

戦略的創造研究推進事業
(社会技術研究開発)
平成29年度研究開発実施報告書

「科学技術イノベーション政策のための科学 研究開発プログラム」
研究開発プロジェクト
「レジリエンス強化のための省エネルギー機器導入制度設計」

上道 茜
(東京大学, 助教)

目次

1. 研究開発プロジェクト	2
2. 研究開発実施の要約.....	2
2-1. 研究開発目標.....	2
2-2. 実施項目・内容	2
2-3. 主な結果	2
3. 研究開発実施の具体的内容	3
3-1. 研究開発目標.....	3
3-2. 実施方法・実施内容	3
3-3. 研究開発結果・成果	13
3-4. 会議等の活動.....	22
4. 研究開発成果の活用・展開に向けた状況	22
5. 研究開発実施体制	22
6. 研究開発実施者.....	23
7. 関与者との協働、研究開発成果の発表・発信、アウトリーチ活動など.....	24
7-1. 主催したイベント等	24
7-2. 社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など	24
7-3. 論文発表、口頭発表、特許	24
7-4. 学会発表	25
7-5. 新聞報道・投稿、受賞等	25
7-6. 知財出願	25

1. 研究開発プロジェクト

プロジェクト名称「レジリエンス強化のための省エネルギー機器導入制度設計」
英語表記 System design to introduce energy-saving equipment for reinforcement of
resilience

研究代表者：上道 茜（東京大学 助教）

研究開発期間：平成29年10月 ～ 平成32年9月（36ヵ月間）

参画機関：東京大学

2. 研究開発実施の要約

2 - 1. 研究開発目標

本研究プロジェクトでは、経済性、環境性、災害時のエネルギーレジリエンス性という異なる目的を達成することのできる「エネルギーBCP策定サポートツール」の完成を目指す。また、構築したツールを活用した、きめ細やかなエネルギー機器導入政策設計の提案を行うことを目標とする。

2 - 2. 実施項目・内容

経済性、環境性、災害時のエネルギーレジリエンス性を達成することのできる「エネルギーBCP策定サポートツール」の完成、および、このツールを活用した客観的データに基づくエネルギー機器導入政策提案を目指し、平成29年度は以下の項目を実施した。

- (1) 従来の補助金制度に関する調査
- (2) 都内災害拠点病院に対するエネルギー需要についての調査に関する予備的検討
- (3) 分散型エネルギー機器導入量最適化ツール（最適化ツール）の実用化に向けた改良
 - ① 分散型エネルギー機器（太陽光発電システム、蓄電池）の追加
 - ② 地域別の水道配管の故障確率の考慮
 - ③ 新しい「エネルギーレジリエンス指標」の導入
 - ④ 多目的最適化問題への拡張
- (4) 最適機器構成の効性検証のためのエネルギーシステム詳細シミュレータ（詳細シミュレータ）の構築

2 - 3. 主な結果

エネルギーレジリエンスの指標として「災害時のエネルギー不足率の期待値」等を追加し、最適化ツールの改良を行った。改良したツールを用いて、規模の異なる災害拠点病院を対象とし、ケーススタディを実施した。その結果、トータルコストと電力不足率期待値がトレードオフ関係となるパレート最適解が得られた。これら最適量の分散型電源機器を導入した場合は、分散型電源を全く導入しない場合より、災害時の電力不足率期待値は大幅に低減できることがわかった。

3. 研究開発実施の具体的内容

3 - 1. 研究開発目標

本研究プロジェクトでは、全研究開発期間をとおして経済性、環境性、災害時のエネルギーレジリエンス性という異なる目的を達成することのできる「エネルギーBCP策定サポートツール」の完成を目指す。また、これを活用したきめ細やかなエネルギー機器導入支援施策設計を目指す。

その目標を達成するため、平成29年度は、これまでに本研究グループで開発をしてきた分散型エネルギー機器導入量最適化ツール（最適化ツール）の改良に加え、既存のエネルギー機器導入補助金制度に関する調査を実施した。

本研究プロジェクトの最終的な成果物として期待される事項を以下に示す。

1. 最適化計算による分散型エネルギー機器導入計画策定支援ツール（最適化ツール）を開発すること。
2. 上記によって得られた最適機器構成の有効性検証のためのエネルギーシステム詳細シミュレータ（詳細シミュレータ）を開発すること。
3. 本研究プロジェクトで開発するエネルギーBCP 策定サポートツールをベースに新しい補助金施策を提案すること。

また、本プロジェクトの完成によってもたらされる社会への影響・効果を以下に挙げる。

- 災害拠点病院をはじめとする公共性の高い事業所への自家発電機の導入の有効性が認知されること。
- 自家発電機の導入による災害時のレジリエンス強化に関する定量的な議論が可能となること。
- 医療機関向け補助金施策についての現状を整理し、将来の補助金施策構想についての議論のベースを創出すること。

3 - 2. 実施方法・実施内容

これまでの準備・進捗状況として、エネルギーシステム構成最適化計算による導入計画策定用ツール（以下、最適化ツール）については、そのフレームワークは既に完成している^{1,2}。

この最適化ツールは、災害リスクを考慮した機器導入指針を得ることを目的としたものであり、「エネルギー機器導入意思決定支援ツール」の構成要素のひとつである。

このツールでは、需要家（意思決定者）は、事業所の敷地面積、熱および電力需要のデータ、災害による事業停止損失の許容額を入力すれば、機器導入による利益や維持費などが算出され、導入すべき機器構成の最適化が可能となる。この最適化シミュレーション対象機器の平均的な熱効率等を考慮した時間分解能が1時間という粗いシミュレーションに留まっているものの、機器運用シミュレーションも実行することができる。また、得られた最適化計算の結果は、正味現在価値法を用いて補助金額算定に活用することができる。現段階では、

¹ H. Nagao, A. Uemichi, Y. Yamasaki, S. Kaneko; Proposal of a decision scheme for installing a cogeneration system considering disaster risks, Applied Thermal Engineering, 114, (2017) 1414-1423, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.061.

² 長尾浩志, 上道茜, 八木正彰, 山崎由大, 金子成彦, 坂東茂; 災害時の事業継続性を考慮したコージェネレーション機器導入計画最適化手法の提案, エネルギー・資源学会論文誌, 2017年, Vol. 38, No. 4, 10-23.

補助金額算出にあたっては正味現在価値（NPV）法を用いた損益分析を活用したものである。

本プロジェクトでは、実用に資する「エネルギーBCP策定サポートツール」の完成を目指し、最適化ツールの改良に加え、エネルギーシステム詳細シミュレータ（以下、詳細シミュレータ）を構築する。詳細シミュレータでは、最適化ツールが求めた最適エネルギー機器構成が災害時にも問題なく運用できるかの有効性検証を行う。以上に述べた、最適化ツールと詳細シミュレータを併せて、「エネルギーBCP策定サポートツール」と呼ぶことにし、このツールをベースに新しい施策を提案することを目指す。

