T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	社会的定着に向けた住宅用太陽光発電システムの運用管理とリサイクルに関する研究
Title(English)	
著者(和文)	鶴崎敬大
Author(English)	Takahiro Tsurusaki
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10646号, 授与年月日:2017年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:湯淺 和博,安田 幸一,中村 芳樹,鍵 直樹,淺輪 貴史
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10646号, Conferred date:2017/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

社会的定着に向けた住宅用太陽光発電システムの運用管理とリサイクルに関する研究

鶴崎　敬大

東京工業大学

大学院理工学研究科

建築学専攻

学位論文

2017 年 9 月

目　　次

目　　次 i
図リスト iii
表リスト vii

第 1 章 序論 1
1.1 研究の目的 1
1.2 研究の背景 1
1.3 既往の研究 2
1.3.1 発電実態・発電性能に関する既往研究 2
1.3.2 導入者意識に関する既往研究 3
1.3.3 太陽光発電パネルのリサイクルに関する既往研究 3
1.4 本論文の構成 4

第 2 章 住宅用太陽光発電システムをめぐる課題 8
2.1 住宅用太陽光発電システムの概要 8
2.2 太陽光発電システムの普及動向 9
2.2.1 世界における普及状況 9
2.2.2 国内における普及状況と普及支援策 10
2.2.3 普及支援策の見直し 19
2.3 普及促進期から社会的定着期へ向かう太陽光発電システムの課題 22
2.3.1 導入に関わる課題 23
2.3.2 運用管理に関わる課題 27
2.3.3 廃棄に関わる課題 31
2.4 本研究の位置づけ 34

第 3 章 長期発電実績に基づく住宅用太陽光発電システムの性能評価 38
3.1 発電実績データの収集と評価の方法 38
3.1.1 発電実績データの収集 38
3.1.2 アレイ面日射量の推定 42
3.1.3 発電性能評価の指標 43
3.2 発電実態と発電性能評価 45
3.2.1 システムの属性 45
3.2.2 発電量・発電性能の実態 48
3.2.3 発電性能の向上に関する評価 55
3.2.4 設置後の発電性能の低下に関する評価 58
3.3 まとめと課題 69

第 4 章 住宅用太陽光発電システムの導入者意識と発電実態 73
4.1 調査の概要 73
4.1.1 アンケート調査の実施要領 73
4.1.2 調査項目 74
4.2 導入者意識 76

4.2.1 導入者の基本属性 76
4.2.2 太陽光発電システムの導入状況 77
4.2.3 住宅・コミュニティとの関わり 80
4.2.4 定期点検・トラブルなどの経験 84
4.2.5 発電量や節電に関する意識，消費者としての態度 91
4.2.6 太陽光発電システムに対する満足度 94
4.2.7 今後の意向 96
4.2.8 満足度と今後の意向・他者への推奨行動 99
4.3 発電実態と導入者意識 101
4.3.1 太陽光発電システムとエネルギー・機器の使用状況 101
4.3.2 発電量と発電性能 103
4.3.3 発電量と電力消費量の関係 104
4.3.4 買電量の確認頻度と電力消費量の関係 107
4.3.5 発電性能と満足度の関係 108
4.4 まとめと課題 111

第 5 章 使用済み太陽光発電パネルのガラス再資源化の環境性評価 115
5.1 住宅用太陽光発電パネルの廃棄量の見通し 115
5.1.1 見通しの前提条件 115
5.1.2 廃棄量の見通し（計算結果） 118
5.2 使用済み太陽光発電パネルのガラス再資源化による CO_2 削減効果の評価 122
5.2.1 インベントリ分析に関する前提条件 122
5.2.2 インベントリ分析 134
5.3 まとめと課題 140

第 6 章 結論 143
6.1 本研究の要約 143
6.2 社会的定着に向けた示唆 146
6.3 今後の課題 148

＜付録＞ 150
付録 A アンケート調査票（第 4 章関係） 150
付録 B ガラス再資源化製品のプロセス別 CO_2 排出量（第 5 章関係） 156
付録 C 本論文に関係する査読付論文リスト 172

図リスト

図 1.4.1　本論文の構成 5
図 2.1.1　住宅用 PV システムの構成 8
図 2.2.1　PV システム累積導入容量の国別構成比（2005 年・2015 年） 9
図 2.2.2　住宅用 PV システムの年間導入容量・導入件数の推移 10
図 2.2.3　住宅用 PV システムの導入コストの推移 12
図 2.2.4　住宅用 PV システムの導入コストの推移（政府補助金控除後） 12
図 2.2.5　FIT 制度における住宅用 PV システムの導入コスト回収想定（2016 年度）. 16
図 2.2.6　住宅用太陽光発電システムの累積導入件数の推移 17
図 2.2.7　PV システムの年間導入容量の推移 18
図 2.2.8　PV システムの累積導入容量の推移 18
図 2.2.9　再生可能エネルギー固定価格買取制度賦課金単価の推移 19
図 2.2.10　再生可能エネルギー固定価格買取制度における電源種類別導入容量と電源種類別累計買取金額 20
図 2.2.11　再生可能エネルギー固定価格買取制度の見直し 21
図 2.3.1　太陽電池セルの変換効率の変遷（2017 年 4 月 14 日版） 24
図 2.3.2　PV モジュール・PV システムの発電性能経年低下率 28
図 2.3.3　PV パネルの排出見込量 31
図 2.3.4　PV システムの撤去・運搬・処理のあるべき姿 32
図 2.3.5　住宅用 PV システムをめぐる課題と想定される因子の関係 34
図 2.3.6　住宅用 PV システムの利用をめぐる課題と本研究の関係 35
図 3.1.1　データの登録内容 39
図 3.1.2　データ数別 PV システム数 41
図 3.1.3　システム出力係数の算出フロー 44
図 3.2.1　PV システムの設置地域別構成比（件数ベース） 45
図 3.2.2　PV システムの設置時期別構成（件数ベース） 46
図 3.2.3　PV システムの発電容量別構成（件数ベース） 46
図 3.2.4　月別発電量の推移（2004～2013 年度） 48
図 3.2.5　月別設備利用率の推移（2004～2013 年度） 49
図 3.2.6　月別システム出力係数の推移（2004～2013 年度） 50
図 3.2.7　データ収集率および設置からの平均経過月数 50
図 3.2.8　年間発電量の相対頻度分布（2013 年度） 51
図 3.2.9　年間システム出力係数の相対頻度分布（2013 年度） 51
図 3.2.10　地域別の年間発電量・年間システム出力係数（2013 年度） 52
図 3.2.11　発電容量別の年間発電量・年間システム出力係数（2013 年度） 53
図 3.2.12　設置時期別の年間発電量・年間システム出力係数（2013 年度） 54
図 3.2.13　設置時期別 PV システムメーカー別システム数構成比 57

図 3.2.14　設置時期別システム出力係数低下率の頻度分布 60
図 3.2.15　属性別システム出力係数低下率（設置後 1 年間と 2013 年度の比較）.....61
図 3.2.16　システム出力係数の推移 62
図 3.2.17　システム出力係数の推移 63
図 3.2.18　システム出力係数低下率（1 年毎）の頻度分布（2004 年度以前のシステム）
.....64
図 3.2.19　システム出力係数の推移 65
図 3.2.20　システム出力係数の推移 66
図 3.2.21　システム出力係数低下率（1 年毎）の経過年別中央値 67
図 3.2.22　設置時期別システム出力係数（12 ヶ月移動平均）の推移.....68
図 4.2.1　PV システムの導入経緯.....77
図 4.2.2　導入経緯別 PV システムの購入先 77
図 4.2.3　導入時期別 PV システムの導入理由 78
図 4.2.4　導入経緯別 設置時・使用開始当初の問題【複数回答】 79
図 4.2.5　導入経緯別 PV パネルの導入場所【複数回答】 80
図 4.2.6　導入経緯別 PV パネルの視認可能性 80
図 4.2.7　導入経緯別 PV パネルの美観評価.....81
図 4.2.8　導入時期別 PV パネルの美観評価.....81
図 4.2.9　PV パネルの視認可能性別 近隣居住者との関わり【複数回答】 82
図 4.2.10　導入後の周辺環境変化による日影，近隣からの苦情【複数回答】 83
図 4.2.11　導入時期別 定期点検の受検状況 84
図 4.2.12　購入先別 定期点検の受検状況.....84
図 4.2.13　導入時期別 パワーコンディショナーの交換・修理経験.....85
図 4.2.14　パワーコンディショナーの交換・修理の時期（導入後経過年） 86
図 4.2.15　パワーコンディショナーの交換・修理のきっかけ.....86
図 4.2.16　導入時期別 PV パネルの交換経験.....87
図 4.2.17　PV パネルの交換の時期（導入後経過年） 88
図 4.2.18　PV パネルの交換のきっかけ.....88
図 4.2.19　導入地域別 自宅での停電経験.....89
図 4.2.20　導入時期別 自立運転機能の利用経験.....90
図 4.2.21　導入地域別 自立運転機能の利用経験.....90
図 4.2.22　発電量・売電量・買電量の確認頻度.....91
図 4.2.23　導入時期別 発電量の確認頻度.....91
図 4.2.24　発電量の確認頻度別 節電意識.....92
図 4.2.25　消費者としての態度 93
図 4.2.26　PV システムに対する満足度.....95
図 4.2.27　総合的に考えて太陽光発電を設置したことの満足度 95
図 4.2.28　PV システムや電気の使用に関する今後の意向.....96

図 4.2.29　発電容量別 今後の意向（3. 家庭用蓄電池システムを使用したい） 97
図 4.2.30　回答者年齢別 固定価格買取期間終了後の売電価格の見通し.....97
図 4.2.31　回答者年齢別 今後の意向（6. 電力自由化後は電気代と売電収入を最優先して電力会社を選びたい） 98
図 4.2.32　回答者年齢別 今後の意向（7. 購入する電気もグリーン電力を選びたい）98
図 4.2.33　総合満足度別 今後の意向（1. PV パネルを増設したい） 99
図 4.2.34　総合満足度別 今後の意向（3. 家庭用蓄電池システムを使用したい） 99
図 4.2.35　総合満足度別 今後の意向（4. EV・PHEV を使用したい） 100
図 4.2.36　総合満足度別 今後の意向（5. EV・PHEV から宅内に給電したい） 100
図 4.2.37　総合満足度別 「太陽光発電システムの設置を勧めたことがある」割合 ..100
図 4.3.1　PV システムの所在地（左図）／発電容量（右図） 101
図 4.3.2　電気以外の使用エネルギー.....102
図 4.3.3　機器使用率 102
図 4.3.4　年間発電量 103
図 4.3.5　発電性能.....103
図 4.3.6　年間電力消費量 105
図 4.3.7　年間電力フロー 105
図 4.3.8　月別発電量・売電量・買電量・電力消費量 106
図 4.3.9　発電量の自家消費率・電力消費量に対する比の分布 106
図 4.3.10　発電量・売電量・買電量の確認頻度.....107
図 4.3.11　買電量の確認頻度（２区分）別　年間電力消費量.....107
図 4.3.12　システム出力係数別　PV システムに対する満足度.....108
図 4.3.13　システム出力係数別　PV システムの発電量に対する満足度（導入理由：「電気代を節約し，売電収入を得たかった」） 109
図 4.3.14　システム出力係数低下率別　PV システムの信頼性・耐久性に対する満足度（2008 年度以前に設置されたシステム）.....110
図 5.1.1　太陽光発電システムの年間導入容量の実績と想定.....116
図 5.1.2　太陽光発電システムの廃棄シナリオ.....117
図 5.1.3　太陽光発電パネルの容量・重量比の想定.....117
図 5.1.4　太陽光発電パネルの年間廃棄容量の見通し（全体） 118
図 5.1.5　太陽光発電パネルの年間廃棄容量の見通し（住宅用） 119
図 5.1.6　太陽光発電パネルのストック容量の見通し 119
図 5.1.7　太陽光発電パネルの年間廃棄重量の見通し 121
図 5.1.8　太陽光発電パネルの累積廃棄重量の見通し 121
図 5.2.1　評価対象とする太陽光発電パネルの種類.....123
図 5.2.2　太陽光発電パネルの種類別国内出荷構成.....124
図 5.2.3　ガラス再資源化製品製造に関するバウンダリ（タイル） 126
図 5.2.4　ガラス再資源化製品製造に関するバウンダリ（ブロック） 127

図 5.2.5　ガラス再資源化製品製造に関するバウンダリ（防音パネル）.....128
図 5.2.6　再資源化製品製造時の CO_2 排出量の内訳.....139

表リスト

表 2.2.1　住宅用 PV システムに対する政府の導入補助単価 11
表 2.2.2　住宅用 PV システムの余剰電力買取単価 14
表 2.2.3　FIT 制度における住宅用 PV システムの買取単価と前提条件（2016 年度）.15
表 2.3.1　太陽電池セル・モジュール変換効率の目標 24
表 2.3.2　PV システムのコスト目標 25
表 2.3.3　事業計画策定ガイドライン（太陽光発電）の構成.....27
表 3.1.1　評価用データ数 40
表 3.2.1　PV システムの設置時期別平均発電容量[kW].....47
表 3.2.2　PV システムの設置条件別発電容量構成比[%] 47
表 3.2.3　地域別の年間発電量・年間システム出力係数（2013 年度） 52
表 3.2.4　発電容量別の年間発電量・年間システム出力係数（2013 年度） 53
表 3.2.5　設置時期別の年間発電量・年間システム出力係数（2013 年度） 54
表 3.2.6　設置時期別年間システム出力係数（設置後 1 年間と 2013 年度の比較） 55
表 3.2.7　設置時期別 PV システムメーカー別システム出力係数（設置後 1 年間）.....57
表 3.2.8　設置時期別年間システム出力係数の低下率（2012 年度と 2013 年度の比較）
.....58
表 3.2.9　既往研究における発電性能低下率 59
表 3.2.10　システム出力係数の低下率（設置後 1 年間と 2013 年度の比較） 59
表 4.1.1　アンケート調査の実施要領.....74
表 4.1.2　アンケート調査の質問内容.....75
表 4.2.1　回答者の主要基本属性.....76
表 5.1.1　太陽光発電パネルの廃棄量見通しの前提条件.....116
表 5.2.1　ヒアリング調査概要 123
表 5.2.2　評価対象ガラス再資源化製品の仕様例 124
表 5.2.3　ガラスカレット利用によるタイル焼成時の燃料消費量 129
表 5.2.4　PV パネルの材料構成比（重量%）と 1 t 当たりの最終製品量 130
表 5.2.5　分析に用いる設定.....131
表 5.2.6　原単位に関する設定 132
表 5.2.7　機器仕様に関する設定.....133
表 5.2.8　タイル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（単結晶系）【工程 A・B】.....135
表 5.2.9　タイル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（単結晶系）【工程 C・D】 136
表 5.2.10　PV パネル種類別，再資源化製品別 CO_2 削減効果 138

第1章 序論

1.1 研究の目的

本研究は，太陽光発電システム（以下，本研究では「PV[1]システム」という）に対する社会の関心が，普及促進から大量導入後の社会への定着に移行しつつあるという認識のもと，導入，運用管理および廃棄に関わる課題のうち，運用管理と廃棄に関わる課題に着目し，運用管理については住宅用 PV システムの発電性能の長期傾向および導入者の意識を評価し，廃棄については使用済み PV パネルのガラス再資源化（リサイクル）の環境性を明らかにすることを目的とする。

1.2 研究の背景

PV システムは再生可能エネルギー電源の主力であり，政府の長期エネルギー需給見通しによると2030年度において総発電電力量の7.0%程度を賄うことが期待されている[1-1)]。また，PV システムは住宅・建築物に導入し易い再生可能エネルギー利用システムであり，ZEH／ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス／ビル）の普及に不可欠と考えられる。ZEH についてエネルギー基本計画[1-2)]では「住宅については，2020 年までに標準的な新築住宅で，2030 年までに新築住宅の平均で ZEH（ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス）の実現を目指す」という目標が設定されている。ここで 2020 年の目標として，具体的にはハウスメーカーや工務店等が施工する新築戸建住宅の過半数が ZEH となることが想定されている[1-3)]。

住宅用 PV システムの普及は 1990 年代の半ばから始まり，2009 年 11 月に太陽光発電の余剰電力買取制度が導入されたことに伴い，急拡大した。2015 年度末までに累積導入件数は 193 万件，累積導入容量は 807 万 kW に達している。また，国土交通省の住宅市場動向調査[1-4)]によると 2015 年度における注文住宅の 43.7%，分譲戸建住宅の 17.1%に PV システムが導入されている。これらの導入率はいずれも 2011 年度以降で最高である。このように，PV システムは新築住宅市場では既に標準的な設備になりつつある。

住宅用 PV システムの普及拡大に伴い，導入後の発電性能の評価が重要になっている。発電性能は経年的に低下することが知られているが，その実態の把握には長期間の継続的な監視が必要であるため，データの蓄積は不十分である。また，既に普及開始から 20 年以上が経過し，約 200 万件の住宅で使用されているにも関わらず，導入

[1] 太陽光発電を表す英語 Photovoltaic は PV と省略するのが一般的である。

者の満足度等の意識についてはほとんど追跡されていない。

一方，再生可能エネルギーの固定価格買取制度が導入された 2012 年以降，非住宅用の PV システムの導入も急増し，2015 年度末までに住宅用 PV システムの 3 倍以上となる約 2,600 万 kW が導入されている。短期間に大量導入が進んだ結果，将来的な PV パネルの大量廃棄が懸念されている。2016 年 3 月，環境省より太陽光発電設備のリサイクルに関するガイドライン[1-5]が発表され，使用済み PV パネルについても今後，再資源化に向けた動きが高まっていくと考えられる。PV パネルの廃棄量はその寿命を 25 年とした場合，2040 年には 80 万 t に達するという試算[1-6]がなされているが，この廃棄量は現在の日本全体の最終処分量の 6%に相当し，今後の最終処分場への負荷を考慮すると，その影響は甚大である。また，PV パネルのリサイクルと同時にリユースに関しても検討がなされているが，流通量は現在極めて少ない[1-6]。

1.3 既往の研究

1.3.1 発電実態・発電性能に関する既往研究

PV システムの発電実態および発電性能に関する既往研究では，1990 年代の普及初期に実住宅に導入された PV システムの評価[1-7),1-8]が行われている。同時期に 100 件規模の PV システムの発電実績データに基づく評価も複数行われている[1-9)-1-12]。これらの研究は設置後 1 年から 3 年程度を評価対象期間としている。

3 年を超える長期間の発電性能の評価事例として，安藤ら[1-13),1-14]による大学に設置された PV システムの 7 年超の発電実績に基づく評価や，岸田ら[1-15]による住宅用 PV システムの約 13 年間の発電実績に基づく評価がある。また，産業・公共施設のフィールドテスト事業で 1998 年度以前に導入された PV システムに対する発電量の追跡調査[1-16]が行われている。いずれの研究でも発電性能の経年的な低下傾向を示唆する結果が報告されている。

発電性能の経年低下傾向については，Jordan & Kurtz[1-17]が過去 40 年間に世界各国で実施された既往研究をレビューし，1,920 件の PV モジュールまたは PV システムにおける発電性能の経年低下率を整理している。しかし，評価対象の大半は PV モジュール単体であり，PV システムの評価件数は約 150 件に留まる。また，そのうち約半数は 2000 年より前に設置されたものであり，近年の PV システムの評価は十分とは言い難い。

以上のように，発電実態や発電性能に関する既往研究では 1990 年代までに導入された PV システムが対象となっていることが多く，2000 年以降の PV システムの発電性能に関する評価は不十分である。

1.3.2 導入者意識に関する既往研究

PV システム導入者の意識については，複数の既往研究がある。本藤・馬場 [1-18]は PV システム導入世帯において PV システムを意識することで日常生活における環境配慮行動を高める傾向があることを報告している。白井ら [1-19]は，導入者と非導入者を対象とするアンケート調査を行い，PV システムの便益を認知することで導入意向が高まり，実際に導入するかどうかは負担容易性の認知に強く規定されることを示している。また，パーソナリティ変数として環境オピニオンリーダー度とイノバティブネス度（「新しいものが好き」など）を定義し，近年の導入者はその度合いが弱くなっていることを明らかにしている。吉岡ら [1-20]も，導入者を対象とするアンケート調査から，近年の導入者は環境問題への関心より経済的便益を重視する傾向が強いことを示している。これらの研究は PV システム導入者を調査対象としているが，PV システムに対する満足度については評価していない。

満足度を評価した例として，福代の研究 [1-21),1-22]がある。福代は導入者と非導入者を対象とするアンケート調査を行い，導入者と非導入者の属性，機器所有，買電量（東日本大震災前後の変化を含む）等の差異を分析するとともに，導入者の PV システムに対する満足度をデザイン性，経済性，環境性，操作性，安全性の 5 項目について把握し，デザイン性以外の 4 項目については肯定的評価が 8 割を超えていることを示している。

満足度については発電量や発電性能，トラブルの経験など PV システムの発電実態の影響が予想されるが，これらを関連づけた研究はみられない。

1.3.3 太陽光発電パネルのリサイクルに関する既往研究

PV パネルのリサイクルに関しては岡島ら [1-23]によって，太陽電池セル部分の再資源化に関する検討がなされており，従来の製造法と比較して投入エネルギー，CO_2 削減効果が得られることを明らかにしている。しかし，PV パネルの主要構成材料は重量比で 50%以上を占める表面保護を目的としたカバーガラスであり，廃棄物の減容化という視点からはこれらの処理についても検討する必要がある。

PV パネルに用いられるガラスは製品の性質上，総じて高い透過性と耐久性が要求され，一般的な製品と比較して品質的に優れている。これらをリサイクル原料として利用することは加工二次製品の品質を担保するうえで有効である。ガラスのリサイクルに関して，醍醐ら [1-24),1-25]は，びん，ガラス繊維，建築用および廃自動車の板ガラスの再資源化に関する評価を行っており，その環境性について言及している。清家ら [1-26]は板ガラス等の建材に対して他産業を含めたマテリアルフローに基づいた再資源化評

価を行っている。茂呂ら [1-27]もアンケート調査に基づく，リサイクル資材製造時の環境負荷原単位の整備を実施しており，一部，廃ガラスを原料とした製品についても製造時の環境負荷原単位を算定している。

以上のように，廃ガラスの再資源化を行うことで環境負荷削減効果が得られることが見込まれており，我が国においても PV パネルを対象とした再資源化の実証試験が進みつつあるが，具体的な効果は明らかにされていない。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を図 1.4.1 に示す。

研究背景と既往研究の状況を踏まえ，本研究ではまず，第 2 章で PV システムの普及動向を普及支援策とともに整理する。また，PV システムの大量導入が実現した現時点における導入，運用管理および廃棄に関わる課題を検討し，本研究で取り組む課題の位置づけを明らかにする。

第 3 章では，導入後の発電性能の評価が重要であるという問題意識から，設置時期が多様な約 4,200 件の住宅用を中心とする PV システムの発電実績データをもとに，住宅用 PV システムの発電性能（特に導入後の発電性能の低下）に関する評価を行う。

第 4 章では，戸建住宅の PV システム導入者を対象とするアンケート調査を実施し，導入の経緯，理由，PV パネルの美観評価，トラブル経験，環境意識等を把握し，PV システムに対する満足度や今後の蓄電池等の利用意向との関係を明らかにする。併せて同じ導入者の発電実態（売・買電量を含む）を把握，分析するとともに，発電性能と満足度との関係を明らかにする。

第 5 章では，まず住宅用 PV パネルの廃棄量の見通しを検討する。続いて，国内のガラスを対象とした再資源化製品を取り扱う業者を対象にヒアリング調査を実施し，実際の処理工程を考慮した PV パネルのガラスを再資源化した際の環境負荷削減効果を，インベントリ分析を用いて評価する。

第 6 章では，本研究を要約するとともに，今後の課題を示す。

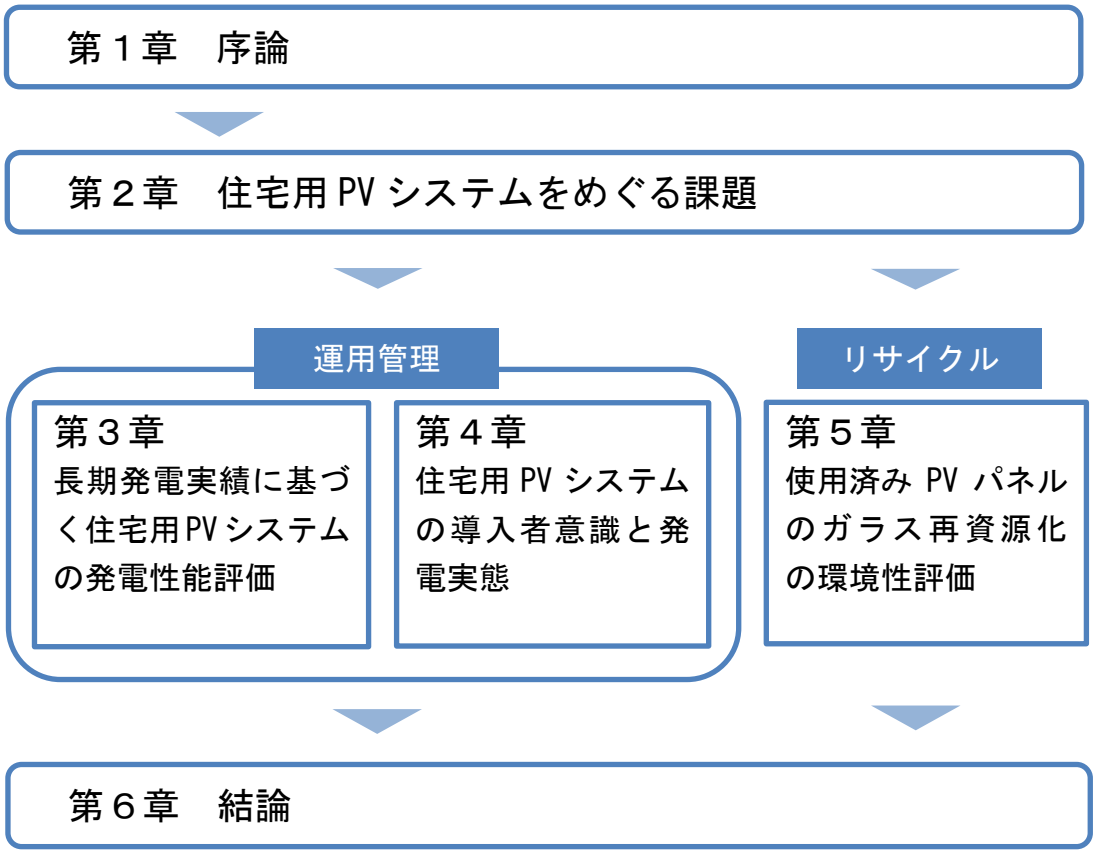

第１章　序論
第２章　住宅用 PV システムをめぐる課題
運用管理
リサイクル
第３章
長期発電実績に基づく住宅用PVシステムの発電性能評価
第４章
住宅用 PV システムの導入者意識と発電実態
第５章
使用済み PV パネルのガラス再資源化の環境性評価
第６章　結論

図 1.4.1　本論文の構成

第１章の参考文献

1-1）経済産業省: 長期エネルギー需給見通し, 2015.7

1-2）経済産業省資源エネルギー庁: エネルギー基本計画 2014, 一般社団法人経済産業調査会, 2014.8

1-3）経済産業省資源エネルギー庁省エネルギー対策課: ZEH ロードマップ検討委員会とりまとめ, 2015.12

1-4） 国土交通省住宅局: 平成 27 年度住宅市場動向調査報告書, 2016.3

1-5）環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部企画課リサイクル推進室: 太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン, 2016.3

1-6）使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する検討会（環境省）: 太陽光発電設備等のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書, 2015.6

1-7）逸見 次郎: 太陽光発電システムの運転実績, エネルギー・資源学会第 16 回研究発表会講演論文集, pp.41-46, 1997.4

1-8）新井 栄一: 一般家屋の屋根に設置された太陽光発電設備の実績, エネルギー・資源, Vol.22, No.2, pp.56-59, 2001.3

1-9）田中 昭雄, 酒井 孝司, 中上 英俊, 石原 修: 首都圏に設置された住宅用太陽光発電システムの計測・解析結果 ―太陽光発電システムの住宅への応用に関する研究 その２―, 日本建築学会計画系論文集, Vol.66, No.544, pp.39-46, 2001.6

1-10）田中 昭雄, 酒井 孝司, 中上 英俊, 石原 修: 九州地域に設置された住宅用太陽光発電システムの計測・解析結果 ―太陽光発電システムの住宅への応用に関する研究 その３―, 日本建築学会計画系論文集, Vol.67, No.551, pp.61-68, 2002.1

1-11）自然エネルギー推進市民フォーラム: 自然エネルギー推進市民フォーラムデータ分析報告書, 2003.3

1-12）大関 崇, 井澤 敏泰, 大谷 謙仁, 都筑 建, 小池 寿文, 黒川 浩助: システム出力電力量のみの計測のおける太陽光発電システムの評価方法に関する研究, 電気学会論文誌 B, 125-12, pp.1299-1307, 2005.12

1-13）安藤 圭佑, 龍 有二: 太陽光発電システムの経年劣化とそのモデル化 その１ 実績データに基づく基礎的検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 47, pp.253-256, 2008.3

1-14）安藤 圭佑, 龍 有二: 太陽光発電システムの経年劣化とそのモデル化 その２ モデル化とシミュレーション, 日本建築学会九州支部研究報告, 48, pp.189-192, 2009.3

1-15）岸田 真一, 鶴崎 敬大, 中上 英俊, 大野 喜久子: 住宅用太陽光発電システムの長期発電実績と利用者の意識調査, 第 29 回エネルギーシステム・経済・環境コン

ファレンス講演論文集, pp.147-150, 2013.1
1-16) 三菱総合研究所: 平成 25 年度新エネルギー技術フィールドテスト事業 太陽光発電新技術等フィールドテスト事業に関する運転データ分析評価業務 発電性能等の分析・評価報告書（経済産業省委託事業）, 2014.2
1-17) Jordan, Dirk C., Sarah R. Kurtz: Photovoltaic Degradation Rates - An Analytical Review, NREL/JA-5200-51664, 2012.6
1-18) 本藤 祐樹, 馬場 健司: エネルギー技術導入の社会心理的な影響―太陽光発電システムの設置世帯における環境行動の変化―, エネルギー・資源, Vol.29, No.1, pp.15-21, 2008.1
1-19) 白井 信雄, 正岡 克, 大野 浩一, 東海 明宏: 住宅用太陽光発電の設置者特性と設置規定要因の分析, エネルギー・資源, Vol.33, No.2, pp.1-9, 2012.1
1-20) 吉岡 剛, 高瀬 香絵, 吉田 好邦, 松橋 隆治: 住宅用太陽光発電設置者に対する導入要因の分析, 環境情報科学 学術研究論文集, Vol.26, pp.261-266, 2012
1-21) 福代 和宏: 太陽光発電システム導入世帯の属性と電力消費実態, 日本建築学会環境系論文集, Vol.76, No.666, pp.741-750, 2011.8
1-22) 福代 和宏: 東日本大震災前後における太陽光発電システム導入世帯のエネルギー意識と電力消費量の変化, 日本建築学会環境系論文集, Vol.78, No.690, pp.645-654, 2013.8
1-23) 岡島 敬一, 内山 洋司: リサイクル技術を考慮した太陽電池ライフサイクル評価, LCA 学会誌, Vol.5, No4, pp.521-528, 2009.10
1-24) 張 玄庚, 醍醐 市郎, 松野 泰也: マテリアルフロー分析による日本におけるガラスのリサイクル可能性評価, LCA 学会誌, Vol.6, No.4, pp.288-294, 2010.10
1-25) 醍醐 市郎, 張 玄庚, 松野 泰也: 使用済み自動車からの板ガラスリサイクルの環境性および事業採算性評価, LCA 学会誌, Vol.7, No.1, pp.72-78, 2011.1
1-26) 清家 剛, 磯部 孝行: 他産業も含めたマテリアルフローを考慮した建設系廃棄物の再資源化評価システムの構築に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.683, pp.17-26, 2013.1
1-27) 茂呂 隆, 多葉井 宏, 高口 洋人: リサイクル建築資材製造時の環境負荷原単位に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol.70, No.595, pp.113-119, 2005.9

第2章 住宅用太陽光発電システムをめぐる課題

本章では PV システムの普及動向を普及支援策とともに整理したうえで，普及状況を評価する。また，PV システムの大量導入を促進した再生可能エネルギーの固定価格買取制度の見直しの背景を検討することを通して，本研究で取り組む課題の位置づけを明らかにする。

2.1 住宅用太陽光発電システムの概要

本研究で対象とする住宅用 PV システムは，住宅の屋根等に設置され，太陽光のエネルギーを電力に変換する PV パネル（PV モジュール）で発生した直流電力を，パワーコンディショナー（インバーター）で交流電力に変換し，住宅用分電盤を経由して家庭の電力負荷（照明，家電製品等）に供給し，余剰が生じた場合には電力系統に供給（売電）する形態のシステムとする。本システムは，売電量を計量するため，売電用電力量計を備える。この形態のシステムは電力系統に連系していない独立型システムと対比して，系統連系型システムと呼ばれることがある。

現在，日本国内で利用されている住宅用 PV システムの大部分は系統連系型システムであるが，これに家庭用蓄電池システムを併設するケースが徐々に増えつつあると考えられる。

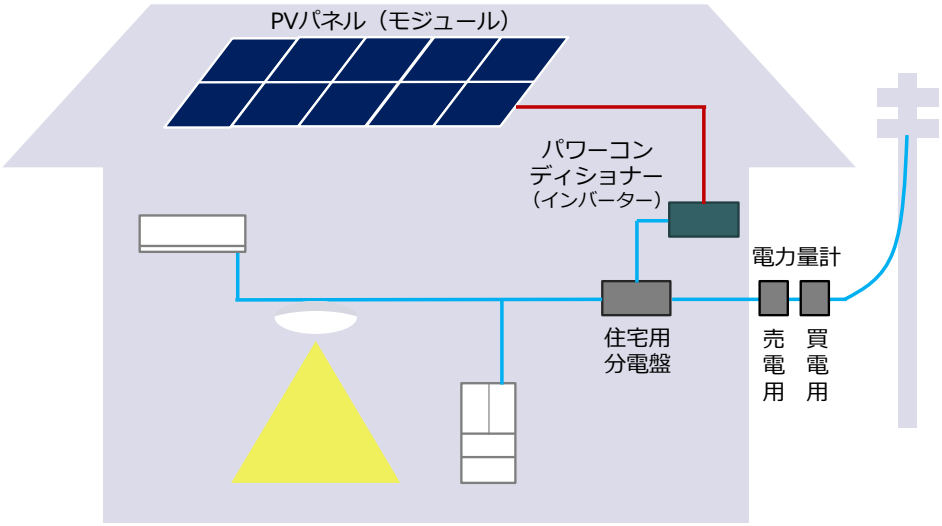


図 2.1.1 住宅用 PV システムの構成

2.2 太陽光発電システムの普及動向

2.2.1 世界における普及状況

1990年代から本格的な導入が始まったPVシステムは世界的に急速に普及が拡大しており，2015年までに世界全体の累積導入容量（非住宅用を含む）は約2億2800万kWに達している。これは2005年までの累積導入容量（423万kW）の54倍の水準である。2005年時点ではドイツが世界全体の50%，日本が34%を占め，普及先が偏っていたが，2015年には中国，ドイツ，日本，米国，イタリアの上位5か国で71%を占めているものの，シェアが20%を超える国は無くなっている。（図 2.2.1）

このように急速な普及拡大が進んでいる背景には，気候変動問題への対応や化石燃料の価格上昇などから，PV システムを含む再生可能エネルギーの利用拡大が重要課題となっており，技術開発および導入に対する政策的な支援が拡充されたことがある。

PV システムの導入支援策として，最も貢献しているのはフィード・イン・タリフ（Feed-in Tariff）と呼ばれる制度である（IEA-PVPS [2-1)]）。この制度では発電電力の全量あるいは一部（導入施設で消費しきれない余剰分）を長期間にわたって固定価格で買い取ることが保証される。導入費用を回収し，一定の利益を得ることができる水準に買い取り価格が設定された場合，PV システムの導入は魅力的な投資となる。ドイツ，日本，中国，イタリアなどでフィード・イン・タリフ（FIT）制度は PV システムの導入拡大に大きく貢献している。

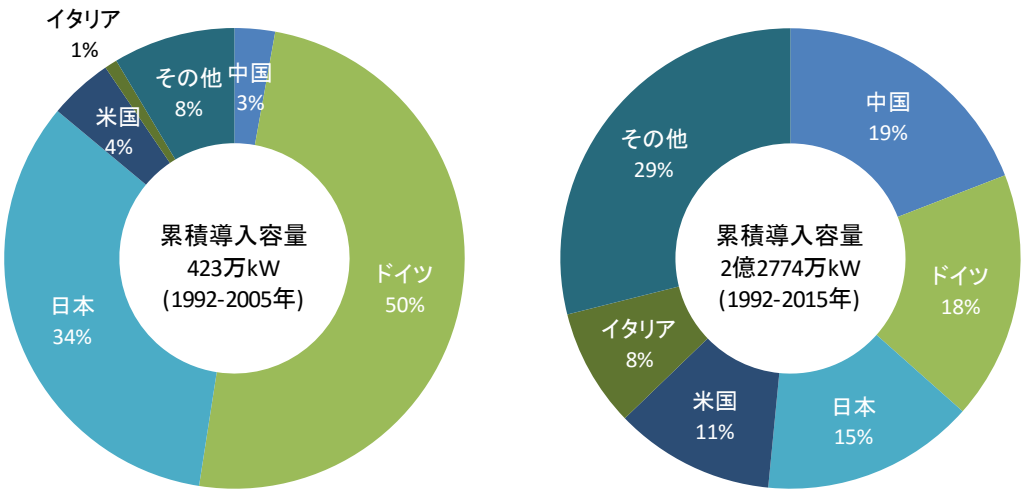


図 2.2.1 PV システム累積導入容量の国別構成比（2005 年・2015 年）

出所：IEA PVPS [2-1)]

2.2.2 国内における普及状況と普及支援策

(1) 住宅用

国内の住宅用 PV システムの年間導入容量および導入件数を図 2.2.2 に示す。2005 年度まで順調に導入が進んだが，2006 年度から 2007 年度は 2 年連続で前年を下回った。その後，2009 年度から導入量が急増し，2013 年度に過去最高の 28.8 万件，131 万 kW が導入されたが，2014 年度の導入量は前年に比べ大幅に減少している。

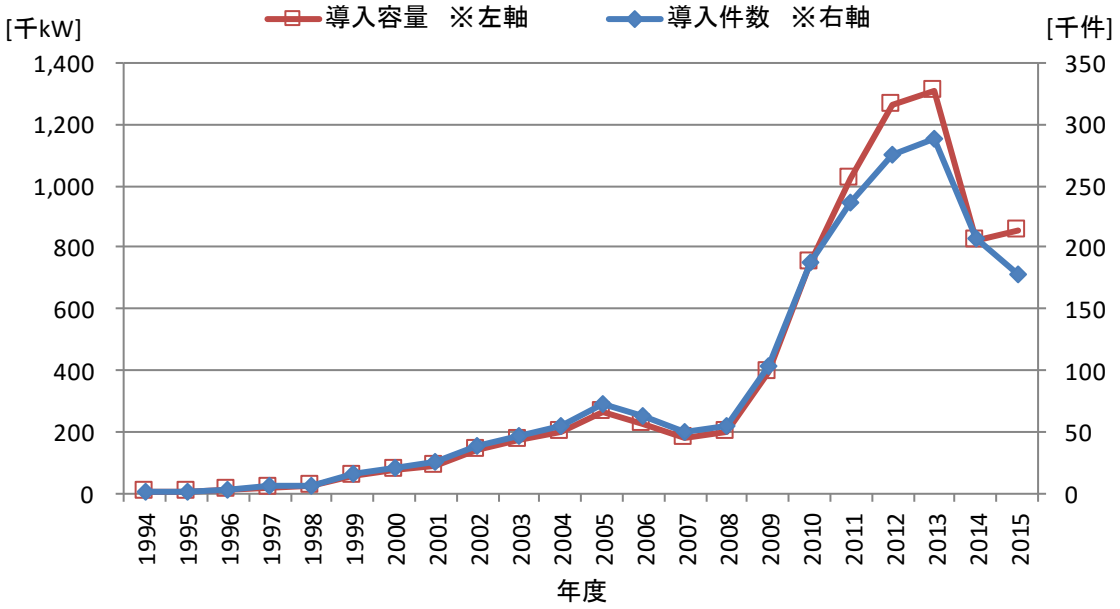


図 2.2.2 住宅用 PV システムの年間導入容量・導入件数の推移

出所：1994～2004 年度は政府の導入促進事業等による導入実績（新エネルギー財団），2005～2008 年度はメーカー販売実績（新エネルギー導入促進協議会），2009～2012 年度は政府の補助金交付実績（太陽光発電協会太陽光発電普及拡大センター），2013 年度以降は固定価格買取制度による 10kW 未満のシステム導入量（経済産業省資源エネルギー庁）。

住宅用 PV システムは, 2017 年時点でも政策的支援無しに費用を回収することは容易ではなく，普及は政策的支援に強く依存している。これまでの普及の経過は，普及支援の内容により，大きく２つの時期に分けることができる。

1） 第１期（2005 年度まで）

普及の第１期は 1994 年度から 2005 年度までである。第１期を特徴づけるのは導入補助金と電力会社による自主的な余剰電力の買い取りである。

まず導入補助金について検討する。普及が進むにつれて，表 2.2.1 に示すように補助単価は徐々に切り下げられ，2005 年度に 1kW 当たり 2 万円を支給したのを最後に政府の補助金はいったん終了した。この間，図 2.2.3 に示すように導入コストは低減したものの，補助金を除く自己負担額（図 2.2.4）は 2005 年度まで 1kW 当たり 60 万円から 70 万円程度で推移した。なお，自治体（都道府県，市区町村）によっては政府の補助金に上乗せして独自の補助金が支給されていた。

表 2.2.1　住宅用 PV システムに対する政府の導入補助単価

年度	補助単価	備考
1994	最大 1/2，上限 90 万円/kW	モニター事業として実施
1995	最大 1/2，上限 85 万円/kW	
1996	最大 1/2，上限 50 万円/kW	
1997～1999	最大 1/3，上限は(導入単価[万円/kW]－35.2)×0.5	
2000	27 万円/kW，18 万円/kW，15 万円/kW	年度中に 2 回改訂
2001	12 万円/kW	
2002	10 万円/kW	
2003	9 万円/kW	
2004	4.5 万円/kW	
2005	2 万円/kW	2005 年度で終了
2008～2009	7 万円/kW（要件：導入単価 70 万円/kW 以下）	2009 年 1 月に再開
2010	7 万円/kW（要件：導入単価 65 万円/kW 以下）	
2011	4.8 万円/kW（要件：導入単価 60 万円/kW 以下）	
2012	3.5 万円/kW（要件：導入単価 47.5 万円/kW 以下） 3 万円/kW（要件：導入単価 55 万円/kW 以下）	
2013	2 万円/kW（要件：導入単価 41 万円/kW 以下） 1.5 万円/kW（要件：導入単価 50 万円/kW 以下）	2013 年度で終了

出所：経済産業省資源エネルギー庁の各種資料より作成

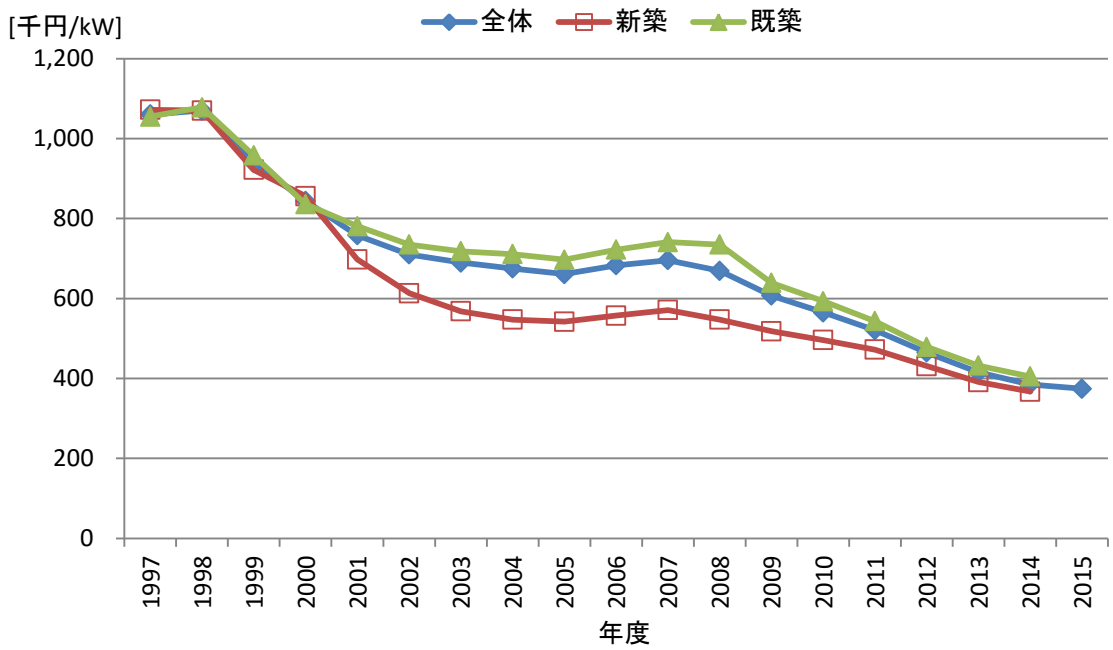


図 2.2.3　住宅用 PV システムの導入コストの推移

出所：1997～2008 年度；新エネルギー導入促進協議会 [2-2)]
2009～2014 年度；太陽光発電協会太陽光発電普及拡大センター[2-3)]
2015 年度；調達価格等算定委員会 [2-4)]

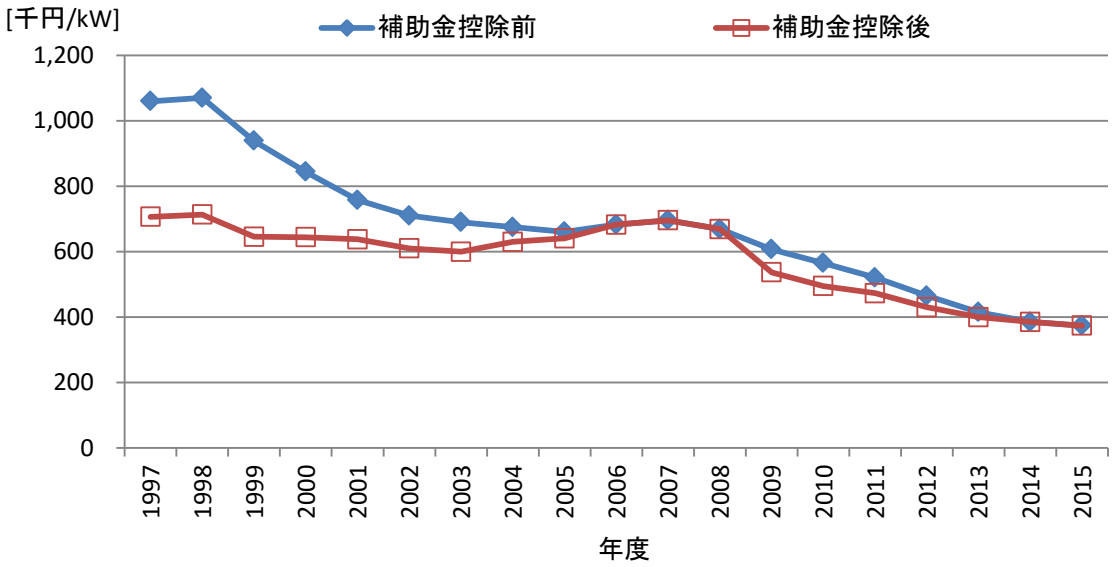


図 2.2.4　住宅用 PV システムの導入コストの推移（政府補助金控除後）

出所：図 2.2.3,　表 2.2.1 をもとに作成
注：2000 年度の補助単価は 3 期の平均値（20 万円/kW）で設定。

次に，余剰電力の買い取りについて検討する。一般に，PV システムの発電電力は，その時点における住宅の電力需要分が消費（以下，「自家消費」という）され，余剰分は電力系統へ供給，すなわち電力会社に売却される。PV システムに蓄電池を併設する事例は徐々に増えているが，未だ限定的である。この余剰電力の買い取りは 1992 年から電力会社の自主的な取り組みとして実施されてきた。買取単価は電力料金単価と同水準に設定され，補助金とともに第 1 期の普及を支えてきた。しかし，自主的な取り組みであることから，買い取りの期間や単価が保証されていた訳ではなく，導入者にとっては不確実な要素でもあった。

第 1 期の導入コストは，導入補助金を除く自己負担額でも 1kW 当たり 60 万円以上の水準であり，一般的に期待されていた使用期間（20 年間）内に，電気代の節約と売電による収入で費用を回収することは困難であった[2]。そのため，導入者のエネルギー・環境問題に対する意識や自宅で発電できることの魅力（楽しさや停電等への対応）を訴求する必要があった。

2005 年度をもって導入補助金が廃止された後，2006 年度から 2007 年度にかけて導入コストは緩やかに上昇した。この結果，年間導入量の減少に転じている。

2） 第２期（2009 年度以降）

普及の第 2 期は 2009 年度以降である。前年度の 2009 年 1 月に政府の導入補助金制度が再開され，補助単価は 1kW 当たり 7 万円とされた。再開後の導入補助金制度は，導入コストの低下を働きかけるため，支給要件に導入単価（1kW 当たり導入コスト）の上限を定めたことに特徴がある。補助単価および導入単価の上限のいずれも徐々に切り下げられ，2013 年度をもって廃止された（表 2.2.1）。

第 2 期を特徴づけるのは導入補助金ではなく，2009 年 11 月に開始された「太陽光発電の余剰電力買取制度」と，2012 年 7 月に開始された「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」である。前者はドイツで成果を挙げていた FIT 制度を太陽光発電に限定して導入したものであり，後者はそれを再生可能エネルギー電源全般に拡大したものである（以下，両制度をまとめて「FIT 制度」という）。

太陽光発電の余剰電力買取制度では 10kW 未満の PV システムに対して，10 年間，1kWh 当たり 48 円での余剰電力の買い取りが保証されることとなった。この買取単価は家庭用電力料金単価の約 2 倍であり，PV システムの導入コストと発電量が平均的な水準であれば，導入補助金と合わせて，20 年以内に導入費用が回収できる条件であった。2011 年度以降，徐々に買取単価が切り下げられているのは，導入コストの低

[2] 1kW 当たりの年間発電量を設備利用率 12%として年間 1,051.2kWh（1kW×8760h×0.12），家庭用電力料金単価および買取単価をいずれも 24 円/kWh，使用期間を 20 年間とすると，使用期間の電気代節約・売電収入の合計額は 50.5 万円となる。

減などによるものであり，導入コストの回収が期待できる水準は維持されている（表2.2.2）。

つまり，第２期においてはFIT制度の導入により，平均的には「元が取れる」水準の支援が提供されることで，それまでPVシステムに関心はあるものの導入コストの回収が見込めないために見送っていた層で導入が進むこととなったと考えられる。

なお, FIT制度では2009年10月以前に導入済みの住宅用PVシステムに対しても，10年間，48円/kWhでの買い取りが保証された。2019年10月には多くの住宅用PVシステムにおいて一斉にFIT制度に基づく買い取りが終了することとなる。

表 2.2.2　住宅用PVシステムの余剰電力買取単価

年度	制度	買取期間	買取単価	備考
1992～2009	電力会社による余剰電力の買い取り（自主的取り組み）	指定なし	電力料金単価と同水準	2009年10月まで
2009～2010	太陽光発電の余剰電力買取制度（エネルギー供給構造高度化法に基づく）	10年間	48円/kWh ※10kW未満（以下同じ）	2009年11月から
2011～2012			42円/kWh	2012年6月まで
2012	再生可能エネルギーの固定価格買取制度（電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法に基づく）	10年間	42円/kWh	2012年7月から
2013			38円/kWh	
2014			37円/kWh	
2015			33円/kWh	出力制御対応機器設置義務有りの場合，買取単価は＋2円/kWh
2016			31円/kWh	
2017			28円/kWh	
2018			26円/kWh	
2019			24円/kWh	

出所：経済産業省資源エネルギー庁[2-5]，調達価格等算定委員会[2-4), 2-6]等より作成

注1：2009年10月以前の導入者については，導入時期に関わらず，2009年11月から10年間の固定価格（48円/kWh）での買い取りが保証されている。

注2：2009年11月以降の導入者の買取単価は，導入から10年間，導入年度の買取単価に固定される。

注3：他の自家発電設備（ガスコージェネレーションシステム等）や蓄電池を併用する場合の買取単価は本表より低めに定められている。

FIT 制度における PV システムの「元が取れる」条件を明確にするため，表 2.2.3 に 2016 年度の買取単価（31 円/kWh）と，その前提条件を示す。内部収益率（IRR）は 3.2%と設定されており，導入にあたってローンを組む場合，金利が 3.2%以内であれば 20 年以内にコストが回収できる。図 2.2.5 はこの条件におけるコスト回収の様子を図示したものである。金利を考慮しない単純回収年数は約 13 年である。従って，2016 年度の住宅用 PV システムの導入者は，13 年から 20 年でコスト回収が期待できる条件で，投資をしていることになる。

ここで，FIT 制度での 10 年間の買取期間が終了した後，11 年目から 20 年目までの買取単価は 11 円/kWh と想定されている。これは卸電力取引価格，すなわち小売電気事業者が市場から電力を調達する際の価格が目安とされている。

仮に FIT 制度が無くなり，余剰電力の買取単価が 1 年目から 11 円/kWh で，他の条件が表 2.2.3 と同一の場合，20 年以内にコスト回収が期待できる導入単価は約 21 万円/kW となる。これは 2016 年度買取単価の算定条件である 35.3 万円/kW より，4 割低い水準である。

このように，住宅用 PV システムの現状のコストは，自立的な普及が期待できる水準とまだ大きな隔たりがある。

表 2.2.3　FIT 制度における住宅用 PV システムの買取単価と前提条件（2016 年度）

項目	設定値
余剰電力の買取単価（1～10 年目）	31 円/kWh
導入単価	35.3 万円/kW
導入補助金	なし
運転維持費	0.32 万円/kW/年
年間発電量	1,200kWh/kW/年 （設備利用率 13.7%）
余剰（売電）割合	70%
余剰電力の買取単価（11～20 年目）	11 円/kWh
家庭用電力料金単価	24 円/kWh
内部収益率（IRR）	3.2%

出所：調達価格等算定委員会 [2-6)]

注 1：運転維持費には 4 年に 1 回の点検（1 回 2 万円）とパワーコンディショナーの交換 1 回（20 万円）が含まれている。

注 2：家庭用電力料金単価は自家消費分（発電量の 30%）の経済価値の算定に用いる。

注 3：内部収益率（IRR）は太陽光発電向けローンの金利を基に設定されている。

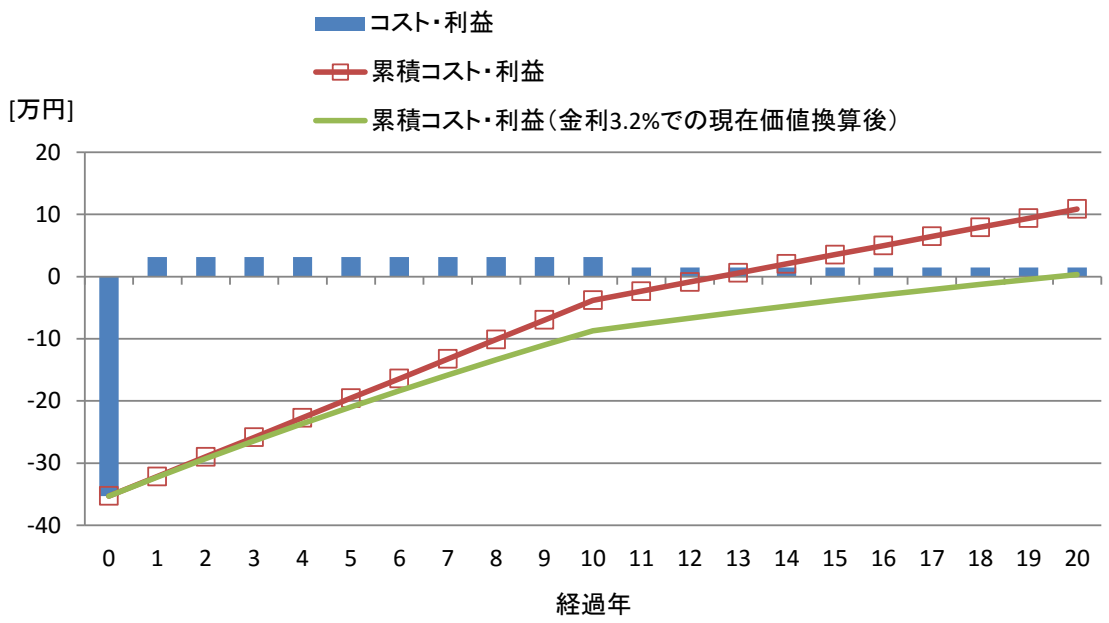


図 2.2.5　FIT 制度における住宅用 PV システムの導入コスト回収想定（2016 年度）

3） 普及状況の評価

FIT 制度の導入により住宅用 PV システムの市場は大きく拡大した。累積導入件数は 2016 年 12 月末時点で約 205 万件である（図 2.2.6）。しかしながら，累積導入件数は 2015 年国勢調査の一般世帯数（5,333 万世帯）の 3.8%に過ぎず，戸建住宅に居住する一般世帯数（2,895 万世帯）と比べても 7.1%に留まる。

環境省が推計している PV システムの導入ポテンシャルによると，50 ㎡未満の狭小住宅を除く戸建住宅において，南向きに限り PV パネルを設置する場合で 4,570 万 kW，東・西向きにも設置する場合で 1 億 2,609 万 kW となっている [2-7]。これは，2015 年度までの累積導入容量（807 万 kW）の 5 倍～15 倍程度の規模である。

一方で，戸建住宅の約半数は 1980 年以前の耐震基準しか満たしていないため，PV パネルを屋根に搭載することは望ましくないとみられている [2-8]。こうした住宅では耐震改修を施されるか，建て替えられるか，あるいは PV パネルの軽量化が進まない限り，導入ポテンシャルとして期待することは難しい。

