

原発は温暖化対策になるの？
経済学からみた本当の話
—原子力発電の費用とCO2排出量—

立命館大学国際関係学部

大島 堅一

k-oshima@cj8.so-net.ne.jp

はじめに

1. 発電コストについて
 - 発電のコストとは何か
 - 電力別(火力、水力、原子力)
 - 財政的支出(開発、立地)
 - 総合的単価
2. 再処理・核燃料サイクルについて
 - 再処理にいくらかかるのか。
 - 再処理の費用負担のあり方
3. CO2排出量について
 - Sovacool (2008)の紹介
 - Jacobson(2009)の紹介

政府発表の発電コスト

資源エネルギー庁/総合エネルギー調査会による発電コストの試算値

| | 99 | | | | 2004 | | | |
|-------|------|--------|-------|------|------|------------|-------|------|
| | 年 | 設備規模 | 設備利用率 | 運転年数 | 年 | 設備規模 | 設備利用率 | 運転年数 |
| 一般水力 | 13.6 | 1.5万kW | 45% | 40年 | 11.9 | 1~2万kW | 45% | 40年 |
| 石油火力 | 10.2 | 40万kW | 80% | 40年 | 10.7 | 35~50万kW | 80% | 40年 |
| 石炭火力 | 6.5 | 90万kW | 80% | 40年 | 6.2 | 60~105万kW | 80% | 40年 |
| LNG火力 | 6.4 | 140万kW | 80% | 40年 | 5.7 | 144~152万kW | 80% | 40年 |
| 原子力 | 5.9 | 130万kW | 80% | 40年 | 5.3 | 118~136万kW | 80% | 40年 |

注1:99年試算、2004年試算には、再処理、中間貯蔵、廃棄物処理処分(高レベル放射性廃棄物処分・貯蔵)、その他の廃棄物処分・貯蔵の費用を含んでいる。

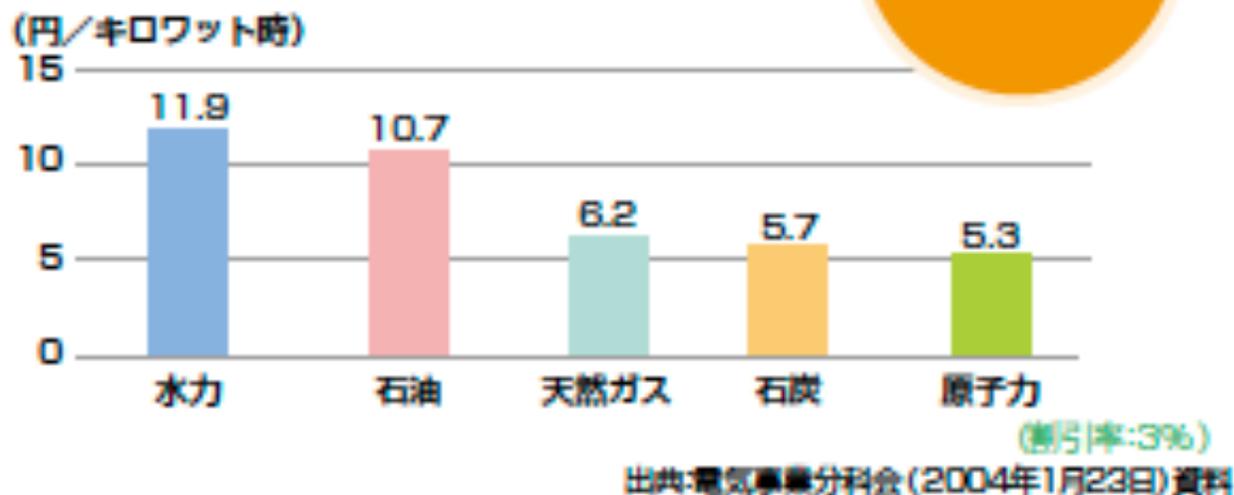
注2:99年、2004年の試算は割引率3%の場合のみ表にした。

出所:日本原子力産業会議『原子力ポケットブック2003年版』総合資源エネルギー調査会電気事業分科会コスト等検討小委員会報告書(2004年1月23日)より作成。

電事連による原子力発電のコスト

各種電源のコスト比較(40年運転の例)

原子力発電の
コストは高くない。



出所:電気事業連合会(2010)「原子力2010[コンセンサス]」

エネルギー政策と発電費用

1. 電力供給にあたっては電力料金を通じて消費者がその費用を負担している。
 2. 政策上の方向付けを行う場合は、
 - ①財政支出
 - ②電力料金を通じた追加的負担を通して、費用が調達されている。
- 今日の課題を考える上では、上記1、2を総合的に評価する必要がある。

発電の費用

| 発電の費用 | | | 料金原価に算入 | 原子力に固有の費用 |
|------------------------------|------------|----------------|--------------------------------|-----------|
| ①発電に直接要する費用(燃料費、減価償却費、保守費用等) | | | | |
| ②バックエンド費用 | 使用済燃料再処理費用 | | | |
| | 放射性廃棄物処分費用 | 低レベル放射性廃棄物処分費用 | | |
| | | 高レベル放射性廃棄物処分費用 | | |
| | | TRU廃棄物処分費用 | | |
| | 廃炉費用 | 解体費用 | | |
| 解体廃棄物処分費用 | | | | |
| ③国家からの資金投入(財政支出:開発費用、立地費用) | | | 一般会計、エネルギー特会から | |
| ④事故に伴う被害と被害補償費用 | | | 原子力発電は莫大。料金原価には不十分にしか反映されていない。 | |

今回は、①～③について計算。

バックエンド費用について

- 再処理するかしないかで大きく異なる。
- 再処理する方針をとらなければ再処理費用と再処理に付随する高レベル放射性廃棄物処理費用、TRU廃棄物処理費用は必要ない。
- 日本は使用済燃料の全量再処理を基本方針としているので、再処理費用と再処理に付随する高レベル放射性廃棄物処理費用、TRU廃棄物処理費用

①の発電単価の計算方法

•有価証券報告書総覧に記載されているデータを基礎に、原価として算入されている金額(=消費者が支払っている額)を総発電量(送電端)で除して計算。(室田武・同志社大学教授の方法)

•原価算入の方法は、供給約款料金算定要領として経済産業省が定めている。

•規制部門と自由化部門にわかれているが、収支が事後的にチェックされていることから、規制部門の算入方法で計算。

$$P_b = \frac{B_b + (C_b + D_b + G_b) \times r}{A_b}$$

$$P_t = \frac{B_t + (C_t + D_t + F_t + G_t + H_t + I_t) \times r}{A_t}$$

$$P_n = \frac{B_n + (C_n + D_n + E_n + F_n + G_n + I_n) \times r}{A_n}$$

P : 発電単価 (円/kWh)

