体)		○	●
		使用可否課題把握			●
	回収	リサイクル装置回収率 $\geq 90\%$			●
	リサイクル	汚泥肥料使用可否 (好気性生分解)	○	●	
		SAP バイオガス化可否 (嫌気性生分解)		○	●

(出所) SDP グローバル作成

上記を踏まえ、事業実施2年目となる令和6年度では、実機による米でんぷん由来バイオSAP製造及びバイオSAP搭載紙おむつの試作品製造を、実施期間前半にて効率的に進める。その後、紙おむつメーカーや自治体、リサイクル装置メーカーといったステークホルダーとの連携の下、リサイクルループ構築に向けたスモールスケールでのリサイクル実証実験に着手する。

米でんぷん由来バイオSAP製造・改良においては、令和5年度のラボスケールにおける実証結果を鑑み、バイオSAPの原料となる米粉を用いた米でんぷん由来CMSの量産体制を構築する。米粉を利用したCMS製造方法については、2パターン（①有機溶媒系反応、②水系反応）を想定し、最もコスト及び環境負荷を低減した手法を確立する。また、令和5年度の課題として残存している生分解性の担保についても、バイオSAPの置換度との相関性を鑑みた上で生分解性の向上を目指す。

上記米粉を用いたCMSの量産体制構築に目処がたち次第、米でんぷん由来バイオSAPの量産体制の構築に向け、実機にて米粉CMSからバイオSAP製造に取り組む。同時並行にて、米でんぷん由来バイオSAP搭載紙おむつを自社ラボで製造し、紙おむつメーカーによるラボ評価や上市に向けた協議を実施する。

さらに量産体制構築と同時並行にて、A市との協議を進め、市内認可保育園1カ所程度を対象としたリサイクルループモデルの小規模での実証実験に着手する。また、自社ラボあるいは、紙おむつメーカーにて米でんぷん由来バイオSAP搭載紙

おむつを試作した上で対象保育園へ無償配布し、使用感や使用済み紙おむつの回収
フローなどに関するテストマーケティングを実施する。

表 13 令和6年度に向けた課題と実施内容

番号	実証項目	技術的課題	R5年度			R6年度
			実施内容	達成状況	課題	想定しうる課題、実施内容
1	米でんぷん由来のバイオSAP製造技術	①米でんぷんでのバイオSAP製造技術確立	米に親水性基を導入し親水性材料（CMSなど）に転換	ラボスケールにて、石化SAPの吸水性能（生理食塩水保水量）：30g/g以上	<ul style="list-style-type: none"> ラボスケールでのみ達成。量産体制下での検証が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 米でんぷん由来CMSの量産実施
		②吸水性向上に向けた原材料の最適化	吸収量改良（最適な米の組成選定）	米の品種による明確な差分は確認できず。	<ol style="list-style-type: none"> 最適な米の組成選定を継続実施 他作物由来のでんぷん利用の検討 	<ol style="list-style-type: none"> 他の外部パートナーと連携し、検討実施 R6年度は着手せず（R7年度実施予定）
		③米から米でんぷん精製プロセスの最適化	最適化米でんぷんを米から効率的に生成する方法または米粉を直接利用する方法の検証	ラボスケールにて、吸水性能とエネルギー起源CO2削減バランスが最適となる米粉を用いた製造プロセスを検証済み。	<ul style="list-style-type: none"> ラボスケールでのみ達成。 	<ul style="list-style-type: none"> 米粉からCMSを製造する方法（3パターン）を検証（①と同時並行で検討）
2	リサイクル・再資源化に向けた米でんぷん由来バイオSAPの改良	①リサイクルしやすい構造の設計	リサイクル装置を用いた使用済みSAPの分離最適化	リサイクル時の条件で可溶化すること。	<ul style="list-style-type: none"> 可溶性は担保できたものの、使用済みSAPを使用済み紙おむつから分離するプロセスは未検証 	<ul style="list-style-type: none"> 米でんぷん由来SAP紙おむつを試作後、スモールスケールで実際に利用してもらい、使用済み紙おむつの分離方法を検証
		②肥料化しやすい構造の設計	架橋構造、親水性基導入量コントロールによる生分解性担保	生分解性試験（JISK6953-1 準拠）の結果、2ヶ月で約10%となった。	<ul style="list-style-type: none"> 生分解性の目標未達 	<ul style="list-style-type: none"> 課題：生分解性と吸収性能の両立 対応策：検証を継続実施（嫌気性生分解性も新たに検討に加える）
3	米でんぷん由来バイオSAPの量産体制構築	①子ども紙おむつ試作品製造	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 課題：現在予定しているR7年度実施となると、試作品製造から紙おむつメーカーと合意形成まで、R7年度内に完了しないリスクあり 米でんぷん由来SAPが完成し次第、米でんぷん由来SAP搭載吸収体サンプルを自社製造。紙おむつメーカーにてラボ評価実施
		②紙おむつメーカーとの合意形成	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 課題：現在予定しているR7年度実施となると、紙おむつメーカーとの合意形成まで達成ならず、社会実装できないリスクあり 国内外おむつメーカーのロングリストをショートリスト化 市場展開に向けた商品開発スケジュール策定
		③量産体制構築	バイオSAP用製造ライン詳細検討	トウモロコシ由来CMSを用いたバイオSAP量産化条件を確立。	<ul style="list-style-type: none"> 米でんぷん由来バイオSAP量産化条件の検討未着手 乾燥工程の具体化 	<ul style="list-style-type: none"> R6年度事業開始後、米でんぷん由来CMS製造を優先して実施し、秋ごろまでにはSAP実機試験に着手 イレギュラーな設備異常に備え、設備メーカーとも協業
4	使用済み紙おむつのリサイクルループモデル構築	①自治体と連携した使用済み紙おむつの回収・素材分離	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 課題：現在予定しているR7年度実施となると、リサイクルループ構築（製造～利用～回収～リサイクル～再資源化）が完了しないリスクあり R6年度内に、A市でスモールスケールの実証実験実施（A市内の認可保育園1箇所にて、米でんぷん由来バイオSAP搭載紙おむつのテストマーケティング）
		②使用済みSAPの汚泥肥料化	-	-	-	-