本研究計画の概念図を図1に示す。

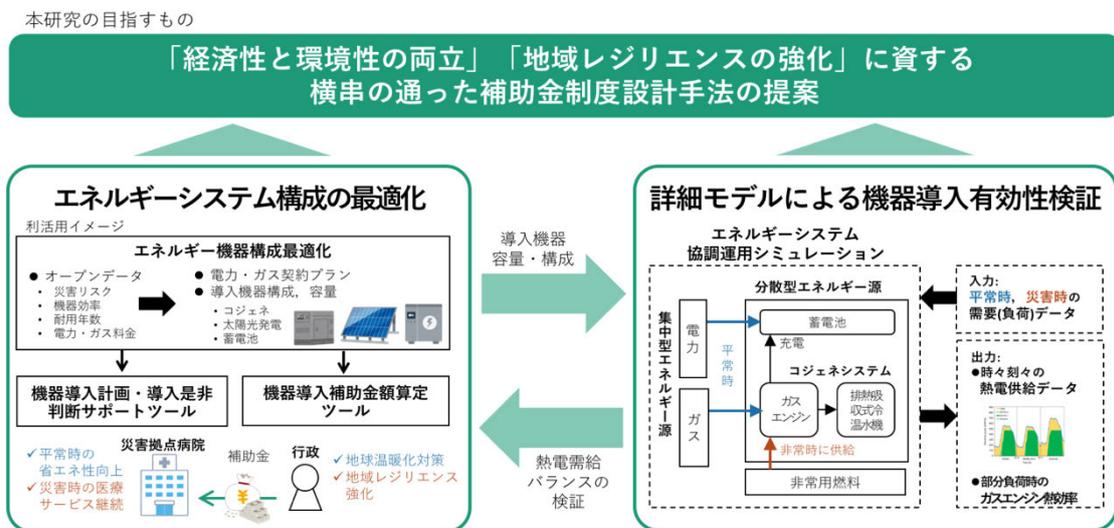


図 1 研究計画の概念図。

以上を踏まえ、平成29年度の本プロジェクトで実施した研究開発の方法・内容を述べる。

(1) 従来の補助金制度に関する調査

本研究では、「エネルギーBCP策定サポートツール」を開発し、このツールを活用したきめ細やかなエネルギー機器導入補助金制度を設計、提案することを目指す。そのために、補助金制度設計手法に関する知見を得ること、現状の課題を明らかにすることを目的として、これまでに施行されてきた補助金制度について公開情報をもとにした網羅的調査を行った。ここでは、主に各官公庁や都道府県が公開しているインターネット上の公開情報をもとに調査を行った。調査結果は、補助金の予算元（省庁）、申請要件、金額、国・地方自治体それぞれの負担額といった項目についてまとめた。今回の調査では明らかにすることができなかった事柄もあるため、平成30年度も本調査は継続する予定である。

なお、当初計画では補助金に関わる実務者への聞き取り調査を予定していたが、実現がかなわず、平成30年度に研究時期を延長して取り組むこととした。

(2) 都内災害拠点病院に対するエネルギー需要についての調査に関する予備的検討

「エネルギーBCP策定サポートツール」には、病院の熱電需要データを入力する必要がある。病床数、従業員数、平常時および災害時の来訪患者（予想）数といった基本的なデータ、導入されている医療機器、平常時のエネルギー利用に関するアンケート調査を行うために調査票を作成し、準備を進めた。調査の対象は都内80箇所（2016年12月現在）の災害拠点病院とする。

(3) 分散型エネルギー機器導入量最適化ツール（最適化ツール）の実用化に向けた改良

先に述べたように、本研究グループでは、エネルギー機器導入計画の立案にあたって、災害リスクを考慮した機器導入指針を確立することを目的とし、最適化ツールのフレームワークをこれまでに開発してきた。以下では、本研究グループがこれまでに構築した最適化ツールについて述べる（長尾ほか，2017）。このツールでは、事業者は、事業所の敷地面積、熱および電力需要のデータ、災害による事業停止損失の許容額を入力すれば、機器導入による利益や維持費などが算出され、機器導入判断が可能となる。また、最適化計算の結果は、正味現在価値法を用いて補助金額算定に活用することができる。

当研究グループが過去に構築したツールの概要を以下に述べる。伊東・横山が用いた機器規模および機器運用方策の階層的決定法³を参考にして、機器導入計画最適化シミュレーションツールを構築した。この機器構成最適化シミュレーションは、需要家の入力する対象建物データに応じて、設定した設計変数の値を最適化するものである。需要家による入力、対象とする事業所の敷地面積、自ら決定する災害による事業停止損失の許容額、1時間おきの熱および電力需要のデータの3つの値とした。設計変数は、コージェネレーションシステムパッケージに含まれるガスエンジン発電機、排熱投入型冷温水機、契約電力量、ガスプランの4項目である。

機器導入計画最適化シミュレーションの基本的な枠組みは、目的関数が最小値をとるように、設計変数を種々に変化させ、最適となる設計変数の組を決定する。目的関数は、経済性、環境性、レジリエンス性の評価指標を全て経済的価値に置き換えた和であり、つまり、単一目的最適化問題を解くことになる。

図2に、最適化したエネルギー機器導入前後でのコスト内訳の変化を示す。

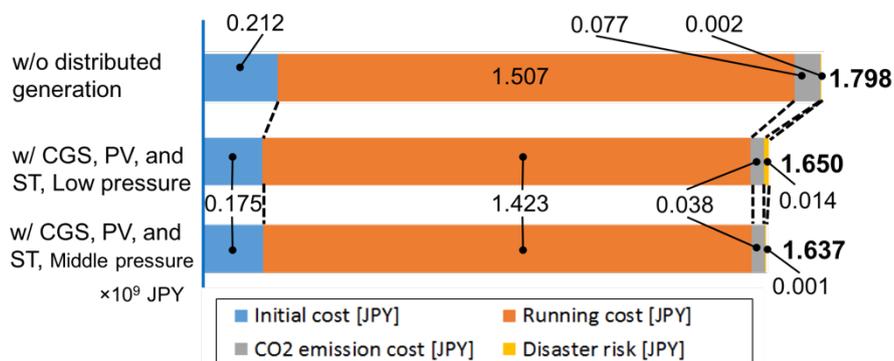


図2 病院を対象とした場合の最適なエネルギー機器導入後のコスト内訳の変化。

³伊東弘一，横山良平；コージェネレーションの最適計画～インテリジェント・フレキシブル・コージェネレーションを目指して～，(1990)，産業図書株式会社。

しかしながら、この段階の最適化ツールでは、以下に挙げるような問題点があった。

- (1) 分散型電源として考慮されているのは、コージェネレーションシステムを構成するガスエンジン発電機のみであり、災害時にガスが途絶した場合のシナリオに対応できない。
- (2) ガスエンジン発電機の冷却に必要な水道水の途絶確率が考慮されていないため、ガスエンジン発電機の災害リスク低減効果を過剰に見積もっている可能性がある。
- (3) ガス料金は単位体積あたりの一定値で定められ、無制限に利用できるという仮定がなされているため、実際のガス料金に関する契約形態と異なる。
- (4) エネルギー途絶による被害を日本円換算して、他のコストとの和として考えているが、災害拠点病院のような公共性の高い事業所では被害金額のみを指標とすることは不適當である。

このような問題点を解消し、実用レベルの分散型電源導入量決定するために、最適化ツールに改良を加えた。これまでの最適化ツールの枠組みをベースとして、(1) コージェネレーションシステム以外に分散型電源として太陽光発電システム (PV) および蓄電池 (ST) を考慮、(2) 断水確率の考慮、(3) ガスの契約 (以下、ガスプランと呼ぶ) を考慮、(4) 災害による被害を表す指標の見直しを行い、多目的最適化問題を解けるように改良を行った。

なお、以下は主に上道ら (2018) ⁴からの出典である。

① 考慮する分散型電源機器に太陽光発電システムと蓄電池の追加

(1) 太陽光発電システム (PV)

太陽光を利用した発電装置には大きく、光電効果を利用したものと太陽熱を利用したものに分類することができるが、本研究では光電効果を利用した太陽電池を対象とする。太陽の日射量によって出力が決まるため、建物の屋上や屋根に設置する事が一般的である。また FIT (固定価格買取制度) の影響もあり近年、急速に太陽光発電の普及が住宅用、非住宅用ともに進んでいる。今回、新たに太陽光発電システムを考慮した理由は、ガス供給に依存しないということのほかに、再生可能エネルギーであるために資源枯渇の懸念がなく、二酸化炭素を排出しない環境面での利点があるためである。

太陽光発電は日射量により出力が変動し、日射量は地域や季節によって傾向が大きく異なる。そこで、太陽光発電システムの発電量をシミュレートするため、NEDOの日射量データベース⁵を利用し、各季節および地域の日射量データを取得し、発電量を算出した。

(2) 蓄電池 (ST)

蓄電池のメリットは充放電計画をたてることで購入電力量のピークカットや、夜間に貯めた電力を昼間に使用することで電力従量料金の削減が可能であるという点である。また、太陽光発電装置と組み合わせることで出力変動を補償することも可能である。一方、充放電回数に限度がありガスエンジン発電機と比較して寿命が短いなどの問題もある。今回新た

⁴ 上道茜, 八木正彰, 山崎由大, 金子成彦; 経済性・環境性・レジリエンス性を考慮した分散型電源機器導入量決定のための多目的最適化ツールの開発, エネルギー・資源, 2018年, Vol. 39, No. 6, pp.6-18.

