HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	自律分散型スマートグリッドの理解を促すシリアスゲームの開発
Author(s)	谷口, 忠大; 中村, 仁美; 熊谷, 歩; 矢野, 史朗
Citation	科学技術コミュニケーション, 15, 37-56
Issue Date	2014-06
DOI	10.14943/66439
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/56439
Type	bulletin (article)
File Information	web_Costep15_37.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

論文

自律分散型スマートグリッドの理解を促すシリアスゲームの開発

Serious Game for the Decentralized Autonomous Smart Grid i-Rene

谷口 忠大[1]，中村 仁美[2]，熊谷 歩[1*]，矢野 史朗[1]

TANIGUCHI Tadahiro[1]，NAKAMURA Hitomi[2]，KUMAGAI Ayumi[1*]，YANO Shiro[1]

Abstract

In this paper, we proposed a novel serious game for decentralized autonomous electric power network called i-Rene（inter intelligent renewable energy network）. Renewable energy sources and micro energy-storages have been attracted in years past. We have proposed a concept which not only improves energy independence but also achieves an optimal allocation of renewables by introducing market mechanisms based on artificial learning multi-agent system. Although such decentralized network would play an important role to install further renewable energy, there is no similar system in this real world today. Many people are unfamiliar with such renewable energy network. It means that the many people are not ready to adopt such decentralized autonomous electric power network. This has been an invisible barrier to install the new electric power network. To solve this problem, we propose to use a serious game. We developed a hand-on game simulating i-Rene based on serious game concepts. We evaluate the performance of this platform through two experiments.

Keywords: smart grid, gamification, serious game, user experience, motivation

1. はじめに

太陽光発電や風力発電は集中発電するメリットが小さく，分散型の配置がより経済効率的であるという指摘がなされている（シェーア 2001）．再生可能エネルギー利用を促進するためには，集中発電を前提とした既存電力ネットワークから分散型の発電源や蓄電池ならびに電力融通機能を備えた自律分散型スマートグリッドへの移行が重要である．自律分散型スマートグリッドの普及には法改正や民間の投資活動が必要であるために，将来的には人々はその判断を迫られる可能性がある．しかし，自律分散型スマートグリッド内での生活を経験したことのない圧倒的多くの市民にとっては，その判断材料としての理解が不足している．次世代の電力網に対する選択肢を確保し，人々が

2014年3月15日受付　2014年5月12日受理
所　属：1 立命館大学
2 奈良先端科学技術大学院大学
*現在，三菱重工業株式会社勤務
連絡先：taniguchi@em.ci.ritsumei.ac.jp

自らが理解した情報にもとづいて社会システム導入の判断を行うためには多くの人々に自律分散型スマートグリッドの挙動を予め理解してもらうことが必要である．これは科学技術コミュニケーションの課題であるといえる．本研究では，人々の理解促進のための方策としてゲームの持つ力で人々の行動変容や対象理解を促すシリアスゲームに注目する．シリアスゲームを構築することで，実際に敷設したり，実証実験を行うこと無く，自律分散型スマートグリッドに対する理解促進を目指す．

本研究は自律分散型スマートグリッドの理解向上のためのアプローチとしてシリアスゲームの利用を提案した点において新規性があり，また，以下の貢献を含む．

1. 人を含んだ系に新たな社会インフラを導入する際のシリアスゲームに関する設計指針を示した点．
2. 自律分散型スマートグリッドの構造を保存したシリアスゲームを開発し，同ゲームがユーザのシステム理解を促す可能性を確認した点．

2節では研究背景および自律分散型スマートグリッドi-Rene について概説し，3節でゲーミフィケーションについて概説する．4節において開発したゲームについて説明する．5節においてユーザの理解促進効果について実験を通して示し，6節の実験においてはソーシャルゲームとして実装することの有効性を検証する．7節において本論文をまとめる．

2. 研究背景

2.1 再生可能エネルギーの特性と適合する分散型電力ネットワーク

数十年で石油が，二百年程度で石炭が枯渇に向かっているといわれる．この背景から，原理的に枯渇しない太陽光，風力といった再生可能エネルギーが注目されている．再生可能エネルギーを主とした持続可能社会実現のためには化石エネルギー利用を前提とした現在の集中型の電力ネットワークを見直し，再生可能エネルギー利用に適した分散型の電力ネットワークへと移行するべきであるといわれる（シェーア 2001）．また，途上国や離島などでは大型電力系統から切り離された地域において，分散電源と蓄電池による電力の自給自足が注目されている（Solangi et al. 2011）．太陽光発電や風力発電を主たる電源とした電力ネットワークを考えた場合，太陽光や風力の特性により電力ネットワークの運用や保守の面で幾つかの変更が必要となり，付随して，住民の生活にも変更が必要となる．その理由は火力発電や原子力発電と異なり太陽光発電や風力発電が以下の特性を持つからである．

1. 集中発電することによっても単位発電量あたりのコストがあまり下がらない，場合によっては増える．
2. 天候の変動により発電量がゆらぐ．
3. 供給量を人為的にコントロールしにくい．

上記1より送電ロスを考慮すると消費地点の近くで生産したほうが有利になり，相対的に分散型の電力ネットワークに経済合理性が生じる．しかし，2や3の特性は電力網の運用に必要な電力需要と供給における同時同量の原則を守るための障害となる．そのため，各世帯への蓄電池の配置や，電力ネットワークを通じた相互融通，需要弾力性の活用など，需要側での弾力的な適応が課題とな

る．需要弾力性とは価格の変化に応じて，消費者の消費行動が変化する性質を指す．価格が高ければ買う量が少なくなり，安ければ多く買うという性質を消費者が全体として持っている場合には，人為的にコントロールしにくい供給量に対し，電力価格を変化させることで需要側で弾力的に適応することが出来る．

このような条件に対応する電力ネットワークとして，様々な自律分散型の電力ネットワークが提案されている．筆者らは自律分散型スマートグリッドInter Intelligent Renewable Energy Network（i-Rene）を提案してきた（谷口他 2009; 谷口 2013）．i-Rene は各世帯に備え付けられた太陽光，風力などの再生可能エネルギーに基づく発電を主な電源とする．i-Rene は，これらの分散電源から供給される電力を，各世帯が小型蓄電池と人工知能を用い，地域市場を介して変動価格で自律的に融通しあうことで成立する知的地域電力ネットワークである．類似の分散型の電力ネットワークはPowerMatcher などにおいても提案されている（Warmer et al. 2007）．電力ネットワークの形状としては異なるが，多くの電源や蓄電池といった資源それぞれがマルチエージェントシステムにおけるエージェントとしてみなされ，その間の調整・取引により分散的な電力配分がなされることが考えられている研究も多くある（Vogt et al. 2010; Vytelingum et al. 2010a,b）．

