

エネルギー領域における 数理最適化プロジェクトの推進

～物語形式：“サムライ電力”の社内プロジェクトを題材に～



株式会社Jij
取締役ビジネス統括
中田 宙志

はじめに

本記事は、「企業における量子技術を活用した数理最適化プロジェクトのプロセス」について、普段事業開発やマーケティングなどのビジネス系の仕事に従事している方を読者の対象として想定している。プロセスのイメージを共有するために、架空の電力会社、サムライ電力を舞台とした物語を展開していく。

■ 本記事のポイント ■

▶対象者

- 日々の業務で、事業開発、営業、事業戦略、マーケティング、広報、ファイナンスなどに向き合うビジネス系の方
- 量子技術や数理最適化の初学者の方

▶説明する3つの内容

1. プロジェクトを推進する際の全体的な流れ
2. 基礎的な技術（数理最適化、量子アニーリングなど）
3. エネルギー領域における案件の事例（E&P領域、海上輸送・陸上輸送、石油・ガスの貯蓄、発電、送配電、コジェネレーション、都市マネジメント、エネルギーマネジメントなど）

まず、本記事のねらいの背景を共有させていただく。筆者は、理工系の大学で土木環境工学を専攻した後、小説家・山崎豊子氏の不毛地帯などに影響を受け、世界を股に掛ける人材になりたいと思い総合社に入社した。エネルギーインフラの事業開発部門に配属され、

メキシコ・ブラジル・豪州における風力発電、ガス焚き火力発電、LNG受入基地、ガス配給、産業用・家庭用のコジェネレーションに関連する事業開発に従事してきた、ビジネス系の間人である。そして現在、出身大学の縁で株式会社Jijという、ディープレック（特定の自然科学分野での研究を通じて得られた科学的な発見に基づく技術^{注1}）に属するスタートアップに籍を置き、大半のスタッフがエンジニア・研究開発者である会社にて、事業全般を担当している。

エネルギーインフラ領域で事業に日々向き合った後に、量子技術に関連する業界（“量子技術関連業界”と定義する）に身を置く今感じるのが、技術という「ソリューション側の視点」での情報が世に溢れており、日々活発に議論がなされているということだ。一方、どのような産業で、どのようなユースケースにおいて課題が解決されているかといった「事業者側の視点」での情報は必ずしも十分でないと感じる。産業発展を実現させるには、技術の発展のみならず、どのような社会課題を解決し、公益に資する産業を生み出すことができるかという「事業者の視点」が必要であると信じている。

したがって本記事では、「事業者側の視点」に立ち、ビジネス系の方を対象に、プロジェクト推進に当たる全体の流れについて説明している。なお、社会課題の大きいエネルギー領域にフォーカスした説明となっているが、他の業界の方にも参考になれば幸いである。

また、技術の基礎的な説明に触れるが、本記事ではより詳細な突っ込んだ説明を割愛している。普段から関連技術に馴染みのある方には物足りない可能性があるが、ご容赦いただきたい。

～サムライ電力によるプロジェクト推進～ ■エピソード0：物語の設定

株式会社サムライ電力は、「地域への電気の安定供給」をミッションに、発電、燃料調達、送配電、電気通信、街づくりなどに関わる事業を国内で展開する電力会社である。

2022年4月にグループの中期経営計画が発表された。脱炭素の潮流の加速化と社会のDXの加速化、再生エネルギーマーケットの変化、燃料費の増加といった環境変化を踏まえ、以下の3つが計画の柱となっている。

1. ゼロカーボン社会へのコミット
2. 筋肉質な経営体質への変貌
3. モノの提供からサービスの提供への転換

サムライ電力の社員である事業開発部の村上マネージャーを主人公として、以下の6名の人物が登場し、物語が展開されていく。

■ 物語の登場人物 ■

- 株式会社サムライ電力
 - 村上マネージャー、事業開発部
 - 山田マネージャー、システムエンジニア
 - 村田担当、入社3年目のシステムエンジニア
 - 大谷部長、管理職で山田マネージャーの上司
 - 栗山執行役員、大谷部長・山田マネージャー・村田担当の所属する部署を所管
- 株式会社Jij
 - 山城代表

■エピソード1：事業開発部の村上マネージャーと量子技術の出会い

村上マネージャーは2004年にサムライ電力に入社し、入社後はガス燃料の調達部門に配属された。日頃から新しい技術に興味があったため、社内異動制度に応募をし、希望が叶って2020年に事業開発部へ配属された。

