

S - 3 脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案 手法の確立に関する総合研究プロジェクト

3 . 都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減策導入効果の評価

(2) 都市エネルギー供給由来の二酸化炭素排出評価と変革による削減効果

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 藤井 康正

[要旨] 本研究では、民生業務・家庭部門における最終需要端での省エネルギー施策の導入や分散電源の大規模導入が、日本の電力系統の電源構成や運用方法に影響を与え、その結果として現れる日本のエネルギー需給と CO₂ 排出量に与える影響を詳細に検討することを目的としている。

平成 16 年度は、日本全国を 9 地域に分割した最適電源構成モデルを構築した。本モデルの時間解像度は、7 季節、24 時間帯であり、電源の種類としては原子力、石炭、IGCC、LNG、LNG 複合、石油、揚水、一般水力、地熱（外生値）を考慮し、9 地域別の電力需給構造の差異や地域間での電力の経済融通も考慮した。この最適電源構成モデルは、大規模な線形計画問題として定式化され、CO₂ 排出削減技術として CO₂ 回収貯留設備も考慮した。

平成 17 年度は以下の 3 つのを行った。まず、個々の家庭における不確実な需要を生成するボトムアップシミュレーションモデルを構築した。このモデルは、世帯を構成する各人の行動を乱数で決め、その行動に関連する機器の電力・熱負荷を積み上げることで、時間解像度 10 分の詳細な日負荷曲線を得るものである。次に、このように作成された不確実な日負荷曲線を用いて、確率動的計画法により個々の家庭でのコージェネレーションシステム、給湯用ヒートポンプの最適運転方法を決定するモデルを構築した。このモデルを用いて、全国 47 都道府県別の世帯構成、生活時間、気候の差異を反映させた戸建住宅 4,700 軒分のコージェネレーションシステムと給湯用ヒートポンプの運用シミュレーションを行い、これらの機器が大規模導入された場合の日本の各地域の系統電力の日負荷曲線の形状に与える影響を推定した。そして、昨年度構築した最適電源構成モデルを用いて、日負荷曲線の変化も考慮した CO₂ 排出削減効果を評価した。その結果、例えば、1990 年比 80% 削減の場合では、期間平均の CO₂ 排出原単位として、コージェネレーションシステム、給湯用ヒートポンプ導入ケースでそれぞれ 0.07、0.04kg-C/kWh が得られた。

[キーワード] 最適電源構成モデル、CO₂ 回収貯留、コージェネレーションシステム、給湯用ヒートポンプ、家庭用エネルギー需要モデル

1 . はじめに

京都議定書が発効し、日本でも 1990 年比 6% の温室効果ガスの削減が要求されることとなった。これにより、産業、民生、運輸などの各最終需要部門におけるエネルギー利用の効率化、低環境負荷を実現するとともに、エネルギー転換部門としての発電部門においても、京都議定書に対応するための電源構成やその運用などが求められている。

日本の最終エネルギー消費の 14.2% (2003 年度) を占める家庭部門に対して、省エネルギー対策を行うことは重要性を増してきている。政府もコージェネレーションシステム（以降 CGS と略記）なら

びに給湯用ヒートポンプ(以降HPと略記)に関して導入目標を掲げ、市場においても高効率給湯器やCGSの投入・開発強化が実施されている。こうした機器の大規模導入は、家庭における給湯用エネルギー源の変化や系統電力購入量の変化をもたらし、将来的な電源計画にも大きく影響を及ぼしうる。

本研究では、個々の家庭の不確実な電力需要・熱需要に対して、CGSとHPの最適な運用を決定し、その一軒一軒の系統電力購入量を考えることで、従来の研究では考えられてこなかった各家庭での運用差にも目を向けている。また、供給側に目を向けると、京都議定書の発効に伴い、温室効果ガスとりわけCO₂排出量的大幅削減の必要性への認識は高まっている。CO₂排出量削減対策には、省エネルギーの推進や炭素依存度の低い一次エネルギー源への転換など様々なものが存在するが、IPCCで特別報告書が作成されたりするなど、昨今特に注目を集めている技術としてCO₂回収貯留がある。CO₂回収貯留に関しては、日本でも長岡市でその地中貯留実験が行われるなど、技術的にもその実用化は近いと考えられている。今年度の研究では、昨年度作成した最適電源構成モデルを活用して、発電部門にCO₂排出量制約が課せられた場合、最適電源構成ならびにCO₂回収貯留設備の導入がどのように推移するかを試算した。またさらに、家庭部門にCGSやHPが大規模に導入された場合に、発電部門側の電源構成・運用の変化も考慮して、CO₂排出量がどのように影響を受けるかも評価した。

