

第3回量子ソフトウェア社会人講座

# 『量子コンピューティング技術の概要と 疑似量子アニーリングのユースケース』

日本電気株式会社

量子コンピューティング事業統括部

千嶋 博

# \Orchestrating a brighter world

NECは、安全・安心・公平・効率という社会価値を創造し、  
誰もが人間性を十分に発揮できる持続可能な社会の実現を目指します。

# 目次

1. 量子アニーリング技術の位置づけ
  2. ユースケース紹介
  3. NECが提供しているサービス
- Q&A

# 量子アニーリング技術の位置づけ

# 量子コンピューティング技術の分類

## 量子コンピューティング

(量子の振る舞いを取り入れたものを含む広義)

### 量子ゲート方式

従来コンピュータのビットを  
量子ビットに置き換え計算する手法

### アニーリング方式 等

イジングモデルを物理法則などを利用して解く  
組合せ最適化問題に特化した手法

量子(イオントラップ)

量子(超伝導)

量子(超伝導)

疑似量子(デジタル回路、NTTのみ光回路)

Quantum

IonQ

NEC

IBM

Google

D-Wave

NEC

NEC

日立

富士通

東芝

NTT

2040年の実用化を目指し研究開発中  
(MOONSHOTプログラム)

商用サービスを展開。  
NECと協業

NEDOの支援を受け、素子を開発中



2021年9月よりベクトルコンピュータベースのオンプレ提供開始。11月からサービス提供を開始



※NEC調べ(紙面の都合上、必ずしも全ての研究機関を網羅しているわけではありません)

# 量子アニーリングマシンへの期待

組合せが膨大で、これまでのコンピュータでは現実的な時間で解くことが難しかった「組合せ最適化問題」の求解に量子コンピュータが期待されています。

条件が多く組合せが膨大な  
シフトの作成

2024年問題

管理職が1人以上出勤

五連続勤務禁止

月1日以上  
計画休暇取得



## 代表的な問題

人員スケジューリング最適化

スキルや仕事のマッチング

配車スケジュール最適化

どのトラックが何をいつ運ぶか計画

配送ルート最適化

納期を満たし、時間/コストが最小となる配送計画

荷積み最適化

重量/大きさが異なる荷物を効率的に積込む

生産計画最適化

納期を満たし、作業/コスト効率が良い計画

金融ポートフォリオ

最適なポートフォリオの高速な解析

# 量子アニーリングの位置づけ: AIとの使い分け

どちらも、従来の計算手法ではデジタル化が難しかった領域をカバー

AI(機械学習)

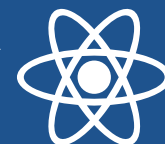


## 機序が複雑、不明な問題

大量の過去データが必要  
要素となる事象は説明できなくともよい

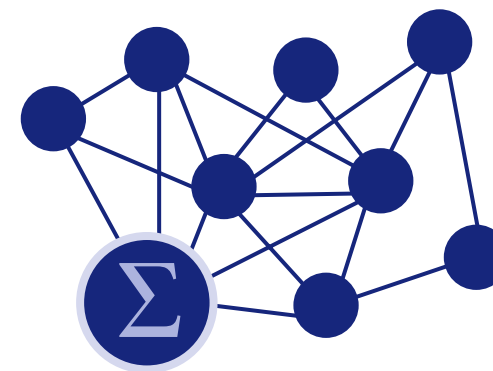


量子アニーリング



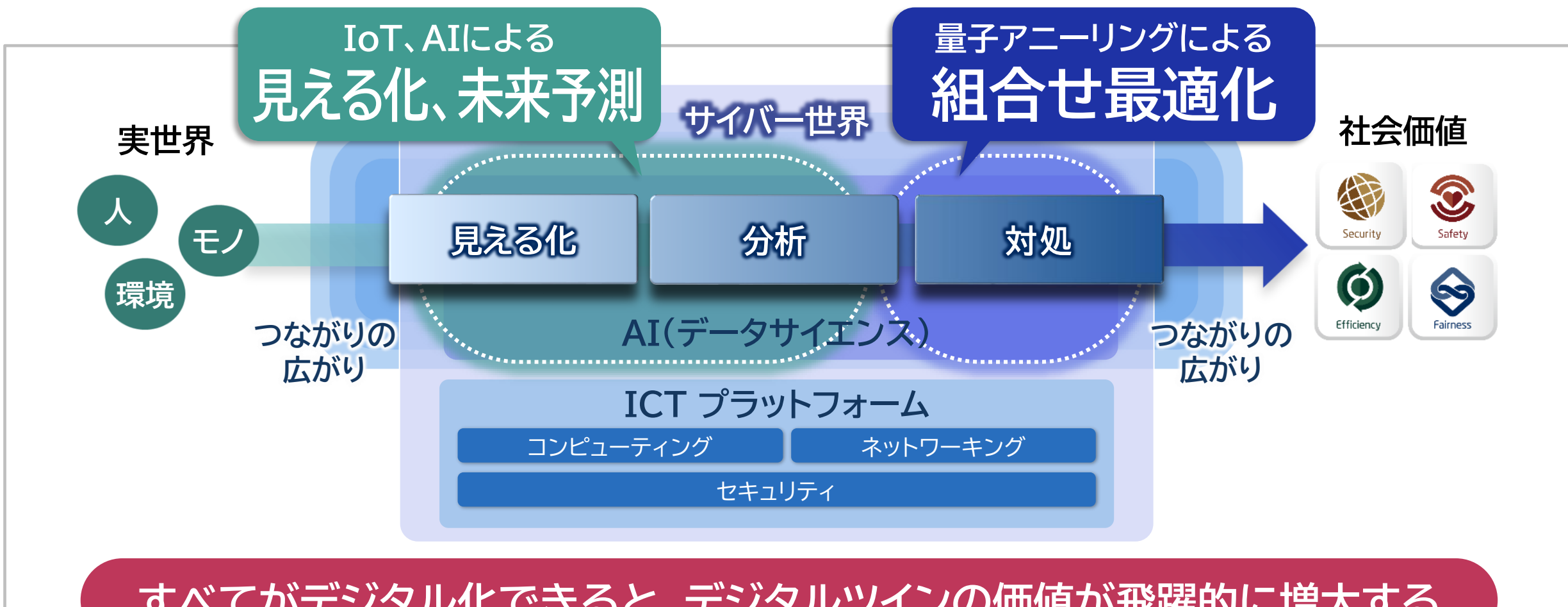
## 組み合わせ数が膨大な問題

過去データがなくともよい  
要素となる事象は説明できる



# 量子アニーリングの位置づけ: AIとの連携

AIが過去データから近い未来を予測。この予測からどのようにアクションするか、実行計画を作るところに現れる「組み合わせ最適化」問題を量子アニーリングが解く



すべてがデジタル化できると、デジタルツインの価値が飛躍的に増大する



# 実証検証にあたり顕在化する課題

AIや数理最適化技術など既存技術との使い分けが重要となります

## ◆ 多くの社会課題は複合的

### ■ 部分問題に切り分け



### ■ 切り分けた部分毎に最適なソルバを選択

- AI(機械学習) or 最適化ソルバ  
過去データの有無や要素の説明可否によって適材適所
- 数理最適化 or アニーリングマシン or その他のソルバ  
モデルを表す式のタイプによって適材適所



# 数理最適化ソルバとの使い分け(1/2)

## モデル化について

	数理最適化ソルバ	イジングマシン
次数	基本1次	基本2次※1
式の形	等式、不等式	等式（不等式は補助変数を用いるなどして対応）
決定変数	連続値、離散値	離散値（連続値は離散化して対応）
制約条件の扱い	制約条件を利用して解を絞り込む（制約条件式が多いと計算時間がかかる）	制約条件は目的項の一つとして取扱う（罰金法）※2

