

北海道における新たな広域ブロック化に向けた 廃棄物焼却施設配置に関する研究

野見山 漂¹・石井 一英²・落合 知³・石川 志保⁴

¹ 非会員 北海道大学大学院 工学院 修士 1 年 (〒060-8628 北海道札幌市北 13 条西 8 丁目)
E-mail: hyo153819@eis.hokudai.ac.jp

² 正会員 北海道大学大学院教授 環境工学部門 (〒060-8628 北海道札幌市北 13 条西 8 丁目)
E-mail: k-ishii@eng.hokudai.ac.jp

³ 正会員 北海道大学大学院特任助教 環境工学部門 (〒060-8628 北海道札幌市北 13 条西 8 丁目)
E-mail: ochiai.satoru@eng.hokudai.ac.jp

⁴ 正会員 酪農学園大学准教授 農食環境学群 (〒069-8501 北海道文京台緑町 582 番地)
E-mail: shiho@rakuno.ac.jp

全国に比して人口減少率が大きい北海道における廃棄物焼却施設の広域化・集約化が、固定費削減やエネルギー効率向上の点から求められている。本研究では、非線形計画法を用いてコストまたはエネルギー最適化の視点から 2050 年の北海道における人口減少を考慮した焼却施設配置を検討した。コストは、輸送費と焼却施設の建設費・運営費の和、正味エネルギー消費量は、輸送の燃料消費と焼却施設での消費の和とした。2050 年の北海道における一般廃棄物、生ごみ、産業廃棄物、下水汚泥の発生量を推計し、これらの組み合わせで定めた 5 パターンについて、目的関数をコストまたはエネルギーの最小とし、それぞれ検討した結果、最適な焼却施設数は、コスト評価では 8~18 施設、エネルギー評価では 2~7 施設となった。

Key Words: *incinerator, integration, location, optimization, Hokkaido*

1. 序論

日本のごみ処理における課題として、人口減少や 3R 推進等によるごみ減量への対応、地方財政の逼迫、温室効果ガス削減が必要であることが挙げられる。これらの課題に対して、固定費削減、エネルギー効率向上が期待されること、また、廃棄物処理の担い手不足や処理の非効率化等の観点から広域化・集約化が求められている。

北海道は人口減少が予想される中小自治体の数が多く、全 179 市町村中 170 市町村の人口が 10 万人未満であり、各市町村の人口減少率が全国と比べて著しいため、将来の廃棄物の減少が予想される。また、小規模の焼却施設が分散しており、現在の北海道は 24 の広域ブロック、8 の離島・単独ブロックからなっており、45 の焼却施設がある。石井りらによると、その内の 40 施設が 2050 年までに稼働 35 年を迎え、更新が必要であると同時に稼働率 50% 以下となる。よって、北海道のごみ処理には広域化・集約化が強く求められる。しかし、施設の立地場所の確保や更新時期の相違、住民感情について市町村間の調整が困難であり、広域化・集約化は進んでいない。そこで、バックキ

ャスティング的に、2050 年の北海道の焼却施設配置の検討を行い、将来のあるべき姿、また、現在と比べてどのような利点があるのか示す必要がある。

石井りらは、北海道の全市町村を対象とし、災害廃棄物の適正処理を考慮して振興局につき 1 つ以上の焼却施設を置くという制限を設け、2050 年の人口・ごみ量予測に基づき、振興局毎にコスト、エネルギーの観点から焼却施設の数と配置について検討している。

これに対して本研究では、振興局につき必ず 1 つの焼却施設という制限を撤廃し、北海道全体についての検討を行っている。

石井りらは Excel のソルバーによって線形計画法を用いて最適化を行った。Excel では変数セルが 200 個までという制限があり、振興局毎の最適化はこの制限内で可能であるが、北海道全体で行う本研究の場合は変数が 179 市町村×179 市町村で 3 万以上となり、Excel で解くことは不可能である。したがって、本研究では Python 言語のライブラリである Pyomo を用いた。ソルバーは IPOPT (Interior Point OPTimizer) を使った。

