

東京大学大学院新領域創成科学研究科
環境システム学専攻

2020 年度

修士論文

エネルギー安定供給性を考慮した場合における
温泉発電の費用対効果検討

2021 年 3 月 1 日提出
指導教員 愛知 正温 講師

川崎 敬

目次

1. 序論	1
1.1. 研究の背景	1
1.1.1. 脱炭素化と再生可能エネルギーの導入	1
1.1.2. 再生可能エネルギーを活用したエネルギー安定供給の取組	3
1.1.3. 温泉発電とその特徴	5
1.2. 先行研究	7
1.2.1. 安定供給を目的としたエネルギーシステムにおけるエネルギー源について	7
1.2.2. 温泉発電についての先行研究	7
1.2.3. 先行研究における課題	8
1.3. 研究目的	9
1.4. 論文の構成	9
2. 手法とデータ	10
2.1. エネルギーシステムを検討する流れ	10
2.2. 本研究で考慮するビジネススキーム	11
2.2.1. 地域新電力事業者	11
2.2.2. 電源調達	15
2.2.3. インバランス料金	16
2.2.4. PV の導入理由	17
2.3. 利用データの整理	18
2.3.1. エネルギーシステムの導入想定エリア	18
2.3.2. 電力需要データ	19
2.3.3. 電力卸取引市場からの調達価格	23
2.3.4. エネルギーシステムの構成機器データ	24
2.4. ケースの設定	28
2.5. エネルギーシステム構成の探索	28
2.5.1. HOMER	28
2.5.2. 広域停電時の電力供給を考慮したシステム構成	31
2.6. 停電回避による便益の算出方法	32
2.7. 費用対効果の指標について	35
3. 解析結果	37

3.1. パターン別解析結果	37
3.1.1. 需要家大, SOC20%	39
3.1.2. 需要家大、SOC50%	43
3.1.3. 需要家小、SOC20%	47
3.1.4. 需要家小、SOC50%	51
3.2. 全解析結果まとめ	55
4. 考察	56
4.1. プロジェクト期間, 需要家構成別の B/C	56
4.2. 停電回避便益の考慮が費用対効果に与える影響	57
4.2.1. B/C パターン①	57
4.2.2. B/C パターン②	58
4.2.3. B/C パターン③	59
4.2.4. 停電回避便益の B/C への影響まとめ	60
4.3. 費用対効果への影響が考えられる要因	61
4.3.1. 社会的割引率を考慮した場合	61
4.3.2. 蓄電池寿命の変動が費用対効果へ与える影響	64
4.3.3. スポット市場取引価格の変動が費用対効果へ与える影響	66
4.3.4. 費用対効果への影響比較	69
5. 結論・今後の課題と展望	70
5.1. 結論	70
5.2. 今後の課題	71
5.3. 研究結果の活用	73
参考文献	74
謝辞	82
付録 A：全解析結果	83

図目次

図 1	2020 年 1~6 月の国内発電量内訳[%]	1
図 2	2050 年カーボンニュートラルへの転換イメージ	2
図 3	再生可能エネルギーを活用したエネルギーの災害時活用イメージ	3
図 4	北海道阿寒郡鶴居村におけるバイオガス発電を用いた事例	4
図 5	島根県隠岐郡海士町における PV(太陽光発電)を用いた事例	4
図 6	温泉発電のイメージ	5
図 7	バイナリー発電機の概要	5
図 8	本研究でのエネルギーシステム検討フロー	10
図 9	想定するビジネススキーム	11
図 10	エネルギー供給を受けていた広域停電時の道の駅（左）と住宅（右） ..	13
図 11	自営線による電力供給のイメージ図	13
図 12	計画値同時同量制度のイメージ	16
図 13	計画・需要値とインバランスの関係	16
図 14	設備容量 100kW の温泉発電と PV による年間発電量	17
図 15	2018 年時点の温泉発電の立地エリア	18
図 16	低温バイナリー発電の導入ポテンシャル分布状況	18
図 17	特別高圧・高圧・低圧の違い	19
図 18	令和 2 年 6 月の九州エリアにおける契約種別一口当たり月間電力需要	19
図 19	平均的な一日あたりの需要傾向(需要家小ケース)	21
図 20	年間の需要傾向(需要家小ケース)	21
図 21	平均的な一日あたりの需要傾向(需要家大ケース)	22
図 22	年間の需要傾向(需要家大ケース)	22
図 23	1 年間の各時間帯におけるスポット価格	23
図 24	検討するエネルギーシステムの基本的な機器構成	24
図 25	トヨタ自動車における使用済み電池再利用の取り組み	26
図 26	HOMER で算出された日射量プロファイル	27
図 27	HOMER の実行タスク間の関係性	29
図 28	検討するエネルギーシステムの基本的な機器構成（再掲）	30
図 29	停電時間と被害額の関係	33
図 30	費用便益分析の主な評価指標と特徴	35
図 31	プロジェクト期間中に発生する便益と費用の内訳イメージ	36

図 32	各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC20%,現状技術,15年運転)	39
図 33	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家大,SOC20%,現状技術,15年運転)	39
図 34	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家大,SOC20%,現状技術,15年運転)	39
図 35	各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC20%,現状技術,25年運転)	40
図 36	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家大,SOC20%,現状技術,25年運転)	40
図 37	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家大,SOC20%,現状技術,25年運転)	40
図 38	各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC20%,将来技術,15年運転)	41
図 39	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家大,SOC20%,将来技術,15年運転)	41
図 40	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家大,SOC20%,将来技術,15年運転)	41
図 41	各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC20%,将来技術,25年運転)	42
図 42	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家大,SOC20%,将来技術,25年運転)	42
図 43	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家大,SOC20%,将来技術,25年運転)	42
図 44	各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC50%,現状技術,15年運転)	43
図 45	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家大,SOC50%,現状技術,15年運転)	43
図 46	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家大,SOC50%,現状技術,15年運転)	43
図 47	各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC50%,現状技術,25年運転)	44
図 48	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家大,SOC50%,現状技術,25年運転)	44
図 49	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家大,SOC50%,現状技術,25年運転)	44
図 50	各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC50%,将来技術,15年運転)	45
図 51	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家大,SOC50%,将来技術,15年運転)	45

図 52	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家大,SOC50%,将来技術,15年運転)	45
図 53	各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC50%,将来技術,25年運転)	46
図 54	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家大,SOC50%,将来技術,25年運転)	46
図 55	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家大,SOC50%,将来技術,25年運転)	46
図 56	各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC20%,現状技術,15年運転)	47
図 57	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC20%,現状技術,15年運転)	47
図 58	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC20%,現状技術,15年運転)	47
図 59	各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC20%,現状技術,25年運転)	48
図 60	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC20%,現状技術,25年運転)	48
図 61	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC20%,現状技術,25年運転)	48
図 62	各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC20%,将来技術,15年運転)	49
図 63	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC20%,将来技術,15年運転)	49
図 64	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC20%,将来技術,15年運転)	49
図 65	各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC20%,将来技術,25年運転)	50
図 66	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC20%,将来技術,25年運転)	50
図 67	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC20%,将来技術,25年運転)	50
図 68	各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC50%,現状技術,15年運転)	51
図 69	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC50%,現状技術,15年運転)	51
図 70	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC50%,現状技術,15年運転)	51
図 71	各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC50%,現状技術,25年運転)	52

図 72	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC50%,現状技術,25年運転)	52
図 73	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC50%,現状技術,25年運転)	52
図 74	各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC50%,将来技術,15年運転)	53
図 75	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC50%,将来技術,15年運転)	53
図 76	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC50%,将来技術,15年運転)	53
図 77	各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC50%,将来技術,25年運転)	54
図 78	プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC50%,将来技術,25年運転)	54
図 79	プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC50%,将来技術,25年運転)	54
図 80	プロジェクト期間,需要家構成別の B/C	56
図 81	各年に発生する便益・コスト(現状ケース)	62
図 82	各年に発生する便益・コスト(将来ケース)	63
図 83	蓄電池寿命変更時 各年に発生する便益・コスト(現状ケース)	64
図 84	蓄電池寿命変更時 各年に発生する便益・コスト(将来ケース)	65
図 85	再生可能エネルギー発電の大量導入によるスポット価格低下プロセス	66
図 86	2020年4月1日~2021年1月17日までのスポット価格	67
図 87	2014~2019年度年間平均スポット価格[円/kWh]と年間取引量[kWh]の推移((JEPX,2020)より作成)	67
図 88	需要変動周期に応じた運転制御	72
図 89	むつざわスマートウェルネスタウンの全体像	73

表目次

表 1	温泉発電の主な特徴とその詳細	6
表 2	地域新電力事業者が取り組んでいる地域課題	12
表 3	地域新電力事業者による“自然災害の脅威”解決の取り組み	12
表 4	電源調達方法	15
表 5	温泉発電と PV の kW 当たり設備費用	17
表 6	導入を想定する温泉発電の月間発電量	20
表 7	想定した各需要家の電力需要	20
表 8	想定する需要家構成	20
表 9	温泉発電の発電量と各ケースの電力需要比較	21
表 10	JEPX における主な市場とその概要	23
表 11	温泉発電の出力、初期設備費用、O&M(運用管理と保守点検)費用	24
表 12	想定する温泉発電プラント寿命	25
表 13	各ケースを構成するパラメータ	28
表 14	HOMER による実行項目	29
表 15	HOMER により決定される変数	30
表 16	最小 SOC[%]と蓄電池容量の下限[kWh]組み合わせ	32
表 17	需要家・停電継続時間別の被害額調査結果	33
表 18	設定した停電の発生回数と一回当たりの継続時間	34
表 19	需要家構成、パターン別停電回避便益	34
表 20	本研究で用いる費用便益分析の指標	35
表 21	需要家構成、蓄電池の最小容量・SOC パターン	37
表 22	需要家構成、蓄電池の最小容量・SOC 別の代表パターン	38
表 23	停電回避便益の算出方法	38
表 24	停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC20%,現状技術,15 年運転)	39
表 25	停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC20%,現状技術,25 年運転)	40
表 26	停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC20%,将来技術,15 年運転)	41
表 27	停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC20%,将来技術,25 年運転)	42
表 28	停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC50%,現状技術,15 年運転)	43
表 29	停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC50%,現状技術,25 年運転)	44
表 30	停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC50%,将来技術,15 年運転)	45
表 31	停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC50%,将来技術,25 年運転)	46

表 32	停電回避便益別の B/C (需要家小,SOC20%,現状技術,15 年運転)	47
表 33	停電回避便益別の B/C (需要家小,SOC20%,現状技術,25 年運転)	48
表 34	停電回避便益別の B/C (需要家小,SOC20%,将来技術,15 年運転)	49
表 35	停電回避便益別の B/C (需要家小,SOC20%,将来技術,25 年運転)	50
表 36	停電回避便益別の B/C(需要家小,SOC50%,現状技術,15 年運転)	51
表 37	停電回避便益別の B/C(需要家小,SOC50%,現状技術,25 年運転)	52
表 38	停電回避便益別の B/C(需要家小,SOC50%,将来技術,15 年運転)	53
表 39	停電回避便益別の B/C(需要家小,SOC50%,将来技術,25 年運転)	54
表 40	プロジェクト期間と需要家構成別の各パターン B/C	55
表 41	B/C パターン①で $B/C > 1$ となるケース	57
表 42	B/C パターン②で $B/C > 1$ となるケース	58
表 43	B/C パターン③で $B/C > 1$ となるケース	59
表 44	NPV を算出する各ケースのパラメータ	61
表 45	停電回避便益別の B/C(現状ケース)	62
表 46	停電回避便益別の NPV (現状ケース)	62
表 47	停電回避便益別の B/C(将来ケース)	63
表 48	停電回避便益別の NPV (将来ケース)	63
表 49	本項目で検討する蓄電池の寿命	64
表 50	蓄電池寿命変更時 停電回避便益別の B/C(現状ケース)	64
表 51	蓄電池寿命変更時 停電回避便益別の B/C(将来ケース)	65
表 52	スポット価格 15%増減時の停電回避便益別の B/C(現状ケース)	68
表 53	スポット価格 15%増減時の停電回避便益別の B/C(将来ケース)	68
表 54	影響要因変動時における停電回避便益別の B/C(現状ケース)	69
表 55	影響要因変動時における停電回避便益別の B/C(将来ケース)	69
表 56	運転制御の概要	72
表 57	全解析結果	84

1. 序論

1.1. 研究の背景

1.1.1. 脱炭素化と再生可能エネルギーの導入

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書統合報告書において、発電部門の脱炭素化は費用対効果の高い緩和戦略に欠かせない要素であるとされている（環境省,2015）。発電部門の脱炭素化のための手法には、既存の火力発電所の効率向上や、再生可能エネルギーの導入量の拡大など様々な方策が考えられる。

一方国内でも、菅内閣総理大臣が2020年10月に宣言した“2050年カーボンニュートラル・脱炭素社会の実現”を受け、2020年12月25日に公表された産業政策では、『2050年には発電量の約50～60%を再生可能エネルギーで賄う』といった成長戦略（経済産業省,2020a）が示されている。以下に2020年上半期の国内電源構成（自然エネルギー財団,2020）と、上述の成長戦略で示された2050年のカーボンニュートラルに向けたエネルギー需給構造のイメージを示す。

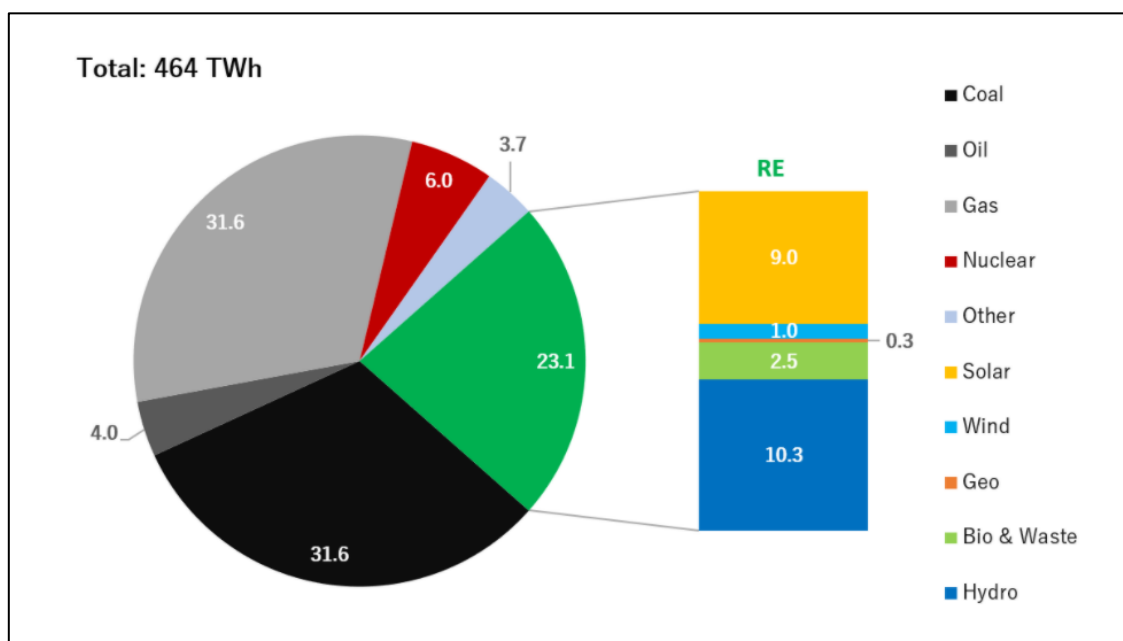


図 1 2020 年 1～6 月の国内発電量内訳[%]
（（自然エネルギー財団,2020）より引用）

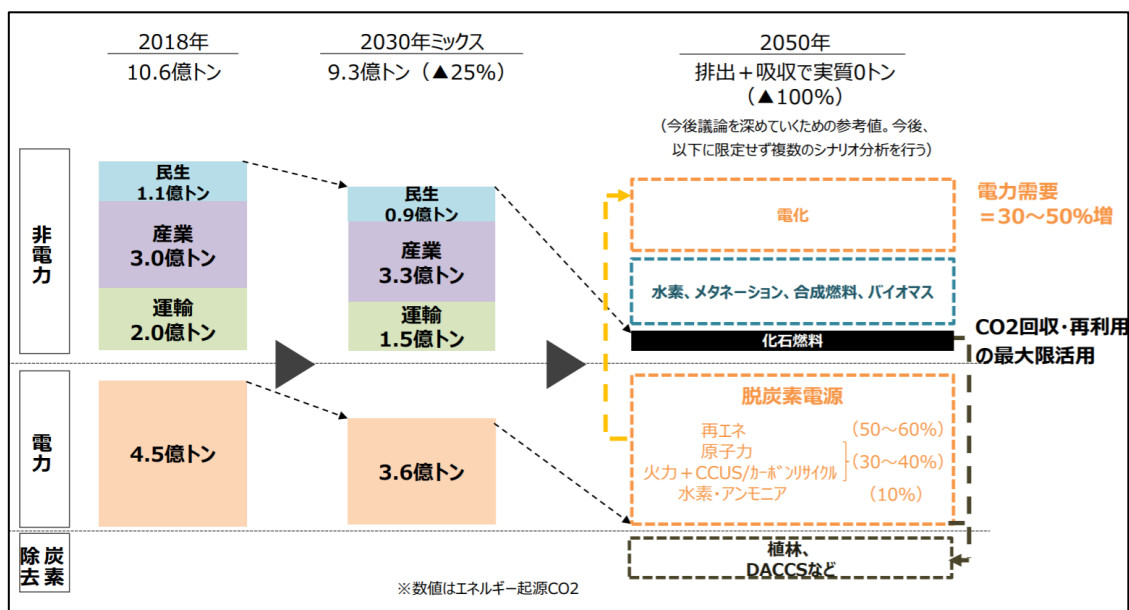


図 2 2050 年カーボンニュートラルへの転換イメージ
((経済産業省,2020a)より引用)

現時点では約 2 割程度である再生可能エネルギーが、2050 年目標では 5,6 割と設定されている。このことから、今後はより一層再生可能エネルギーの導入促進の重要性が増していくことと考えられる。

また、再生可能エネルギーの導入には、脱炭素化にとどまらず地域経済の活性化やエネルギーセキュリティへの貢献といった便益(Benefit)も存在することが(環境省,2012)や (IPCC,2014) にて言及されている。(環境省,2012)においては、再生可能エネルギーによる便益として、以下のようなグローバルなものからローカルなものまで多岐にわたる便益が紹介されている。

- ① 温室効果ガスの削減
- ② エネルギー自給率の向上
- ③ 化石燃料調達に伴う資金流出の抑制
- ④ 産業の国際競争力の強化
- ⑤ 雇用の創出
- ⑥ 地域の活性化
- ⑦ 非常時のエネルギーの確保

一方で、日本国内の再生可能エネルギー導入における課題の一つとして、再生可能エネルギーがもたらす社会的な便益(Benefit)が広く市民に周知されていないこと(安田,2019)が指摘されている。また今後は、前述の成長戦略における目標達成の為、国

内各地域での再生可能エネルギー導入検討が予想される。地域への再生可能エネルギー導入にあたっては、導入がもたらす地域への貢献を客観的な指標で示していくことが、導入が地域に受容されるうえで重要な役割を果たすという指摘もなされている(安田,2018)。よって、今後の再生可能エネルギーの導入にあたっては、その導入による便益を定量的に示すことが、導入を進めていくためにも重要であると考えられる。

1.1.2. 再生可能エネルギーを活用したエネルギー安定供給の取組

日本国内では、近年、再生可能エネルギーの比較的小規模で地域に分散している特性を利用して、非常時のエネルギー供給源として活用する取り組みが検討・実行されている(経済産業省,2015、経済産業省,2020c)。特に2018年の北海道や2019年の千葉県で発生した大規模な停電を受け、既存の系統から独立可能な電力ネットワークを構築し、再生可能エネルギー等のエネルギーを用いて災害時にも安定して地域に面的な電力供給を行うシステム(マイクログリッド)の検討・導入が、全国の各地域で行われ始めている。以下にマイクログリッドにおける、再生可能エネルギーを活用したエネルギーの災害時活用イメージを示す。

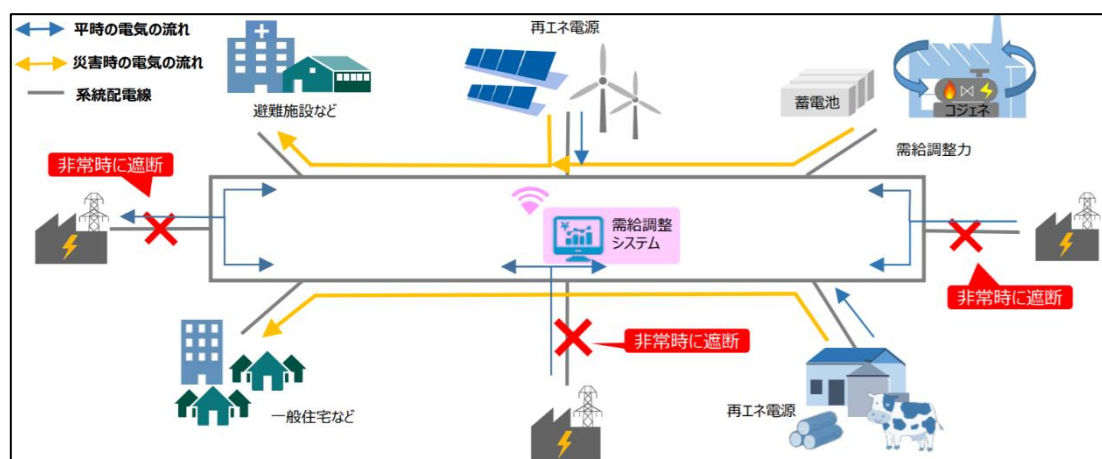


図 3 再生可能エネルギーを活用したエネルギーの災害時活用イメージ
((資源エネルギー庁,2019)より引用)

マイクログリッドを構築した場合、地震や台風などの災害により広域の停電が発生した場合でも、平常時に広域の送配電ネットワークから地域の電力ネットワークを切り離すことで、再生可能エネルギー等の分散電源を活用して安定した電力供給を行えること(北海道経済産業局,2019)が期待されている。近年検討が行われている幾つかの事例として、北海道におけるバイオガスを用いた事例と島根県におけるPVを用いた事例を以下に示す。

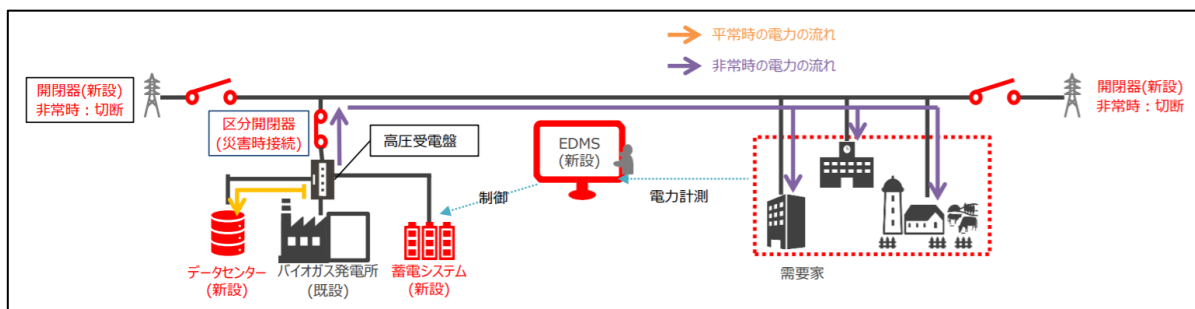


図 4 北海道阿寒郡鶴居村におけるバイオガス発電を用いた事例
((環境共創イニシアチブ,2019)より引用)

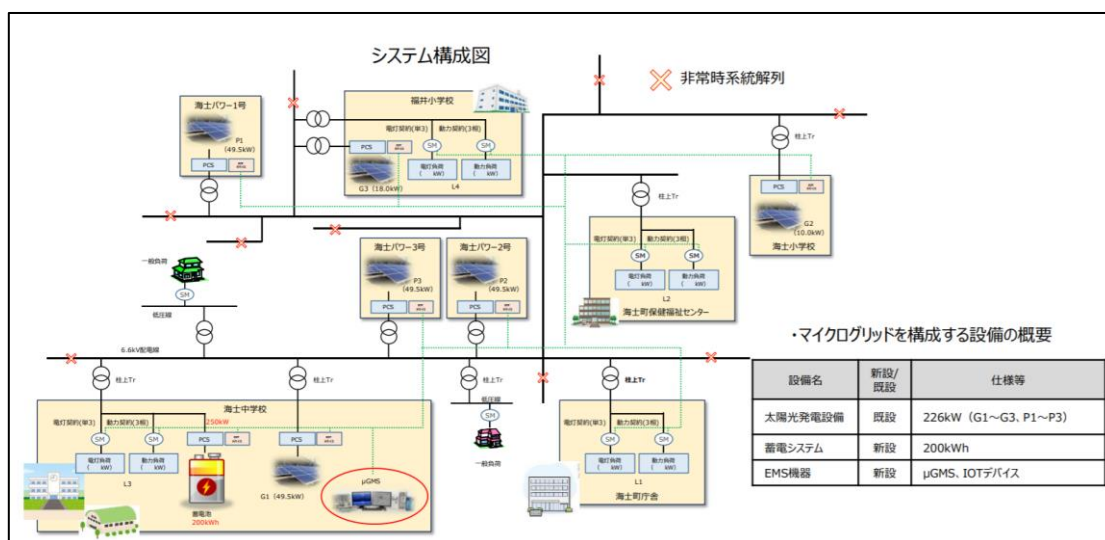


図 5 島根県隠岐郡海士町における PV(太陽光発電)を用いた事例
((環境共創イニシアチブ,2019)より引用)

以上で確認したように、近年は、再生可能エネルギーを地域で活用し、安定したエネルギー供給を確保する様々な取り組みがなされている。

1.1.3. 温泉発電とその特徴

再生可能エネルギーの一つである地熱エネルギーは、国内の豊富な地熱資源にも関わらず、事業採算性・各種規制・温泉関係者の反対などの理由により、これまで導入が停滞していた。しかし近年は、地熱発電のうち既存の温泉井戸から得られる比較的低温（概ね 70～150℃程度）の未利用熱水・蒸気を利用した小規模な地熱発電である、『温泉発電』が注目を集めている。以下に温泉発電のイメージと、主に発電で用いられるバイナリー発電機の概要を示す。バイナリー発電は、熱交換器を介することで温泉熱を低沸点媒体に与え沸騰させ、その蒸気圧力でタービンを回転させて発電する仕組みである。

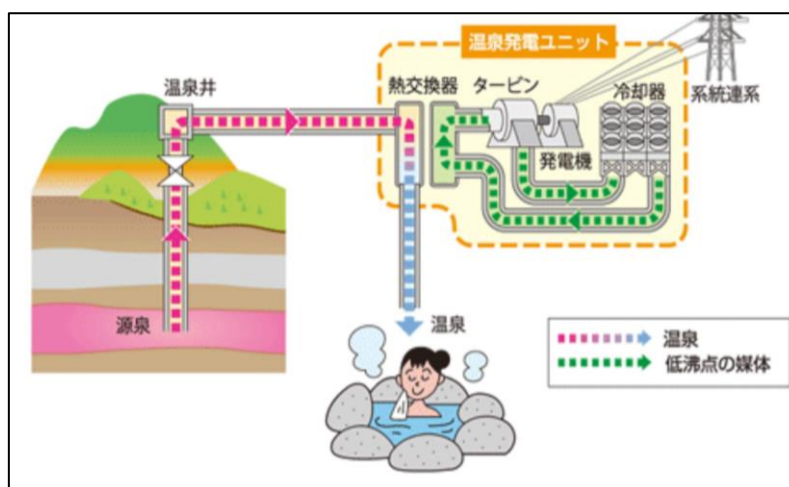


図 6 温泉発電のイメージ

((JFE エンジニアリング,2014)より引用)

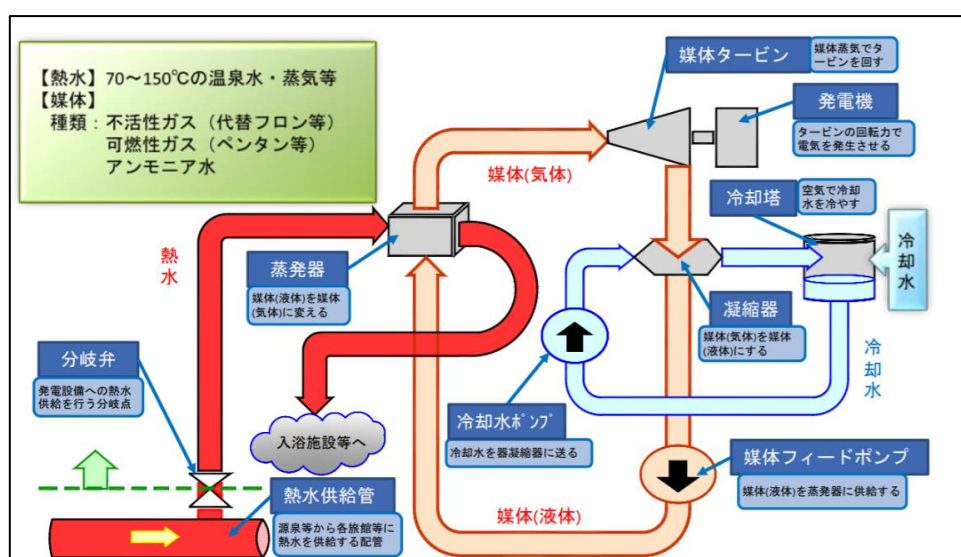


図 7 バイナリー発電機の概要

((JOGMEC,2015a)より引用)