※1 次数については、一般に補助変数を用いた次数下げテクニックを用いて、高次の式に対応することが可能だが、イジングマシンの方が高次の問題に比較的強い。また、数理最適化ソルバでも凸型であれば2次式を効率的に扱うことができるものがある。

※2 イジングマシンによっては、制約条件を最適化プロセスで用いることで、求解効率を上げているものもある。

# 数理最適化ソルバとの使い分け(2/2)

解の性質、精度、品質、速度等について

	数理最適化ソルバ	イジングマシン
再現性	毎回同じ解が得られる	解くたびに異なる解が得られる。※3 式に含まれる重みパラメータを調整することで、解の傾向を調整することも可能
品質保証	解ける問題では厳密解が得られる	絶対的な解の品質保証はできない。 ただし、解の検算や比較は容易に実装可
解が無い場合	「解無し」になる。この場合、モデルを見直し、制約条件を緩めて次善の解を求めることが多い。	なるべく制約や目的を満たす次善の解を出力
最適化処理時間	問題の規模による。制約条件の数が大きくなると計算時間が長くなる。計算時間を指定して打ち切って途中の解を得ることは可能。	問題の規模による。制約条件の数には影響されにくい。計算時間を指定することができるものもある。

※3 イジングマシンの解の再現性について、どちらが好適かはアプリケーションによる。

# 量子コンピューティング適用領域の広がり

様々な共創パートナーとの取り組みから、実用が見込める領域が見えてきました。  
量子コンピューティングの活用が価値を生み出しています。

## 共創パートナーとの取り組み

SMBCグループ 様 / 日本総合研究所 様 / NECプラットフォームズ / NECフィールディング 他



### 広告/公共/インフラ

- マッチング/  
レコメンド
- 通信基地局制御
- 監視センサー制御



### 製造

- 生産計画
- 部品発注計画



### 交通/物流

- 乗務員シフト
- 配送計画
- 積荷配置



### 金融

- カード不正検知
- モンテカルロ・  
シミュレーション
- リスク計算  
データ補完

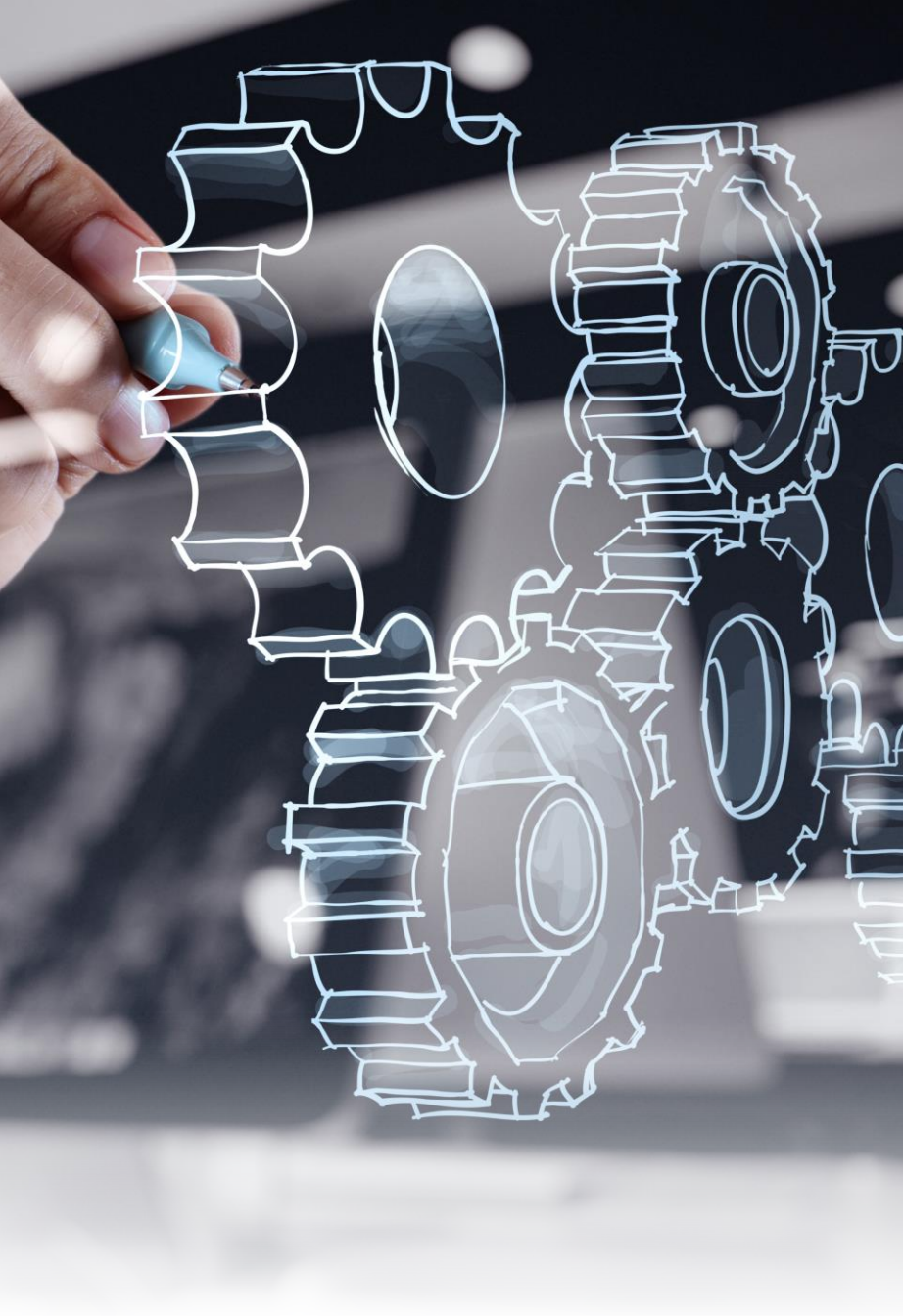


### 素材開発/創薬

- スクリーニング
- 実験パラメータ  
探索

※研究中、顧客実証～実用に至るものが含まれています

# 量子アニーリングを活用した最適化事例



# 製造現場の実用事例

NECプラットフォームズ  
2023年3月稼働  
生産計画立案システム事例

2023年1月20日 プレスリリース  
[https://jpn.nec.com/press/202301/20230120\\_02.html](https://jpn.nec.com/press/202301/20230120_02.html)



# NECプラットフォームズの事業分野・提供技術

ICT領域の幅広い技術力を活かし、皆様の仕事や暮らしを明るく元気にする  
製品・ソリューションを提供します



# 生産計画立案に関わる制約条件

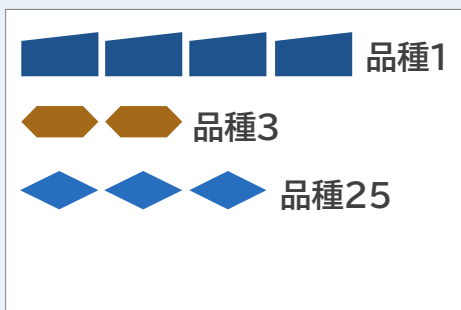
## SMTラインにおける最適化の課題

### 例: 締め切り日が異なる数百品種のオーダーに対して 当日の最適な生産計画(製造順)を立案

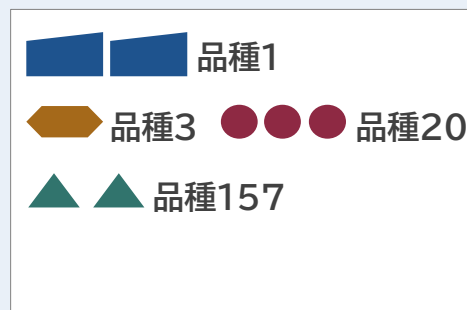
- 生産する品種が切り替わるたびに発生する「段取り時間」を最小化したい
- 品種はいくつかのグループに分類されており、  
同じグループの品種を連続的に生産すると効率が良い
- 当日締め切りのオーダーは必ず生産する

