廃棄物処理方法改善による豊かな循環型社会の創生
～CO_2クレジット配分による産業創出～

チーム名　　:資源循環（全般）
メンバー　　:尾﨑大輔、唐井利賢、神邊進、佐橋拓弥、槙基宣（五十音順）
アドバイザリー講師　:神本祐樹、鈴木英司、谷川彩月、西田美紀（敬称略、五十音順）

目次

1.　現状の把握 3
(1)　背景 3
1)　愛知県の 2040 年に向けた社会経済の展望 3
2)　愛知県の生産年齢人口減少 3
3)　人口減少による公共サービスの低下 4
4)　2050 年カーボンニュートラルに対する負担 4
5)　リニア中央新幹線の開業 8
(2)　20 年後のありたい姿 9
1)　20 年後の愛知県のありたい姿 9
2)　ありたい姿に向けてのアプローチ 9
(3)　課題 10
1)　廃棄物によるエネルギーリサイクル高効率化、GHG 削減とごみ処理分別簡素化の両立 10
2)　2050 年カーボンニュートラルに対する IT スタートアップ企業・畜産業支援 10
2.　20 年後に向けての提言の概要 11
(1)　廃棄物によるエネルギーリサイクル高効率化、GHG 削減およびごみ処理分別簡素化のための廃棄物処理方法の改善 11
1)　焼却場の集約 11
2)　最新技術を組み合わせた中間処理施設の設置 12
(2)　企業・産業支援のための CO2 排出権クレジット化と配分 12
1)　廃棄物処理方法改善による GHG 削減分のクレジット化 12
2)　IT スタートアップ企業・畜産業へクレジット配分 12
3.　提案の内容 13
(1)　廃棄物によるエネルギーリサイクル高効率化、GHG 削減およびごみ処理分別簡素化のための廃棄物処理方法の改善 13
1)　焼却場の集約 13
2)　最新技術を組み合わせた中間処理施設の設置 14
3)　まとめ 21

(2) 企業・産業支援のための CO2 排出権クレジット化と配分 22
1) 廃棄物処理方法改善による GHG 削減分のクレジット化 22
2) IT スタートアップ企業・畜産業へクレジット配分 23
3) まとめ 24
4. 提案実現のための具体的な取り組み（アクションプラン）と実現可能性 25
(1) 計画 25
(2) 効果 26
1) J-クレジット創出による企業誘致・産業保護 26
2) エネルギーリサイクルによる投資回収 27
5. 波及効果 28
(1) 県内既存企業と誘致した IT スタートアップ企業とのシナジー効果 28
(2) 愛知県産真正肉のブランド化 28
(3) 運搬回収による GHG 排出量削減によるクレジット創出 28
(4) 最終処分場での GHG 排出量削減 28
6. 最終報告会における議論 29
(1) 会場からの質問 29
(2) 近藤先生講評 29
【引用文献】 30

本文

1. 現状の把握

(1) 背景

20 年後の未来社会へ向けての我々の提案の基となった背景について、下記に記す。

1) 愛知県の 2040 年に向けた社会経済の展望

「2040 年に向けた社会経済の展望と愛知の将来の方向性について」[1-1]によると、愛知県の強みは 41 年連続で製造品出荷額等が日本一であること、外国人労働者数が全国 2 位であること、そして、他県と比べて生産年齢人口が多いことなどが挙げられる。一方で弱みとしては、自動車関連事業への偏りやベンチャー企業(スタートアップ企業)が少ないことなどが挙げられる。

2) 愛知県の生産年齢人口減少

愛知県の人口予測[1-2]および外国人登録者数予測を示す。前項より、愛知県は他県と比べて生産年齢人口は多いが、それでも減少傾向にある事が予想される。しかし、外国人労働者は微増すると予測される。さらに、訪日外国人も増加すると予測される。

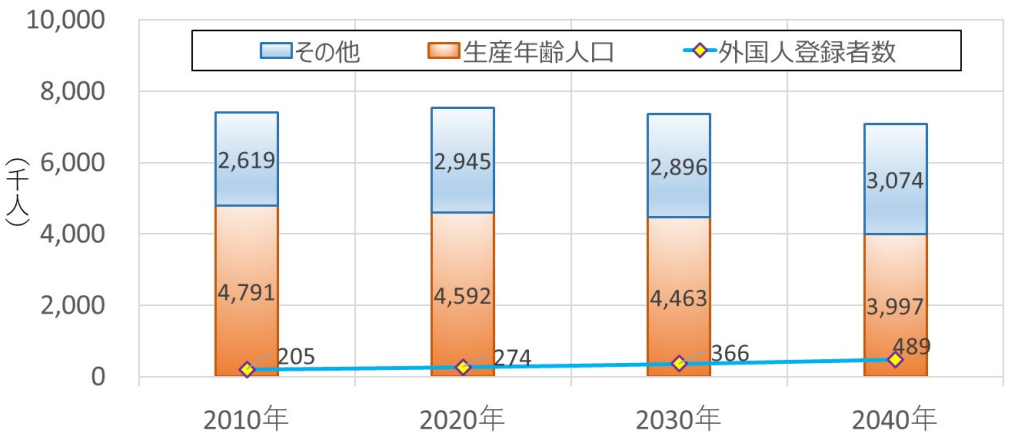


図 1-1 愛知県の人口予測[1-2]

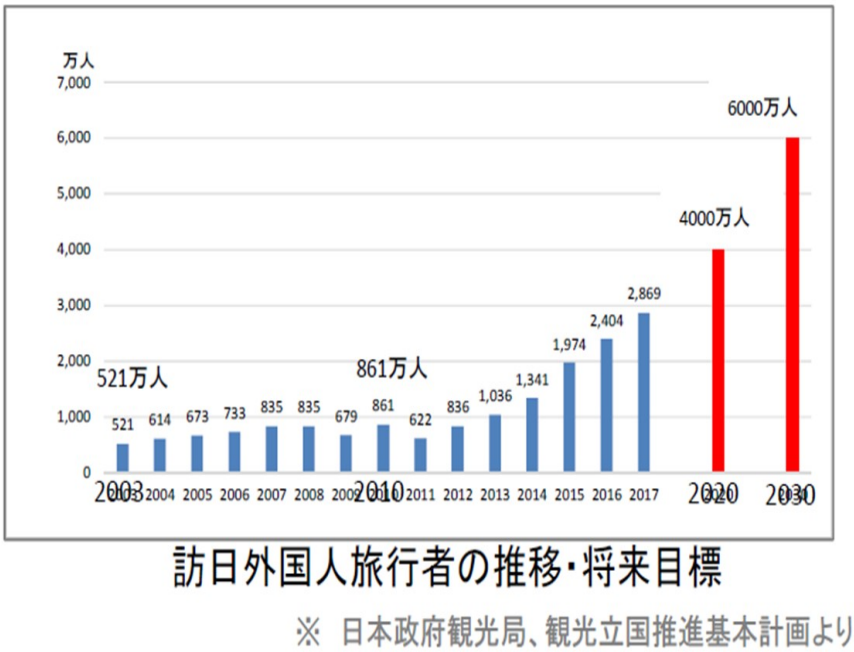


図 1-2 訪日外国人の推移

3) 人口減少による公共サービスの低下

2040 年の税収を単純予測した場合に 1 人当たりの生産性が一定とすると労働人口の低下による県税収入の減少が予測される。2020 年比での県全体の人口の減少率が約 6.2%に対して生産年齢人口の減少率は約 13.0%と大きく、税収減少による公共サービスの低下が予想される。

表 1-1 県税の予測

	2010 年（実績）	2020 年（実績）	2030 年（予測）	2040 年（予測）
生産年齢人口[千人]（図 1-1 より）	4,791	4,592	4,463	3,997
県税（実績）[百万円][1-3]	915,836	1,155,265	—	—
2020 年からの減少予測[百万円]	—	—	▲44,870	▲117,453

4) 2050 年カーボンニュートラルに対する負担

A. 愛知県の温室効果ガス（GHG）排出量

愛知県内の温室効果ガス総排出量の内訳を図 1-3 に示す。2013 年～2018 年の CO_2排出量の推移はほぼ横ばいである。

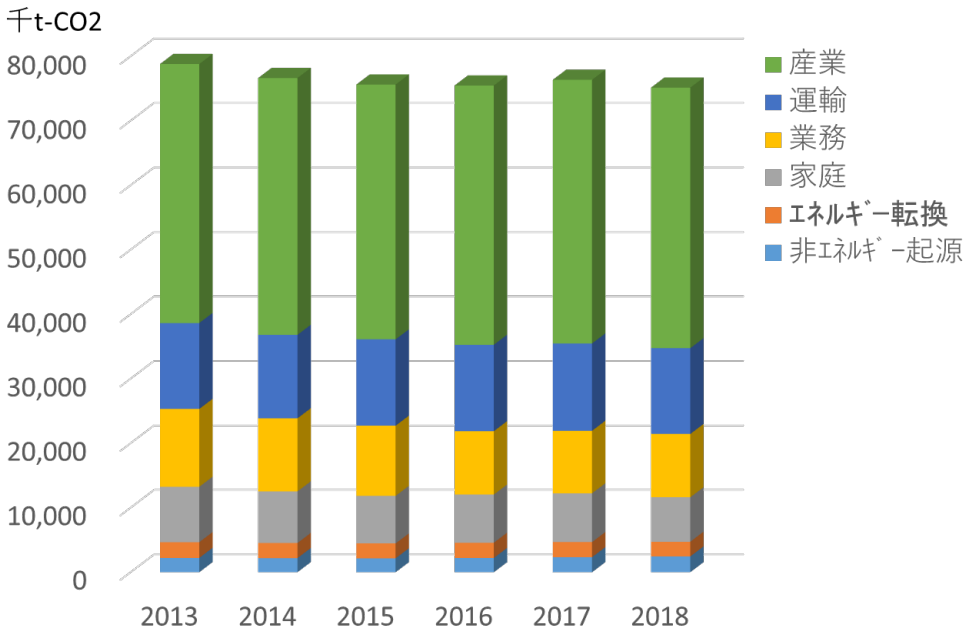


図 1-3　愛知県の CO_2 排出量の推移[1-4]

B.　各産業での GHG 排出

数ある産業の中から、我々は GHG 排出量削減が困難と考えられる以下の産業に着目した。

(a) IT スタートアップ企業

ブロックチェーンや AI などの技術を使ったスタートアップ企業のサービスは今後増加の一途を辿ると考えられる。愛知県ではスタートアップ企業が少ないが、こうした IT スタートアップ企業を誘致することにより、愛知県の強みである製造業とのシナジー効果を期待できる(詳細後述)。