2. 研究目的

本研究は、次のように3つの部分に分けられる。

(1) 家庭での電力・熱の日負荷曲線のボトムアップシミュレーション

家庭での人間の挙動を、乱数を用いた確率的なシミュレーションとしてモデル化し、電力・熱の日負荷曲線を生成する。

(2) 確率動的計画法を用いたCGSやHPの最適運用戦略の導出

ボトムアップシミュレーションにより作成した家庭での電力・熱の日負荷曲線を用い、一軒一軒の家庭にCGSやHPを導入し、確率動的計画法を用いて最適な運用方を決定するとともに系統電力購入量の変化を算出する。

(3) 最適電源構成モデルによる電源構成・運用とCO₂回収貯留の推移の計算

全国47都道府県の4,700軒分の家庭を想定した系統電力購入量の変化を推定値を集計し、CGSやHPの導入が系統電力の日負荷曲線の形状に与えるマクロな影響を評価する。そして、2050年までのCGSやHPの普及シナリオを与え、これらの機器の大量導入が、電源構成・運用ならびにCO₂回収貯留の推移にどのように影響を及ぼすかを、最適電源構成モデルを利用して評価する。

3. 研究の方法

(1) 家庭での電力・熱の日負荷曲線のボトムアップシミュレーション

本研究で作成したボトムアップシミュレーションは家庭の中にある電気・ガス機器個々の時刻別に発生する需要を乱数(モンテカルロ・シミュレーション)により生成し、それらの和として1軒1軒の電力・熱の日負荷曲線を算出するものである。まず、統計調査データを参考に各家庭の世帯構成員とその行動を決め、それぞれの10分毎の各時点での行動や気温などの情報から、各電気・ガス機器の起動確率を求める。そして、求めた起動確率に従って、これらの機器の起動・停止をモンテカルロ・シミュレーションにより決定し、それに機器毎の単位消費エネルギーを掛けることによってその機器の使用エネルギーを求める。そして、それを積分することによって日負荷曲線を生成する。

図1には、東京在住の5人家族、冬季平日の電力と熱(給湯)の日負荷曲線の生成サンプルを載せる。時刻によって急峻なピークが表れ、不確実な需要となる様子が模擬できていることが見て取れる。