#### ■ オーダの例

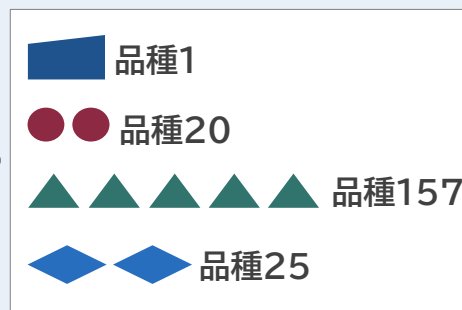
##### 当日締め切り



##### 翌日締め切り



##### n日後締め切り

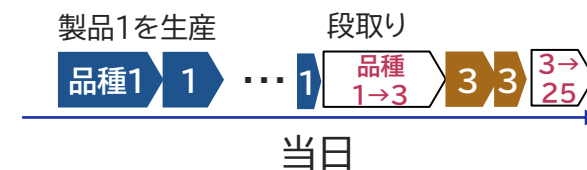


生産計画立案

#### ■ 極端な生産計画例

同一品種オーダーを作り続ける

✗ 品種25が締め切り遅れ



締め切り順に生産

✗ 段取り時間増え稼働低下



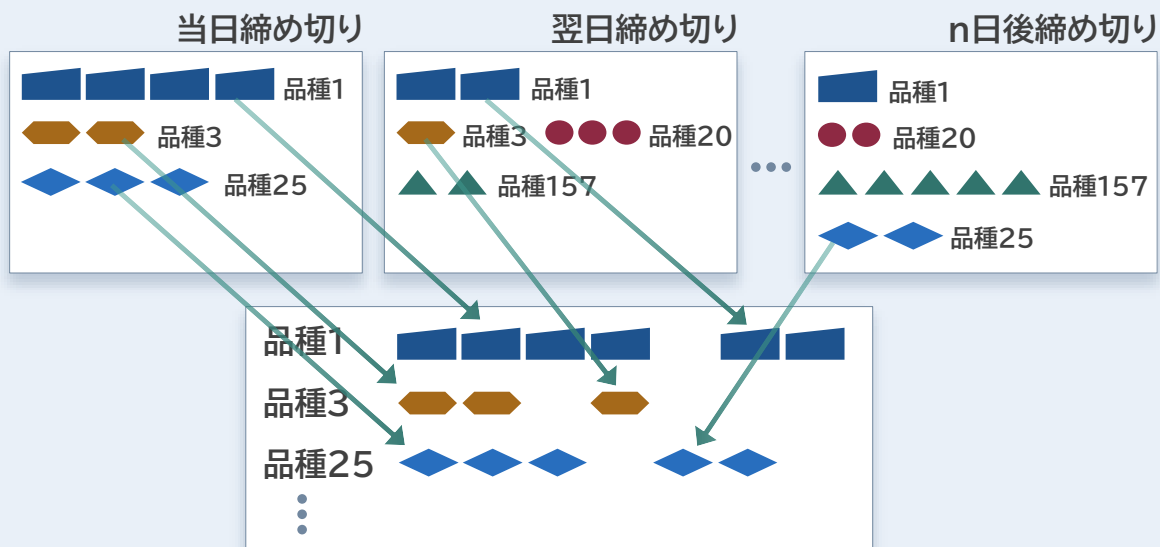


# 量子コンピューティングによる生産計画の最適化結果

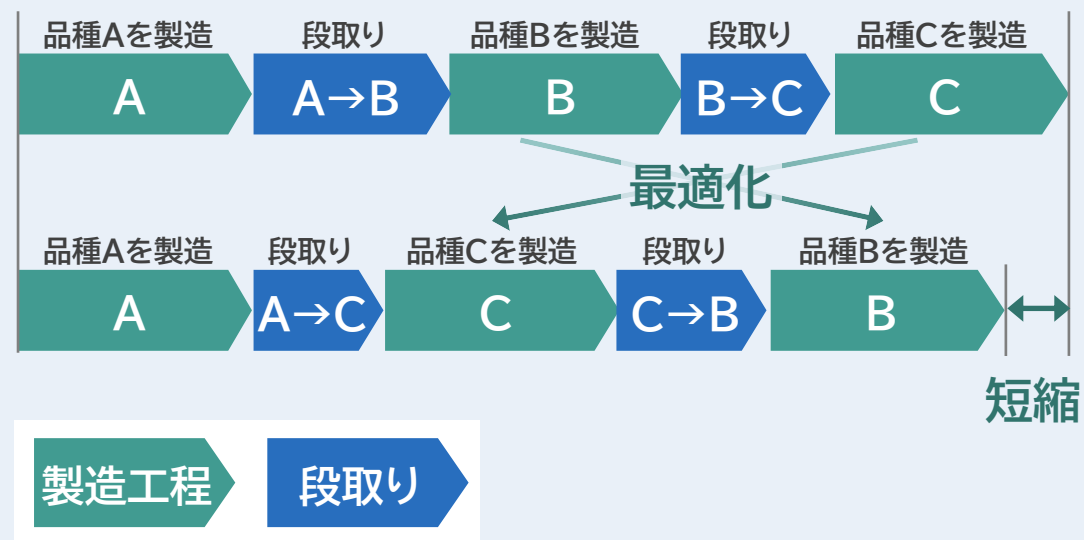
## 匠の技のデジタル化

[https://jpn.nec.com/press/202003/20200317\\_01.html](https://jpn.nec.com/press/202003/20200317_01.html)

### ■ 当日製造する品種の選択イメージ



### ■ 生産順序最適化イメージ



## 人による計画立案

熟練工でも1~2時間

- ・ 熟練工の不足、後継者育成問題
- ・ システム化・アルゴリズム化が困難

改善

## 量子コンピューティングによる計画立案

最適化にかかる時間は数秒※

- ・ 熟練工より、無駄の少ない計画立案が可能であることを検証

※最適化計算のみの時間

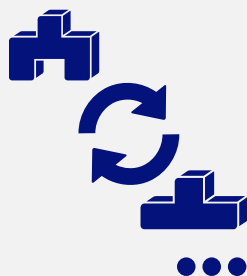
# 生産拠点への展開、定量効果

- ・SMTラインを持つ4事業所(福島、白石、大月、掛川)に展開、2023年3月より本格導入
- ・段取り工数50%削減し、設備稼働率15%向上。立案工数90%削減