事業開発部のミッションは、サムライ電力の中期経営計画を実現するための新しい技術の発掘と、企業連携の推進である。配属当初は機械学習に関連する技術と企業を発掘していた。

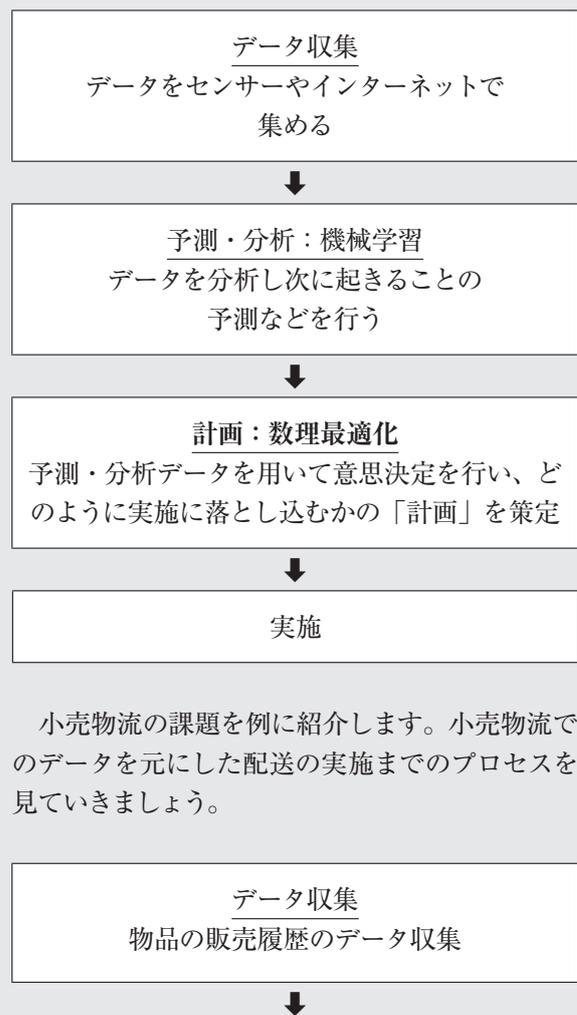
2023年1月、複数の新しい技術に関する展示会に参加したところ、量子技術と数理最適化に関するプレゼンテーションをしている企業を見かけた。株式会社

Jijという会社で、何やらこの企業は、量子技術を活用した数理最適化ソリューションで社会課題を解決しているとのことである。ガス燃料の調達部門に所属していた頃、発電の運転計画は最適化計算の手法が取り入れられていたため「数理最適化」という単語には一定の馴染みがあった。一方、量子技術が活用されているとは知らなかった。

Jijの山城代表がプレゼンテーションをしており、「数理最適化」について以下のような説明があった。

◇ Jij 山城代表のプレゼンテーション ～数理最適化とは？～

まずは数理最適化の大きな枠組みを紹介します。よく機械学習との違いを問われることが多いのですが、データを用いた課題解決の流れで、各技術がどのように使われるかを理解すると違いがわかりやすいです。



小売物流の課題を例に紹介します。小売物流でのデータを元にした配送の実施までのプロセスを見ていきましょう。

予測・分析：機械学習

データをもとに需要予測モデルを作成してどの地域の倉庫で明日どれだけの需要が発生するかを予測・分析



計画：数理最適化

予測データを元にコストが最も低く、いろいろな制約を満たすことができる配送計画（どれだけのトラックが必要で、各トラックにどのルートを任せるか）を数理最適化によって決定



実施

策定された配送計画を元に物資を各倉庫に運ぶ

このように機械学習と数理最適化は互いに協調する技術です。またこの「計画」がプロセスの後半にきていることに注目してください。数理最適化が活躍する「計画」はデータを集めてそのデータに関して分析する基盤が整ってこそ、より力を発揮します。近年DXという言葉とともにビジネスプロセスのデジタル化が進み始めていることにより、この「計画」のプロセスに数理最適化を使えるようになってきている現場が増え始めています。

■エピソード2：事業開発部の村上マネージャーによる市場調査

展示会に参加した村上マネージャーは、「数理最適化」に興味をもったため、インターネットで市場調査を開始した。すると、自身のかかっていた燃料調達分野のみならず、エネルギー分野で幅広く「数理最適化」が活用されていることがわかった。