（出所）SDP グローバル作成

事業実施においては、以下スケジュールのもと各実証項目を検証する想定である。

番号	実証項目	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	備考	
1	米でんぷんを用い製造技術検討	→												検討結果まとめ	
	吸水性向上に向けた原材料の最適化	→													
	プロセスの最適化（洗浄工程レス、米粉の直接使用）	→													
2	プロセス検討／量産化条件検討	→													
	リサイクル性確認（可溶化、分離性）	→													
	安全性データ取得						→								
3	紙おむつメーカーサンプルワーク/ラボ評価合格/おむつ試作品製造							→							
	紙おむつメーカーとの合意形成										→				
	量産体制構築						→								
4	A市との合意形成	→										→			

図 34 令和 6 年度事業実施スケジュール

(出所) SDP グローバル作成

5. 出口戦略・波及効果

- 子供用紙おむつへの本格導入

量産化に成功した SAP は、紙おむつメーカーへの提案を通じて実装を図る。過去の開発の過程で培った吸収体評価を含む評価技術を活用して、SAP としての吸収性能のみならず、吸収体として紙おむつの機能を果たすための提案を行う。

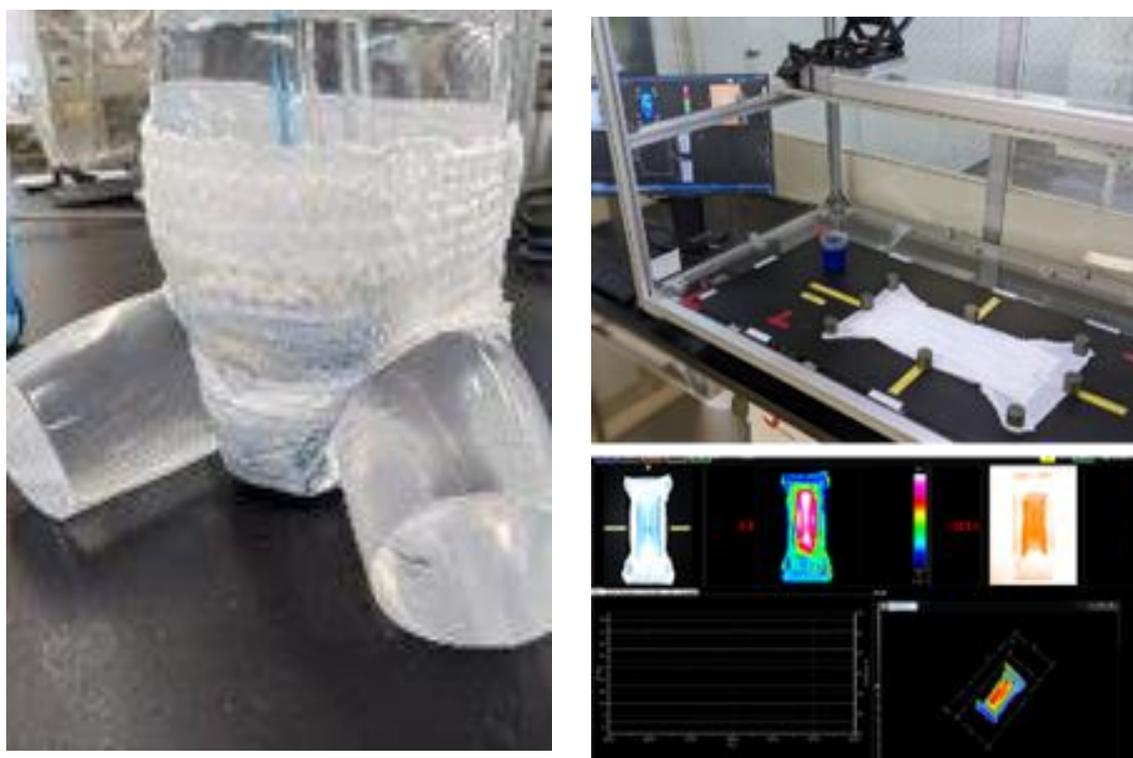


図 35 自社開発の紙おむつ評価装置

(出所) SDP グローバル作成

米でんぷん由来バイオ SAP の吸収性能データと合わせ、上記についても紙おむつメーカーに提案していくことで、新素材 SAP への導入障壁を下げ、実装化まで顧

客と伴走していく。なお、現時点では特定の紙おむつメーカーを限定せず、当事業にて開発した米でんぷん由来バイオ SAP を当社既存顧客である紙おむつメーカーに広く訴求し、製品の具現化に意欲を示すパートナーと製品化を進めていく方針である。また、本事業の目標でもある易リサイクル性を意識したおむつ構造についても協議する。