このような制約はあるものの，住宅への PV システムの普及はまだ限定的であり，今後も大きな導入余地があると考えられる。

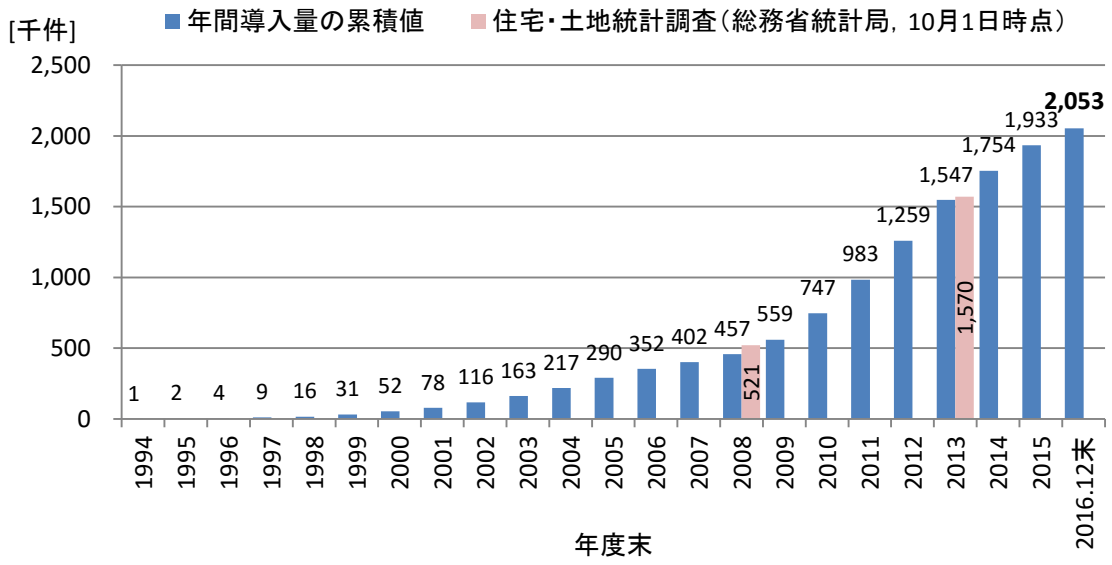


図 2.2.6　住宅用太陽光発電システムの累積導入件数の推移

出所：図 2.2.2 に同じ。住宅・土地統計調査は，総務省「平成 20 年住宅・土地統計調査」，同「平成 25 年住宅・土地・統計調査」による。

(2) 非住宅用

従来，国内の PV システム市場は住宅用が主用途であり，2000 年代には導入容量の約 8 割を住宅用が占めていた。非住宅用では公共施設等において先導的に導入されるケースはあったものの，経済性が乏しい状況にあって普及は限定的であった。

2009 年 11 月の余剰電力買取制度開始後に徐々に市場が拡大し，2012 年 7 月の再生可能エネルギーの固定価格買取制度への移行後，爆発的に導入が進んだ。2015 年度には単年度で約 1,000 万 kW が導入されており，これは住宅用 PV システムの累積導入容量を上回る水準である。この結果，2014 年度と 2015 年度は年間導入容量における住宅用のシェアが 1 割を下回っている（図 2.2.7）。

FIT 制度における非住宅用 PV システムの買取条件は住宅用と異なり，通常，発電量の全量が 20 年間にわたり買い取られる。その分，買取単価は低くなるが，導入コストが 20 年以内に回収できるように設定される点は住宅用と同じである。

図 2.2.8 に累積導入容量の推移を示す。2015 年度までに全体では 3,415 万 kW，住宅用は 807 万 kW が導入されている。非住宅用は 2013 年度に住宅用を上回り，2015 年度には 2,608 万 kW となっている。

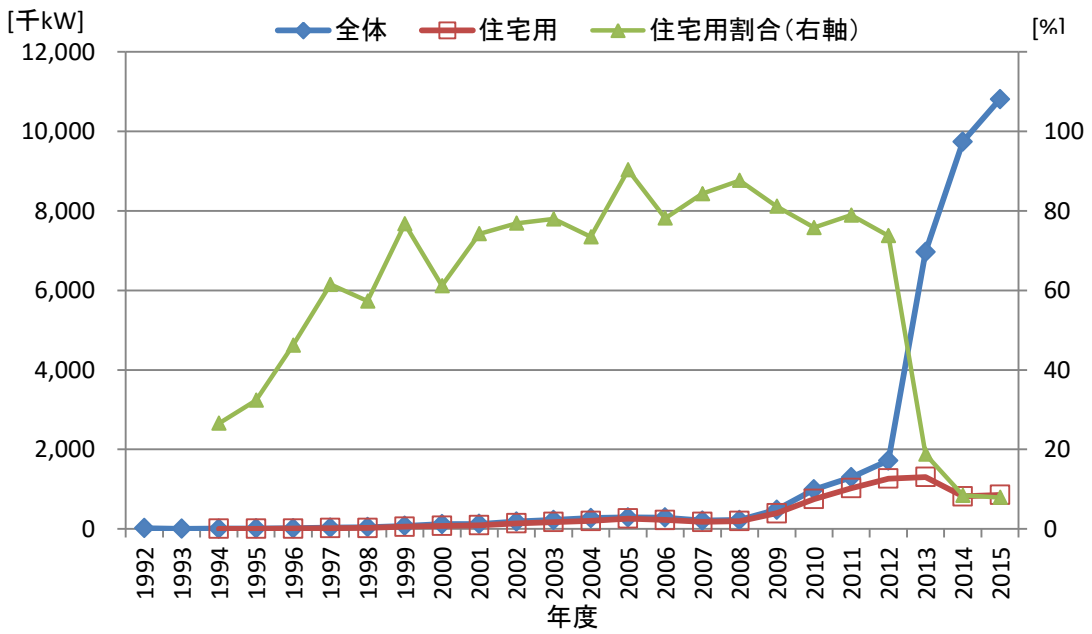


図 2.2.7　PV システムの年間導入容量の推移

出所：

全体；IEA PVPS [2-1)]

住宅用；　図 2.2.2 に同じ

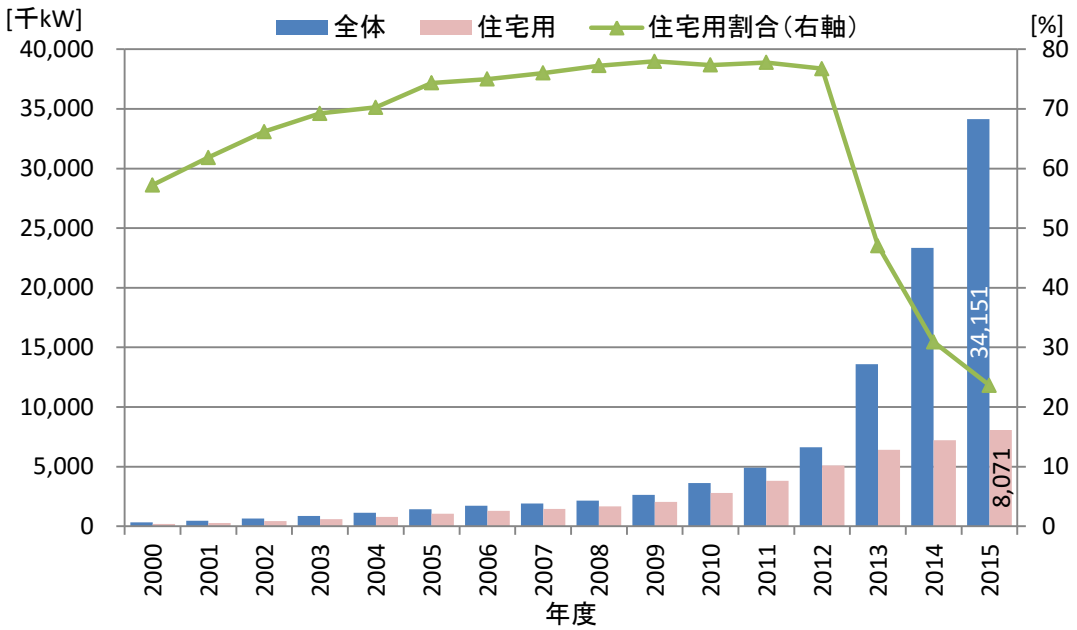


図 2.2.8　PV システムの累積導入容量の推移

出所：図 2.2.7 に同じ

2.2.3 普及支援策の見直し

(1) 固定価格買取制度における買取費用の増大

FIT 制度は PV システムの普及拡大の原動力となったが，電力の買取費用は「賦課金」として電気料金に上乗せして徴収されている[3]。図 2.2.9 に固定価格買取制度における賦課金単価（1kWh 当たりの負担金）を示す。2012 年度に 0.22 円/kWh だった賦課金単価は，2017 年度には 2.64 円/kWh となり，5 年間で 10 倍以上の水準に上昇している。一般家庭の標準的な電気使用量を月間 300kWh とすると，2017 年度は月額 792 円の負担となる[4]。この 2017 年度の賦課金単価（2.64 円/kWh）の前提となる買取費用の想定額は年間で約 2.7 兆円に達している。

これまでのところ FIT 制度では，運転開始までに要する期間（リードタイム）が比較的短期間である PV システムが導入量の大半を占めている。2016 年 12 月までの導入容量は住宅用と非住宅用を合わせて PV システムの構成比が 87%となっている。買取金額（実績）の累計は約 4.9 兆円であり，このうち PV システムが 79%を占めている（図 2.2.10）。

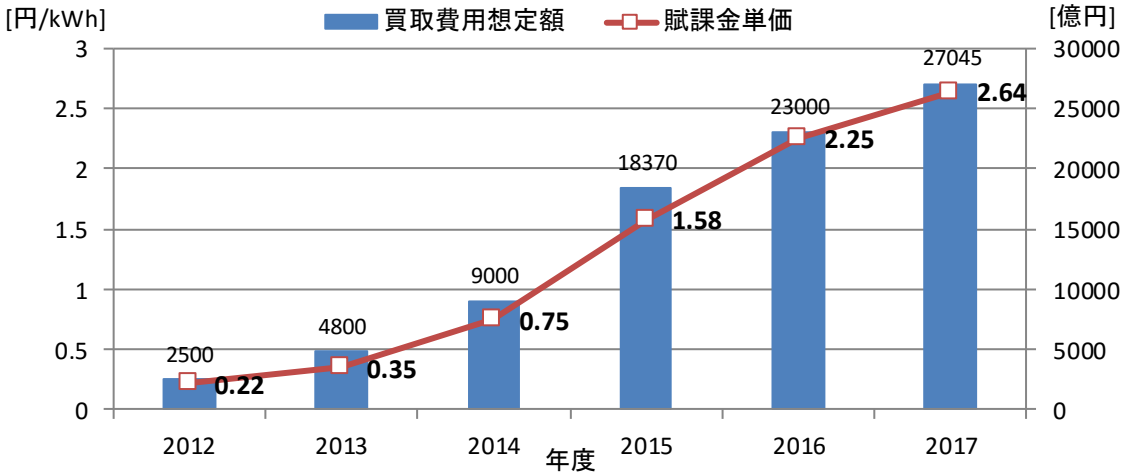


図 2.2.9 再生可能エネルギー固定価格買取制度賦課金単価の推移

出所：経済産業省資源エネルギー庁 [2-9)]

[3] エネルギー多消費産業等では賦課金の負担が減免されている。

[4] 太陽光発電の余剰電力買取制度（2009 年 11 月～2012 年 6 月）に係る賦課金は，別途 2014 年 9 月分の電気料金まで上乗せされていた。

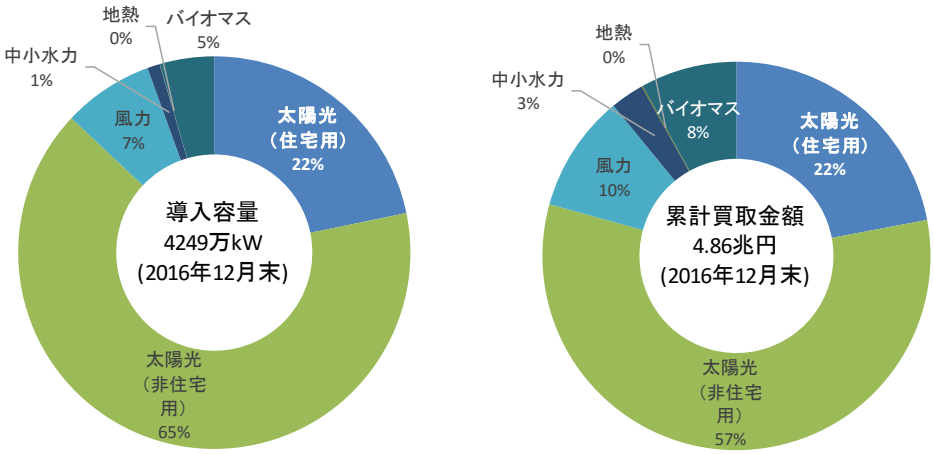


図 2.2.10　再生可能エネルギー固定価格買取制度における電源種類別導入容量と電源種類別累計買取金額

出所：経済産業省資源エネルギー庁 [2-10)]

(2) 固定価格買取制度の見直しの概要

政府は FIT 制度による再生可能エネルギー電源の導入が PV システムに偏っていること，国民負担の増大の懸念があることなど，課題が顕在化してきたことを背景に，FIT 制度の根拠法令である「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」を改正し，2017 年 4 月に施行した（図 2.2.11）。

PV システムは導入容量の 9 割弱を占めていたが，潜在的にはさらに PV システムへの偏りが強まる可能性がある。従来の制度下で，認定を受けながら未稼働の非住宅用 PV システムが, 2016 年 12 月末時点で約 4,800 万 kW も存在しているためである。これは同じ時点の既導入容量よりも大きく，すべてが導入された場合，国民負担は大幅に増大するおそれがあった。

大量の未稼働が発生した原因として，土地・設備・資金が予定通り確保できていないケースや，出力変動の大きい PV システムを大量に電力系統に接続することで電力系統が不安定化するおそれがあり，電力系統への接続契約が保留されたケースがあると考えられる。改正後の FIT 制度では，導入の準備が整い，電力会社との接続契約が完了していることが認定の条件とされた。

その他にも政府は，PV システムについて大規模案件（2,000kW 以上）に対する入札制度を導入すること，2017 年度以降の 3 年間の買取単価の低下幅を，他の再生可能エネルギー電源より大きく設定することなどにより，PV システムへの偏りの是正と導入コストの低減を図ろうとしている。

なお, 2016 年 6 月末までの未導入の案件については 2017 年 3 月末までに接続契約を完了できない場合，原則として認定が取り消されることとなり，約 2,800 万 kW 分

（PV システム以外を含む）の認定が失効している [2-11]。

図 2.2.11　再生可能エネルギー固定価格買取制度の見直し

出典：経済産業省資源エネルギー庁 [2-9],p.4

2.3 普及促進期から社会的定着期へ向かう太陽光発電システムの課題

FIT 制度の導入以前には，PV システムをいかに導入していくかが社会の主たる関心事であった。しかし，一定量の導入が進んだ現在では，導入後にどのように利用（運用管理）され，役割を終えた後，どのように処分（廃棄）されるのかも大きな関心事となっている。

運用管理に関わる課題に取り組まなければ，性能低下やトラブル等の不利益やそれに伴う導入者の不満への対処が不十分となり，使用後のリプレースや次世代における新規導入に結びつかないおそれがある。また，PV システムは天候次第で発電量が変動するため，大量導入時には電力需要とのバランスを確保するための運用管理も必要となり，社会に定着するために解決すべき課題がある。さらに，廃棄に関わる課題に取り組まなければ，使用済みシステムの放置や不法投棄，有害物質による汚染，最終処分場の負荷増大など新たな環境問題や社会問題を引き起こすおそれがある。

こうした課題に対応し，PV システムが一時的な普及に留まることなく，導入量が安定的に推移し，リサイクルや適正処分が実施され，永続的にエネルギー供給システムあるいは建築設備として重要な役割を担う状態を，本研究では PV システムが社会的に定着した状態と考える。

PV システムは未だ普及促進のための支援が必要であるが，今後，普及促進期から社会的定着期へ移行していくことが期待される。FIT 制度を所掌する経済産業省資源エネルギー庁新エネルギー課の山崎琢矢課長は，FIT 制度の見直しの背景について，「太陽光発電を取り巻く政策的環境は，これまでの大量導入を促進する時期から，社会への定着や自立化を実現する時期へ，大きく転換してきました」[2-12),p.3] と述べている。また，NEDO 技術開発機構が 2014 年に発表した太陽光発電開発戦略（NEDO PV Challenges）では，策定にあたり，「太陽光発電の普及を進めるための戦略ではなく，太陽光発電普及後の社会を支える戦略として検討する」ことや「「発電コストの削減」だけでなく，太陽光発電の大量導入社会で必要な課題を包括的に検討する」ことに留意したと示されている [2-13),p.2]。本研究の問題意識は，これらの見解と符合する。

以上のように，PV システムは未だ経済的に自立していない段階にあるが，既に大量の PV システムが導入され，今後も導入量の拡大が続くことが期待されていることから，今後は社会的定着に向けて運用管理や廃棄に関わる課題への対応に，力点を移していくことが求められていると考えられる。

本節では，導入，運用管理，廃棄に関わる課題を整理し，本研究で取り組む課題の位置づけを明らかにする。

2.3.1 導入に関わる課題

FIT 制度の導入により，PV システムの導入量は急増したが，未だ多くの導入余地があり，今後も継続的に導入が進むことが期待される。そのためには引き続き，発電性能の向上や導入コストの低減が必要であり，当面は普及支援策の継続が望まれる。

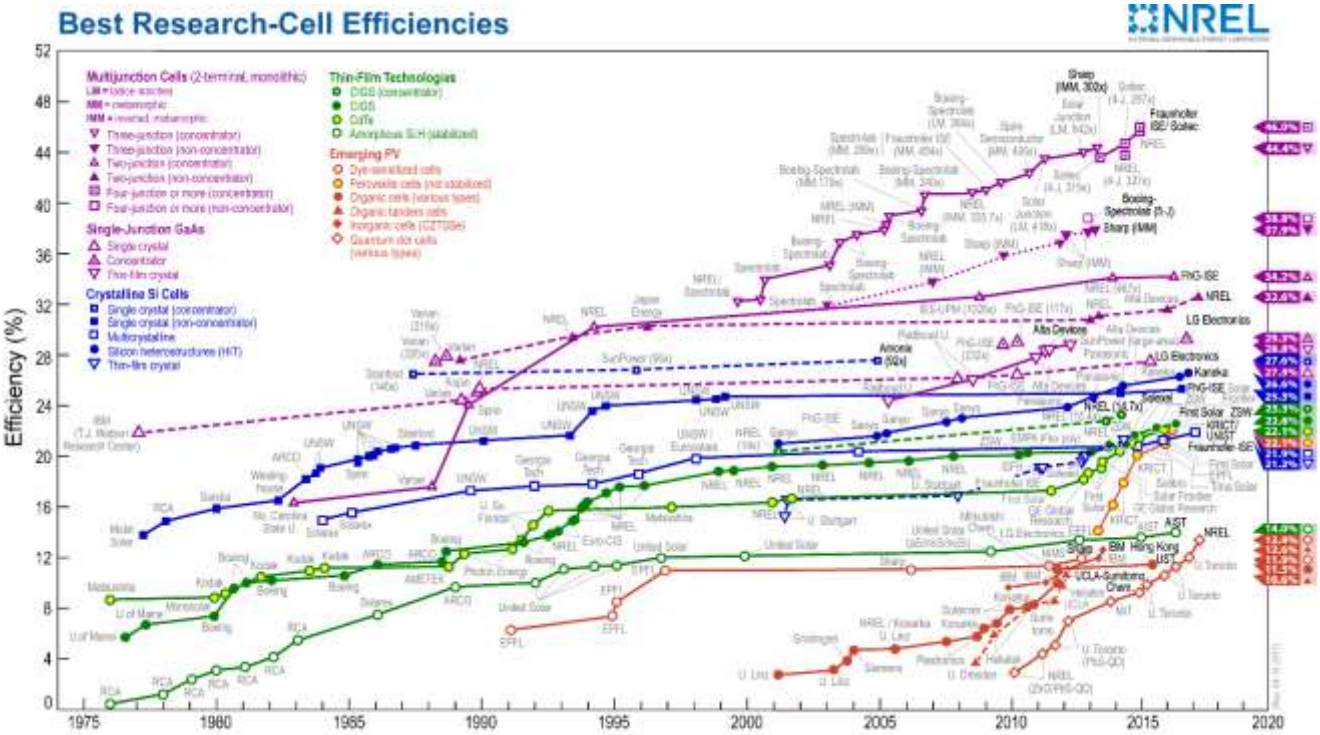
(1) 発電性能の向上

PV パネルの変換効率を向上させ，太陽エネルギーから得られる電力を増やすことは今後も基本的な取り組み課題である。単純に言えば，変換効率が 2 倍になれば，発電容量当たりの PV パネルの面積や重量は 2 分の 1 になる。住宅用 PV システムでは屋根の条件（方位・角度）や面積に制約を受けるため，変換効率が高い PV パネルの方が有利である。住宅の耐震性の観点でも重量が軽い方が望ましい。面積が小さくなれば，屋根が狭小あるいは複雑な形状である，一部に日影が生じる，などの悪条件から従来導入が見送られていた住宅にも，導入が期待できるようになる。また，PV システム導入のための資材（架台等）も減少し，導入コストの低減に寄与するほか，撤去や処分に関わる負担も小さくなる。

PV パネルを構成する最小単位である太陽電池セルの変換効率の向上については，研究機関やメーカーによる競争が長年続いている。米国・国立再生可能エネルギー研究所が整理している資料（図 2.3.1）によると，2017 年 4 月時点の変換効率の最高値は 46.0%であり，これは異なる化合物半導体を 4 層重ね合わせた，4 接合太陽電池セルで達成されたものである[5]。単結晶シリコン太陽電池（非集光型）の最高値は 25.3%，多結晶シリコン太陽電池では 21.9%に達しており，変換効率の向上は続いているものの，近年の向上ペースは緩やかになっている。一方，新材料を用いた太陽電池では，ペロブスカイト太陽電池の変換効率が近年急速に向上し，注目されている。

政府では各種太陽電池の変換効率の向上に関する中長期目標を掲げている（表 2.3.1）。これによると PV パネル（モジュール）については，2017 年から 2025 年に 4～7%ポイントの改善を目指している。また，2050 年には変換効率 40%を達成することを目標としている。

[5] 多接合ではない単層の太陽電池の変換効率は理論的に 30%程度が限界とされている（ショックレー・クワイサー（Shockley-Queisser）限界）。異なる波長の光を吸収する太陽電池を積層することで，この限界を超える効率を得ることができる。



＊ This plot is courtesy of the National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.

図 2.3.1　太陽電池セルの変換効率の変遷（2017 年 4 月 14 日版）

出典：米国・国立再生可能エネルギー研究所（NREL）

URL: https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png

表 2.3.1　太陽電池セル・モジュール変換効率の目標

	太陽電池 1)	現状	2017 年		2025 年		2050 年
		モジュール (%)	セル (%)	モジュール (%)	セル (%)	モジュール (%)	モジュール (%)
個別技術の開発目標	結晶シリコン 2)	～16	25	20	(30)	25	40%の超高効率太陽電池（追加開発）
	薄膜シリコン	～11	18	14	20	18	
	CIS 系	～11	25	18	30	25	
	化合物系 3)	～25	45	35	50	40	
	色素増感	－	15	10	18	15	
	有機系 4)		12	10	15	15	

1)　セルは技術の到達水準を示す指標で、研究室での小面積セル。モジュールは実用化技術段階。
2)　結晶シリコンは単結晶、多結晶などを区別せず、シリコン基板を用いた太陽電池として設定。
3)　集光時の変換効率。
4)　新しい太陽電池として有機系太陽電池にも開発目標を設定した。
5)　モジュール目標を達成するために最低限必要なセルの変換効率。

出典：NEDO 技術開発機構 [2-13),p.35]

(2) 導入コストの低減

発電性能の向上と共に，導入コストの低減を進め，発電コスト（電力 1kWh 当たりのコスト）を引き下げていく必要がある。

政府は PV システムの FIT 制度からの自立を目標に，低コスト化を推進している（表 2.3.2）。住宅用 PV システムについては，2020 年以降の早期に自立化し，余剰電力が卸電力市場取引価格（2016 年度 FIT 買取単価の想定では 11 円/kWh 程度）で買い取られる環境でも導入が進むことを目指している。そのためには前述の通り，導入コストが約 21 万円/kW 以下に低下する必要がある。

低コスト化に向けて政府では，①PV パネルの製造コストの低減，②PV パネルの変換効率の向上，③パワーコンディショナーの長寿命化・高効率化，などの技術開発に取り組んでいる [2-12]。

表 2.3.2　PV システムのコスト目標

対象	目標	備考
PV 共通	FIT 制度からの自立	
住宅用 PV	2019 年に FIT 買取単価が家庭用電力料金単価並み	2019 年度の買取単価は 24 円/kWh に設定された。（表 2.2.2）
	2020 年以降，早期に売電価格が電力市場価格並み	調達価格等算定委員会による買取単価の検討では，余剰分を卸電力市場取引価格（11 円/kWh 程度）で売却すると想定されている。自家消費の価値（24 円/kWh）と合わせて，この水準で自立する。
非住宅用 PV	2020 年の発電コスト 14 円/kWh	システム価格 20 万円/kW，運転年数 25 年，設備利用率 15%の前提で，メンテナンス・廃棄・オペレーションを含め 13.21 円/kWh。
	2030 年の発電コスト 7 円/kWh	システム価格 10 万円/kW，運転年数 30 年，設備利用率 15%の前提で，メンテナンス・廃棄・オペレーションを含め 6.87 円/kWh。

出所：経済産業省資源エネルギー庁 [2-9]

注：非住宅用 PV の備考欄の内容は NEDO 技術開発機構 [2-13],p.58 を参照。

(3) 普及支援策

2.2 節で示したように，政府は再生可能エネルギー電源の導入が PV システムに偏っていることを問題視し，FIT 制度における PV システムからの買取価格を 2017 年度から 3 年続けて引き下げることを決定している。従来毎年，実際の導入コストの低減傾向を踏まえて買取価格が見直されてきたが, 改正された FIT 制度では, 将来の「価格目標」にも基づいている。

政府は多段階の流通構造が住宅用 PV システムの高コスト要因になっている[2-4),p.10-11] として，その是正により，コストの低減が可能とみているが，期待通りに導入コストの低減が進まなければ，経済的に元が取れないケースが増え，導入量が減少する可能性がある。流通コストの削減が期待通り進まず，導入現場での過度なコスト削減が施工品質の低下を招くおそれもある。従って，制度の見直しによる PV システム市場の変化を注視していく必要がある。

PV システムは 2020 年代のできるだけ早期に FIT 制度から自立することが期待されている。既に導入補助も終了しているため，政府の直接的な普及支援策は 2020 年代に無くなる可能性が高い。今後は，PV システムの運用管理・廃棄に関する情報提供や PV システム由来の電気が有する環境価値の取引を活発にするなど，長期間の利用に向けた，間接的な PV システムへの支援が求められる。

2.3.2 運用管理に関わる課題

(1) 長期発電性能の維持

改正 FIT 制度では，発電システムの認定を受けるにあたって，事業計画の提出が必要となった。政府は事業計画を策定するためのガイドライン[2-15]を示している。PV システムに関する事業計画策定ガイドラインの構成を表 2.3.3 に示す。ガイドラインでは，企画立案（第２章第１節）と設計・施工（第２節）という導入段階の計画に加え，運用・管理（第３節），撤去及び処分（第４節）において導入以降の段階における計画の策定が求められている[6]。

表 2.3.3　事業計画策定ガイドライン（太陽光発電）の構成

第１章　総則
第２章　適切な事業実施のために必要な措置
第１節　企画立案
第２節　設計・施工
第３節　運用・管理
第４節　撤去及び処分（リサイクル、リユース、廃棄）
付録

出所：経済産業省資源エネルギー庁[2-15]

運用管理面の問題意識としてガイドラインでは，以下に引用するように，保守点検・維持管理のための計画や体制の不備に起因する発電量低下や不具合の発見・対処の遅れが挙げられている。

> *事業計画の段階において、保守点検及び維持管理計画や体制を検討していなかったため、運転開始後に発電電力量の低下や不具合が発生しているにもかかわらず、発見や対処が遅れる、あるいは放置されたままになっているという事例が報告されている。その原因の一つとして、太陽光発電事業者に保守点検及び維持管理の必要性に関する知識や、実際の保守点検及び維持管理のノウハウが不足しており、適切な計画の策定や体制の構築がなされていないという点が挙げられている。*
>
> （出典：経済産業省資源エネルギー庁[2-15],pp.19-20）

[6] 撤去及び処分の課題については次項で検討する。

運用中の発電性能の低下は，PV システムの導入者にとって重大な関心事であるが，最低でも発電量の監視と日射量等による評価が必要であるため，見過ごされる場合がある。この結果，導入コストの回収が計画通りに進まない，回収が不可能になる，といった事態が生じかねない。

FIT 制度における買取単価の算定では，発電量が 20 年間一定で推移することが前提とされている。制度の開始当初，性能低下による発電量の減少を考慮することが検討されたものの，「劣化率については，複数年使用した後の太陽光パネルの公称出力からの出力低下がどの程度の水準であるかという点について，確立したデータが存在していない。」[2-16),p.7] という理由で見送られ，現在に至るまで，性能低下は前提に織り込まれていない。

1.3 節で述べたように，発電性能の経年低下傾向について Jordan & Kurtz [2-17)]が過去 40 年間に世界各国で実施された既往研究をレビューし，1,920 件の PV パネル（モジュール）または PV システムにおける発電性能の経年低下率を整理している。これによると，性能低下率の中央値は年率 0.5%とされている[7]。仮に年率で 0.5%の性能低下が生じる場合，20 年間の発電量は性能一定の場合に比べ 5%程度減少する。

このような発電性能の低下傾向に関する実態を継続的に把握し，発電性能の低下原因の検討を通じて信頼性の向上に向けた技術開発に取り組むことが重要である。

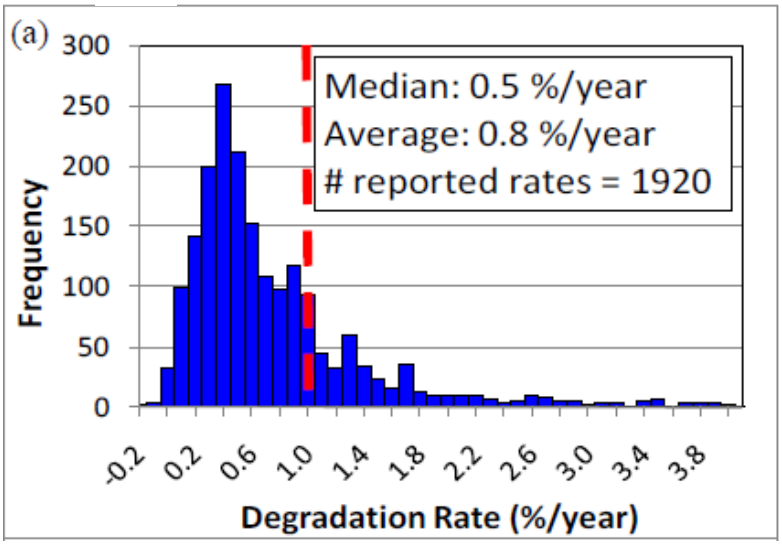


図 2.3.2　PV モジュール・PV システムの発電性能経年低下率

出典：Jordan & Kurtz[2-17)]

[7] 平均値は 0.8%である。なお，1 枚ずつの PV パネル（モジュール）と PV システムを区別していない。

(2) 導入者の評価向上

導入初期の PV システムは既に導入から 20 年以上が経過しているが, 長期使用期間中のトラブル，発電性能の低下，パワーコンディショナーや PV パネルの交換といったネガティブな側面や，環境負荷の小さい電気を使用すること，電気代が減少して売電収入も得られることといったポジティブな側面について，導入者がどのように評価しているか，従来，あまり注目されてこなかった。

PV システムの開発や導入にこれまで多額の公的費用を投入してきたことを考えれば，社会全体として PV システムの運用管理実態に注目し，導入者の評価を向上させる（低下させない）取り組みが必要であり，そのためには導入者の意識を継続的に把握していくことが必要である。

導入者の評価の高低は，まず，導入者が将来リプレースの意向を持つか否かに影響し，さらに他の新しいエネルギーシステム技術に対する信頼感に影響すると考えられる。また，導入者の高い評価は家族・親類，友人・知人，近隣の住民に良い評判として伝播し，普及の拡大に寄与すると考えられる。

導入者の意識は発電量やそれによる経済的便益に留まらず，導入時の施工ミスの経験，停電時の PV システムからの電気の使用経験，PV パネルのデザイン面での評価なども関係すると考えられる。

導入者の意識に注目するうえで注意を要するのは，導入理由が時代と共に変化している可能性があることである。FIT 制度の導入以前においては，PV システムは経済的に元が取れない製品であったため，エネルギー・環境問題への貢献や自宅で発電ができることへの興味など，非経済的な価値を重視した導入者が多かったと予想されるが，FIT 制度導入以降，経済性を重視した導入者が増えていると考えられる。

(3) 大量導入による電力系統の制約：売電から自家消費へ

電力の需要と供給は常時バランスをとる必要があり，供給が需要を上回る場合にも停電を引き起こすリスクがある。PV システムや風力発電のように出力変動が自然任せの電源が大量に導入された状況では, それらの電源の出力が大きく上昇したときに, 火力発電の出力を最低まで下げる，揚水式発電の揚水運転を行う（電力を消費する）等により，バランスをとることになる。また，夕方に PV システムの発電量が大きく減少する際には，逆に火力発電の出力を上げる，揚水式発電で発電する等の対応が行われる。

しかし，それらの調整力の範囲を超えて PV システム等が導入されている場合，需給バランスを確保するために，止む無く PV システム等の出力を抑制する必要が生じる。FIT 制度では，大規模な PV システムや風力発電に対して，出力抑制の仕組みが取り入れられていたが，それでも電力会社から接続契約が保留されるケースが増えた

ことから，2015 年 1 月より小規模な住宅用 PV システムを含め，遠隔制御で出力抑制ができるようにルールが改正されている。

今後も PV システムや風力発電の導入が期待されるなか，出力抑制は導入者にとって不利益であり，また，再生可能エネルギーの有効利用と CO_2 排出量の削減の観点からも望ましいことではない。電力系統の受け入れ量を拡張するためには，送配電設備の増強や蓄電池の導入などが必要になるが，その費用は便益に見合うものであるかの検討や，費用負担のあり方が論点となっている。

こうした背景から，政府では自家消費型の PV システムの導入を促進する方針を示している [2-12]。具体的にはゼロ・エネルギー・ハウス（ZEH）やゼロ・エネルギー・ビル（ZEB）の推進，自家消費型に対する事業者支援の実施などが挙げられている。

住宅用 PV システムの買取単価は 2019 年度に 24 円/kWh に引き下げされる予定であり，自家消費を減らして売電を行うインセンティブは低下する。また，2019 年度以降に 10 年間の買取が終了する住宅用 PV システムが出現し，これに対する余剰電力の買取単価は大きく低下すると見込まれているため，自家消費のインセンティブが強まると考えられる。自家消費を増やすために，蓄電池の導入，電気自動車（EV）やプラグインハイブリッド自動車（PHEV）への充電，従来深夜に稼働させていたヒートポンプ給湯機を日中に稼働することなどの対応が想定されている。

2.3.3 廃棄に関わる課題

PV システムの導入は 1990 年代から進んできたため，既に撤去・処分が発生している。廃棄段階にいたる PV システムの量は今後も増大を続け，特に FIT 制度によって 2013 年度以降に大量に導入された PV システムが 2030 年代から 40 年代にかけて，大量に撤去・処分されることが見込まれる。第 1 章 1.2 節で述べたように，環境省は PV パネルの寿命を 25 年とした場合に，その廃棄量（排出見込量）が 2040 年には 80 万 t に達すると試算している（図 2.3.3）。

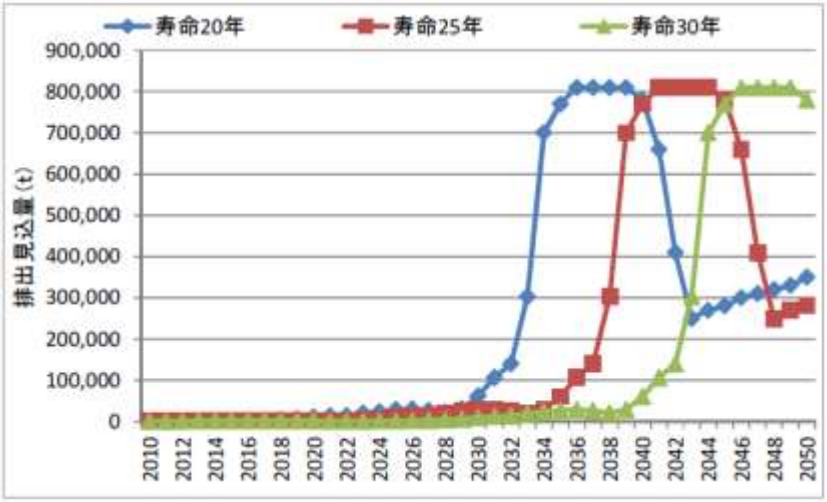


図 2.3.3　PV パネルの排出見込量

出典：使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する検討会 [2-18],p.31

(1) 環境省検討会で示された課題

環境省では PV システムをはじめとする再生可能エネルギー設備の撤去・運搬・処分についてモデル事業やリサイクル技術の評価等を実施するとともに，有識者や関係事業者等で構成される検討会（「使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する検討会」）を 2013 年度から 2 年度にわたって開催し，その結果をとりまとめている [2-18]。検討会では，PV システムの撤去・運搬・処分のあるべき姿として，物質的側面から 4 項目，経済的側面から 2 項目の課題が示されている（図 2.3.4）。

物質的側面

- 最終処分負荷と有害物質負荷の削減
- 不法投棄の極小化
- リサイクルの推進
- 長期使用やリユースによる排出の先延ばし（FIT制度との連携）

経済的側面

- 撤去・運搬・処理コストの適切な負担
- 経済的・効率的なリユース・リサイクルビジネスの展開

図 2.3.4　PV システムの撤去・運搬・処理のあるべき姿

出所：使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する検討会 [2-18],p.49

物質的側面について，検討会の報告書で示されている主な課題を以下に示す。

まず，最終処分負荷と有害物質負荷の削減が挙げられている。最終処分負荷はリサイクルが実施されない場合に相当の影響があることは前述の通りである。PV パネルの電極等において用いられるはんだには鉛が含有されている。また，セレンやカドミウムを用いた化合物系 PV パネルも存在する。従って，最終処分場の有害物質負荷を削減するためにもリサイクルが重要となる。

次に，産業廃棄物には排出者責任に基づく適正処分の義務が課されているものの，リサイクルの経済性が低く，撤去・処分の費用負担が適切になされない状況では，使用済み PV システムが不法投棄されることが懸念されている。

3 点目の「リサイクルの推進」では，特に重量比で高い割合を占めるガラスのリサイクルが課題として挙げられている。メーカーでは，化学物質の削減や解体の容易な設計等の環境配慮設計の取り組みが進められているものの，長期使用に耐えることが優先され，解体が容易ではない PV パネルもある。また，同一種類の PV パネルが大量に排出される非住宅用に比べ，住宅用は回収やリサイクルの経済性が劣る可能性があると指摘されている。

4 点目は「長期使用やリユースによる排出の先延ばし」である。長寿命化に向けてメーカーの取り組みが進められている一方，リユースについては現状では海外への輸出が見られる程度である。また，撤去の費用が十分に確保されていないために，使用後に放置され，退蔵されるシステムが発生することも懸念されている。

(2) 事業計画策定ガイドラインにおける撤去・処分

前述の改正 FIT 制度における「事業計画策定ガイドライン（太陽光発電）」では，撤去・処分（リサイクル，リユース，廃棄）についても言及されている。

まず，10kW 以上の PV システムの導入者に対して，使用後の適切な撤去・処分を行うための費用を想定し，事業計画を策定することを求めている（10kW 未満のシステムの導入者に対しては，策定に努めることを求めている）。また，撤去・処分費用を適切に確保するために，積立等の計画的な調達・手配に努めることを求めている。

次に，実際の撤去・処分の実施について，使用済みの PV システム（住宅用を含む）が廃棄物処理法において原則として「産業廃棄物」として取り扱われることを示し，法令に則って，適切に撤去・処理（リサイクル，リユース，廃棄）することを求めている。その際，環境省の「太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン」[2-19)]を参照するように努めることが併せて求められている。

2.4　本研究の位置づけ

本章で検討した PV システムをめぐる課題と想定される主因子の関係を図 2.3.5 に示す。本研究では PV システムが普及促進期から社会的定着期に向かいつつあるという認識のもと，導入，運用管理，廃棄に関わる課題のうち，特に運用管理と廃棄に関わる課題に取り組むこととし，長期発電性能や導入者の満足度など普及に影響を及ぼす因子と，普及の結果生じる課題（自家消費志向，リサイクル）を研究対象とする。

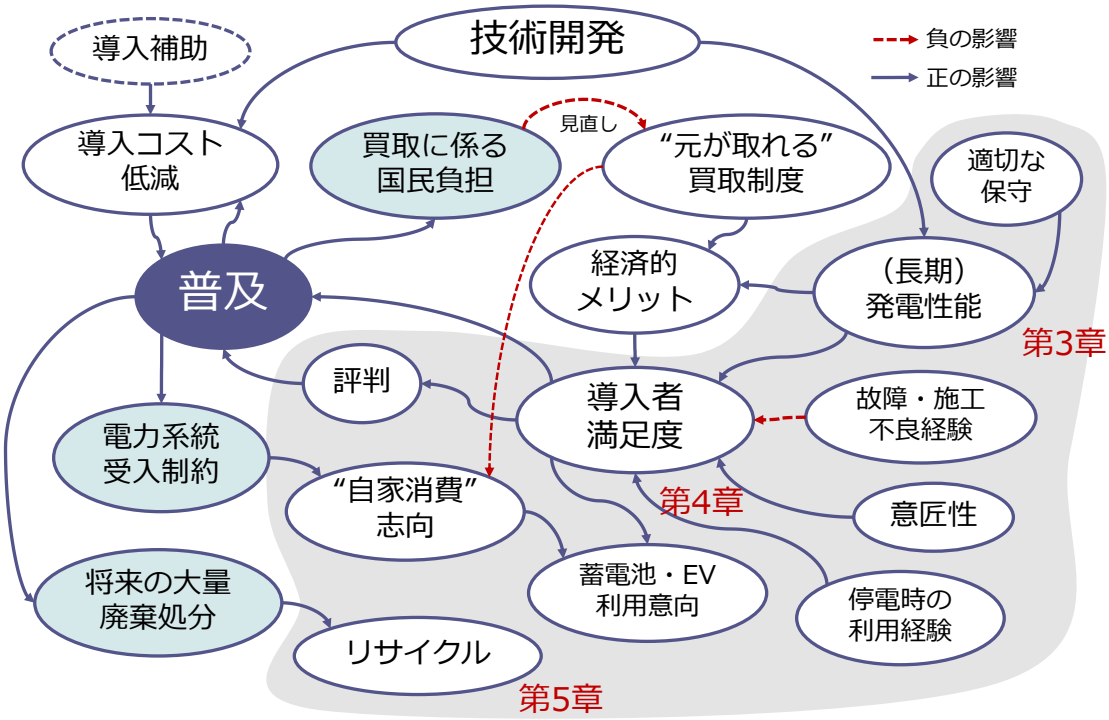


図 2.4.1　住宅用 PV システムをめぐる課題と想定される因子の関係

注：網掛け部分を本研究で主に対象とする。

第 3 章で実施する長期発電性能の評価は，実使用条件下での発電実態に基づく評価事例が少なく，今後も変換効率が向上した新しい種類の太陽電池やパワーコンディショナーが開発される見通しであることから，継続的に取り組む必要がある研究課題である。

第 4 章で実施する導入者の満足度や意向等の意識の把握と分析は，既に 200 万件の住宅用 PV システムが普及しているにも関わらず，従来ほとんど行われていないものであり，今後の普及拡大と社会への定着に向けて，これも継続的な取り組みが必要と

考えられる。また，第 4 章で併せて行う PV システムが導入されている住宅における電力消費と発電量の分析は，売電から自家消費へ向かう時期に必要な基礎的情報を提供するものと考えられる。

第 5 章で実施する使用済み PV パネルのガラス再資源化による CO_2 削減効果の評価は，将来の大量処理・廃棄に向けて，再資源化の取り組みが産業廃棄物の減量化に貢献する一方で，CO_2 排出量の増加をもたらすおそれがあるのか否か，という疑問に答えるものであり，今後のリサイクルの取り組みの推進に貢献するものと考えられる。

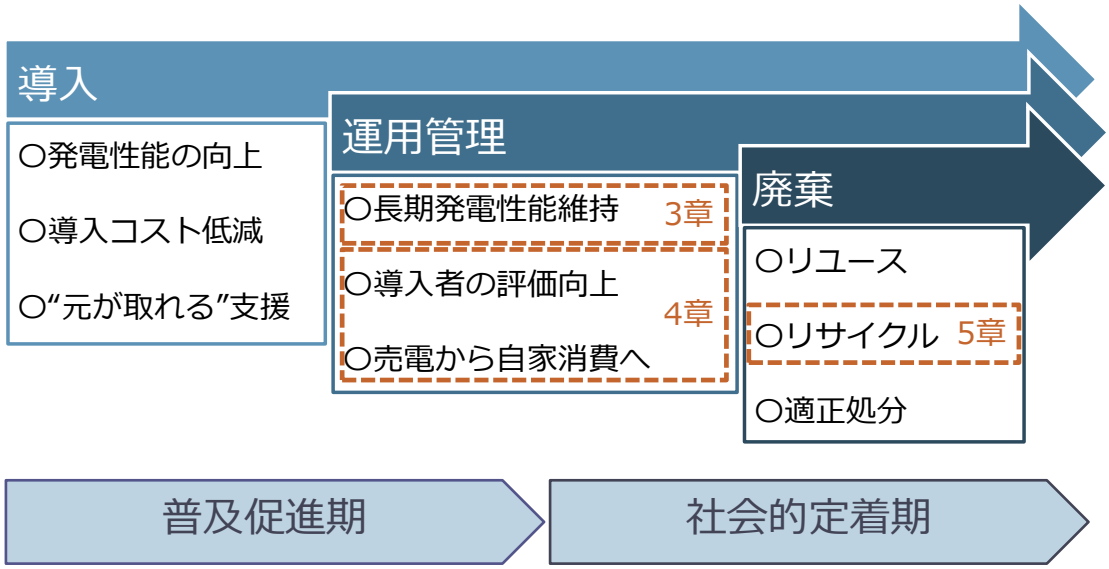


図 2.4.2　住宅用 PV システムの利用をめぐる課題と本研究の関係

第２章の参考文献

2-1) IEA PVPS: TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015, Report IEA-PVPS T1-30:2016, 2016

2-2) 一般財団法人新エネルギー導入促進協議会: 平成 20 年度住宅用太陽光発電システム導入状況に関する調査, 2009.7

2-3) 一般社団法人太陽光発電協会太陽光発電普及拡大センター: 補助金申請の都道府県別集計データ, http://www.jpea.gr.jp/j-pec/data/ （参照 2017.5.2）

2-4) 調達価格等算定委員会: 平成 29 年度以降の調達価格等に関する意見, 2016.12

2-5) 経済産業省資源エネルギー庁: 固定価格買取制度ウェブサイト,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/fit_kakaku.html
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/kakaku.html
（参照 2017.5.2）

2-6) 調達価格等算定委員会: 平成 28 年度調達価格及び調達期間に関する意見, 2016.2

2-7) 環境省地球環境局地球温暖化対策課: 平成 25 年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書, 2014.8

2-8) 調達価格等算定委員会: 第 1 回調達価格等算定委員会 資料 7, 2012.3.6

2-9) 経済産業省資源エネルギー庁: 改正 FIT 法による制度改正について, 2017.3
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/dl/fit_2017/setsumei_shiryou.pdf
（参照 2017.5.2）

2-10) 経済産業省資源エネルギー庁: 固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/statistics/index.html
（参照 2017.5.2）

2-11) 経済産業省資源エネルギー庁: 改正 FIT 法の施行に伴う認定失効の見込みを取りまとめました（ニュースリリース）, 2017.4.21

2-12) 山崎琢矢（経済産業省資源エネルギー庁新エネルギー課長）: 太陽光発電の基幹電源化に向けて, PVTEC ニュース, Vol.75, 2017.3

2-13) NEDO 技術開発機構: 太陽光発電開発戦略（NEDO PV Challenges）,2014.9

2-14) National Renewable Energy Labolatory: Best Research-Cell Efficiencies, 2017.4
https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png
（参照 2017.7.1）

2-15) 経済産業省資源エネルギー庁: 事業計画策定ガイドライン（太陽光発電）, 2017.3

2-16) 調達価格等算定委員会: 平成 24 年度調達価格及び調達期間に関する意見, 2012.4
2-17) Jordan, Dirk C., Sarah R. Kurtz: Photovoltaic Degradation Rates - An Analytical Review, NREL/JA-5200-51664, 2012.6
2-18) 使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する検討会（環境省）: 太陽光発電設備等のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書, 2015.6
2-19) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部企画課リサイクル推進室: 太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン, 2016.3

第3章 長期発電実績に基づく住宅用太陽光発電システムの性能評価

住宅用 PV システムの普及拡大に伴い，導入後の発電性能の評価が重要になっている。発電性能は経年的に低下することが知られているが，その実態の把握には長期間の継続的な監視が必要であるため，データの蓄積は不十分である。

本章では，導入時期が多様な約 4,200 件の住宅用を中心とする PV システムの発電実績データをもとに，住宅用 PV システムの発電性能の向上と導入後の発電性能の低下に関する評価を行う。

3.1 発電実績データの収集と評価の方法

3.1.1 発電実績データの収集

発電実績データとして，住環境計画研究所が提供するウェブサイト上の PV システム導入者支援サービス「ソーラークリニック」[8]（以下，「Solar Clinic」という）において，PV システムの設置者が自主的に報告したデータを使用する。データは日々追加・更新されているため，本研究では 2014 年 11 月 10 日時点のデータを使用する。このようにデータは無作為抽出の標本調査によるものではなく，ウェブ上のサービスにおいて自主的に登録されたものであるため，代表性に留意が必要である。また，長期間の評価では，データ収集率の低下に伴う偏りも生じている可能性がある。

(1) データの収集方法と登録内容

Solar Clinic は 2001 年に開設され，2002 年から設置者による PV システムの登録を受け付けている。登録の動機は Solar Clinic が提供するアレイ面日射量の推定値と発電量を比較すること，あるいは他の PV システムと発電性能を比較することで簡便に性能診断ができることであり，登録数は全国で 4,500 件を超えている。

宣伝等による登録の呼び掛けは行われていない。インターネット検索や情報系サイト等からの誘導により，設置者自ら登録するケースがほとんどを占めると見られるが，設置事業者等による代行登録も含まれる。

Solar Clinic におけるデータの登録内容は PV システムの設置場所（郵便番号），設置時期，設置条件（方位，傾斜角），各設置条件に対応する発電容量，PV システムメーカーおよび月別発電量である。設置条件における方位は 8 方位，傾斜角は 10°～

[8] 「ソーラークリニック」の URL： http://www.jyuri.co.jp/solarclinic/

40°（10°間隔）から近い条件を選択する。発電容量は原則として太陽電池容量（公称最大値）であるが，パワーコンディショナー容量での登録も許容されている。

月別発電量については，サービス提供者が月 1 回電子メールで登録を呼び掛けている。督促は行われていない。発電量はパワーコンディショナーや専用モニタ等で視認され，ウェブ上の登録フォームで入力される。発電量の期間は各月の 1 日から末日が推奨されているが，検針日等の月の途中で区切られたデータも含まれている。また，通常と異なる状況（積雪等）や PV システムの故障・修理・メンテナンス等に関する情報を入力する備考欄が各月に用意されている。

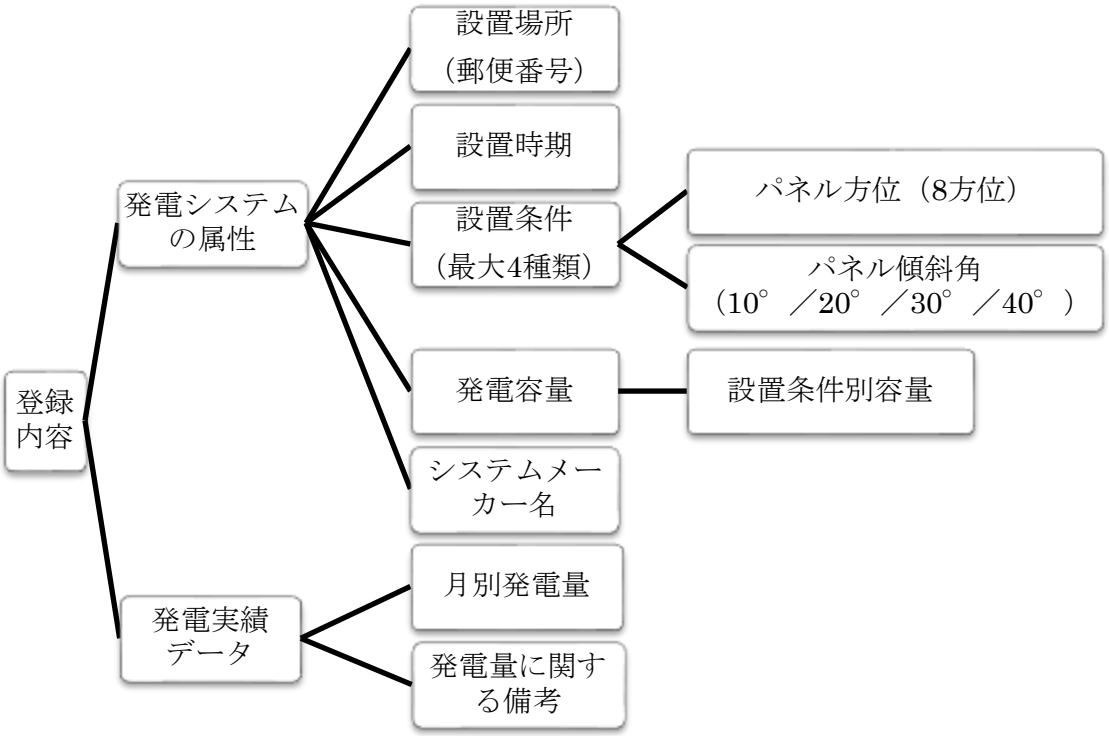


図 3.1.1　データの登録内容

(2) 評価用データの抽出

本研究では，収集された 4,559 件の PV システムの月別発電量データ 149,535 件のうち，以下のデータを除外して分析を行う。

- 発電容量 10kW 以上のシステムのデータ（ほぼ非住宅用と考えられるため）
- 設置月のデータ（日数が不足しているため）
- 外れ値：　システム出力係数（PR；定義を 3.1.3 項に示す）が 1.1 以上であって，かつ，設置月を除く全期間の PR 平均値に対する偏差が標準偏差の 2.5 倍以上であるデータについて，個別に確認したうえで誤りと判断されるもの
- 推定値：　12 ヶ月分以上の合計値が各月に按分されているもの
- 異常値：　①長期間停止が継続し運用意図がないと判断しうるもの（該当なし），②負の値（該当なし）
- 設置後に PV パネルが増設されたシステムの増設以降のデータ
- PV パネルの交換により発電性能が回復したシステムの交換以降のデータ[9]

ここで，発電量が少ない方の外れ値については除外しない。パワーコンディショナーの故障等による一定期間の停止や積雪・日影等の影響による発電量の低下なども，住宅用 PV システムの発電実態をあらわしているためである。

以上の結果，表 3.1.1 に示す通り，4,199 件の PV システムにおける約 14 万件のデータを評価に使用する。データ数（月数）別の PV システム数を図 3.1.2 に示す。最も件数が多いのはデータ数が 24～35 ヶ月のシステムであるが，データ数が 60 ヶ月分（5 年分）以上のシステムも 785 件（18.7%）含まれている。

表 3.1.1　評価用データ数

	データ数 ［システム・月］	全データ数比 ［%］	PV システム数
全データ	149,535	100	4,559
出力 10kW 未満	145,581	97.4	4,235
評価用データ	139,128	93.0	4,199

[9] 交換の確認は登録者からの報告によっているため，すべての交換事例を除外できていない可能性がある。

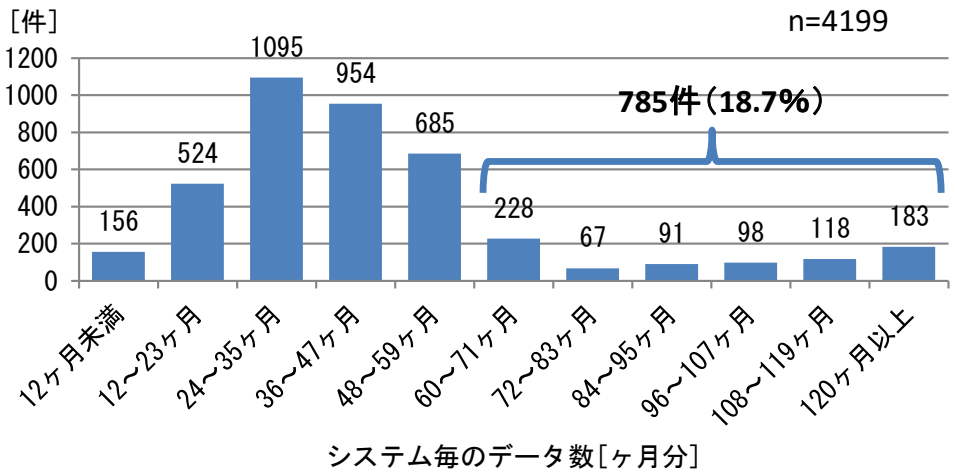


図 3.1.2　データ数別 PV システム数

3.1.2 アレイ面日射量の推定

(1) 日射量の推定方法

発電量の評価には PV システム設置場所にできるだけ近い地点の日射量データが必要である。日射量が観測されている地上気象観測所は 2000 年時点では全国で 67 地点存在したが，2014 年時点では 50 地点を下回っている。67 地点としても全国平均で 75km 四方に 1 箇所と十分ではない。

日射量は日照時間との相関が高いことが知られている。NEDO の標準気象データベースや日本建築学会の拡張アメダス気象データ [3-1)]は，地域気象観測システム（アメダス：全国約 840 地点）導入地点における日射量を推定している。アメダスは平均 21km 四方に 1 箇所設置されているため，実用的な参照データになりうる。しかし，いずれのデータベースも標準的な気象データの提供が目的であり，特定の月の日射量推定値が入手できる訳ではない。

そこで本研究ではアメダス観測値（1 時間値）に，拡張アメダス気象データで採用されている水平面全天日射量推定モデルである赤坂・二宮モデル [3-2), 3-3)]と，拡張アメダス気象データで推定精度が最高水準と評価されているアレイ（パネル）面日射量推定モデルの組み合わせとして，直散分離に Erbs モデル [3-4)]，斜面日射量推定に Perez モデル [3-5)]を適用し，全国 839 地点における方位・傾斜角別の時別日射量を推定する。

アメダス観測値に欠測がある場合の補充については拡張アメダス気象データと同じ方法を採用する。具体的には，代用補充法（近隣の観測地点のデータの補充）や直線補間などを組み合わせている。また，アメダスの日照時間の観測で使用されている日照計は 2005 年から 2009 年にかけて太陽電池式から回転式に変更されたため，日照計変更前については気象庁 [3-6)]が示す換算式を参考に日射量を補正する。

発電量の評価では，当該 PV システムの設置場所から最寄りの地点のアレイ面日射量推定値を参照する。発電量が月別値であるため，アレイ面日射量の時別推定値を月積算値に集計して使用する。

(2) 日射量の推定精度

赤坂・二宮モデルによる水平面全天日射量の推定精度については，観測精度が最も高いと考えられている舘野（1994 年）において日積算値の RMSE（二乗平均平方根誤差）が 1.28MJ/㎡・日とされている [3-3)]。本研究では月積算値または年積算値を使用するため，月・年レベルでの推定精度を舘野（1995 年～2015 年）のデータで確認すると，月積算値の RMSE が 12.5MJ/㎡・月（平均日射量 409MJ/㎡・月），年積算値の RMSE が 75.6MJ/㎡・年（平均日射量 4,910MJ/㎡・年）となる。