⁵ 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO, 年間特別日射量データベース METPV-11, <http://app0.infoc.nedo.go.jp/metpv/metpv.html>

に蓄電池を考慮した理由は電力需要のピークシフトを行うことで経済面の利点があること、太陽光発電システムの供給変動を吸収できるためである。

蓄電池は、電力の深夜料金時間帯に充電し、日中の売電量の多い時間帯に放電するというルールで運用する。これは、安い深夜料金で購入した電気を日中に利用することによるコスト低減を目的としている。蓄電池の特徴は、放電量が前時刻の充電量に依存しているため、これに留意し、関係式を構築し、運用シミュレーションに組み込んだ。

以上に述べた、太陽光発電システム、蓄電池を組み込んだ際の運用シミュレーション結果を図3に示す。

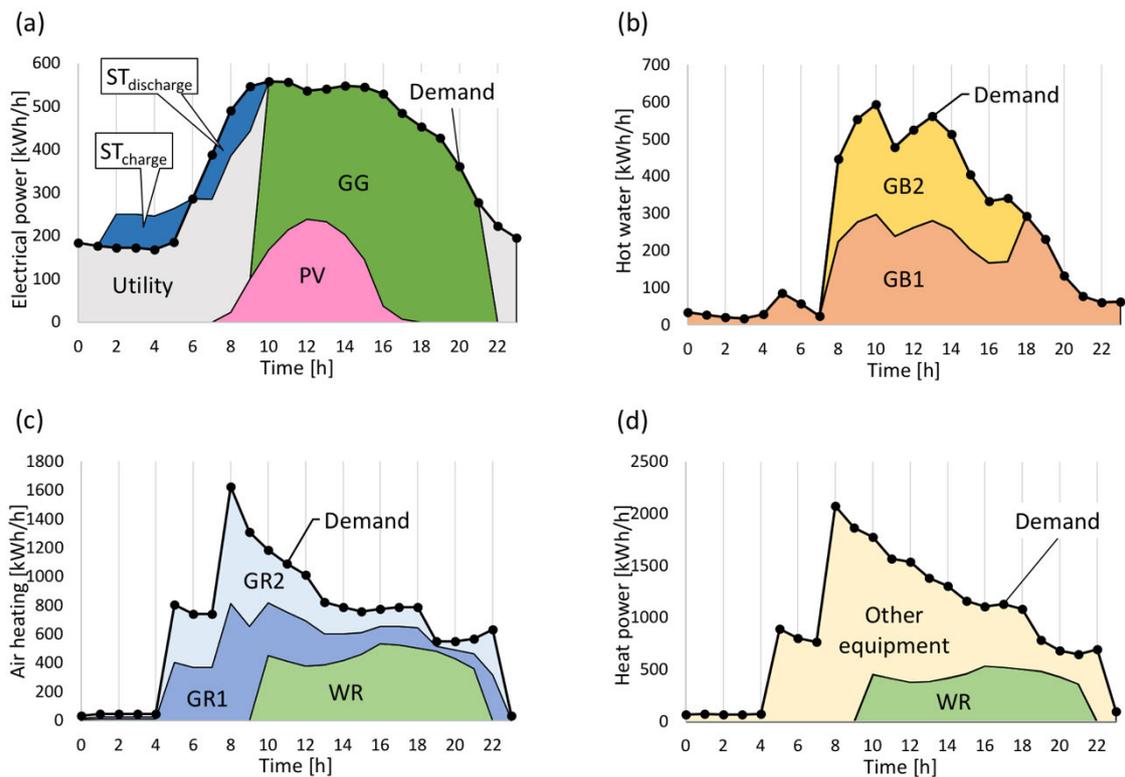


図3 晴天の冬期代表日における運用シミュレーション例. 熱電需要に対する延床面20,000 m²の仮想病院の場合. (a)電力需給, (b)温水需給, (c)暖房需給, (d)熱需給. (d)の熱需給は温水, 冷房, 暖房の和 (出典: 上道ほか(2018)p. 12)

② 地域別の水道配管の故障確率の考慮

コージェネレーションシステムには、水の供給が不可欠である。断水が起きた場合にはコージェネレーションシステムが稼働しない。本研究では、断水は震災によって生じるものとし、配水池から対象建物への配水管に損傷がなければ、送水が可能であるとして、災害時のガスエンジンからの電力供給は不断水確率 Y_i を乗じたものとして考えた。 Y_i は震度によって変化する。 Y_i は1から断水確率 OR を引いたものとして考える。

阪神淡路大震災をはじめとする過去の地震で得られた断水確率 OR は、回帰的に以下のよ

うに表せる⁶.

$$OR = \frac{1}{1 + 0.0473DR^{-1.61}} \quad (1)$$

ここで、 DR は被害率であり、水道管の管種類、管径、地盤、液状化の補正係数などを用いて求められる⁷.

本研究では、地域として都内、200 mm口径のダグタイル鋳鉄管を想定した。断水確率 OR を計算すると表1のようになる。

表1 災害パターン別断水確率（出典：上道ら(2018)p. 13）

Disaster pattern	$i = 1$	2	3
Water un-stoppage	23.7%	98.0%	100%

③ ガスプランの選択

ガスプランの選択手順は、東京ガスの業務用季節契約⁸を参考に以下のように定めた。業務用季節別契約にはNo. S, No. 1~No. 4の5つのプランがあり、ガスの使用量等に応じて選択できる。表2に5つのプランにおける単位料金をそれぞれ示す。表の上にあるプランほど、ガスを多く利用する必要がある。従量料金単価は低く設定されている。

また、各プランの条件は以下に示す通りである（条件内の用語は後述する）。

- No. S：契約最大時間流量倍率が600倍以上、契約年間負荷率が75%以上かつ契約月平均使用量が2,500 m³以上の場合。
- No. 1：契約最大時間流量倍率が600倍以上、契約年間負荷率が75%以上かつ契約月平均使用量が2,500 m³未満の場合。
- No. 2：契約最大時間流量倍率が600倍以上、契約年間負荷率が65%以上75%未満の場合、および契約最大時間流量倍率が400倍以上600倍未満、契約年間負荷率が75%以上の場合。
- No. 3：契約最大時間流量倍率が600倍以上、契約年間負荷率が65%未満の場合、契約最大時間流量倍率が400倍以上600倍未満、契約年間負荷率が65%以上75%未満の場合、およびNo.3：契約最大時間流量倍率が400倍未満、契約年間負荷率が75%以上の場合。

⁶ 川上英二；道路交通システムの形状と連結確率との関係，第1回都市直下地震災害総合シンポジウム，pp.169-172, 1996

⁷ ①高田至朗，宮島晶克；水道配水管の被害予測手法について，災害科学研究所，1997. ②丸山喜久，山崎文雄，近年の地震データを考慮したマクロな配水管被害予測式，第30回土木学会地震工学研究発表会論文集，2009. ③童華南，山崎文雄；地振動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係，生産研究，48号，No.11，pp.547-550, 1996. ④東京都建設局・港湾局，東京の液状化予測. 2013.

⁸ ①東京電力，業務用季節別時間帯別電力（契約電力 500kW 未満）<http://www.tepco.co.jp/e-rates/corporate/charge/charge08-j.html>，②東京ガス，料金表，<http://eee.tokyo-gas.co.jp/ryokin/about/list/roguchi.html>，③東京ガス；業務用季節別契約（選択約款）-東京地区等-，http://eee.tokyo-gas.co.jp/ryokin/about/menu/yakkan_170401/tokyo/commrc_170401.pdf，④東京ガス；ガス料金用語集，<http://eee.tokyo-gas.co.jp/ryokin/glossary/index.html>，

- No. 4 : 契約最大時間流量倍率が400倍以上600倍未満, 契約年間負荷率が65%未満の場合, および契約最大時間流量倍率が400倍未満, 契約年間負荷率が65%以上75%未満の場合.

なお, 各プランに対して定額基本料金は19,116 JPY/month, 基本流量料金単価は432.73 JPY/(m³-month)である.

