

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2022年1月6日(06.01.2022)



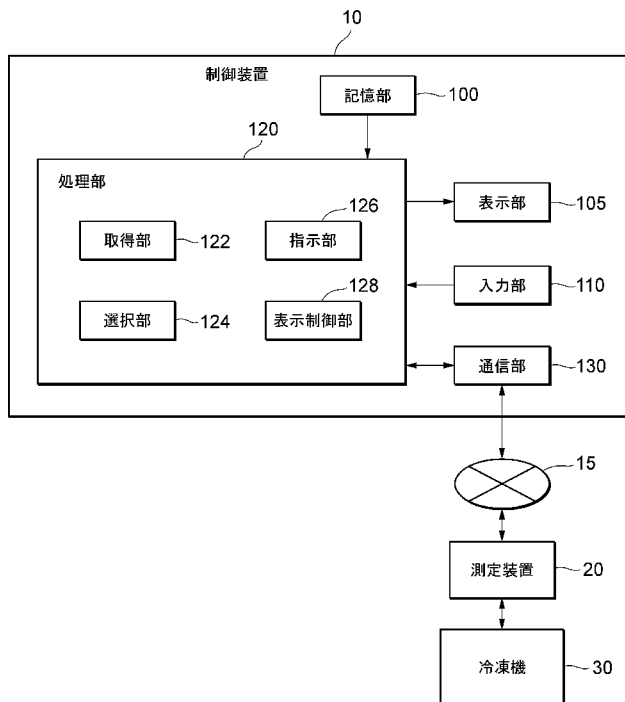
(10) 国際公開番号

WO 2022/004274 A1

- (51) 国際特許分類:
G06N 10/00 (2019.01) *G06F 7/57* (2006.01) [JP/JP]; 〒1008921 東京都千代田区霞が関
1丁目3番1号 Tokyo (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2021/021357 (72) 発明者: 才田 大輔(SAIDA, Daisuke); 〒3058560
茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第1 国立研
(22) 国際出願日: 2021年6月4日(04.06.2021) 究開発法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP).
- (25) 国際出願の言語: 日本語 (74) 代理人: 稲葉 良幸, 外(INABA, Yoshiyuki et al.);
(26) 国際公開の言語: 日本語 〒1066123 東京都港区六本木6-10-
1 六本木ヒルズ森タワー23階 T M I
(30) 優先権データ: 特願 2020-112273 2020年6月30日(30.06.2020) JP 総合法律事務所 Tokyo (JP).
- (71) 出願人: 国立研究開発法人産業技術総合研究所(NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED
INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,

(54) Title: COMPUTER SYSTEM AND CONTROL DEVICE

(54) 発明の名称: コンピュータシステム及び制御装置



10 Control device
20 Measurement device
30 Freezing machine
100 Storage unit
105 Display unit
110 Input unit
120 Processing unit
122 Acquisition unit
124 Selection unit
126 Instruction unit
128 Display control unit
130 Communication unit

(57) Abstract: Provided are a computer system and a control device with which it is possible to reduce the necessity to reconfigure the circuit configuration of a quantum computer in accordance with computation details. A computer system comprising an acquisition unit 122 that acquires computation details, a computation unit group including a plurality of computation units that each execute computation using a quantum effect or a thermal effect of a superconductive state, a selection unit 124 that selects a computation unit from the computation unit group on the basis of the computation details,

HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

and an execution unit 212 that causes the computation unit selected by the selection unit to execute the computation.

(57) 要約: 量子コンピュータの回路構成における演算内容に応じた再構成の必要性を低減することが可能なコンピュータシステム及び制御装置を提供する。演算内容を取得する取得部122と、超伝導状態の量子効果又は熱的効果を用いた演算をそれぞれ実行する複数の演算ユニットを含む演算ユニット群と、演算内容に基づいて、演算ユニット群から演算ユニットを選択する選択部124と、選択部により選択された演算ユニットに演算を実行させる実行部212と、を備えるコンピュータシステム。

明 細 書

発明の名称 : コンピュータシステム及び制御装置

技術分野

[0001] 本発明は、コンピュータシステム及び制御装置に関する。

背景技術

[0002] 近年では、量子力学的な効果を利用した量子コンピュータの実現に向けた開発が行われている。例えば、特許文献1には、超伝導素子を用いた量子コンピュータについて記載されている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特表2011-524026号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 量子コンピュータでは、演算内容に応じた回路構成が必要となる。このため、従来の量子コンピュータでは、演算内容が変わると、演算内容に応じた量子コンピュータの回路構成の再構成が必要となる。この結果、ユーザに負担が生じていたものと推測される。

[0005] そこで、本発明は、量子コンピュータの回路構成における演算内容に応じた再構成の必要性を低減することが可能なコンピュータシステム及び制御装置を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0006] 本発明の一態様に係るコンピュータシステムは、演算内容を取得する取得部と、超伝導状態の量子効果又は熱的効果を用いた演算をそれぞれ実行する複数の演算ユニットを含む演算ユニット群と、演算内容に基づいて、演算ユニット群から演算ユニットを選択する選択部と、選択部により選択された演算ユニットに演算を実行させる実行部と、を備える。

[0007] この態様によれば、演算内容に応じた演算ユニットが選択され、その演算

ユニットにより演算が実行される。このため、量子コンピュータの回路構成における演算内容に応じた再構成の必要性が低減される。

[0008] 上記態様において、演算ユニット群は、汎用の演算ユニットである汎用演算ユニットと、特定の用途のための演算ユニットである特定演算ユニットとを含み、選択部は、演算ユニット群が演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを含まない場合には汎用演算ユニットを選択し、演算ユニット群が演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを含む場合には特定演算ユニットを選択してもよい。

[0009] この態様によれば、演算内容に応じて、より適切な演算ユニットが選択される。

[0010] 上記態様において、演算ユニット群は、互いに異なる用途のための複数の特定演算ユニットを含み、選択部は、演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを選択してもよい。

[0011] この態様によれば、演算内容に応じて、より適切な演算ユニットが選択される。

[0012] 上記態様において、演算ユニット群は、同一の基板上に形成されている複数の演算ユニットを含んでもよい。

[0013] この態様によれば、複数の演算ユニットが互いに異なる基板上に形成されている場合と比べて、設計が容易となる場合がある。

[0014] 上記態様において、演算ユニット群は、互いに異なる基板上に形成されている複数の演算ユニットを含んでもよい。

[0015] この態様によれば、複数の演算ユニットのそれぞれに適した位置に、演算ユニットを配置することが可能になる。

[0016] 上記態様において、互いに異なる基板上に形成されている複数の演算ユニットは、互いに異なる温度の基板上に形成されている複数の演算ユニットを含み、互いに異なる温度の基板上に形成されている複数の演算ユニットのそれぞれは、それぞれの演算ユニットによる演算に適した温度の基板上に形成されてもよい。

- [0017] この態様によれば、冷凍機等に演算ユニットが配置される場合には、冷凍機内の空間をより効率よく利用することが可能になる。
- [0018] 上記態様において、選択部は、演算ユニット群から複数の演算ユニットを選択し、実行部は、選択部により選択された複数の演算ユニットのそれぞれに演算を実行させてもよい。
- [0019] この態様によれば、複数の演算ユニットに演算を実行させることができるようになる。
- [0020] 上記態様において、実行部は、選択部により選択された複数の演算ユニットのそれぞれにより実行される演算が非同期となるように、選択部により選択された複数の演算ユニットのそれぞれに演算を実行させてもよい。
- [0021] この態様によれば、複数の演算ユニットにそれぞれのタイミングで演算を実行させることができる。
- [0022] 上記態様において、実行部は、選択部により選択された複数の演算ユニットのそれぞれにより実行される演算が同期するように、選択部により選択された複数の演算ユニットのそれぞれに演算を実行させてもよい。
- [0023] この態様によれば、複数の演算ユニットのそれぞれにより演算が実行されるタイミングを管理することが可能になる。
- [0024] 本発明の他の態様に係る制御装置は、演算内容を取得する取得部と、演算内容に基づいて、超伝導状態の量子効果又は熱的效果を用いた演算をそれぞれ実行する複数の演算ユニットを含む演算ユニット群から、演算ユニットを選択する選択部と、を備える。
- [0025] この態様によれば、演算内容に応じた演算ユニットが選択され、その演算ユニットにより演算が実行される。このため、量子コンピュータの回路構成における演算内容に応じた再構成の必要性が低減される。
- [0026] 上記態様において、演算ユニット群は、汎用の演算ユニットである汎用演算ユニットと、特定の用途のための演算ユニットである特定演算ユニットとを含み、選択部は、演算ユニット群が演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを含まない場合には汎用演算ユニットを選択し、演算ユニット

群が演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを含む場合には汎用演算ユニットを選択してもよい。

[0027] この態様によれば、演算内容に応じて、より適切な演算ユニットが選択される。

[0028] 上記態様において、演算ユニット群は、互いに異なる用途のための複数の特定演算ユニットを含み、選択部は、演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを選択してもよい。

[0029] この態様によれば、演算内容に応じて、より適切な演算ユニットが選択される。

発明の効果

[0030] 本発明によれば、量子コンピュータの回路構成における演算内容に応じた再構成の必要性を低減することが可能なコンピュータシステム及び制御装置を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0031] [図1]本開示の一実施形態に係るコンピュータシステムの概略構成図である。

[図2]同実施形態に係る制御装置のハードウェア構成の一例を示す図である。

[図3]同実施形態に係る測定装置及び冷凍機の概略構成図である。

[図4]同実施形態に係る汎用演算ユニットの概略構成図である。

[図5]同実施形態に係るコンピュータシステムによる処理の流れを示すフローチャートである。

[図6]実施例1において、NORユニットにNOR演算を実行させた結果を示す図である。

[図7]実施例1における乗算器ユニットの演算内容を説明するための図である。

[図8]実施例1において乗算器ユニットに乗算を実行させた結果を示す図である。

[図9]実施例2におけるシミュレーションにおいて、3つの回路に流した電流を示す図である。

[図10]実施例2におけるシミュレーションにおいて、3つの量子ビットのループに流れる電流を示す図である。

[図11]実施例2において、演算ユニットの演算を再現するシミュレーションを行った結果を示す図である。

[図12]第1変形例に係る2つの基板の構成を示す図である。

[図13]第2変形例に係る冷凍機の内部構成を示す図である。

[図14]第3変形例に係る2つの測定装置と、基板との構成を示す図である。

[図15]第4変形例に係るコンピュータシステムの概略構成図である。

発明を実施するための形態

[0032] 添付図面を参照して、本発明の好適な実施形態について説明する。なお、各図において、同一の符号を付したものは、同一又は同様の構成を有する。

[0033] [第1実施形態]

図1は、本開示の一実施形態に係るコンピュータシステム1の概略構成図である。本実施形態に係るコンピュータシステム1は、主として、制御装置10、測定装置20及び冷凍機30を備える。制御装置10及び測定装置20は、通信ネットワーク15を介して、通信可能に接続されている。また、測定装置20は、冷凍機30に配置されている複数の演算ユニットに接続されている。

[0034] 通信ネットワーク15は、各種の態様を取り得る。通信ネットワーク15は、例えば、専用回線を通して相互に接続するデータ伝送ネットワーク(WAN)又はローカル・エリア・ネットワーク(LAN)等であってよい。本実施形態では、通信ネットワーク15は、公共ネットワークの代表のインターネットであるものとして説明する。なお、制御装置10及び測定装置20は、USB(Universal Serial Bus)ケーブル又はGPIB(General Purpose Interface Bus)ケーブル等で接続されても良い。

[0035] 冷凍機30には、超伝導状態の量子効果又は熱的效果を用いた演算をそれぞれ実行する複数の演算ユニットを含む演算ユニット群が配置されている。本実施形態では、演算ユニット群が量子コンピュータを構成している。制御

装置 10 は、冷凍機 30 に配置されている演算ユニット群から、演算を実行する演算ユニットを選択できる。測定装置 20 は、制御装置 10 により選択された演算ユニットに各種の演算を実行させる。以下、制御装置 10、測定装置 20 及び冷凍機 30 の構成について詳細に説明する。

[0036] 制御装置 10 は、演算内容に基づいて演算ユニットを選択し、選択した演算ユニットが演算を実行するように、測定装置 20 に指示することができる。制御装置 10 は、記憶部 100、表示部 105、入力部 110、処理部 120 及び通信部 130 を備える。

[0037] 記憶部 100 は、各種の情報を記憶している。記憶部 100 は、例えば、演算ユニットを選択するための情報を記憶している。具体的には、記憶部 100 は、演算ユニットとその演算ユニットの用途（例えば、因数分解及びタンパク質構造解析等の用途）とを対応付けたテーブルを記憶してよい。本実施形態では、テーブルには、複数の演算ユニットを示す情報と、それぞれの演算ユニットに対応付けられた用途を示す情報とが格納されている。記憶部 100 が記憶している各種の情報は、必要に応じて処理部 120 により参照される。

[0038] 表示部 105 は、各種の画面を表示できる。例えば、表示部 105 は、演算内容を特定するための画面を表示できる。具体的には、表示部 105 は、各種の演算内容を表示して、チェックボックス式、スクロール式又はプルダウン式等の各種の形式でユーザが演算内容を特定できる画面を表示する。

[0039] 入力部 110 は、ユーザの操作に応じて、各種の情報の入力を受け付ける。例えば、入力部 110 は、ユーザの操作に応じて演算内容を受け付ける。このとき、入力部 110 は、複数の演算内容を受け付けてもよい。入力部 110 が受け付けた各種の情報は、処理部 120 に伝達される。

[0040] 処理部 120 は、各種の処理を実行する。具体的には、処理部 120 は、演算ユニット群から演算ユニットを選択して、選択した演算ユニットに演算を実行するように測定装置 20 に指示できる。処理部 120 は、取得部 122、選択部 124、指示部 126 及び表示制御部 128 を備える。