SAP としての量産化に目途を得次第、上述の紙おむつメーカーへの提案を速やかに実施し、2025 年には約 5,000 トン、2030 年には 3 万トン（国内流通量の約 15%）の代替を目指す。

表 14 米でんぷん由来バイオ SAP 量産化目標

年	年間目標生産量	国内流通量に占める割合 ¹²	製造可能な子供用紙おむつ量 ¹³
2025	5,000t	2.3%	5 億枚
2030	30,000t	14%	30 億枚

（出所）SDP グローバル作成

¹² 2022 年度の国内年間 SAP 消費量（約 22 万トン）をベースに算出

¹³ 現在流通する子供用紙おむつに使用されている SAP 量（1 枚当たり約 10g）から算出

- 使用済み紙おむつのリサイクルループ実践

当事業で生産する米でんぷん由来バイオ SAP は、80%以上がバイオマス由来の原料を使用していることから、国内の紙おむつ用 SAP 約 22 万トンが全て米でんぷん由来 SAP へ代替された場合、年間約 27 万トンの廃棄物由来の CO2 排出量削減が見込める。また、当該 SAP によりリサイクルが進み、現状の焼却処分をする必要がなくなった場合は、使用済み紙おむつの焼却によって生じる 128 万トンの CO2 排出量削減に繋がる¹⁴。リサイクルの検討と並行して量産化体制を築き、リサイクルループモデル構築のパートナーである A 市において早期社会実装化を目指す。

使用済み紙おむつの回収およびリサイクルの実施は、自治体およびリサイクラーと協力して進める。特に、リサイクル時は SAP の回収が重要となるため、SAP のハンドリングや性質に知見を有する当社が主体的に関与しながら、自治体、リサイクル装置メーカー、当社で効率よく回収できる処理条件を見出す。A 市とは、子供用紙おむつリサイクルループ構築に向けた連携について既に合意できており、当事業においてリサイクルループのモデル化を協働する。紙おむつの無償提供をしている認可保育園や保護者に対して紙おむつサブスクリプションサービスを導入している保育園に対し、米でんぷん由来バイオ SAP 搭載紙おむつを提供し、他素材の紙おむつとのコンタミネーションが発生しづらい環境下にて消費を推進する。使用済み