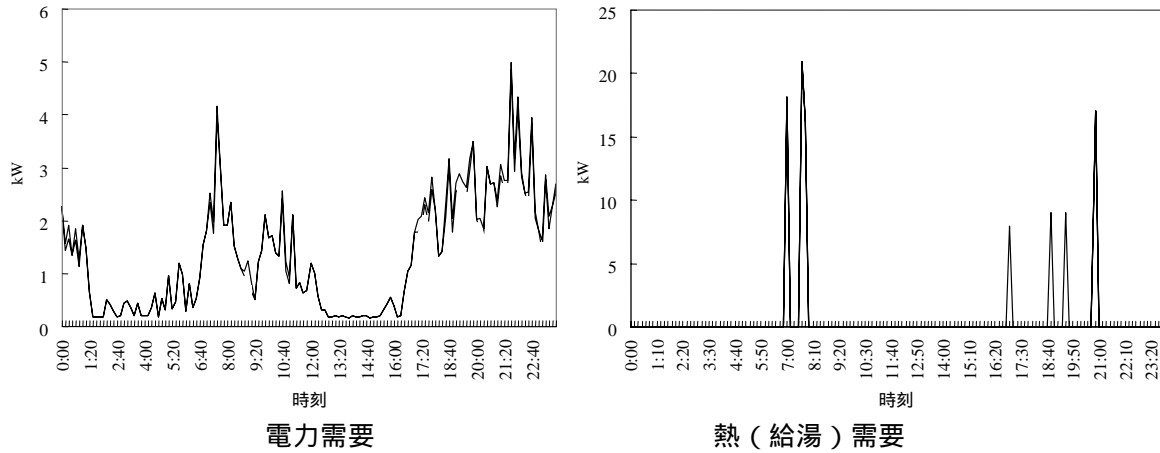


図1. 東京在住の五大家族冬季平日の電力と熱(給湯)の日負荷曲線の生成サンプル

都道府県による気温・家族構成比率・行動パターン・機器普及率の違いを考慮して、全国47都道府県・20世帯類型・6季節・10分単位の電力・熱の日負荷曲線を生成する。

(2) 確率動的計画法を用いたCGSやHPの最適運用戦略の導出

家庭における電力・熱の日負荷曲線の形状は、毎日毎日異なっており確実に負荷の大きさを予測することは難しい。また、負荷変動が大きく、負荷の集中する時間帯も日々変化するものと考えられる。このような状況下で、CGSやHPのメリットを活かすような効率的な運用を行なうためには、家庭での電気・ガス機器の使用傾向、CGSやHPの性能等を考慮した合理的な運用戦略を決める必要がある。

そこで本研究では、家庭における電力・熱の需要の時間的な推移を、一種の確率過程でモデル化できると仮定し、確率動的計画法を用いて、エネルギーコスト(電気代とガス代の和)の期待値が最小となるような最適運用戦略を導出することを考える。

以下に第 t 時点におけるエネルギーコスト期待値 Q_t を求める関数方程式を示す。

$$Q_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}) = \min_{a_t} \left(C_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}, a_t) + \sum_{m=1}^8 P_{t,t+1}(Dh_{t,j}; Dh_{t+1,m}) Q_{t+1}(S_{t+1,i'}, Dh_{t+1,m}) \right) \quad (1)$$

$$Q_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}, De_{t,k}) = \min_{a_t} \left(C_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}, De_{t,k}, a_t) + \sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^8 P_{t,t+1}(Dh_{t,j}, De_{t,k}; Dh_{t+1,m}, De_{t+1,n}) Q_{t+1}(S_{t+1,i'}, Dh_{t+1,m}, De_{t+1,n}) \right) \quad (2)$$

ただし、 C_t : 第 t 時点における総コスト、 $S_{t,i}$: 第 t 時点に貯湯タンク内残湯量(i : 8段階に離散化)、 $Dh_{t,j}$: 第 t 時点に熱負荷(j : 8段階に離散化)、 $De_{t,k}$: 第 t 時点に電力負荷(k : 8段階に離散化)、 a_t : 貯湯タンク内残湯変化量、 $P_{t,t+1}$: 第 t 時点と第 $t+1$ 時点との間における需要の遷移確率

式(1)と(2)の $P_{t,t+1}$ は、モンテカルロ・シミュレーションを通して、同一世帯に関して繰り返し需要(10日分)を発生させて、その発生頻度から確率を推計する。モンテカルロ・シミュレーションにおいて、たまたま一度も発生しなかった事象の確率については、周辺の事象の確率を利用して正