## 生産計画最適化 時々刻々と変化する生産条件に合せ、動的にナビゲーション

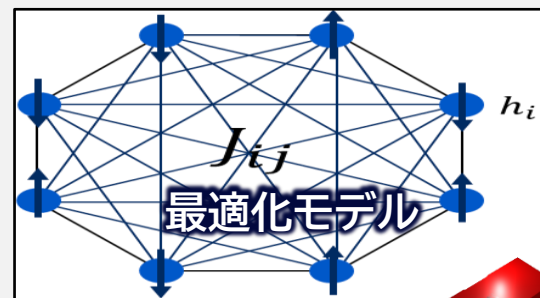
### 生産条件



組合せ多数  
頻繁な変化

入力

### 量子アニーリング

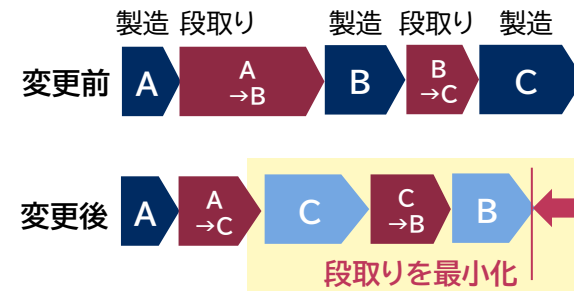


アニーリングマシン  
NEC Vector Annealing  
サービス

$4 \times 10^{30}$ 通りの  
組合せを解決

出力

### 生産順をナビ



- ◆設備稼働率15%向上
- ◆段取り工数50%削減
- ◆立案工数90%削減

# 定性効果、今後の展望

## 量子コンピューティング技術適用による定性効果

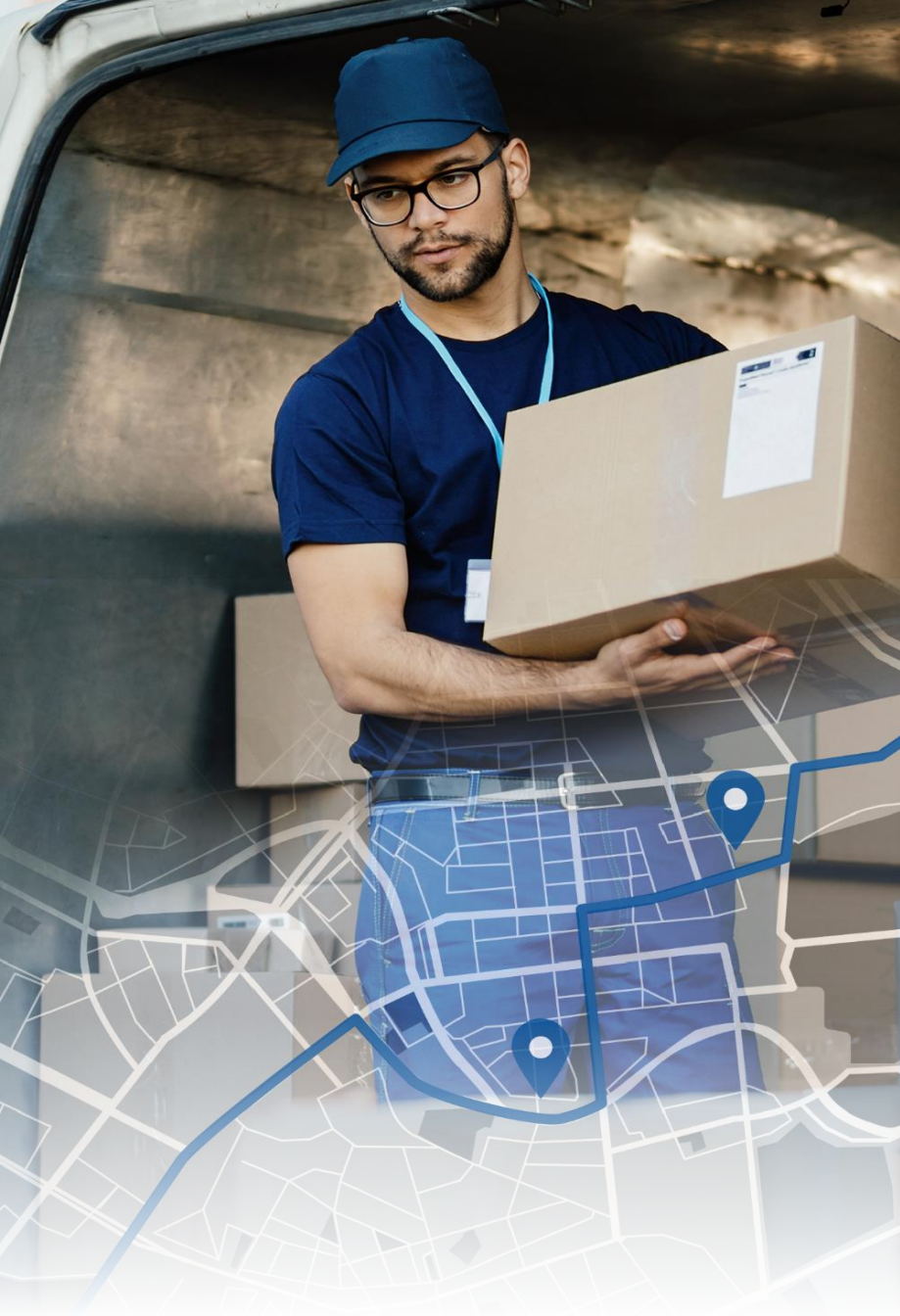
ベテランと  
同水準の計画を  
自動生成

- システム化によって  
ベテラン作業者のノウハウを形式知化でき  
熟練者の作業が解放可能となった
- 従来は計画の妥当性が判断できなかったが、  
定量的に判断ができ最適な選択が可能となった

展開

## 今後の展望

- タイ工場のSMTラインへ本システムを展開
- 各工程の組合せ問題を解決し、SC全体で生産性最大化・棚卸最適化
- 半導体逼迫、欠品などの突発変動にも生産計画の変更で柔軟に対応



# 物流現場の実用事例

NECフィールドディング  
2022年10月稼働  
配送計画最適化事例

2022年9月9日 プレスリリース  
[https://jpn.nec.com/press/202209/20220909\\_03.html](https://jpn.nec.com/press/202209/20220909_03.html)



# NECフィールドディング ハードウェア保守サービス概要

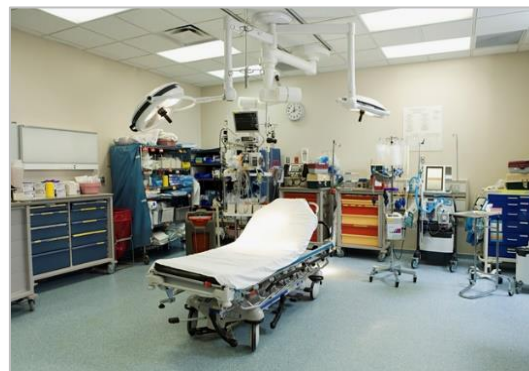
法人向けICT・非ICT機器、ネットワーク機器、各種システムに関する  
保守・修理サービスを提供



ICT機器



病院ファシリティ機器  
医療機器



分析装置



ロボット



業務用洗濯機・乾燥機



業務用冷凍冷蔵庫

# 量子コンピューティングを活用した事例概要

東京パーツセンター



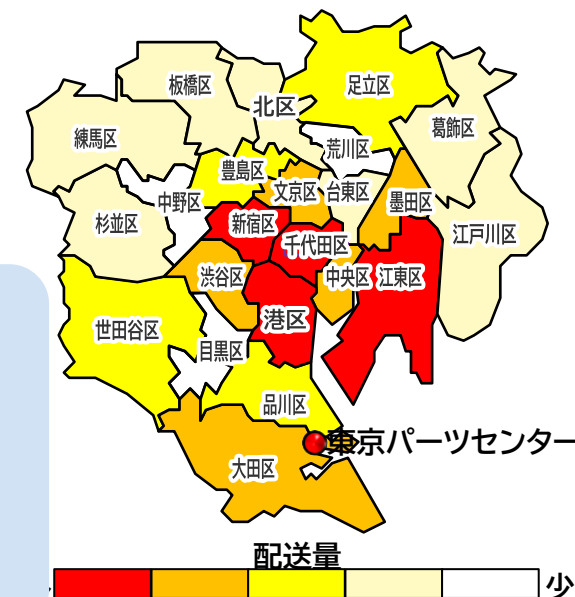
## ◆東京パーツセンター概要

- ・都内南部に約1,800坪の倉庫を構え、約15万点の保守部品在庫を保有
- ・東京23区のお客さまへ**1日数百箇所、約40台の車両で配送**

管轄エリア： 東京23区内  
体制： 24時間365日運用  
配送車両： 軽車両30台/バイク8台  
従業員： 43名

## ◆適用業務内容

- ・首都圏(東京/大阪)のCEは公共交通機関でお客さまからお客さまへ移動
- ・CEがお客さま先に到着するタイミングで部品を届ける必要あり
- ・保守部品の配送は、コストを最少にするため複数の案件をまとめて配送
- ・配送時間/場所/手段/量の組合せパターンが膨大で人手に頼った配送を計画