- [0041] 取得部 1 2 2 は、各種の情報を取得できる。具体的には、取得部 1 2 2 は、記憶部 1 0 0 から各種の情報を取得したり、入力部 1 1 0 が受け付けた各種の情報を取得したりできる。例えば、取得部 1 2 2 は、入力部 1 1 0 からユーザの操作に基づいて、演算内容を取得できる。このとき、取得部 1 2 2 は、複数の演算内容を取得してもよい。
- [0042] 選択部 1 2 4 は、取得部 1 2 2 が取得した演算内容に基づいて、冷凍機 3 0 に配置されている演算ユニット群から演算ユニットを選択することができる。具体的には、選択部 1 2 4 は、記憶部 1 0 0 に記憶されているテーブルを参照して、取得された演算内容に応じた演算ユニットを選択する。本実施形態では、演算ユニット群は、汎用の演算ユニットである汎用演算ユニットと、特定の用途のための演算ユニットである特定演算ユニットを含む。選択部 1 2 4 は、演算内容に応じて、汎用演算ユニット及び特定演算ユニットの少なくともいずれかを選択する。
- [0043] 具体的には、演算ユニット群が、取得された演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを含まない場合には、選択部 1 2 4 は、汎用演算ユニットを選択する。一方、演算ユニット群が、取得された演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを含む場合には、選択部 1 2 4 は、その特定演算ユニットを選択する。
- [0044] また、選択部 1 2 4 は、演算ユニット群から複数の演算ユニットを選択できる。選択部 1 2 4 は、複数の特定演算ユニットを選択してもよいし、汎用演算ユニット及び少なくとも 1 つの特定演算ユニットを選択してもよい。このとき、選択部 1 2 4 は、複数の演算内容に基づいて、それぞれの演算内容に合致する用途のための演算ユニットを選択できる。あるいは、選択部 1 2 4 は、1 つの演算内容に基づいて、その演算内容に合致する複数の演算ユニットを選択してもよい。すなわち、1 つの演算内容に応じた演算が複数の演算ユニットに分担されてもよい。
- [0045] 指示部 1 2 6 は、演算ユニットによる演算の実行を指示することができる。具体的には、指示部 1 2 6 は、通信部 1 3 0 を介して測定装置 2 0 に各種

の信号を伝送して、演算ユニットによる演算の実行を指示することができる。本実施形態では、指示部 126 は、選択部 124 により選択された演算ユニットによる演算の実行を指示する。また、指示部 126 は、例えばユーザの操作に基づいて、演算ユニットに演算を実行させる回数を指示してもよい。

[0046] さらに、指示部 126 は、複数の演算ユニットによる演算の実行を指示することができる。この場合、指示部 126 は、複数の演算ユニットによる演算の同期に関する指示を行うことができる。例えば、指示部 126 は、ユーザの操作に基づき、複数の演算ユニットのそれぞれによる演算のタイミングを指示してもよい。

[0047] 表示制御部 128 は、表示部 105 の表示を制御する。具体的には、表示制御部 128 は、表示部 105 が表示する画面のデータを生成し、生成したデータを表示部 105 に伝達する。例えば、表示制御部 128 は、ユーザが演算内容を入力するための各種の画面のデータを生成して、生成したデータを表示部 105 に伝達できる。

[0048] 通信部 130 は、各種の情報を送受信できる。例えば、通信部 130 は、通信ネットワーク 15 を介して、指示部 126 による指示を測定装置 20 に送信できる。

[0049] 図 2 は、本実施形態に係る制御装置 10 のハードウェア構成の一例を示す図である。制御装置 10 は、処理部 120 に相当する CPU (Central Processing Unit) 10a と、記憶部 100 に相当する RAM (Random Access Memory) 10b と、記憶部 100 に相当する ROM (Read Only Memory) 10c と、通信部 10d と、入力部 10e と、表示部 10f と、を有する。これらの各構成は、バスを介して相互にデータ送受信可能に接続される。なお、本例では制御装置 10 が一台のコンピュータで構成される場合について説明するが、制御装置 10 は、複数のコンピュータが組み合わされて実現されてもよい。また、図 2 で示す構成は一例であり、制御装置 10 はこれら以外の構成を有してもよいし、これらの構成のうち一部を有さなくてもよい。

- [0050] CPU 10aは、RAM 10b又はROM 10cに記憶されたプログラムの実行に関する制御やデータの演算、加工を行う処理部である。CPU 10aは、演算内容を取得して演算ユニットを選択し、演算の実行を指示するプログラム（演算指示プログラム）を実行する処理部である。CPU 10aは、入力部 10eや通信部 10dから種々のデータを受け取り、データの演算結果を表示部 10fに表示したり、RAM 10bに格納したりする。
- [0051] RAM 10bは、記憶部のうちデータの書き換えが可能なものであり、例えば半導体記憶素子で構成されてよい。RAM 10bは、CPU 10aが実行するプログラム、演算結果および演算に必要なデータといったデータを記憶してよい。なお、これらは例示であって、RAM 10bには、これら以外のデータが記憶されていてもよいし、これらの一部が記憶されていなくてもよい。
- [0052] ROM 10cは、記憶部のうちデータの読み出しが可能なものであり、例えば半導体記憶素子で構成されてよい。ROM 10cは、例えば演算指示プログラムや、書き換えが行われないデータを記憶してよい。
- [0053] 通信部 10dは、制御装置 10を他の機器に接続するインターフェースである。通信部 10dは、インターネット等の通信ネットワークに接続されてよい。
- [0054] 入力部 10eは、ユーザからデータの入力を受け付けるものであり、例えば、キーボード及びタッチパネルを含んでよい。
- [0055] 表示部 10fは、各種の画面に表示するものであり、例えば、LCD（Liquid Crystal Display）により構成されてよい。表示部 10fは、例えば、演算内容を入力するための画面等を表示してよい。
- [0056] 演算指示プログラムは、RAM 10bやROM 10c等のコンピュータによって読み取り可能な記憶媒体に記憶されて提供されてもよいし、通信部 10dにより接続される通信ネットワークを介して提供されてもよい。制御装置 10では、CPU 10aが演算指示プログラムを実行することにより、図1を用いて説明した様々な動作が実現される。なお、これらの物理的な構成

は例示であって、必ずしも独立した構成でなくてもよい。例えば、制御装置 10 は、CPU 10a と RAM 10b や ROM 10c が一体化した LSI (Large-Scale Integration) を備えていてもよい。

[0057] 図 3 は、本実施形態に係る測定装置 20 及び冷凍機 30 の概略構成図である。

[0058] 測定装置 20 は、演算ユニットに各種の演算を実行させる。本実施形態では、測定装置 20 は、制御装置 10 の指示部 126 による指示に基づいて、冷凍機 30 に配置されている各種の演算ユニットに演算を実行させることができる。より具体的には、測定装置 20 は、選択部 124 により選択された演算ユニットに演算を実行させる。測定装置 20 は、通信部 200、制御部 210、第 1 スイッチ 220 及び第 2 スイッチ 222 を備える。なお、第 1 スイッチ 220 と第 2 スイッチ 222 は、実際の構造として存在しても良いが、選択部 124 によって選択される状態を理解のし易さを向上するために便宜上示したものであっても良い。すなわち、第 1 スイッチ 220 及び第 2 スイッチ 222 は、実際の構造として存在しなくてもよい。

[0059] 通信部 200 は、測定装置 20 を他の機器に接続するインターフェースである。本実施形態では、通信部 200 は、通信ネットワーク 15 に接続される。通信部 200 は、各種の情報を送受信できる。例えば、通信部 200 は、制御装置 10 による指示等を受信する。

[0060] 制御部 210 は、各種の制御を実行する。制御部 210 は、例えば、ROM、RAM 及び CPU 等を備えるマイクロコンピュータ等を含んでよい。制御部 210 は、実行部 212 及びスイッチ制御部 214 を備える。なお、スイッチ制御部 214 は、実際の構造として存在しても良いが、選択部 124 によって選択される状態を理解のし易さを向上するために便宜上示したものであっても良い。汎用演算ユニット 312 及び特定演算ユニット 318 と実行部 212 とは、リン青銅線、Cu 又は NbTi / CuNi 等を素材とした低抵抗線、SCNi - CuNi 等を素材とした高周波配線又は同軸ケーブル等、電気信号を伝搬するための配線で接続されている。スイッチ制御部 21

4は、この2つの演算ユニットと実行部212との接続を制御するものとして便宜上示したが、実際の構造として存在しても良い。

[0061] 実行部212は、演算ユニットに演算を実行させる。具体的には、実行部212は、制御装置10の指示に基づいて、演算ユニットに各種の信号を伝送して演算ユニットに演算を実行させる。実行部212は、信号発生器を備える。信号発生器は、各種の信号を発生する装置であり、例えば、AWG (Arbitrary Waveform Generator : 任意波形発生器)、オシレータ及び直流電源等の各種の装置を含む。また、実行部212は冷凍機30の内部に配置されてもよい。

[0062] また、実行部212は、選択部124により選択された複数の演算ユニットのそれぞれにより実行される演算が同期するように、各演算ユニットに演算を実行させることができる。具体的には、実行部212は、各演算ユニットに信号を入力するタイミングを調整することにより、複数の演算ユニットによる演算のタイミングを管理することができる。例えば、実行部212は、複数の演算ユニットに、同一のタイミングで演算を開始させたりすることができる。

[0063] また、実行部212は、選択部124により選択された複数の演算ユニットのそれぞれにより実行される演算が非同期となるように、各演算ユニットに演算を実行させることができる。例えば、実行部212は、複数の演算ユニットに、異なるタイミングで演算を開始させてもよい。

[0064] スイッチ制御部214は、制御装置10の指示に基づいて、各種の公知のスイッチング素子により構成される第1スイッチ220及び第2スイッチ222の状態を制御する。具体的には、スイッチ制御部214は、演算を実行させる演算ユニットに接続されたスイッチを導通状態に制御し、演算を実行させない演算ユニットに接続されたスイッチを開放状態に制御する。例えば、第1スイッチ220に接続された演算ユニットが演算を実行し、第2スイッチ222に接続された演算ユニットが演算を実行しない場合には、スイッチ制御部214は、第1スイッチ220を導通状態に制御して、第2スイ

チ 2 2 2 を開放状態に制御する。なお、第 1 スイッチ 2 2 0、第 2 スイッチ 2 2 2 及びスイッチ制御部 2 1 4 は実際の構造として存在しても良いが、選択部 1 2 4 によって選択される状態を理解のし易さを向上するために便宜上示したものであっても良い。すなわち、第 1 スイッチ 2 2 0、第 2 スイッチ 2 2 2 及びスイッチ制御部 2 1 4 は、実際の構造として存在しなくてもよい。

[0065] 冷凍機 3 0 は、極低温を実現できる冷凍機であり、例えば $^3\text{He}-^4\text{He}$ 希釈冷凍法を用いた冷凍機であってよい。冷凍機 3 0 の内部の温度は、4 K（より正確には、大気圧化での ^4He 液体の沸点である 4.2 K）以下の温度であり得る。また、冷凍機 3 0 は、所定の温度に調整される基板 3 1 0 を備える。本実施形態では、基板 3 1 0 の温度は、数 mK～数十 mK の温度である。なお、基板 3 1 0 の温度は、これに限定されるものではなく、例えば 4.2 K 程度あるいは 1 K 程度の温度であってよい。

[0066] 本実施形態では、演算ユニット群は、同一の基板 3 1 0 上に形成されている複数の演算ユニットを含む。演算ユニットは、超伝導材料を含み、超伝導状態で量子効果又は熱的効果を用いた演算を実行する。より具体的には、演算ユニットは、演算ユニットの温度が超伝導材料の超伝導転移温度以下である場合に、量子アニーリング等を用いた演算を実行できる。演算ユニットには、読み出し回路が接続されており、演算結果等が適宜読み出される。読み出し回路は、例えば、基板 3 1 0 に形成されている。なお、演算ユニットは、量子アニーリングに限らず、例えば、イオントラップ、コヒーレントイジングマシン、量子ゲート素子、量子ドット、NV (nitrogen vacancy) センター及びトポロジカル絶縁体 (majorana fermion) 等の少なくともいずれかを利用してよい。

[0067] 本実施形態では、基板 3 1 0 上には、汎用の演算ユニットである汎用演算ユニット 3 1 2 と、特定の用途のための演算ユニットである特定演算ユニット 3 1 8 とが形成されている。すなわち、本実施形態では、演算ユニット群は、汎用演算ユニット及び特定演算ユニットを含む。汎用演算ユニット 3 1

2 及び特定演算ユニット 3 1 8 のそれぞれが演算を実行する際には、汎用演算ユニット 3 1 2 及び特定演算ユニット 3 1 8 のそれぞれの温度は、基板 3 1 0 の温度と同一になっているものとする。

[0068] 汎用演算ユニット 3 1 2 及び特定演算ユニット 3 1 8 のそれぞれは、測定装置 2 0 に電氣的に接続されている。具体的には、汎用演算ユニット 3 1 2 及び特定演算ユニット 3 1 8 のそれぞれは、同軸ケーブル又はツイストペアケーブルを通じて、測定装置 2 0 の第 1 スイッチ 2 2 0 及び第 2 スイッチ 2 2 2 に接続されている。なお、第 1 スイッチ 2 2 0 及び第 2 スイッチ 2 2 2 は、便宜的に示したものであり、汎用演算ユニット 3 1 2 及び特定演算ユニット 3 1 8 のそれぞれに接続された同軸ケーブル又はツイストペアケーブル等、電気信号を伝搬するための配線は、測定装置 2 0 に直接接続されていても良い。

[0069] 汎用演算ユニット 3 1 2 は、例えば、量子ゲート素子等を備えた回路であってよい。この場合、1 枚の基板 3 1 0 を図示しているが、複数の基板が積層していてもよく、複数の基板が貼り合わせられてもよい。このとき、インターポーザあるいは T S V (Through Silicon Via) 及びバンプを用いた構成等の各種の構成が実現され得る。