以上の条件を図示すると図4のようになる. 図中のValue1, Value2, Value3は, それぞれ, 契約最大時間流量倍率 (年間ガス使用量を機器定格流量で除したもので, 機器を運転しないと小さい値となる) [-], 契約年間負荷率 (年間の月平均ガス使用量を最大需要期の月平均使用量で除したもので, ある月だけガスを多く使うような利用方法だと小さい値となる) [%], 契約月平均使用量 (年間のガス使用量を12で除して算出する月の平均ガス使用量) [m³] である. Value1およびValue2は以下の式で表す.

$$\text{Value1} = \frac{\text{年間ガス使用量}}{\text{機器定格流量}} \quad (2)$$

$$\text{Value2} = \frac{\text{年間の月平均ガス使用量}}{\text{最大需要期の月平均使用量}} \quad (3)$$

表2 東京ガス業務用季節別契約の料金プラン (出典: 上道ら(2018)p. 18)

No.	従量料金単価 [JPY/m ³]	
	冬	冬以外
S	76.86	66.58
1	81.00	70.45
2	85.35	74.80
3	87.94	77.39
4	91.08	80.53

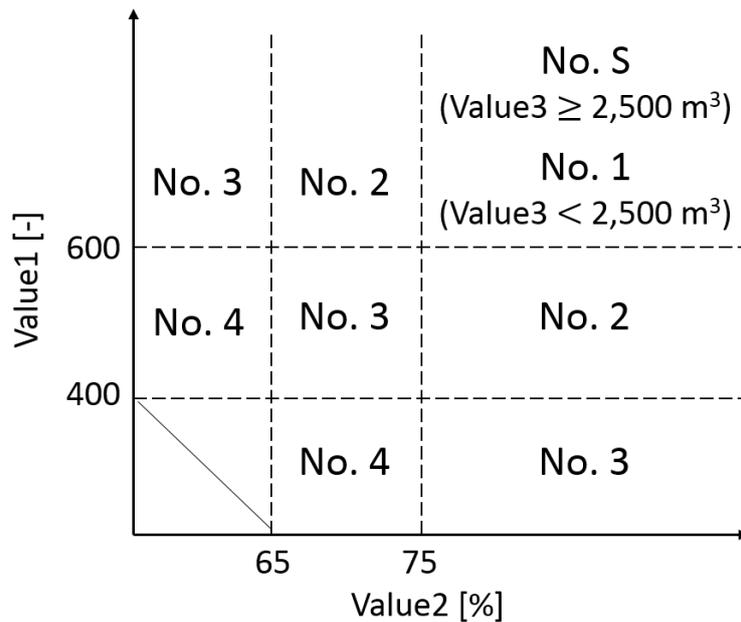


図4 東京ガス業務用季節別契約のプラン条件（出典：上道ら(2018)p. 18）

④ 新しい「エネルギーレジリエンス指標」の導入

災害時の事業継続性を評価するにあたって、これまでの最適化ツールでは、災害による事業停止損失額の期待値を使用した。なお、このとき、期待値を算出するにあたって用いられる、災害による損失額の最大許容値は需要家によって決定されるものとしている。医療機関における事業損失額については、日本病院会の調査結果⁹をもとに25.63 JPY/(m²・h)という値を適用してきた。しかし、この値は100床当たり収支金額を根拠として算出したものである。このように、人の命を預かる医療機関において単純な利潤ベースの値を設定するのは適切ではないと考えた。本研究で対象とする医療機関における事業停止損失額については、推定された停電による事業停止損失額¹⁰や統計的生命価値を用いる方法も考えられるが、前者では、経営的な視点からの損失額の算出に止まり、後者では、8～10億円/人¹¹という推定結果もあるが、災害による被害額を大きく見積もりすぎてしまう可能性があることから、単一目的最適化シミュレーションではなく、レジリエンス性の指標を新たに目的関数に加えた多目的最適化シミュレーションを実施する必要がある。

本研究では、災害リスクを災害によるエネルギー不足を用いて表現するものとし「災害による電力不足率の期待値 P_S [%]」として新たに定義し、目的関数に加えることとした。災害による電力不足率の期待値 P_S [%]は、災害時に必要な電力需要に対して不足すると推定される電力割合であり、0%に近ければ災害に強く、100%に近ければ災害に弱い分散型電源構成であると解釈することができる。これにより、病院のような人命を扱う施設においても、金額換算することなく、レジリエンス性を定量的に評価することが可能となった。

災害による電力不足率期待値 P_S は、次のように表現する。

⁹ 日本病院会; 「平成 28 年病院運営実態分析調査の概要」, (2017)

¹⁰ 吉田好邦, 松橋隆治, 産業需要家への調査に基づいた停電コストの推計, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌)2011, Vol. 131, No. 9, pp.730-736.

¹¹ 古川俊一, 磯崎肇, 統計的生命価値と規制政策評価, 日本評価学会「日本評価研究」, 第 4 巻第 1 号 2004 年 pp.53-65.

$$P_s = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 P_{gas,i,j} (1 - r_{ind,i,j}) \quad (4)$$

ここで、 $P_{gas,i,j}$ はガス配管種別gasに対する災害パターン*i*および被害パターン*j*におけるライフライン途絶確率、 $r_{ind,i,j}$ は被害パターン*j*におけるエネルギー自立度であり、エネルギー供給可能率である。

このとき、ガス供給配管については低圧配管と中圧配管の場合を考える。中圧配管は一部の都市部の大規模事業所へのガス供給を担い、低圧配管よりもガス供給途絶確率が低いとされる。

災害および被害パターンとしては、それぞれ以下の3パターンを考える。

- 災害パターン*i*
 - ・ $i = 1$: 震度6弱以上の震災
 - ・ $i = 2$: 震度5弱～5強の震災
 - ・ $i = 3$: 震災以外の災害（人災，台風など）

- 被害パターン*j*
 - ・ $j = 1$: 停電のみ発生
 - ・ $j = 2$: ガス供給遮断のみ発生
 - ・ $j = 3$: 停電およびガス供給遮断が同時に発生

災害発生確率は、NIEDの「J-SHIS地震ハザードステーション」¹²および地震情報サイトJIS¹³から調査し、算出した。なお、これらを利用するにあたり場所を指定する必要があったため、東京大学周辺を例にとり、東京都文京区とした。また、集中型エネルギー供給は、電力およびガスの2種類とし、エネルギー供給途絶確率は東京電力が提供するデータベース¹⁴および東京ガスからの聞き取りをもとに定めた。

被害パターンによる供給可能な電力量は、以下のように考えた。停電のみが発生した場合、ガス供給は可能であるので、後述する不断水確率を考慮したガスエンジン発電量と太陽光発電および蓄電池からのエネルギー供給が可能である。ガス供給途絶が発生した場合、集中型電源から供給される電力に加え、太陽光発電および蓄電池からのエネルギー供給がある。停電とガス途絶の両方が発生した場合、ガスエンジン発電機からも集中型電源からのエネルギー供給は不可能となるため、太陽光発電および蓄電池のみからエネルギー供給が行われるとした。以上を図5にまとめる。

¹² J-SHIS 地震ハザードステーション; <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>

¹³ 地震情報サイト JIS; <http://j-jis.com/>

¹⁴ 東京電力ホールディングス; 数表でみる東京電力, http://www.tepco.co.jp/about/fact_database/index-j.html

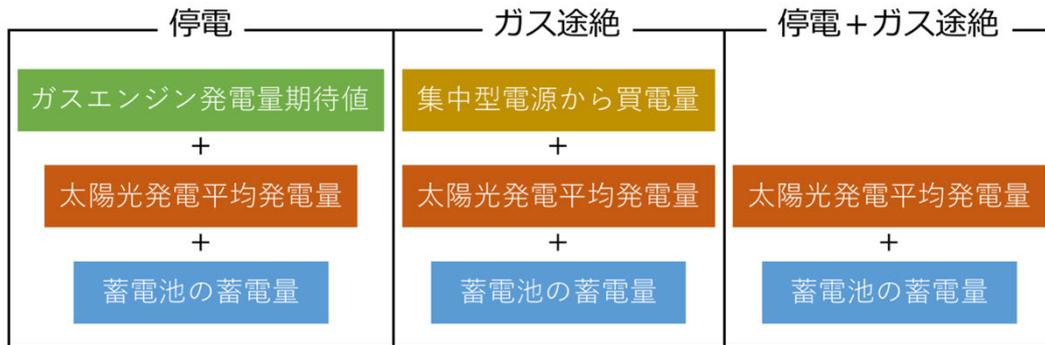


図5 電力供給可能量の考え方.