以上の研究背景を踏まえて、本研究では研究目的を、非

線形計画法を用いてコストまたはエネルギー最適化の視点から 2050 年の北海道における人口減少を考慮した焼却施設配置を検討する、とした。

2. 2050 年の廃棄物量推計と対象廃棄物の設定

(1) 人口推計

石井¹⁾らは、まず、国立社会保障・人口問題研究所²⁾が推計した 2020～2045 年の 5 年ごとの推計人口を用いて、2050 年の人口＝2045 年の人口＋(2045 年の人口－2040 年の人口)として 2050 年の人口を求め、これを含めた 2020 年～2050 年の 5 年ごとの推計人口から、2020 年～2050 年の 1 年ごとの推計人口を按分によって求めた。

(2) 2050 年の各市町村の焼却対象廃棄物の推計

a) 一般廃棄物

一般廃棄物は一般廃棄物処理実態調査結果³⁾を基に家庭系一般廃棄物と事業系廃棄物に分けて年度ごと、市町村ごとに求めた。家庭系一般廃棄物は各市町村の家庭系一般廃棄物排出原単位^{注2)}と人口^{注1)}を基に式(1)から推計した。原単位は各市町村の過去 5 年の平均値を用いて、各市町村の廃棄物処理計画中の目標値まで減少、その後は一定とした。廃棄物処理計画中に目標値の記載がない市町村は、北海道の廃棄物処理計画^{注3)}の現状値と目標値から求まる原単位削減率を適用した。家庭系一般廃棄物は以上を用いて式(1)から推計した。

$$GW = k \times n^x \times 365 \quad (1)$$

GW：市町村別家庭系一般廃棄物年間発生量 (t/年)

k：市町村別家庭系一般廃棄物排出原単位 (t/day/人)

n^x：x 年度市町村別人口 (人)

事業系一般廃棄物に関しては、観光ごみなどは人口に依存せず予想困難なため現在の発生量と変わらないと仮定した。また、家庭系一般廃棄物、事業系一般廃棄物ともに、ごみ組成は各市町村の過去 5 年の平均組成割合を用いて、今後も変わらないと仮定した。

また、以上を用いて、一般廃棄物の焼却対象ごみを算出した。式(1)で求めた一般廃棄物量の内、現在可燃ごみとして分別され焼却処理されているごみと現在は焼却処理せずに直接埋立されているごみ中の可燃分のごみを焼却対象ごみとし、市町村ごとに 2050 年のごみ量を算出した。石井¹⁾らによる北海道の人口推移と一般廃棄物の焼却対象ごみの推計結果は、図-1 のようになっている。

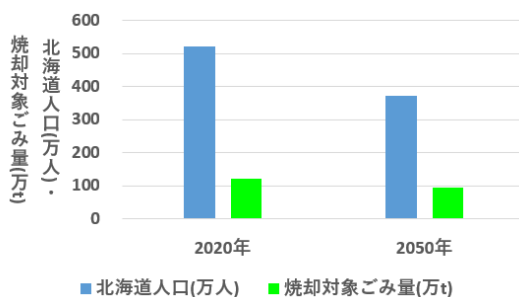


図-1 北海道の人口の推移と焼却対象ごみ量の推計

そして、現在、一般的に生ごみは可燃ごみとして収集・焼却されているが、生ごみは含水率が高く焼却の効率を低下させるという問題や資源循環の必要性を考え、分別によって資源化する必要性が考えられることから、一般廃棄物から生ごみを除いた場合の施設配置も検討することとした。生ごみ量は、生ごみの資源化を現在実施している市町村については 0 とし、資源化を行っていない市町村についてのみ算出した。資源化を行っており、可燃ごみに対する生ごみ割合が算出可能であった美唄市、赤平市、滝川町の割合平均が 29.4%であったことから、生ごみ量は、一般廃棄物の焼却対象ごみに 29.4%を乗じたものとし、これを一般廃棄物の焼却対象ごみから除くことによって算出した。

b) 産業廃棄物

現在、一般廃棄物、産業廃棄物、下水汚泥はそれぞれ別の焼却施設で焼却されている。しかし、ごみ減量による施設稼働率の低下や地方財政の逼迫という問題によって、集約化による固定費の削減、エネルギー効率の向上が期待される混合焼却を考える必要があることから、一般廃棄物＋産業廃棄物、一般廃棄物＋下水汚泥、一般廃棄物＋産業廃棄物＋下水汚泥の場合についての施設配置も検討することとした。