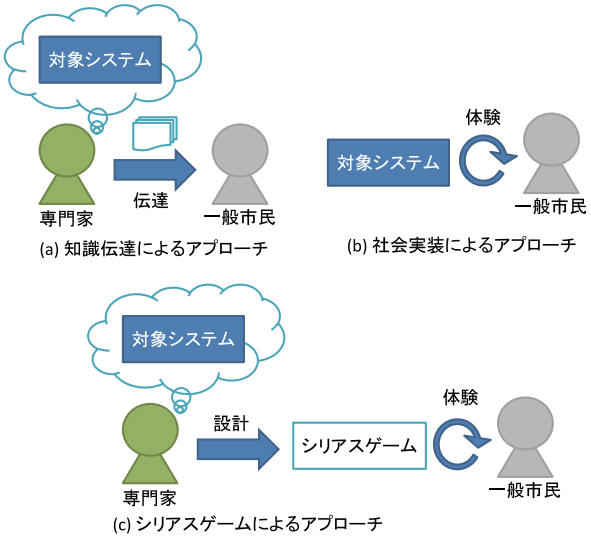

図1．社会システムの市民理解促進のためアプローチの分類

2.2 自律分散型スマートグリッドの理解促進という課題

特に日本においては，現状の電力ネットワークの多くは集中型であり，多くの人びとはこの現状しか認識していないために，現状システムから新たなシステムへの移行のためには高い心理的障壁がある．ゆえに住人が新たなシステムの論理的な説明をいくら受けても主観的な感覚として理解・納得できず，新たなシステムの受容に心理的抵抗を覚えてしまうという現状がある．事前ヒアリングでは具体的な心理的障壁を表す声として，「電力を蓄電しながら相互融通するということが，どういう『感じ』なのかよくわからない」「価格がむちゃくちゃな値段になったりしないのか不安である」「実際に導入したときにどのような『感じ』になるのかわからない」という意見がよく聞かれた．本稿で問題にする自律分散型スマートグリッドの理解促進とは，具体的には，太陽光発電のみで地域の電力を賄おうとした時にどのような問題が生じるか，変動価格がどのように消費行動に影響を

あたえるか，各世帯間の電力取引において生じる価格がどのように変化するのか，蓄電池の残量は消費行動や天候に応じてどのように変化するのか，といったような実際に自律分散型スマートグリッドが導入された場合の，生活者視点での理解の促進を指す．自律分散型スマートグリッドを社会に導入すべきかどうかを市民が判断するためには，その材料として自らの体験を伴った理解を持つことが重要である．このような市民にとって未知の科学技術に関する理解を促すことは科学技術コミュニケーションの課題の一つであると言えるだろう（北海道大学科学技術コミュニケーター養成ユニット 2007; 藤垣他 2008）．

図1に社会システムの理解促進のためアプローチの分類をイメージ図で示す．(a) 知識伝達によるアプローチは狭義のコミュニケーションによるアプローチだと言ってもいいだろう．論文や記事，動画，または専門家による語りを通して一般市民の理解を促そうとするアプローチがこれにあたる．しかし，このアプローチでは多くの場合，伝えられるのは形式知のみであり，上述の『感じ』に相当するような市民の体験をともなった暗黙知としての理解を導くことは困難である．このような対極として，(b) 社会実装によるアプローチ，がある．人々が自律分散型スマートグリッドを理解するためには，自律分散型スマートグリッドが敷設された地域に住むことが一番である．近年，社会実験や社会実装という形で，交通やエネルギーの分野では「実際にやってみる」という理解促進の活動がとられることもある．しかし，実際にそのような地域を構築することはコスト的にも法制度的にも困難である．自律分散型スマートグリッドを百世帯において実装しようとすると，一世帯あたり千万円としても十億円の予算が必要となる．それほどの予算をかけても，体験できるのは百世帯のみである．ゆえに，いかに自律分散型スマートグリッドが存在しない状況下で，住民の自律分散型スマートグリッドに対する体験を伴った理解を低コストで促進するかが重要な問題となる．また，対象となるユーザ数が増加してもコストは増加しないスケーラブルな手法が求められる．(c) シリアスゲームによるアプローチでは，一般市民がゲームとして体験できる仮想的な対象システムを構築することによって市民の社会システムの理解を促すことを目指す．シリアスゲームをWEB上のソーシャルゲームとして構築すれば，ユーザ数の増加に対してコストを大きく増加させることなく，擬似的であるとはいえ市民に対象システムを体験し，学んでもらう機会を作ることができる．本研究では大規模な社会実証実験を実施することなく，住人に自律分散型スマートグリッドの理解促進を行うためのシリアスゲームの活用を提案する．

2.3 自律分散型スマートグリッドi-Rene

自律分散型スマートグリッドi-Rene では，各世帯が蓄電池と再生可能エネルギー等の分散電源を設置し，自家発電によって自身の世帯の電力需要を基本的には賄い，また地域の余剰電力を地域電力市場を介した変動価格での市場取引により世帯相互で融通する．ただし，地域全体で電力が不足した場合には，外部の電力系統から電力の買い入れが可能であるとしている．一方で，外部系統への電力の売却は逆潮流問題を生じさせるために出来ないと仮定している（図2）．これにより地域の再生可能エネルギーによる電力自給率向上を目指している．

谷口らはi-Rene において線形関数提出型のオークションを提案し，各世帯の電力ルータに配置した自動化電力取引エージェントの学習則を導出し，その有効性をシミュレーション実験を通して示した（谷口 2013）．また，消費者の需要弾力性をモデルにとりこむことで，ボトムアップに形成された価格がリアルタイムプライシングとして機能し，消費者の電力消費が平準化されることを示した．リアルタイムプライシングとは電力価格を毎時刻変動させることで，消費者の電力消費行動を変化し制御する手法である．通常，電力が不足する状況で価格を高くし，余る状況で安くする．

自律分散型スマートグリッドi-Rene と現在日本で利用されている電力供給システムは大きく異

図2. 自律分散型スマートグリッドi-Reneの概略図

なっている．消費者目線では以下が挙げられる．

1. 天候により発電量が変わるため価格も変化する．
2. 蓄電池が存在するので変動価格下で電力の売買タイミングが重要になる．
3. 変動価格のためいつ電力を消費するかが重要になる．
4. 売買は自動的に行われる[1)]．
5. 他の消費者の消費動向がリアルタイムに価格に反映される．

これらは現状の日本の電力システムでは多くの消費者にとって馴染みの無いものであり，上記のような説明を受けると，未知であるがゆえに，多くの人々が不安感を感じたり，非現実的だと感じたりする傾向がある．しかし，このような類の地域電力ネットワークは，予測や制御の困難な再生可能エネルギーが大量導入されることによって，実現に向かうことが予想されている（Fang et al. 2012）．

3. シリアスゲーム

3.1 ゲーミフィケーションとシリアスゲーム

学習者が効率的に系の挙動を学習するためには，内発的動機づけを持つことが重要である．内発的動機付けは自律的な学習を促進することが広く知られている（デシ 1999）．内発的動機を高める仕組みとして，ゲーミフィケーションやシリアスゲームが注目されている（井上 2012）．ゲーミフィケーションとは，困難な課題であるにも関わらずプレイヤーを熱中させるようなゲームのノウハウを，ゲーム以外の領域における課題解決に用いることである．一方で，教育や学習，研究を促進するためにゲーム化された活動はシリアスゲームと呼ばれる．科学技術コミュニケーションの文脈においてシリアスゲームを活用する事例としてはクロスロード（矢守他 2005）がある．クロスロードはカードを利用したグループゲームであり，参加者は災害時の対応を自らの問題としてゲームを通じて学ぶことが出来る．

チクセントミハイはフローと呼ばれる集中状態が，チャレンジの度合いが高すぎず低すぎず処理できる程度のタスクに没頭しているときに起こり，個人的成長を導くものであるとしている（チクセントミハイ 2010）．マクゴニガルは，よいゲームには，明確な目標，素早いフィードバック，そして最適なチャレンジとスキルのバランスなどのゲームに没頭しやすい仕組みが存在すると指摘し

ており，これがフロー状態を生むと考えられている（McGonigal 2011）.