⑤ 多目的最適化問題への拡張

これまでに構築した最適化ツールでは、初期コスト、ランニングコストだけでなく、二酸化炭素排出コストや災害リスクのすべてを経済的価値に換算したものの和をひとつの目的関数で表現していた。この場合、最適解に至った理由がトータルコストのうち大部分を占めるランニングコストの減少によるものであるという問題が生じた。そこで、2つの目的関数を最小化する、多目的最適化計算に変更する。

ひとつめの目的関数 f_1 は、トータルコストである。これは、機器導入コスト C_{init} 、ランニングコスト $C_{r,15yr}$ 、二酸化炭素排出コスト C_{CO_2} の和である。これに加え、先に述べた「災害による電力不足率の期待値 P_S 」をもうひとつの目的関数 f_2 とした。

したがって、目的関数は以下のように表せる。

$$\begin{cases} f_1 = C_{init} + C_{r,15yr} + C_{CO_2} \\ f_2 = P_S \end{cases} \quad (5)$$

二酸化炭素排出は国内外で市場取引の制度が確立されている¹⁵ことに加え、計算時間短縮とわかりやすさのために、トータルコストに含めた。

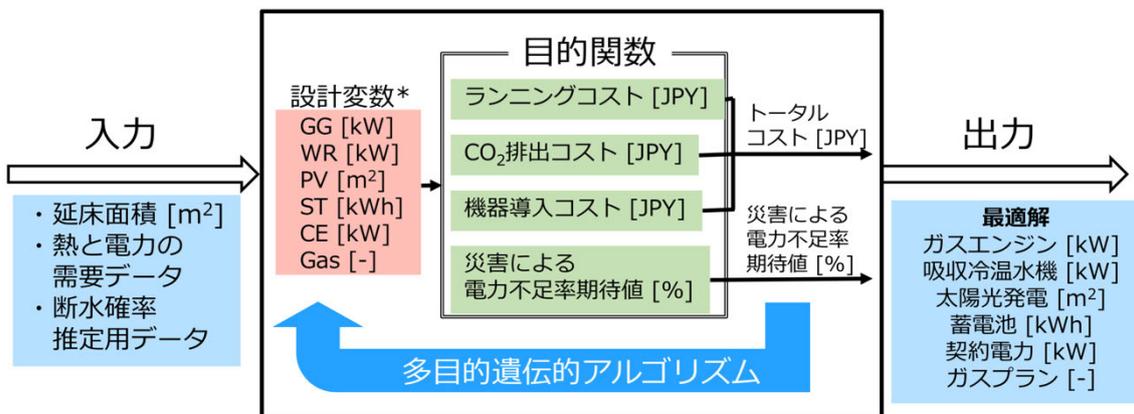


図6 分散型電源導入量多目的最適化ツールの概略図.

¹⁵ 環境省地球温暖化対策室市場メカニズム室; 国内排出量取引制度について, (2013).

(4) 詳細シミュレータの構築

最適化ツールの有効性を検証することを目的として、機器運用状況を提示するための詳細シミュレータを構築する。詳細シミュレータの有効性にはふたつの側面がある。ひとつは、最適化ツールより得られた最適機器構成・容量を導入した場合、実際のランニングコストが最適化ツールの時間分解能の低い運用シミュレーションの結果とどの程度違うかを示すことである。もうひとつは、最適化ツールの結果で示された機器構成・容量の分散型エネルギー機器は、災害時にどの程度の熱電需要を満たせるかどうかを検証することである。図7に詳細シミュレータの開発フローを示す。

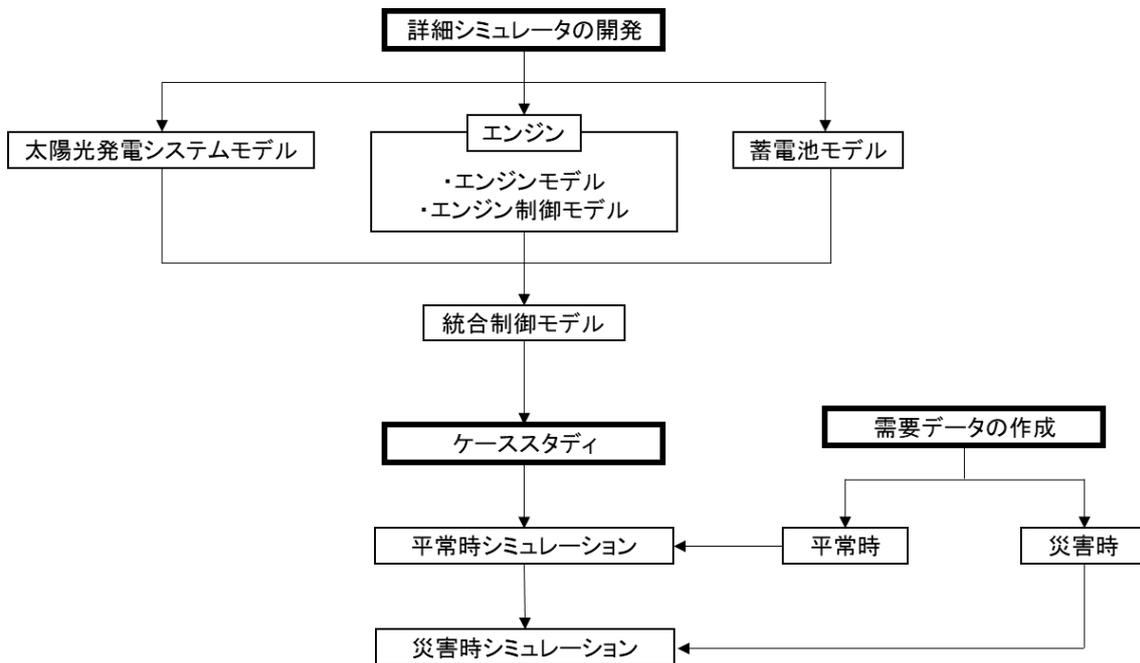


図7 詳細シミュレータの開発フロー。

① エネルギー機器データ収集

メーカーのカタログ値等から、コージェネレーションシステムのガスエンジン、太陽光発電、蓄電池についてのデータを収集する。

② 各エネルギー機器モデル化（一部）

詳細シミュレータ開発にあたって、平成29年度は分散型エネルギー機器のうち、コージェネレーションシステムをモデル化する。ガスエンジンは最終的には多様な燃料に対応したものを想定しているが、初年度は都市ガスを燃料としたガスエンジンを対象とする。

3 - 3. 研究開発結果・成果

(1) 従来の補助金制度に関する調査

補助金制度は、望ましい状態をつくり出すために企業等に向けて政府が特定の事業や活

動に対して金銭的な支援を行う、誘引政策のひとつである¹⁶。本研究の目的と照らし合わせ、対象事業者を医療機関に限定せず、分散型電源機器導入に関する補助金事業に焦点を当てた調査を行った。

調査対象は、直接補助金（ある活動に要する費用の全額ないし一部を財政から直接提供するもの）のみとし、なかでも、分散型電源機器（コージェネまたは再生可能エネルギー）導入に関する事業者向けの補助金事業とした。

調査方法は、インターネット上の公開資料に基づき、メタデータを抽出し、まとめた。集計期間は平成10年以降の補助金事業とした。本調査で対応する省庁は、経済産業省を中心に、国土交通省、環境省であった。調査項目を表3にまとめる。

表3 省エネルギー機器導入に関する補助金制度調査項目。

予算元省庁、事業主体、名称、対象事業者、 事業概要、期間、予算規模、事業概要、 補助の内容、補助金で購入出来るエネルギー機器の種類、 その他参考情報

調査を行った補助金について、対応省庁別の事業数を表4にまとめる。対応省庁が複数にまたがるものについては、窓口となる省庁を対応省庁とみなした。

表4 調査を行った補助金事業数。

対応省庁	事業数（件）
経済産業省	42
環境省	22
国土交通省	5

今回の調査を通して、経済産業省を中心とした分散型電源機器導入に関するメタデータの収集は行えたものの、厚生労働省管轄の医療機関向け分散型電源機器導入施策については明らかにすることができなかった。そこで、本調査は継続して実施し、いくつかの補助金事業についてはレビューシートをはじめとする詳細な調査を追加して行う。また、補助金制度にはその上位概念となる政策の理解が不可欠であるため、複数の政策実務者へのヒアリング調査を行う予定である。

（2）最適化ツールを用いたケーススタディの結果

① ケーススタディの計算条件

病院規模別にケーススタディを実施し、おおよその最適機器導入量を把握することは大きな意義があると考え、以下では、延床面積の異なるいくつかの仮定の災害拠点病院を設定し、それぞれに関するケーススタディを行い、結果の傾向を確認する。対象とする事業所のエネルギーネットワークを図8に示す。図中のエネルギー機器は以下のとおりである。集中

16 秋吉貴雄「入門 公共政策学 社会問題を解決する『新しい知』」, 中公新書, 2017.

