

令和元年度

食品等のリサイクルの新たな展開を目指す亜臨界水技術の導入調査

報告書

(概要版)

令和2年3月

令和元年度食品等のリサイクルの新たな展開を目指す

亜臨界水技術の導入調査委託事業共同事業体

中央大学理工学研究所

株式会社 エックス都市研究所



## 目 次

1. 業務目的	1-1
2. 食品等リサイクルの現状と課題	2-1
2-1. 食品リサイクルの現状	2-1
2-2. 食品廃棄物の再生利用に向けた課題	2-1
2-3. 食品小売業由来の食品廃棄物の再生利用（事例等紹介）	2-3
3. 亜臨界水処理技術の導入による有用性・効果等の整理	3-1
3-1. 技術的な有用性に関する情報収集	3-1
3-2. 技術的な有用性（プラスチック処理等）	3-1
3-3. 製造物の飼料原料としての効果と課題	3-4
3-4. 製造物の肥料原料としての効果と課題	3-5
3-5. 製造物のメタン発酵原料としての効果と課題	3-6
4. プラスチック成分等の検出及び実機試験	4-1
4-1. 実機試験計画の検討	4-1
4-2. 実機試験の概要	4-1
4-3. 実機試験の実施	4-6
4-4. プラスチックの亜臨界水処理変容物のGC-MS定性分析及び実体顕微鏡分析	4-8
4-5. プラスチック亜臨界水処理変容物の実体顕微鏡による粒度測定・分析	4-9
4-6. プラスチック亜臨界水処理変容物のGC-MS定性分析及び実体顕微鏡分析（総括）	4-13
5. 製造物の飼料原料利用に係わる安全性・機能性・事業性の評価等	5-1
5-1. 安全性の確認・機能性の評価	5-1
5-2. 事業性の検討	5-8
5-3. 既存の制度との整合性	5-18
5-4. まとめ	5-18
6. 製造物の肥料原料利用に係る安全性・機能性・事業性の評価等	6-1
6-1. 安全性の確認・機能性の評価	6-1
6-2. 事業性の検討	6-14
6-3. 既存の制度との整合性	6-24
6-4. まとめ	6-24
7. メタン発酵前処理施設としての亜臨界水処理施設の導入検討	7-1
7-1. 検討概要	7-1

7-2.	期待される亜臨界水技術の導入効果	7-1
7-3.	先行事例にみる亜臨界水処理技術の導入による機能性	7-2
7-4.	実機試験にみる亜臨界水処理の導入効果	7-6
7-5.	事業性の評価	7-12
7-6.	事業性が確保される条件の検討	7-19
7-7.	導入事業計画の検討	7-22
7-8.	亜臨界水技術導入に伴う温室効果ガス削減効果	7-23
7-9.	亜臨界水処理の導入効果のまとめ	7-24

## 1. 業務目的

発生量が年間約 2,000 万トンにのぼる事業系食品廃棄物は、特に外食産業では分別手間などから再生利用が進まず、また飼肥料化の再生利用の現場では、プラスチックなどの混入を避けるため、食品廃棄物を手作業で分別するなど人員の確保が必要であり、メタン化（メタン菌の働きにより有機性廃棄物からバイオガスを取り出す技術）については、飼肥料化に比べて分別が粗くても可能であるが、設備導入や副産物（発酵消化液）の処理コストが高い等の課題がある状況である。

一方で、亜臨界水処理技術は、プラスチックも分解され分別作業の省力化が可能であるとともに、亜臨界水処理を施した生成物を原料としてメタン化すると、ガス発生量の増加や発酵日数の短縮（発酵槽の縮小が可能）が期待される。また、この他にも亜臨界水処理技術には、機能性物質の生成など多様な出口があると考えられる。

しかしながら、亜臨界水技術は、海外や一部国内では飼肥料化の例があるものの、製造物（肥料・飼料等）の化学的・経済的な検証が不十分であり、国内での導入実績は少ない。このため、本事業により、飼肥料の規制や規格との整合性を含めた化学的・経済的な検証・調査を行い、安全性・機能性・事業性の評価を行うことにより農林水産業への亜臨界水処理技術の導入可能性を整理する。

## 2. 食品等リサイクルの現状と課題

### 2-1. 食品リサイクルの現状

食品廃棄物等の利用状況は、農林水産省・環境省が公表している「食品廃棄物の利用状況等（平成28年度推計）」（図2-1-1）では、以下の通り示されている。

- i) 国内の食用仕向量 8,088 万トンのうち、食品関連事業者から食品廃棄物等が年間 1,970 万トン排出される。
- ii) このうち 1,398 万トン（72%）が再生利用され、343 万トン（18%）が焼却・埋立て等に廻されている。