石井¹⁾らは、産業廃棄物の内、年間焼却量が 10000t 以上の汚泥（下水汚泥除く）、廃油、廃プラスチック類、木くず、ばいじんを算出対象とし、焼却量を算出した。振興局ごとの発生量データ^{注4)}と各市町村人口を用いて案分して、事業系一般廃棄物と同様に現在の発生量と変わらないと仮定し、式(2)より算出した。

$$I = I' \times n_{2050} / m \quad (2)$$

I：市町村別産業廃棄物焼却量 (t/年)

I'：振興局別産業廃棄物焼却量 (t/年)

m：振興局別 2050 年度人口 (人)

c) 下水汚泥

石井¹⁾らは、下水汚泥の内、現在焼却処理、セメント化、直接埋立されているものを一般廃棄物との混合焼

却の対象として算出した。また、肥料原料や緑農地利用されている場合は対象外とした。

現在各市町村で発生する下水汚泥量^{注5)}を2050年の将来人口で案分して乾燥量ベースで求めた後、表-1の汚泥性状別の含水率を用いて湿潤ベース量を式(3)より算出した。

$$S = S' \times n_{2050} / n_{2020} / (1-w) \quad (3)$$

S : 市町村別 2050 年度下水汚泥発生量 (t/年)

S' : 市町村別 2020 年度下水汚泥発生量 (t-DS/年)

n₂₀₅₀ : 市町村別 2050 年度人口 (人)

n₂₀₂₀ : 市町村別 2020 年度人口 (人)

w : 汚泥性状別含水率 (-)

表-1 汚泥性状別の含水率

含水率	値
濃縮汚泥	0.98
脱水汚泥	0.75
乾燥汚泥	0.3
生汚泥	0.8

また、農業集落施設、漁業集落施設、合併処理浄化槽において汚水処理を行っている市町村に関しては、脱水汚泥の発生を仮定し、式(4)より下水汚泥量を算出した。下水汚泥（脱水汚泥）発生量原単位は下水汚泥量のデータが入手可能な市町村の平均値を用いた。

$$S = a \times h \times n_{2050} / (1-w) \quad (4)$$

a : 市町村別下水汚泥（脱水汚泥）発生量原単位 (t-DS/人/年)

h : 汚水処理人口普及率 (-) ^{注5)}

(3) 対象廃棄物

以上から、本研究の対象とする廃棄物を①一般廃棄物、②生ごみを除いた一般廃棄物、③一般廃棄物+下水汚泥、④一般廃棄物+産業廃棄物、⑤一般廃棄物+産業廃棄物+下水汚泥の5つとした。また、①~④の2050年の発生量分布を図-2、⑤の2050年の発生量分布を図-3に示す。

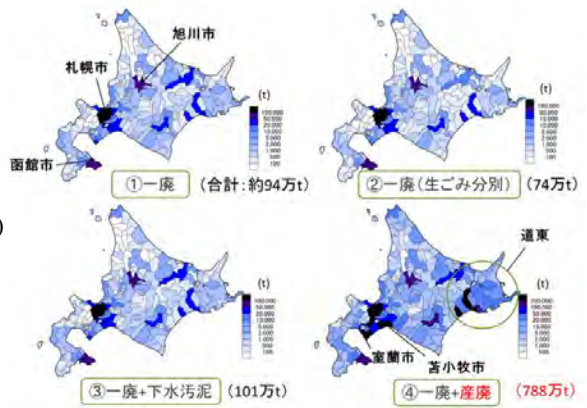


図-2 ①~④の2050年の発生量予測

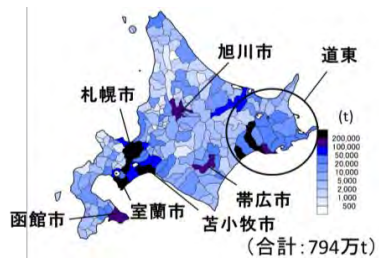


図-3 ⑤の2050年の発生量予測

3. 2050年の廃棄物焼却施設配置の検討

(1) 検討方法

a) 最適化手法

2050年の北海道内の全179市町村を対象として焼却施設配置を検討するにあたり、コストまたはエネルギー量に関する非線形の目的関数の最小化問題を解く必要がある。そのために、Python言語のライブラリであるPyomoを用いて、非線形計画問題を解いた。なお、ソルバーはIPOPT (Interior Point OPTimizer)を使った。

b) 目的関数：コスト

コストは年間費用として、輸送費、焼却施設の建設費、運営費からなっており、石井⁹⁾らの算出方法を参考とした。

輸送費は、各市町村内における収集費は対象外とし、広域輸送費のみ考慮し、式(5)より算出した。

$$TC = b \times L_{a,b} \times X_{a,b} / 10000 \quad (5)$$

TC : 広域輸送費 (万円/年)

b : 広域輸送費 = 300 (円/t/km)