ところが、こうした IT 企業は多くの計算量を必要とするため、データセンターにおいて多量の CO_2 を排出する。マサチューセッツ大学アマースト校の研究チームが発表した論文では、1 つの巨大な自然言語処理モデルを訓練するために必要なエネルギーは、1 台のクルマがライフサイクルを通じて消費するエネルギー(製造にかかったエネルギーも含む)と変わらない[1-5]。

世界のデータセンターでの電気使用量の予測を図 1-4 に示す[1-6]。消費エネルギー量は、今後 10 年間でさらに著しい増加が見込まれている。2030 年までに、世界の電気の 8%から 20%がコンピューターによる計算や通信技術によって消費され、その 3 分の 1 をデータセンターが占める。

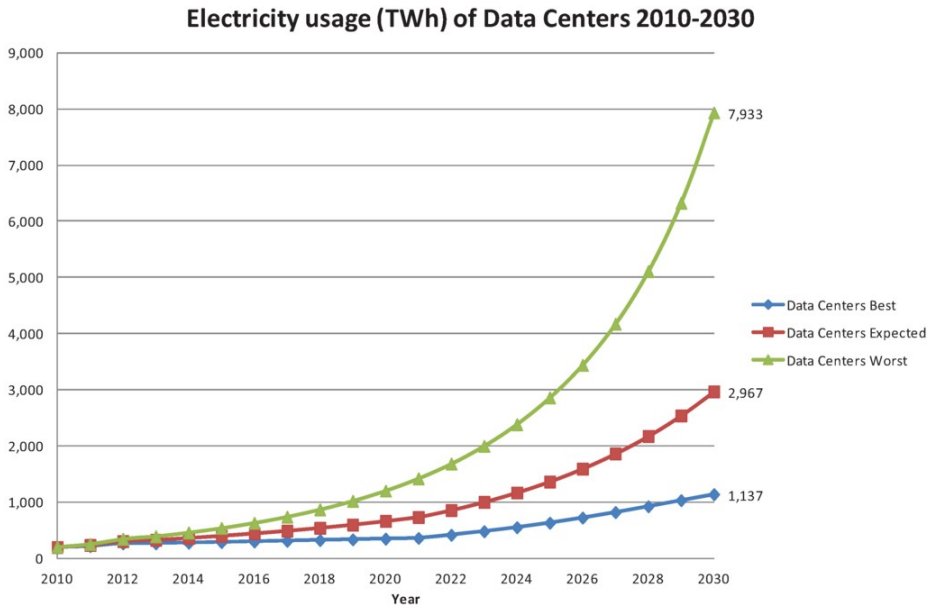


図 1-4　データセンターのシナリオ別電気使用量予測[1-6]

(b) 畜産業

畜産分野では動物の消化器内発酵に伴うメタンの排出（げっぷ）やふん尿の管理に伴うメタン・一酸化二窒素の排出等、家畜特有の GHG 排出が有り、これをゼロとすることは困難である。愛知県での畜産による CO_2 は 887 千 t-CO_2/年と試算される[1-7]。従って、今後、技術の進歩により、GHG の排出が少ないと思われる培養肉や植物肉による代替が進んで行くと考えられる。

愛知の畜産[1-7]

・畜産出荷額 866 億円＝全国第 11 位（2018 年）、愛知県農業全体の 30%を占める。
・昔から酒や醤油等醸造業が盛んで搾りかす等、餌の入手が容易な環境だった。
・豚＝三河地域中心。約 35 万頭、全国 10 位（2018 年）。ブランド豚「みかわポーク」
・鶏卵＝産出額全国 6 位（2018 年）。知多半島中心に約 920 万羽。
・乳用牛＝生乳生産量全国 7 位（2018 年）。年間約 17 万トン生産（牛乳瓶約 8.5 億本分）
　県の学校給食は全て愛知産の牛乳。
・肉用牛＝各地域で牛肉のブランド化に取り組む。黒毛和種（和牛）＝「みかわ牛」、
　交雑種（ホルスタイン種＋黒毛和種）＝「あいち牛」
・うずら卵＝産出額全国 1 位（シェア 60%：2018 年）
・その他＝なごやコーチン

(c) 廃棄物分野

愛知県における部門別 CO_2 排出量推移を図 1-5 に示す。愛知県における部門別 CO_2 排出量の経年変化を見ると、2018 年度における非エネルギー起源 CO_2 の排出が、2013 年度比で 10.2%、2017 年度比で 4.9%増加している。この理由として、廃棄物分野（廃油、プラスチックご

みの焼却等)において排出が増加したことが挙げられている[1-4]。なお、愛知県では令和元年度に 1,929 千t/年ものごみが焼却されている[1-8]。

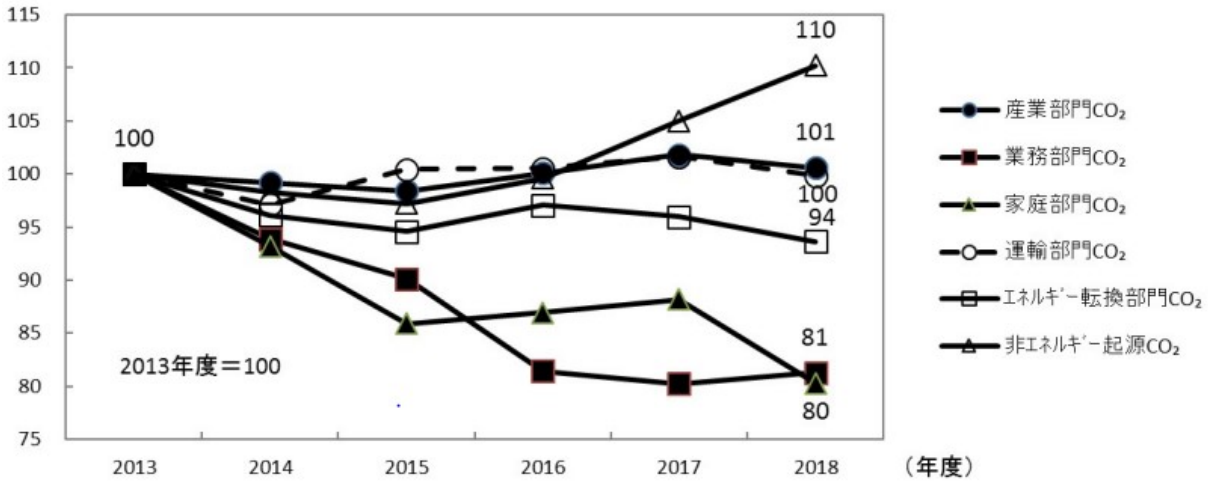


図 1-5　愛知県の部門別 CO_2 排出量の推移[1-4]

C.　国際的な炭素価格

技術的な GHG 削減手法だけでなく、市場原理を活用した経済的な削減手法が注目され、各国にて導入・検討が進んでいる(クレジット取引〔排出量取引〕や炭素税、国境調整措置等)。日本でもＪクレジット制度によるクレジット取引市場が整備され、活用が広がっている。例えばＪクレジットの平均落札価格(第 11 回 2021 年 4 月)は再エネ発電＝2,536 円/t-CO_2、省エネ＝1,518 円/t-CO_2 であり、年々上昇している。また国際的な将来予測では IEA(国際エネルギー機関)が 2040 年の先進国にて、「持続可能な開発シナリオ(SDS)」＝140USD/t-CO_2、「2050 年までに CO_2 排出量を実質ゼロ化するシナリオ(NZE2050)」＝205USD/t-CO_2 と予想している[1-9]。仮に愛知県全体の CO_2 排出量が 2040 年も 2018 年同様の 80,000 千 t-CO_2 程度であり、かつ炭素価格が上述の 140USD/t-CO_2(110 円/USD)程度であると仮定し、全 CO_2 を排出量取引で実質ゼロ化しようとした場合、単純計算にて 1 兆 2 千億円超必要になる(図 1-6)。

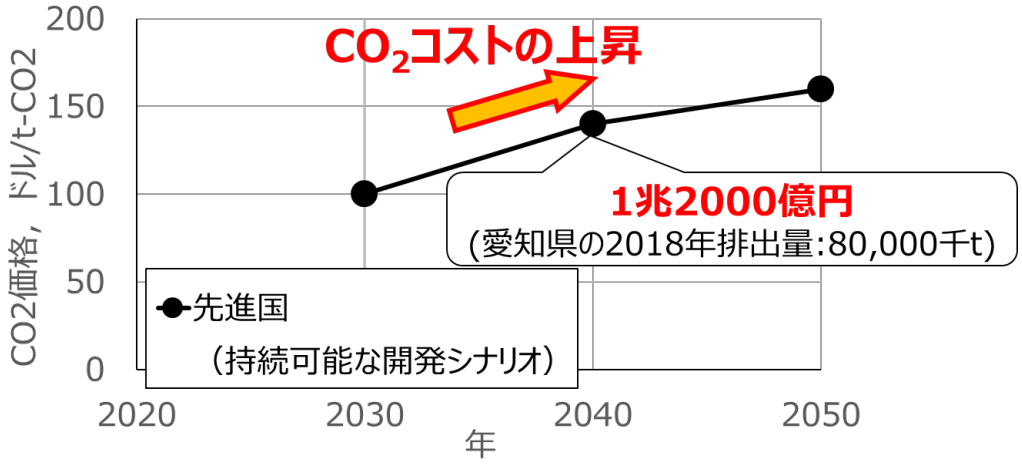


図 1-6　CO_2 価格推移[1-9]

D.　まとめ

以上から、近い将来 CO_2 等がコスト化され損益に直結することは明確である。ただし、IT スタートアップ企業等は、なかなか GHG 削減にまで手が回らないと考えられる。また、愛知県が誇る畜産分野についても、GHG 削減は難しい。廃棄物分野においては、GHG 排出量が増加している。