このことは、日本の食料自給率がカロリーベースで 40%を割り込むなかで、食品ロスが 643 万トンあることは、国内の食料需給の構造的な課題となっている。

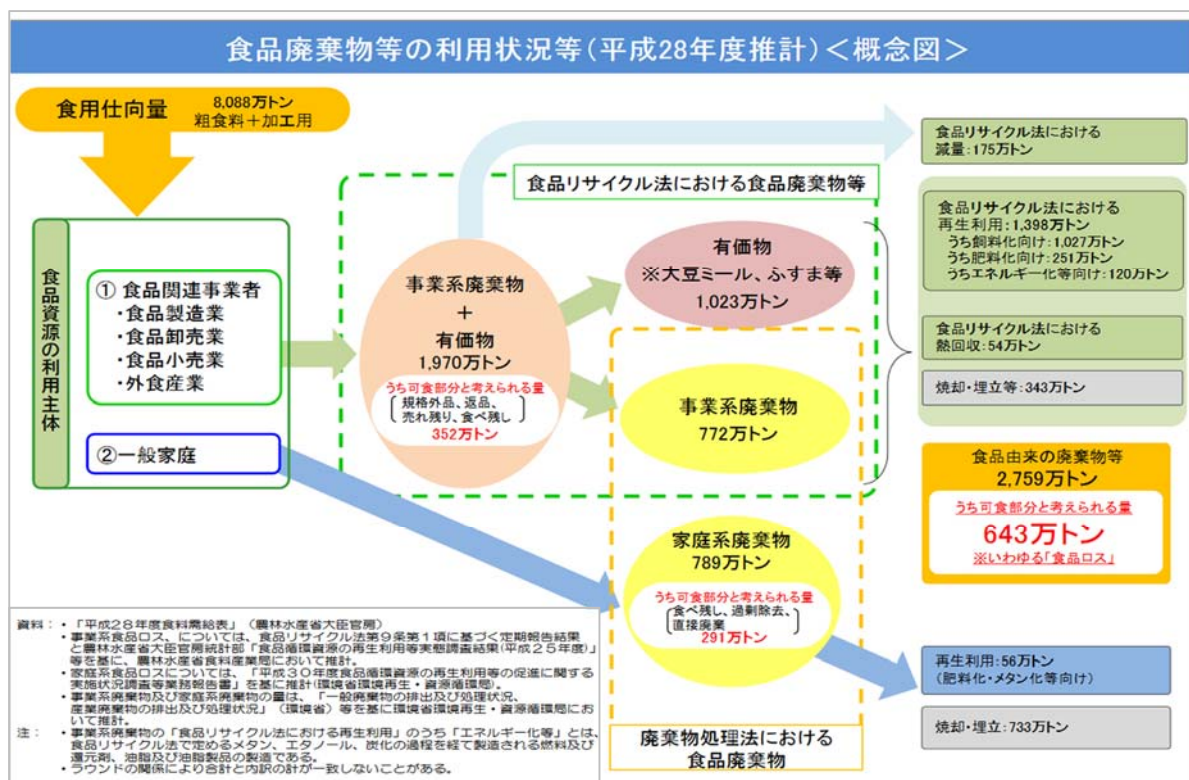


図 2-1-1 食品廃棄物等の利用状況等（平成 28 年度推計） 農林水産省・環境省資料

### 2-2. 食品廃棄物の再生利用に向けた課題

#### (1) 食品廃棄物等の種別と再生利用方法の基本

食品廃棄物等の種類は、発生源である食品関連事業者の業態により発生量も性状も大きく異なり、発生地域にも大きく依存する。

また、再生利用方法や質的転換技術は、大きく飼料化、肥料化、メタン発酵の三つのタイプに分かれ、食品廃棄物の性状と発生量によって適性が決まる。技術的には、処理（質的転