3.2 電力システムとゲーミフィケーション

再生可能エネルギーや電力消費行動に関するゲーミフィケーションやシリアスゲームに関する研究には以下の様な先行研究がある.

グノーク（Gnauk）らは，住人に社会的に望ましい消費行動を推奨するための方法として，ユーザに自身の次の日の電力使用計画を提出させ，地域全体での需要に応じてユーザに電力使用計画を交渉したり，消費行動に対するフィードバックを行う方法を考え，これに対してゲーミフィケーションを用いた（Gnauk et al., 2012）．電力使用計画の提出や交渉，消費行動のフィードバックはすべてユーザインタフェース（UI）上で行われた．また，ユーザの内発的動機を高めるために望ましい消費行動に対してポイントを与えた．評価実験では，ユーザはほとんどのタスクを直感的に行うことができ，UI について非常に高い評価を得られた．この研究では消費行動に応じたポイントを与えることで，ユーザの電力消費に対して影響を与えることが可能であると分かった.

リウ（Liu）らは，家庭内の省電力行動を促す目的でゲーミフィケーションを利用し，また利用しなかった場合における省電力行動の比較を行った（Liu et al. 2011）．ユーザは自身で電力消費の上限値を設定し，実際の消費行動は携帯電話で申告した．評価実験では，実験期間が短いためにゲーミフィケーションを利用した場合と利用していない場合に，差は見られなかったとしている.

また，フォスター（Foster）らもリウらと同様に，住民の省電力行動を促すことを目的としたゲームを開発した．ゲーム性を向上させる方法として，やはりユーザ間の競争を促すようなソーシャルネットワークという社会的要素を導入した（Foster et al. 2010）．ここで，社会的要素とは他のユーザの消費状況などが見えること，また，ランキング表示が見えることを意味する．この実験では社会的要素を取り入れることで，システムの参照回数が社会的要素を取り入れなかった場合の5倍になったと報告されている．この研究では，競争を促す社会的要素を取り入れることで，ユーザの電力消費行動に大きな影響を与えられることが分かった.

しかしながら，自律分散型スマートグリッドの理解を促すためにシリアスゲームを用いる研究は報告されていない.

3.3 シリアスゲームの設計指針

導入前の社会インフラをゲームで擬似体験することにより，学習者が系の理解を深めることを目的としたシリアスゲームの設計問題を考える．ゲーミフィケーションについては，バッジやランキングなど個別の要素についての設計指針は提案されている（Zichermann and Cunningham 2011）．しかし，人を含んだ系の新たな社会インフラをシリアスゲームにゲーム化する際の設計指針は広く知られていない．本節では本研究におけるシリアスゲームの設計指針について述べる.

シリアスゲームは現実の系のシミュレーションではなく，ゲーム的要素を盛り込む必要がある．ゲームの世界は現実そのものではないが，現実のモデル（比喩）として表現される必要がある．山梨はモデルの条件として系を構成する要素間の関係がモデルと現実の系の間でマッピングされる必要があるとしている（山梨 2007）．ゲームが現実の系の理解に繋がるためには，このような写像関係を成立させながら，ゲームデザインを行う必要がある．図3に写像関係の概念を示す．図中の左側の枠はモデル化される現実世界の領域（domain）を指し，A,B,C が現実世界の要素を表す．要素 A,B,C 間には現実世界内における関係性が存在しており，これを図中の矢印で表現する．右側の枠が現実世界のモデルとして現実世界の領域が写像された領域（codomain）としてのゲーム世界の領域を表し，α，β，γ はゲーム世界での要素を持つ．これらの間は対応 f^{+} と逆対応 f^{-} で結ばれる.

この対応 f^{+} は要素のみでなく，要素間の関係性も自然に対応させる．ゲームの世界に現実世界の全ての要素を表現することは不可能であるため，むしろ設計者が重要だと考える要素についてのみ選択的に取り入れることが必要となる．

上記の考え方に従ったシリアスゲームのデザイン手順を以下に示す．

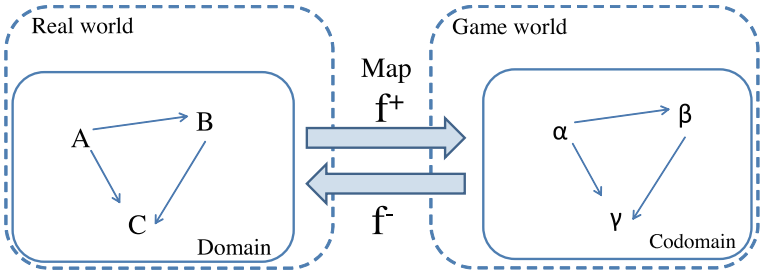

図3．シリアスゲーム世界と現実世界の諸要素の対応関係

1. 現実の系の中でシリアスゲームに含めるべき要素とその諸関係を列挙する．
2. ゲームの世界の中で，現実世界の要素に対応した要素を置き，ゲーム性に配慮しながら，ゲームデザインを行う．
3. ゲームの世界における諸要素の関係が現実世界の諸要素の関係との自然な対応関係が成立しているかを確認する．成立していれば完了．成立していなければ（2）に戻り再設計を行う．

上記の提案手順では（3）でモデルとして機能することを制約条件としながら，（2）でゲーム性を取り込むようにしている．より形式的表現としては，圏論（竹内 1978）やチャネル理論（川上 2005）の記述方式をとることも考えられるが，本稿では形式表現には深く踏み込まず，上記のような設計指針を提示するに留める．

4. 提案ゲーム：i-Rene ゲーム

本章では開発したシリアスゲームであるi-Rene ゲーム「カデモンアドベンチャー」について説明する．i-Rene ゲームの目的はユーザに自律分散型スマートグリッドの系についての自発的な学習を促進することである．特に，発電，消費，電力取引が行われる結果として，どのように蓄電残量が変化し，地域の電力価格が変化するかを，ユーザがゲームを通じて学習することを目的とする．先行研究（Gnauk et al. 2012; Foster et al. 2010）により，ユーザの自発的な学習を促すにはポイント性の導入や社会的要素を取り入れたゲームが効果的であるとが示唆されてきている．よってこれらの要素を取り入れた上で，学習すべき自律分散型スマートグリッドの本質を維持したゲームを開発する．