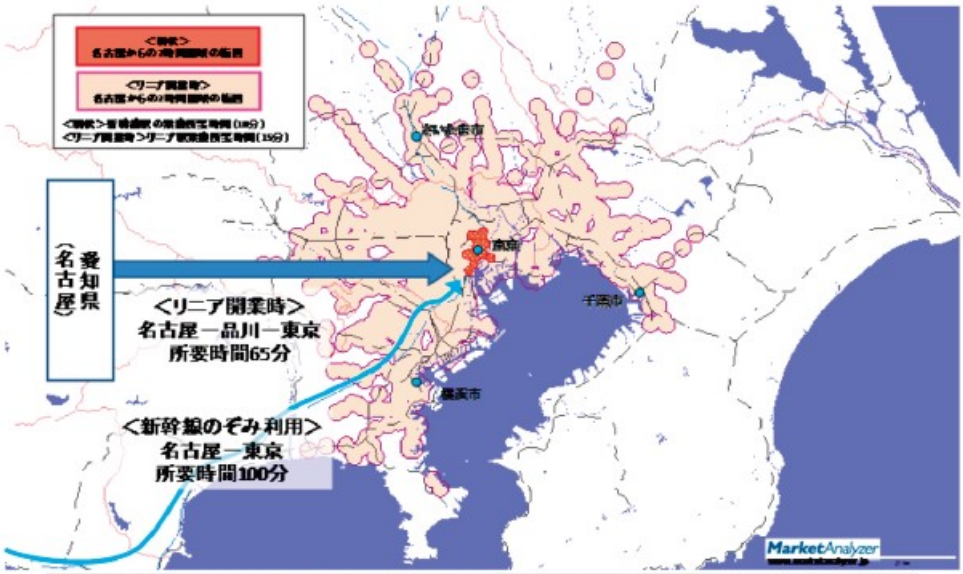
しかし、CO_2のコスト化は、その削減自体が価値を持ち、交換により利益を産む世界になりつつあることを示している。そこで我々は廃棄物分野で GHG 排出量を削減し、IT スタートアップ企業や畜産業へその価値を配分することを検討した。

5)　リニア中央新幹線の開業

リニア開業に伴う時間短縮効果により、愛知県には様々な影響がもたらされる。

リニア開業による名古屋から 2 時間圏域の拡がりを図 1-7 に示す。東京都ー名古屋市間の所要時間が 40 分に短縮されることにより、本県と首都圏との往来が容易になり、企業活動や住民生活の様々な選択肢が拡大することが見込まれる。例えば、東海道新幹線を利用した場合、名古屋から2時間で移動できる範囲は東京駅周辺に限られるが、リニアを利用した場合、さいたま市や千葉市、横浜市を越えた地域に広がる。これにより、名古屋 2 時間圏内でカバーできる事業所数や小売業販売額は東海道新幹線を利用した場合の約 10 倍、人口は約 100 倍と広がり、ビジネス面や観光交流の拡大などが期待できる。

一方、首都圏との一体性が高まることで、支店・営業所などの撤退や消費・文化活動などが首都圏へ流出するストロー現象が進むといったマイナス面の影響も懸念される[1-10]。



指標	単位	現状	リニア開業時	リニア開業時／現状
全事業所数(H18)	万事業所	10	103	9.9倍
総人口(H22)	万人	21	2,284	110.6倍
世帯総数(H22)	万世帯	13.5	1,110.0	82.5倍
昼間人口(H17)	万人	222	2,303	10.4倍
小売業販売額(H19)	兆円／年	2.9	27.7	9.5倍

図 1-7　リニア開業による名古屋から 2 時間圏域の拡がり[1-10]

(2) 20 年後のありたい姿

具体的課題を導くため、まずは 20 年後のありたい姿とそれに向けてのアプローチについて下記に記す。

1) 20 年後の愛知県のありたい姿

我々は人が集まる豊かで明るい愛知県をありたい姿として設定した。具体的には、外国人を含む生産年齢人口の維持または増加、企業数の増加による税収が増加する社会である。また、カーボンニュートラルな社会に向けて県内各企業と2050 年に向けて計画的にCO_2排出量が削減されていることを想定している。

2) ありたい姿に向けてのアプローチ

A. 企業誘致による生産年齢人口の増加

公共サービスを向上させるためには税収増、人口増が考えられる。リニア大交流圏の西の拠点として求心力を高めるとともに、首都圏へのストロー現象が生じないようするため、この地域の役割を明確にしつつ、独自の強みを発揮していくことが必要である。また、首都圏に対抗していくためには、一定の人口規模と産業集積による経済圏を形成していくことが求められる。そこで愛知県では、大都市名古屋を中心に社会的・経済的な結びつきが強く、一体性の強い産業集積を有するエリア(名古屋を中心とした概ね 80～100km 圏)を「中京大都市圏」と位置づけ、国内外から人、モノ、カネ、情報を呼び込もうとしている[1-10]。

愛知県は自動車産業が盛んではあるが、情報系大学が少なく情報産業が育ちにくいとも言われている[1-1]。そこで、人口、税収の増加のため、IT 系のスタートアップ企業を誘致することにより愛知県の弱みを補いつつ、製造業との相乗効果を狙う。また、愛知県が全国に誇る畜産業についても積極的に保護することにより、若手の従事者を確保する。

IT スタートアップ企業や畜産業にとって今後の GHG 削減への取り組みは大きな課題である。また、愛知県は廃棄物分野においてごみ焼却を中心に GHG 削減が進んでいない。

そこで、本提案では、この廃棄物分野を改善することで CO_2 排出権クレジットを創出し、このクレジットを GHG 削減にまで手が回らない IT スタートアップ企業や GHG 削減が困難な畜産業に配分することで、企業誘致、ひいては税収増、人口増を目指す。

B. 外国人にも住みやすい環境づくり

生産年齢人口が減少する中、今後の重要な働き手を担う意味でも、外国人は増えていくと予測される。そのためには外国人に住みやすい環境づくりも重要であり、「ごみの分別」は大切な住環境整備の 1 つである。在留外国人へのアンケートを図 1-8 に示す。在留外国人の 41%の人がごみの分別ルールに困ったと回答していることが分かった[1-11]。従って、ごみ分別の簡素化は、外国人にも住みやすい環境づくりの重要な項目の 1 つとして考える。

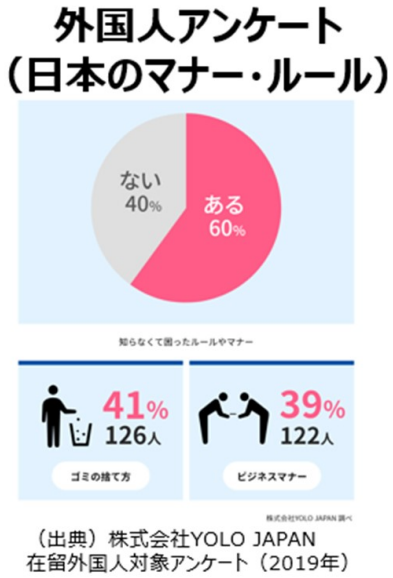


図 1-8　外国人アンケート[1-11]

(3)　課題

以上から、ありたい姿へのアプローチ実現に向けての課題は、下記 2 点である。

1)　廃棄物によるエネルギーリサイクル高効率化、GHG 削減とごみ処理分別簡素化の両立

愛知県として CO_2 排出権クレジットを創出のため、廃棄物分野で温室効果ガス（GHG）を削減することが必要である。

一方、外国人にも住みやすい環境づくりの 1 つとして、ごみ処理時の分別の簡素化があると考える。しかし分別を簡素化すると、廃棄物処理効率の低下が懸念される。

そこで、廃棄物によるエネルギーリサイクル高効率化、GHG 削減とごみ処理分別簡素化を両立するための廃棄物処理方法の改善が必要である。

2)　2050 年カーボンニュートラルに対する IT スタートアップ企業・畜産業支援

愛知県が GHG 排出削減の困難な企業・産業の支援として、積極的に IT スタートアップ企業を誘致したり畜産業を保護したりすることで、生産年齢人口を維持、増加、ひいては税収を増加させることができる可能性がある。

しかし、前述の通り、上記企業・産業は、2050 年のカーボンニュートラルの負担が大きい。

そこで、こうした企業の誘致や産業の保護を図るため、愛知県が 1) にて得た CO_2 排出権を対象企業・産業へ配分することが必要である。

2. 20 年後に向けての提言の概要

(1) 廃棄物によるエネルギーリサイクル高効率化、GHG 削減およびごみ処理分別簡素化のための廃棄物処理方法の改善

廃棄物処理方法の改善として、焼却場の集約と中間処理施設の設置を提案する。

1) 焼却場の集約

廃棄物を最終処分前に焼却処理するが、その処理を高効率にする。そのため、効率の低い施設では焼却処理せず、焼却は高効率施設に集約する。廃棄物の廃棄処理フローの現状と提案イメージを図 2-1 に示す。

また、集約された高効率な大型焼却処理施設でも、焼却処理すれば CO_2 が排出される。そこで、排出された CO_2 はメタネーションによってエネルギーリサイクルすることにより、GHG 排出削減を実施する。大型焼却処理施設での廃棄処理フローのイメージを図 2-2 に示す。