換) 技術の長短所を把握したうえで、生成物の用途に合わせて、適切な技術を選択することが課題となる。

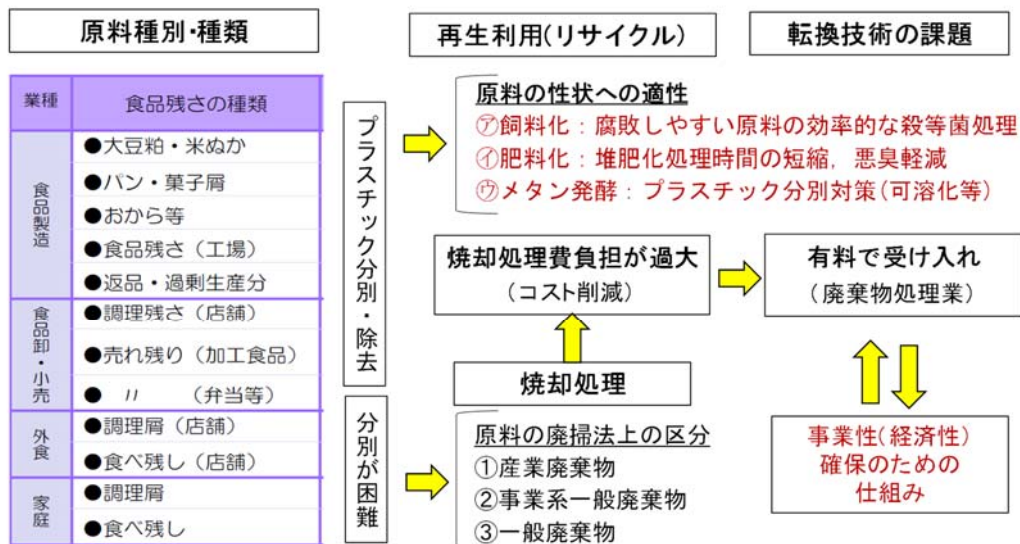
## (2) バイオマスの質的転換技術からみた課題

技術的には、処理(転換)技術の長短所を把握したうえで、生成物の用途に合わせて、適切な技術を選択することが課題となる。

食品製造業からの食品残さは、量的にも質的にも安定していて、プラスチック分別・除去もなされていることから飼料・肥料化に向く。食品卸・小売業や外食からの食品残さは、プラスチックの分別・除去がなされれば飼料・肥料化の原料として利用できる。食品卸・小売や外食からの食品残さはプラスチックが混合する可能性があることから、メタン発酵施設に持ち込み分別後にメタン発酵にかけるか、それが困難な場合には産業廃棄物或いは事業系一般廃棄物として焼却処理するという二つの選択肢がある。

食品廃棄物の再生利用を事業として成立させるためには、食品廃棄物を有料で受け入れ、飼・肥料製造やメタン発酵によるバイオガス製造のための経費に充てる仕組みを構築する必要がある。

以上の食品廃棄物の再生利用事業に係る原料安定確保の仕組みと技術面の課題をまとめると、図2-2-1の通りとなる。



- 仕組み面の課題：事業性確保の観点から、焼却処理コストより安い費用で受け入れる仕組み。このためには、再生利用事業者自らが廃棄物処理業を営む必要がある。
- 技術面の課題：原料の性状に適した的確な技術の導入の検討が必要である。

図2-2-1 食品廃棄物等の再生利用に係る課題(仕組みと技術)

(参考文献) 大隈 修(2013): 国内事例にみるバイオマス利活用事業の成立要因に関する評価、環境科学誌 261号

### (3) 再生利用の安全性・機能性から見た課題

食品廃棄物の再生利用の安全性・機能性から見た課題は以下の通り。

#### ア 飼料化（エコフィード）における課題

病原菌類による衛生管理上のリスクに対しては、殺菌効果の高い技術の導入を図ることにより、再生利用製品の安全性を高めることが必要である。従来は受け入れにくかった腐敗しやすい肉や魚のアラなどを処理し、粗たん白質やアミノ酸のほか、カルシウムを含むより栄養価の高い飼料化技術の導入が期待される。

#### イ 肥料化における課題

乾燥飼料化では、食品残さは含水率が高いため、乾燥工程のコスト削減策を検討する必要がある。液肥化では、含水率が高い食品残さは利用しやすいが、製造後の貯蔵・保存に係るコスト削減策を検討する必要がある。

堆肥化では、普通肥料の場合と異なり、公定規格は必要でなく、基本的な成分表示のみで流通できる仕組みであるが、熟度が高い堆肥の流通を促進するため、短時間で完熟堆肥を効率的に生産できる堆肥化工程の改善策の検討が期待される。

#### ウ メタン発酵における課題

メタン発酵残さ汚泥から製造される堆肥は、下水汚泥肥料と同様に、重金属類の含有量に関する公定規格が定められている。このため、食品廃棄物の収集運搬過程やメタン発酵プロセスにおいて重金属類の混入を防ぐよう適切な対策を取り入れる必要がある。