温泉発電には、以下のような特徴がある。

表 1 温泉発電の主な特徴とその詳細
((遠藤,2015、JOGMEC,2015a、JOGMEC,2020)を参考に作成)

特徴	詳細
安定した発電	<ul style="list-style-type: none"> ● 地熱発電の一種であるため、天候に左右されることなく安定した発電を維持できる。
未利用エネルギーの有効利用	<ul style="list-style-type: none"> ● 従来の大規模な地熱発電が主に 150℃以上の蒸気を利用するのに対し、温泉発電では 150℃以下の蒸気・熱水を用いて発電ができる。 ● 従来、高温の温泉を浴用である 50℃程度まで下げる際に捨てられていた未利用エネルギーを活用できる。
大規模な地熱発電の導入に係る諸課題の回避	<p>従来の大規模な地熱発電と比較して、</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 既存の温泉井戸を利用するため調査・掘削が不要となり掘削失敗リスクもない。 ● 基本的に既存の温泉井戸から湧出する熱水又は蒸気の未利用エネルギーを使うものであるから、温泉資源への影響がほとんどない。 ● 初期費用が数億円程度に抑えられるため中小事業者も参入可能に。 ● 事業開始までの期間が比較的短い（事業化の構想から運転開始まで約 2~3 年）

以上のように温泉発電には、安定して発電できる、未利用エネルギーの利用、従来型の地熱発電と比較して事業のハードルが低いといったメリットがある。

一方で、温泉発電の普及への課題として、小型発電機の市場が確立していないため発電機のコストが高いこと(柳澤,2014)や、配管や熱交換器などに付着するスケール除去対策費用の発生によるメンテナンス費用の増加等(遠藤,2015、JOGMEC,2015a)、による事業採算性の懸念についての指摘がなされている。

1.2. 先行研究

1.2.1. 安定供給を目的としたエネルギーシステムにおけるエネルギー源について

エネルギーの安定供給を達成するエネルギーシステムの構築についての先行研究は、複数の種類のエネルギー源について行われている。(日本サステナブル建築協会,2016、長尾ほか,2017、上道ほか,2018)では、災害時のライフライン途絶時に、ガスコジェネレーションをエネルギー源として用いてエネルギー供給を行うシステムが検討されている。また、(秋沢ほか,2016、上道ほか,2020)では、ガスコジェネレーションのほかに PV (太陽光発電) や太陽集熱器などの再生可能エネルギーを用いて、同様にライフライン途絶時にもエネルギー供給を行う事のできるシステムが検討されている。再生可能エネルギーのうち、PV は近年一般家庭における停電時のエネルギー源としても利用され始めているが、(下條ほか,2015、長合ほか,2015) では、バイオマスや風力をエネルギー源としての活用した地域へのエネルギー供給安定化が提案されている。

しかし、(浦島,2011)などにおいて災害時のエネルギー源としての地熱発電の活用可能性について言及がなされている一方で、温泉発電の導入がエネルギー安定供給に与える効果を定量的に評価する取り組みは未だ行われていないのが現状である。

1.2.2. 温泉発電についての先行研究

温泉発電に関する先行研究として、(馬場ほか,2015、印具ほか,2017)では温泉発電の導入に関わる地域の受容について、調査・改善の為の提案がなされている。同様に発電に関わるソフト面の課題として、(奥名,2014)では、温泉発電を事業として成立させる際の、資金調達や事業支援、利益分配の重要性についての定性的な検討を行っている。

先述したマイクログリッドを用いたエネルギー供給に関する研究として、(Farrukhほか,2017、Kazmi,2019)では、温泉発電のような小規模な地熱発電を活用して小規模エリアにエネルギーを供給するエネルギーシステムの経済性について言及されているが、いずれも日本国外における導入を想定している。

以上のように、温泉発電についての先行研究は、主に発電設備導入・運用時の課題についての定性的な検討が中心であり、国内においては温泉発電をシステムの一部として組み込んだエネルギーシステムについての検討が十分には行われていない現状がある。

1.2.3. 先行研究における課題

以上より、温泉発電の導入には災害発生時などにも安定してエネルギー供給が可能であるメリットが語られている一方で、そのようなメリットを定量化して評価することは現状行われていない。

また、温泉発電についての先行研究は、発電設備導入・運用時の課題についての定性的な検討が中心であり、温泉発電を用いたエネルギーシステムを構築した際の効果については、現状国内での検討は不十分であると考えられる。

1.3. 研究目的

（前述した（環境省,2012）や（IPCC,2014）でも語られているように、再生可能エネルギーの導入には様々な便益が存在する。そのような便益の中でも、背景で述べた北海道や島根県の事例など、“非常時のエネルギーの確保”という便益に注目し、再生可能エネルギーを活用する事例が近年日本国内においては見受けられる。一方で、そのようなエネルギー源としての温泉発電の活用は十分に検討されているとは言い難い現状がある。）以上を踏まえ、本研究では、従来費用対効果が懸念されていた温泉発電について、エネルギーの安定供給という特徴に注目し、停電回避の便益を加えて費用対効果を考慮することで、温泉発電の導入効果を改めて確認することを目的とする。温泉発電の評価の高まりは、今度の再生可能エネルギーの導入拡大にも貢献することと考えられる。

具体的には以下の項目についての検討を行う。

- ① 停電回避による便益を考慮した場合の、温泉発電を用いたエネルギーシステムの構成とその費用対効果を分析
- ② 温泉発電を用いたエネルギーシステムの費用対効果に影響する要因の確認

1.4. 論文の構成

第1章では、背景、先行研究、及び本研究の目的を述べた。

第2章では、活用する手法、データについての説明を行う。

第3章では、2章で設定した条件における解析の結果を示す。

第4章では、結果を踏まえ、費用対効果に影響する要因についての考察を示す。

第5章では、結論と今後の展望を述べる。

2. 手法とデータ

2.1. エネルギーシステムを検討する流れ

本研究では下図のフローに従って、エネルギーシステムの検討を実施した。

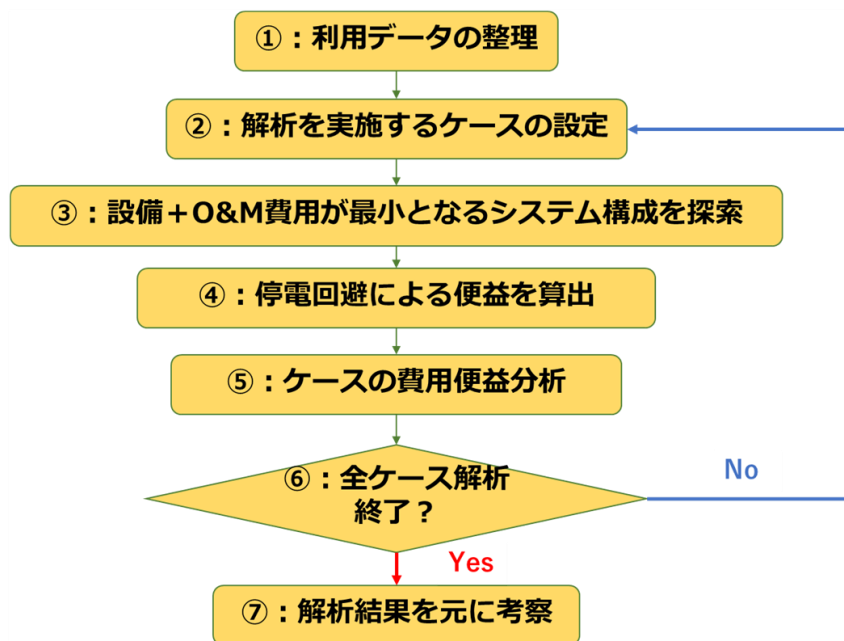


図 8 本研究でのエネルギーシステム検討フロー

上記フローについての詳細を以下に示す。

- ① 本研究で提案するエネルギーシステムの導入を想定するエリアの電力需要、システムを構成する各機器の出力など解析に利用するデータを整理する。
- ② システムを構成する機器の費用や稼働状況については、いくつかのケースが想定される。本研究では異なるケースを異なるパラメータの値の組み合わせとして扱い、各ケースごとに分析を行う事で、異なるケース間での最終的な結果の比較を行う。フローにおける本項目では、ある 1 ケースを想定した数値パラメータの設定を行う。
- ③ 後述するエネルギーシステムのシミュレータである HOMER を用いて、各パラメータ設定において設備費用と運転・メンテナンス費用の総額が最小となるシステム構成を探索する。その際、任意の時間継続する停電の発生も考慮し、停電時も供給想定エリアに電力供給が可能となるシステム構成の探索を行う。

- ④ 各ケースにおける停電回避便益を算出する。今回考慮する停電回避便益は、システム構成には依存しないと仮定するため、停電回避便益の算出は、シミュレータによる費用最小システムの探索とは独立して実施する。
 - ⑤ 上記の③、④より算出された結果を元に、各ケースの費用対効果を評価する。
 - ⑥ 全ケースについて上記の解析を実施したかどうかを確認する。全ケースの解析が終了していない場合、上記②に戻り解析を実施していないケースについて②～⑤の作業を実施する。
 - ⑦ 解析結果を元に考察を行う。
- フローの過程で用いる各手法については、本論文の以降のページで後述する。

2.2. 本研究で考慮するビジネススキーム

本研究では、温泉発電を用いたエネルギーシステムの運用主体として、地域電力事業者を想定し、事業者による温泉発電を用いたエネルギーシステム事業の費用便益分析を行う。地域電力事業者を取り巻くビジネススキームは、(北海道開発局,2016、低炭素社会戦略センター,2018、所沢市,2018、北沢,2019、東京都環境公社,2019)を参考に以下のように設定した。

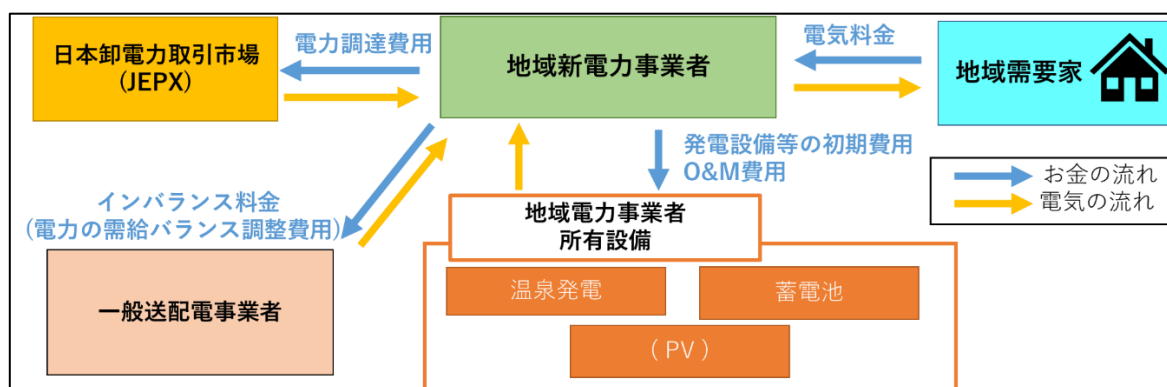


図 9 想定するビジネススキーム

本ビジネススキームは、地域の需要家に電力供給を行う電力事業者が、自社の電源設備として、温泉発電・蓄電池・PVを保有するケースを想定している。以降で図中の各項目について詳細な説明を行う。

2.2.1. 地域新電力事業者

2016年の電力小売全面自由化に伴って、電力小売事業への新規参入者が増加した。それらの新規参入者のなかでも、地方自治体の関与のもと小売電気事業を営み、得られた収益等を活用して地域の課題解決に取り組む事業者は「地域新電力」と呼ば

れる(環境省,2020a)。地域新電力事業者が取り組んでいる地域課題の例を以下に示す。

表 2 地域新電力事業者が取り組んでいる地域課題

((環境省,2020a)を参考に作成)

課題の区分	主な課題
地域経済に関する課題	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地域経済の衰退 ・ 労働人口の流出 ・ 人口減少
地域社会に関する課題	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高齢化、少子化社会 ・ 公共交通網の脆弱化 ・ 自然災害の脅威
地域環境に関する課題	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地球温暖化 ・ 域外エネルギー資源に依存したエネルギー構造 ・ 環境施策実施主体の認識の不足 ・ 地域低炭素化推進事業の担い手不足

上記に示す“自然災害の脅威”という課題の解決に向けては、具体的に以下のような取り組みがなされている。

表 3 地域新電力事業者による“自然災害の脅威”解決の取り組み

((環境省,2020a)を参考に作成)

事業者名	地域課題	取り組み
おおすみ半島スマートエネルギー	台風等に起因する長時間停電	再生可能エネルギーを電源とする発電設備の導入
三郷ひまわりエナジー	避難所施設への災害時のエネルギー供給	避難所への太陽光発電システム導入促進
湘南電力	BCP（災害時の事業継続）対策	太陽光発電と蓄電池の設置
ながの電力	災害時に利用できるエネルギー設備	屋根置き太陽光発電の導入。蓄電池やEVの導入提案。
ローカルエナジー	災害時避難場所のレジリエンス強化	主要避難所への蓄電池設置。
スマートエナジー熊本	災害時のライフライン確立	水道局及び南区役所に大型蓄電池の導入。自営線敷設・急速充電器設置により系統電力に頼らない、EVによる避難所等への電力供給を可能に。

また実際の広域停電時においても、地域新電力が構築したエネルギーシステムにより、需要家が継続してエネルギー供給を受けることのできた事例が存在する。2019年9月に千葉で発生した広域停電時において、地域新電力であるCHIBA むつざわエナジーがエネルギーを供給する”むつざわスマートウェルネスタウン”においては、周囲の店舗や住宅が停電する中、停電復旧までの約一日にわたって、エネルギーの供給を行うことが出来た(環境ビジネスオンライン,2019)。以下に広域停電中のむつざわ

スマートウェルネスタウンの様子を撮影した写真を示す。周囲が停電している中で電力と熱水が核施設に供給されていた。



図 10 エネルギー供給を受けていた広域停電時の道の駅（左）と住宅（右）
（（環境ビジネスオンライン,2019）より引用）

これらのことから、自然災害などによって引き起こされる停電の回避を、地域新電力が事業の目的の一つとする可能性は十分に考えられる。よって、本研究では温泉発電を含むエネルギーシステムの運用主体として、この地域新電力事業者を想定し、費用便益分析を行う。

また本研究で提案するエネルギーシステムは、広域停電時にも地域需要家に電力を供給できるように、上述のスマートウェルネスタウンでも用いられている自営線を利用した地域需要家への電力供給を想定する。自営線とは事業者自らが、電力供給の為に敷設した電線のことである。自営線を用いた電力供給のイメージを以下に示す。



図 11 自営線による電力供給のイメージ図
（（低炭素投資促進機構,2019）より引用）

自営線による電力供給を行う場合、災害等で系統電力の供給が停止した場合にも電力の供給が可能となることから需要家の生活・事業継続向上の効果が期待される一方

で、敷設する場合はその整備費用や維持管理費用が生じる事となる(低炭素投資促進機構,2019)。ただ、2020年6月に国会で可決・成立した「強靱かつ持続可能な電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正する法律」により、一般送配電事業者が運営していた配電網を新規事業者が借りる、もしくは譲り受けることで、配電事業に参入できるように「配電事業ライセンス」が創設された(資源エネルギー庁,2020)。このことから今後の配電網管理に必要なコストは現状とは異なる可能性が高いと判断し、本研究では自営線敷設コストはゼロとして検討を行った。

2.2.2. 電源調達

また、電力事業者は、需要家に供給する電力の確保の為、いくつかの方法で電源を調達している。調達方法の概要とその特徴を以下に示す。

表 4 電源調達方法
((東京都環境公社,2019)を参考に作成)

概要	特徴
①発電事業者から電気を調達	<ul style="list-style-type: none">・ 初期投資の必要なし・ 契約に基づいて安定して電源を確保・ 電源種別の選択が可能
② 日本卸電力取引所 (JEPX) の利用	<ul style="list-style-type: none">・ 当日一時間前までの電力の取引が可能・ 不足の事態に対して、調達量の調整ができる
③ 常時バックアップ契約を旧一般電気事業者と結ぶ	<ul style="list-style-type: none">・ 時間毎に調達量を決めることが出来る。・ 将来的には廃止が望ましいとされている
④ 自社の発電設備を利用	<ul style="list-style-type: none">・ 長期に安定して電源を確保できる・ 建設費用や運転費用の投資を行う必要がある・ 意思決定から発電開始までタイムラグがある
⑤ 他の小売電気事業者から電力を調達(相対取引で電力を購入)	<ul style="list-style-type: none">・ 交渉に予知、必要な時に必要な量を確保可能。・ 相手の状況により、希望する量や価格での調達ができない場合もある。

本研究で想定するビジネススキームでは、電源調達方法として上記のうち“②日本卸電力取引所 (JEPX) の利用”と“④自社の発電設備を利用”を想定する。

2.2.3. インバランス料金

2016年4月から始まった「計画値同時同量制度」により、小売電気事業者と発電契約者は、30分単位の「需要計画(事前に計画する需要量)」と「需要実績(実際の需要)」を一致させるように調整を行うことが定められている。計画値同時同量制度のイメージ図を以下に示す。



図 12 計画値同時同量制度のイメージ

((電力広域的運営推進機関、『計画値同時同量制度』)より引用)

もし計画値と実績値が一致しない場合には、一般送配電事業者により電力を自動で補給もしくは引き取られ、“インバランス料金”として精算を行う事となる。小売電気事業者側からみて、計画値<需要値の場合はインバランス料金の支払が発生し(不足インバランス)、計画値>需要値の場合はインバランス料金での受取(余剰インバランス)が発生する(東京都環境公社,2019)。下図に計画・需要値とインバランスの関係を示す。

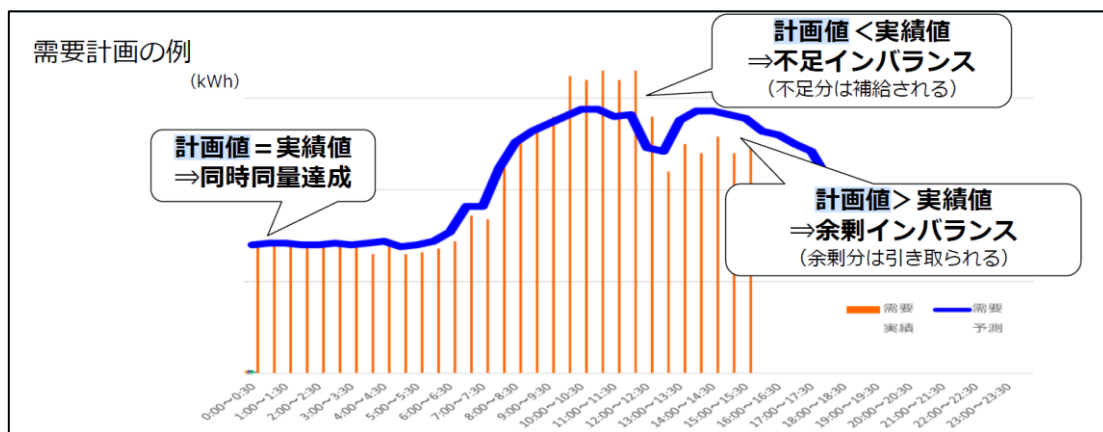


図 13 計画・需要値とインバランスの関係

((東京都環境公社,2019)より引用)

インバランスはエリアや時間帯ごとに異なる値であるが、本研究の検討においては、簡易化の為(北海道開発局,2016、所沢市,2018)における試算例を参考に、『需要電力量[kWh]の3%の不足インバランスが発生し、インバランス料金は市場価格の10%増』と仮定して、計算した。

2.2.4. PVの導入理由

本研究では主に温泉発電と蓄電池に加え、PV(Photovoltaics,太陽光発電)の導入も想定した。PVの導入を想定した理由としては、温泉発電と比較した場合にPVのほうが設備容量1kW当たりの設備費用が安価であることが挙げられる。一方で、年間発電量[kWh]を比較した場合は、比較的安定した出力で発電を行う事のできる地熱発電のほうが約5倍程度年間発電量は大きい。上記より、安定した出力で発電可能な温泉発電に、kW当たりの発電単価が安価なPVを組み合わせることで、全体としてより安価にエネルギーサービスを構築できると考え、PVの導入も想定したエネルギーシステムの検討を行った。以下に、温泉発電とPVそれぞれの設備容量1kW当たりの設備費用と、設備容量100kWの温泉発電とPVにおける年間発電量の試算を示す。

表 5 温泉発電とPVのkW当たり設備費用
(JOGMEC,2015b、経済産業省,2020b)を参考に作成)

温泉発電	PV
134[万円/kW]	27 [万円/kW]

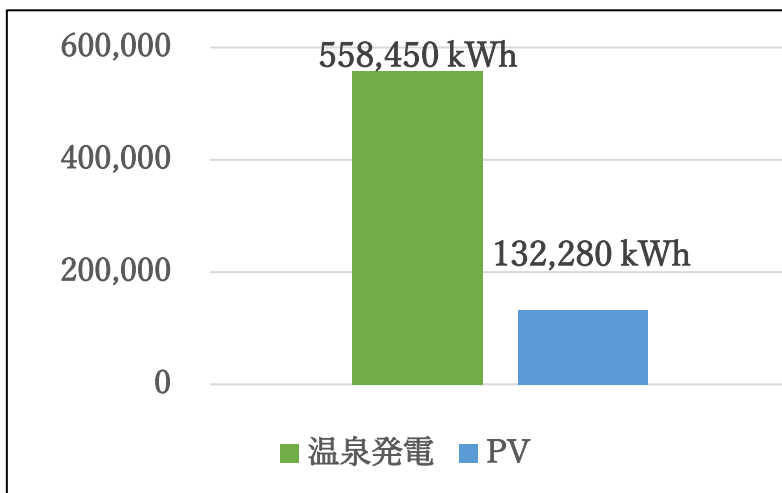


図 14 設備容量100kWの温泉発電とPVによる年間発電量
(JOGMEC,2015b、経済産業省,2020b)を参考に作成)

2.3. 利用データの整理

2.3.1. エネルギーシステムの導入想定エリア

本研究で検討するエネルギーシステムの導入エリアとしては、九州の別府周辺を想定し、各種データの整理を行った。これは、稼働している温泉発電所のほとんどが九州の大分県別府市に立地していることに加え、120℃以下の熱源を用いるバイナリー発電の導入ポテンシャル調査結果(環境省,2020b)においても別府周辺のエリアは比較的高い値が報告されていたため、本研究で検討するような温泉発電を用いたエネルギーシステムの導入場所としても妥当だと考えたためである。以下に温泉発電立地エリアと国内におけるバイナリー発電の導入ポテンシャル図を示す。

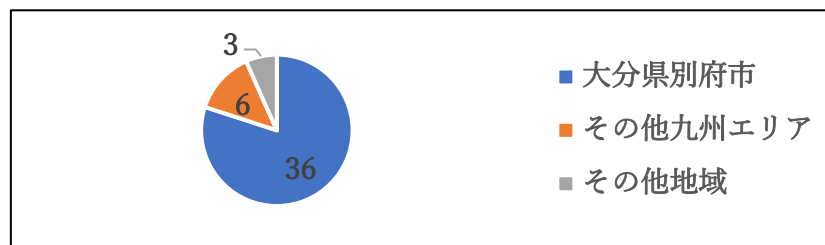


図 15 2018 年時点の温泉発電の立地エリア
((火力原子力発電技術協会,2018)を参考に作成)

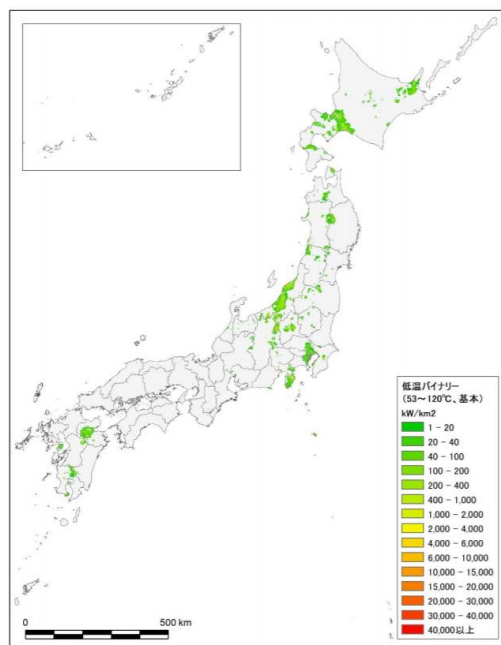


図 16 低温バイナリー発電の導入ポテンシャル分布状況
((環境省,2020b)より引用)

2.3.2. 電力需要データ

電気の契約は供給電圧により大きく“特別高圧・高圧・低圧”の三つに区分されている。以下に特別高圧・高圧・低圧の供給電圧、全国の電気供給量に占める割合、各区分で供給を受ける施設のイメージを以下に示す。

	供給電圧	構成比 [※]	施設イメージ
特別高圧	20,000ボルト以上	28%	大規模工場/ビル等
高圧	6,000ボルト	36%	中規模工場/ビル、 商業施設 等
低圧 (電灯・動力)	100・200ボルト	36%	家庭/小規模店舗等

※電力使用量 (kWh) ベース

図 17 特別高圧・高圧・低圧の違い

((Ennet,『コラム：電気料金のしくみ』)より引用)

低圧契約はさらに 2 種類に分かれており、一つは照明や一般の電化製品を動かすために必要な“電灯契約”、もう一点は業務用空調や業務用冷蔵庫などに必要な“動力契約”となる。小規模店舗、町工場では“電灯契約”と“動力契約”の両方を利用しているケースもある。

九州エリアにおける特別高圧・高圧・低圧各契約種別の月間電力需要を確認したところ、特別高圧は今回導入を想定する設備容量 100kW の温泉発電一基の月間発電量を大きく上回ることが判明した。そのため、需要家には高圧・低圧需要家を想定する。以下に契約種別一口当たりの月間電力需要と、設備容量 100kW の温泉発電一基の月間発電量の試算を示す。

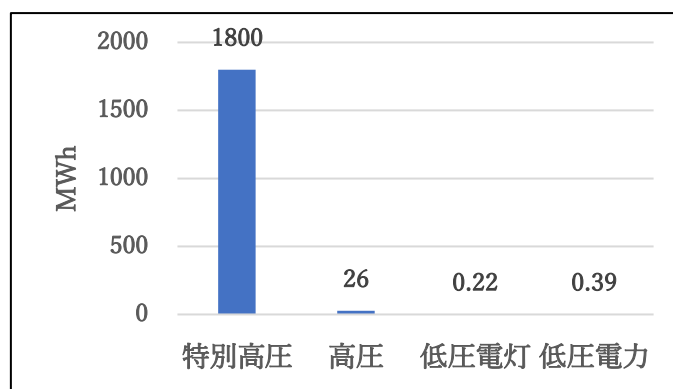


図 18 令和 2 年 6 月の九州エリアにおける契約種別一口当たり月間電力需要
((電力・ガス取引監視等委員会,2020)を参考に作成)

表 6 導入を想定する温泉発電の月間発電量
(JOGMEC,2015b)を参考に作成)

100kW 温泉発電の月間発電量
46.5[MWh/month]

また、(資源エネルギー庁,『2015 年度(平成 27 年度) 電力調査統計表』、電力・ガス取引監視等委員会,2020)の電力需要に関する統計を参考に、導入を想定する九州エリアにおける高圧契約事業者一軒当たりの一般家庭、事業種別低圧契約事業者の契約口数の比と、それぞれの電力需要として以下を算出した。

表 7 想定した各需要家の電力需要

契約種別 (想定事業)	高圧事業者 (大規模商店)	低圧事業者 (オフィス)	低圧事業者 (小規模商店)	一般家庭
高圧事業者を 1 とした時の 口数比	1	2.84	4.17	77.14
一契約あたり 電力需要	28.21 [MW/month]	776.3 [kW/month]	1529 [kW/month]	311.8 [kW/month]

上記を踏まえ、提案するエネルギーシステムで自営線にて電力を供給する需要家の構成には以下の二通りを想定した。

表 8 想定する需要家構成

ケース名	高圧事業者 (大規模商店)	低圧事業者 (オフィス)	低圧事業者 (小規模商店)	一般家庭
需要家構成小	1	2	3	38
需要家構成大	1	3	4	78

需要家構成小のケースは温泉発電の月間発電電力量と釣り合うような需要を想定し、大のケースは算出した口数比参考に設定した。以下にそれぞれのケースにおける平均的な月間電力需要と温泉発電の一基での月間発電量を示す。

表 9 温泉発電の発電量と各ケースの電力需要比較

100kW 温泉発電の発電量	46.5[MWh/month]
需要家小ケースの電力需要	46.2 [MWh/month]
需要家大ケースの電力需要	60.1 [MWh/month]