3.1.3 発電性能評価の指標

発電性能評価にはシステム出力係数（PR）を用いる。PR はシステム出力電力量（発電量）を，アレイ面日射量と太陽電池出力（定格出力）との積で除した値である。(3.1)式には太陽電池の標準試験条件における日射強度（1kW/㎡）が含まれるため，PR は無次元となる。

システム出力係数の大小は太陽電池の変換効率（太陽エネルギーを電力に変換する効率）の高低とは無関係である。パワーコンディショナーでの直流・交流変換ロスや温度上昇による太陽電池の変換効率の低下等の損失があるため，多くの場合，システム出力係数は 1 を下回る[10]。

$$\mathrm{PR} = \frac{E_{PCO}}{P_{AS} \cdot H_A / G_S} \tag{3.1}$$

PR：システム出力係数

E_{PCO}: システム出力電力量［kWh/月］

P_{AS}: 太陽電池出力[kW]

H_A: アレイ（パネル）面日射量[kWh/㎡/月]

G_S: 標準試験条件における日射強度 = 1[kW/㎡]

以上をまとめ，PR の算出までのフローを図 3.1.3 に示す。各 PV システムの月別発電量（139,128 件）に対応する月別 PR を算出する。

[10] 以降で示すが，システム出力係数が 1 以上になるシステムがみられる。これは実際のパネル容量が公称（カタログ表記）値を上回る場合があることなどによると考えられる。

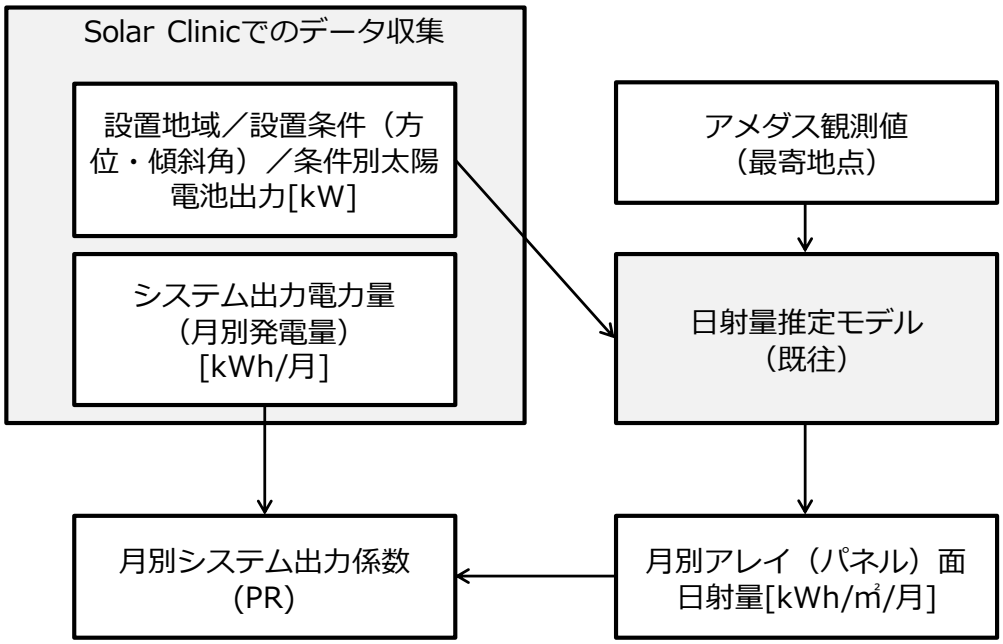


図 3.1.3　システム出力係数の算出フロー

3.2 発電実態と発電性能評価

3.2.1 システムの属性

本項では評価用データ（以下，「本データ」という）に含まれる PV システム 4,199 件の主な属性を明らかにする。

(1) 設置地域

本データの PV システム設置場所の地域分布を平成 25 年の住宅・土地統計調査 [3-7] における普及戸数と比較すると，関東甲信の割合が 7 ポイント高く，九州・沖縄の割合が 6 ポイント低い。本データの設置地域はやや偏りがある。

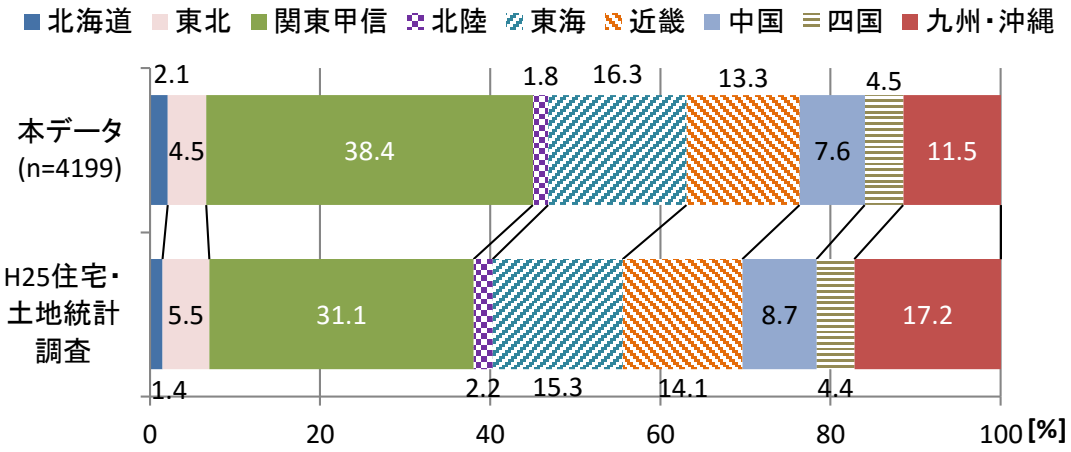


図 3.2.1 PV システムの設置地域別構成比（件数ベース）

(2) 設置時期

本データは 2009～2012 年度に導入された PV システムが 77%を占める。経済産業省資源エネルギー庁等の資料による毎年の導入件数データの累計値（以下，「総導入データ」[11]という）と比較すると，本データの設置時期には偏りが見られる。

[11] 住宅用 PV システムの各年度の導入量について統一的に把握できる統計等は存在しない。一般に，政府の補助金制度による導入量データ，PV システムメーカーの出荷データ（補助金が支給されなかった期間）および FIT 制度による導入量データを組み合わせて推計されている。本研究でも同様の方法で年度別の導入量を推計している。詳細は第 2 章（図 2.2.2）を参照のこと。

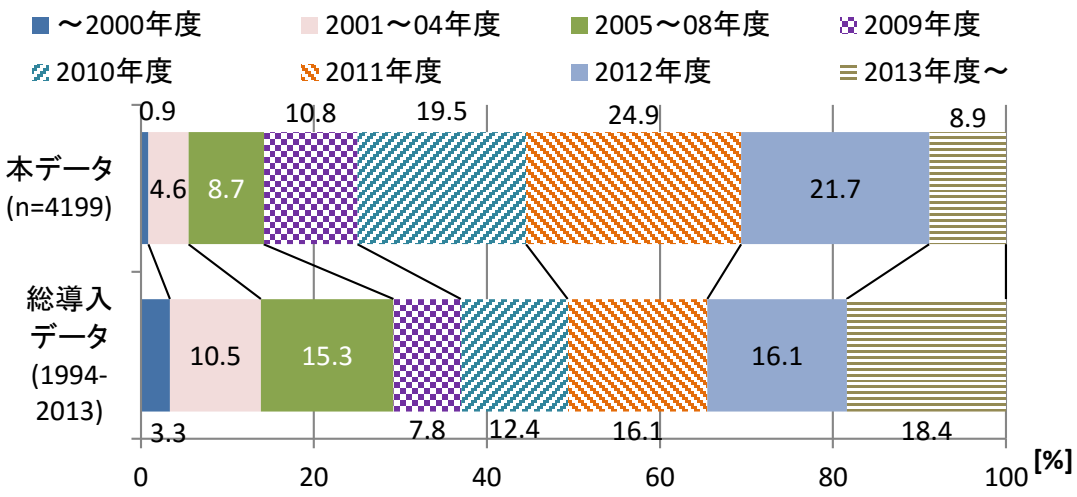


図 3.2.2　PV システムの設置時期別構成（件数ベース）

出所：総導入データの出所は図 2.2.2（p.10）に同じ。

(3) 発電容量

発電容量が 4kW 以上 5kW 未満の PV システムが最も多く，3～6kW で 78%を占める（図 3.2.2）。平均発電容量は 4.8kW であり，総導入データの平均値（4.1kW）を 0.7kW 上回る。また，平均発電容量は近年，上昇傾向にある（表 3.2.1）。

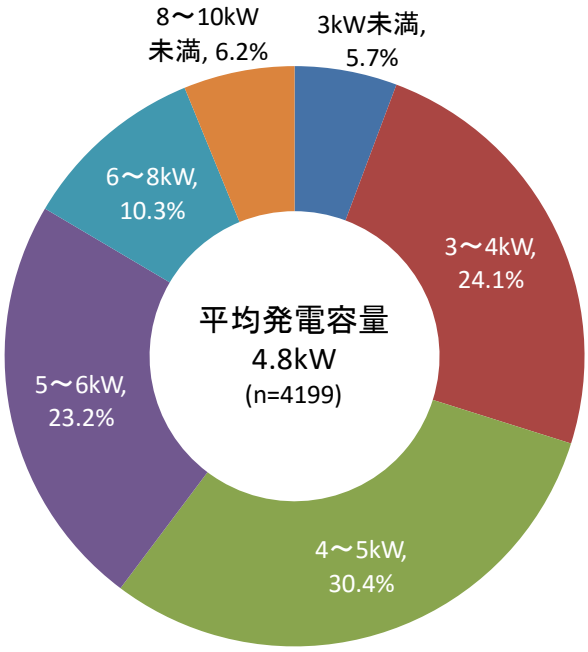


図 3.2.3　PV システムの発電容量別構成（件数ベース）

表 3.2.1　PV システムの設置時期別平均発電容量[kW]

年度	～2000	2001～04	2005～08	2009	2010	2011	2012	2013～	平均	n
本データ	3.8	4.0	4.1	4.5	4.7	5.0	5.3	5.3	4.8	4199
総導入データ(1994-2013)	3.6	3.7	3.6	3.8	4.0	4.4	4.6	4.5	4.1	

出所：総導入データの出所は図 2.2.2（p.10）に同じ。

(4) 設置条件

設置条件別の発電容量構成比を表 3.2.2 に示す。傾斜角については一般的な住宅屋根のこう配に近い 20°または 30°が全体の 85%を占めている。方位については南向きが 52%を占め，南東と南西を合わせると 79%になる。

表 3.2.2　PV システムの設置条件別発電容量構成比[%]

		方位								
		東	南東	南	南西	西	北西	北	北東	計
傾斜角	10°	0.4	1.8	6.6	1.6	0.6	0.2	0.2	0.2	11.7
	20°	3.5	4.2	18.2	5.0	3.6	0.5	0.0	0.3	35.4
	30°	4.7	6.7	25.9	6.6	4.5	0.6	0.1	0.6	49.8
	40°	0.3	0.4	1.7	0.5	0.2	0.0	-	0.0	3.1
	計	8.8	13.2	52.4	13.6	9.0	1.4	0.4	1.1	100

注：発電容量の合計は 20,344kW。

3.2.2 発電量・発電性能の実態

(1) 月別発電量の推移

毎月 100 件以上のデータが得られた 2004 年度から 2013 年度における 1kW 当たりの月別発電量を図 3.2.4 に示す。発電量には明確な季節変動がみられ，概ね 100±30kWh/kW の範囲で変動している。12 ヶ月移動平均値は 2010 年度頃までは 90kWh/kW/月程度で推移してきたが，近年では 100kWh/kW/月を超えている。

標準偏差は 10～30kWh/kW 程度で変動している。冬季の方が発電量は小さいが，標準偏差は大きい。これは PV システム間での発電量のばらつきが大きいことを表している。冬季は太陽高度が低く，設置条件（方位・傾斜角度）によるアレイ（パネル）面日射量の差が大きくなること，積雪や周辺建築物等の日影の影響を受けやすいことなどが影響していると考えられる。

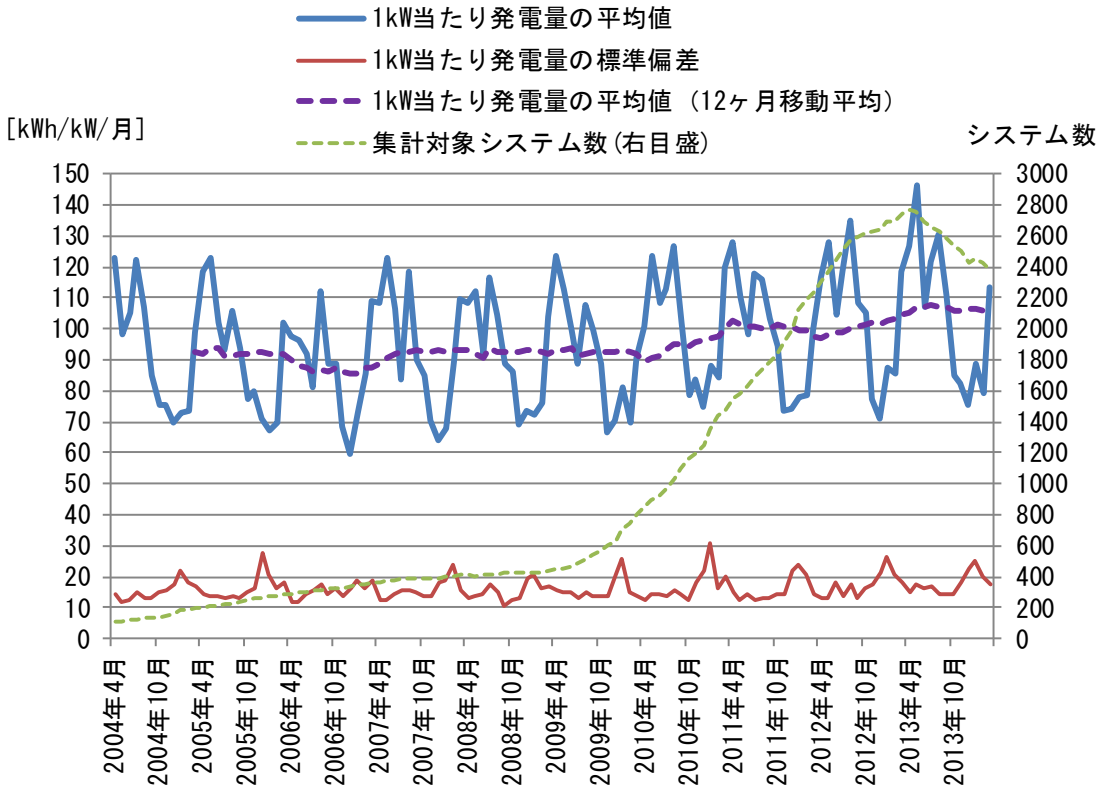


図 3.2.4 月別発電量の推移（2004～2013 年度）

発電システムの稼働状況を表す指標として，設備利用率がある。発電容量 1kW のシステムが常時 1kW 発電する場合，設備利用率は 100%である。PV システムは日射量によって発電量が変動し，夜間は発電量がゼロになるため，火力発電等に比べ，設備利用率は低い。本データでは，設備利用率は 8%～20%の間で推移している。12 ヶ月移動平均値は 2010 年度頃までは 12%程度であったが，近年では 14%程度に上昇している。（図 3.2.5）

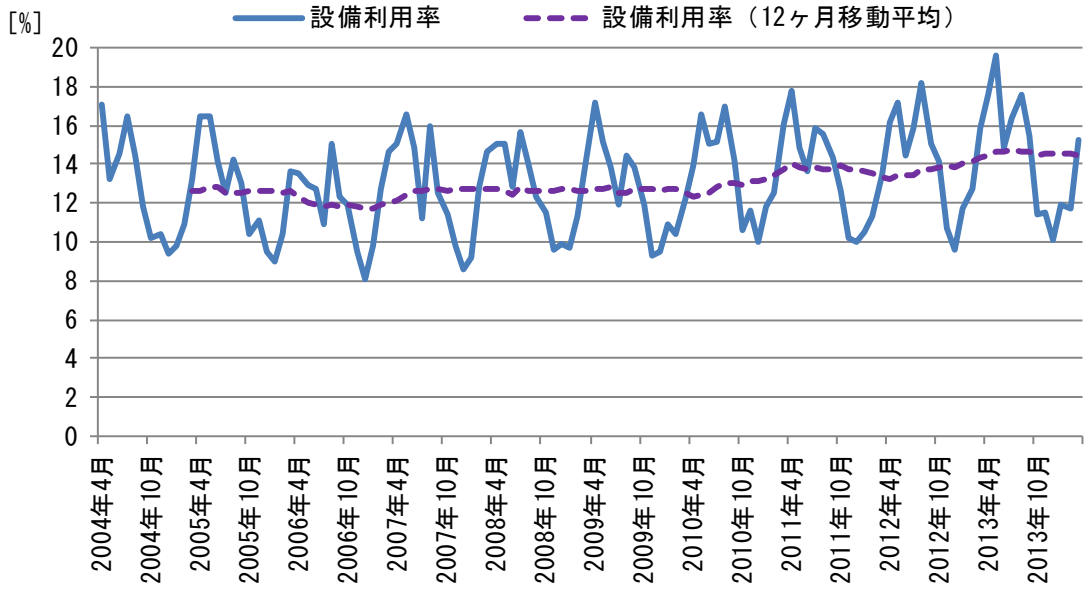


図 3.2.5　月別設備利用率の推移（2004～2013 年度）

(2) 月別システム出力係数の推移

2004 年度から 2013 年度のシステム出力係数（PR）の推移を図 3.2.6 に示す。PR には結晶系太陽電池の温度特性（高温になると効率が低下）に起因すると考えられる季節変動が見られる。

PR は緩やかな上昇傾向にあり，2004 年度の約 0.74 から 2013 年度の約 0.83 まで 9 年間で 0.09 上昇している。これは PV システムの発電性能が向上していることを示唆している。ただし，本データは前述の通り設置時期に偏りがある。また，各 PV システムのデータは全期間収集されているとは限らず，設置からの時間経過とともに収集率は低下する傾向がある。データ収集率は平均 79%と良好であるが，2012 年度以降は低下傾向にあり，2013 年度末には 60%程度に低下している（図 3.2.7）。つまり，近年のデータほど新しい PV システムにデータが偏っており，実際以上の上昇傾向を示している可能性がある。

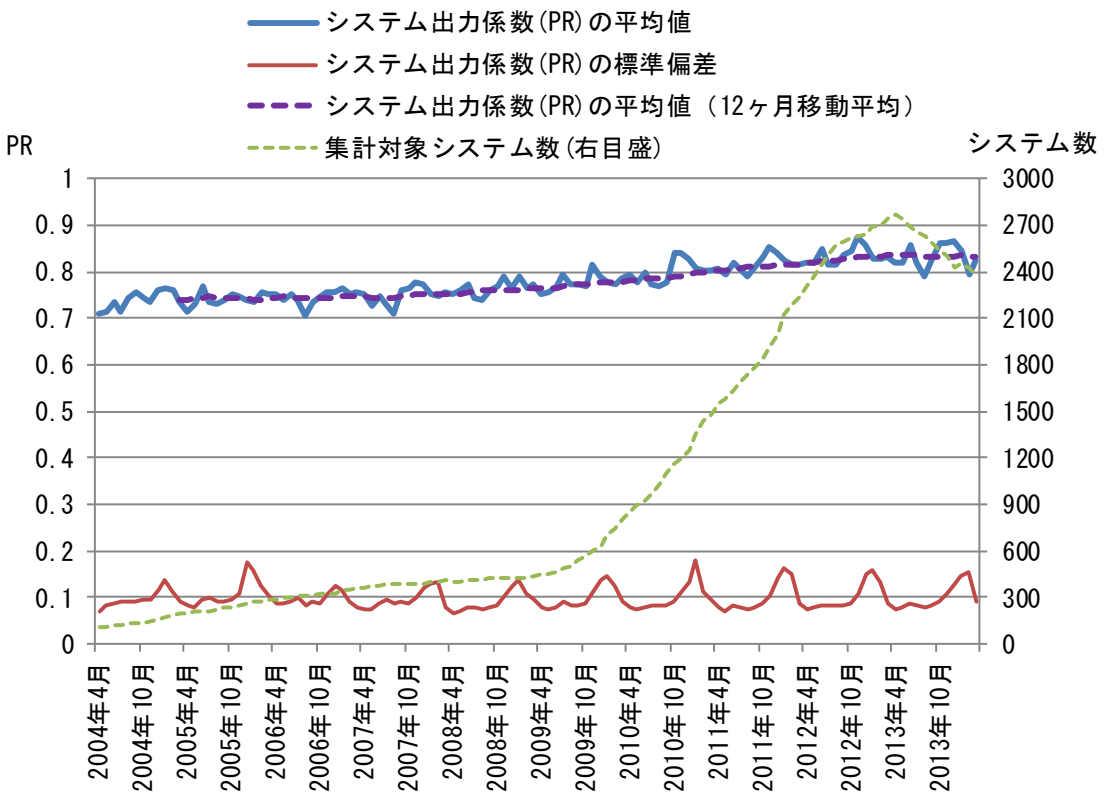


図 3.2.6　月別システム出力係数の推移（2004～2013 年度）

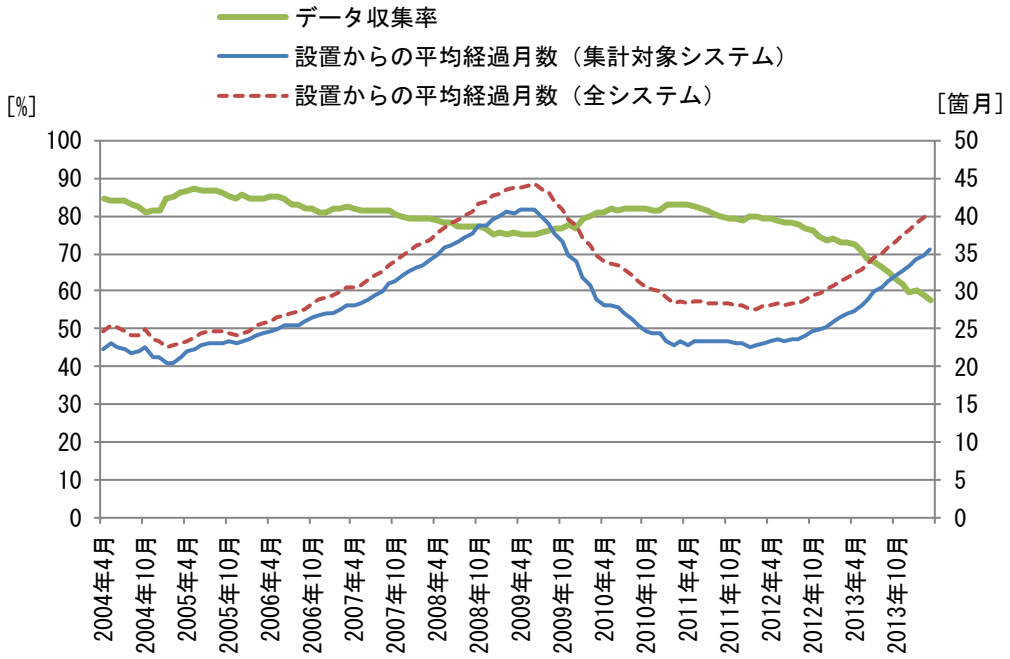


図 3.2.7　データ収集率および設置からの平均経過月数

(3) 2013 年度の年間発電量・システム出力係数の傾向

1） 分布

2013 年度の 1kW 当たり年間発電量の相対頻度分布を図 3.2.8 に，年間 PR の分布を図 3.2.9 に示す。集計対象システム数は 2,052 件で，発電量の平均値は 1,269kWh/kW/年，PR の平均値は 0.829 である。分布は左側にやや偏りが認められるが，概ね正規分布を形成していると認められる。図 3.2.9 で PR が 1 以上のシステムがあるのは，パネル容量が公称値（カタログ表記値）を上回る場合があることなどによると考えられる。なお，前述の通り，パワーコンディショナーの故障等による一時的な停止や積雪等により発電量が少ないデータを含んでいる。

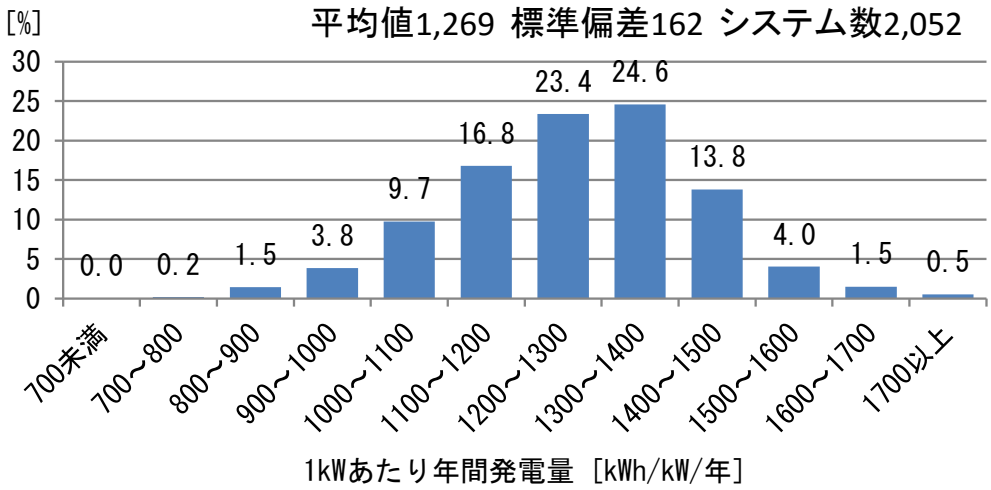


図 3.2.8 年間発電量の相対頻度分布（2013 年度）

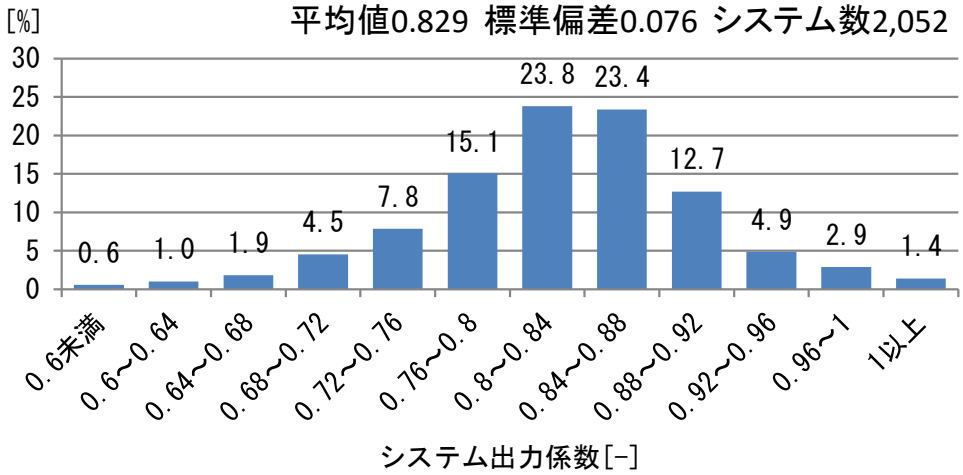


図 3.2.9 年間システム出力係数の相対頻度分布（2013 年度）

2） 地域別

地域別の年間発電量および年間 PR を表 3.2.3，図 3.2.10 に示す。最も発電量が多いのは東海で全体平均を 6%上回っている。北海道，東北および北陸の発電量は全体平均を 16%下回っている。

年間 PR では東北と北陸が全体平均を 3%下回っているが，発電量に比べ地域差は小さい。なお，積雪があると発電量は減少するが，日射量の推定では PV パネルへの積雪を考慮していないため，見かけ上，PR が低下することがある。

表 3.2.3　地域別の年間発電量・年間システム出力係数（2013 年度）

地域	システム数	年間発電量[kWh/kW/年]			年間PR		
		平均	全体=1	標準偏差	平均	全体=1	標準偏差
北海道	33	1,072	0.84	139	0.825	1.00	0.080
東北	105	1,069	0.84	145	0.806	0.97	0.084
関東甲信	795	1,303	1.03	156	0.832	1.00	0.075
北陸	39	1,065	0.84	109	0.802	0.97	0.070
東海	329	1,339	1.06	159	0.833	1.01	0.080
近畿	284	1,240	0.98	129	0.829	1.00	0.074
中国	158	1,212	0.96	131	0.817	0.99	0.072
四国	94	1,304	1.03	110	0.828	1.00	0.052
九州・沖縄	215	1,266	1.00	134	0.834	1.01	0.081
全体	2,052	1,269	1.00	162	0.829	1.00	0.076

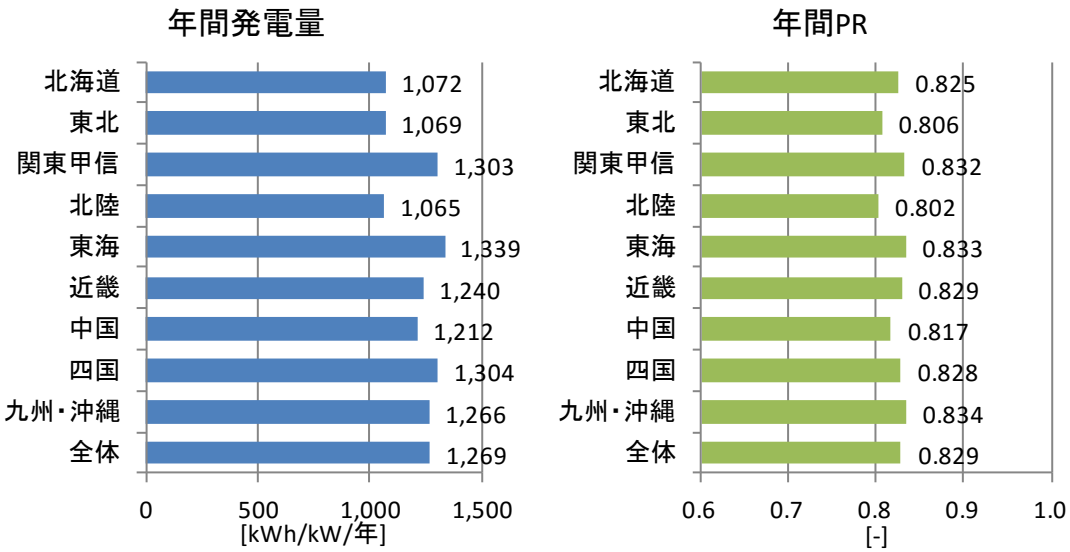


図 3.2.10　地域別の年間発電量・年間システム出力係数（2013 年度）

3） 発電容量別

発電容量別の年間発電量および年間 PR を表 3.2.4，図 3.2.11 に示す。発電容量と 1kW 当たりの発電量には，ほとんど関係が見られない。

年間 PR では，小容量のシステムの年間 PR がやや低い傾向がみられる。これは次に示す，設置時期と年間 PR の関係が影響している可能性がある。すなわち発電容量の大型化と性能の向上が同時に進んでいる可能性が考えられる。

表 3.2.4　発電容量別の年間発電量・年間システム出力係数（2013 年度）

出力	システム数	年間発電量[kWh/kW/年]			年間PR		
		平均	全体=1	標準偏差	平均値	全体=1	標準偏差
3kW未満	116	1,271	1.00	192	0.814	0.98	0.088
3～4kW	509	1,260	0.99	173	0.818	0.99	0.085
4～5kW	636	1,281	1.01	158	0.833	1.00	0.074
5～6kW	462	1,274	1.00	151	0.837	1.01	0.066
6～8kW	201	1,247	0.98	153	0.827	1.00	0.069
8～10kW未満	128	1,263	1.00	152	0.839	1.01	0.076
全体	2,052	1,269	1.00	162	0.829	1.00	0.076

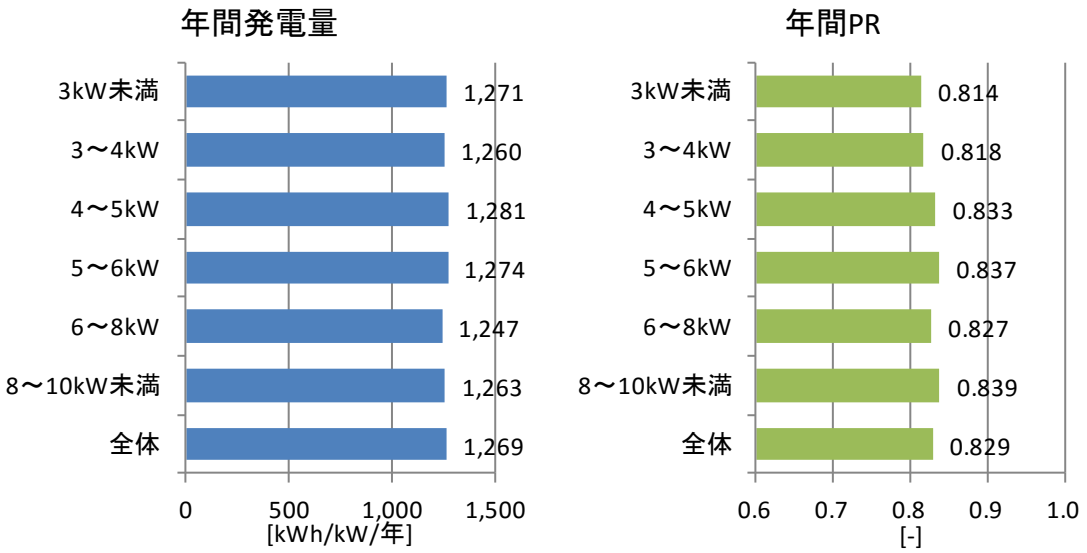


図 3.2.11　発電容量別の年間発電量・年間システム出力係数（2013 年度）

4） 設置時期別

設置時期別の年間発電量と年間 PR を表 3.2.5，図 3.2.12 に示す。設置時期が古いほど発電量が少なく，また，PR もほぼ同程度に低い。2004 年度以前に設置された PV システムについては，2012 年度に設置された PV システムに比べ，発電量が 17%少なく，PR も 17%低い（いずれも有意水準 1%で有意差あり）。

この原因として，設置時期が新しい PV システムほど設置当初の発電性能が向上していることが予想されるが，古い PV システムの発電性能が設置後に低下している可能性もある。そこで，次項では設置後の発電性能低下の影響を取り除いたうえで，発電性能の向上について検証する。

表 3.2.5　設置時期別の年間発電量・年間システム出力係数（2013 年度）

設置時期	システム数	年間発電量[kWh/kW/年]			年間PR		
		平均	2012年度設置=1	標準偏差	平均	2012年度設置=1	標準偏差
～2004年度	90	1,088	0.83	154	0.709	0.83	0.075
2005～08年度	143	1,190	0.91	156	0.762	0.89	0.075
2009年度	231	1,256	0.96	149	0.815	0.95	0.062
2010年度	400	1,262	0.97	146	0.823	0.96	0.055
2011年度	580	1,290	0.99	152	0.843	0.98	0.068
2012年度	608	1,303	1.00	163	0.858	1.00	0.073
全体	2,052	1,269	0.97	162	0.829	0.97	0.076

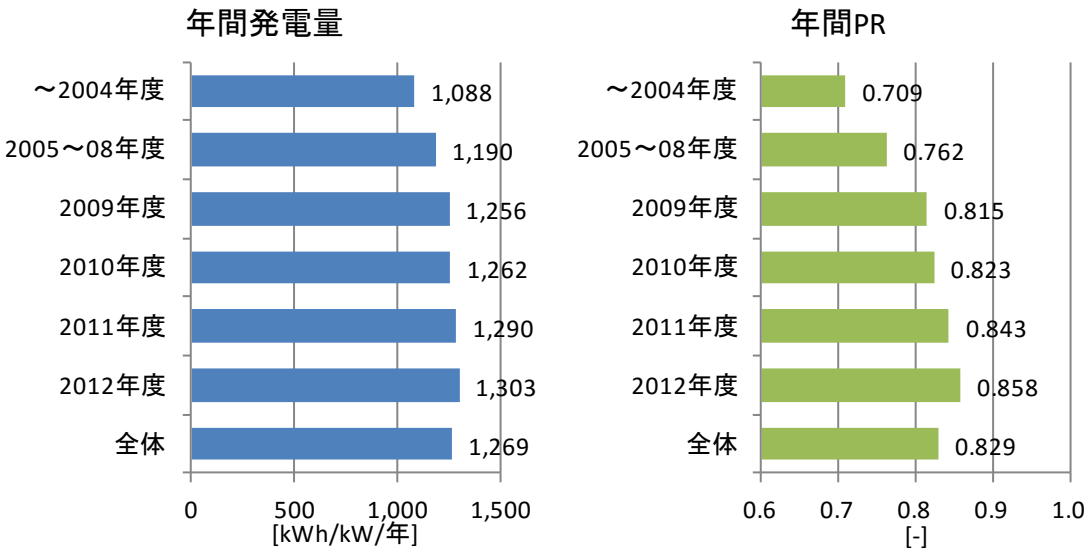


図 3.2.12　設置時期別の年間発電量・年間システム出力係数（2013 年度）

3.2.3 発電性能の向上に関する評価

(1) システム出力係数の 2 時点間の変化

設置後 1 年間（設置の翌月からの 12 ヶ月間）と 2013 年度の 2 時点について比較が可能なシステム（1,982 件）の年間 PR を表 3.2.6 に示す。なお，2 時点間で PR が 0.1 以上上昇した PV システムについては，製品や施工に係る初期不良があったと推察されるため，集計対象から除外している。

設置後 1 年間における 2004 年度以前の PV システムの PR の平均値は 0.755 であり，2012 年度の PV システム（0.862）に比べ 12%低い。

2004 年度以前の PV システムは設置後 1 年間から 2013 年度までに平均 9.7 年経過し，この間に PR の平均値が 0.755 から 0.711 に低下している。ここから，2 時点間における PR の平均値の低下率は 0.61%/年と算出される。この結果，2013 年度の PR では 2012 年度の PV システムとの差が 17%に拡大している。なお，2011 年度の PV システムの PR 低下率は約 1%/年とやや高い値を示していることを含め，設置後の発電性能の低下傾向については次項で評価を行う。

このように，設置後の発電性能の低下を考慮し，設置後 1 年間の PR で比較しても設置時期による明確な差が認められるため，2012 年度までの 10 年程度の期間において，PV システムの設置当初の発電性能は向上していると言える。

表 3.2.6　設置時期別年間システム出力係数（設置後 1 年間と 2013 年度の比較）

設置時期	システム数	設置後1年間		2013年度		2時点間の平均経過年数［年］	P_Rの低下率（年率）［%/年］
		平均	2012年度設置=1	平均	2012年度設置=1		
～2004年度	80	0.755	0.88	0.711	0.83	9.7	0.61
2005～08年度	133	0.782	0.91	0.760	0.89	6.0	0.47
2009年度	220	0.827	0.96	0.815	0.95	3.3	0.44
2010年度	383	0.835	0.97	0.824	0.96	2.4	0.57
2011年度	566	0.855	0.99	0.843	0.98	1.4	1.02
2012年度	600	0.862	1.00	0.858	1.00	0.5	
全体	1,982	0.841	0.98	0.830	0.97	2.2	0.63

注 1：本表の PR の低下率は平均 PR の低下率を表す（PV システムごとの PR 低下率の単純平均値ではない）。

注 2：2012 年度設置システムでは設置後 1 年間と 2013 年度の 2 時点で期間に重なりがあるため，PR の低下率を表示していない。

(2) 発電性能向上の要因

発電性能の向上の主な要因として，パワーコンディショナーの効率や機能の向上，PV システム設計・施工技術の向上，実環境下での性能が高い太陽電池の普及が挙げられる。なお，PR で評価しているため，太陽電池モジュールの変換効率の向上は織り込まれている。

主な住宅用 PV システム向けパワーコンディショナーの直流電力から交流電力への変換効率（定格値あるいは最大値）は 2000 年時点で 94%～96%（n=17，単純平均 94.6%）[3-8]であった。2012 年時点でも 94%～97.5%（n=18，単純平均 94.9%）[3-9]とわずかな改善に留まっている。しかし，最大電力点追従制御機能[12]の搭載や，パワーコンディショナー自体の低消費電力化などが進み，総合的な効率はより向上していると考えられる。

PV システム設計・施工技術面でも普及の進展に伴い，各太陽電池モジュールの実出力のばらつきを抑える[13]こと，周囲や自宅構造物による日影の影響を回避することなどへの配慮が進み，発電性能の向上に寄与していると考えられる。また，太陽電池モジュールの公称最大出力に対する実出力の比が向上している可能性もある。

これらに加えて，PR の高い PV システムのシェアの拡大も全体的な性能向上に寄与している可能性がある。本データでは太陽電池の種類は未把握であるが，PV システムメーカー名をほぼ把握している。主要 PV システムメーカー別の設置後 1 年間の PR を設置時期別に集計した結果を表 3.2.7 に示す。A 社，B 社（いずれも結晶系太陽電池が主力）および C 社（HIT 太陽電池が主力）の PR はいずれも上昇傾向にある。また，化合物系（CIS）太陽電池を採用している D 社の PR は比較的高い水準である。

PV システムメーカーにより PR に差が見られる理由の一つとして，太陽電池の特性の違いが考えられる。C 社が主力としている HIT 太陽電池は温度上昇による出力低下が結晶系太陽電池に比べ小さい。また，D 社が採用している化合物系太陽電池は光照射効果により実環境下に暴露されると出力が上昇する特性を持つ。

全 PV システムの 2004 年度以前から 2012 年度への PR の変化（+0.11）を要因分解すると，各社の性能向上要因が+0.07，PV システムメーカー別構成比変化要因が+0.04 となる。後者の要因では PR の高い PV システムメーカーの構成比の増加（図 3.2.13）が寄与している。

---

[12] 気象条件（日射量）に応じて，常に電力が最大になるように出力電圧を調整する制御機能をいう。

[13] 一般に太陽電池モジュールは複数接続して使用されるが，その中に出力の低いモジュールが混在すると，その影響を受けて全体の発電電力が低下する。このため，出力の揃ったモジュールでシステムを構成することが望ましい。

表 3.2.7　設置時期別 PV システムメーカー別システム出力係数（設置後 1 年間）

設置時期	A社	B社	C社	D社	E社	その他・不明	全システム
～2004年度	0.723	0.723	0.806			0.768	0.755
2005～08年度	0.760	0.768	0.823			0.789	0.782
2009年度	0.816	0.784	0.851			0.831	0.827
2010年度	0.811	0.790	0.863	0.901		0.826	0.835
2011年度	0.815	0.798	0.872	0.950	0.838	0.818	0.855
2012年度	0.818	0.805	0.861	0.939	0.848	0.820	0.862
全体	0.803	0.785	0.860	0.935	0.842	0.818	0.841

注 1：各設置時期の PV システム数の合計は表 3.2.6 と同じ。

注 2：PV システム数上位 5 社を抽出。PV システム数が 10 以上の設置時期の平均値を表示し，10 未満の場合は「その他・不明」に含めた。

注 3：A 社～E 社は国内メーカーである。

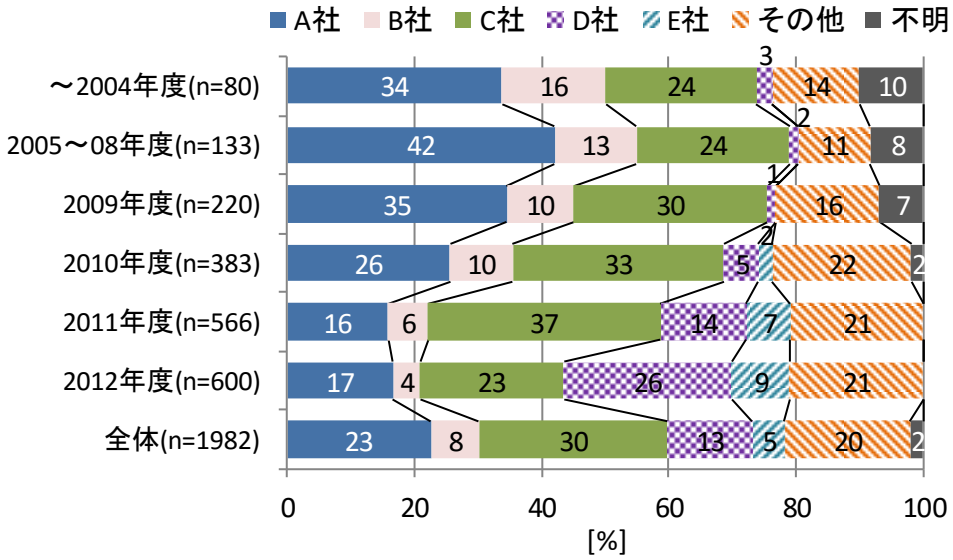


図 3.2.13　設置時期別 PV システムメーカー別システム数構成比

3.2.4 設置後の発電性能の低下に関する評価

(1) 間隔の短い 2 時点間でのシステム出力係数低下率

表 3.2.6 では 2004 年度以前に設置された PV システムにおいて，設置後 1 年間と 2013 年度の 2 時点間で PR が 0.61%/年（平均経過年数 9.7 年）のペースで低下していることを示した。2005～2008 年度の PV システムも 0.47%/年（同 6.0 年）の低下傾向を示している。

ここで，2011 年度の PV システムの PR 低下率が 1.02%/年と，他の設置時期の PV システムに比べ比較的高い値を示している。これは 2011 年度の PV システムの発電性能の低下率が高い可能性を示唆しているが，2011～12 年度から 2013 年度にかけての発電性能の低下率が全体的に高い可能性もある。そこで 2012 年度から 2013 年度の 1 年間での PR 低下率を設置時期別に比較すると，2011 年度の PV システムに限らず全体的に PR 低下率が高い傾向が見られる（表 3.2.8）。その理由として，2013 年度は前年より高温で日射量も多かった[14]ため，太陽電池モジュールの温度上昇により，損失が増大した可能性が挙げられる。間隔の短い 2 時点間での PR 低下率は，このような気候の影響に加え日射量の推定誤差の影響も受け易いため，以降の検討では，経過年数の短い 2009 年度以降の PV システムを対象外とする。

表 3.2.8 設置時期別年間システム出力係数の低下率（2012 年度と 2013 年度の比較）

設置時期	システム数	P_Rの平均値		P_Rの低下率
		2012年度	2013年度	[%/年]
～2004年度	84	0.723	0.713	1.37
2005～08年度	142	0.769	0.762	0.88
2009年度	228	0.824	0.815	1.02
2010年度	396	0.831	0.824	0.89
2011年度	568	0.855	0.843	1.36
全体	1,418	0.827	0.817	1.13

[14] ここで集計対象とした 1,418 件の PV システムが参照している気象観測地点では，2013 年度は 2012 年度に比べ気温が 0.2℃高く，日射量が 1.2%多かった（参照している PV システムの発電容量で加重平均）。

(2) システム出力係数低下率の既往研究との比較

Jordan & Kurtz[3-10]が整理した既往研究における発電性能低下率（表 3.2.9）によると，結晶系シリコン太陽電池を使用する PV システムの発電性能低下率の中央値は 0.23～0.90%/年となっている。また，太陽電池モジュール単体では 0.36～0.64%/年となっている。

比較のため本データによる PR 低下率についても中央値を算出すると，2004 年度以前の PV システムで 0.53%/年（経過年数 9.2 年），2005～2008 年度の PV システムで 0.40%/年（同 6.1 年）となっている（表 3.2.10）。このように本研究の PR 低下率は既往研究と概ね整合している。

表 3.2.9　既往研究における発電性能低下率

対象	設置時期	電池種類	ｼｽﾃﾑ・モジュール件数	発電性能低下率の中央値[%/年]	経過年数の中央値
PVシステム	1999年以前	単結晶Si	42	0.90	7
		多結晶Si	5	0.60	9
	2000年以降	単結晶Si	37	0.23	5
		多結晶Si	21	0.59	5
太陽電池モジュール	1999年以前	単結晶Si	1133	0.47	21
		多結晶Si	409	0.61	10
	2000年以降	単結晶Si	55	0.36	3
		多結晶Si	36	0.64	3

出所：Jordan & Kurtz [3-10]
注：本表は単結晶 Si と多結晶 Si のみ抜粋して作成したもの。

表 3.2.10　システム出力係数の低下率（設置後 1 年間と 2013 年度の比較）

設置時期	システム数	PR低下率中央値[%/年]	経過年数[年]		
			中央値	最小値	最大値
～2004年度	80	0.53	9.2	8.1	14.8
2005～08年度	133	0.40	6.1	4.0	7.9
全体	213	0.45	7.3	4.0	14.8

注：本表では表 3.2.9 との比較のため低下率の中央値を示す。

(3) システム出力係数低下率の分布

設置後 1 年間と 2013 年度の 2 時点間の PR 低下率の頻度分布を図 3.2.14 に示す。PR 低下率が高い方向にやや偏りが認められる。

PR 低下率にはこのように PV システムによる差があり， 1%/年以上が約 2 割，0.2～1%/年が約 5 割，－0.2～0.2%/年（ほとんど変化なし）が約 2 割，－0.2%未満が約 1 割となっている。ここで 1%/年以上の低下率は，一般的な PV システムメーカーの太陽電池モジュール出力保証が想定している低下率を上回るペースである。このような性能低下が懸念される PV システムが約 2 割存在する一方で，性能がほとんど変化していない PV システムも約 2 割存在する。

なお，低下率がマイナスの PV システムでは設置後 1 年間に何らかの問題（積雪，一時的停止，系統電圧上昇による頻繁な出力抑制など）があった可能性がある。ただし，3.2.3 項の冒頭に記載のように，2 時点間で PR が 0.1 以上上昇した PV システムは, 初期不良があったと考えられるため 3.2.3 項および 3.2.4 項の評価対象から除外している。

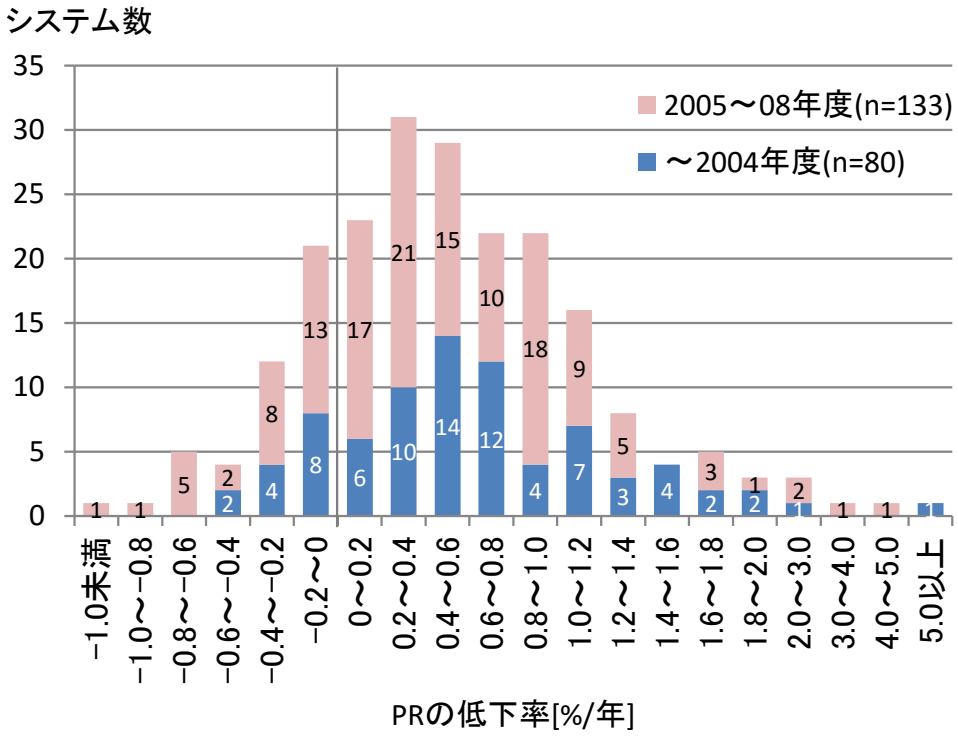


図 3.2.14　設置時期別システム出力係数低下率の頻度分布

（設置後 1 年間と 2013 年度の比較）

(4) 属性別システム出力係数低下率

把握している PV システムの属性に PR 低下率に影響を与える因子が存在するかどうか検討するため，属性別の PR 低下率を図 3.2.15 に示す。ここで「PR 低下率（年率)」は，表 3.2.6 の定義と同じであり，2 時点間の平均 PR の低下率を平均経過年数で年率換算した値である。「PR 低下率の中央値」は個別システムの PR 低下率の中央値である。

設置時期別の PR 低下率については既に確認した通りである。地域，設置条件（方位・角度が単一か複数か）およびシステムメーカー別に分析したが， PR が低下するシステムが特定の属性に偏在する傾向は認められない。

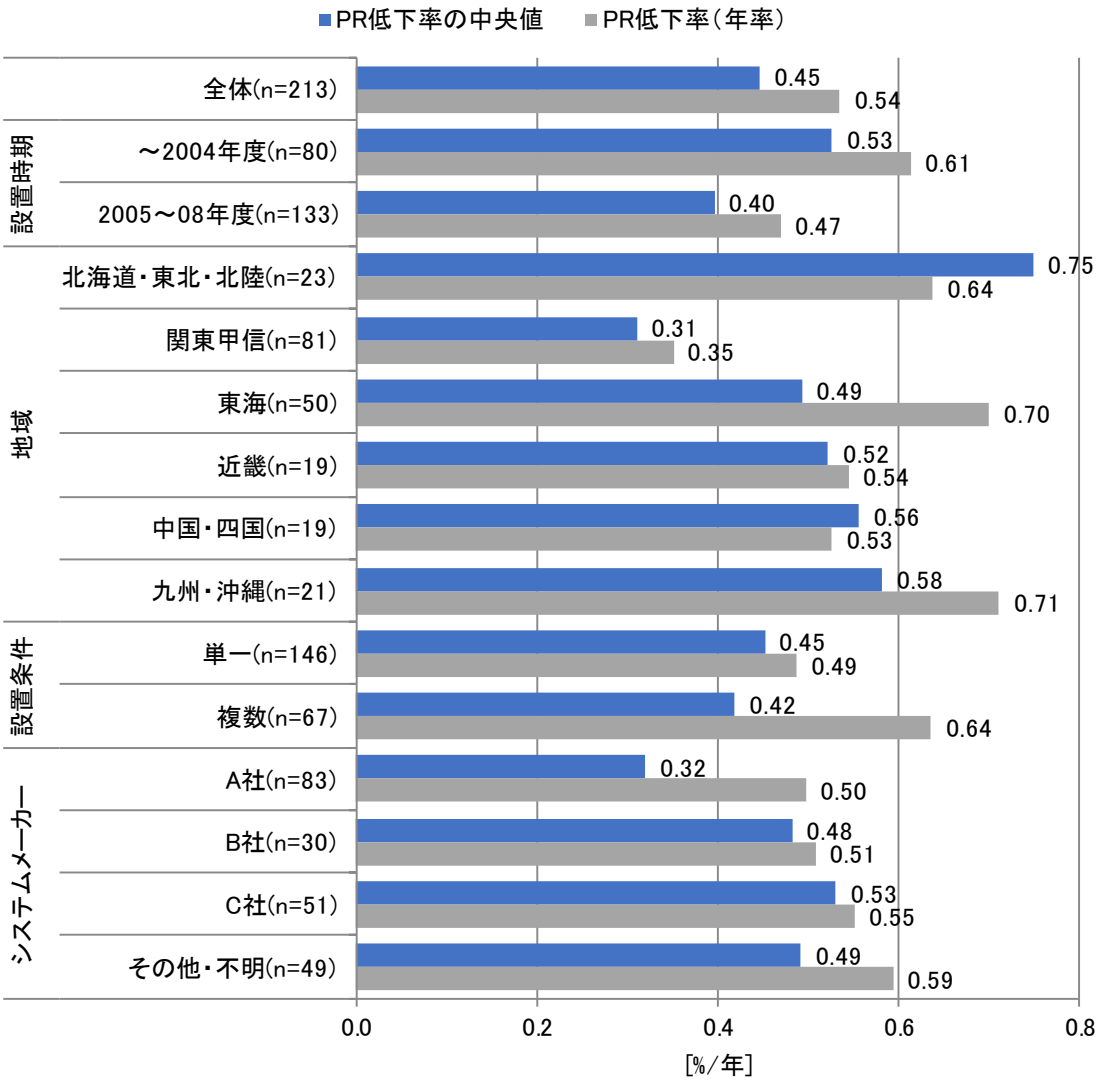


図 3.2.15　属性別システム出力係数低下率（設置後 1 年間と 2013 年度の比較）

(5) システム出力係数の低下傾向

図 3.2.14 で集計対象とした 2004 年度以前のシステム 80 件のうち，全期間の発電実績データが得られる 75 件から，9 年目までの PR の年平均低下率が 1%/年以上のシステム 17 件の PR の推移を図 3.2.16 に，－0.2～0.2%/年のシステム 16 件の PR の推移を図 3.2.17 に示す。

低下率の大きいシステムの中には，短期間に大きな低下が生じている事例が見られる。このような場合，導入者は異常に気が付き易く，トラブルへの対処に進みやすいと考えられるが，徐々に低下している場合もみられる。PR がほとんど変化していないシステムでは，PR が安定的に推移している事例が多いが，一時的な PR の低下がみられる事例や，低下傾向と回復が繰り返されている事例もみられる[15]。

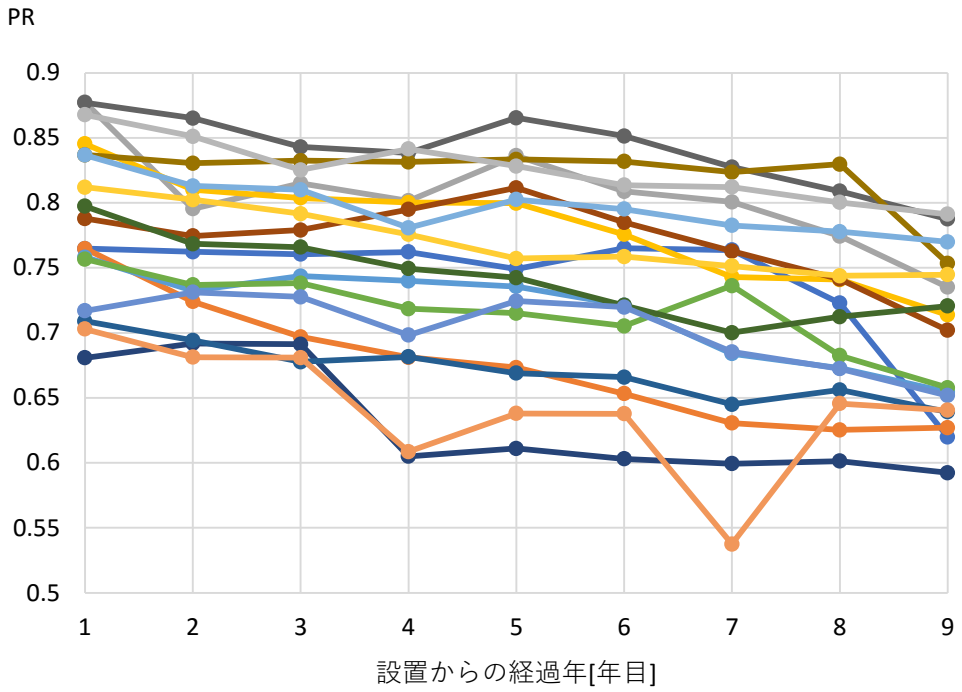


図 3.2.16　システム出力係数の推移

（2004 年度以前のシステム，9 年目までの年平均低下率 1%/年以上，17 件）

[15] 一時的な PR の低下の原因としては，パワーコンディショナーの不調・故障や積雪地帯における年による積雪量の変動が考えられ，PR の回復の原因としては，日影を引き起こす障害物（樹木，周辺建築物等）の影響緩和などが考えられるが，特定できていない。