#### エ 食品容器包装に使われるプラスチックの分別から見た課題

食品小売店舗等での発生源における分別が難しい場合、再生利用業での分別作業が必要になることから、分別作業やプラスチックの処分の経費が再生利用における重荷になる可能性がある。このため、適切な減容・資源化技術を研究開発することにより、食品容器包装用のプラスチック問題を解決するための道筋を見出す必要がある。

## 2-3. 食品小売業由来の食品廃棄物の再生利用（事例等紹介）

### (1) 食品小売業から排出された食品廃棄物を原料とした飼料製造の取り組み

前述で、食品小売業から排出された食品廃棄物はプラスチックの分別が困難であるため、飼料に不向きと説明したが、飼料原料として利用している企業も存在する。

A社では、スーパー等の食品小売店から食品廃棄物を受け入れるとともに、食品製造業から排出される大豆粕や米ぬかなどの栄養価の高い食品残さを適宜投入することにより成分調整を行い、養豚飼料としての栄養価を高め、養豚業者に販売している。さらに、生産



した豚肉を食品廃棄物を排出した食品事業者等で販売するという「地域循環畜産業の輪」を構築しているモデル的な事例となっている。

## (2) 食品小売業における食品廃棄物再生利用の取り組み

首都圏を中心として食品小売業を展開しているB社は、食品リサイクルに関する意識が高く、プラスチック分別後の食品廃棄物の飼・肥料化を食品リサイクル事業者に委託するとともに、生産された畜産物や農産物をブランド化し、自社の小売店舗で販売するという取り組みに展開、食品小売業における「食品リサイクル・ループ」のモデル的な事例となっている。

さらに、廃棄する食品容器包装の廃プラスチック中の発泡スチロールを回収して自社で資源化する取り組みも行い、可燃ごみの排出量を削減し、食品廃棄物のリサイクル率を業界目標値よりも高めている。

### 3. 亜臨界水処理技術の導入による有用性・効果等の整理

#### 3-1. 技術的な有用性に関する情報収集

本業務では、平成 30 年度に実施された「バイオマス活用推進専門家会議」で紹介された先行事例のほか、文献等の情報収集を行った。情報収集した内容を基に、亜臨界水処理技術の導入による有用性・効果等を整理していき、後段の実機試験結果をふまえて吟味していく。

#### 3-2. 技術の有用性（プラスチック処理等）

##### (1) 亜臨界水技術の処理特性

亜臨界水処理技術は、図 3-1-1 に示す高温・高圧の亜臨界領域（100℃/0.1 MPa～374℃/22.1MPa）の水による加水分解反応によって有機物を短時間で効率的に分解することで、飼料や肥料などとして資源活用するコア技術である。

水のイオン積は 530K（257℃）付近で最大値を示し、その時の H<sup>+</sup>及び OH<sup>-</sup>の濃度は常温時の 30 倍以上となる。亜臨界水反応の特徴は、このイオン反応によって、様々な有機物に対して熱化学的に加水分解が引き起こされ、低分子化されることである。（参考文献）吉田弘之（監修）：亜臨界水反応による廃棄物処理と資源・エネルギー化、シーエムシー出版、2007