A : 総電端発電量

B : 営業費用

C : 電気事業固定資産

D : 建設中の資産 = 建設仮勘定 \times 1/2

E : 核燃料資産

F : 特定投資

G : 営業資本 = (営業費用 - 控除項目) \times 1.5/12

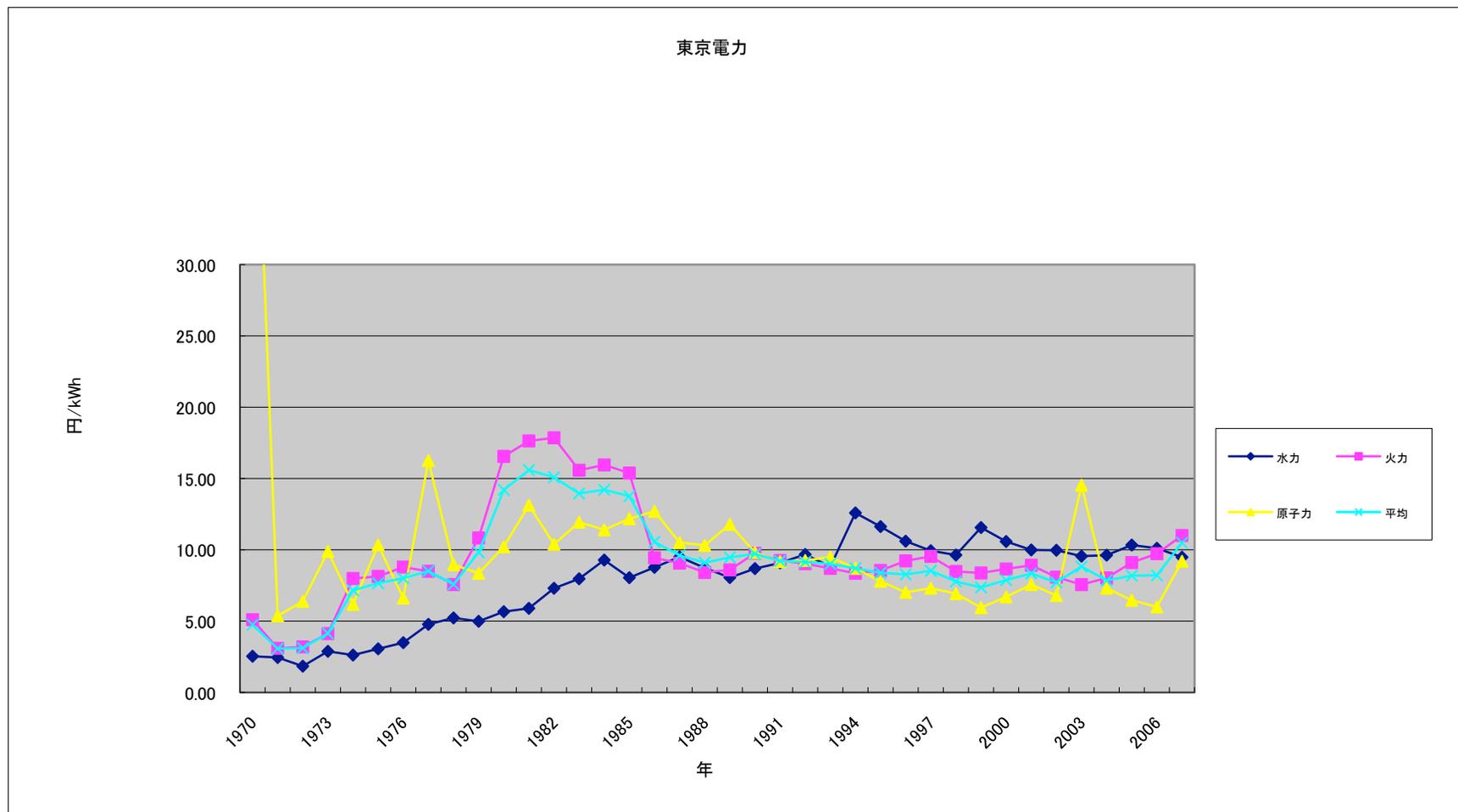
H : 貯蔵品 = 貯蔵品 \times 1.5/12

I : 長期投資

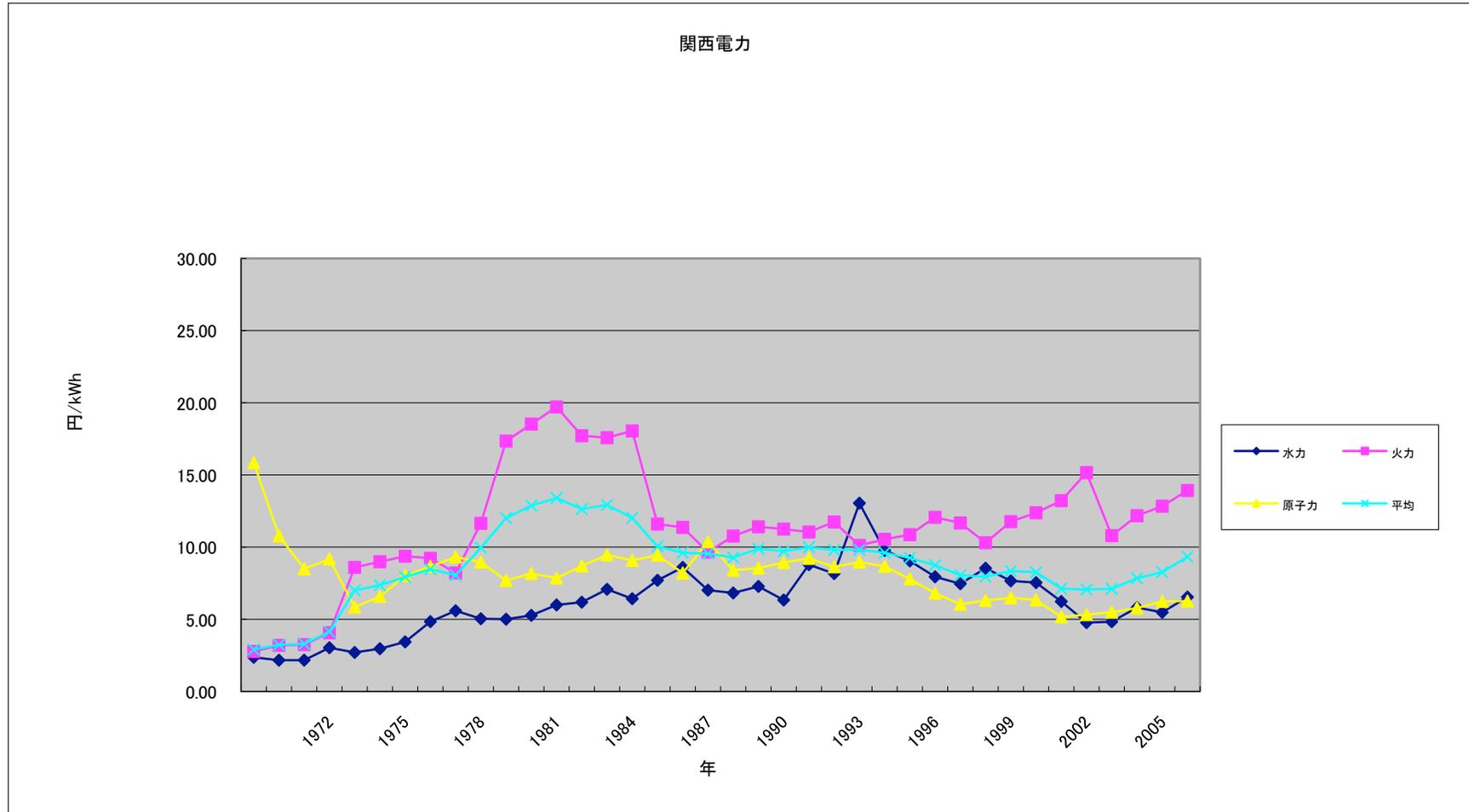
r : 報酬率

(添字の b は水力, t は火力, n は原子力を表す)

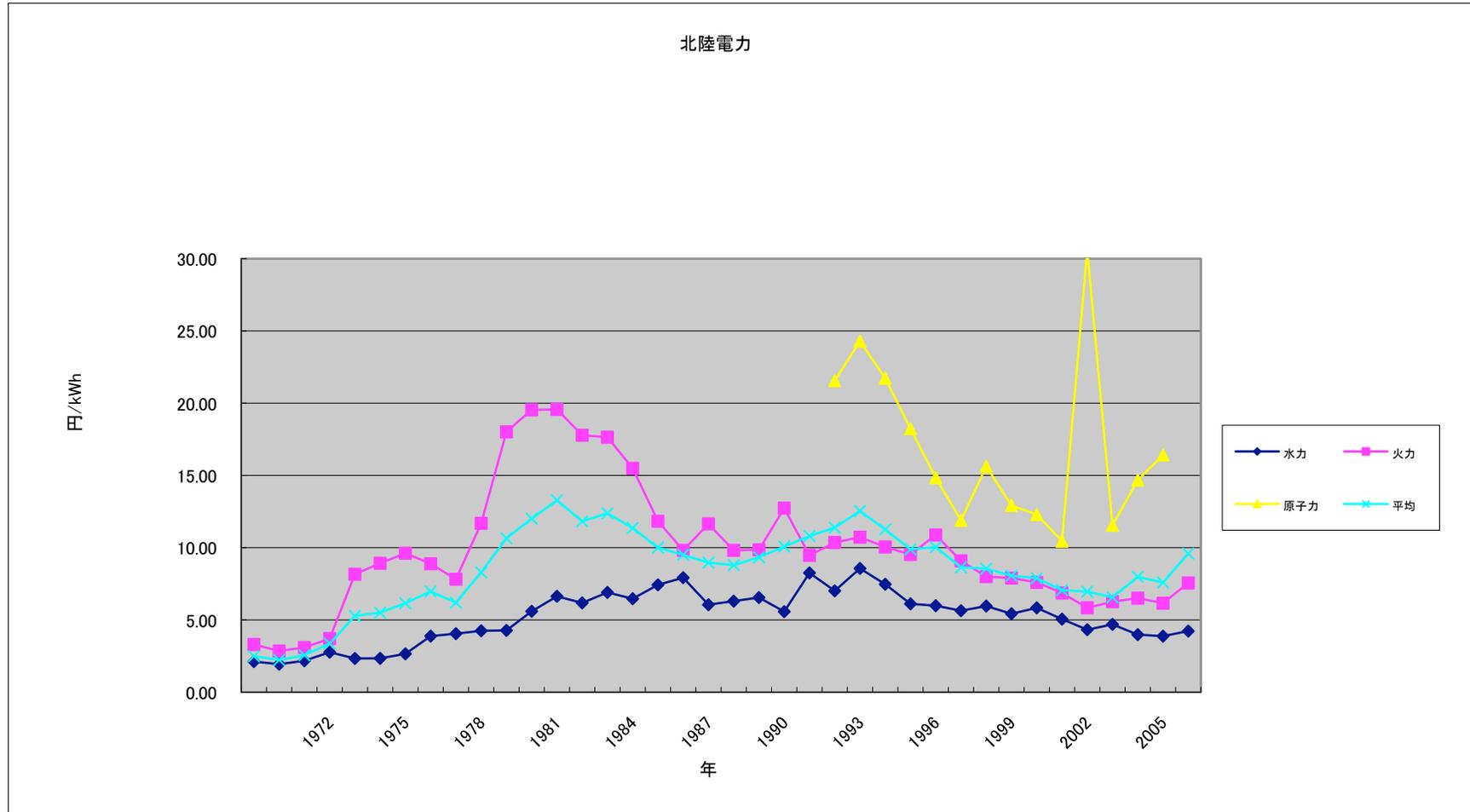
発電単価の推移(東京電力)