¹⁴ 伊坪ら(2019)「使用済み紙おむつのクローズドリサイクルの環境影響評価」内、使用済み紙おむつの焼却処理に係る CO2 排出量 0.0641kg/枚に、日本衛生材料工業連合会(2022)の国内紙おむつ生産枚数(乳幼児用、大人用計)199 億枚(2021 年)を乗じた値。

紙おむつは、素材分離技術を有するリサイクル装置メーカーとの協議のもと、回収を実施する。さらに、A市が検討を進める紙おむつリサイクル事業に協力しながら、リサイクル装置メーカーによる既存紙おむつ用リサイクル装置を活用し、使用済みバイオ SAP やし尿と他素材を分離する。回収したし尿と使用済み SAP は、汚泥肥料メーカーを通じて肥料登録し、同社のもつ販路を活用しながら汚泥肥料として広く展開が可能である。さらに、回収したし尿と使用済み SAP は、優れた生分解性が期待できることから、汚泥肥料以外にもバイオガスとして有効利用することも検討していく。

なお、リサイクル装置メーカーは、すでに使用済みおむつのリサイクル実証試験中であり、石化 SAP 搭載の使用済み紙おむつの分離方法を確立済みである。当手法では、回収した石化 SAP 搭載の使用済み紙おむつを分解した後に、プラスチック類とパルプ/SAP 混合物を分離回収している。しかし現在のアプローチでは、回収した SAP 中の水分が残存する点が課題となっている。本課題に対し当事業では、同処理機内の処理時に分解して水に可溶化することにより、パルプとの分離（濾別）を実現できる想定である。さらに、米でんぷん由来バイオ SAP の架橋構造を最適化することで、処理中に分解し可溶化させることも検討する。可溶化した米でんぷん由来 SAP は、排水としてし尿と同時に効率よく回収でき、肥料として有効活用できる想定である。

- リサイクルループモデルの他地域展開

A 市での社会実装が完了した後、当リサイクルループモデルを他自治体へも横展開する計画である。A 市は人口約 9 万人を有する自治体であり、日本全国約 8 割を占める人口 10 万人以下自治体に対するショーケースとなることが期待できる。当社として、2030 年に自治体 10 ヶ所にてリサイクルループを設置することを目標におき、A 市での実績を活用しながら横展開を進める。さらに、国内で SAP の回収と有効利用の手法を確立することで、将来的には今後ますます廃棄物問題が深刻になる海外へのインフラ輸出にも繋がるものと期待する。

- 米でんぷん由来バイオSAPの新規市場開拓

上述の通り、既存の石化SAPをバイオSAPに代替していくことと併せ、これまでのSAPとは異なる使用方法を提案しながら新規市場を開拓していくことも目指す。

世界の子ども用紙おむつ市場は、2023年に約516億米ドルの市場規模に達し、2036年には約1,113億ドルに達すると予測されている¹⁵。また、2023年から2036年までに最大5.4%のCAGRで成長しうる。その背景として、世界人口の増加¹⁶に加え、人口が多い中国やインド、インドネシアなどの国々や人口増加率の高いサブサハラアフリカ諸国などにおける所得の増加による消費財への需要上昇がある。

このような成長を遂げる世界の子ども用紙おむつ市場では、安価で利用しやすい使い捨て紙おむつへの需要とあわせ、排出される使用済み紙おむつへの対策も実施されている。特に、環境に対する消費者意識の高いヨーロッパ諸国では、国家・自治体による政策から企業による商品展開まで、消費者の新規需要に応える環境が形成され始めている。

海外諸国での政策¹⁷

- ベルギー：約40%の自治体にて、布おむつ利用のための補助金（100ユーロかそれ以上）を各家庭へ支給。

¹⁵ SDKI Inc., 赤ちゃん用おむつ市場に関する調査

¹⁶ 国際連合によると、2023年時点で約80億人に到達している世界人口は、2036年には90億人まで増加する見込み

¹⁷ ZERO WASTE EUROPE (2021), It's time to clear out plastic & chemical from nappies, not the poo, https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2021/04/zwe_bffp_policy-briefing_Its-time-to-clear-out-plastic-chemicals-from-nappies-not-the-poop_en-2.pdf