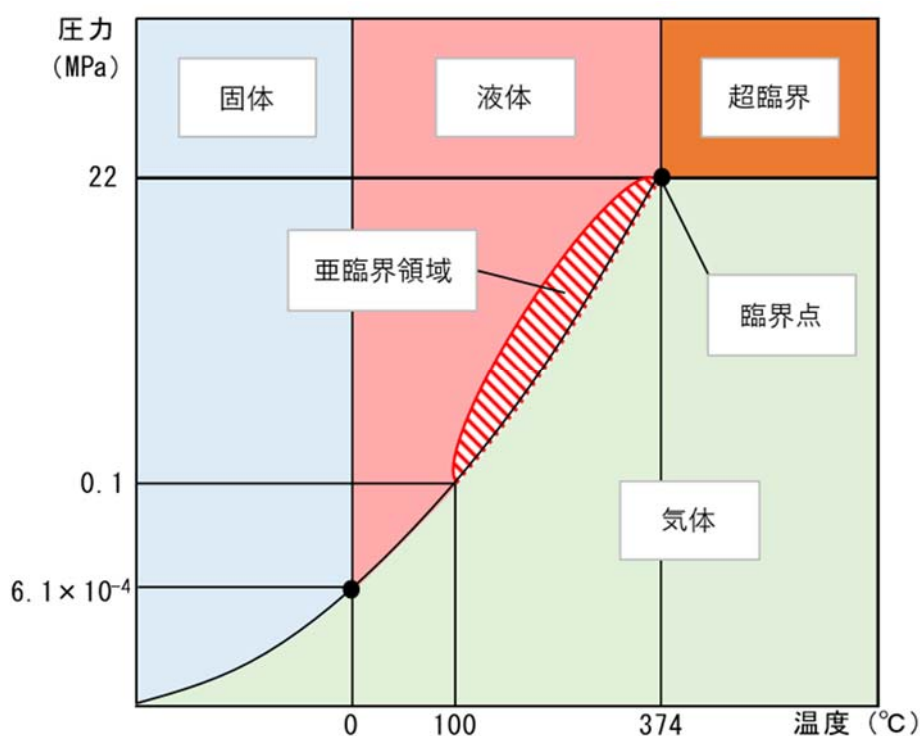


図 3-1-1 水の亜臨界領域（超臨界領域との比較）

##### (2) 亜臨界水処理技術の特長と効果

亜臨界水処理は、食品廃棄物や生ごみ、家畜排せつ物、漁業残さのほか、下水汚泥や未利用材など、地域に賦存する様々なバイオマス資源（廃棄物）を加水分解し、短時間で有用な飼肥料素材として質転換する、或はメタン発酵向けの優良な原料として資源化・処理できる

汎用性の高い技術である。(図 3-2-1)

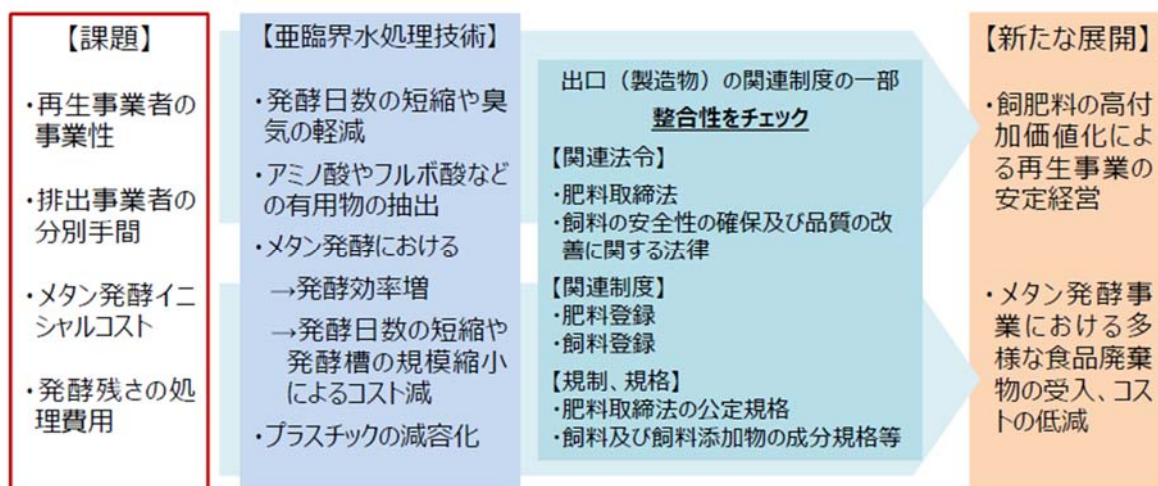


図 3-2-1 亜臨界水処理の効果

#### ア 超臨界水処理技術との比較

超臨界水の領域では、熱化学的な分解力が卓越し、ダイオキシンや PCB の分解が可能であるが、活性塩素により反応容器の劣化や脆弱化が進みやすく、容器製造に向く安価な金属材料がないことなどから実用化が困難である。この結果、超臨界水より温度圧力条件が低く扱いやすい亜臨界水技術の研究開発と実用化が先行している。

#### イ 焼却技術との比較

CO2 発生量が少なく、環境に負荷をかけずに低コストで処理できる。また、生成物は殺菌・滅菌されているので、衛生的かつ安全であるため、有機物の資源化利用に向く。

#### ウ 多様な有機物への適性

食品廃棄物や下水汚泥の可溶化・減容化、木質バイオマスの解裂や糖化・炭化、水産加工残さからの有価物の抽出のほか、生ごみや下水汚泥の高効率メタン発酵まで幅広い分野において活用可能性が見込まれる。(参考文献) 吉田弘之 (監修): 亜臨界水反応による廃棄物処理と資源・エネルギー化、シーエムシー出版, 2007

#### エ 食品工学分野

亜臨界水技術を応用した機能性物質の抽出などの応用研究も 進んでいる。(参考文献) 安達修二: 亜臨界水の特性と食品加工技術の開発, 日本食品化学工学誌, 57 (1), 275-257, 2010