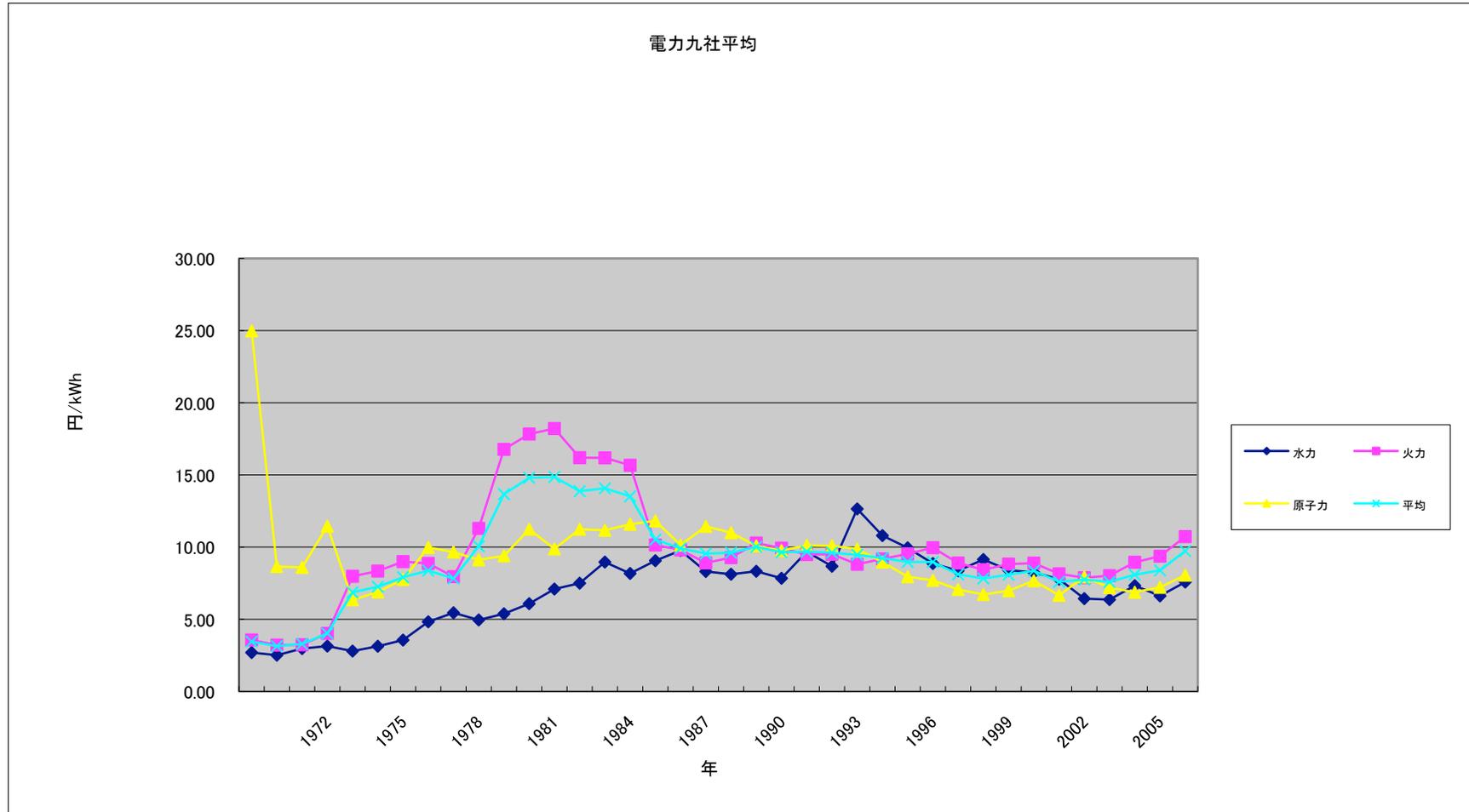
発電単価の推移(関西電力)



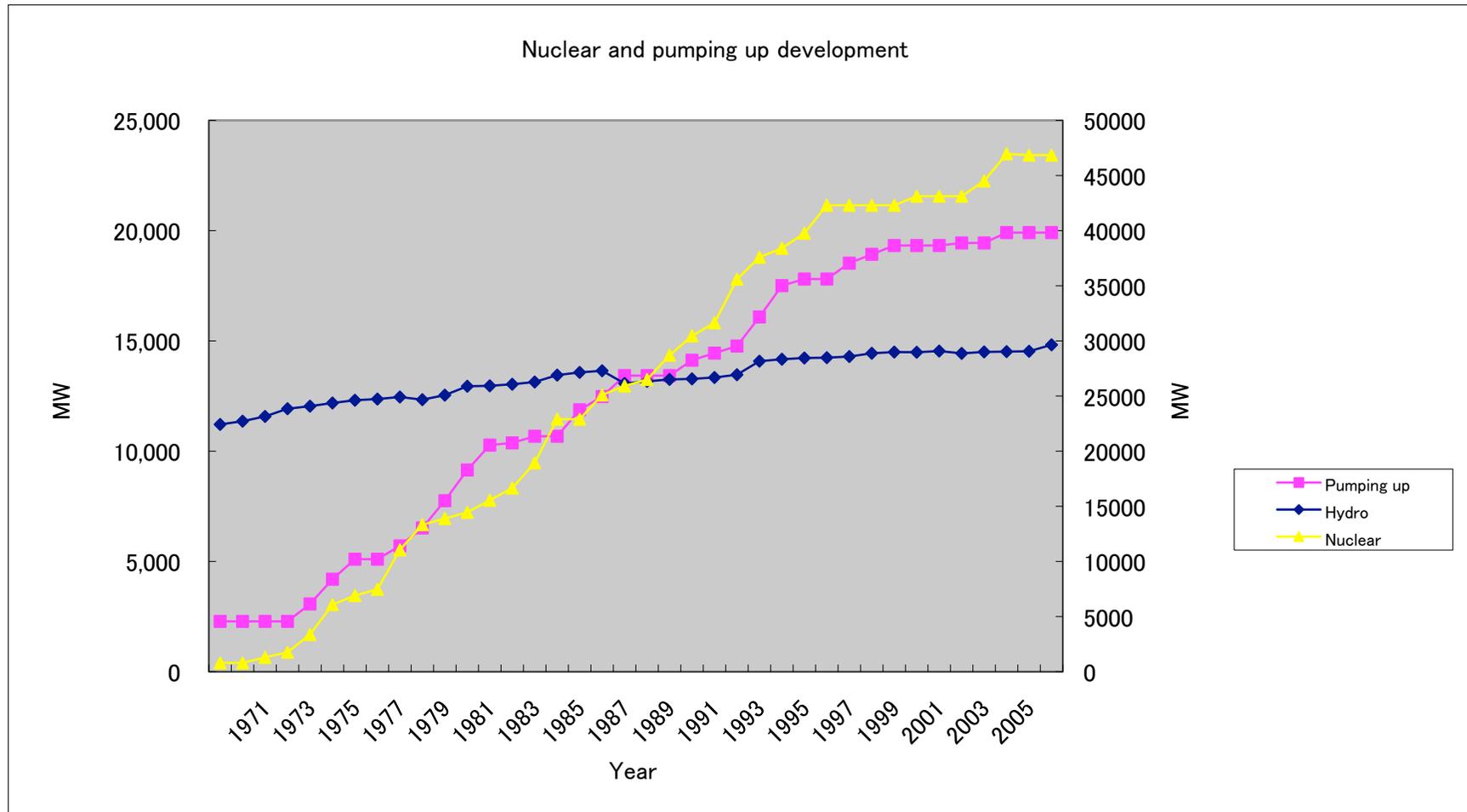
発電単価の推移(北陸電力)



発電単価の推移(電力九社)



原子力発電と揚水発電



電源毎の発電単価（実績）

| | 原子力 | 火力 | 水力 | 一般水力 | 揚水 | 原子力+ 揚水 |
|-----------|-------|-------|------|------|-------|------------|
| 1970年代 | 8.85 | 7.11 | 3.56 | 2.72 | 40.83 | 11.55 |
| 1980年代 | 10.98 | 13.67 | 7.80 | 4.42 | 81.57 | 12.90 |
| 1990年代 | 8.61 | 9.39 | 9.32 | 4.77 | 50.02 | 10.07 |
| 2000年代 | 7.29 | 8.90 | 7.31 | 3.47 | 41.81 | 8.44 |
| 1970-2007 | 8.64 | 9.80 | 7.08 | 3.88 | 51.87 | 10.13 |