◇ 村上マネージャー作成のレポート^{注2}

▶レポートサマリー

エネルギー分野での各領域における数理最適化の活用事例をまとめる。エネルギーバリューチェーンの上流のE&P領域、海上輸送・陸上輸送、石油・ガスの貯蓄、発電、送配電、コジェネレーション、都市マネジメント、エネルギーマネジメントま

で、いくつもの数理最適化問題が存在しており、既存のオペレーションで活用されている。

▶E&P領域：生産フェーズ

石油・ガス分野の調査・モニタリング、プロジェクト管理支援サービスを提供するイタリア Serintel社が提示する、E&P領域における最適化問題の事例^{注3}。

- 掘削孔周辺におけるウォーター・コーニング（高い圧力をもつ底水が、圧力の不均衡を補うために圧力の低い坑底に向かって隆起してくる状態^{注4}）のプロファイル管理、ダメージ除去
- 水圧破砕法（坑井内を満たした流体を高圧で加圧することで、坑井付近の貯留岩を人工的に破壊する技術^{注5}）の生産性指数の最大化
- 掘削孔周辺やパイプライン内の固形沈殿物の防止
- ケーシング（掘削の進行に伴って、掘られたまま地層が露出している坑井に内枠をつけること^{注6}）とセメントにおける損傷の予防と修復の管理
- 地表設備および流体処理能力の設計
- 生産システムのボトルネック解消

▶陸上輸送（パイプライン輸送）

- エネルギー領域の運営リスクを調査する米国 East Daley Capitalによる、オクラホマ州アナダルコ盆地でのガス収集・処理システムにおけるスループット（コンピュータやネットワークの一定時間内に処理される情報量、データ転送速度、通信速度^{注7}）の推定に関する数理モデルの構築^{注8}）
- プロセス制御のソフトウェア開発を行うドイツのPSI AGによる石油・ガスパイプライン上のポンプ場効率の改善^{注9}

▶海上輸送（LNG船）

- JOGMECによるLNG船経路最適化^{注10}
- 千代田化工によるLNG船のボイルオフガス再液化装置に関する経済的な運転条件の最適化設計^{注11}

▶LNG基地

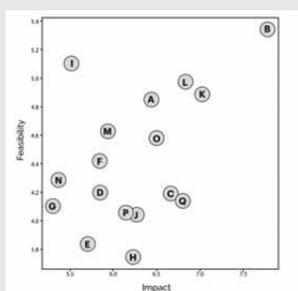
- 東京ガスによるLNG基地操業オペレーション最適化^{注12}
- 大阪ガスによる数理計画を用いたLNGタンクオペレーション策定モデル^{注13}

▶送配電

- 欧州最大の応用研究機関であるドイツ Fraunhoferによる、送電ネットワークを安定化させるための、パワーエレクトロニクスに内蔵される電力変換器で測定される電流・電圧・経時変化のパラメーターなどに関する制御モデルの構築^{注14}
- ドイツの送電網における直流・交流のパワーフロー計算と混雑管理を対象とした、効率的な運営とコストの最小化を実現するための最適化計算

▶発電

- 24時間の時間軸で予想される総電力需要を満たしつつ総コストを最小限に抑えるための、ジェネレーターの数・最大出力・メガワット当たりの生成コスト・起動コストなどを鑑みた数理モデルの構築^{注15}
- 複数の火力発電ユニットと水力発電ユニットにおける、総コストを最小限に抑えるための、異なるコスト構造と発電特性を考慮した数理モデルの構築^{注16}
- 東京電力フュエル&パワーによる、電力システム改革に対応した火力発電計画作成システムの最適化計算手法の開発^{注17}
- 四国電力による電力需給計画立案システムの運用^{注18}
- チリの電気のない地域における電力供給のケーススタディに基づく、再生可能エネルギーの分散型供給におけるエネルギーコストの最小化に関する数理モデルの構築^{注19}
- 米国量子経済開発コンソーシアムである QED-C^{注20}が発行した電力業界における量子技術の活用を記したホワイトペーパーに列挙されている事例^{注21}。電力業界における221種類のユースケースを抽出し、「実現性」と「インパクトの大きさ」の2軸評価で、最も影響力のあるトップ17種類のユースケースを選定している。