#### オ バイオマス利用技術ロードマップでの位置づけ

亜臨界水処理装置を用いてバイオマス資源を活用する資源循環拠点の立ち上げが国内外で進み始めている。2019年5月に、国の「バイオマス活用推進会議」(農林水産省等関係7府省から構成)の下、「バイオマス利用技術の現状とロードマップ」で5年後実用化が見込まれる技術として位置づけられている。

## (2) プラスチックの処理

プラスチックの処理の分野では、幅広い処理温度条件で処理し、資源化に向けた研究開発

が進められてきた。

ア ナイロンやポリカーボネート、ポリスチレン、ポリエチレン等の分解と資源化の可能性

(参考文献) 佐古 猛、岡島いづみ：プラスチックの分解，食品への超臨界水流体応用ハンドブック，サイエンスフォーラム，2002

イ 食品容器包装に使われるプラスチックの分解と資源化の可能性

250℃以上で熱分解と加水分解が生じ、モノマーとして一部回収できるが、それ以下の温度条件では強アルカリなどの触媒が必要である。(参考文献) 陶山寛志，白井正充：プラスチックの再生，吉田弘之監修：亜臨界水反応による廃棄物処理と資源・エネルギー化，シーエムシー出版，2007

ウ 食品廃棄物と廃プラスチックからの複合燃料製造の可能性

廃プラ/食品廃棄物/おが粉混合物を 210℃/処理時間 20 分～40 分で亜臨界水処理。これにより、廃プラは細粒化され、高発熱量を持つ複合燃料を生成できる。

(参考文献) 岡島いづみほか6名：亜臨界水を用いる食品およびプラスチック廃棄物からの高発熱量の複合燃料の生成，Journal of Japan Inst. Energy, Vo.11, No.10, 2012

エ 装置メーカーの実機試験の成果

レジ袋（ポリエチレン）入りの生ごみを 180℃/10 分亜臨界水処理。これによりレジ袋は熱分解、細粒化され、加水分解された生ごみ中に入り込み肉眼では捉らえきれなくなる。また、廃プラスチックが 10%程混じった都市ごみを 200℃/60 分亜臨界水処理すると、廃プラスチックは熱溶解し半炭化した都市ごみに入り込み、同様に肉眼では捉らえきれなくなる。

(図 3-2-2)



図 3-2-2 生ごみ・都市ごみ(プラスチック混合)の亜臨界水処理試験事例

### 3-3. 製造物の飼料原料等としての効果と課題

#### (1) 製造物の飼料原料としての要件

飼料原料として、安全性に加え、嗜好性や栄養価が高いこと、消化・吸収しやすいことが求められる。また、畜産農家からは、畜産物生産費に占める飼料代の割合が40-60%と高いことから飼料コストの抑制が求められる。（参考文献）木村信熙、木村和久：肉用牛新飼料資源の特徴と給与，肉牛新報社，2014

#### (2) 飼料製造における亜臨界水処理導入効果（想定）

##### ア 亜臨界水処理による機能性向上効果

- i) 食品廃棄物に対して150°C-180°Cの温度条件の下で亜臨界水処理を行なうことで、有機物の加水分解が起こり、均一化されたスラリー状の素材が得られる。
- ii) 食品廃棄物の成分に即した栄養成分を含み、たん白質は一部アミノ酸に、繊維類は糖類や有機酸に転換される。また、腐敗しやすい魚肉類の残さのほか、骨なども処理できる可能性があり、原料の選択性が広げられる。

##### イ 亜臨界水処理による安全性向上効果

- i) 100°C以上の高温・高圧水で処理するため、生成物は殺菌されて衛生的である。亜臨界水処理（100-200°C）の持つ殺菌力は、原理的には医療現場で使われる消毒滅菌機（オートクレーブ）以上のものと考えられる。
- ii) 現行の「食品残さ等利用飼料の安全確保のためのガイドライン」に規定される豚の飼養衛生管理条件（80°C/3分、もしくは70分/30分以上の加熱）を超える加熱処理条件で熱消毒することが可能となる。また、食料・農業・農村政策審議会において、食品残さの飼料利用に係る規制の見直しが議論されており、今後更に条件が厳しくなる場合にも対応可能である。

#### (3) 実機試験において確認すべき課題

- i) 水分量の増加，スラリー状の生成物の性状の均一性についての確認
- ii) 亜臨界水処理による基本成分（粗たん白、粗繊維、粗脂肪、粗灰分、可溶無窒素物）の変化についての確認
- iii) 亜臨界水処理による遊離アミノ酸への一部転換、乳酸等の有機酸の生成，更には腐敗しやすい魚や肉に付随する骨などから溶出するカルシウム含有量の確認
- iv) 食品廃棄物に含まれるプラスチック成分の変容度の確認。