単位：円/kWh

注：電力各社の『有価証券報告書総覧』を基礎に算定。

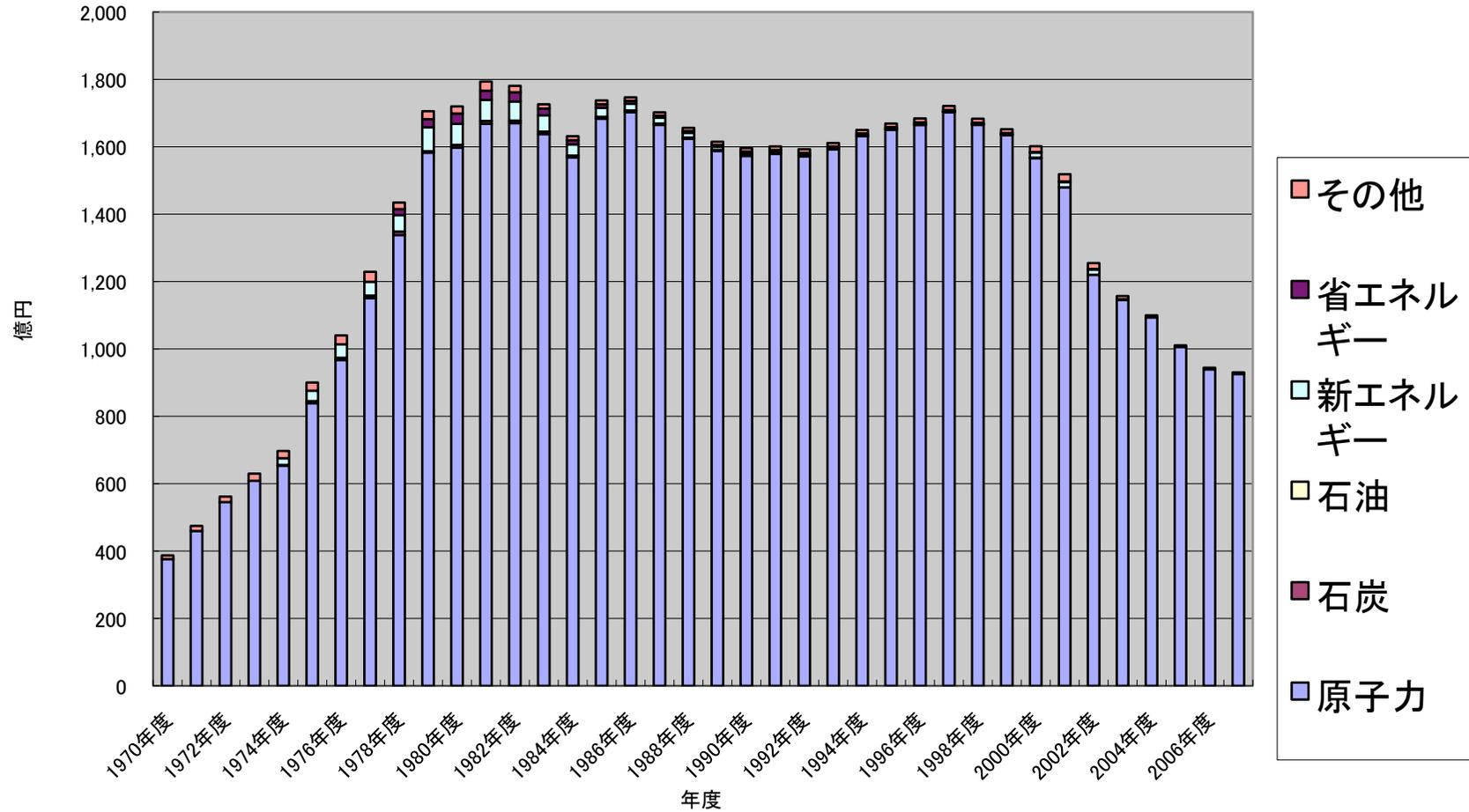
エネルギー政策の財政的裏付け

- 一般会計エネルギー対策費
 - 特別会計
 - 電源開発促進対策特別会計
 - 立地対策(電源立地勘定)～日本に固有の交付金システム
 - 技術開発対策(電源利用勘定)
 - 石油及びエネルギー需給構造高度化対策特別会計(名称は次々に変わっていった)
- エネルギー対策特別会計(2007年度より)
内容は、上記の2つの特別会計を引き継いでいる。

電源別の財政支出額の計算

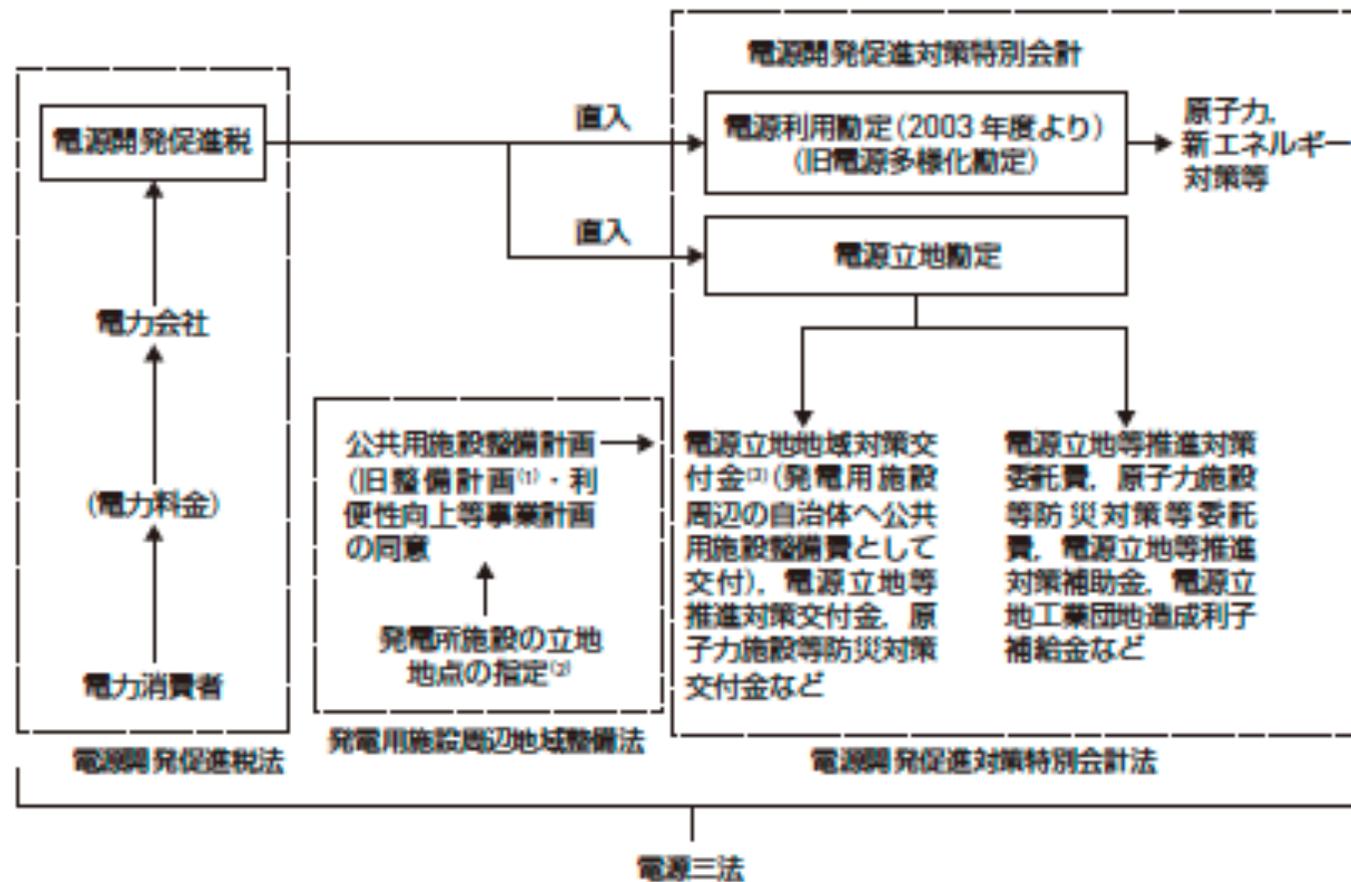
- 電源別に計上されている財政資料は存在しない。
- そこで、『國の予算』(各年版)を基礎に一般会計エネルギー対策費、特別会計の費用項目を可能な限り電源別に再集計して積み上げて、これを当該年度の発電量で割る。
- 交付金実績については、特別会計決算参照書、『電源開発の概要』に基づき、計算。