4.1 ゲームと現実の写像関係

現実の自律分散型スマートグリッドi-Rene における一世帯に着目した各要素間の関係を図4に示す．i-Rene では各世帯は太陽光発電装置と蓄電池を保有していることを仮定している．これを各世帯のユーザ中心の視点で描いたのが図4である．各世帯には太陽光発電装置と蓄電池が存在し毎時刻発電が行われ，余剰電力は蓄電される．現実世界では電力消費は主に家庭用電気機器（以降，家電）の利用によって行われる．これは，家電の使用によって「涼みたい」「部屋を綺麗にしたい」

といった欲望を解消する行為と考えられる．これは，電力の経済モデルでは各消費者の効用を増す行為である．太陽光発電も風力発電も天候に依存した発電源であるために，ユーザは自らの世帯の発電量，蓄電残量，地域電力市場での電力価格の変化を意識しながら自らの消費行動や売買行動を調整しなければならない．

i-Rene ゲームにおけるゲームの世界での一世帯に着目した各要素間の関係を図5に示す．ゲーム世界でもプレイヤーのキャラクター宅には太陽光発電装置と蓄電池が存在し毎時刻発電が行われ，余剰電力は蓄電される．i-Reneゲーム「カデモンアドベンチャー」ではゲーム性を高めるためにゲームの定番であるバトル要素を盛り込んでいる．本ゲームでは家電を「カデモン」（家電モンスター）という味方のキャラクターによって表現する．欲望は各時刻に現れてくる「ヨクボウ」と呼ばれる敵キャラクターによって表現する．迫り来るヨクボウをカデモンを使って撃退していくのが，このゲームの骨格である．ヨクボウの撃退によって得られる現実世界での効用は，ゲームの中の「ポイント」によって表現する．また，電力は「デンリョク」として表現され，各カデモンはこのデンリョクを消費することでヨクボウを倒すことができる．また，現実世界の金銭はゲーム内でも金銭として表現される．ゲームの世界でも現実世界のi-Rene と同様にこの金銭を用いて，他のプレイヤーのキャラクターと地域市場を介してデンリョク取引を行うことができる．

より多くポイントを得ることがプレイヤーの目的となる．ゲーム内で敵を倒すスケジュールはプレイヤーがゲームをしたいと考えているタイミング通りに行うことが可能であるが，実際に敵を倒すにはデンリョクが必要であり，なるべく安価な時間帯でデンリョクを購入し，また，高価な時間帯でデンリョクを販売しておく必要がある．ここにゲーム性が生まれる．

また要素間関係が3.3節の設計指針に従った設計になっているかについて設計指針（3）のチェックを行った．シリアスゲーム内に盛り込んだ現実世界の要素と，その写像先であるゲーム内の要素の対応関係を表1に示す．また，各要素間の対応関係を表2に示す．以上のように，本設計は設計指針を満たしているものになっており，現実のモデルとしての条件は満たしたシリアスゲームになっていることがわかる．

4.2 ゲームの実装

4.2.1 ソーシャルゲームの構築

前節に示したi-Rene ゲームをソーシャルネットワークfacebook 上のアプリとして開発した．アプリケーションの中心的なデータ処理を行うサーバ側はWEB サーバをApache 上にPHP を用いて開発し，プレイヤーの使うブラウザ側の描画やサーバとの通信を担うクライアント側はJavaScriptを中心に用いて開発した．WEB サービス開発のフレームワークとしてはCakePHPを用いた．

4.2.2 ヨクボウとの戦い

ゲーム内では，自身が所持しているカデモンを使用して敵ヨクボウを倒していく．この敵を倒すと，ポイントが得られる．図6に戦闘シーンにおいて使うカデモンと倒す敵を選択する画面を示す．カデモンを使って攻撃する際，カデモンにデンリョクを消費させる必要がある．デンリョクは地域市場内での売買で取引され，また太陽光発電によって自動的に補充される．デンリョクはその日の天気に応じて1時間ごとに自動的に補充される．欲望を象徴する敵ヨクボウはゲーム内で1時間経過すると1つ右に移動する．複数の敵がいた場合には同時に移動する（図6）．プレイヤーが右端の敵を倒していない場合は，右端の敵は自動でカデモンに倒される．自動で敵を倒しているときは戦うカデモンをランダムに決定しており，タイプについて考えた効率的な戦い方をしていない．カデモンと敵にはタイプが存在し，適したタイプのカデモンで敵を攻撃すると，より少ないデンリョク

で敵を倒すことができる．例えば，ゴミを表す敵に対して，掃除機を表すカデモンを選択すると効率的に倒せる．カデモンはゲーム内での1時間中に何度でも選択し敵を倒すことが出来る．よって，自動で敵を倒すよりもプレイヤー自身が敵を倒した方がより効率的な戦い方ができる．

表1．自律分散型スマートグリッドi-Rene とi-Rene ゲームに含まれる諸要素の対応関係

現実世界の要素	ゲーム内の要素
効用	ポイント
金銭	金銭
家庭内電気機器	カデモン
欲望	欲望を象徴する敵：ヨクボウ
電力	デンリョク

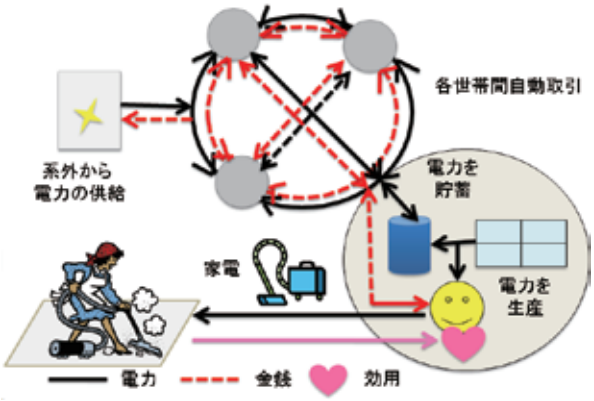

図4. 自律分散型スマートグリッドi-Rene における各要素の関係

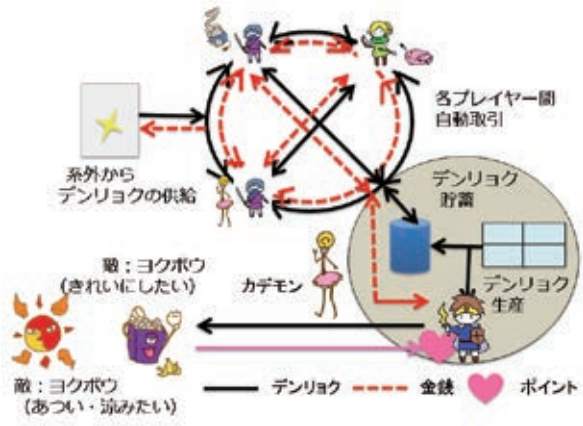

図5. i-Rene ゲームにおける各要素の関係

図6. i-Reneゲームにおける戦闘シーン

4.2.3 デンリョクの取引戦略

デンリョクが余っている場合はデンリョクを売って金銭を得ることができ，またデンリョクが足りない場合は金銭でデンリョクを買うこともできる．この売買方式は自律分散型スマートグリッドにおいて提案されているモデルをそのまま用いた．文献（谷口 2013）では個別需要供給関数を各時刻1パラメータで表現できる線形関数提出型のダブルオークションが提案されている．この手法における個別最大価格と呼ばれるパラメータp_t^iをプレイヤーに決定させることを，本ゲームにおけるプレイヤーのデンリョク取引戦略の決定法とする．iはプレイヤーID を表し，tは時刻を表す．基本的にこの値が大きければ大きいほど，電力価格が高くても蓄電池に多くの電力を充電しようとする．