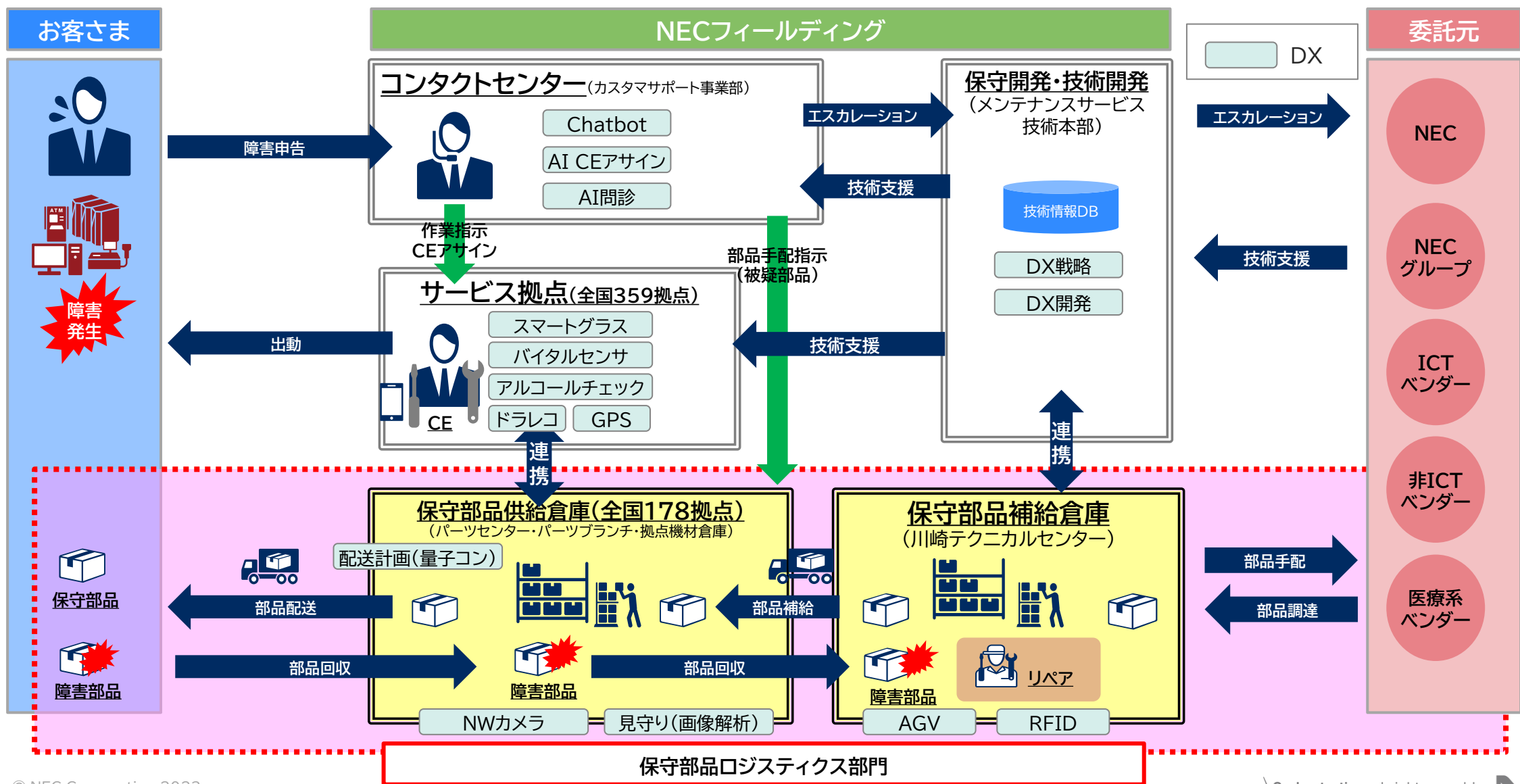
部品配送要求

配送計画

配送地域、配送時間、配送手段、配送量の  
組合せを**ベテラン作業**者が振分け

配送

# NECフィールドディング 保守フォーメーション



# 適用業務概要とその特性、課題

検証 & 10月導入済み

前日迄に受付  
けた配送依頼

数百件  
/日

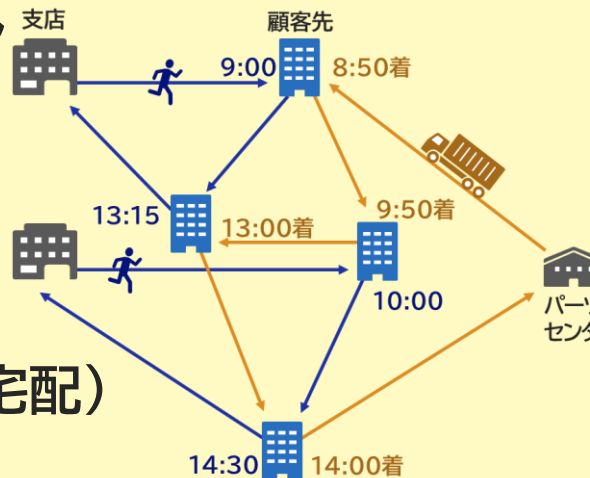
今後導入予定

当日受付  
緊急配送依頼

- 配送計画  
複雑な条件の配送要求を  
人手で組合せて計画  
★ベテラン作業者の裁量により計画



- ・ 配送時間
- ・ 道路の混雑状況
- ・ 配送エリア
- ・ 部品点数
- ・ 部品重量
- ・ 配送手段  
(車/バイク/宅配)



お客さま先  
での保守対応





# 気づき・今後の期待

## NEC



### 配送現場が抱える課題を 平和島配送センターに出向きヒアリング

- 配送計画立案作業は属人的
- 熟練者の驚くべき「勘と経験」で変化に応じた対応を実施
- あらかじめ立てた配送計画に緊急配送品が乗らず非効率的

## 気づき



実社会で使うには、**変化に強く柔軟に**追隨できるモデルでないと使い物にならない

## フィールディング



### 適用による期待効果

- ベテランの人手による計画と同水準の計画を自動生成
- システム化によってベテラン作業者のノウハウを形式知化



## 今後の課題



- 当日受付の緊急配送に適用
- 30%の配送効率向上(試算時の上限)
- CO2削減による環境負荷軽減

# 材料探索領域での活用例

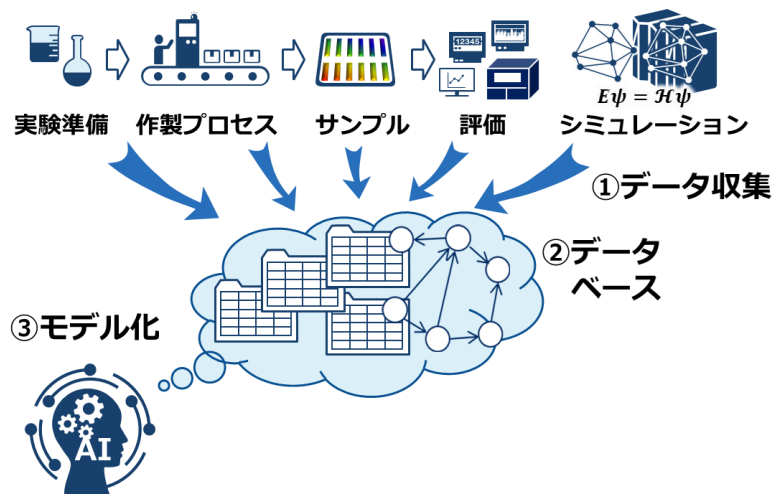
# 高度化するMI(マテリアルズインフォマティクス)のキーテクノロジーへ

試行錯誤のデジタル化による高効率探索の実現

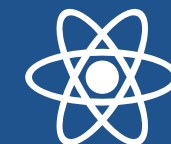
## AI(機械学習)