一般会計エネルギー対策費の推移

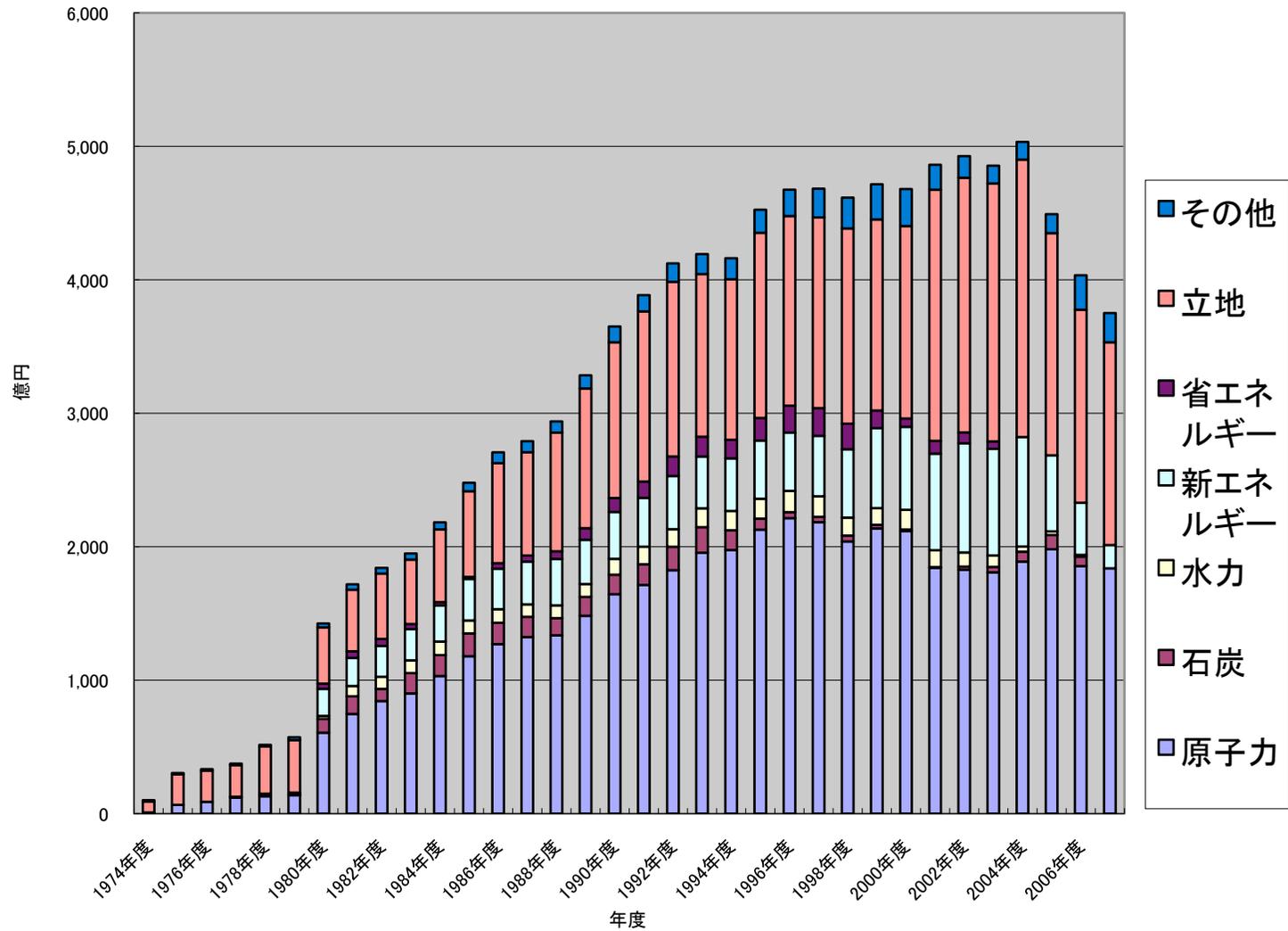


電源三法システム

図1-2 電源三法システムの構造 (2006年度まで)

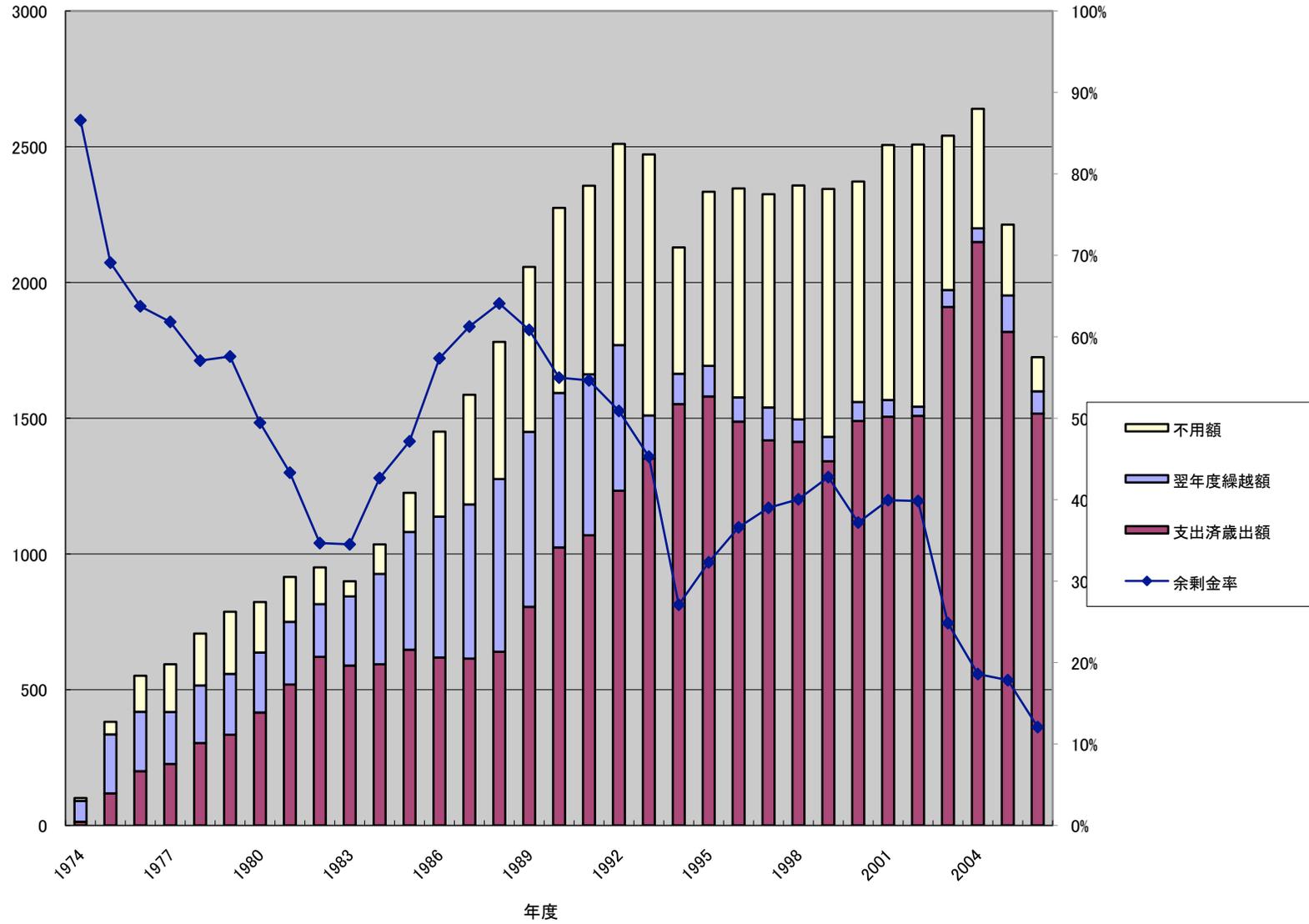


電源開発促進対策特別会計(エネルギー源、用途別)



電源立地勘定決算の推移

億円



交付金交付額(電源別)