[0070] 特定演算ユニット 3 1 8 は、特定の用途に適した回路構成を備えてよい。例えば、特定演算ユニット 3 1 8 は、解く問題に対応するハミルトニアン of the 形を実装することに適した回路構成を備えてよい。この場合、特定演算ユニット 3 1 8 が備える回路構成は、例えば、量子ビットで構成された複数の格子 (例えば、図 4 に示したような格子) を含んでよい。このとき、特定演算ユニット 3 1 8 を構成する複数の量子ビットの間の結合及び格子の間の結合には、固定結合が利用されてもよい。すなわち、特定演算ユニット 3 1 8 を構成する複数の量子ビットの間の結合及び格子の間の結合は、固定されており、変更できない結合であってもよい。

[0071] 特定演算ユニット 3 1 8 の用途は、例えば、論理演算 (例えば、N O R 演算、N A N D 演算、O R 演算及び A N D 演算等)、乗算、因数分解、タンパ

ク質構造解析、ナップザック最適化問題及びポートフォリオ最適化問題等の各種の用途であってよい。

[0072] 図4は、本実施形態に係る汎用演算ユニット312の概略構成図である。本実施形態に係る汎用演算ユニット312は、4つの格子（第1格子313、第2格子314、第3格子315、第4格子316）により構成されたキメラグラフを備える。それぞれの格子は、縦及び横に4つの量子ビットが並べられた構成を有している。なお、図4には、4つの格子が示されているが、汎用演算ユニット312が備える格子の数は3つ以下であってもよいし、5つ以上であってもよい。

[0073] 具体的に説明すると、それぞれの格子は、横に伸びている4つの第1量子ビット301と、縦に伸びている4つの第2量子ビット302と、16個の可変結合器303を備えている。可変結合器303は、1つの第1量子ビット301と1つの第2量子ビット302との結合するもので、その結合は適宜調整され得る。可変結合器303による結合に応じて、第1量子ビット301と第2量子ビット302とが相互作用する。

[0074] なお、それぞれの格子が備える4つの第1量子ビット301のそれぞれは、別個の量子ビットとして機能する。各第1量子ビット301は、可変結合器により他の量子ビットに接続され、他の量子ビットとの相互作用を有している。また、それぞれの格子が備える4つの第2量子ビット302のそれぞれは、別個の量子ビットとして機能する。各第2量子ビット302は、可変結合器により他の量子ビットに接続され、他の量子ビットとの相互作用を有している。

[0075] また、それぞれの量子ビットの端部は、他の格子に含まれる対面する量子ビットの端部と接続され得る。例えば、第1格子313に含まれる左端の第2量子ビット302の端部305は、第3格子315に含まれる左端の第2量子ビットの端部306と接合され得る。このように量子ビット同士が接続されることにより複数の格子が接続され、複数の格子を用いた演算が実現される。

[0076] 汎用演算ユニット312において演算が実行される際には、演算内容に応じて、使用される格子の数が適宜調整される。例えば、演算内容が3つの量子ビットを必要とする内容である場合には、1つの格子が使用される。また、演算内容が7つの量子ビットを必要とする内容である場合には、例えば4つの格子が使用される。

[0077] 本実施形態では、汎用演算ユニット312はキメラグラフを用いた演算を実行するが、キメラグラフを用いた演算では、ユーザにより解くべき問題に応じたハミルトニアンが設定され、そのハミルトニアンがキメラグラフにマッピングされる。例えば、設定されるハミルトニアン H_1 が、 $H_1 = \sum_{n=3} J_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum h_i \sigma_j$ で表される場合には、3つの量子ビットが必要となるため、1つの格子が用いられる。また、設定されるハミルトニアン H_2 が、 $H_2 = \sum_{n=7} J_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum h_i \sigma_j$ で表される場合には、例えば7つの量子ビットが必要となるため、3つの格子が用いられる。ここで、 σ_i はサイトiのスピン、 h_i はサイトiの磁場、 J_{ij} はサイトi及びサイトjのスピン相互作用、nは全サイト数を示している。

[0078] また、汎用演算ユニット312は、1つ又は複数（例えば3つ）のLUT（Look Up Table）を含み、所望の演算を実行できる構成を含んでも良い。汎用演算ユニット312が複数のLUTを含む場合、複数のLUTのうちの少なくとも2つのLUTが互いに接続されてよい。このとき、選択部124によって汎用演算ユニット312が選択された後、表示部105に演算内容を指定するための画面が表示され、演算内容をユーザにより設計するモードが選択されてよい。演算内容に応じたLUTの接続方法（複数のLUTの間の接続方法）をユーザが設定することで、指示部126が汎用演算ユニット312に演算の実行を指示し、汎用演算ユニット312で演算が実行されることとなる。

[0079] 図5は、本実施形態に係るコンピュータシステム1による処理の流れを示すフローチャートである。

[0080] まず、入力部110は、ユーザの操作に基づき、演算内容の入力を受け付

ける（ステップS 1 0 1）。次いで、取得部 1 2 2 は、ステップS 1 0 1 において受け付けられた演算内容を取得する（ステップS 1 0 3）。

[0081] 次いで、選択部 1 2 4 は、ステップS 1 0 3 において取得された演算内容に合致する用途の特定演算ユニットがあるか否かを判定する（ステップS 1 0 5）。選択部 1 2 4 が、演算内容に合致する用途の特定演算ユニットがないことを判定した場合（ステップS 1 0 5：NO）、ステップS 1 0 7 に進む。一方、選択部 1 2 4 が、演算内容に合致する用途の特定演算ユニットがあることを判定した場合（ステップS 1 0 5：YES）、ステップS 1 0 9 に進む。

[0082] ステップS 1 0 5 においてNOと判定されると、選択部 1 2 4 は、演算ユニット群から汎用演算ユニットを選択する（ステップS 1 0 7）。一方、ステップS 1 0 5 においてYESと判定されると、選択部 1 2 4 は、演算ユニット群から演算内容に合致する用途の特定演算ユニットを選択する（ステップS 1 0 9）。

[0083] ステップS 1 0 7 又はステップS 1 0 9 において選択部 1 2 4 が演算ユニットを選択すると、指示部 1 2 6 は、選択された演算ユニットによる演算の実行の指示を生成する（ステップS 1 1 1）。次いで、通信部 1 3 0 は、通信ネットワーク 1 5 を介して、選択された演算ユニットによる演算の実行の指示を測定装置 2 0 に送信する（ステップS 1 1 3）。次いで、測定装置 2 0 の通信部 2 0 0 は、指示を受信し、実行部 2 1 2 は、受信した指示に基づいて、選択された演算ユニットに演算を実行させる（ステップS 1 1 5）。これにより、冷凍機 3 0 に配置される演算ユニットにおいて、演算内容に応じた演算が実行される。演算ユニットにより演算が実行されると、図 5 に示す処理が終了する。なお、ここでは記載を省略しているが、演算結果は、測定装置 2 0 の状態観測（状態読出し）を担う測定機器（図示しない。）によって観測され、通信ネットワーク 1 5 を介して、制御装置 1 0 に送信されてよい。さらに、演算結果は、表示部 1 0 5 に表示されたり、記憶部 1 0 0 に記憶されたりしてもよい。

[0084] <実施例1>

実施例1では、冷凍機30に2つの演算ユニットを配置して実験を行った。本実施例では、2つの演算ユニットは、NOR演算を実行する演算ユニット（以下、「NORユニット」とも称する。）及び乗算を実行する演算ユニット（以下、「乗算器ユニット」とも称する。）である。本実施例では、NORユニット及び乗算器ユニットのそれぞれを、冷凍機30において10mKまで冷却し、超伝導状態でNORユニット及び乗算器ユニットのそれぞれに演算を実行させた。本実施例では、演算ユニットの選択（NORユニット又は乗算器ユニットの選択）及び演算ユニットによる演算の実行の指示等には、制御装置10に搭載されたソフトウェア「LabVIEW（登録商標）」を用いた。

[0085] 図6は、実施例1において、NORユニットにNOR演算を実行させた結果を示す図である。本実施例では、入力(0, 0)、(0, 1)、(1, 0)及び(1, 1)のNOR演算を、NORユニットにそれぞれ1000回ずつ実行させた。図6には、4つの演算結果のグラフが示されており、上から順に入力(0, 0)、(0, 1)、(1, 0)及び(1, 1)の演算結果が示されている。図中のX及びYは、入力(X, Y)を示しており、Sは演算結果を示している。また、グラフの横軸は、(X, Y, S)を示しており、縦軸は演算結果のカウント数を示している。図6に示すように、いずれの演算においても、正しい演算結果が一番多くカウントされている。したがって、本実施例では、NORユニットにおいて、適切に演算が実行されたといえる。

[0086] 次いで、図7及び図8を参照して、乗算器ユニットによる演算結果について説明する。図7は、実施例1における乗算器ユニットの演算内容を説明するための図である。図7に示すX、Y、Z及びDのそれぞれは、乗算器ユニットの入力に対応している。また、C及びSは、乗算器ユニットの演算結果に対応している。図7に示す回路は、乗算器ユニットの入力及び出力の関係を模試的に示したものであり、X、Y、Z、D、C及びSのそれぞれは、量

子ビット（ $Q_1 \sim Q_6$ ）により実現される。

[0087] 図8は、実施例1において乗算器ユニットに乗算を実行させた結果を示す図である。図8には、入力（ X, Y, Z, D ）に対する演算結果（ C, S ）が示されている。本実施例では、乗算器ユニットに、（0, 0, 0, 0）～（1, 1, 1, 1）を入力とする乗算を実行させた。図8に示すように、いずれの演算においても、適切な演算結果が得られていることが分かる。

[0088] 本実施例では、NORユニット及び乗算器ユニットの2つの演算ユニットから構成される演算ユニット群から、演算内容に応じた演算ユニットを選択して、選択した演算ユニットに演算を実行させた。その結果、いずれの演算ユニットにおいても、適切に演算が実行された。

[0089] <実施例2>

実施例2では、実施例1においてNORユニット及び乗算器ユニットのそれぞれが実行した演算を模擬するシミュレーションを行った。

[0090] まず、NORユニットによる演算を模擬したシミュレーションを行った。具体的には、3つの量子ビットを形成するループのそれぞれに対応する回路を用意して、それぞれの回路に各々並走する部分を有する電流線路へ電流（ I_{h1}, I_{h2}, I_{h3} ）を流して磁束を発生させ、3つの量子ビットの各ループへ臨界電流を誘起させた。各量子ビットは、演算結果（それぞれのループを流れる臨界電流 I_{q1}, I_{q2}, I_{q3} ）がNORの関係となるように相互作用を有している。この回路シミュレーションでは、 I_{h1}, I_{h2}, I_{h3} によって各量子ビットに異なる臨界電流が流れることとなる。換言すれば、 I_{h1} と I_{h2} とが流れることで誘起される磁束でNORユニットの入力を生じさせ、 I_{h3} は出力を観測するための電流を誘起する磁束を与えているともいえる。そして、それぞれの量子ビットのループに結合している読み出し回路を介して、それぞれの量子ビットのループを流れる電流（以下では、単に「量子ビットの電流」とも称する。）の値が閾値を超えているか否かに基づき、量子ビットの状態（0又は1）を計測した。

[0091] 図9は、実施例2におけるシミュレーションにおいて、3つの回路に流し

た電流 (I_{h1} , I_{h2} 及び I_{h3}) を示す図である。0～50 ns では (1, 1, 0) の演算、50～100 ns では (1, 0, 0) の演算をシミュレーションしている。0～50 ns では、(1, 1, 0) の演算が実現されるように電流 I_{h1} , I_{h2} , I_{h3} を3つの量子ビットに並走する部分を有する各電流線路へ流した。50～100 ns では、(1, 0, 0) の演算が実現されるように電流 I_{h1} , I_{h2} , I_{h3} を3つの量子ビットに並走する部分を有する各電流線路へ流した。

[0092] 図10は、実施例2におけるシミュレーションにおいて、3つの量子ビットのループに流れる電流を示す図である。図10に示す3つのグラフは、左から順に I_{h1} , I_{h2} 及び I_{h3} の電流が流れる回路に対応する量子ビットの電流 I_{q1} , I_{q2} 及び I_{q3} を示すグラフである。本実施例では、0 μ A を閾値として、量子ビットの状態 (0 又は 1) を計測した。具体的には、量子ビットの電流値が0 μ A より低い場合には、その量子ビットを1として計測し、量子ビットの電流値が0 μ A 以上である場合には、その量子ビットを0として計測した。図10から各量子ビットの状態を読み取ると、0～50 ns では3つの量子ビットの状態は (1, 1, 0) となり、50～100 ns では3つの量子ビットの状態は (1, 0, 0) となっていることが分かる。したがって、NORユニットの演算を適切に再現できていることが分かる。なお、本実施例では、シミュレーションの時間を短縮するために ns のオーダーで演算をシミュレーションしたが、 μ s のオーダーで演算をシミュレーションした場合においても、NORユニットの演算を適切に再現できることは確認済みである。

[0093] 図11は、実施例2において、乗算器ユニットの演算を再現するシミュレーションを行った結果を示す図である。上の段のグラフは、左から順に Q1～Q3 の量子ビットの状態を示し、下の段のグラフは左から順に Q4～Q6 の量子ビットの状態を示している。ここでは量子ビットの状態を読みだした時に、量子ビットの状態が1であれば正の電圧が出力されるような演算を行った。ここで、図11に示す Q1～Q6 は、図7に示した Q1～Q6 に対応

している。すなわち、Q 1 ～ Q 4 が入力であり、Q 5 及び Q 6 が演算結果である。実施例 2 では、0 ～ 50 ns では (1, 1, 1, 1) を入力とする演算、50 ns ～ 100 ns では (1, 0, 1, 1) を入力とする演算のシミュレーションを行った。図 11 を参照すると、演算結果は、0 ～ 50 ns では (1, 1) となり、50 ns ～ 100 ns では (1, 0) となっており、乗算を適切に再現できていることが分かる。なお、本実施例では、シミュレーションの時間を短縮するために ns のオーダーで演算をシミュレーションしたが、 μ s のオーダーで演算をシミュレーションした場合においても、乗算器ユニットの演算を適切に再現できることは確認済みである。