#### (4) 亜臨界水処理導入による事業性に関して確認すべき課題

- i) 飼料製造事業としてどのようなメリットが得られるのかの確認。  
（例）原行の破碎・殺菌装置の置き換え
- ii) 食品再生利用業者及び農林事業者へのヒアリング調査等をふまえ、コスト削減の可能性や事業性の改善策について検討する。

### 3-4. 製造物の肥料原料としての効果と課題

#### (1) 製造物の飼料原料としての要件

従来の嫌気・好気性発酵処理によって食品廃棄物を肥料化する場合、有機物を作物生産に適した状態の物質に質転換させる必要がある。そのためには、堆肥の製造において、微生物の働きを最大限生かした工程管理が必要となる。(参考文献) 藤原俊六郎：良い堆肥生産のポイント～微生物の働きを生かす堆肥の作り方，セミナー生産技術

#### (2) 肥料製造における亜臨界水処理導入効果（想定）

##### ア 亜臨界水処理による機能性効果

食品廃棄物に対して150°C-180°Cの温度条件の下で亜臨界水処理を行うことで、均一化されたスラリー状の生成物が得られる。食品廃棄物の成分に即した栄養成分を含み、たん白質は一部アミノ酸に、繊維類は糖類や有機酸に転換される。

##### 【液肥利用する場合】

生成物は直接的に液肥利用するのに向いた性状となるが、亜臨界水処理により生成される有機酸は、植物の生長を阻害する可能性があることに配慮する必要がある。

##### 【堆肥利用する場合】

生成物は殺菌されているため、完熟堆肥製造に有用な土壌微生物が繁殖しやすい環境が形成される。これにより、完熟堆肥の製造工程時間の短縮が見込まれる。

また、亜臨界水反応槽という密閉空間での処理となるため、従来の堆肥化プロセスにおいて発生するアンモニアなどの悪臭対策を軽減できる可能性がある。

##### イ 亜臨界水処理による安全性向上効果

100°C以上の高温・高圧水で処理するため、生成物は殺菌されて衛生的である。亜臨界水処理（100-200°C）の持つ殺菌力は、原理的には医療現場で使われる消毒滅菌機（オートクレーブ）以上のものであるといえる。

#### (3) 実機試験において確認すべき課題

- i) 水分量の増加、スラリー状の生成物の性状の均一性についての確認
- ii) 亜臨界水処理による肥料の基本成分（窒素，リン，カリ）の変化についての確認
- iii) 遊離アミノ酸への一部転換、水溶性リン等の生成についての確認
- iv) 植物成長の阻害要因となる有機酸の含有量の確認
- v) 食品廃棄物に含まれるプラスチック成分の変容度の確認

#### (4) 亜臨界水処理導入による事業性に関して確認すべき課題

- i) 肥料製造事業としてどのようなメリットが期待されるかの確認  
(例) 既往プラントの規模縮小、或は同一プラントでの受け入れ量の拡大
- ii) 飼料化事業者や食品再生利用業者へのヒアリング調査等をふまえ、コスト削減の可能性や事業性の改善策について検討する。



### 3-5. 製造物のメタン発酵原料としての効果と課題

#### (1) メタン発酵原料としての要件

メタン発酵によるメタンガス発生ポテンシャルは、以下の式により推測される。

$$\text{メタンガス発生ポテンシャル} = \text{強熱減量 (VS)} \times \text{分解率}$$

従って、メタン発酵原料としての要件は、有機物中の強熱減量 (VS) と分解率が高いためメタンガス発生ポテンシャルが大きいことで、これにより投資効果に見合いやすくなる。

#### (2) メタン発酵原料製造における亜臨界水処理導入効果 (想定)

亜臨界水反応は、メタン発酵を構成する①加水分解工程、②酸生成工程、③メタン発酵工程中の②酸生成過程を短縮し、③メタン発酵工程中の有機物の分解率を高め、バイオガス増嵩させる効果を持つ。

ア 従来型の「亜臨界水前処理なし」のケース

上記の①～③の工程のすべてを生物学的反応に依るため、メタン発酵の効率を上げることが課題とされる。食品廃棄物の場合、有機物の分解率は75～80%程度で、消化日数は30日程度を必要とすることが多い。

イ 「亜臨界水前処理あり」のケース

①加水分解工程が60分、②酸生成工程が10-30分程度で済むため、①～③の工程が促進され、有機物の消化率は80%以上に増え、消化日数は10-25日程度に短縮される見込みとなる。