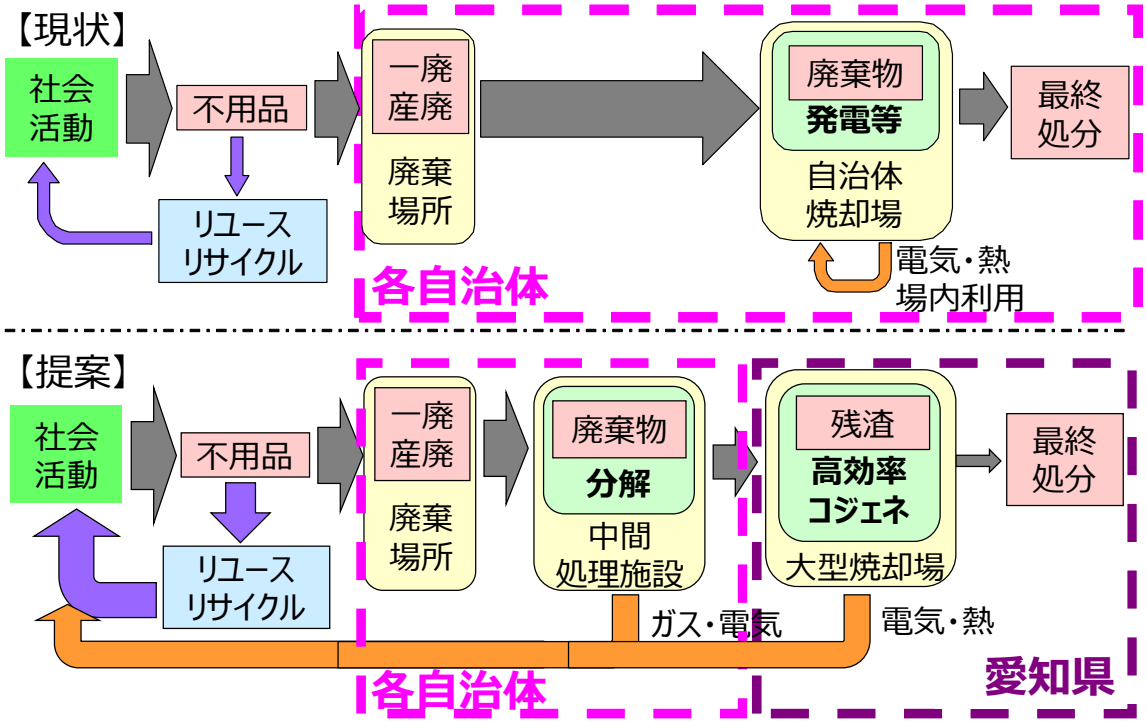


図 2-1 現状と提案の廃棄物の廃棄処理フロー

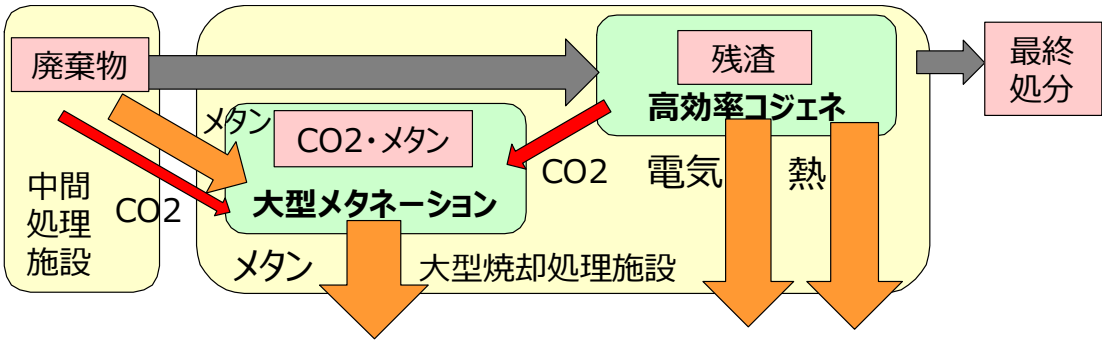


図 2-2 大型焼却処理施設での廃棄物処理フロー

2)　最新技術を組み合わせた中間処理施設の設置

廃棄物の焼却処理施設を集約すると、廃棄物運搬の長距離化、集約された廃棄物量の焼却施設能力超過、焼却処分が中途半端になり未分解の残渣増加、等の問題が発生する。

そこで、廃棄物を焼却施設へ運搬する途中で廃棄物をある程度まで分解、軽量化する次世代中間処理施設を設置する。次世代中間処理施設でもエネルギーリサイクルを実施する。そのため、次世代中間処理施設では、最新技術を組み合わせる。

次世代中間処理施設での廃棄物処理フローを図 2-3 に示す。

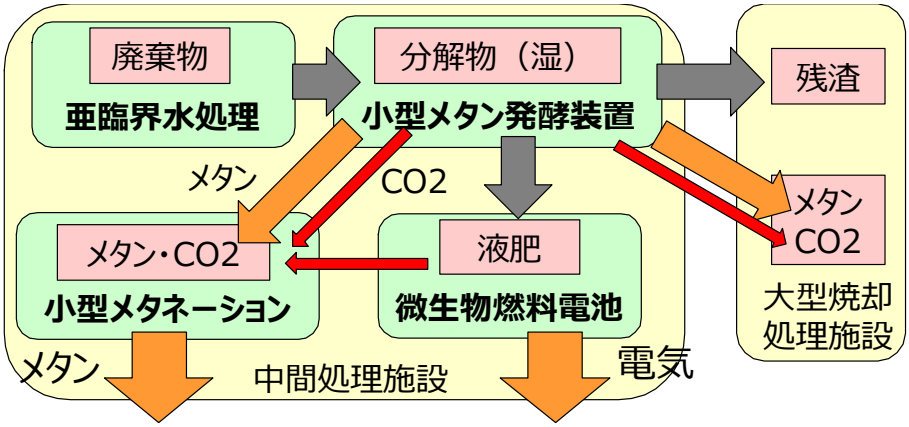


図 2-3　次世代中間処理施設での廃棄物処理フロー

(2)　企業・産業支援のための CO2 排出権クレジット化と配分

1)　廃棄物処理方法改善による GHG 削減分のクレジット化

廃棄物処理方法改善により GHG を削減した分を、県内企業・産業に排出権として利用してもらえるようにするため、J-クレジット制度を利用してクレジット化する。

2)　IT スタートアップ企業・畜産業へクレジット配分

上記で創出したクレジットを、未だ取り組めていない IT スタートアップ企業や畜産業へ配分することにより、それらの企業・産業の保護、育成を図る。これにより、生産年齢人口の維持、増加、税収増加を目指す。

3. 提案の内容

以下、前章の 2 点の提案について、詳細を述べる。

(1) 廃棄物によるエネルギーリサイクル高効率化、GHG 削減およびごみ処理分別簡素化のための廃棄物処理方法の改善

1) 焼却場の集約

廃棄物を最終処分前に焼却処理する。愛知県の焼却施設を表 3-1 に示す。施設数は 43 施設あるが、熱利用していない施設もある。発電している施設は 26 施設あるが、発電効率は 3.1%～25.0%とバラつきが大きく、さらに発電していない施設もある[1-8]。この焼却処理を高効率化するため、効率の低い施設では焼却処理せず、焼却は高効率施設に集約する。廃棄物の廃棄処理フローの現状と提案イメージは図 2-1 の通りである。

表 3-1 愛知県の焼却施設[1-8]

施設数	43 ヶ所	
熱利用	34 ヶ所	温水、蒸気を場内、場外で利用
発電台数	26 ヶ所	
発電効率	3.1～25[%]	

廃棄物は、後述の次世代中間処理施設で中間処理をする。処理された残渣は後述の通り、軽量化される。この残渣を高効率焼却処理施設へ運搬する。次世代中間処理委施設の中で発生した CO2 をその施設内でメタネーションによりメタン化処理できない場合は、CO2 も回収し高効率焼却施設へ運搬する。ここまでは、市町村が実施する。

愛知県は、焼却施設を集約し、残った高効率焼却施設を運営し、収集された残渣を焼却処理する。次世代中間処理施設で分解しきれなかったものを、焼却にて分解し、その熱を利用してエネルギーリサイクルとして発電する。発電した電力は、一部を焼却施設や愛知県の公共施設にて使用する、あるいは、全て電力会社へ売電する。

集約により処理能力を超える廃棄物が焼却施設に運搬されることが懸念される。そこで、既存施設より次世代中間処理施設から運搬されてくる廃棄物の量を推定し、愛知県全体の焼却量を推定する。

既存の湿式メタン発酵処理施設[3-1]に対する搬入量、ガス回収量、発電量、残渣量、および、それらから算出されるごみ 1[t]あたりのガス回収量、発電量、残渣量の平均値、さらに、愛知県のごみ総排出量から算出したガス回収量、発電量、残渣量の推定値を表 3-2 に示す。

メタン発酵施設での分解のみでの残渣推定値は、愛知県全体でも、386[千 t/年]となる。後述の通り、次世代中間処理施設では、他の分解も行うため、これより少量になると考えられる。既存の焼却処理施設では、処理能力が 1,500[t/日]（300 日稼働で 450[千 t/年]、ただし、建設年度が古く発電効率は良くないが。）のものもあるため、仮に 1 施設に集約したとしても、焼却処理

は可能と考える。

焼却処理施設では、焼却により CO2 が排出されるが、それは、焼却施設内に設置するメタネーション設備により、グリーン水素とともに、メタン化する。さらに、次世代中間処理施設内で処理できなかった CO2 も、このメタネーション設備へ収集運搬されてくるため、メタン化する。発生したメタンガスは都市ガスとして売却する。

ここで、電力、ガスを売却した利益は、次世代中間処理施設、焼却処理施設の更新費用、高効率化費用の償却に充てる。

表 3-2 メタン発酵処理施設のガス回収量、発電量、残渣量

メタン発酵処理施設[3-1]	北空知衛生センター	リサイクリーン	クリーンプラザくるくる	ごみ 1t あたり平均（算出値）	愛知県全体（排出量[1-8]以外は推定値）	
処理方式	湿式	湿式	湿式			
搬入量 （t/年）	3,283	8,352	3,633		ごみ総排出量（千 t/年）	1,929
バイオガス回収量（千 Nm^3/年）	352	948	591	107 Nm^3/t	バイオガス回収量（千 Nm^3/年）	192,889
発電量 （MWh/年）	482	1,617	753	147 kWh/t	発電量 （MWh/年）	385,778
残渣 （t/年）	948	1,587	363	0.193 t/t	残渣 （千 t/年）	386

2) 最新技術を組み合わせた中間処理施設の設置

廃棄物の焼却処理施設を集約すると、下記の懸念がある。

・廃棄物を運搬する距離が長くなる。
・集約すると、集約された廃棄物量が、焼却施設の能力より大きくなることが考えられる。
・廃棄物を焼却施設で焼却処分する際、廃棄物内の含有水分量が多いと、それを気化させるエネルギーが必要になり、焼却効率が低下する。廃棄物量が増えると、含有水分量も増えるため、焼却効率が低下する可能性がある。
・廃棄物を焼却施設で焼却処分する際、廃棄物の分別がなされていない場合は、廃棄物量が増加する分、焼却処分による分解が中途半端となり、焼却効率が低下する。さらに、残渣に未分解のものが増加する。

そこで、廃棄物を焼却施設へ運搬する途中である程度まで分解、軽量化する次世代中間処理施設を設置する。次世代中間処理施設には、下記の技術、施設の導入が必要である。

・外国人にも住みやすい環境づくりのため、詳細な分別が不要となるよう、多種多様な廃棄物を一括して低分子状態に分解することができる技術が必要である。そのため、水を使って多

種多様な廃棄物を分解することができる、亜臨界水処理を導入する。

・特に生ごみ等は水を含有したまま保管すると、臭気が激しくなる。そこで、微生物により、それらを発酵、分解し、メタンガスを生成するメタン発酵を導入する。残渣を固液分離し、固体成分は、高効率焼却処分へ運搬し、液体成分は、液肥・排液として、後述する微生物燃料電池へ送液する。

・亜臨界水処理とメタン発酵を組み合わせるため、メタン発酵は湿式となり、液肥・排液が出る。この液肥・排液は、有機成分が高いため、液体肥料として農業用に利用が可能である。しかし、利用できる場所が次世代中間処理施設にない場合は、その処理に費用がかかる。そのため、この液肥・排液から、エネルギーリサイクルするため、微生物燃料電池を導入する。液肥・排液を微生物燃料電池の原材料として利用する。

・メタン発酵や微生物燃料電池からはメタンガスや電力だけでなく CO_2 も生成される。そこで、この CO_2 もメタン化し、都市ガス等として、販売する。実際には、次世代中間処理施設が生成したメタンガスは愛知県が買い取り、愛知県がガスを売却する。