プレイヤーは次の日に切り替わる前に図7に示すスライダーにより個別最大価格p_t^iを調整し，次の日のデンリョクの取引戦略を決定する．全プレイヤーがp_t^iを出すことで，自動的に市場価格が決まり，また，各プレイヤーが売買する電力の出荷量が決定する（詳細の式などは（谷口 2013）を参照）．

4.2.4 ソーシャル性

各プレイヤーは自らの状況のみならず，他のプレイヤーのポイントや状況をみることが出来，これにより競い合うことが出来る．図8にプレイヤーの情報をランキング形式で表示した状況の画面を示す[2)]．

5. 実験1：ゲーム性によるユーザの理解促進

5.1 実験目的

本実験は，開発したシリアスゲームにi-Rene に関する理解の促進効果があるか評価することを目的とする．また学習効果の評価に伴って，被験者がゲームに熱心に取り組んだかに関する分析を行う．これによって，ゲーミフィケーションが被験者のi-Rene 学習に対する内発的動機を高める手法として，適切であったかを検証する．

表2. i-Reneゲームに写像された自律分散型スマートグリッドi-Reneにおける要素間関係

現実での要素間関係	ゲーム世界での要素間関係
電力を用いて家電を動かす	デンリョクを使ってカデモンを動かす
太陽光発電装置が電力を生む	太陽光発電装置がデンリョクを生む
効用を最大化するという目標	ポイントを最大化するという目標
家電を動かすことで 欲望を解消するという関係	カデモンを使ってヨクボウを倒すという関係

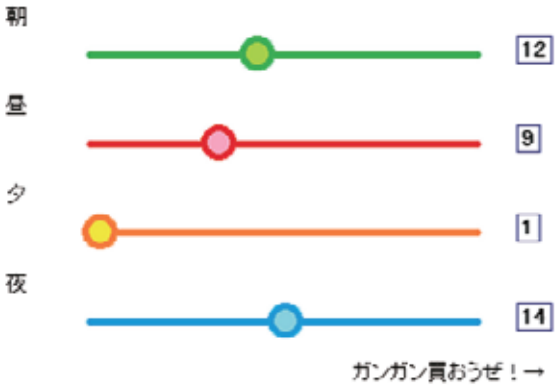

図7. 取引戦略のためのパラメータp_t^iの設定画面

図8. ゲーム画面における他のプレイヤーの順位表示

5.2 実験目的

本研究では，ゲーミフィケーションに基づき開発したi-Rene ゲームと，ゲーム性を削った体験型学習環境の2つを用い，それらの間でi-Rene の挙動についての学習効果に差があったか否かについてペーパーテストによって評価する．後者の学習環境を「ゲーム性なし」の実験条件と呼ぶことにする．また，どれだけ系を理解し積極的にプレイを行ったかを示す客観指標としてプレイヤーのゲーム内の獲得ポイントを評価する．また，主観的評価としてSUS 質問紙（Brooke 2010）を用いることでシステムの品質特性に関するユーザビリティの評価を行い，プレイヤーがどれだけ自然にi-Rene のシステムに触れることができているかを評価する．まとめると，(1) i-Rene の理解度を測

るためのペーパテストの得点，(2) 獲得ポイントの順位，(3) SUS による全体的な満足度評価の3点について回答を行わせ，この結果を用いて評価を行う．

5.3 実験条件

実験は14名の18歳から24歳までの男女14名に対して行った[3]．14名の内，7名はi-Rene ゲーム，残りの7名はゲーム性なしの体験型学習環境を利用し，それぞれ学習をさせた．ゲーム性なしの体験型学習環境については本節末尾にて述べる．双方ともにブラウザ上で動作するために，インターネット接続環境とPC があれば何時でもプレイ可能であり，実験期間中，被験者はfacebook を介して自由にゲームを行う．被験者の募集についてはこのような課題について参画してくれる者を大学生，大学院生を対象にオンライン，オフラインで募集して集めた[4]．

実験前に，被験者全員を一室に集め，以下の説明を与えた．

1. 実験期間や実験可能環境についての説明
2. i-Rene についての基本的な情報
3. 簡単な操作の手順についての指導
4. 獲得ポイントの最大化が目標であること

被験者に対しては，i-Rene の基本的な情報として，電力の地産地消を目的とした自律分散型スマートグリッドであること，i-Rene では各世帯が太陽光発電設備と蓄電池を持ち，太陽光発電で得た電力を用いて，世帯内で電力消費を行うこと，世帯間で電力売買を行えること，全世帯の電力が不足した場合のみ系外から電力が購入されること，電力価格は需給に応じて変動すること，を説明する．

操作手順については，それぞれのアプリケーション上の全てのページを表示し，ページ上の操作，提示される情報の種類についてした上で，プレイヤーが行う操作は，電力取引のためのパラメータ p_t^i の提出とカデモンで敵を倒すこと（ゲーム性あり），もしくは電力消費量の調整（ゲーム性なし）だと説明した．最後に，ゲームの目標が，獲得ポイントの最大化であることを告げた．最終日の実験終了後に，被験者はi-Rene の理解度を測るペーパーテスト（付録1に掲載）と，SUS ユーザビリティ評価に関するアンケート用紙に回答を行った．SUS はユーザビリティを測る簡易ツールとして一般的に用いられるものである[5]．

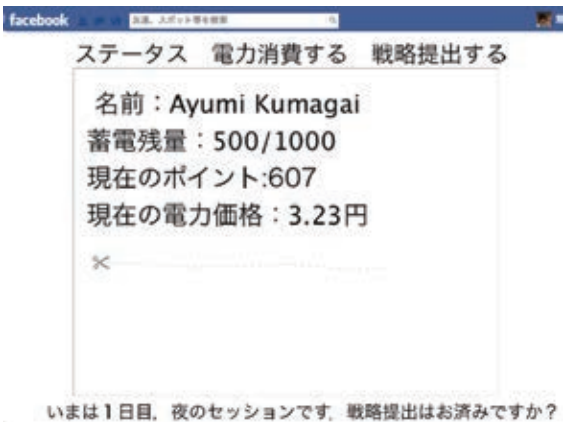

図9．ゲーム性なしのシミュレータのステータス画面

実験期間は，ゲーム内の1週間を実世界における2日間に短縮し実験を行った．ゲームにおける1日は朝昼夕夜の4つのステップに分割し，この各ステップをそれぞれ実世界における30分で進めることにより，ゲーム内での1日が実世界における2時間で進行する．実験期間中，被験者は1日目に4時間，2日目に10時間をゲームのプレー時間として，合計2日間の実験を行った．