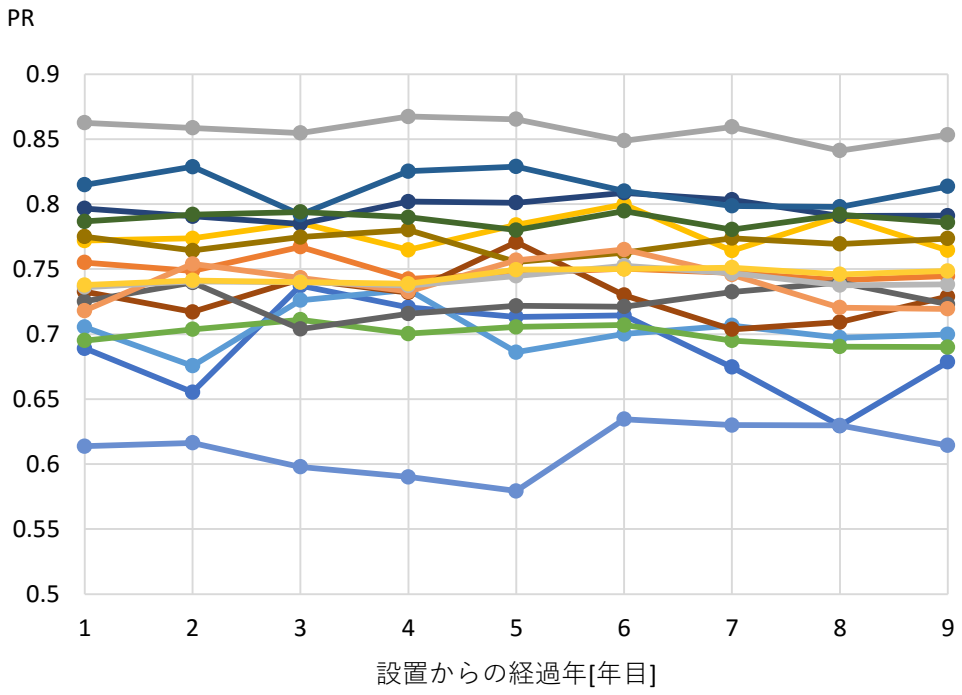


図 3.2.17　システム出力係数の推移

（2004 年度以前のシステム，9 年目までの年平均低下率－0.2～0.2%/年，16 件）

PR が低下傾向にあるシステム（図 3.2.16 の 17 件）において，徐々に低下する事例と短期間に大きく低下する事例がみられることから，その分類を行う。まず，図 3.2.14 で集計対象とした 2004 年度以前のシステム 80 件のうち，全期間の発電実績データが得られる 75 件について，毎年の PR 低下率を集計する（図 3.2.18）。次に，分類対象のシステムについて，非常に大きな低下率を含むシステムを「ある年に大きく低下した」事例に，含まないシステムを「徐々に低下している」事例に分類する。ここで，非常に大きな低下率の定義は，外れ値の検出に一般的に用いられている方法を参考に，第 1 四分位数に四分位範囲（IQR）の 1.5 倍を加えた値を上回るものとする。

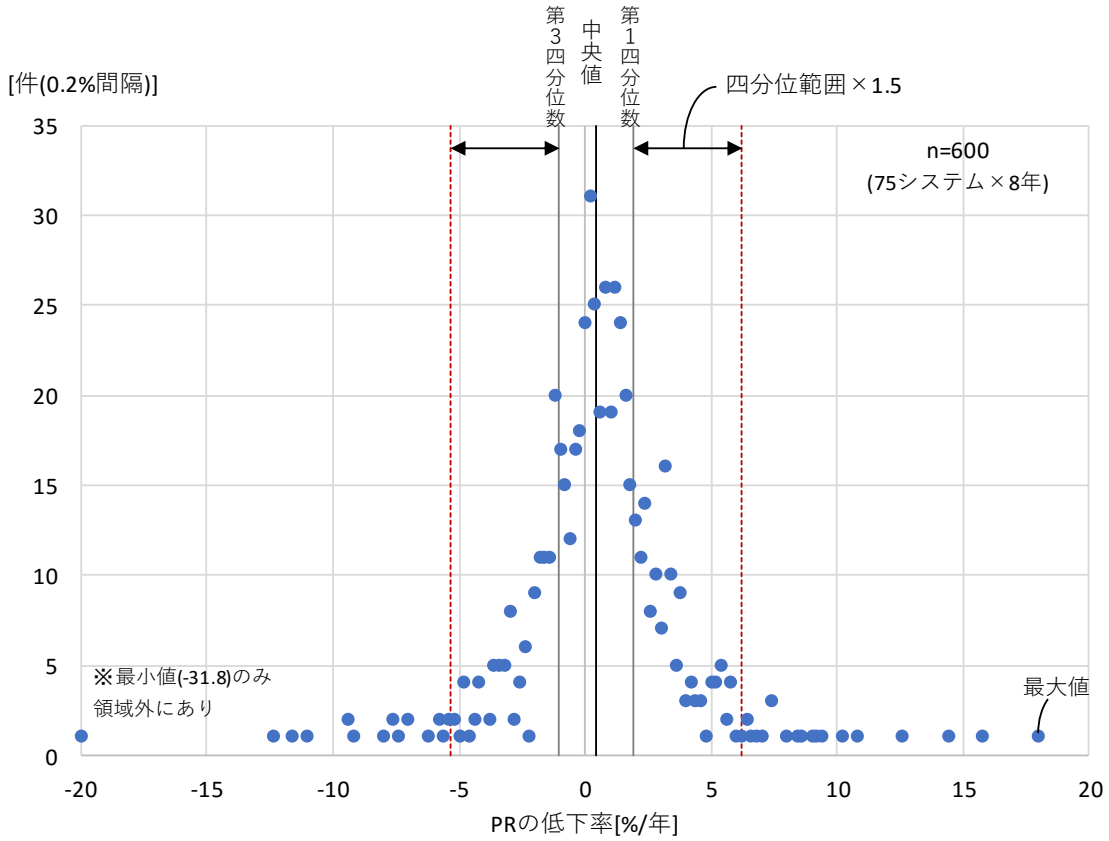


図 3.2.18　システム出力係数低下率（1 年毎）の頻度分布（2004 年度以前のシステム）

注：2004 年度以前に設置されたシステム 80 件のうち，全期間の発電実績データが得られる 75 件のそれぞれについて，t=1～8 として設置 t 年目と t+1 年目の PR の低下率を集計。

分類の結果，「徐々に低下している」事例が 17 件中 11 件，「ある年に大きく低下した」事例が 6 件となった。全事例を図 3.2.19，図 3.2.20 にそれぞれ示す。ある年に大きく低下した事例の中には，Case B-2，CaseB-4 および Case B-6 のように，大きく低下した後に，同程度の PR が数年間にわたって維持されるシステムがみられる。一方で，Case B-3 のように大きく低下した翌年も比較的大きな低下がみられる場合もある。

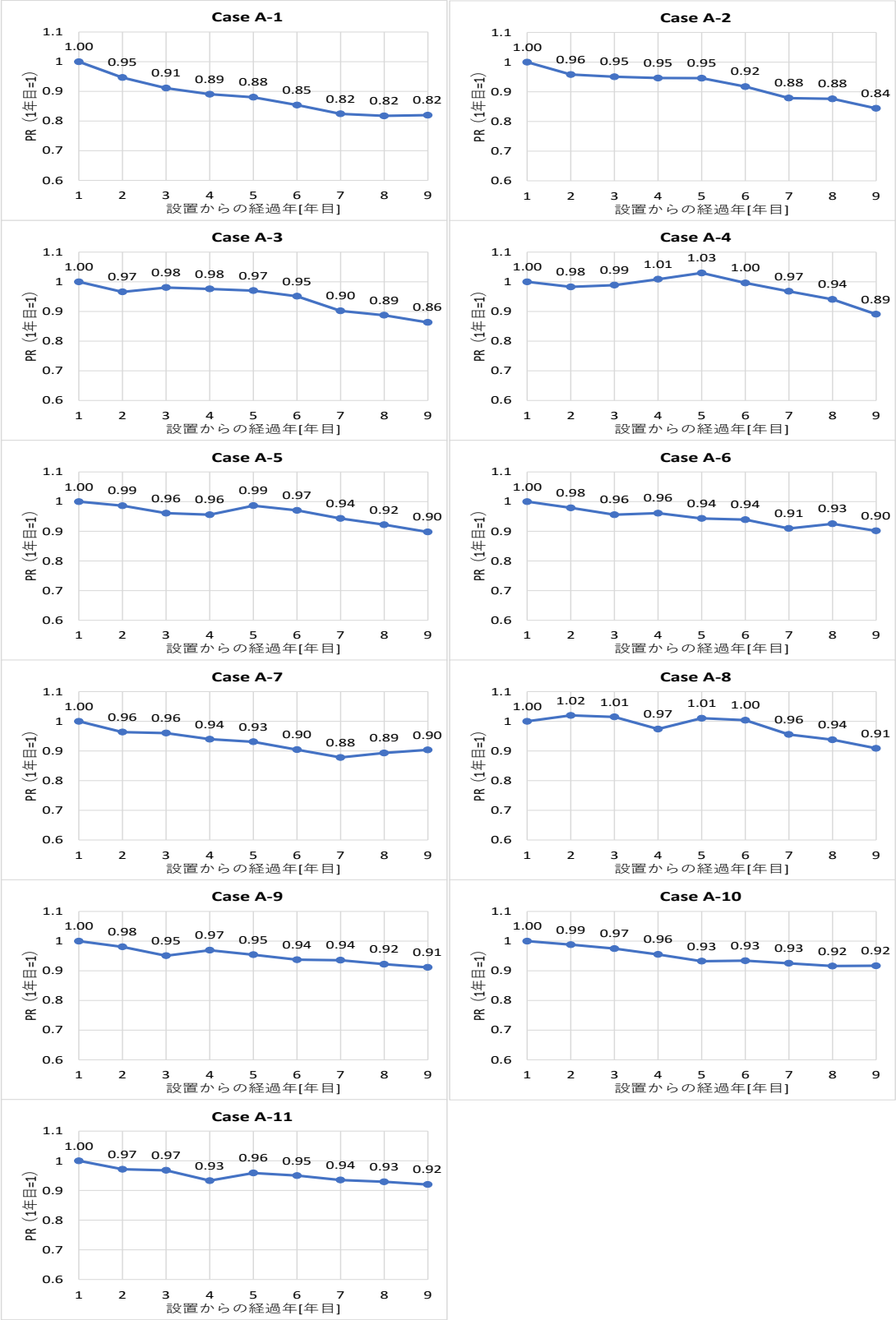


図 3.2.19　システム出力係数の推移

（2004 年度以前のシステム，徐々に低下している事例，全 11 件）

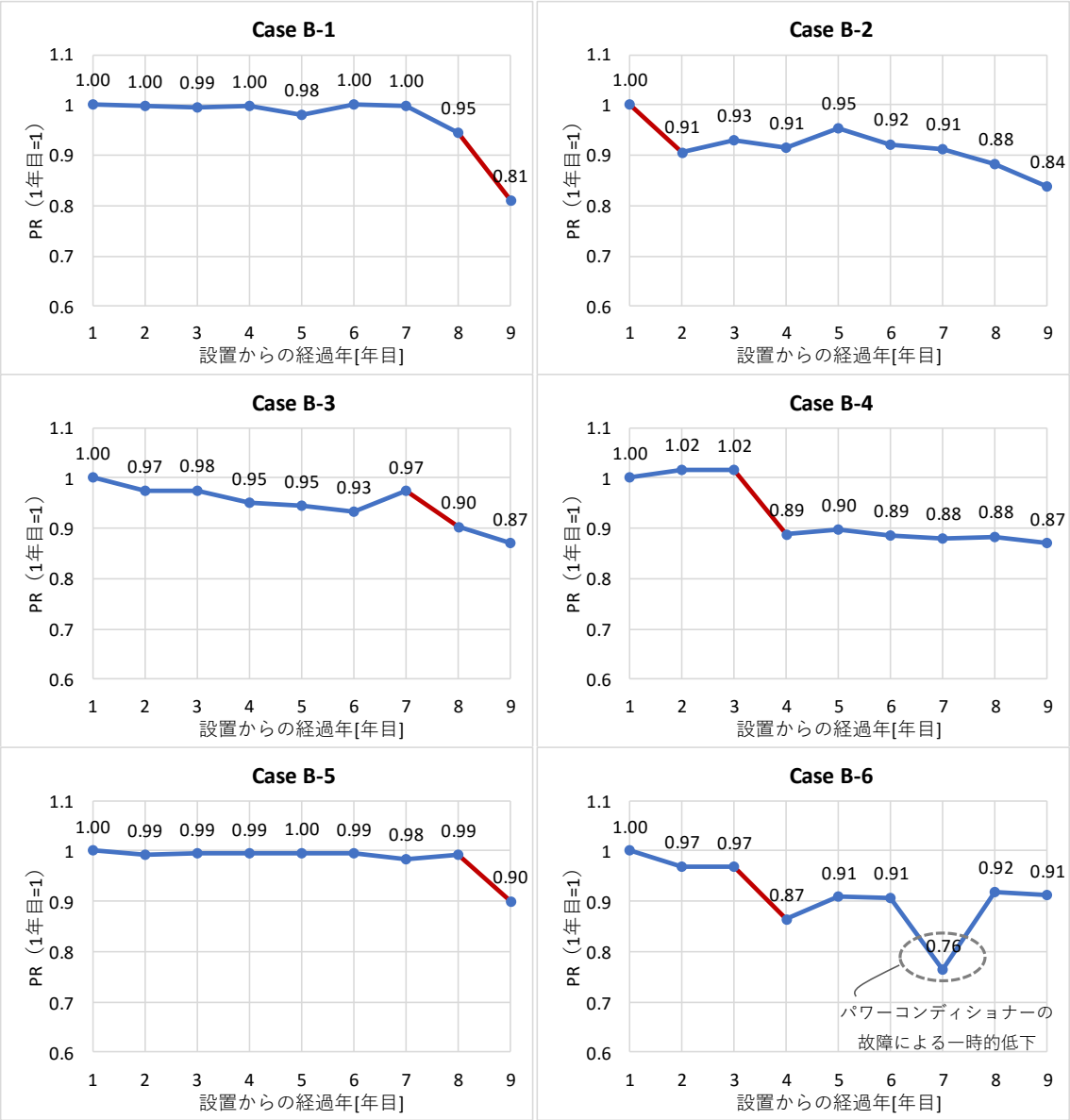


図 3.2.20　システム出力係数の推移

（2004 年度以前のシステム，ある年に大きく低下した事例，全 6 件）

図 3.2.20 に示した発電性能の低下事例をみると，大きく発電性能が低下するタイミングはシステムごとに異なる。図 3.2.18 に示した 1 年毎の PR 低下率を経過年数別に集計すると，5 年目までの PR 低下率は中央値が 0.21%/年，6 年目以降の PR 低下率の中央値が 0.78%/年となり，設置からの経過期間が長いほど，発電性能の低下が発生し易いと考えられる（図 3.2.21）。

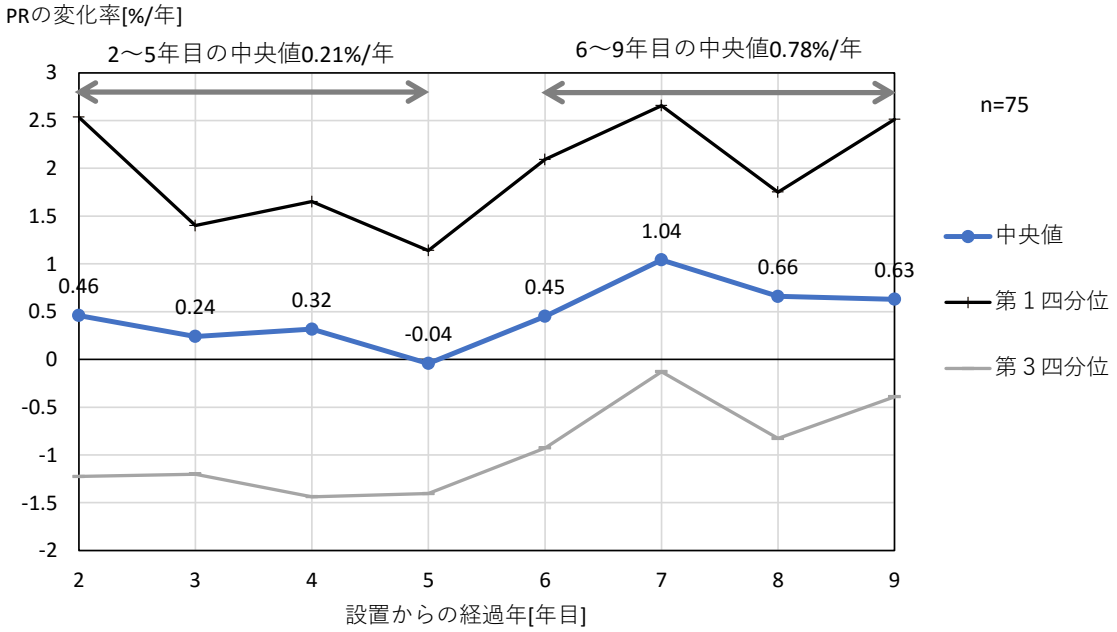


図 3.2.21　システム出力係数低下率（1 年毎）の経過年別中央値

（2004 年度以前のシステム）

注：2004 年度以前に設置されたシステム 80 件のうち，全期間の発電実績データが得られる 75 件を集計

2004 年度以前に設置されたシステムと 2005～2008 年度に設置されたシステムの平均 PR（12 ヶ月移動平均）の推移を図 3.2.22 に示す。2004 年度以前の PV システムの PR は 6 年目（72 ヶ月目）頃から低下が加速している。72 ヶ月目までの低下率は約 0.3%/年であるのに対して，72 ヶ月目以降の低下率は約 0.9%/年である。2005 年度以降の PV システムにおいても，ある時期から低下が加速するか，あるいは異なるパターンを示すかについて，さらにデータを蓄積し評価を行う必要がある。

従って，長期的な PR 低下率を適切に評価するためには，使用期間中の継続的な監視が必要と考えられる。

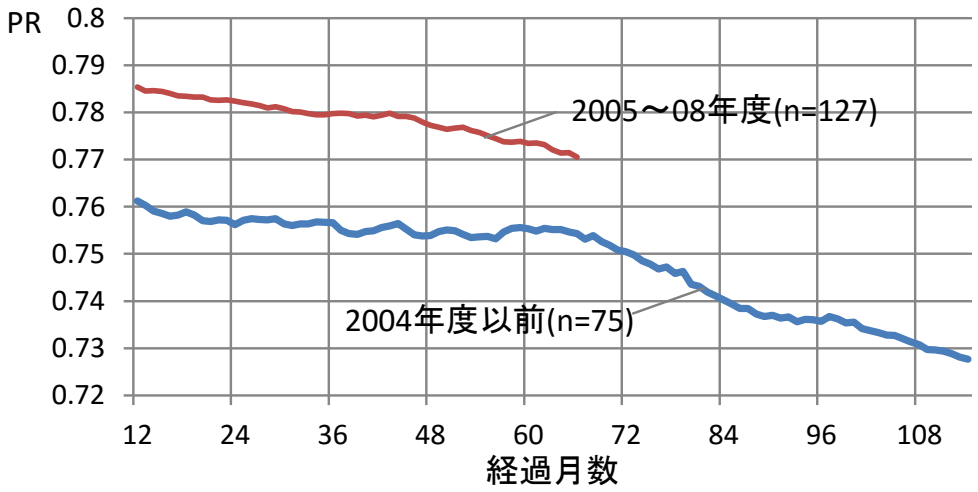


図 3.2.22　設置時期別システム出力係数（12 ヶ月移動平均）の推移

注：本図の集計対象は全期間の発電実績データが得られるシステムのみであるため，図 3.2.14 よりサンプルサイズが小さい。

3.3 まとめと課題

(1) まとめ

本章では，住宅用を中心とする約 4,200 件の PV システムの発電実績データとアレイ（パネル）面日射量の推定値をもとに，発電性能の評価を行った。主な結果を以下にまとめる。

- 発電性能を表すシステム出力係数（PR）は，2013 年度において平均 0.829 であり，設置時期が古いシステムほど PR が低い。
- 設置後 1 年間の PR を設置時期別に比較すると, 2004 年度以前に設置された PV システム（n=80）の PR は, 2012 年度に設置された PV システムより 12%低く，発電性能の向上が認められる。これは各 PV システムメーカーでの発電性能の向上と，PR の高い PV システムメーカーの構成比の増加による。
- PR 低下率の中央値は, 2004 年度以前に設置された PV システム（n=80）で 0.53%/年，2005～2008 年度に設置された PV システム（n=133）で 0.40%/年であり，既往研究で示された水準に概ね整合している。
- 2008 年度以前に設置された PV システム（n=213）のうち，設置後 1 年間と 2013 年度の 2 時点間での PR 低下率が 1%/年以上のシステムが約 2 割ある一方で，ほとんど変化していない（PR 低下率－0.2～0.2%/年）システムも約 2 割ある。
- 2004 年度以前に設置された PV システムの発電性能の低下のペースは一定ではなく，6 年目頃から低下が加速している。

(2) 社会的定着に向けた示唆

本研究では, 既往研究では評価が不十分であった 2000 年代以降の PV システム（ただし，国内メーカー製が中心）を中心に発電性能の低下傾向を評価し，知見の確立に貢献した。

発電性能の低下傾向は，個々の PV システムによって異なり，多様であることが明らかになった。設置からの経過年数が 10 年程度のシステムの中でも，未だ発電性能の低下がみられないシステムと，年率 1%以上の比較的高いペースで低下しているシステムが各 2 割程度ずつあり，さらに後者のグループは徐々に発電性能が低下しているシステムと，短期間に大きく低下しているシステムに分けられる。発電性能の低下がみられないシステムでも今後，発電性能の低下が始まる可能性があり，発電性能の低下が始まる時期にばらつきがあると解釈するのが妥当である。

個々の PV システムについて，発電性能の低下が始まる時期を予測することは難しいため，発電量の監視と保守点検を継続的に行うことが不具合や性能低下を早期に発見し，対処するうえで重要である。しかし，定期点検を受けていない PV システムも多く存在すると考えられ，特に住宅用 PV システムでは余剰売電量は把握されていて

も，発電量は把握されていない場合があると考えられる。また，発電量に対する導入者の関心は，設置当初は高くても徐々に低下する可能性がある。少なくとも月単位の発電量が継続的に記録される仕組みが必要と考えられる。また，本研究から発電性能の低下ペースが一定ではなく，運用期間が長くなるほど加速的に低下する可能性が示唆されるため，発電量の監視や保守点検は，時期が経過するほど重要になることに留意が必要である。

PV システムの技術は発展途上であり，発電性能の低下傾向に関する知見は継続的に蓄積される必要があるが，今後，性能低下がある程度予見できるようになれば，運用の継続に関する判断に活用可能である。例えば，パワーコンディショナーが故障（発電が一切できなくなる）した際のリプレースの是非の判断や，運用の節目（買取期間終了時等）における PV システムの運用継続の是非の判断，さらには最終的な運用停止とリプレースの是非の判断にも役立つと考えられる。

今後，建材としての機能と発電システムの機能を併せ持つ，建材一体型の PV パネルが普及する可能性がある。これを採用する場合，長期的に発電性能が低下することを前提に，導入の是非，導入に適した場所，あるいは保守点検のあり方について，計画・設計段階で十分に検討することが必要と考えられる。

(3) 課題

本研究で使用した PV システムの発電実績データは，無作為抽出の標本調査によるものではなく，ウェブ上のサービスにおいて自主的に登録されたものであることに留意が必要である。また，長期間の評価では，データ収集率の低下に伴う偏りが発生している可能性がある。

日射量の推定にも注意を要する。日射量の推定には誤差があり，短期間の PR の変化は誤差の影響を受け易い。また，日射量の推定では日照時間と日射量の関係が経年的に安定的であることが仮定されているが，大気中の浮遊粒子状物質（SPM）濃度の減少により，近年，日照時間に対する日射量が増大傾向にあるという報告がある [3-11]。これに従えば，近年の日射量を過小評価し，発電性能の向上を過大評価（設置後の発電性能の低下率を過小評価）しているおそれがある[16]。

本研究では主に 2000 年代に導入された住宅用を中心とする PV システム（約 4,200 件）の発電性能を評価したが，導入から 10 年程度以上を経過した PV システムの評価数は 100 件に満たない。PV システムは 20 年以上の使用が想定されていることも考慮すれば，長期発電性能の評価件数および評価期間は不十分である。

本研究の評価対象には結晶系太陽電池の PV システムを主力商品とするメーカーと

[16] この影響を検討するため，1995 年～2014 年の全天日射量と日照時間の観測値が得られる 41 地点について，日照時間に対する日射量の比を算定した。その結果，東京では 1995～1999 年平均の比を 1 とした場合に 2010～2014 年平均の比が 1.06 となるなど，一部の地点で比の上昇傾向が見られたが，寒冷地では横ばいないし下降傾向にある地点が多く，全地点の単純平均では変化が見られなかった。

化合物系（CIS 等）太陽電池の PV システムを主力商品とするメーカーが含まれており，設置当初の発電性能では化合物系太陽電池の PV システムの方が高い傾向がみられた（表 3.2.7）が，長期性能で比較評価を行う必要がある。

PV システムの技術は発展途上であるため，導入済みの PV システムの評価を継続するだけでは十分ではない。今後も新型の太陽電池が登場することが見込まれており，さらにパワーコンディショナーの高効率化や長寿命化に向けた技術開発も進められていることから，今後新たに導入される PV システムを評価対象とすることが不可欠である。

継続的な評価を行うために，長期間の発電実績データにアクセスし易い環境を整える必要がある。本研究で使用したデータセットは，筆者が所属する民間研究機関が提供するウェブ上のサービスにおいて 12 年間（2002～2014 年）にわたり徐々に蓄積されたものであるが，後継研究を増やすためには，HEMS（ホーム・エネルギー・マネジメント・システム）やモニタリングサービス[17]で収集されている発電実績データを，匿名化を施したうえで，第 3 者が利用できる環境を整えることが考えられる。

[17] PV システムメーカーが提供するサービスや，サードパーティ（NTT スマイルエナジー等）が提供するサービスがある。

第３章の参考文献

3-1）日本建築学会: 拡張アメダス気象データ, 2000

3-2）二宮秀與, 赤坂裕, 須貝高, 黒木壮一郎: AMeDAS のデータを用いた時刻別日射量の推定法, 空気調和・衛生工学会論文集 39, pp.13-23, 1989.2

3-3）二宮秀與, 松尾陽, 赤坂裕, 曽我和弘: AMeDAS のデータを用いた時刻別日射量の推定法: 第 2 報-回転式日照計および改良型太陽電池式日照計への適用, 空気調和・衛生工学会論文集 65, pp.53-65, 1997.4

3-4) Erbs, D.G., S.A.Klein, J.A.Duffie: Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation, *Solar Energy*, 28-4, pp.293-302, 1982

3-5) Perez, R., P.Ineichen, R.Seals, J. Michalsky and R.Stewart: Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, *Solar Energy*, 44-5, pp.271-289, 1990

3-6）気象庁: 気象観測統計の解説, 2013

3-7）総務省: 平成 25 年住宅・土地統計調査（確報集計結果）, 2015

3-8）ソーラーシステム研究所: 住宅用太陽光発電系統連系システムの主な仕様, ソーラーシステム, 81, pp.34-35, 2000.6

3-9）ソーラーシステム研究所: 住宅用太陽光発電系統連系システムの主な仕様, ソーラーシステム, 129, pp.30-31, 2012.8

3-10）Jordan, Dirk C., Sarah R. Kurtz: Photovoltaic degradation rates - an analytical review, NREL/JA-5200-51664, 2012.6

3-11）池鯉鮒悟: 国内の日射量変化について, 太陽エネルギー, 38-5, pp.49-54, 2012.9

第4章 住宅用太陽光発電システムの導入者意識と発電実態

住宅用 PV システムは既に普及開始から 20 年以上が経過し，約 200 万件の住宅で使用されているにも関わらず,導入者の満足度等の意識はほとんど追跡されていない。

本章では，戸建住宅の PV システム導入者を対象とするアンケート調査を実施し，導入者意識と発電実態（売・買電量を含む）およびそれらの関係を明らかにする。

4.1 調査の概要

4.1.1 アンケート調査の実施要領

PV システム導入者を対象に実施したアンケート調査の実施要領を表 4.1.1 に示す。調査対象者は，住環境計画研究所が提供するウェブサイト上の PV システム導入者支援サービス「ソーラークリニック」（以下,「Solar Clinic」という）の登録者のうち，導入から 1 年以上が経過している，戸建住宅の居住者である等の 4 条件を満たす者としている。Solar Clinic は日本国内の PV システムを対象としており，利用者が自ら発電量を登録（入力）し，日射量推定値と比較することで発電性能を簡易的にチェックするものである。従って，調査対象は発電性能に関心を持つ層に偏っているおそれがあることに留意が必要である。

調査手順は以下の通りである。導入からの経過期間が 1 年未満であるなど条件を満たさない者を除く調査対象候補者（2,214 件）に対して，2015 年 12 月に電子メールで調査を配信した。調査対象候補者が 4 条件すべてを満たすかどうかは事前に把握できていないため，調査依頼文に条件を記載するとともに，調査票の初問で確認している。条件を満たした回答件数は 571 件である。

回答はインターネットを通じて，専用のオンライン調査画面（Google フォームを使用）で行われた。ただし，調査項目のうち 12 か月分の月別の電力量（発電量，売電量，買電量）については，Excel 形式の調査票に入力し，電子メールで回収する方法とした。Excel 調査票の低回収率が懸念されたため，同じ期間の年間合計の電力量をオンライン調査画面で調査した結果，電力量の有効回答は年間値 283 件，月別値 183 件となった。

表 4.1.1　アンケート調査の実施要領

調査時期	2015 年 12 月～2016 年 1 月
対象者	民間研究機関の太陽光発電導入者支援サービスに登録する者のうち，以下の 4 条件を満たす者 ①導入から 1 年以上が経過している ②余剰電力を売電している ③導入先が持ち家の戸建住宅である ④当該住宅に居住している
調査方法	インターネット調査
調査件数	2,214 件（配信 2,225 件中，不達等 11 件を除く）
回答件数	571 件 うち，電力量の有効回答 283 件（月別値は 183 件）

4.1.2　調査項目

アンケート調査の質問内容を表 4.1.2 に示す。本調査では，PV システムに対する満足度および今後の機器等の利用意向と，それらに関連する可能性がある導入目的，PV システムと住宅・コミュニティとの関わり，点検・トラブルの経験，意識・行動，回答者属性（性別・年齢）等を調査している。また，発電量等の電力量とエネルギー・機器の使用有無，基本属性（世帯・住宅）を調査している。なお，調査票を付録 A（p.150～）に示す。

アンケート調査以外の情報源として，Solar Clinic からの提供情報があり，具体的には発電量の分析・評価に必要となる PV システムの導入地域（都道府県，最寄りのアメダス気象観測地点），導入時期（年・月），PV パネルの発電容量・方位・傾斜角，アンケート調査で未回答の月別発電量データである。前述の電力量の有効回答件数は，提供情報の月別発電量データから補完されたものを含んでいる。

表 4.1.2　アンケート調査の質問内容

分類	項目
確認事項	調査対象条件への適合
導入状況	導入経緯（新築時に設置／既築住宅に設置／設置済中古住宅取得），購入先，導入理由，導入時・使用初期の問題発生有無
住宅･コミュニティ	パネルの導入場所（屋根/他），パネルの視認可能性，パネルの美観評価，近隣との PV システムに関するコミュニケーションやトラブル（日影，反射光，作動音等）の有無
点検・トラブル	定期点検の受検，交換・修理の有無・時期・原因，10 年以内の自宅での停電経験，自立運転機能使用経験
意識・態度	節電意識，消費者態度（3 項目）
電力量	2014 年 12 月～2015 年 11 月の発電量，売電量，買電量の月別値，年間合計値，電力量の確認頻度
エネルギー・機器	電気以外の使用エネルギー，電力多消費機器（電気式給湯器等）の有無，コージェネレーションシステム(CGS)・蓄電池システム・EV/PHEV 等の有無
満足度・意向	PV システムの満足度（①発電量，②電気代節約・売電収入，③信頼性・耐久性，④購入先・メーカーの対応力，⑤総合），将来の売電価格の見通し，今後の機器等の利用意向（1. PV システム増設，2. CGS 併用，3. 蓄電池システム利用，4. EV/PHEV 利用，5. EV/PHEV 宅内給電利用，6. 電気代節約・売電収入目的での電力会社の選択，7. グリーン電力契約メニュー）
基本属性	世帯人数，高齢者数，住宅の建築時期，住宅の延床面積，二重サッシ・複層ガラス有無，回答者性別・年齢

注：調査票を付録 6.2.3＜付録＞付録 A（p.150～）に示す。

4.2 導入者意識

4.2.1 導入者の基本属性

PV システムの導入者意識を検討する前に，導入者の基本属性を確認する。なお，エネルギー・機器に関する事項については次節で示す。

回答者の主要基本属性を表 4.2.1 に示す。回答者の多くは 40 代～60 代を中心とする男性であることから，PV システム導入の意思決定に関与し，また，導入費用を負担した蓋然性が高いと考えられる。

世帯人数の平均値は 3.6 人であり，一戸建ての全国平均値 2.8 人（平成 22 年国勢調査。住宅に住む一般世帯に限る。）より 0.8 人多い。世帯人数が 3～5 人の世帯が 72%を占めることから，親子世帯が多いと考えられる。福代[4-1)]が実施した PV システム導入者を対象とする 2 回の調査では，世帯人数が 3～5 人の世帯が 7～8 割を占めていることから，本調査の世帯人数は PV システム導入住宅として平均的な水準と考えられる。

住宅の延床面積の平均値は 143 ㎡であり，一戸建ての全国平均値 133 ㎡（平成 25 年住宅・土地統計調査。持ち家に限る。）を上回っている。住宅の建築時期による建築後経過年数の平均値は 15.0 年であり，比較的新しい住宅が多い。PV システムの導入が近年拡大していること，耐震性に懸念のある老朽化住宅には導入が難しいことが主な理由と考えられる。

表 4.2.1　回答者の主要基本属性

回答者性別	男性 96%，女性 4%
回答者年齢	30 代以下 9%, 40 代 35%, 50 代 33%, 60 代 18%, 70 代以上 5%
世帯人数	平均 3.6 人 （1 人 1%, 2 人 20%, 3 人 26%,4 人 32%, 5 人 14%, 6 人以上 7%）
住宅建築時期	平均建築後経過年数 15.0 年（不明を除く）
住宅延床面積	平均 143 ㎡（不明を除く）

注：サンプルサイズ n=571

4.2.2 太陽光発電システムの導入状況

(1) 導入経緯・購入先

図 4.2.1 に PV システムの導入経緯を，図 4.2.2 に購入先を示す。導入経緯では「新築時に設置」が 16%，「既築住宅に設置」が 84%である。購入先は太陽光発電販売事業者が 49%を占め，次いでハウスメーカー15%，住宅設備販売・リフォーム事業者 11%となっている。また，新築設置の場合，導入者の 49%がハウスメーカーから，10%が工務店から購入しているが，太陽光発電販売事業者からの購入も 29%みられる。

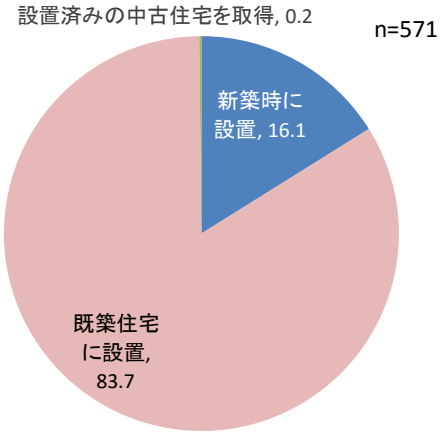


図 4.2.1　PV システムの導入経緯

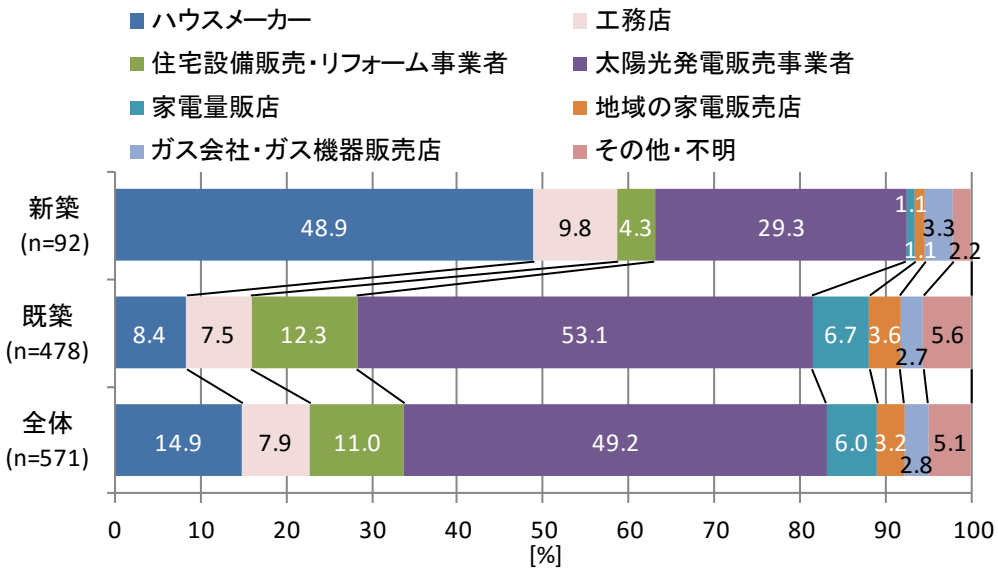


図 4.2.2　導入経緯別 PV システムの購入先

(2) 導入理由

図 4.2.3 に PV システムの導入理由を導入時期別に示す。導入理由は複合的であると考えられるが，本調査では一番の理由を挙げてもらう設問形式としている。

導入時期が 2004 年度以前の導入者では「自宅で発電できることが楽しそうだった」の割合が 42%で最高である。2005～08 年度以降は「電気代を節約し，売電収入を得たかった」の割合が最も高く，概ね近年ほど割合が高い。また，「エネルギー問題や環境問題の解決に貢献したかった」の割合は 2004 年度以前と東日本大震災直後の 2011 年度に比較的高い。PV システムの普及拡大に伴い，経済性を重視する導入者の割合が高まる傾向は白井らの研究 [4-2]，吉岡らの研究 [4-3]の結果と整合する。

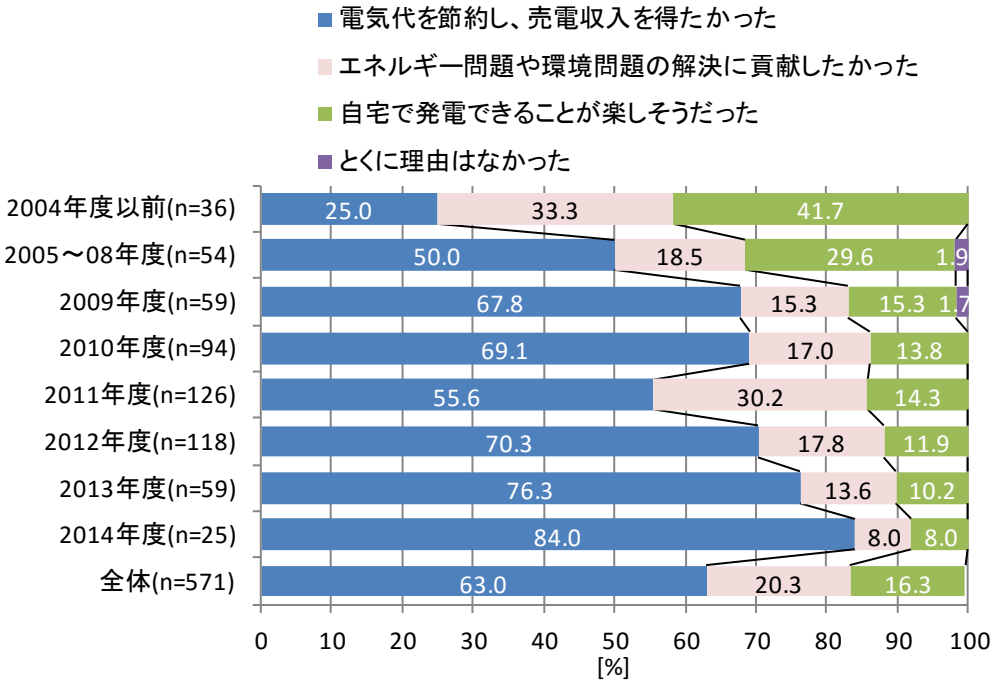


図 4.2.3　導入時期別 PV システムの導入理由

(3) 設置時・使用開始当初の問題発生状況

PV システムの設置時あるいは使用開始当初の問題発生状況を図 4.2.4 に示す。3 割近くの導入者が何らかの問題があったと回答している。最も多いのは「配電系統の電圧上昇により頻繁に出力が抑制された」であり，17%の導入者が該当している。配線ミスや設定ミスなどによる発電量の損失や施工ミスによる住宅の損傷を経験した者も数%程度みられる。その他の内容は，31 件中 19 件が施工業者との問題（施工ミス，費用，説明不足・食い違い，工期の遅れ等）であり，6 件がシステムのトラブルに関する問題，3 件が想定より発電量が少なかったことである。

新築設置の場合，住宅の損傷の経験者はいなく，配線ミスによる発電量の損失の経験者も少ない。

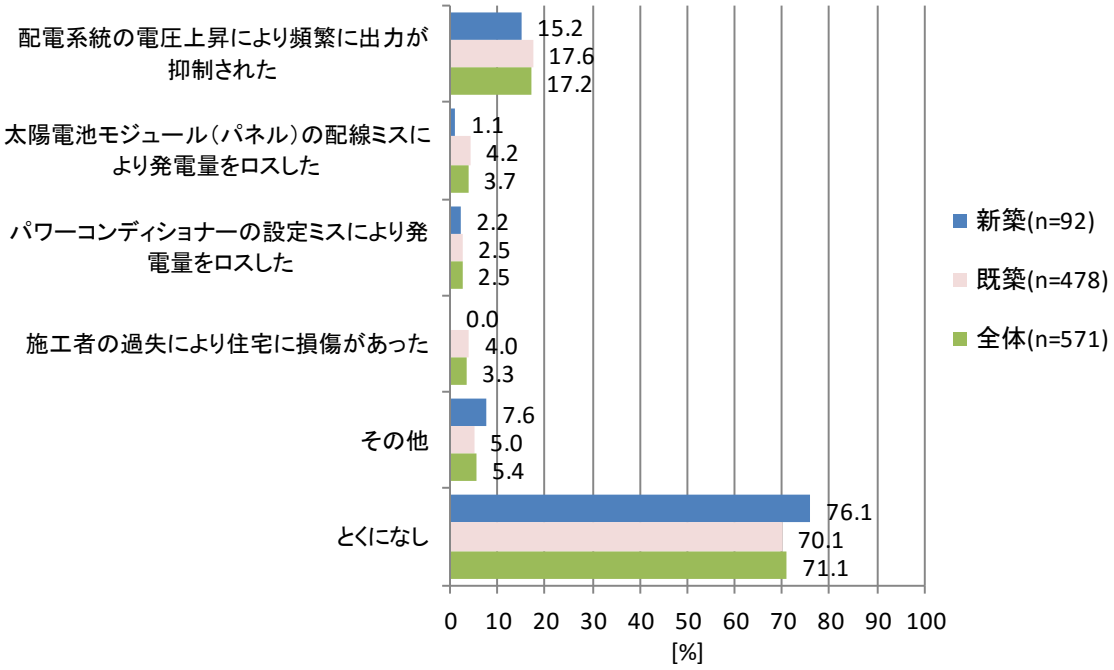


図 4.2.4　導入経緯別 設置時・使用開始当初の問題【複数回答】

4.2.3 住宅・コミュニティとの関わり

(1) 住宅における PV パネルの導入場所

住宅における PV パネルの導入場所を図 4.2.5 に示す。ほとんどが住宅の屋根に導入されている。新築設置では屋根材一体型の採用率が 16%と比較的高い。なお，その他として，敷地内の他の建物（倉庫，カーポートなど）への導入がある。

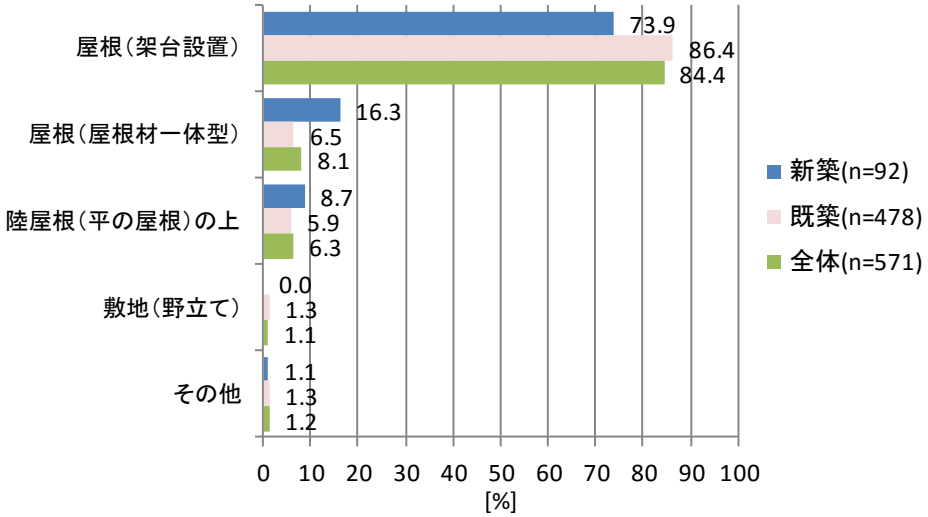


図 4.2.5　導入経緯別 PV パネルの導入場所【複数回答】

(2) PV パネルの視認可能性

57%の導入者は住宅の敷地内などから PV パネルの全体を見ることができる。「見えない」と回答した導入者は 8%である。新築設置では「見えない」の割合がやや高い。

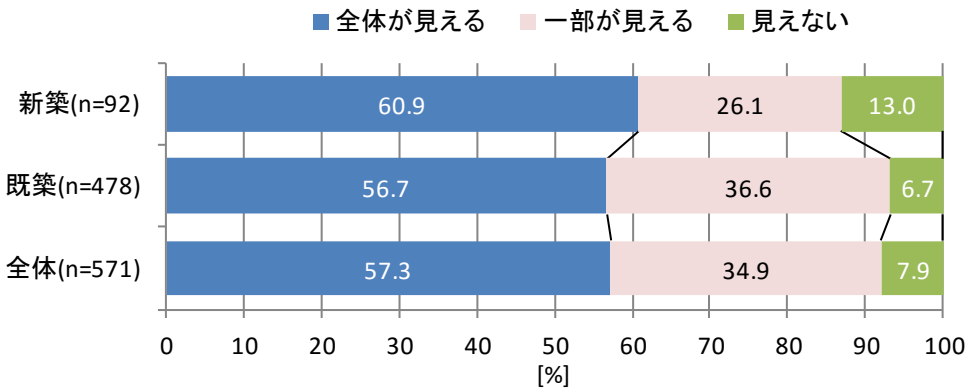


図 4.2.6　導入経緯別 PV パネルの視認可能性

注：設問文「Q8　太陽電池モジュール（パネル）はご自宅の敷地内や周辺の道路から見えますか。」

(3) PV パネルの美観評価

PV パネルが住宅の美観を増していると感じている導入者は 14%である。反対に美観を損ねていると感じている導入者も 12%いる。このように美観評価は分かれている。PV パネルの導入を前提とした設計が可能と考えられる新築設置の場合でも，美観を増していると感じている導入者は 12%に留まるが，美観を損ねていると感じている導入者は 7%と，比較的低い（図 4.2.7）。

設計・施工技術の向上により，導入時期が近年の方が美観評価は高いことが期待されるが，実際には図 4.2.8 に示すように，評価は向上していない。

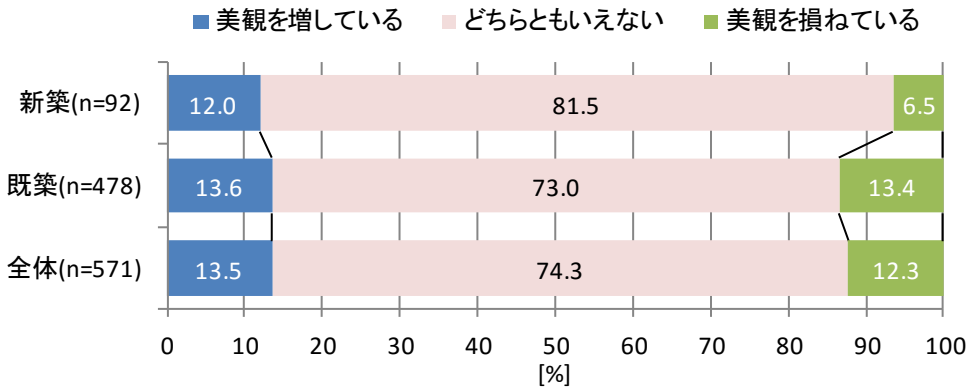


図 4.2.7　導入経緯別 PV パネルの美観評価

注：設問文「Q9　太陽電池モジュール（パネル）は住宅の美観を増していると思いますか。」

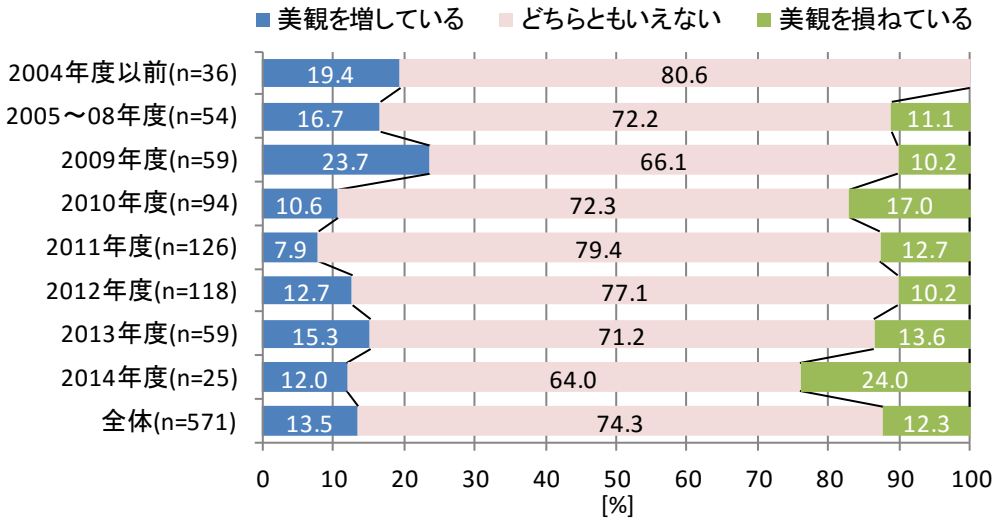


図 4.2.8　導入時期別 PV パネルの美観評価

(4) 近隣・周辺環境との関わり

導入後に近隣居住者から PV システムについて話しかけられたことがある導入者の割合は 42%である。詳しい質問や相談に応じたことがある導入者は 21%，設置者同士で情報交換をしたことがある，および PV システムの設置を勧めたことがある導入者の割合はそれぞれ 19%である。PV パネルの視認可能性によって，近隣の方との関わりには差がみられる。PV パネルが自宅敷地内などから「見えない」場合，いずれの項目についても近隣居住者との関わりは小さい（図 4.2.9）。

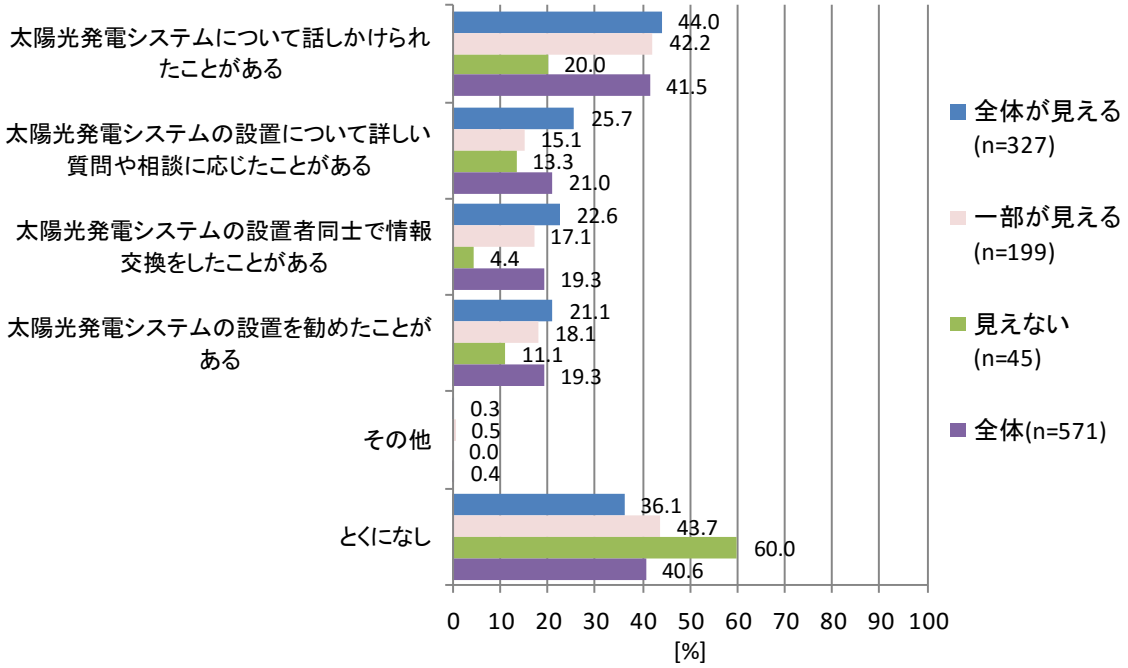


図 4.2.9　PV パネルの視認可能性別 近隣居住者との関わり【複数回答】

注：設問文「Q10　太陽光発電システムの設置後，近隣の方との関わりはありましたか。」

導入後に新しい建築物や樹木の生長による日影の影響を受けた導入者は，それぞれ1.8%，1.2%とわずかにみられる。PV パネルの反射光やパワーコンディショナーの作動音によって，近隣から苦情を受けた経験のある導入者はみられない。その他の自由回答で 8 件挙げられたのは，降雪時の PV パネルから隣接する住宅敷地等への急激な落雪である。隣の住宅の屋根を破損した事例もみられた（図 4.2.10）。

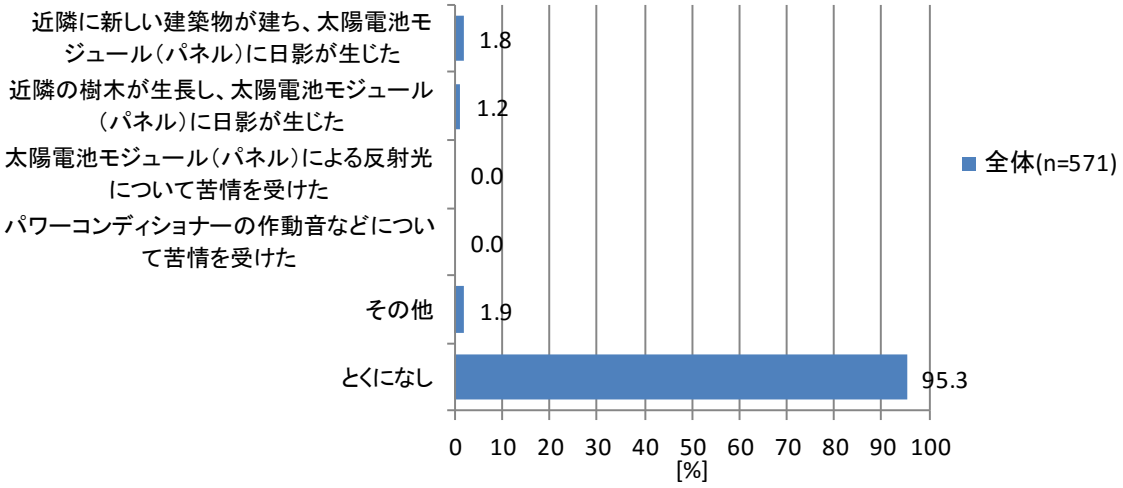


図 4.2.10　導入後の周辺環境変化による日影，近隣からの苦情【複数回答】

注：設問文「Q11　太陽光発電システムの利用に伴い，設置後の周辺環境の変化による日影の発生や，近隣の方とのトラブルを経験したことがありますか。」

4.2.4 定期点検・トラブルなどの経験

(1) 定期点検の受検状況

定期点検を受けている(受ける予定がある場合を含む)導入者の割合は 37%である。導入時期別にみると，2012 年度の導入者が定期点検受検の割合が最も高く，49%である。古い導入者ほど受検割合が低く，2014 年度導入者も受検割合が低い(図 4.2.11)。