以下に、上記の技術について、詳細を説明する。

A. 亜臨界水処理

水の温度・圧力を 374℃、22MPa 以上まで上げると、水(液体)でも水蒸気(気体)でもない状態となる。水の温度-圧力線図を図 3-1 に示す。この点を水の臨界点といい、臨界点より上の領域を超臨界水と呼ぶ。臨界点よりもやや低い近傍の領域を亜臨界水と呼ぶ。亜臨界水の特徴は、有機物の溶解作用と強い加水分解作用がある。この亜臨界水の性質を利用することで、環境にやさしい廃棄物の再資源化が可能である。

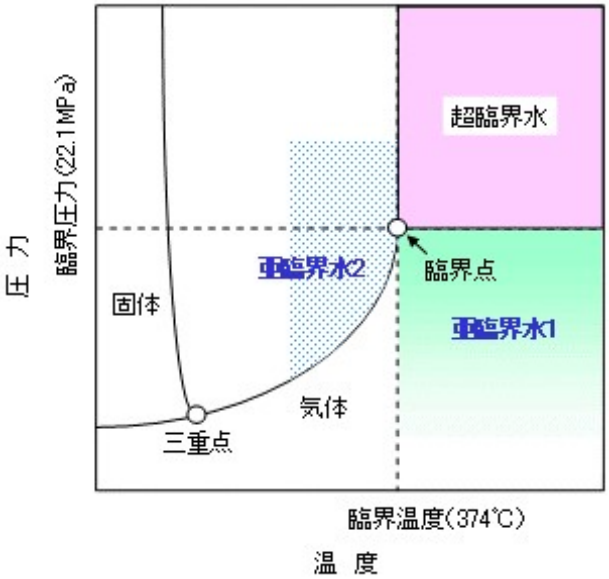


図 3-1 水の温度-圧力線図

装置のイメージ図を図 3-2 に示す。

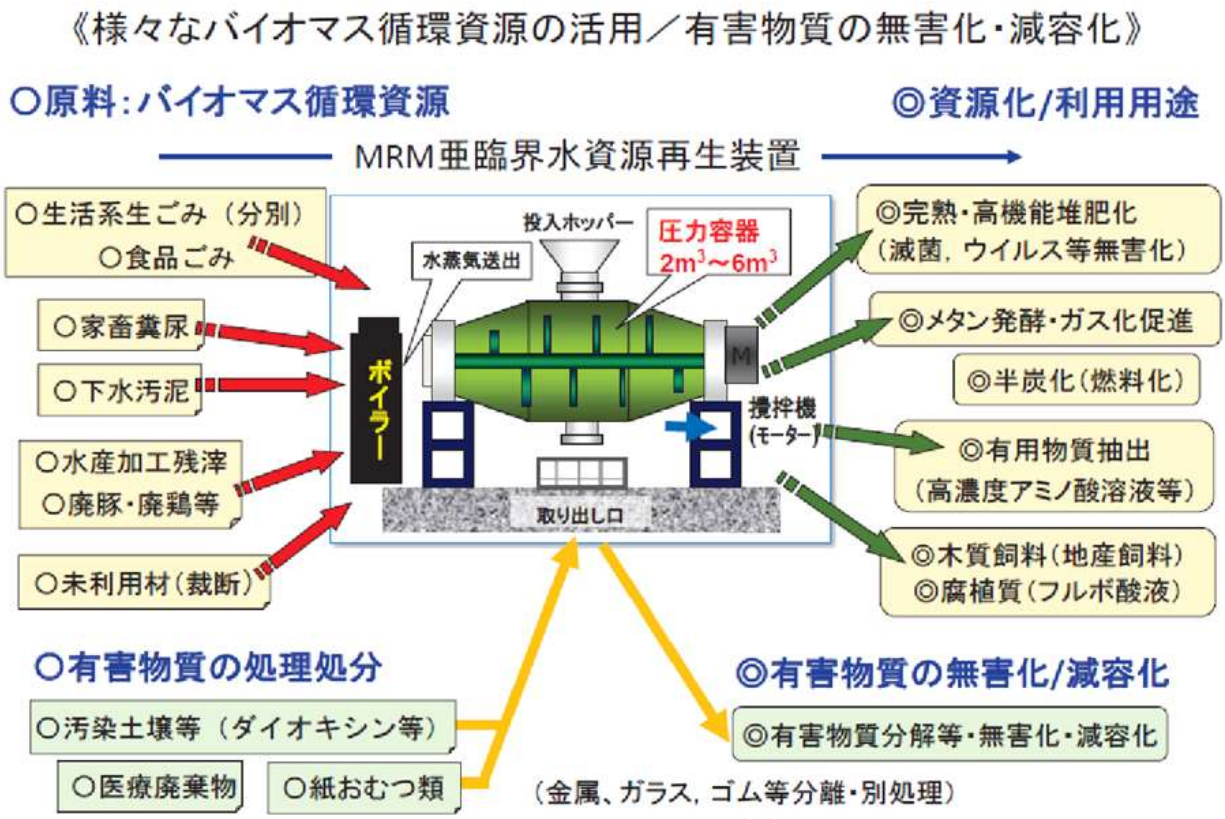


図 3-2 装置のイメージ[3-2]

この技術を利用することにより、亜臨界水で、加水分解反応により、種々の有機物を低分子化することができる。

技術課題としては、実証試験による効果・コストの検証、課題等の整理が必要である。

技術的には 2019 年段階で研究・実証段階（堆肥化、飼料化は一部実用化）、2024 年には実用化レベルになると考えられる[3-3]。

B. メタン発酵

メタン発酵（メタンガス化）とは、有機物を種々の嫌気性微生物の働きによって分解し、メタンガスや二酸化炭素を精製するものである。メタンガスの分解過程は、下記に示す 4 段階から構成される。

・低分子有機物に分解する可溶化・加水分解
・有機酸（プロピオン酸、酪酸等）を生成する酸生成
・酢酸と水素を精製する酢酸生成
・メタンと二酸化炭素を精製するメタン生成

メタン発酵過程を図 3-3 に示す。[3-4]

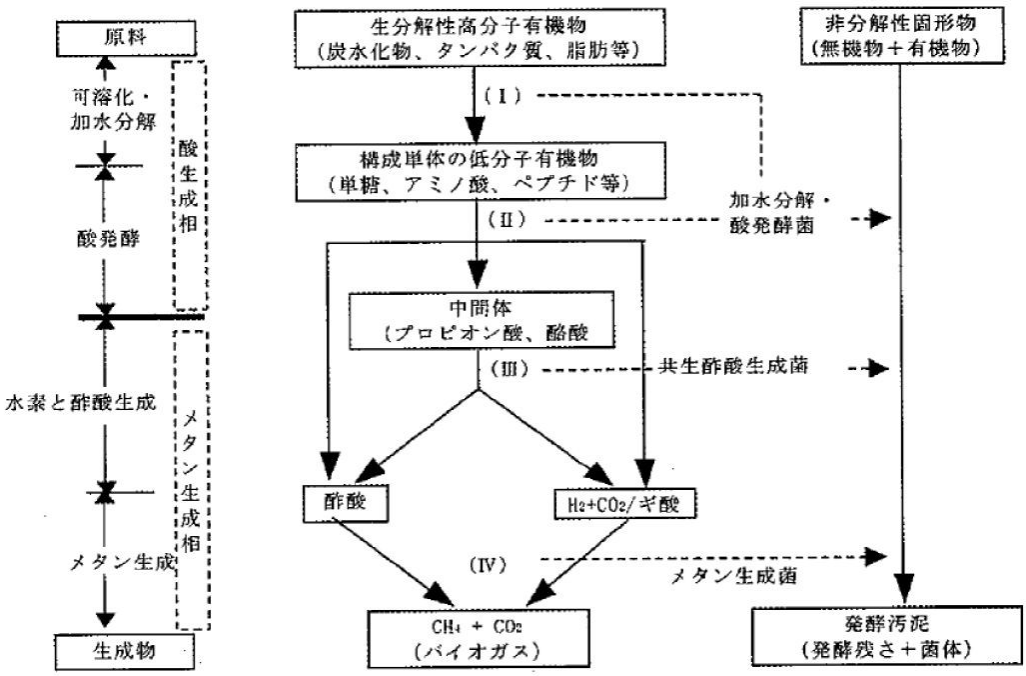


図 3-3 メタン発酵過程[3-4]

メタンガス化の処理方式には処理対象物の固形物濃度によって湿式と乾式に、また発酵温度によって、中温発酵方式と高温発酵方式に分類できる。 それぞれの特徴を表 3-3 に示す。

表 3-3 メタンガス化処理方式[3-4]

	乾式メタン発酵槽	湿式メタン発酵槽
メリット	• 排水処理量が少ない（湿式と比較） • 機械選別を導入することで、生ごみの分別収集を実施していない自治体でも利用可である • ガス発生量が多い（湿式と比較）	• 設備費用が少ない（乾式と比較） • 稼動実績が多い • 規模・処理量のバリエーションが豊富（敷地面接の省スペースが可能、堅型も可能） • 残渣が少ない（下水処理場と連携させた場合）
処理量	• 1槽あたり25～35t/dの処理量	• 1槽あたり4～40t/dの処理量
建設面積/槽の大きさ	• 1槽あたり6.4m×32m 程度	• バリエーション豊富（例）2,210m^2（処理能力20t/dの場合）、1,500m^2（処理能力130t/dの場合）

排水処理量が少ないこと、ガス発生量が多いことを考慮すると、乾式の方が良いが、投入ごみの分別が必要である。その要件が比較的ゆるいこと、前工程で亜臨界水処理を実施すること、

から今回は、湿式メタン発酵方式を提案する。

メタンガス化施設の設備を分類すると、A.廃棄物処理施設設備と B.資源化物利用施設設備に分類できる。施設全体構成を図 3-4 に示す。

(a) 廃棄物処理施設設備

・受け入れ・前処理設備(資源化に不要なものを除去する選別施設、破袋・粉砕設備)

・メタン発酵設備(メタン発酵槽、ガスホルダー、脱硫施設、余剰ガス燃焼設備)

・環境保全設備(悪臭により周辺環境への影響を防止する脱臭設備や排水設備)

(b) 資源化物利用施設設備

・エネルギー利用設備(電気エネルギーに変える発電設備やボイラなどの熱利用設備、メタンガス精製設備)

・マテリアル利用設備(発酵残渣の液肥利用・貯留設備、肥料化施設)