過去の実験データ  
から傾向分析  
モデル作成



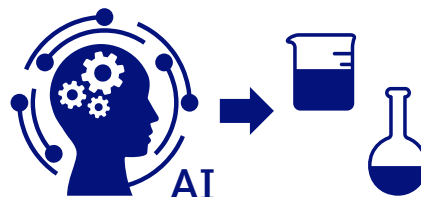
## 量子アニーリング



どの素材をどれだけ入れるか  
最適なプロセス条件の策定  
断片的なルールの適用

組合せ  
最適化問題

実験環境のデジタル化の進展  
各種シミュレーション、AIの連動などMIは日々進化途上



- 所望の性能を発揮するレシピの探索は  
試行錯誤試行回数(=コスト)を  
いかに減らすか

# 新材料のレシピ提案

---

# 具体的な問題例

- ◆ 複数の特性値に下限値と上限値が設定されている。
- ◆ 特性値が上下限に収まるような材料を作るための、素材の量の組合せ:「レシピ案」を求める。
  - 複数の特性値(硬さ、靱性…)

特性値名	下限値	上限値
特性値 1	60	80
特性値 2	500	600
特性値 3	-50	-35
特性値 4	0.1	0.3
特性値 5	40	75
特性値 6	1.0	5.0
特性値 7	90	200
特性値 8	0.2	1
特性値 9	10	50
特性値 1 0	20	30
特性値 1 1	5	15
特性値 1 2	0.05	0.2
特性値 1 3	5	10

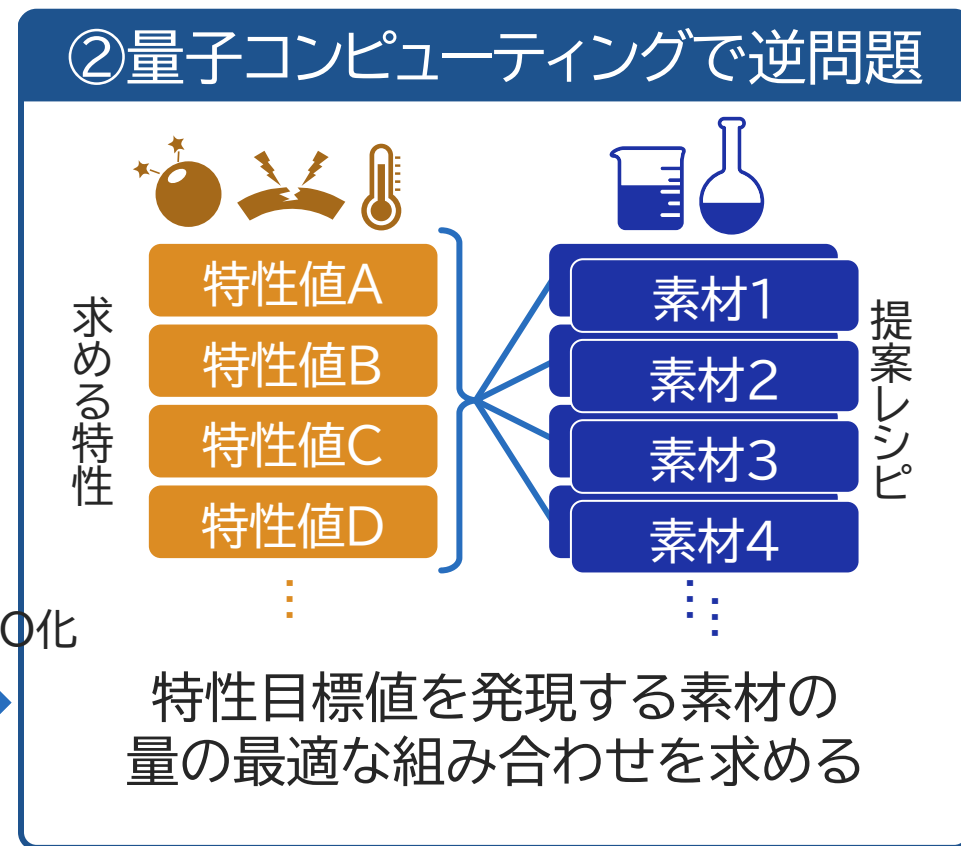
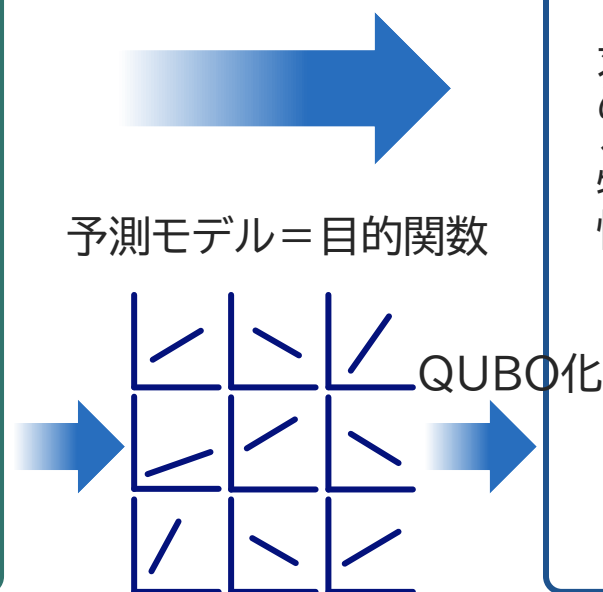
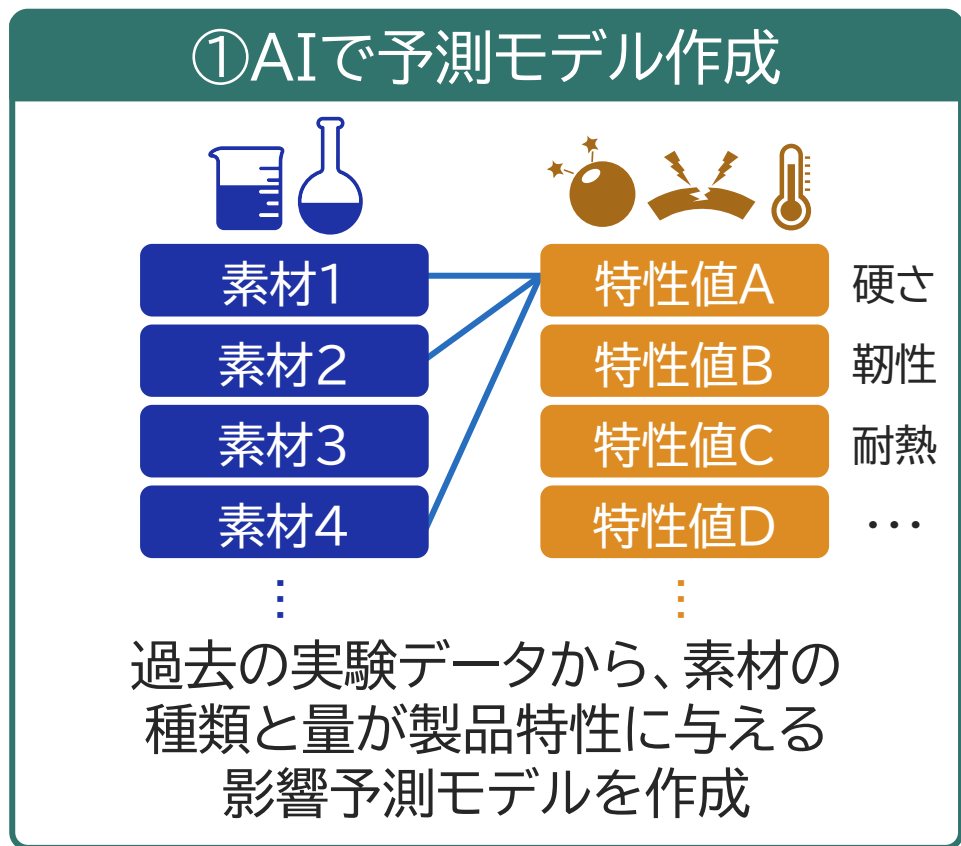
何をどれだけ入れたら  
目標通りの物質が得ら  
れるか、逆問題を解く