購入先別にみると，ハウスメーカーからの導入者の受検割合は 40%で全体平均並であるが，工務店は 27%で最も低い（図 4.2.12)。

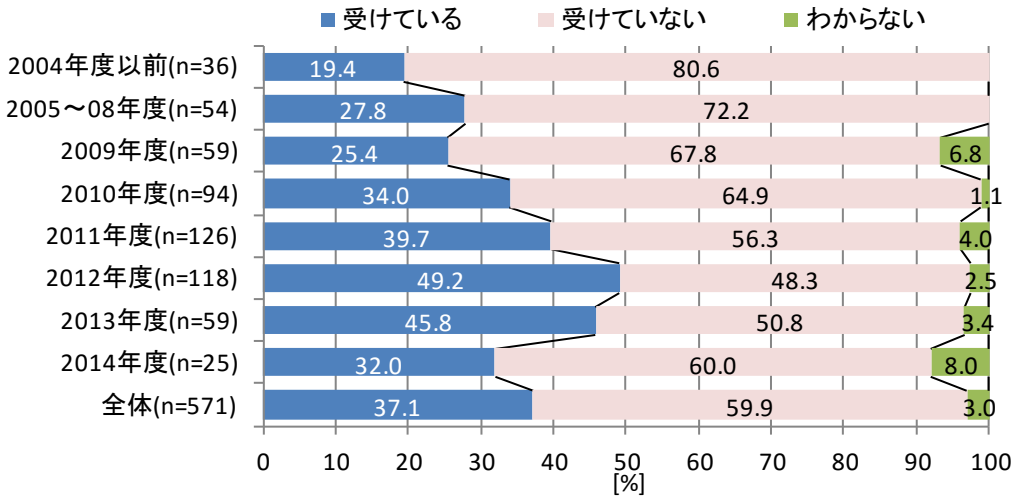


図 4.2.11 導入時期別 定期点検の受検状況

注：設問文「Q12 太陽光発電システムの定期点検を受けていますか。今後，受ける予定がある場合を含みます。」

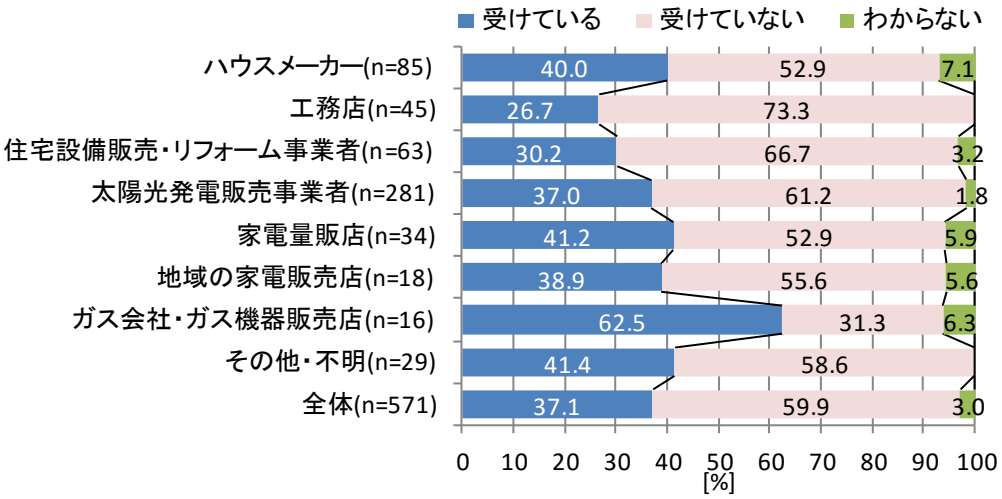


図 4.2.12 購入先別 定期点検の受検状況

(2) パワーコンディショナーの交換・修理経験

パワーコンディショナーの本体交換経験がある導入者の割合は 6%，部品交換などの修理の経験については 4%である。導入時期が 2004 年度以前の導入者の 50%はいずれかを経験している（図 4.2.13）。

交換・修理の時期はばらついているが，本体交換と修理のいずれも導入から 1 年以内が最も多い（図 4.2.14）。

パワーコンディショナーの交換・修理のきっかけは故障（自然災害を除く）が 61%で最も多く，次いでメーカーのリコール（16%），自然災害による故障（7%）である。その他（5 件）の内容は，異音等の発生（2 件），増設に伴う容量変更の必要性（2 件），表示系のトラブル（1 件）である（図 4.2.15）。

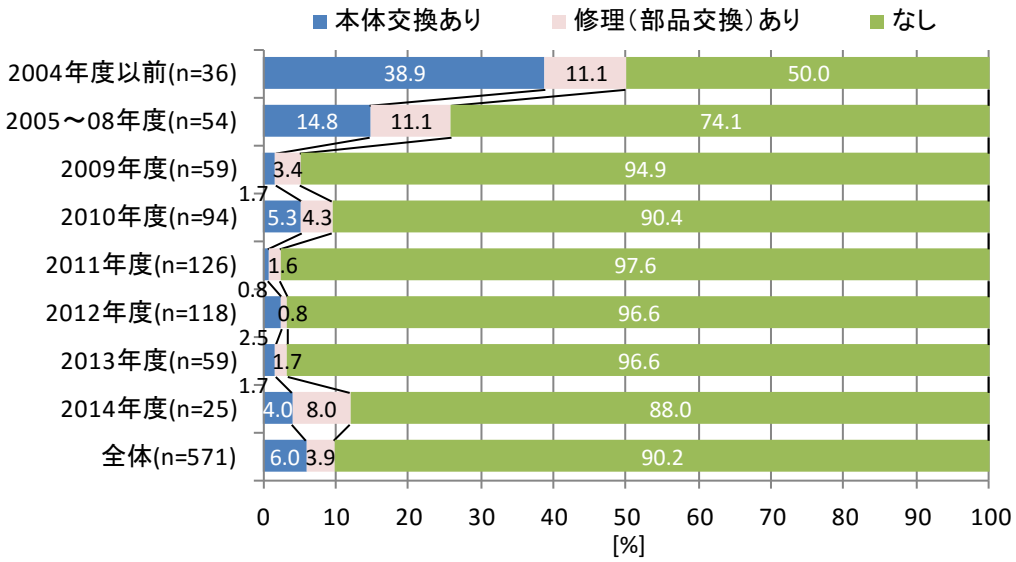


図 4.2.13　導入時期別 パワーコンディショナーの交換・修理経験

注：設問文「Q13　これまでにパワーコンディショナーの交換や修理をしたことがありますか。本体交換，修理（部品交換）の両方を経験している場合は，本体交換を選択してください。」

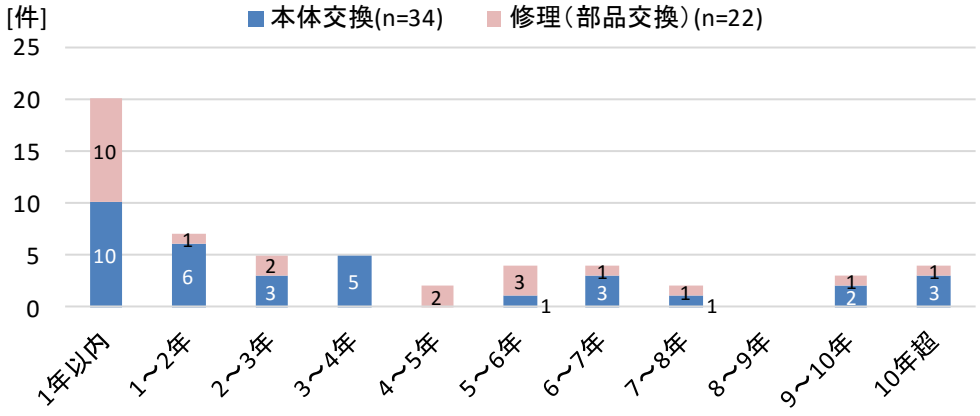


図 4.2.14　パワーコンディショナーの交換・修理の時期（導入後経過年）

注：複数回経験している場合は 1 回目の状況を回答。

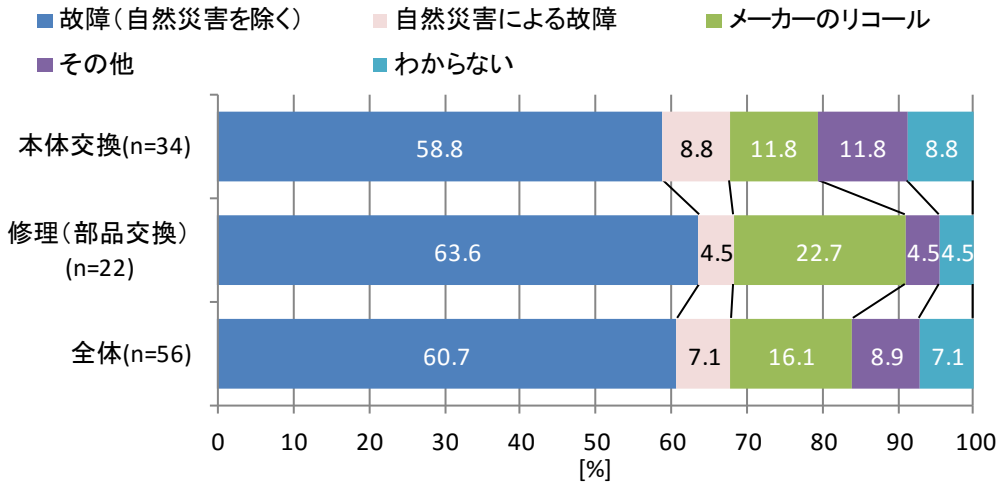


図 4.2.15　パワーコンディショナーの交換・修理のきっかけ

注：複数回経験している場合は 1 回目の状況を回答。

(3) PV パネルの交換経験

PV パネルの交換経験のある導入者の割合は全体交換が 1%，一部交換が 3%であり，合計 4%が交換を経験している。パワーコンディショナーと比べると経験率は半分以下である。全体交換については導入時期が 2004 年度以前の導入者に集中している。2004 年度以前の導入者の 33%は全体交換または一部交換を経験している（図 4.2.16）。

PV パネルの交換時期は導入から 4 年以内で 48%（25 件中 12 件）を占めている。全部交換についても，2 年以内が 2 件ある。本調査では把握していないが，PV パネルのメーカー保証期間（通常 10 年以上）や定期点検サイクルの影響を受けている可能性がある（図 4.2.17）。

PV パネルの交換のきっかけは，発電出力の不足・低下が 52%（13 件）と最も多く，自然災害などによる損壊も 16%（4 件）みられる。その他（6 件）のうち 4 件は施工ミスによる破損（配線，コネクタを含む）であり，これらは 4 年以内の交換に含まれる（図 4.2.18）。

なお，本調査の対象者は Solar Clinic の利用者であり，発電性能に対する関心が高いと考えられるため，平均的な導入者に比べ，発電出力の不足や低下の兆候に気づきやすい可能性があることに留意が必要である。

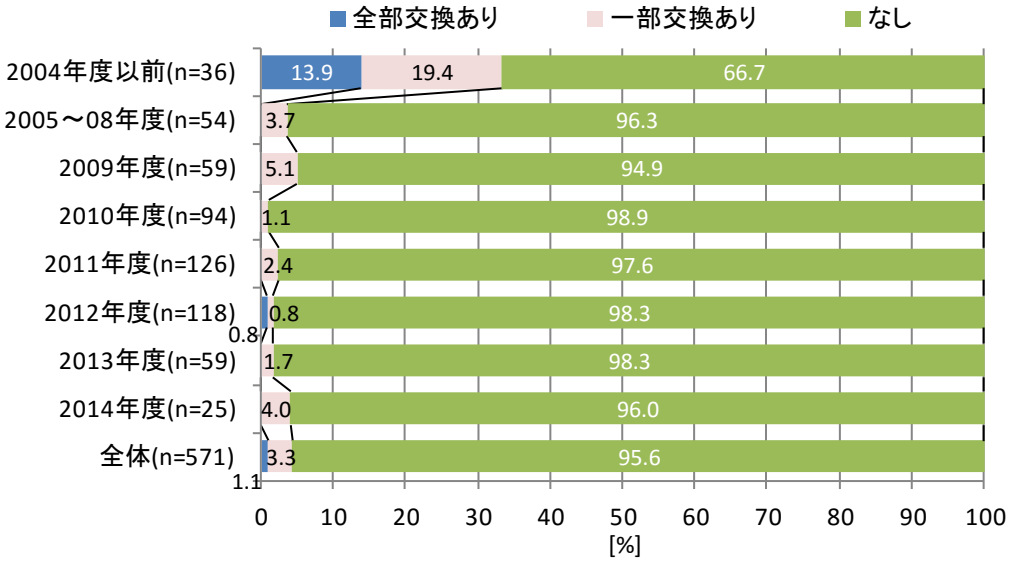


図 4.2.16　導入時期別 PV パネルの交換経験

注：設問文「Q14　これまでに太陽電池モジュール（パネル）の全部または一部を交換したことがありますか。全部交換，一部交換の両方を経験している場合は，全部交換を選択してください。」

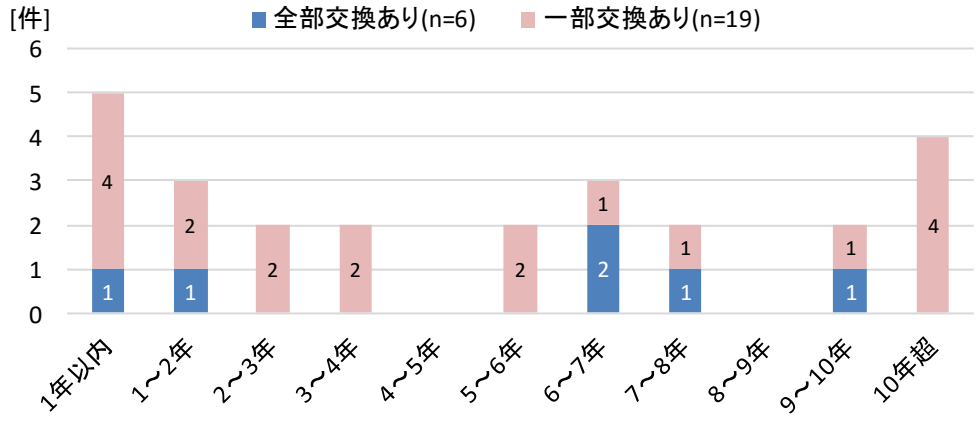


図 4.2.17　PV パネルの交換の時期（導入後経過年）

注：複数回経験している場合は 1 回目の状況を回答。

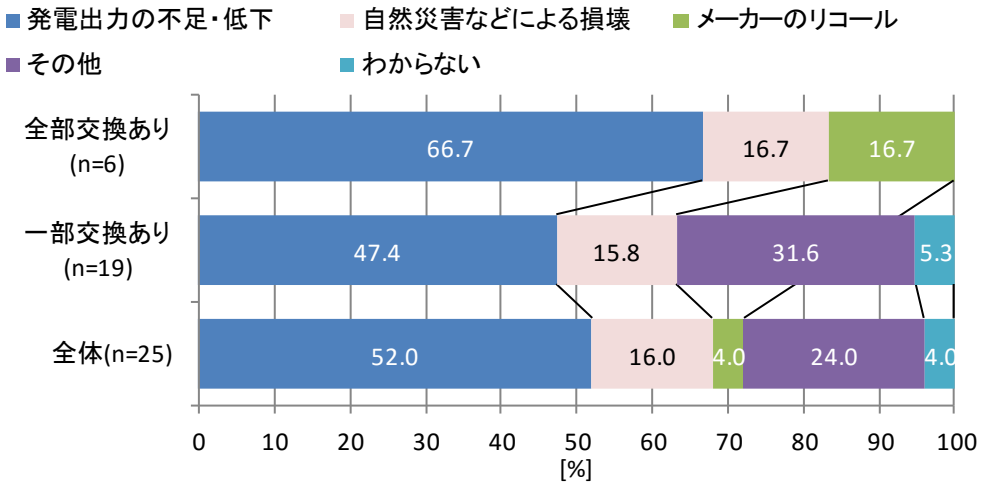


図 4.2.18　PV パネルの交換のきっかけ

注：複数回経験している場合は 1 回目の状況を回答。

(4) 停電の経験・自立運転機能の利用経験

自宅での停電経験や自立運転機能[18]の利用経験は PV システムの満足度に影響する可能性がある。

過去 10 年以内（PV システムの利用前を含む）に自宅で 1 時間を超える停電を経験したことがある導入者の割合は，経験回数 2 回以上が 19%，1 回が 18%となっている。東日本大震災（2011 年 3 月）の被災地や計画停電の実施された東京電力管内が含まれる東北と関東甲信で特に停電の経験者が多い（図 4.2.19）。

自立運転機能の利用経験がある導入者の割合は，経験回数 2 回以上が 4%，1 回が 6%である。経験者は東日本大震災以前の導入者に集中している（図 4.2.20）。ただし，自立運転機能の利用経験者は，東北と関東甲信以外の地域でもみられる（図 4.2.21）。

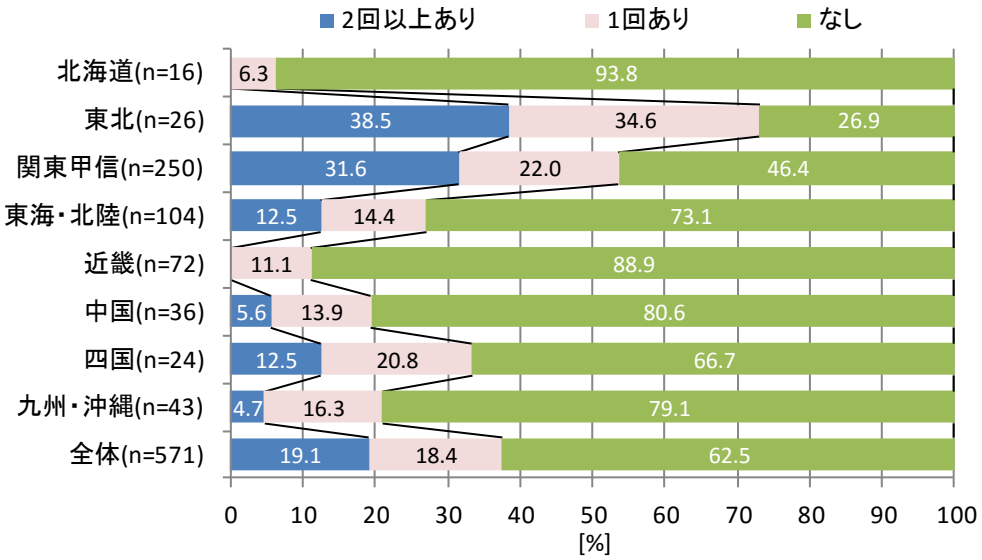


図 4.2.19　導入地域別 自宅での停電経験

注：設問文「Q15　太陽光発電システムを利用する前を含め，10 年以内に，ご自宅で 1 時間を越える停電を経験したことがありますか。」

[18] 住宅用 PV システムは電力系統に連系されているため，停電時には連系が遮断され，発電が停止する。自立運転機能を利用することで，電力系統から遮断された状態で，一定量の電気（多くは専用コンセントから 15 アンペア（1,500W）以内）を使用することができる。

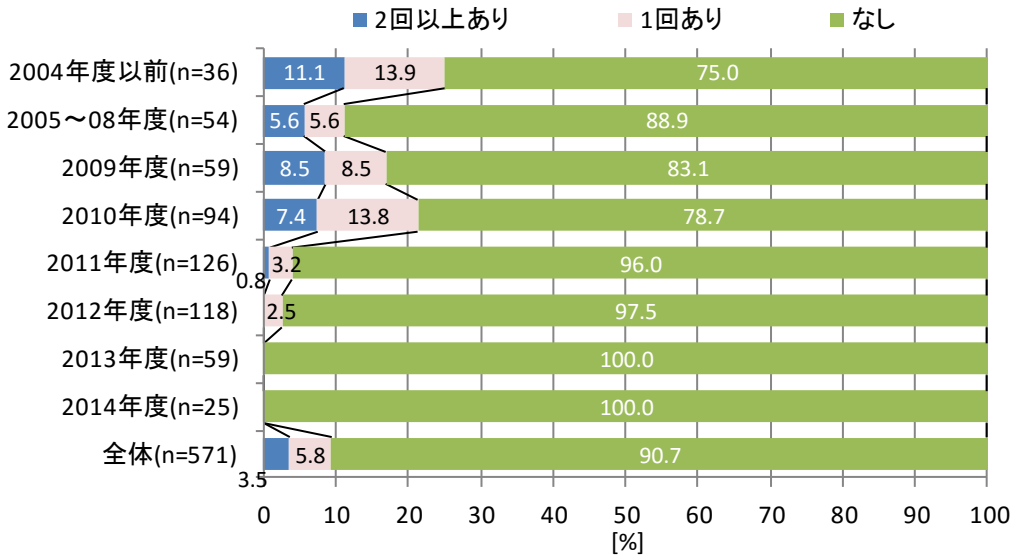


図 4.2.20　導入時期別 自立運転機能の利用経験

注：設問文「Q16　太陽光発電システムの稼動中に停電が発生し，自立運転機能で電気を使用したことがありますか。」

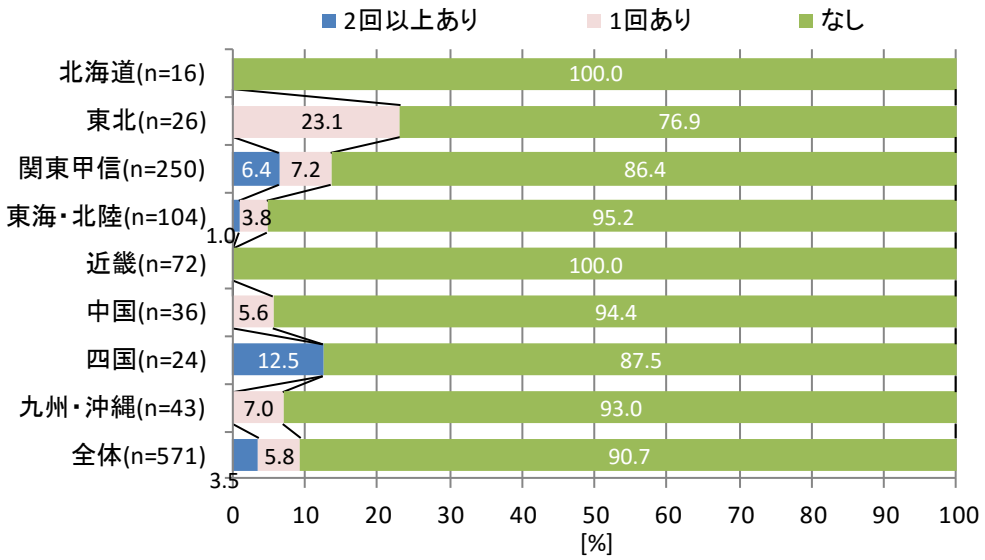


図 4.2.21　導入地域別 自立運転機能の利用経験

4.2.5 発電量や節電に関する意識，消費者としての態度

(1) 発電量などの確認頻度

発電量，売電量および買電量の確認頻度を図 4.2.22 に示す。発電量をほぼ毎日確認している導入者の割合は 32%である。売電量と買電量については，月に 1 回程度確認している導入者が多い。

導入時期別に発電量の確認頻度をみると，近年の導入者の確認頻度が高い。ただし，2004 年度以前の導入者の確認頻度も高い（図 4.2.23）。

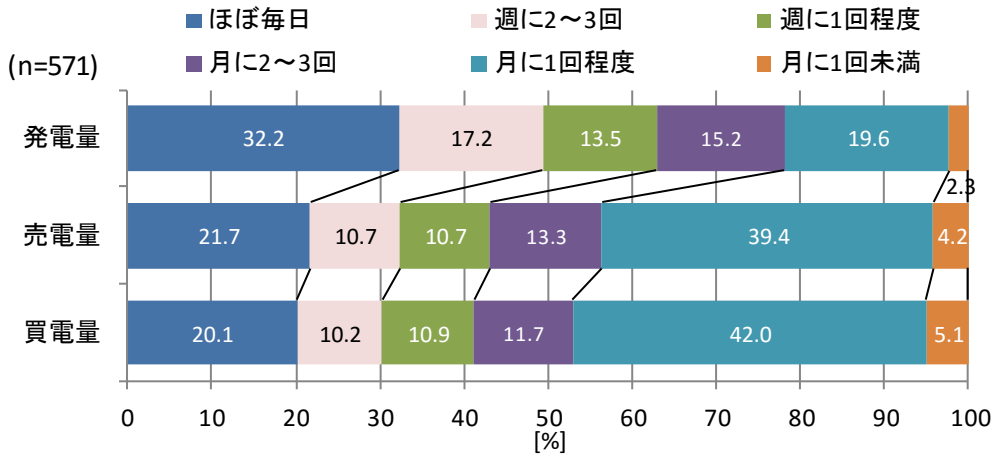


図 4.2.22　発電量・売電量・買電量の確認頻度

注：設問文「Q17　あなたは，発電量，売電量，買電量を，どのくらいの頻度で確認していますか。」

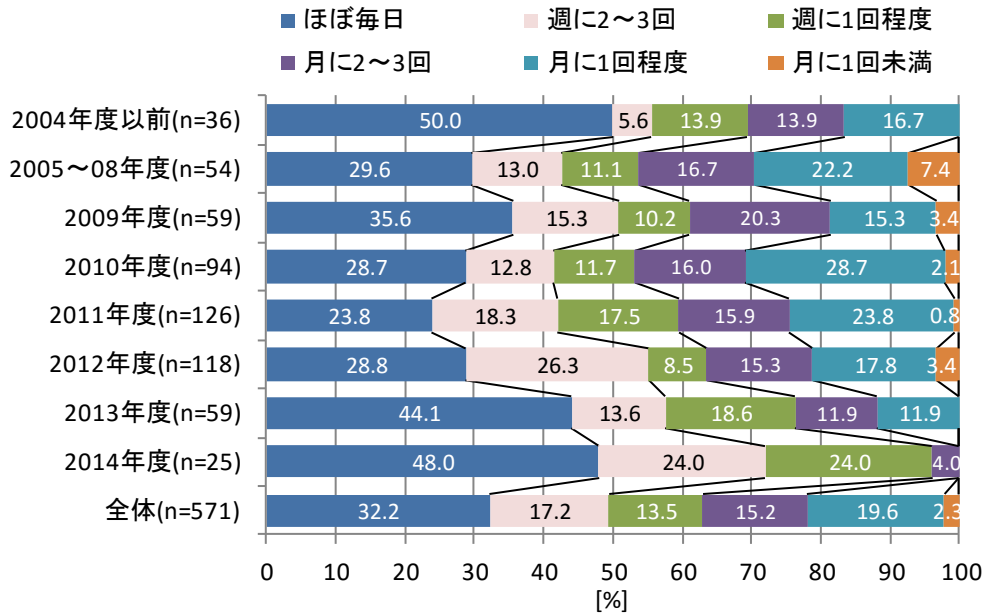


図 4.2.23　導入時期別 発電量の確認頻度

(2) 節電意識

ふだんの生活で節電を「かなり心掛けている」導入者の割合は 21%である。「ある程度心掛けている」(59%) を合わせると，8 割の導入者が節電を意識している。また，発電量の確認頻度が高いほど，節電意識も高い傾向がうかがえる（図 4.2.24)。

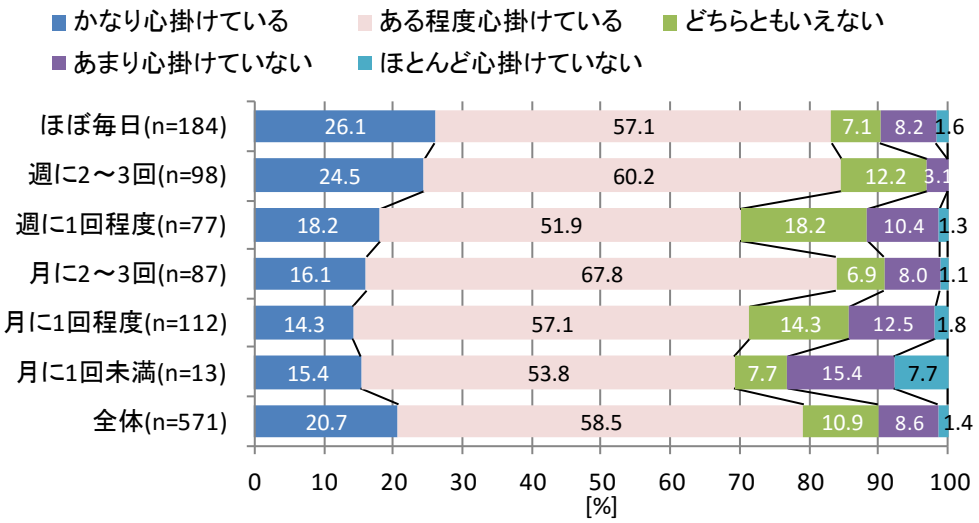


図 4.2.24　発電量の確認頻度別 節電意識

注：設問文「Q18　あなたやあなたのご家族は，ふだんの生活で節電を心掛けていますか。」

(3) 消費者態度

消費者としての態度について，消費者庁による「消費者意識基本調査」[4-4)]の設問を踏襲した 3 項目の結果を図 4.2.25 に示す。

「トラブルに備えて，対処方法をあらかじめ準備・確認しておく」と「商品やサービスについて問題があれば，事業者に申立てを行う」の 2 項目は，PV システムの導入・利用に関するトラブルの予防や対応に関する意識と関連している。いずれの項目でも，本調査の PV システム導入者は平均的な消費者に比べ，高い意識を有している傾向がみられる。

「環境に配慮した商品やサービスを選択する」についても平均的な消費者より，「かなり心掛けている」や「ある程度心掛けている」割合が高いが，差は上の 2 項目ほどではない。

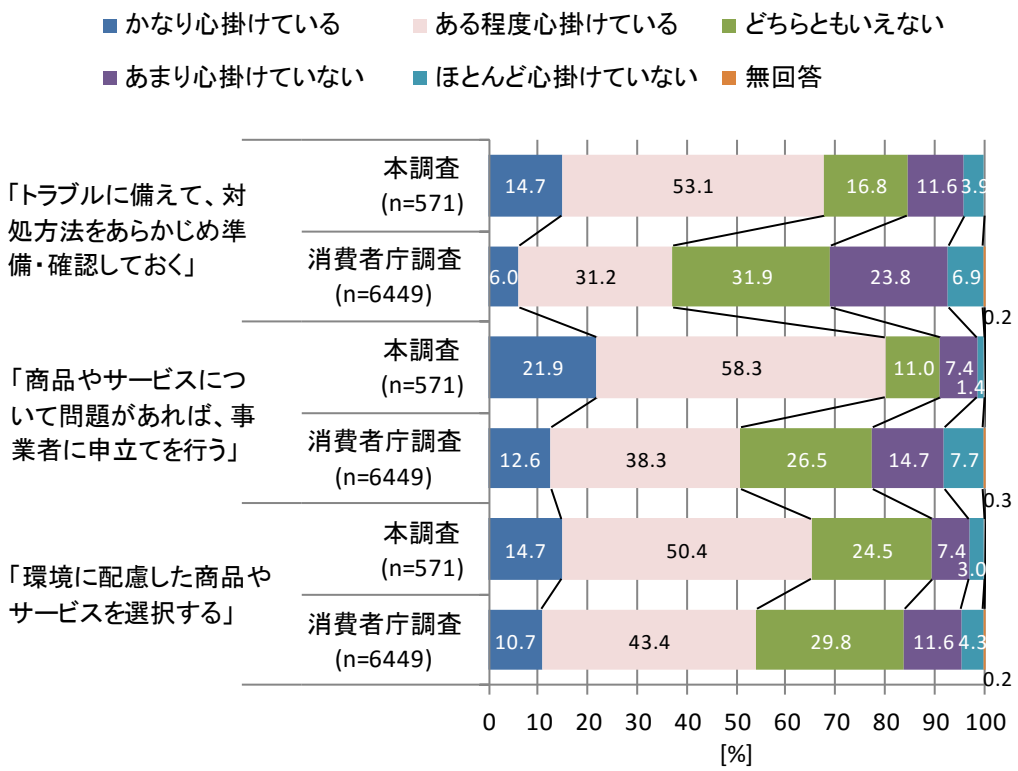


図 4.2.25　消費者としての態度

注：設問文「Q19　あなたは，消費者として以下のような行動をどの程度心掛けていますか。」
出所：本研究のアンケート調査および消費者庁 [4-4)]

4.2.6 太陽光発電システムに対する満足度

図 4.2.26 に PV システムに対する満足度を示す。「発電量」や「電気代の節約と売電収入」については，「満足」と「やや満足」を合わせた肯定的評価が 80%前後となっている。「信頼性・耐久性」と「購入先やメーカーの対応力」については，こうした評価を行う機会が訪れていない導入者もいるため「どちらともいえない」の割合が高い。「総合的に考えて太陽光発電を設置したこと」についての満足度（以下，「総合満足度」という）は「満足」が 52%，「やや満足」が 39%で肯定的評価が 90%を超えている。総合満足度は，個別の 4 項目の満足度を上回っている。

導入者の意識・態度，パネルの美観評価，停電時の自立運転機能使用経験等と総合満足度の関係を図 4.2.27 に示す。節電意識（図 4.2.24）と消費者態度（図 4.2.25）のうち,「環境に配慮した商品やサービスを選択する」について「かなり心掛けている」と回答した方（571 人中それぞれ 118 人，84 人）は，総合満足度が非常に高く，「満足」の割合が 70%以上である。節電意識には経済的動機も含まれると考えられるが，環境意識が高いほど，PV システムに対する総合満足度が高い可能性がうかがえる。

PV パネルが住宅の美観に及ぼす影響に関する評価（図 4.2.7）も総合満足度に影響している。肯定的評価者（571 人中 77 人）の総合満足度は極めて高く，反対に否定的評価者（同 70 人）の総合満足度は低めであり，統計的な有意差がある（Pearson のカイ二乗検定, p=0.0048）。美観評価は主観によるため，確実に効果の上がる対応は難しいが，設計・施工者は完成イメージを事前に示す，設置方法や PV パネルについて複数の選択肢を示すなど，美観に配慮することが望まれる。

停電時に PV システムの自立運転機能で電気を使った経験（図 4.2.20）が 2 回以上ある導入者は総合満足度が高く，非常時に電気が使えることの価値は高く評価されている。自立運転機能は使用頻度が低い機能であるため，いざという時に確実に活用されるように，使用方法等について，きめ細かいフォローが必要と考えられる。

施工ミスを経験した導入者（図 4.2.4）の総合満足度は比較的低いが，日影の影響を受けた導入者の総合満足度は，小サンプルであるがむしろ高く，正反対の傾向を示している。施工ミスは避けられるべきものであるが，近隣での新築や樹木の生長は止むを得ないことと受け止められ，満足度に影響を及ぼさなかったと考えられる。

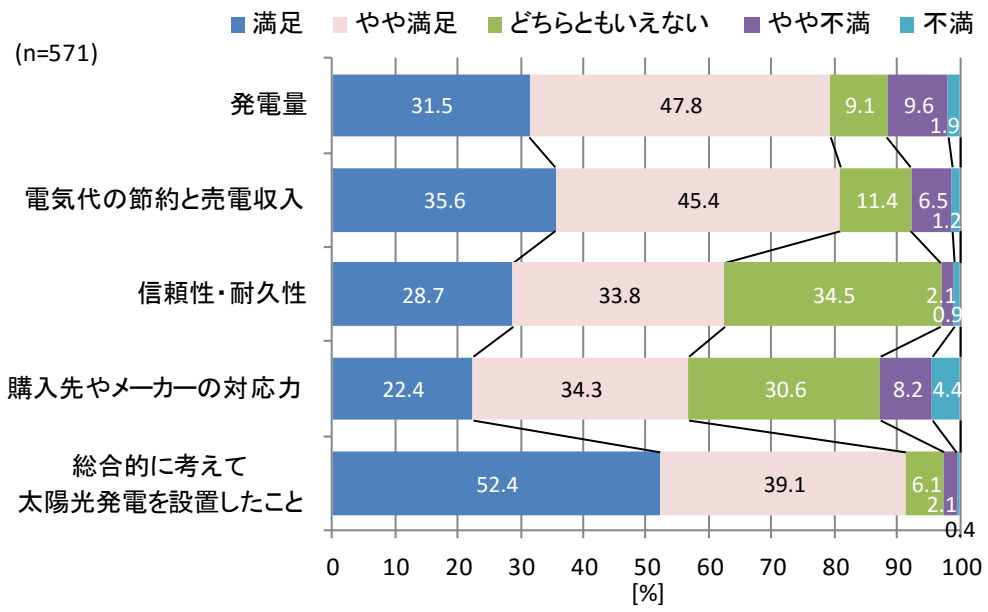


図 4.2.26　PV システムに対する満足度

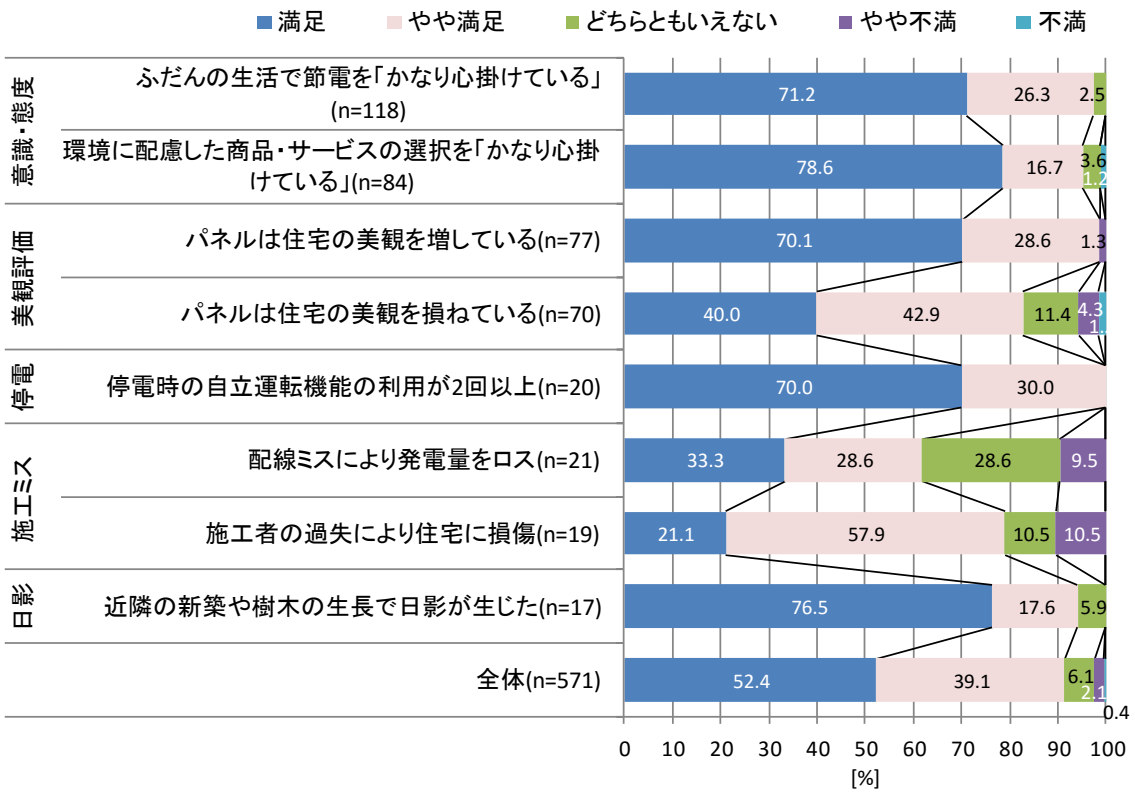


図 4.2.27　総合的に考えて太陽光発電を設置したことの満足度

4.2.7　今後の意向

PV システムや電気の使用に関する今後の意向を図 4.2.28 に示す。システム関係では家庭用蓄電池システムや電気自動車（EV）・プラグインハイブリッド自動車（PHEV）について利用意向がある導入者が 5 割を超えている。PV パネルの増設は導入場所の制約があると考えられるが，3 割の導入者に意向がある。ガス発電システムの併用意向は 1 割に留まる。

今後の意向に関する自由記述式回答では，余剰電力に対する固定価格買取制度の期間（10 年間）終了後の売電価格が見通せないことへの不安が記されている。PV システムが発電した電気を売電せずに自宅で消費（自家消費）することへの関心の高まりが，家庭用蓄電池システムや EV・PHEV に対する利用意向の高さに現れていると考えられる。図 4.2.29 に示すように，発電容量が大きいほど家庭用蓄電池の利用意向が強い。

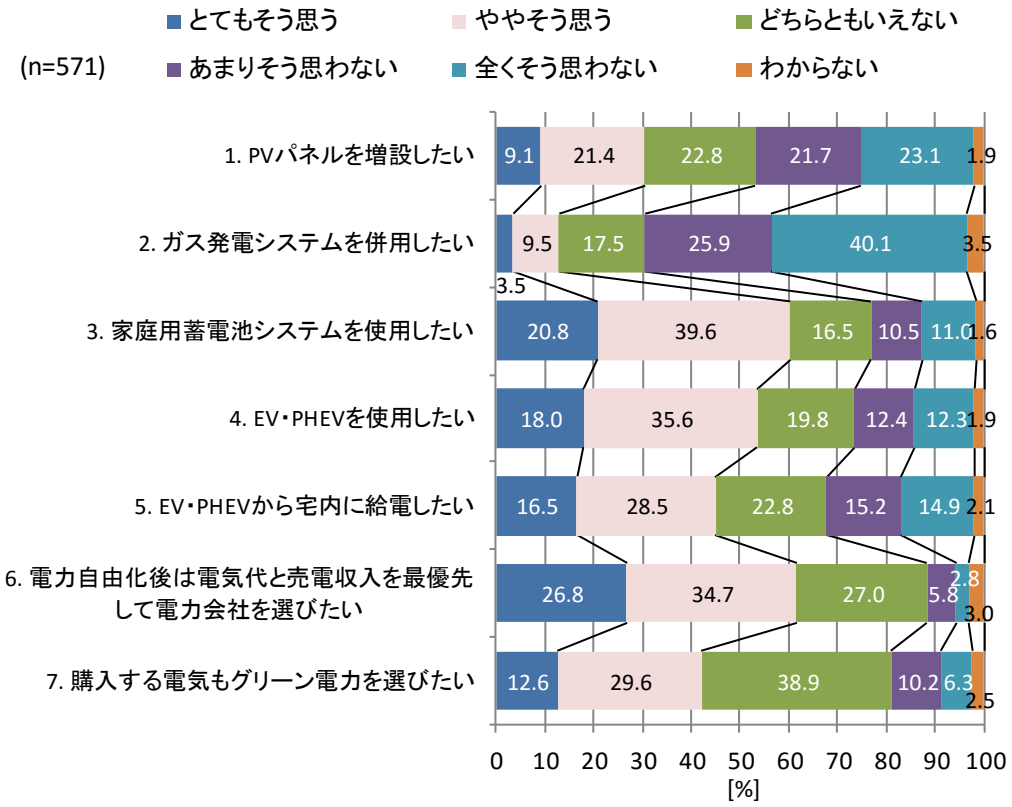


図 4.2.28　PV システムや電気の使用に関する今後の意向

図 4.2.30 に，固定価格買取制度の買取期間（10kW 未満の PV システムでは 10 年間）の終了後の売電価格に関する導入者の見通しを示す。導入者の 34%が買電価格よりも低くなると予想している。売電価格の予想は困難であるが，環境価値に対する評価が大きく向上しない限り，この予想は妥当と考えられる。一方で，導入者の半数以上は買電価格と同程度以上での買い取りを予想している。実際にそうならなければ，自家消費への関心はさらに高まり，家庭用蓄電池や EV・PHEV の利用意向が強まる可能性がある。

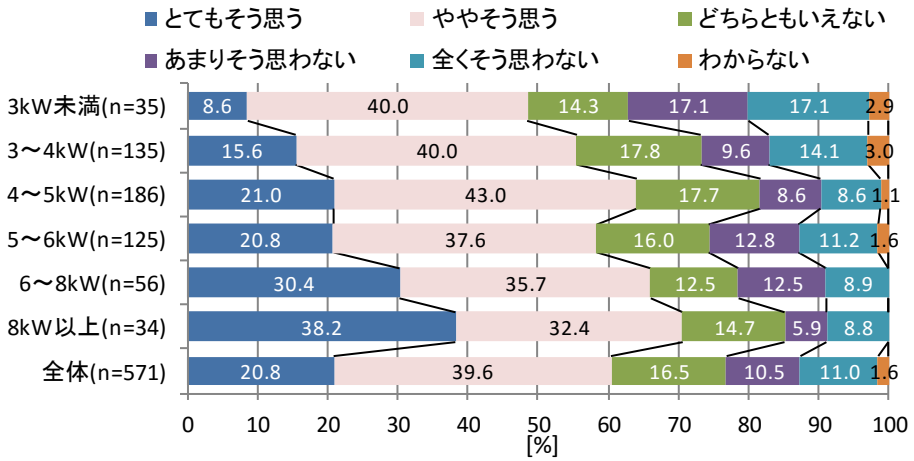


図 4.2.29　発電容量別 今後の意向（3. 家庭用蓄電池システムを使用したい）

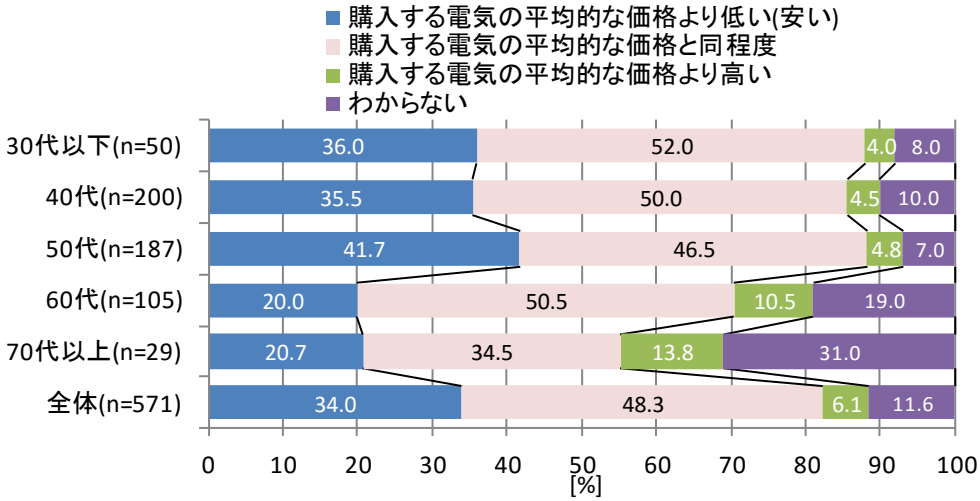


図 4.2.30　回答者年齢別 固定価格買取期間終了後の売電価格の見通し

注：設問文「Q25　固定価格買取期間(10 年)の経過後，お使いの太陽光発電システムの売電価格はどのような水準になると思いますか。」

再び図 4.2.28 に戻り，電気の使用に関する 2 項目（6，7）をみると，電気代と売電収入を最優先して電力会社を選ぶ意向を持つ導入者が 6 割みられる。また，買電分の電気についても再生可能エネルギー由来の電気（グリーン電力）を選ぶ意向も 4 割の導入者にみられる。なお，本調査は電力の小売り全面自由化（2016 年 4 月）の約 4 か月前に実施されている。

電気の使用に関する意向は，年齢によっても異なる。経済性を最優先する電力会社の選択については若い年代の意向が強く，グリーン電力の選択意向は逆に年代が高い方が強い。（図 4.2.31，図 4.2.32）

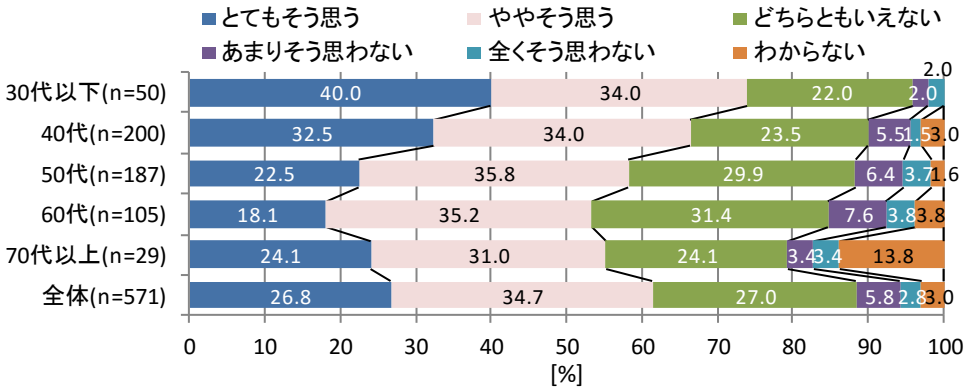


図 4.2.31　回答者年齢別 今後の意向（6. 電力自由化後は電気代と売電収入を最優先して電力会社を選びたい）

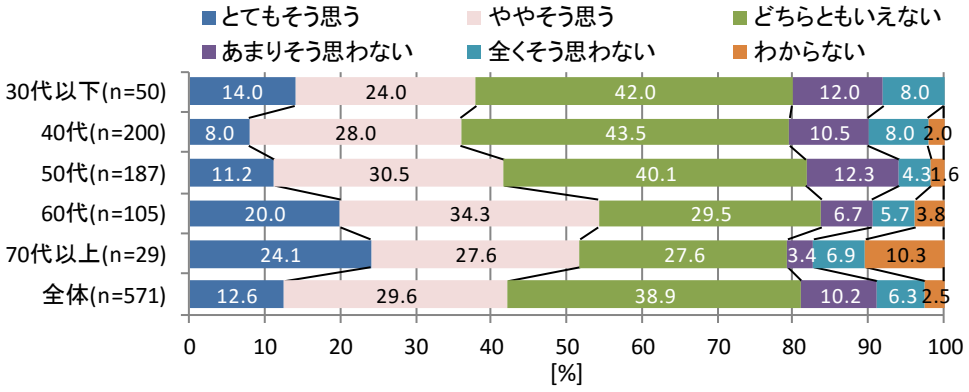


図 4.2.32　回答者年齢別 今後の意向（7. 購入する電気もグリーン電力を選びたい）

4.2.8 満足度と今後の意向・他者への推奨行動

PV システムに対する総合満足度の高さは，今後の機器の使用意向に影響を及ぼしている。図 4.2.33 から図 4.2.36 に示すように，PV パネルの増設，家庭用蓄電池システムの使用，EV・PHEV の使用および EV・PHEV からの宅内給電の使用意向については，総合満足度が「満足」の導入者において，「とてもそう思う」と「ややそう思う」を合わせた割合が最も高い。家庭用蓄電池システムの使用を除く 3 項目では統計的に有意な差である（Pearson のカイ二乗検定, $p<0.001$）。PV システムへの満足は新しい機器の使用意向を強める可能性がある。

PV システムに対する満足度の高さは，PV システムの他者への推奨行動にも影響を及ぼしている。図 4.2.37 に示すように，他者に PV システムの設置を勧めたことがある割合は，総合満足度が「満足」の導入者では 25%であり，「やや満足」の導入者の 14%を大きく上回っている。

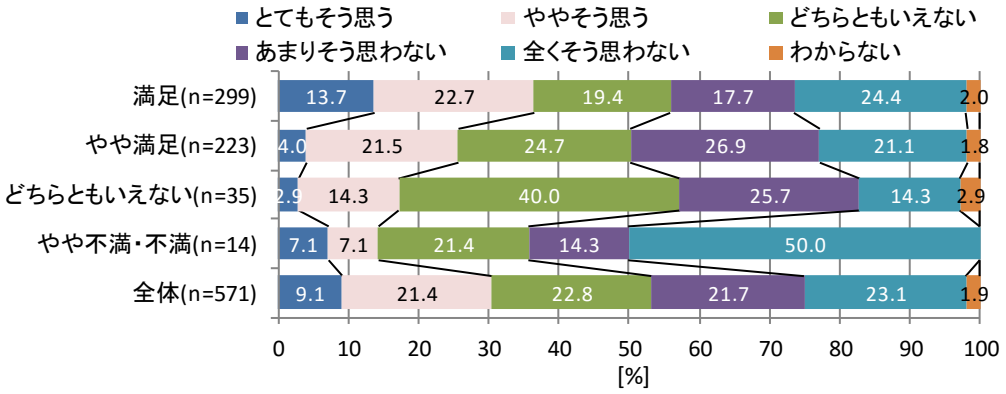


図 4.2.33　総合満足度別 今後の意向（1. PV パネルを増設したい）

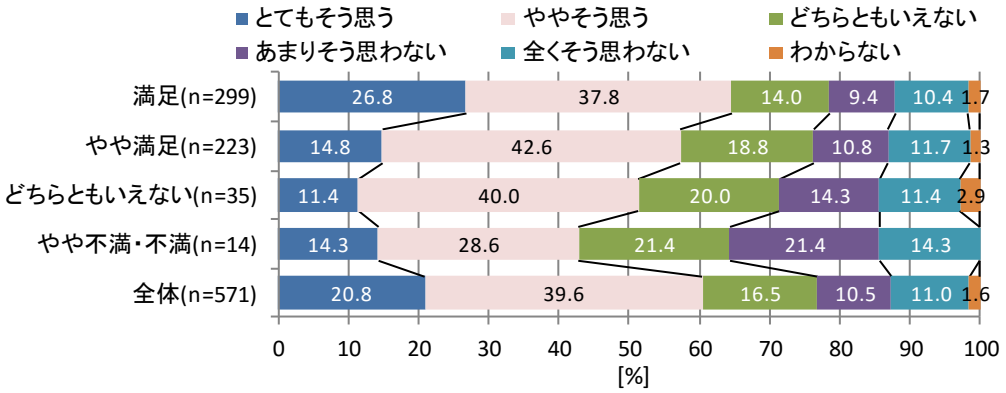


図 4.2.34　総合満足度別 今後の意向（3. 家庭用蓄電池システムを使用したい）

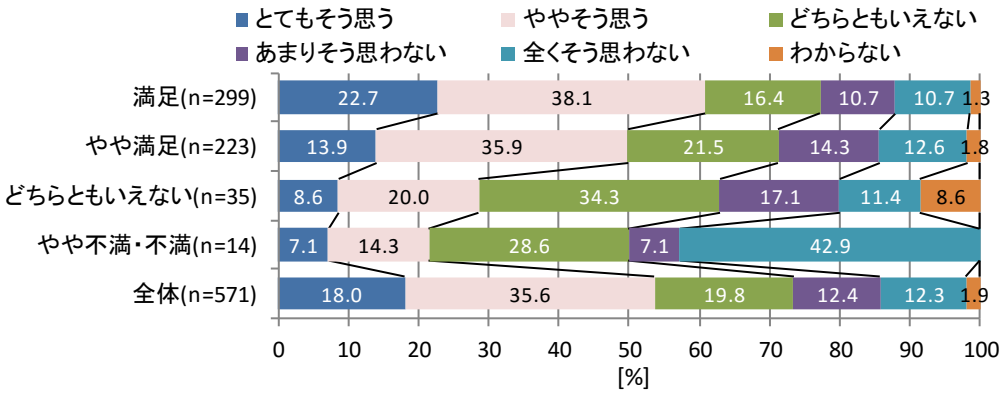


図 4.2.35　総合満足度別 今後の意向（4. EV・PHEV を使用したい）

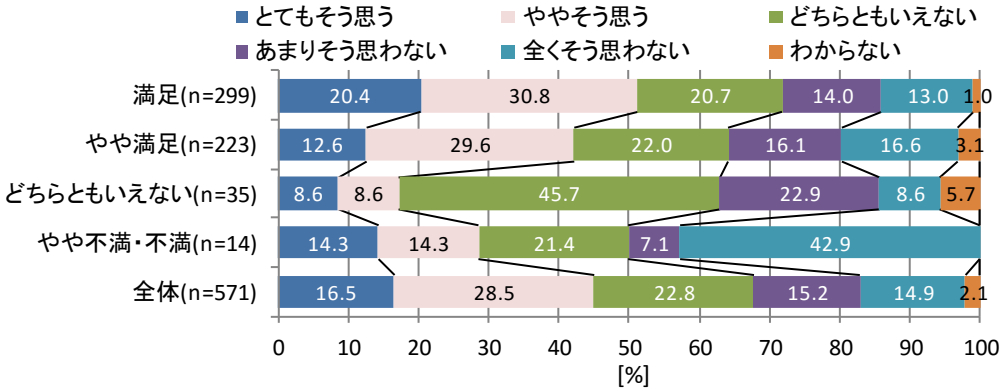


図 4.2.36　総合満足度別 今後の意向（5. EV・PHEV から宅内に給電したい）

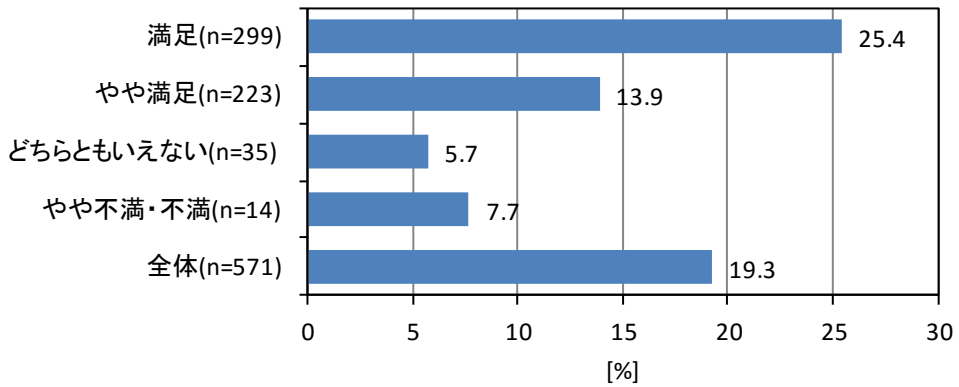


図 4.2.37　総合満足度別 「太陽光発電システムの設置を勧めたことがある」割合

4.3 発電実態と導入者意識

PV システムに対する総合満足度は，発電量や電気代の節約・売電収入以外の要素にも依存しているが，発電システムとしての性能は最重要因子と考えられる。本節ではアンケート調査で把握した発電諸量（発電量，売電量，買電量）を評価したうえで，発電性能と満足度との関係を分析する。

4.3.1 太陽光発電システムとエネルギー・機器の使用状況

図 4.3.1 に調査対象の PV システムの導入地域と発電容量を示す。導入地域は関東甲信（44%），東海（17%），近畿（13%）の割合が高い。発電容量については 4 分の 3 以上のシステムが 3kW 以上 6kW 未満の範囲にある。発電容量の平均値は 4.8kW，中央値は 4.5kW である。国内の住宅用 PV システムの平均容量は 4.1kW と推計される（表 3.2.1（p.47））ため，本調査対象の PV システムは容量が大きい層にやや偏っている。

本調査対象の PV システム導入住宅で使用されているエネルギーと機器を図 4.3.2，図 4.3.3 に示す。ヒートポンプ式給湯機の使用率が 5 割を超えており，電気温水器を合わせると 66%の住宅で電気給湯器が使用されている。このため電気以外のエネルギーが使用されていない住宅（オール電化住宅）も多い。また，家庭用燃料電池システム等の家庭用コージェネレーションシステム（CGS）の併用が 4%，家庭用蓄電池システムの使用が 3%みられる。