- イタリア：100以上の自治体にて、バウチャー配布など再利用可能な子ども用おむつを対象としたインセンティブプログラムを実施。
- フランス¹⁸：各自治体にて、布おむつ利用のための補助金として、個人の購入費に対し25%（上限100ユーロ）を補助。
- イギリス：70以上の自治体にて、再利用可能な子ども用おむつを対象としたキャッシュバックプログラムの実施（購入した商品の金額に応じ、30～50ユーロ返金）やバウチャー（24ユーロ程度のクーポン券）の配布を実施。無料トライアルキットも配布。

¹⁸ (一財)自治体国際化協会 パリ事務所 (2023)、Clair Report No.541 フランス自治体の“ごみゼロ”への挑戦、<https://www.clair.or.jp/j/forum/pub/docs/541.pdf>

民間企業による取り組み¹⁹

- Ontex (ベルギー)²⁰：おむつメーカーOntex は、gDiapers (詳細後述) と連携し、サステナブルなおむつブランド「Little Big Change」を展開。洗浄することにより再利用可能なおむつカバーと、堆肥化できる使い捨ておむつインレイを搭載。



図 36 Little Big Change の仕組み

(出所) Ontex ウェブサイト



図 37 Little Big Change のブランドサイト

(出所) Little Big Change ウェブサイト

¹⁹ 株式会社アットグローバル (2023)、令和4年度使用済紙おむつ再生利用等に関する 調査業務報告書、<https://www.env.go.jp/content/000128829.pdf>

²⁰ Ontex, Diaper composting, <https://ontex.com/products/industrial-composting-of-diaper-pads/>

- DYCLE（ドイツ）²¹：麻の副産物を吸収剤に利用した 100%堆肥化可能なおむつインレイを開発。おむつと布おむつかバーパンツ、堆肥化させるための炭の粉、バケツをセットとして提供。
- gDiapers（アメリカ）²²：Cradle to Cradle 認証（グローバル環境認証）を取得した世界初の紙おむつを開発。セルロース、綿毛パルプ、高吸収剤で構成されている紙おむつは、おむつインレイを家庭用コンポストで堆肥化可能。



図 38 gDiapers おむつ使用方法

(出所) gDiapers ウェブサイト



図 39 gDiapers の商品ライン

(出所) gDiapers ウェブサイト

²¹ DYCLE, <https://dycle.org/en>

Circular Economy Hub, 【前編】おむつを通じて環境の再生を。ドイツ発スタートアップ DYCLE の循環型モデル、<https://cehub.jp/interview/dycle-1/>