上記の想定のもと、(日本エネルギー学会,2008)で報告された需要家別の需要パターンを参考に、需要構成ケース別に年間の一時間ごとの電力需要データを作成した。各ケースにおける平均的な一日当たりの時間別電力需要と年間の需要それぞれの傾向を以下に示す。

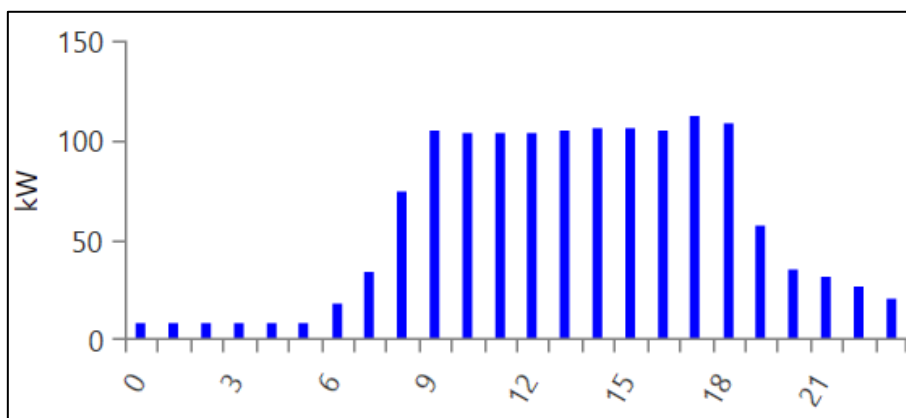


図 19 平均的な一日あたりの需要傾向(需要家小ケース)

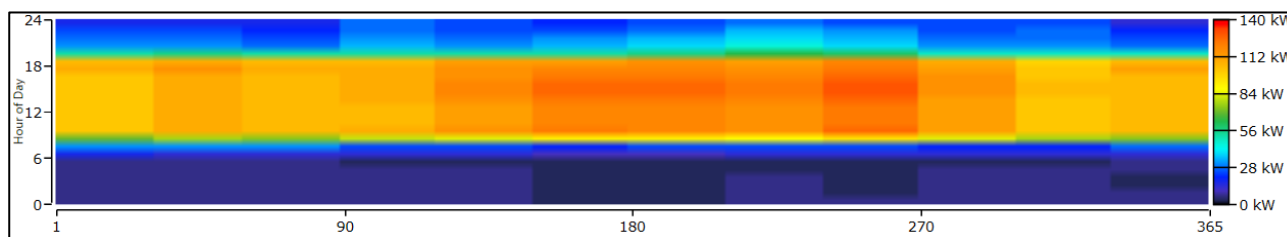


図 20 年間の需要傾向(需要家小ケース)

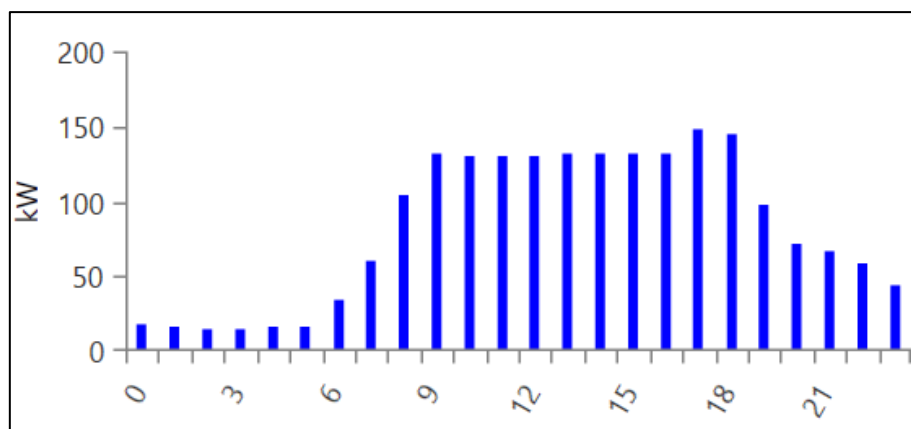


図 21 平均的な一日あたりの需要傾向(需要家大ケース)

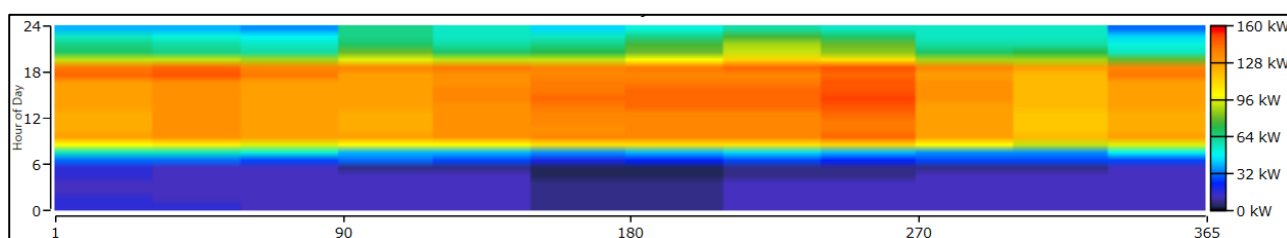


図 22 年間の需要傾向(需要家大ケース)

2.3.3. 電力卸取引市場からの調達価格

日本卸電力取引所（JEPX）では、市場取引を用いて電力の調達・販売を行うことができる。主な市場とその概要を以下に示す。

表 10 JEPX における主な市場とその概要
（（東京都環境公社,2019）より引用）

	特性	最低取引単位	入札期間等	手数料 (税別)
スポット市場 (1日前市場)	<ul style="list-style-type: none"> ・1日を30分毎の48商品 ・365日取引可 ・全国統一のシステムプライス。ただしエリアを跨ぐ締約量が連系線の容量を上回る場合は市場の分断処理が行われる。 ・ブラインド・シングルプライスオークション（入札価格によらず約定価格で取引される。例えば ¥10/kWh で売りの入札を出していても、約定価格が ¥15/kWh であれば、¥15/kWh で売られることになる。ブラインドとは、入札時に他の参加者の入札状況が見えないことを指す。） ・売買が成立した後、自社の販売計画・発電計画に反映し、広域機関を通して託送を申し込む。 	0.1MW (50kW/ 30分)	10日前～ 前日10時	0.03円 /kWh もしくは 月額 100万 円
時間前市場	<ul style="list-style-type: none"> ・24時間取引可 ・ザラバ方式（約定価格は約定した売買入札のうち、先に入札された価格となる。より良い条件で取引を行うためには、常に取り引状況を観察することが必要。） ・約定した電気は、広域機関システムを通じて系統利用計画に反映される。 	0.1MW (50kW/ 30分)	前日17時～ 利用の1時 間前	0.1円 /kWh
分散型・グリーン 売電市場	<ul style="list-style-type: none"> ・相対の長期契約 ・売り手は取引会員でなくてもよい ・出なり電気の売電も可能 	1kW		

直近 2019 年度の JEPX の取引量は、スポット市場によるものが 9 割超を占める (JEPX,2020) ことから、提案するエネルギーシステムにおいても、電力調達はスポット市場で行うものとする。

上図に示すようにスポット価格は、エリア・時間毎に異なる。今回は JPEX が公開している 2018 年度の九州エリアにおける実績値 (JEPX, 『取引情報：2018 年度 スポット市場取引結果』) を利用した。以下に 1 年間の各時間帯におけるスポット価格を示す。スポット価格にはシステム期間中において毎年同じ値を利用した。

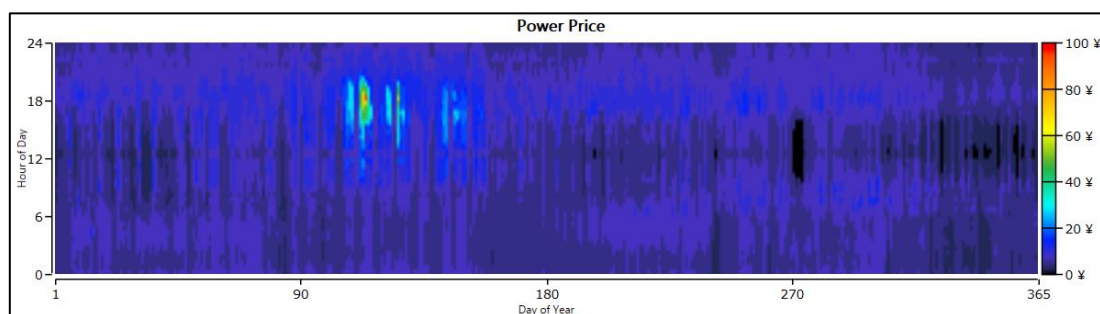


図 23 1 年間の各時間帯におけるスポット価格
(横軸の Day1 は 4 月 1 日、Day365 は翌年の 3 月 31 日を示す。)

2.3.4. エネルギーシステムの構成機器データ

本研究で検討するシステムの基本的な機器構成を以下に示す。

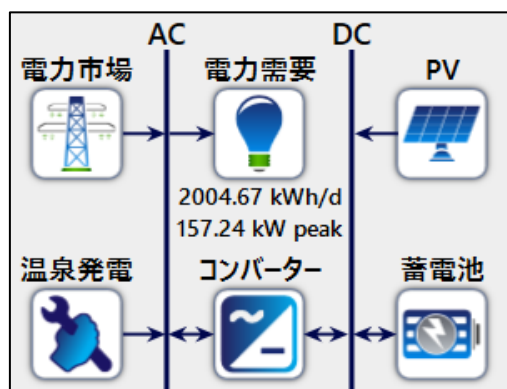


図 24 検討するエネルギーシステムの基本的な機器構成

また各機器のデータには以下のものを用いた。

○温泉発電

温泉発電の出力、初期設備費用、O&M(運用管理と保守点検)費用としては、(JOGMEC,2015b)と2030年度の地熱発電技術の研究開発目標(NEDO,『「地熱発電技術研究開発」基本計画』)、実際の事業者への聞き取り調査((株)元気アップつちゆ,2020)を参考に、以下の三パターンの値を想定した。温泉発電の出力については全パターンで一定と考え、想定される年間発電量[kWh]を1年(8760h)で割ることで算出した。

表 11 温泉発電の出力、初期設備費用、O&M(運用管理と保守点検)費用

値	値の設定理由
出力：64[kW] 初期設備費用：13390[万円] O&M 費用：790[万円/年]	(JOGMEC,2015b)で報告された値より算出
出力：70[kW] 初期設備費用：13390[万円] O&M 費用：790[万円/年]	(JOGMEC,2015b)で報告された値をベースに設定。 (JOGMEC,2015b)で報告された発電機稼働率85%を、事業者への聞き取り調査((株)元気アップつちゆ,2020)で得られた2019年度の稼働率93%に置き換え出力を算出した。
出力：72[kW] 初期設備費用：12460[万円] O&M 費用：580[万円/年]	(JOGMEC,2015b)で報告された値をベースに設定。 2030年度の地熱発電技術の研究開発目標(NEDO,『「地熱発電技術研究開発」基本計画』)を参考に、目標が達成された場合の、設備稼働率・kW当たりの設備費用・O&M費用として設定。

また、エネルギーシステム運用のプロジェクト期間は、温泉発電のプラント寿命と同様であると仮定した。ただ、温泉発電を含む出力 1000kW 以下バイナリー発電は、2014 年以前に稼働したプラントが国内には存在しない。よって本研究では、プラント寿命として以下の二つの値を想定し、その値をプロジェクト期間としても扱い、それぞれの値においてシステムの検討を行う事とする。

表 12 想定する温泉発電プラント寿命

プラント寿命	値の設定理由
15 年	再生可能エネルギーの固定価格買取制度で定められた 1500kW 未満の地熱発電による電力の買取期間である 15 年（資源エネルギー庁、『固定価格買取制度 買取価格・期間等（2020 年度以降）』）を参考に設定。
25 年	(IRENA,2017a)におけるバイナリー発電含む地熱発電の発電単価試算時において、プラントの寿命として設定された値。

○蓄電池

エネルギーシステムで用いる蓄電池には、(IRENA,2017b)にて小規模な電力網での蓄電手段として適していると言及されていることから、リチウムイオン電池を想定した。また、蓄電池 1kWh 当たりの初期設備費用、寿命経過後のリプレイス費用としては(環境省,2017、資源エネルギー庁,2017)を参考に以下の値を設定した。9[万円/kWh]は現状の数値ではなく将来目標をもとに設定している。これは、今後蓄電池の価格が低下した際のシステムの費用対効果についても検討を行うためである。

蓄電池費用	値の設定理由
9[万円/kWh]	（資源エネルギー庁,2017）で言及された 2020 年度の蓄電池価格の目標価格 9[万円/kWh]を参考に設定。
15[万円/kWh]	(環境省,2017)にて報告されたリチウムイオン蓄電池の容量当たりシステム価格 15~25[万円/kWh]の下限をとり設定。
25[万円/kWh]	(環境省,2017)にて報告されたリチウムイオン蓄電池の容量当たりシステム価格 15~25[万円/kWh]の上限をとり設定。

蓄電池の O&M 費用については、(低炭素社会戦略センター,2020)を参考に蓄電池の初期設備費用の 1.5%が毎年発生すると想定した。蓄電池の寿命は、（環境省,2017）を参考に、暦日寿命で 20 年もしくはサイクル寿命で 10,000 回と設定し、どちらかの寿命を迎えた時点でリプレイスが行われると想定した。

また、近年は電気自動車における蓄電池再利用の取り組みなど、当初蓄電池を組み込んだシステムの運用後に、別の用途に蓄電池を活用する取り組みも行われ始めている。以下にその一例を示す。

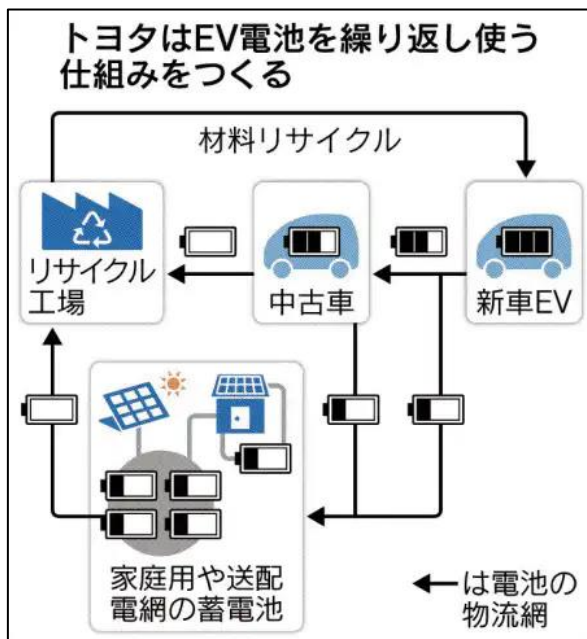


図 25 トヨタ自動車における使用済み電池再利用の取り組み
((日経新聞,2020)の新聞記事より引用)

このことから、提案するエネルギーシステムのプロジェクト期間終了時に蓄電池の寿命(年数)がまだ残っている場合には、蓄電池を売却することで利益を得ることが出来ると想定した。売却時の価格は、蓄電池の価値が運用開始から寿命の到達まで運用年数に対して線形に減少すると想定し、プロジェクト終了時の残りの価値と設定する。

○PV

(資源エネルギー庁,2018、経済産業省,2020b)を参考に、kW 当たりの初期設備費用・O&M 費用・機器寿命として、それぞれ以下の値を設定する。

- 初期設備費用：¥ 266,000/kW
- O&M 費用：¥ 5,000/kW
- 機器寿命：25 年

後述するシミュレータの HOMERPro には、エネルギーシステム導入エリアの緯度経度を指定することで、導入エリアに応じた日射量を計算し、それに基づいて PV 出力を計算する機能が備わっている。本研究ではこの機能を利用して、別府市の緯度経

度を指定し PV の出力を計算した。HOMER により算出された日射量を以下に示す。
PV アレイは太陽のトラッキングを行わず、傾斜角一定のケースを想定している。

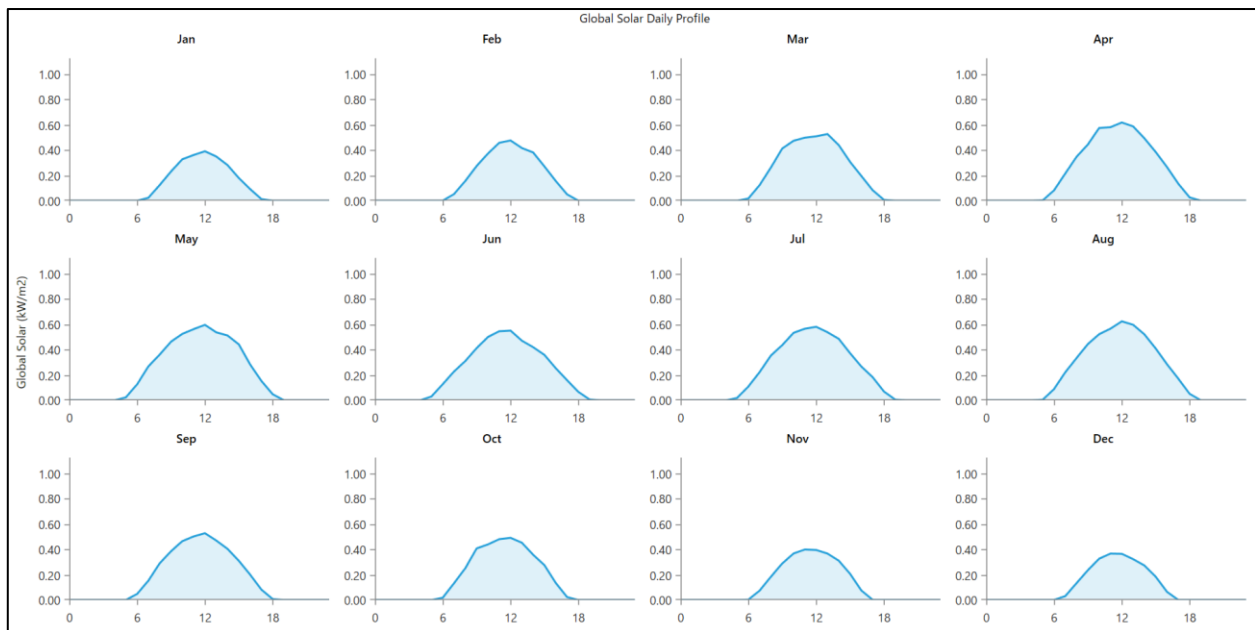


図 26 HOMER で算出された日射量プロファイル

○コンバーター

システム中のコンバーターは、DC（直流）と AC（交流）を変換する装置である。本システムにおいては、DC で発電又は充放電を行う PV や蓄電池と、AC で発生する電力需要等を仲介する役割を果たす。

[低炭素社会戦略センター,2020]を参考に、kW 当たりの初期設備費用・リプレース費用・O&M 費用・AC⇔DC 変換効率・部品交換期間(リプレースが発生する期間)として、それぞれ以下の値を設定する。

- 初期設備費用：¥ 10,000/kW
- リプレース費用：¥ 1,500/kW
- O&M 費用：なし
- AC⇔DC 変換効率：97.5%
- 部品交換期間：5 年

2.4. ケースの設定

各ケースを構成するパラメータとして、下表のものを利用した。総解析ケース数は、下表のパラメータの組み合わせの総数である 108 ケースである。

表 13 各ケースを構成するパラメータ

パラメータ名	パラメータ数	パラメータの値
温泉発電の出力 [kW], 設備費用[万円], O&M 費用[万円/年]	3	以下のパターンを想定 ● 64[kW],13390[万円],790[万円/年] ● 70[kW],13390[万円],790[万円/年] ● 72[kW],12460[万円],580[万円/年]
需要家構成	2	● 高圧事業者 1 軒,低圧事業者 5 軒,一般家庭 38 軒 ● 高圧事業者 1 軒,低圧事業者 7 軒,一般家庭 78 軒
蓄電池費用[万円/kWh]	3	● 9 ● 15 ● 25
蓄電池容量の下限值[kWh],最小 SOC[%]	3	以下のパターンを想定 ● 容量の下限值：250kWh,最小 SOC：20% ● 容量の下限值：125kWh,最小 SOC：30% ● 容量の下限值：63kWh,最小 SOC：50%
プロジェクト期間	2	● 15 ● 25

2.5. エネルギーシステム構成の探索

2.5.1. HOMER

本研究では、エネルギーシステムの設計を行うために、1 時間の時間解像度で電力需給バランスを考慮しながら、エネルギーシステム運用期間中の総コストが最小になるシステム構成の探索を行う事のできるシミュレータである HOMER Pro(Felix,M.G odoy,2006)を利用した。シミュレータは以降 HOMER と呼称する。HOMER は主に、

①エネルギーシステムのシミュレート、②最適化、③感度分析、の三つのタスクを実行することが出来る。下表にそれぞれのタスクにおける実行項目の概要を整理した。

表 14 HOMER による実行項目
 ((Felix,M.Godoy,2006)を参考に著者作成)

タスク	概要
①シミュレート	<ul style="list-style-type: none"> ● システム構成の技術的な実行可能性を確認 ● システムのライフサイクルでのコストを確認
②最適化	<ul style="list-style-type: none"> ● 最もライフサイクルのコストが小さい解を探索
③感度分析	<ul style="list-style-type: none"> ● モデルの入力データに複数の値を想定し、最適化を実施

また、下図に上記三つのタスクの関係性を示す。

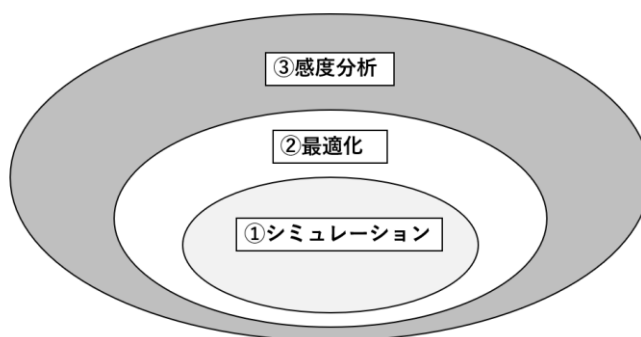


図 27 HOMER の実行タスク間の関係性
 ([Felix,M.Godoy,2006]を参考に著者作成)

上図にて、シミュレーションの楕円が最適化の楕円に囲まれているのは、単一の最適化が複数のシミュレーションの結果より構成されていることを示している。同様に、単一の感度分析は複数の最適化の結果より構成されていることから、最適化の楕円は感度分析の楕円に囲まれている。つまり、HOMER では上記の機能を用いて、複数の条件下において実行可能なエネルギーシステムの設計を判断し、そのシステムの経済性を考慮することができる。実際に計算を行う際は、入力データとして電力需要や発電機の特徴・コスト等のデータをインプットすることで、上記のシミュレーションを行うことが出来る。

本研究では HOMER を用いて、エネルギーシステム中の機器の構成と各機器のサイズを決定し、決定したシステム構成で運用期間中に発生する費用を算出した。以下に本研究で検討するシステムの基本的な構成を示す。

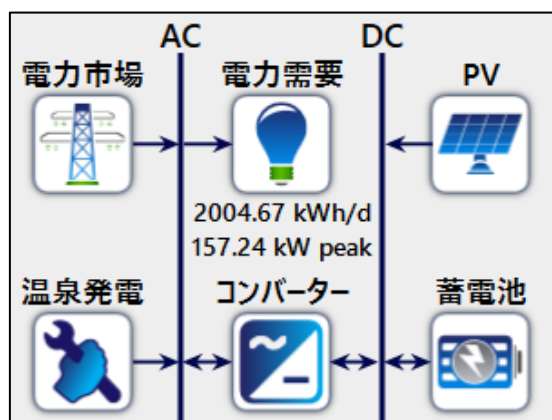


図 28 検討するエネルギーシステムの基本的な機器構成（再掲）

上記システムは、電源として以下の三つをもつシステムとなる。

- ① 再生可能エネルギーによる発電（温泉発電、PV）
- ② 電力市場からの調達
- ③ 蓄電池からの放電

また、HOMER による解析で決定される変数を下表に示す。

表 15 HOMER により決定される変数

蓄電池容量 [kWh]	PV 容量 [kW]	コンバーター容量 [kW]
----------------	---------------	------------------

HOMER にてシミュレーションを行い、運用期間の費用を算出するためには、時系列の電力需要のデータに加え、エネルギーシステムを構成する機器の出力や費用に関するデータなどがインプットデータとして必要になる。これらのインプットデータには前節で整理したデータを用いる。

エネルギーシステムの運用戦略(Dispatch Strategy)としては、以下に示す 2 種類の戦略をそれぞれシミュレーションにおいて検証し、各ケースにおいて経済性の高い結果を算出している。両戦略とも将来の運用については考慮せず、各タイムステップにおける経済性のみを考慮して運用を行っている(HOMER Energy,2020)。

- Load following: 電力需要を満たすのに十分なだけの電力を供給する
- Cycle charging: 可能な限り多くの電力を生成し、バッテリーの充電を優先する。

2.5.2. 広域停電時の電力供給を考慮したシステム構成

本研究では、広域エリアの停電が発生し、広域電力系統から電力供給が行われない場合でも、電力供給が可能となるエネルギーシステムの検討を行う。そのため、HOMERでのシステム構成探索時においても、上記の状況を考慮したシステムのみを探索する必要がある。よって、HOMERによるシステム構成探索時に、以下の条件を設定した。

① 停電時間の設定

② 蓄電池容量の下限值[kWh],と最小 SOC[%]

①停電時間の設定

停電発生時も電力を供給できるようなシステムを探索するため、HOMERの停電モデル化機能を用いて、『電力需要が最大となる9月1日の9:00-19:00のタイミングで、10時間にわたって系統からの電力調達が不可能』という条件を設定する。この期間は電力市場を用いた電力調達を行う事ができないため、『需要が最大となるタイミングにおいて、再生可能エネルギーによる発電もしくは蓄電池の放電のみで、地域需要家への電力供給を行うことのできるシステム』を探索することになる。停電継続時間10時間の設定は、後述する停電一回当たりの停電時間を参考に設定した。

②蓄電池容量の下限值[kWh],と最小 SOC[%]

事業者への聞き取り調査((株)シン・エナジー,2020)により、広域停電時に温泉発電を起動させるためには、少なくとも発電所内の温泉発電のポンプ等を稼働させるための電力が必要であることが判明した。(JOGMEC,2015b)によれば、設備容量100kWの温泉発電所内動力は25kWと見積もられており、前述のむつざわスマートウェルネスタウンの事例において、停電時の発電所稼働におおよそ一時間を要したことが推定される(環境ビジネスオンライン,2019、環境省,2020c)。以上のことから、『25kWhを停電時の発電所起動用として常に蓄電池に確保する。』という条件を設定する。

HOMERでは、運用時に蓄電池に確保される電力量[kWh]を直接指定することはできないが、運用時の蓄電池の最小SOC[%](※State of Charge,蓄電池容量[kWh]に対する現在の充電量[kWh]の比)とシステム構成探索時の蓄電池容量[kWh]の下限を設定することが出来る。通常、蓄電池運用時のSOC下限は10%程度であるとされる(低炭素社会戦略センター,2020)ことから、『25kWhを停電時の発電所起動用に利用した際

も、SOC \geq 10%で蓄電池の運用が可能な最小 SOC[%]と蓄電池容量の下限[kWh]組み合わせ』として、以下の3パターンを想定する。

表 16 最小 SOC[%]と蓄電池容量の下限[kWh]組み合わせ

最小 SOC[%]	蓄電池容量の下限[kWh]
20	250
30	125
50	63

2.6. 停電回避による便益の算出方法

地域新電力事業者は地方自治体や地域の事業者等が設立・運営に関与している例が複数存在することから、地域新電力は地域需要家の生活向上に関心が高い主体であると想定し、エネルギーシステムの導入により地域需要家が享受する停電回避の便益は、地域新電力に帰属させることが可能であると考ええる。同様にエネルギー導入による多用な便益を加味して費用便益分析を実施する手法は、[工月,2015、日本サステナブル建築協会,2016]の既存研究においても行われている。

停電回避による便益は、既存研究を参考に以下の三パターンを想定した。

- パターン①
 - 停電回避便益を考慮しない。
- パターン②
 - (蟻生ほか,2007)で報告された、需要家別被害額を利用。
- パターン③
 - 事業者：パターン②同様。
 - 一般家庭：(佐藤ほか,2018)で報告された、停電回避への年間支払い意思額を利用。

パターン①においては、エネルギーシステムによる停電回避の便益は考慮しない。パターン②とパターン③においては、本研究で検討するエネルギーシステムの導入を行わなかった場合に需要家に発生する被害額を、導入により回避できるものと考え、導入しない場合に発生すると考えられる被害額相当を導入による便益として考慮する。またパターン③では、一般家庭の停電回避による便益として(佐藤ほか,2018)で報告された、停電回避への年間支払い意思額を利用する。

パターン②,③で利用する(蟻生ほか,2007)で報告されている需要家別被害額は、一回の停電の継続時間に対する事業者・一般家庭の被害額調査結果として以下に示す被害額が報告されている。

表 17 需要家・停電継続時間別の被害額調査結果
(蟻生ほか,2007)より作成)