規分布補間を行なうことによって値を想定する。

次に対象としたCGSおよびHPシステム及びモデル仕様を示す。図2、図3に概略図を載せる。

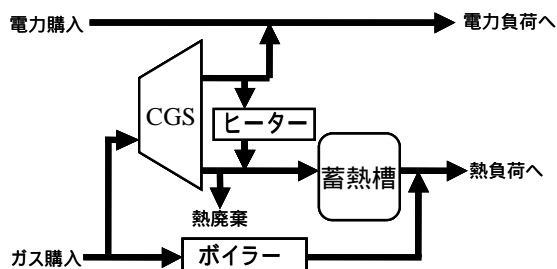


図2. CGSのシステム構成図

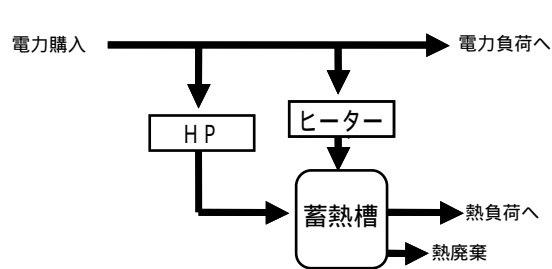


図3. HPのシステム構成図

表1 CGSの想定仕様（ガスエンジンCGSを想定）

項目	仕様	備考
発電出力	1000[W]	
廃熱出力	3250[W]	
効率(発電)	20[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m ³])基準
効率(廃熱)	65[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m ³])基準
総合熱効率	85[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m ³])基準
暖機運転時廃熱出力減少率	50[%]	エンジンが停止状態から運転状態に変化した時の熱出力減少率(暖機運転時間は10分間)
最大ガス消費量	0.4343[m ³ /h]	1時間連続動作時のガス消費量
貯湯タンク容量	20000[Wh]	タンク容量を300[]とし、元水温を一律60[]上昇させるものとする。
補助ボイラ熱効率	80[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m ³])基準
ヒーター熱効率	98[%]	余剰電力を熱変換する際のヒーター熱効率
タンク保温効率	99.9[%/5min]	電気温水器の保温効率を参考に決定・5分ごとにタンク内熱量が0.1[%]づつ減少

表2 HPの想定仕様

項目	仕様	備考
出力	4500[W]	
COP	4(定格)	外気温に依存して変化
暖機運転時廃熱出力減少率	50[%]	エンジンが停止状態から運転状態に変化した時の熱出力減少率(暖機運転時間は10分間)
貯湯タンク容量	25800[Wh]	タンク容量を370[]とし、元水温を一律60[]上昇させるものとする。
ヒーター熱効率	98[%]	不足した熱需要をまかなうためのヒーター熱効率
タンク保温効率	99.9[%/5min]	電気温水器の保温効率を参考に決定・5分ごとにタンク内熱量が0.1[%]づつ減少

図4、図5に一軒一軒の不確実な需要に対し確率動的計画法により運用を決定し、その後に100軒分平均した各種負荷とCGS出力ならびにHP用電力などを示す。(いずれも床暖房がない場合)表3には、運転コストや購入電力量、購入ガス量について比較したものを載せる。CGSでは、確率動的計画ケースでは小刻みに需要に対応した運転をすることはなく、電力需要がある程度期待される朝と夕刻に運転をする結果となっている。表3に示すように、CGSの排熱を有効に利用できず、運転コスト面で割高となる傾向が見られる。ただし、床暖房を導入すると、熱負荷の増加により、運転コストも割安になる。(図6、図7には参考のため、床暖房がある場合のCGS、HPの計算結果の例もそれぞれ示す。)

HPの場合では、不確実な需要に備えるため、貯湯タンク残湯量がある程度多く保とうとする運転パ

ターンをとり、当初予想された夜間電力を利用した運転とはならなかった。この結果は、本年度の定式化方法では、確率動的計画の24時における終端条件の考慮の仕方にまだ検討の余地がある可能性を示唆している。ただし、このように夜間電力の有効利用が不完全ながらも、表3に示すように、運転コスト面ではHPの導入は運転コストの削減に寄与しているのがわかる。

ここで計算された購入電力量の変化、購入ガス量の変化を次章の最適電源構成モデルへの入力データに反映させる。HPで購入電力量の増加により、系統需要が増加する一方で、熱負荷に対するガス量がなくなる。CGSでは購入電力量が減少する一方で、家庭でのガス消費量の増加に繋がる。