•交付金交付額実績からすれば、電源三法交付金の約7割が原子力向けになっている。

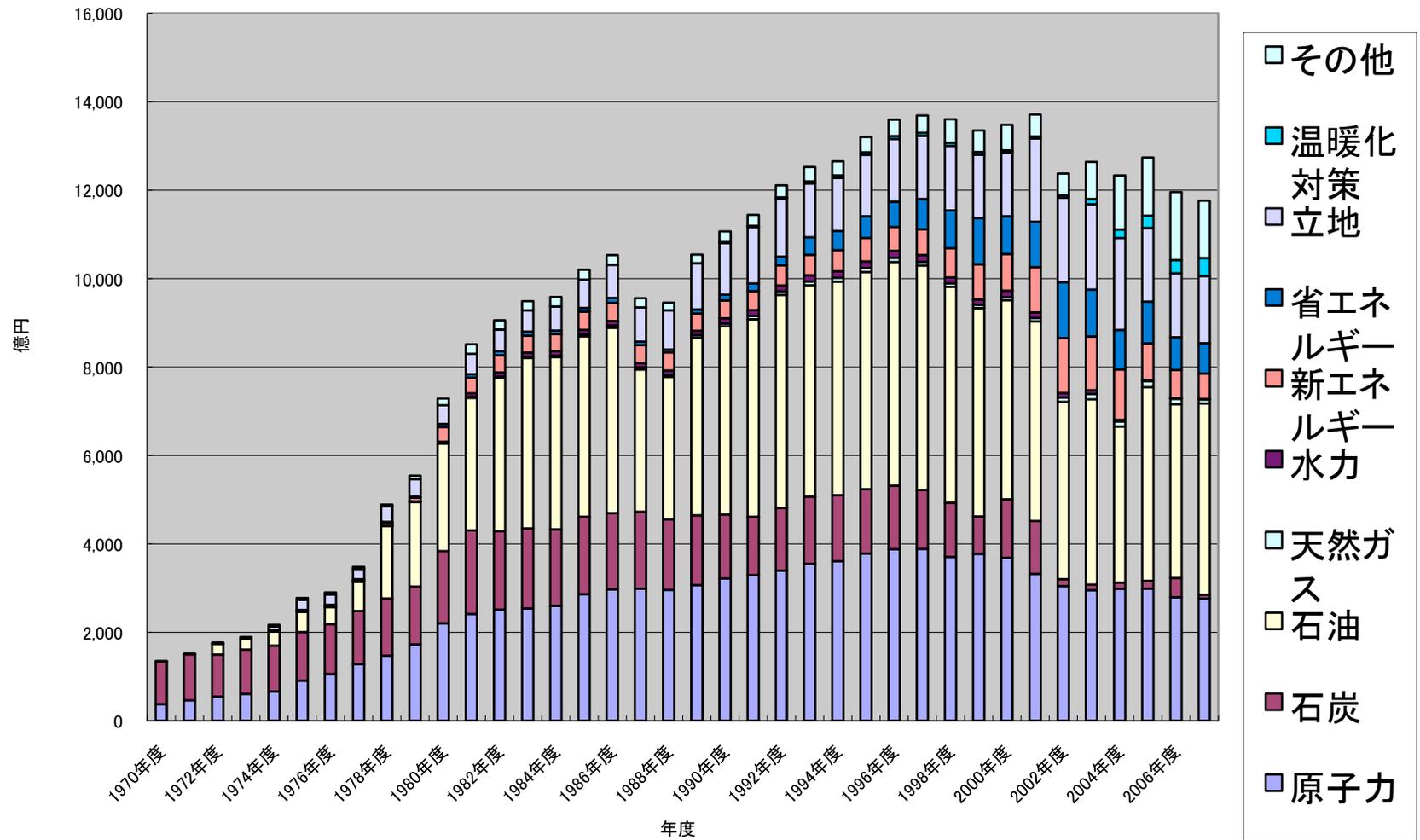
表1-2 交付金交付額(電源別, 1975~2007年)

| 電源 | 交付額(億円) | 比率 |
|-------|----------|-------|
| 原子力 | 6,251.17 | 68.4% |
| 火力 | 2,498.99 | 27.3% |
| 水力 | 352.65 | 3.9% |
| うち純揚水 | 131.16 | 1.4% |
| 地熱 | 13.63 | 0.1% |
| その他 | 21.15 | 0.2% |
| 合計 | 9,137.59 | |

(注) 水力には揚水関連施設も含まれている。

(出所) 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部編「電源開発の概要」(各年度版)より作成。

エネルギー予算の推移(エネルギー源、用途別)



財政支出単価(開発、立地)

| | | 原子力 | 火力 | 水力 | 一般水力 | 揚水 | 原子力 +揚水 |
|------------|----|------|------|------|------|------|------------|
| 1970年代 | 開発 | 4.19 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.31 |
| | 立地 | 0.53 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.36 | 0.54 |
| 1980年代 | 開発 | 2.26 | 0.02 | 0.14 | 0.08 | 1.52 | 2.31 |
| | 立地 | 0.37 | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 0.35 | 0.38 |
| 1990年代 | 開発 | 1.49 | 0.02 | 0.22 | 0.11 | 1.16 | 1.54 |
| | 立地 | 0.38 | 0.10 | 0.08 | 0.06 | 0.29 | 0.39 |
| 2000年代 | 開発 | 1.18 | 0.01 | 0.10 | 0.05 | 0.60 | 1.21 |
| | 立地 | 0.46 | 0.11 | 0.10 | 0.07 | 0.38 | 0.47 |
| 1970-2007年 | 開発 | 1.64 | 0.02 | 0.12 | 0.06 | 0.94 | 1.68 |
| | 立地 | 0.41 | 0.08 | 0.06 | 0.04 | 0.34 | 0.42 |

単位:円/kWh

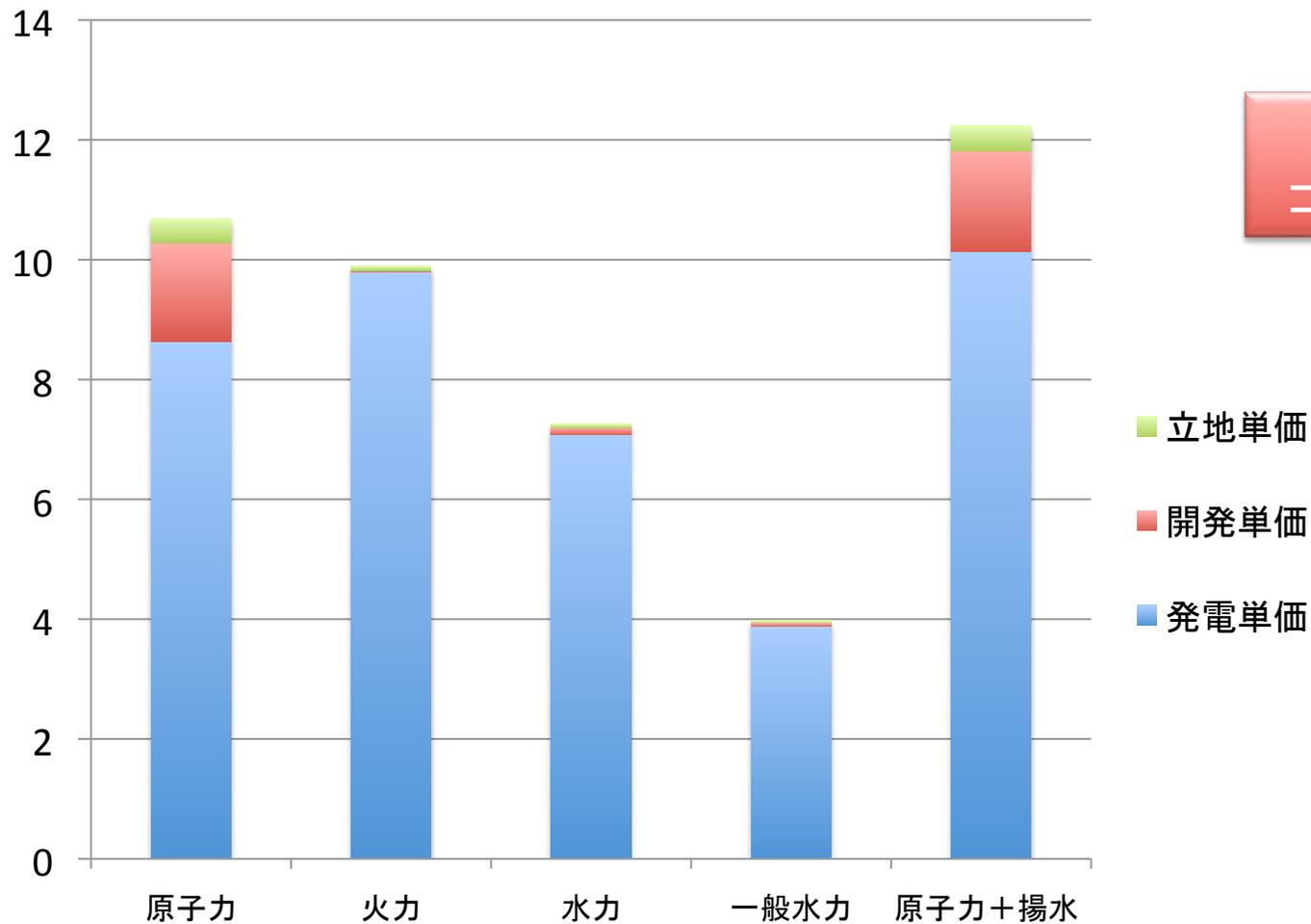
電源別の単価（総合）

| | 原子力 | 火力 | 水力 | 一般水力 | 揚水 | 原子力+揚水 |
|-----------|-------|-------|------|------|-------|--------|
| 1970年代 | 13.57 | 7.14 | 3.58 | 2.74 | 41.20 | 16.40 |
| 1980年代 | 13.61 | 13.76 | 7.99 | 4.53 | 83.44 | 15.60 |
| 1990年代 | 10.48 | 9.51 | 9.61 | 4.93 | 51.47 | 12.01 |
| 2000年代 | 8.93 | 9.02 | 7.52 | 3.59 | 42.79 | 10.11 |
| 1970-2007 | 10.68 | 9.90 | 7.26 | 3.98 | 53.14 | 12.23 |

単位：円/kWh

※事故の場合の被害額、被害補償額は上記の表には含まれない。

電源別実際の発電コスト (1970-2007年度)