²² gDiapers, <https://original.gdiapers.com/>

このような消費者からの需要が既に顕在化されつつある海外市場も、今後のビジネス展開先として検討を進めていく。

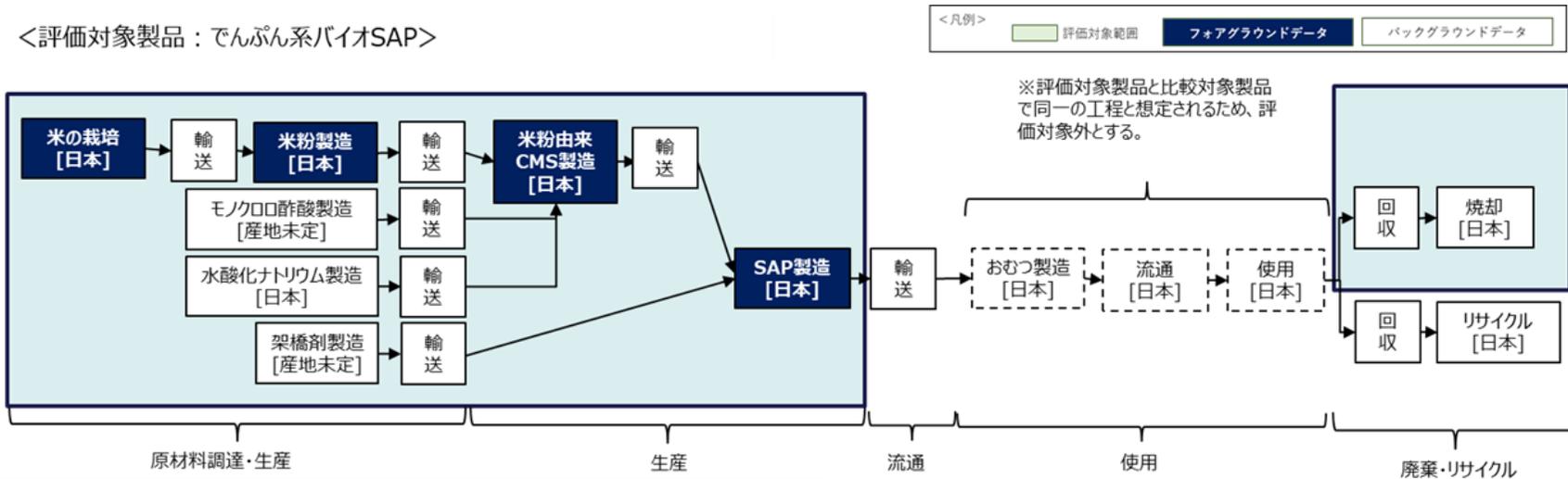
6. 環境負荷の低減

6.1. エネルギー起源 CO2 排出削減量等環境負荷の低減

- LCA 算出方法

今年度の検証で実施した LCA のシステム境界を以下の図 39 に示す。本事業では、最終年度となる令和 7 年度に回収したりサイクル SAP を肥料もしくはバイオガス化を検討するが、今年度は回収した SAP は焼却処理するものとして計算し、既存の石化 SAP との比較を行った。

<評価対象製品：でんぷん系バイオSAP>



<ベースライン：アクリル酸系SAP>

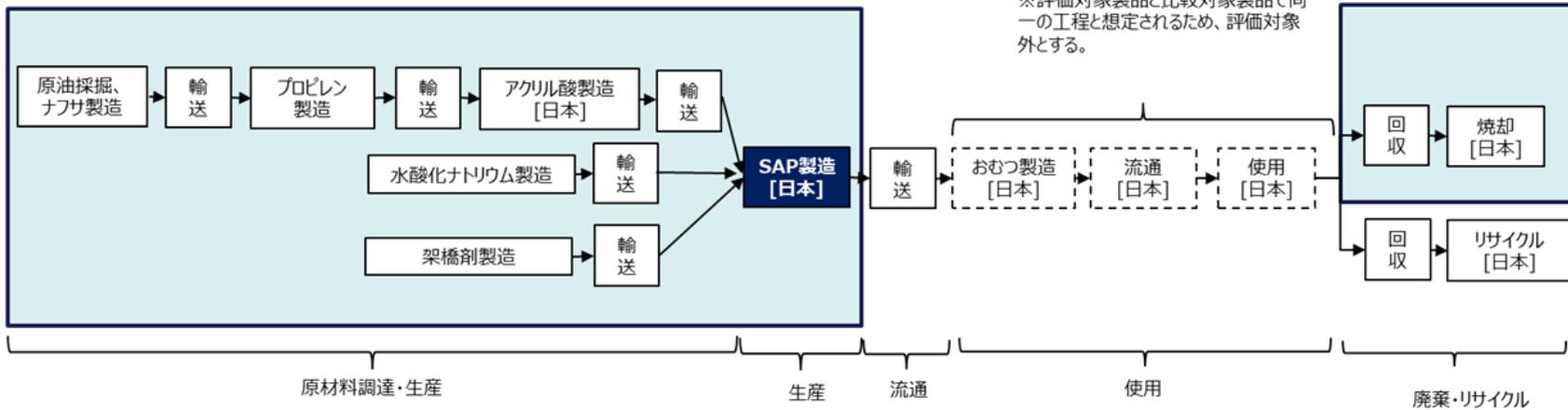


図 40 LCA のシステム境界

(出所) SDP グローバル作成

フォアグラウンドデータには、以下を挙げた。

- 米の栽培

慣行の水田稲作は、引用文献²³にもあるように栽培時にメタンを多く排出している。今回は、製品カテゴリールール（PCR）のうるち米のデータと、近年メタン発生抑制のために国内でも一部の地域で検討が開始されている乾田直播による陸稲米を工業用として利用することを想定したケース、およびカビや水濡れにより食用に適さない廃棄される予定の米を用いる3つのケースで見積もった。

- 米粉、CMS 製造

米からでんぷんを製造する工程を経ずに精米後の米から米粉を製造し、直接CMS 化反応に使用することを前提とした。また、CMS 化は、反応時に有機溶媒を用いるケースと有機溶剤を使用しない（水系）ケース、さらに反応に用いた有機溶媒およびカルボキシメチルクロライドがすべてバイオマス由来原料から作られたケースの3ケースで見積もった。反応に使用した有機溶剤および精製に使用した有機溶剤は、いずれも回収し、再蒸留して再利用（回収率 97%、蒸留残留物等の残りは濃厚廃液として処理）するものとした。