[0094] <効果>

本実施形態によれば、コンピュータシステム 1 は、演算ユニット群から演算ユニットを選択して、選択した演算ユニットに演算を実行させる。これにより、量子コンピュータの回路構成における演算内容に応じた再構成の必要性が低減される。

[0095] また、本実施形態によれば、演算ユニット群は、汎用演算ユニットに加えて、特定演算ユニットを含む。このため、汎用演算ユニットに機能をマッピングして目的の回路を作る際に必要となる余剰ビットが不要となる。

[0096] また、本実施形態によれば、指示部 126 は、演算ユニットに実行させる演算回数を指示することができる。このとき、演算回数が増加することによる消費電力量の増加量は、古典コンピュータにおける消費電力量の増加量と比べて低減され得る。

[0097] また、本実施形態によれば、取得部 122 により取得された演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットがある場合には、その特定演算ユニットが選択され、演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットがない場合には、汎用演算ユニットが選択される。これにより、演算内容に合致する用途の特定演算ユニットがない場合にも、適切な演算ユニット（例えば、汎用演算ユニット）が選択される。

[0098] また、本実施形態によれば、選択部 124 により選択された複数の演算ユ

ニットのそれぞれが、演算を実行する。これにより、より効率よく演算が実行され得る。

[0099] また、本実施形態によれば、コンピュータシステム 1 は、複数の演算ユニットによる演算を同期させることもできる。このとき、量子コンピュータはアナログ式であるため、本実施形態に係るコンピュータシステム 1 では、古典コンピュータにおける同期のように、クロックに同期させた演算設計を行う必要がない。

[0100] また、本実施形態によれば、コンピュータシステム 1 は、複数の演算ユニットによる演算を非同期にすることもできる。これにより、複数の演算ユニットのそれぞれの演算を、より自由なタイミングで実行させることが可能になる。

[0101] また、本実施形態によれば、演算ユニット群は、同一の基板 310 上に形成されている複数の演算ユニットを含む。このため、設計が容易となったり、同一の基板 310 上に形成されている複数の演算ユニットの配線の引き回しが容易となったりする。また、複数の演算ユニットが同一の基板上に形成されることにより、それぞれの演算ユニットのレイテンシーあるいは演算のタイミングのずれ等が向上する。

[0102] [第 1 変形例]

上記実施形態では、1つの基板上に演算ユニット群を構成する全ての演算ユニットが形成されるものとして説明した。これに限らず、演算ユニット群は、互いに異なる基板上に形成されている複数の演算ユニットを含んでよい。

[0103] 図 12 は、第 1 変形例に係る 2 つの基板（第 1 基板 320 及び第 2 基板 322）の構成を示す図である。第 1 基板 320 には、汎用演算ユニット 312 が形成されている。また、第 2 基板 322 には、3 つの特定演算ユニット 324、326 及び 328 が形成されている。本実施形態では、汎用演算ユニット 312 及び 3 つの特定演算ユニット 324、326 及び 328 が演算ユニット群を構成している。

- [0104] 本実施形態では、記憶部 100 に記憶されているテーブルには、3つの特定演算ユニット 324, 326 及び 328 を示す情報のそれぞれに、それぞれの用途を示す情報が対応付けられている。選択部 124 は、テーブルを参照して、演算内容に合致する用途の特定演算ユニットを選択できる。このとき、選択部 124 は、複数の特定演算ユニットを選択することができる。あるいは、選択部 124 は、汎用演算ユニット 312 及び少なくとも 1つの特定演算ユニットを選択することもできる。
- [0105] また、本実施形態では、実行部 212 は、複数の特定演算ユニットのそれぞれに演算を実行させることができる。例えば、実行部 212 は、1つの特定演算ユニットがタンパク質を解析する演算を実行させている際に、別の特定演算ユニットに因数分解の演算を実行させてよい。
- [0106] 本実施形態によれば、演算ユニット群が、互いに異なる用途のための複数の特定演算ユニットを備えている。さらに、選択部 124 は、演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを選択できる。これにより、複数の特定演算ユニットの中で、より演算内容に合致した用途の特定演算ユニットが選択される。この結果、より適切な演算が実行される。
- [0107] また、本実施形態によれば、演算ユニット群は、互いに異なる基板上に形成されている複数の演算ユニットを含む。このため、基板に形成された演算ユニットの特性等に応じて、それぞれの基板を所望の位置に配置することが可能となる。
- [0108] 本実施形態では、演算ユニット群を構成する複数の演算ユニットが2つの基板に配置されるものとして説明した。これに限らず、演算ユニット群を構成する複数の演算ユニットは、3つ以上の基板に配置されてもよい。
- [0109] また、本実施形態では、第2基板 322 には、3つの特定演算ユニットが形成されるものとして説明したが、1つの基板に4つ以上の特定演算ユニットが形成されてもよいし、2つ以下の特定演算ユニットが形成されてもよい。また、1つの基板には、2つ以上の汎用演算ユニットが配置されてもよい。

[0110] [第2変形例]

第1変形例では、複数の基板のそれぞれに演算ユニットが形成される例について説明した。冷凍機30において複数の基板が配置される場合には、それぞれの基板が異なる温度領域に配置されてもよい。

[0111] 図13は、第2変形例に係る冷凍機30の内部構成を示す図である。冷凍機30には、2つの基板（第1基板330及び第2基板334）が異なる温度領域に配置されている。第1基板330には、量子アニーリング素子を備えた第1演算ユニット332が形成されており、第2基板334には、量子ゲート素子を備えた第2演算ユニット336が形成されているものとする。

[0112] ここでは、冷凍機30の内部構成は、上から下に向かうにつれて徐々に温度が低くなる設計となっているものとする。すなわち、冷凍機30の内部において、位置が低くなるほど、温度が低くなっている。

[0113] 本実施形態では、第1演算ユニット332及び第2演算ユニット336は、互いに異なる温度の基板上に形成されている。すなわち、第1基板330及び第2基板334のそれぞれは、互いに異なる温度領域に設けられたステージ（図示しない。）に張り付けられている。この結果、第1基板330及び第2基板334の温度は、互いに異なる温度になっており、第1演算ユニット332及び第2演算ユニット336の温度も、互いに異なる温度になっている。なお、第1演算ユニット332及び第2演算ユニット336の温度は、それぞれの演算ユニットが演算を実行する際にも、互いに異なる温度になっている。

[0114] また、本実施形態では、第2基板334は、第1基板330よりも低い位置に配置されている。このため、第2基板334の温度は、第1基板330の温度よりも低くなっている。この結果、第2演算ユニット336の温度は、第1演算ユニット332の温度よりも低くなっている。

[0115] より詳細に説明すると、第1基板330は、0.1K程度の温度領域のステージに張り付けられている。このため、第1基板330及び第1演算ユニット332の温度は0.1K程度の温度になっている。このため、第1演算

ユニット 332 が備える量子アニーリング素子は超伝導状態となり、量子アニーリング素子に量子効果が現れる。このとき、第 1 演算ユニット 332 は、超伝導状態の量子効果又は熱的效果を用いた演算を実行できるため、演算に適した温度の第 1 基板 330 上に形成されているといえる。

[0116] 一方、第 2 基板 334 は、10 mK 未満の温度領域のステージに張り付けられている。第 2 基板 334 上に形成されている第 2 演算ユニット 336 は、量子ゲート素子を備えており、10 mK 未満の温度では、超伝導状態の量子効果又は熱的效果を用いた演算を実行できる。このため、第 2 演算ユニット 336 は、演算に適した温度の第 2 基板 334 上に形成されているといえる。

[0117] 冷凍機 30 の内部では、10 mK の温度領域の設置面積には限りがある。第 2 演算ユニット 336 のような演算ユニットは、10 mK の温度領域に配置される必要がある。そこで、10 mK よりも高い温度（例えば、0.1 K）において適切に演算を実行可能な第 1 演算ユニット 332 を 10 mK よりも高い温度領域に配置することにより、冷凍機 30 の内部の空間を効率よく活用することが可能となる。

[0118] なお、10 mK の温度領域には、量子ビットとしてユニタリー操作が可能な Si の量子ドット素子等が配置されてもよい。また、10 mK の温度領域には、トポロジカル絶縁体等、組み紐理論を利用するような異なる量子計算方法の素子等が配置されても良い。

[0119] また、本実施形態では、互いに異なる温度の基板上に形成されている演算ユニットの数が 2 つであるものとして説明した。これに限らず、互いに異なる温度の基板上に形成されている演算ユニットの数は、3 つ以上であってもよい。

[0120] [第 3 変形例]

上記実施形態では、1 つの測定装置 20 が演算ユニットに演算を実行させるものとして説明した。これに限らず、2 つ以上の測定装置が演算ユニットに演算を実行させてもよい。

- [0121] 図14は、第3変形例に係る2つの測定装置（第1測定装置22及び第2測定装置24）と、基板340との構成を示す図である。図14では、冷凍機が省略されている。第1測定装置22及び第2測定装置24のそれぞれは、図3に示した測定装置20と実質的に同一の機能を有しており、制御装置10に通信可能に接続されているものとする。
- [0122] 基板340には、2つの演算ユニット（第1演算ユニット342及び第2演算ユニット344）が形成されている。第1演算ユニット342は、第1測定装置22に接続されており、第2演算ユニット344は、第2測定装置24に接続されている。したがって、第1測定装置22は、第1演算ユニット342に演算を実行させることができ、第2測定装置24は、第2演算ユニット344に演算を実行させることができる。
- [0123] このとき、第1測定装置22及び第2測定装置24は、第1演算ユニット342及び第2演算ユニット344により実行される演算が同期するように、第1演算ユニット342及び第2演算ユニット344のそれぞれに演算を実行させることができる。例えば、第1測定装置22及び第2測定装置24にトリガーとなる信号が入力され得る。このとき、第1測定装置22及び第2測定装置24は、そのトリガーに応じて第1演算ユニット342及び第2演算ユニット344に演算を実行させる。これにより、第1演算ユニット342及び第2演算ユニット344により実行される演算が同期する。トリガーとなる信号は、例えば、制御装置10の指示部126により生成され、第1測定装置22及び第2測定装置24に送信されてよい。
- [0124] なお、第1測定装置22及び第2測定装置24は、第1演算ユニット342及び第2演算ユニット344により実行される演算が非同期となるように、第1演算ユニット342及び第2演算ユニット344のそれぞれに演算を実行させることもできる。
- [0125] 本実施形態では、測定装置の数が2つである場合を例示したが、測定装置の数は3つ以上であってよい。また、1つの測定装置に接続される演算ユニットの数は2つ以上であってもよい。

[0126] [第4変形例]

上記実施形態では、いずれの演算ユニットも冷凍機30において超伝導状態で演算を実行するものとして説明した。演算ユニットは、超伝導状態で演算を実行するデバイスに限らず、例えば、室温において演算を実行可能なデバイス等であって良い。

[0127] 図15は、第4変形例に係るコンピュータシステム2の概略構成図である。コンピュータシステム2は、図1を用いて説明したコンピュータシステム1が備える制御装置10、測定装置20及び冷凍機30に加えて、演算装置40を備える。

[0128] 演算装置40は、制御装置10による指示に応じて、超伝導状態に依らない各種の演算を実行する。本実施形態では、演算装置40は、例えば室温において演算を実行できるものとする。演算装置40は、通信部400、実行部410及び演算部420を備える。

[0129] 通信部400は、制御装置10を他の機器に接続するインターフェースである。通信部400は、LAN、WAN又はインターネット等の通信ネットワークに接続されてよい。また、通信部400は、USBケーブル又はGPIBケーブル等によって他の装置（例えば制御装置10等）に接続されてもよい。通信部400は、各種の情報を送受信できる。例えば、通信部400は、制御装置10による演算ユニットの演算の指示を受信できる。通信部400は、受信した情報を実行部410に伝達する。

[0130] 実行部410は、例えば、ROM、RAM及びCPU等を備えるマイクロコンピュータ等を含んでよい。また、実行部410は、測定装置20が備える実行部212が有する各種の構成を有してよい。

[0131] 実行部410は、演算ユニットに各種の演算を実行させる。具体的には、制御装置10による指示に基づいて、演算部420が備える各種の演算ユニットに演算を実行させる。

[0132] 演算部420は、各種の演算ユニットを備え、実行部410による制御に応じて、各種の演算を実行する。演算部420が備える演算ユニットは、汎

用演算ユニットであってもよいし、特定演算ユニットであってもよい。

[0133] 演算ユニットは、例えば、論理演算を効率よく実行できるＬＵＴベースのＦＰＧＡ（Field-Programmable Gate Array）、ワークステーション、光コヒーレントイジングマシン、ＡＳＩＣ（Application Specific Integrated Circuit）により機能するイジングマシン等であってもよい。ここで、ＦＰＧＡは、汎用演算ユニットとして用いられてもよいし、特定演算ユニットとして用いられてもよい。また、演算ユニットは、ＦＰＧＡに非ノイマン型コンピューティング（例えば、イジングマシン及び機械学習等）を実装したデバイスを含んでよい。また、演算ユニットは、シミュレーテッドアニーリング等の演算を実行してもよい。さらに、演算ユニットは、上述したＮＯＲユニット等の超伝導状態で演算を実行する各種の演算ユニットの演算をシミュレーションする回路シミュレータであってもよい。

[0134] 演算装置４０が備える演算ユニットと冷凍機３０に配置された演算ユニットとは、特定演算ユニットのみの組み合わせであってもよいし、特定演算ユニットと汎用演算ユニットとの組み合わせであってもよいし、汎用演算ユニットのみの組み合わせであってもよい。

[0135] また、演算装置４０が備える特定演算ユニットは、ＩＰ（Intellectual Property）コアにおけるマクロの形態で提供され、演算の目的に応じた各種の回路により構成されてもよい。例えば、ＳＰＩＣＥ（Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis）と呼ばれる電子回路シミュレータにより回路が構成され、特定演算ユニットは、その回路による演算結果を出力してもよい。

[0136] [他の実施形態]