#### (3) 実機試験において確認すべき課題

- i) 亜臨界水処理の基本特性として、亜臨界水処理によるマテリアル収支の確認
- ii) 亜生成物の成分分析で確認すべき課題  
亜臨界水処理による強熱減量 (VS) の確認  
亜臨界水処理によるプラスチックの変容度、アルコール化や細粒化の確認

#### (4) 亜臨界水処理装置の導入による事業性に関して確認すべき課題

- i) メタン発酵事業としてどのようなメリットが期待されるかの確認
- ii) メタン発酵試験から、メタン発酵試験による消化率の向上に伴うバイオガス増量、消化残さの削減などの効果の確認

(本実機試験におけるメタン発酵システムの検討対象案は、図3-5-1 (1) (2) を参照)

**検討対象案**

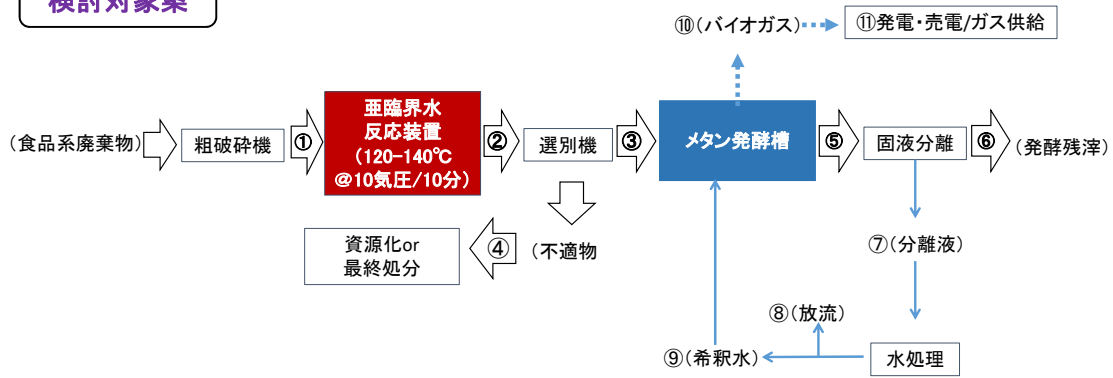


図 3-5-1 (1) 亜臨界水前処理を活用したメタン発酵／バイオガス化システムフロー

亜臨界水前処理によりプラスチックを熱溶解、一部加水分解によるアルコールへの転換を想定し、メタン発酵槽に投入／メタン発酵／高効率バイオガス化するシステムを前提とした検討を行う。  
 (液状化できない廃プラ類は分離し、固形燃料化等の资源化、もしくは廃棄処分を検討する)

**比較対象案**

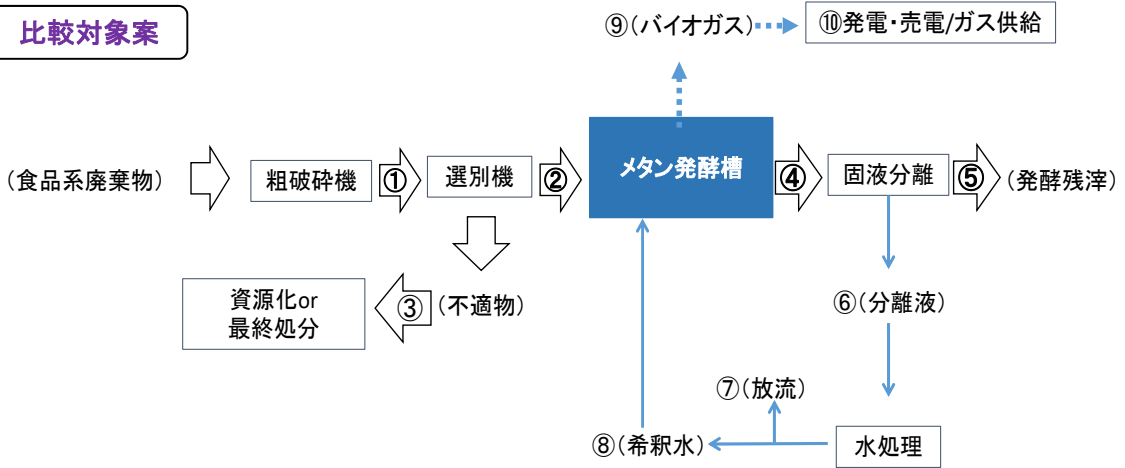


図 3-5-1 (2) 比較対象システムフロー  
 (従来のメタン発酵／バイオガス化システムフロー)