L_{a,b} : a市町村とb市町村間の距離 (km)

X_{a,b} : a市町村からb市町村へのごみ輸送量 (t/年)

焼却施設の建設費、運営費はスケールメリットを考慮した建設単価、運営単価を用い、供用年数 25 年を考慮して式(6)、(7)より算出した。また、建設単価、運営単価それぞれ 900, 600 t/day 以上の施設規模の場合、建設、運営単価は変化しないと仮定した。

$$IC = 21341F^{-0.279} \times F/25 \quad (6)$$

IC: 焼却施設建設費 (万円/年)

F: 焼却施設規模 (t/day)

$$OC = (-5412 \ln F + 36088) \times 365F/10000 \quad (7)$$

OC: 焼却施設運営費 (万円/年)

c) 目的関数: エネルギー

エネルギーは年間正味エネルギー消費量として、輸送の燃料消費と焼却施設での電気及び熱の使用・供給、重油等の燃料消費からなっており、石井¹⁾らの算出方法を参考とした。

輸送の燃料消費は、2tパッカー車による広域輸送を仮定し、式(8)より算出した。

$$E_L = E_{L0}/1000/G \times (L_{a,b} \times 2) \times (X_{a,b}/2) \quad (8)$$

E_L : 広域輸送に伴う燃料消費量

E_{L0} : 軽油発熱量=37.7 (GJ/kL)

G: 車両燃費=4.8 (km/L)

焼却施設での電気及び熱の使用・供給、重油等の燃料消費は、正味エネルギー起源の CO2 排出量原単位に基づき、電気エネルギー換算で式(9)より算出しており、焼却施設での電気・熱・燃料消費量からごみ焼却による発電量を引いたものを表している。よって、負の値の場合、産出エネルギーとなる。また、施設規模が 1800 t/day 以上の場合、排出原単位は変化しないことを仮定している。

$$E_D = (-218 \log F + 606) \times 365F/P \times 3.6/1000 \quad (9)$$

E_D : 広域輸送に伴う燃料消費量

P: 電気の CO2 排出係数=0.55 (t-CO2/kWh)

d) 問題の定式化

焼却施設を置く市町村の集合を I, 北海道の全市町村の集合を J, 2050 年のごみ発生量を W とすると、コスト最小の目的関数と制約は次のように定式化できる。

$$\text{minimize} \quad \sum_{i \in I} \left(\sum_{j \in J} TC_{i,j} + IC_i + OC_i \right) \quad (10)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{i \in I} X_{i,j} = W_j \quad (11)$$

$$F_i = \sum_{j \in J} X_{i,j} \geq 70(\text{t/day}) \quad (12)$$

制約として、施設規模を発電可能な規模である 70 t/day 以上としている。

正味消費エネルギー消費量最小の目的関数と制約は次のように定式化できる。

$$\text{minimize} \quad \sum_{i \in I} \left(\sum_{j \in J} E_{L_{i,j}} + E_{D_i} \right) \quad (13)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{i \in I} X_{i,j} = W_j \quad (14)$$

e) 検討手順

以上をふまえて、本研究における最適化手法を用いた検討手順について説明する。Python の非線形計画を扱うことができる Pyomo の ipopt ソルバーを用いて、まず施設数を 1 つとし、ごみ発生量、距離データを入力し、コストまたはエネルギー最小化として、道内のある 1 つの市町村に施設を置いた場合の最適化を 179 市町村に対して行う。そして、最小となった 1 つの市町村に施設を置くことを前提として施設数を 2 つとし、先程の操作を繰り返して 2 つ目の施設位置を決定し、施設数を 3 つとする、というようにして最小の施設数、配置がわかるまで繰り返す。ただし、施設数を増やす際に、前提となっている施設の場所にごみ量の少ない市町村を含む場合、その市町村を前提から除き、代わりに近隣のごみ量の多い場所へ変更した方が目的関数が小さくなるという場合は前提を変更する。また、施設規模は発電可能規模の 70 t/day 以上という制限を設けた。