原子力発電の
コストは低い。

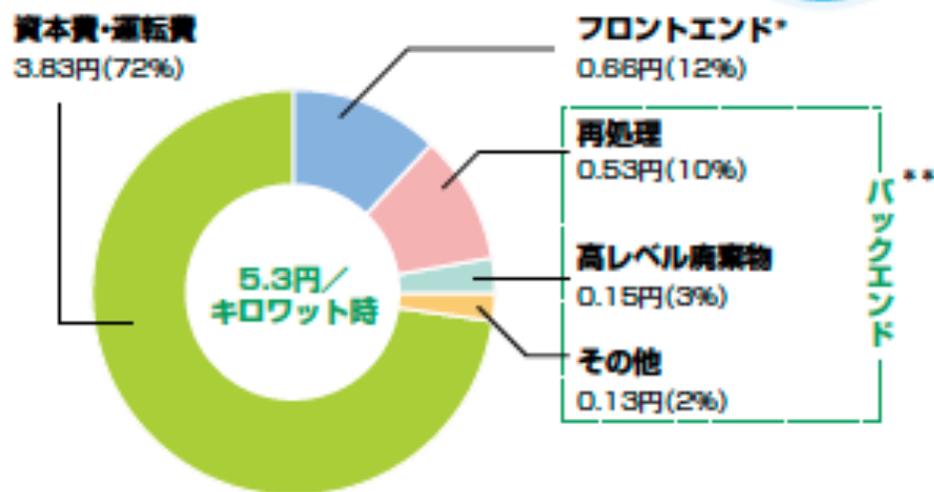
電源別のコスト

- 原子力単体でみた発電単価でみた場合であっても、原子力は安価な電源とは言えない。
- 「原子力＋揚水」で見れば、最も高い電源である。
- 電力料金を通じて支払われている電源開発促進税を主財源とする財政コストを考慮すると、原子力は最もコストが高く、消費者の負担が大きい。
- つまり、原子力政策は、政策的に優遇措置を受け続けてきたと言える。
- 今後も優遇策を続けるべきかどうかは議論の余地がある。少なくとも、発生する費用も含めて議論すべきである。

電事連による再処理コストの説明

発電コストに占める廃棄物処分コスト

再処理コストは
発電コストの
10%にすぎない。



* 原子炉で利用するまでの工程 (ウラン採掘・精錬～ウラン濃縮～燃料加工)

** 原子炉での利用から後の工程 (再処理、放射性廃棄物の処理処分)

(注) 40年運転の場合 (利用率80%、割引率3%)

電気事業分科会 (2004年1月23日) 資料より作成

出所: 電気事業連合会(2010)「原子力2010[コンセンサス]」

再処理をめぐる課題

- 放射性廃棄物処理処分問題
 - 2つの選択肢
 - 使用済燃料をそのまま処分する。→使用済燃料の処理処分問題
 - 使用済燃料を再処理する。→高レベル放射性廃棄物、TRU廃棄物が発生。
- 使用済燃料の再処理問題
 - 日本は全量再処理方針をもっている。
- 課題
 - 安全性確保
 - いったいいくらかかるのか。
 - どのように費用負担するのか。
 - 財源
 - 持続可能性

バックエンド費用の費用推計

| | |
|----------------|-----------|
| 再処理 | 11兆円 |
| 返還高レベル放射性廃棄物管理 | 3000億円 |
| 返還低レベル放射性廃棄物管理 | 5700億円 |
| 高レベル放射性廃棄物輸送 | 1900億円 |
| 高レベル放射性廃棄物処分 | 2兆5500億円 |
| TRU廃棄物地層処分 | 8100億円 |
| 使用済燃料輸送 | 9200億円 |
| 使用済燃料中間貯蔵 | 1兆100億円 |
| MOX燃料加工 | 1兆1900億円 |
| ウラン濃縮工場バックエンド | 2400億円 |
| 合計 | 18兆8800億円 |

出所:総合資源エネルギー調査会電気事業分科会コスト等検討小委員会(2004)「バックエンド事業全般にわたるコスト構造、原子力発電全体の収益性の分析・評価」

バックエンド費用推計の問題点(1)

バックエンド事業の範囲

- 劣化ウラン・減損ウランの処理は対象外
- MOX使用済燃料の再処理ないし処分費用は対象外
- 六ヶ所再処理工場のみ評価(全量再処理する方針を堅持するのであれば、さらに必要。)
- 高速増殖炉サイクルに関する事業は対象外

費用推計の不確実性

- 大規模実施事例が世界的にない。
- 高レベル放射性廃棄物、TRU廃棄物地層処分廃棄物の具体的計画が無い。
- 人類が生存する期間中、人類に影響がでないようにするという高度な要求を満たす必要がある。

バックエンド費用の問題点(2)

費用推計にあたっての仮定

- 再処理工場の稼働率を100%と想定している。(AREVA社の実績は2007年:56%)
- 放射性廃棄物処理費用の妥当性(高レベル放射性廃棄物ガラス固化体1本あたり3530万6000円と見積もる→実績(返還高レベル放射性廃棄物の管理費用単価は1億2300万円/本)

資源経済性

- 得られるMOX燃料:4800tHM(重金属トン) = 9000億円程度。
- 再処理費用11兆円 + MOX燃料加工1兆9000億円
- 「リサイクル」費用をリサイクル資源利用者に課さない構造。

バックエンド事業費用の負担制度

- 廃炉・廃止措置
 - 1989年より電気料金の原価に「原子力発電施設解体費」として算入されている。(解体費用のみ)
 - 2000年から解体放射性廃棄物処理処分費用が組み込まれている。
 - 2007年に対象費用項目拡大。
- 高レベル放射性廃棄物・TRU廃棄物処理
 - 2000年の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」により、高レベル放射性廃棄物費用を「特定放射性廃棄物処分費」として原価に算入。
 - 2007年に、上記の法律が改正され、第二種特定放射性廃棄物とされて、料金原価に算入。

バックエンド費用の負担制度(2)

- 再処理
 - 1981年:使用済燃料再処理引当金
 - 1986年:使用済核燃料再処理費として料金原価に算入。
 - 2005年:「原子力発電における使用済燃料の再処理等のための積立金の積立て及び管理に関する法律」(再処理等積立金法)(=再処理費用を電力会社の外部に積立て・管理するもの)
 - 2006年より使用済燃料再処理等引当金として原価に算入。
 - 六ヶ所再処理工場による再処理を含め、いったいいくらになるのかが確定される必要があった。
 - まだ未決定の第二再処理工場の費用についても、内部劉邦として引当金を積み上げ。料金原価には算入されていない(将来、算入される可能性)

再処理にいくら払っているのか

—電力料金からすでに徴収されているもの—

| | 2006年度 | 2007年度 |
|--|-----------|-----------|
| 使用済燃料再処理費 | 0.51円/kWh | 0.43円/kWh |
| 特定放射性廃棄物処分費 (高レベル放射性廃棄物、 TRU廃棄物) | 0.09円/kWh | 0.09円/kWh |
| 合計 | 0.60円/kWh | 0.51円/kWh |
| 1世帯・1月当たりの負担額 | 274円 | 240円 |
| (参考)1世帯・1月当たりの 電力向け支出 | 9462円 | 9252円 |

注:『有価証券報告書総覧』に掲載された各費用を総電力量(需要端)で除して計算。
世帯1月当たりの平均電力消費量は、日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット
編『エネルギー・経済統計要覧』より、2006年度455kWh、2007年度467kWhとした。