上記実施形態では、制御装置１０の外部に配置された演算ユニットにより各種の演算が実行されるものとして説明した。これに限らず、制御装置１０が演算ユニットを備え、その演算ユニットが演算を実行してもよい。この場合、選択部１２４は、制御装置１０が備える演算ユニットあるいは制御装置１０の外部に配置された演算ユニット（例えば、特定演算ユニット）を選択

することができる。例えば、選択部 124 は、演算内容に合致する用途の演算ユニットが制御装置 10 の外部に配置されている場合には、制御装置 10 の外部に配置された演算ユニットを選択できる。

[0137] 上記実施形態では、制御装置 10、測定装置 20 及び演算装置 40 が、主に通信ネットワーク 15 を介して互いに通信可能に接続されているものとして説明した。これに限らず、制御装置 10、測定装置 20 及び演算装置 40 は、通信ネットワーク 15 を介さずに通信可能に接続されてもよい。

[0138] 上記実施形態では、取得部 122 は、主に、演算内容を直接的に受け付けるものとして説明した。これに限らず、取得部 122 は、演算内容に関わる情報（例えば、ハミルトニアン等）に基づいて、演算内容を推定して取得してもよい。また、取得部 122 は、所定の演算内容を特定するプログラムに基づいて、演算内容を取得してもよい。

[0139] 以上説明した実施形態は、本発明の理解を容易にするためのものであり、本発明を限定して解釈するためのものではない。実施形態が備える各要素及びその配置、材料、条件、形状、サイズ等は、例示したものに限定されるわけではなく適宜変更することができる。また、異なる実施形態で示した構成同士を部分的に置換し又は組み合わせることが可能である。

符号の説明

[0140] 1, 2…コンピュータシステム、10…制御装置、100…記憶部、110…入力部、120…処理部、122…取得部、124…選択部、126…指示部、128…表示制御部、20…測定装置、210…制御部、212…実行部、214…スイッチ制御部、220…第1スイッチ、222…第2スイッチ、30…冷凍機、310…基板、312…汎用演算ユニット、318, 324, 326, 328…特定演算ユニット、40…演算装置、410…実行部、420…演算部

請求の範囲

- [請求項1] 演算内容を取得する取得部と、
 超伝導状態の量子効果又は熱的效果を用いた演算をそれぞれ実行する複数の演算ユニットを含む演算ユニット群と、
 前記演算内容に基づいて、前記演算ユニット群から演算ユニットを選択する選択部と、
 前記選択部により選択された演算ユニットに演算を実行させる実行部と、
 を備えるコンピュータシステム。
- [請求項2] 前記演算ユニット群は、汎用の演算ユニットである汎用演算ユニットと、特定の用途のための演算ユニットである特定演算ユニットとを含み、
 前記選択部は、前記演算ユニット群が前記演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを含まない場合には前記汎用演算ユニットを選択し、前記演算ユニット群が前記演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを含む場合には前記特定演算ユニットを選択する、
 請求項1に記載のコンピュータシステム。
- [請求項3] 前記演算ユニット群は、互いに異なる用途のための複数の特定演算ユニットを含み、
 前記選択部は、前記演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを選択する、
 請求項1に記載のコンピュータシステム。
- [請求項4] 前記演算ユニット群は、同一の基板上に形成されている複数の演算ユニットを含む、
 請求項1から3のいずれか一項に記載のコンピュータシステム。
- [請求項5] 前記演算ユニット群は、互いに異なる基板上に形成されている複数の演算ユニットを含む、

請求項 1 から 4 のいずれか一項に記載のコンピュータシステム。

[請求項6] 前記互いに異なる基板上に形成されている複数の演算ユニットは、互いに異なる温度の基板上に形成されている複数の演算ユニットを含み、

前記互いに異なる温度の基板上に形成されている複数の演算ユニットのそれぞれは、それぞれの演算ユニットによる演算に適した温度の基板上に形成されている、

請求項 5 に記載のコンピュータシステム。

[請求項7] 前記選択部は、前記演算ユニット群から複数の演算ユニットを選択し、

前記実行部は、前記選択部により選択された複数の演算ユニットのそれぞれに演算を実行させる、

請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載のコンピュータシステム。

[請求項8] 前記実行部は、前記選択部により選択された複数の演算ユニットのそれぞれにより実行される演算が非同期となるように、前記選択部により選択された複数の演算ユニットのそれぞれに演算を実行させる、請求項 7 に記載のコンピュータシステム。

[請求項9] 前記実行部は、前記選択部により選択された複数の演算ユニットのそれぞれにより実行される演算が同期するように、前記選択部により選択された複数の演算ユニットのそれぞれに演算を実行させる、請求項 7 に記載のコンピュータシステム。

[請求項10] 演算内容を取得する取得部と、

前記演算内容に基づいて、超伝導状態の量子効果又は熱的效果を用いた演算をそれぞれ実行する複数の演算ユニットを含む演算ユニット群から、演算ユニットを選択する選択部と、

を備える制御装置。

[請求項11] 前記演算ユニット群は、汎用の演算ユニットである汎用演算ユニットと、特定の用途のための演算ユニットである特定演算ユニットとを

含み、

前記選択部は、前記演算ユニット群が前記演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを含まない場合には前記汎用演算ユニットを選択し、前記演算ユニット群が前記演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを含む場合には前記汎用演算ユニットを選択する、

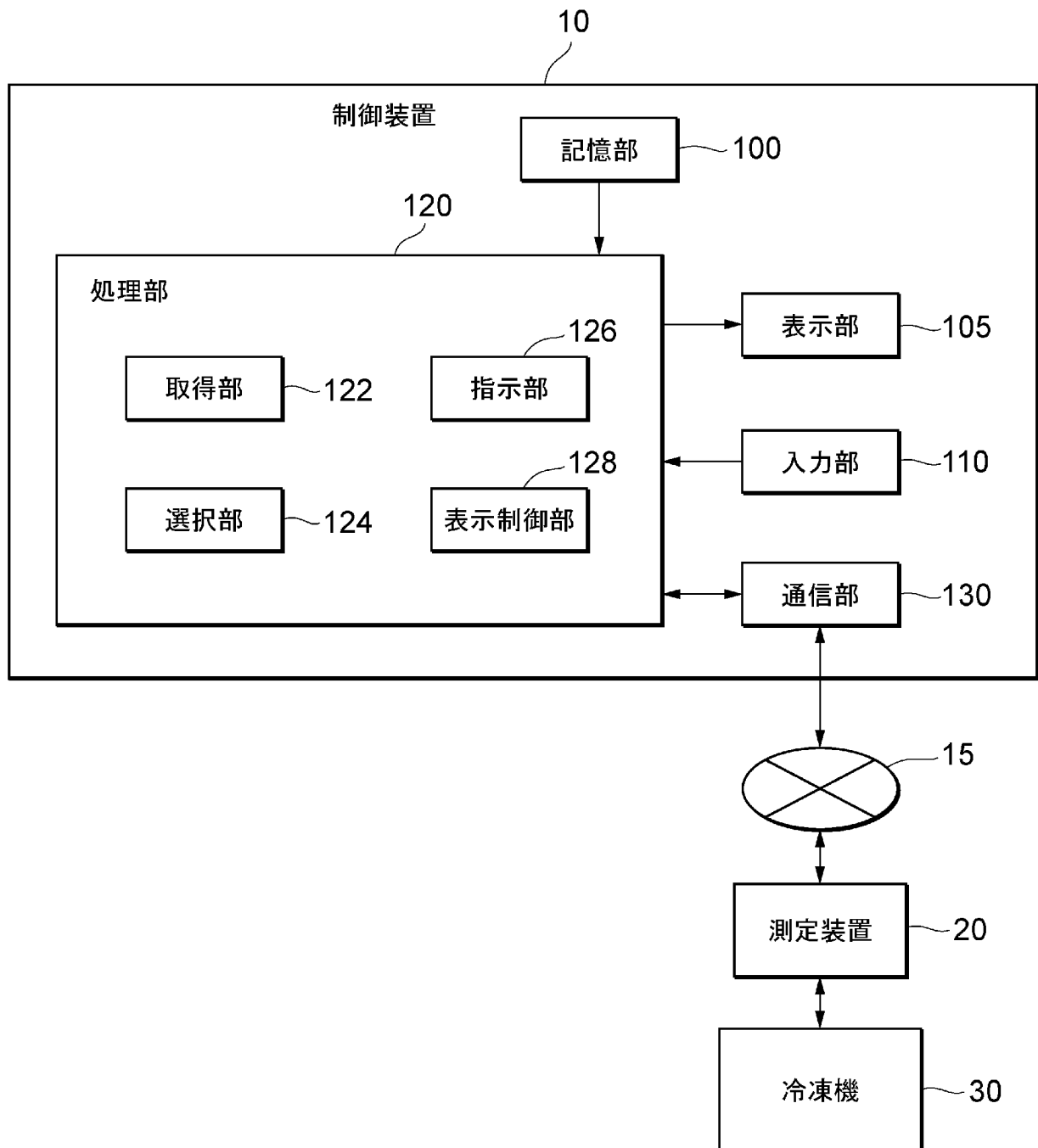
請求項 10 に記載の制御装置。

[請求項12] 前記演算ユニット群は、互いに異なる用途のための複数の特定演算ユニットを含み、

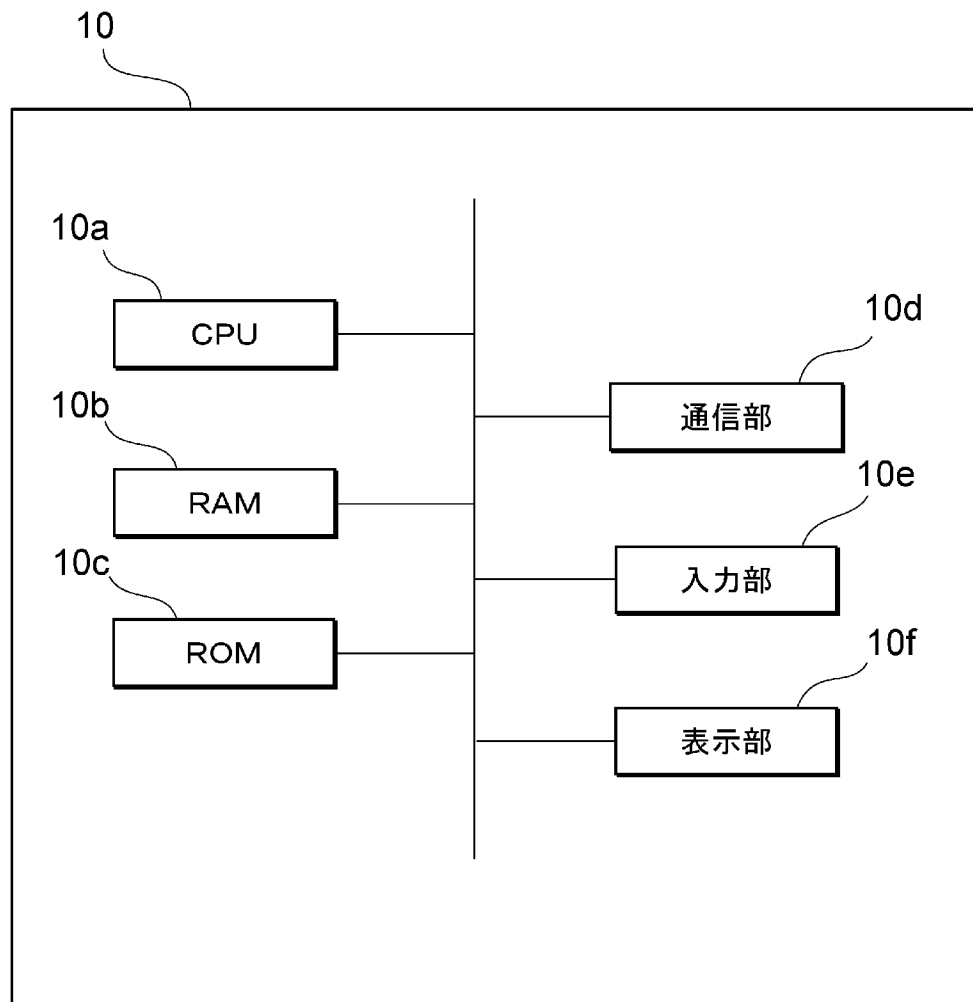
前記選択部は、前記演算内容に合致する用途のための特定演算ユニットを選択する、

請求項 10 に記載の制御装置。

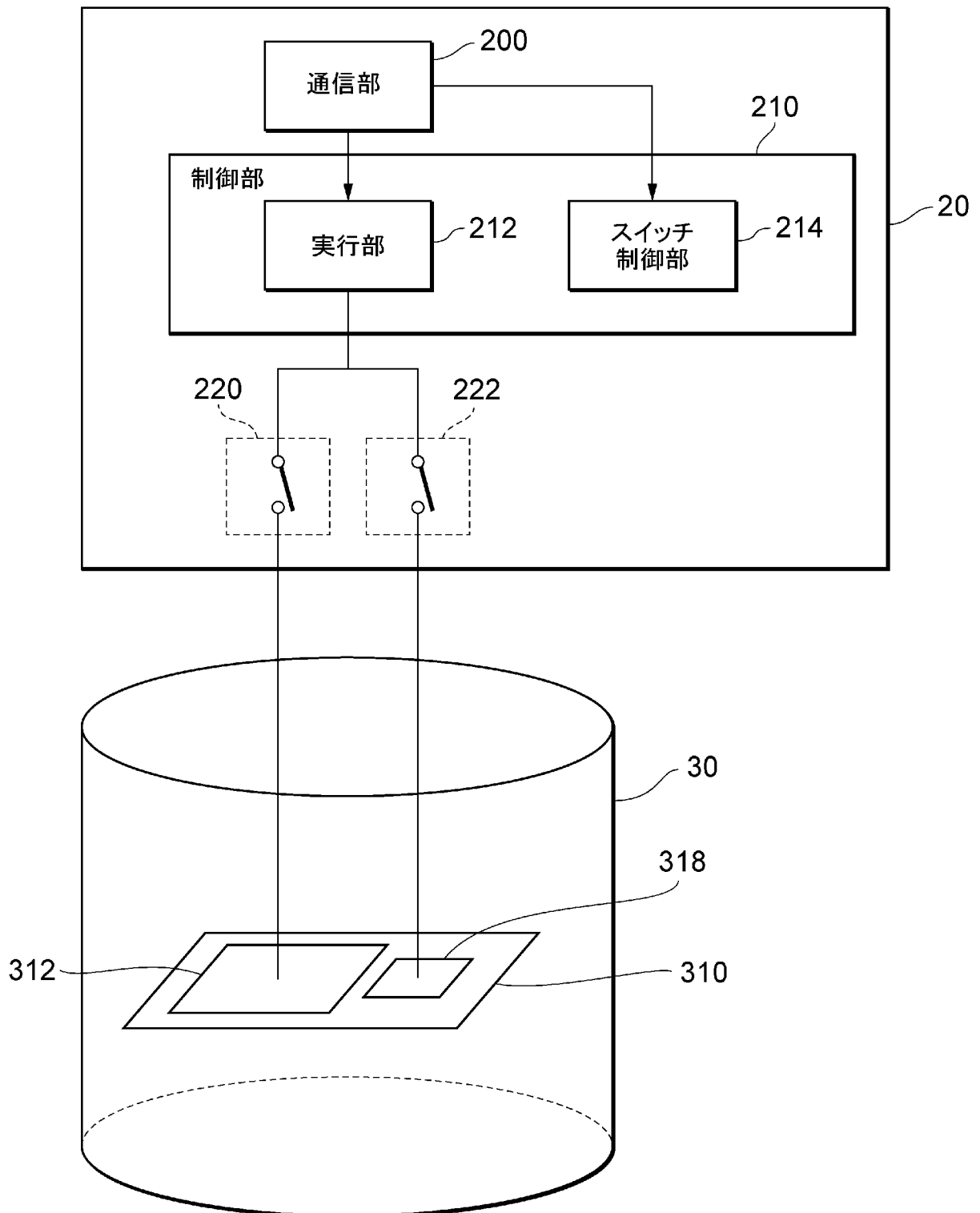
[図1]