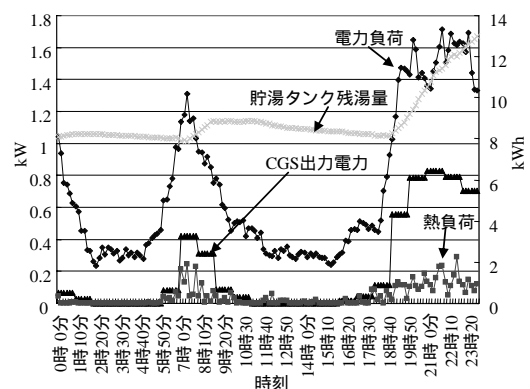


図4. CGS確率動的計画ケース（床暖房無し）

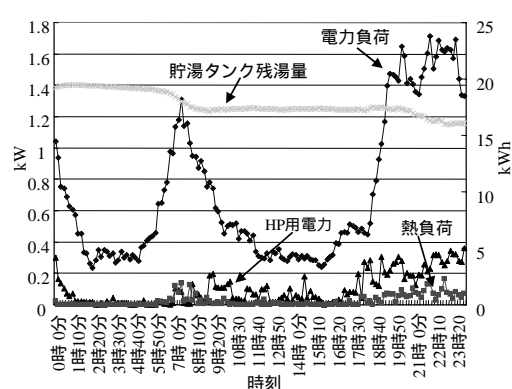


図5. HP確率動的計画ケース（床暖房無し）

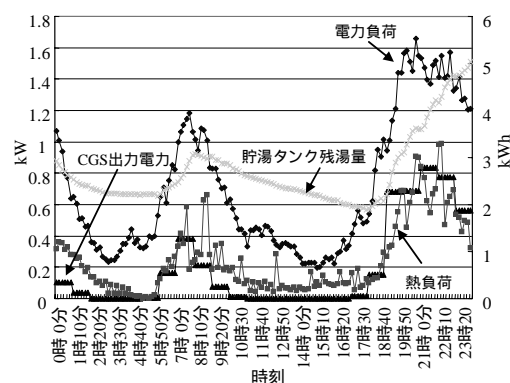


図6. CGS確率動的計画ケース（床暖房有り）

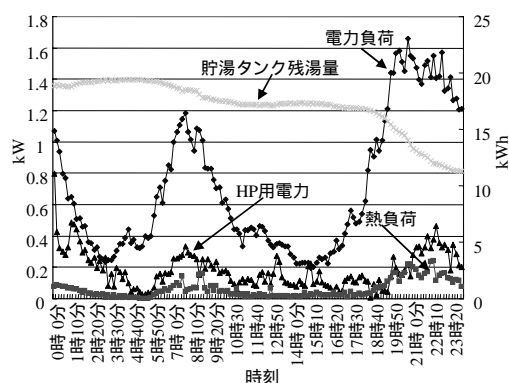


図7. HP確率動的計画ケース（床暖房有り）

表3 運転コスト・購入電力量・購入ガス量比（東京都の場合）

	CGS導入ケース			HP導入ケース		
	運転費	購入電力量	購入ガス量	運転費	購入電力量	購入ガス量
床暖房無し	1.003	0.744	2.537	0.894	1.141	0
床暖房有り	0.875	0.755	1.303	0.797	1.347	0

（注：それぞれCGS・HPを持たないガスボイラで熱負荷をまかなう場合を1として規格化している。）

（3）最適電源構成モデルによる電源構成・運用とCO₂回収貯留の推移の計算

前述したように、本最適電源構成モデル自体は、平成16年度の研究で構築したものであり、今年度は、対象期間を1990～2035年だったものを、2005年～2050年へと更新した。

本モデルは需要に対して、日本全体の発電事業総費用を最小にするような電源構成、運用方法を線

形計画法により求めるものであり、電源種別の運用特性や経済特性、そしてCO₂排出量削減対策なども明示的に考慮した解析が可能である。本モデルの主要設定条件を以下に載せる。

- ・ 目的関数：発電事業総費用（期間中の割引率は5%で現在価値換算）の最小化
- ・ 制約条件：電力需給制約、供給予備力制約、設備容量制約、発電出力制約、揚水式水力関連制約、電力融通制約、負荷追従制約、LNG消費量制約、CO₂排出量制約、CO₂回収設備制約、CO₂貯留制約
- ・ 対象期間：2005年から2050年（10期間）
- ・ 対象地域：日本を9地域（北海道・東北・東京・北陸・中部・関西・中国・四国・九州）に分割
- ・ 供給力：原子力、石炭火力発電、IGCC、LNG火力発電、LNG複合発電、石油火力発電、揚水発電、一般水力・地熱発電（外生値）、他社受電（日本全体の最適化）
- ・ 需要：各地域・年度につき24 時間帯日負荷曲線（年間7 パターン）を想定。
- ・ 参照ケース、2050年までにCGSの戸建住宅100%普及ケース、2050 年HPの戸建住宅100%普及ケースの需要を使用（現時点から2050年までは線形に普及率が高まると想定）
- ・ CO₂回収設備：石炭火力発電、IGCC、LNG火力発電、LNG複合発電にのみ導入可能と想定
- ・ CO₂貯留：帯水層、油・ガス田、海洋帯水層、海洋への貯留を考慮する。輸送パイプライン、注入法等についても考慮