- A. リアルタイムでの状況把握
- B. エネルギー市場の最適化
- C. 竜巻・嵐発生後の配電システムの運用
- D. 効率的・効果的な貯蔵の稼働のモデリング
- E. 非線形交流回路の離散選択
- F. 予測と観測の整合性
- G. 需要モデリング
- H. 突発的な事象への対応準備
- I. エネルギー需要予測
- J. 輪番停電
- K. 新規の材料開発に対する量子シミュレーション
- L. 電力システムのグリッドレジリエンスの最適化
- M. 電力スポット市場
- N. 天気とネットワーク利用パターンの調整
- O. 統合計画と最適化
- P. 統合オペレーションと制御

▶コジェネレーション

- 東邦ガスとJijによる家庭用燃料電池発電計画の最適化^{注22}

▶都市マネジメント

- 豊田通商・マイクロソフト・Jijによる二酸化炭素の排出量削減を目的とした交通信号制御の最適化^{注23}

■エピソード3：プロジェクト立ち上げ前夜

山田マネージャーは、15年前に工学系の大学を卒業しサムライ電力に入社。5年前に、システムエンジニアとして送配電の実運用を行う部署に配属された。現在、送配電の運用計画における数理最適化の実務に日々取り組んでいる。

村上マネージャーは、同期入社の子山田マネージャーが実務で取り組んでいる数理最適化プロジェクトについてヒヤリングをした。その際に、展示会で出会った数理最適化に量子技術を活用している株式会社Jijのプレゼンテーションの内容を共有したところ、もう少し詳しい話を聞いてみようとなった。

村上マネージャーは早速株式会社Jijの山城代表に連絡をしたところ、近々オンラインセミナーが開催されるとのことだったので、翌月開催されたセミナーに参加した。セミナーにて、山城代表から量子技術の一つである量子アニーリングについて以下の説明があった。

◇ Jij 山城代表の説明

▶組み合わせ爆発

まずイメージを掴むために、動画「『フカシギの数え方』おねえさんといっしょ！ みんなで数えてみよう！」(日本未来科学館作成^{注24}) をご覧いただくことをおすすめします。

組み合わせ最適化とは、さまざまな組み合わせからある指標に従ってベストな組み合わせを探す最適化問題です。有名な問題としては、巡回路の距離を最小化する巡回セールスマン問題などがあります。他にも組み合わせ最適化問題は巷にあふれているのですが、多くの組み合わせ最適化問題は少し変数の数が増えるだけで、可能となる選択肢が膨大となり最適化を行うことが難しくなります。

▶量子アニーリングとは？

量子アニーリングは1998年に門脇・西森^{注25}によって提案された量子力学を使った最適化アルゴリズムです。

すべての組み合わせ最適化問題が指数爆発する選択肢すべてを探さないといけないわけではないのですが、多くの組み合わせ最適化問題はこの選択肢が指数的に増えるという状況を回避できません。

しかし、組み合わせ最適化問題を解く際に必ずしも厳密な最適解を得る必要はなく、比較的よい解を得るためのアプローチとしてヒューリスティクス(発見的解法)と呼ばれる手法を用いればよい場面も多いです。ヒューリスティクスは経験的にうまくいくアルゴリズムの総称です。

そのなかでもメタヒューリスティクスと呼ばれる多くの最適化問題で適応可能な汎用的なアルゴリズムが存在します。メタヒューリスティクスとして有名な方法は、進化のプロセスに着想を得た「遺伝的アルゴリズム」、一度行った解以外を探索するように工夫した「タブー探索」、温度によるゆらぎに着想をえた「シミュレーテッド・アニーリング(焼きなまし法)」、シンプルにいろんな場所からスタートして局所探索を行う「多スタート局所探索法」などがあります。このように組み合わせ最適化問題に対してのアプローチはさまざまな研究開発が行われており、既存のサービスでもすでに取り込まれていることが多いです。ここで紹介する量子アニーリングは量子力学を使った計算手法におけるメタヒューリスティクスのひとつであり、近年ハードウェアとしても実装が進み、実際に使える量子アルゴリズムとして注目を浴びています。

■エピソード4：プロジェクトの立ち上げ

量子技術を活用した数理最適化手法について興味を抱いた山田マネージャーは、まず最初の取り組みとして、デスクトップリサーチで関連する論文を収集することとした。論文収集を通じて、送配電の運用計画における総コストの最小化を目的に、量子技術を活用した数理最適化手法の技術方針に関する仮説を立てた。