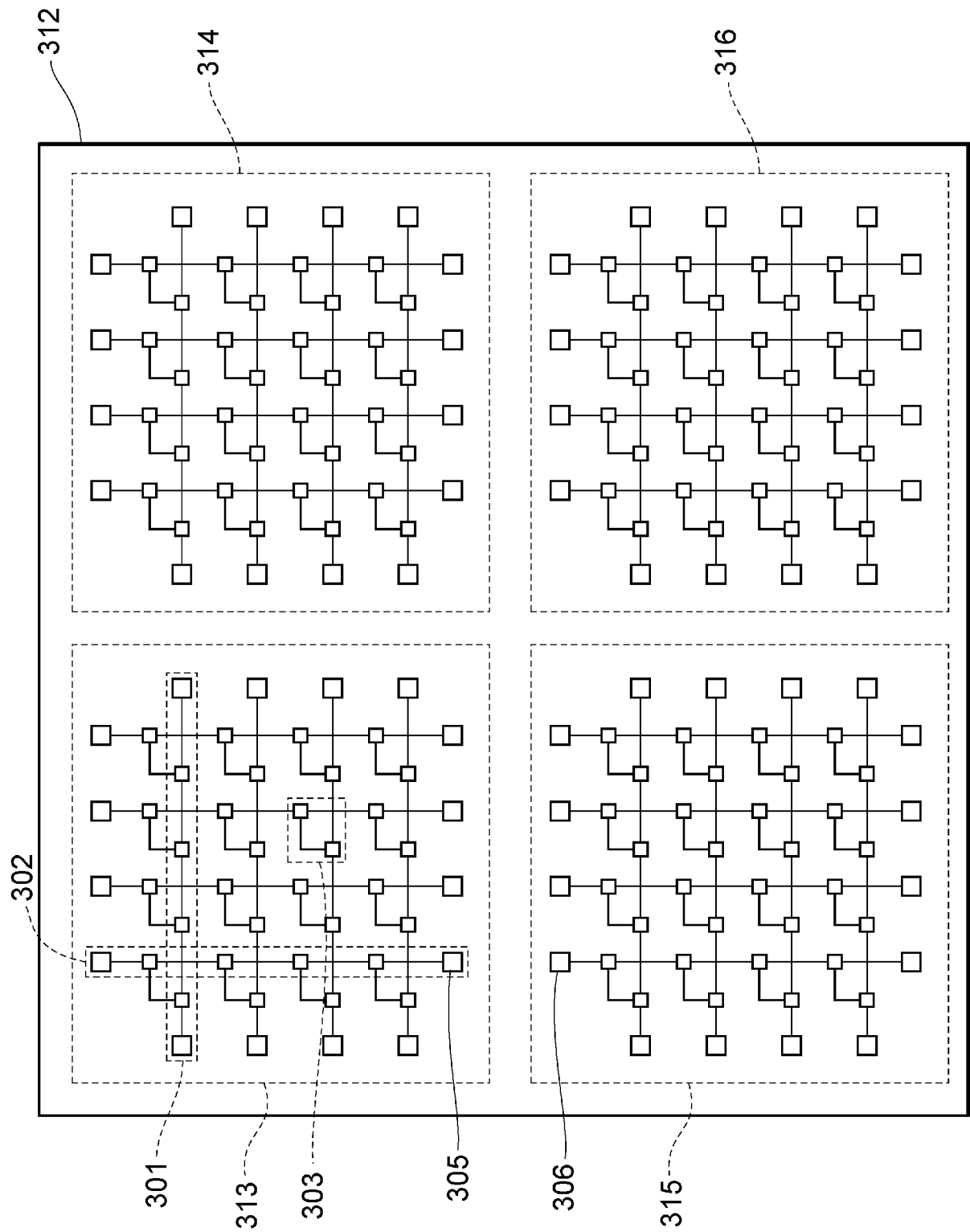
[図2]



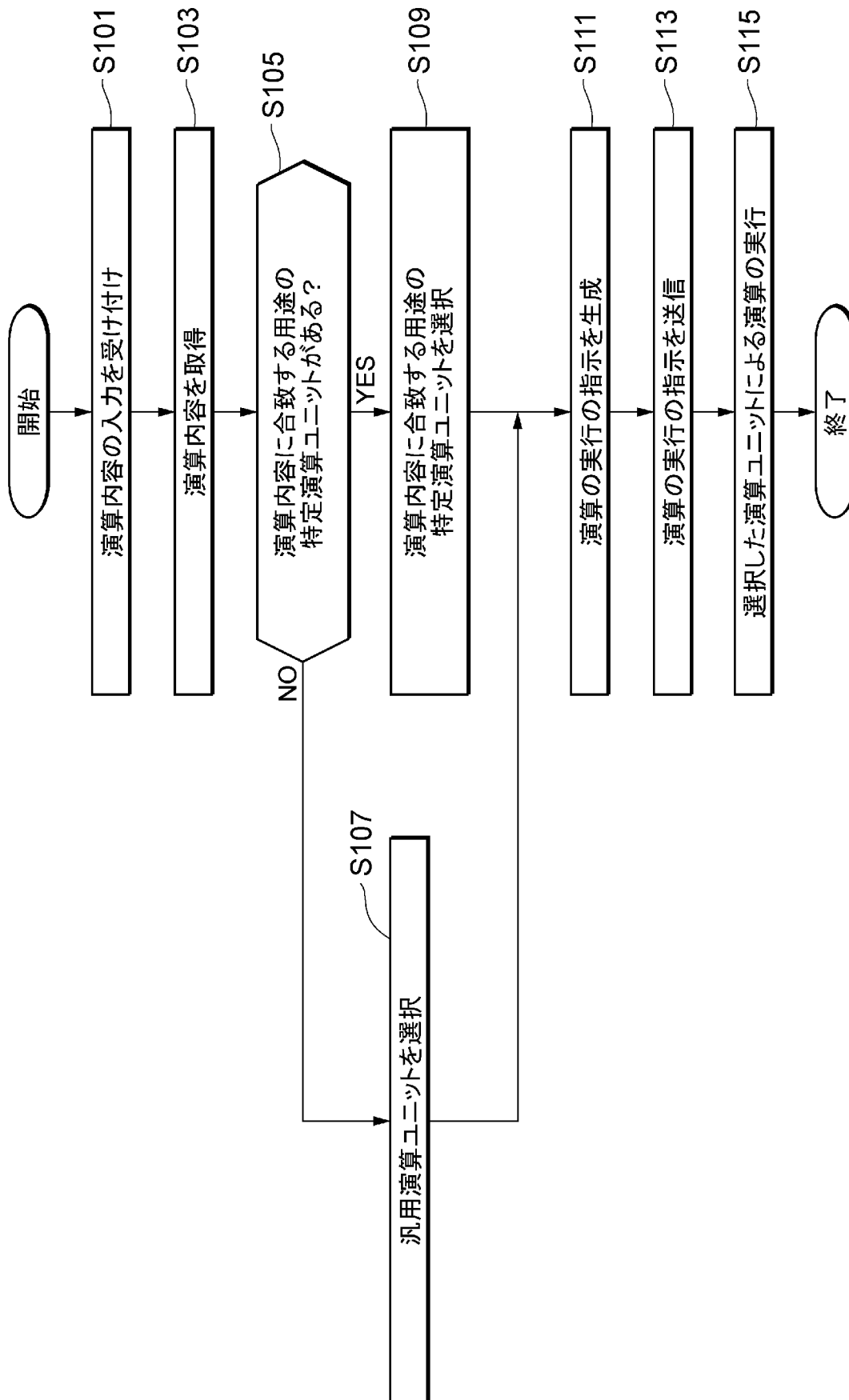
[図3]



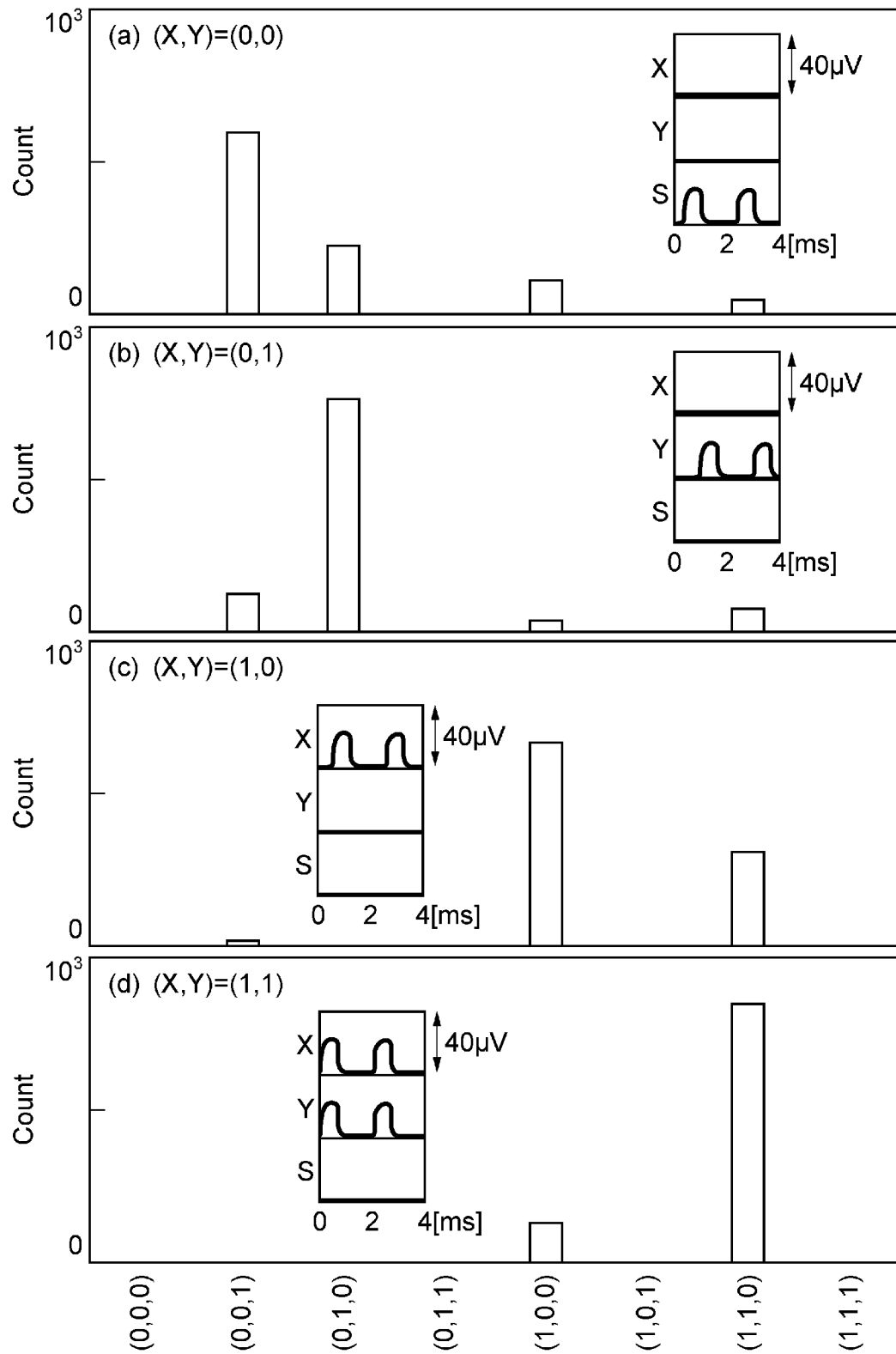
[図4]



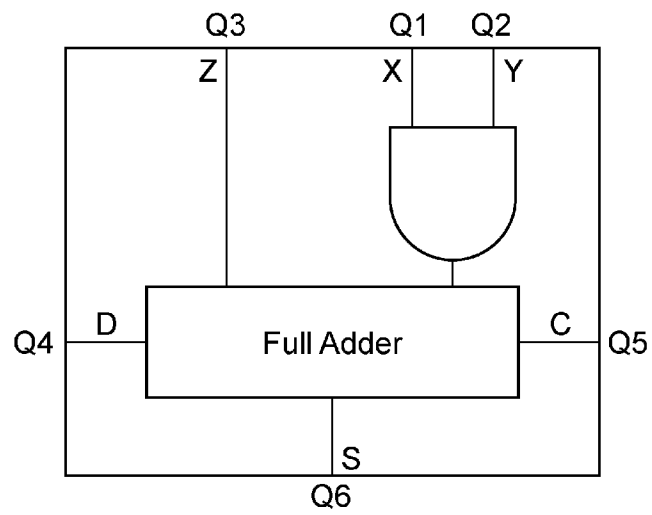
[図5]