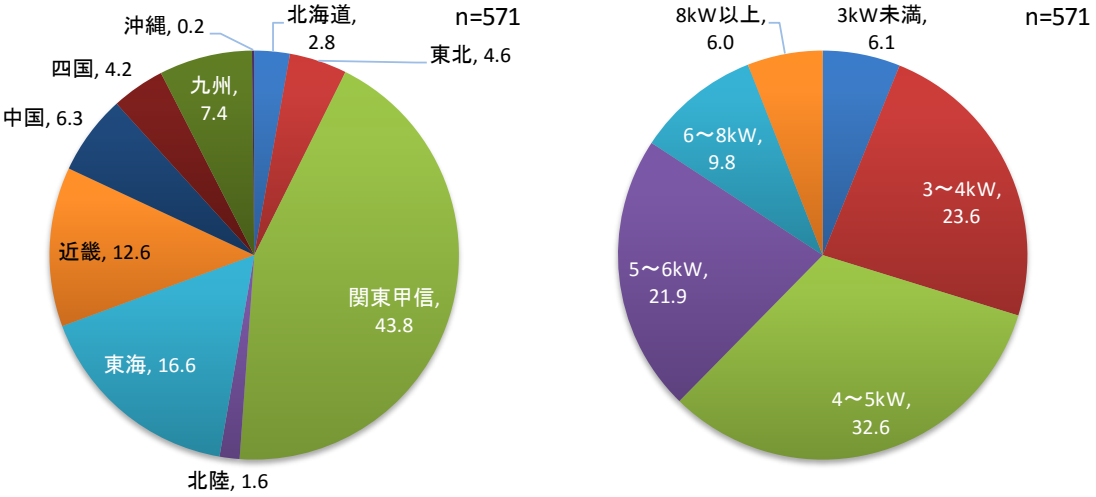


図 4.3.1　PV システムの所在地（左図）／発電容量（右図）

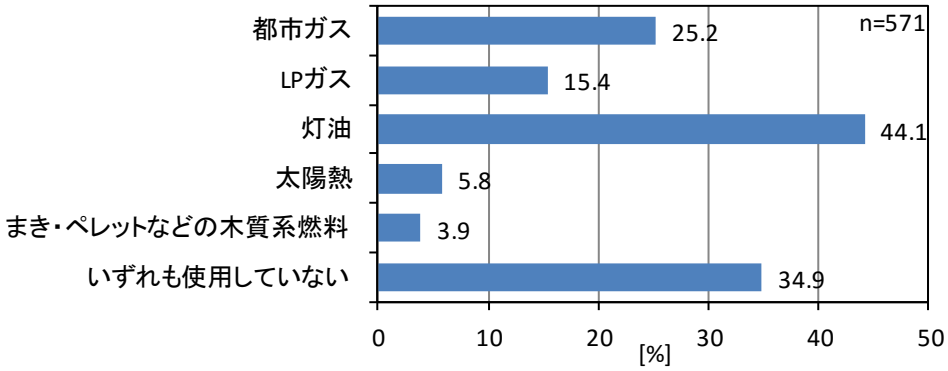


図 4.3.2　電気以外の使用エネルギー

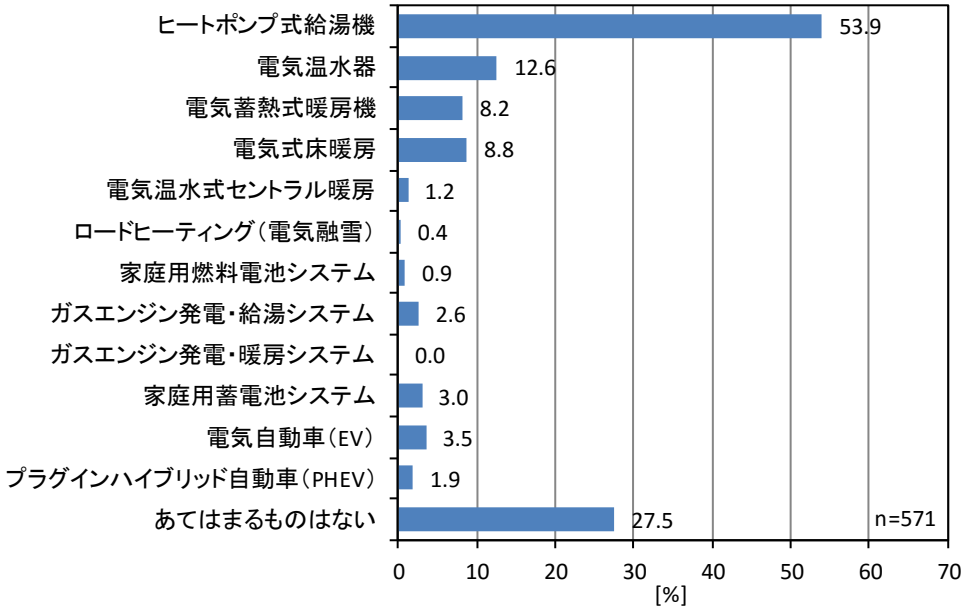
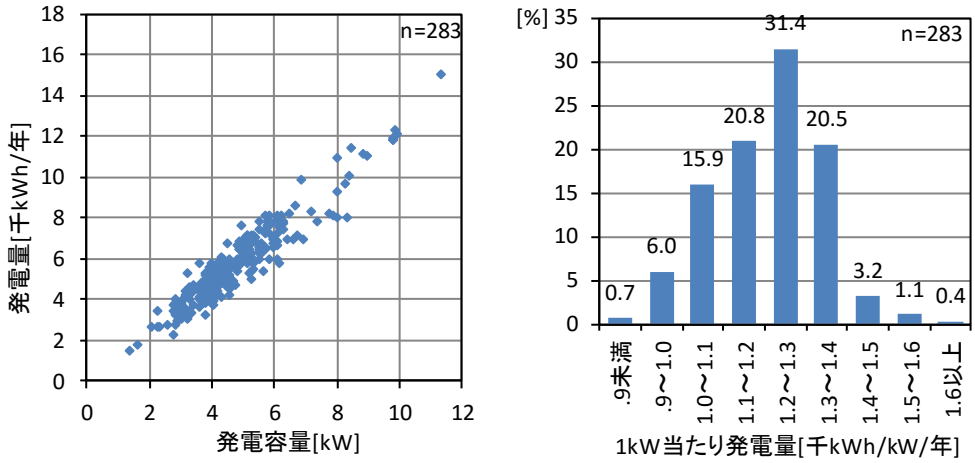


図 4.3.3　機器使用率

4.3.2 発電量と発電性能

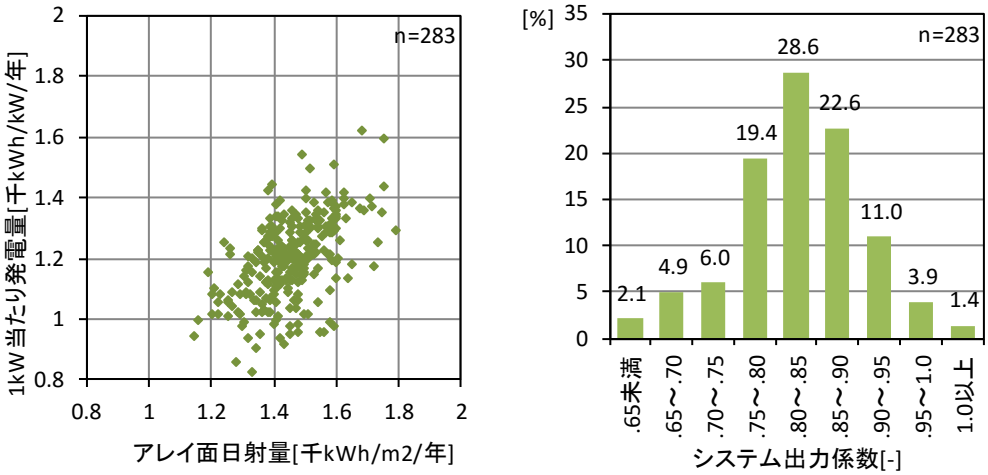
発電容量と発電量の関係および 1kW 当たり発電量の分布を図 4.3.4 に示す。調査対象期間（2014 年 12 月～2015 年 11 月）の発電量の最頻値は 1kW 当たり 1,200～1,300kWh/年，平均値は 1,205kWh/年である。

図 4.3.5 にアレイ（パネル）面日射量と発電量の関係およびシステム出力係数の分布を示す。システム出力係数の最頻値は 0.80～0.85，平均値は 0.828 である[19]。



(1) 発電容量と発電量の関係　　(2) 1kW 当たり発電量の分布

図 4.3.4　年間発電量



(1) アレイ面日射量と 1kW 当たり発電量の関係　　(2) システム出力係数の分布

図 4.3.5　発電性能

[19] システム出力係数の定義は 3.1.3 項に，アレイ（パネル）面日射量の推定方法は 3.1.2 項に示した。

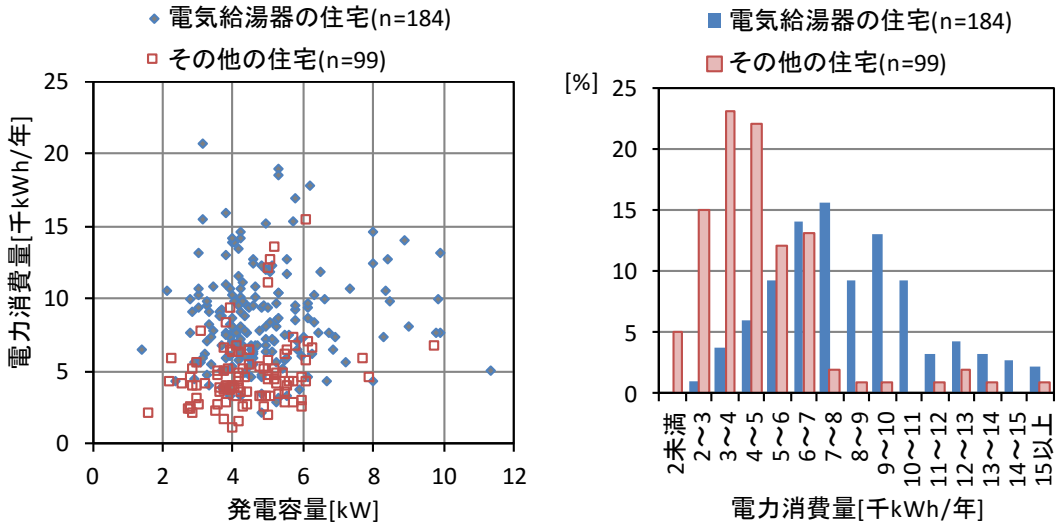
4.3.3 発電量と電力消費量の関係

PV システム導入住宅の電力消費量を図 4.3.6 に示す。電力消費量は電力会社からの購入電力量（買電量）と PV システムの発電量のうち住宅で消費された電力量（自家消費量）の合計である。電気給湯器の有無により電力消費量は大きく異なる。電気給湯器の住宅では電力消費量の最頻値が 7,000～8,000kWh/年であるのに対して，その他の住宅では 3,000～4,000kWh/年が最頻値である。

図 4.3.7 に PV システム導入住宅の年間電力フローを給湯器の種類別に示す。電気給湯器の住宅では発電量は電力消費量の 0.68 倍であるのに対して, その他の住宅では発電量が電力消費量の 1.15 倍と，発電量が電力消費量を上回っている。ここで自家消費量（発電量から売電量を差し引いた量）を発電量で除した値を「自家消費率」と定義すると，電気給湯器の住宅では 0.27，その他の住宅では 0.26 となり，差は小さい。電気給湯器の住宅では電気給湯器が主に夜間に稼働するため，自家消費率が同程度になっている。自家消費量の電力消費量に対する比（電力消費量の PV 依存率）はその他の住宅では 0.30 であるのに対して，電気給湯器の住宅では 0.19 と低く，電気給湯器の電力消費量の影響が現れる。

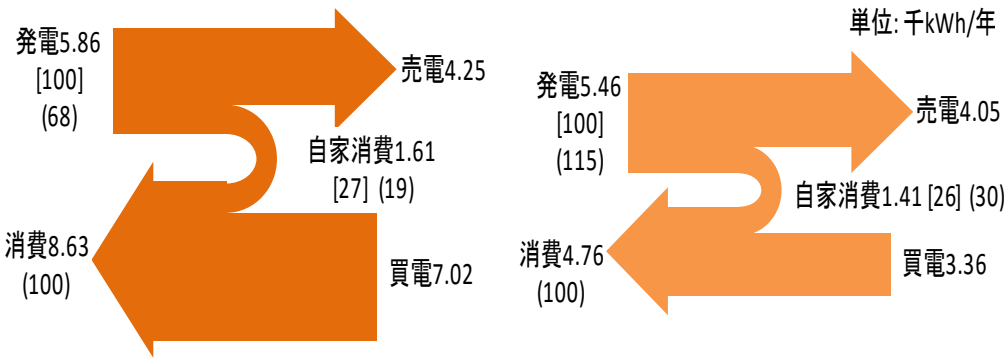
図 4.3.8 に月別データが把握できている住宅について，発電量・売電量・買電量・電力消費量の年間変動を示す。発電量は冬季の 300kWh/月から 5 月の 600kWh/月の間で変化し，売電量は発電量に追随している。電気給湯器の住宅では電力消費量が少ない中間期では発電量と電力消費量が同程度であり，5 月のみ発電量が電力消費量を上回っている。その他の住宅では 3 月～10 月に発電量が電力消費量を上回っている。

図 4.3.9 に自家消費率と発電量の電力消費量に対する比の分布を示す。自家消費率の分布については電気給湯器の住宅とその他の住宅は比較的類似しているが，発電量の電力消費量に対する比の分布は大きく異なる。その他の住宅では 70%（69 件）の住宅で発電量が電力消費量を上回り，電気給湯器の住宅では 22%（40 件）で上回っている。電気給湯器の住宅 40 件のうち，19 件はガス・灯油を使用していないため，少なくとも電気給湯器の住宅の 10%はネット・ゼロ・エネルギーを達成している。



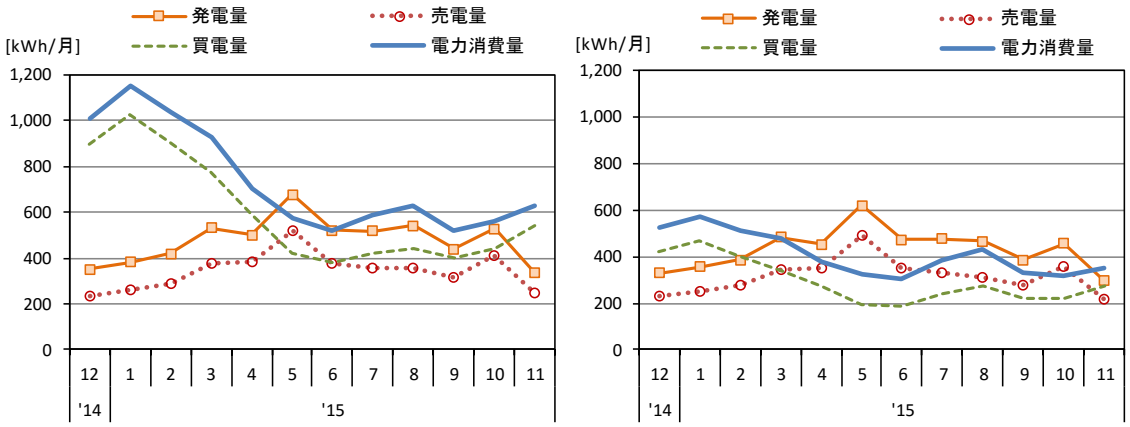
(1) 発電容量と電力消費量の関係　　(2) 電力消費量の分布

図 4.3.6　年間電力消費量



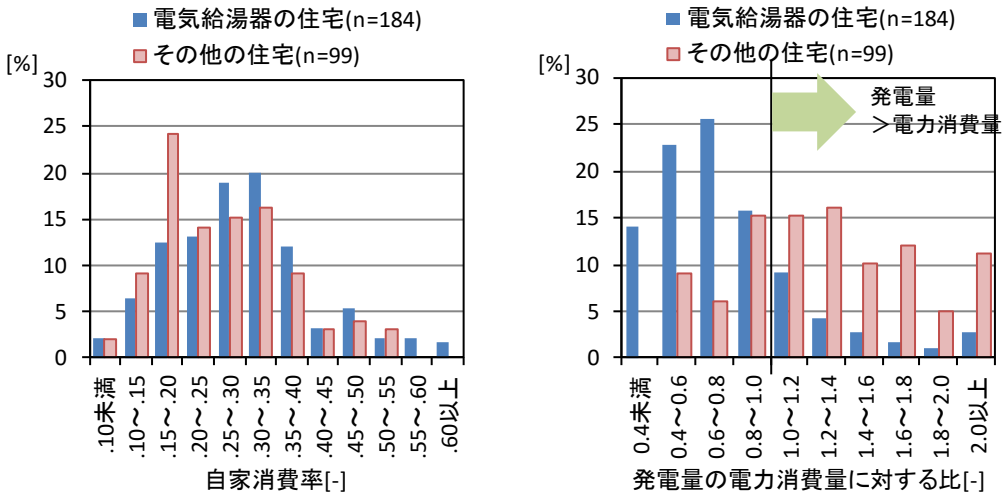
(1) 電気給湯器の住宅 (n=184)　　(2) その他の住宅 (n=99)

図 4.3.7　年間電力フロー



(1) 電気給湯器の住宅(n=117)　　(2) その他の住宅(n=66)

図 4.3.8　月別発電量・売電量・買電量・電力消費量



(1) 自家消費率の分布　　(2) 発電量の電力消費量に対する比の分布

図 4.3.9　発電量の自家消費率・電力消費量に対する比の分布

4.3.4　買電量の確認頻度と電力消費量の関係

図 4.3.10 に，年間電力消費量が有効回答の導入者における発電量・売電量・買電量の確認頻度を示す。発電量に比べ，売・買電量の確認頻度は小さいが，よく確認する群とあまり確認しない群に分かれる。

買電量を週 1 回程度以上確認する群の年間電力消費量は，週 1 回程度未満の群に比べ，電気給湯器の住宅で 4%，その他の住宅で 5%少ない。中央値は電気給湯器の住宅で 5%，その他の住宅で 9%，それぞれ少ない。一般に，エネルギーの使用状況を“見える化”し，こまめに確認する世帯ではエネルギー消費量が少ないとされているが，本データからもそのような傾向がうかがえる（図 4.3.11）。

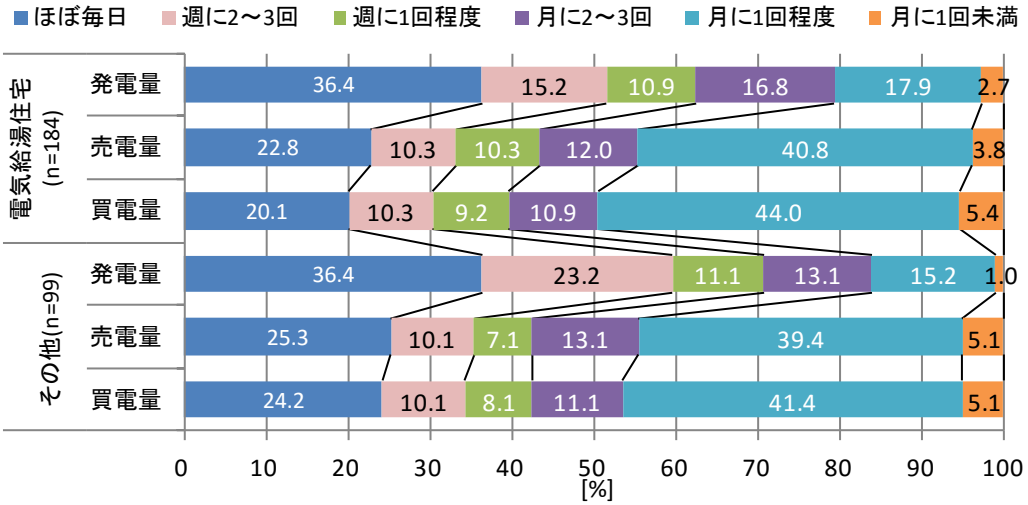


図 4.3.10　発電量・売電量・買電量の確認頻度

注：年間電力消費量有効回答サンプル

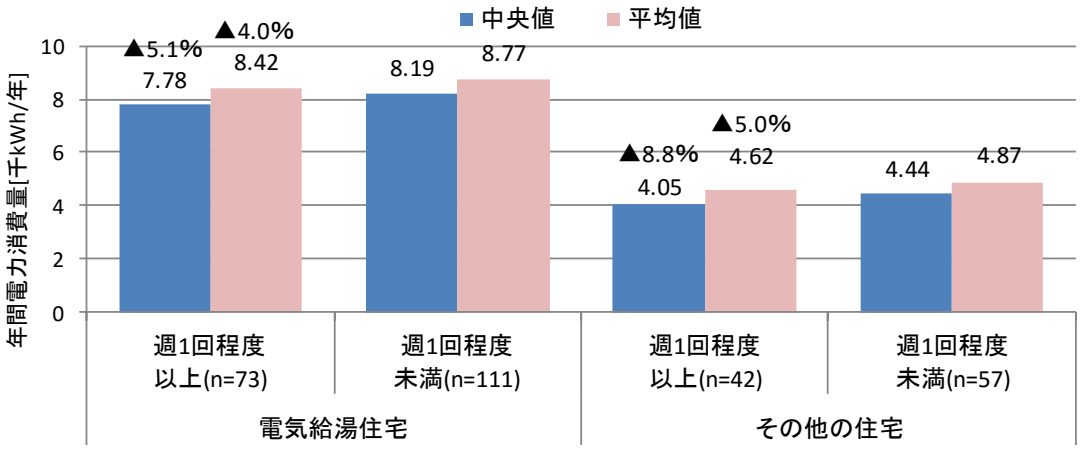


図 4.3.11　買電量の確認頻度（２区分）別　年間電力消費量

4.3.5 発電性能と満足度の関係

(1) システム出力係数と満足度

PV システムに対する満足度を規定する要因として，発電性能は重要と考えられる。図 4.3.12 にシステム出力係数別の満足度を示す[20]。システム出力係数が高いほど発電量に対する満足度は有意に高い（Pearson のカイ二乗検定，$p<0.001$）。電気代の節約と売電収入や総合満足度についてもシステム出力係数と満足度に相関がみられるが，統計的な有意差ではない。

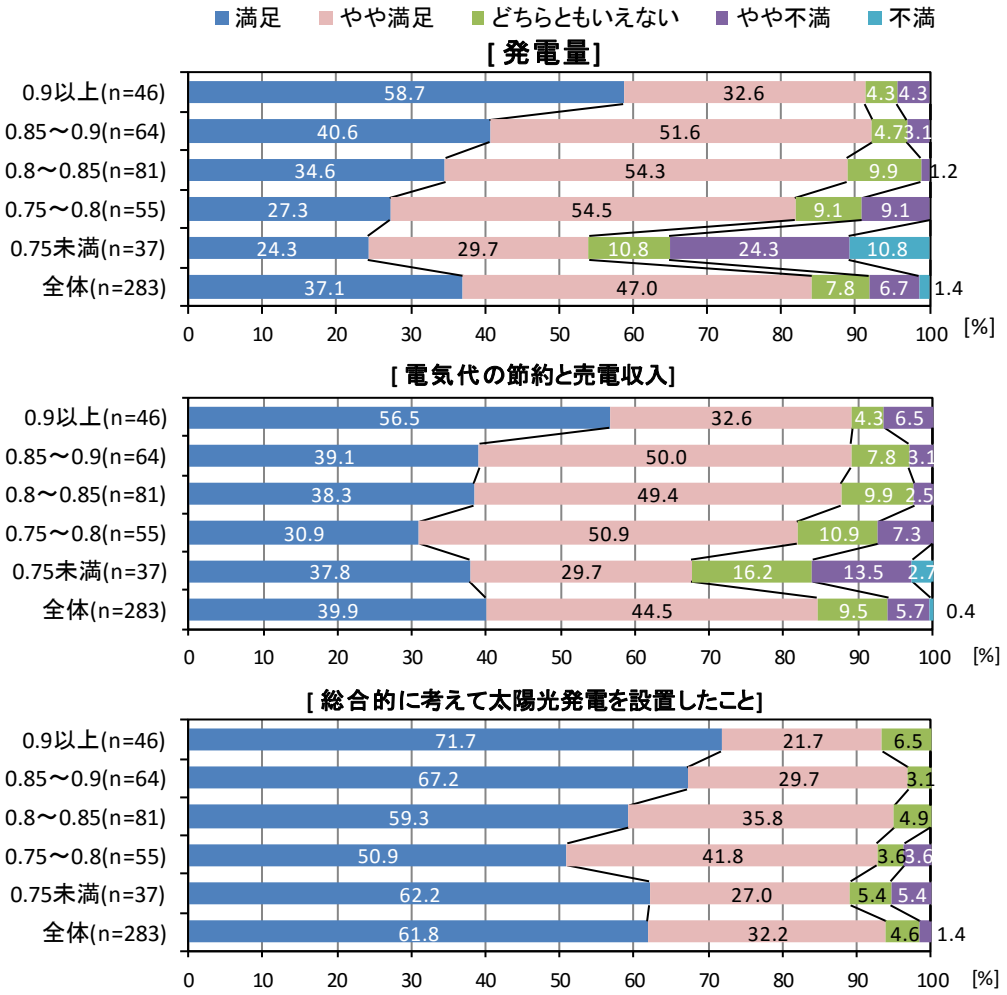


図 4.3.12　システム出力係数別　PV システムに対する満足度

[20] 発電性能を表すシステム出力係数以外に，1kW 当たりの年間発電量，年間発電量，発電容量（各 5 区分）と発電量に対する満足度（5 段階）の関係を Pearson のカイ二乗検定で分析した結果，いずれも量が大きいほど満足度が高い傾向がみられた（有意水準 1%で有意）。1kW 当たりの年間発電量については，システム出力係数に匹敵する相関がみられたが，ここでは最も相関の強いシステム出力係数との関係を示した。

図 4.3.13 に導入理由（選択肢は図 4.2.3 を参照）として電気代の節約や売電収入を得ることを挙げた導入者の発電量に関する満足度を示す。システム出力係数が 0.75 未満の場合，発電量に対する否定的評価が肯定的評価を上回っている。近年は電気代の節約や売電収入を目的とする導入者が増えているため，一定水準の発電性能を確保することが益々重要になっていると考えられる。

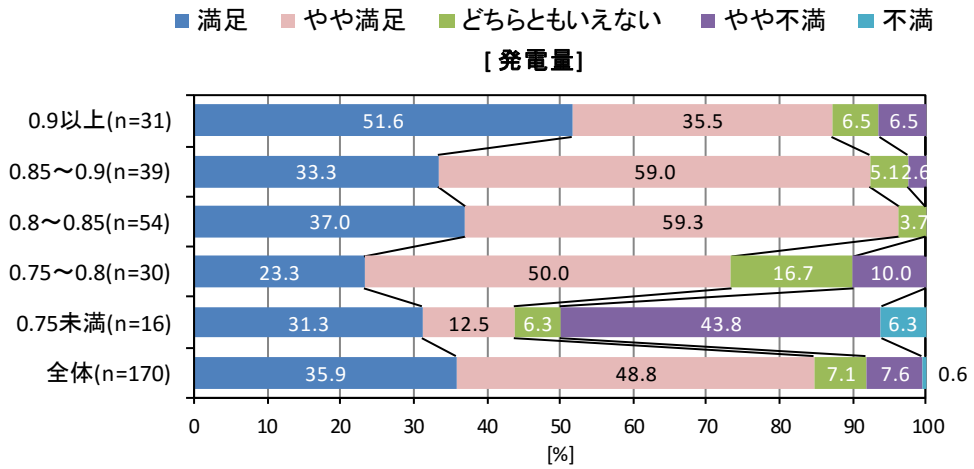


図 4.3.13　システム出力係数別　PV システムの発電量に対する満足度（導入理由:「電気代を節約し，売電収入を得たかった」）

(2) システム出力係数低下率と満足度

PV システムに対する満足度はある一時点の発電性能だけでなく，発電性能の変化にも影響を受けると考えられる。そこで，第 3 章で使用したシステム出力係数の経年データをもとに, 2008 年度以前に設置されたシステムに限定し, 設置後 1 年間と 2013 年度の 2 時点間におけるシステム出力係数の年平均低下率と，信頼性・耐久性に対する満足度の関係を分析した結果を図 4.3.14 に示す。

システム出力係数の低下率が年平均 0.2%未満の PV システム導入者は信頼性・耐久性に対する満足度が「満足」40.9%,「やや満足」45.5%であるのに対して，年平均 1.0%以上の PV システム導入者では「満足」12.5%,「やや満足」43.8%と比較的低く,「やや不満」と「不満」を合わせて 18.8%がネガティブな評価をしている。

図 4.2.26（p.95）に示したアンケート調査回答者全体での信頼性・耐久性に対する満足度は「満足」28.7%,「やや満足」33.8%,「どちらともいえない」34.5%となっており，システム出力係数の低下率が年平均 0.2%未満という，発電性能が長期間にわたって安定しているシステムの導入者は信頼性・耐久性に対する満足度が高い。

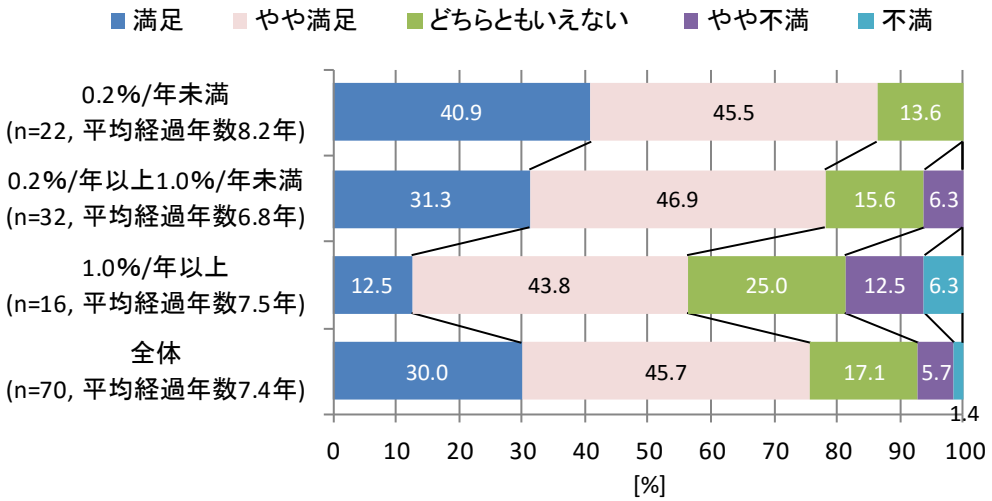


図 4.3.14　システム出力係数低下率別　PV システムの信頼性・耐久性に対する満足度（2008 年度以前に設置されたシステム）

注：第 3 章で使用したシステム出力係数の設置後 1 年間および 2013 年度の 2 時点間の年平均低下率による。

4.4 まとめと課題

(1) まとめ

戸建住宅における PV システム導入者を対象とするアンケート調査を実施し，571 件の有効回答を得た（ただし，年間電力量は 283 件，月別電力量は 183 件）。アンケート調査結果から，PV システムに対する満足度等の導入者意識と発電実態およびそれらの関係を分析した。主な結果を以下にまとめる。

- PV システムの導入時期が近年になるほど，エネルギー・環境問題への貢献や自宅で発電することの楽しさよりも，電気代の節約と売電収入を得ることを導入理由に挙げる導入者の割合が高くなる。
- PV システムの定期点検を受けている（受ける予定がある場合を含む）導入者の割合は 37%に留まり，過去の導入者ほどこの割合は低い。
- PV システムに対する総合満足度は「満足」（52%）と「やや満足」（39%）を合わせると 90%を上回り，肯定的評価をしている導入者が非常に多い。
- ふだんの生活で節電を「かなり心掛けている」，環境に配慮した商品・サービスの選択を「かなり心掛けている」，PV パネルが「住宅の美観を増している」と考えている，あるいは停電時の自立運転機能を 2 回以上利用した経験がある導入者は，総合満足度において「満足」の割合が 70%以上である。
- 総合満足度が高い導入者は，PV システムの増設，電気自動車・プラグインハイブリッド自動車の利用および宅内給電に対する意向が強い（統計的に有意）。また，総合満足度が高いほど，他人に PV システムの導入を勧める傾向がある。
- PV システムの平均発電容量は 4.8kW である。2014 年 12 月からの 1 年間における 1kW 当たり発電量の最頻値は 1,200～1,300kWh/年，発電性能を表すシステム出力係数（PR）の最頻値は 0.80～0.85 である（n=283）。
- 年間発電量のうち住宅で自家消費される割合は，電気給湯器を使用する住宅（n=184）で 27%，その他の住宅で 26%（n=99）である。
- 発電量の電力消費量に対する比は電気給湯器の住宅で 0.68，その他の住宅で 1.15 である。PV システム住宅個別にみると，その他の住宅の 70%（69 件），電気給湯器の住宅の 22%（40 件）において，発電量が電力消費量を上回っている。電気給湯器の住宅の少なくとも 10%（19 件）ではネット・ゼロ・エネルギーを達成している。
- PR が高いほど，発電量に対する満足度は有意に高い。電気代の節約や売電収入を得ることを導入理由に挙げた導入者では，PR が 0.75 未満の場合，発電量に対する否定的評価が肯定的評価を上回る。
- PR の経年的な低下率が高いシステムの導入者は，信頼性・耐久性に対する満足度が低い傾向がみられる。

(2) 社会的定着に向けた示唆

本研究では，既往研究でほとんど注目されていなかった住宅用 PV システム導入者の満足度等の意識をアンケート調査で把握し，その規定因を分析した。導入者の意識だけでなく PV システムの発電実態を一体的に把握することで，発電性能が満足度に及ぼす影響を明らかにした点に特徴がある。

PV システムに対する導入者の満足度は非常に高いが，導入者の意識を分析すると，注意を要する点もみられる。PV システムの導入理由として，電気代の節約と売電収入を得ることを挙げる導入者の割合が近年増加しているため，発電性能が満足度に及ぼす影響が強まっている可能性がある。実際，このような経済的な理由で導入し，発電性能が低水準である導入者は発電量に対する満足度が低い傾向が確認された。また，発電性能が年率 1%以上のペースで低下している導入者の信頼性・耐久性に対する満足度も比較的低い。従って，発電性能の維持が重要になるが，定期点検を受けている導入者の割合は，発電性能に関心があると考えられる本研究のアンケート調査回答者でも約 4 割に留まり，保守に対する意識はまだ低いと言わざるを得ない。発電量の監視や保守・点検の必要性と重要性について，PV システムの供給者（販売事業者），導入者双方に啓発が必要と考えられる。

PV システムに対する満足度が高いほど，電気自動車等の導入意向が強く，将来，余剰電力の買取価格が購入価格より低くなった際に，自家消費先として注目される可能性がある。PV システムが大量に普及した社会では，晴天日の日中に，電力系統全体として大きな余剰電力が生じる可能性があり，一部の地域では低需要期に顕在化している。電力系統側での調整が困難な場合，PV システム等の出力を抑制するルールになっているが，燃料費のかからない電力を捨てることになる。このため，適切なタイミングで PV システムからの電気を電気自動車等に供給する制御が必要になると考えられる。また，本研究のアンケート調査では，PV システム導入住宅の約 5 割で電気ヒートポンプ式給湯機が使用されていた。基本的に深夜に沸きあげて貯湯する運転方法となっているが，晴天日には日中に沸きあげることが有効である。この場合，住宅で給湯需要が増える夕方以降に向けて，当日の日中に沸きあげることになるため，発電量（天気）の予測精度も重要になる。これらの他にも運転スケジュールを調整し易い電気機器（住宅内では食器洗浄乾燥機や衣類乾燥機，住宅外では飲料用自動販売機等が考えられる）を最適制御することで，PV システムからの電力を有効利用することが可能になる。こうした状況では，複数の電気機器を最適制御する司令塔となる HEMS（ホームエネルギーマネジメントシステム）に対して，ある期間（例えば翌日まで）の予測発電量を提供するなど，PV システムの機能も進化が求められると考えられる。

(3) 課題

本研究のアンケート調査の対象者は，民間研究機関がウェブサイトで提供する PV システム導入者支援サービスの利用者であることに留意が必要である。このサービスは利用者が自ら発電量を登録（入力）し，日射量推定値と比較することで発電性能を簡易的にチェックするものである。従って，発電性能に関心を持つ層に偏っているおそれがある。

アンケート調査の対象者は導入からの経過年数が短い導入者が多かったことから，特に信頼性・耐久性に対する満足度の評価は不十分であり，今後も長期間の使用経験を有する導入者の意識調査を行っていく必要がある。第 2 章で示したように，PV システムの技術は発展途上であるため，導入者の意識もそれに応じて変化する可能性があり，継続的な評価が求められる。また，2019 年以降に FIT 制度の買取期間が終了する導入者（売電より自家消費が経済的に有利となる）が，実際にどのような行動を起こし，その結果，どのような意識を持つかも興味深い。

今回のアンケート調査では，将来の撤去・処分に関する導入者の意識を把握できていない。既に住宅用 PV システムを 20 年以上使用している導入者もいることから，今後，この点にも注目していく必要がある。

第４章の参考文献

4-1）福代 和宏: 東日本大震災前後における太陽光発電システム導入世帯のエネルギー意識と電力消費量の変化，日本建築学会環境系論文集，Vol.78, No.690, pp.645-654, 2013.8

4-2）白井 信雄, 正岡 克, 大野 浩一, 東海 明宏: 住宅用太陽光発電の設置者特性と設置規定要因の分析, エネルギー・資源, Vol.33, No.2, pp.1-9, 2012.1

4-3）吉岡 剛, 高瀬 香絵, 吉田 好邦, 松橋 隆治: 住宅用太陽光発電設置者に対する導入要因の分析, 環境情報科学 学術研究論文集, Vol.26, pp.261-266, 2012

4-4）消費者庁: 消費者意識基本調査, 2014.12

第5章 使用済み太陽光発電パネルのガラス再資源化の環境性評価

再生可能エネルギーの固定価格買取制度が導入された 2012 年以降, 非住宅用の PV システムの導入も急増し, 2015 年度末までに住宅用 PV システムの 3 倍以上となる約 2,600 万 kW が導入されている。短期間に大量導入が進んだ結果，将来的な PV パネルの大量廃棄が懸念されている。

本章では，まず住宅用 PV パネルの廃棄量の見通しを検討する。続いて，国内のガラスを対象とした再資源化製品を取り扱う業者を対象にヒアリング調査を実施し，実際の処理工程を考慮した PV パネルのガラスを再資源化した際の環境負荷削減効果を，インベントリ分析を用いて評価する。

5.1 住宅用太陽光発電パネルの廃棄量の見通し

環境省は PV パネルの寿命を 25 年とした場合，2040 年には PV パネルの廃棄量が 80 万 t に達するとの試算を発表している [5-1)]が，本研究が注目している住宅用 PV システムからの PV パネルの廃棄量は示されていない。また，環境省の試算には，大量導入された近年（2013～2015 年度）の導入量が想定値である，ほとんどの PV パネルが寿命に達した年に廃棄されると想定している，PV パネルの容量・重量比を 100kg/kW で固定している（実際には発電効率の向上等による軽量化が進展）といった課題がある。そこで本節では，実際の導入実績や既往研究を踏まえ，住宅用 PV パネルの廃棄量の見通しを検討する。

5.1.1 見通しの前提条件

将来の PV パネルの廃棄量を算定する前提条件を表 5.1.1 に示す。世界各国の廃棄量見通しについて IEA-PVPS（国際エネルギー機関・太陽光発電プログラム）と IRENA（国際再生可能エネルギー機関）が 2016 年に共同研究結果 [5-2)]を発表している。この研究で用いられた廃棄シナリオと容量・重量比の想定を参照する。将来の導入容量については，資源総合システム [5-3)]の見通しを参考に想定する。

各前提条件の想定を図 5.1.1～図 5.1.3 に示す。廃棄シナリオについては，20 年を超えてから急速に廃棄が進むシナリオ A と，比較的廃棄の時期が分散的であるシナリオ B の 2 種類を用意する。

表 5.1.1　太陽光発電パネルの廃棄量見通しの前提条件

項目		想定
導入容量	2015 年度まで	導入容量の実績値（図 2.2.7（p.18）） 2016 年 4 月～12 月の導入容量の年間換算値（導入容量×4／3）
	2016 年度	
	2017 年度以降	資源総合システム[5-3]による見通し（標準ケース）を参考に，以下のように想定。 • 2017 年度：総導入量 300 万 kW，住宅用 100 万 kW • 2020 年度以降：総導入量 350 万 kW/年，住宅用 150 万 kW/年 • 2018～19 年度：直線補間
廃棄シナリオ		IEA-PVPS & IRENA[5-2]の想定に従い，ワイブル分布（$F(t) = 1-e^{-(t/T)^{\alpha}}$）より t 年後の累積廃棄率を算出する。 • シナリオ A：　α=5.3759，T = 30（”regular-loss scenario”） • シナリオ B：　α=2.4928，T = 30（”early-loss scenario”）
容量・重量比		IEA-PVPS & IRENA[5-2]の想定に従う。

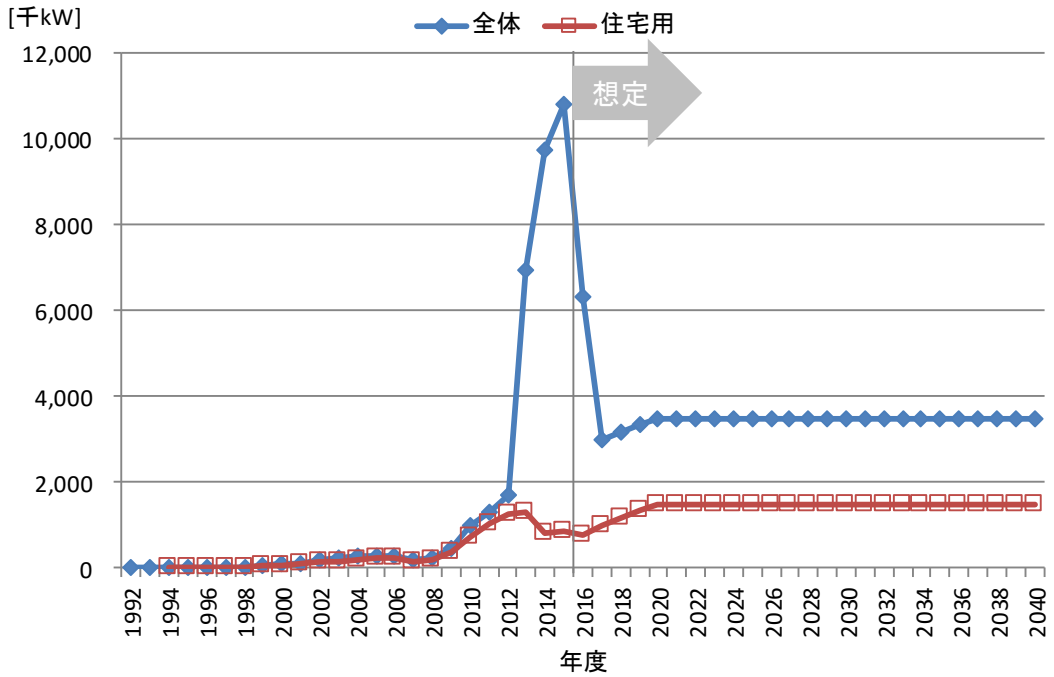


図 5.1.1　太陽光発電システムの年間導入容量の実績と想定

出所：2015 年度までの実績は図 2.2.7（p.18）に同じ。2016 年度以降の想定は表 5.1.1 に示す通り。

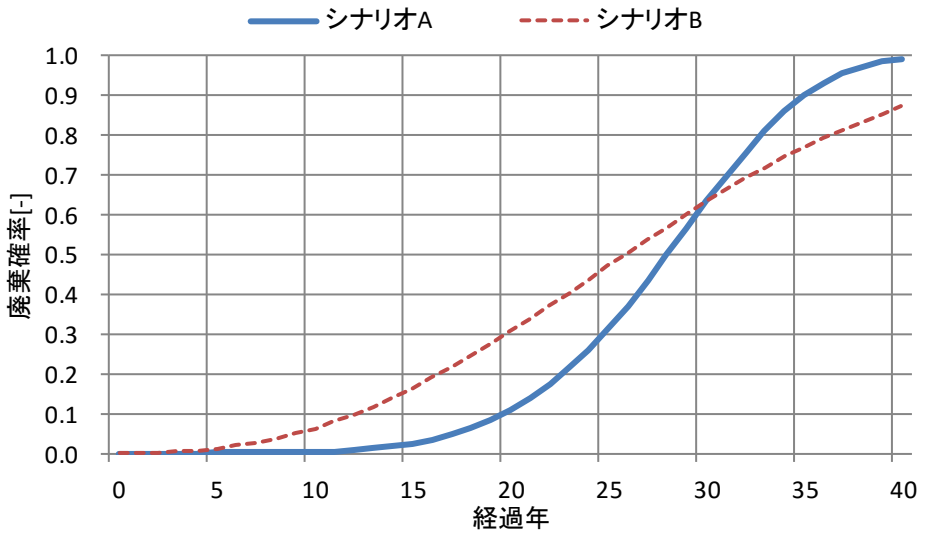


図 5.1.2　太陽光発電システムの廃棄シナリオ

出所：IEA-PVPS&IRENA[5-2)]による。

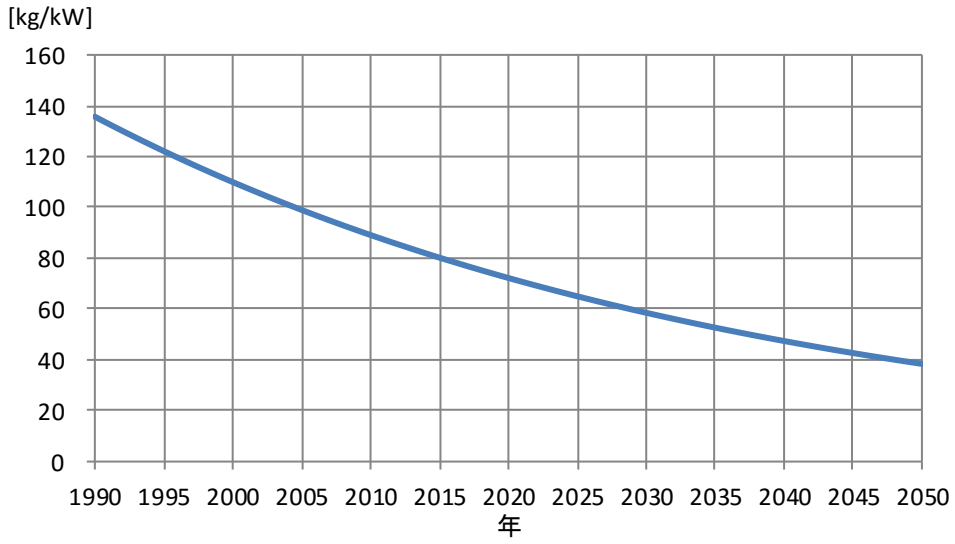


図 5.1.3　太陽光発電パネルの容量・重量比の想定

出所：IEA-PVPS&IRENA[5-2)]による。

5.1.2 廃棄量の見通し（計算結果）

(1) 廃棄容量の見通し

PV パネルの廃棄容量の見通しを，住宅用以外を含む全体について図 5.1.4 に，住宅用について図 5.1.5 に，それぞれ示す。

全体ではシナリオ A において 2040 年代の半ばに廃棄容量のピークを迎え，2047 年度に 420 万 kW に達する。廃棄時期が分散化されるシナリオ B では 2030 年度には廃棄容量が 140 万 kW となり，同時期のシナリオ A の 2.5 倍以上の水準に達するが，その後の廃棄容量の伸びは緩やかである。本見通しでは 2020 年度以降の導入容量を 350 万 kW に固定しているため，長期的に導入容量に漸近する過程が描かれている。

住宅用ではシナリオ A，シナリオ B のいずれにおいても 2050 年度までにピークは見られず，廃棄容量は徐々に増加していく。2030 年度にはシナリオ B で廃棄容量が 41 万 kW となり，同時期のシナリオ A（21 万 kW）の 2 倍の水準になる。2040 年度には 78 万～85 万 kW，2050 年度には 120 万～130 万 kW が廃棄される。

参考に本見通しにおける PV パネルのストック容量を図 5.1.6 に示す。将来の導入容量と廃棄シナリオの前提により，2050 年度に向けて全体は約 1 億 kW に，住宅用は約 4,000 万 kW に漸近していく。2030 年度時点では全体で 7,900～8,600 万 kW，住宅用で 2,600 万～2,800 万 kW である。なお，政府の長期エネルギー需給見通し [5-4] では，2030 年度において全体で 6,400 万 kW と見込んでおり，これに比べ本見通しの導入量は 2～3 割程度大きい。

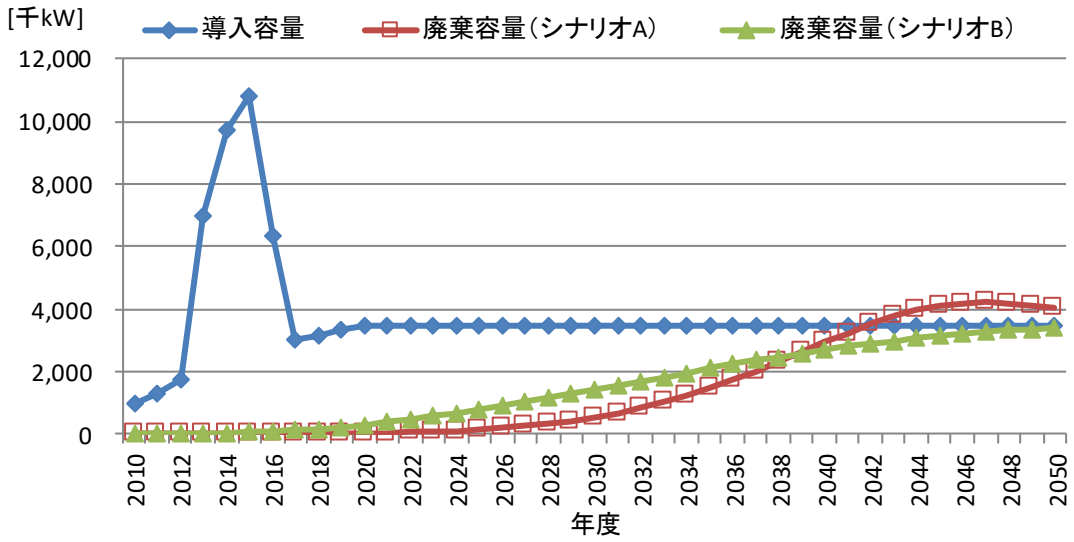


図 5.1.4　太陽光発電パネルの年間廃棄容量の見通し（全体）

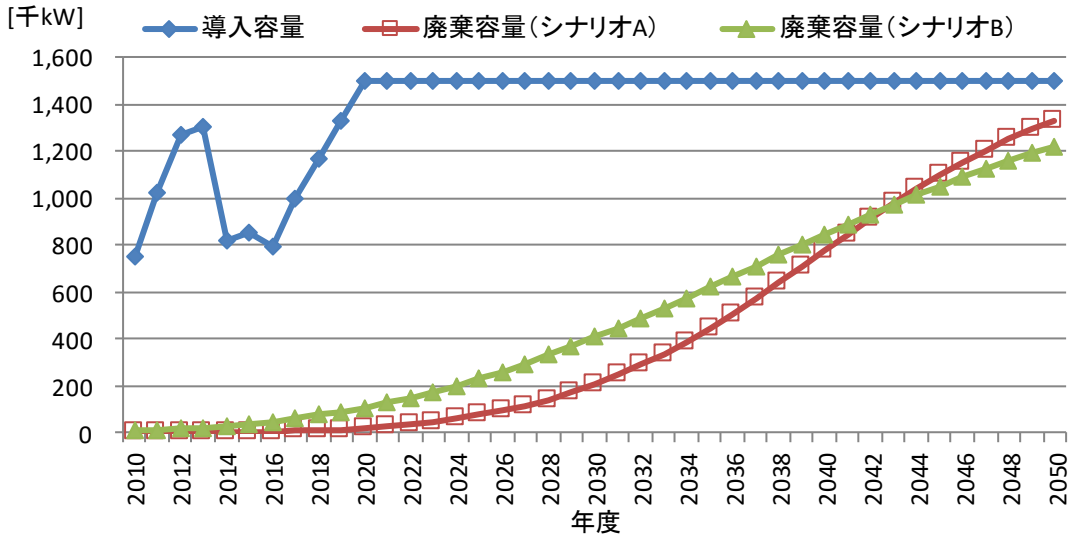


図 5.1.5　太陽光発電パネルの年間廃棄容量の見通し（住宅用）

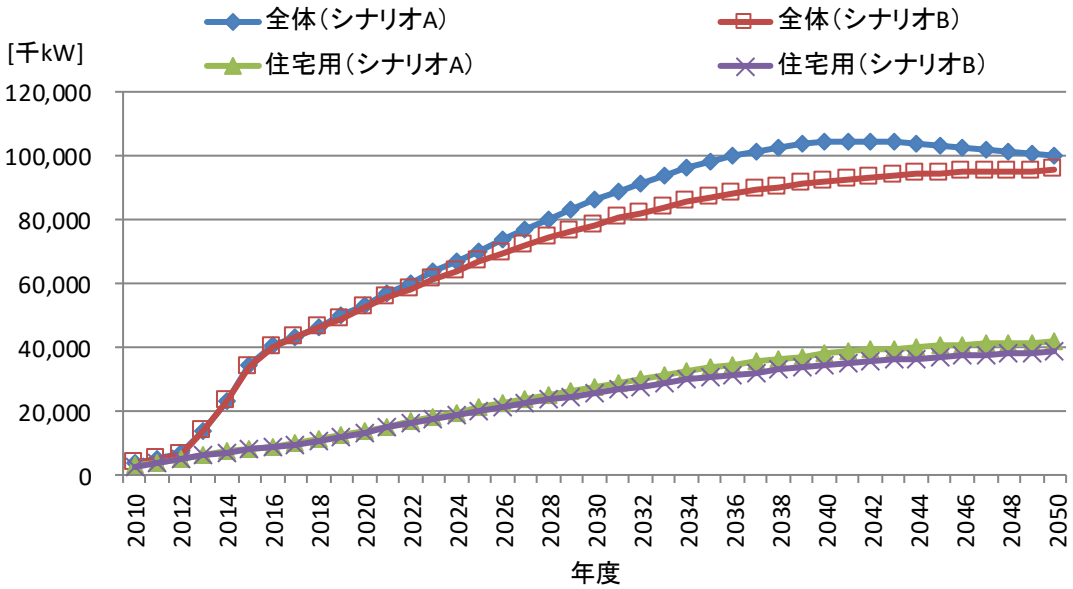


図 5.1.6　太陽光発電パネルのストック容量の見通し

(2) 廃棄重量の見通し

PV パネルの廃棄重量の見通しを図 5.1.7 に示す。全体の傾向をみるとシナリオ A では 2046 年度に年間 32 万 t でピークに達し，2050 年度には 29 万 t となる。シナリオ B では 2050 年度まで徐々に増加していき，23 万 t に達する。2030 年度時点では 5～11 万 t である。住宅用では 2050 年度に 8～9 万 t に達する。2030 年度時点では 2～3 万 t である。本見通しの廃棄重量は，環境省が示した最大約 80 万 t と比べると，ピークでも約 4 割の水準となっている。これは廃棄時期の分散化の影響が大きく，PV パネルの容量・重量比の低下も影響している。

PV パネルの累積廃棄重量の見通しを図 5.1.8 に示す。全体では 2050 年度までに 460～470 万 t に達する。2030 年度時点では 21～83 万 t である。住宅用の累積廃棄重量は 2050 年度までに 130～150 万 t である。2030 年度時点では 10～27 万 t である。IEA-PVPS&IRENA[5-2)]では日本での累積廃棄重量は 2050 年度に 650～760 万 t，2030 年度時点では 20～100 万 t と予測されており，本見通しの方が少ない。これは将来の導入容量の想定の違いによる。2050 年度までの累積導入容量は本見通しでは 1.6 億 kW であるのに対して，IEA-PVPS&IRENA は 3.5 億 kW を見込んでいる。

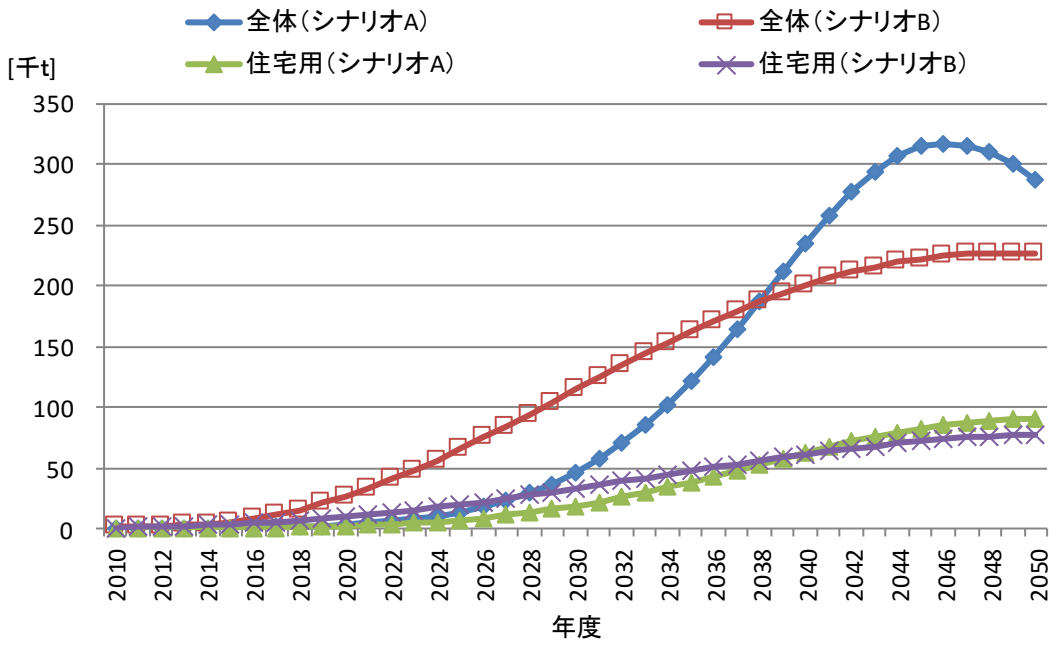


図 5.1.7　太陽光発電パネルの年間廃棄重量の見通し

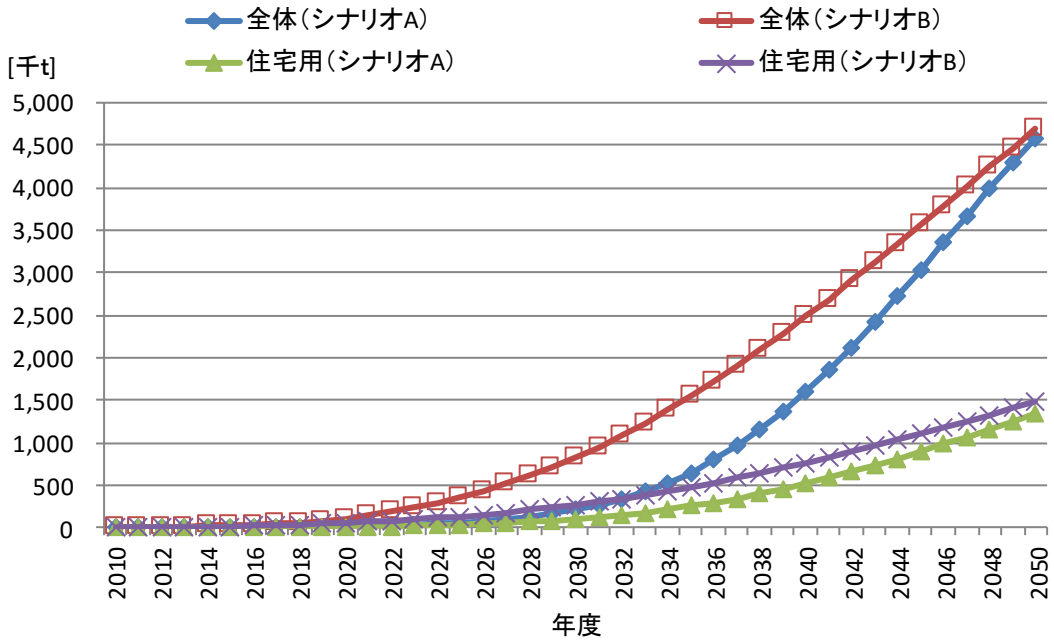


図 5.1.8　太陽光発電パネルの累積廃棄重量の見通し

5.2 使用済み太陽光発電パネルのガラス再資源化による CO_2 削減効果の評価

本節では，国内のガラス再資源化製品を取り扱う事業者を対象とするヒアリング調査結果等に基づき，実際の処理工程を考慮した PV パネルのガラスを再資源化した際の CO_2 排出量の削減効果をインベントリ分析により評価する。なお，本研究では住宅用 PV システムを研究対象としているが，PV パネルのリサイクルでは住宅用と非住宅用が区別されることはない。