²³ 吉川 直樹、天野耕二、島田幸司「日本の主要食料消費における温室効果ガス排出のライフサイクル分析とその削減ポテンシャルの評価」<https://www.ritsumei.ac.jp/se/rv/amano/pdf/2009KKS-yoshikawanaoki.pdf> (2024年2月28日アクセス)

- SAP 製造

米でんぷん由来の CMS と架橋剤を均一に混練する工程と、得られた混練物を成型、乾燥、粉碎する工程がある。できるだけ混練に使用する水の量を減らし、続く乾燥工程時に留去する水の量を少なくすることで、エネルギーの使用量が削減できる。今回は、混練工程の含水率が 30%（固形分濃度 70%）の条件で見積もった。また、乾燥、粉碎工程は、既存の石化 SAP と同様のプロセスのデータを参考にし、蒸発で留去する水分含量を考慮して算出した。

- 各製造工程間の輸送

最終的に量産化する際には、極力同一箇所で製造し効率化することが好ましいが、現時点では各工程の製造拠点が分散している。このため、量産化を見据えた普及段階と本事業の実証終了時点（令和 7 年度）の 2 ケースを想定した。また、輸送にかかる CO2 排出量は、輸送距離から見積もった。

今年度検討した内容について表 16 に示す。現時点、製造工程間において量産化ステージが異なるため、電力を実測した工程とラボデータや類似製品から推定した工程があるが、最終年度までにはすべての工程を測定し精査する予定である。

表 15 本年度検討した範囲

項目		今年度検討した範囲
機能単位		<ul style="list-style-type: none"> ・おむつ吸収体（自社評価）の結果から、石化 SAP の 1.2 倍量に設定した。
原材料 調達 ・生産	米	<ul style="list-style-type: none"> ・通常の米使用時：うるち米の PCR データを活用した。 ・廃棄米使用時：調達先候補、発生までの経緯を調査し、参考データとして使用した。 ・工業米（陸稲）使用時：本年度内に一次データとしての測定は困難なため、従来のもち米栽培と陸稲栽培の比較バックグラウンドデータを調査し、根拠として用いた。
	米粉	<ul style="list-style-type: none"> ・米粉メーカーでエネルギー消費量を実測した。
生産	CMS	<ul style="list-style-type: none"> ・有機溶媒系反応または水系反応のプロセスを立案し、ラボデータからスケールアップ時のエネルギー消費量を推測した。溶媒の回収利用のデータは、自社で生産する他製品の値を参考にし、溶媒の蒸発エネルギー差を考慮して算出した。 ・米以外の原料(溶媒およびカルボキシメチルクロライド)もすべてバイオマス由来のものを利用したケースの試算を行った。

	SAP	混練	<ul style="list-style-type: none"> ・バイオマスレジソールディングスが保有する小型量産設備を用いて実測した。 ・バックグラウンドデータには、IDEA v3.3 を用いた。架橋剤や溶媒などで、対応する物質が IDEA に掲載されていない場合は、当該物質の原料で IDEA に掲載されている物質を調べ、その投入量を計上した。
		乾燥・表面架橋・粉碎	<ul style="list-style-type: none"> ・自社の石化由来 SAP の量産設備のデータを参考にし、除去する水分含量を考慮して試算した。
輸送			<ul style="list-style-type: none"> ・検討初期段階では、プロセス毎に製造拠点が異なり非効率となるため、実証終了時点と普及段階（製造拠点の集約）の2ケースで試算した。製造拠点間距離に基づき、類似品の PCR を参考にした。
廃棄			<ul style="list-style-type: none"> ・本年度は焼却を前提に試算した。（令和7年度に計画しているおむつリサイクル実証試験時に実際の効果を測定する予定）

（出所）SDP グローバル作成

- LCA 算出結果

前提条件としては、以下とした。

【評価対象製品】

でんぷん系バイオ SAP。原料として米粉を使用したケースを用いた。その他原材料調達・生産時の CO2 排出は全てエネルギー由来とした。廃棄物由来 CO2 のうち、バイオマス由来分は除外して算出した。