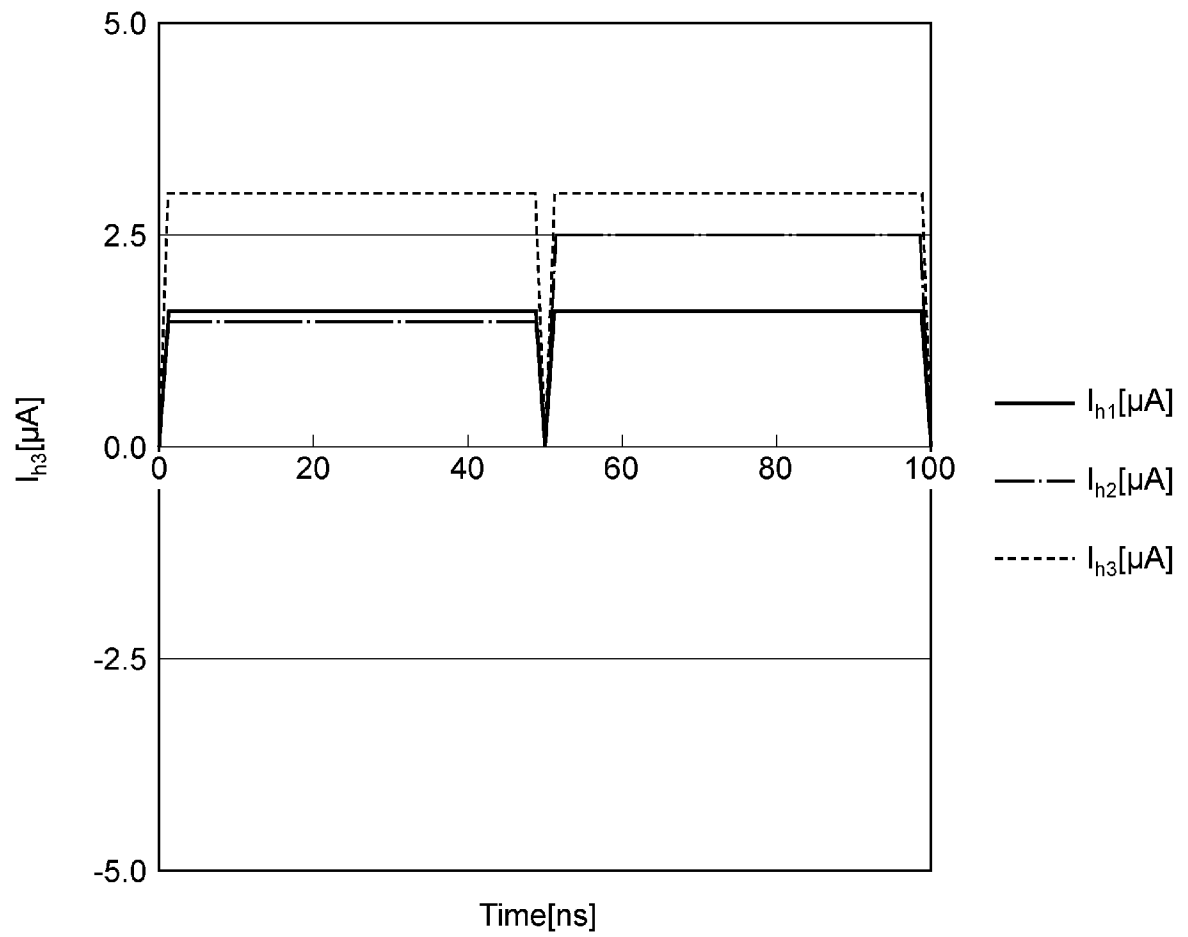
[図6]



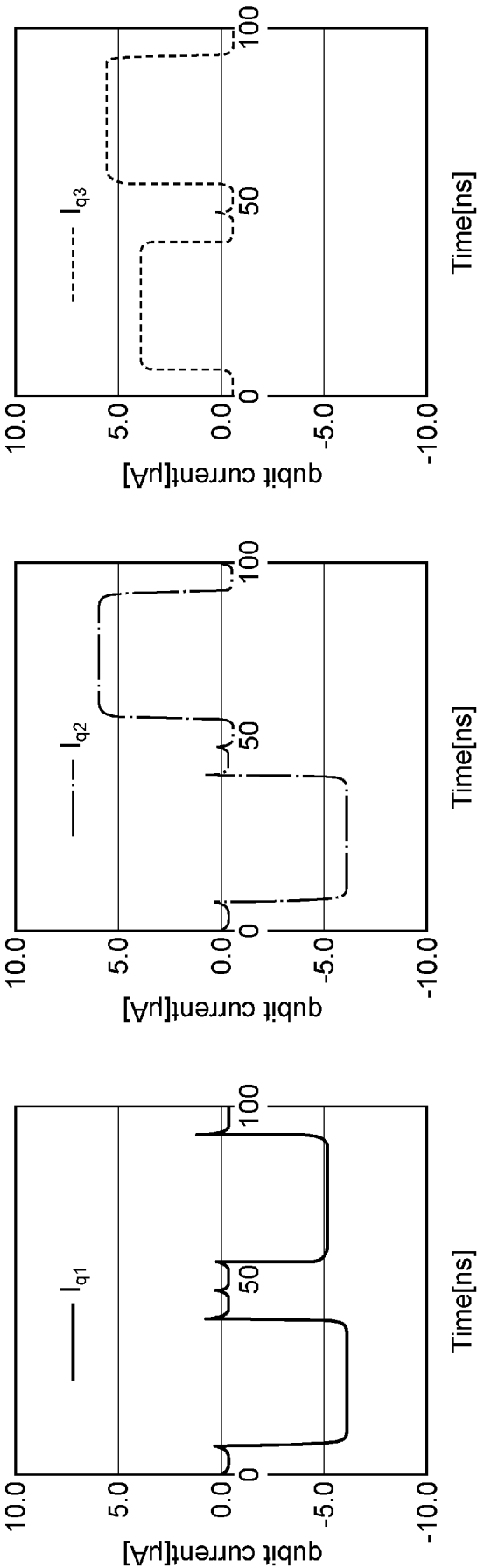
[図7]



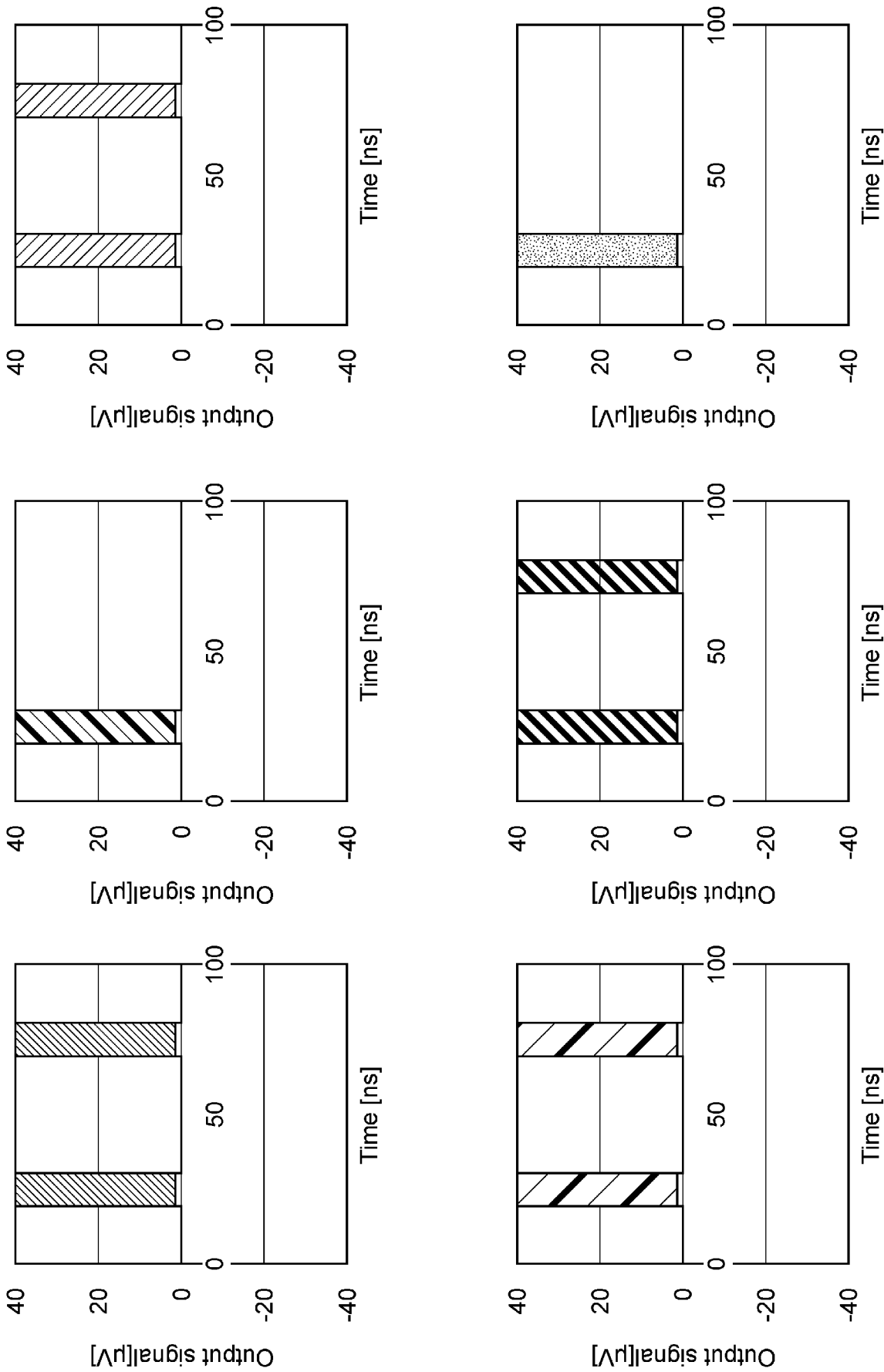
[図9]



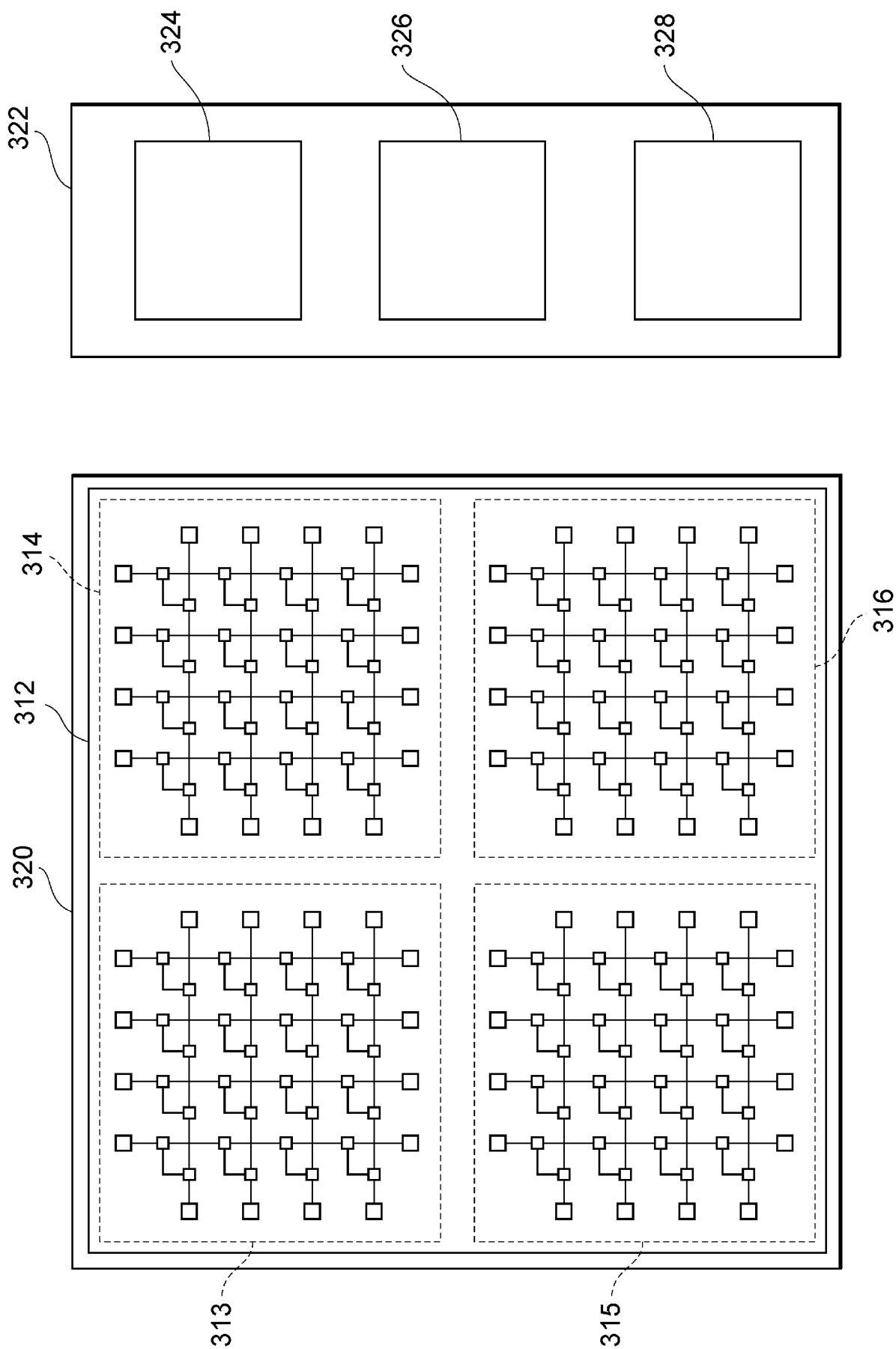
[図10]