4．結果・考察

図8、図9には、CO₂排出制約が無いケースにおいて、CGSやHPが普及することで参照ケース（CGSやHPが普及しないケース）からの発電電力量の変化分をそれぞれ図示する。2050年頃になると、CGSやHPの大規模普及による電力需要の変化に対しては、主にベース電源となる原子力、LNG複合発電の発電量を変化させることで対応している。

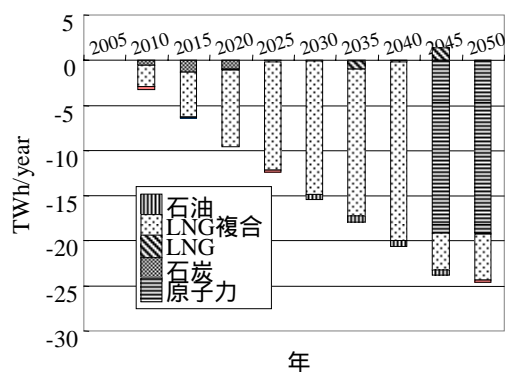


図8. CGSの普及により変化する発電電力量

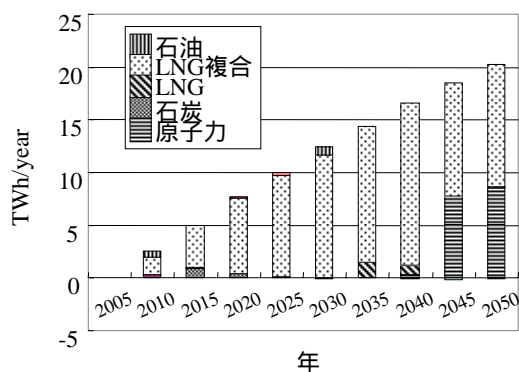


図9. HPの普及により変化する発電電力量

次に図10には参照ケース（CGSやHPが普及しないケース）において、CO₂排出量の1990年比8割削減を想定した場合のCO₂バランスを示す。また、このときのCO₂排出制約条件式のシャドープライスと同額の炭素税を導入した状況下で、CGSとHPが大規模普及した場合のCO₂バランスを図11、図12にそれぞれ示す。いずれの場合も主にLNG複合発電から排出されるCO₂を油・ガス田、帯水層、海底下帯水層、海洋（深海）の順に使用していき、CO₂回収貯留を大規模に実施される結果となった。また、HPの導入により家庭で排出されなくなるCO₂排出量は大きく、同額の炭素税を導入した場合、CO₂