対照群はゲーム性なしのi-Rene の挙動をシミュレートするだけの体験型学習環境を用いた．図9に，ゲーム性なしの体験型学習環境のステータス画面を示す．マクゴニガル（McGonigal 2011）はゲームの4つの特徴として，(1) ゴール，(2) ルール，(3) フィードバックシステム，(4) 自発的な参加，を挙げた．本条件では可能な限り実験群との実験条件を揃えながらゲーム性を削ぐためにカデモンとの戦いによるリアルタイムのフィードバックシステムを中心に削った．ゲーム性なし条件においても，ポイントの最大化やゴールや電力取引や電力量の変化の仕方などのルールは保存されており，ゲーム性が完全に無くなったわけではないことには注意する必要がある．また，ゲーム性なしの体験型学習環境における戦略提出用ユーザインタフェースについては，i-Rene ゲームと同一のものを使用した．ゲーム性なしの体験型学習環境においても，i-Rene ゲームと同様，プレイヤーが1日前の価格推移を見ながら各時間帯の電力売買のパラメータp_t^iの値を日々決定することで，各時間帯の電力売買量が決定される．また，プレイヤーは蓄電残量を上限として，電力消費を行うボタンをクリックすることによって，電力消費を行い，効用を表すポイントを得ることが出来る．

5.4 実験結果

以下では前節で説明した実験の結果を述べる．結果の具体的数値については表3にまとめた．まず，プレイヤーのi-Rene の系理解の促進度合いを表すペーパーテストの結果について示す．ペーパテストの結果，それぞれのグループの得点平均と分散は図10となった．このペーパーテストの結果を用いて，ゲーム性の有無によって得点に差が生じるか否かをフィッシャー正確確率検定を用いて検定を行った．その結果，ゲーミフィケーションによって拡張された体験型学習環境としてのi-Rene ゲームとゲーム性なしの体験型学習環境で学習したプレイヤーの間には，ペーパーテストの得点に5%を有意水準として有意差は見られず，有意傾向のみ認められた（$p = 0.06 < 0.1$）．次に，どれだけ被験者が真剣に取り組んで高い成果をあげたかを検討するため，全被験者の獲得ポイント数と順位を測定した結果を示す．それぞれのグループの順位平均と標準偏差は図11となった．Kolmogorov-Smirnov 検定により正規性が棄却されたためMann-Whitney 検定を行い，平均ランクに有意な差があることが支持された（$p = 0.04 < 0.05$）．また，それぞれのグループの平均獲得ポイントはi-Rene ゲームを用いた被験者が905点，ゲーム性なしの体験型学習環境を用いた被験者が703点であった．

SUS質問紙によって得た結果を図12に示す．このデータについても，Kolmogorov-Smirnov 検定を用いた結果，正規性が棄却された．そこで，平均ランクに差があるという帰無仮説の検定を行うためにMann-Whitney 検定を行ったところ，有意な差が見られた（$p = 0.2 \times 10^{-5} < 0.01$）．i-Rene ゲームはユーザビリティについて相対的に高い評価を得ていた．

これらの結果を表3にまとめる．以上よりゲーム性の存在がユーザビリティを高めるとともにプレイヤーのゲームへの積極的な参加と学習を促す可能性が認められた．

また，前述したように，対照群のゲーム性なし条件でも，完全にゲーム性が消されていた訳ではない．実験群と対照群の結果に有意差が見られなかったのは，ゲーム性なし条件における残存したゲーム性の効果が原因であるという可能性も存在する．

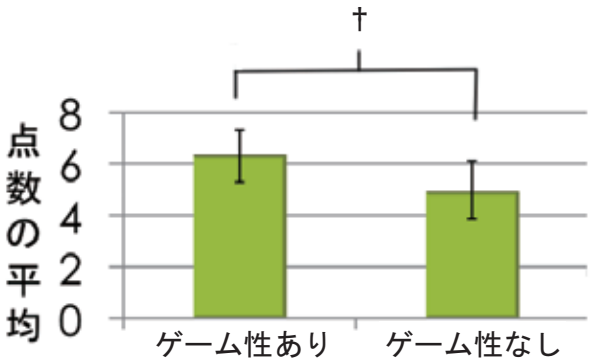

図10.　ペーパーテストの得点

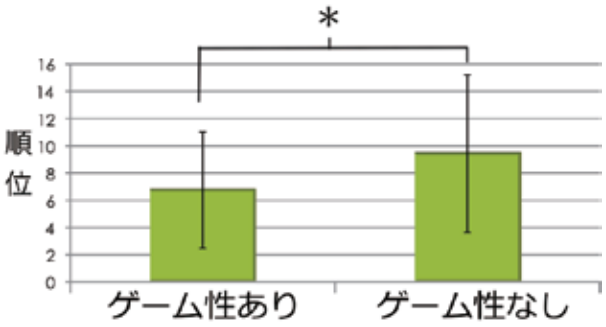

図11.　ゲームでの獲得ポイントの順位

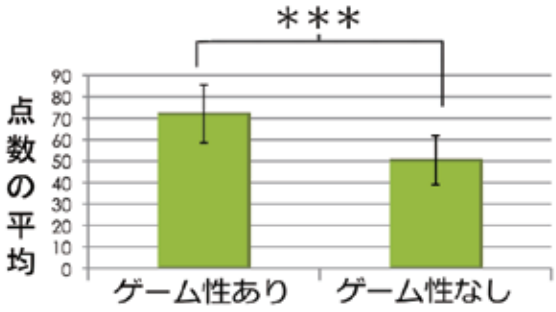

図12.　SUS ユーザビリティテストの得点

表3.　実験１：結果の数値一覧

	ゲーム性あり 平均値(標準偏差)	ゲーム性なし 平均値(標準偏差)
ペーパーテスト	6.29 (1.11)	4.86 (1.35)
ゲーム順位	7.4 (2.9)	9.1 (4.3)
SUS 質問紙	71.88 (14.44)	50.31 (12.21)

6. 実験2：社会的要素の影響

6.1 実験目的

前実験において，ゲーム性が学習を促進することが示唆され，ユーザビリティを高めることが確認された．次の実験として，ゲームに導入した社会的要素が，プレイヤーの内発的動機にどのように影響したかを分析する．ここでソーシャルゲームにおける社会的要素とは，他のプレイヤーのポイント獲得ランキングを通して他のプレイヤーの状況がわかることを指す．サイエンスコミュニケーションのツールとしてのシリアスゲームを単体のゲームとして提供するのではなく，ソーシャルゲームとして提供することの有効性を検証することを目的とする．これを主観的な事後アンケート結果と，客観的な指標であるログイン回数から検討する．実験1と実験2の違いを明確にするために二つの実験に関する対照表を表4に示す．

表4．実験内容の対照表

	実験1	実験2
目的	ゲーム性の有無による学習効果とユーザの参画行動への影響評価	社会的要素の有無によるユーザの動機付けへの影響評価
評価方法	ペーパーテスト 獲得ポイント SUSユーザビリティテスト	アンケート ログイン回数
対照条件	「ゲーム性なし」の体験型学習環境	他のプレイヤー情報を表示しないゲーム
被験者数	14 名	14 名

6.2 実験方法

実験は18歳から23歳の男女14名の被験者に対して行った[6]．7名の被験者に他プレイヤーの情報を表示しているゲームを利用させ，残りの7名は他プレイヤーの情報を一切表示していないゲームを利用させた．