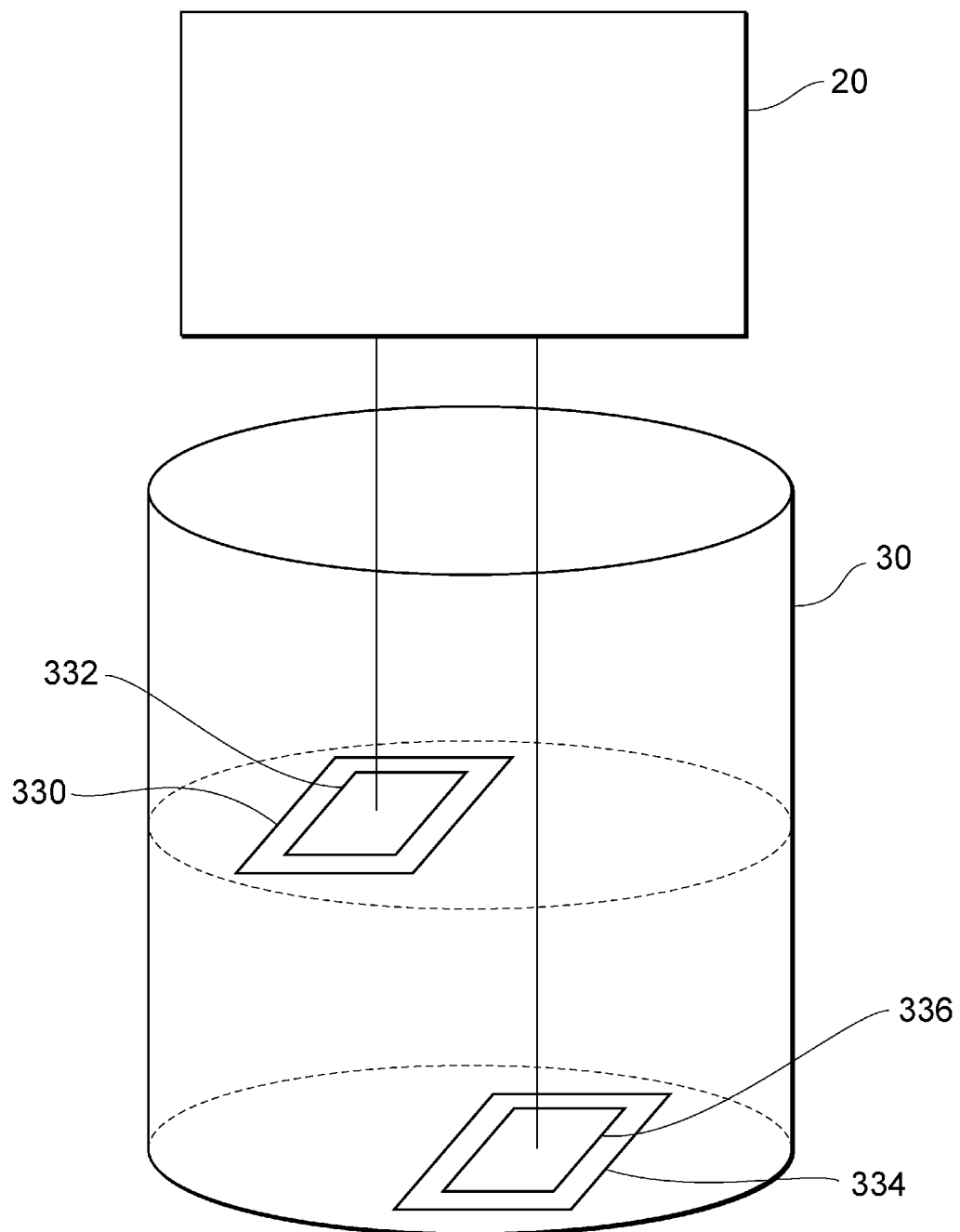
[図11]



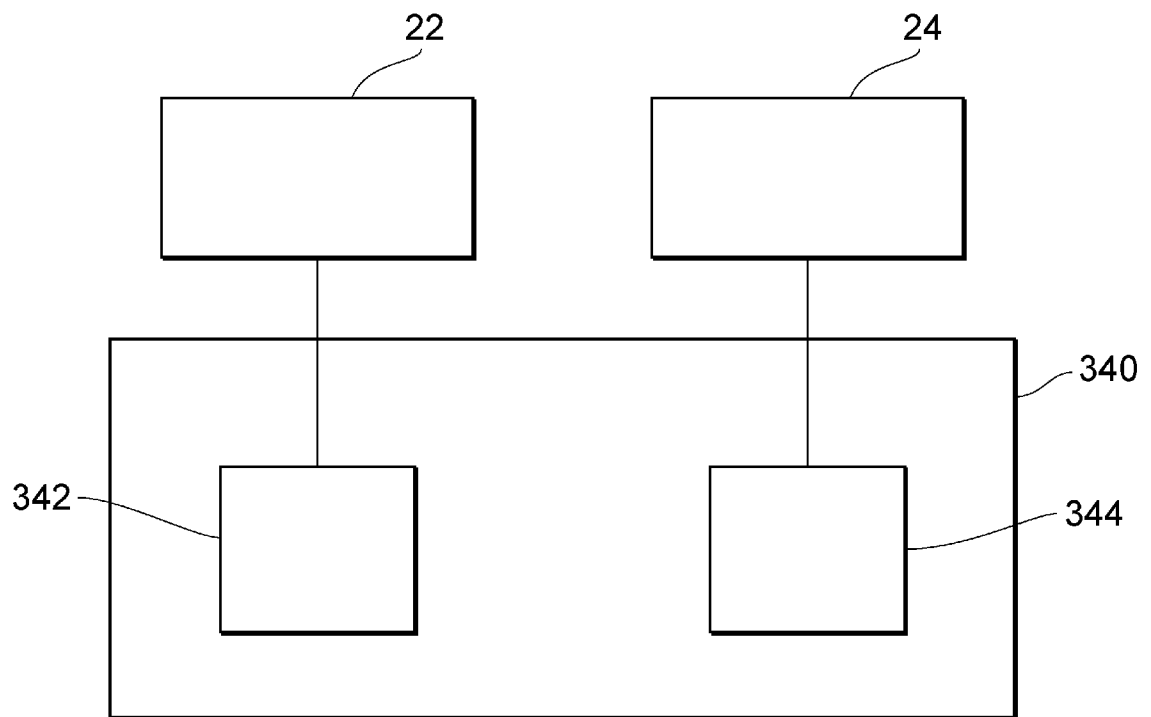
[図12]



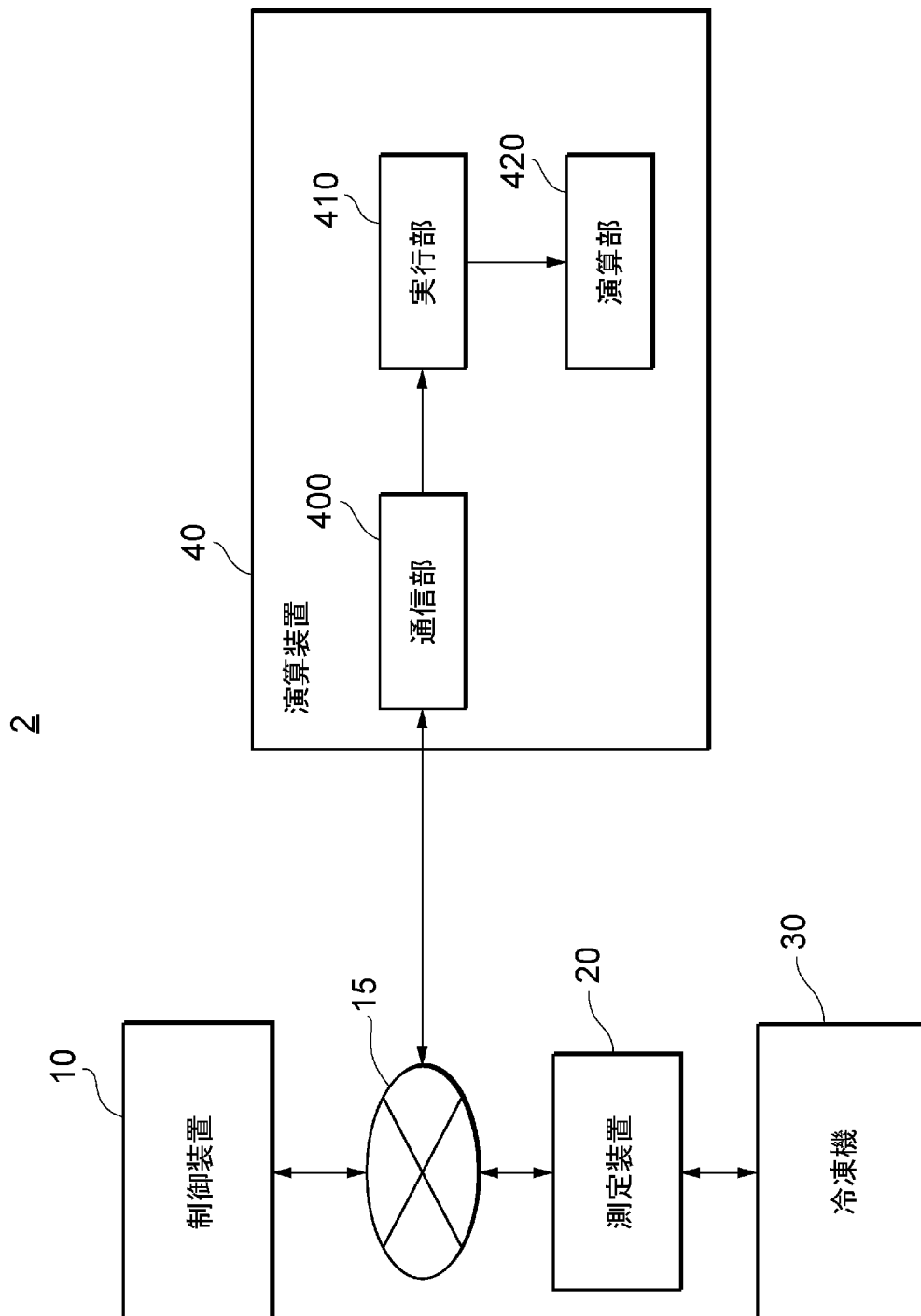
[図13]



[図14]



[図15]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2021/021357

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. G06N10/00 (2019.01) i, G06F7/57 (2006.01) i
FI: G06N10/00, G06F7/57

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl. G06N3/00-99/00, G06F7/57

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2021

Registered utility model specifications of Japan 1996-2021

Published registered utility model applications of Japan 1994-2021

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2020-515999 A (BULL SAS) 28 May 2020 (2020-05-28)	1-12
A	JP 2002-149402 A (PACIFIC DESIGN KK) 24 May 2002 (2002-05-24)	1-12
P, X	WO 2021/064932 A1 (MDR KK) 08 April 2021 (2021-04-08)	1-3, 5-6, 10-12
P, A		4, 7-9

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
28.07.2021

Date of mailing of the international search report
10.08.2021

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2021/021357

Patent Documents referred to in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
JP 2020-515999 A	28.05.2020	WO 2018/172629 A1 FR 3064380 A1 CA 3057734 A1 CN 110709851 A	
JP 2002-149402 A	24.05.2002	US 2002/0059510 A1	
WO 2021/064932 A1	08.04.2021	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G06N 10/00(2019.01)i; G06F 7/57(2006.01)i FI: G06N10/00; G06F7/57														
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） G06N3/00-99/00; G06F7/57 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2021年</td> </tr> </table> 国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）			日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2021年	日本国実用新案登録公報	1996-2021年	日本国登録実用新案公報	1994-2021年				
日本国実用新案公報	1922-1996年													
日本国公開実用新案公報	1971-2021年													
日本国実用新案登録公報	1996-2021年													
日本国登録実用新案公報	1994-2021年													
C. 関連すると認められる文献														
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号												
A	JP 2020-515999 A (ピュル エスアエス) 28.05.2020 (2020 - 05 - 28)	1-12												
A	JP 2002-149402 A (パシフィック・デザイン株式会社) 24.05.2002 (2002 - 05 - 24)	1-12												
P, X P, A	WO 2021/064932 A1 (MDR株式会社) 08.04.2021 (2021 - 04 - 08)	1-3, 5-6, 10-12 4, 7-9												
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。														
<table border="0"> <tr> <td>* 参考文献のカテゴリー</td> <td>"T" 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの</td> </tr> <tr> <td>"A" 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの</td> <td>"X" 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの</td> </tr> <tr> <td>"E" 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの</td> <td>"Y" 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの</td> </tr> <tr> <td>"L" 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）</td> <td>"&" 同一パテントファミリー文献</td> </tr> <tr> <td>"O" 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"P" 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献</td> <td></td> </tr> </table>			* 参考文献のカテゴリー	"T" 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの	"A" 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの	"X" 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの	"E" 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	"Y" 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの	"L" 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）	"&" 同一パテントファミリー文献	"O" 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献		"P" 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献	
* 参考文献のカテゴリー	"T" 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの													
"A" 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの	"X" 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの													
"E" 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	"Y" 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの													
"L" 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）	"&" 同一パテントファミリー文献													
"O" 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献														
"P" 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献														
国際調査を完了した日 28.07.2021	国際調査報告の発送日 10.08.2021													
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 吉倉 大智 5B 1599 電話番号 03-3581-1101 内線 3545													

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2021/021357

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
JP	2020-515999	A	28.05.2020	WO	2018/172629	A1	
				FR	3064380	A1	
				CA	3057734	A1	
				CN	110709851	A	
JP	2002-149402	A	24.05.2002	US	2002/0059510	A1	
WO	2021/064932	A1	08.04.2021	(ファミリーなし)			