停電時間	需要家		
	一般家庭 (円)	低圧事業者 (万円)	高圧事業者 (万円)
10 分未満	175	3.4	20
10 分以上 1 時間未満	1,007	14	71
1 時間以上 3 時間未満	3,156	36	186
3 時間以上 6 時間未満	6,925	75	376
6 時間以上	14,823	138	715

本研究では、上記をもとに被害額と停電時間の関係式として以下に示す階段関数を作成し、被害額の算出に用いた。6 時間以上の停電においては”6 時間以上”の被害額として報告された値を 6 で割り、停電時間を掛け合わせることで算出した。

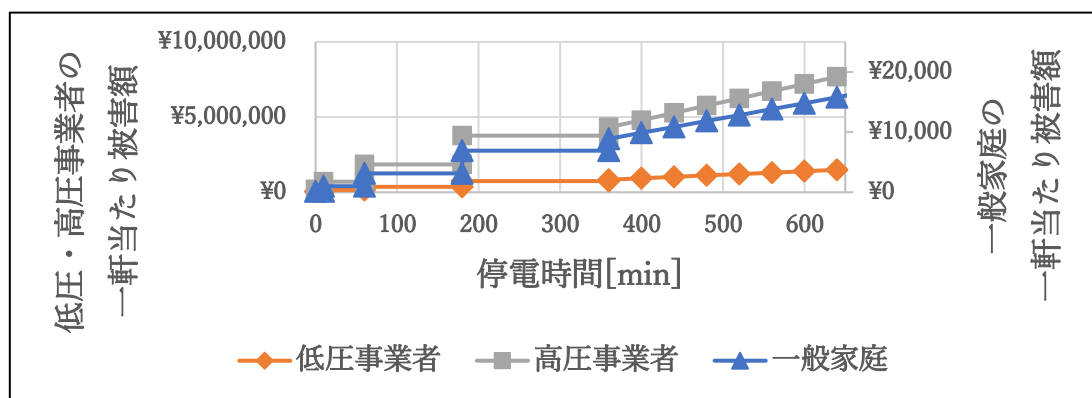


図 29 停電時間と被害額の関係

上記を用いてプロジェクト期間中の被害額を算出するためには、プロジェクト期間に発生する停電の発生回数と一回当たりの継続時間を仮定する必要がある。停電の発生回数と一回当たりの継続時間は、(電力広域的運営推進機関,2019)において報告された九州エリア低圧電灯需要家の 2014~2018 年度における平均停電実績をもとに設定した。

本研究では、高圧需要家も含むエリアへの電力供給を想定しているが、今回は電力供給エリアにシステムを導入しない場合の低圧電灯需要家の停電実績を用いている。これは、一般送配電事業者より公開されている 2020 年 8 月に東京エリアで実際に発生した一回の停電における停電軒数を一般送配電事業者の停電情報公開ウェブページ（東京電力パワーグリッド,『停電履歴情報』）にて確認したところ、過半数が 100 軒を超える停電であったため、検討するエネルギーシステムにより電力供給を受けるエリアの全需要家は低圧電灯需要家と同時に停電すると考えたためである。

停電の発生回数と一回当たりの継続時間には以下の値を設定した。算出した各需要家の被害額は、（停電継続時間 571 分の停電における各需要家被害額[円・年]）×（停電発生回数 0.14[回/年]）=（各需要家の一年あたり被害額[円/年]）と考え、一年あたりの被害額に換算して利用した。

表 18 設定した停電の発生回数と一回当たりの継続時間

項目	値	算出方法
停電発生回数	0.14[回/年]	（電力広域的運営推進機関,2019）により報告された、“1 需要家当たり年間停電回数 0.14[年]”の値をそのまま利用
一回の停電当たりの 停電継続時間	571[min]	（電力広域的運営推進機関,2019）により報告された、“1 需要家当たり年間停電回数 0.14[年]”と“1 需要家あたり年間停電時間 80[分]”より、“1 需要家当たり年間停電回数”÷“1 需要家あたり年間停電時間”=“停電一回当たりの継続時間”と考え、算出。

最終的に算出した 3 パターンの停電回避便益は以下のようになった。需要家構成が異なる場合、停電を回避できる需要家の人数が異なることから便益も異なる値となる。以下では“高圧事業者 1 軒,低圧事業者 7 軒,一般家庭 78 軒”の場合を“需要家大”、“高圧事業者 1 軒,低圧事業者 5 軒,一般家庭 38 軒”の場合を“需要家小”と表記している。

表 19 需要家構成、パターン別停電回避便益

	停電回避便益[万円/年]	
	需要家数小	需要家数大
パターン①	0	0
パターン②	200	370
パターン③	240	600

2.7. 費用対効果の指標について

本研究では、停電回避の便益を加味した場合における温泉発電を利用したエネルギーシステムの費用対効果を確認するために費用便益分析を行う。ある事業を実施する際の費用便益分析の指標として費用便益分析で一般的に用いられているのは、以下の三つであるとされている（国土交通省,2009）。

- ① 費用便益比（Cost Benefit Ratio 以降 B/C と表記）
- ② 純現在価値（Net Present Value 以降 NPV と表記）
- ③ 経済的内部収益率（Economic Internal Rate of Return）

また、それぞれの算出方法は下図で示すようになっている。下図にて i で表される社会割引率は、『現在手に入る財と、将来手に入る同じ財の価値の交換比率』（国土交通省,2018）という意味合いがあるとされている。

評価指標	定 義	特 徴
純現在価値 (NPV: Net Present Value)	$\sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^{t-1}}$	<ul style="list-style-type: none"> ・事業実施による純便益の大きさを比較できる。 ・社会的割引率によって値が変化する。
費用便益比 (CBR: Cost Benefit Ratio) ※以下、B/C と表記	$\frac{\sum_{t=1}^n B_t / (1+i)^{t-1}}{\sum_{t=1}^n C_t / (1+i)^{t-1}}$	<ul style="list-style-type: none"> ・単位投資額あたりの便益の大きさにより事業の投資効率性を比較できる。 ・社会的割引率によって値が変化する。 ・事業間の比較に用いる場合は、各費目（営業費用、維持管理費用、等）を便益側に計上するか、費用側に計上するか、考え方に注意が必要である。
経済的内部収益率 (EIRR: Economic Internal Rate of Return)	$\sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i_0)^{t-1}} = 0$ となる i_0	<ul style="list-style-type: none"> ・社会的割引率との比較によって事業の投資効率性を判断できる。 ・社会的割引率の影響を受けない。

ただし、 n : 評価期間、 B_t : t 年次の便益、 C_t : t 年次の費用、 i : 社会的割引率

図 30 費用便益分析の主な評価指標と特徴

((国土交通省,2009)より引用)

エネルギーシステム導入によるコベネフィットを加味した費用便益分析を行っている(工月ほか,2010、水石,2013、長尾ほか,2017)の既存研究でも指標として B/C や NPV が用いられている。それらを参考に、本研究においては以下の指標を用いることとする。

表 20 本研究で用いる費用便益分析の指標

評価指標	社会的割引率 i [%]	※社会割引率設定参考
B/C	0	(工月ほか,2010、水石,2013)
NPV	3	(長尾ほか,2017)

算出した指標の解釈であるが、(長尾ほか,2017、神奈川県県土整備局,2018)を参考に、それぞれ $B/C > 1$, $NPV > 0$ の場合においては事業実施により一定の費用対効果が得られると考え、 $B/C = 1$ もしくは $NPV = 0$ をエネルギーシステム事業が実施されるか否かの分水嶺であるとする。

研究では主に B/C を用いてエネルギーシステムを検討し、解析の結果 $B/C > 1$ となったシステムについて考察を行う。また考察部分にて $NPV > 0$ となるシステムについても検討を行う。また、これ以降のページで特筆なく B/C 、 NPV を用いる際は、それぞれの社会的割引率 $i = 0.3\%$ のケースについて言及しているものとする。

費用対効果の分析に際し、費用と便益にはそれぞれ以下の要素を考慮する。

- **費用**：エネルギーシステム構成機器の初期設備・O&M・リプレース費用，電力市場からの調達料，インバランス料金
- **便益**：需要家からの電気料金，停電回避による便益、蓄電池売却利益

プロジェクト期間中に発生する、便益と費用それぞれの内訳のイメージを以下に示す。

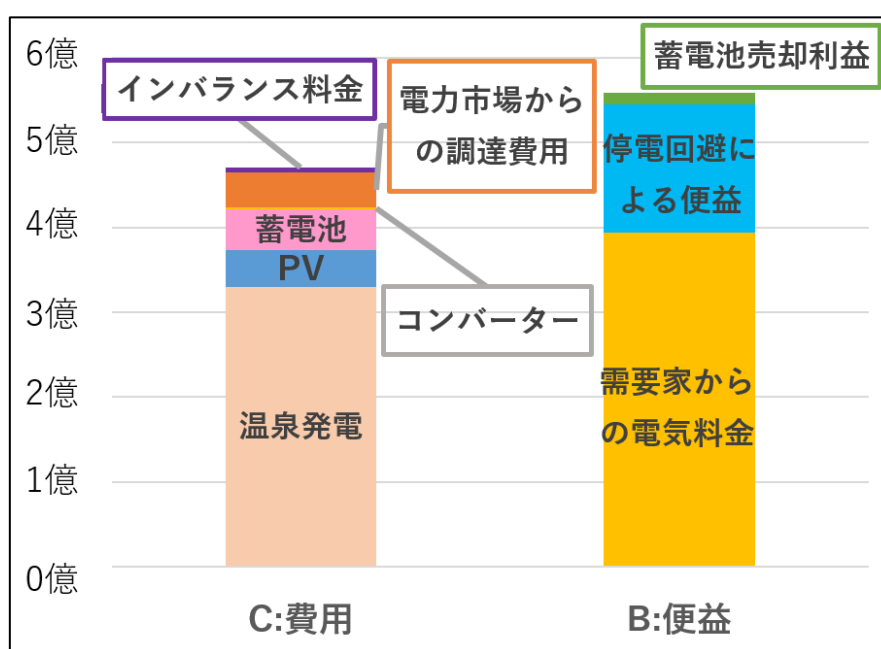


図 31 プロジェクト期間中に発生する便益と費用の内訳イメージ

上図のように 15 年間に発生する費用と便益を確認し、 B/C を確認する。上図の例では、 $B/C = 1.21$ となる。

3. 解析結果

3.1. パターン別解析結果

本章では、下表に示す需要家構成、蓄電池の最小容量[kWh]と最小 SOC[%]の組み合わせ 4 パターン別に、解析結果を示す。

表 21 需要家構成、蓄電池の最小容量・SOC パターン

組み合わせ名	需要家構成	蓄電池容量の下限值 [kWh], 最小 SOC[%]
需要家大,SOC20%	高圧事業者 1 軒, 低圧事業者 7 軒, 一般家庭 78 軒	容量の下限值：250kWh, 最小 SOC：20%
需要家大,SOC50%	高圧事業者 1 軒, 低圧事業者 7 軒, 一般家庭 78 軒	容量の下限值：63kWh, 最小 SOC：50%
需要家小,SOC20%	高圧事業者 1 軒, 低圧事業者 5 軒, 一般家庭 38 軒	容量の下限值：250kWh, 最小 SOC：20%
需要家小,SOC50%	高圧事業者 1 軒, 低圧事業者 5 軒, 一般家庭 38 軒	容量の下限值：63kWh, 最小 SOC：50%

解析結果の代表的なケースとして、下表のパラメータの組み合わせ 4 種パターンにおける、プロジェクト期間中の各年に発生する便益・コスト、プロジェクト期間中に発生する便益・コスト合計の内訳を示す。

表 22 需要家構成、蓄電池の最小容量・SOC 別の代表パターン

組み合わせ名	蓄電池価格 [万円/kWh]	温泉発電の出力 [kW], 設備費用[万円], O&M 費用[万円/年]	プロジェクト 期間[年]
現状技術,15 年運転	15	70[kW],13390[万円], 790[万円/年]	15 年
現状技術,25 年運転	15	70[kW],13390[万円], 790[万円/年]	25 年
将来技術,15 年運転	9	72[kW],12460[万円], 580[万円/年]	15 年
将来技術,25 年運転	9	72[kW],12460[万円], 580[万円/年]	25 年

また、各ケースについて下表の停電回避便益の算出パターンごとに B/C を示した。プロジェクト期間中の各年に発生する便益・コスト、プロジェクト期間中に発生する便益・コストの図は、下表のパターン③における値である。

表 23 停電回避便益の算出方法
(2 章の内容の再掲)

パターン①	停電回避便益を考慮しない
パターン②	(蟻生ほか,2007)で報告された、需要家別の被害額を利用
パターン③	事業者：パターン②同様 一般家庭：(佐藤ほか,2018)で報告された、停電回避への年間支払い意思額を利用

3.1.1. 需要家大,SOC20%

○現状技術,15年運転

表 24 停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC20%,現状技術,15年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.69	0.8	0.95

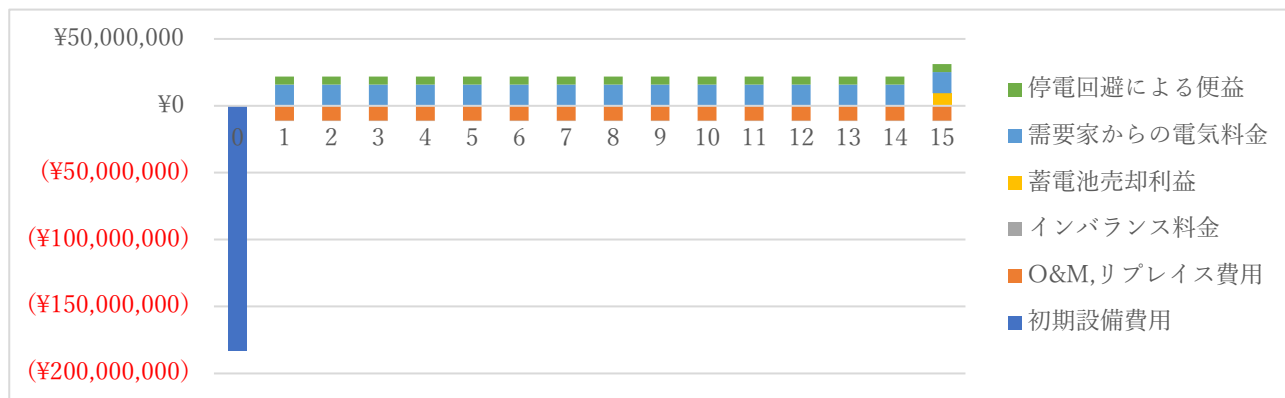


図 32 各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC20%,現状技術,15年運転)

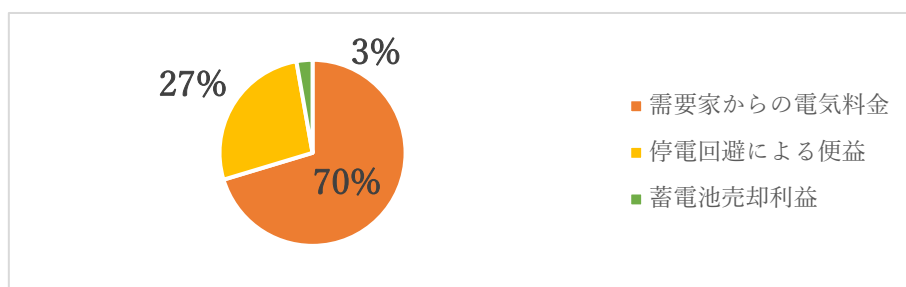


図 33 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家大,SOC20%,現状技術,15年運転)

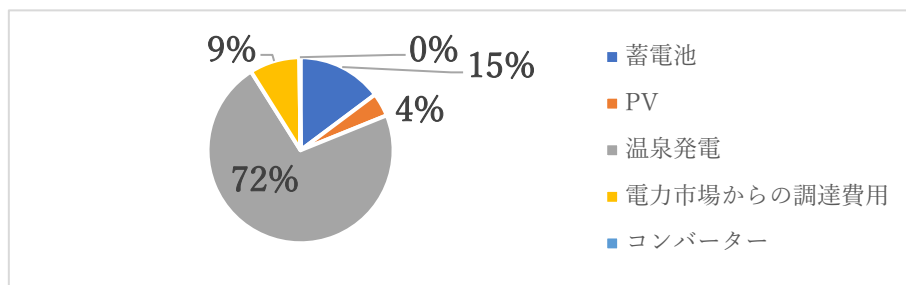


図 34 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家大,SOC20%,現状技術,15年運転)

○現状技術,25年運転

表 25 停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC20%,現状技術,25年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.88	1.01	1.21

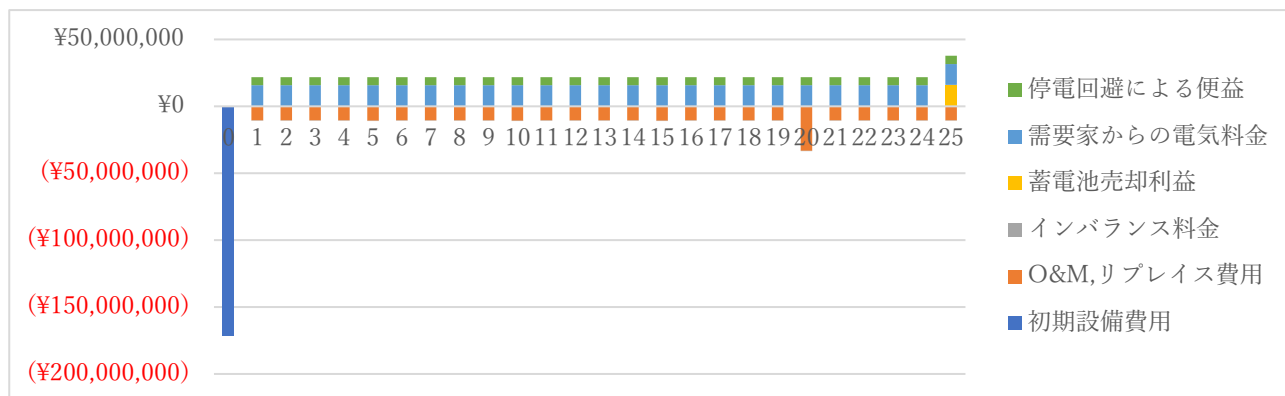


図 35 各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC20%,現状技術,25年運転)

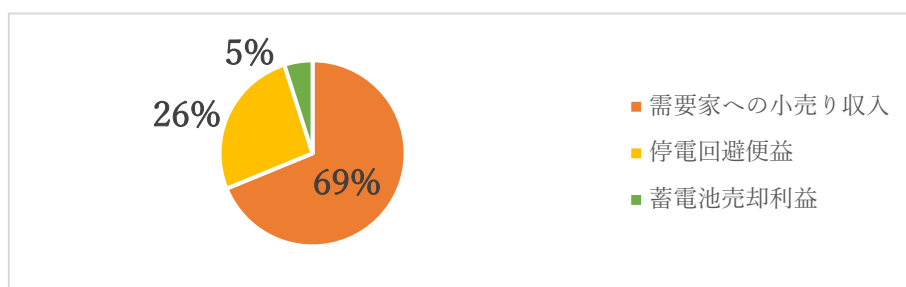


図 36 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家大,SOC20%,現状技術,25年運転)

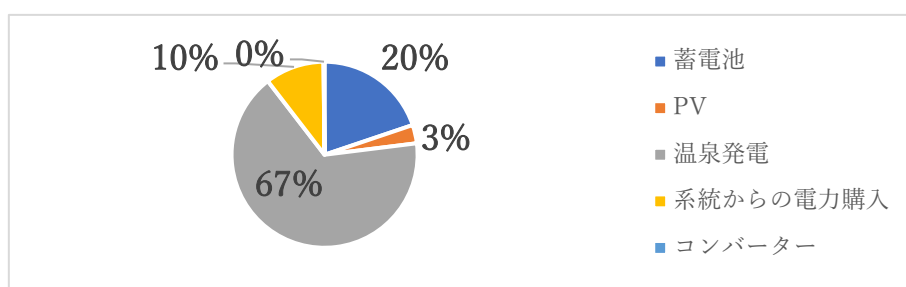


図 37 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家大,SOC20%,現状技術,25年運転)

○将来技術,15 年運転

表 26 停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC20%,将来技術,15 年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.84	0.97	1.16

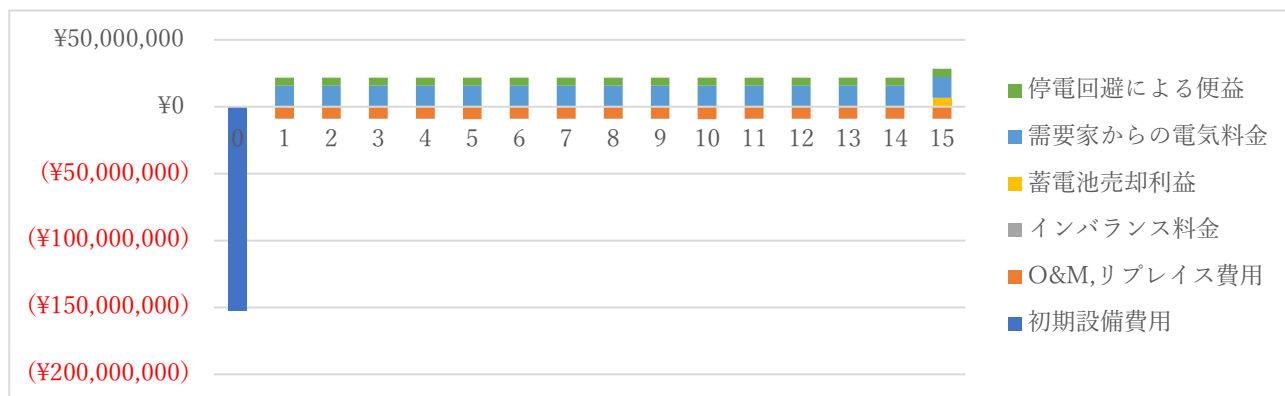


図 38 各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC20%,将来技術,15 年運転)

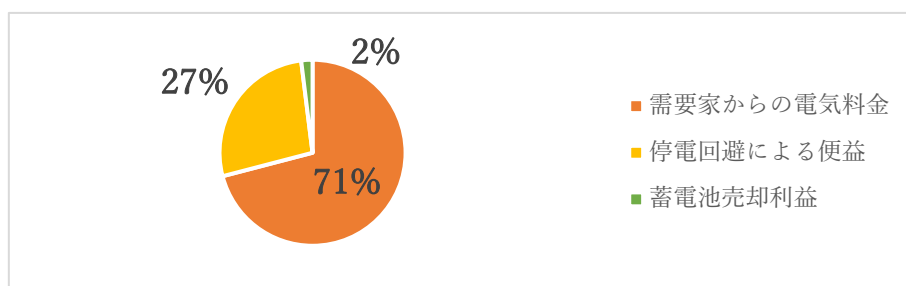


図 39 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳 (需要家大,SOC20%,将来技術,15 年運転)

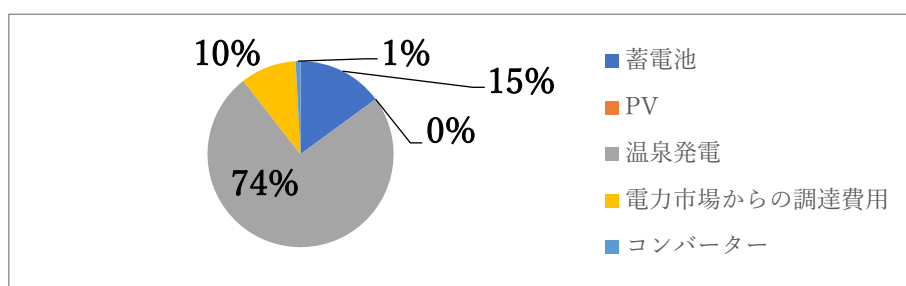


図 40 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳 (需要家大,SOC20%,将来技術,15 年運転)

※本ケースでは PV 容量は 0[kW]となった。

○将来技術,25 年運転

表 27 停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC20%,将来技術,25 年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
1.03	1.18	1.42

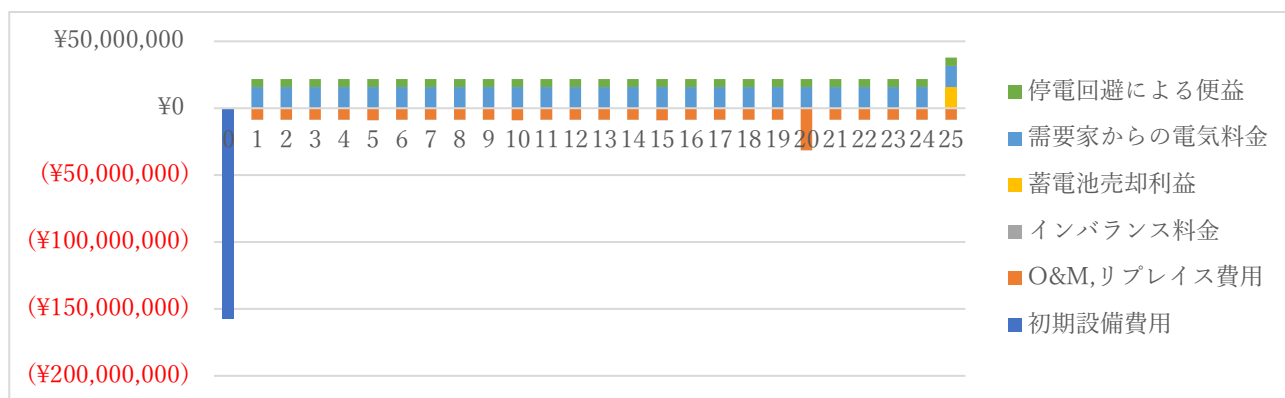


図 41 各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC20%,将来技術,25 年運転)

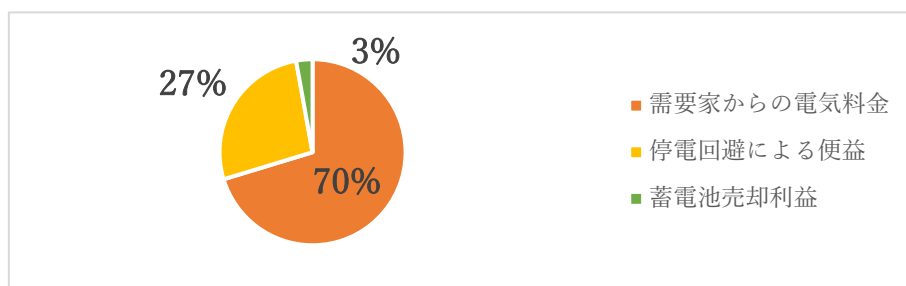


図 42 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳 (需要家大,SOC20%,将来技術,25 年運転)

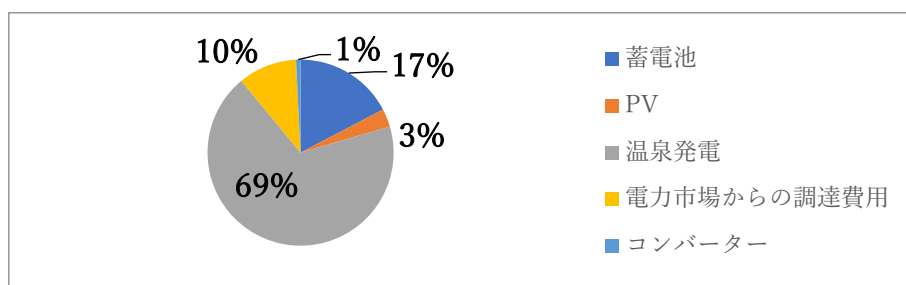


図 43 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳 (需要家大,SOC20%,将来技術,25 年運転)

3.1.2. 需要家大、SOC50%

○現状技術,15年運転

表 28 停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC50%,現状技術,15年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.68	0.78	0.94

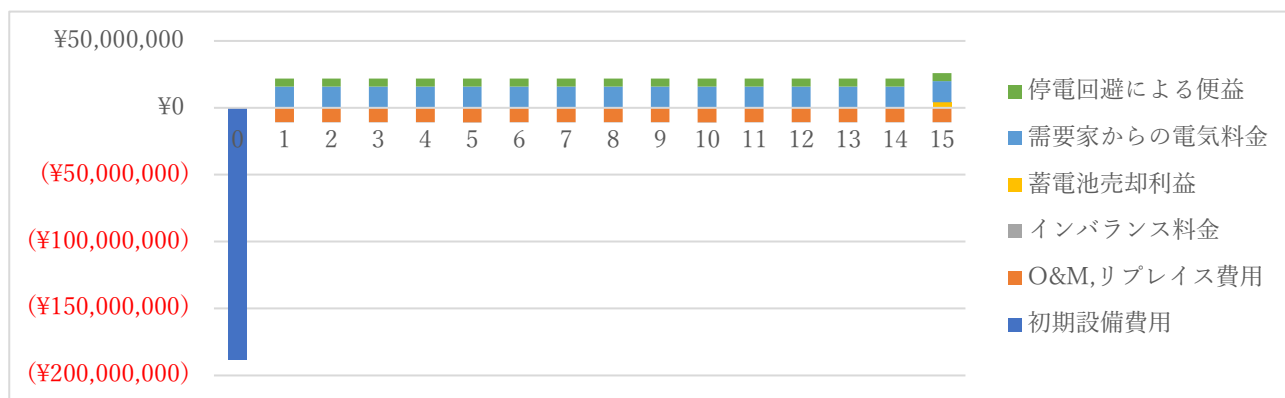


図 44 各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC50%,現状技術,15年運転)