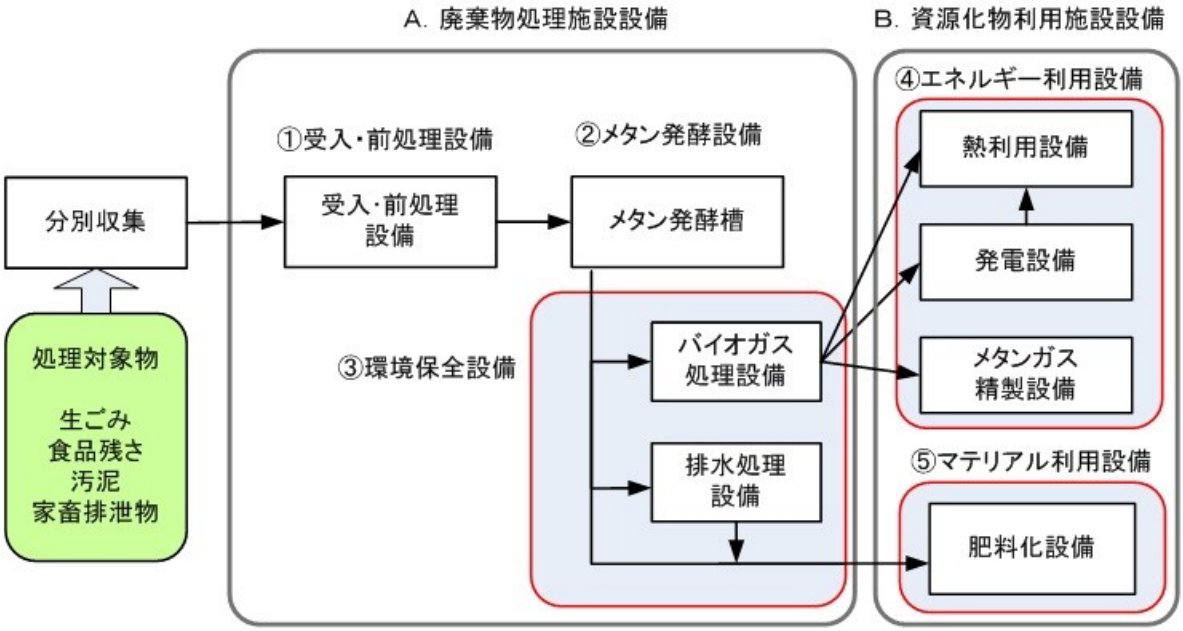


図 3-4 施設全体構成[3-4]

メタンガス化施設から生成されるバイオガス等の生成物を図 3-5 に示す。メタンガス化によってバイオガスと発酵残渣が生成される。バイオガスとしては、主としてメタンガスと CO_2 が発生する。バイオガスはメタネーション施設に回す。脱水固形物は、周辺地域で必要性があれば堆肥等に利用するが、不要な場合はさらに乾燥により乾燥固形物として高効率焼却施設に回す。排水は周辺地域で必要性があれば液肥(消毒後)として利用するが、不要な場合は微生物燃料電池に回す。

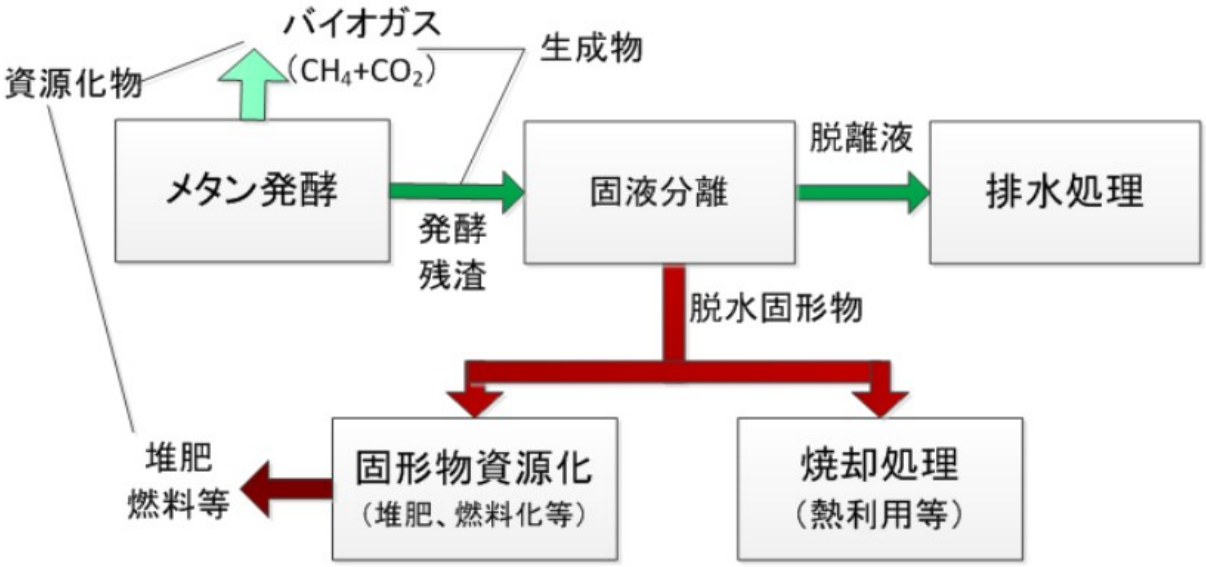


図 3-5 生成物[3-4]

技術課題としては、下記がある。

・メタンの利用方法の拡大(未精製ガスの利用技術の開発等)
・消化液の肥料等への利用拡大
・高効率で安価な発酵・メタン精製濃縮装置の開発
・微生物糖化技術を用いた発酵速度の向上
・原料調達、販路等を含む事業環境の整備や製造等(コスト)
・中規模、小規模で低コスト・高効率なメタン発酵技術

このうち、1 点目については、後述のメタネーションより、メタン化、都市ガス化する。また、2 点目については、後述の微生物燃料電池で利用する。

技術的には 2019 年段階で実用化(一部実証)レベルにある[3-3]。

C. 微生物燃料電池

微生物燃料電池(microbial fuel cell、MFC)とは、微生物の代謝能力を利用して有機物などの燃料を電気エネルギーに変換する装置。正極(カソード)と負極(アノード)を設置し、負極では投入された燃料(主に有機物)が微生物により酸化分解されて発生する電子を電極で回収する。その電子は外部回路を経由して正極に移動し、正極での酸化剤(主に酸素)の還元反応により消費される。負極の化学反応と正極の化学反応の電位差に従い電子が流れるので、その際の電位差と電子流量(電流量)の積に相当するエネルギーが外部回路において得られる[3-5]。概念図を図 3-6 に示す[3-6]。

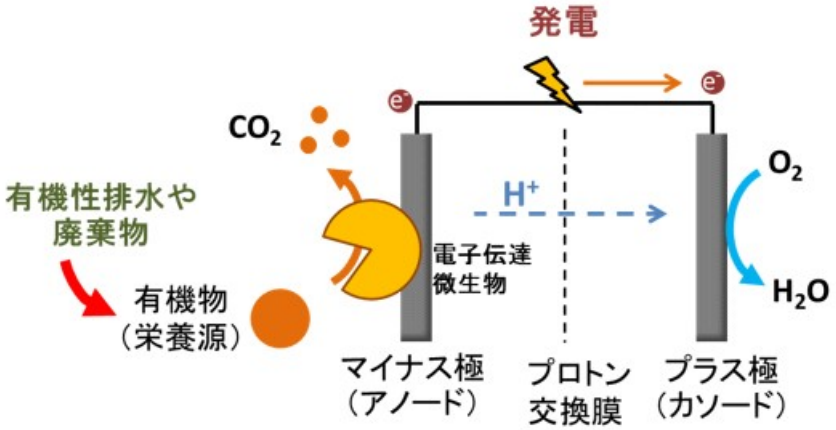


図 3-6　微生物燃料電池の概念図[3-6]

図 3-6 の有機性排水として、メタン発酵で排出される排液（液肥）を利用する。微生物は、ジオバクター菌、シュワネラ菌等の地球上のいたるところに存在する発電菌（嫌気性微生物）である。

課題は、下記の通りである[3-7]。

・CO_2 が生成：発電菌が有機物分解時に電子とともに CO_2 が発生する

・低い電気出力　：　現状（0.1～10 W/m^3、0.01～1 W/m^2）、目標（＞数 100 W/m^3　、10 W/m^2）

・膜・カソード素材が高価　：　Pt 触媒、Nafion 膜

・大型化が困難

1 点目については、後述のメタネーションより、メタン化、都市ガス化する。他の課題についても、今後の技術の発達により解決されると考えられる。

D.　メタネーション

メタン発酵や微生物燃料電池で発生した CO_2 を有用なガスに変換する手段として、CO_2 と水素からメタンを合成する「メタネーション」技術を導入する。

メタネーションは下記反応で CO_2 からメタンを生成する。

$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$　（サバティエ反応）

メタネーションプラント例を図 3-7 に示す。

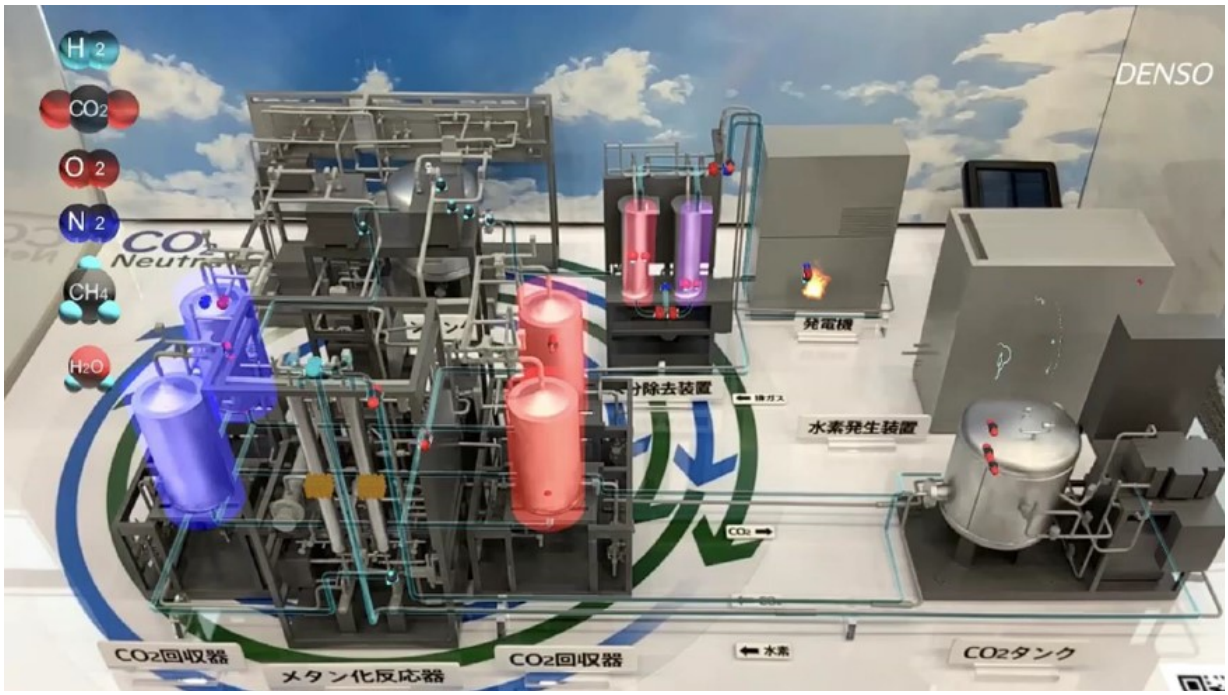


図 3-7　メタネーションプラント例（株式会社デンソー）[3-8]