5.2.1 インベントリ分析に関する前提条件

(1) インベントリデータの収集

インベントリ分析に必要となるインベントリデータの収集を目的に国内（愛知県，岐阜県）に所在する使用済み PV パネル処理業者，ガラスカレット加工業者，ガラス再資源化製品製造事業者を対象に実施したヒアリング調査の概要を表 5.2.1 に示す。

調査項目は PV パネルの中間処理や再資源化製品製造の処理工程, 加工機器の仕様, 燃料消費量などである。また，使用済み PV パネル処理業者からは PV パネルの材料構成比と有価金属含有量についても回答を得た。

本研究では PV パネルの材料構成比等について回答が得られた，シリコン系の単結晶，多結晶および薄膜（ガラス素材により，アルミナとソーダ石灰に区分），化合物系のうち CIGS 系の 5 種類の PV パネルを評価の対象とする（図 5.2.1）。なお，2015 年度の PV パネルの国内出荷量によると，発電容量（kW）ベースで多結晶系が 61%，単結晶系が 27%を占めている（図 5.2.2）。

評価対象とするガラス再資源化製品は，業界として PV パネルのガラス再資源化の用途開発に関する実証 [5-5)]が進められている，セラミックタイル（以下,「タイル」という），セラミックブロック（以下,「ブロック」という）および防音パネルの 3 種類とする。タイルとブロックは主に床の外装材や舗装材として使用されている。製品仕様の例を表 5.2.2 に示す。ガラス投入量は製品や製造事業者によって差異があるが，ここでは実証で実際に検討された製品の情報を示している。

表 5.2.1　ヒアリング調査概要

調査対象	使用済み PV パネル処理業者（A 社，B 社） ガラスカレット加工業者（C 社） ガラス再資源化製品製造事業者（D 社，E 社）	
調査期間	2015 年 10 月～11 月	
調査項目	処理工程	• 作業工程フローとそれに伴うマテリアルバランス • 各工程における機器の処理量と稼働時間
	加工機器仕様	• 各工程における機器の定格出力 • 処理能力，機器平均出力率 • 時間平均燃料消費量（LPG，都市ガス，A 重油等）
	生産品仕様	• 寸法，重量，面積等
	生産量	• 生産能力（日当たり，あるいは月当たり）
	PV パネル構成比	• 材料構成比 • 有価金属含有量

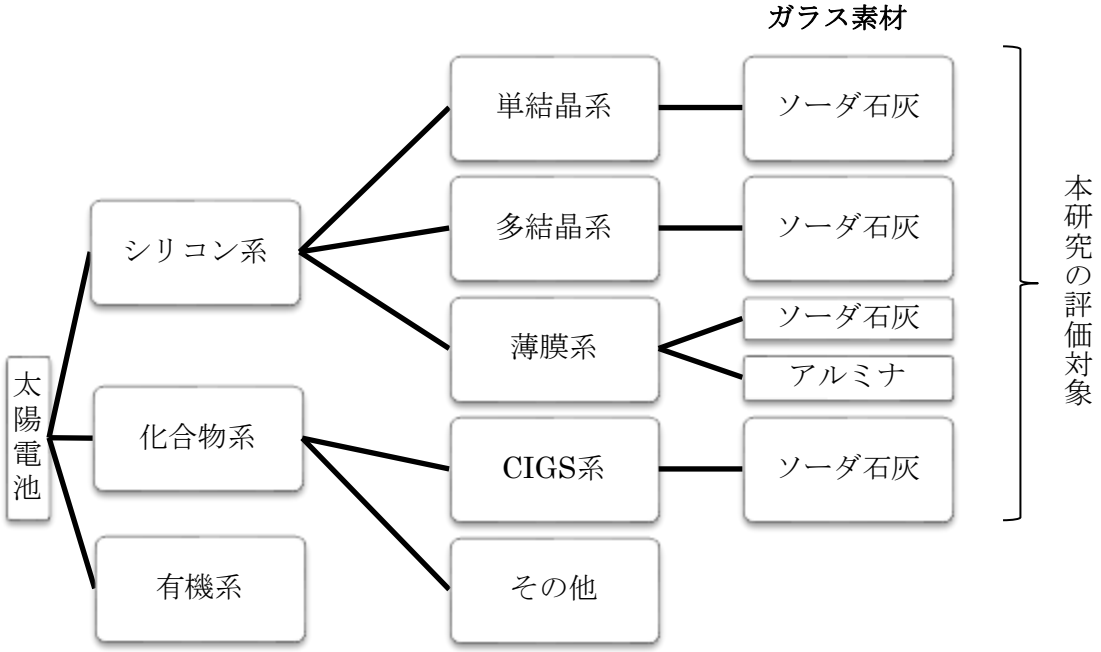


図 5.2.1　評価対象とする太陽光発電パネルの種類

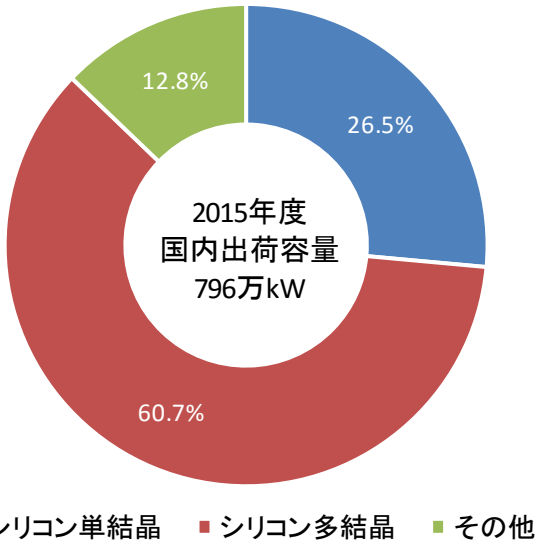


図 5.2.2　太陽光発電パネルの種類別国内出荷構成

出所：太陽光発電協会 [5-6)]

表 5.2.2　評価対象ガラス再資源化製品の仕様例

	タイル	ブロック	防音パネル
主用途	外装材，舗装材	外装材，舗装材	屋内外の騒音対策
寸法	100×100×15 厚 mm	200×100×60 厚 mm	2000×500×90 厚 mm
重量	0.6kg/個	2.0kg/個	19kg/㎡ （表面保護アルミ板込）
ガラス投入量 （原材料重量比）	50%	10%	94%

出所：ガラス再資源化業界ヒアリング調査

(2) 製品製造工程と評価方法

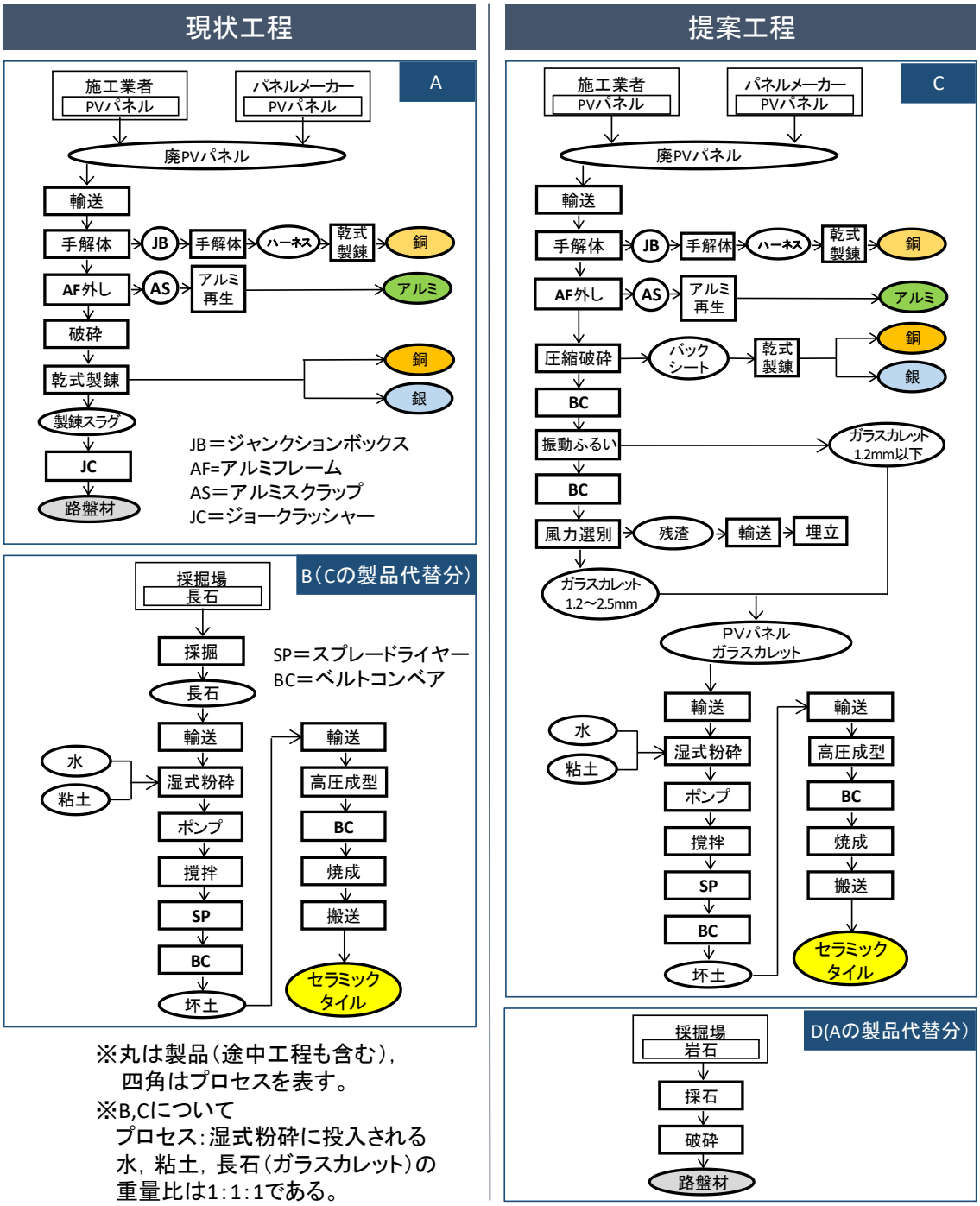
図 5.2.3 にヒアリング調査を基に設定した，タイルのインベントリ分析に必要となる製造工程を示す。工程 C は PV パネルをタイルへと再資源化する際の加工工程である。廃 PV パネルは端子箱（ジャンクションボックス）とアルミフレームが取り除かれたうえで，圧縮破砕に掛けられ，2 種類の粒径の異なるガラスカレットが回収される。この工程で副産物としてアルミ，銅，銀が回収される。ガラスカレットは坏土（タイルの原料）の製造工程に輸送され，湿式粉砕の工程においてガラスカレットと同重量の粘土と水が投入される。スプレードライヤーによる乾燥工程では電力と燃料（A 重油）が使用される。完成した坏土はタイル製造工程へ輸送され，プレス成型された後に焼成される。焼成工程では電力と燃料（LPG）が使用される。

工程 A は現状の最も単純な PV パネルのリサイクル方法である。廃 PV パネルを破砕した後に製錬処理により溶融スラグ化し，路盤材として活用する工程である。

比較対象間の最終製品量を揃えた評価を行うため，工程 C と同量のタイルを天然原料（長石）から製造する工程 B，工程 A と同量の路盤材を天然原料（岩石）から製造する工程 D を設定する。現状工程[A+B]と提案工程[C+D]の CO_2 排出量の比較を行うことで PV パネルをタイルに再資源化した際の CO_2 削減効果を確認する。なお，分析では PV パネル 1 t を処理した場合を想定した CO_2 排出量（本研究では[kgCO_2/t′]と表記）を算定する。

ブロックおよび防音パネルの製造工程を図 5.2.4，図 5.2.5 にそれぞれ示す。工程 C でガラスカレットが回収されるまではタイルと同じであり，その後，ガラスカレットにボールミル加工を施してガラスパウダーが製造され，ブロックおよび防音パネルの製造工程に輸送される。ブロックの製造工程のうち，調合の工程において陶磁器くずが 90%（重量比）投入される。ブロックの焼成工程では電力と燃料（LPG）が使用される。防音パネルの製造工程のうち，混合工程において発泡剤が 1%（重量比），ベントナイトが 5%（同）投入され，スプレードライヤーによる乾燥工程では電力と A 重油が，焼成工程では電力（電気窯）がそれぞれ使用される。

これら 2 つの製品の工程 B については，天然原料から製品を作る場合のデータをヒアリング調査から得られなかったため，既に市場で流通しているガラスカレット（びん製品や建材由来のガラスから発生するもの）を原料とする工程を設定する。なお，これら 2 つの製品の工程 A と工程 D はタイルの場合と同じである。



※丸は製品（途中工程も含む），
四角はプロセスを表す。
※B,Cについて
プロセス：湿式粉砕に投入される
水，粘土，長石（ガラスカレット）の
重量比は1:1:1である。

図 5.2.3　ガラス再資源化製品製造に関するバウンダリ（タイル）

出所：業界ヒアリング調査結果

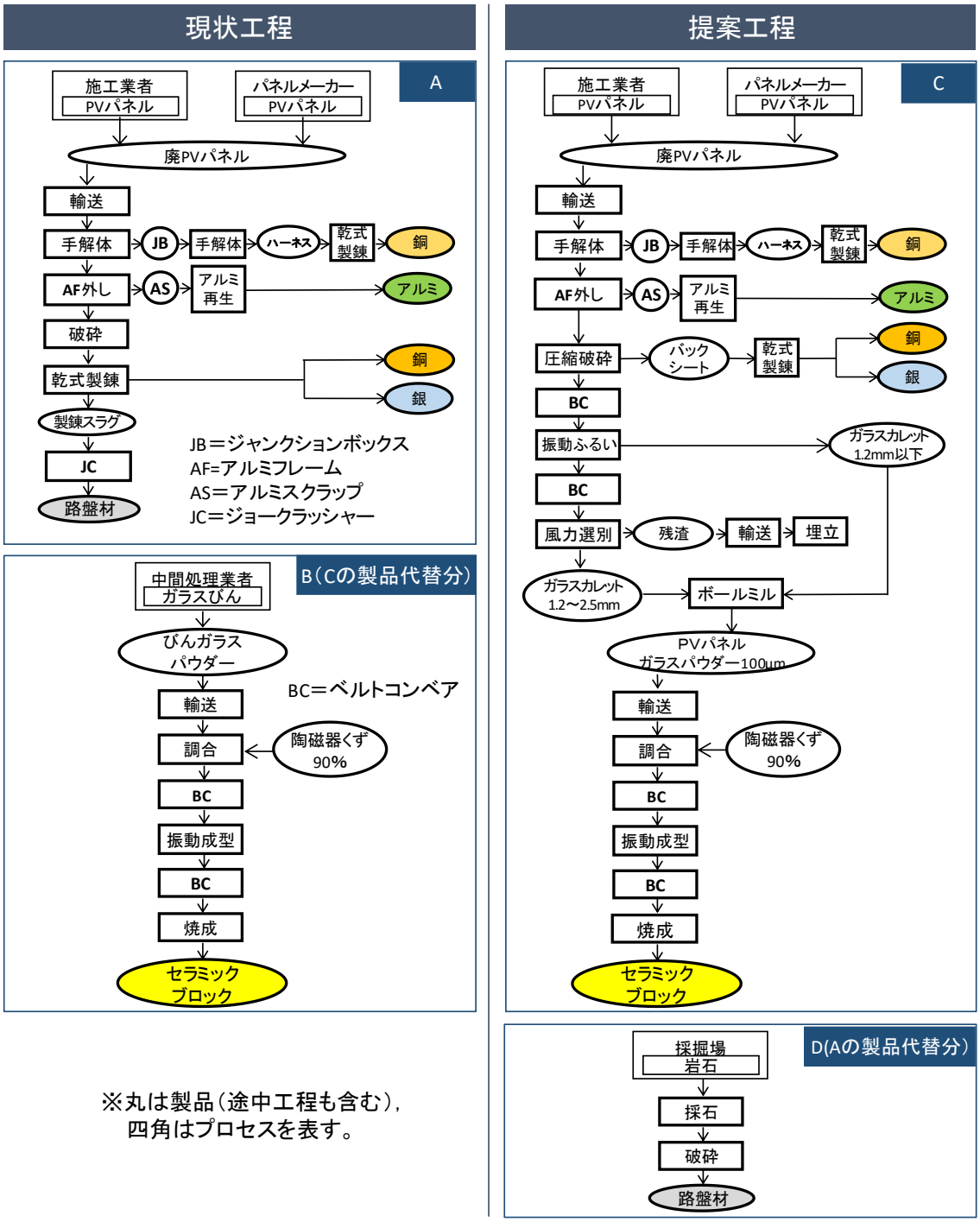


図 5.2.4　ガラス再資源化製品製造に関するバウンダリ（ブロック）

注：工程 A，工程 D はタイル（図 5.2.3）の場合と同じである。

出所：業界ヒアリング調査結果

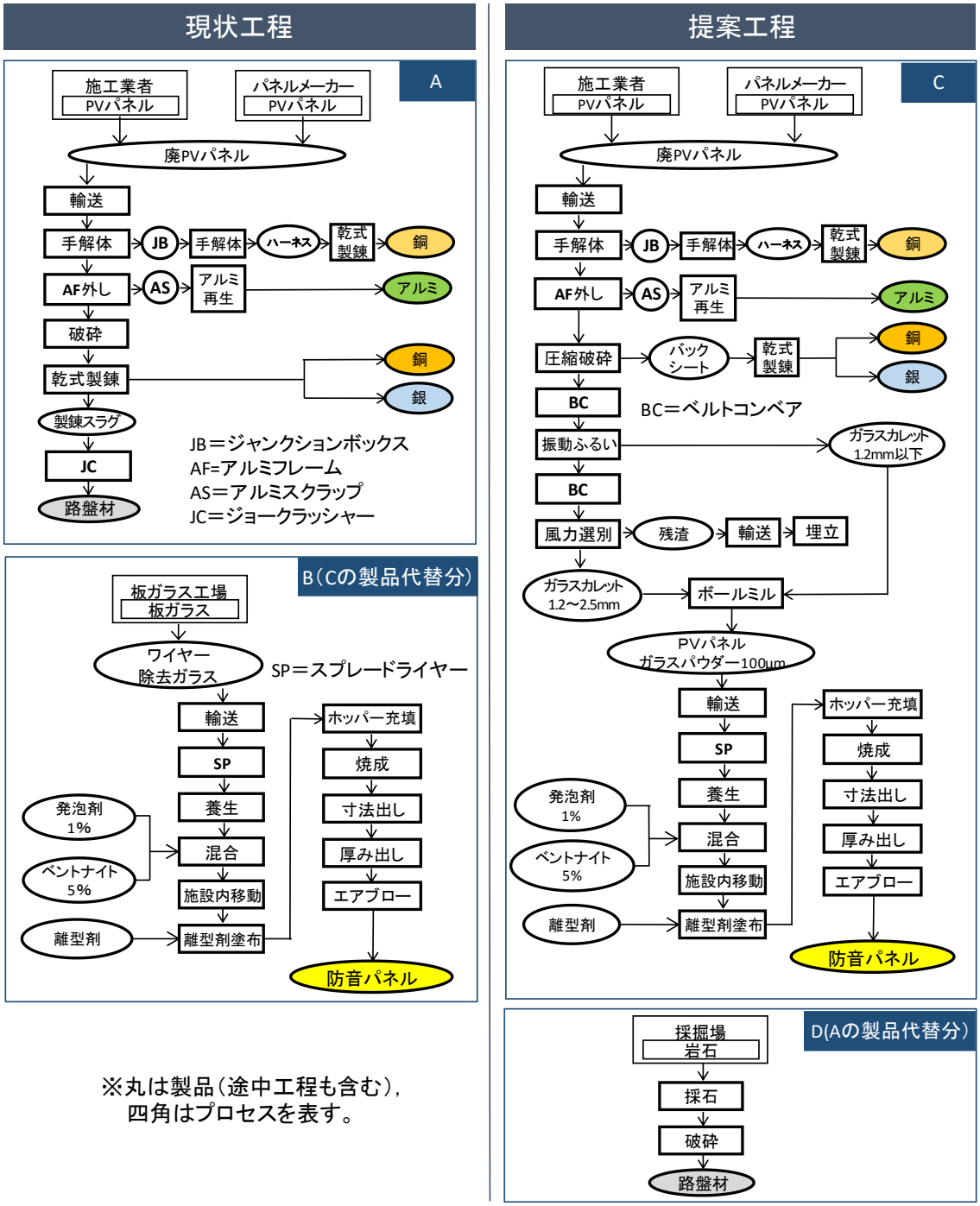


図 5.2.5　ガラス再資源化製品製造に関するバウンダリ（防音パネル）

注：工程 A，工程 D はタイル（図 5.2.3）の場合と同じである。

出所：業界ヒアリング調査結果

(3) ガラスカレット利用による燃料削減効果

図 5.2.3 において，タイルの製造工程である工程 B は原料が天然原料（長石），工程 C は原料がガラスカレットである。ヒアリング調査により，それぞれの工程におけるタイル焼成プロセスにおいて燃料消費量に違いが生じるという回答を得た。表 5.2.3 にタイル焼成時の燃料消費量を示す。タイルの原料にガラスカレットを用いることで天然原料から作られる一般的な磁器質タイルを製造するときに比べ，焼成プロセスでの炉内温度を 1,250℃から 1,100℃まで下げることが可能であり，燃料使用量を 33%削減できる。

表 5.2.3　ガラスカレット利用によるタイル焼成時の燃料消費量

	材料構成[%]	焼成温度[℃]	タイル1㎡あたりのLPG使用量[kg/㎡]
既存磁器質タイル	長石50，粘土50	1,250	6.0
ガラスカレット使用タイル	カレット50，粘土50	1,100	4.0

出所：業界ヒアリング調査結果

(4) 太陽光発電パネルの材料構成比と最終製品量

表 5.2.4 に PV パネルの材料構成比と PV パネル 1ｔをリサイクルした際に得られる最終製品量を示す。ガラスの含有率は単結晶系（43.9%），CIGS 系（40.0%），多結晶系（37.5%），薄膜系（33.0%）の順に大きい。アルミフレームの構成比に関しては薄膜系が最も大きく（33.0%），次いで単結晶系（20.0%），多結晶系（16.3%）である。CIGS 系に関しては，ヒアリング調査の対象となった PV パネルがアルミフレームレスの設計であったため，構成比は 0%である[21]。また，銀と銅は多結晶系 PV パネルにおいて比較的含有量が多く，CIGS 系において最も少ないという結果が得られた。なお，薄膜系 PV パネルはアルミナとソーダ石灰の 2 種類に区別しているが，材料構成比について個別のデータが得られなかった（両パネルが混成された材料構成比を得た）ため，有価金属含有量のみ差がみられるものとし，ガラス，アルミフレームの量などについてはそれぞれ同値と仮定して分析を行う。

[21] 国内の CIGS 系 PV パネルを製造中，もしくは製造していた事業者は 4 社確認されたが，現在も製造販売している事業者は 1 社に限られる。その 1 社が製造販売する CIGS 系 PV パネルのうちウェブサイト上で仕様を確認できるものは全てがアルミフレームレスの設計であった。従って，ヒアリング調査で得られた，CIGS 系パネルのアルミフレーム含有率が 0%という結果は特異なデータではないと判断し，設定値として採用する。

PV パネルをリサイクルすることで得られる再資源化製品の最終製品量は，PV パネルのガラス含有量に比例する。例えば，PV パネル 1 t から得られるガラスは単結晶系 PV パネルで 439kg，多結晶系 PV パネルで 375kg であり，製造できるタイルはそれぞれ 788.4kg，675.0kg となる。最終製品量はガラス含有率の高い単結晶系 PV パネルで最大となり，タイルは 788.4kg /t′（ガラス使用率 56%），ブロックは 4,380kg/t′（同 10%），防音パネルは 461.3kg/t′（同 95%）となる。

表 5.2.4　PV パネルの材料構成比（重量%）と 1 t 当たりの最終製品量

			単結晶系	多結晶系	薄膜系（アルミナ）	薄膜系（ソーダ石灰）	CIGS系
材料構成比［%］	端子箱		1.54	1.88	3.30	3.30	0
	アルミフレーム		20.0	16.3	33.0	33.0	0
	バックシート		32.8	42.2	23.3	24.0	52.9
	ガラス		43.9	37.5	33.0	33.0	40.0
	銀		0.074	0.133	0.045	0.018	0.0036
	銅		0.19	1.42	0.84	0.14	0.011
	その他		1.54	0.63	6.59	6.59	7.06
最終製品量［kg/t´］	タイル		788.4	675.0	593.5	593.5	720.0
	ブロック		4,380	3,750	3,297	3,297	4,000
	防音パネル		461.3	394.9	347.2	347.2	421.3
	共通	アルミ	182.0	147.9	300.0	300.0	0
		銅	5.80	19.02	16.87	9.88	0.11
		銀	0.74	1.33	0.45	0.18	0.04

注：再資源化商品の種類に依らず，有価金属の最終製品量は同量。
出所：業界ヒアリング調査結果

(5) 分析に用いる各種設定値

本研究では，各プロセスにおいて分析に必要となる情報が上記のヒアリング調査で捕捉しきれない場合には，表 5.2.5 に示す設定値を用いて分析を行う。

輸送プロセスについてはヒアリング対象である実際の工場などの立地を参考に PV パネル処理業者への集積時には 100km, それ以外の輸送プロセスは 50km と距離を設定する[22]。また，環境省の調査[5-7]によると，現状の PV パネルの排出ルートは大部分がパネルメーカーからのものであると推察される。メーカーで発生する廃 PV パネルはある程度ストックが溜まった段階で搬送されるものと仮定し，パネル処理業者への輸送時のトラックの積載率は 100%と設定する。それ以外の輸送プロセスの積載率は再資源化製品の需要により変動すると考えられるため，75%とする。

ジャンクションボックス中のハーネス量，溶融スラグの重量についてはヒアリング調査や文献からデータを得られなかったため，表 5.2.5 の通り設定する。

表 5.2.5　分析に用いる設定

プロセス	該当工程	内容	設定値	単位
輸送	A, B, C, D	輸送距離（パネル処理業者への輸送時）	100	km
		輸送距離（上記以外の輸送時）	50	km
		輸送トラックの積載重量	4	t/台
		輸送トラックの積載率（パネル処理業者への輸送時）	100	%
		輸送トラックの積載率（上記以外の輸送時）	75	%
手解体	A, B	ジャンクションボックスに含まれるハーネス量（重量%）	50	%
乾式製錬	A	被溶融物のスラグ化時の重量（重量%）	100	%

[22] 輸送プロセスはヒアリング対象の工場間の距離を参考に設定値を設けたが，日本全体の将来的な廃 PV パネル発生源とリサイクル工場間等の距離は本論の設定値より大きくなる可能性がある。ただし，輸送プロセスにおける CO_2 原単位は小さく，タイルの工程 C の場合，廃 PV パネルのリサイクル工場までの輸送に関わる CO_2 排出量が工程 C に占める割合の増加は距離の設定を 100km 延長するごとに 0.6%程度であることを確認している。

分析に必要となる CO_2 原単位に関しては産業環境管理協会データ [5-8),5-9)]等を参考に設定するが，該当するプロセスの原単位が不明な場合には代替となる原単位（表 5.2.6）を用いて分析を行う。輸送プロセスにおける原単位は，表 5.2.5 に示した設定値をもとに産業環境管理協会データ [5-8)]より設定している。一般的に溶融スラグ製造時の炉内温度は約 1,200～1,300℃，アルミニウム溶解炉の温度は約 1,100℃であり，前者の温度帯が高く CO_2 排出量が大きくなる可能性があるが，本研究では安全側をみて乾式製錬プロセスの原単位をアルミスクラップ溶融の原単位で代替している。

電力消費に関する CO_2 原単位は電気事業者ごとにその値が公表されているが，本研究では特定の電気事業者の値を用いず，環境省 [5-10)]が公表する 2015 年度の排出量算定用係数（2016 年度報告用）の代替値（0.579kgCO_2/kWh）を適用する。燃料消費に関する CO_2 原単位についても，環境省公表値を用いる（LPG：3.00kgCO_2/kg，A 重油：2.71kgCO_2/L）。

表 5.2.6　原単位に関する設定

プロセス	該当工程	内容	使用原単位	排出量	単位
輸送	A,C	PVパネル処理業者への輸送時CO_2排出量	トラック輸送（4ｔ車：積載率100%）のCO_2排出量	0.185	kg-CO_2/tkm
	B,C	上記以外の輸送時のCO_2排出量	トラック輸送（4ｔ車：積載率75%）のCO_2排出量	0.234	kg-CO_2/tkm
乾式製錬（スラグ化）	A	処理物1kg溶融時のCO_2排出量	アルミスクラップ1kg溶融時のCO_2排出量	0.287	kg-CO_2/kg
乾式製錬（銀再生）	C	製錬処理により銀1kgを再生する際のCO_2排出量	銅乾式製錬の際，併産される銀1kgあたりのCO_2排出量	14.8	kg-CO_2/kg

出所：輸送プロセスの原単位は表 5.2.5 の設定をもとに産業環境管理協会データ [5-8)]より設定。乾式製錬（スラグ化）の原単位は日本アルミニウム協会報告書 [5-11)]より，乾式製錬（銀再生）の原単位は成田らの研究 [5-12)]より設定。

各プロセスにおける加工機器の仕様を表 5.2.7 に示す。機器の効率に関しては定格出力の値を参考に JIS C 4210[5-13]より値を推定し，設定を行っている。また，ここでの平均出力率とは定格出力に対して各機器がどれほどの負荷で稼働しているのかを示す値であり，各プロセスにおける時間平均の値をヒアリング調査から設定している。なお，一部の機器についてはヒアリング調査で仕様データを入手できなかったため，カタログから機器仕様を設定している。

表 5.2.7　機器仕様に関する設定

該当工程		プロセス	定格出力 [kW]	平均出力率	効率	処理能力 [kg/h]
A（共通）		フレームはずし機	2.2	0.5	0.8	216
		ジョークラッシャー	7.5	0.5	0.85	5000
C（共通）		フレームはずし機	2.2	0.5	0.8	216
		圧縮破砕機（集塵機含む）	21（3.7）	0.7（0.7）	0.9（0.8）	500
		ベルトコンベア①	0.4	0.8	0.7	500
		振動ふるい機	1.5	0.8	0.8	500
		風力選別機	0.75	0.8	0.8	500
タイル	B・C	湿式粉砕機	45	0.7	0.9	9000
		ベルトコンベア①	12.4	0.9	0.8	2000
		高圧成型機（集塵機含む）	59.7（3.7）	0.8（0.7）	0.9（0.7）	1200
		ベルトコンベア②	14.3	0.8	0.85	1200
		焼成機	28.2	0.85	0.9	400
		搬送器	11.2	0.8	0.85	2600
	B	スプレードライヤー	75,22,15	0.8,0.8,0.8	0.9,0.9,0.85	8000
		ポンプ	11	0.8	0.85	9900[L/h]
		攪拌機	7.5	0.8	0.85	9000[L/h]
	C	スプレードライヤー	37,5.5,7.5	0.8,0.8,0.8	0.9,0.85,0.85	2000
		ポンプ	5.5	0.8	0.8	1660[L/h]
		攪拌機	0.75	0.8	0.7	3900[L/h]
ブロック	B・C	調合機（集塵機含む）	5.9（3.7）	0.75（0.7）	0.8（0.8）	1600
		ベルトコンベア	4	0.8	0.8	1600
		振動成型機	26	0.82	0.85	1600
		焼成機	11.9	0.77	0.85	380
	C	ボールミル	75	0.8	0.9	450
防音パネル	B・C	スプレードライヤー	37,5.5,7.5	0.8,0.8,0.8	0.9,0.85,0.85	2000
		混合機	0.4	0.8	0.7	80
		コンプレッサー（離型剤塗布）	5.5	0.8	0.8	148
		焼成機	3.7	0.8	0.8	148
		ハンドソー（寸法出し）	2.2	0.7	0.75	148
		ベルトサンダー（厚み出し）	2.2	0.7	0.75	148
		コンプレッサー（エアブロー）	15	0.8	0.85	148
	C	ボールミル	75	0.8	0.9	450
D（共通）		ジョークラッシャー	7.5	0.5	0.85	5000

注：スプレードライヤーは機器の構成上，電動機を 3 つ搭載している。
出所：効率は JIS C 4210[5-13]，その他は業界ヒアリング調査結果，製品カタログより設定。

5.2.2 インベントリ分析

(1) 各プロセスの算定結果

表 5.2.8，表 5.2.9 に単結晶系 PV パネルをタイルへリサイクルする場合の各工程（A～D）の各プロセスにおける CO_2 排出量と，その算定式を示す。

ここで，電力や燃料を使用するプロセスについては，以下の基本式に基づいて消費量を算定している。なお，機器の稼働時間は式中の処理量/処理能力に該当するが，処理が一連のライン状で進行する部分（例：工程 C の圧縮破砕～風力選別）では，機器の稼働時間は各プロセスで一定であるとし，工程上で上流側の機器の稼働時間に依存するものとして算定している。

電力消費量[kWh]
　＝定格出力[kW] × 平均出力率[–] × （処理量[kg] / 処理能力[kg/h]）/ 効率[–]
燃料消費量[kg]
　＝単位時間燃料消費量[kg/h] ×（処理量[kg] / 処理能力[kg/h]）

工程 A では排出量の合計は 324.5kgCO_2/t′となった。そのうち 224.6kgCO_2 はスラグ化時の乾式製錬プロセスにおける排出量であり，工程 A 全体のおよそ 7 割を占めている。次いで，大きかったのはアルミ再生プロセスにおける排出量で 58.0 kgCO_2/t′である。工程 B では排出量の合計は 890.9 kgCO_2/t′となった。そのうち 626.2 kgCO_2/t′はタイル焼成プロセスでの LPG 利用による排出量であり，このプロセスで工程 B 全体のおよそ 7 割を占めている。次いで，大きかったのはスプレードライヤープロセスにおける A 重油利用による排出量で 178.1 kgCO_2/t′である。

工程 C では排出量の合計は 808.6 kgCO_2/t′となった。そのうち 417.4 kgCO_2/t′はタイル焼成プロセスにおける LPG 利用による排出であるが，工程 B の同プロセスと比較すると，208.7 kgCO_2/t′の低減がなされている。これは，天然原料に替えてガラスカレットを用いたことによる燃料削減効果によるものである。また，PV パネルからガラスカレットを製造するまで（工程 C の管理型埋立まで）の排出量の合計は 104.0kgCO_2/t′となり，工程 C の排出量の合計に対し，1 割程度に留まる。工程 D では排出量の合計は 5.8 kgCO_2/t′であり，全体への影響は小さい。

他の 4 種類の PV パネルをタイルにリサイクルする場合のプロセス別 CO_2 排出量，他の 2 製品（ブロック，防音パネル）にリサイクルする場合のプロセス別 CO_2 排出量については，付録 B （p.156～）に示す。

表 5.2.8　タイル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（単結晶系）【工程 A・B】

工程	プロセス		入力[kg] 出力[kg]	算定法	排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		1000 1000	0.185×1×100×(1000/4000) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg]	4.63
	乾式製錬		7.7 3.95	0.95×3.95 [kgCO2/kg] [kg]	3.75
	アルミフレームはずし		985 785	0.579×2.2×0.5/0.8×985/216 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	3.63
	アルミ再生		200 182	0.29×200 [kgCO2/kg] [kg]	58.00
	破砕		785 785	0.021×785 [kgCO2/kg] [kg]	16.86
	乾式製錬	スラグ化	785 782	0.287×782 [kgCO2/kg] [kg]	224.55
		銅再生	785 1.85	0.95×1.85 [kgCO2/kg] [kg]	1.76
		銀再生	785 0.74	14.8×0.74 [kgCO2/kg] [kg]	10.92
	ジョークラッシャー		782 782	0.579×7.5×0.5/0.85×782/5000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	0.40
	合計				324.50
B	長石採取～製錬		438 438	0.0011×438 [kgCO2/kg] [kg]	0.48
	輸送		438 438	0.234×1×50×(438/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg] [-]	1.71
	湿式粉砕		438 1314	0.579×45×0.7/0.9×1314/9000 [kgCO2/kW] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	2.96
	ポンプ		1314 1314	0.579×11×0.8/0.85×864/9900 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [L] [L/h]	0.52
	撹拌		1314 1314	0.579×7.5×0.8/0.85×864/9000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [L] [L/h]	0.39
	スプレー ドライヤー	電力使用	1314 851.5	0.579×(75/0.9+22/0.9+15/0.85) ×0.8×1314/8000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [kw] [-] [kw] [-] [-] [kg] [kg/h]	9.54
		燃料使用	1314 851.5	2.71×400×1314/8000 [kgCO2/L] [L/h] [kg] [kg/h]	178.1
	ベルトコンベア		851.5 851.5	0.579×12.4×0.9/0.8×851.5/2000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	3.44
	輸送		851.5 851.5	0.234×1×50×(851.5/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg] [-]	3.32
	高圧成型	成型機	851.5 851.5	0.579×59.7×0.8/0.9×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	21.8
		集塵機	851.5 851.5	0.579×3.7×0.7/0.8×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	1.33
	ベルトコンベア		851.5 851.5	0.579×14.3×0.8/0.85×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	5.53
	焼成	電力使用	851.5 788.4	0.579×28.2×0.85/0.9×851.5/400 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	32.83
		燃料使用	851.5 788.4	3.00×98.05×851.5/400 [kgCO2/kg] [kg/h] [kg] [kg/h]	626.17
	搬送		788.4 788.4	0.579×11.2×0.8/0.85×788.4/2600 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	1.85
	合計				889.91

表 5.2.9　タイル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（単結晶系）【工程 C・D】

工程	プロセス		入力[kg] 出力[kg]	算定法	排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		1000 1000	0.185×1×100×(1000/4000) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg]	4.63
	乾式製錬		7.7 3.95	0.95×3.95 [kgCO2/kg] [kg]	3.75
	アルミフレームはずし		985 785	0.579×2.2×0.5/0.8×985/216 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	3.63
	アルミ再生		200 182	0.29×200 [kgCO2/kg] [kg]	58.00
	圧縮破砕	破砕機	785 453.9	0.579×21×0.7/0.9×785/500 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	14.85
		集塵機	785 453.9	0.579×3.7×0.7/0.8×785/500 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	2.94
	乾式製錬	銅再生	346.6 1.85	0.95×1.85 [kgCO2/kg] [kg]	1.76
		銀再生	346.6 0.74	14.8×0.74 [kgCO2/kg] [kg]	10.92
	ベルトコンベア		453.9 453.9	0.579×0.4×0.8/0.7×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	0.42
	振動ふるい		453.9 238.5	0.579×1.5×0.8/0.8×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	1.36
	ベルトコンベア		238.5 238.5	0.579×0.4×0.8/0.7×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	0.42
	風力選別		238.5 223.1	0.579×0.75×0.8/0.8×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	0.68
	輸送		15.4 15.4	0.234×1×50×(15.4/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg] [-]	0.059
	管理型埋立		15.4 –	0.038×15.4 [kgCO2/kg] [kg]	0.57
	輸送		438 438	0.234×1×50×(438/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg] [-]	1.71
	湿式粉砕		438 1314	0.579×1×0.7/0.75×1314/500 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	1.42
	ポンプ		1314 1314	0.579×5.5×0.8/0.8×864/3900 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [L] [L/h]	0.71
	撹拌		1314 1314	0.579×0.75×0.8/0.8×864/1660 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [L] [L/h]	0.26
	スプレー ドライヤー	電力使用	1314 851.5	0.579×(37/0.9+5.5/0.85+17.5/0.85) ×0.8×1314/2000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [kW] [-] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	17.17
		燃料使用	1314 851.5	2.71×110×1314/2000 [kgCO2/L] [L/h] [kg] [kg/h]	195.85
	ベルトコンベア		851.5 851.5	0.579×12.4×0.9/0.8×851.5/2000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	3.44
	輸送		851.5 851.5	0.234×1×50×(851.5/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg] [-]	3.32
	高圧成型	成型機	851.5 851.5	0.579×59.7×0.8/0.9×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	21.8
		集塵機	851.5 851.5	0.579×3.7×0.7/0.8×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	1.33
	ベルトコンベア		851.5 851.5	0.579×14.3×0.8/0.85×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	5.53
	焼成	電力使用	851.5 788.4	0.579×28.2×0.85/0.9×851.5/400 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	32.83
		燃料使用	851.5 788.4	3.00×65.4×851.5/400 [kgCO2/kg] [kg/h] [kg] [kg/h]	417.44
	搬送		788.4 788.4	0.579×11.2×0.8/0.85×788.4/2600 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	1.85
	合計				808.63
D	採石		782 782	0.0069×782 [kgCO2/kg] [kg]	5.43
	破砕		782 782	0.579×7.5×0.5/0.85×782/5000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	0.40
	合計				5.83

(2) PV パネル種類別，再資源化製品別 CO_2 削減効果

表 5.2.10 に PV パネル種類，再資源化製品ごとの工程別 CO_2 排出量および CO_2 削減量を示す。タイルへのリサイクル時には，310～442kgCO2/t′の CO_2 削減効果が得られた。最大となるのは CIGS 系 PV パネルを処理した場合であり，次いで単結晶系，多結晶系，薄膜系の順となった。本分析では，タイル焼成プロセスにおける CO_2 排出量が大きいが，薄膜系 PV パネルのようなガラス含有率の比較的小さいものは，焼成プロセスでの処理量が他の PV パネルより小さく，工程 B および工程 C における CO_2 排出量は他の PV パネルの場合より小さくなった。

ブロックと防音パネルへのリサイクル時に関しても，142～238kgCO_2/t′の CO_2 削減効果が得られることが分かった。ブロックはガラス使用率が 10%と低いものであり，1ｔの PV パネルから生産される製品の量はタイルと比較して大きくなる（表 5.2.4 を参照）。そのため，ブロック焼成プロセスでの処理量が増えることで CO_2 排出量が大きくなり，タイル製造時に比べ工程 B と工程 C の値が大きい。逆に防音パネルに関してはガラス使用率が 95%と高く，焼成に化石燃料を用いないため工程 B と工程 C の値は他の 2 製品に比べ小さい。

ブロックと防音パネルの場合，工程 B と工程 C において製品の原料は共にガラスである（工程 B は既存ガラスカレット，工程 C は PV パネルから抽出したガラスカレット）。そのため，両製品とも工程 B と工程 C の製品製造部分において CO_2 排出量に差が生じない。よって，ブロックと防音パネルの CO_2 削減効果（[A+B]-[C+D]）は同量になっている。

また，ガラス再資源化製品 1kg 当たりの CO_2 削減効果はタイルの場合で 0.51～0.61 kgCO_2/kg，ブロックで 0.04～0.06 kgCO_2/kg，防音パネルで 0.38～0.57 kgCO_2/kg となった。

表 5.2.10　PV パネル種類別，再資源化製品別 CO_2 削減効果

単位：[kgCO_2/t']　※は[kgCO_2/kg]

	工程		単結晶系	多結晶系	薄膜系（アルミナ）	薄膜系（ソーダ石灰）	CIGS系
タイルへのリサイクル時	現状	A	324.5	341.6	320.9	312.3	314.2
		B	889.9	761.9	669.9	669.9	812.7
	提案	C	808.6	718.0	676.3	665.6	677.9
		D	5.8	6.0	4.7	4.7	7.4
	CO_2削減量 (A+B) － (C+D)		400.0	379.5	309.8	311.8	441.6
	再資源化製品1kg当たりのCO_2削減量※		0.507	0.562	0.522	0.525	0.613
ブロックへのリサイクル時	現状	A	324.5	341.6	320.9	312.3	314.2
		B	1298.6	1111.8	977.5	977.5	1185.9
	提案	C	1440.1	1258.9	1151.8	1141.2	1254.8
		D	5.8	6.0	4.7	4.7	7.4
	CO_2削減量 (A+B) － (C+D)		177.1	188.6	141.9	143.9	237.9
	再資源化製品1kg当たりのCO_2削減量※		0.040	0.050	0.043	0.044	0.059
防音パネルへのリサイクル時	現状	A	324.5	341.6	320.9	312.3	314.2
		B	83.1	71.5	63.2	63.2	76.1
	提案	C	224.7	218.6	237.5	226.9	145.0
		D	5.8	6.0	4.7	4.7	7.4
	CO_2削減量 (A+B) － (C+D)		177.1	188.6	141.9	143.9	237.9
	再資源化製品1kg当たりのCO_2削減量※		0.384	0.477	0.409	0.414	0.565

図 5.2.6 に再資源化製品，PV パネル種類ごとの CO_2 排出量の内訳を示す。いずれの製品化の場合でも，提案工程では乾式製錬プロセスが無くなることで，現状工程との CO_2 削減量の差が大きくなっている。

タイルへの再資源化時の CO_2 排出量の内訳に着目すると，タイル焼成プロセスでの燃料削減効果が結果に影響を及ぼし，CO_2 削減に大きく寄与していることが分かる。本分析では，ガラスカレット利用による燃料削減効果が大きいため，ガラスの含有量の大きい PV パネルほど大きな CO_2 削減効果が見込まれるが，結果としては最もガラス含有率の大きい単結晶系より CIGS 系のほうが大きい削減効果を得た。これは今回，取り扱った CIGS 系 PV パネルがアルミフレームを含まないものであったためである。

他の種類の PV パネルの場合，工程 A のスラグ化に関する乾式製錬プロセスでの処理量は PV パネル 1 t からアルミフレームを 163～330kg 取り除いたものになるが，CIGS 系 PV パネルに関してはアルミフレーム除去による乾式製錬プロセスでの処理量の減少は無い。そのため，図 5.2.6 に示すように，CIGS 系 PV パネルの乾式製錬プロセスでの CO_2 排出量は他の PV パネルの場合と比較して大きいものとなっている。

現状工程に対する提案工程の CO_2 削減率については防音パネルへの再資源化時で 37～61%，タイルで 31～39%，ブロックで 11～16%となった。CO_2 削減率という点では，ガラス使用率の高い製品へのリサイクルが有利となる。

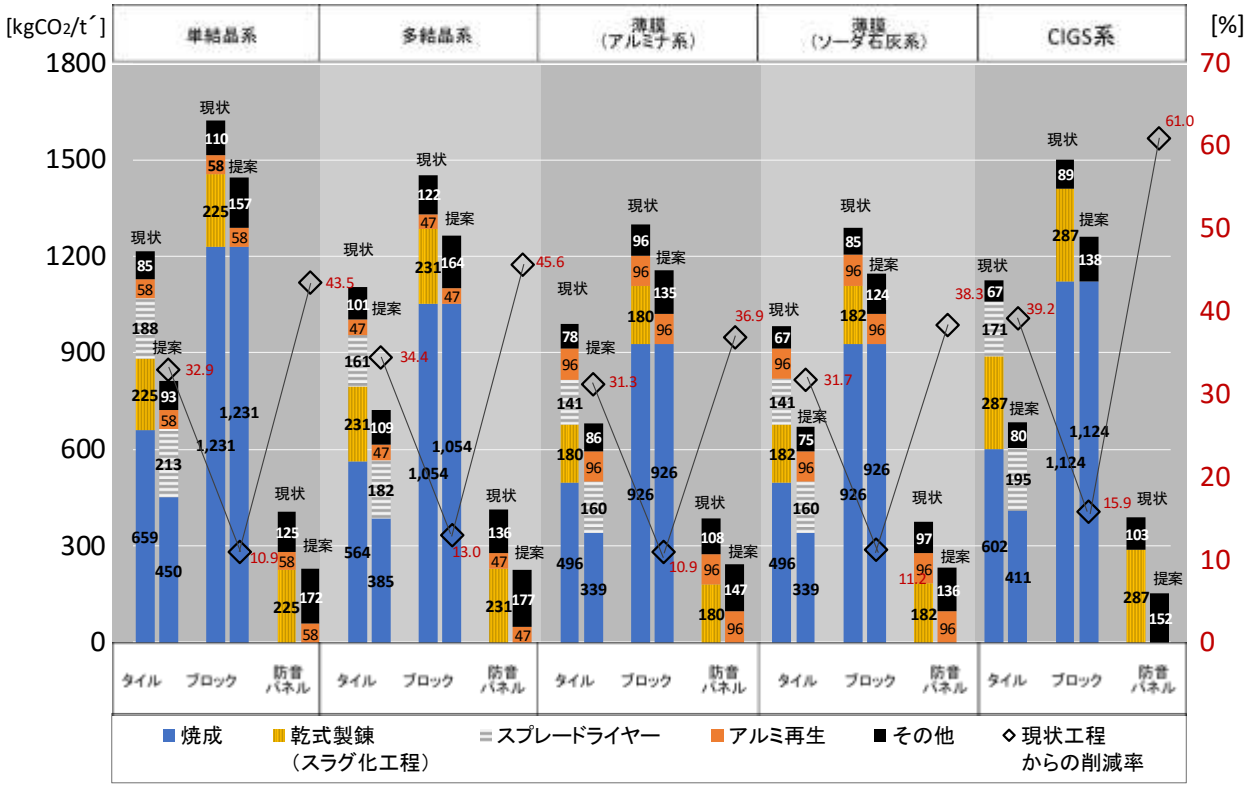


図 5.2.6　再資源化製品製造時の CO_2 排出量の内訳

5.3 まとめと課題

(1) まとめ

本章ではまず，既往研究をもとに住宅用 PV パネルの廃棄量の見通しを検討し，続いて，ガラス再資源化に関連する事業者を対象とするヒアリング調査をもとに，実際の処理工程を考慮した PV パネルのガラス再資源化による CO_2 削減効果を，インベントリ分析により算定した。主な結果を以下にまとめる。

- 住宅用 PV パネルの廃棄重量は，2030 年度に年 2～3 万 t，2050 年度に年 8～9 万 t に達する見込みである。
- 非住宅用を含む PV パネル全体の廃棄重量は, 2040 年代後半から 2050 年度に年 30 万 t 程度でピークに達する見込みである。環境省の試算（2040 年に 80 万 t）に比べ大幅に少ないのは，廃棄時期の分散化，PV システムの長寿命化，PV パネルの軽量化等を考慮したためである。
- PV パネルを再資源化する際, その主な構成品目であるガラスを再生原料としてタイル, ブロック, 防音パネルなどの建材を製造することで現状工程（廃棄後，製錬スラグ化し路盤材として利用する）と比較して，10%以上の CO_2 削減効果が得られる。
- PV パネル 1t を処理した場合の CO_2 削減量は, タイルに再資源化した場合で 310～442 $kgCO_2/t'$，ブロックおよび防音パネルの場合で 142～238 $kgCO_2/t'$ となる。
- タイルへの再資源化時に原料にガラスを用いることによる燃料使用量削減効果が CO_2 削減に大きく寄与する。

(2) 社会的定着に向けた示唆

本研究は，使用済み PV パネルのガラス再資源化に CO_2 削減効果があることを定量的に示した点に特徴がある。

ガラス再資源化は，最終処分負荷や有害物質負荷の軽減に寄与しつつ，CO_2 排出量の削減に貢献することから，今後，処理技術や経済性の改善を進めながら，2040 年代の大量廃棄に向けて十分な処理体制が整備されることが期待される。

従来，発電性能の向上，長寿命化および低コスト化が PV システムの優先的な取り組み課題であったが，今後はリユース，リサイクル，適正処分を進める観点から，リサイクルし易い PV パネルの設計も重要になると考えられる。

(3) 課題

本研究のインベントリ分析では，実際の再資源化工程を参考にしたものの，加工機器には試験的に導入されたものもあり，処理量に対して必ずしも最適化されていない可能性がある。また，一部の項目についてはヒアリングや既存文献からデータを入手

できなかったため，代替的な設定値を利用しているため，今後，より適切なデータが整備された場合には設定を見直す必要がある。

本研究では将来の廃棄量（全国計）の見通しを示したが，今後は，地域ごとの使用済み PV パネルの廃棄量の推定に基づき，再資源化工場の分散配置計画等を行う必要がある。その際には，地域の廃棄量に基づく再資源化工程の機器仕様の最適化，現実的な輸送距離の見直し等が課題となる。

太陽電池の技術が成熟し，長期の信頼性が確立していくに伴い，PV パネルのリユースに対する需要が増えていく可能性がある。特に住宅用 PV システムの場合，住宅の建て替えなどにより，耐用年数よりも早く，PV システムが撤去されるケースがある。PV パネルのリユースには性能保証やトレーサビリティなどの課題はあるものの，環境性の面ではリサイクルより有利と考えられるため，将来的にはリサイクルとリユースを総合的に評価していくことが必要になると考えられる。

第５章の参考文献

5-1）環境省 大臣官房廃棄物・リサイクル対策部 企画課 リサイクル推進室: 太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン, 2016.3

5-2）IEA-PVPS, IRENA: END-OF-LIFE MANAGEMENT Solar Photovoltaic Panels, 2016.6

5-3）株式会社資源総合システム: 太陽エネルギー技術研究開発 太陽光発電システム次世代高性能技術の開発 「太陽光発電技術開発動向等の調査」 （太陽光発電システム等の普及動向に関する調査）（新エネルギー・産業技術総合開発機構委託調査）, 2015.2

5-4）総合資源エネルギー調査会基本政策分科会長期エネルギー需給見通し小委員会: 長期エネルギー需給見通し小委員会（第 11 回）資料 3, 2015.7

5-5）株式会社レノバ: 平成 27 年度低炭素型３Ｒ技術・システム実証事業（使用済太陽光パネルユニットの新たなリサイクル、リユースシステムの構築実証事業）報告書（環境省委託事業）, 2016.2

5-6）一般社団法人太陽光発電協会: 日本における太陽電池出荷統計, 2016.5

5-7）環境省: 太陽光発電設備等のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書, 2015.6

5-8）一般社団法人産業環境管理協会: カーボンフットプリント制度試行事業 CO_2 換算量共通原単位データベース, Vol.4, http://www.cms-cfp-japan.jp/calculate/verify/data.html （参照 2015.10.24）

5-9）一般社団法人産業環境管理協会: JEMAI-LCA Pro＆オプションデータパック, 2003

5-10）環境省: 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧, http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc （参照 2016.10.1）

5-11）一般社団法人日本アルミニウム協会: スクラップ溶解のインベントリ調査報告書, 2007.9

5-12）成田 暢彦, 田原 聖隆, 匂坂 正幸, 稲葉 敦: 貴金属（金, 銀, 白金）のインベントリ分析―CO_2 排出に着目して―, 第 1 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, pp.74-75, 2005.12

5-13）日本工業規格 JIS C 4210（一般用低圧三相かご形誘導電動機）, 2001

第6章 結論

6.1 本研究の要約

本研究は，住宅用 PV システムに対する社会の関心が普及促進から大量導入後の社会への定着に移行しつつあるという認識のもと，運用管理と廃棄に関わる課題に取り組むことにより，PV システムの社会的定着に向けた基礎的情報を提供することを目的とした。第 2 章では普及動向を踏まえ，住宅用 PV システムをめぐる課題を検討し，本研究の位置づけを明らかにした。第 3 章では発電実績データをもとに発電性能（特に導入後の低下傾向）を評価した。第 4 章では戸建住宅への導入者を対象とするアンケート調査を実施し，満足度等の意識と発電実態およびそれらの関係を明らかにした。第 5 章では使用済み PV パネルのガラス再資源化による CO_2 削減効果をインベントリ分析で評価した。

(1) 住宅用太陽光発電システムをめぐる課題

第 2 章では，まず住宅用 PV システムの普及動向を普及支援策とともに整理した。これまでの普及経過について，2005 年度までの導入補助金と電力会社による自主的な買い取りにより徐々に普及が進んだ時期と，導入補助金の終了による普及停滞をはさんで，2009 年度以降の FIT 制度（太陽光発電の余剰電力買取制度，再生可能エネルギーの固定価格買取制度）による導入コストの回収が見込める水準での買い取り（原資は電気料金への賦課金）により導入量が拡大した時期とに分けて概観した。また，FIT 制度については，非住宅用 PV システムが住宅用の 10 倍の規模で大量導入された結果，国民負担の増大を招く等の弊害が生じたことから，2017 年度から改正された経緯についても述べた。

次に，PV システムの導入，運用管理および廃棄に関わる課題を整理したうえで，PV システムが普及促進から大量導入後の社会的定着（一時的な普及に終わらず，導入量が安定的に推移し，リサイクルおよび適正処分が実施され，永続的にエネルギー供給システムあるいは建築設備としての重要な役割を担う状態）に向けて，運用管理および廃棄に関わる課題の対応に力点を移していくことが求められるという認識のもと，第 3 章以降で取り組む課題の位置づけを明らかにした。

(2) 長期発電実績に基づく住宅用太陽光発電システムの性能評価

第 3 章では，住宅用を中心とする約 4,200 件の PV システムの発電実績データとアレイ（パネル）面日射量の推定値をもとに，発電性能の評価を行った。主な結果を以下にまとめる。

- 発電性能を表すシステム出力係数（PR）は，2013 年度において平均 0.829 であり，設置時期が古いシステムほど PR が低い。
- 設置後 1 年間の PR を設置時期別に比較すると, 2004 年度以前に設置された PV システム（n=80）の PR は, 2012 年度に設置された PV システムより 12%低く，発電性能の向上が認められる。これは各 PV システムメーカーでの発電性能の向上と，PR の高い PV システムメーカーの構成比の増加による。
- PR 低下率の中央値は, 2004 年度以前に設置された PV システム（n=80）で 0.53%/年，2005～2008 年度に設置された PV システム（n=133）で 0.40%/年であり，既往研究で示された水準に概ね整合している。
- 2008 年度以前に設置された PV システム（n=213）のうち，設置後 1 年間と 2013 年度の 2 時点間での PR 低下率が 1%/年以上のシステムが約 2 割ある一方で，ほとんど変化していない（PR 低下率－0.2～0.2%/年）システムも約 2 割ある。
- 2004 年度以前に設置された PV システムの発電性能の低下のペースは一定ではなく，6 年目頃から低下が加速している。

(3) 住宅用太陽光発電システムの導入者意識と発電実態

第 4 章では，戸建住宅における PV システム導入者を対象とするアンケート調査を実施（有効回答 571 件）し，PV システムに対する満足度等の導入者意識と発電実態およびそれらの関係を分析した。主な結果を以下にまとめる。

- PV システムの導入時期が近年になるほど，エネルギー・環境問題への貢献や自宅で発電することの楽しさよりも，電気代の節約と売電収入を得ることを導入理由に挙げる導入者の割合が高くなる。
- PV システムの定期点検を受けている（受ける予定がある場合を含む）導入者の割合は 37%に留まり，過去の導入者ほどこの割合は低い。
- PV システムに対する総合満足度は「満足」（52%）と「やや満足」（39%）を合わせると 90%を上回り，肯定的評価をしている導入者が非常に多い。
- ふだんの生活で節電を「かなり心掛けている」，環境に配慮した商品・サービスの選択を「かなり心掛けている」，PV パネルが「住宅の美観を増している」と考えている，あるいは停電時の自立運転機能を 2 回以上利用した経験がある導入者は，総合満足度において「満足」の割合が 70%以上である。
- 総合満足度が高い導入者は，PV システムの増設，電気自動車・プラグインハイブリッド自動車の利用および宅内給電に対する意向が強い（統計的に有意）。また，総合満足度が高いほど，他人に PV システムの導入を勧める傾向がある。
- PV システムの平均発電容量は 4.8kW である。2014 年 12 月からの 1 年間における 1kW 当たり発電量の最頻値は 1,200～1,300kWh/年，発電性能を表すシステム出力係数（PR）の最頻値は 0.80～0.85 である（n=283）。