型電源に接続されているのは、蓄電池 (ST)、電動ヒートポンプ (EH)、ターボ冷凍機 (TR) である。蓄電池と太陽光発電システム (PV)は接続している。都市ガスには、ガスエンジン発電機 (GG)、ガス冷温水機 (GR)、ガスヒートポンプ (GH)、ガスボイラ (GB) が接続している。ガスエンジン発電機は排熱投入型冷温水機 (WR) と接続しており、これら2つでコージェネレーションシステムを構成する。本研究では、図中のハッチ部について最適化を行う。

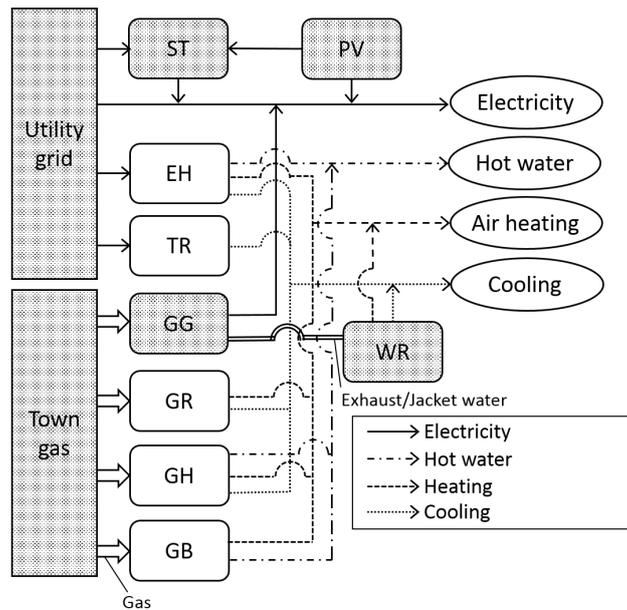


図8 エネルギー機器構成 (ハッチ部が最適化対象)。(出典:上道ら(2018) p.9)

本研究では、表5に示す(a)~(f)の6通りの仮想の災害拠点病院を計算対象とする。なお、災害拠点病院は、延床面積 (相当病床数) を規模を表す指標、また、ガス配管種別をガス供給の頑健性を表す指標として、この2項目をパラメータとした。また、それぞれのケースでの既設機器容量を表6に示す。ここでは、いずれのケースでもターボ冷凍機 (TR) は4台、ガス冷温水機 (GR) は8台、ガスボイラー (GB) は8台とした。

表5 想定する仮想病院の規模とガス配管種別(出典：上道ら(2018) p. 13をもとに作成)。

Case	延床面積 [m ²]	相当ベッド数	ガス配管種別
(a)	10,000	100	Low
(b)			Middle
(c)	20,000	200	Low
(d)			Middle
(e)	30,000	300	Low
(f)			Middle

表6 想定する仮想病院の既設機器容量 [kW]. (出典：上道ら(2018) p. 13をもとに作成)

Case	ターボ冷凍機	ガス冷温水機	ガスボイラ
(a)	150	150	150
(b)	150	150	150
(c)	300	300	300
(d)	300	300	300
(e)	450	450	450
(f)	450	450	450

本研究で用いた整数変数を扱う多目的遺伝的アルゴリズムでは、各設計変数の探索範囲とステップを整数で予め設定しておく必要がある。表7に各ケースにおける設計変数探索諸元の上限值を示す。下限値は全ての設計変数について0としている。計算ステップは、ガスエンジン発電機、排熱投入型吸収冷温水機、太陽光発電システム、蓄電池、契約電力量は10刻みとした。ガスプランについては、0から4までの1刻みの離散値で設定されているため、1刻みで探索する。

表7 各ケースにおける探索範囲の上限值. (出典：上道ら(2018)p. 13をもとに作成)

Variables	(a), (b)	(c), (d)	(e), (f)
ガスエンジン発電機, GG [kW]	400	800	1200
排熱投入型冷温水機, WR [kW]	400	800	1200
太陽光発電システム, PV [m ²]	300	600	900
蓄電池, ST [kWh]	300	600	900
契約電力量, CD [kW]	400	800	900
ガスプラン, Gas plan	4	4	4

② ケーススタディの結果

ケーススタディの結果例として図9にケース(a)の結果を示す。横軸はトータルコスト、縦軸は災害による電力不足率の期待値 P_s [%]である。なお、先述した厚生労働省による災害拠点病院の新たな指定要件¹⁷である「通常時の6割程度の発電容量のある自家発電機等を保有すること」を「非常時の電力不足率は平時の4割以内に抑えること」と読み替え、縦軸には $P_s = 40\%$ のラインを設けてある。つまり、このラインを下回る解は災害拠点病院としての要件を満足しているものであると考えられる。

赤色のプロット点で示した最適解群は、理想的なパレートフロンティアを形成していることが確認できる。トータルコストが増加するほど、 P_s は低下し、双曲線の様な形状となっている。これは、最適容量の機器導入をする際、トータルコストと P_s はトレードオフの関係にあることが示されている。

図中には、比較のために非常用発電機のみ導入した場合について計算した結果を示す

¹⁷ 厚生労働省; 災害拠点病院指定要件の一部改正について,
<http://www.hourei.mhlw.go.jp/hourei/doc/tsuchi/T170406G0030.pdf>

(only EG, 青色のプロット点) . この場合のコージョネレーションシステム (ガスエンジン発電機および排熱投入型吸収冷温水機), 太陽光発電システム, 蓄電池の導入量は0 kWh または0 m², 契約電力量は350 kWとした. 非常用電源の容量は, 厚生労働省の通達を参考に電力需要のピーク値の60%とした. ケース(a)の場合, 夏季の電力需要データ¹⁸より, 207.6 kWとなる. なお, 災害による電力不足率の期待値を計算すると, 被害パターン*i* = 1 (停電) および*i* = 3 (停電およびガス途絶) の場合, 非常用発電機によるエネルギー自立度 $r_{ind,i,j}$ は60%となり, 式(4)よりケース(a)の P_g は32.0%となる.

ここで, 非常用電源の種類は, 広く用いられているディーゼル発電機として, インターネット上の公開情報やメーカーからの聞き取り調査をもとに機器導入コストおよびメンテナンスコストを決定した¹⁹. 計算すると, 15年間でのトータルコストは 9.31×10^8 JPYとなる.

これに対して, 本ツールで求められた複数の最適解 (赤色のプロット) の P_g は, ほぼ全て20%を下回っており, さらに非常用電源のみを導入したケースよりもトータルコストが小さい解が得られている. したがって, 縦軸に示した災害時の電力不足率の期待値に関しては, 非常用電源のみを導入した解は, この想定の場合には常用防災兼用分散型電源を導入した場合よりも高くなる. つまり, 常用防災兼用分散型電源を導入した場合, 災害時の電力不足は改善が期待できる.