基盤技術開発は着実に進んでいるメタネーションだが、今後、商用化を実現するためには、まだ大きな課題がある。ひとつは合成メタンを生成する設備の大規模化である。現在は、海外の事例で 1 時間あたり数十～数百 Nm^3 の合成メタン生成を実現しているが、商用化にあたっては、1 時間あたり 1 万～6 万 Nm^3 の合成メタンを生成できるよう、設備をスケールアップする必要がある。また、コストの低減も重要な課題である。供給コストを、現在の LNG 価格と同水準にするためには、水素を安価に調達すること、CO2 を安価に回収できることも不可欠である[3-9]。

3)　まとめ

廃棄物処理方法改善のメリット・デメリットを表 3-4 に示す。

焼却施設の集約により、既存の小型焼却施設は不要となる。そこで、その施設を更新し、中間処理施設とすることにより、用地確保の必要が無くなり、費用を削減することができる。

さらに、次世代中間処理施設には、新技術の開発が必要である。これらについては、県内企業を中心にコンソーシアムを組織化し、愛知県の補助金（例えば、新あいち創造研究開発補助金）での開発や、経産省（NEDO）、環境省、文科省等の国家プロジェクトでの開発により推進する。

表 3-4 廃棄物処理方法改善のメリット・デメリット

提案内容 （県・市町村）	メリット	デメリット	対策 （県・市町村）
・高効率リサイクル可能な大型焼却場へ集約（県）	・エネルギーリサイクル量増	・収集運搬の長距離化	・中間処理施設にて運搬物の軽量化（市町村）
・中間処理施設を設置（市町村） ・最新技術の導入（県・市町村）	・分別不要 ・焼却処理量の削減 ・エネルギーリサイクル	・中間保管場所の新規設置 ・新技術の開発	・現在の小型焼却施設を更新 （市町村） ・県補助金・国プロでの研究に向けコンソーシアムの組織化（県）

(2) 企業・産業支援のための CO2 排出権クレジット化と配分

1) 廃棄物処理方法改善による GHG 削減分のクレジット化

各中間処理施設において削減した GHG に対する排出権の創出については、将来的には多様な排出量取引市場が整備・強化されることが予想されるが、現状で言えば J クレジット制度が最も現実的である。実際には具体的かつ複雑な申請・承認の過程を経る必要が有るが、同制度にて現状承認されている方法論の中では以下の表 3-5 に記載する方法論が活用出来る可能性が高い。また該当する方法論が無い場合は新たに登録出来る可能性もある。

廃棄物からクレジット化できる反面、J-クレジットの申請や認証は煩雑、困難であることから、各中間処理施設からの GHG 排出削減を各市町村がそれぞれクレジット化することは困難と考えられる。そこで、各中間処理施設からエネルギーリサイクルで生成した電気、ガスは愛知県が買い取り、愛知県が一括して申請しクレジット化する。

表 3-5 適応が考えられる既存の方法論

NO.	方法論	備考
EN-S-019	廃棄物由来燃料による化石燃料又は系統電力の代替	生成した電気、ガスの件施設での利用
EN-S-022	生産設備(工作機械、プレス機械、射出成型機、ダイカストマシン、工業炉又は乾燥設備)の更新	焼却場→次世代中間処理施設での CO2 削減量
EN-S-036	下水汚泥脱水機の更新による汚泥処理プロセスに用いる化石燃料消費削減	微生物燃料電池の利用
EN-S-037	共同配送への変更	中間処理の設置
EN-R-007	バイオガス(嫌気性発酵によるメタンガス)による化石燃料又は系統電力の代替	生成したバイオガスの施設内利用
WA-001	微生物活性剤を利用した汚泥減容による、焼却処理に用いる化石燃料の削減	微生物燃料電池の発電量の施設内利用
WA-002	食品廃棄物等の埋立から堆肥化への処分方法の変更	中間処理→堆肥化とする場合

2) IT スタートアップ企業・畜産業へクレジット配分

創出されたクレジットはターゲット企業に配分し、企業のカーボンニュートラルに向けた負担を軽減することで、以下ターゲットに絞った企業誘致・産業保護に繋げる。

一つ目のターゲットであるIT スタートアップ企業については、自動車を中心に製造業が盛んであった反動で育成が遅れていた愛知県だが、現在その巻き返しに動いている。例えばソフトバンクと組んだ(PFI 方式)日本最大級の育成拠点「ステーション Ai」を 2024 年に名古屋市内に立ち上げる。この様な動きをカーボンニュートラルの側面からバックアップする。前述のとおり、こうした企業に必要なデータセンターには大量のエネルギーが必要であることが問題視されていることもあり、前項 1)で創出したクレジットを配分することで、カーボンニュートラルの側面からバックアップする。

二つ目のターゲットである畜産業であるが、前述のとおり、愛知県の畜産出荷額は 866 億円、全国第 11 位(2018 年)で愛知県農業全体の 30%を占めており、愛知県では、産出額全国 1 位のうずら卵や「みかわ牛」「あいち牛」「みかわポーク」「愛とん」「名古屋コーチン」等の食肉のブランド化を推進している[1-7]。これより畜産業・畜産品は特色有る重要な地域資産である。しかし前述のとおり、畜産業は GHG 削減が困難である。従って前項 1)で創出したクレジットを配分することで、カーボンニュートラルの側面からバックアップする。

次に具体的なクレジットの配分案を述べる。対象業種を「製造業とのシナジー効果の見込める先端スタートアップ企業」、および「スマート農業の実施を志す畜産業者」とする。選考の為の提出書類には企業基本情報(業種、決算書等)、今後 5 年間の売上計画や人員計画の他に、今後 5 年間の脱炭素化計画(CO2 排出量計画)を要求し、愛知県は計画段階から積極的にこれをサポートして行く。具体的な補助期間は 3 年間程度、補助率は計画された CO2 排出量課税の内 2/3 程度を想定、前年のクレジット額に応じて予算を組み、その枠に収まる件数で採用することとする。

3) まとめ

2050 年カーボンニュートラルに対する企業・産業支援のメリット・デメリットを表 3-6 に示す。

企業・産業へクレジット化することにより、県内企業・産業の保護、育成、支援が可能であるが、支援した企業・産業のカーボンニュートラルが進まない可能性がある。そこで、支援時は、各企業・産業より、カーボンニュートラルの計画を立案していただき、さらに、支援するクレジットも計画的に削減する。

表 3-6 2050 年カーボンニュートラルに対する企業・産業支援のメリット・デメリット

提案内容 (県・市町村)	メリット	デメリット	対策 (県・市町村)
・廃棄物処理方法改善による GHG 削減分のクレジット化	・廃棄物をクレジット化	・中間処理施設からのクレジット化は申請、認証が困難	・市町村がエネルギーリサイクルした電気・ガスを愛知県が買い取り、一括してクレジット申請、認証
・企業・産業へクレジットを配分	・県内企業・産業の保護、育成、支援	・支援した企業・産業のカーボンニュートラルが進まない	・支援時は、GHG 削減計画を提出 ・計画的に補助を削減

4. 提案実現のための具体的な取り組み（アクションプラン）と実現可能性

(1) 計画

前述の提案に対して、大切なのは安易に市町村任せにして旧来技術・設備の更新・延命化を優先するのではなく、その財源や民間活力を活用し、ベクトルを統一して最新技術・設備を順次導入することである。そのため、愛知県が主導してこの構想を確立し、各市町村へ説明、同意を得る。

蛇足となるが、本提案は環境省が描く廃棄物分野の 2050 年カーボンニュートラル目標における漠然とした「CCUS による炭素回収・利用」[4-2]よりも一歩踏み込んだ提案になっていると思われる。

本提案の計画のマスタースケジュールについて、図 4-1 に示す。

内容	主担当	2025	2030	2035	2040
構想確立	愛知県				
高効率焼却施設へ集約					
CO_2クレジットの創出					
IT スタートアップ企業の誘致 畜産業の保護					
新技術の開発	愛知県 企業				
次世代中間処理施設の設置	市町村				

図 4-1 マスタースケジュール

(2) 効果

1) J-クレジット創出による企業誘致・産業保護

我々の提案にて愛知県でどれくらいのクレジットを創出出来るのか、その規模を算出する。

廃棄物分野の温室効果ガス排出量を表 4-1 に示す。日本全国における廃棄物分野の温室効果ガス排出量は 37,820 千 t-CO_2(2018 年)であった[4-2] 。全国、愛知県それぞれのごみ排出量[4-1]の割合から、愛知県の廃棄物分野の温室効果ガス排出量は、1,892 千 t-CO_2となる。

次に、愛知県の廃棄物焼却由来の CO_2 排出量を算出する。廃棄物分野からの GHG 排出量内訳(全国)[4-3]を図4-2に示す。これより、全国的には、廃棄物焼却由来の CO_2 排出量は、廃棄物分野全体の GHG 排出量の 75.4[%]である。愛知県の廃棄物分野の温室効果ガス排出量と左記の割合から、愛知県の廃棄物焼却由来の CO_2 排出量は、1,427 千 t-CO_2となる。

CO_2 価格については、これまでにも述べて来たように更なる高騰が予想されるものの、仮に最近の J クレジット平均落札価格に近い 1,500 円/t-CO_2(省エネ)を想定する。これを掛け合わせると、約 21 億円/年のクレジット規模になる。

もちろん CO_2 落札価格が上昇すれば更にその規模は拡大する。これが企業誘致・産業保護の原資となる。

表 4-1 廃棄物分野の温室効果ガス排出量

	ごみ総排出量		廃棄物分野の温室効果ガス排出量	
全国	最終処分量 3,798[千 t]	平成 30 年度[4-1]	37,820 [千 t-CO_2]	2018 年[4-2]
愛知県	最終処分量 190[千 t]		1,892 千 [t-CO_2]	単純比例計算