- 年間発電量のうち住宅で自家消費される割合は，電気給湯器を使用する住宅（n=184）で 27%，その他の住宅で 26%（n=99）である。
- 発電量の電力消費量に対する比は電気給湯器の住宅で 0.68，その他の住宅で 1.15 である。PV システム住宅個別にみると，その他の住宅の 70%（69 件），電気給湯器の住宅の 22%（40 件）において，発電量が電力消費量を上回っている。電気給湯器の住宅の少なくとも 10%（19 件）ではネット・ゼロ・エネルギーを達成している。
- PR が高いほど，発電量に対する満足度は有意に高い。電気代の節約や売電収入を得ることを導入理由に挙げた導入者では，PR が 0.75 未満の場合，発電量に対する否定的評価が肯定的評価を上回る。
- PR の経年的な低下率が高いシステムの導入者は，信頼性・耐久性に対する満足度が低い傾向がみられる。

(4) 使用済み太陽光発電パネルのガラス再資源化の環境性評価

第 5 章ではまず，既往研究をもとに住宅用 PV パネルの廃棄量の見通しを検討し，続いて，ガラス再資源化に関連する事業者を対象とするヒアリング調査をもとに，実際の処理工程を考慮した PV パネルのガラス再資源化による CO_2 削減効果を，インベントリ分析により算定した。主な結果を以下にまとめる。

- 住宅用 PV パネルの廃棄重量は，2030 年度に年 2～3 万 t，2050 年度に年 8～9 万 t に達する見込みである。
- 非住宅用を含む PV パネル全体の廃棄重量は, 2040 年代後半から 2050 年度に年 30 万 t 程度でピークに達する見込みである。環境省の試算（2040 年に 80 万 t）に比べ大幅に少ないのは，廃棄時期の分散化，PV システムの長寿命化，PV パネルの軽量化等を考慮したためである。
- PV パネルを再資源化する際, その主な構成品目であるガラスを再生原料としてタイル, ブロック, 防音パネルなどの建材を製造することで現状工程（廃棄後，製錬スラグ化し路盤材として利用する）と比較して，10%以上の CO_2 削減効果が得られる。
- PV パネル 1t を処理した場合の CO_2 削減量は, タイルに再資源化した場合で 310～442 $kgCO_2/t'$，ブロックおよび防音パネルの場合で 142～238 $kgCO_2/t'$ となる。
- タイルへの再資源化時に原料にガラスを用いることによる燃料使用量削減効果が CO_2 削減に大きく寄与する。

6.2 社会的定着に向けた示唆

(1) 長期発電性能の評価結果からの示唆

本研究では，既往研究では評価が不十分であった 2000 年代以降の PV システム（ただし，国内メーカー製が中心）を中心に発電性能の低下傾向を評価し，知見の確立に貢献した。

発電性能の低下傾向は，個々の PV システムによって異なり，多様であることが明らかになった。設置からの経過年数が 10 年程度のシステムの中でも，未だ発電性能の低下がみられないシステムと，年率 1%以上の比較的高いペースで低下しているシステムが各 2 割程度ずつあり，さらに後者のグループは徐々に発電性能が低下しているシステムと，短期間に大きく低下しているシステムに分けられる。発電性能の低下がみられないシステムでも今後，発電性能の低下が始まる可能性があり，発電性能の低下が始まる時期にばらつきがあると解釈するのが妥当である。

個々の PV システムについて，発電性能の低下が始まる時期を予測することは難しいため，発電量の監視と保守点検を継続的に行うことが不具合や性能低下を早期に発見し，対処するうえで重要である。しかし，定期点検を受けていない PV システムも多く存在すると考えられ，特に住宅用 PV システムでは余剰売電量は把握されていても，発電量は把握されていない場合があると考えられる。また，発電量に対する導入者の関心は，設置当初は高くても徐々に低下する可能性がある。少なくとも月単位の発電量が継続的に記録される仕組みが必要と考えられる。また，本研究から発電性能の低下ペースが一定ではなく，運用期間が長くなるほど加速的に低下する可能性が示唆されるため，発電量の監視や保守点検は，時期が経過するほど重要になることに留意が必要である。

PV システムの技術は発展途上であり，発電性能の低下傾向に関する知見は継続的に蓄積される必要があるが，今後，性能低下がある程度予見できるようになれば，運用の継続に関する判断に活用可能である。例えば，パワーコンディショナーが故障（発電が一切できなくなる）した際のリプレースの是非の判断や，運用の節目（買取期間終了時等）における PV システムの運用継続の是非の判断，さらには最終的な運用停止とリプレースの是非の判断にも役立つと考えられる。

今後，建材としての機能と発電システムの機能を併せ持つ，建材一体型の PV パネルが普及する可能性がある。これを採用する場合，長期的に発電性能が低下することを前提に，導入の是非，導入に適した場所，あるいは保守点検のあり方について，計画・設計段階で十分に検討することが必要と考えられる。

(2) 導入者意識の評価結果からの示唆

本研究では，既往研究でほとんど注目されていなかった住宅用 PV システム導入者

の満足度等の意識をアンケート調査で把握し，その規定因を分析した。導入者の意識だけでなく PV システムの発電実態を一体的に把握することで，発電性能が満足度に及ぼす影響を明らかにした点に特徴がある。

PV システムに対する導入者の満足度は非常に高いが，導入者の意識を分析すると，注意を要する点もみられる。PV システムの導入理由として，電気代の節約と売電収入を得ることを挙げる導入者の割合が近年増加しているため，発電性能が満足度に及ぼす影響が強まっている可能性がある。実際，このような経済的な理由で導入し，発電性能が低水準である導入者は発電量に対する満足度が低い傾向が確認された。また，発電性能が年率 1%以上のペースで低下している導入者の信頼性・耐久性に対する満足度も比較的低い。従って，発電性能の維持が重要になるが，定期点検を受けている導入者の割合は，発電性能に関心があると考えられる本研究のアンケート調査回答者でも約 4 割に留まり，保守に対する意識はまだ低いと言わざるを得ない。発電量の監視や保守・点検の必要性と重要性について，PV システムの供給者（販売事業者），導入者双方に啓発が必要と考えられる。

PV システムに対する満足度が高いほど，電気自動車等の導入意向が強く，将来，余剰電力の買取価格が購入価格より低くなった際に，自家消費先として注目される可能性がある。PV システムが大量に普及した社会では，晴天日の日中に，電力系統全体として大きな余剰電力が生じる可能性があり，一部の地域では低需要期に顕在化している。電力系統側での調整が困難な場合，PV システム等の出力を抑制するルールになっているが，燃料費のかからない電力を捨てることになる。このため，適切なタイミングで PV システムからの電気を電気自動車等に供給する制御が必要になると考えられる。また，本研究のアンケート調査では，PV システム導入住宅の約 5 割で電気ヒートポンプ式給湯機が使用されていた。基本的に深夜に沸きあげて貯湯する運転方法となっているが，晴天日には日中に沸きあげることが有効である。この場合，住宅で給湯需要が増える夕方以降に向けて，当日の日中に沸きあげることになるため，発電量（天気）の予測精度も重要になる。これらの他にも運転スケジュールを調整し易い電気機器（住宅内では食器洗浄乾燥機や衣類乾燥機，住宅外では飲料用自動販売機等が考えられる）を最適制御することで，PV システムからの電力を有効利用することが可能になる。こうした状況では，複数の電気機器を最適制御する司令塔となる HEMS（ホームエネルギーマネジメントシステム）に対して，ある期間（例えば翌日まで）の予測発電量を提供するなど，PV システムの機能も進化が求められると考えられる。

(3) 使用済み太陽光発電パネルのガラス再資源化の環境性評価結果からの示唆

本研究は，使用済み PV パネルのガラス再資源化に CO_2 削減効果があることを定量的に示した点に特徴がある。

ガラス再資源化は，最終処分負荷や有害物質負荷の軽減に寄与しつつ，CO_2排出量の削減に貢献することから，今後，処理技術や経済性の改善を進めながら，2040 年代の大量廃棄に向けて十分な処理体制が整備されることが期待される。

従来，発電性能の向上，長寿命化および低コスト化が PV システムの優先的な取り組み課題であったが，今後はリユース，リサイクル，適正処分を進める観点から，リサイクルし易い PV パネルの設計も重要になると考えられる。

6.3 今後の課題

(1) 長期発電性能の評価

本研究では主に 2000 年代に導入された住宅用を中心とする PV システム（約 4,200 件）の発電性能を評価したが，導入から 10 年程度以上を経過した PV システムの評価数は 100 件に満たない。PV システムは 20 年以上の使用が想定されていることも考慮すれば，長期発電性能の評価件数および評価期間は不十分である。

本研究の評価対象には結晶系太陽電池の PV システムを主力商品とするメーカーと化合物系（CIS 等）太陽電池の PV システムを主力商品とするメーカーが含まれており，設置当初の発電性能では化合物系太陽電池の PV システムの方が高い傾向がみられた（表 3.2.7）が，長期性能で比較評価を行う必要がある。

PV システムの技術は発展途上であるため，導入済みの PV システムの評価を継続するだけでは十分ではない。今後も新型の太陽電池が登場することが見込まれており，さらにパワーコンディショナーの高効率化や長寿命化に向けた技術開発も進められていることから，今後新たに導入される PV システムを評価対象とすることが不可欠である。

継続的な評価を行うために，長期間の発電実績データにアクセスし易い環境を整える必要がある。本研究で使用したデータセットは，筆者が所属する民間研究機関が提供するウェブ上のサービスにおいて 12 年間（2002～2014 年）にわたり徐々に蓄積されたものであるが，後継研究を増やすためには，HEMS（ホーム・エネルギー・マネジメント・システム）やモニタリングサービス[23]で収集されている発電実績データを，匿名化を施したうえで，第 3 者が利用できる環境を整えることが考えられる。

(2) 導入者意識の評価

本研究のアンケート調査の対象者は導入からの経過年数が短い導入者が多かったことから，特に信頼性・耐久性に対する満足度の評価は不十分であり，今後も長期間の

[23] PV システムメーカーが提供するサービスや，サードパーティ（NTT スマイルエナジー等）が提供するサービスがある。

使用経験を有する導入者の意識調査を行っていく必要がある。第 2 章で示したように，PV システムの技術は発展途上であるため，導入者の意識調査もそれに応じて変化する可能性があり，継続的な評価が求められる。また，2019 年以降に FIT 制度の買取期間が終了する導入者（売電より自家消費が経済的に有利となる）が，実際にどのような行動を起こし，その結果，どのような意識を持つかも興味深い。

今回のアンケート調査では，将来の撤去・処分に関する導入者の意識を把握できていない。既に住宅用 PV システムを 20 年以上使用している導入者もいることから，今後，この点にも注目していく必要がある。

(3) 使用済み太陽光発電パネルのガラス再資源化の環境性評価

本研究のインベントリ分析では，実際の再資源化工程を参考にしたものの，加工機器には試験的に導入されたものもあり，処理量に対して必ずしも最適化されていない可能性がある。また，一部の項目についてはヒアリングや既存文献からデータを入手できなかったため，代替的な設定値を利用しているため，今後，より適切なデータが整備された場合には設定を見直す必要がある。

本研究では将来の廃棄量（全国計）の見通しを示したが，今後は，地域ごとの使用済み PV パネルの廃棄量の推定に基づき，再資源化工場の分散配置計画等を行う必要がある。その際には，地域の廃棄量に基づく再資源化工程の機器仕様の最適化，現実的な輸送距離の見直し等が課題となる。

太陽電池の技術が成熟し，長期の信頼性が確立していくに伴い，PV パネルのリユースに対する需要が増えていく可能性がある。特に住宅用 PV システムの場合，住宅の建て替えなどにより，耐用年数よりも早く，PV システムが撤去されるケースがある。PV パネルのリユースには性能保証やトレーサビリティなどの課題はあるものの，環境性の面ではリサイクルより有利と考えられるため，将来的にはリサイクルとリユースを総合的に評価していくことが必要になると考えられる。

＜付録＞

付録A　アンケート調査票（第４章関係）

太陽光発電に関するアンケート調査

＜はじめに＞

本調査は、住宅用太陽光発電ユーザーの意識や電気の使用状況などを把握し、今後の太陽光発電の普及に向けて課題を検討することを目的としています。

本調査は、ソーラークリニックを提供する住環境計画研究所と、東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻・湯淺研究室との共同研究の一環として実施するものです。

調査の結果は学術研究に利用させていただき、個別のご回答内容が公表されることはありません。
また、共同研究に際し、皆さまのメールアドレスが、共同研究実施者である東京工業大学に提供されることはありません。

お忙しいところ恐縮ですが、ご協力をよろしくお願いいたします。

＜調査対象＞

本アンケート調査の対象は、ソーラークリニック登録発電所の方であって、以下のすべての条件を満たす太陽光発電システムの利用者です。

1. 設置から1年以上経過
   お使いの太陽光発電システムが、2014年11月またはそれより前に設置(売電開始)されていること。

2. 余剰売電
   お使いの太陽光発電システムが、住宅に電気を供給し、余剰分を売電するものであること。

3. 持ち家の一戸建て
   お使いの太陽光発電システムが電気を供給する先が、持ち家の一戸建て住宅であること。

4. 居住者である
   あなたご自身がその住宅に居住していること。

＜ご回答をはじめる前に＞

本アンケートは7ページで構成されており、合計の質問数は33問です。
ご回答に必要な時間（目安）はおよそ15分です。

上記の調査対象の条件を満たし、調査にご協力いただける場合は、ご回答をはじめる前に、あらかじめ以下の情報をお手元にご用意いただきますと、最後までスムーズにご回答いただけるかと思います。

・ご自宅の建築年
・ご自宅の延べ床面積（㎡）
・2014年12月から2015年11月までの発電量※、売電量、買電量　（※ソーラークリニックに登録済みの発電量は不要）

なお、これらの情報をお手元にご用意いただけなかったとしても、最後までご回答いただけるようにしております。

PQ　お使いの太陽光発電システムは、本アンケート調査の対象となる条件を満たしていますか。また、調査にご協力いただけますか。

1. 調査対象であり、調査に協力できる
2. 調査対象であるが、調査に協力できない　⇒　終了
3. 調査対象でない　⇒　終了

◆IDおよび発電所名

Ｑ１　ソーラークリニック発電所ID

ご確認のみしていただき、次にお進みください。

埋込

Ｑ２　確認のため、発電所名をお答えください。

複数の発電所をご登録の方は、念のため、本アンケートのご依頼メールのお宛名をご確認のうえ、ご記入ください。

◆太陽光発電システムの設置時の状況についておうかがいします。

Ｑ３　太陽光発電システムの使用の経緯をお答えください。

1. 新築時に設置
2. 既築住宅に設置
3. 設置済みの中古住宅を取得

Ｑ４　太陽光発電システムの購入先をお答えください。

1. ハウスメーカー
2. 工務店
3. 不動産事業者（ディベロッパー）
4. 住宅設備販売・リフォーム事業者
5. 太陽光発電を中心に扱う販売事業者
6. 家電量販店
7. 地域の家電販売店
8. ガス会社・ガス機器販売店
9. 農協・生協
10. その他（　　）
11. わからない

Ｑ５　太陽光発電システムを設置した理由は多様であると思いますが、以下の中から一番の理由を挙げるとすれば、どれに最も近いですか。

1. 電気代を節約し、売電収入を得たかった
2. エネルギー問題や環境問題の解決に貢献したかった
3. 自宅で発電できることが楽しそうだった
4. とくに理由はなかった

Ｑ６　太陽光発電システムの設置時や使用開始当初に、以下のような問題はありましたか。【複数回答可】

1. 配電系統の電圧上昇により頻繁に出力が抑制された
2. 太陽電池モジュール（パネル）の配線ミスにより発電量をロスした
3. パワーコンディショナーの設定ミスにより発電量をロスした
4. 施工者の過失により住宅に損傷があった
5. その他（　　）
6. とくになし

◆太陽光発電システムと住宅・コミュニティとの関わりについておうかがいします。

Ｑ７　太陽電池モジュール（パネル）の設置場所をお答えください。【複数回答可】

1. 屋根（架台設置）
2. 屋根（屋根材一体型）
3. 陸屋根（平の屋根）の上
4. 敷地（野立て）
5. その他（　　）

Ｑ８　太陽電池モジュール（パネル）はご自宅の敷地内や周辺の道路から見えますか。

1. 全体が見える
2. 一部が見える
3. 見えない

Ｑ９　太陽電池モジュール（パネル）は住宅の美観を増していると思いますか。

1. 美観を増している
2. どちらともいえない
3. 美観を損ねている

Ｑ10　太陽光発電システムの設置後、近隣の方との関わりはありましたか。【複数回答可】

1. 太陽光発電システムについて話し掛けられたことがある
2. 太陽光発電システムの設置について詳しい質問や相談に応じたことがある
3. 太陽光発電システムの設置者同士で情報交換をしたことがある
4. 太陽光発電システムの設置を勧めたことがある
5. その他（　　）
6. とくになし

Ｑ11　太陽光発電システムの利用に伴い、設置後の周辺環境の変化による日影の発生や、近隣の方とのトラブルを経験したことがありますか。【複数回答可】

1. 近隣に新しい建築物が建ち、太陽電池モジュール（パネル）に日影が生じた
2. 近隣の樹木が生長し、太陽電池モジュール（パネル）に日影が生じた
3. 太陽電池モジュール（パネル）による反射光について苦情を受けた
4. パワーコンディショナーの作動音などについて苦情を受けた
5. その他（　　）
6. とくになし

◆太陽光発電システムの点検やトラブル、停電などのご経験についておうかがいします。

Q 12　太陽光発電システムの定期点検を受けていますか。今後、受ける予定がある場合を含みます。

1. 受けている	2. 受けていない	3. わからない

Q 13　これまでにパワーコンディショナーの交換や修理をしたことがありますか。
本体交換、修理（部品交換）の両方を経験している場合は、本体交換を選択してください。

1. 本体交換あり　⇒(2),(3)へ	2. 修理（部品交換）あり　⇒(2),(3)へ	3. なし　⇒Q14へ

(2)上記の交換・修理は設置から何年後のことでしたか。
本体交換（あるいは修理）を複数回経験されている場合は、1回目についてお答えください。

[　　] 年後

(3)上記の交換・修理のきっかけは何ですか。
本体交換（あるいは修理）を複数回経験されている場合は、1回目についてお答えください。

1. 故障（自然災害によるものを除く）	2. 自然災害による故障	3. メーカーのリコール
4. その他（　　）	5. わからない	

Q 14　これまでに太陽電池モジュール（パネル）の全部または一部を交換をしたことがありますか。
全部交換、一部交換の両方を経験している場合は、全部交換を選択してください。

1. 全部交換あり	2. 一部交換あり	3. なし

(2)上記の交換は設置から何年後のことでしたか。
全部交換（あるいは一部交換）を複数回経験されている場合は、1回目についてお答えください。

[　　] 年後

(3)上記の交換のきっかけは何ですか。
全部交換（あるいは一部交換）を複数回経験されている場合は、1回目についてお答えください。

1. 発電出力の不足・低下	2. 自然災害などによる損壊	3. メーカーのリコール
4. その他（　　）	5. わからない	

Q 15　太陽光発電システムを利用する前を含め、10年以内に、ご自宅で1時間を超える停電を経験したことがありますか。

1. 2回以上あり	2. 1回あり	3. なし

Q 16　太陽光発電システムの稼働中に停電が発生し、自立運転機能で電気を使用したことがありますか。

1. 2回以上あり	2. 1回あり	3. なし

◆発電状況や電気の使用状況についておうかがいします。

Q 17　あなたは、発電量、売電量、買電量を、どのくらいの頻度で確認していますか。

	ほぼ毎日	週に2～3回	週に1回程度	月に2～3回	月に1回程度	月に1回未満
1　発電量	1	2	3	4	5	6
2　売電量	1	2	3	4	5	6
3　買電量	1	2	3	4	5	6

Q 18　あなたやあなたのご家族は、ふだんの生活で節電を心掛けていますか。

1. かなり心掛けている　2. ある程度心掛けている　3. どちらともいえない
4. あまり心掛けていない　5. ほとんど心掛けていない

Q 19　あなたは、消費者として以下のような行動をどの程度心掛けていますか。
1点目と2点目については、太陽光発電システム以外の商品やサービスも含めて、お考えください。

	かなり心掛けている	ある程度心掛けている	どちらともいえない	あまり心掛けていない	ほとんど心掛けていない
1　トラブルに備えて、対処方法をあらかじめ準備・確認しておく	1	2	3	4	5
2　商品やサービスについて問題があれば、事業者に申立てを行う	1	2	3	4	5
3　環境に配慮した商品やサービスを選択する	1	2	3	4	5

Q 20　2014年12月～2015年11月の"月ごとの"発電量、売電量、買電量を、別途、Excel形式のファイルでご回答いただくことはできますか。
回答できる方は、右のリンクから回答ファイルをダウンロードの上、別途、メールでお送りください。http://www.jyuri.co.jp/solarclinic/Q20kaitou.xls
なお、ソーラークリニックに登録済みの発電量は必要ありません。

1. 回答できる　⇒Q22へ　2. 回答できない　⇒Q21へ

Q 21　前問で、「回答できない」とお答えの方は、2014年12月～2015年11月の"1年間合計の"発電量をお答えください。
ソーラークリニックに当該期間のデータを登録済みの方は空欄で結構です。

[　　] kWh

(2)　(1)と同じ1年間合計の"売電量(kWh)"をお答えください。
モニターなどで各月1日～末日のデータを確認できる場合は、その数値をもとにお答えください。確認することができない場合は、検針票をもとにお答えください。

[　　] kWh

(3)　(1)と同じ1年間合計の"買電量(kWh)"をお答えください。
契約が複数ある場合（従量電灯＆深夜電力など）は、検針票をもとに、すべての契約の合計値をお答えください。（契約が1つの場合は(2)と同様）

[　　] kWh

Q 22　ご自宅では、電気のほかに以下のようなエネルギーを使用していますか。【複数回答可】

1. 都市ガス　2. LPガス　3. 灯油
4. 太陽熱　5. まき・ペレットなどの木質系燃料　6. いずれも使用していない

Q 23　ご自宅では、以下の設備を使用していますか。【複数回答可】

1. エコキュート（ヒートポンプ式給湯機）
2. 電気温水器（主に夜間電力で沸き上げるタイプ）
3. 電気蓄熱式暖房機
4. 電気式床暖房
5. 電気温水式セントラル暖房
6. ロードヒーティング（電気融雪）
7. エネファーム（家庭用燃料電池システム）
8. エコウィル（ガスエンジン発電機で発電し、排熱を給湯に使用するシステム）
9. コレモ（ガスエンジン発電機で発電し、排熱を暖房に使用するシステム）
10. 家庭用蓄電池システム
11. 電気自動車
12. プラグインハイブリッド自動車（充電とガソリン給油の両方に対応した自動車）
13. あてはまるものはない

◆太陽光発電システムの満足度、今後の利用意向などについておうかがいします。

Q 24　太陽光発電システムを設置して満足していますか。以下のそれぞれの項目についてお答えください。

	満足	やや満足	どちらともいえない	やや不満	不満
1　発電量	1	2	3	4	5
2　電気代の節約と売電収入	1	2	3	4	5
3　信頼性・耐久性	1	2	3	4	5
4　購入先やメーカーの対応力	1	2	3	4	5
5　総合的に考えて、太陽光発電を設置したこと	1	2	3	4	5

(2)満足、不満足な点について補足されたいことがありましたら、ご自由にお書きください。

Q 25　固定価格買取期間（10年）の経過後、お使いの太陽光発電システムの売電価格はどのような水準になると思いますか。

1. 購入する電気の平均的な価格より低い（安い）
2. 購入する電気の平均的な価格と同程度
3. 購入する電気の平均的な価格より高い
4. わからない

Q 26　今後の太陽光発電システムや電気の使用に関し、以下のようなご希望はありますか。

2点目から5点目に関して、既に使用している場合は、今後も長期的に使用したいかどうかお答えください。

	とてもそう思う	ややそう思う	どちらともいえない	あまりそう思わない	全くそう思わない	わからない
1　太陽電池モジュール（パネル）を増設したい	1	2	3	4	5	6
2　ガス発電システム（エネファーム、エコウィル、コレモ）を併せて使用したい	1	2	3	4	5	6
3　家庭用蓄電池システムを使用したい	1	2	3	4	5	6
4　電気自動車やプラグインハイブリッド自動車を使用したい	1	2	3	4	5	6
5　電気自動車やプラグインハイブリッド自動車に充電した電気を、自宅でも使用したい	1	2	3	4	5	6
6　2016年4月の電力自由化後は、電気代と売電収入を最優先して電力会社を選びたい	1	2	3	4	5	6
7　購入する電気も再生可能エネルギーによる電気（グリーン電力）を選びたい	1	2	3	4	5	6

(2)今後の太陽光発電システムや電気の使用に関するご希望について補足されたいことがありましたら、ご自由にお書きください。

◆最後に世帯・住宅及びあなたご自身についておうかがいします。分析に必要な項目ですので、ご協力をお願いいたします。

Q 27　ご自宅にお住まいの方の人数をお答えください。

1. 1人	2. 2人	3. 3人	4. 4人	5. 5人	6. 6人	7. 7人以上

Q 28　65歳以上の方の人数をお答えください。

1. 0人	2. 1人	3. 2人	4. 3人	5. 4人以上

Q 29　ご自宅の建築年（西暦）をお答えください。

正確にお分かりにならない場合は、999と入力し、(2)の選択式設問でお答えください。

西暦 [　　] 年

(2)ご自宅の建築年（西暦）を以下からお選びください。

1. 1970年（昭和45年）以前	2. 1971年～1980年（昭和46年～55年）
3. 1981年～1985年（昭和56年～60年）	4. 1986年～1990年（昭和61年～平成2年）
5. 1991年～1995年（平成3年～7年）	6. 1996年～2000年（平成8年～12年）
7. 2001年～2005年（平成13年～17年）	8. 2006年～2010年（平成18年～22年）
9. 2011年（平成23年）以降	10. わからない

Q 30　ご自宅の延床面積（㎡）をお答えください。坪数で把握されている場合は3.3倍してください。小数点以下は四捨五入してください。

土地の面積や、建築面積（建坪）ではなく、各階の床面積の合計をお答えください。正確にお分かりにならない場合は、999と入力し、(2)の選択式設問でお答えください。

[　　] ㎡

(2)ご自宅の延床面積を以下からお選びください。

1. 74㎡以下	2. 75～99㎡	3. 100～124㎡
4. 125～149㎡	5. 150～199㎡	6. 200㎡以上
7. わからない		

Q 31　ご自宅には、二重サッシまたは複層ガラスの窓はありますか。

1. すべての窓にある	2. 一部の窓にある	3. ない
4. わからない		

Q 32　あなたの性別をお答えください。

1. 男性	2. 女性

Q 33　あなたの年齢をお答えください。

1. 10代以下	2. 20代	3. 30代	4. 40代	5. 50代	6. 60代	7. 70代以上

以上

（注）実際の回答には Google フォームを使用した。

付録B　ガラス再資源化製品のプロセス別 CO_2 排出量（第５章関係）

(1) タイル製造時

1） 多結晶系

付表 B-1　タイル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（多結晶系）

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		4.63
	乾式製錬		4.56
	アルミフレームはずし		3.62
	アルミ再生		47.13
	破砕		17.59
	乾式製錬	スラグ化	230.52
		銅再生	13.51
		銀再生	19.68
	ジョークラッシャー		0.41
	合計		341.64
B	長石採取～製錬		0.41
	輸送		1.46
	湿式粉砕		2.53
	ポンプ		0.45
	撹拌		0.34
	スプレードライヤー	電力使用	8.17
		燃料使用	152.44
	ベルトコンベア		2.94
	輸送		2.84
	高圧成型		19.80
	ベルトコンベア		4.73
	焼成	電力使用	28.10
		燃料使用	536.08
	搬送		1.58
	合計		761.89

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		4.63
	乾式製錬		4.56
	アルミフレームはずし		3.62
	アルミ再生		47.13
	圧縮破砕		18.54
	乾式製錬	銅再生	13.51
		銀再生	19.68
	ベルトコンベア		0.43
	振動ふるい		1.42
	ベルトコンベア		0.43
	風力選別		0.71
	輸送		0.02
	管理型埋立		0.24
	輸送		1.46
	湿式粉砕		1.22
	ポンプ		0.60
	撹拌		0.22
	スプレードライヤー	電力使用	14.70
		燃料使用	167.68
	ベルトコンベア		2.77
	輸送		2.84
	高圧成型		19.80
	ベルトコンベア		4.73
	焼成	電力使用	28.10
		燃料使用	357.39
	搬送		1.58
	合計		718.04
D	採石		5.57
	破砕		0.41
	合計		5.98

注１：PV パネル処理量１ｔ当たりの CO_2 排出量

注２：各工程の詳細は図 5.2.3（p.126）を参照

2） 薄膜系（アルミナ）

付表 B-2　タイル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（薄膜系（アルミナ））

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		4.63
	乾式製錬		8.03
	アルミフレームはずし		3.56
	アルミ再生		95.61
	破砕		13.69
	乾式製錬	スラグ化	180.36
		銅再生	7.99
		銀再生	6.70
	ジョークラッシャー		0.32
	合計		320.90
B	長石採取～製錬		0.36
	輸送		1.29
	湿式粉砕		2.23
	ポンプ		0.39
	撹拌		0.30
	スプレードライヤー	電力使用	7.18
		燃料使用	134.02
	ベルトコンベア		2.50
	輸送		2.84
	高圧成型		17.41
	ベルトコンベア		4.16
	焼成	電力使用	24.71
		燃料使用	471.32
	搬送		1.39
	合計		669.86

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		4.63
	乾式製錬		8.03
	アルミフレームはずし		3.56
	アルミ再生		95.61
	圧縮破砕		14.44
	乾式製錬	銅再生	7.99
		銀再生	6.70
	ベルトコンベア		0.34
	振動ふるい		1.11
	ベルトコンベア		0.34
	風力選別		0.55
	輸送		0.26
	管理型埋立		2.50
	輸送		1.29
	湿式粉砕		1.07
	ポンプ		0.53
	撹拌		0.19
	スプレードライヤー	電力使用	12.92
		燃料使用	147.43
	ベルトコンベア		2.44
	輸送		2.50
	高圧成型		17.41
	ベルトコンベア		4.16
	焼成	電力使用	24.71
		燃料使用	314.22
	搬送		1.39
	合計		676.32
D	採石		4.36
	破砕		0.32
	合計		4.68

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量
注 2：各工程の詳細は図 5.2.3（p.126）を参照

3） 薄膜系（ソーダ石灰）

付表 B-3　タイル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（薄膜系（ソーダ石灰））

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		4.63
	乾式製錬		8.03
	アルミフレームはずし		3.56
	アルミ再生		95.61
	破砕		13.69
	乾式製錬	スラグ化	182.44
		銅再生	1.36
		銀再生	2.66
	ジョークラッシャー		0.32
	合計		312.31
B	長石採取～製錬		0.36
	輸送		1.29
	湿式粉砕		2.23
	ポンプ		0.39
	撹拌		0.30
	スプレードライヤー	電力使用	7.18
		燃料使用	134.02
	ベルトコンベア		2.50
	輸送		2.84
	高圧成型		17.41
	ベルトコンベア		4.16
	焼成	電力使用	24.71
		燃料使用	471.32
	搬送		1.39
	合計		669.86

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		4.63
	乾式製錬		8.03
	アルミフレームはずし		3.56
	アルミ再生		95.61
	圧縮破砕		14.44
	乾式製錬	銅再生	1.36
		銀再生	2.66
	ベルトコンベア		0.34
	振動ふるい		1.11
	ベルトコンベア		0.34
	風力選別		0.55
	輸送		0.26
	管理型埋立		2.50
	輸送		1.29
	湿式粉砕		1.07
	ポンプ		0.53
	撹拌		0.19
	スプレードライヤー	電力使用	12.92
		燃料使用	147.43
	ベルトコンベア		2.44
	輸送		2.50
	高圧成型		17.41
	ベルトコンベア		4.16
	焼成	電力使用	24.71
		燃料使用	314.22
	搬送		1.39
	合計		665.64
D	採石		4.41
	破砕		0.32
	合計		4.74

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量
注 2：各工程の詳細は図 5.2.3（p.126）を参照

4） CIGS 系

付表 B-4　タイル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（CIGS 系）

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		4.63
	乾式製錬		0.00
	アルミフレームはずし		0.00
	アルミ再生		0.00
	破砕		21.48
	乾式製錬	スラグ化	286.96
		銅再生	0.10
		銀再生	0.54
	ジョークラッシャー		0.51
	合計		314.21
B	長石採取～製錬		0.44
	輸送		1.56
	湿式粉砕		2.70
	ポンプ		0.48
	撹拌		0.36
	スプレードライヤー	電力使用	8.71
		燃料使用	162.60
	ベルトコンベア		3.14
	輸送		3.03
	高圧成型		21.12
	ベルトコンベア		5.05
	焼成	電力使用	29.98
		燃料使用	571.82
	搬送		1.69
	合計		812.69

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		4.63
	乾式製錬		0.00
	アルミフレームはずし		0.00
	アルミ再生		0.00
	圧縮破砕		22.66
	乾式製錬	銅再生	0.10
		銀再生	0.54
	ベルトコンベア		0.53
	振動ふるい		1.74
	ベルトコンベア		0.53
	風力選別		0.87
	輸送		0.28
	管理型埋立		2.68
	輸送		1.56
	湿式粉砕		1.30
	ポンプ		0.64
	撹拌		0.24
	スプレードライヤー	電力使用	15.68
		燃料使用	178.86
	ベルトコンベア		2.96
	輸送		3.03
	高圧成型		21.12
	ベルトコンベア		5.05
	焼成	電力使用	29.98
		燃料使用	381.22
	搬送		1.69
	合計		677.86
D	採石		6.94
	破砕		0.51
	合計		7.45

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量
注 2：各工程の詳細は図 5.2.3（p.126）を参照

(2) ブロック製造時

1） 単結晶系

付表 B-5　ブロック製造時のプロセス別 CO_2 排出量（単結晶系）【工程 A・B】

工程	プロセス		入力[kg] 出力[kg]	算定法	排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		1000 1000	0.185×1×100×(1000/4000) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg]	4.63
	乾式製錬		7.7 3.95	0.95×3.95 [kgCO2/kg] [kg]	3.75
	アルミフレームはずし		985 785	0.579×2.2×0.5/0.8×985/216 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	3.63
	アルミ再生		200 182	0.29×200 [kgCO2/kg] [kg]	58.00
	破砕		785 785	0.021×785 [kgCO2/kg] [kg]	16.86
	乾式製錬	スラグ化	785 782	0.287×782 [kgCO2/kg] [kg]	224.55
		銅再生	785 1.85	0.95×1.85 [kgCO2/kg] [kg]	1.76
		銀再生	785 0.74	14.8×0.74 [kgCO2/kg] [kg]	10.92
	ジョークラッシャー		782 782	0.579×7.5×0.5/0.85×782/5000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	0.40
	合計				324.50
B	輸送		438 438	0.234×1×50×(438/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg] [-]	1.71
	調合機	調合機	4380 4380	0.579×5.9×0.75/0.8×4380/1600 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	21.8
		集塵機	4380 4380	0.579×3.7×0.7/0.8×4380/1600 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	1.33
	ベルトコンベア		4380 4380	0.579×26×0.82/0.85×4380/1600 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	6.34
	振動成型		4380 4380	0.579×14.3×0.8/0.85×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	39.76
	ベルトコンベア		4380 4380	0.579×14.3×0.8/0.8×4380/1600 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	6.34
	焼成	電力使用	4380 4380	0.579×11.9×0.77/0.85×4380/380 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	71.94
		燃料使用	4380 4380	3.00×33.51×4380/380 [kgCO2/kg] [kg/h] [kg] [kg/h]	1158.61
	合計				1298.59

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量

注 2：各工程の詳細は図 5.2.4（p.127）を参照

付表 B-6　ブロック製造時のプロセス別 CO_2 排出量（単結晶系）【工程 C・D】

工程	プロセス		入力[kg] 出力[kg]	算定法	排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		1000 1000	0.185×1×100×(1000/4000) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg]	4.63
	乾式製錬		7.7 3.95	0.95×3.95 [kgCO2/kg] [kg]	3.75
	アルミフレームはずし		985 785	0.579×2.2×0.5/0.8×985/216 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	3.63
	アルミ再生		200 182	0.29×200 [kgCO2/kg] [kg]	58.00
	圧縮破砕	破砕機	785 453.9	0.579×21×0.7/0.9×785/500 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	14.85
		集塵機	785 453.9	0.579×3.7×0.7/0.8×785/500 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	2.94
	乾式製錬	銅再生	346.6 1.85	0.95×1.85 [kgCO2/kg] [kg]	1.76
		銀再生	346.6 0.74	14.8×0.74 [kgCO2/kg] [kg]	10.92
	ベルトコンベア		453.9 453.9	0.579×0.4×0.8/0.7×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	0.42
	振動ふるい		453.9 238.5	0.579×1.5×0.8/0.8×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	1.36
	ベルトコンベア		238.5 238.5	0.579×0.4×0.8/0.7×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	0.42
	風力選別		238.5 223.1	0.579×0.75×0.8/0.8×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	0.68
	ボールミル		438 438	0.579×75×0.8/0.9×438/450 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	37.57
	輸送		15.4 15.4	0.234×1×50×(15.4/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg] [-]	0.059
	管理型埋立		15.4 -	0.038×15.4 [kgCO2/kg] [kg]	0.57
	輸送		438 438	0.234×1×50×(438/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg] [-]	1.71
	調合機	調合機	4380 4380	0.579×5.9×0.75/0.8×4380/1600 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	21.8
		集塵機	4380 4380	0.579×3.7×0.7/0.8×4380/1600 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	1.33
	ベルトコンベア		4380 4380	0.579×26×0.82/0.85×4380/1600 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	6.34
	振動成型		4380 4380	0.579×14.3×0.8/0.85×851.5/1200 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	39.76
	ベルトコンベア		4380 4380	0.579×14.3×0.8/0.8×4380/1600 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	6.34
	焼成	電力使用	4380 4380	0.579×11.9×0.77/0.85×4380/380 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	71.94
		燃料使用	4380 4380	3.00×33.51×4380/380 [kgCO2/kg] [kg/h] [kg] [kg/h]	1158.61
	合計				1440.10
D	採石		782 782	0.0069×782 [kgCO2/kg] [kg]	5.43
	破砕		782 782	0.579×7.5×0.5/0.85×782/5000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	0.40
	合計				5.83

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量

注 2：各工程の詳細は図 5.2.4（p.127）を参照

2） 多結晶系

付表 B-7　ブロック製造時のプロセス別 CO_2 排出量（多結晶系）

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		4.63
	乾式製錬		4.56
	アルミフレームはずし		3.62
	アルミ再生		47.13
	破砕		17.59
	乾式製錬	スラグ化	230.52
		銅再生	13.51
		銀再生	19.68
	ジョークラッシャー		0.41
	合計		341.64
B	輸送		1.46
	調合機		11.90
	ベルトコンベア		5.43
	振動成型		34.04
	ベルトコンベア		5.43
	焼成	電力使用	61.59
		燃料使用	991.96
	合計		1111.81

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		4.63
	乾式製錬		4.56
	アルミフレームはずし		3.62
	アルミ再生		47.13
	圧縮破砕		18.54
	乾式製錬	銅再生	13.51
		銀再生	19.68
	ベルトコンベア		0.43
	振動ふるい		1.42
	ベルトコンベア		0.43
	風力選別		0.71
	ボールミル		32.17
	輸送		0.02
	管理型埋立		0.24
	輸送		1.46
	調合機		11.90
	ベルトコンベア		5.43
	振動成型		34.04
	ベルトコンベア		5.43
	焼成	電力使用	61.59
		燃料使用	991.96
	合計		1258.91
D	採石		5.57
	破砕		0.41
	合計		5.98

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量
注 2：各工程の詳細は図 5.2.4（p.127）を参照

3） 薄膜系（アルミナ）

付表 B-8　ブロック製造時のプロセス別 CO_2 排出量（薄膜系（アルミナ））

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		4.63
	乾式製錬		8.03
	アルミフレームはずし		3.56
	アルミ再生		95.61
	破砕		13.69
	乾式製錬	スラグ化	180.36
		銅再生	7.99
		銀再生	6.70
	ジョークラッシャー		0.32
	合計		320.90
B	輸送		1.29
	調合機		10.46
	ベルトコンベア		4.77
	振動成型		29.93
	ベルトコンベア		4.77
	焼成	電力使用	54.15
		燃料使用	872.13
	合計		977.50

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		4.63
	乾式製錬		8.03
	アルミフレームはずし		3.56
	アルミ再生		95.61
	圧縮破砕		14.44
	乾式製錬	銅再生	7.99
		銀再生	6.70
	ベルトコンベア		0.34
	振動ふるい		1.11
	ベルトコンベア		0.34
	風力選別		0.55
	ボールミル		28.28
	輸送		0.26
	管理型埋立		2.50
	輸送		1.29
	調合機		10.46
	ベルトコンベア		4.77
	振動成型		29.93
	ベルトコンベア		4.77
	焼成	電力使用	54.15
		燃料使用	872.13
	合計		1151.85
D	採石		4.36
	破砕		0.32
	合計		4.68

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量
注 2：各工程の詳細は図 5.2.4（p.127）を参照

4） 薄膜系（ソーダ石灰）

付表 B-9　ブロック製造時のプロセス別 CO_2 排出量（薄膜系（ソーダ石灰））

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		4.63
	乾式製錬		8.03
	アルミフレームはずし		3.56
	アルミ再生		95.61
	破砕		13.69
	乾式製錬	スラグ化	182.44
		銅再生	1.36
		銀再生	2.66
	ジョークラッシャー		0.32
	合計		312. 31
B	輸送		1.29
	調合機		10.46
	ベルトコンベア		4.77
	振動成型		29.93
	ベルトコンベア		4.77
	焼成	電力使用	54.15
		燃料使用	872.13
	合計		977.50

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		4.63
	乾式製錬		8.03
	アルミフレームはずし		3.56
	アルミ再生		95.61
	圧縮破砕		14.44
	乾式製錬	銅再生	1.36
		銀再生	2.66
	ベルトコンベア		0.34
	振動ふるい		1.11
	ベルトコンベア		0.34
	風力選別		0.55
	ボールミル		28.28
	輸送		0.26
	管理型埋立		2.50
	輸送		1.29
	調合機		10.46
	ベルトコンベア		4.77
	振動成型		29.93
	ベルトコンベア		4.77
	焼成	電力使用	54.15
		燃料使用	872.13
	合計		1141.17
D	採石		4.41
	破砕		0.32
	合計		4.74

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量
注 2：各工程の詳細は図 5.2.4（p.127）を参照

5） CIGS 系

付表 B-10　ブロック製造時のプロセス別 CO_2 排出量（CIGS 系）

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		4.63
	乾式製錬		0.00
	アルミフレームはずし		0.00
	アルミ再生		0.00
	破砕		21.48
	乾式製錬	スラグ化	286.96
		銅再生	0.10
		銀再生	0.54
	ジョークラッシャー		0.51
	合計		314.21
B	輸送		1.56
	調合機		12.69
	ベルトコンベア		5.79
	振動成型		36.31
	ベルトコンベア		5.79
	焼成	電力使用	65.70
		燃料使用	1058.09
	合計		1185.93

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		4.63
	乾式製錬		0.00
	アルミフレームはずし		0.00
	アルミ再生		0.00
	圧縮破砕		22.66
	乾式製錬	銅再生	0.10
		銀再生	0.54
	ベルトコンベア		0.53
	振動ふるい		1.74
	ベルトコンベア		0.53
	風力選別		0.87
	ボールミル		28.28
	輸送		1.56
	湿式粉砕		1.30
	輸送		1.56
	調合機		12.69
	ベルトコンベア		5.79
	振動成型		36.31
	ベルトコンベア		5.79
	焼成	電力使用	65.70
		燃料使用	1058.09
	合計		1254.78
D	採石		6.94
	破砕		0.51
	合計		7.45

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量
注 2：各工程の詳細は図 5.2.4（p.127）を参照

(3) 防音パネル製造時

1） 単結晶系

付表 B-11　防音パネル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（単結晶系）【工程 A・B】

工程	プロセス		入力[kg] 出力[kg]	算定法	排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		1000 1000	0.185×1×100×(1000/4000) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg]	4.63
	乾式製錬		7.7 3.95	0.95×3.95 [kgCO2/kg] [kg]	3.75
	アルミフレームはずし		985 785	0.579×2.2×0.5/0.8×985/216 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	3.63
	アルミ再生		200 182	0.29×200 [kgCO2/kg] [kg]	58.00
	破砕		785 785	0.021×785 [kgCO2/kg] [kg]	16.86
	乾式製錬	スラグ化	785 782	0.287×782 [kgCO2/kg] [kg]	224.55
		銅再生	785 1.85	0.95×1.85 [kgCO2/kg] [kg]	1.76
		銀再生	785 0.74	14.8×0.74 [kgCO2/kg] [kg]	10.92
	ジョークラッシャー		782 782	0.579×7.5×0.5/0.85×782/5000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	0.40
	合計				324.50
B	輸送		438 438	0.234×1×50×(438/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg] [-]	1.71
	スプレードライヤー	電力使用	438 438	0.579×(37/0.9+5.5/0.85+7.5/0.85) ×0.8×438/2000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [kw] [-] [kw] [-] [-] [kg] [kg/h]	5.72
		燃料使用	438 438	3.0×13×438/2000 [kgCO2/L] [L/h] [kg] [kg/h]	8.54
	混合(だるまミキサー)		438 465.95	0.579×0.4×0.8/0.7×465.95/80 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	1.54
	施設内移動		465.95 465.95	2.58×2.0×0.5 [kgCO2/L] [L/h] [h]	2.58
	離型剤塗布		465.95 465.95	0.579×5.5×0.8/0.8×465.95/148 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	10.03
	焼成		465.95 461.3	0.579×3.7×0.8/0.8×465.95/148 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	6.74
	寸法出し(ハンドソー)		461.3 461.3	0.579×2.2×0.7/0.75×465.95/148 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	10.38
	厚み出し(ベルトサンダー)		461.3 461.3	0.579×2.2×0.7/0.75×465.95/148 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	10.38
	エアーブロー		461.3 461.3	0.579×15×0.8/0.85×461.3/148 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	25.48
	合計				83.11

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量

注 2：各工程の詳細は図 5.2.5（p.128）を参照

付表 B-12　防音パネル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（単結晶系）【工程 C・D】

工程	プロセス		入力[kg] 出力[kg]	算定法	排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		1000 1000	0.185×1×100×(1000/4000) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg]	4.63
	乾式製錬		7.7 3.95	0.95×3.95 [kgCO2/kg] [kg]	3.75
	アルミフレームはずし		985 785	0.579×2.2×0.5/0.8×985/216 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	3.63
	アルミ再生		200 182	0.29×200 [kgCO2/kg] [kg]	58.00
	圧縮破砕	破砕機	785 453.9	0.579×21×0.7/0.9×785/500 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	14.85
		集塵機	785 453.9	0.579×3.7×0.7/0.8×785/500 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	2.94
	乾式製錬	銅再生	346.6 1.85	0.95×1.85 [kgCO2/kg] [kg]	1.76
		銀再生	346.6 0.74	14.8×0.74 [kgCO2/kg] [kg]	10.92
	ベルトコンベア		453.9 453.9	0.579×0.4×0.8/0.7×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	0.42
	振動ふるい		453.9 238.5	0.579×1.5×0.8/0.8×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	1.36
	ベルトコンベア		238.5 238.5	0.579×0.4×0.8/0.7×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	0.42
	風力選別		238.5 223.1	0.579×0.75×0.8/0.8×1.57 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [h]	0.68
	ボールミル		438 438	0.579×75×0.8/0.9×438/450 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	37.57
	輸送		15.4 15.4	0.234×1×50×(15.4/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg] [-]	0.059
	管理型埋立		15.4 -	0.038×15.4 [kgCO2/kg] [kg]	0.57
	輸送		438 438	0.234×1×50×(438/4000×0.75) [kgCO2/tkm] [t] [km] [kg] [kg] [-]	1.71
	スプレー ドライヤー	電力使用	438 438	0.579×(37/0.9+5.5/0.85+7.5/0.85) ×0.8×438/2000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [kw] [-] [kw] [-] [-] [kg] [kg/h]	5.72
		燃料使用	438 438	3.0×13×438/2000 [kgCO2/L] [L/h] [kg] [kg/h]	8.54
	混合（だるまミキサー）		438 465.95	0.579×0.4×0.8/0.7×465.95/80 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	1.54
	施設内移動		465.95 465.95	2.58×2.0×0.5 [kgCO2/L] [L/h] [h]	2.58
	離型剤塗布		465.95 465.95	0.579×5.5×0.8/0.8×465.95/148 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	10.03
	焼成		465.95 461.3	0.579×3.7×0.8/0.8×465.95/148 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	6.74
	寸法出し（ハンドソー）		461.3 461.3	0.579×2.2×0.7/0.75×465.95/148 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	10.38
	厚み出し（ベルトサンダー）		461.3 461.3	0.579×2.2×0.7/0.75×465.95/148 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	10.38
	エアーブロー		461.3 461.3	0.579×15×0.8/0.85×461.3/148 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	25.48
	合計				224.65
D	採石		782 782	0.0069×782 [kgCO2/kg] [kg]	5.43
	破砕		782 782	0.579×7.5×0.5/0.85×782/5000 [kgCO2/kWh] [kW] [-] [-] [kg] [kg/h]	0.40
	合計				5.83

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量

注 2：各工程の詳細は図 5.2.5（p.128）を参照

2） 多結晶系

付表 B-13　防音パネル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（多結晶系）

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		4.63
	乾式製錬		4.56
	アルミフレームはずし		3.62
	アルミ再生		47.13
	破砕		17.59
	乾式製錬	スラグ化	230.52
		銅再生	13.51
		銀再生	19.68
	ジョークラッシャー		0.41
	合計		341.64
B	輸送		1.46
	スプレードライヤ	電力使用	4.90
		燃料使用	7.31
	混合（だるまミキサー）		1.32
	施設内移動		2.58
	離型剤塗布		8.58
	振動成型		5.77
	寸法出し（ハンドソー）		8.89
	厚み出し（ベルトサンダー）		8.89
	エアーブロー		21.81
	合計		71.51

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		4.63
	乾式製錬		4.56
	アルミフレームはずし		3.62
	アルミ再生		47.13
	圧縮破砕		18.54
	乾式製錬	銅再生	13.51
		銀再生	19.68
	ベルトコンベア		0.43
	振動ふるい		1.42
	ベルトコンベア		0.43
	風力選別		0.71
	ボールミル		32.17
	輸送		0.02
	管理型埋立		0.24
	輸送		1.46
	スプレードライヤー	電力使用	4.90
		燃料使用	7.31
	混合（だるまミキサー）		1.32
	施設内移動		2.58
	離型剤移動		8.58
	焼成		5.77
	寸法出し（ハンドソー）		8.89
	厚み出し（ベルトサンダー）		8.89
	エアーブロー		21.81
	合計		218.62
D	採石		5.57
	破砕		0.41
	合計		5.98

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量
注 2：各工程の詳細は図 5.2.5（p.128）を参照

3） 薄膜系（アルミナ）

付表 B-14　防音パネル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（薄膜系（アルミナ））

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		4.63
	乾式製錬		8.03
	アルミフレームはずし		3.56
	アルミ再生		95.61
	破砕		13.69
	乾式製錬	スラグ化	180.36
		銅再生	7.99
		銀再生	6.70
	ジョークラッシャー		0.32
	合計		320.90
B	輸送		1.29
	スプレードライヤ	電力使用	4.31
		燃料使用	6.43
	混合（だるまミキサー）		1.16
	施設内移動		2.58
	離型剤塗布		7.55
	振動成型		5.08
	寸法出し（ハンドソー）		7.82
	厚み出し（ベルトサンダー）		7.82
	エアーブロー		19.18
	合計		63.20

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		4.63
	乾式製錬		8.03
	アルミフレームはずし		3.56
	アルミ再生		95.61
	圧縮破砕		14.44
	乾式製錬	銅再生	7.99
		銀再生	6.70
	ベルトコンベア		0.34
	振動ふるい		1.11
	ベルトコンベア		0.34
	風力選別		0.55
	ボールミル		28.28
	輸送		0.26
	管理型埋立		2.50
	輸送		1.29
	スプレードライヤー	電力使用	4.31
		燃料使用	6.43
	混合（だるまミキサー）		1.16
	施設内移動		2.58
	離型剤移動		7.55
	焼成		5.08
	寸法出し（ハンドソー）		7.82
	厚み出し（ベルトサンダー）		7.82
	エアーブロー		19.18
	合計		237.54
D	採石		4.36
	破砕		0.32
	合計		4.68

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量
注 2：各工程の詳細は図 5.2.5（p.128）を参照

4） 薄膜系（ソーダ石灰）

付表 B-15　防音パネル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（薄膜系（ソーダ石灰））

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		4.63
	乾式製錬		8.03
	アルミフレームはずし		3.56
	アルミ再生		95.61
	破砕		13.69
	乾式製錬	スラグ化	182.44
		銅再生	1.36
		銀再生	2.66
	ジョークラッシャー		0.32
	合計		312. 31
B	輸送		1.29
	スプレードライヤ	電力使用	4.31
		燃料使用	6.43
	混合（だるまミキサー）		1.16
	施設内移動		2.58
	離型剤塗布		7.55
	振動成型		5.08
	寸法出し（ハンドソー）		7.82
	厚み出し（ベルトサンダー）		7.82
	エアーブロー		19.18
	合計		63.20

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		4.63
	乾式製錬		8.03
	アルミフレームはずし		3.56
	アルミ再生		95.61
	圧縮破砕		14.44
	乾式製錬	銅再生	1.36
		銀再生	2.66
	ベルトコンベア		0.34
	振動ふるい		1.11
	ベルトコンベア		0.34
	風力選別		0.55
	ボールミル		28.28
	輸送		0.26
	管理型埋立		2.50
	輸送		1.29
	スプレードライヤー	電力使用	4.31
		燃料使用	6.43
	混合（だるまミキサー）		1.16
	施設内移動		2.58
	離型剤移動		7.55
	焼成		5.08
	寸法出し（ハンドソー）		7.82
	厚み出し（ベルトサンダー）		7.82
	エアーブロー		19.18
	合計		226.86
D	採石		4.41
	破砕		0.32
	合計		4.74

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量
注 2：各工程の詳細は図 5.2.5（p.128）を参照

5） CIGS 系

付表 B-16　防音パネル製造時のプロセス別 CO_2 排出量（CIGS 系）

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
A	輸送		4.63
	乾式製錬		0.00
	アルミフレームはずし		0.00
	アルミ再生		0.00
	破砕		21.48
	乾式製錬	スラグ化	286.96
		銅再生	0.10
		銀再生	0.54
	ジョークラッシャー		0.51
	合計		312.31
B	輸送		1.56
	スプレードライヤ	電力使用	5.23
		燃料使用	7.80
	混合（だるまミキサー）		1.41
	施設内移動		2.58
	離型剤塗布		9.16
	振動成型		6.16
	寸法出し（ハンドソー）		9.48
	厚み出し（ベルトサンダー）		9.48
	エアーブロー		23.27
	合計		76.12

工程	プロセス		排出量 [kgCO2/t´]
C	輸送		4.63
	乾式製錬		0.00
	アルミフレームはずし		0.00
	アルミ再生		0.00
	圧縮破砕		22.66
	乾式製錬	銅再生	0.10
		銀再生	0.54
	ベルトコンベア		0.53
	振動ふるい		1.74
	ベルトコンベア		0.53
	風力選別		0.87
	ボールミル		28.28
	輸送		1.56
	管理型埋立		1.30
	輸送		1.56
	スプレードライヤー	電力使用	5.23
		燃料使用	7.80
	混合（だるまミキサー）		1.41
	施設内移動		2.58
	離型剤移動		9.16
	焼成		6.16
	寸法出し（ハンドソー）		9.48
	厚み出し（ベルトサンダー）		9.48
	エアーブロー		23.27
	合計		144.97
D	採石		6.94
	破砕		0.51
	合計		7.45

注 1：PV パネル処理量 1 t 当たりの CO_2 排出量

注 2：各工程の詳細は図 5.2.5（p.128）を参照

付録C　本論文に関係する査読付論文リスト

[1] 鶴崎 敬大, 湯淺 和博, 中上 英俊: 長期発電実績に基づく住宅用太陽光発電システムの性能評価, エネルギー・資源, Vol.37, No.6, pp.1-9, 2016.5【第 3 章】

[2] 鶴崎 敬大, 湯淺 和博, 潮 梨紗, 中上 英俊: 戸建住宅における太陽光発電システムの導入者意識と発電実態, 日本建築学会環境系論文集, Vol.82, No.735, pp.463-470, 2017.5, DOI http://doi.org/10.3130/aije.82.463【第 4 章】

[3] 湯淺 和博, 鶴崎 敬大, 山崎 成: 使用済み太陽光発電パネルのガラス再資源化による環境負荷削減効果, 日本建築学会環境系論文集, Vol.82, No.741, 2017.11（掲載決定）【第 5 章】

謝　辞

社会人として勤務を続けながら博士課程に在籍し，博士論文を取りまとめるに至るまで，多くの皆様のご指導，ご支援ならびにご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

指導教員である湯淺和博准教授には，博士課程への入学をご相談させていただいて以来 4 年間にわたり，懇切丁寧にご指導を賜りました。私が日常の業務に追われ，研究が遅々として進まず，博士論文の構想が漠然とした状態が長く続いたなかでも，研究内容へのご助言やご提案に加えて，不慣れであった学術研究や査読付論文執筆の作法，研究室での共同研究の進め方，個別研究結果の博士論文への取りまとめ方など，細部まで大変丁寧にご指導いただきました。湯淺和博先生の忍耐強いお導き無しには決して博士論文を完成させることはできませんでした。

本学の安田幸一教授，中村芳樹教授，鍵直樹准教授，淺輪貴史准教授には，環境系研究室の合同ゼミや博士論文発表会において貴重なご意見を賜りました。矢田麻衣さん，藤原紀沙さん（当時，安田研），山崎成さん，潮梨紗さん，本間俊貴さんをはじめ，同時期に湯淺研で共同研究に取り組み，一緒に学んだ皆様にはゼミ，合同ゼミ，学会，論文発表会などで大変お世話になり，また，既往研究の収集・整理，アンケート調査の調査票作成・集計・分析，論文の英文翻訳などを手伝っていただきました。

勤務先である株式会社住環境計画研究所の中上英俊会長には，博士論文研究に利用したデータを得るための自主研究を長年にわたって認めていただいたうえ，博士号の取得を強く勧めていただき，また，研究が滞りがちな私を日々叱咤激励していただきました。住環境計画研究所の所員の皆様には，3 年間の在学中，業務をサポートしていただいたうえ，温かい励ましの言葉を繰り返しいただきました。

本論文の基礎となっている査読付論文の匿名査読者の皆様には，丁寧に論文を点検していただき，示唆に富むコメントを多数いただきました。

多くの太陽光発電システムユーザーの皆様，PV パネルのリサイクルに関係する事業者の皆様には，貴重なデータや情報をご提供いただきました。ユーザーの皆様との長年のコミュニケーションは，本研究の着想に大いに役立ちました。

最後に，勤務だけでも多忙な生活に，大学院生としての研究生活を上乗せしてしまった私をこれまで以上にサポートし励ましてくれた妻・美智子，応援してくれた子供たち，心配しながら労ってくれた両親に，深く感謝いたします。