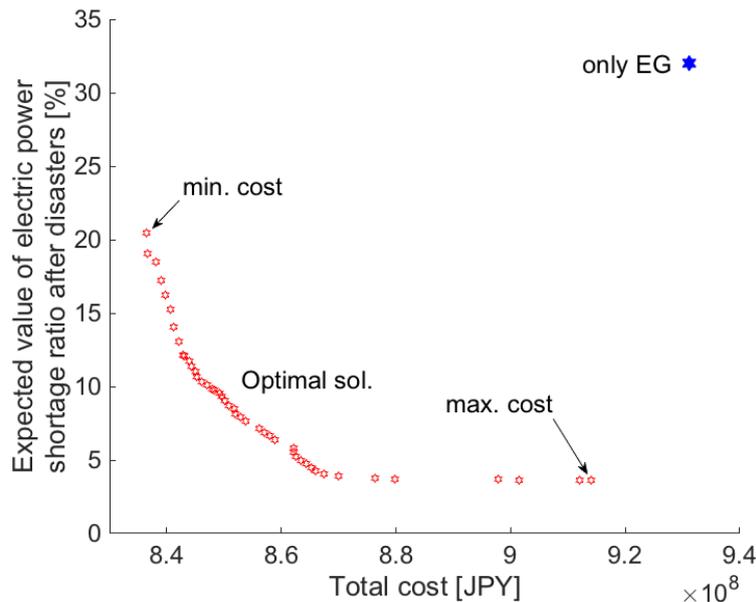


図9 ケース(a)パレート解集合 (出典: 上道ら(2018)p. 14)

図10に, 全てのケースのパレート最適解集合を同一グラフにプロットしたものを示す. 図より, 延べ床面積はトータルコストに影響していることがわかる. ケース(a)および(b), (c)および(d), (e)および(f)の延べ床面積別に解が集まっている. これは, 延べ床面積が大きくなるほど熱電需要が増加し, これを賄うために必要な機器容量が増加することで機器導入コストをはじめとするコストが増加するためである. 次に, 同じ延べ床面積同士で比較す

¹⁸ (社)日本エネルギー学会編;天然ガスコージョネレーション計画・設計マニュアル 2008, 日本工業出版, 2008.
¹⁹ 非常用ディーゼル発電機について, 単位容量あたりの機器導入コストは 165,750 JPY/kW, 年間メンテナンスコストは 829 JPY/(kW-yr)として計算した.

ると、ガス配管種別によって P_s の値が変化している。低圧配管のほうが中圧配管よりも P_s は高い値をとる。これは、ガス配管種別の災害による破損確率によるものである。中圧配管は低圧配管よりも強度の高い構造であり、破損確率が低く、途絶確率も低い。したがって、ガスを利用するガスエンジン発電機の電力供給が可能である確率が高いため、低圧配管よりも中圧配管のほうが P_s は低い値をとる。

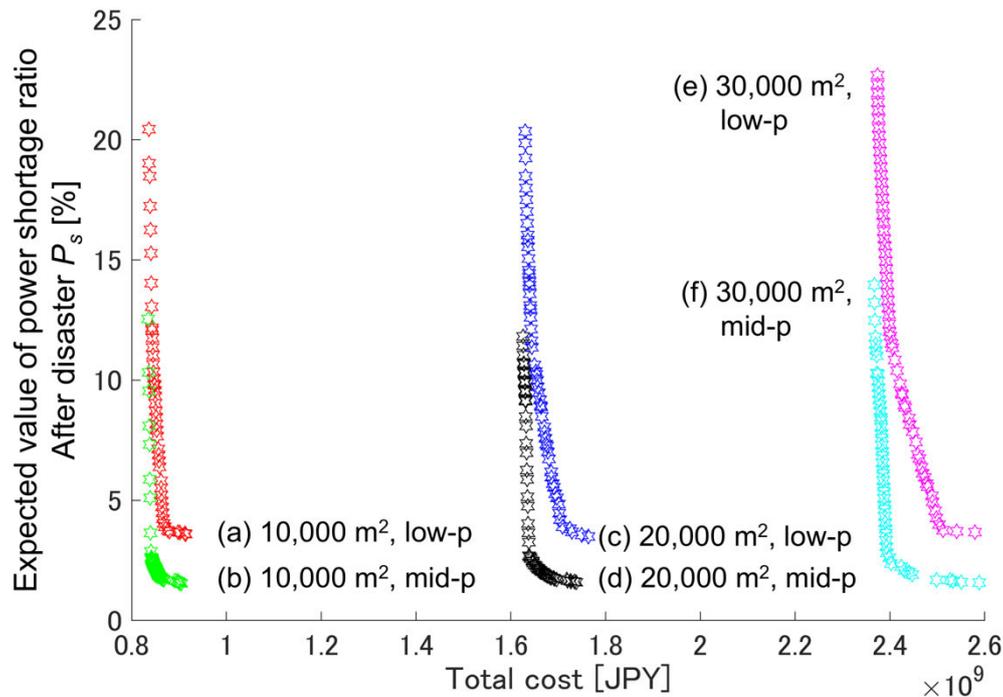


図10 各ケースのパレート解集合（出典：上道ら(2018)p. 15）

次に、ケーススタディの結果を最適導入量の観点から議論する。本来、ひとつの最適解に対して1組の設計変数が導かれるが、すべての解について議論することは難しいため、ここでは、ケース別にパレート最適解集合について、各機器の算術平均値を示すことで、その傾向を把握するものとする。

図11、図12、図13にガスエンジン発電機、太陽光発電システム、蓄電池の最適導入量のケース別パレート最適解の平均値をそれぞれ示す。図中のオレンジ色のバーが予め設定した探索諸元の上限值、青色のバーが最適解集合の平均値である。

まず、図11よりガスエンジン発電機は延床面積が大きくなるほど、最適導入量が増加している。また、低圧配管の場合よりも中圧配管のほうが導入量が増加する傾向がある。これは、先に述べたように中圧配管は低圧配管に比べて破損する確率が低く、災害によるガス供給途絶確率が低いためである。なお、排熱投入型吸収冷温水機の導入量はガスエンジン発電機の導入量と連動するため、これと同様の結果が得られた。

次に図12より、太陽光発電システムは、延床面積が大きいかほど導入量が増加する。また、低圧配管である場合よりも中圧配管である場合の方が、導入量がやや少なくなる。この理由は、ガスエンジン発電機の導入量に起因すると考えられる。中圧配管の場合は先に述べたようにガスエンジン発電機の導入量が増加するが、充足すべき需要は固定であるの

で、相対的に太陽光発電システムの必要量は低下する。

図13より、蓄電池については太陽光発電システムと同様に延床面積が増加するほど導入量が増加する。また、低圧配管の場合よりも中圧配管の場合のほうが、導入量がやや少ない。これは太陽光発電システムと同様に、中圧配管の場合のほうが、ガスエンジン発電機の導入量が増加したため、相対的に蓄電池の最適導入量が低下したと考えられる。