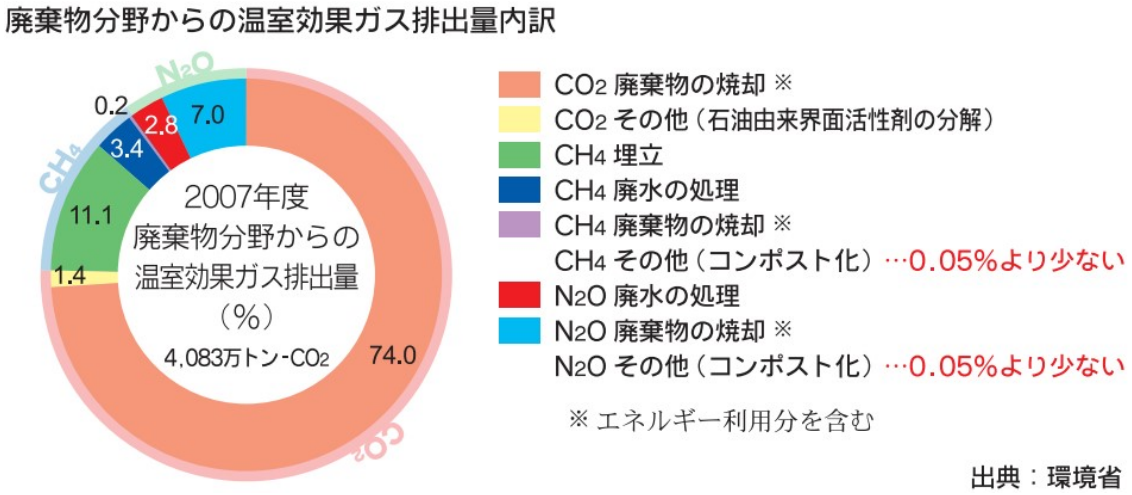


図 4-2 廃棄物分野からの GHG 排出量内訳(全国)[4-3]

2) エネルギーリサイクルによる投資回収

今回計画に基づく新規設備の建設費額を愛知県のごみ処理経費、焼却施設数を基に独自に推計し、2,400 億円 （50[億円／施設]×48[施設]） とした。

また本計画において創出される電気およびメタンガスの価値を、それぞれ売電単価 15 円/kWh、ガス売却単価 40 円/Nm^3として独自に計算した結果、以下の表 4-2 のとおり発電にて 58 億円/年、メタンガスにて 77 億円/年、合計 135 億円/年を創出出来ると予想した。

結果、エネルギーリサイクルによる投資回収期間を 18 年(2,400/135)と想定する。

ちなみにごみ焼却施設の耐用年数は一般的に 20～30 年程度とされていることや(4-4)、豊橋市バイオマス資源利活用施設設備・運営事業では事業期間を 20 年にて設定していること(4-5)等から考えても十分合理的な計画であると考える。

表 4-2 エネルギーリサイクルによる収入

	愛知県全体 （表 3-2 より）		金額	備考
バイオガス回収量 （千 Nm^3/年）	192,889	ガス収入 （百万円）	7,716	単価 40 円/Nm^3
発電量 （MWh/年）	385,778	売電収入 （百万円）	5,787	単価 15 円/kWh

5. 波及効果

(1) 県内既存企業と誘致したITスタートアップ企業とのシナジー効果

県内既存企業と誘致したITスタートアップ企業との協業により以下のようなシナジー効果を見込む。

- 都市 OS を中心として、モビリティの FMS(Flexible Manufacturing System)や、各種 EMS(Energy Management System)の連携による、ヒトやモノの移動・エネルギー消費の最適化の実現
- 県内の製造業とITスタートアップ企業との協業によりIoT、ロボティクスやビッグデータ解析が全工場に浸透し、工場の生産性の爆発的な向上
- VR・ARの発展に伴う、バーチャル世界での製造業という新産業の確立

(2) 愛知県産真正肉のブランド化

GHG排出負担の手助けを行うことで、定常的に家畜がGHGを排出する畜産業の保護を行うことができる。これにより人工肉が広く流通する社会の中で真正肉を提供できる希少な地域として、愛知県産の肉を「カーボンニュートラル肉」等ブランド化し、畜産業の利益を最大化することができる。

(3) 運搬回収による GHG 排出量削減によるクレジット創出

次世代中間処理施設を用いたごみの集約と減量化を行うことで輸送効率が向上し、廃棄物の運搬時に発生する CO_2 排出量の削減することができる。こちらの CO_2 削減量もクレジット化し、企業誘致に活用することができる。

(4) 最終処分場での GHG 排出量削減

廃棄物を複数回分解処理することで有機物をほぼ全て分解することができる。そのため、従来の廃棄方法において最終処分場で発生していた CH_4 を削減することができる。表 4-1 の愛知県の廃棄物分野の温室効果ガス排出量(1,892[千t/CO_2])と図4-2の埋立から排出されるGHG排出量割合(11.1[%])より、本提案による最終処分場での GHG 削減量は 210[千t-CO_2]となる。

6. 最終報告会における議論

(1) 会場からの質問

・企業誘致と外国人労働者増加の関係

Q. 外国人労働者が増える前提は成立するのか、生活はほかにも連動するものが多すぎるため難しい、むしろ、高齢者にキャプチャーした方が良いのでは？外国人労働者が増えることは短期的には企業にポジティブだがどうか。

A. 確かにご指摘の通り、議論の中では高齢者にメリットがあるという話はあがったが、今回の発表では企業誘致に着目したため発表では割愛した。

・スタートアップについて補足

コメント　愛知県では、既に、ステーション Ai でソフトバンクとともに拠点形成に取り組んでいる。東三河でも拠点形成している。

Q. スタートアップで社会課題を解決するのは非常によい。ただし技術革新を待つと、すぐには始まらない。

A. 取り組みがあるのは承知しているが、まだ伸び代は多くあると考えている。
（尚、本報告書では近藤先生の講評（6.(2)参照)を参考に、畜産業の支援や波及効果についても追記させて頂いた）。

・提案適用範囲

Q. 愛知県の労働集約を考えているが、愛知だけで良いのか

A. 確かにそうであるが、まずは愛知から始める。外国人の話も含めて将来的には東海州としての視点なども盛り込んでいければ良い。

(2) 近藤先生講評

資源循環全般では、せっかく CO_2 を県内で減らしたが、どうしても減らせない産業があるから、そこに投資する、という視点もあっても良かったのでは。例えば畜産ではメタン排出は避けられない。人工肉より魅力のある真正肉の生産・ブランド化など、さらに踏み込んだ議論も可能である。

以上

【引用文献】

(1-1) 「2040 年に向けた社会経済の展望」(愛知県)
https://www.pref.aichi.jp/uploaded/life/304733_1153066_misc.pdf

(1-2) 日本の地域別将来推計人口(平成 30(2018)年推計)(国立社会保障・人口問題研究所)
https://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson18/t-page.asp

(1-3) 県税歳入予算・決算
https://www.pref.aichi.jp/soshiki/zeimu/0000026065.html

(1-4) 2018 年度の愛知県内の温室効果ガス排出量について
https://www.pref.aichi.jp/uploaded/attachment/375040.pdf

(1-5) Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP
https://arxiv.org/abs/1906.02243

(1-6) On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030
https://www.mdpi.com/2078-1547/6/1/117

(1-7) JA グループ愛知 https://www.chu.aichi-ja.or.jp/agri/meat/

(1-8) 令和元年度一般廃棄物処理事業実態調査(愛知県)
https://www.pref.aichi.jp/soshiki/junkan/ippai-jittaityousa-r1.html

(1-9) World Energy Model Documentation October 2021, CO2 prices
(IEA/International Energy Agency)
https://iea.blob.core.windows.net/assets/932ea201-0972-4231-8d81-356300e9fc43/WEM_Documentation_WEO2021.pdf

(1-10) あいちビジョン 2020 平成 27 年度版年次レポート あいちレポート 2015
https://www.pref.aichi.jp/kikaku/aichivision2020aichireport/aichivision2020aichireport.html

(1-11) 日本政府観光局、観光立国推進基本計画より
株式会社 YOLO JAPAN 在留外国人アンケート 「YOLO JAPAN」調べ
https://www.yolo-japan.co.jp/news-release/5402

(3-1) メタンガス化施設整備マニュアル(改訂版)(環境省)
https://www.env.go.jp/recycle/waste/3r_network/7_misc/metangasu_full.pdf

(3-2) 第 6 回(平成 30 年度)バイオマス活用推進専門家会議 資料 2ー2(農林水産省)
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_senmonka/pdf/H30senmonkakaigi/02-2_siryo2-2.pdf

(3-3) 第 6 回(平成 30 年度)バイオマス活用推進専門家会議 資料 3(農林水産省)
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_senmonka/pdf/H30senmonkakaigi/03_siryo3.pdf

(3-4) メタンガス化施設の導入検討を支援するための情報サイト(環境省)
http://www.env.go.jp/recycle/waste/biomass/supportinformation.html

(3-5) 微生物燃料電池の廃水処理性能向上、実用レベルに(NEDO)
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100197.html

(3-6) 「微生物燃料電池とは」 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター オンラインマガ

ジン 2016 年 12 月号 循環・廃棄物の豆知識
https://www-cycle.nies.go.jp/magazine/mame/201612.html
(3-7) 「微生物燃料電池の研究動向」 平成 26 年度家畜ふん尿処理利用研究会資料（農研機構）
https://www.naro.affrc.go.jp/archive/nilgs/kenkyukai/files/kachikufunnyo2014_koen10.pdf
(3-8) 「デンソーの C/N の取り組み」第 2 回 メタネーション推進官民協議会 資料 6（経済産業省）
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/002_06_00.pdf
(3-9) ガスのカーボンニュートラル化を実現する「メタネーション」技術（資源エネルギー庁）
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/methanation.html

(4-1) 廃棄物処理技術情報（環境省）
https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/index.html
(4-2) 中長期の気候変動対策検討小委員会（第4回） 資料 4-4 （環境省 環境再生・資源循環局）
https://www.env.go.jp/council/06earth/y0620-4b/mat04_4-1.pdf
(4-3) 車両対策の手引き ―廃棄物分野における温暖化対策―（環境省）
https://www.env.go.jp/recycle/misc/gl_truck/index.html
(4-4) インフラ長寿命化計画（行動計画） 令和 3 年 Ⅳ-1.廃棄物処理施設（環境省）
https://www.env.go.jp/other/infra/infra1.pdf
(4-5) 豊橋市バイオマス資源利活用施設設備・運営事業 基本設計の概要（豊橋市）
https://www.city.toyohashi.lg.jp/secure/28336/kihonnsekkeinogaiyou_saisyuubann2.pdf