実験前に被験者には実験1と同様に，ゲームの目的がポイントと保有金銭の最大化であること，などについて説明した．実験は1週間行い，ゲームを自由に利用してもらった．また実験終了後，被験者に対し各項目に対して5段階での事後アンケートを行った．アンケート内容について付録2に示す．

本実験ではプレイヤーに対するアンケート結果とゲームプレイログからログイン回数情報を用い，主観的評価と客観的評価を行った．

図13にそれぞれの被験者群における事後アンケートの結果を示す[7]．各項目について有意差は見られなかったが，平均値においては対抗意識と戦略の決めやすさについて社会的要素のある方が高い評価を得た．ランキング表示等を通じて他のプレイヤーの動向と自らの行動に対するフィードバックを豊富に得られるため対抗意識が高められたと考えられる．一方で，i-Rene ゲームが被験者にとっては不慣れなゲームであるために，特に取引戦略の決定に困難さがあったようであり，他のプレイヤーの戦略を観察できることが，戦略の決めやすさを増していたと考えられる．

本研究の目的からすれば，このような感性的影響を通じて，いかにゲームへの自律的で能動的な参画を増すことができるかどうかが重要である．能動性を計測することは一般に難しい課題であるが，それが反映されているであろう指標として，ログイン回数に注目した．図14にそれぞれのゲー

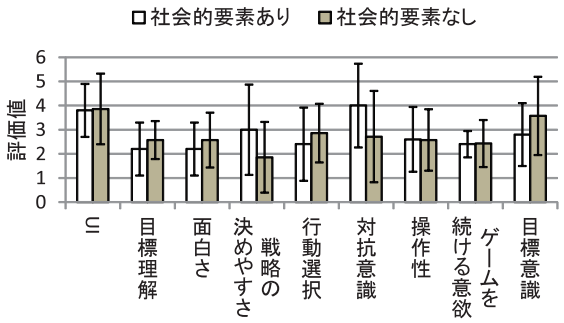

図13. アンケート結果

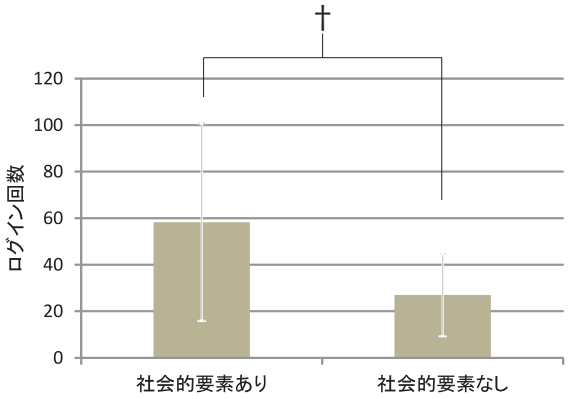

図14. ゲームのログイン回数

ムにおけるプレイヤーのログイン回数を示す．この結果に関して，帰無仮説を「両群のログイン回数に差がない」とし，t 検定を行った．結果は $p = 0.06 < 0.1$ となり有意水準5%では有意差は認められず，有意傾向のみ見られた．つまり，i-Rene ゲームに社会的要素を取り入れることで，ログイン回数がより多くなる傾向があったとのみ言える．これらの結果を表5にまとめる．

これらより社会的要素を加えることでフィードバックが増し，ゲームに取り組む内発的動機が高まったのではないかと考えられる．このような社会的要素を積極的に用いることが実験1で示唆された学習効果にもつながっているものと考察される．

表5. 実験２：結果の数値一覧

	UI	目標理解	面白さ	戦略の決めやすさ	行動選択	対抗意識
社会的要素あり（平均値）	3.80	3.80	3.80	3.00	3.60	4.00
社会的要素あり（標準偏差）	1.10	1.10	1.10	1.87	1.52	1.73
社会的要素なし（平均値）	3.86	3.43	3.43	1.86	3.14	2.71
社会的要素なし（標準偏差）	1.46	0.79	1.13	1.46	1.21	1.89

	操作性	ゲームを続ける意欲	目標意識	ログイン回数
社会的要素あり（平均値）	3.40	3.60	2.80	58.3
社会的要素あり（標準偏差）	1.34	0.55	1.30	42.4
社会的要素なし（平均値）	3.43	3.57	3.57	27.0
社会的要素なし（標準偏差）	1.27	0.98	1.62	17.8

7. まとめ

本研究では，まず，再生可能エネルギー普及のための重要な課題として新たな電力ネットワークに対するユーザの理解促進という課題を示した．その問題解決の手法としてシリアスゲームによるアプローチを提案した．

まず，シリアスゲームの設計指針を提案した上で，実際にi-Rene の構造を保ったまま，ゲーミフィケーションを取り入れたi-Rene ゲーム「カデモンアドベンチャー」を提案しソーシャルゲームとして開発した．また，被験者実験を通して，単純な体験型シミュレータではなく，ゲーム性を導入することの効果について検討した．

比較実験の結果，提案したシリアスゲームの方が，ゲーム性なしの体験型学習環境よりも被験者に対して高い学習効果を与えるという仮説に対しては，有意な結果は得られず，有意傾向のみが確認された．よって，本研究ではシリアスゲームがユーザのシステム理解を促す可能性が認められたとのみ言える．学習効果を計測するペーパーテストにおいては有意差は認められなかったが，ポイント獲得ランキングという客観的評価と，SUS による主観的評価の両方に有意な差がみられた．これはゲーム性により，内発的動機が向上し，また体験学習環境の利用しやすさが向上したことを示唆している．また，提案したシリアスゲームでは現実の系から諸要素を変更しているので，現実の系に関する誤った理解を進めてしまう危険性が考えられるが，ペーパーテストの得点差にも有意傾向にあったために，提案したシリアスゲームの設計指針は機能していたと考えられる．

また社会的要素を取り入れることによるユーザの学習意欲への影響を分析した．社会的要素を取り入れることで，ユーザ同士の対抗意識がより高くなる傾向，およびi-Rene ゲームに取り組む回数がより多くなる傾向が観察された．以上のことから，社会的要素を取り入れることでユーザはより積極的にゲームに取り組み，作業に没頭するなかで，学習を進められることが可能になると示唆

された.

本研究は分散型エネルギー社会の実現に向けてのコミュニケーション施策にシリアスゲームを用いた先駆的な取り組みであり，現時点では類似の研究は極めて少ない．本研究において，シリアスゲームを用いることの有効性は実験において示唆されたが，社会的波及効果を生むためには，このようなサービスをあらゆる人々が利用可能な形でリリースし，長期運用を行うことが必要である．より，デザイン性，可用性の高いシステムとして構築し，運用し，その社会的有効性を評価することが今後の課題である.

付録1

ペーパーテストでは，価格に応じて適切に振る舞いを変化させることができたかについて8問から構成されるテストを用いて評価を行った．ペーパーテストは以下の内容とした.