排出量の8%程度の追加削減につながる結果となった。

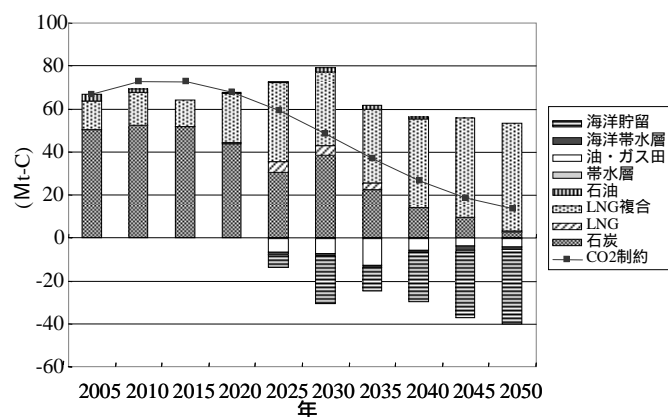


図10. 参照ケースのCO₂バランス（1990年比8割削減）

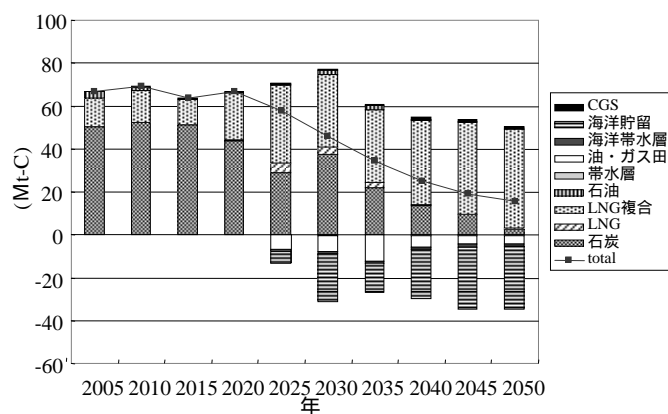


図11. CGSの普及時のCO₂バランス（1990年比8割削減相当の炭素税導入ケース）

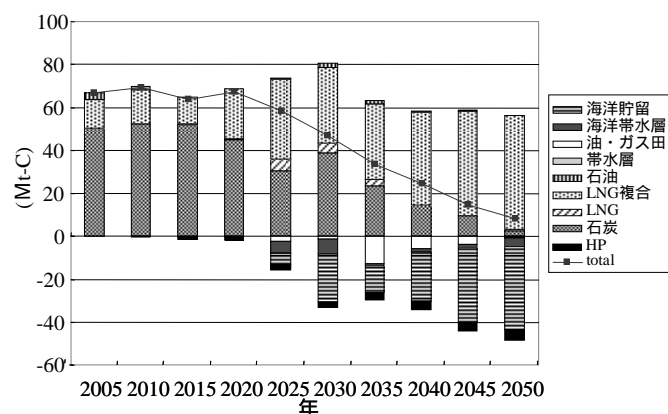


図12. HPの普及時のCO₂バランス（1990年比8割削減相当の炭素税導入ケース）

最後にCGSやHPの普及によりCO₂排出原単位がどう変化するか考察する。CO₂排出原単位の計算方法は、参照ケースとCGSケース・HPケースの電源からのCO₂排出量の差を分子に、総電力需要量の差を分母に用いることで、系統側の運用はブラックボックスとして、あくまで需要端でのCO₂排出原単位を、将来の設備容量の変化まで含めたCO₂排出原単位を算出することになる。

こうして算出した2050年までの全期間内排出原単位を図13に示す。現在の需要端でのCO₂排出原単位は全電源平均で0.101[kg-C/kWh]、火力平均で0.18[kg-C/kWh]である。今回の計算結果では、CO₂排出量制約が無い場合には、CGSケース・HPケースのどちらも全電源平均より小さい結果となった。これは、CO₂排出量制約が無い場合には、原子力の発電電力量を変化させて、CGSやHPの普及による電力需要の変化に対応しているため、現在の全電源平均や火力平均とはいずれも異なる結果となった。そして、CO₂排出量制約（1990年比5~6割削減）が課せられると、現在の全電源平均のCO₂原単位に比べ、CO₂原単位は増加する結果となった。これは、CO₂排出量制約が課せられた場合、原子力発電は上限制約一杯まで導入されるため、CGSやHPの普及による電力需要の変化には、LNG複合発電による調整で対応することになると推定されるためである。ただし、さらに厳しいCO₂制約（1990年比7~8割削減）が課せられると、CO₂原単位は低下に転ずる結果となっているが、これは火力発電所にCO₂回収装置のついた設備の普及するためである。

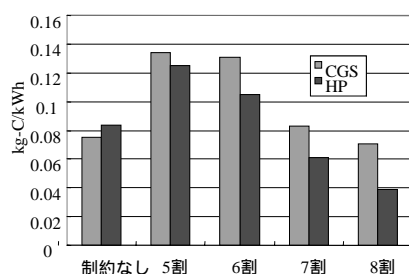


図13. 2050年までの全期間内CO₂排出原単位
(横軸は1990年比の2050年時点のCO₂排出削減率)

5. 本研究により得られた成果

本試算を通じて以下のことがわかった。

- ・ 不確実な需要下における確率動的計画法を利用した CGS の運用決定は、基本的には電力需要に追従して運転を行うため、床暖房が無い場合では、排熱を有効に利用することが出来ずに運転コストが割高になる地域も場合によってはあり得ることが予想される。床暖房が有る場合では CGS の導入により運転コストが削減される場合が多くなるが、床暖房の導入により快適性は向上するものの、エネルギーの消費量自体は増加する可能性がある。一方、HP を導入した場合、地域によって程度差はあるが、床暖房の有無によらず、従来のガスボイラよりも運転コストは削減されることが多いこと予想される。
- ・ CGS や HP の大規模普及の有無に起因する電源構成・運用の変化から求められる CO₂ 排出原単位は、全電源平均や火力平均とは異なる結果が得られた。CO₂ 排出量制約がないときには、CGS や HP の普及による電力需要の変化への対応は、主に原子力発電により行うため全電源平均よりも低い値となる。1990 年比 5 ~ 6 割削減程度の CO₂ 排出量制約が課せられると、原子力発電は上限一杯まで導入されるため、CGS や HP の普及による電力需要の変化へは専ら LNG 複合発電により対応することになるため、CO₂ 排出原単位は増加する。さらに、1990 年比 7 ~ 8 割削減程度の厳しい制約が課せられると、CO₂ 回収貯留の導入が進み CO₂ 排出原単位は低下に転ずる。その結果、今回想定した前提条件では、厳しい CO₂ 削減を想定した場合、HP は CGS よりも高い CO₂ 排出削減効果を期待できる。