上記仮説に基づき、上司である大谷部長へ相談し、プロジェクト化と部内予算の割り当てを提案した。

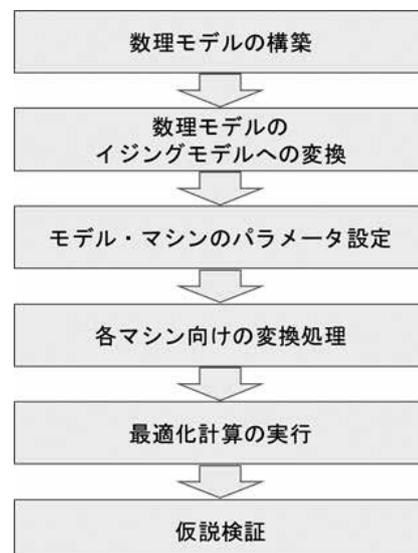
管理職の大谷部長は、新聞などを通じて量子技術の将来的な可能性を目にしており、事業開発部から情報共有もあったため、山田マネージャーから提案のあったプロジェクト化を了承した。山田マネージャーには、報告書作成に際しては、以下の切り口で検証するよう指示を出した。

- 既存手法に比べてどれだけ性能が向上したか
- 導入することでどれだけ費用対効果が得られるか
- 導入に際する運用コストと人的コスト(含む教育コスト)

■エピソード5：プロジェクトの実行

プロジェクト化と予算の割り当ての許可が出たため、山田マネージャーがプロジェクトマネージャーとなり検証を開始することとした。また、技術的アドバイスをJijに依頼することとした。なお、プロジェクト実施に際しては、入社3年目の村田担当がアサインされた。

山田マネージャーは山城代表から数理モデルのレクチャーを受けながら、以下の流れでプロジェクトを推進した。



◇ Jij 山城代表の説明

▶数理解モデルとアルゴリズム

数理最適化は、解きたい最適化問題をまず数式として定式化する必要があります。定式化した数式を数理解モデルとよびます。数理解モデルはその数学的な性質によって幾つかの種類に分類することができます（線形計画問題、整数計画問題など）。

量子アニーリングやイジング最適化という手法では、二次二値制約無し最適化問題（Quadratic Unconstrained Binary Optimization problem; QUBO）という数理解モデルを扱うことができます。量子アニーリングではQUBOという数理解モデルを扱うと認識しておいてもらえればと思います。

次にアルゴリズムですが、これは上記の各数理解モデルごとに適用できるアルゴリズムが異なります。またアルゴリズムといっても厳密な最適解を求める方法から、近似解を求める方法、ヒューリスティクス（発見的な手法）のようにどれくらいよい解が見つかるかはわからないが経験的にうまくいく方法などさまざまです。

しかしながら離散変数を含む最適化問題は、一般には厳密解を求めるにはそのデータのサイズに対して指数関数的に計算時間が必要になるため（これは通常のコンピュータではもちろん量子コンピュータを用いても）、厳密解を求めるのはなかなか難しいです。そのため離散変数を含む最適化問題には限られた時間である程度よい解を出すヒューリスティクスが用いられることが多く、量子アニーリングはヒューリスティクスに分類されます。

■エピソード6：入社3年目の村田担当の取り組み

村田担当は、情報工学系の修士課程を卒業し3年前にサムライ電力へ入社。入社後は社内オペレーション改善プロジェクトにアサインされており、Pythonなどの一定のコーディングスキルを有している。先月部署異動で山田マネージャーのチームに配属された。数理最適化の知見は有していない。

業務にキャッチアップするべく、山田マネージャーのレクチャーのもと、すでに存在する本プロジェクトに関する数理解モデルの目的関数、制約条件の特徴を理

解しつつ、プログラミング上での数理解モデル構築の業務を通じて知見を重ねていった。

また、量子技術を活用した数理最適化手法についても初めての取り組みだったため、山田マネージャーとともに手探りで情報収集しつつ、数理解モデルの構築と検証を行なった。

■エピソード7：社内の縦横連携

山田マネージャーは、検証結果を報告書にまとめて、上司である大谷部長へ報告した。

大谷部長は社内のスマートシティ実現プロジェクトのメンバーも兼任していた。そのため、送配電の運用計画のみならず、スマートシティにおける建物の分散電源の制御、EV車両のバッテリーインフラにおける制御、コジェネレーションシステムでも適用可能性があると考え始めた。

上記の個別プロジェクトの検証結果と、他領域への横断的な適用可能性を事業報告書にまとめて、栗山執行役員へ報告した。

栗山執行役員は、社内の経営戦略として、デジタルシフトと新規技術を活用した事業機会の創出が優先項目のひとつであるため、栗山執行役員が所管する事業ポートフォリオにおける、新規技術の適用可能性を模索していた。