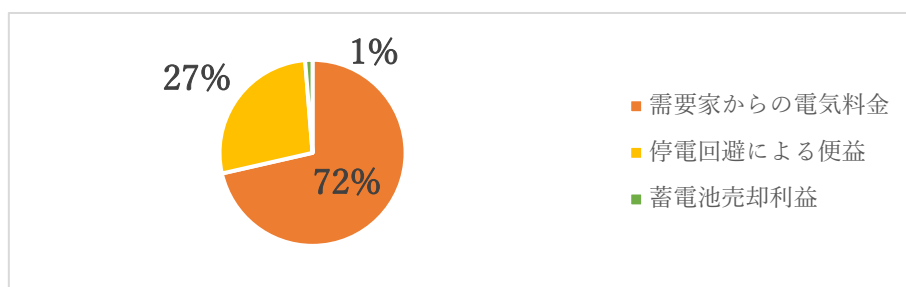


図 45 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家大,SOC50%,現状技術,15年運転)

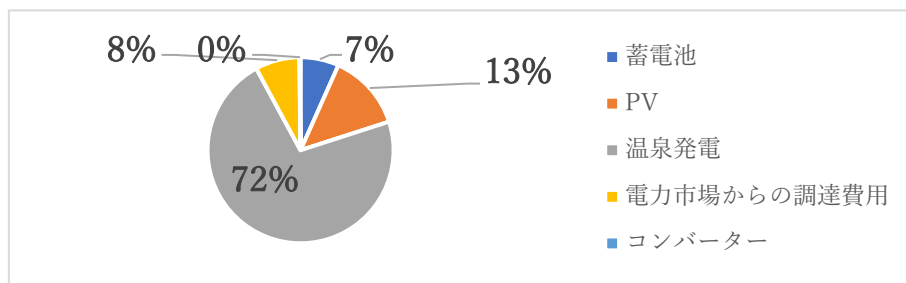


図 46 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家大,SOC50%,現状技術,15年運転)

○現状技術,25 年運転

表 29 停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC50%,現状技術,25 年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.87	1.00	1.20

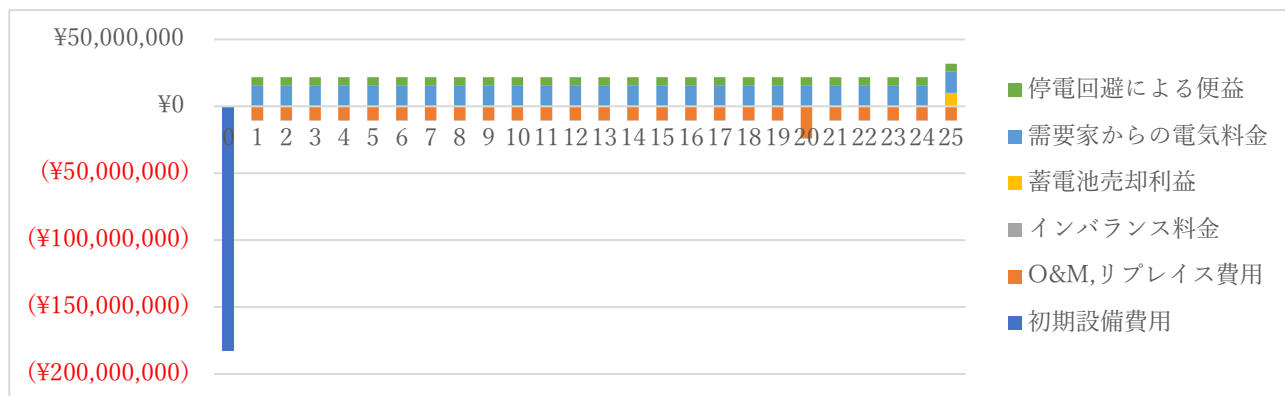


図 47 各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC50%,現状技術,25 年運転)

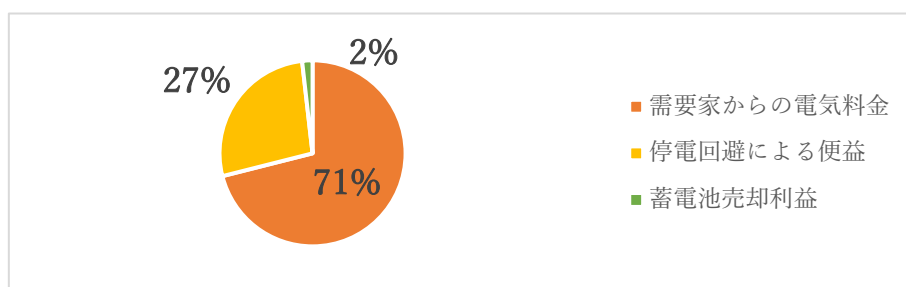


図 48 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳 (需要家大,SOC50%,現状技術,25 年運転)

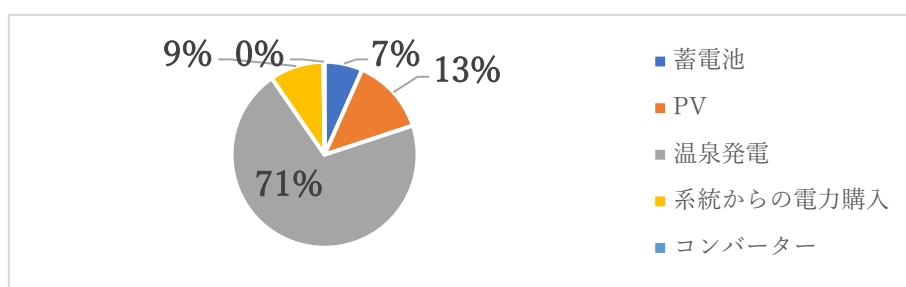


図 49 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳 (需要家大,SOC50%,現状技術,25 年運転)

○将来技術,15年運転

表 30 停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC50%,将来技術,15年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.81	0.93	1.12

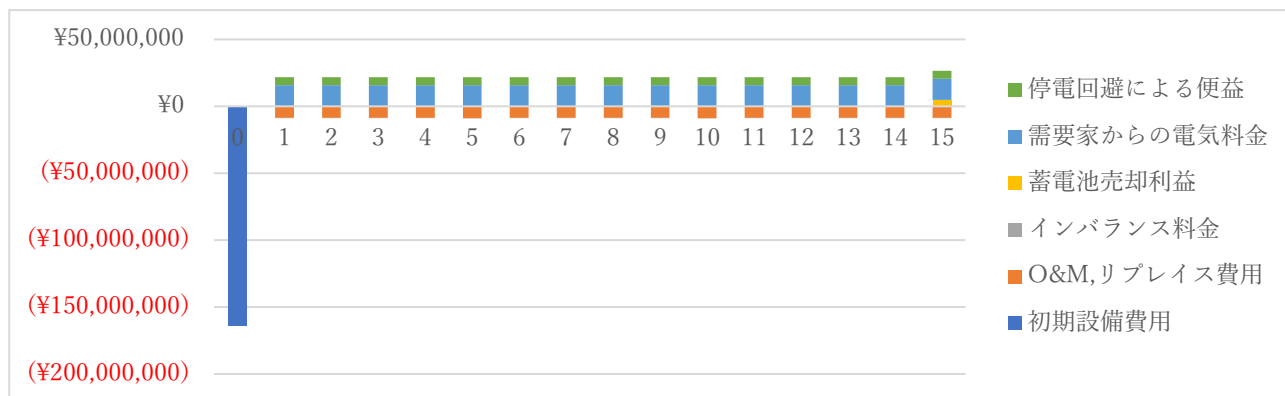


図 50 各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC50%,将来技術,15年運転)

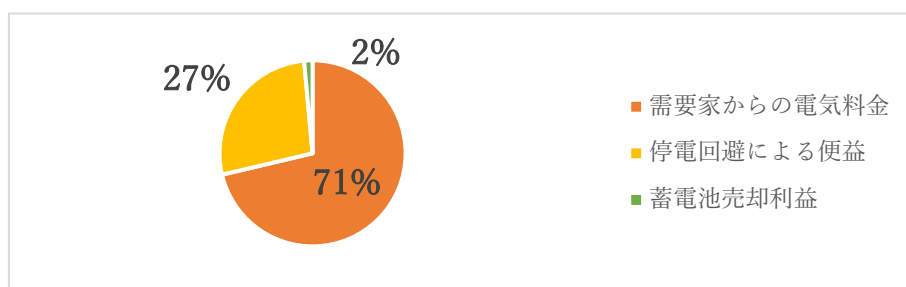


図 51 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家大,SOC50%,将来技術,15年運転)

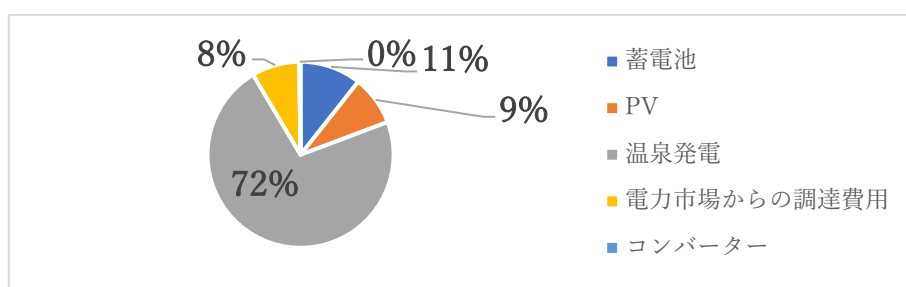


図 52 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家大,SOC50%,将来技術,15年運転)

○将来技術,25年運転

表 31 停電回避便益別の B/C (需要家大,SOC50%,将来技術,25年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
1.02	1.18	1.41

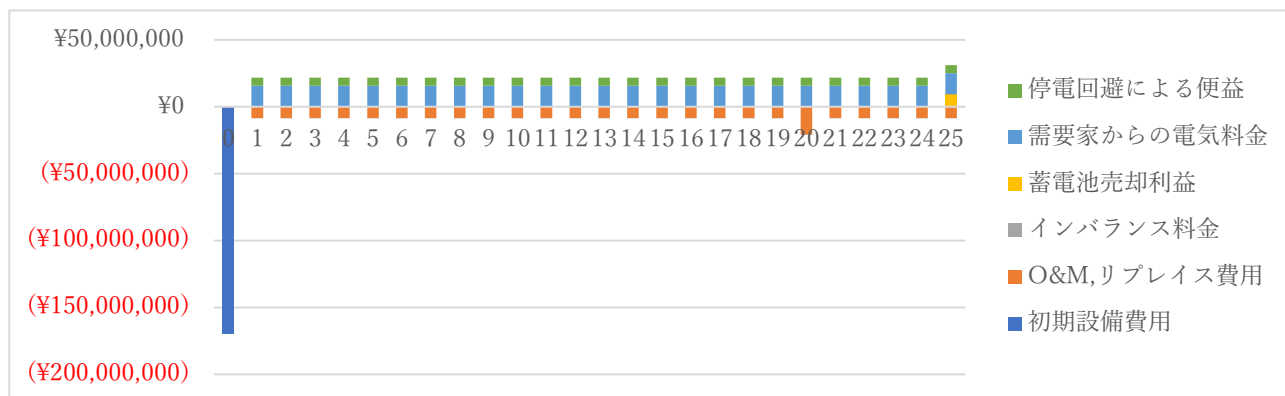


図 53 各年に発生する便益・コスト(需要家大,SOC50%,将来技術,25年運転)

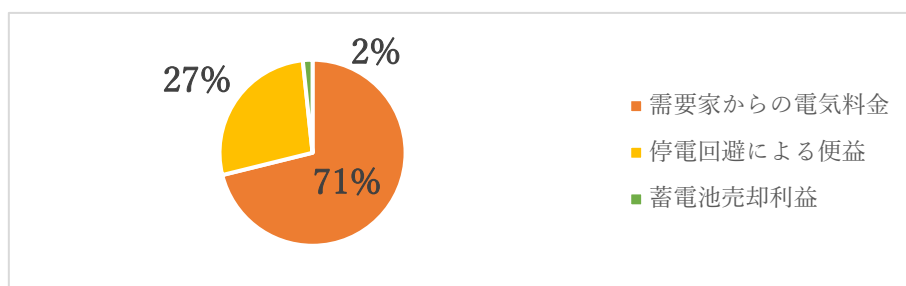


図 54 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家大,SOC50%,将来技術,25年運転)

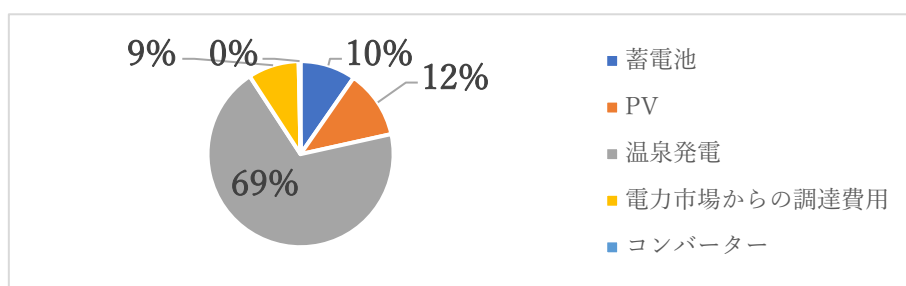


図 55 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家大,SOC50%,将来技術,25年運転)

3.1.3. 需要家小、SOC20%

○現状技術,15年運転

表 32 停電回避便益別の B/C (需要家小,SOC20%,現状技術,15年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.51	0.60	0.69

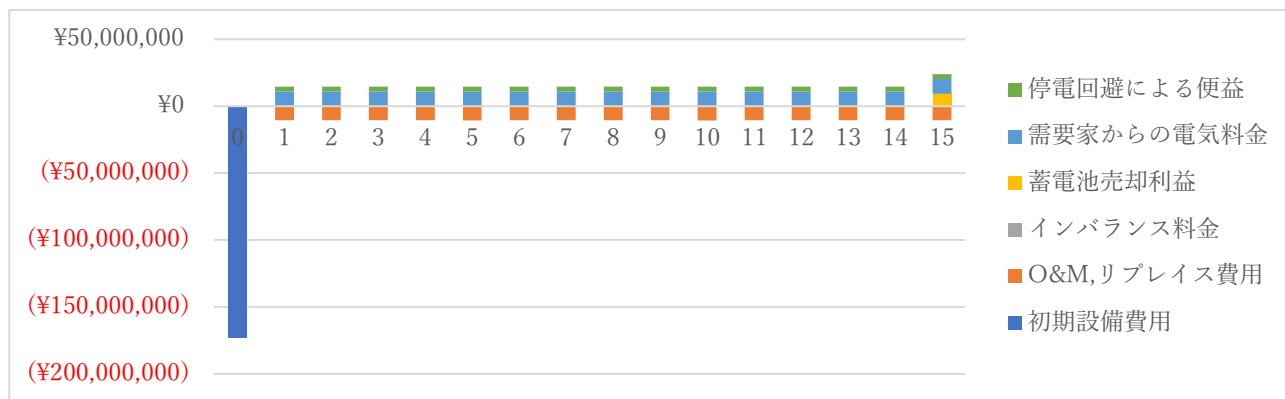


図 56 各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC20%,現状技術,15年運転)

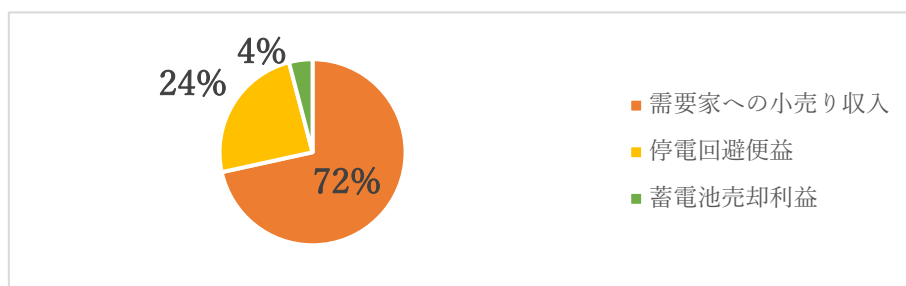


図 57 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC20%,現状技術,15年運転)

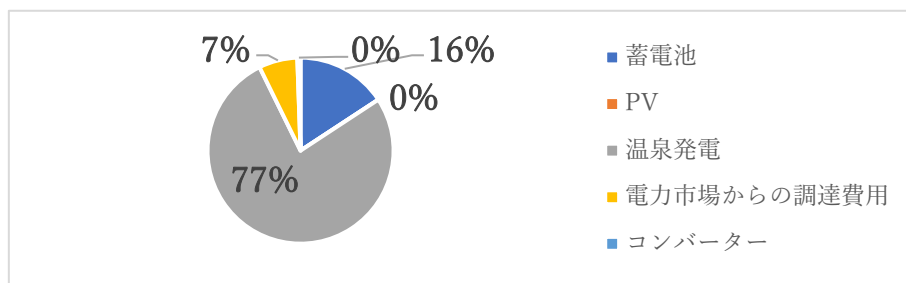


図 58 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC20%,現状技術,15年運転)

※本ケースでは PV 容量は 0[kW]となった。

○現状技術,25 年運転

表 33 停電回避便益別の B/C (需要家小,SOC20%,現状技術,25 年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.66	0.77	0.88

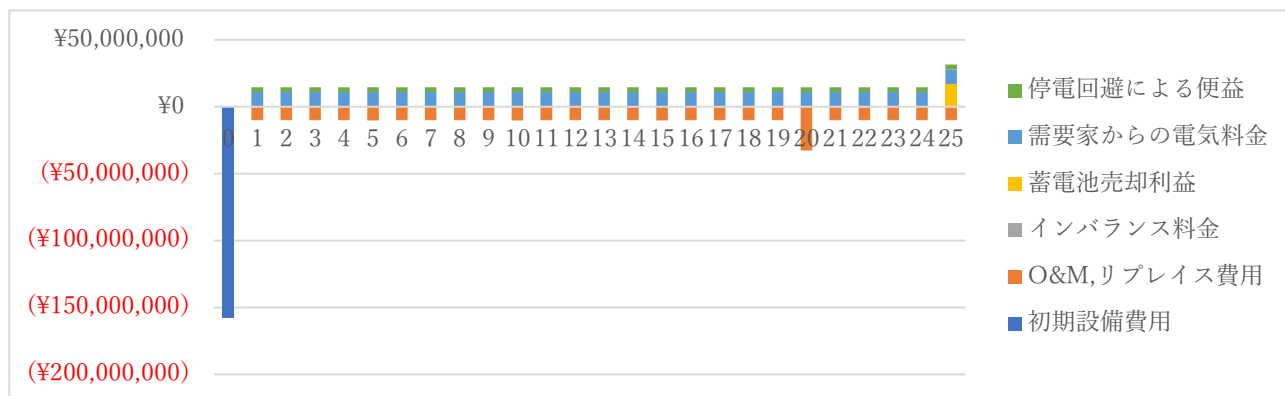


図 59 各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC20%,現状技術,25 年運転)

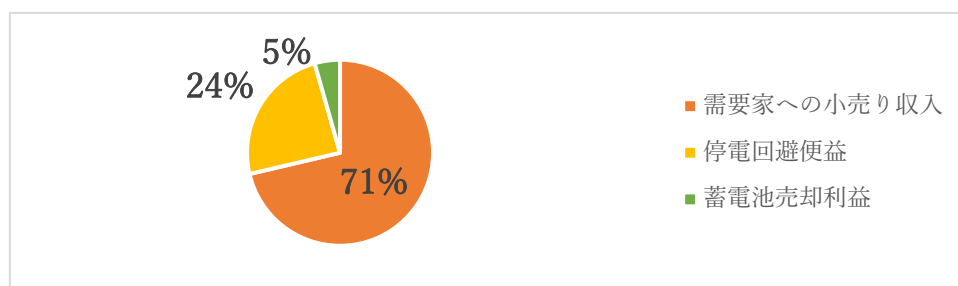


図 60 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC20%,現状技術,25 年運転)

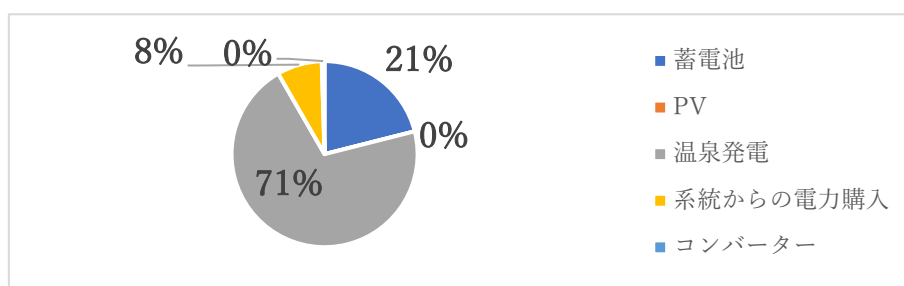


図 61 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC20%,現状技術,25 年運転)

※本ケースでは PV 容量は 0[kW]となった。

○将来技術,15年運転

表 34 停電回避便益別の B/C (需要家小,SOC20%,将来技術,15年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.62	0.73	0.83

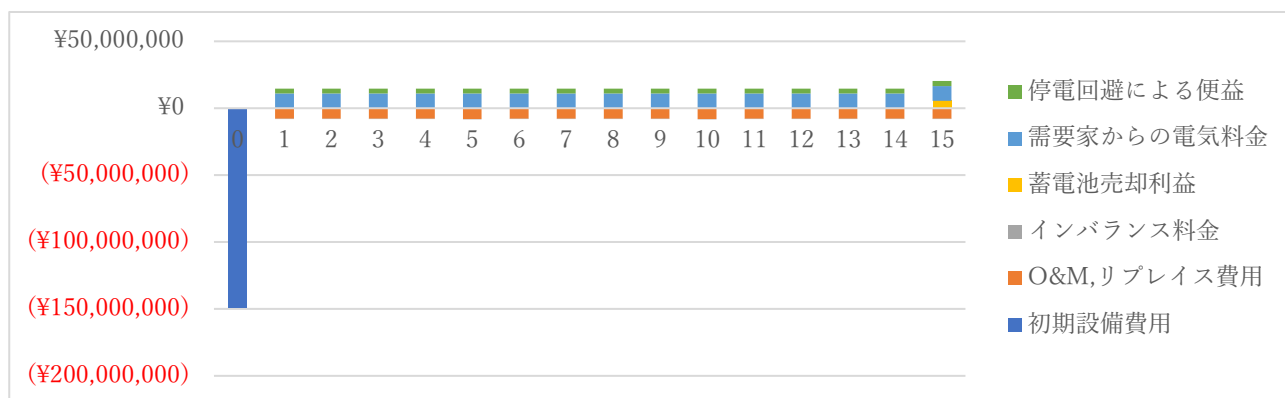


図 62 各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC20%,将来技術,15年運転)

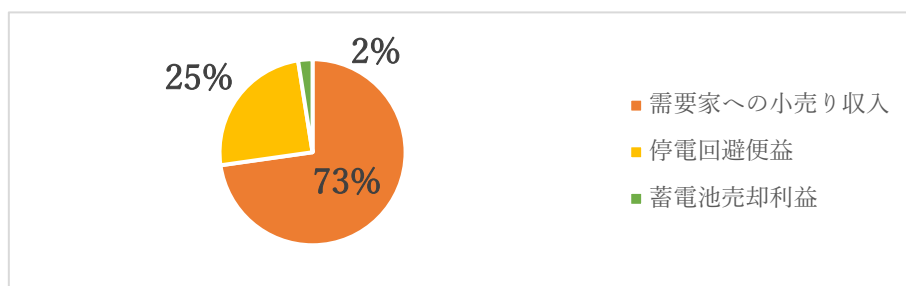


図 63 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC20%,将来技術,15年運転)

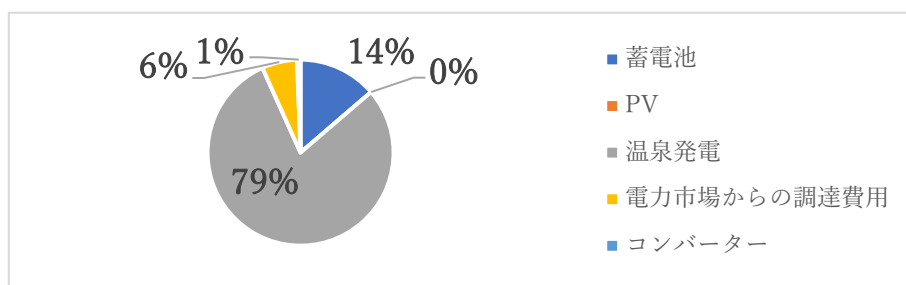


図 64 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC20%,将来技術,15年運転)

※本ケースでは PV 容量は 0[kW]となった。

○将来技術,25 年運転

表 35 停電回避便益別の B/C (需要家小,SOC20%,将来技術,25 年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.77	0.91	1.03

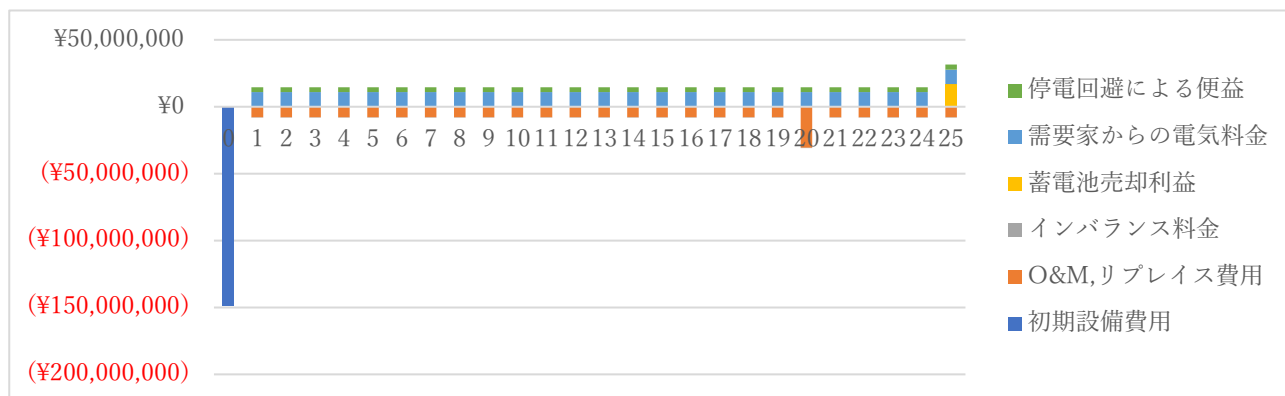


図 65 各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC20%,将来技術,25 年運転)

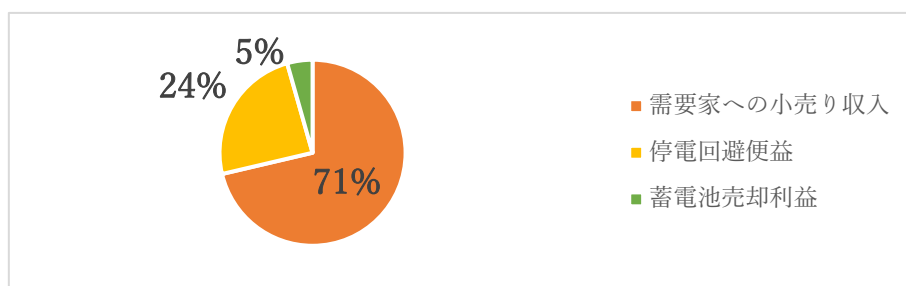


図 66 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC20%,将来技術,25 年運転)

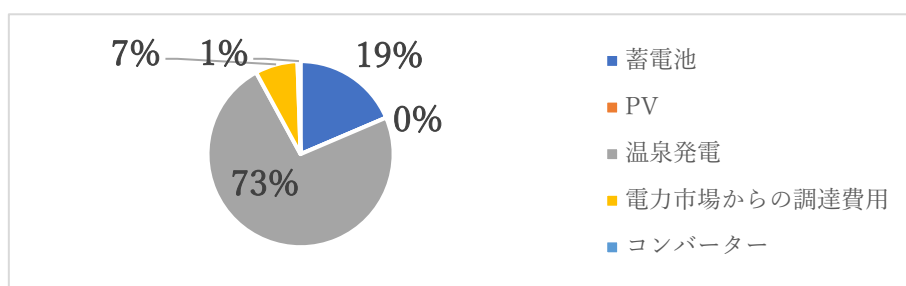


図 67 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC20%,将来技術,25 年運転)

※本ケースでは PV 容量は 0[kW]となった。

3.1.4. 需要家小、SOC50%

○現状技術,15年運転

表 36 停電回避便益別の B/C(需要家小,SOC50%,現状技術,15年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.51	0.60	0.68