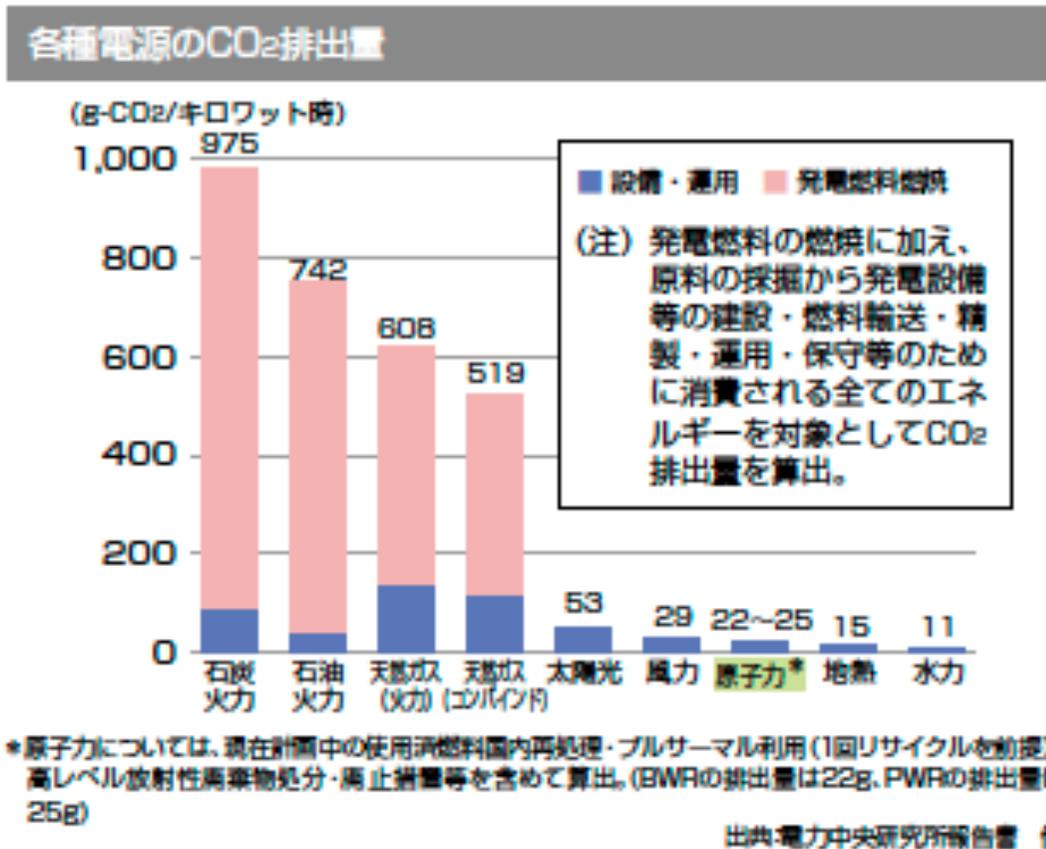
再処理費用負担について

- バックエンド費用は莫大な額と推計されている。
- これに基づいて電気料金に含めて費用を徴収する制度が構築されてきた。
- だが、これはあくまで六ヶ所再処理工場での再処理のみの費用負担額である。全量再処理するのであれば、さらに必要になる。

原子力からのCO2排出量と 再生可能エネルギーの比較

- Sovacool (2008), “Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey”, *Energy Policy*, 2950-2963
 - 原子力発電からのCO2排出量を推計したこれまでの研究を全て調査し、とりまとめたもの。
 - これまでの研究の包括的レビューになっており、客観性を持っている。
- Jacobson, Mark Z. (2009) “Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy and Environmental Science*,” 2009(2),pp.148-173.
 - 非化石エネルギーに関して、大気汚染、CO2排出量、水消費量、資源量の観点から総合的に比較したもの。
 - これまでの研究に依拠した包括的レビューになっている。

電事連によるCO2排出量 に関する説明



出所:電気事業連合会
(2010)「原子力2010[コ
ンセンサス]」

Sovacool(2008)による原子力発電からのCO2排出量に関する研究のレビュー

- 英語で出版された原子力発電所からの温室効果ガス排出量を推計した103の研究をレビュー
- 信頼性のないデータを除外
 1. 10年を経過した研究(1997年以前のもの)を除く。(40)
 - 時代遅れのデータを除外する
 2. 公開されていないデータに基づく研究を除外する。(9)

Sovacool(2008)による原子力発電からのCO2排出量に関する研究のレビュー

- 方法論によって除外(35)
 - 非公開データに依拠
 - 二次的情情報源を利用。
 - 計算方法の説明がないもの。
 - 核燃料サイクルの各パートでの推計がないもの。データや方法論の透明性を重視。
- 以上の基準を全てクリアーしたの研究(19)が、同じ基準をみたすものとして等しく扱える。

原子力発電所からの温室効果ガス排出量 に関する研究結果の要約

| | フロントエ ンド | 建設 | 運転 | バックエン ド | 廃炉 | 合計 |
|----|-------------|------|-------|------------|-------|--------|
| 最小 | 0.58 | 0.27 | 0.1 | 0.4 | 0.01 | 1.36 |
| 最大 | 118 | 35 | 40 | 40.75 | 54.5 | 288.25 |
| 平均 | 25.09 | 8.20 | 11.58 | 9.2 | 12.01 | 66.08 |
| 割合 | 38% | 12% | 17% | 15% | 18% | |
| N | 17 | 19 | 9 | 15 | 13 | |

出所: Sovacool (2008), p.2957

原子力と二酸化炭素排出

- 原子力は決して炭素フリーなエネルギーではない。
- 石炭、石油、天然ガスよりは排出量が少ないが、再生可能エネルギーよりも多く排出する。
 - 原子力: 平均66g-CO₂/kWh
 - 太陽光: 29～35g-CO₂/kWh
- 原子力の排出量については、透明性の高い包括的な研究が一層必要とされている。
 - 81%の研究が、方法論的に受け入れがたい。
 - 残りの19%の研究にも包括的でないものも含まれている。
 - 検討されている原子炉自体が大きく異なる。

石炭・石油・天然ガスに代わる資源の比較

1. 資源量

| 技術 | 利用可能性 (兆kWh/年) | 技術的可能性 (兆kWh/年) | 設置量(現 行)(100万 kW) | 設備利用率 | 発電量(現 在)(10億 kWh/年) |
|-------|----------------------|--------------------|-------------------------|------------|---------------------------|
| 太陽光 | 14900 | <3000 | 8.7 | 0.1-0.2 | 11.4 |
| 太陽熱発電 | 9250-11800 | 1.05-7.8 | 0.354 | 0.13-0.25 | 0.4 |
| 風力 | 630 | 410 | 94.1 | 0.205-0.42 | 173 |
| 地熱 | 1390 | 0.57-1.21 | 9 | 0.73 | 57.6 |
| 水力 | 16.5 | <16.5 | 778 | 0.416 | 2840 |
| 波力 | 23.6 | 4.4 | 0.00075 | 0.21-0.25 | 0.0014 |
| 潮力 | 7 | 0.18 | 0.26 | 0.2-0.35 | 0.565 |
| 原子力 | 4.1-122 (90-300年) | <4.1-122 | 371 | 0.808 | 2630 |
| 石炭CCS | 11(200年) | <11 | 0 | 0.65-0.85 | 0 |

出所: Jacobson (2009), p.153.

石炭・石油・天然ガス以外のエネルギー源 からの CO2排出量

| | ライフサイクル | 遅延による機会 排出 | 戦争・テロ(原子 力)、炭素漏洩 (CCS)による排 出 | 総排出量 |
|--------|----------|---------------|---------------------------------------|-----------|
| 太陽光発電 | 19-59 | 0 | 0 | 19-59 |
| 太陽熱発電 | 8.5-11.3 | 0 | 0 | 8.5-11.3 |
| 風力 | 2.8-7.4 | 0 | 0 | 2.8-7.4 |
| 地熱 | 15.1-55 | 1-6 | 0 | 16.1-61 |
| 水力 | 17-22 | 31-49 | 0 | 48-71 |
| 波力 | 21.7 | 20-41 | 0 | 41.7-62.7 |
| 潮力 | 14 | 20-41 | 0 | 34-55 |
| 原子力 | 9-70 | 59-106 | 0-4.1 | 68-180.1 |
| 石炭-CCS | 255-442 | 51-87 | 1.8-42 | 307.8-571 |

出所: Jacobson (2009), p.154.

結論

- 原子力発電の費用は他の電源に比べて低くない。
- 使用済燃料再処理によって多額の費用がかかり、今後増大する可能性が高い。
- バックエンド費用の負担システムがすでにできあがっている。
- 原子力発電は炭素フリーな電源ではないし、CO2排出量の点で再生可能エネルギーより優れているとは言いがたい。
- 原子力一辺倒の政策を改め、再生可能エネルギー中心のエネルギー政策への転換することが必要である。

グリーン改革の方向性

1. 国家財政のあり方を改革する
 - － 一般会計、エネルギー特別会計の用途を徹底的に精査し、原子力偏重を改める。
2. 電力料金を通じた費用負担のあり方を改革する
 - － 電源開発促進税の用途を精査する(=1の課題)
 - － 再処理費用に関する無制限の費用徴収を可能とする制度を改める。
 - － 再生可能エネルギー普及のために電力料金を再設計する。

ご静聴、ありがとうございました。

詳しくは、大島堅一『再生可能エネルギーの政治経済学』東洋経済新報社をご覧ください。

文献リスト

- 大島堅一(2010)『再生可能エネルギーの政治経済学』東洋経済新報社
- Hondo, Hiroki (2005) Lifecycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy*, 30, pp.2042-2056.
- Jacobson, Mark Z. (2009) Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy and Environmental Science*, 2009(2),pp.148-173.
- Sovacool, Benjamin K. (2008) Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. *Energy Policy*, 36(8),pp.2950-2963.
- Spadaro, Joseph V., Lucille Langlois and Bruce Hamilton (2000) Greenhouse gas emissions of electricity generation chains, assessing the difference. *IAEA Bulletin*(42/2/2000).
- Uchiyama, Y. and H. Yamamoto (1995) Life cycle analysis of power generation plants, CRIEPI report Y94009.
- Van De Vate, Joop F. (2002) Full-energy-chain greenhouse gas emissions: a comparison between nuclear power, hydropower, solar power, and wind power. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 3(1),pp.59-74.
- Vattenfall (2004) Certified environmental product declaration of electricity from Forsmark NPP (updated 2005) and Ringhals NPP.
- World Energy Council (2004) Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment.