

(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
2014年6月26日(26.06.2014)

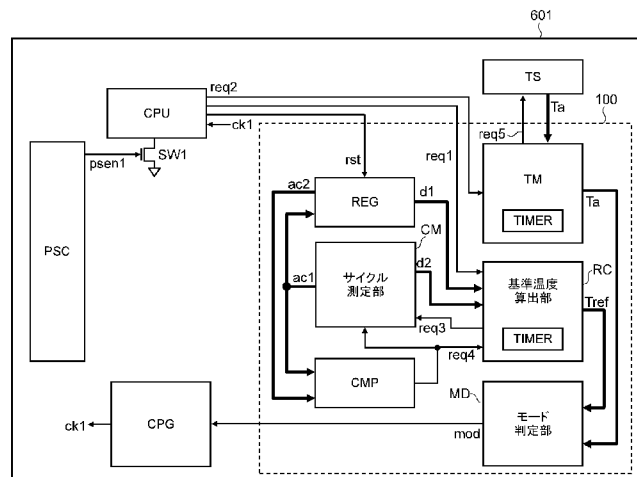


(10) 国際公開番号
WO 2014/097362 A1

- (51) 国際特許分類:
G06F 1/04 (2006.01) *H01L 27/04* (2006.01)
H01L 21/822 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2012/008187
- (22) 国際出願日: 2012年12月21日(21.12.2012)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: ルネサスモバイル株式会社 (RENESAS MOBILE CORPORATION) [JP/JP]; 〒1000004 東京都千代田区大手町二丁目6番2号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 五味 賢彦 (GOMI, Takahiko); 〒1000004 東京都千代田区大手町二丁目6番2号 ルネサスモバイル株式会社内 Tokyo (JP). 鈴木 哲也 (SUZUKI, Tetsuya); 〒1000004 東京都千代田区大手町二丁目6番2号 ルネサスモバイル株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 家入 健 (IEIRI, Takeshi); 〒2210835 神奈川県横浜市神奈川区鶴屋町三丁目3番8号 アサヒビルディング10階 響国際特許事務所 Kanagawa (JP).
- (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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, 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, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, 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, 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, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- 添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第21条(3))

(54) Title: SEMICONDUCTOR DEVICE AND METHOD FOR CONTROLLING SAME

(54) 発明の名称: 半導体装置及びその制御方法



CM CYCLE MEASURING UNIT
MD MODE DETERMINING UNIT
RC REFERENCE TEMPERATURE CALCULATING UNIT

(57) Abstract: According to one embodiment of the present invention, a semiconductor device (601) is provided with a calculating unit (CPU) that is provided in a semiconductor chip, and a temperature sensor (TS) that measures a temperature of the semiconductor chip. The semiconductor device compares a measured temperature (T_a) measured by means of the temperature sensor (TS) with a predetermined reference temperature (T_{ref}), and when the measured temperature (T_a) is higher than the reference temperature (T_{ref}), the semiconductor device switches the frequency of an operation clock to be supplied to the operating unit (CPU) from a first frequency to a second frequency that is higher than the first frequency.

(57) 要約: 一実施の形態に係る半導体装置 (601) は、半導体チップに設けられた演算部 (CPU) 及び半導体チップの温度を測定する温度センサ (TS) を備え、温度センサ (TS) により測定された測定温度 (T_a) を予め定められた基準温度 (T_{ref}) と比較し、測定温度 (T_a) が基準温度 (T_{ref}) よりも高い場合、演算部 (CPU) へ供給する動作クロックの周波数を第1の周波数から当該第1の周波数よりも高い第2の周波数へ切り換える。



WO 2014/097362 A1

明 細 書

発明の名称：半導体装置及びその制御方法

技術分野

[0001] 本発明は半導体装置及びその制御方法に関する。

背景技術

[0002] 近年、半導体装置の微細化に伴い、高機能化、高性能化などが進む一方、消費電力に占めるリーク電力（リーク電流によって消費される電力）の割合は増加する傾向にある。このリーク電力は、温度により急激に変化することが知られている。

[0003] ところで、特許文献１～３には、ＣＰＵ（Central Processing Unit）やプロセッサの温度に応じて動作周波数（動作クロックの周波数）を制御する技術が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献１：特開２０００－１８７５２３号公報

特許文献２：特開２００９－２３０６７０号公報

特許文献３：特開平７－１６０３６７号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] 発明者らは、通信端末等に用いられる半導体装置の開発に際し、様々な課題を見出した。本願で開示される各実施の形態は、例えば通信端末等に好適な半導体装置を提供する。

その他の課題と新規な特徴は、本明細書の記述および添付図面から明らかになるであろう。

課題を解決するための手段

[0006] 一実施の形態に係る半導体装置では、測定温度が予め定められた基準温度よりも高い場合、動作周波数を第１の周波数から当該第１の周波数よりも高

い第2の周波数へ切り換える。

発明の効果

[0007] 一実施の形態によれば、例えば無線通信端末等の電子装置に好適であって、良質な半導体装置を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0008] [図1]リーク電流を説明するためのMOSFETの断面図である。

[図2A]ある一定の処理負荷における消費電力の動作周波数依存性を示すグラフである。

[図2B]ある一定の処理負荷における消費電力の温度依存性を示すグラフである。

[図3]リーク電力 P_L 、アイドル電力 P_I 、アクティブ電力 P_A のそれぞれについて、動作周波数及び温度に対する依存性をまとめた一覧表である。

[図4A]比較例に係る半導体装置の低温時における消費電力の構成を模式的に示すグラフである。

[図4B]比較例に係る半導体装置の高温時における消費電力の構成を模式的に示すグラフである。

[図5A]無線通信端末の構成例を示す外観図である。

[図5B]無線通信端末の構成例を示す外観図である。

[図6]実施の形態1に係る無線通信装置の構成例を示すブロック図である。

[図7]実施の形態1に係るアプリケーションプロセッサ601の構成例を示すブロック図である。

[図8]実施の形態1に係る電力削減モード制御方法（メインルーチン）を説明するためのフローチャートである。

[図9]実施の形態1に係る基準温度算出方法（サブルーチン1）を説明するためのフローチャートである。

[図10]実施の形態1に係る測定温度取得方法（サブルーチン2）を説明するためのフローチャートである。

[図11A]実施の形態1の実施例に係る半導体装置の低温時（測定温度 $T_a < 基$

準温度 T_{ref}) すなわちアイドル電力削減モードにおける消費電力の構成を模式的に示すグラフである。

[図11B]実施の形態1の実施例に係る半導体装置の高温時(基準温度 T_{ref} < 測定温度 T_a) すなわちリーク電力削減モードにおける消費電力の構成を模式的に示すグラフである。

[図12]実施の形態1の実施例に係る半導体装置の消費電力の温度依存性を示すグラフである。

[図13]実施の形態2に係るアプリケーションプロセッサ601の構成例を示すブロック図である。

[図14A]実際のユースケース(音楽再生及び動画再生)に則した電力削減モード制御方法の詳細を説明するためのシーケンス図である。

[図14B]実際のユースケース(音楽再生及び動画再生)に則した電力削減モード制御方法の詳細を説明するためのシーケンス図である。

[図14C]実際のユースケース(音楽再生及び動画再生)に則した電力削減モード制御方法の詳細を説明するためのシーケンス図である。

[図14D]実際のユースケース(音楽再生及び動画再生)に則した電力削減モード制御方法の詳細を説明するためのシーケンス図である。

[図14E]実際のユースケース(音楽再生及び動画再生)に則した電力削減モード制御方法の詳細を説明するためのシーケンス図である。

[図15]実施の形態3に係る電力削減モード制御方法(メインルーチン)を説明するためのフローチャートである。

[図16A]実施の形態3の実施例に係る半導体装置の温度上昇時における消費電力の温度依存性を説明するためのグラフである。

[図16B]実施の形態3の実施例に係る半導体装置の温度降下時における消費電力の温度依存性を説明するためのグラフである。

発明を実施するための形態

[0009] 以下、具体的な実施の形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。ただし、以下の実施の形態に限定される訳ではない。また、説明を明確に

するため、以下の記載及び図面は、適宜簡略化されている。

[0010] <事前検討事項>

<リーク電力の原因>

まず、発明者らによる事前検討事項について説明する。

上述の通り、半導体装置の微細化により、消費電力におけるリーク電力の増加が問題となっている。ここで、図1を参照してリーク電力の原因となるリーク電流について説明する。図1は、リーク電流を説明するためのMOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) の断面図である。

[0011] 図1に示されたMOSFETは、シリコン基板90、ゲート91、ソース92、ドレイン93、ゲート絶縁膜94を備えている。さらに、このMOSFETは、ゲート91の側面に形成されたサイドウォール95、ゲート91上に形成されたゲートコンタクト96、ソース92上に形成されたソースコンタクト97、ドレイン93上に形成されたドレインコンタクト98を備えている。

[0012] 図1に示すように、主なリーク電流には、サブスレッショルド・リーク電流 I_{SUB} 、ゲートリーク電流（ゲートトンネル電流） I_{GATE} 、及びGIDL (Gate-Induced Drain Leakage) 電流 I_{GIDL} の3つがある。

[0013] サブスレッショルド・リーク電流 I_{SUB} は、MOSFETがオフであるときにドレイン93とソース92の間を流れる電流である。サブスレッショルド・リーク電流 I_{SUB} は、近年のMOSFETにおける閾値電圧の低下とともに増加する傾向にある。サブスレッショルド・リーク電流 I_{SUB} は温度依存性が大きく、MOSFETのジャンクション温度（チャネル温度）の上昇とともに急激に増加する。

[0014] ゲートリーク電流（ゲートトンネル電流） I_{GATE} は、電子が薄いゲート絶縁膜94をトンネル効果によって通過するためにゲート91とシリコン基板90の間（又はゲート91とソース92の間、若しくはゲート91とドレイン93の間）を流れる電流である。

[0015] $GIDL$ (Gate-Induced Drain Leakage) 電流 I_{GIDL} は、ゲート 91 とドレイン 92 の間の電界がトンネル現象を引き起こすために、ドレイン 93 とシリコン基板 90 を流れる電流である。

[0016] ゲートリーク電流 I_{GATE} 及び $GIDL$ 電流 I_{GIDL} は、 $MOSFET$ の微細化に伴うゲート絶縁膜 94 の薄膜化により増加する。一方、ゲートリーク電流 I_{GATE} 及び $GIDL$ 電流 I_{GIDL} の温度依存性はともに小さい。

[0017] <消費電力の構成並びにそれらの動作周波数依存性及び温度依存性>

次に、図 2 A、図 2 B を参照して消費電力の動作周波数依存性及び温度依存性について説明する。図 2 A は、ある一定の処理負荷における消費電力の動作周波数依存性を示すグラフである。図 2 B は、ある一定の処理負荷における消費電力の温度依存性を示すグラフである。

[0018] 図 2 A、図 2 B に示すように、消費電力は、アクティブ電力 P_A 、アイドル電力 P_I 、リーク電力 P_L から構成されている。アクティブ電力 P_A とは、半導体装置が実際に処理を実行することにより消費される電力である。そのため、処理負荷が一定であればアクティブ電力 P_A も一定となる。アイドル電力とは、半導体装置のステータス（動作状態）がアイドル状態において消費される電力であって、電源及びクロックが供給されていれば常に消費されるものである。リーク電力とは、リーク電流により消費される電力であって、電源が供給されていれば常に消費されるものである。

[0019] ここで、半導体装置のステータスについて説明する。半導体装置のステータスには、アクティブ状態、アイドル状態、シャットダウン状態の 3 つがある。

[0020] アクティブ状態とは、電源及びクロックが供給され、かつ、実際に処理を行っている状態である。例えば、半導体装置が無線通信端末向けアプリケーションプロセッサの場合、無線データ通信、音楽再生、動画再生などの処理を実際に行っている状態である。アクティブ状態では、アクティブ電力 P_A 、アイドル電力 P_I 、リーク電力 P_L の全てが発生する。

[0021] アイドル状態（ストール状態とも呼ばれる）とは、電源及びクロックは供

給されているが、実際には処理を実行していない状態（すなわち、ターゲットからの応答を待っている状態）である。アイドル状態では、アイドル電力 P_I 及びリーク電力 P_L が発生し、アクティブ電力 P_A は発生しない。

[0022] シャットダウン状態とは、電源及びクロックが供給されていない状態である。シャットダウン状態では、アクティブ電力 P_A 、アイドル電力 P_I 、リーク電力 P_L のいずれも発生しない。

[0023] 図2Aに示すように、アクティブ電力 P_A 及びリーク電力 P_L は、動作周波数（動作クロックの周波数）依存性を示さない。ここで、動作周波数が上昇すれば、単位時間当たりのアクティブ電力も上昇するが、処理負荷が一定であるため、処理時間が短くなる。そのため、処理に要するアクティブ電力 P_A （＝単位時間当たりのアクティブ電力×処理時間）は動作周波数によらず一定となる。一方、アイドル電力 P_I は、動作周波数に比例して上昇する。従って、消費電力全体も動作周波数の上昇とともに上昇する。

図2Bに示すように、アクティブ電力 P_A 及びアイドル電力 P_I は、温度依存性を示さない。一方、リーク電力 P_L は、温度の上昇とともに急激に上昇する。従って、消費電力全体も温度の上昇とともに急激に上昇する。

[0024] 図3は、リーク電力 P_L 、アイドル電力 P_I 、アクティブ電力 P_A のそれぞれについて、動作周波数及び温度に対する依存性をまとめた一覧表である。図3に示すように、リーク電力 P_L は、動作周波数には依存しないが、温度には依存する。具体的には、図2Bに示したように、温度の上昇とともに上昇する。アイドル電力 P_I は、動作周波数には依存するが、温度には依存しない。具体的には、図2Aに示したように、動作周波数の上昇とともに上昇する。アクティブ電力 P_A は、動作周波数及び温度のいずれにも依存しない。

[0025] <比較例及びその問題点>

図4A、図4Bは本発明者らが検討した比較例である。ここでは、低温時に動作周波数を高く、高温時には動作周波数を低く設定した半導体装置の消費電力を検討している。図4Aは、比較例に係る半導体装置の低温時における消費電力の構成を模式的に示すグラフである。図4Bは、比較例に係る半

導体装置の高温時における消費電力の構成を模式的に示すグラフである。図 4 A、図 4 Bは、いずれもある一定の処理負荷における消費電力の構成を示している。

[0026] 図 4 A、図 4 Bのグラフにおいて横軸は時間 [s]、縦軸は単位時間当たりの消費電力 [W/s] である。横軸の時間に合わせ、動作クロック (CLOCK) 及びステータス (STATUS) が示されている。図 4 Aに示すように、単位時間当たりのリーク電力 P_L 及びアイドル電力 P_I は、アイドル状態であるかアクティブ状態であるかによらず、一定である。アクティブ電力 P_A は、アクティブ状態のみにおいて発生する。また、シャットダウン状態では消費電力は発生しない。図 4 Bにおいても同様である。図 4 A及び図 4 Bに示した単位時間当たりの消費電力の時間積分値 (つまり図 4 A及び図 4 Bに示したグラフの面積すなわちマスの数) が消費電力となる。

[0027] 図 4 Bでは図 4 Aに比べ、動作周波数が $1/2$ になっているため、単位時間当たりのアイドル電力 P_I も $1/2$ になっている。他方、図 4 Bでは図 4 Aに比べ、温度の上昇により、単位時間当たりのリーク電力 P_L は 8 倍になっている。ここで、図 4 A及び図 4 Bにおける処理負荷は一定であるため、処理に要するアクティブ電力 P_A の合計は、図 4 A及び図 4 Bにおいて同じである。しかし、図 4 Bでは図 4 Aに比べ、動作周波数が $1/2$ になっているため、処理に要する時間が 2 倍となっている。結果として、比較例では、高温時にシャットダウン状態の時間が短くなり、リーク電力 P_L が増加してしまう問題があった。

[0028] 発明者らは、半導体装置の消費電力低減について検討を行った。以下にその詳細について説明する。

[0029] (実施の形態 1)

<無線通信端末の概要>

まず、図 5 A、図 5 Bを参照して、本実施の形態に係る半導体装置が適用される電子装置として好適な無線通信端末の概要について説明する。図 5 A及び図 5 Bは、無線通信端末 500 の構成例を示す外観図である。

- [0030] なお、図 5 A、図 5 B では、無線通信端末 5 0 0 がスマートフォンである場合について示している。しかしながら、無線通信端末 5 0 0 は、フィーチャーフォン(例えば、折り畳み式の携帯電話端末)、携帯ゲーム端末、タブレット P C (Personal Computer)、ノート P C 等のその他の無線通信端末であってもよい。また、当然のことながら、本実施の形態に係る半導体装置は、無線通信端末以外に適用することも可能である。
- [0031] 図 5 A は、無線通信端末 5 0 0 を形成する筐体 5 0 1 の一方の主面(前面)を示している。筐体 5 0 1 の前面には、ディスプレイデバイス 5 0 2 と、タッチパネル 5 0 3 と、幾つかの操作ボタン 5 0 4 と、カメラデバイス 5 0 5 とが配置されている。一方、図 5 B は、筐体 5 0 1 の他方の主面(背面)を示している。筐体 5 0 1 の背面には、カメラデバイス 5 0 6 が配置されている。
- [0032] ディスプレイデバイス 5 0 2 は、液晶ディスプレイ (L C D : Liquid Crystal Display) や有機 E L ディスプレイ (O L E D : Organic Light-Emitting Diode) 等の表示装置である。ディスプレイデバイス 5 0 2 は、表示面が筐体 5 0 1 の前面に位置するように配置されている。
- [0033] タッチパネル 5 0 3 は、ディスプレイデバイス 5 0 2 の表示面を覆うように配置されるか、或いはディスプレイデバイス 5 0 2 の裏面側に配置され、ユーザーによる表示面への接触位置を検知する。つまり、ユーザーは、指や専用のペン(一般に、スタイラスと呼称される)等でディスプレイデバイス 5 0 2 の表示面に触れることで、無線通信端末 5 0 0 を直感的に操作することができる。
- [0034] 操作ボタン 5 0 4 は、無線通信端末 5 0 0 に対する補助的な操作に用いられる。なお、無線通信端末によっては、このような操作ボタンが設けられないこともある。
- [0035] カメラデバイス 5 0 5 は、そのレンズユニットが筐体 5 0 1 の前面に位置するように配置されたサブカメラである。なお、無線通信端末によっては、このようなサブカメラが設けられないこともある。

[0036] カメラデバイス506は、そのレンズユニットが筐体501の背面に位置するように配置されたメインカメラである。

[0037] <無線通信装置の構成>

図6を参照して、本実施の形態に係る半導体装置が搭載される無線通信装置600の構成について説明する。図6は、実施の形態1に係る無線通信装置600の構成例を示すブロック図である。無線通信装置600は、例えば、図5A、図5Bに示した無線通信端末500の内部構成である。

[0038] 図6に示すように、無線通信装置600は、アプリケーションプロセッサ（ホストIC）601、ベースバンドプロセッサ602、RFIC（Radio Frequency Integrated Circuit）603、メインメモリ604、バッテリー605、パワーマネジメントIC（PMIC：Power Management Integrated Circuit）606、表示部607、カメラ部608、操作入力部609、オーディオIC610、マイク611、スピーカ612を含む。

[0039] アプリケーションプロセッサ（ホストIC）601は、メインメモリ604に格納されたプログラムを読み出して、無線通信装置600の各種機能を実現するための処理を行う半導体集積回路である。例えば、アプリケーションプロセッサ601は、メインメモリ604からOS（Operating System）プログラムを読み出して実行すると共に、このOSプログラムを動作基盤とするアプリケーションプログラムを実行する。

[0040] ベースバンドプロセッサ602は、携帯通信端末が送受信するデータに対して符号化（例えば、畳み込み符号やターボ符号等の誤り訂正符号化）処理又は復号化処理等を含むベースバンド処理を行う。例えば音声データの場合、ベースバンドプロセッサ602は、送信音声データをオーディオIC610から受け取り、受け取った送信音声データに対して符号化処理を施して、RFIC603に送信する。他方、ベースバンドプロセッサ602は、RFIC603から受信音声データを受け取り、受け取った受信音声データに対して復号化処理を施してオーディオIC610に送信する。

[0041] RFIC603は、アナログRF信号処理を行う。アナログRF信号処理

は、周波数アップコンバージョン、周波数ダウンコンバージョン、増幅などを含む。例えば音声データの場合、RFIC603は、ベースバンドプロセッサ602によって変調された送信音声データから送信RF信号を生成し、アンテナを介してこの送信RF信号を無線送信する。他方、RFIC603は、アンテナを介して受信RF信号を無線受信し、受信RF信号から受信音声データを生成し、この受信音声データをベースバンドプロセッサ602に送信する。

[0042] メインメモリ（外部メモリ）604は、アプリケーションプロセッサ601により利用されるプログラム及びデータを格納している。メインメモリ604としては、電源遮断時に記憶データが消去される揮発性メモリであるDRAM（Dynamic Random Access Memory）を用いる場合が多い。もちろん、メインメモリ604として、電源遮断時に記憶データが保持される不揮発性メモリを用いてもよい。

[0043] バッテリ605は、電池であり、無線通信装置600が外部電源によらずに動作する場合に利用される。なお、無線通信装置600は、外部電源が接続されている場合においてもバッテリ605の電源を利用してもよい。また、バッテリ605としては、二次電池を利用することが好ましい。

[0044] パワーマネジメントIC606は、バッテリ605又は外部電源から内部電源を生成する。この内部電源は、無線通信装置600の各ブロックに与えられる。このとき、パワーマネジメントIC606は、内部電源の供給を受けるブロック毎に内部電源の電圧を制御する。パワーマネジメントIC606は、アプリケーションプロセッサ601からの指示に基づき内部電源の電圧制御を行う。さらに、パワーマネジメントIC606は、ブロック毎に内部電源の供給と遮断とを制御することもできる。また、パワーマネジメントIC606は、外部電源の供給がある場合、バッテリ605への充電制御も行う。

[0045] 表示部607は、図5A、図5Bにおけるディスプレイデバイス502に相当するものであって、液晶ディスプレイ（LCD：Liquid Crystal Displa

y) や有機ELディスプレイ (OLED: Organic Light-Emitting Diode) 等の表示装置である。表示部607は、アプリケーションプロセッサ601における処理に従い様々な画像を表示する。表示部607において表示される画像には、ユーザーが無線通信装置600に動作指示を与えるユーザーインタフェース画像、カメラ画像、動画等が含まれる。

[0046] カメラ部608は、アプリケーションプロセッサ601からの指示に従い、画像を取得する。カメラ部608は、図5A、図5Bにおけるカメラデバイス505、506に相当するものである。

[0047] 操作入力部609は、ユーザーが操作して無線通信装置600に操作指示を与えるユーザーインタフェースである。操作入力部609は、図5A、図5Bにおけるタッチパネル503、操作ボタン504に相当するものである。

[0048] オーディオIC610は、ベースバンドプロセッサ602から受け取ったデジタル信号である受信音声データをアナログ信号に変換し、スピーカ612を駆動する。これにより、スピーカ612から音声が出力される。他方、オーディオIC610は、マイク611で検出したアナログ信号である音声をアナログ／デジタル (A/D) 変換して、ベースバンドプロセッサ602に出力する。

[0049] <実施の形態1に係る半導体装置の構成>

図7を参照して、実施の形態1に係る半導体装置であるアプリケーションプロセッサ601の構成について説明する。図7は、実施の形態1に係るアプリケーションプロセッサ601の構成例を示すブロック図である。図7に示すように、実施の形態1に係るアプリケーションプロセッサ601は、CPU (演算部)、温度センサTS、電力削減モード制御部 (制御部) 100、クロック生成部CPG、電源制御部PSCを備えている。ここで、電力削減モード制御部100は、温度監視部TM、基準温度算出部RC、サイクル測定部CM、記憶部REG、比較部CMP、モード判定部MDを備えている。図7において、太い矢印はデータを示し、細い矢印は各種制御信号やクロ

ックを示している。

[0050] 実施の形態1に係るアプリケーションプロセッサ601は、1つの半導体チップ上に設けられている。アプリケーションプロセッサ601では、温度センサTSにより測定されたチップ温度（半導体チップの温度）に応じて、電力削減モード制御部100が電力削減モードを制御する。具体的には、チップ温度が所定の基準温度を超えれば、電力削減モード制御部100はリーク電力削減モード（第1のモード）を選択し、クロック生成部CPGにより生成されるCPUの動作クロックの周波数を高く設定する。

[0051] 一方、アプリケーションプロセッサ601のチップ温度が所定の基準温度を下回れば、電力削減モード制御部100はアイドル電力削減モード（第2のモード）を選択し、クロック生成部CPGにより生成されるCPUの動作クロックの周波数を低く設定する。すなわち、電力削減モード制御部100は、クロック生成部CPGにより生成される動作クロックの周波数を制御している。

[0052] CPUは、クロック生成部CPGが出力する動作クロックck1に応じて動作する。つまり、CPUの動作周波数は、動作クロックck1の周波数である。CPUは、システム起動時に記憶部REGに対して初期化信号rstを出力し、記憶部REGに格納された各種データを初期化する。その後、CPUは、基準温度算出部RCに対し、基準温度Trefを算出するためのサブルーチン1の開始を要求する開始要求req1を出力する。サブルーチン1の詳細については後述する。さらに、CPUは、温度監視部TMに対し、測定温度Taを取得するためのサブルーチン2の開始を要求する開始要求req2を出力する。サブルーチン2の詳細については後述する。

[0053] 温度センサTSは、いわゆるオンチップ温度センサであり、アプリケーションプロセッサ601のチップ温度（ジャンクション温度又はチャネル温度と言うこともできる）を計測する。

[0054] 温度監視部TMは、CPUから出力されたサブルーチン2の開始要求req2に応じて、温度センサTSにより測定された測定温度Taの監視を開始

する。温度監視部 T M は、内部にタイマを備えている。タイマは、例えばカウンタである。タイマは、例えば 0 から最大値までのカウントアップを繰り返す。温度監視部 T M は、例えばタイマが最大値になったタイミングで、温度センサ T S に対し測定要求 $req\ 5$ を出力し、温度センサ T S から測定温度 T_a を取得する。すなわち、温度監視部 T M は、温度センサ T S から繰り返し測定温度 T_a を取得する。そして、温度監視部 T M は、温度センサ T S から取得した測定温度 T_a をモード判定部 M D へ出力する。タイマの最大値（リミット値）は、例えば記憶部 R E G に格納されている。もちろん、タイマの構成は上記に限定されるものではない。

[0055] 基準温度算出部 R C は、C P U から出力されたサブルーチン 1 の開始要求 $req\ 1$ に応じて、基準温度 T_{ref} の算出を開始する。基準温度算出部 R C は、内部にタイマを備えている。このタイマは、温度監視部 T M のタイマと同様の構成を有している。温度監視部 T M は、例えばタイマが最大値になったタイミングで、サイクル測定部 C M に対し、アクティブサイクル $ac\ 1$ などの測定要求 $req\ 3$ を出力する。すなわち、基準温度算出部 R C は、サイクル測定部 C M に対し繰り返し測定要求 $req\ 3$ を出力する。タイマの最大値（リミット値）は、例えば記憶部 R E G に格納されている。ここで、アクティブサイクル $ac\ 1$ [H z] とは、ステータスがアクティブ状態である単位時間当たりの動作クロックのサイクル数の総和である。

[0056] また、基準温度算出部 R C は、比較部 C M P が出力する基準変更要求 $req\ 4$ を受け取ると、記憶部 R E G から計算用基礎データ $d\ 1$ を取得するとともに、サイクル測定部 C M から計算用測定データ $d\ 2$ を取得する。そして、基準温度算出部 R C は、取得した計算用基礎データ $d\ 1$ 及び計算用測定データ $d\ 2$ を使用して、基準温度 T_{ref} を算出し、モード判定部 M D へ出力する。

[0057] 計算用基礎データ $d\ 1$ は、基準温度計算式及び要素アイドル電力を含む。基準温度計算式とは、基準温度 T_{ref} を算出するための計算式である。要素アイドル電力 [W/H z] とは、動作周波数当たりのアイドル電力 P_i （図

2 Aにおけるアイドル電力 P_i の傾き)である。

[0058] 計算用測定データ d_2 は、アイドルサイクル C_i 、シャットダウン比率 r を含む。アイドルサイクル C_i [Hz]とは、ステータスがアイドル状態である単位時間当たりの動作クロックのサイクル数の総和である。シャットダウン比率 r とは、ステータスがシャットダウン状態となる単位時間当たりの比率である。シャットダウン比率 r は0～1までの数値であって、例えばシャットダウン比率 $r = 0.2$ であれば、シャットダウン比率が20%ということである。

[0059] サイクル測定部CMは、基準温度算出部RCから出力された測定要求 req_3 に応じて、アクティブサイクル a_c1 、アイドルサイクル C_i 、シャットダウン比率 r を測定する。そして、サイクル測定部CMは、取得したアクティブサイクル a_c1 を比較部CMPへ出力する。さらに、サイクル測定部CMは、比較部CMPから出力された基準変更要求 req_4 に応じて、取得したアクティブサイクル a_c1 を新たな基準アクティブサイクル a_c2 として記憶部REGに格納する。他方、サイクル測定部CMは、測定したアイドルサイクル C_i 及びシャットダウン比率 r を計算用測定データ d_2 として基準温度算出部RCへ出力する。

[0060] 記憶部REGは、各種データを保持するレジスタである。本実施の形態に係る記憶部REGは、温度監視部TM及び基準温度算出部RCが備えるタイマのリミット値、計算用基礎データ d_1 、基準アクティブサイクル a_c2 を保持している。記憶部REGの保持する各種データは、システム起動時には、CPUから出力される初期化信号 rst に応じて初期化される。

[0061] 比較部CMPは、サイクル測定部CMから取得したアクティブサイクル a_c1 と記憶部REGに保持された基準アクティブサイクル a_c2 とを比較する。比較部CMPは、アクティブサイクル a_c1 の基準アクティブサイクル a_c2 に対する変化が大きければ、基準温度 T_{ref} を変更するための基準変更要求 req_4 を基準温度算出部RCに対し出力する。他方、比較部CMPは、アクティブサイクル a_c1 の基準アクティブサイクル a_c2 に対する

変化が小さければ、基準変更要求 $req\ 4$ を基準温度算出部 RC に対し出力しない。

[0062] 具体的には、例えば $ac\ 2 \times 0.9 < ac\ 1 < ac\ 2 \times 1.1$ を満たせば、基準変更要求 $req\ 4$ を出力せず、 $ac\ 2 \times 0.9 < ac\ 1 < ac\ 2 \times 1.1$ を満たさなければ、基準変更要求 $req\ 4$ を出力する。なお、上述の通り、比較部 CMP から出力された基準変更要求 $req\ 4$ は、サイクル測定部 CM にも入力される。そして、サイクル測定部 CM が、取得したアクティブサイクル $ac\ 1$ を新たな基準アクティブサイクル $ac\ 2$ として記憶部 REG に格納する。しかしながら、比較部 CMP が基準変更要求 $req\ 4$ を出力した際、比較部 CMP が比較したアクティブサイクル $ac\ 1$ を新たな基準アクティブサイクル $ac\ 2$ として記憶部 REG に格納するような構成としてもよい。

[0063] モード判定部 MD は、基準温度算出部 RC から取得した基準温度 T_{ref} と温度監視部 TM から取得した測定温度 T_a とを比較して、電力削減のモードを判定する。具体的には、例えば $T_a < T_{ref}$ を満たせば、アイドル電力削減モードを選択し、 $T_a < T_{ref}$ を満たさなければ、リーク電力削減モードを選択する。モード判定部 MD は、判定結果に応じたモード信号（制御信号） mod をクロック生成部 CPG に対して出力する。

[0064] クロック生成部 CPG は、モード判定部 MD から出力されたモード信号 mod に応じて、 CPU の動作クロック $ck\ 1$ を生成する。具体的には、アイドル電力削減モードの場合、クロック生成部 CPG は、出力する動作クロック $ck\ 1$ の周波数（動作周波数）を低く設定し、リーク電力削減モードの場合、出力する動作クロック $ck\ 1$ の周波数を高く設定する。

[0065] 電源制御部 PSC は、 CPU に接続された電源供給スイッチ $SW\ 1$ のオンオフを制御する電源イネーブル信号 $pse\ n\ 1$ を出力する。ここで、電源供給スイッチ $SW\ 1$ のオンオフは、 CPU の状態に応じて制御される。具体的には、 CPU の状態がアクティブ状態又はアイドル状態の場合、電源供給スイッチ $SW\ 1$ はオンとなり、 CPU へ電源電圧が供給される。一方

、CPUのステートがシャットダウン状態の場合、電源供給スイッチSW1はオフとなり、CPUへの電源電圧の供給が停止される。電源供給スイッチSW1は、例えばMOSFETから構成され、そのゲート端子（制御端子）に電源イネーブル信号psen1が入力される。

[0066] ＜電力削減モード制御方法（メインルーチン）＞

次に、図8を参照して、実施の形態1に係る半導体装置における電力削減モード制御方法（メインルーチン）について説明する。図8は、実施の形態1に係る電力削減モード制御方法（メインルーチン）を説明するためのフローチャートである。

[0067] システムが起動すると、CPUがメインルーチンを開始する。図8に示すように、まず、CPUが記憶部REGに対し初期化信号rstを出力し、記憶部REGに格納された各種データ（温度監視部TM及び基準温度算出部RCが備えるタイマのリミット値、計算用基礎データd1、基準アクティブサイクルac2）を初期化する（ステップS1）。

[0068] 次に、CPUは、基準温度算出部RCに対し、基準温度Trefを算出するためのサブルーチン1の開始要求req1を出力する。開始要求req1に応じ、基準温度算出部RCは、サブルーチン1を開始する（ステップS2）。サブルーチン1の詳細については後述する。

[0069] 次に、CPUは、温度監視部TMに対し、測定温度Taを取得するためのサブルーチン2の開始要求req2を出力する。開始要求req2に応じ、温度監視部TMは、サブルーチン2を開始する（ステップS3）。サブルーチン2の詳細については後述する。なお、ステップS2とステップS3の順序は逆でもよい。

[0070] 次に、基準温度算出部RCは、サブルーチン1によって取得した基準温度Trefをモード判定部MDに設定する（ステップS4）。さらに、温度監視部TMは、サブルーチン2によって取得した測定温度Taをモード判定部MDに設定する（ステップS5）。なお、ステップS4とステップS5の順序は逆でもよい。

[0071] 次に、モード判定部MDは、測定温度 T_a と基準温度 T_{ref} とを比較し、 $T_a < T_{ref}$ を満たすか否かを判定する（ステップS6）。 $T_a < T_{ref}$ を満たす場合（ステップS6YES）、モード判定部MDはアイドル電力削減モードを選択し、クロック生成部CPGはCPUの動作クロック ck_1 の周波数を低く設定する（ステップS7）。例えば、処理に支障をきたさずにCPUが動作可能な最低の周波数に設定する。その後、ステップS4に戻り、モード判定を繰り返す。

[0072] 一方、 $T_a < T_{ref}$ を満たさない場合（ステップS6NO）、モード判定部MDはリーク電力削減モードを選択し、クロック生成部CPGはCPUの動作クロック ck_1 の周波数を高く設定する（ステップS8）。例えば、CPUが動作可能な最高周波数に設定する。その後、ステップS4に戻り、モード判定を繰り返す。

[0073] <基準温度算出方法（サブルーチン1）>

次に、図9を参照して、実施の形態1に係る半導体装置における基準温度 T_{ref} の算出方法（サブルーチン1）について説明する。図9は、実施の形態1に係る基準温度算出方法（サブルーチン1）を説明するためのフローチャートである。

[0074] CPUからのサブルーチン1の開始要求 req_1 に応じ、基準温度算出部RCは、サブルーチン1を開始する。

まず、基準温度算出部RCは、内部に備えたタイマの値をリセットする（ステップS11）。

[0075] 次に、タイマがリミット値に到達したら（すなわちタイマ満了時）、基準温度算出部RCは、サイクル測定部CMへアクティブサイクル ac_1 の測定要求 req_3 を出力する（ステップS12）。

[0076] 次に、基準温度算出部RCからの測定要求 req_3 に応じ、サイクル測定部CMはアクティブサイクル ac_1 を測定し、比較部CMPへ出力する（ステップS13）。ここで、サイクル測定部CMは、アイドルサイクル C_i [Hz]、シャットダウン比率 r も併せて測定する。

[0077] 次に、比較部CMPは、サイクル測定部CMから取得したアクティブサイクル $a_c 1$ と記憶部REGに格納されている基準アクティブサイクル $a_c 2$ とを比較する。具体的には、例えば $a_c 2 \times 0.9 < a_c 1 < a_c 2 \times 1.1$ を満足しているか否かを判定する（ステップS14）。すなわち、アクティブサイクル $a_c 1$ の基準アクティブサイクル $a_c 2$ に対する変化が10%未満か否かを判定する。ここで、10%という数値はあくまでも一例であって、目的、用途等に応じて適宜設定することができる。

[0078] $a_c 2 \times 0.9 < a_c 1 < a_c 2 \times 1.1$ を満たせば（ステップS14YES）、比較部CMPは、基準温度算出部RCへ基準変更要求req4を出力せずに、ステップS11に戻る。すなわち、アクティブサイクル $a_c 1$ の基準アクティブサイクル $a_c 2$ に対する変化が小さい場合、比較部CMPは基準変更要求req4を基準温度算出部RCに対し出力しない。

[0079] 一方、 $a_c 2 \times 0.9 < a_c 1 < a_c 2 \times 1.1$ を満たさなければ（ステップS14NO）、基準温度算出部RCへ基準変更要求req4を出力する（ステップS15）。すなわち、アクティブサイクル $a_c 1$ の基準アクティブサイクル $a_c 2$ に対する変化が大きい場合、比較部CMPは基準変更要求req4を基準温度算出部RCに対し出力する。なお、基準変更要求req4は、サイクル測定部CMへも入力される。

[0080] 次に、サイクル測定部CMは、基準変更要求req4に応じて、アクティブサイクル $a_c 1$ を新たな基準アクティブサイクル $a_c 2$ として記憶部REGに格納する（ステップS16）。すなわち、基準温度Trefが更新される場合、基準アクティブサイクル $a_c 2$ も更新される。

[0081] 次に、基準温度算出部RCは、基準変更要求req4に応じて、記憶部REGに格納された要素アイドル電力 E_i [W/Hz] 及びサイクル測定部CMから取得したアイドルサイクル C_i [Hz] を用いて、アイドル電力 P_i [W] を算出する（ステップS17）。具体的には、 P_i [W] = E_i [W/Hz] $\times C_i$ [Hz] の式からアイドル電力 P_i [W] が算出される。

[0082] 続けて、基準温度算出部RCは、記憶部REGに格納された基準温度計算

式及びシャットダウン比率を用いて、基準温度 T_{ref} を算出する（ステップ S 1 8）。その後、ステップ S 1 1 へ戻り、ステップ S 1 1 ～ S 1 8 のフローを繰り返す。

[0083] 以下に、基準温度 T_{ref} を算出するために用いる基準温度計算式の一例を示す。

まず、トランジスタ 1 個当たりのリーク電流 i_L [A] は、係数 α [A/nm]、ゲート幅 W [nm]、閾値電圧 V_T [V]、サブスレッショルド係数 n 、温度電圧 U_t [V] を用いて、次式 1 で表すことができる。ここで、係数 α 及びサブスレッショルド係数 n は実験などから求めることができる。

$$i_L = \alpha \times W \times \exp \{ -V_T / (n \times U_t) \} \cdots \text{(式 1)}$$

[0084] ここで、温度電圧 U_t [V] は、ボルツマン定数 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ [J/K]、絶対温度 T [K]、電気素量 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ [C] を用いて、次式 2 で表すことができる。

$$U_t = k T / q \cdots \text{(式 2)}$$

[0085] ここで、半導体装置のリーク電流 I_L [A] は、半導体装置を構成するトランジスタ数 N [個] 及びシャットダウン比率 r を用いて、式 1、式 2 から次式 3 により表すことができる。

$$I_L = \alpha \times W \times \exp \{ -V_T \times q / (n \times k T) \} \times N \times (1 - r) \cdots \text{(式 3)}$$

[0086] 式 3 から絶対温度 T [K] は次式 4 により表すことができる。

$$T = (-V_T \times q) / (n \times k) / \ln [I_L / \{ \alpha \times W \times N \times (1 - r) \}] \cdots \text{(式 4)}$$

[0087] そして、式 4 の絶対温度 T [K] は、次式 5 により摂氏温度 T_c [°C] ($= T - T_0$) として表すことができる。ここで、0 °C の絶対温度 $T_0 = 273.15$ [K] である。

$$T_c = (-V_T \times q) / (n \times k) / \ln [I_L / \{ \alpha \times W \times N \times (1 - r) \}] - T_0$$

・・・ (式5)

[0088] アイドル電力 P_I [W] (=アイドル電流 I_I [A] ×動作電圧 V [V]) とリーク電力 P_L [W] (=リーク電流 I_L [A] ×動作電圧 V [V]) の比が 1 : m すなわち $I_L = m \times I_I = m \times P_I / V$ のときの温度を基準温度 T_{ref} [°C] とする。この基準温度 T_{ref} [°C] は、式5から次式6により表すことができる。 m の値は適宜決定すればよいが、例えば 10 程度とする。

$$T_{ref} = (-V_T \times q) / (n \times k) / \ln [(m \times P_I / V) / \{ \alpha \times W \times N \times (1 - r) \}] - T_0$$

・・・ (式6)

[0089] この式6が基準温度計算式となる。この式6に、ステップS17において算出されたアイドル電力 P_I [W] 及びサイクル測定部CMから取得されたシャットダウン比率 r を代入することにより、基準温度 T_{ref} [°C] が得られる。

[0090] <測定温度取得方法(サブルーチン2)>

次に、図10を参照して、実施の形態1に係る半導体装置における測定温度 T_a の取得方法(サブルーチン2)について説明する。図10は、実施の形態1に係る測定温度取得方法(サブルーチン2)を説明するためのフローチャートである。

CPUからのサブルーチン2の開始要求 req_2 に応じ、温度監視部TMは、サブルーチン2を開始する。

まず、温度監視部TMは、内部に備えたタイマの値をリセットする(ステップS21)。

[0091] 次に、タイマがリミット値に到達したら(すなわちタイマ満了時)、温度監視部TMは、温度センサTSへ温度の測定要求 req_5 を出力する(ステップS22)。

[0092] 次に、温度監視部TMは、測定要求 req_5 に応じて温度センサTSから出力された測定温度 T_a を取得する(ステップS23)。その後、ステップ

S 2 1 へ戻り、ステップ S 2 1 ～ S 2 3 のフローを繰り返す。

[0093] <消費電力削減効果の説明>

次に、図 1 1 A、図 1 1 B を参照して、本実施の形態に係る半導体装置の消費電力削減効果について説明する。図 1 1 A は、実施の形態 1 の実施例に係る半導体装置の低温時（測定温度 $T_a < \text{基準温度 } T_{ref}$ ）すなわちアイドル電力削減モードにおける消費電力の構成を模式的に示すグラフである。図 1 1 B は、実施の形態 1 の実施例に係る半導体装置の高温時（基準温度 $T_{ref} < \text{測定温度 } T_a$ ）すなわちリーク電力削減モードにおける消費電力の構成を模式的に示すグラフである。ここで、図 1 1 A、図 1 1 B は、比較例に係る図 4 A、図 4 B と同種のグラフである。

[0094] 図 1 1 A、図 1 1 B のグラフにおいて横軸は時間 [s]、縦軸は単位時間当たりの消費電力 [W/s] である。横軸の時間に合わせ、動作クロック (CLOCK) 及びステータス (STATUS) が示されている。図 1 1 A に示すように、単位時間当たりのリーク電力 P_L 及びアイドル電力 P_I は、アイドル状態及びアクティブ状態によらず、一定である。アクティブ電力 P_A は、アクティブ状態のみにおいて発生する。また、シャットダウン状態では消費電力は発生しない。図 1 1 B においても同様である。図 1 1 A 及び図 1 1 B に示した単位時間当たりの消費電力の時間積分値（つまり図 1 1 A 及び図 1 1 B に示したグラフの面積すなわちマスの数）が消費電力となる。

[0095] 図 1 1 B では図 1 1 A に比べ、動作周波数が 2 倍になっているため、単位時間当たりのアイドル電力 P_I も 2 倍になっている。他方、図 1 1 B では図 1 1 A に比べ、温度の上昇により、単位時間当たりのリーク電力 P_L は 8 倍になっている。ここで、処理に要するアクティブ電力 P_A の合計は、図 1 1 A 及び図 1 1 B において同じである。そのため、図 1 1 B では図 1 1 A に比べ、アクティブ状態が短時間化（シャットダウン状態が長時間化）している。

[0096] 実施例に係る図 1 1 A を比較例に係る図 4 A と比較することにより、アイドル電力削減モードにおける消費電力削減効果について説明する。図 1 1 A では図 4 A に比べ、動作周波数が $1/2$ になっているため、単位時間当たり

のアイドル電力 P_I は $1/2$ になる。一方、処理に要するアクティブ電力 P_A の合計は同じであるため、処理に要する時間（アクティブ状態の時間）は2倍となる。なお、温度は同じであるため、単位時間当たりのリーク電力 P_L は同じである。

[0097] 図11Aでは図4Aに比べ、アクティブ状態の時間は2倍になり、リーク電力 P_L は増える。しかしながら、低温で単位時間当たりのリーク電力 P_L が小さいため、単位時間当たりのアイドル電力 P_I が $1/2$ となるアイドル電力削減効果の方が大きい。そのため、全体として消費電力を削減することができる。より具体的には、図11Aでは図4Aに比べ、リーク電力 P_L が2マス分増えているが、アイドル電力 P_I が4マス分減っており、全体として2マス分の消費電力を削減することができる。

[0098] 次に、実施例に係る図11Bを比較例に係る図4Bと比較することにより、リーク電力削減モードにおける消費電力削減効果について説明する。図11Bでは図4Bに比べ、動作周波数が2倍になっているため、単位時間当たりのアイドル電力 P_I は2倍になる。一方、処理に要するアクティブ電力 P_A の合計は同じであるため、処理に要する時間（アクティブ状態の時間）は $1/2$ となる。なお、温度は同じであるため、単位時間当たりのリーク電力 P_L は同じである。

[0099] 図11Bでは図4Bに比べ、単位時間当たりのアイドル電力 P_I は2倍になる。しかしながら、高温で単位時間当たりのリーク電力 P_L が大きいいため、アクティブ状態の短時間化（シャットダウン状態の長時間化）によるリーク電力削減効果の方が大きい。そのため、全体として消費電力を削減することができる。より具体的には、図11Bでは図4Bに比べ、アイドル電力 P_I が4マス分増えているが、リーク電力 P_L が16マス分減っており、全体として12マス分の消費電力を削減することができる。

[0100] 図12は、図11A、図11Bに示した実施の形態1の実施例に係る半導体装置の消費電力の温度依存性を示すグラフである。横軸が温度[°C]、縦軸が消費電力[mW]であり、実施例の消費電力が実線で示されている。ま

た、図 1 2 には、図 4 A、図 4 B に示した比較例に係る半導体装置の消費電力も破線で示されている。

[0101] 実施例では、基準温度 T_{ref} よりも温度が低い場合、動作周波数を下げ、基準温度 T_{ref} よりも温度が高い場合、動作周波数を上げるように制御している。反対に、比較例では、基準温度 T_{ref} よりも温度が低い場合、動作周波数を上げ、基準温度 T_{ref} よりも温度が高い場合、動作周波数を下げるように制御している。

[0102] 図 1 2 に示すように、全温度域において、比較例よりも実施例の方が消費電力は小さい。ここで、温度が基準温度 T_{ref} 近傍であれば、実施例と比較例との消費電力の差は小さい。しかしながら、温度が基準温度 T_{ref} よりも高くあるいは低くなる程、その差は大きくなる。特に、高温域でのリーク電力削減効果が大きい。

[0103] 以上説明したように、本実施の形態に係る半導体装置では、動作周波数に比例して増加するアイドル電力 P_I と温度上昇とともに急激に増加するリーク電力 P_L とのうち、いずれを削減するのが全体としての消費電力削減に寄与するのかを基準温度 T_{ref} と測定温度 T_a とを比較することにより判断している。そして、この比較結果に基づいて、動作周波数を適切に制御することにより、消費電力を削減している。

[0104] 具体的には、測定温度 T_a が基準温度 T_{ref} よりも小さく、リーク電力 P_L が小さい場合、電力削減モード制御部（制御部）100 は、動作周波数を低くするように制御する。これにより、アイドル電力 P_I が削減され、全体として消費電力を削減することができる。他方、測定温度 T_a が基準温度 T_{ref} より大きく、リーク電力 P_L が大きい場合、電力削減モード制御部（制御部）100 は、動作周波数を高くするように制御する。すなわち、アクティブ状態を短時間化（シャットダウン状態を長時間化）することにより、リーク電力 P_L が削減され、全体として消費電力を削減することができる。

[0105] さらに、消費電力の削減に伴い、半導体装置から発生する熱も抑制することができる。そのため、チップ温度の上昇による半導体装置の熱暴走を抑制

することができる。すなわち、半導体装置の信頼性も向上する。

[0106] (実施の形態2)

＜実施の形態2に係る半導体装置の構成＞

図13を参照して、実施の形態2に係る半導体装置であるアプリケーションプロセッサ601の構成について説明する。図13は、実施の形態2に係るアプリケーションプロセッサ601の構成例を示すブロック図である。図13に示すように、実施の形態2に係るアプリケーションプロセッサ601は、図7に示した実施の形態1に係るアプリケーションプロセッサ601の構成に加え、画像処理部IPU及び音声処理部VPUを備えている。図13において、太い矢印はデータを示し、細い矢印は各種制御信号やクロックを示している。

[0107] 画像処理部IPUは、画像処理専用のプロセッサであって、例えばDSP (Digital Signal Processor) から構成される。画像処理部IPUには、クロック生成部CPGから出力される動作クロックck2が入力される。本実施の形態に係る半導体装置では、画像処理部IPUは、例えば、動画再生などの画像処理を必要とするユースケースの場合に処理を実行し、画像処理を必要としないユースケースではステータスが常時シャットダウン状態となる。

[0108] 音声処理部VPUは、音声処理専用のプロセッサであって、例えばDSP (Digital Signal Processor) から構成される。音声処理部VPUには、クロック生成部CPGから出力される動作クロックck3が入力される。本実施の形態に係る半導体装置では、音声処理部VPUは、例えば、音楽再生などの音声処理を必要とするユースケースの場合に処理を実行し、音声処理を必要としないユースケースではステータスが常時シャットダウン状態となる。

[0109] 電源制御部PSCは、CPUに接続された電源供給スイッチSW1のオンオフを制御する電源イネーブル信号psen1を出力する。また、電源制御部PSCは、画像処理部IPUに接続された電源供給スイッチSW2のオン

オフを制御する電源イネーブル信号 $pse n 2$ を出力する。さらに、電源制御部 $P S C$ は、音声処理部 $V P U$ に接続された電源供給スイッチ $S W 3$ のオンオフを制御する電源イネーブル信号 $pse n 3$ を出力する。電源供給スイッチ $S W 1 \sim S W 3$ は、例えば $M O S F E T$ から構成され、それらのゲート端子（制御端子）に電源イネーブル信号 $pse n 1 \sim pse n 3$ がそれぞれ入力される。

[0110] ここで、電源供給スイッチ $S W 1$ のオンオフは、 $C P U$ の状態に応じて制御される。具体的には、 $C P U$ の状態がアクティブ状態又はアイドル状態の場合、電源供給スイッチ $S W 1$ はオンとなる。一方、 $C P U$ の状態がシャットダウン状態の場合、電源供給スイッチ $S W 1$ はオフとなる。

[0111] 同様に、電源供給スイッチ $S W 2$ のオンオフは、画像処理部 $I P U$ の状態に応じて制御される。具体的には、画像処理部 $I P U$ の状態がアクティブ状態又はアイドル状態の場合、電源供給スイッチ $S W 2$ はオンとなる。一方、画像処理部 $I P U$ の状態がシャットダウン状態の場合、電源供給スイッチ $S W 2$ はオフとなる。

[0112] 同様に、電源供給スイッチ $S W 3$ のオンオフは、音声処理部 $V P U$ の状態に応じて制御される。具体的には、音声処理部 $V P U$ の状態がアクティブ状態又はアイドル状態の場合、電源供給スイッチ $S W 3$ はオンとなる。一方、音声処理部 $V P U$ の状態がシャットダウン状態の場合、電源供給スイッチ $S W 3$ はオフとなる。

その他の構成は、実施の形態 1 に係る半導体装置と同様であるため、詳細な説明は省略する。

[0113] <実施の形態 2 に係る半導体装置の動作の詳細>

次に、図 1 4 A ～図 1 4 E を用いて、実施の形態 2 に係る半導体装置の動作の詳細について説明する。図 1 4 A ～図 1 4 E は、実際のユースケース（音楽再生及び動画再生）に則した電力削減モード制御方法の詳細を説明するためのシーケンス図である。図 1 4 A ～図 1 4 E の左端に $< 1 > \sim < 1 1 >$ までの番号を示している。この番号に沿って、順に説明する。

[0114] <1>システム起動時の動作

システムが起動すると、CPUがメインルーチンを開始する。まず、図14Aに示すように、CPUが記憶部REGに対し初期化信号rstを出力し、記憶部REGに格納された各種データ（温度監視部TM及び基準温度算出部RCが備えるタイマのリミット値、計算用基礎データd1、基準アクティブサイクルac2）を初期化する。なお、起動時のチップ温度は20℃であって、起動後のユースケースは音楽再生である。

[0115] 次に、CPUは、基準温度算出部RCに対し、基準温度Trefを算出するためのサブルーチン1の開始を要求する開始要求req1を出力する。また、CPUは、温度監視部TMに対し、測定温度Taを取得するためのサブルーチン2の開始を要求する開始要求req2を出力する。

[0116] <2>基準温度算出（サブルーチン1）及び測定温度取得（サブルーチン2）

サブルーチン1の開始要求req1に応じ、基準温度算出部RCは内部のタイマをリセットし、タイマ満了時にサイクル測定部CMに対し、各種測定データの測定要求req3を出力する。この測定要求req3に応じ、サイクル測定部CMは、アクティブサイクルac1及び計算用測定データd2（アイドルサイクルCi及びシャットダウン比率r）を測定する。続けて、サイクル測定部CMは、比較部取得したアクティブサイクルac1を比較部CMPへ送付する。

[0117] 比較部CMPは、サイクル測定部CMから送付されたアクティブサイクルac1と記憶部REGに格納されている基準アクティブサイクルac2とを比較する。具体的には、例えば $ac2 \times 0.9 < ac1 < ac2 \times 1.1$ を満足しているか否かを判定する。すなわち、アクティブサイクルac1の基準アクティブサイクルac2に対する変化が10%未満か否かを判定する。上述の通り、10%という数値はあくまでも一例である。

[0118] ここで、システム起動後最初の判定であるため、 $ac2 \times 0.9 < ac1 < ac2 \times 1.1$ を満足しない。そのため、比較部CMPは、基準温度算出

部RCに対し、基準温度 T_{ref} を変更するための基準変更要求 $req4$ を出力する。この基準変更要求 $req4$ は例えばイネーブル信号であって、基準変更要求 $req4$ を出力するとは、当該イネーブル信号の値が1であることを意味する。

[0119] 基準変更要求 $req4$ は、サイクル測定部CMにも入力される。基準変更要求 $req4$ に応じて、サイクル測定部CMはアクティブサイクル $ac1$ を新たな基準アクティブサイクル $ac2$ として記憶部REGへ送付する（図14Aには示されていないが、図9のステップS16に相当する）。

[0120] 基準変更要求 $req4$ に応じ、基準温度算出部RCは、サイクル測定部CMに対し計算用測定データ $d2$ （アイドルサイクル C_i 及びシャットダウン比率 r ）の送付を要求する。この要求に応じて、サイクル測定部CMは、基準温度算出部RCへ計算用測定データ $d2$ を送付する。

また、基準温度算出部RCは、記憶部REGに対し計算用基礎データ $d1$ （基準温度計算式及び要素アイドル電力）の送付を要求する。この要求に応じて、記憶部REGは基準温度算出部RCへ計算用基礎データ $d1$ を送付する。

[0121] 基準温度算出部RCは、記憶部REGから取得した要素アイドル電力 E_i [W/Hz] 及びサイクル測定部CMから取得したアイドルサイクル C_i [$H z$] を用いて、アイドル電力 P_i [W] を算出する。具体的には、 P_i [W] = E_i [W/Hz] $\times C_i$ [$H z$] の式からアイドル電力 P_i [W] を算出する。

続けて、基準温度算出部RCは、自身が算出したアイドル電力 P_i 、サイクル測定部CMから取得したシャットダウン比率 r 、及び記憶部REGから取得した基準温度計算式を用いて、基準温度 T_{ref} を算出する。ここでは、 $T_{ref} = 63.3^{\circ}C$ とする。基準温度算出部RCは、この算出された基準温度 T_{ref} をモード判定部MDへ送付する。

[0122] 一方、サブルーチン2の開始要求 $req2$ に応じ、温度監視部TMは、内部のタイマをリセットし、タイマ満了時に温度センサTSへ温度の測定要求 $req5$ を出力する。測定要求 $req5$ に応じ、温度センサTSは測定温度

T_a を取得し、温度監視部 TM へ送付する。ここでは、 $T_a = 22^\circ\text{C}$ である。温度監視部 TM は、温度センサ TS から取得した測定温度 T_a をモード判定部 MD へ送付する。

[0123] <3>モード判定

モード判定部 MD は、測定温度 T_a と基準温度 T_{ref} とを比較し、 $T_a < T_{ref}$ を満たすか否かを判定する。ここで、測定温度 $T_a = 22^\circ\text{C}$ 、基準温度 $T_{ref} = 63.3^\circ\text{C}$ であるため、 $T_a < T_{ref}$ を満たす。従って、モード判定部 MD は、アイドル電力削減モードを選択する。そのため、クロック生成部 CPG は、出力する動作クロック ck_1 の周波数（ CPU の動作周波数）を最大周波数 $f_{max} [\text{Hz}]$ からアイドル電力削減モード周波数 $f_1 [\text{Hz}]$ へ変更する。

[0124] <4>基準温度算出（サブルーチン1）及び測定温度取得（サブルーチン2）

次に、図14Bを参照して説明する。

基準温度算出部 RC は、基準温度 T_{ref} をモード判定部 MD へ送付した後、内部のタイマをリセットする。そして、基準温度算出部 RC は、タイマ満了時にサイクル測定部 CM に対し、各種測定データの測定要求 req_3 を出力する。この測定要求 req_3 に応じ、サイクル測定部 CM は、アクティブサイクル ac_1 及び計算用測定データ d_2 （アイドルサイクル C_i 及びシャットダウン比率 r ）を測定する。続けて、サイクル測定部 CM は、比較部取得したアクティブサイクル ac_1 を比較部 CMP へ送付する。

[0125] 比較部 CMP は、サイクル測定部 CM から送付されたアクティブサイクル ac_1 と記憶部 REG に格納されている基準アクティブサイクル ac_2 とを比較する。具体的には、例えば $ac_2 \times 0.9 < ac_1 < ac_2 \times 1.1$ を満足しているか否かを判定する。ここで、ユースケースは音楽再生のままであるため、 $ac_2 \times 0.9 < ac_1 < ac_2 \times 1.1$ を満足する。そのため、比較部 CMP は、基準温度算出部 RC に対し、基準温度 T_{ref} を変更するための基準変更要求 req_4 を出力しない。この基準変更要求 req_4 が上

記イネーブル信号であれば、基準変更要求 $req\ 4$ を出力しないとは、当該イネーブル信号の値が0であることを意味する。

[0126] 一方、温度監視部 TM は、測定温度 T_a をモード判定部 MD へ送付した後、内部のタイマをリセットし、タイマ満了時に温度センサ TS へ温度の測定要求 $req\ 5$ を出力する。測定要求 $req\ 5$ に応じ、温度センサ TS は測定温度 T_a を取得し、温度監視部 TM へ送付する。ここでは、 $T_a = 23^{\circ}\text{C}$ である。温度監視部 TM は、温度センサ TS から取得した測定温度 T_a をモード判定部 MD へ送付する。

[0127] <5>モード判定

モード判定部 MD は、測定温度 T_a と基準温度 T_{ref} とを比較し、 $T_a < T_{ref}$ を満たすか否かを判定する。ここで、測定温度 $T_a = 23^{\circ}\text{C}$ 、基準温度 $T_{ref} = 63.3^{\circ}\text{C}$ であるため、 $T_a < T_{ref}$ を満たす。従って、モード判定部 MD は、アイドル電力削減モードを選択する。ここで、 CPU の動作周波数は既にアイドル電力削減モード周波数 f_1 [Hz] である。そのため、クロック生成部 CPG は出力する動作クロック ck_1 の周波数を切り換えない。

[0128] <6>基準温度算出（サブルーチン1）及び測定温度取得（サブルーチン2）

次に、図14Cを参照して説明する。

基準温度算出部 RC は、比較部 CMP からの基準変更要求 $req\ 4$ がない場合、内部のタイマをリセットする。そして、基準温度算出部 RC は、タイマ満了時にサイクル測定部 CM に対し、各種測定データの測定要求 $req\ 3$ を出力する。この測定要求 $req\ 3$ に応じ、サイクル測定部 CM は、アクティブサイクル ac_1 及び計算用測定データ d_2 （アイドルサイクル C_i 及びシャットダウン比率 r ）を測定する。続けて、サイクル測定部 CM は、比較部取得したアクティブサイクル ac_1 を比較部 CMP へ送付する。

[0129] 比較部 CMP は、サイクル測定部 CM から送付されたアクティブサイクル ac_1 と記憶部 REG に格納されている基準アクティブサイクル ac_2 とを

比較する。具体的には、例えば $a c 2 \times 0.9 < a c 1 < a c 2 \times 1.1$ を満足しているか否か判定する。ここで、ユースケースが音楽再生から動画再生へ変更されているため、 $a c 2 \times 0.9 < a c 1 < a c 2 \times 1.1$ を満足しない。そのため、比較部CMPは、基準温度算出部RCに対し、基準温度 T_{ref} を変更するための基準変更要求 $req 4$ を出力する。

[0130] この基準変更要求 $req 4$ は、サイクル測定部CMにも入力され、この基準変更要求 $req 4$ に応じて、サイクル測定部CMはアクティブサイクル $a c 1$ を新たな基準アクティブサイクル $a c 2$ として記憶部REGへ送付する（図14Cには示されていないが、図9のステップS16に相当する）。

[0131] 基準変更要求 $req 4$ に応じ、基準温度算出部RCは、サイクル測定部CMに対し計算用測定データ $d 2$ （アイドルサイクル C_i 及びシャットダウン比率 r ）の送付を要求する。この要求に応じて、サイクル測定部CMは、基準温度算出部RCへ計算用測定データ $d 2$ を送付する。

また、基準温度算出部RCは、記憶部REGに対し計算用基礎データ $d 1$ （基準温度計算式及び要素アイドル電力）の送付を要求する。この要求に応じて、記憶部REGは基準温度算出部RCへ計算用基礎データ $d 1$ を送付する。

[0132] 基準温度算出部RCは、記憶部REGから取得した要素アイドル電力 E_i [W/Hz] 及びサイクル測定部CMから取得したアイドルサイクル C_i [$H z$] を用いて、アイドル電力 P_i [W] を算出する。続けて、基準温度算出部RCは、自身が算出したアイドル電力 P_i 、サイクル測定部CMから取得したシャットダウン比率 r 、及び記憶部REGから取得した基準温度計算式を用いて、基準温度 T_{ref} を算出する。ここでは、 $T_{ref} = 64.4^{\circ}C$ とする。基準温度算出部RCは、この算出された基準温度 T_{ref} をモード判定部MDへ送付する。

[0133] 一方、温度監視部TMは、測定温度 T_a をモード判定部MDへ送付した後、内部のタイマをリセットし、タイマ満了時に温度センサTSへ温度の測定要求 $req 5$ を出力する。測定要求 $req 5$ に応じ、温度センサTSは測定

温度 T_a を取得し、温度監視部 TM へ送付する。ここでは、 $T_a = 44^\circ\text{C}$ である。温度監視部 TM は、温度センサ TS から取得した測定温度 T_a をモード判定部 MD へ送付する。

[0134] <7>モード判定

モード判定部 MD は、測定温度 T_a と基準温度 T_{ref} とを比較し、 $T_a < T_{ref}$ を満たすか否かを判定する。ここで、測定温度 $T_a = 44^\circ\text{C}$ 、基準温度 $T_{ref} = 64.4^\circ\text{C}$ であるため、 $T_a < T_{ref}$ を満たす。従って、モード判定部 MD は、アイドル電力削減モードを選択する。この時点において、 CPU の動作周波数は、音楽再生でのアイドル電力削減モード周波数 f_1 [Hz] である。そのため、クロック生成部 CPG は、出力する動作クロック ck_1 の周波数を動画再生でのアイドル電力削減モード周波数 f_2 [Hz] へ切り換える。ここで、動画再生では音楽再生よりも高速動作が要求されるため、通常 $f_1 < f_2$ である。

[0135] <8>基準温度算出（サブルーチン1）及び測定温度取得（サブルーチン2）

次に、図14Dを参照して説明する。

基準温度算出部 RC は、基準温度 T_{ref} をモード判定部 MD へ送付した後、内部のタイマをリセットする。そして、基準温度算出部 RC は、タイマ満了時にサイクル測定部 CM に対し、各種測定データの測定要求 req_3 を出力する。この測定要求 req_3 に応じ、サイクル測定部 CM は、アクティブサイクル ac_1 及び計算用測定データ d_2 （アイドルサイクル C_i 及びシャットダウン比率 r ）を測定する。続けて、サイクル測定部 CM は、比較部取得したアクティブサイクル ac_1 を比較部 CMP へ送付する。

[0136] 比較部 CMP は、サイクル測定部 CM から送付されたアクティブサイクル ac_1 と記憶部 REG に格納されている基準アクティブサイクル ac_2 とを比較する。具体的には、例えば $ac_2 \times 0.9 < ac_1 < ac_2 \times 1.1$ を満足しているか否かを判定する。ここで、ユースケースは動画再生のままであるため、 $ac_2 \times 0.9 < ac_1 < ac_2 \times 1.1$ を満足する。そのため、

比較部CMPは、基準温度算出部RCに対し、基準温度 T_{ref} を変更するための基準変更要求 $req4$ を出力しない。

[0137] 一方、温度監視部TMは、測定温度 T_a をモード判定部MDへ送付した後、内部のタイマをリセットし、タイマ満了時に温度センサTSへ温度の測定要求 $req5$ を出力する。測定要求 $req5$ に応じ、温度センサTSは測定温度 T_a を取得し、温度監視部TMへ送付する。ここでは、 $T_a = 70^{\circ}\text{C}$ である。温度監視部TMは、温度センサTSから取得した測定温度 T_a をモード判定部MDへ送付する。

[0138] <9>モード判定

モード判定部MDは、測定温度 T_a と基準温度 T_{ref} とを比較し、 $T_a < T_{ref}$ を満たすか否かを判定する。ここで、測定温度 $T_a = 70^{\circ}\text{C}$ 、基準温度 $T_{ref} = 64.4^{\circ}\text{C}$ であるため、 $T_a < T_{ref}$ を満たさない。従って、モード判定部MDは、リーク電力削減モードを選択する。そのため、クロック生成部CPGは、出力する動作クロック $ck1$ の周波数をアイドル電力削減モード周波数 $f2$ [Hz] から最大周波数 f_{max} へ切り換える。

[0139] <10>基準温度算出（サブルーチン1）及び測定温度取得（サブルーチン2）

次に、図14Eを参照して説明する。

基準温度算出部RCは、比較部CMPからの基準変更要求 $req4$ がない場合、内部のタイマをリセットする。そして、基準温度算出部RCは、タイマ満了時にサイクル測定部CMに対し、各種測定データの測定要求 $req3$ を出力する。この測定要求 $req3$ に応じ、サイクル測定部CMは、アクティブサイクル $ac1$ 及び計算用測定データ $d2$ （アイドルサイクル C_i 及びシャットダウン比率 r ）を測定する。続けて、サイクル測定部CMは、比較部取得したアクティブサイクル $ac1$ を比較部CMPへ送付する。

[0140] 比較部CMPは、サイクル測定部CMから送付されたアクティブサイクル $ac1$ と記憶部REGに格納されている基準アクティブサイクル $ac2$ とを比較する。具体的には、例えば $ac2 \times 0.9 < ac1 < ac2 \times 1.1$ を

満足しているか否か判定する。ここで、ユースケースは動画再生のままであるため、 $a c 2 \times 0.9 < a c 1 < a c 2 \times 1.1$ を満足する。そのため、比較部CMPは、基準温度算出部RCに対し、基準温度 T_{ref} を変更するための基準変更要求 $req 4$ を出力しない。

[0141] 一方、温度監視部TMは、測定温度 T_a をモード判定部MDへ送付した後、内部のタイマをリセットし、タイマ満了時に温度センサTSへ温度の測定要求 $req 5$ を出力する。測定要求 $req 5$ に応じ、温度センサTSは測定温度 T_a を取得し、温度監視部TMへ送付する。ここでは、 $T_a = 60^{\circ}\text{C}$ である。温度監視部TMは、温度センサTSから取得した測定温度 T_a をモード判定部MDへ送付する。

[0142] <11>モード判定

モード判定部MDは、測定温度 T_a と基準温度 T_{ref} とを比較し、 $T_a < T_{ref}$ を満たすか否かを判定する。ここで、測定温度 $T_a = 60^{\circ}\text{C}$ 、基準温度 $T_{ref} = 64.4^{\circ}\text{C}$ であるため、 $T_a < T_{ref}$ を満たす。従って、モード判定部MDは、アイドル電力削減モードを選択する。そのため、クロック生成部CPGは、出力する動作クロック $ck 1$ の周波数を最大周波数 f_{max} からアイドル電力削減モード周波数 $f 2 [\text{Hz}]$ へ切り換える。

[0143] 以上説明したように、本実施の形態に係る半導体装置では、動作周波数に比例して増加するアイドル電力 P_I と温度上昇とともに急激に増加するリーク電力 P_L とのうち、いずれを削減するのが全体としての消費電力削減に寄与するのかを基準温度 T_{ref} と測定温度 T_a とを比較することにより判断している。そして、この比較結果に基づいて、動作周波数を適切に制御することにより、消費電力を削減している。

[0144] 具体的には、測定温度 T_a が基準温度 T_{ref} よりも小さく、リーク電力 P_L が小さい場合、動作周波数を下げることによりアイドル電力 P_I を削減し、全体として消費電力を削減する。他方、測定温度 T_a が基準温度 T_{ref} 以上で、リーク電力 P_L が大きい場合、動作周波数を上げ、アクティブ状態を短時間化する（シャットダウン状態を長時間化する）ことにより、リーク電

力 P_L を削減し、全体として消費電力を削減する。

[0145] さらに、消費電力の削減に伴い、半導体装置から発生する熱も抑制することができる。そのため、チップ温度の上昇による半導体装置の熱暴走を抑制することができる。すなわち、半導体装置の信頼性も向上する。

[0146] (実施の形態3)

＜電力削減モード制御方法（メインルーチン）＞

次に、図15を参照して、実施の形態3に係る半導体装置における電力削減モード制御方法（メインルーチン）について説明する。図15は、実施の形態3に係る電力削減モード制御方法（メインルーチン）を説明するためのフローチャートである。実施の形態3に係る半導体装置の構成は、図7に示した実施の形態1に係る半導体装置と同様であるが、モード判定部MDにおける判定方法が異なる。

[0147] 図15におけるステップS1～S5は、図8におけるステップS1～S5と同じであるため、説明を省略する。

ステップS5の後、モード判定部MDは、測定温度 T_a と下限基準温度（第1の基準温度） $= T_{ref} \times 0.8$ とを比較し、 $T_a < T_{ref} \times 0.8$ を満たすか否かを判定する（ステップS61）。 $T_a < T_{ref} \times 0.8$ を満たす場合（ステップS61 YES）、モード判定部MDはアイドル電力削減モードを選択し、クロック生成部CPGはCPUの動作クロック ck_1 の周波数を低く設定する（ステップS7）。例えば、処理に支障をきたさずにCPUが動作可能な最低の周波数に設定する。その後、ステップS4に戻り、モード判定を繰り返す。

[0148] 一方、 $T_a < T_{ref} \times 0.8$ を満たさない場合（ステップS61 NO）、モード判定部MDは、測定温度 T_a と上限基準温度（第2の基準温度） $= T_{ref} \times 1.2$ とを比較し、 $T_a > T_{ref} \times 1.2$ を満たすか否かを判定する（ステップS62）。 $T_a > T_{ref} \times 1.2$ を満たす場合（ステップS62 YES）、モード判定部MDはリーク電力削減モードを選択し、クロック生成部CPGはCPUの動作クロック ck_1 の周波数を高く設定する

(ステップS8)。例えば、CPUが動作可能な最高周波数に設定する。その後、ステップS4に戻り、モード判定を繰り返す。

[0149] 一方、 $T_a > T_{ref} \times 1.2$ を満たさない場合(ステップS62NO)、モード判定部MDはいずれのモードも選択せず、クロック生成部CPGはCPUの動作クロック $ck1$ の周波数を変更しない。つまり、そのままステップS4に戻り、モード判定を繰り返す。

[0150] すなわち、モード判定部MDは、測定温度 T_a が上限基準温度(図15では $T_{ref} \times 1.2$)を超えた場合に、リーク電力削減モードを選択し、測定温度 T_a が下限基準温度(図15では $T_{ref} \times 0.8$)を下回った場合に、アイドル電力削減モードを選択する。他方、測定温度 T_a が下限基準温度以上、上限基準温度以下(図15では $T_{ref} \times 0.8 \leq T_a \leq T_{ref} \times 1.2$)であれば、いずれのモードも選択しない。すなわち、クロック生成部CPGは動作周波数を変更しない。

[0151] なお、図15の例では、上限基準温度 $= T_{ref} \times 1.2$ 、下限基準温度 $= T_{ref} \times 0.8$ であるが、上限基準温度及び下限基準温度は適宜決定することができる。また、図15の例では、上限基準温度及び下限基準温度を基準温度 T_{ref} から決定しているが、別々に決定してもよい。また、当然のことながら、ステップS61、S62については、いずれを先に実行してもかまわない。

[0152] 図16Aは、実施の形態3の実施例に係る半導体装置の温度上昇時における消費電力の温度依存性を説明するためのグラフである。横軸が温度[°C]、縦軸が消費電力[mW]であり、実施例の消費電力が実線で示されている。また、図16Aには、比較例に係る半導体装置の消費電力も破線で示されている(図12の比較例に同じ)。

[0153] 図16Aでは、実施例において、下限基準温度 $T_{ref} \times 0.8$ よりも温度が低い場合、動作周波数を下げ、上限基準温度 $T_{ref} \times 1.2$ よりも温度が高い場合、動作周波数を上げるように制御している。図16Aに示すように、温度上昇時には、上限基準温度以下の温度域では低い動作周波数であ

って、上限基準温度を超えると高い動作周波数へ切り換わる。そのため、基準温度 T_{ref} から上限基準温度 $T_{ref} \times 1.2$ までの間では比較例と同程度の消費電力となる。但し、この温度域では比較例の消費電力もさほど高くなり、全体として実施の形態 1 とほぼ同様に比較例よりも消費電力が小さくなる。

[0154] 図 16B は、実施の形態 3 の実施例に係る半導体装置の温度降下時における消費電力の温度依存性を説明するためのグラフである。横軸が温度 [°C]、縦軸が消費電力 [mW] であり、実施例の消費電力が実線で示されている。また、図 16B にも、比較例に係る半導体装置の消費電力も破線で示されている（図 12 の比較例に同じ）。

[0155] 図 16B でも、実施例において、下限基準温度 $T_{ref} \times 0.8$ よりも温度が低い場合、動作周波数を下げ、上限基準温度 $T_{ref} \times 1.2$ よりも温度が高い場合、動作周波数を上げるように制御している。図 16B に示すように、温度降下時には、下限基準温度以上の温度域では高い動作周波数であって、下限基準温度を下回ると低い動作周波数へ切り換わる。そのため、基準温度 T_{ref} から下限基準温度 $T_{ref} \times 0.8$ までの間では比較例と同程度の消費電力となる。但し、この温度域では比較例の消費電力もさほど高くなり、全体として実施の形態 1 とほぼ同様に比較例よりも消費電力が小さくなる。

[0156] このように、実施の形態 3 に係る半導体装置では、実施の形態 1 に係る半導体装置に比べ、動作周波数の切換回数を減らすことにより、半導体装置の動作を安定させつつ、効果的に消費電力を低減することができる。

[0157] <変更例等>

以上、本発明者によってなされた発明を実施の形態に基づき具体的に説明したが、本発明は既に述べた実施の形態に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲において種々の変更が可能であることはいうまでもない。

例えば、基準温度 T_{ref} と測定温度 T_a との比較結果に基づいて、動作

周波数を変更することに加え、動作電圧も変更するようにしてもよい。

符号の説明

- [0158] 90 シリコン基板
- 91 ゲート
- 92 ソース
- 92 ドレイン
- 93 ドレイン
- 94 ゲート絶縁膜
- 95 サイドウォール
- 96 ゲートコンタクト
- 97 ソースコンタクト
- 98 ドレインコンタクト
- 100 電力削減モード制御部
- 500 無線通信端末
- 501 筐体
- 502 ディスプレイデバイス
- 503 タッチパネル
- 504 操作ボタン
- 505、506 カメラデバイス
- 600 無線通信装置
- 601 アプリケーションプロセッサ（ホストIC）
- 602 ベースバンドプロセッサ
- 603 RFIC
- 604 メインメモリ
- 605 バッテリ
- 606 PMIC
- 607 表示部
- 608 カメラ部

609 操作入力部
610 オーディオIC
611 マイク
612 スピーカ
CM サイクル測定部
CMP 比較部
CPG クロック生成部
CPU CPU
IPU 画像処理部
MD モード判定部
PSC 電源制御部
RC 基準温度算出部
REG 記憶部
SW1～SW3 電源供給スイッチ
Ta 測定温度
TM 温度監視部
Tref 基準温度
TS 温度センサ
VPU 音声処理部

請求の範囲

- [請求項1] 以下を含む半導体装置：
- (a) 半導体チップに設けられた演算部；
 - (b) 前記半導体チップの温度を測定する温度センサ；
 - (c) 前記温度センサにより測定された測定温度を予め定められた基準温度と比較し、比較結果に基づいて、制御信号を出力する制御部；
 - (d) 前記制御信号に基づいて、前記演算部へ供給する動作クロックを生成するクロック生成部、
- ここで前記制御部は、前記測定温度が前記基準温度よりも高い場合、前記動作クロックの周波数を第1の周波数から当該第1の周波数よりも高い第2の周波数へ切り換えるように前記クロック生成部を制御可能とする。
- [請求項2] 前記制御部は、前記測定温度が前記基準温度よりも低い場合、前記動作クロックの周波数を前記第2の周波数から前記第1の周波数へ切り換えるように前記クロック生成部を制御可能とする、
- 請求項1に記載の半導体装置。
- [請求項3] 前記制御部は、前記基準温度を算出する基準温度算出部を備えている、
- 請求項1に記載の半導体装置。
- [請求項4] 前記基準温度算出部は、予め定められたアイドル電流とリーク電流との比に基づいて、前記基準温度を算出する、
- 請求項3に記載の半導体装置。
- [請求項5] 前記基準温度算出部は、前記演算部がアクティブ状態での前記動作クロックのサイクル数の変化に応じて、前記基準温度を更新する、
- 請求項3に記載の半導体装置。
- [請求項6] 前記動作クロックの周波数が前記第1の周波数である第1のモードは、前記動作クロックの周波数が前記第2の周波数である第2のモードに比べ、前記演算部への電源電圧の供給を停止するシャットダウン

状態の比率が小さい、
請求項 1 に記載の半導体装置。

[請求項7] 前記演算部への前記電源電圧の供給を制御する電源制御部をさらに備える、
請求項 6 に記載の半導体装置。

[請求項8] 以下を含む半導体装置：
(a) 半導体チップに設けられた演算部；
(b) 前記半導体チップの温度を測定する温度センサ；
(c) 前記温度センサにより測定された測定温度を予め定められた第 1 の基準温度及び前記第 1 の基準温度よりも高い第 2 の基準温度と比較し、比較結果に基づいて、制御信号を出力する制御部；
(d) 前記制御信号に基づいて、前記演算部へ供給する動作クロックを生成するクロック生成部、
ここで前記制御部は、前記測定温度が前記第 2 の基準温度よりも高い場合、前記動作クロックの周波数を第 1 の周波数から当該第 1 の周波数よりも高い第 2 の周波数へ切り換えるように前記クロック生成部を制御する。

[請求項9] 前記制御部は、前記測定温度が前記第 1 の基準温度よりも低い場合、前記動作クロックの周波数を前記第 2 の周波数から前記第 1 の周波数へ切り換えるように前記クロック生成部を制御する、
請求項 8 に記載の半導体装置。

[請求項10] 前記制御部は、前記測定温度が前記第 1 の基準温度よりも高く前記第 2 の基準温度よりも低い場合、前記動作クロックの周波数を切り換えないように前記クロック生成部を制御する、
請求項 8 に記載の半導体装置。

[請求項11] 前記制御部は、前記第 1 の基準温度及び前記第 2 の基準温度を算出する基準温度算出部を備えている、
請求項 8 に記載の半導体装置。

- [請求項12] 前記基準温度算出部は、予め定められたアイドル電流とリーク電流との比に基づいて、前記第1の基準温度及び前記第2の基準温度を算出する、
請求項11に記載の半導体装置。
- [請求項13] 前記基準温度算出部は、前記演算部がアクティブ状態での前記動作クロックのサイクル数の変化に応じて、前記第1の基準温度及び前記第2の基準温度を更新する、
請求項11に記載の半導体装置。
- [請求項14] 前記動作クロックの周波数が前記第1の周波数である第1のモードは、前記動作クロックの周波数が前記第2の周波数である第2のモードに比べ、前記演算部への電源電圧の供給を停止するシャットダウン状態の比率が小さい、
請求項8に記載の半導体装置。
- [請求項15] 前記演算部への前記電源電圧の供給を制御する電源制御部をさらに備える、
請求項14に記載の半導体装置。
- [請求項16] 以下の工程を含む半導体装置の制御方法：
(a) 半導体チップの温度を測定する工程；
(b) 測定温度を予め定められた基準温度と比較する工程；
(c) 前記測定温度が前記基準温度よりも高い場合、前記半導体チップに形成された演算部へ供給する動作クロックの周波数を第1の周波数から当該第1の周波数よりも高い第2の周波数へ切り換える工程。
- [請求項17] さらに、前記測定温度が前記基準温度よりも低い場合、前記動作クロックの周波数を前記第2の周波数から前記第1の周波数へ切り換える工程を含む、
請求項16に記載の半導体装置の制御方法。
- [請求項18] 以下の工程を含む半導体装置の制御方法：
(a) 半導体チップの温度を測定する工程；

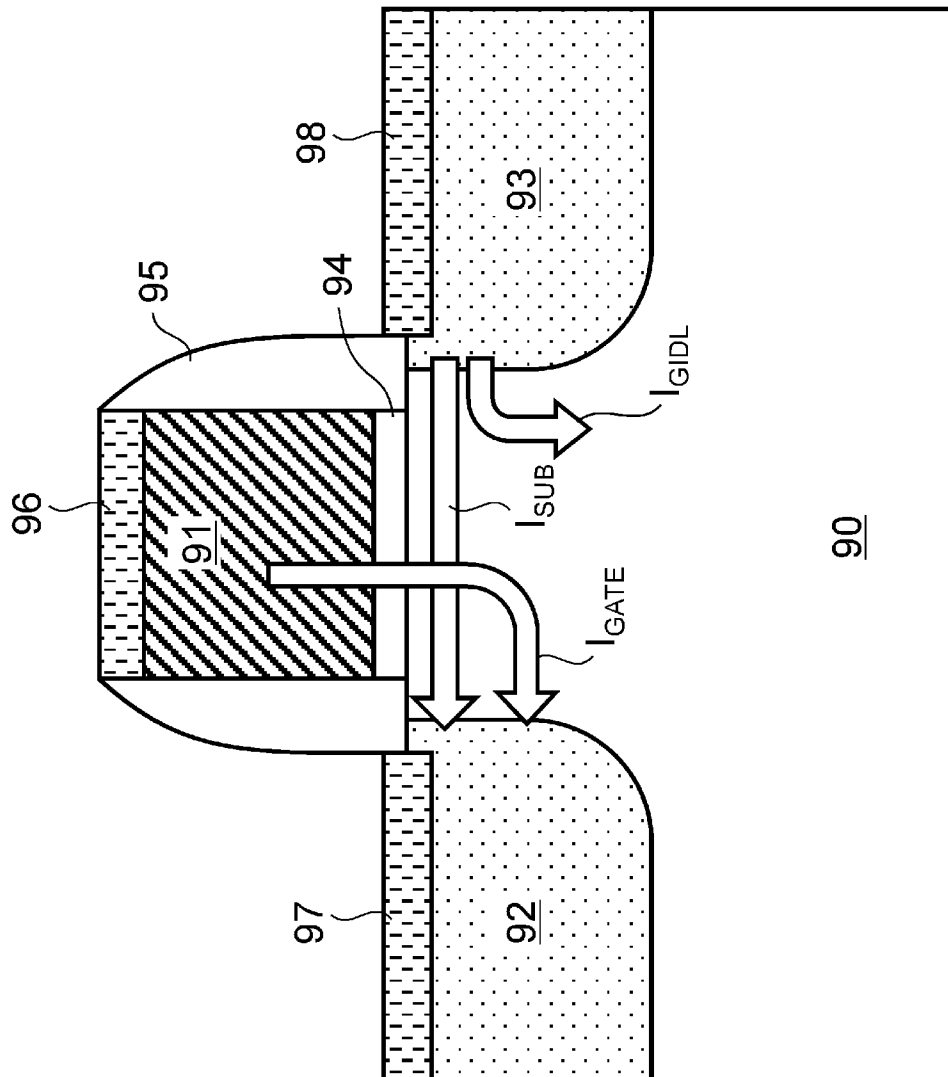
(b) 測定温度を予め定められた第1の基準温度及び前記第1の基準温度よりも高い第2の基準温度と比較する工程；

(c) 前記測定温度が前記第2の基準温度よりも高い場合、前記半導体チップに形成された演算部へ供給する動作クロックの周波数を第1の周波数から当該第1の周波数よりも高い第2の周波数へ切り換える工程。

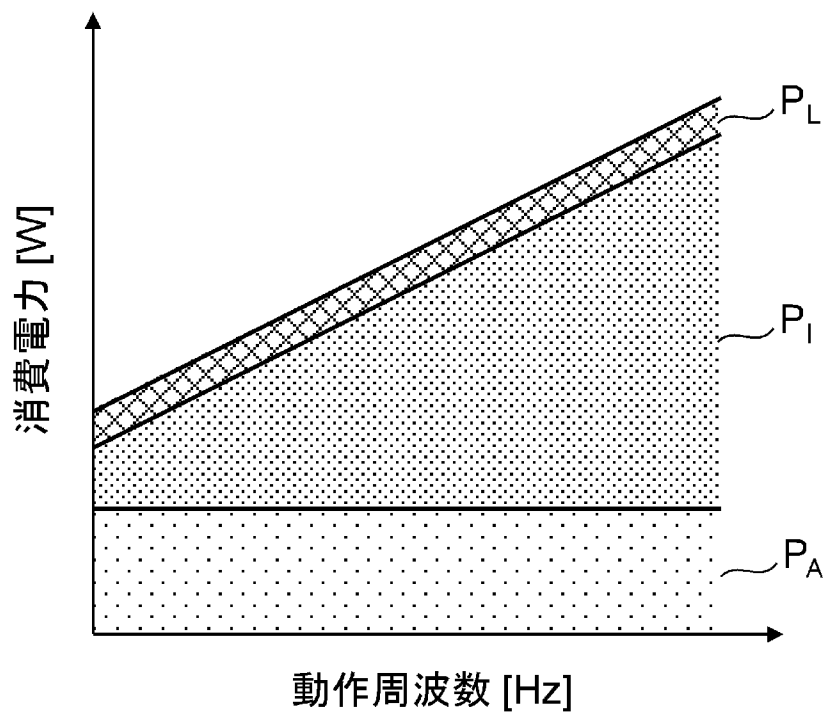
[請求項19] さらに、前記測定温度が前記第1の基準温度よりも低い場合、前記動作クロックの周波数を前記第2の周波数から前記第1の周波数へ切り換える工程を含む、
請求項18に記載の半導体装置の制御方法。

[請求項20] さらに、前記測定温度が前記第1の基準温度よりも高く前記第2の基準温度よりも低い場合、前記動作クロックの周波数を切り換えない工程を含む、
請求項18に記載の半導体装置の制御方法。

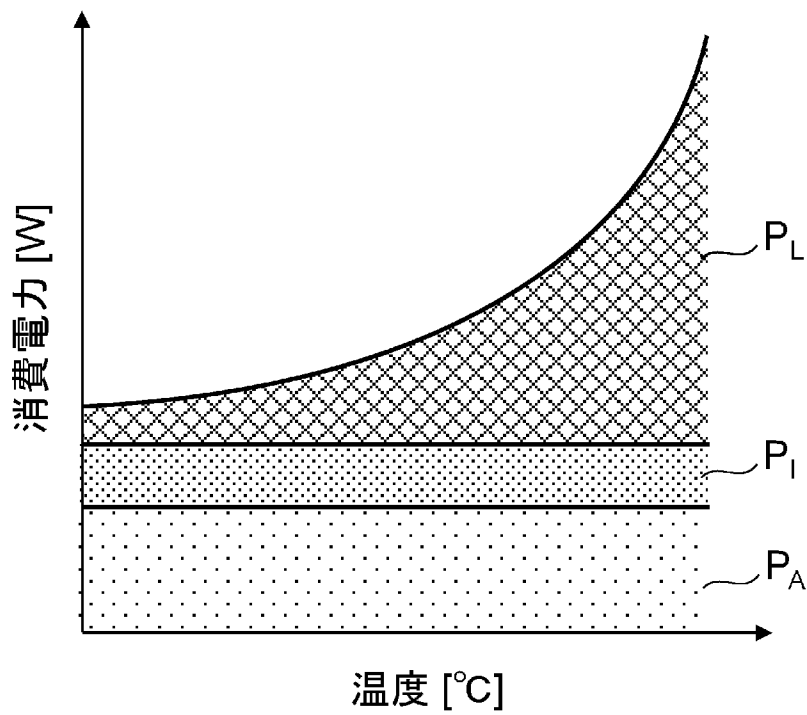
[図1]



[図2A]



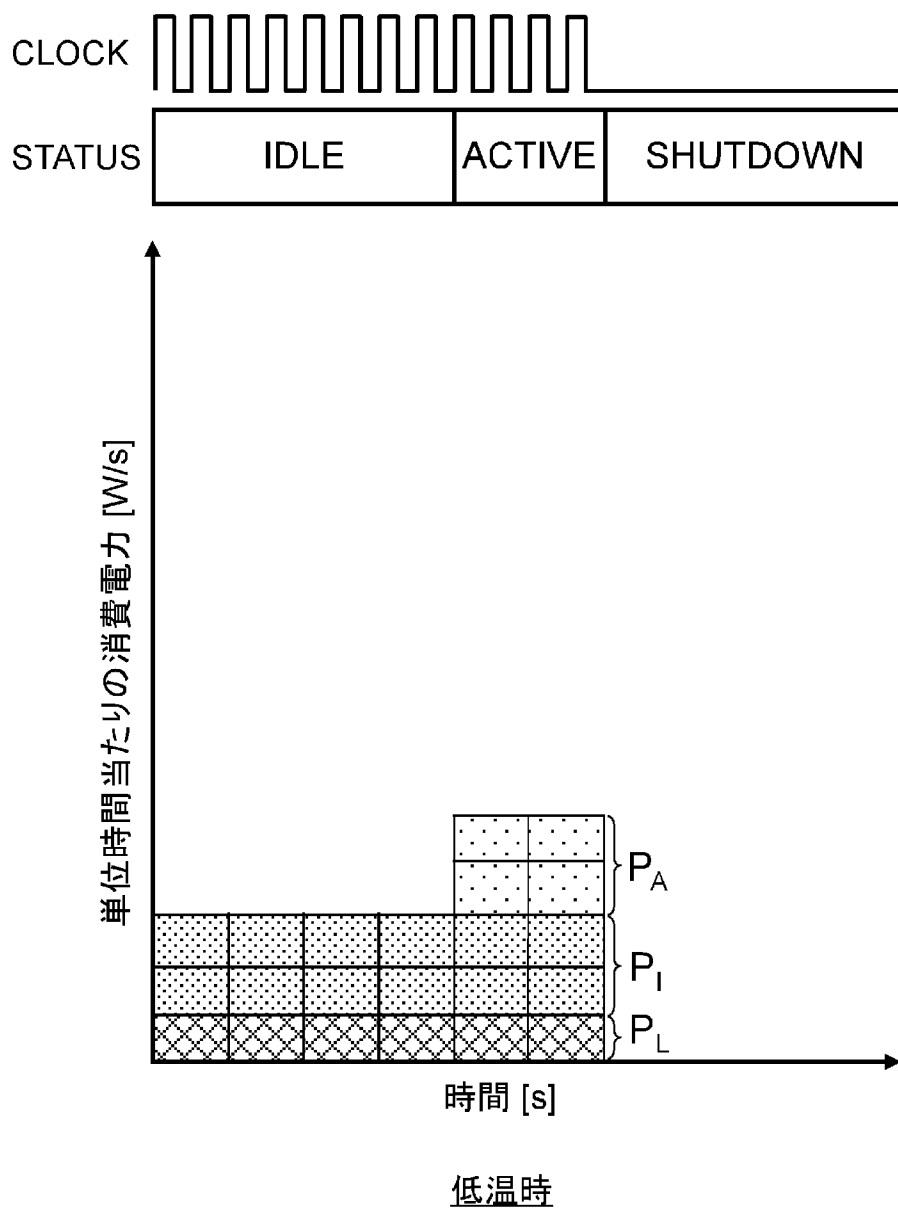
[図2B]



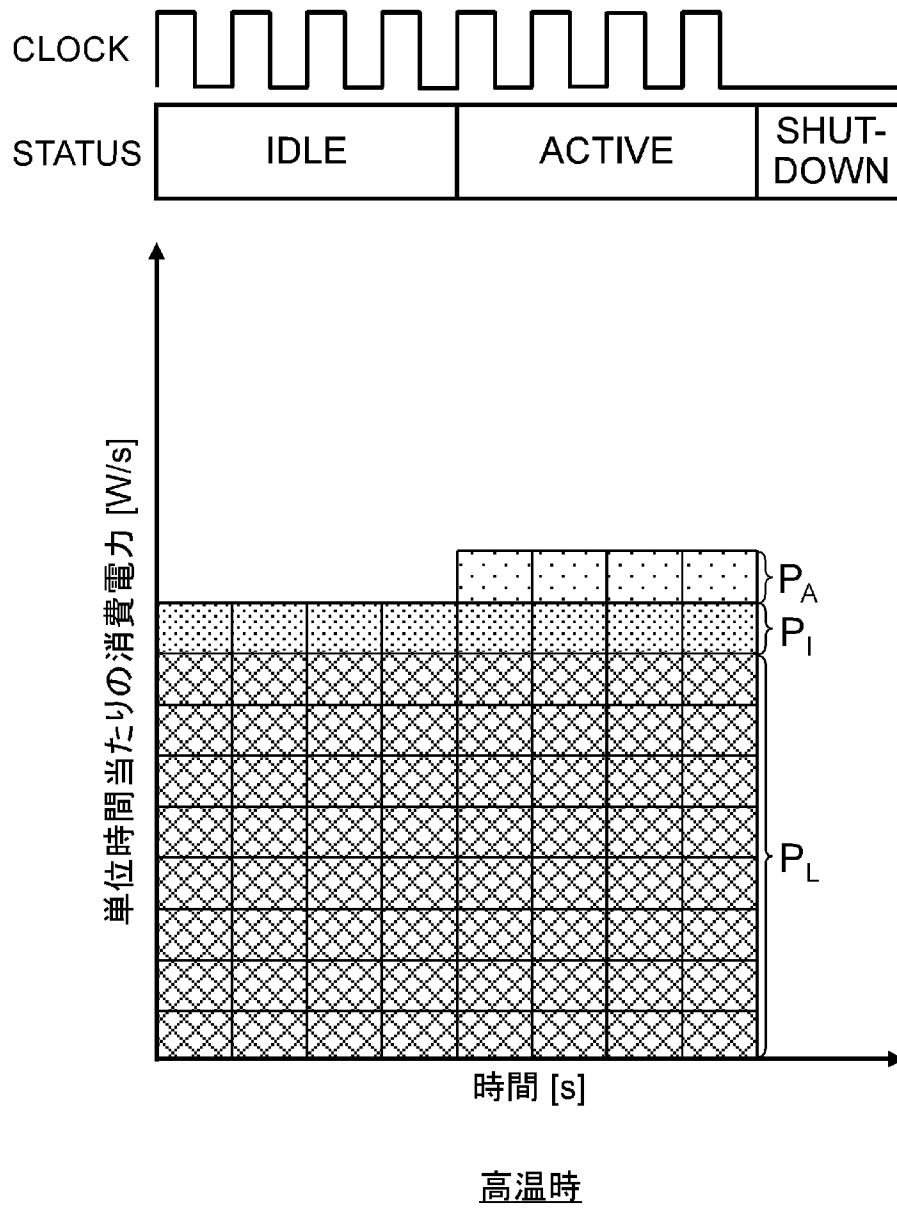
[図3]

	動作周波数	温度
リーク電力 P_L	依存しない	依存する
アイドル電力 P_I	依存する	依存しない
アクティブ電力 P_A	依存しない	依存しない

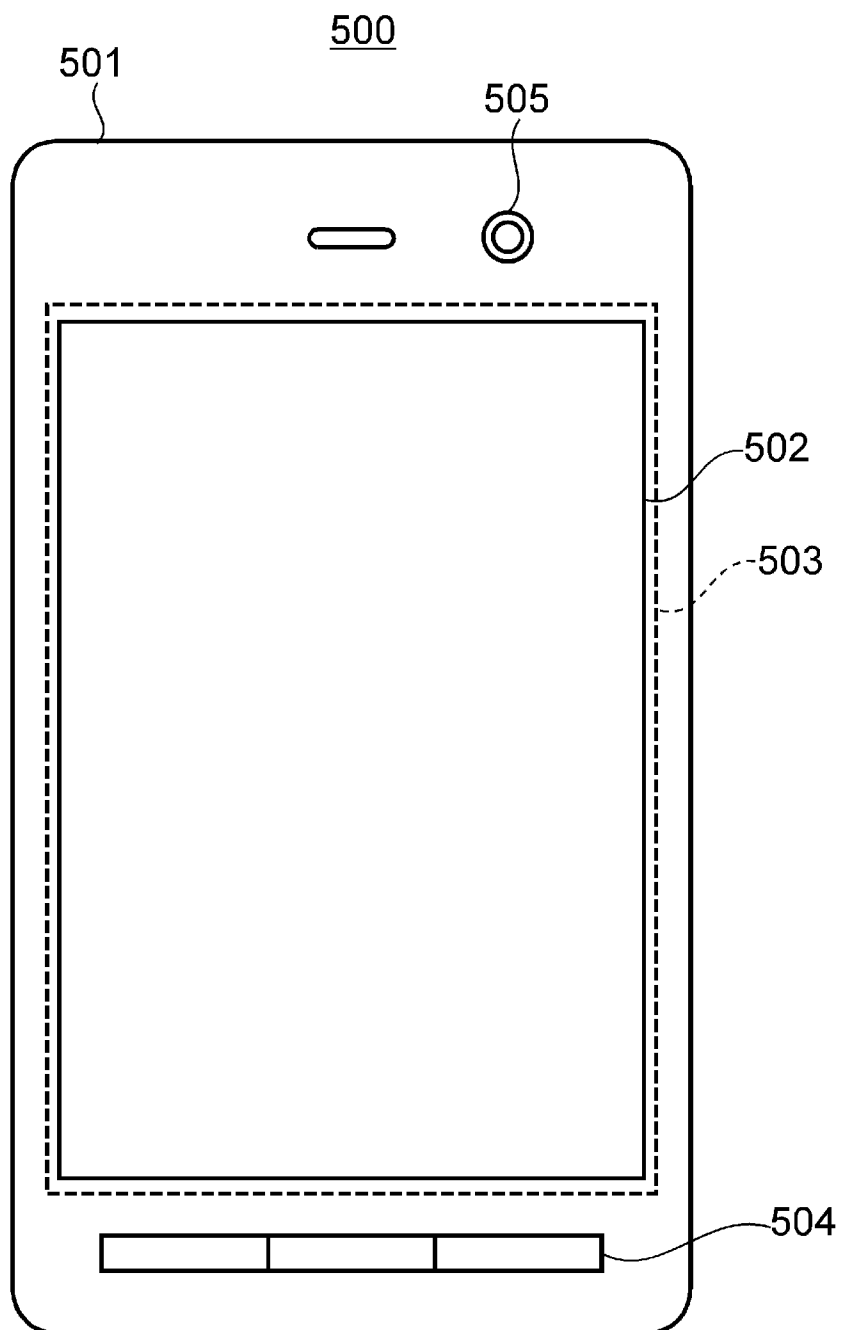
[図4A]



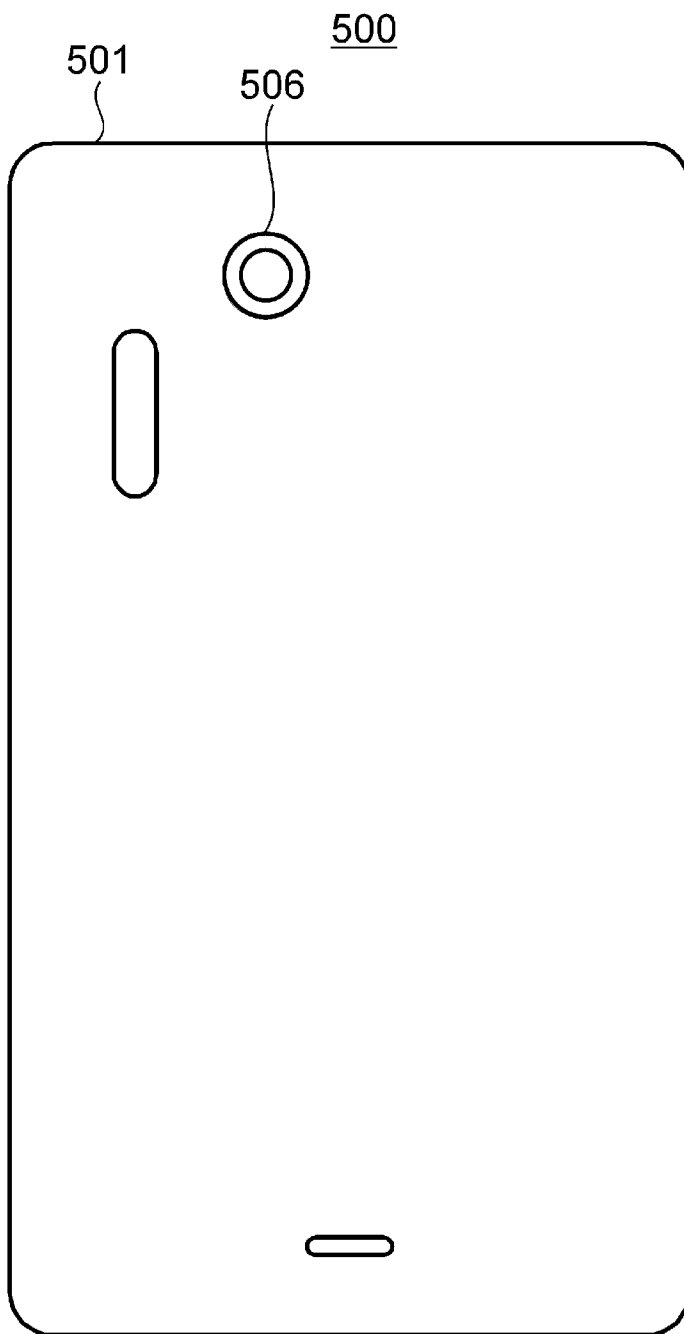
[図4B]



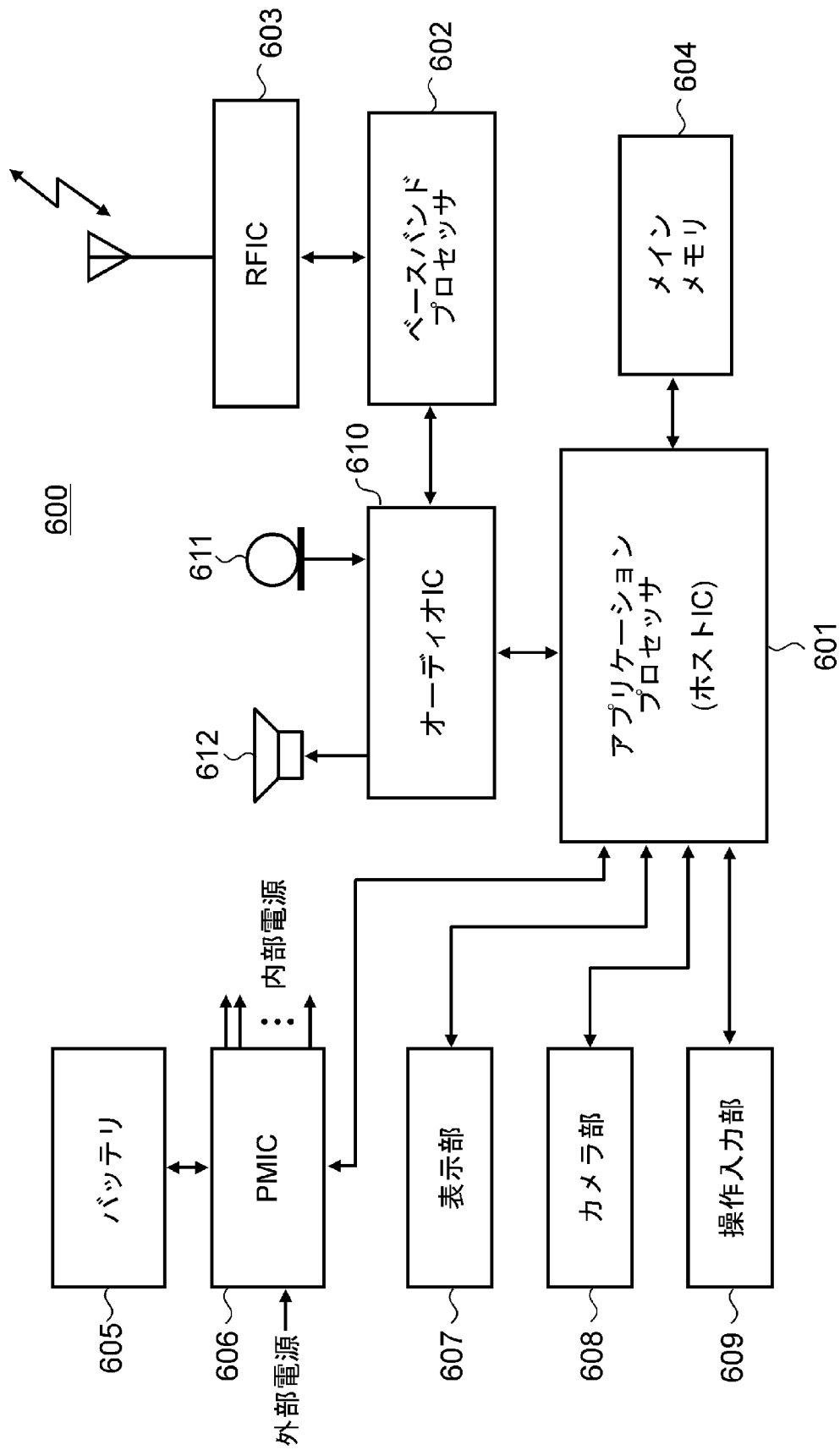
[図5A]



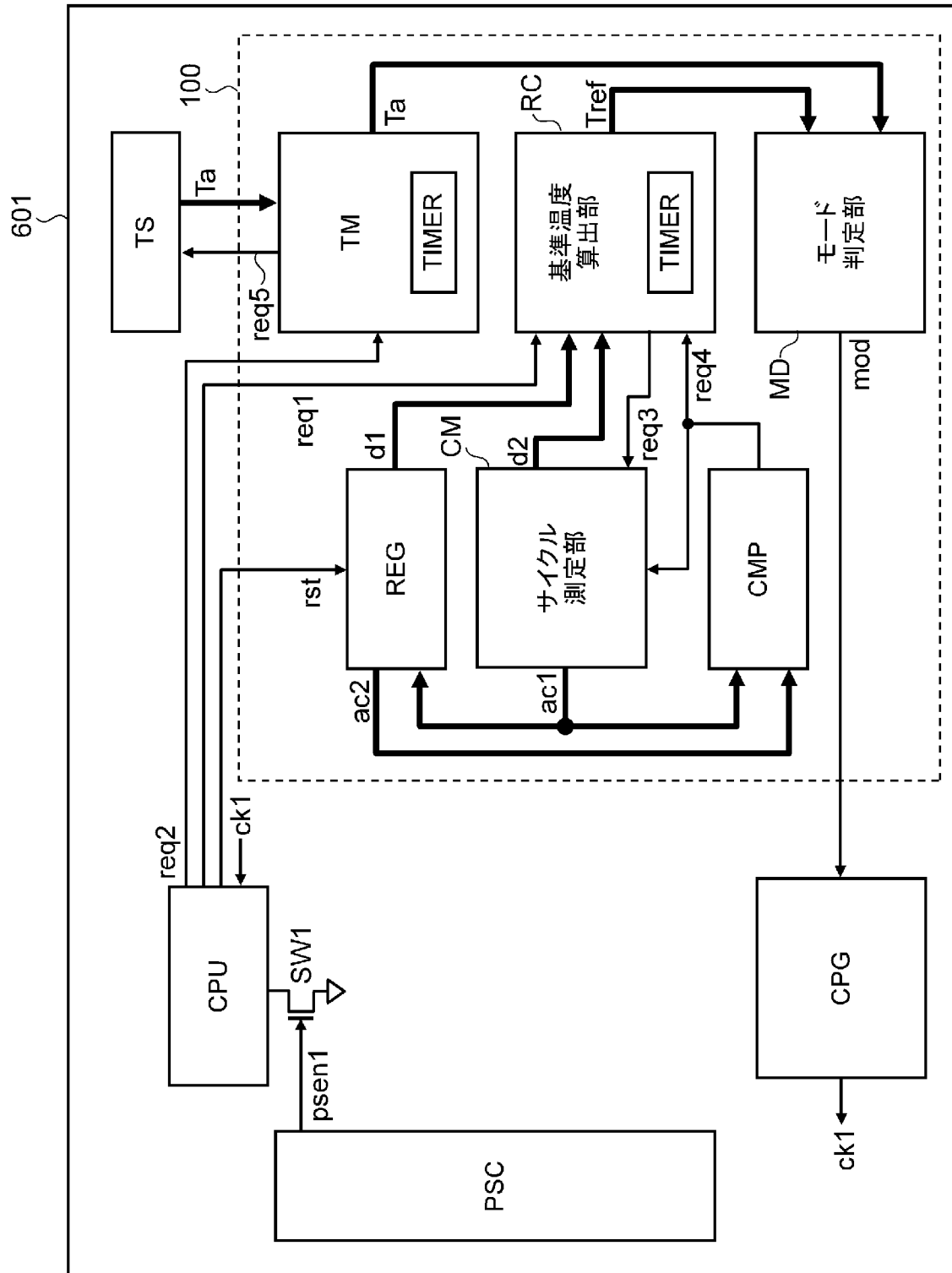
[図5B]



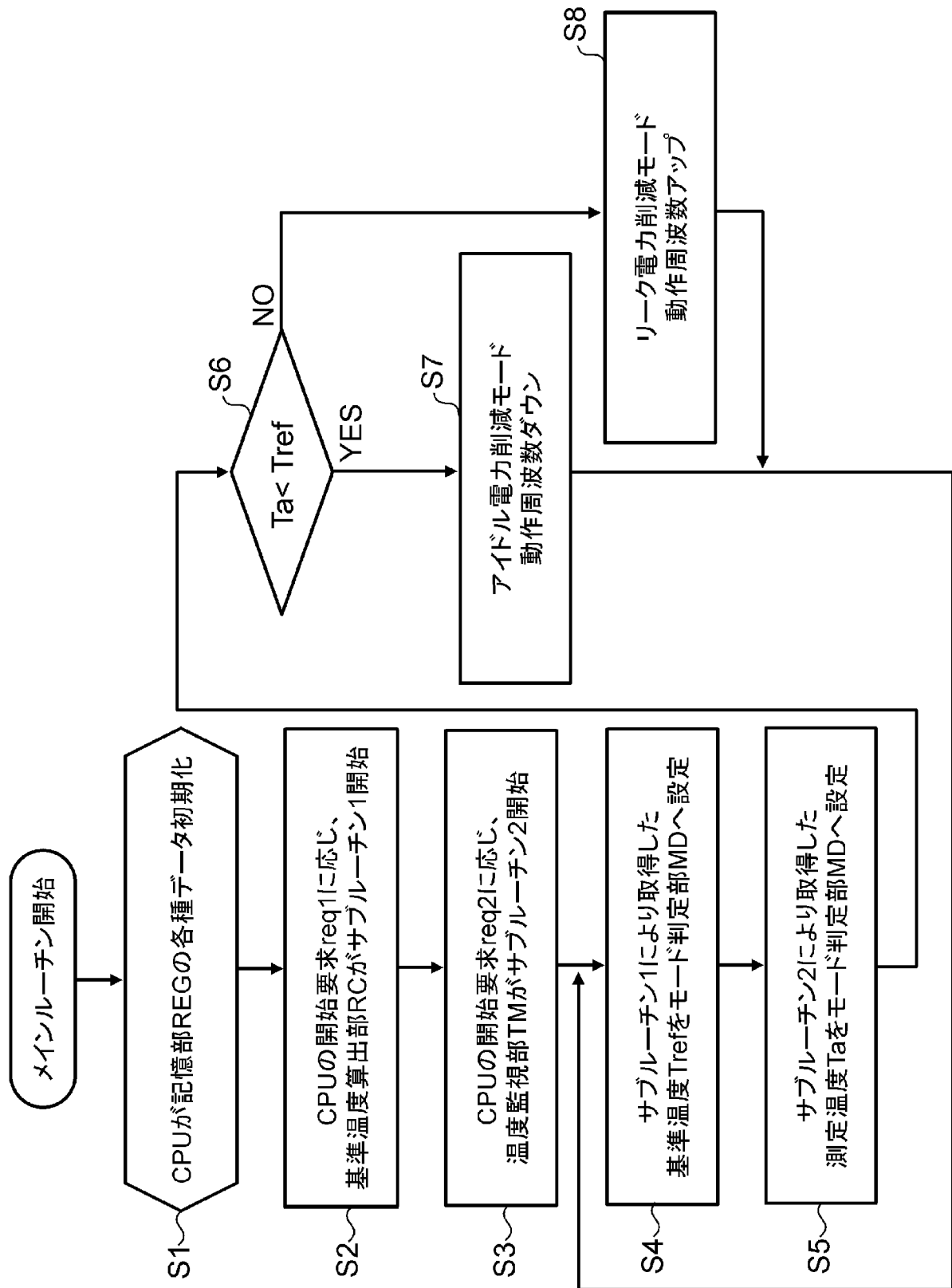
[図6]