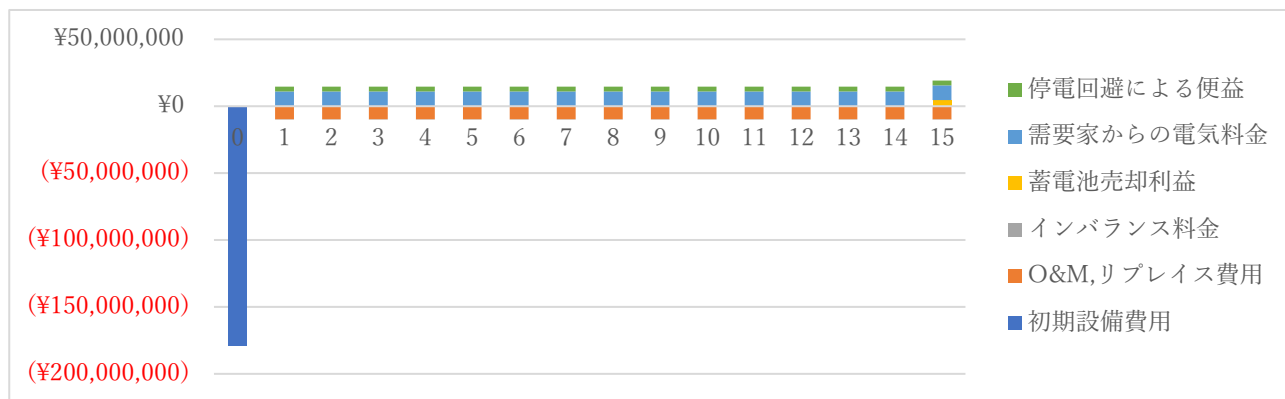


図 68 各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC50%,現状技術,15年運転)

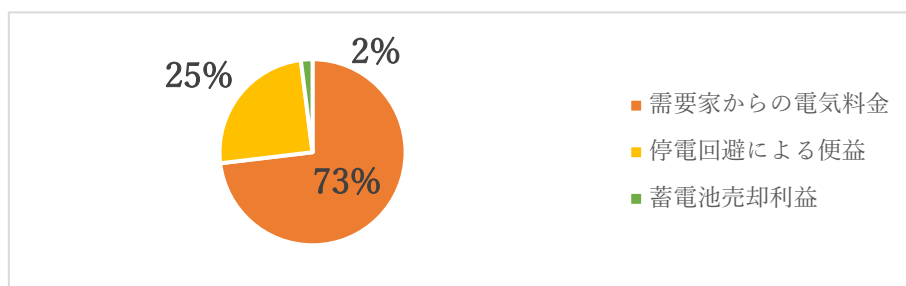


図 69 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC50%,現状技術,15年運転)

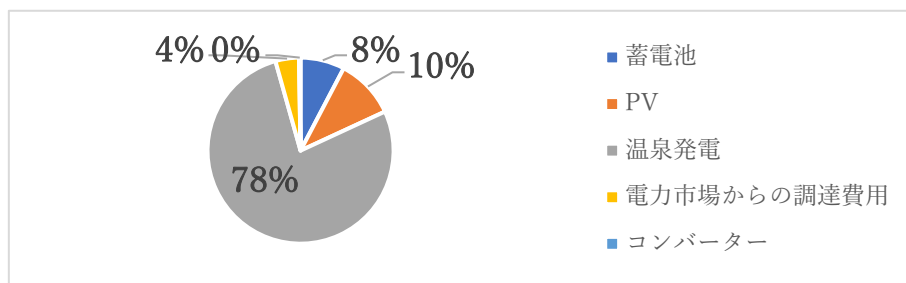


図 70 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC50%,現状技術,15年運転)

○現状技術,25年運転

表 37 停電回避便益別の B/C(需要家小,SOC50%,現状技術,25年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.65	0.77	0.88

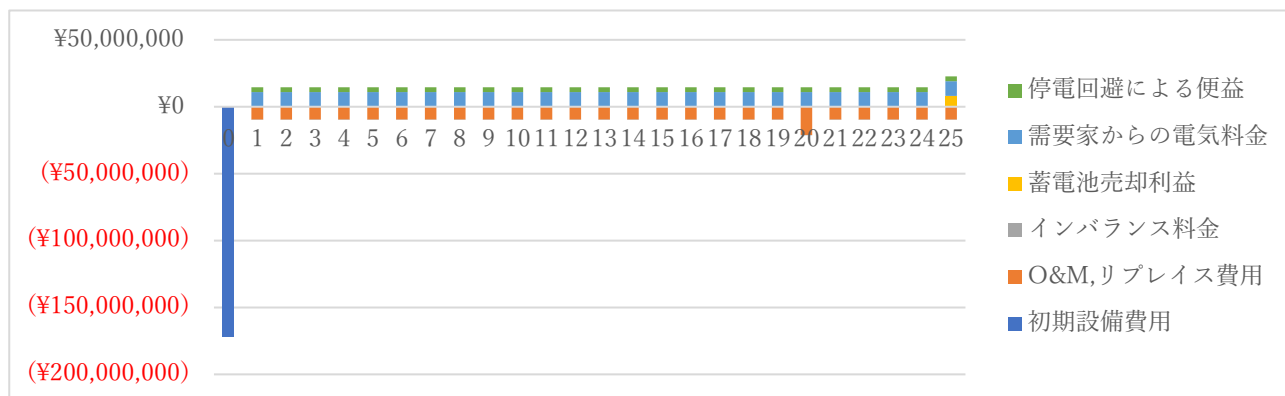


図 71 各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC50%,現状技術,25年運転)

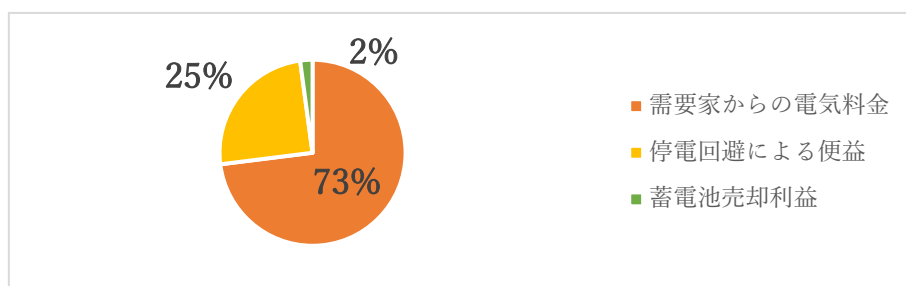


図 72 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC50%,現状技術,25年運転)

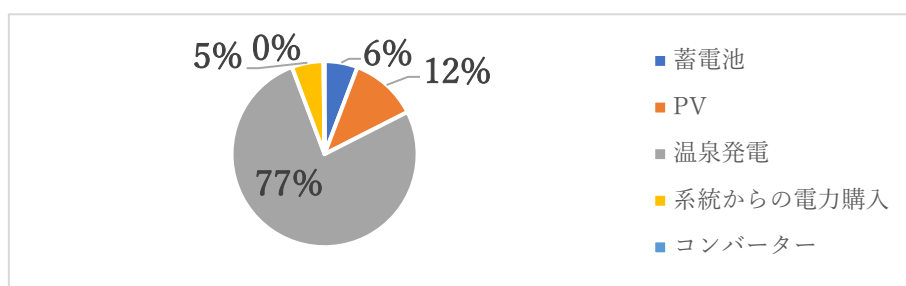


図 73 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC50%,現状技術,25年運転)

○将来技術,15年運転

表 38 停電回避便益別の B/C(需要家小,SOC50%,将来技術,15年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.61	0.72	0.81

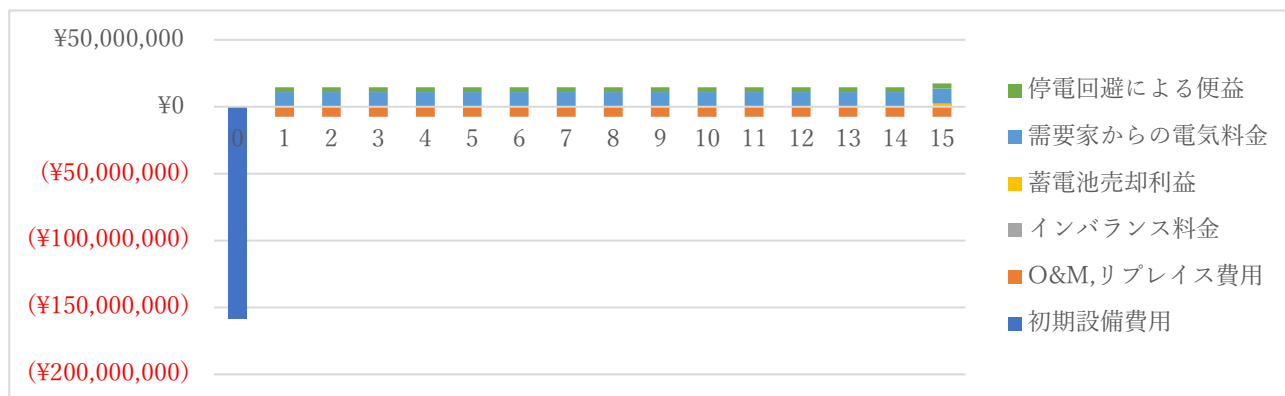


図 74 各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC50%,将来技術,15年運転)

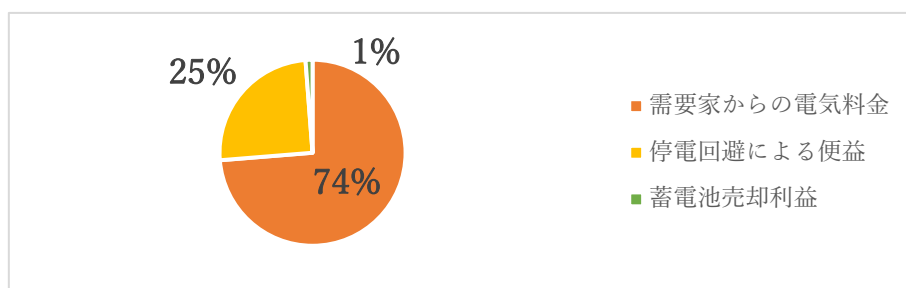


図 75 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC50%,将来技術,15年運転)

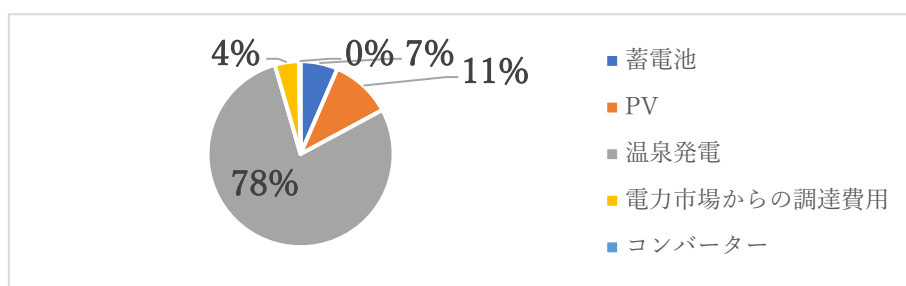


図 76 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC50%,将来技術,15年運転)

○将来技術,25 年運転

表 39 停電回避便益別の B/C(需要家小,SOC50%,将来技術,25 年運転)

パターン①	パターン②	パターン③
0.77	0.91	1.03

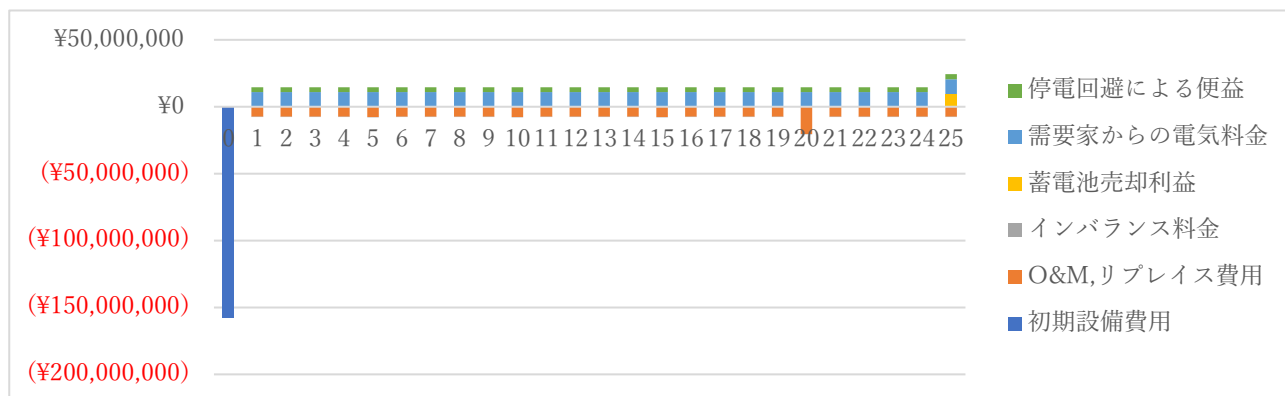


図 77 各年に発生する便益・コスト(需要家小,SOC50%,将来技術,25 年運転)

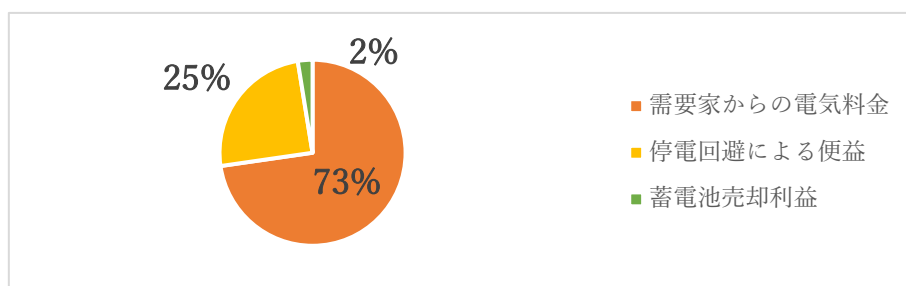


図 78 プロジェクト期間中に発生する便益合計の内訳(需要家小,SOC50%,将来技術,25 年運転)

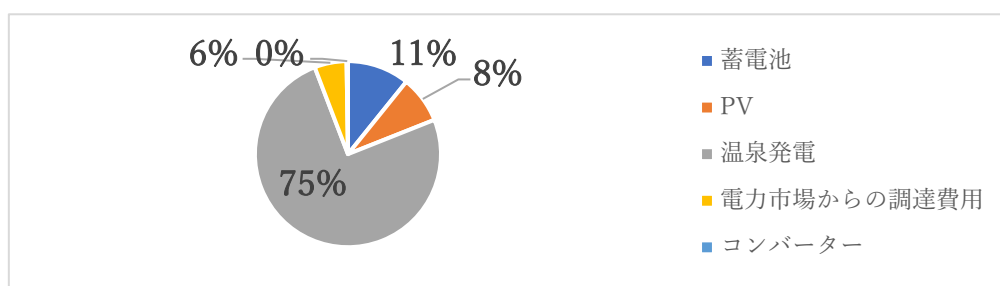


図 79 プロジェクト期間中に発生するコスト合計の内訳(需要家小,SOC50%,将来技術,25 年運転)

3.2. 全解析結果まとめ

プロジェクト期間と需要家構成別の各パターンの B/C は以下の値となった。パターン②③において、全便益に占める停電回避便益の割合はそれぞれ 12-15%,23-27%となった。結果についての詳細な考察は次章で言及する。

表 40 プロジェクト期間と需要家構成別の各パターン B/C

プロジェクト期間,需要家構成	パターン別の B/C		
	パターン①	パターン②	パターン③
15 年,需要家小	0.47~0.63	0.55~0.74	0.62~0.84
15 年,需要家大	0.63~0.84	0.73~0.97	0.87~1.16
25 年,需要家小	0.59~0.79	0.69~0.93	0.78~1.05
25 年,需要家大	0.78~1.04	0.88~1.20	1.04~1.43

また、全 108 ケースにおける、パラメータ、3 パターンの B/C、シミュレータに決定された蓄電池・PV・コンバーターの容量の各々の値については、付録 A に添付した。

4. 考察

4.1. プロジェクト期間,需要家構成別の B/C

全 108 ケースの解析結果をプロジェクト期間と需要家構成別に分類し、各パターンの B/C をプロットしたものを以下に示す。図中の赤線は $B/C=1$ を表している。

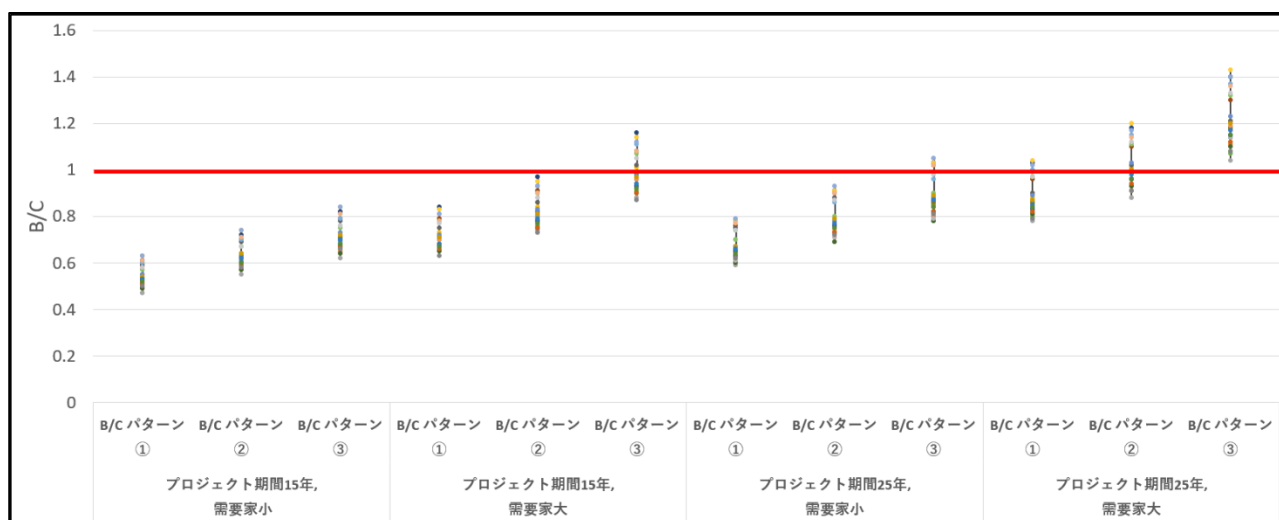


図 80 プロジェクト期間,需要家構成別の B/C

結果より、以下の傾向が確認できる。

- “プロジェクト期間 15 年,需要家小”の場合、どの停電回避便益の算出パターンでも、 B/C が 1 を超えない。
- “プロジェクト期間 15 年”もしくは“プロジェクト期間 25 年,需要家小”の場合、パターン③のみ $B/C>1$ となるケースが存在する。
- “需要家小”の場合、プロジェクト期間 25 年かつパターン③の場合においてのみ、 $B/C>1$ となる。
- “プロジェクト期間 25 年,需要家大”の場合、停電回避便益を考慮しないパターン①の場合でも $B/C>1$ となるケースが存在する。またこの場合のみ、パターン②においても $B/C>1$ となるケースが存在する。

4.2. 停電回避便益の考慮が費用対効果に与える影響

次に B/C パターン別に B/C>1 となる条件を整理し、停電回避便益の考慮が費用対効果の指標である B/C の算出に与える影響を考察する。

4.2.1. B/C パターン①

B/C>1 となるケースのパラメータと HOMER による決定変数を以下に示す。ケース数は 4 ケースであった。

表 41 B/C パターン①で B/C>1 となるケース

パラメータ							B/C			決定変数		
需要家構成	SOC[%]	温泉発電出力 [kW]	温泉発電設備コスト [万円]	温泉発電 O&M コスト [万円/年]	蓄電池コスト [万円/kWh]	プロジェクト期間 [年]	パターン①	パターン②	パターン③	蓄電池容量 [kWh]	PV 容量 [kW]	コンバーター容量 [kW]
大	30	72	12460	580	15	25	1.00	1.15	1.37	125	97.9	33.7
大	50	72	12460	580	9	25	1.02	1.17	1.4	138	118.6	40.6
大	20	72	12460	580	9	25	1.03	1.18	1.4	250	31.8	96.2
大	30	72	12460	580	9	25	1.04	1.2	1.43	125	99.5	37.5

上記のケースに共通するパラメータの組み合わせは、以下組み合わせであることが確認できた。

- 需要家構成大、将来の温泉発電技術・コスト水準、プロジェクト期間 25 年

以上より、将来的に温泉発電や蓄電池の価格が低下した場合、停電回避便益を考慮しない場合でも、エネルギーシステムの運用期間を比較的長期に行うことが出来れば、費用対効果が高くなることが判明した。

4.2.2. B/C パターン②

B/C>1 となるケースのパラメータと HOMER による決定変数を以下に示す。ケース数は 13 ケースであった。

表 42 B/C パターン②で B/C>1 となるケース

パラメータ							B/C			決定変数		
需要家構成	SOC[%]	温泉発電出力 [kW]	温泉発電設備コスト [万円]	温泉発電 O&M コスト [万円/年]	蓄電池コスト [万円/kWh]	プロジェクト期間 [年]	パターン①	パターン②	パターン③	蓄電池容量 [kWh]	PV 容量 [kW]	コンバーター容量 [kW]
大	30	70	13390	790	15	25	0.87	1.00	1.19	125	108.8	37.9
大	50	70	13390	790	9	25	0.87	1.00	1.2	148	131.3	42.1
大	20	70	13390	790	9	25	0.88	1.01	1.21	250	50.2	96.4
大	20	72	12460	580	25	25	0.9	1.02	1.21	250	32.8	25.5
大	30	70	13390	790	9	25	0.89	1.03	1.23	137	99.7	35.8
大	20	72	12460	580	15	25	0.96	1.1	1.3	250	38.1	33.1
大	30	72	12460	580	25	25	0.97	1.11	1.32	125	100.3	37.1
大	50	72	12460	580	25	25	0.97	1.12	1.33	63	156.5	29.2
大	50	72	12460	580	15	25	0.99	1.14	1.36	63	155.0	27.6
大	30	72	12460	580	15	25	1	1.15	1.37	125	97.9	33.7
大	50	72	12460	580	9	25	1.02	1.17	1.4	138	118.6	40.6
大	20	72	12460	580	9	25	1.03	1.18	1.4	250	31.8	96.2
大	30	72	12460	580	9	25	1.04	1.2	1.43	125	99.5	37.5

上記のケースに共通するパラメータの組み合わせは、以下の 2 パターンであることが確認できた。

- 需要家構成大、将来の温泉発電技術・コスト水準、プロジェクト期間 25 年
- 需要家構成大、現状の温泉発電技術・コスト水準、蓄電池価格 9or15 万円/kWh、プロジェクト期間 25 年

以上より、停電回避便益を大きく見積もらない場合、考慮した場合に費用対効果を高めるためには、15 年を超えてプロジェクトを継続させる必要なことが示された。

4.2.3. B/C パターン③

B/C>1 となるケースのパラメータと HOMER による決定変数を、全ケースが B/C>1 となる“プロジェクト期間 25 年,需要家大”のケースを除く 15 ケースを以下に示す。“プロジェクト期間 25 年,需要家大”を含むケース数は 42 ケースであった。

表 43 B/C パターン③で B/C>1 となるケース

パラメータ							B/C			決定変数		
需要家構成	SOC[%]	温泉発電出力 [kW]	温泉発電設備コスト [万円]	温泉発電 O&M コスト [万円/年]	蓄電池コスト [万円/kWh]	プロジェクト期間 [年]	パターン①	パターン②	パターン③	蓄電池容量 [kWh]	PV 容量 [kW]	コンバーター容量 [kW]
大	20	70	13390	790	9	15	0.73	0.84	1.01	313	0.0	116.2
大	20	72	12460	580	25	15	0.75	0.86	1.02	250	32.1	26.2
小	50	72	12460	580	15	25	0.76	0.9	1.02	63	112.1	21.9
小	30	72	12460	580	15	25	0.77	0.9	1.02	125	60.5	23.7
小	50	72	12460	580	9	25	0.78	0.91	1.03	142	75.3	27
小	20	72	12460	580	9	25	0.78	0.91	1.03	250	0.0	61.6
大	50	72	12460	580	25	15	0.77	0.88	1.05	78	143.6	27.2
小	30	72	12460	580	9	25	0.79	0.93	1.05	125	68.7	30.2
大	30	72	12460	580	25	15	0.78	0.9	1.07	130	89.0	30
大	50	72	12460	580	15	15	0.78	0.9	1.08	154	107.1	34.8
大	20	72	12460	580	15	15	0.79	0.91	1.08	287	0.0	100.2
大	30	72	12460	580	15	15	0.81	0.93	1.11	143	81.8	29.2
大	50	72	12460	580	9	15	0.81	0.93	1.12	214	74.3	26.9
大	30	72	12460	580	9	15	0.83	0.95	1.14	329	0.0	96.5
大	20	72	12460	580	9	15	0.84	0.97	1.16	291	0.0	92.8

上記のケースに共通するパラメータの組み合わせは、以下の3パターンであることが確認できた。

- 将来の温泉発電技術・コスト水準、需要家大
- 将来の温泉発電技術・コスト水準、需要家小、プロジェクト期間 25 年
- 現状の温泉発電技術・コスト水準、需要家大、蓄電池価格 9 万円/kWh、プロジェクト期間 25 年

以上より、停電回避便益を大きく考慮する場合に限り、需要家が少数の条件であっても費用対効果が高くなることが確認できた。

4.2.4. 停電回避便益の B/C への影響まとめ

以上の考察より、停電回避便益の考慮については以下のように整理できる。

- 現状における温泉発電の費用等の条件では停電回避便益を考慮しない場合、 $B/C < 1$ となる。
- 停電回避便益を考慮した場合、現在の温泉発電、蓄電池の条件でも $B/C > 1$ となるケースが存在する。

これらより、停電回避便益の考慮が、費用対効果判断の分水嶺である $B/C = 1$ を超えるために重要であることが確認できた。

その他にも、各パラメータと B/C の関係として以下が確認できた。

- 需要家が少ない場合は、エネルギーシステムの運用期間が比較的長期になれば、 $B/C < 1$ となる。
- 将来的に温泉発電や蓄電池の価格が低下した場合、停電回避便益を考慮しない場合でも、エネルギーシステムの運用期間が 25 年の場合は、 $B/C > 1$ となる。

4.3. 費用対効果への影響が考えられる要因

本節では、費用対効果への影響が考えられる要因が変動したときに、費用対効果にどのような影響を与えるかを考察する。

4.3.1. 社会的割引率を考慮した場合

B/C>1 となるケースについて、第 2 章で述べた社会的割引率 $r=3[\%]$ を考慮した際に NPV>0 となるかどうかを考察した。ケースとしては、現状のシステム費用をパラメータにもつケース（“現状ケース”）と、将来想定されるシステム費用をパラメータにもつケース（“将来ケース”）について、それぞれ下表のパラメータのケースを考えた。

表 44 NPV を算出する各ケースのパラメータ

ケース名	需要家構成	蓄電池容量の下限值 [kWh], 最小 SOC[%]	蓄電池価格	温泉発電の出力 [kW], 設備費用[万円], O&M 費用[万円/年]	プロジェクト期間[年]
現状ケース	高圧事業者 1 軒, 低圧事業者 7 軒, 一般家庭 78 軒	容量の下限值 : 125kWh, 最小 SOC : 30%	15	70[kW], 13390[万円], 790[万円/年]	25
将来ケース	高圧事業者 1 軒, 低圧事業者 7 軒, 一般家庭 78 軒	容量の下限值 : 125kWh, 最小 SOC : 30%	9	72[kW], 12460[万円], 580[万円/年]	25

次ページに、それぞれケースにおける停電回避便益算出パターン別の NPV と停電回避便益算出パターン③での各年に発生する便益・コストを記載した。また従来の条件との比較の為、 $r=0,3[\%]$ での B/C の値も記載した

○現状ケース

表 45 停電回避便益別の B/C(現状ケース)

社会的割引率 r [%]	パターン①	パターン②	パターン③
0	0.87	1.00	1.19
3	0.74	0.85	1.01

表 46 停電回避便益別の NPV (現状ケース)

パターン①	パターン②	パターン③
-9900 万円	-5700 万円	600 万円

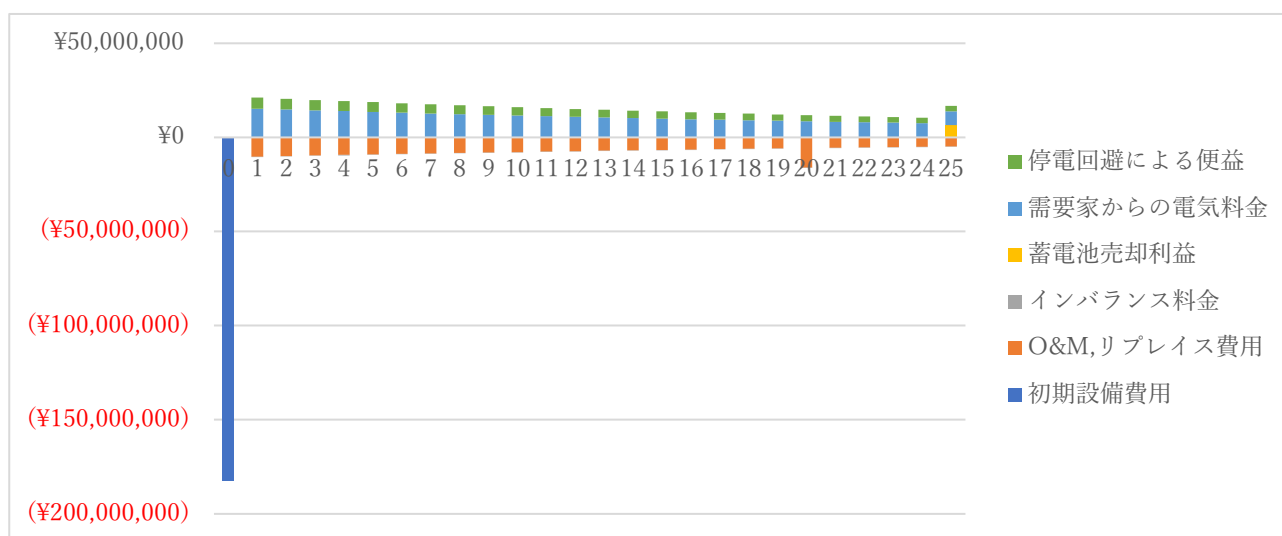


図 81 各年に発生する便益・コスト (現状ケース)