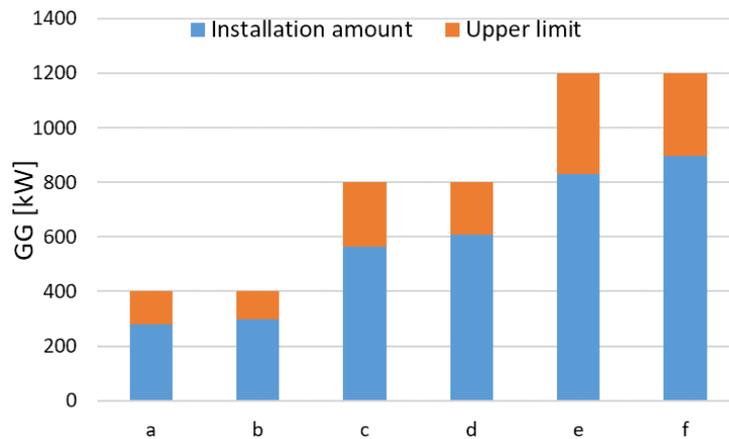


図11 ケース別のガスエンジン発電機GG最適導入量の全パレート解平均値（出典：上道ら(2018) p. 15）。

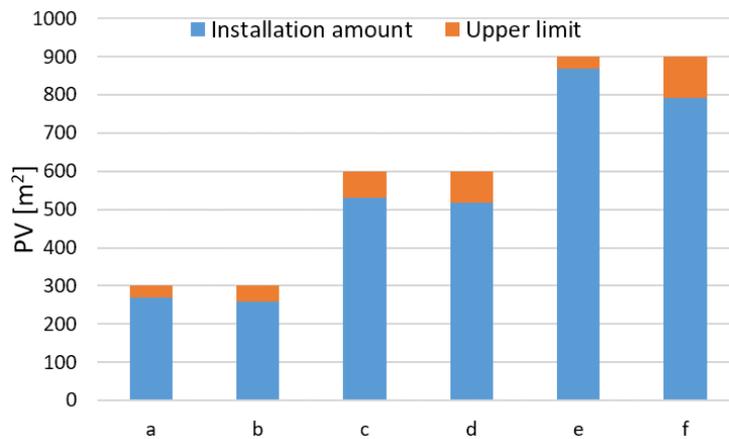


図12 ケース別の太陽光発電システムPV最適導入量の全パレート解平均値（出典：上道ら(2018) p. 15）。

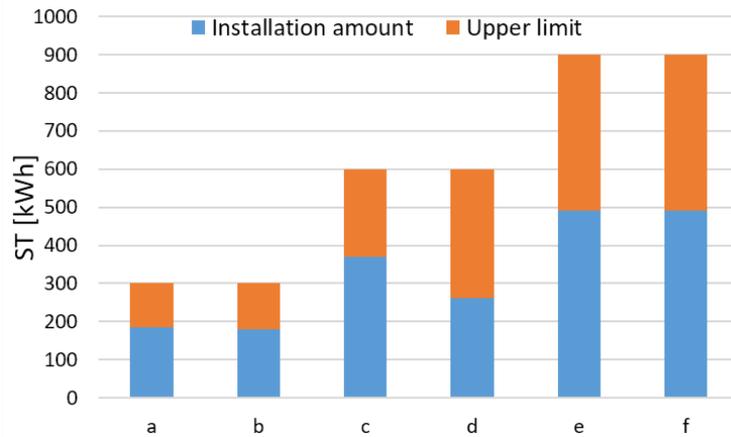


図13 ケース別の蓄電池ST最適導入量の全パレート解平均値（出典：上道ら(2018)p.15）。

契約電力量については、太陽光発電システムおよび蓄電池と同様に、延床面積が大きくなるほど増加し、低圧配管の場合より中圧配管の場合の方がやや小さくなる傾向が得られた。この理由は太陽光発電システムおよび蓄電池と同様、ガスエンジン発電機の導入量が増加したためであると考えられる。

なお、太陽光発電システムの最適導入量の値は、上限値に非常に近い値である。今回の上限値の設定は病院単独で設置できる程度の、延床面積に比例した値として設定した。そこで、上限値を100倍大きくしたシミュレーション結果では、元の最適値よりも大きく、上限値を十分に下回る最適値を得ることができ、真の最適値が得られたと考えられる。したがって、病院に隣接した場所に太陽光発電システム設置に利用できる広大な場所が確保できる場合には太陽光発電システムの増設が可能となる。

最後に、図14に本プロジェクトの研究開発スケジュールを示す。

実施項目	17FY	18FY		19FY		20FY	
	10～12月 1～3月	4～6月 7～9月	10～12月 1～3月	4～6月 7～9月	10～12月 1～3月	4～6月 7～9月	
定期研究会の実施	●	●	●	●	●	●	
(1) 従来の補助金制度に関する調査							
(1)-1 過去の補助金制度に関する網羅的調査		延長					
(1)-2 補助金に関わる実務者への聞き取り調査		延長					
(2) 災害拠点病院へのエネルギー需要調査							
(2)-1 アンケート調査票作成							
(2)-2 アンケート調査実施							
(2)-3 災害拠点病院を対象とした聞き取り調査							
(3) 最適化ツールの精緻化							
(3)-1 新しい「災害リスクモデル」の構築							
(3)-2 多目的最適化への変更							
(3)-3 機器故障確率の調査							
(3)-4 ガス・配管故障確率の調査							
(3)-5 既存ツールとカップリング							
(4) 詳細シミュレータの構築							
(4)-1 エネルギー機器データ収集							
(4)-2 各エネルギー機器モデル化							
(4)-3 集中型電源・分散型機器のカップリング							
(5) ケーススタディの実施							
(5)-1 熱電需要データの作成							
(5)-2 ケーススタディ計算							
(6) 補助金制度の提案							
(6)-1 本開発ツールを活用した補助金制度の検討							
(6)-2 ケーススタディに対する補助金施策提案							
(7) 評価と分析							
(7)-1 便益計測							
(7)-2 災害拠点病院を対象とした聞き取り調査							
(7)-3 補助金に関わる実務者への聞き取り調査							
(8) まとめ							

図14 研究開発スケジュール.

3 - 4. 会議等の活動

年月日	名称	場所	概要
2017/10/6	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究の進捗報告, 打ち合わせ等
2017/10/24	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究の進捗報告, 打ち合わせ等
2017/11/20	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究の進捗報告, 打ち合わせ等
2017/12/4	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究の進捗報告, 打ち合わせ等
2017/12/4	研究協力者打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	補助金の調査に関する打ち合わせ
2017/2/1	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究の進捗報告, 打ち合わせ等
2017/2/8	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究の進捗報告, 打ち合わせ等
2017/2/19	研究打ち合わせ	東京大学本郷 キャンパス	研究の進捗報告, 打ち合わせ等
2018/2/27	研究協力者打ち合わせ	防災科学研究 所東京会議室	ヒアリング調査に関する打ち合わせ

4. 研究開発成果の活用・展開に向けた状況

特に該当なし.

5. 研究開発実施体制

(1) 東京大学コアグループ

① リーダー名 (所属、役職)

上道茜 (東京大学, 助教)

① 実施項目:

- 補助金制度に関する調査
- エネルギーBCP策定サポートツールの開発

6. 研究開発実施者

氏名	フリガナ	所属機関等	所属部署等	役職(身分)	担当する研究開発実施項目
上道 茜	ウエミチ アカネ	東京大学	大学院工学系研究科	助教	統括/各種検討, ツール開発補助
金子 成彦	カネコ シゲヒコ	東京大学	大学院工学系研究科	教授	アドバイス
山崎 由大	ヤマサキ ユウダイ	東京大学	大学院工学系研究科	准教授	機器モデル化に関する知見提供
八木 正彰	ヤギ マサアキ	東京大学	大学院工学系研究科	M2	最適化ツールの改良
及川 亮	オイカワ リョウ	東京大学	大学院工学系研究科	M1	詳細シミュレータ開発

(参考) 研究協力者一覧

氏名	フリガナ	所属	役職(身分)	協力内容
近藤 久禎	コンドウ ヒサヨシ	災害医療派遣チーム DMAT	事務局長	災害拠点病院への調査・分析・評価項目に関するアドバイス
小森 健史	コモリ タケシ	災害医療派遣チーム DMAT	事務局員	災害拠点病院への調査・分析・評価項目に関するアドバイス
坂東 茂	バンドウ シゲル	電力中央研究所	主任研究員	調査・分析・評価手法に関するアドバイス
中村 いずみ	ナカムラ イズミ	防災科学技術研究所	主任研究員	エネルギー機器, 配管等の故障確率に関する知見提供
佐藤 良太	サトウ リョウタ	防災科学技術研究所	研究員	災害情報に関する知見提供
田幡 琢磨	タバタ タクマ	国立国会図書館	司書	補助金施策調査に関するアドバイス

7. 関与者との協働、研究開発成果の発表・発信、アウトリーチ活動など

7 - 1. 主催したイベント等

年月日	名称	場所	規模 (参加人数 等)	概要
2018/3/14	2017年度後期定期研究会	東京大学本郷キャンパス	8名	本研究グループにおける研究 変遷に関する話題提供および2017年度の成果報告.

7 - 2. 社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など

(1) 書籍、DVDなど発行物

- なし

(2) ウェブサイト構築

- なし

(3) 招聘講演

- なし

(4) その他

- なし

7 - 3. 論文発表、口頭発表、特許

(1) 論文発表：査読付き

●国内誌 (0件)

●国際誌 (1件)

- Akane Uemichi, Masaaki Yagi, Ryo Oikawa, Yudai Yamasaki, Shigehiko Kaneko (2017) 「System design to reduce disaster risks by installing distributed power resources」 『Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design』 1, pp.49-56, <https://doi.org/10.1007/s41939-017-0005-5>

(2) 論文発表：査読なし

●国内誌 (0件)

●国際誌 (0件)

7 - 4. 学会発表

- (1) 招待講演（国内会議0件、国際会議0件）
- (2) 口頭発表（国内会議1件、国際会議0件）
 - 八木正彰，上道茜，山崎由大，金子成彦（東京大学）「災害拠点病院を対象とした分散型電源導入量の決定手法」日本オペレーションズ・リサーチ学会 2018年春季研究発表会，東海大学高輪キャンパス，2018年3月16日。
- (3) ポスター発表（国内会議0件、国際会議0件）

7 - 5. 新聞報道・投稿、受賞等

- (1) 新聞報道・投稿（0件）
- (2) 受賞（0件）
- (3) その他（0件）

7 - 6. 知財出願

- (1) 国内出願（0件）
- (2) 海外出願（0件）