(2) 結果と考察

a) コスト最適化

以上のようにして求めた①一廃, ④一廃+産廃の焼却対象ごみを対象とした施設数ごとの最小コスト推移を図-4、図-5、発電可能な施設規模の 70 t/day 以上という制約下でのコスト最小の施設配置とブロック分けを図-6、図-7 に示す。

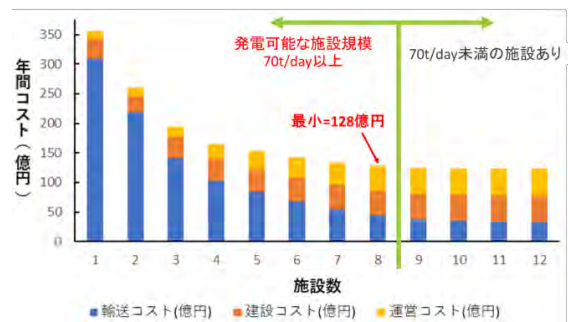


図-4 最小コスト推移 (一廃)

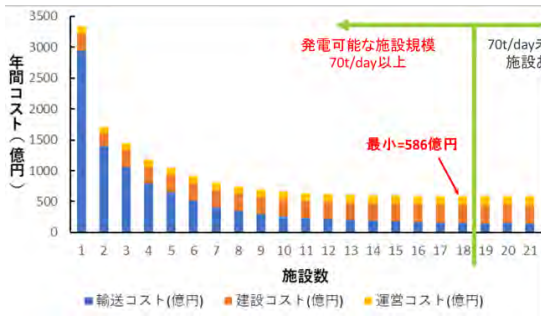


図-5 最小コスト推移 (一廃+産廃)

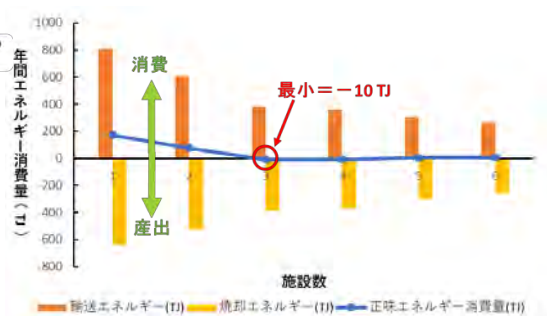


図-8 最小エネルギー消費量推移 (一廃)



図-6 コスト最小の施設配置とブロック分け (一廃)

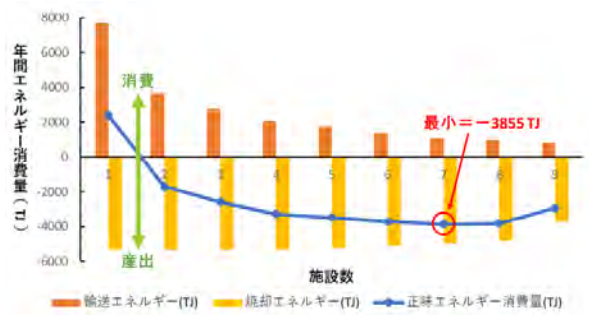


図-9 最小エネルギー消費量推移 (一廃+産廃)



図-7 コスト最小の施設配置とブロック分け (一廃+産廃)

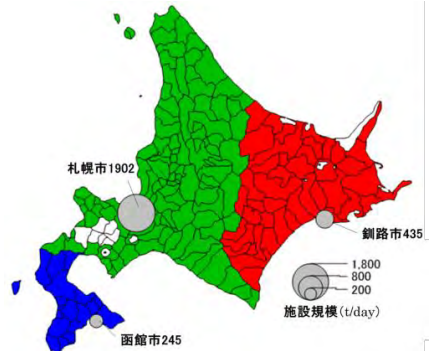


図-10 エネルギー消費量最小の施設配置とブロック分け (一廃)

①一廃, ②生ごみを除いた一廃, ③一廃+下水汚泥は 8 施設で同じブロック分け, ④一廃+産廃, ⑤一廃+下水汚泥+産廃は 18 施設で同じブロック分けになった。また, 最小コストは, 対象廃棄物①~⑤の順に 128, 108, 135, 586, 591 億円/年になった。

b) エネルギー最適化

①一廃, ④一廃+産廃の焼却対象ごみを対象とした施設数ごとの最小エネルギー消費量推移を図-8, 図-9, エネルギー消費量最小の施設配置とブロック分けを図-10, 図-11 に示す。