○将来ケース

表 47 停電回避便益別の B/C(将来ケース)

社会的割引率 r [%]	パターン①	パターン②	パターン③
0	1.04	1.20	1.43
3	0.88	1.01	1.20

表 48 停電回避便益別の NPV (将来ケース)

パターン①	パターン②	パターン③
-3800 万円	400 万円	6700 万円

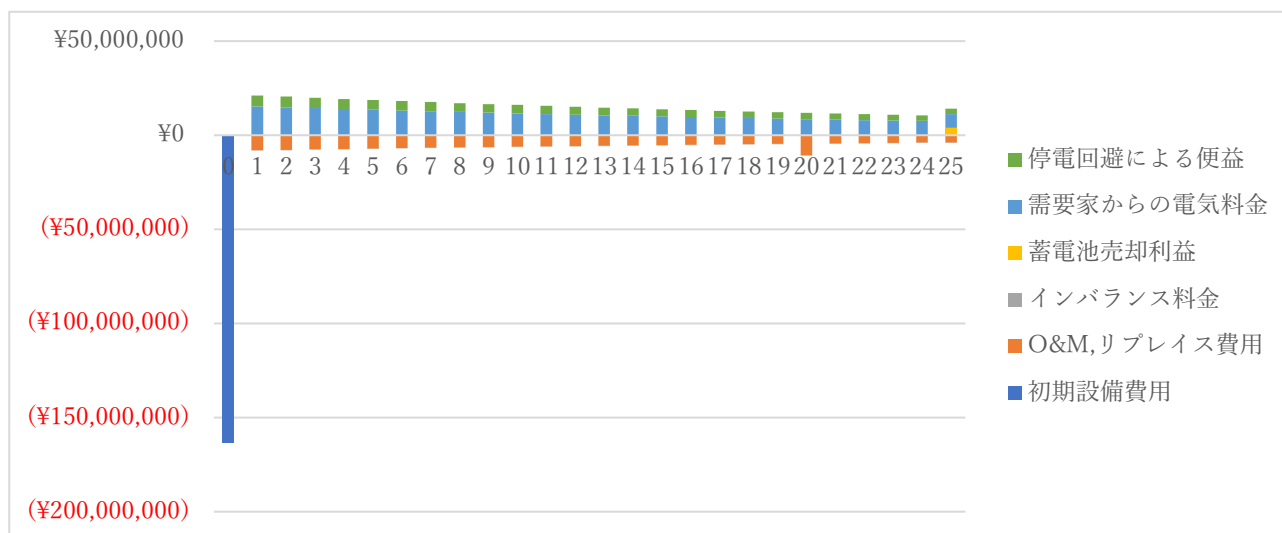


図 82 各年に発生する便益・コスト (将来ケース)

現状ケースの結果より、停電回避便益を考慮しない場合、現状の機器費用水準においては、 $NPV > 0$ とならないことが分かった。 $NPV > 0$ となるのは停電回避便益を最も多く見積もるパターン③の場合のみであった。

また、上記の“将来ケース”は、今回解析した全 108 ケース中においては、どの停電回避便益の算出パターンも B/C が最大となるケースである。このことより、社会的割引率を考慮した場合には、停電回避による便益を考慮しなければ $NPV > 0$ にならないことが分かった。

4.3.2. 蓄電池寿命の変動が費用対効果へ与える影響

蓄電池の寿命は動作条件・環境によっても左右されることが知られている。

(IRENA,2017b)においても、リチウムイオン蓄電池の寿命として、暦日寿命で5~20年、サイクル寿命で500~20,000サイクルという幅のある値が報告されている。本項目では、蓄電池寿命がより短い場合にエネルギーシステムの費用対効果がどのように変化するのか検討する。以下に、前章までの解析で設定していた蓄電池寿命（従来条件）と、本項目で検討する蓄電池寿命を示す。

表 49 本項目で検討する蓄電池の寿命

従来条件	20年,10000サイクル
本項目での検討条件	10年,5000サイクル

その他のパラメータは、前節の“現状ケース”,“将来ケース”と同様に設定した。以下に、各ケースにおける従来条件と本条件におけるB/C、本条件における停電回避便益算出パターン③での各年に発生する便益・コストを示す。

表 50 蓄電池寿命変更時 停電回避便益別のB/C(現状ケース)

	パターン①	パターン②	パターン③
従来条件	0.87	1.00	1.19
本項目での検討条件	0.82	0.94	1.12

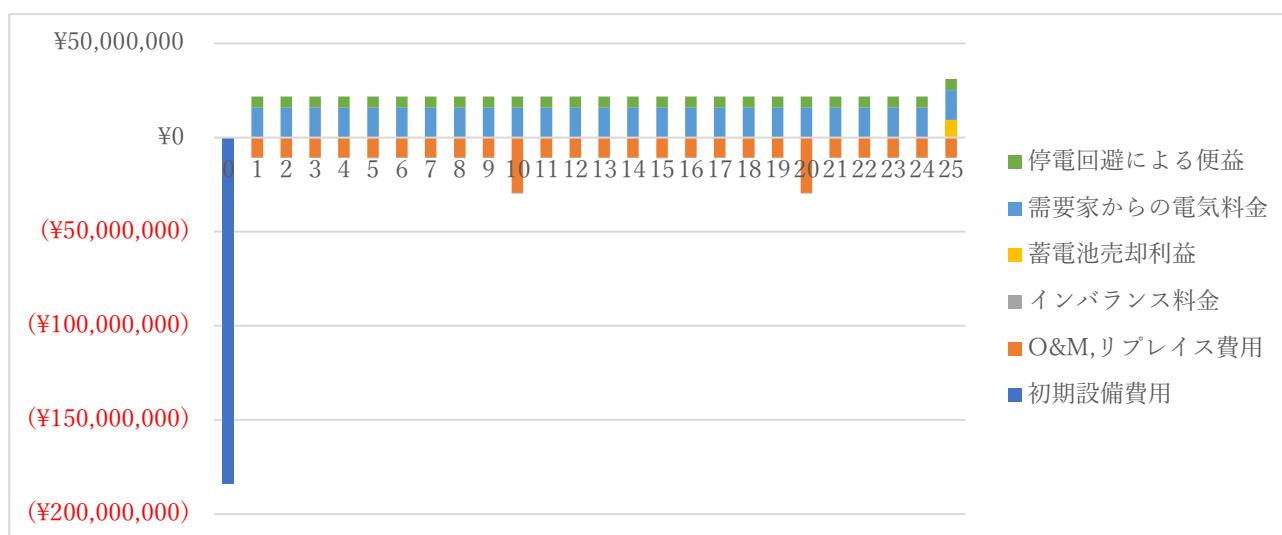


図 83 蓄電池寿命変更時 各年に発生する便益・コスト（現状ケース）

表 51 蓄電池寿命変更時 停電回避便益別の B/C(将来ケース)

	パターン①	パターン②	パターン③
従来条件	1.04	1.20	1.43
本項目での検討条件	0.99	1.14	1.37

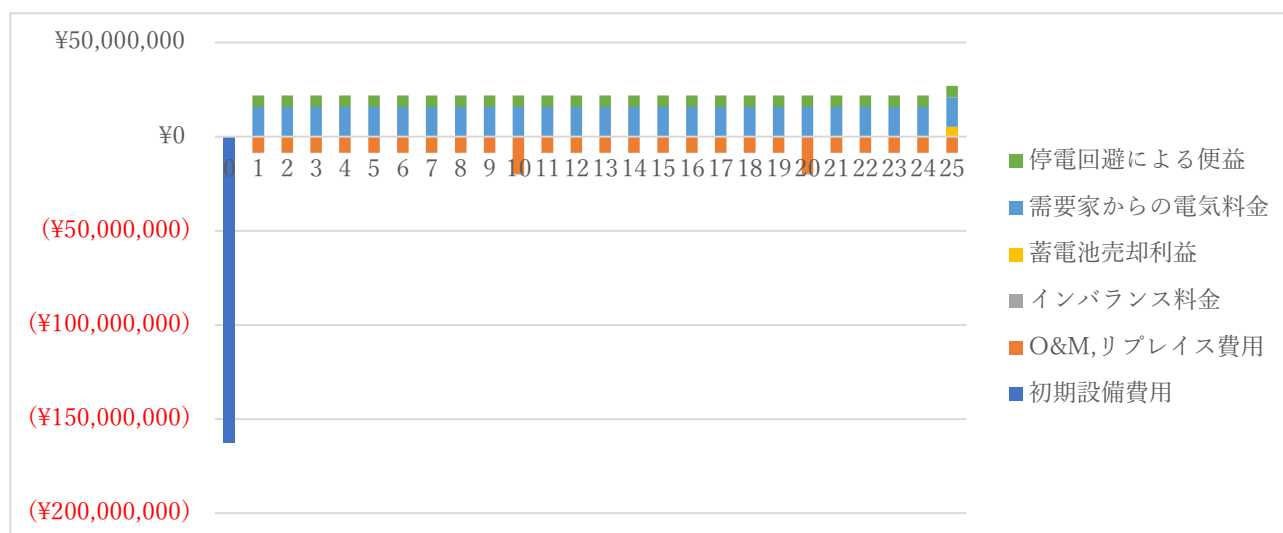


図 84 蓄電池寿命変更時 各年に発生する便益・コスト（将来ケース）

上記に示す結果より、現状ケース・将来ケース双方において、蓄電池寿命が半減した場合は B/C が低下する傾向が確認できた。特に将来ケースにおいては、停電回避の便益を考慮しないパターン①について B/C がわずかに 1 を下回ってしまうことが判明した。また、従来ケースにおいても、停電回避の便益を比較的大きく推定するパターン③以外の B/C は 1 を超えないことが判明した。以上より、蓄電池寿命が比較的小さい場合、停電回避の便益を加味することが費用対効果の向上に一層重要であることが確認出来た。

4.3.3. スポット市場取引価格の変動が費用対効果へ与える影響

本研究では、電源調達の一手段として、電力市場のスポット市場における取引を想定した。(安田,2020)では、再生可能エネルギー発電の増加に伴い、スポット市場における取引価格が低下する可能性(メリットオーダー効果)について言及されている。以下がスポット価格低下するプロセスについての図を示す。以下に登場する“メリットオーダー曲線”とは、簡単に言えば『発電事業者の市場入札価格順に並べた各発電所のリスト』であり、以下の例では同じ発電方式であれば入札価格が等しいと仮定して模式的に示している。

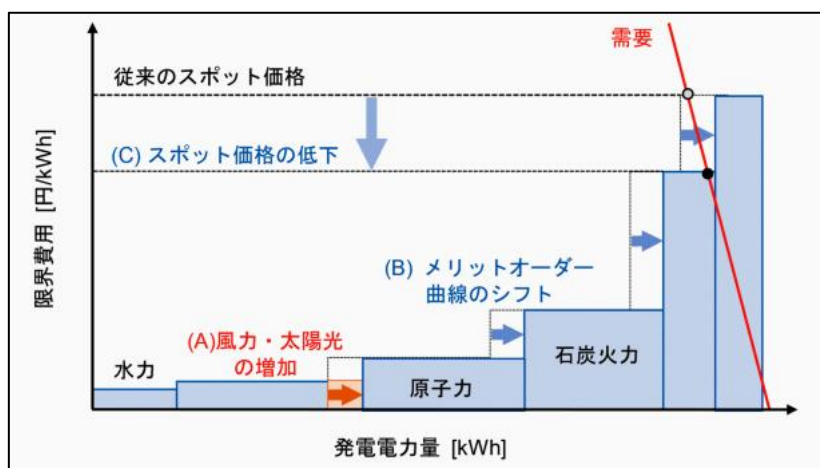


図 85 再生可能エネルギー発電の大量導入によるスポット価格低下プロセス
((安田,2020)より引用)

上図は、(A)の再生可能エネルギー発電の増加に伴い、(B)で示すメリットオーダー曲線がシフトし、赤線で示す需要曲線とのメリットオーダー曲線の交点がシフトすることで、(C)のスポット価格低下が生じるというプロセスである。

一方で、2020 年 12 月から 2021 年 1 月にかけては、寒波による暖房用電力の需要増や、国内発電量の 4 割を占める LNG 火力発電所の燃料である LNG の不足等の要因（日本経済新聞,2021、自然電力,2021）から、スポット価格の高騰が発生した。この期間で、スポット価格はこれまでの過去最高値を更新している（電気新聞,2021）。以下に 2020 年 4 月 1 日から 2021 年 1 月 17 日までの期間における、スポット価格の 24 時間平均値を示す。

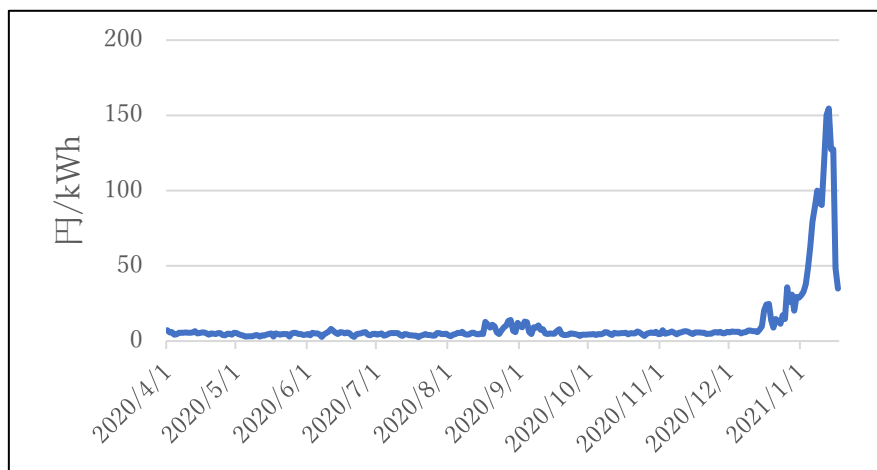


図 86 2020 年 4 月 1 日～2021 年 1 月 17 日までのスポット価格
（(JEPX,『取引情報：2020 年度 スポット市場インデックス』）より作成）

更に、直近 5 年における年間平均のスポット価格[円/kWh]と年間取引量[kWh]の推移を以下に示す。取引量の増加に伴いスポット価格は右下がりの傾向にあるが、2016 年度から 2017 年度のように平均価格が上昇する場合もあることがわかる。

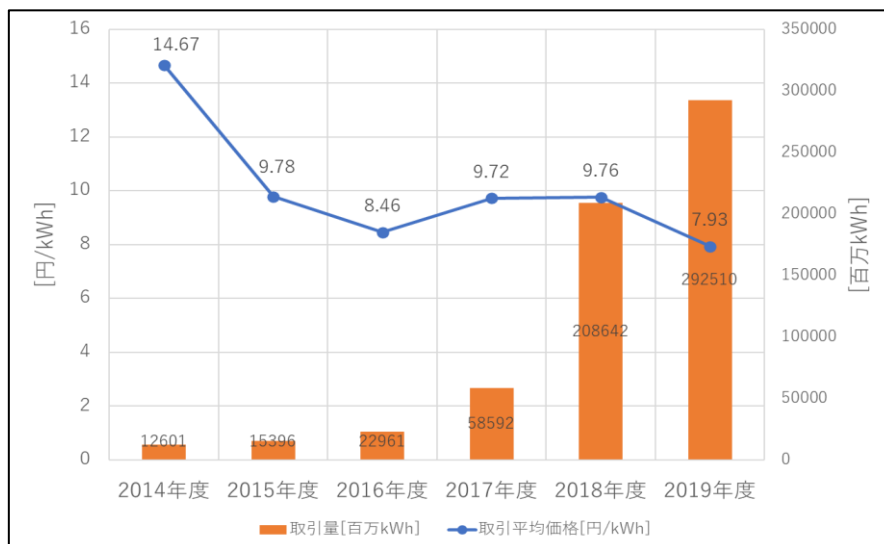


図 87 2014～2019 年度年間平均スポット価格[円/kWh]と年間取引量[kWh]の推移
（(JEPX,2020) より作成）

以上より、今後もスポット価格は変動する可能性が高いと考え、本項目では、スポット価格が変動した場合のエネルギーシステムの費用対効果について検討を行う。前掲の図で示した 2014~2019 年度年間平均スポット価格において、①2016 年度の価格が 2015 年度の約 86%②2017 年度の価格が 2016 年度の約 115%、ということを経験に、前章までの解析で設定していた 2018 年度の九州エリアにおけるスポット価格が 15%増減した場合をそれぞれ想定する。スポット価格の増減に伴い、インバランス料金も増減すると想定している。

その他のパラメータは、前節の“現状ケース”, “将来ケース”と同様に設定した。また、参考としてスポット価格の増減がない場合の結果を“従来条件”として示した。以下に、各ケースにおける従来条件と本条件における B/C を示す。

表 52 スポット価格 15%増減時の停電回避便益別の B/C(現状ケース)

	パターン①	パターン②	パターン③
従来条件	0.86	1.00	1.19
スポット価格 15%増	0.86	0.98	1.17
スポット価格 15%減	0.88	1.01	1.21

表 53 スポット価格 15%増減時の停電回避便益別の B/C(将来ケース)

	パターン①	パターン②	パターン③
従来条件	1.04	1.20	1.43
スポット価格 15%増	1.03	1.18	1.41
スポット価格 15%減	1.05	1.21	1.45

結果より、スポット価格が増加する場合は B/C 減少の傾向が、スポット価格が減少する場合は B/C 増加の傾向が、確認された。しかし、いずれのケースにおいても B/C の変動幅は 0.02 以内と比較的小さな値に収まることから、今回検討したスポット価格の変動幅では費用対効果に大きな影響は生じないと考えられる。

4.3.4. 費用対効果への影響比較

本節で影響要因として考慮した項目を変動させたときの、現状ケース・将来ケース双方における費用対効果を以下にまとめる。

表 54 影響要因変動時における停電回避便益別の B/C(現状ケース)

	パターン①	パターン②	パターン③
従来条件	0.87	1.00	1.19
社会的割引率 3%	0.74	0.85	1.01
蓄電池寿命半減	0.82	0.94	1.12
スポット価格 15%増	0.86	0.98	1.17
スポット価格 15%減	0.88	1.01	1.21

表 55 影響要因変動時における停電回避便益別の B/C(将来ケース)

	パターン①	パターン②	パターン③
従来条件	1.04	1.20	1.43
社会的割引率 3%	0.88	1.01	1.20
蓄電池寿命半減	0.99	1.14	1.37
スポット価格 15%増	1.03	1.18	1.41
スポット価格 15%減	1.05	1.21	1.45

上記を比較することで、各要因が変動した時の費用対効果への影響は、社会的割引率＞蓄電池寿命＞電力市場取引価格の順に大きいことが確認できる。

5. 結論・今後の課題と展望

5.1. 結論

今後の再生可能エネルギー導入拡大にあたっては、導入がもたらす効果を定量的に示していくことが重要である。そのような背景から、本研究では以下の2点についての検証を試みた。

- ① 停電回避による便益を考慮した場合の、温泉発電を用いたエネルギーシステムの検討とその費用対効果の定量的な分析
- ② 温泉発電を用いたエネルギーシステムの費用対効果に影響する要因の確認

まず、先行研究や報告書を参考に、温泉発電を広域停電時においてもエネルギー安定供給として用いるためのエネルギーシステムの構成と、エネルギーシステム運用主体を想定したビジネススキームの検討を行った。

その後、エネルギーシステムのシミュレータである HOMER Pro を用いて最適なシステム構成とそのコストを算出したうえで、停電回避による便益を加味した費用対効果を定量的に確認した。

上記の解析結果、以下が確認された。

- 現在の温泉発電の費用等条件では、停電回避便益を考慮しない場合 $B/C < 1$ となり、エネルギーシステム導入の費用対効果は低い。
- 停電回避の便益を考慮した場合、現在の温泉発電・蓄電池の費用等条件でも $B/C > 1$ となり、費用対効果は高くなる。
- 停電回避による便益は費用対効果の改善に寄与し、その便益は全便益における 12～27% を占める。
- 要因変動による費用対効果への影響は、社会的割引率 > 蓄電池寿命 > 電力市場取引価格の順に大きい。

これらより本研究では、

- ① 『温泉発電を用いたエネルギーシステムは現状では費用対効果が低いが、停電回避便益を考慮した場合、費用対効果の高い選択肢となりうる。』
- ② 『社会的割引の考慮や蓄電池寿命の変動は費用対効果に対し影響するが、市場取引価格の変動による影響はそれら二つよりも小さい。』

ということが明らかになった。

5.2. 今後の課題

今後の課題としては、まず温泉発電のメンテナンススケジュールの考慮や PV の発電量に実際の測定値を用いることによるモデルの精緻化が挙げられる。これらの再生可能エネルギーによる発電量が変化した場合、電力市場からの調達量が増減することで、費用対効果が変化する可能性が予想される。実際の条件に近い発電量をモデルとして利用することにより、さらに信頼度の高い結果を算出することが出来ると考えられる。

二点目として、ビジネススキームの改善が挙げられる。本研究では、エネルギーシステムの運用に関わる人件費や事業者の利益については検討を行っていない。これは、本研究がエネルギーシステムそのものの経済性に焦点を当てたことに加え、事業者ごとで大きく値が異なることが予想されたためであるが、実際に事業を行っていく上では、この要素の検討も重要となってくるだろう。電力ネットワークに関する費用についても、今後ライセンス制の活用事例が蓄積され費用が明らかになった場合、適切にモデル化し費用対効果の分析に反映させることが必要だと考えられる。

また三点目として需要家構成の検討が挙げられる。本研究では需要家が少ない場合と多い場合の 2 パターンのみを考慮したが、需要家をさらに増加させていった場合、どこかの時点で費用対効果が低下する可能性もあり、『最適な需要家構成・需要家規模』というものが存在している可能性も考えられる。また、電力ネットワークを構築するのであれば、ネットワークの運用コスト等も考慮し、需要家構成に影響を受ける供給エリアの大きさなどを考慮する必要もあると考えられる。

最後に、エネルギーシステムにおける短期の需要変動に関する検討が挙げられる。本研究では電力需給バランスを考慮する際、一時間毎の kWh データとして電力需要を扱ったが、実際の需要はさらに細かく変動している。広域停電時のエネルギー供給を考える上では、この様な短期の需要変動を含めた需給バランスを考慮して、エネル

ギーシステムの運用制御を行うことも必要となってくるだろう。以下に、需要変動の成分毎に用いられる制御方法とその概要と示す。

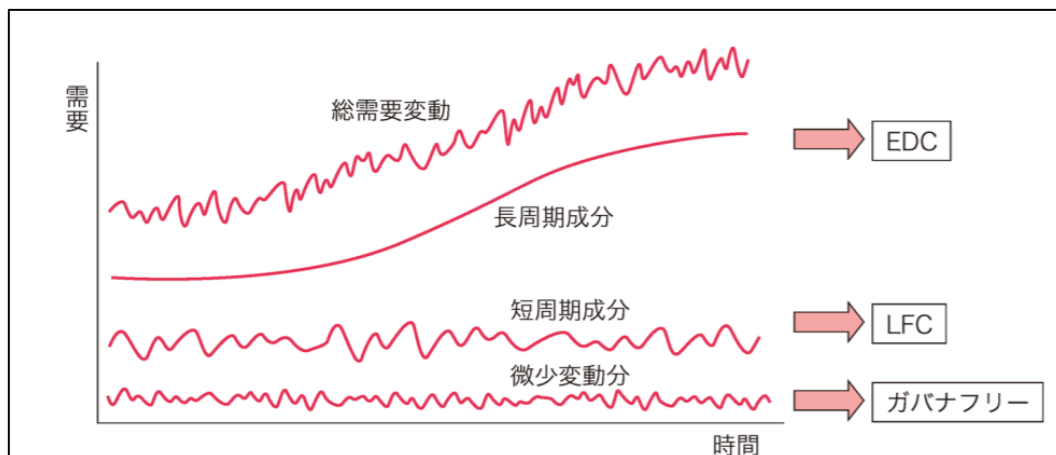


図 88 需要変動周期に応じた運転制御
((NEDO,2014)より引用)

表 56 運転制御の概要
((NEDO,2014)より引用)

方式	対応する周期	概要
GF (ガバナフリー)	数分以内	発電機が回転数の変動を感知し、適正周波数のための回転数を維持するように自動的かつ瞬時の回転数を制御
LFC (負荷周波数制御)	数分～十数分	需給不均衡に起因する周波数変動を感知し、需給不均衡を解消するために給電システムからの自動的な発電機出力を制御
EDC (経済負荷配分制御)	十数分以上	周期の長い変動への対応は、その変動幅も大きいことから対応する発電機の経済性を考慮し負荷配分を制御

5.3. 研究結果の活用

本研究では、停電回避の便益を考慮した際、将来的に温泉発電が費用対効果の高い選択肢になりうる可能性を示すことが出来た。本研究結果の活用可能性としては、温泉発電を用いたエネルギーシステムの検討に資することが考えられる。実際に今回考慮した需要家構成と同程度の規模のエリアに対してエネルギー供給を行っている前述のむつぎわスマートウェルネスタウンでは、広域停電時に災害時の地域の避難所としても活用が行われていた。以下に、むつぎわスマートウェルネスタウンの全体像を示す。

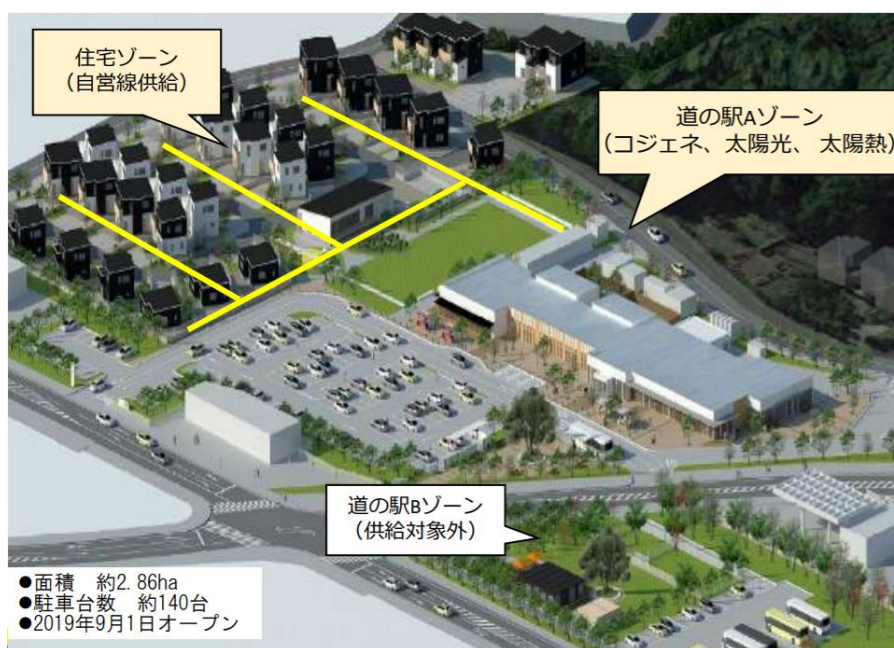


図 89 むつぎわスマートウェルネスタウンの全体像
(（環境省,2020c)より引用)

むつぎわスマートウェルネスタウン内の道の駅には、コジェネレーションプラントの発電後廃熱を活用した温泉が併設されており、広域停電時にはシャワーの利用や携帯電話の充電の為に約 1000 人の地域住民に活用されていた。

温泉発電は、その名が示すように温泉を活用できる地域での導入が期待されることから、今後の活用方法として、同様に『災害時も熱と電気を供給できる地域防災拠点』を温泉発電の活用により構築することは考えられるであろう。その際には、本研究で検討した“高圧事業者 1 低圧事業者 5 一般家庭 38 軒”という需要家構成における費用対効果の分析結果を、『道の駅 1 軒オフィス・商店 5 軒、一般家庭 38 軒』というような需要家構成の災害時拠点を考える際の参考として活用することもできるだろう。