【ベースライン】

石化由来（アクリル酸系）SAP。原材料調達・生産時の CO2 排出は全てエネルギー由来とした。

【普及段階】

生産数量年間 3 万 t(2030 年時点)での削減量を見積った。

表 16 に、各ケースにおける米でんぷん由来の SAP と既存の石化 SAP についてそれぞれ算出した結果を示す。なお、石化 SAP における GHG 排出量は非開示情報であるため、基準値 100 として比較をした。

表 16 機能単位（石化 SAP 1 kg 相当）当たりの GHG 排出量（kg-CO2/機能単位比較）

ケース	1	2	3	4	5	6	基準	
米種類	うるち米	廃棄米	工業米（陸稲）	うるち米			石化 SAP	
CMS 化	石化溶剤使用		水系	バイオ由来溶剤	石化溶剤使用			
物流	普及段階（製造拠点集約）					実証終了時点		
非エネルギー由来 CO2	42.29	24.52	24.52	49.76	17.77	42.29		32.08
エネルギー由来 CO2	323.21	305.44	314.32	484.46	323.21	327.59	67.92	
副産品分	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
合計	365.50	329.96	338.84	534.22	340.98	369.88	100.00	

（出所）SDP グローバル作成

結果から、現時点では基準となる石化 SAP と比べて、いずれのケースも大幅に上昇した。大きな要因としては、CMS 化工程で使用する溶媒を回収してリサイクル使用の際に使用するエネルギーが、全体の GHG 排出量の 8~9 割を占めることがわかった。また、石化 SAP と比べて機能単位で比較した場合、1.2 倍増加することも排出量を増加させる大きな要因となっている。

- 今後の課題と対策

判明した課題に対して、次年度以降、工程ごとに以下の観点でさらなる CO2 削減を検討する。特に、CMS 化工程の精査と機能単位の改善が重要なポイントとなる。

表 17 現状と課題・対策

項目		課題	対策	
機能単位		<ul style="list-style-type: none"> ・おむつの機能を果たすために必要な SAP 必要添加量の削減 	<ul style="list-style-type: none"> ・吸収性能の向上（保水量と荷重下吸収性能） ・他の素材、吸収体構造の最適化 	
原材料調達・生産	米	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄米の調達、利活用 ・稲作時の CO2 削減 	<ul style="list-style-type: none"> ・発生場所、利用可能性の確認 ・メタン発生抑制効果の確認（乾田直播、中干し期間） ・他の原材料の可能性検討 	
	米粉	<ul style="list-style-type: none"> ・生産工程の簡素化 	<ul style="list-style-type: none"> ・工業用利用としての工程最適化 	
生産	CMS		<ul style="list-style-type: none"> ・残留塩の許容範囲確認、溶剤使用量削減 ・溶剤不使用プロセスの検討 ・バイオマス由来の原材料の活用 ・製造時の一時データ取得と課題把握 	
	SAP	混練	<ul style="list-style-type: none"> ・米でんぷん CMS の製造条件確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・米でんぷん由来 CMS を用いた確認 ・生産効率化（スケールアップ検証）
		乾燥・表面架橋・粉碎	<ul style="list-style-type: none"> ・量産化プロセス検証 	<ul style="list-style-type: none"> ・製造設備の具現化と検証
流通		<ul style="list-style-type: none"> ・各工程の集約 	<ul style="list-style-type: none"> ・製造拠点モデルの立案 	
廃棄		<ul style="list-style-type: none"> ・リサイクルモデルの検証 	<ul style="list-style-type: none"> ・自治体での回収とリサイクル性（肥料、バイオガス化）検証 	

(出所) SDP グローバル作成

6.2. その他の環境影響の低減・循環型社会への貢献の見込み

今年度は、米でんぷん由来の SAP の製造プロセスの立案と検証に重きを置いたため、実際に使用された後は、従前の使用済み紙おむつ同様に焼却処理を前提にした。本事業では、最終的に回収した使用済み紙おむつをリサイクルする過程で SAP を分離し、肥料やバイオガスに再利用することを想定している。実現できれば、さらなる CO2 削減が見込める。

またこの方式が普及し、家庭などから排出される一般ごみの中から使用済み紙おむつが分別され利活用されることで、回収し焼却や埋め立てされるごみの量が減少し、自治体が保有する焼却炉や埋立地の運用コストの削減が期待できる。

使用済み紙おむつの廃棄物問題は、世界的にも大きな課題となっており、リサイクルプロセスが確立できれば、モデルケースになりうる。