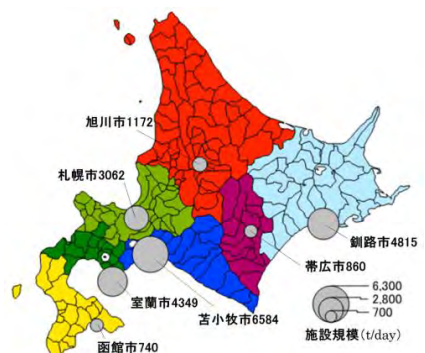


図-11 エネルギー消費量最小の施設配置とブロック分け (一廃+産廃)

②生ごみを除いた一廃は2施設, ①一廃, ③一廃+下水汚泥は3施設で同じブロック分け, ④一廃+産廃, ⑤一廃+下水汚泥+産廃は7施設で同じブロック分けとなった。最小の正味消費エネルギー量は, 対象廃棄物①～⑤の順に-10, 49, -18, -3855, -3897TJ/年になった。

4. 結論

(1) 結論

本研究では, 2050年の人口減少を考慮した北海道における焼却施設配置について検討した。その結果, 現状の45施設から, コスト最小では, ①一廃, ②生ごみを除いた一廃, ③一廃+下水汚泥は8施設, ④一廃+産廃, ⑤一廃+産廃+下水汚泥は, 18施設となった。エネルギー消費量最小では, ②は2施設, ①, ③は3施設, ④, ⑤は7施設となった。また, 産廃との混焼がエネルギー産出に大きな寄与をもたらすことを示した。

(2) 今後の課題

- ・生ごみ自体の処理に関するコスト、エネルギーの考慮
- ・プラスチックを除いた場合の焼却施設配置の検討
- ・中継施設の設置により輸送効率を向上させ、さらなる集約化を考えた場合の施設配置の検討

(3) 最適化方法について

本研究では多段階決定を用いて最適化を行ったが, この方法では初期に損をして後に大きい利益を得られる

場合を考慮できず, 最適解を得られる保証がない。そこで, 遺伝的アルゴリズムを用いて確率的アプローチによってより良い解を求めることができるか, また, 動的計画法によって効率的に全数検査を行って最適解を探すことができるのか等検討する必要がある。そして, 本研究では2050年時点の最適化を行ったが, 2050年前後で段階的に広域化を行っていくような時間軸を考慮した最適化も検討する必要がある。

NOTES

- 注1) 国立社会保障・人口問題研究所
- 注2) 環境省 一般廃棄物処理実態調査結果 平成30年度調査結果
- 注3) 「北海道廃棄物処理計画」(第5次)
- 注4) 北海道産業廃棄物処理状況調査の結果について(平成30年度(2018年度))
- 注5) 北海道の下水道2018

REFERENCES

- 1) 石井一英, 高橋恵介: 2050年の人口減少後の北海道における焼却処理施設の広域化・集約化に関する研究, pp. 103-104, 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会 講演原稿 2021. [Ishii, K. and Takahashi, K.: Research on expansion and integration of incineration facilities in Hokkaido after the population decrease in 2050, pp. 103-104, Speech manuscript 2021, Japan Society of Material Cycles and Waste Management.]

(Received March 28, 2022)

(Accepted August 22, 2022)

STUDY ON LOCATION OF WASTE INCINERATION FACILITIES FOR NEW INTEGRATION OF MUNICIPALITIES IN HOKKAIDO

Hyo Nomiya, Kazuei Ishii, Satoru Ochiai and Shiho Ishikawa

Scaling up and integrating waste incineration facilities in Hokkaido, where the population decline rate is larger than the other prefectures, are required in terms of reduction of fixed costs and improvement of energy efficiency. In this study, we considered the location of waste incineration facilities in Hokkaido in 2050 from the viewpoint of cost or energy optimization using a nonlinear programming method. The cost was defined as the sum of the transportation cost, and the construction and operation costs of the incineration facility. Net energy consumption was the sum of fuel consumption for transportation and consumption at the incineration facility. Estimating the amount of municipal waste, food waste, industrial waste, and sewage sludge generated in Hokkaido in 2050, and examining the five cases defined as a combination of these, for the minimum cost, the number of facilities was 8~18. On the other hand, for the minimum energy consumption, the number of facilities was 2~7.