参考文献

- 秋澤淳,竹下紀之(2016),”非常時のエネルギー供給維持を考慮した集合住宅の分散型エネルギーシステムの最適技術構成”,エネルギー・資源学会論文誌, 37 巻, 1 号, p. 1-8
- 蟻生俊夫,後藤久典,”需要家から見た供給信頼度の重要性と停電影響－国内需要家調査および首都圏停電調査にもとづく分析”, 電力中央研究所研究報告書,2007,[<https://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/Y06005.html>]
- 印具秀三,上村美貴,内田有香,大宮美砂,三浦大輝,濱崎宏則(2017),『雲仙市小浜町における温泉発電の地域活性化への活用に関する研究－小浜町の未来可能性の模索－』長崎大学総合環境研究,20,1p51-63
- 上道茜,八木正彰,山崎由大,金子成彦(2018),『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・資源学会論文誌, 39 巻, 6 号, p. 6-18
- 上道茜,山崎由大,金子成彦(2020),『災害拠点病院を対象とした災害時事業継続性向上のための分散型電源導入量の最適化 (特集 エネルギーミックスと OR)』,オペレーションズ・リサーチ = Communications of the Operations Research Society of Japan : 経営の科学,65,1,p41-48
- 浦島邦子,和田潤(2011)『地域イノベーションと震災復興に寄与する地熱エネルギーの利用』,科学技術動向,126, 13
- 遠藤真弘(2015),『温泉発電 : 温泉資源と共生する再生可能エネルギー』, 国立国会図書館, 調査と情報. (845), [<https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/8943330>] (2021/1/17 閲覧)
- 奥名貴士(2014),『国内の温泉発電事業の評価要素に関する研究 : 大分県別府市の三つの事業についての事例比較』,新領域創成科学研究科環境学研究系自然環境学専攻 2013 年度修士論文,[<http://hdl.handle.net/2261/56770>]
- 神奈川県県土整備局(2018),『平成 30 年度 神奈川県県土整備局公共事業評価委員会
- B / C (費用便益比)関係資料－各事業の B (総便益)の算出方法－],[<https://www.pref.kanagawa.jp/documents/48623/sankou-3.pdf>],(2021/1/15 閲覧)
- 火力原子力発電技術協会(2018),『地熱発電の現状と動向 2018 年』, 火力原子力発電技術協会
- 環境共創イニシアチブ(2020),『平成 30 年度 補正予算 災害時にも再生可能エネル

ギーを供給力として稼働可能とするための蓄電池等補助金（地域マイクログリッド構築支援事業のうち、マスタープラン作成事業）成果報告書（要約版）』, [https://sii.or.jp/microgrid30r/uploads/seikahoukokusyoyouyakuban_02.pdf], (2021/1/17 閲覧)

- 環境省(2012),『低炭素社会づくりのためのエネルギーの低炭素化に向けた提言（平成 24 年 3 月）（低炭素社会づくりのためのエネルギーの低炭素化検討会）』, [<http://www.env.go.jp/earth/report/h24-08/chpt01.pdf>], (2021/2/28 閲覧)
- 環境省(2015),『IPCC 第 5 次評価報告書の概要 -第 3 作業部会(気候変動の緩和)【2015 年 4 月改訂】』, [http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_wg3_overview_presentation.pdf], (2021/1/17 閲覧)
- 環境省(2017),『平成 28 年度低炭素社会の実現に向けた中長期的再生可能エネルギー導入拡大方策検討調査委託業務報告書』, [<https://www.env.go.jp/earth/report/h29-03/>], (2020/12/8 閲覧)
- 環境省(2020a),『地域新電力事例集《Ver.1.0》』, [https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/data/shindenryoku.pdf], (2021/1/14 閲覧)
- 環境省(2020b),『令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書』 [<http://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/report/r01.html>], (2021/1/15 閲覧)
- 環境省(2020c),『自治体新電力「CHIBA むつざわエナジー」の地域資源を生かした防災エネルギー拠点づくり』,環境省シンポジウム「気候変動を踏まえた脱炭素社会の実現に向けて」（令和 2 年 2 月 8 日開催） 講演資料, [<https://www.env.go.jp/press/files/jp/113284.pdf>], (2021/1/16 閲覧)
- 環境ビジネスオンライン(2019),『睦沢町の新電力、台風の影響で町内全域停電中に防災拠点へ電力供給（2019 年 09 月 18 日掲載）』, [<https://www.kankyo-business.jp/news/023115.php>], (2021/1/14 閲覧)
- 北沢雅光(2019),『太陽光発電と蓄電池を導入した街区の電力需給マネジメント』, 東京大学大学院新領域創成科学研究科 平成 30 年度修士論文, [<http://hdl.handle.net/2261/00078816>],
- 経済産業省(2015),『分散型エネルギーについて』,総合資源エネルギー調査会 長期エネルギー需給見通し小委員会（第 6 回会合）, [https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/006/pdf/006_05.pdf], (2021/1/17 閲覧)
- 経済産業省(2020a),『2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略』, [https://www.meti.go.jp/press/2020/09/20200910_001.pdf], (2021/1/17 閲覧)

<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-1.pdf>] (2021/1/17 閲覧)

- 経済産業省 (2020b),『令和 2 年度の調達価格等に関する意見』,[https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/20200204_report.html],(2021/1/14 閲覧)
- 経済産業省 (2020c),『台風 15 号の停電復旧対応等に係る検証結果取りまとめ概要』,[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/resilience_wg/pdf/20200110_report_01.pdf] ,(2021/1/17 閲覧)
- (株) 元気アップつちゆ:聞き取り調査 (2020 年実施)
- (株) シン・エナジー:聞き取り調査 (2020 年実施)
- 工月良太,伊香賀 俊治,村上周三(2010),『エネルギーの面的利用がもたらす間接的便益 (NEB) に関する研究』,日本建築学会環境系論文集, 75 巻, 653 号, p. 645-652
- 工月良太,村上周三,伊香賀俊治,山田航也,川除隆広,生田雄一,小見山堤子(2015),『地域レベルの自立分散型エネルギーネットワークの事業スキームに関する研究』,日本建築学会環境系論文集, 80 巻, 708 号, p. 169-176
- 国土交通省(2009),『公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針 (共通編)』,[<https://www.mlit.go.jp/tec/hyouka/public/090601/0906012.html>] ,(2021/1/13 閲覧)
- 国土交通省(2018),『改訂第 4 版 大規模公園費用対効果分析手法マニュアル』,[<https://www.mlit.go.jp/common/001187812.pdf>] ,(2021/1/13 閲覧)
- 佐藤亮太,伊香賀俊治,武田晃成,笹本太郎(2018),『被災の可能性のある居住者の不安の軽減効果を考慮した自立分散型エネルギーシステムの費用便益評価』,空気調和・衛生工学会大会,平成 30 年度大会 (名古屋) 学術講演論文集 第 2 巻 蓄熱・熱源システム 編,セッション ID B-30, p. 89-92
- 資源エネルギー庁,『2015 年度 (平成 27 年度) 電力調査統計表』 [https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results_archive.html] (2020/9/24 閲覧)
- 資源エネルギー庁(2017),『定置用蓄電池の価格低減スキーム』,[https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/energy_resource/pdf/005_08_00.pdf], (2021/1/16 閲覧)
- 資源エネルギー庁(2019),『地域の系統線を活用したエネルギー面的利用システム (地域マイクログリッド) について』,地域社会における持続的な再エネ導入に関する情報連絡会 第 4 回 (令和元年 12 月 6 日)資料 [<https://www.enecho.meti.go.jp>]

[/category/saving_and_new/saiene/community/dl/04_06.pdf](#)],(2021/1/17 閲覧)

- 資源エネルギー庁(2020),『「法制度」の観点から考える、電力のレジリエンス ④ 次世代の電力プラットフォームもにらんだ法改正(2020-10-02)』,[https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/denjihokaisei_04.html] (2021/1/15 閲覧)
- 資源エネルギー庁ウェブサイト,“固定価格買取制度 買取価格・期間等(2020年度以降)”, [https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/fit_kakaku.html],(2021/1/16 閲覧)
- 資源エネルギー庁(2018),『2040年、太陽光パネルのゴミが大量に出てくる？再エネの廃棄物問題(2018-07-24)』,[<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/taiyoukouhaiki.html>] (2021/1/16 閲覧)
- 自然エネルギー財団(2020),『First Half of 2020: Japan Meets its 2030 RE Target』,[https://www.renewable-ei.org/en/activities/column/REupdate/20200918_2.php] (2021/1/17 閲覧)
- 自然電力(2021),『日本卸電力取引所(JEPX)電力取引価格高騰に関する重要なお知らせ(2021年1月7日)』,[https://www.shizenenergy.net/2021/01/07/jepx_information/],(2021/1/16 閲覧)
- 下條理生,古市徹,石井一英,藤山淳史(2015),『災害時をも考慮した木質バイオマスを用いた小規模・自立分散型熱電併給システムの提案』,環境システム研究論文発表会講演集, 43, 25-31.
- 長合憲人,田中春輝,松木良介(2015),『蓄電設備併設型風力発電システムの防災対応型電源への適用』,風力エネルギー, 39 巻, 2 号, p. 195-198,
- 低炭素社会戦略センター(2018),『地域電力事業者の運用改善のための蓄電資源導入に関する研究』 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
- イノベーション政策立案のための提案書,[<https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2017-pp-17.pdf>]
- 低炭素社会戦略センター(2020),『蓄電池システム (Vol.7) —蓄電システムの経済性の考察(現状の効率、コストと今後の課題)』,[<https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2019-pp-01.pdf>], (2020/12/8 閲覧)
- 低炭素投資促進機構(2019),『地域の特性を活かした地産地消の分散型エネルギーシステム構築ガイドブック』,[<https://www.teitanso.or.jp/cms/wp-content/uploads/2020/03/%e3%82%ac%e3%82%a4%e3%83%89%e3%83%96%e3%83%83%e3%8>

[2%af_ver1.0.pdf](#)],(2021/1/15 閲覧)

- 電力・ガス取引監視等委員会(2020),『電力取引の状況（電力取引報結果） 令和 2 年 6 月分（令和 2 年 9 月 8 日公表）』” [<https://www.emsc.meti.go.jp/info/business/report/results.html>],(2020/9/15 閲覧)
- 電力広域的運営推進機関(2019),『電気の質に関する報告書-2018 年度実績-』, [https://www.occto.or.jp/houkokusho/2019/2019_nenjihoukokusho.html], (2021/1/15 閲覧)
- 電力広域的運営推進機関,『計画値同時同量制度』, [https://www.occto.or.jp/occto/about_occto/jukyu_chousei_kinou.html], (2021/1/14 閲覧)
- 電気新聞(2021),” スポット価格の高騰が止まらない。寒波で LNG の在庫が減少 (2021 年 1 月 12 日)”, [<https://www.denkishimbun.com/sp/101152>],(2021/1/16 閲覧)
- 所沢市(2018),『所沢新電力事業計画書』, [<https://www.city.tokorozawa.saitama.jp/kurashi/seikatukankyo/kankyo/chiikishindenryoku/kousou.files/keikaku.pdf>] , (2021/1/14 閲覧)
- 東京電力パワーグリッド『停電履歴情報』, [<https://teideninfo.tepco.co.jp/day/teiden/index-j.html>], (2020/8/31 閲覧)
- 東京都環境公社(2019),『再エネを活用した 新電力 虎の巻（設立検討編）』, [<https://www.tokyo-co2down.jp/action/efforts-renewable/fit-2/index.html>]
- 長尾浩志,上道茜,八木正彰,山崎由大,金子成彦,坂東茂(2017),『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 38 巻, 4 号, p. 10-23
- 日本サステナブル建築協会(2016),『エネルギーコベネフィットクリエイティブタウン調査 報告書』, [http://www.jsbc.or.jp/project/2016/pdf/ene_cobenecreat_town.pdf], (2021/1/18 閲覧)
- 日本エネルギー学会編,”天然ガスコージェネレーション計画．設計マニュアル 2008”, 日本工業出版, 2008.
- 日本経済新聞(2020),『EV 電池を家庭で再利用 トヨタ、蓄電向け仕組み作り パナソニックなど参加へ (2020 年 2 月 6 日)』, [<https://www.nikkei.com/article/DGKKZO55278520V00C20A2MM8000?unlock=1>], (2021/1/16 閲覧)
- 日本経済新聞(2021),『東電、企業の自家発電から電力調達へ LNG 在庫不足で(2021 年 1 月 6 日)』, [<https://www.nikkei.com/article/DGXZQODZ060UU0W1A100C2000000?unlock=1>], (2021/1/16 閲覧)

- 馬場健司,高津宏明,鬼頭未沙子,河合裕子,則武透子,増原直樹,木村道德,田中充(2015),『地熱資源をめぐる発電と温泉利用の共生に向けたステークホルダー分析』,環境科学会誌,28巻,4号,p.316-329
- 北海道開発局(2016),『平成28年度再生可能エネルギーを活用した地域づくりに関する調査報告書(概要版)』,[<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/ki/chousa/splaat000000uedi-att/splaat000000ueia.pdf>],(2021/1/14閲覧)
- 北海道経済産業局(2019),『資源エネルギー環境広報 令和元年10月号』[<https://www.hkd.meti.go.jp/hokpp/kankoho/201910.pdf>],(2021/1/17閲覧)
- 水石仁(2013),『間接的エネルギー便益(NEB)を考慮したステークホルダー別の費用便益分析とNEBの再配分に関する考察:分散型エネルギーシステムによる都市・地域の低炭素化に関する研究』,日本建築学会環境系論文集,78巻,684号,p175-181
- 安田陽(2018),『再生可能エネルギーがもたらす便益とは』,岩波書店『科学』,Vol.88, No.10, pp.992-996
- 安田陽(2019),『再生可能エネルギーの便益が語られない日本—メディア・政府文書・学術論文における「便益」の出現頻度調査—』,京都大学大学院経済学研究科再生可能エネルギー経済学講座ディスカッションペーパー,[http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/stage2/contents/dp001.html],(2021/1/17閲覧)
- 安田陽(2020),『世界の再生可能エネルギーと電力システム 電力市場編 (NextPublishing)』,インプレス R&D. Kindle版.
- 柳沢教雄(2014),『地熱発電の現状』,Journal of the Japan Institute of Energy,93-11,1140
- Ennet,"コラム:電気料金のしくみ",[https://www.ennet.co.jp/column/price_mechanism/],(2021/1/16閲覧)
- JOGMEC(2015a),『平成25年度小規模地熱発電のうち温泉発電導入促進のための手引書』,[<http://geothermal.jogmec.go.jp/gathering/japan/promotion.html>],(2021/1/17閲覧)
- JOGMEC(2015b),『小規模地熱発電のうち温泉発電導入促進について【概要版】(第四版)』,[<http://geothermal.jogmec.go.jp/gathering/japan/promotion.html>],(2021/1/14閲覧)
- JOGMEC(2020),『2020年度「小規模地熱発電プラント設計ガイドライン」』,[<http://geothermal.jogmec.go.jp/gathering/japan/guideline.html>],(2021/1/17閲覧)
- JFEエンジニアリング(2014),『ニュースリリース 土湯温泉で温泉バイナリー発電』

設備を受注～石油天然ガス・金属鉱物資源機構による地熱発電で初の債務保証対象事業に採択(2014年5月22日)』, [<https://www.jfe-eng.co.jp/news/pdf/20140522.pdf>], (2021/1/18 閲覧)

- JEPX(2020), 『2019年度事業の概要』, [<http://jepx.org/aboutus/pdf/BR2019.pdf?timestamp=1610766125197>], (2021/1/16 閲覧)
- JEPX, 『取引情報：2018年度スポット市場取引結果』, [<http://www.jepx.org/market/>], (2021/1/16 閲覧)
- JEPX, 『取引情報：2020年度スポット市場インデックス』, [<http://www.jepx.org/market/>], (2021/1/18 閲覧)
- NEDO(2014), 「再生可能エネルギー技術白書 第2版—再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋—」 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構[編]
- NEDO, 『「地熱発電技術研究開発」基本計画』, [<https://www.nedo.go.jp/content/100561270.pdf>], (2021/1/16 閲覧)
- Farrukh Khalid, Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen(2017), 『Techno-economic assessment of a solar-geothermal multigeneration system for buildings』, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 33, Pages 21454-21462,
- Felix A. Farret, M. Godoy Simões(2006), 『Micropower System Modeling with Homer』, Integration of Alternative Sources of Energy, IEEE, 2006, pp.379-418, doi: 10.1002/0471755621.ch15.
- IPCC(2014), 『CLIMATE CHANGE 2014 Mitigation of Climate Change (IPCC 5th Assessment Report Working Group III)』, [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf], (2020/12/20 閲覧)
- IRENA(2017a), 『GEOTHERMAL POWER TECHNOLOGY BRIEF』, [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Aug/IRENA_Geothermal_Power_2017.pdf], (2021/1/8 閲覧)
- IRENA(2017b), 『Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030』, [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf], (2021/1/16 閲覧)
- HOMER Energy(2020), 『Dispatch Strategy and Controllers』, [<https://homerenergy.force.com/supportcenter/s/article/dispatch-strategy-and-controllers>], (2021/1/16 閲覧)

- Kazmi, S.W.S., Sheikh, M.I(2019), 『Hybrid geothermal–PV–wind system for a village in Pakistan.』 SN Appl. Sci. 1, 754. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0643-9>

謝辞

本研究は、様々な方のご協力、意見交換が無くしては完成いたしませんでした。論文の締めとしてご協力いただいた皆様に改めてお礼申し上げます。

- 愛知正温先生
- 井原智彦先生
- 愛知研の皆様
- 新地町でのプロジェクトに関わらせていただいた皆様
- 環境システム学専攻の諸先生方
- 環境システム学専攻の他研究室の皆様
- ヒアリングにご協力くださった事業者の皆様
- 柏図書館職員の皆様
- 柏図書館夜間学生スタッフの皆様
- 議論を交わしてくださった学内外の皆様

皆様のおかげで、大学院での2年間が大変に実りあるものとなりました。
重ねて深くお礼申し上げます。

2021年1月20日
川崎 敬

付録 A：全解析結果

需要家構成、蓄電池の最小容量[kWh]と最小 SOC[%]については、それぞれ以下の名称を用いて表記している。

- 需要家構成
 - 大：高圧事業者 1 軒,低圧事業者 7 軒,一般家庭 78 軒
 - 小：高圧事業者 1 軒,低圧事業者 5 軒,一般家庭 38 軒
- 蓄電池の最小容量[kWh]と最小 SOC[%]
 - 20：容量の下限值：250kWh,最小 SOC：20%
 - 30：容量の下限值：125kWh,最小 SOC：30%
 - 50：容量の下限值：63kWh,最小 SOC：50%

また、停電回避便益の算出パターンごとの B/C を示した。各パターンは以下の条件における B/C を示している。

- パターン①：停電回避便益を考慮しない
- パターン②：(蟻生ほか,2007)で報告された、需要家別被害額を利用
- パターン③：事業者については、パターン②と同様。一般家庭については(佐藤ほか,2018)で報告された、停電回避への年間支払い意思額を利用

全 108 ケースにおける、パラメータ、3 パターンの B/C、シミュレータの解析の結果決定される蓄電池・PV・コンバーターの容量の各々の値を、以下に示す。

表 57 全解析結果

ケース No	パラメータ							B/C			決定変数		
	需要家構成	SOC[%]	温泉発電出力[kW]	温泉発電設備コスト[万円]	温泉発電 O&M コスト[万円/年]	蓄電池コスト[万円/kWh]	プロジェクト期間[年]	パターン①	パターン②	パターン③	蓄電池容量[kWh]	PV 容量[kW]	コンバーター容量[kW]
1	大	20	64	13390	790	9	15	0.71	0.82	0.98	368	0.0	106.9
2	大	20	64	13390	790	15	15	0.68	0.78	0.93	254	70.6	34.5
3	大	20	64	13390	790	25	15	0.65	0.74	0.88	250	68.9	34.8
4	大	20	64	13390	790	9	25	0.86	0.99	1.18	250	91.7	59.5
5	大	20	64	13390	790	15	25	0.82	0.93	1.11	250	78.2	44.6
6	大	20	64	13390	790	25	25	0.78	0.88	1.04	250	78.2	44.6
7	大	20	70	13390	790	9	15	0.73	0.84	1.01	313	0.0	116.2
8	大	20	70	13390	790	15	15	0.7	0.8	0.96	250	41.8	29.1
9	大	20	70	13390	790	25	15	0.67	0.76	0.91	250	41.1	28.4
10	大	20	70	13390	790	9	25	0.88	1.01	1.21	250	50.2	96.4
11	大	20	70	13390	790	15	25	0.84	0.96	1.14	250	40.7	29
12	大	20	70	13390	790	25	25	0.8	0.91	1.07	250	42.0	28.8
13	大	20	72	12460	580	9	15	0.84	0.97	1.16	291	0.0	92.8
14	大	20	72	12460	580	15	15	0.79	0.91	1.08	287	0.0	100.2
15	大	20	72	12460	580	25	15	0.75	0.86	1.02	250	32.1	26.2
16	大	20	72	12460	580	9	25	1.03	1.18	1.4	250	31.8	96.2
17	大	20	72	12460	580	15	25	0.96	1.1	1.3	250	38.1	33.1
18	大	20	72	12460	580	25	25	0.9	1.02	1.21	250	32.8	25.5

19	大	30	64	13390	790	9	15	0.7	0.81	0.96	419	0.0	104.5
20	大	30	64	13390	790	15	15	0.68	0.78	0.93	178	112.9	38.1
21	大	30	64	13390	790	25	15	0.65	0.75	0.9	131	144.9	35
22	大	30	64	13390	790	9	25	0.86	0.99	1.18	174	117.7	40.5
23	大	30	64	13390	790	15	25	0.83	0.96	1.14	135	148.4	52
24	大	30	64	13390	790	25	25	0.81	0.93	1.1	125	160.8	55.7
25	大	30	70	13390	790	9	15	0.72	0.83	0.99	213	63.7	27.3
26	大	30	70	13390	790	15	15	0.7	0.81	0.96	146	93.8	30.7
27	大	30	70	13390	790	25	15	0.68	0.79	0.94	128	104.6	37.2
28	大	30	70	13390	790	9	25	0.89	1.03	1.23	137	99.7	35.8
29	大	30	70	13390	790	15	25	0.87	1	1.19	125	108.8	37.9
30	大	30	70	13390	790	25	25	0.84	0.96	1.14	125	113.7	41.2
31	大	30	72	12460	580	9	15	0.83	0.95	1.14	329	0.0	96.5
32	大	30	72	12460	580	15	15	0.81	0.93	1.11	143	81.8	29.2
33	大	30	72	12460	580	25	15	0.78	0.9	1.07	130	89.0	30
34	大	30	72	12460	580	9	25	1.04	1.2	1.43	125	99.5	37.5
35	大	30	72	12460	580	15	25	1	1.15	1.37	125	97.9	33.7
36	大	30	72	12460	580	25	25	0.97	1.11	1.32	125	100.3	37.1
37	大	50	64	13390	790	9	15	0.68	0.78	0.93	213	130.1	44.7
38	大	50	64	13390	790	15	15	0.66	0.75	0.9	181	156.0	55.8
39	大	50	64	13390	790	25	15	0.63	0.73	0.87	63	223.6	36.1
40	大	50	64	13390	790	9	25	0.84	0.96	1.15	212	140.9	50.8
41	大	50	64	13390	790	15	25	0.82	0.94	1.12	101	188.8	36.6
42	大	50	64	13390	790	25	25	0.79	0.91	1.08	63	251.7	44.3
43	大	50	70	13390	790	9	15	0.71	0.81	0.97	175	107.3	37.2
44	大	50	70	13390	790	15	15	0.68	0.79	0.94	113	136.8	27.9
45	大	50	70	13390	790	25	15	0.67	0.77	0.92	79	159.3	28.3
46	大	50	70	13390	790	9	25	0.87	1	1.2	148	131.3	42.1
47	大	50	70	13390	790	15	25	0.85	0.98	1.17	79	159.3	28.3
48	大	50	70	13390	790	25	25	0.84	0.96	1.15	63	167.2	29.4
49	大	50	72	12460	580	9	15	0.81	0.93	1.12	214	74.3	26.9
50	大	50	72	12460	580	15	15	0.78	0.9	1.08	154	107.1	34.8

51	大	50	72	12460	580	25	15	0.77	0.88	1.05	78	143.6	27.2
52	大	50	72	12460	580	9	25	1.02	1.17	1.4	138	118.6	40.6
53	大	50	72	12460	580	15	25	0.99	1.14	1.36	63	155.0	27.6
54	大	50	72	12460	580	25	25	0.97	1.12	1.33	63	156.5	29.2
55	小	50	64	13390	790	9	15	0.51	0.6	0.68	223	87.4	31
56	小	50	64	13390	790	15	15	0.49	0.57	0.65	66	174.7	30
57	小	50	64	13390	790	25	15	0.47	0.55	0.62	132	174.2	94.6
58	小	50	64	13390	790	9	25	0.64	0.75	0.85	157	122.9	43.2
59	小	50	64	13390	790	15	25	0.61	0.71	0.8	132	174.2	94.6
60	小	50	64	13390	790	25	25	0.59	0.69	0.78	105	203.1	105.8
61	小	50	70	13390	790	9	15	0.53	0.62	0.7	169	75.6	26.7
62	小	50	70	13390	790	15	15	0.52	0.61	0.69	121	99.2	34.1
63	小	50	70	13390	790	25	15	0.51	0.6	0.68	63	123.8	22.9
64	小	50	70	13390	790	9	25	0.66	0.78	0.88	126	97.1	32.2
65	小	50	70	13390	790	15	25	0.65	0.76	0.86	63	129.3	25.2
66	小	50	70	13390	790	25	25	0.64	0.75	0.85	63	125.3	22.5
67	小	50	72	12460	580	9	15	0.61	0.72	0.82	120	84.5	29.8
68	小	50	72	12460	580	15	15	0.59	0.7	0.79	63	110.4	21.5
69	小	50	72	12460	580	25	15	0.59	0.69	0.78	63	112.1	21.9
70	小	50	72	12460	580	9	25	0.78	0.91	1.03	142	75.3	27
71	小	50	72	12460	580	15	25	0.76	0.9	1.02	63	112.1	21.9
72	小	50	72	12460	580	25	25	0.75	0.88	0.99	63	110.5	20.5
73	小	20	64	13390	790	9	15	0.53	0.63	0.71	282	11.9	88.2
74	小	20	64	13390	790	15	15	0.51	0.6	0.67	250	34.7	78.7
75	小	20	64	13390	790	25	15	0.49	0.57	0.64	250	34.7	78.7
76	小	20	64	13390	790	9	25	0.65	0.76	0.86	250	33.7	84.5
77	小	20	64	13390	790	15	25	0.63	0.73	0.82	250	33.7	84.5
78	小	20	64	13390	790	25	25	0.6	0.69	0.78	250	33.4	82.5
79	小	20	70	13390	790	9	15	0.55	0.64	0.73	250	0.0	70.1
80	小	20	70	13390	790	15	15	0.53	0.62	0.7	250	0.0	70.1
81	小	20	70	13390	790	25	15	0.51	0.59	0.66	250	0.0	70.1
82	小	20	70	13390	790	9	25	0.67	0.78	0.88	250	0.0	70.1

83	小	20	70	13390	790	15	25	0.64	0.74	0.84	250	0.0	70.1
84	小	20	70	13390	790	25	25	0.61	0.71	0.79	250	0.0	70.1
85	小	20	72	12460	580	9	15	0.63	0.74	0.84	250	0.0	61.6
86	小	20	72	12460	580	15	15	0.6	0.7	0.79	250	0.0	61.6
87	小	20	72	12460	580	25	15	0.57	0.67	0.75	250	0.0	61.6
88	小	20	72	12460	580	9	25	0.78	0.91	1.03	250	0.0	61.6
89	小	20	72	12460	580	15	25	0.74	0.86	0.96	250	0.0	61.6
90	小	20	72	12460	580	25	25	0.7	0.8	0.9	250	0.0	61.6
91	小	30	64	13390	790	9	15	0.53	0.62	0.7	309	17.8	111.1
92	小	30	64	13390	790	15	15	0.51	0.59	0.67	131	109.9	40.3
93	小	30	64	13390	790	25	15	0.5	0.58	0.66	125	110.3	36
94	小	30	64	13390	790	9	25	0.65	0.76	0.87	125	115.9	42.5
95	小	30	64	13390	790	15	25	0.62	0.73	0.82	125	153.8	62.7
96	小	30	64	13390	790	25	25	0.62	0.72	0.81	125	113.0	37.2
97	小	30	70	13390	790	9	15	0.54	0.64	0.72	281	0.0	81.7
98	小	30	70	13390	790	15	15	0.53	0.62	0.7	125	70.3	25.1
99	小	30	70	13390	790	25	15	0.52	0.6	0.68	125	68.4	23.6
100	小	30	70	13390	790	9	25	0.67	0.79	0.89	125	67.9	22.8
101	小	30	70	13390	790	15	25	0.66	0.77	0.87	125	68.4	23.6
102	小	30	70	13390	790	25	25	0.64	0.75	0.84	125	72.3	27
103	小	30	72	12460	580	9	15	0.63	0.74	0.84	253	0.0	76.3
104	小	30	72	12460	580	15	15	0.61	0.71	0.81	125	67.6	27.8
105	小	30	72	12460	580	25	15	0.58	0.67	0.76	125	96.4	72.4
106	小	30	72	12460	580	9	25	0.79	0.93	1.05	125	68.7	30.2
107	小	30	72	12460	580	15	25	0.77	0.9	1.02	125	60.5	23.7
108	小	30	72	12460	580	25	25	0.74	0.87	0.98	125	63.2	26.6