ペーパーテスト

1) 次の場面において，蓄電残量はどの様になっているかをA,B で答えなさい.
(選択肢)
(A) 蓄電残量少ない，(B) 蓄電残量は多い
【　　】晴れの日の昼
【　　】雨の日の夜
【　　】今日は街の中で，自分の世帯だけが1日遠くへ旅行に出かけていた.

2) 次の時，電力価格は今後どのように変化するかを以下の選択肢3つからそれぞれ選択し，A,B,C で答えなさい.
(選択肢)
(A) 低くなる，(B) 変わらない，(C) 高くなる
【　　】昼になって急に曇って来た.
【　　】今日は晴れの予報で，今は朝方だ.
【　　】夏が終わって秋が近づいて来た.
【　　】夜，雨がやんで星が見えた.
【　　】夕方になって急に曇って来た.

付録2

アンケートでは9つの項目について5段階で解答してもらった．左の選択肢によくあてはまる場合に1, 右の選択肢によく当てはまる場合に5の5段階評価で回答を得た.

1. ゲームのUI について
　わかりにくかった- わかりやすかった
2. ゲームの目標について
　理解している- 理解していない
3. ゲームの面白さについて
　面白かった- つまらなかった
4. 戦略の決めやすさについて
　決めにくかった- 決めやすかった

5. ゲーム内で何をすればよいか
　理解できた- 理解できなかった
6. 他のプレイヤーへの対抗心について
　特になかった- 負けたくないと思った
7. ゲームの操作性について
　操作しやすかった- 操作しづらかった
8. ゲームへの意欲について
　これからもやりたい- もうやりたくない
9. ゲームの目標を意識してプレイしていたか
　意識していなかった- 意識していた

(2)(3)(5)(7)(8) については，右の項目が負の評定になっているために，1から5の値を反転させ集計しグラフに示す．よって，集計後の各項目は値が大きいほど高い（良い）評価になっている．

注

1）蓄電池制御を行うスマートメータに備え付けられた人工知能が毎時刻，個別需要供給曲線を市場に提出することにより価格と売買量が決定される（谷口 2013; 谷口他 2009）．
2）画面右にランキング形式でプレイヤー名が表示されているが，個人情報保護のためにマスキングを行っている．
3）本システムの適用可能なターゲット層はソーシャルゲームユーザ層に限られる．そのため，このような被験者の年代の偏りは対象ユーザのコアユーザ層の想定として一定の妥当性を持つと考えられる．
4）これより本実験においては十分な被験者のランダム抽出が行えていない可能性がある．以降の結果についてはその前提の上で得られたものである点には注意すべきである．
5）SUS は評価対象のもつ特定の文脈に依存せず，信頼性があり，低コストで実施できることが売りの簡便な評価尺度である．SUS 質問紙は「このシステムを頻繁に使いたい」「私はこのシステムが不必要に複雑だと思った」などの10の質問によって構成される． 10の指標について5段階評価を行った後に100点満点に換算する．100点に近いほどよい評価で，0点に近いほど悪い評価となる．また，SUS についての詳細は文献（Brooke 2010）を参照されたい．
6）実験1と同じ被験者数であるが異なる被験者群である．
7）社会要素ありの被験者群2名についてはアンケート回収ができず5名となっている．社会要素なしの被験者群については7名の全数を回収できている．

●文献：

Brooke, J. 2010 : “SUS -A quick and dirty usability scale,” *Usability evaluation in industry*, 28, 71-83.
チクセントミハイ 2010 :『フロー体験入門: 楽しみと創造の心理学』世界思想社.
デシ他1999 :『人を伸ばす力: 内発と自律のすすめ』新曜社.
Fang, X., Misra, S., Xue, G. and Yang, D. 2012 : “Smart Grid-The New and Improved Power Grid: A Survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4), 944-980.
Foster, D., Lawson, S., Blythe, M. and Cairns, P. 2010 : “Wattsup? motivating reductions in domestic energy consumption using social networks,” *The 6th Nordic Conference on Human Computer Interaction: Extending Boundaries*, 178-187.
藤垣裕子・廣野喜幸2008 :『科学コミュニケーション論』東京大学出版会.
Gnauk, B., Dannecker, L. and Hahmann, M. 2012 : “Leveraging gamification in demand dispatch systems,” *The 2012 Joint EDBT/ICDT Workshops*, 103-110.

北海道大学科学技術コミュニケーター養成ユニット (CoSTEP) 2007 :『はじめよう！科学技術コミュニケーション』ナカニシヤ出版.

井上明人2012 :『ゲーミフィケーション:＜ゲーム＞がビジネスを変える』NHK 出版.

川上浩司2005 :「チャネル理論とそのシステム科学への応用」『システム/制御/情報: システム制御情報学会誌』49(2), 58-63.

Liu, Y., Alexandrova, T. and Nakajima, T. 2011 : "Gamifying intelligent environments," *The 2011 International ACM Workshop on Ubiquitous Meta User Interfaces*, 7-12.

McGonigal, J. 2011 : *Reality Is Broken: Why Games Make Us Better and How They Can Change the World*, Penguin Press HC.

シェーア2001 :『ソーラー地球経済』岩波書店.

Solangi, K.H., Islam, M.R., R. S. N. R. and Fayaz, H. 2011 : "A review on global solar energy policy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(15), 2149-2163.

竹内外史1978 :『層・圏・トポス: 現代的集合像を求めて』日本評論社.

谷口忠大・高木圭太・榊原一紀・西川郁子2009 :「地産地消型電力ネットワークの為のNatural Actor-Critic を用いた自動取引エージェントの構築」『知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会論文誌)』21(6), 1078-1091.

Taniguchi, T. and Yano, S. 2012 : "Decentralized Trading and Demand Side Response in Inter-Intelligent Renewable Energy Network," *The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems / The 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems* (*SCIS-ISIS 2012*) .

谷口忠大2013 :「自律分散型スマートグリッドおける適応的電力融通手法人工知能によるボトムアップな市場価格形成と電力需要応答の動態分析」『人工知能学会論文誌』28(1), 77-87.

Vogt, H., Weiss, H., Spiess, P. and Karduck, A. 2010 : "Market-based prosumer participation in the smart grid," *4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies* (*DEST*), 592-597.

Vytelingum, P., Ramchurn, S., Voice, T., Rogers, A. and Jennings, N. 2010a : "Trading agents for the smart electricity grid," *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, volume 1, 897-904.

Vytelingum, P., Voice, T., Ramchurn, S., Rogers, A. and Jennings, N. 2010b : "Agent-based micro-storage management for the smart grid," *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, volume 1, 39-46.

Warmer, C., Kamphuis, I., Kok, J. and Schaeffer, G. 2007 : "Distributed Control Concepts using Multi-Agent technology and Automatic Markets: An indispensable feature of smart power grids," *Power Engineering Society General Meeting*, 1-7.

山梨正明2007 :『比喩と理解 (コレクション認知科学)』東京大学出版会.

矢守克也・網代剛・吉川肇子2005 :『防災ゲームで学ぶリスク・コミュニケーション:クロスロードへの招待』ナカニシヤ出版.

Zichermann, G. and Cunningham, C. 2011 : *Gamication by Design: Implementing Game Mechanics in Web and Mobile Apps*, Oreilly & Associates Inc.