今年度の評価では、想定した前提条件に依存しているものと考えられるが、HP と比較して CGS には不利な結果となっている。今後は、戸建住宅でのガスエンジン CGS に加えて、燃料電池 CGS や集合住宅での CGS の集合運用なども想定した評価を行い、CGS に関する技術進歩も考慮して計算精度を高めることが必要と考えられる。

また、CO₂ 回収貯留技術の有効性も示されたが、CO₂ 地中貯留に関しては、現在、日本国内の CO₂ 貯留可能量の見直し作業が進められている。新しい CO₂ 貯留可能量を反映した評価を行なう必要性があると考えられる。また、今年度の評価では、特に CO₂ 海洋貯留の役割が大きくなったが、CO₂ 海洋貯留実施への国際的なコンセンサスが必ずしも得られるとは限らないため、CO₂ 海洋貯留が実施できないケースを想定した評価も重要であると考えられる。

6．引用文献

- 1) EDMC「エネルギー・経済統計要覧」(財)省エネルギーセンター(2002)
- 2) 西尾健一郎 他、「ヒートポンプ給湯器や燃料電池 CGS など家庭用エネルギー機器の技術選択分析」、第 24 回エネルギー資源学会研究発表会
- 3) 末包哲也、「CO₂ 貯留技術の動向 1」地中(帯水層)貯留技術、エネルギー資源学会学会誌 第 26 巻第六号(通巻 154 号)
- 4) 辻穀一郎 他、「関西文化学術都市における住宅用エネルギー消費の計測調査報告書(第 部)」日本学術振興会(2001)
- 5) NHK 放送文化研究所「国民生活時間調査」日本放送出版協会(2001)
- 6) 総務省統計局統計センター「国勢調査」(2002)
- 7) 総務省統計局資料「平成 16 年全国消費実態調査」
- 8) 電気事業連合会統計委員会編「電気事業便覧平成 13 年版」日本電気協会(2002)
- 9) 鍋島一郎「動的計画法」森北出版(1968)
- 10) IBEC 住宅建築省エネルギーハンドブック 2002
- 11) 国立社会保障・人口問題研究所、「日本の世帯数の将来推計(都道府県別推計)」(2005 年 8 月推計)
- 12) 総合資源エネルギー調査会需給部会「2030 年のエネルギー需給展望」
- 13) 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部会編「平成 14 年度電力需給の概要 52」
- 14) 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部会編「平成 16 年度電源開発の概要 49」
- 15) エンジニアリング振興協会、石油開発環境安全センター、「CO₂ 地中貯留技術調査 平成 5 年度報告書」(1994)

7．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8．研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

なし

<その他誌上発表(査読なし)>

なし

(2) 口頭発表(学会)

戸張智貴、藤井康正、山地憲治：「家庭用 CGS・給湯用 HP の大規模導入時が日本のエネルギー需給・CO₂ 排出量に及ぼす影響の評価」、エネルギー・資源学会・第 22 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(2006 年 1 月)

戸張智貴、横山直規、藤井康正、山地憲治：「負荷の不確実性を加味した家庭用 CGS・給湯 HP の運用が日本のエネルギー需給・CO₂ 排出量に与える影響評価」、平成 18 年電気学会全国大会(2006 年 3 月)

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、電気学会、エネルギー・資源学会などの主要なエネルギー関連学会での発表やシンポジウム等での議論を通じ、関連業種の専門家における本モデルの認知度を高め、その妥当性の向上を目指すとともに、政策評価の道具としての説得力を高めるように努める。