

# 地球温暖化対策になる発電方法

---

情報工学系 橋本龍徳

# 目次

---

- 地球温暖化のいま
- 問題解決の流れ
- 目標設定過程
  - 温暖化問題解決の基準の設定
- 代替案発想過程と合理的判断過程
  - 目標達成のための方法とその妥当性の検討
- 最適解導出過程
- 合意形成過程

# 授業の目標

- 今まで学んできた数学や他教科の知識を思い出して、これからの問題解決に使うことができる。
- 数学的な見方・考え方を用いて、数値データや数式の主張することを日常的事象において説明できる。
- 自分が行った方法をより良くする方法を提案できる。
- 日常生活においても、「問題解決の縦糸・横糸モデル」が適用できそうな場面を見出せるようになる。



# 導入

---

# 地球温暖化問題

- 地球温暖化が問題視
- 対策の必要性が叫ばれる
- たくさんの実害 (次ページ)
- SDGsの目標の必要性
  - 13, 14, 15





# 気候変動による天災



雨により浸水した倉敷市の街並み(2018年7月8日撮影) 写真/時事

2018年 倉敷市豪雨

- 西日本豪雨
- 温暖化による豪雨
- バックウォーター
- 死者61名

出典：ウェザーニュース



# 気候変動による天災



出典：NHK

2023年 ブラジル北部干ばつ

- アマゾン川とその支流で大規模干ばつ
- 生態系の崩壊
- 海水温上昇が原因か

# 地球温暖化抑制の方法

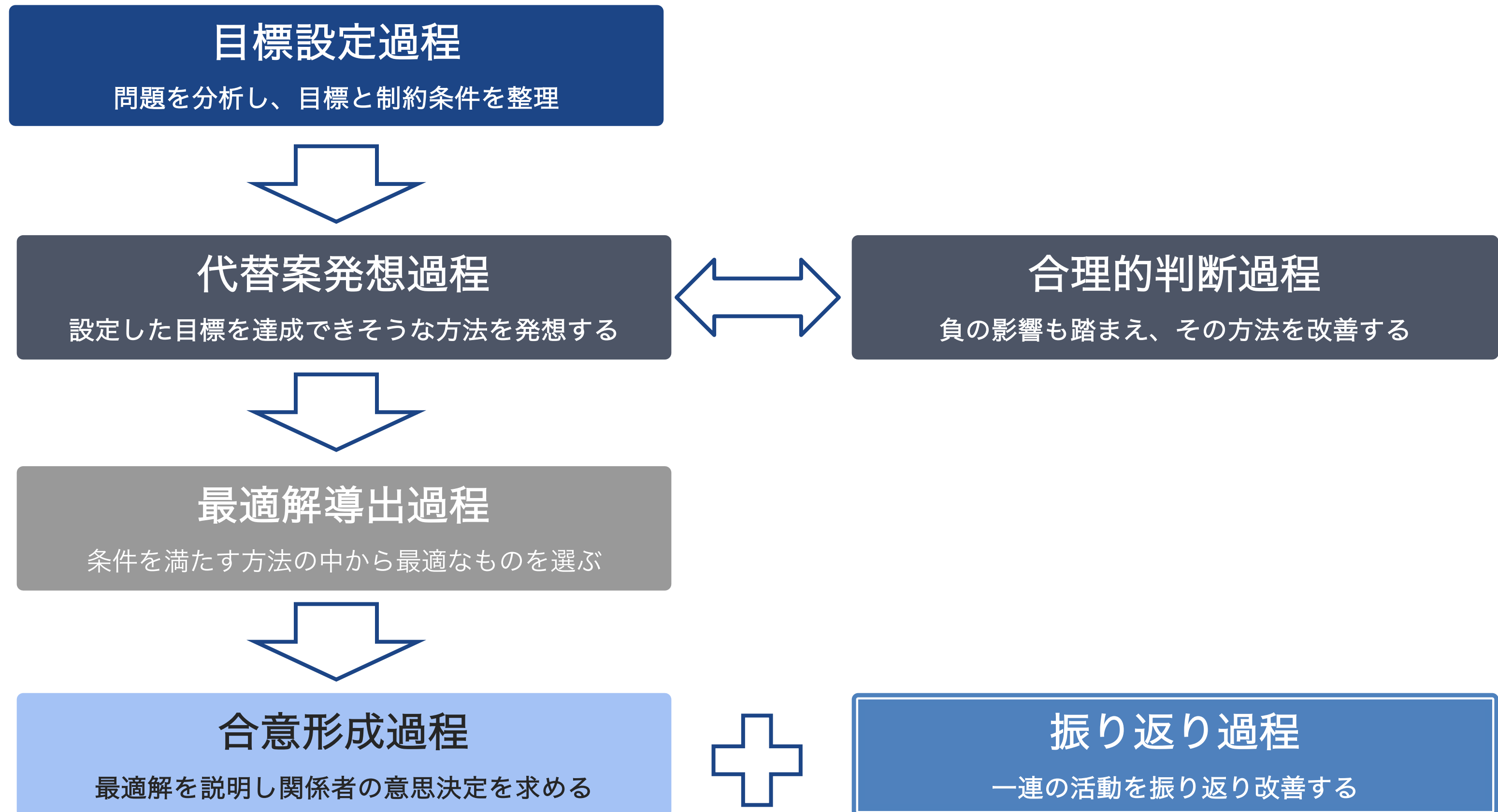
- SDGsの観点から地球温暖化を防止する方法を検討する必要がある
  - 現在地球温暖化の原因として特にとりだ足されるのは発電によるCO<sub>2</sub>など
  - 昨今、地球温暖化対策としてカーボンニュートラルな（CO<sub>2</sub>の出ない）発電方法が提案されている
  - しかし、こうした地球温暖化対策として行われている発電方法は、本当に効果があるのだろうか？
- 実際に考えてみよう！



# 問題解決の流れ

---

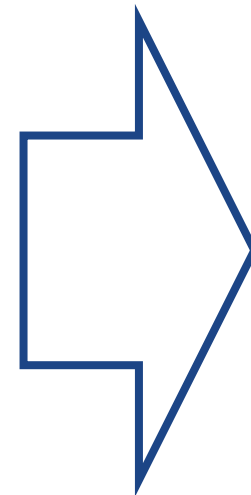
# 問題解決の流れ（縦糸・横糸モデル）の縦糸



# 問題解決の流れ（縦糸・横糸モデル）の横糸

## 収集

必要な情報を集める



## 処理

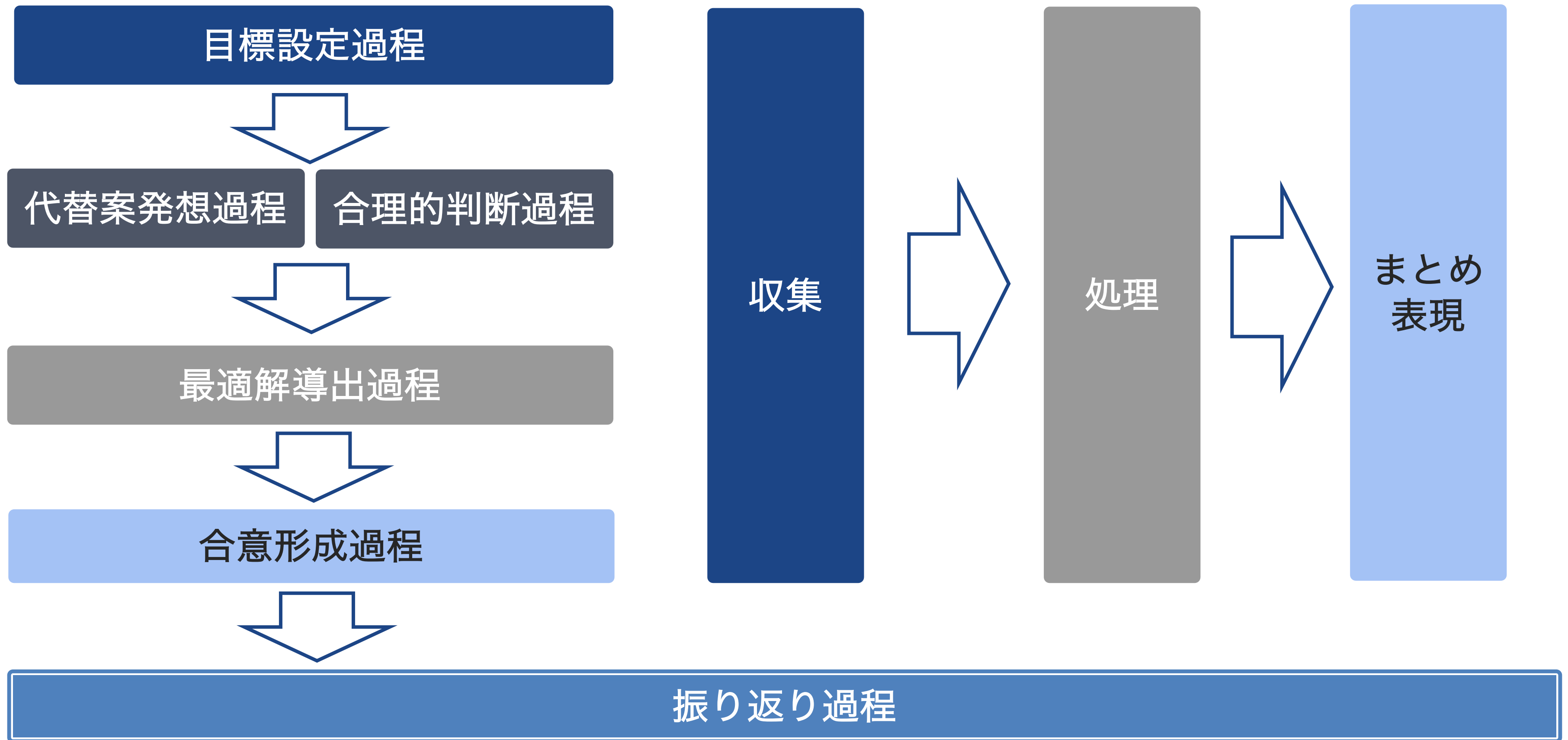
集めた情報から必要な情報を取り出し分析する



## まとめ・表現

収集・処理した情報から分かったことをまとめてアウトプットする

# 問題解決の流れ（縦糸・横糸モデル）

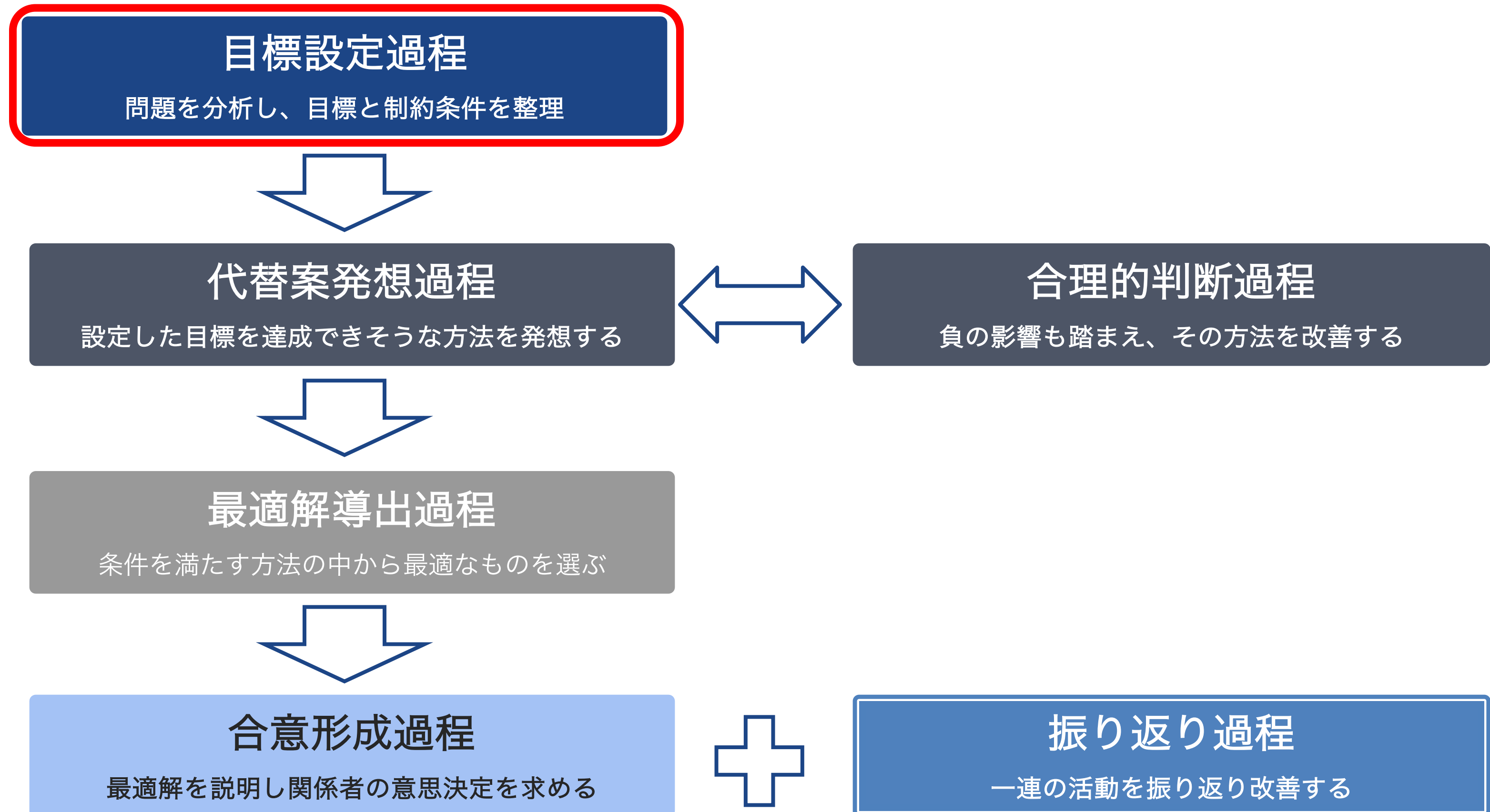




# 問題解決 - カーボンニュートラル

---

# 問題解決の流れ（縦糸・横糸モデル）の縦糸



# 地球温暖化の原因

## ●国連の見解

- 地球温暖化の原因はCO<sub>2</sub>出と温室効果ガス排出
- よってカーボンニュートラル（炭化物排出ゼロ）が重要

## ●日本政府

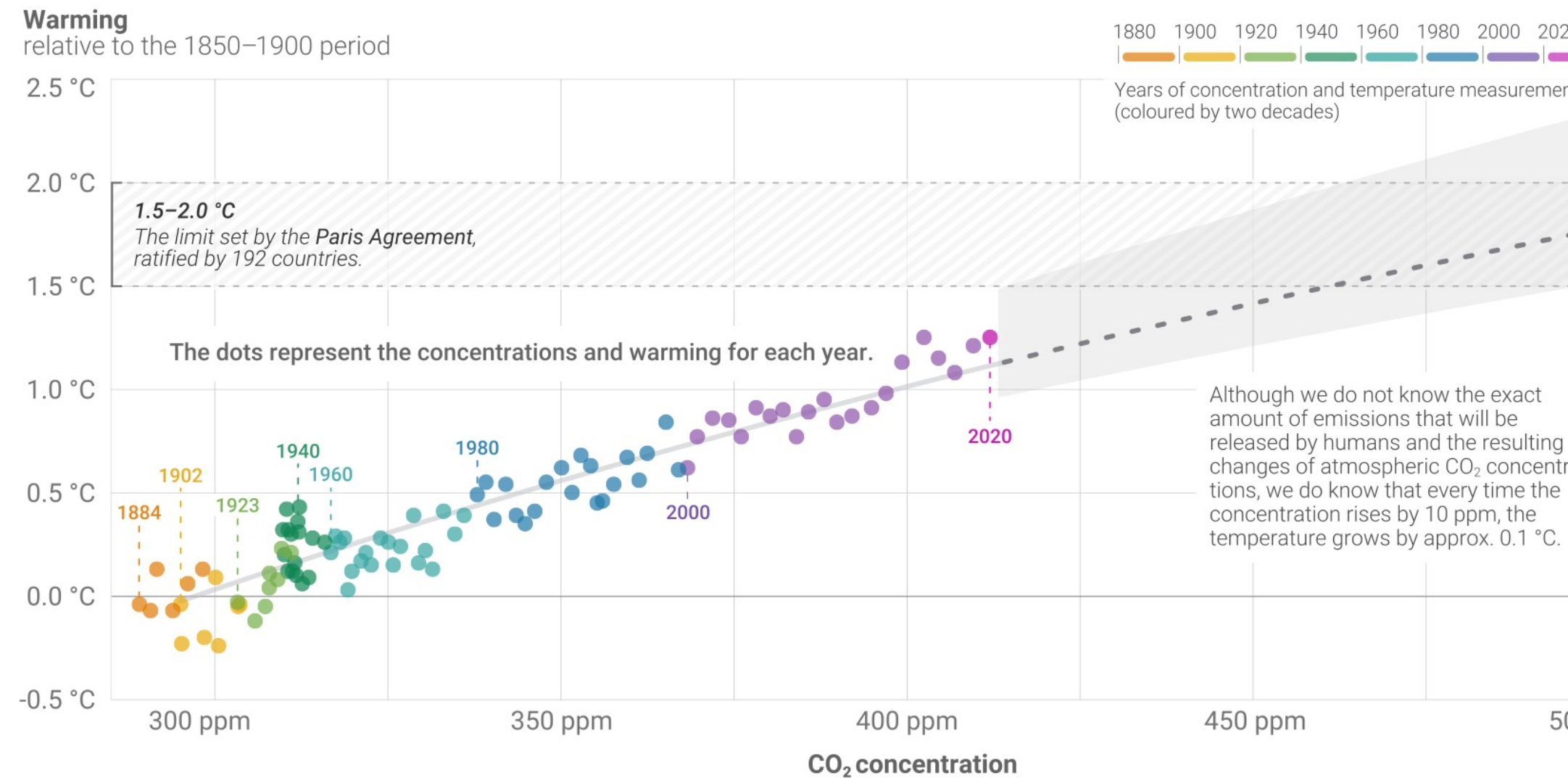
- カーボンニュートラルに向け原子力発電の割合増加を目指す

## ●その他の国の政府

- アメリカ政府も同様の見解
- フランス政府は現在6割以上が原子力発電を利用

# 温暖化解決の鍵

- 温暖化の原因はCO<sub>2</sub>である
- CO<sub>2</sub>増加により気温上昇
- 相関係数はおおよそ  
 $r \approx 0.92$ 。
- 二酸化炭素排出を減らせば温暖化は防げる
- 二酸化炭素を最も排出する火力発電を置き換えれば良い！



CO<sub>2</sub> concentration is measured in ppm (parts per million). The CO<sub>2</sub> concentration of 400 ppm means that one million of air molecules contains 400 molecules of CO<sub>2</sub>. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) contributes to global warming more than any other greenhouse gas: the greenhouse effect is intensifying and 70% of this change is caused by

VERSION 2022-05-12 LICENCE CC BY 4.0

Read more at [factsonclimate.org/concentration-warming-relationship](https://factsonclimate.org/concentration-warming-relationship)

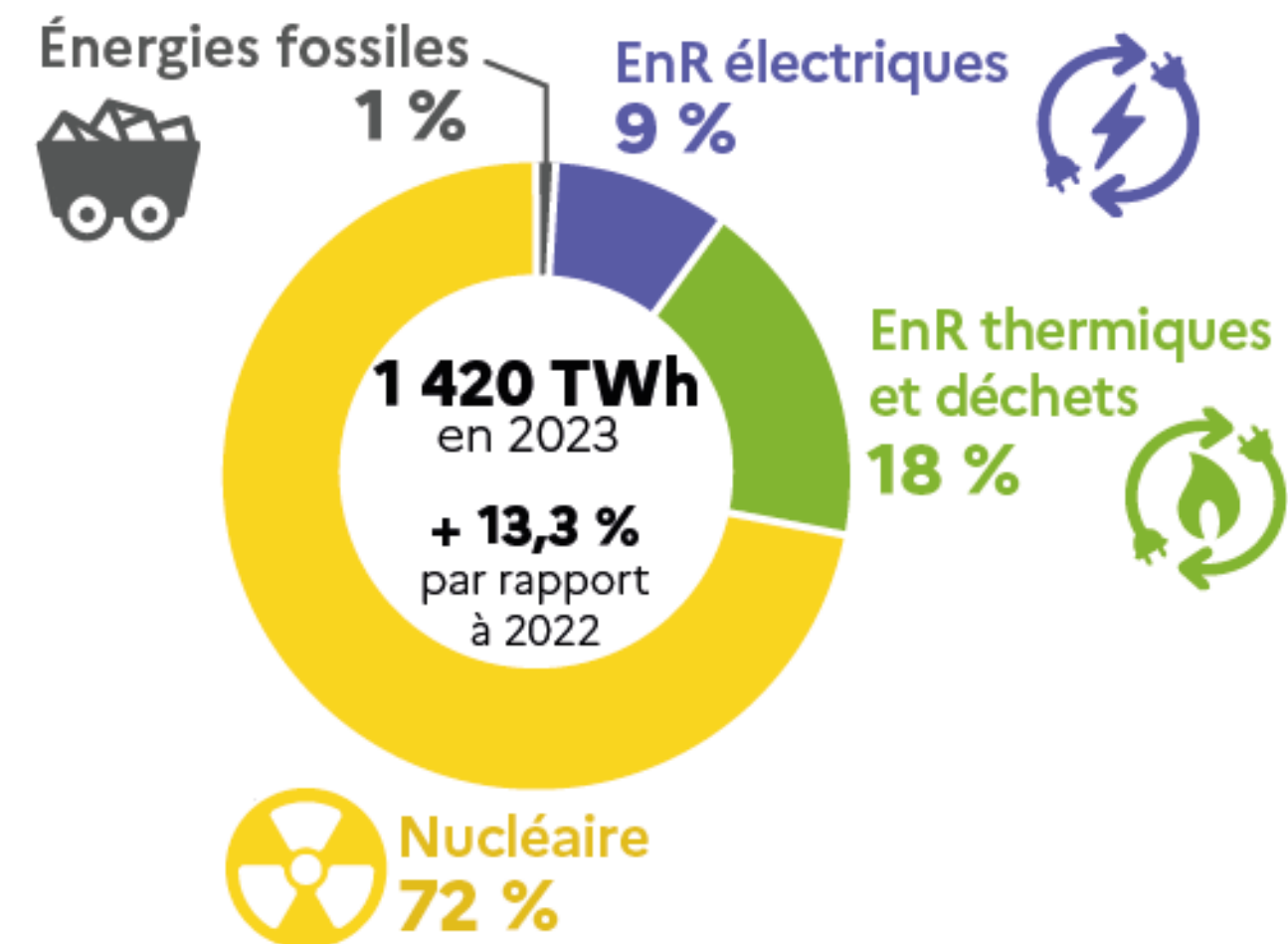
Data source: NOAA, NASA Goddard Institute for S



# フランスの電源供給割合

- 2023年フランスの電力供給源
  - 7割以上が原子力
- 政府政策として、
  - la France va devoir produire plus d'électricité décarbonée.  
「カーボンニュートラルな発電を推し進める」
  - 原子力発電と再生可能エネルギー
- 地球温暖化対策に貢献している（と主張）

## Production primaire d'énergie en 2023



EnR = l'énergie renouvelable  
(再生可能エネルギー)

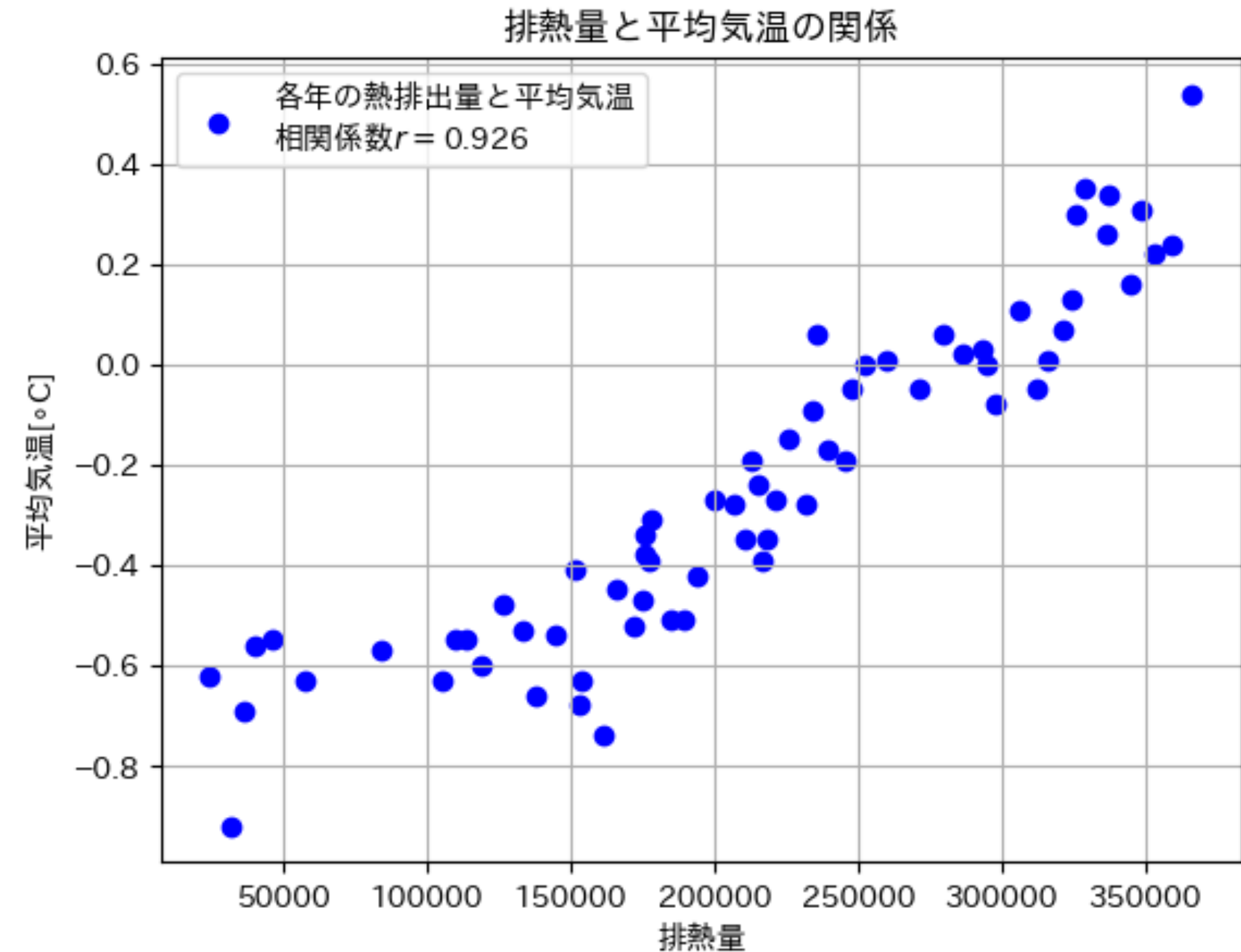
# 温暖化解決の鍵？

- 原因は必ずしもCO<sub>2</sub>か？
  - 相関係数は高いが、それは因果関係か？それとも擬似相関か？
  - 因果関係だとしたら、どういう因果関係か？
- CO<sub>2</sub>排出を減らすだけで解決する問題なのか？
  - たいていの問題は複合要因
  - CO<sub>2</sub>だけ対処して解決するか？
  - いまのカーボンニュートラル政策は意味があるのか？

# 排熱量と気温の関係

## ●排熱量を横軸、平均気温を縦軸にプロット

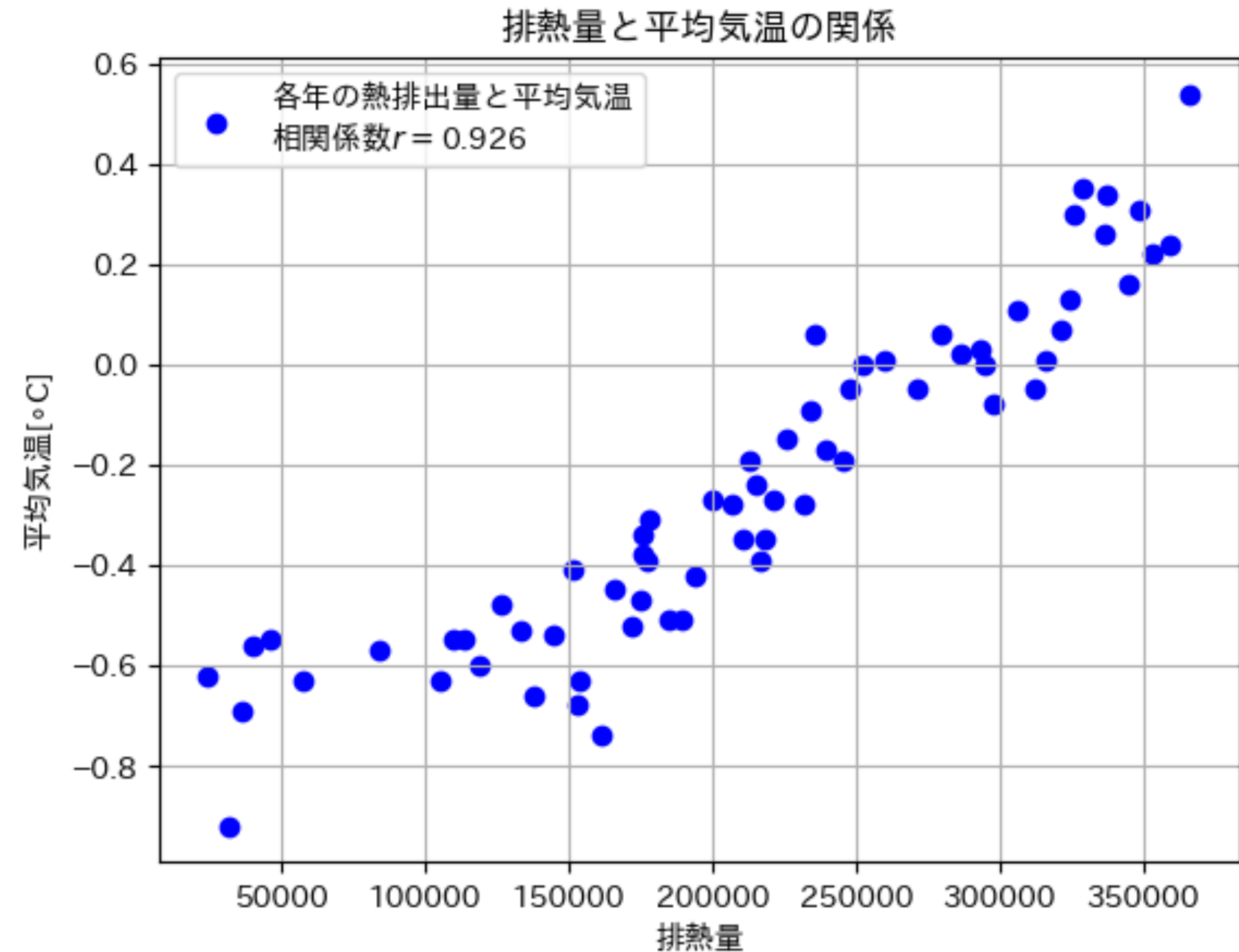
- ここでは単純に排熱量は発電量に比例すると仮定した
- 実際、火力発電の占める割合大から大きな問題はない（後で考察する）



気象庁のデータとOur World in Dataのデータセットから作成

# 排熱量と気温の関係

- 排熱量を横軸、平均気温を縦軸にプロット
  - ここでは単純に排熱量は発電量に比例すると仮定した
  - 実際、火力発電の占める割合大から大きな問題はない（後で考察する）
- 相関係数は  $r = 0.926$
- 明らかな正の相関がある
- 熱の放出も地球温暖化の原因である可能性があるのでは？



気象庁のデータとOur World in Dataのデータセットから作成



# 検討する課題



- 地球温暖化の原因は必ずしもCO<sub>2</sub>か？
  - 相関係数は高いが、それは因果関係か？それとも擬似相関か？
  - 因果関係だとしたら、どういう因果関係か？
- そもそも温暖化する原因は熱の放出ではないか？
  - 熱くなるためには熱が関係していると考えるのは自然
  - 相関係数も大きい
- これらの視点から現在の世界/政府の施策は意味があるか？
  - 今回はカーボンニュートラル実現に向けて大規模な取り組みを行なっているフランスの政策について検討する

# フランスの発電量内訳 (1971～)

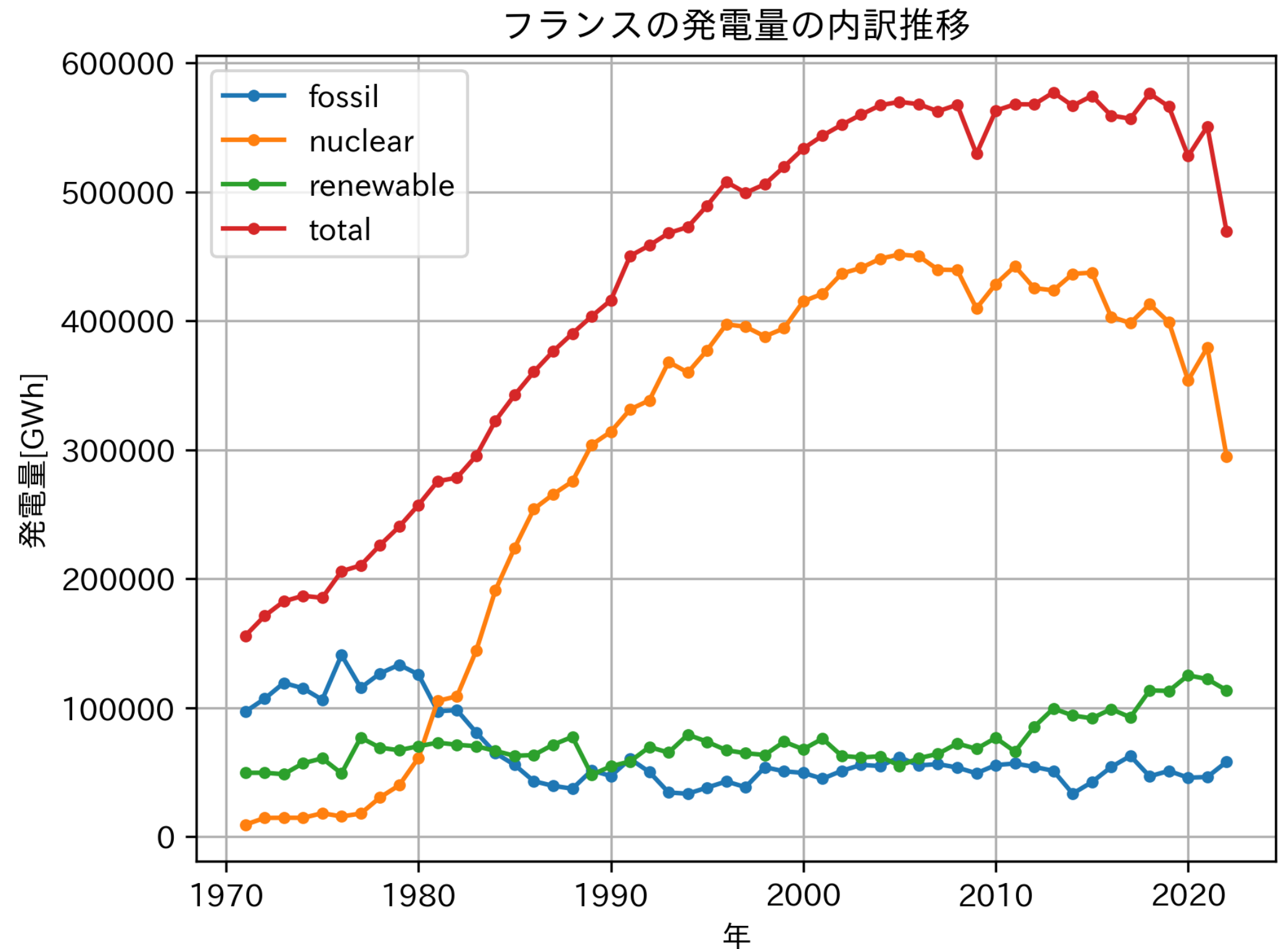
## ●フランスの発電量内訳

■1971～2022 年

## ●原子力発電の割合大

## ●そもそも発電量の大幅増加

## ●2020年以降減少しているのはCOVIDの影響？

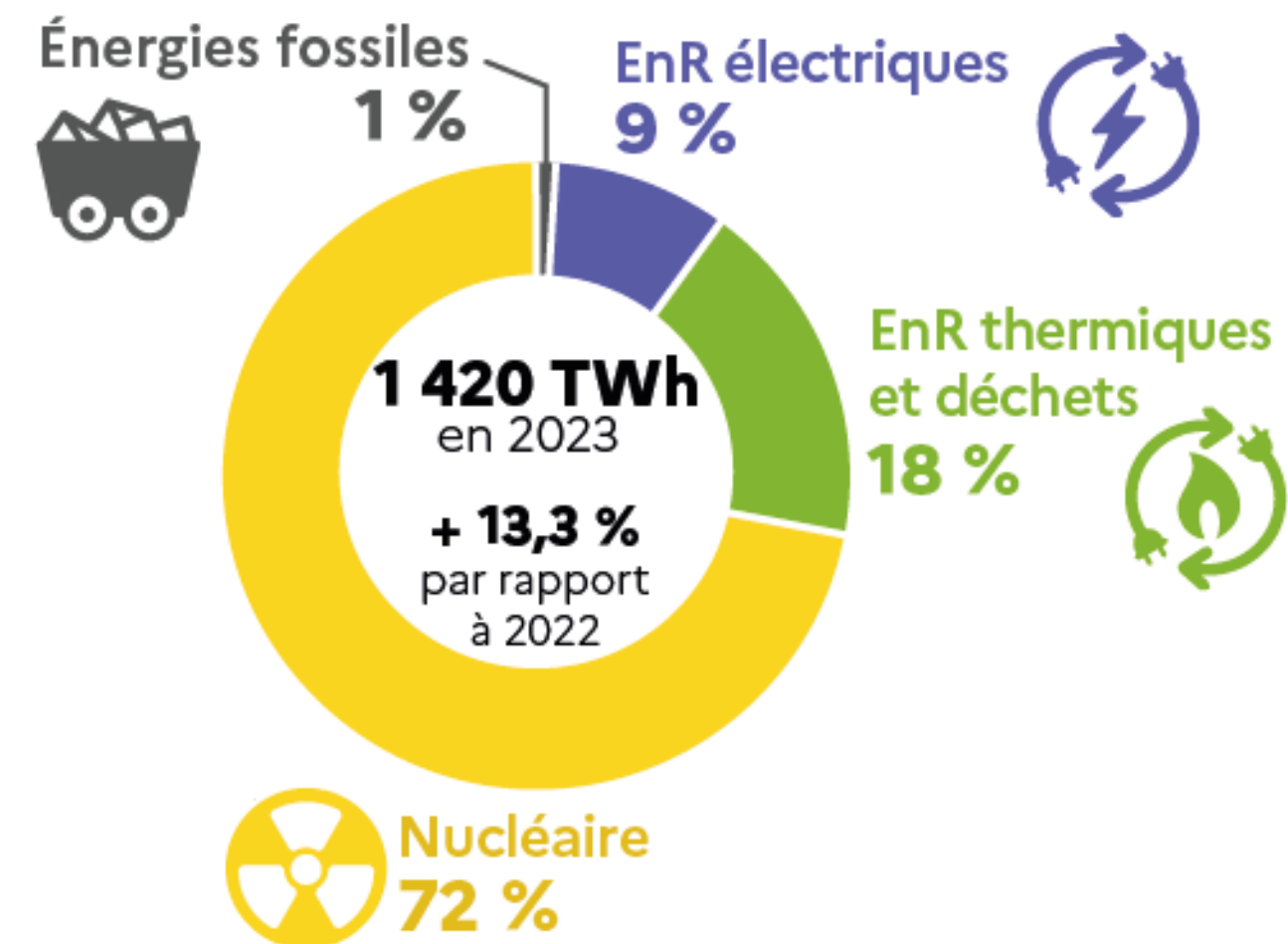


IEAのデータセットから作成

# フランスの電源供給割合

- 2023年フランスの電力供給源
  - 7割以上が原子力
- 政府政策として、
  - la France va devoir produire plus d'électricité décarbonée.  
「カーボンニュートラルな発電を推し進める」
  - 原子力発電と再生可能エネルギー
- 地球温暖化対策に貢献している（と主張）

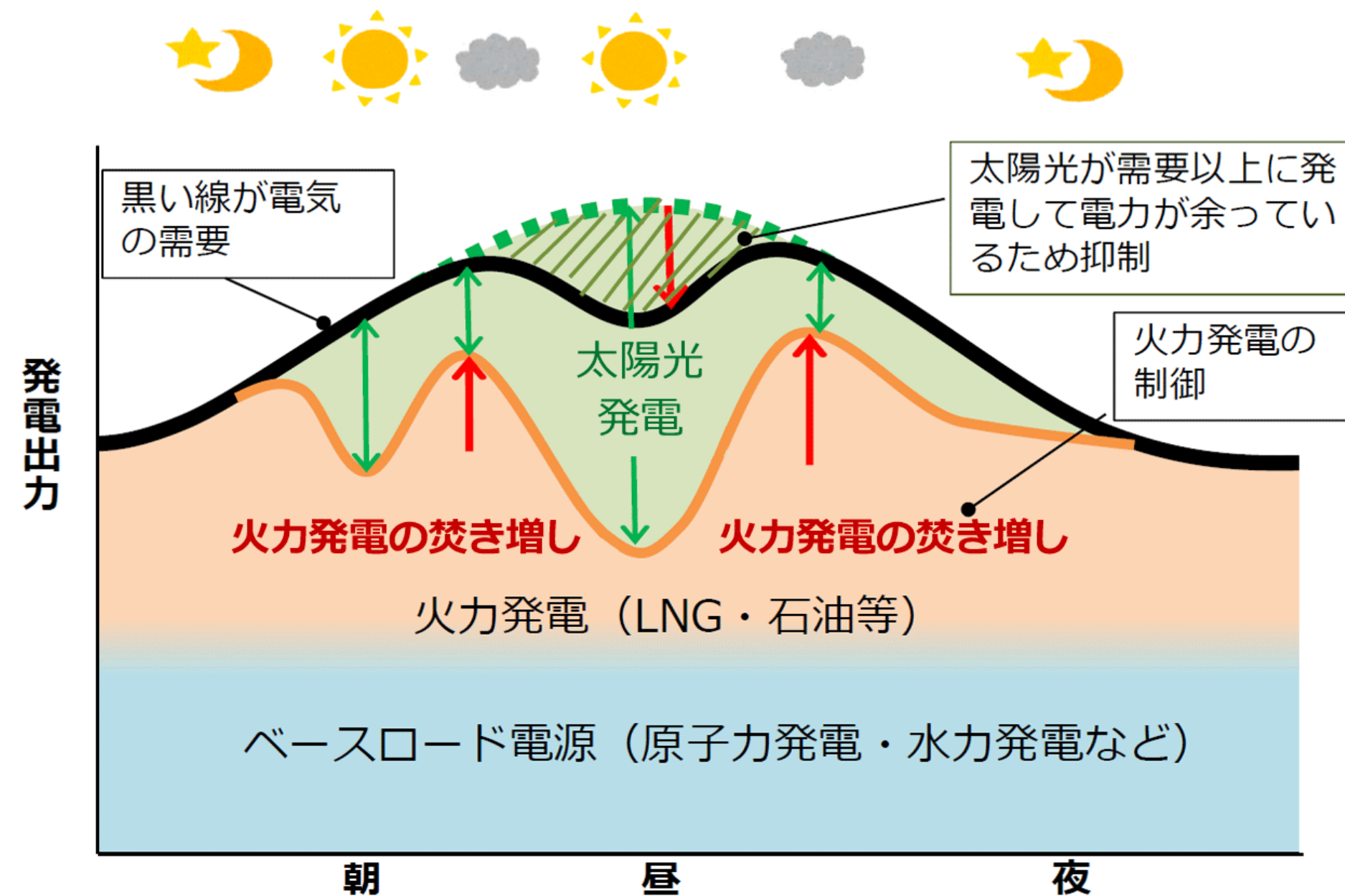
## Production primaire d'énergie en 2023



EnR = l'énergie renouvelable  
(再生可能エネルギー)

# 異なる電力源を組み合わせることの必要性

- 太陽光や風力は出力が急変動する
  - ⇒ 需給バランスが崩れると大停電（ブラックアウト）を起こす
  - ⇒ 即応性の高い火力や蓄電池で出力調整しバランスを保つ





# 地球温暖化対策としての評価基準

- 制約条件

- 安全に利用できる
- 安定的に電力を供給できる

- 地球の気温の急激な上昇が抑えられる

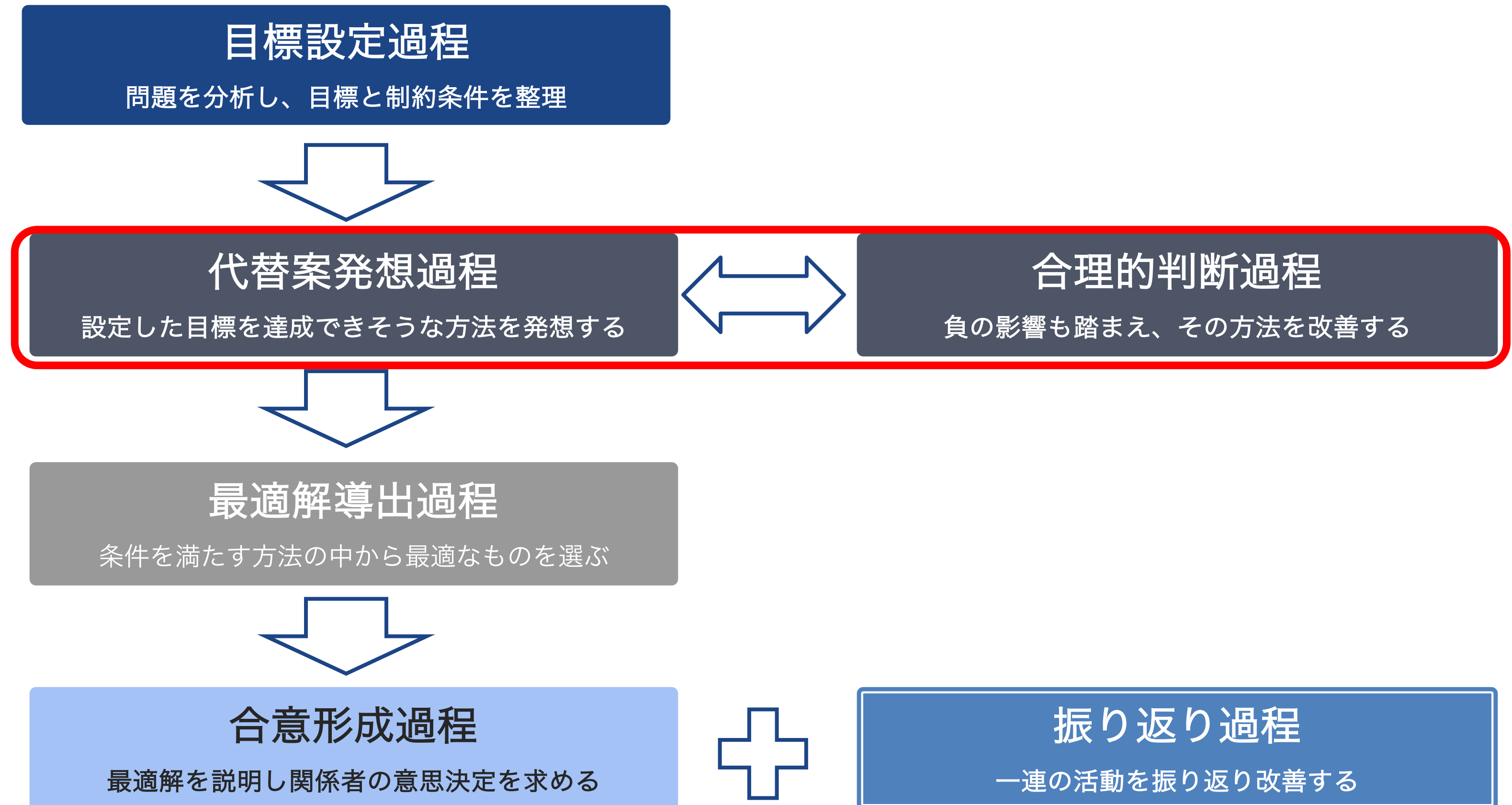
- 原因がわからなければ対策できないから、原因を探ろう

- その対策は実現可能である

- 副作用がないか

- その対策による悪影響はないか（普通は何かしらの悪影響がある）
- 悪影響が避けられない場合は、得られるメリットと悪影響のトレードオフ関係を精査する

# 問題解決の流れ（縦糸・横糸モデル）の縦糸



# 代替案発想過程

今回は次の3つの代替案を考える

1. 原子力発電を推進してカーボンニュートラルを目指す
  - カーボンニュートラルによって地球温暖化が抑制できる
2. 従来の火力発電を続け、電力使用量を減らす
  - 従来の発電量を少し下方修正することによって考える
3. 全て再生可能エネルギーでまかなう
  - CO<sub>2</sub>実質排出ゼロ、必要なエネルギーもリサイクル品でエコ

# 合理的判断のための知識の確認

---

# 物理基礎の知識

---

# 熱効率

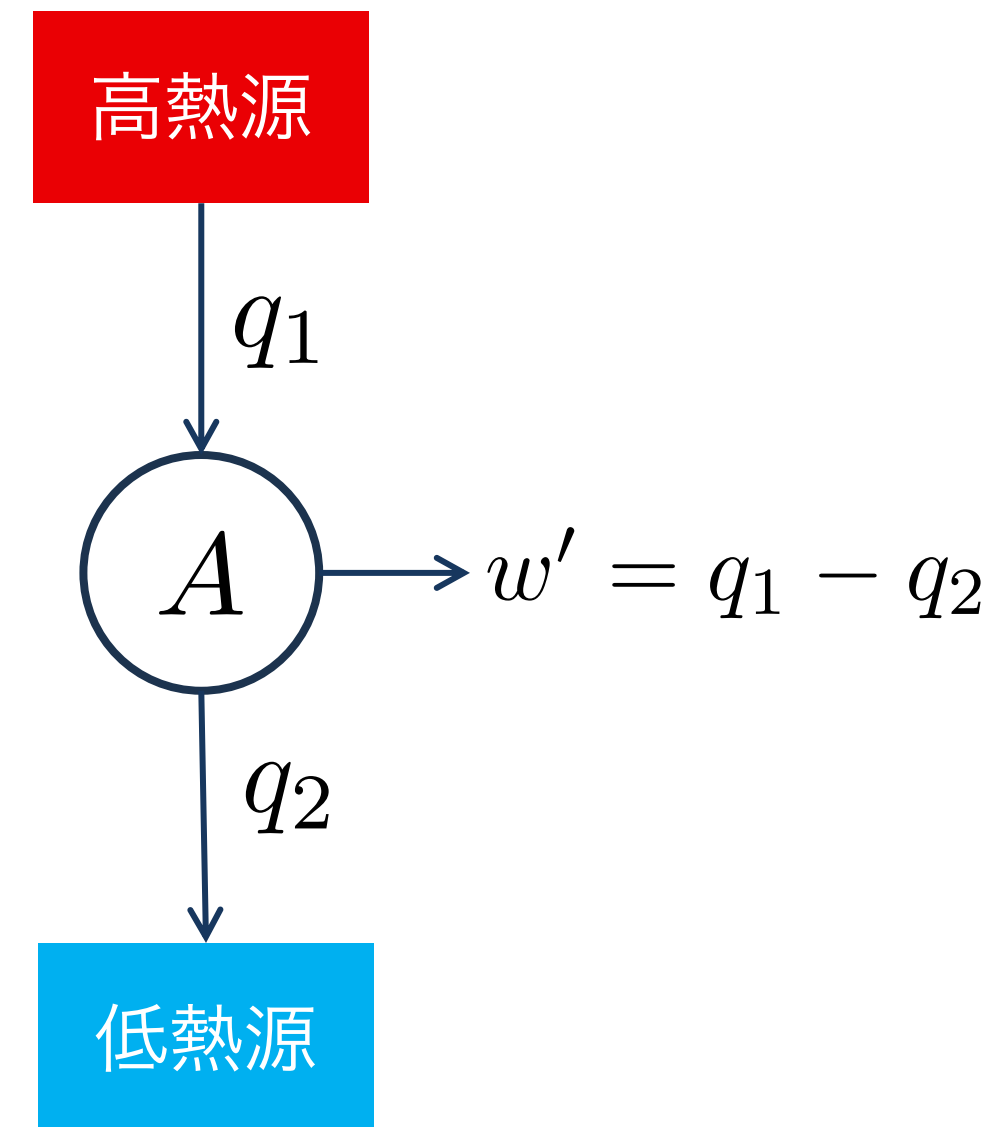
- 熱機関とは、熱を仕事今回は電気に変える装置

- 熱機関の効率  $e$  は

$$e = \frac{w'}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$$

- ここでの仕事  $w'$  は発電量に対応

- 正確には仕事を使って発電する





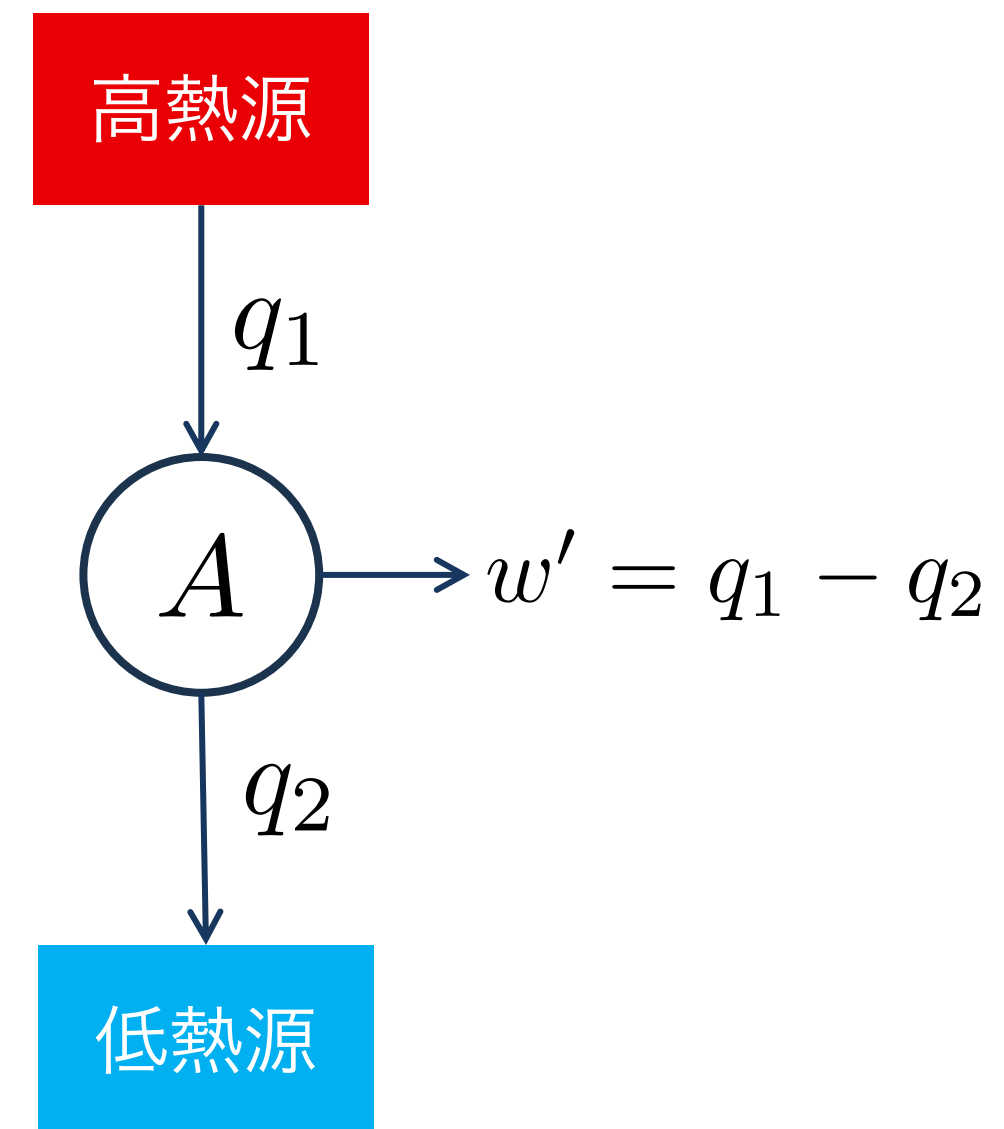
# 熱力学第二法則

## トムソンの原理

- 熱機関において、**すべての熱を仕事に変えることはできない**

■ 注. 熱力学第二法則にはさまざまな表現方法があるが、どれも意味するところは同じ（同値）である

- つまり、熱効率  $e < 1$
- 今回でいえば、どんなに頑張っても、無駄のない発電はできないということ！



# 数学Iの知識

---

# 関数（とグラフ）

- 2つの変数  $x, y$  があって、 $x$  が決まると \_\_\_\_\_ とき、  
 $y$  は  $x$  の関数である
- これを  $y = f(x)$  と書いた。
- 例えば、次のようなものなどがあった

$$f(x) = 2x - 1$$

$$f(x) = x^2 - 2x + 1$$

# 関数（とグラフ）

- 2つの変数  $x, y$  があって、 $x$  が決まると  $y$  がただ一つに決まるとき、 $y$  は  $x$  の関数である
- これを  $y = f(x)$  と書いた。
- 例えば、次のようなものなどがあった

$$f(x) = 2x - 1$$

$$f(x) = x^2 - 2x + 1$$

# 相関係数と事象の関係

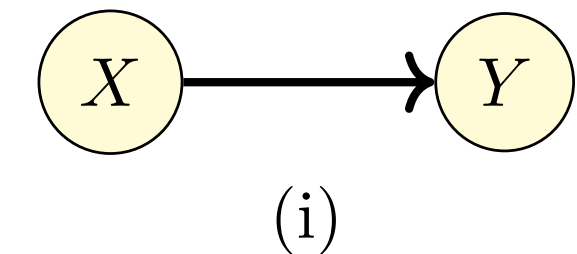
---

- 相関係数が高い(相関関係がある)からと言って、二つに因果関係があるとは限らない
- 相関係数が高いとき、次のような関係が考えられる

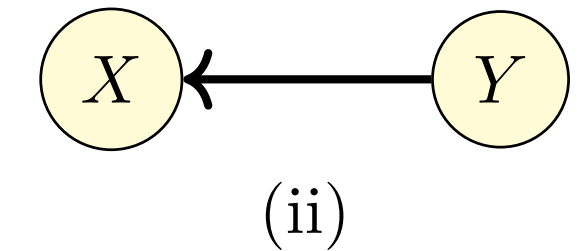
# 事象同士の関係

事象 $X$ と事象 $Y$ に相関があるとき、次のような関係がある。

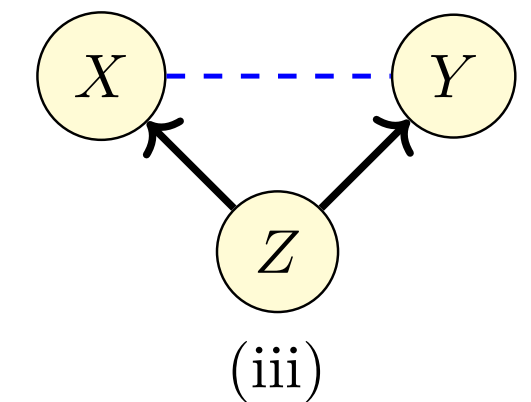
i. 因果関係：事象 $X$ が事象 $Y$ を発生させる



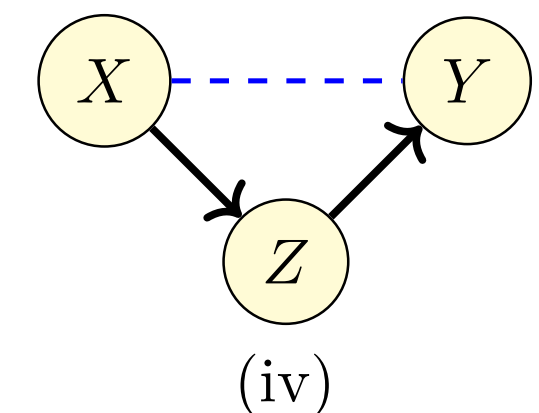
ii. 因果関係：事象 $Y$ が事象 $X$ を発生させる



iii. 擬似相関：別の事象 $Z$ が事象 $X$ と $Y$ を発生させる



iv. 間接相関：事象 $X$ が別の事象 $Z$ を発生させ、  
 $Z$ が事象 $Y$ を発生させる





# 今回の因果関係と擬似相関, 命題と論理

- 二酸化炭素が増えた  $\Rightarrow$  地球温暖化が進んだ ?
  - 地球温暖化が進んだ  $\Rightarrow$  二酸化炭素が増えた ?
- } 因果関係

■ヘンリーの法則から、気体(CO<sub>2</sub>)は温度が上がれば水に溶けにくい

■つまり、海水に溶けていたCO<sub>2</sub>が出てきた?

- 排熱量が増えた  $\Rightarrow$  地球温暖化が進んだ  $\Rightarrow$  二酸化炭素が増えた ?

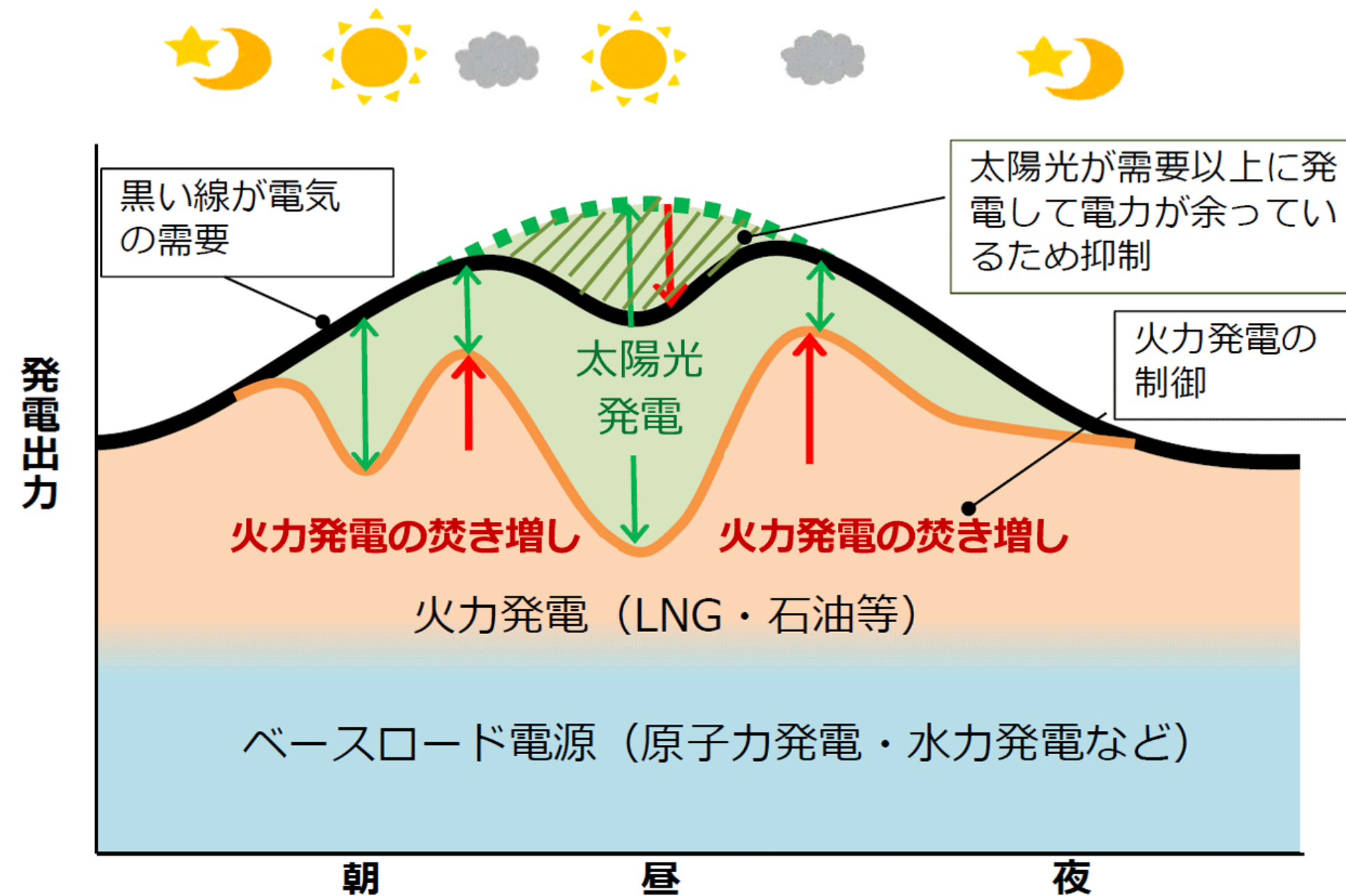
一体どの関係にあるのだろうか? 間接相関

# 合理的判斷過程

---

# 異なる電力源を組み合わせることの必要性

- 太陽光や風力は出力が急変動する
  - ⇒ 需給バランスが崩れると大停電（ブラックアウト）を起こす
  - ⇒ 即応性の高い火力や蓄電池で出力調整しバランスを保つ



# 原子力発電の効率

- トムソンの原理で見たように、全ての熱を電気には変えられない
- 火力発電の効率と原子力発電の効率と、発電量に対する排熱量はどうくらいだろうか？？？

## 熱効率 (再掲)

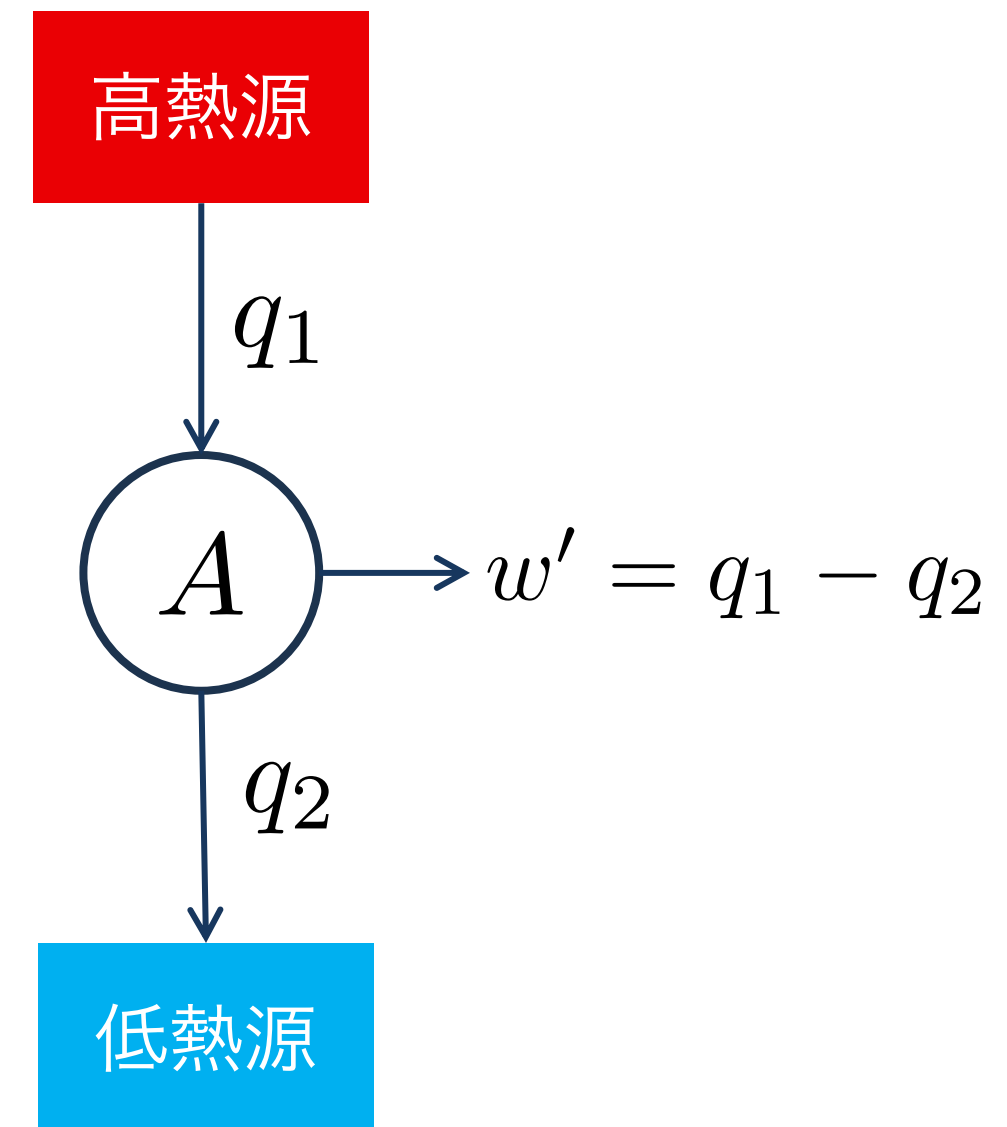
- 熱機関とは、熱を仕事今回は電気に変える装置

- 熱機関の効率  $e$  は

$$e = \frac{w'}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$$

- ここでの仕事  $w'$  は発電量に対応

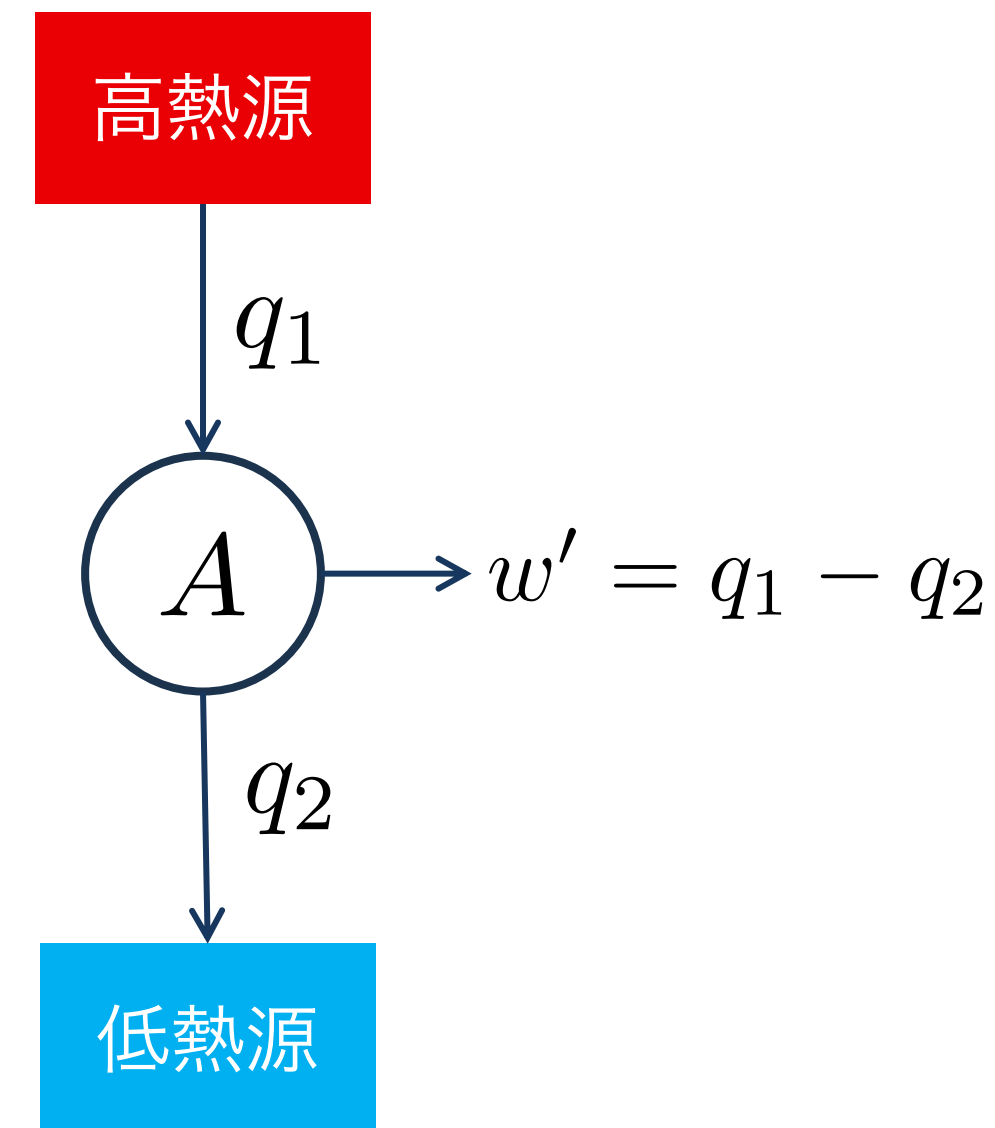
- 正確には仕事を使って発電する



# 排熱量のモデル化

- 発電量  $w'$  を大きくするには  $q_1$  を大きくする
- 無駄になる熱量  $q_2$  はその発電機の効率  $e$ （一定）によって決まる
- 手に入るデータは発電量  $w'$  と発電機固有の  $e$
- まず、 $q_2$  を  $w'$  と  $e$  で表そう

$$\begin{cases} w' = q_1 - q_2 \\ e = \frac{w'}{q_1} \end{cases} \iff \begin{cases} q_2 = q_1 - w' \\ q_1 = \frac{1}{e} w' \end{cases}$$





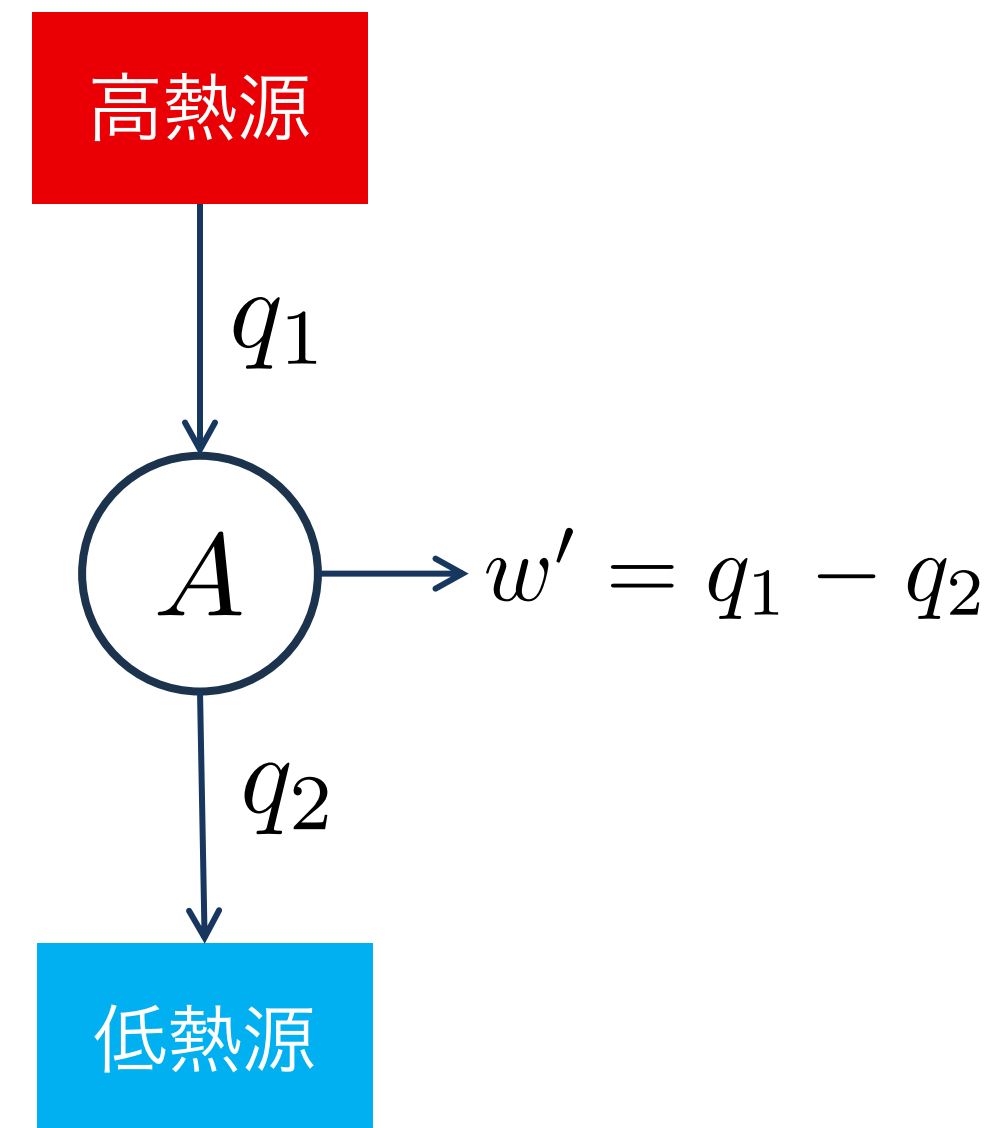
# 排熱量のモデル化

- 発電量  $w'$  を大きくするには  $q_1$  を大きくする
- 無駄になる熱量  $q_2$  はその発電機の効率  $e$  (一定) によって決まる
- 手に入るデータは発電量  $w'$  と発電機固有の  $e$
- まず、 $q_2$  を  $w'$  と  $e$  で表そう

$$\begin{cases} w' = q_1 - q_2 \\ e = \frac{w'}{q_1} \end{cases} \iff \begin{cases} q_2 = q_1 - w' \\ q_1 = \frac{1}{e} w' \end{cases}$$

$$\implies q_2 = \frac{1-e}{e} w' \quad \left[ e < 1 \text{ つまり、} 1-e > 0, \frac{1-e}{e} > 0 \right]$$

これは  $q_2 = kw'$  (1次関数) の形!  $[k > 0]$



# 原子力発電の効率

- トムソンの原理で見たように、全ての熱を電気には変えられない
- 火力発電の効率と原子力発電の効率と、発電量に対する排熱量はどうくらいだろうか？？？

発電方法	熱効率 $e$	単位電力あたりの排熱[KJ/KhW]
火力	60.0%	857
原子力	33.3%	1690

和田明「原子力発電所の温排水問題」日本原子力学会誌  
および電気事業連合会資料、原子力規制委員会資料による

# 原子力/火力発電の効率と排熱量比

- 排熱量の比は

$$\frac{\text{原子力発電の排熱量} q_2}{\text{火力発電の排熱量} q_2} = \frac{\frac{1-e_{\text{原子力}}}{e_{\text{原子力}}} q_1}{\frac{1-e_{\text{火力}}}{e_{\text{火力}}} q_1} = 3$$

であるので、原子力発電は火力発電の3倍の排熱量  
(前ページの値を代入して計算)

# 発熱量のモデル化

- 排熱量は発電量（の定数倍）として考えて良い
- 排熱量は原子力発電の3倍
  - 原子力の排熱量を3倍して算出する。詳細は以下。(定数)=1とする
  - (原子力排熱) = (原子力発電量) × 3 × (定数)
  - (火力排熱) = (火力発電量) × 1 × (定数)
- 各々の排熱量とその合計を見してみる
- 今回は再生可能エネルギーによる排熱は簡単のため無視
  - 実際にはサーマルリサイクルなどではたくさん熱を排出する。  
詳細は「総合的な探究の時間」で学ぶ。

# 使用する外部データ

---

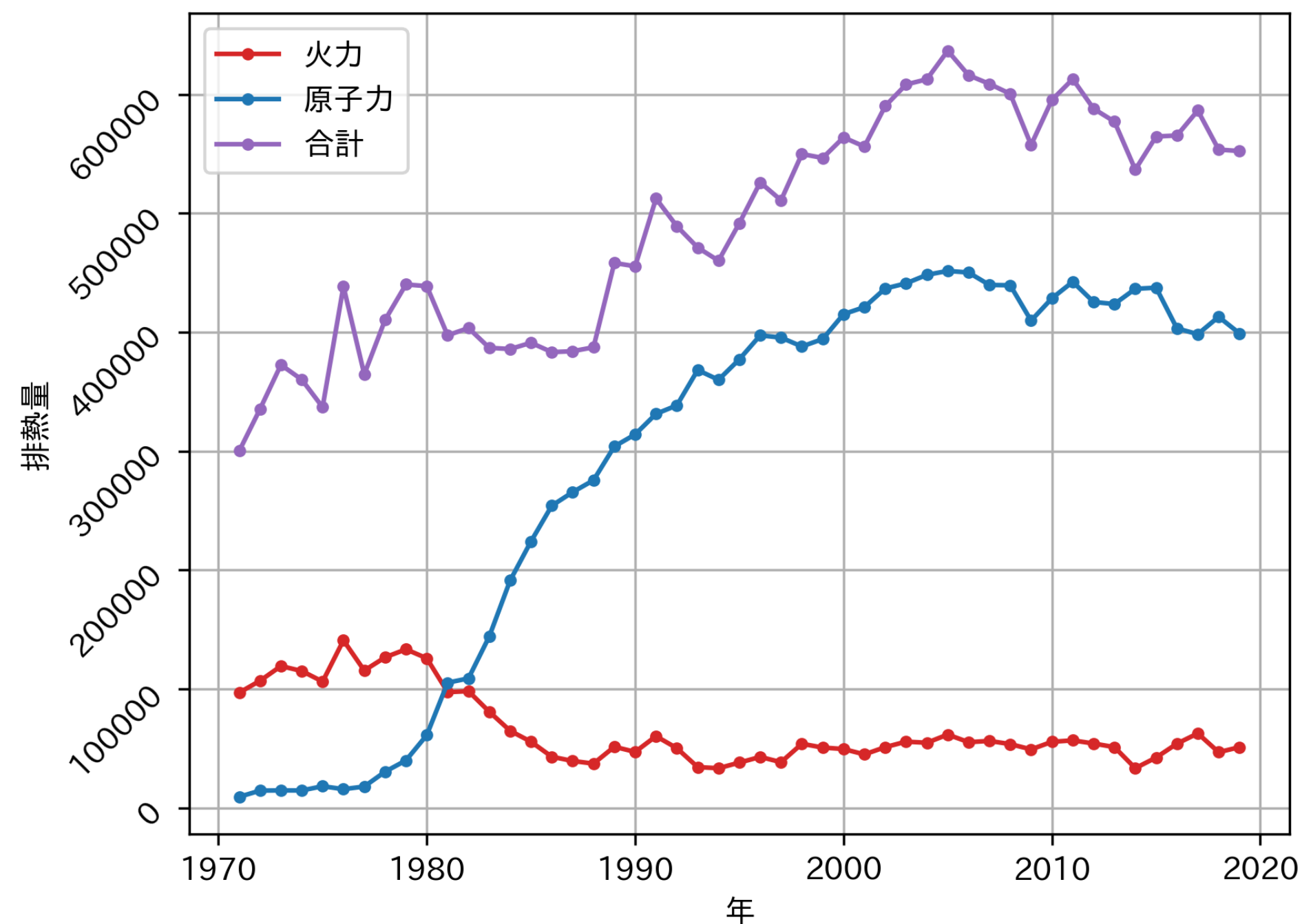
- フランスの方法別発電量の時系列データ
- ソース
  - IEA “[World Energy Statistics and Balances](#)”
- データの詳細
  - 1970～2022年の発電方法別の発電量を記録したデータ
  - 2020年以降はCOVID流行の影響を受けているのか、急激な変化を見せる

# 排熱量

- 排熱量は次のよう

$$\text{排熱量} = 3 (\text{原子力発電の排熱量}) + (\text{火力発電の排熱量})$$

- 今回、原子力の排熱量(発電量)が大きいいため、排熱量自体が原子力発電の排熱量が支配的
- では、もしこれが火力と原子力が逆だったらどうなるだろうか？
  - 元々の発電量の大小が入れ替わる  
1980年ごろ以降でプロットしてみる





# 排熱量シミュレーション

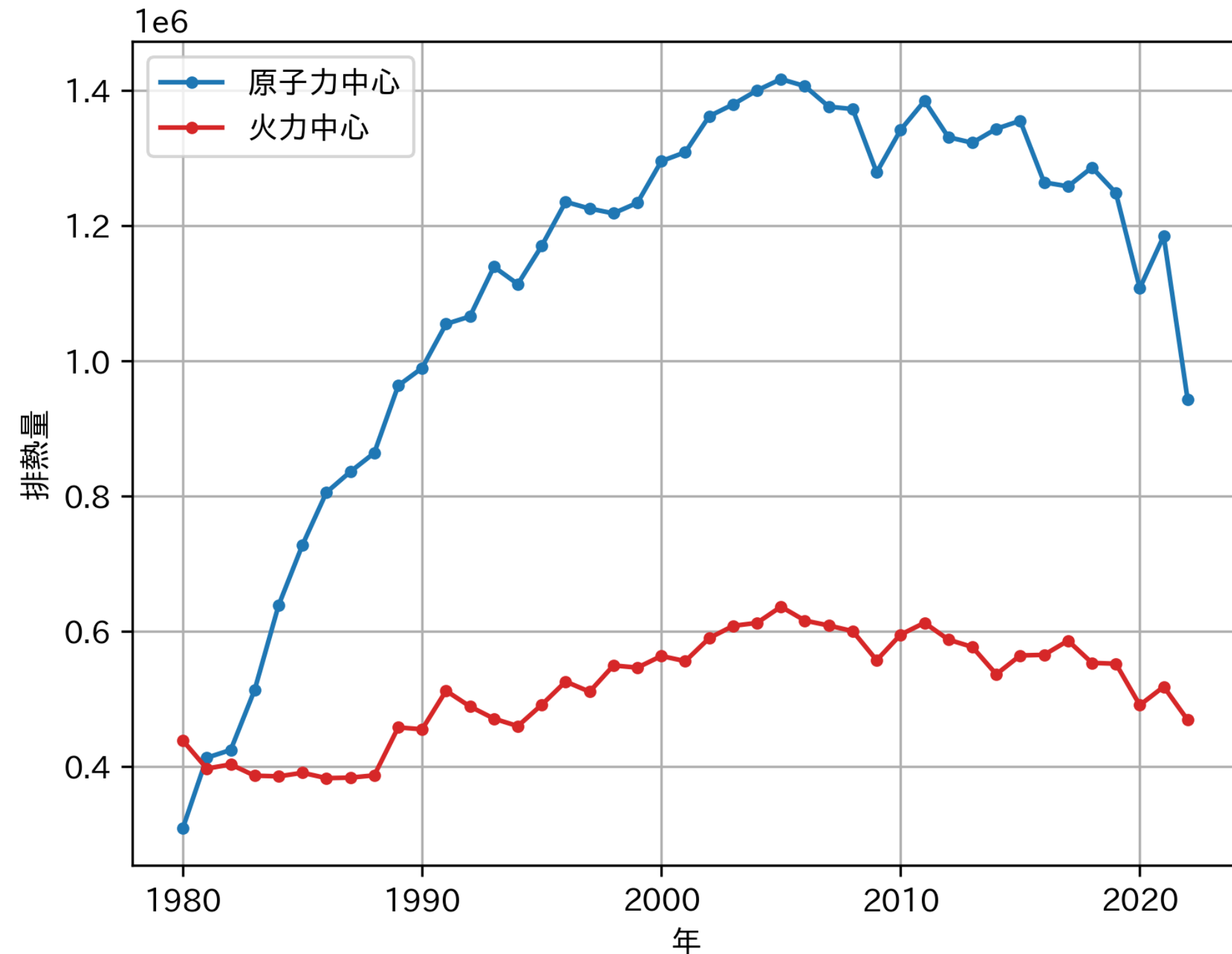
## ●シミュレーションしたグラフ

■上(赤)が実際の折れ線

■下(青)が火力中心で電力を賄っていたと仮定する場合

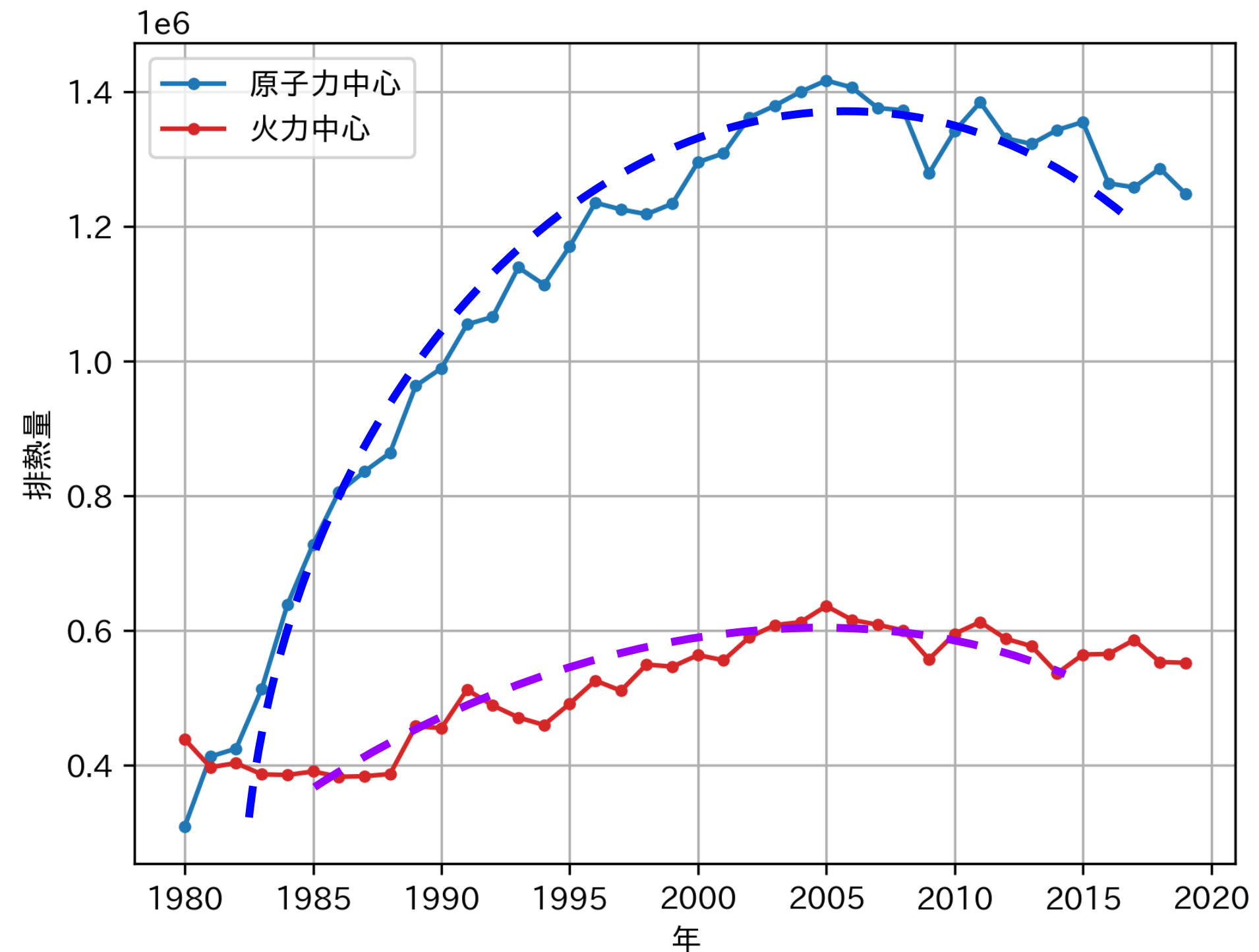
●下は排熱量はおおよそ1/3

●上はCO<sub>2</sub>排出ゼロ



# 排熱量シミュレーション

- 2020年以降はCOVIDの影響があると考え除外する
- 増え方は放物線に似ている
- この先は減少すると考えられるか？
  - 形は2次関数(放物線)に似ている
  - この点の列に近い2次関数が、このデータを擬似的に表すとして考える
  - 点線の2次関数はこのデータをよく表しているか？



# 代替案発想過程 (再掲)

## 3つの代替案

1. 原子力発電を推進してカーボンニュートラルを目指す
  - カーボンニュートラルによって地球温暖化が抑制できる
2. 従来の火力発電を続け、電力使用量を減らす
  - 従来の発電量を少し下方修正することによって考える
3. 全て再生可能エネルギーでまかなう

# 地球温暖化対策の評価基準 (再掲)

- 制約条件
  - 安全に利用できる
  - 安定的に電力を供給できる
- 地球の気温の急激な上昇が抑えられる
  - 原因がわからなければ対策できないから、原因を探ろう
- その対策は実現可能である
- 副作用がないか
  - その対策による悪影響はないか（普通は何かしらの悪影響がある）
  - 悪影響が避けられない場合は、得られるメリットと悪影響のトレードオフ関係を精査する

# 合理的判断過程

- 今まで見てきた知識などに基づいて、グループで代替案について意見交換をしてみよう
- 各代替案は制約条件を満たすか？
- それぞれのメリット・デメリットはなんだろうか？
- メリットとデメリットのトレードオフ関係解消はどうしたら良いだろうか？
- グループでの話し合いをワークシートにまとめよう
- 提示した情報で不足があるなら、インターネットなどを利用して調べて良い

# 合理的判断過程

## 1. 原子力発電を推進してカーボンニュートラルを目指す

### ●制約条件について

- 電力の安定供給は可能
- 安全性の確保にやや課題はあるが、現在使用されている

### ●メリット

- 電力の安定供給とカーボンニュートラル両方の実現が可能
- 必要となる燃料が少なく、燃費が良い

### ●デメリット

- 従来の発電方法よりも排熱量が多い
- 発電量制御は可能だが、メンテナンスや廃炉等が難しい

# 合理的判断過程

## 2. 従来の火力発電を続け、電力使用量を減らす

### ●制約条件について

- 電力の安定供給は可能
- 安全性は比較的確保しやすい

### ●メリット

- 熱効率がよく排熱量が少ない
- 安定供給が可能で、内陸部にも発電所を設置しやすい

### ●デメリット

- CO<sub>2</sub>排出量が多い
- 燃費は原子力発電よりは悪く、燃料が調達できなくなると供給が滞る



# 合理的判断過程

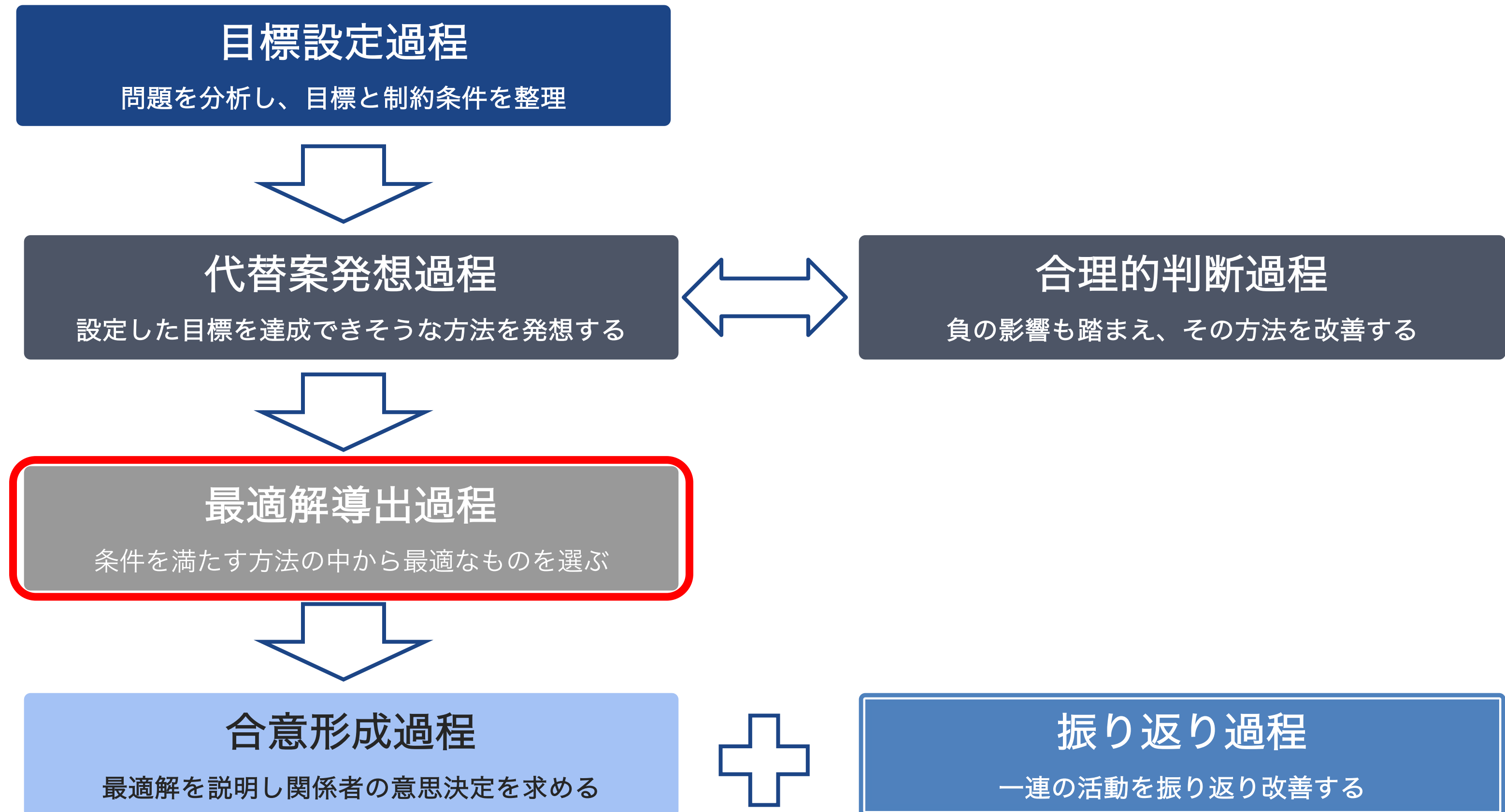
---

## 3. 全て再生可能エネルギーでまかなう

### ●制約条件について

■電力の安定供給・必要な電力量の供給ができない

# 問題解決の流れ（縦糸・横糸モデル）の縦糸

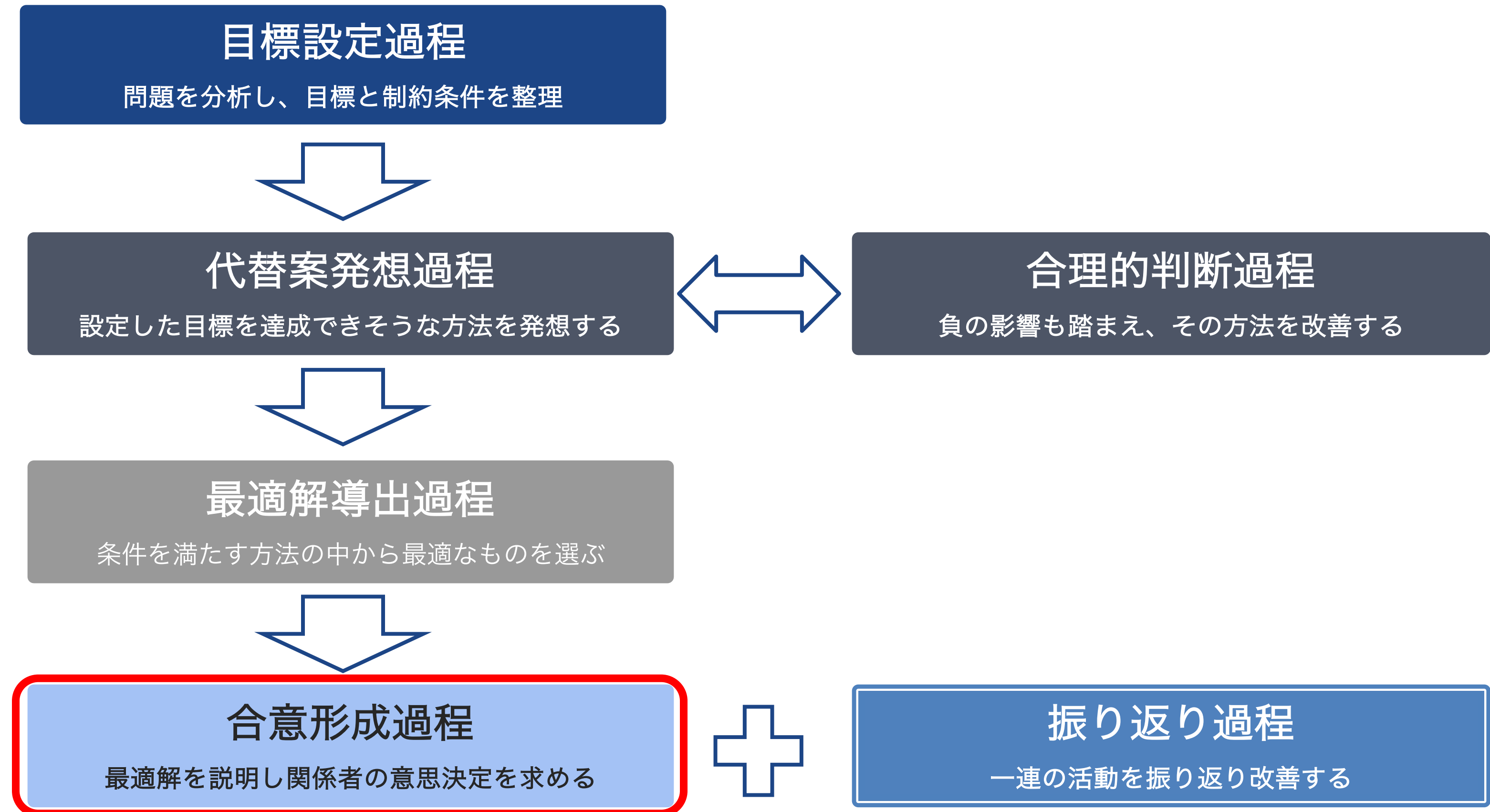


# 最適解導出過程

- 実際には
  - 現在ある発電方法を組み合わせ、最も環境負荷が少ない方法を取る
- という方針で利用することになった



# 問題解決の流れ（縦糸・横糸モデル）の縦糸

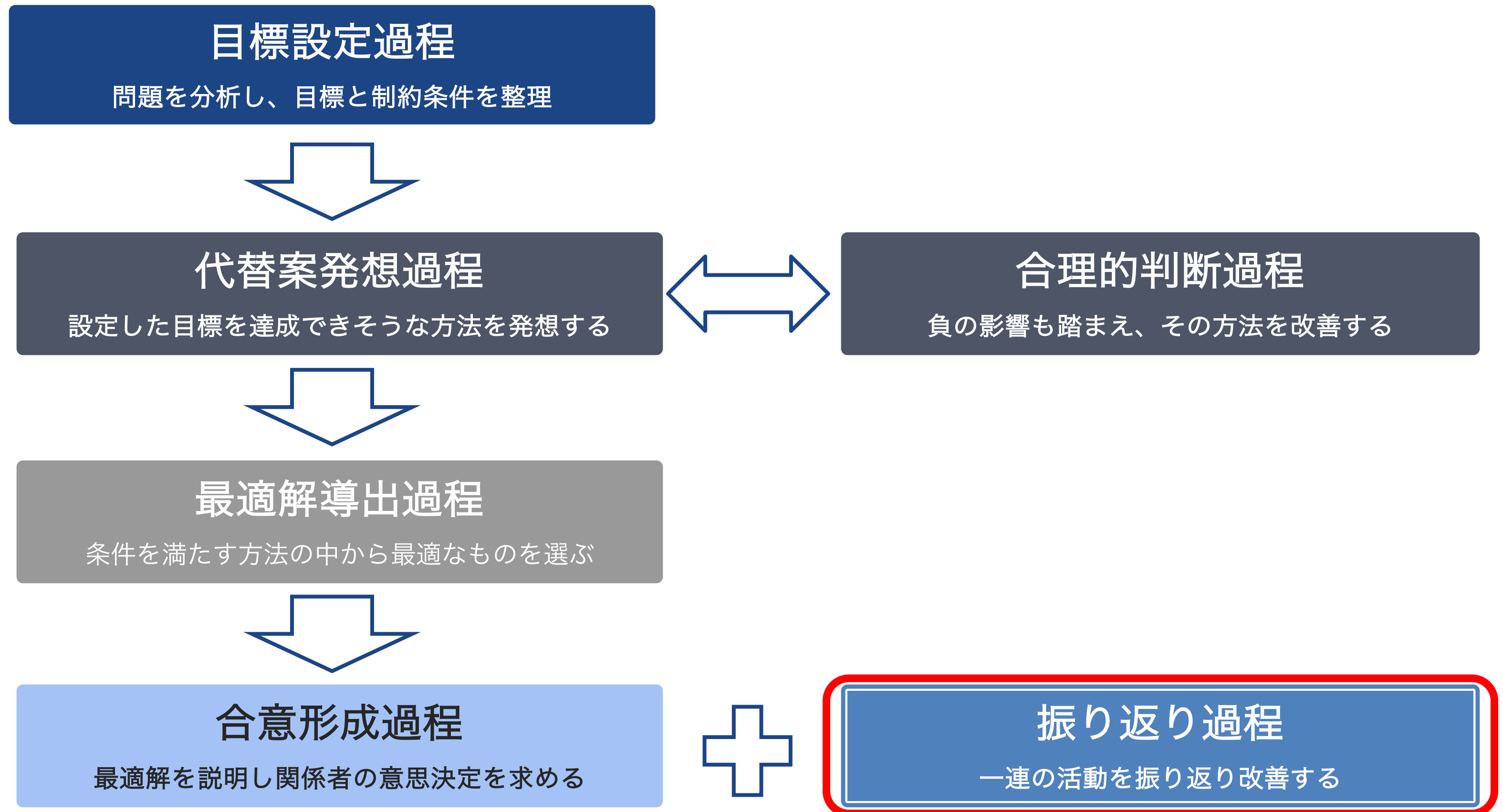


# 合意形成過程

- では、どの発電方法をどのように利用するのが良いだろうか？
- グループで話し合ってみよう
- その方法を選んだ理由も明確にしよう
- グループでの話し合いをワークシートにまとめよう



# 問題解決の流れ（縦糸・横糸モデル）の縦糸



# 振り返り過程

- そもそも、地球温暖化の原因がよくわかっていないから結論づけるのが難しい
  - これについては「総合的な探究の時間」に検討する
- 再生可能エネルギーを無視するなどのモデル化が適切だったか不明
- フランスの施策のため、考慮すべきフランスという国の特性があった可能性がある





# 振り返り過程

- 他の人の意見を踏まえて、自分の出した最適解を再検討
- 今回のワークでうまくいった／良かった点を記述
- 今回のワークでうまくいかなかった点を記述
- 工夫すべきだった点はどこか記述
- 必要ならば再度代替案発想過程や合理的判断過程に戻って考えよう



# 課題学習 地球温暖化対策になる発電方法

---

～次回授業の説明～

# 次回授業の予告

今回はフランスを例に考えた。

では、日本の電力施策について、同様のステップで検討してみよう

●地球温暖化対策を組み込んだ発電方法に関する政府や企業の施策について、その是非を根拠をもとに結論を導き発表しなさい。

その際には、

■問題解決の流れを明確に示し

■根拠に基づいて

結論を導くこと。

# まとめ

- 今まで学んできた数学や他教科の知識を思い出して、これからの問題解決に使うことができる。
- 数学的な見方・考え方を用いて、数値データや数式の主張することを日常的事象において説明できる。
- 自分が行った方法をより良くする方法を提案できる。
- 日常生活においても、「問題解決の縦糸・横糸モデル」が適用できそうな場面を見出せるようになる。



**お疲れ様でした！**  
**(ワークシートを提出してください)**