素材名	レシピ案 1	レシピ案 2	レシピ案 3
素材 1	?	?	?
素材 2	?	?	?
素材 3	?	?	?
素材 4	?	?	?
素材 5	?	?	?
素材 6	?	?	?
素材 7	?	?	?
素材 8	?	?	?
素材 9	?	?	?
素材 1 0	?	?	?
素材 1 1	?	?	?
素材 1 2	?	?	?
素材 1 3	?	?	?

# 1. 目的関数のQUBO化による直接解法

- ◆ AIによる予測モデル作成→量子コンピューティングが逆問題を解く
- ◆ 有力な複数のレシピ案を提案

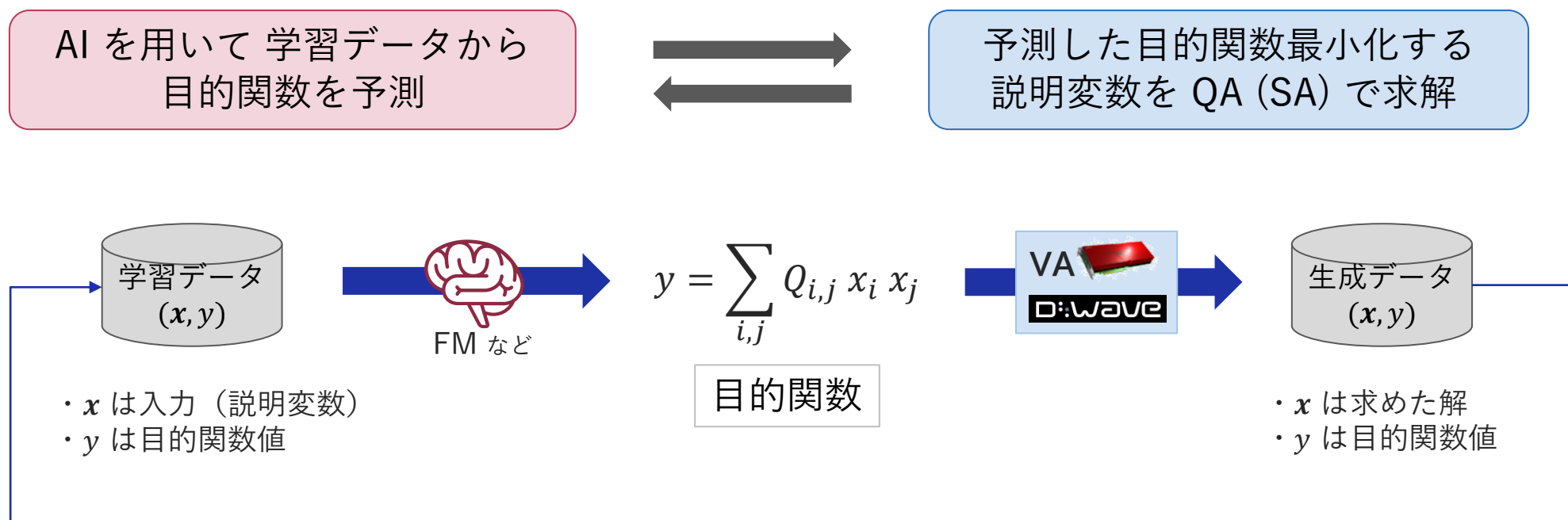


**効果** 試作回数の削減。属人性の排除。

## 2. ブラックボックス最適化

- ・ **組合せ最適化問題の目的関数が不明確な場合**に、AI と QA (SA) を組み合わせて最適解を得る手法
- ・ AI で 学習データから目的関数を予測し、その関数を最小化する説明変数を QA (SA) で求解する。

### ◆ ブラックボックス最適化の概要



QA (SA) で求めた解を学習データへ追加

# 得られる解のイメージ

## ● レシピ案

素材名	レシピ案 1	レシピ案 2	レシピ案 3
素材 1	61	68	50
素材 2	20	20	0
素材 3	0	5	0
素材 4	0	0	9
素材 5	8	0	0
素材 6	0	0	13
素材 7	0	0	0
素材 8	0	13	0
素材 9	6	0	30
素材 1 0	0	55	0
素材 1 1	0	0	56
素材 1 2	53	0	0
素材 1 3	1.3	0	0.5
素材 1 4	0	5.4	0
素材 1 5	2	1	2
素材 1 6	1.6	1	1
素材 1 7	0.4	0	0.1
素材 1 8	12	0	0

## ● レシピ案で得られる特性値(推定値)

特性値名	下限値	上限値	レシピ案 1 の 特性推定値	判定1	レシピ案 2 の 特性推定値	判定2	レシピ案 3 の 特性推定値	判定3
特性値 1	60	80	62	OK	64	OK	64	OK
特性値 2	500	600	508	OK	533	OK	549	OK
特性値 3	-50	-35	-36	OK	-38	OK	-39	OK
特性値 4	0.1	0.3	0.2	OK	0.2	OK	0.2	OK
特性値 5	40	75	43	OK	59	OK	42	OK
特性値 6	1.0	5.0	2.1	OK	2.1	OK	2.2	OK
特性値 7	90	200	86	NG	75	NG	84	NG
特性値 8	0.2	1	0.4	OK	0.4	OK	0.4	OK
特性値 9	10	50	16	OK	17	OK	27	OK
特性値 1 0	20	30	23	OK	22	OK	25	OK
特性値 1 1	5	15	8	OK	8	OK	11	OK
特性値 1 2	0.05	0.2	0.1	OK	0.1	OK	0.2	OK
特性値 1 3	5	10	6	OK	6	OK	6	OK
特性値 1 4	2	50	11	OK	20	OK	30	OK
特性値 1 5	0.5	1.0	0.7	OK	0.8	OK	0.7	OK
特性値 1 6	0.5	1.5	0.7	OK	0.7	OK	0.7	OK
特性値 1 7	200	350	292	OK	312	OK	327	OK