大谷部長から提出された事業報告書を確認し、量子技術活用の可能性について理解した。サムライ電力が保有する事業ポートフォリオに対する、量子技術のさらなる活用機会を検討するべく、以下の切り口について検証することとした。

- a. 量子業界の技術・市場トレンドの把握
- b. 短期・中長期での事業採算性の検証

■終わりに

本記事では、ビジネス系の方を対象に、サムライ電力を題材に、プロジェクトの全体的な流れに重きを置いて説明した。一方で、実際のプロジェクトで肝となるのは、プロジェクトの実行の部分であり、数理解モデルの構築や実装、検証のサイクルが重要となってくる。これらの詳細な内容は、分量に制限があり割愛したが、プロジェクトの実行についてご質問などのある方は、お気軽にお問い合わせいただきたい。量子技術関連業界に、ビジネス系の業務に従事している方が一人でも多く増え、実社会でより一層活用される未来を願っている。

ご質問などのある方はLinkedInのメッセージまたはメールアドレスまでお気軽にお問い合わせください。

LinkedIn：

<https://www.linkedin.com/in/hiroshi-nakata-114545b9/>

メールアドレス：h.nakata@j-ij.com

LinkedInでは、国内外における量子・数理最適化&エネルギー領域に関する情報を日々発信しています。

(筆者略歴)

株式会社Jij 取締役ビジネス統括。東京工業大学工学部土木環境工学科卒業。2009年に三井物産株式会社に入社、エネルギーインフラプロジェクトの事業開発、プロジェクトファイナンス、M&A業務に従事。2015年より公益財団法人ラグビーワールドカップ2019組織委員会にて、経営企画部での経営戦略業務を経て人事企画部長として組織開発、採用、エンゲージメントなどの業務を推進。2020年に独立、複数のITプロダクトの開発業務の経験を経て現職。



- 注1：経済産業省 産業技術環境局「ディープテック・スタートアップ支援事業について」P 2 引用
- 注2：全体の構成はフィクションであるが、取り上げられている事例は実世界のものである
- 注3：<https://www.oil-gasportal.com/petroleum-production-optimization/>
- 注4・6：独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）石油・天然ガス資源情報 用語一覧参照
- 注5：独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）石油調査部 伊原 賢氏「水圧破碎技術の歴史とインパクト」引用
- 注7：NTT東日本 用語解説引用
- 注8：https://www.gurobi.com/case_studies/east-daley-using-mip-to-model-midstream-energy-assets/
- 注9：<https://www.nag-ij.co.jp/nagconsul/numerical-optimization/jirei-PSI.htm>
- 注10：<https://mirai.jogmec.go.jp/digital/column/01-04.html>
- 注11：https://www.chiyodacorp.com/media/LNGLPG_201401_2.pdf
- 注12：https://orsj.org/wp-content/corsj/or61-1/or61_1_30.pdf
- 注13：https://www.daigasgroup.com/rd/topic/1310130_53539.html
- 注14：<https://www.scs.fraunhofer.de/en/focus-projects/ada-center/mathematical-optimization.html>
- 注15：https://colab.research.google.com/github/Gurobi/modeling-examples/blob/master/electrical_power_generation_1_2/electrical_power_1_gcl.ipynb
- 注16：https://colab.research.google.com/github/Gurobi/modeling-examples/blob/master/electrical_power_generation_1_2/electrical_power2_gcl.ipynb
- 注17：<https://cir.nii.ac.jp/crid/1050574047123638272>
- 注18：https://www.yonden.co.jp/press/2022/_icsFiles/afieldfile/2022/06/23/pr004.pdf
- 注19：https://www.researchgate.net/publication/348013148_A_Mathematical_Model_for_the_Optimization_of_Renewable_Energy_Systems
- 注20：Quantum Economic Development Consortiumの略語
- 注21：<https://quantumconsortium.org/quenergy22/>
- 注22：<https://www.ipsj.or.jp/kenkyukai/event/qs2.html>
- 注23：<https://www.qmedia.jp/qio-azurequantum/>
- 注24：<https://www.youtube.com/watch?v=Q4gTV4r0zRs>
- 注25：Tadashi Kadowaki and Hidetoshi Nishimori, Phys. Rev. E 58, 5355, 1998.