# 最適化業務のデジタル化がもたらす効果とは

# 量子コンピューティングの適用の期待値

高度なAIによる未来予測と組み合わせ、最適なアクション選択のデジタル化による精緻なシミュレーション結果をもとに、ヒトモノカネをどう配分するかを判断する経営支援ツールとしての活用が期待できる

## 現在

その日の配送計画、生産計画、  
人員シフトetcを立案する業務をデジタル化

- 属人性の排除、スキルフリー化、配送コストの削減
- 短期間の業務の効率化



## 今後

1年、3年といった将来の事業予測に基いた  
年単位の生産計画、配送計画を  
仮想世界で短時間でシミュレーション  
することで、経営判断に活用していく

改善効果をシミュレーション

目標「〇〇%削減」を設定し、実証  
関連業務含めた課題の明確化

該当業務の最適化、更なるサービス向上へ

# NECが提供しているサービス

# NECの提供サービス

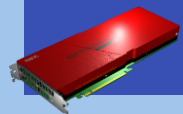
お客様のご要望とニーズに応じて様々なサービスメニューをご用意しています

オンプレミス

クラウドサービス

## NEC Vector Annealingサービス

NECのベクトルプロセッサ(高速行列計算・高速メモリアクセス)と、  
独自アニーリングアルゴリズムにより  
大規模アニーリング最適化の高速処理を実現



## Leap Quantum Cloud Service

D-Waveの  
Leap Quantum Cloud  
Serviceを、NECによる  
日本語サポート含めて提供

## 量子コンピューティング 適用サービス

お客様の業務課題に対して  
技術検証などトータルにサポート

業務課題抽出  
テーマ検討

最適化方式検討  
仮説設定

定式化・机上検証  
プロトタイプ開発

現場適用検証  
チューンアップ

## 量子コンピューティング 教育サービス

お客様のDX化や  
AI活用を加速する  
量子コンピューティング  
人材育成を支援

### 基礎編

量子コンピューティングとは何か、  
どのような課題が解決できるのか、  
短時間で学べるプログラム

### 実践編

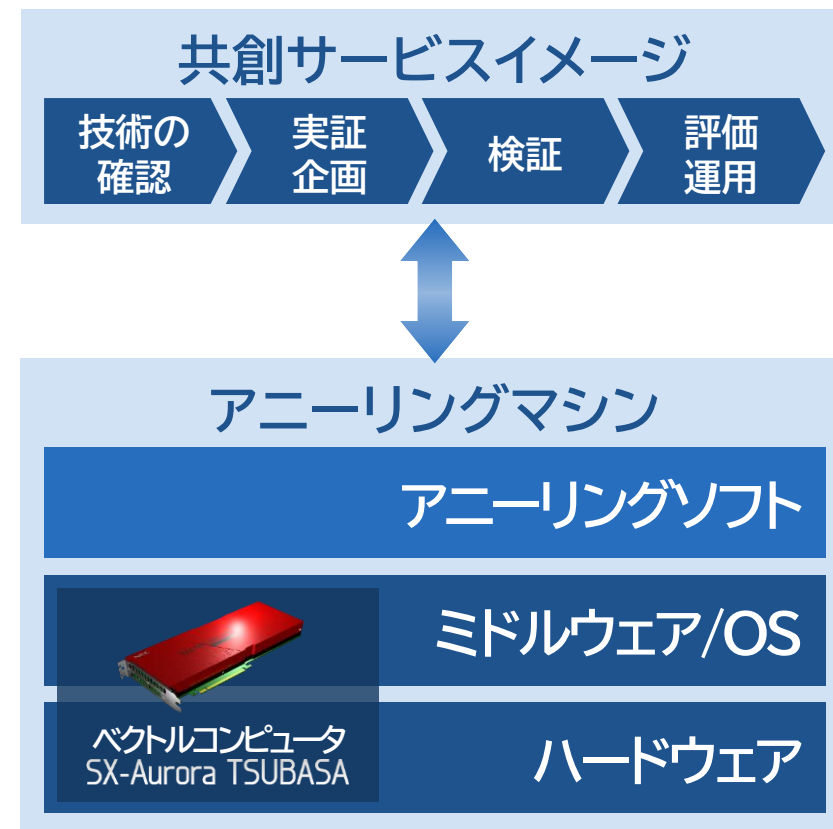
量子アニーリングによる  
課題解決のプログラミングスキルを  
獲得できるサービス

# NEC Vector Annealing サービス

ベクトルコンピュータを利用した  
高性能シミュレーテッドアニーリングマシンのクラウドサービスを提供

## アニーリングマシンの特徴

- アニーリング処理に適した独自開発のアルゴリズムとベクトルコンピュータ※1により超高速に処理
- 従来のシミュレーテッド・アニーリングシステム比**300倍以上**※2
- **30万量子ビット相当**の大規模な組合せ最適化問題に対応
- ビッグデータ/AIソフトウェアと連携したアプリケーションを容易に開発可能
- より多くの業務に適用いただけるよう、用途に応じたサービスを月額固定料金でご提供
  - ・国内業界最安値となる月額25万円で利用できるスタンダードプランと、月額125万円で利用できるプロフェッショナルプランの2種を提供



プレスリリース:[https://jpn.nec.com/press/202109/20210901\\_01.html](https://jpn.nec.com/press/202109/20210901_01.html)

※1:スーパーコンピュータとして商品化済みのSX-Aurora TSUBASAを利用

※2:NEC調べ。100都市巡回セールスマン問題において従来アルゴリズム(シミュレーテッドアニーリング)をXeonプロセッサで実行した場合と比較

# 量子コンピューティング適用サービス

目的  
1

実際の業務に適用して、  
技術開発及び有効性を検証する

目的  
2

人材育成

- ◆ お客様の業務課題に対し、お客様と共同して取り組む
- ◆ D-Wave社の量子アニーリング、ベクトルコンピュータを用いたSimulated Annealing(SA)など、技術サポートをトータルに提供

量子アニーリングの業務適用に向け、トータルにサポート

業務課題提出  
テーマ検討

最適化方式検討  
仮説設定

定式化・机上検証  
プロトタイプ開発

現場適用検証  
チューンアップ

# 量子コンピューティング教育サービス

企業のDX化やAI活用を加速する量子コンピューティング人材育成を支援

## 基礎編

量子コンピューティングとは何か、  
どのような課題が解決できるのか、  
短時間で学べるプログラム

受講対象: 企画、DX推進者  
研修期間: 半日  
開催形式: オンライン型  
前提知識: 不要

量子アニーリングの基本的な特徴と、  
製造/物流/金融をはじめとした、  
さまざまな産業におけるユースケースを  
分かりやすく解説します。

## 実践編

量子アニーリングによる  
課題解決のプログラミングスキルを  
獲得できるサービス

受講対象: システムエンジニア  
研修期間: 2日  
開催形式: 集合型  
前提知識: アニーリングの基本的な特徴 &  
Pythonの基本構文を理解している

量子アニーリングのプログラミング方法を、  
座学と実機による演習形式で学びます。  
お客様の実際の課題にアニーリングマシンを  
適用した実例を用いて実践します。

# おわりに

- ・組合せ最適化問題は、日常生活な様々な場面にあります。
- ・これらの問題解決に量子コンピューティング技術が使われだしています。
- ・さらに詳しく知りたい方、検討については、NECまでぜひご相談ください。

ご相談・お問い合わせ先

optimization@aiqc.jp.nec.com

※量子コンピューティングに関するNECの取り組みについてこちらでご紹介しています  
[https://jpn.nec.com/quantum\\_annealing/index.html](https://jpn.nec.com/quantum_annealing/index.html)



\ Orchestrating a brighter world

**NEC**