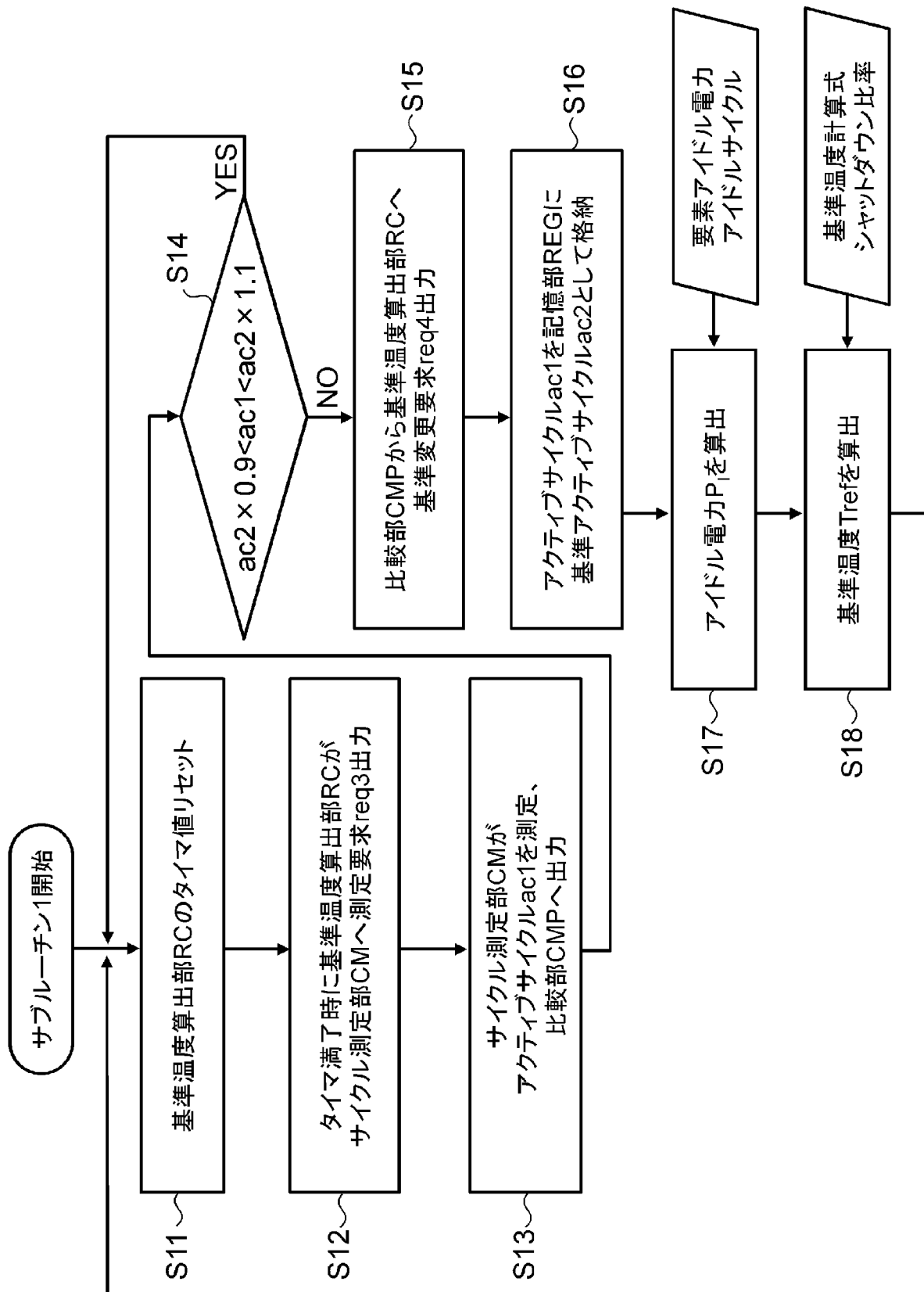
[図7]



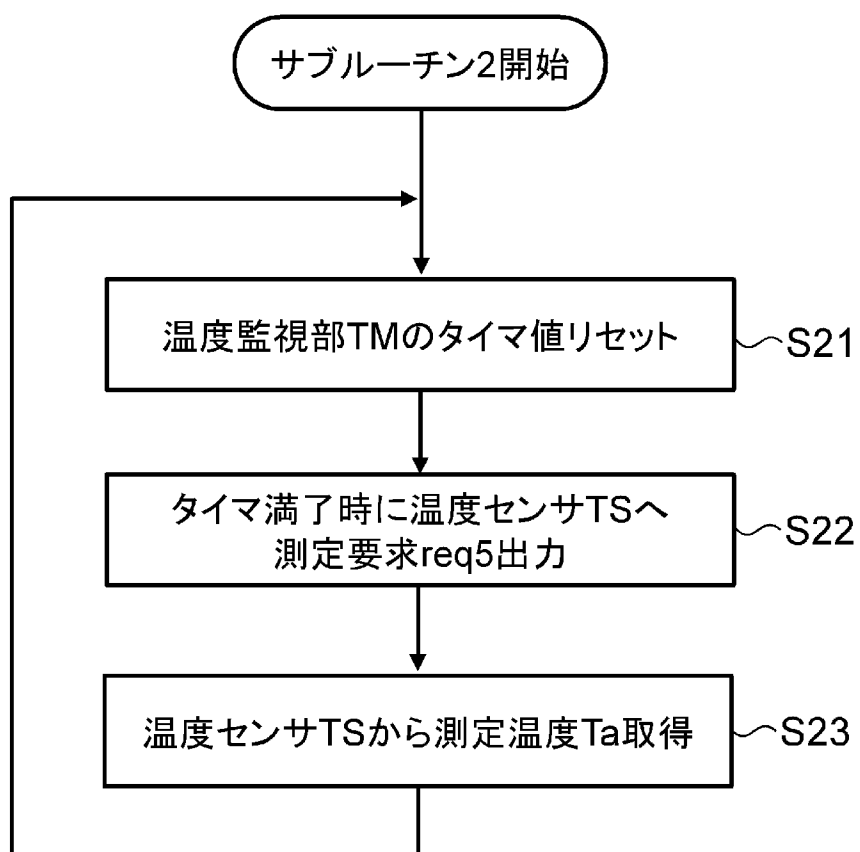
[図8]



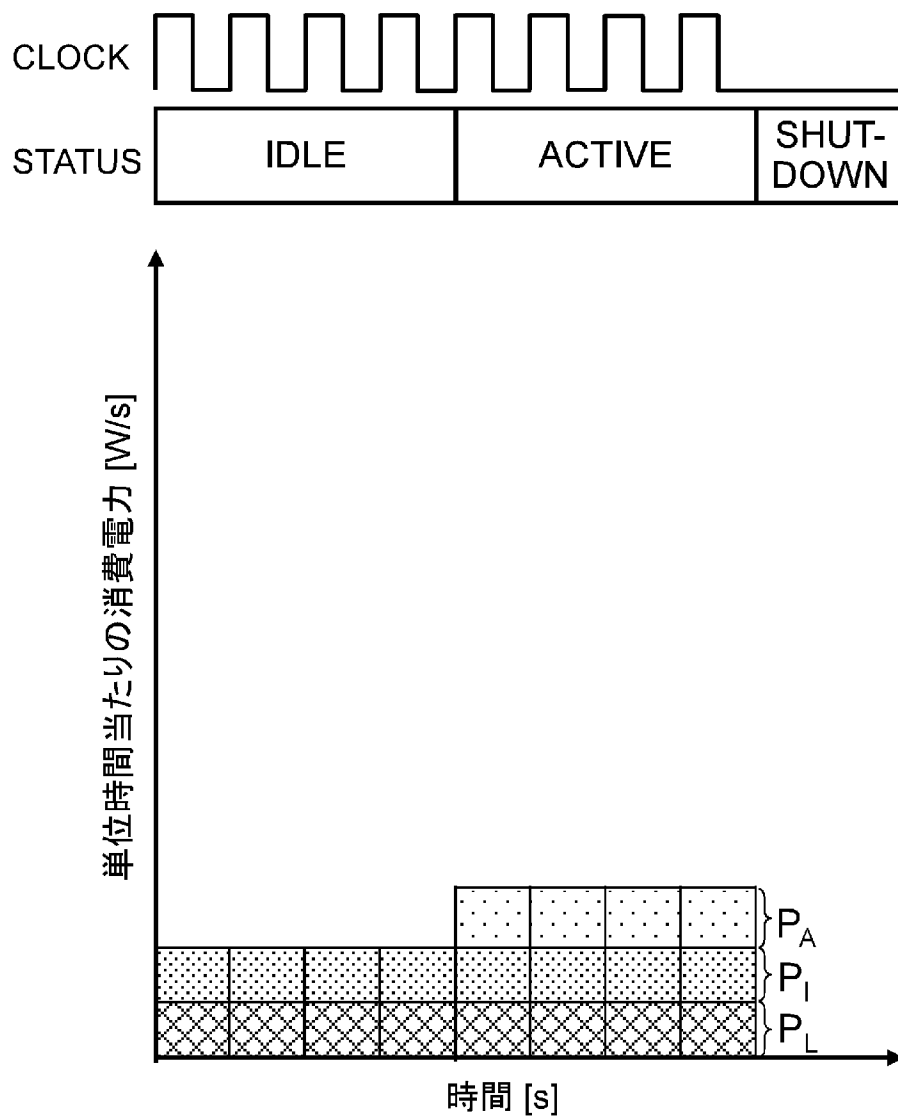
[図9]



[図10]

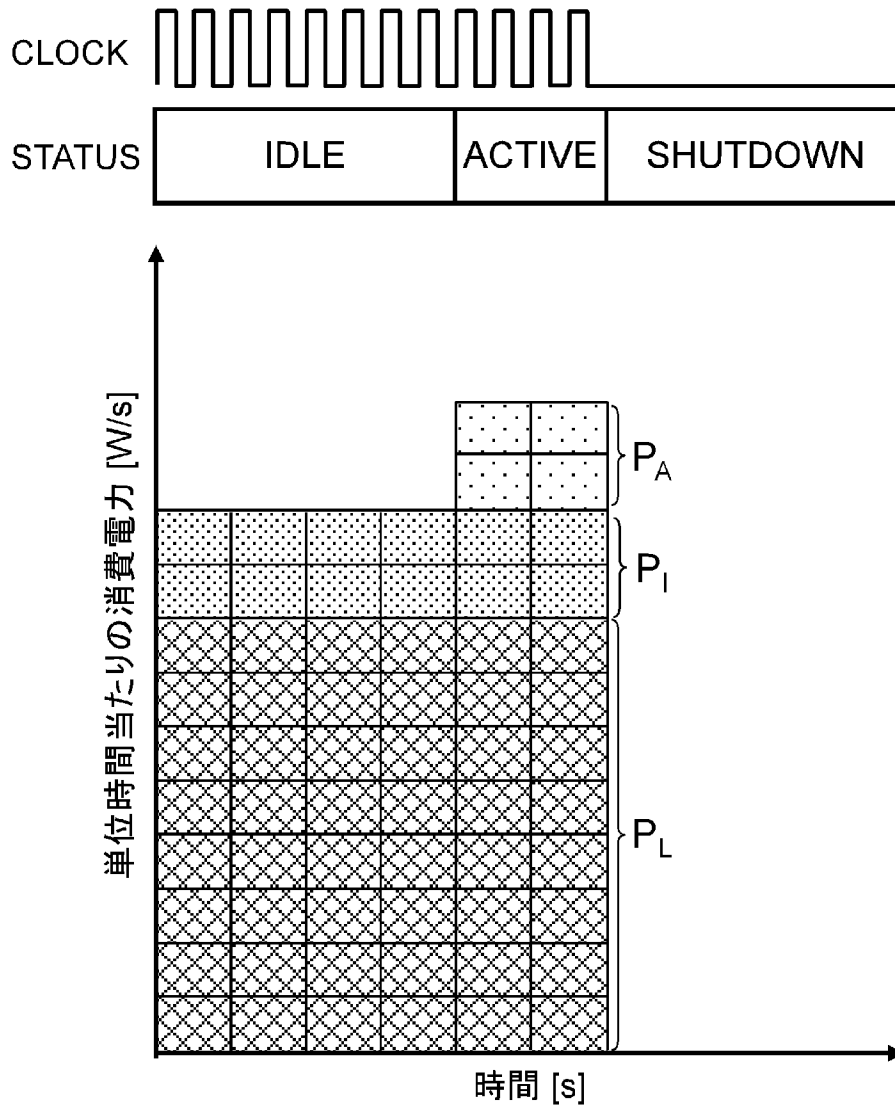


[図11A]



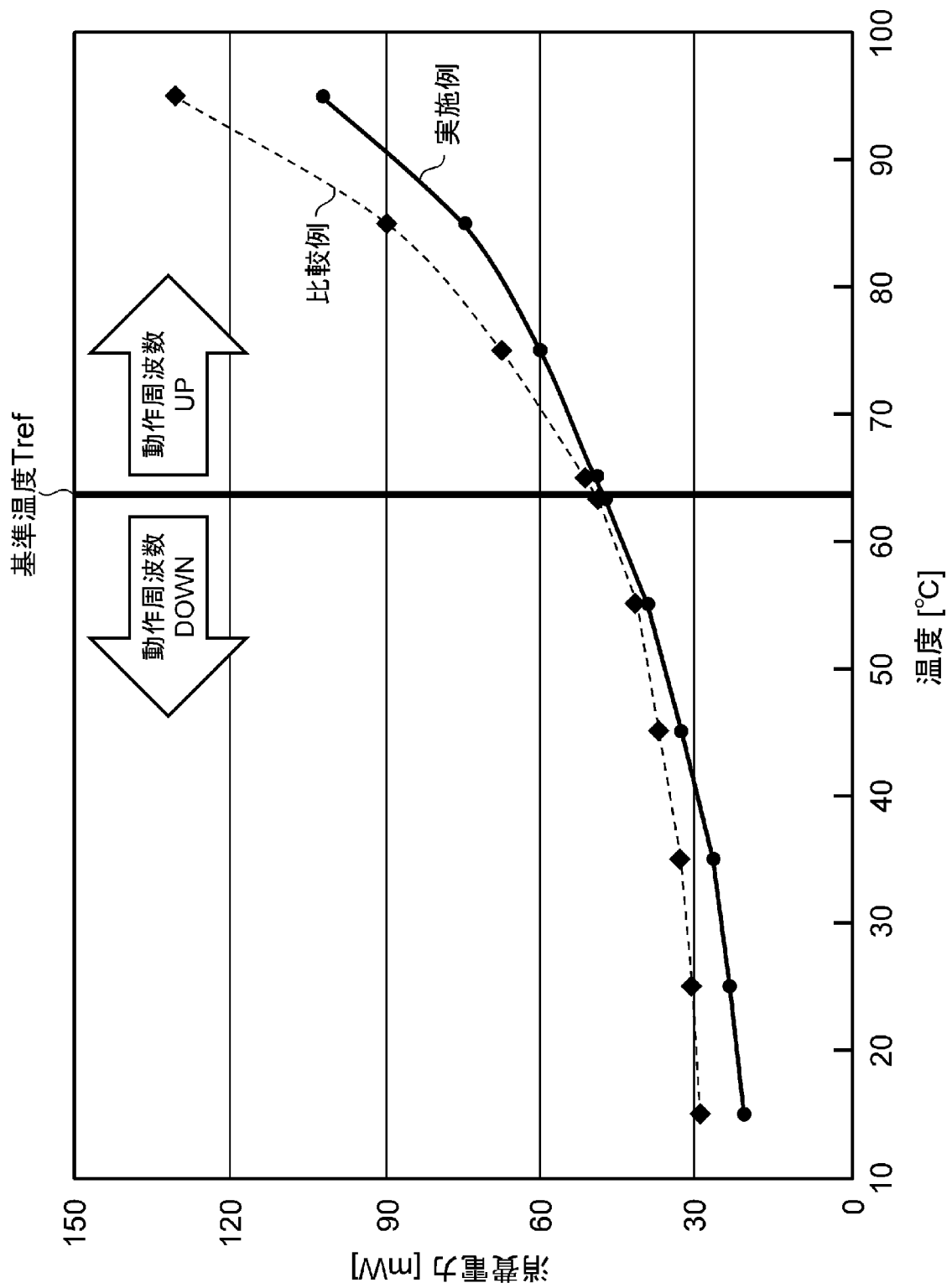
低温時 ($T_a < T_{ref}$)
アイドル電力削減モード

[図11B]

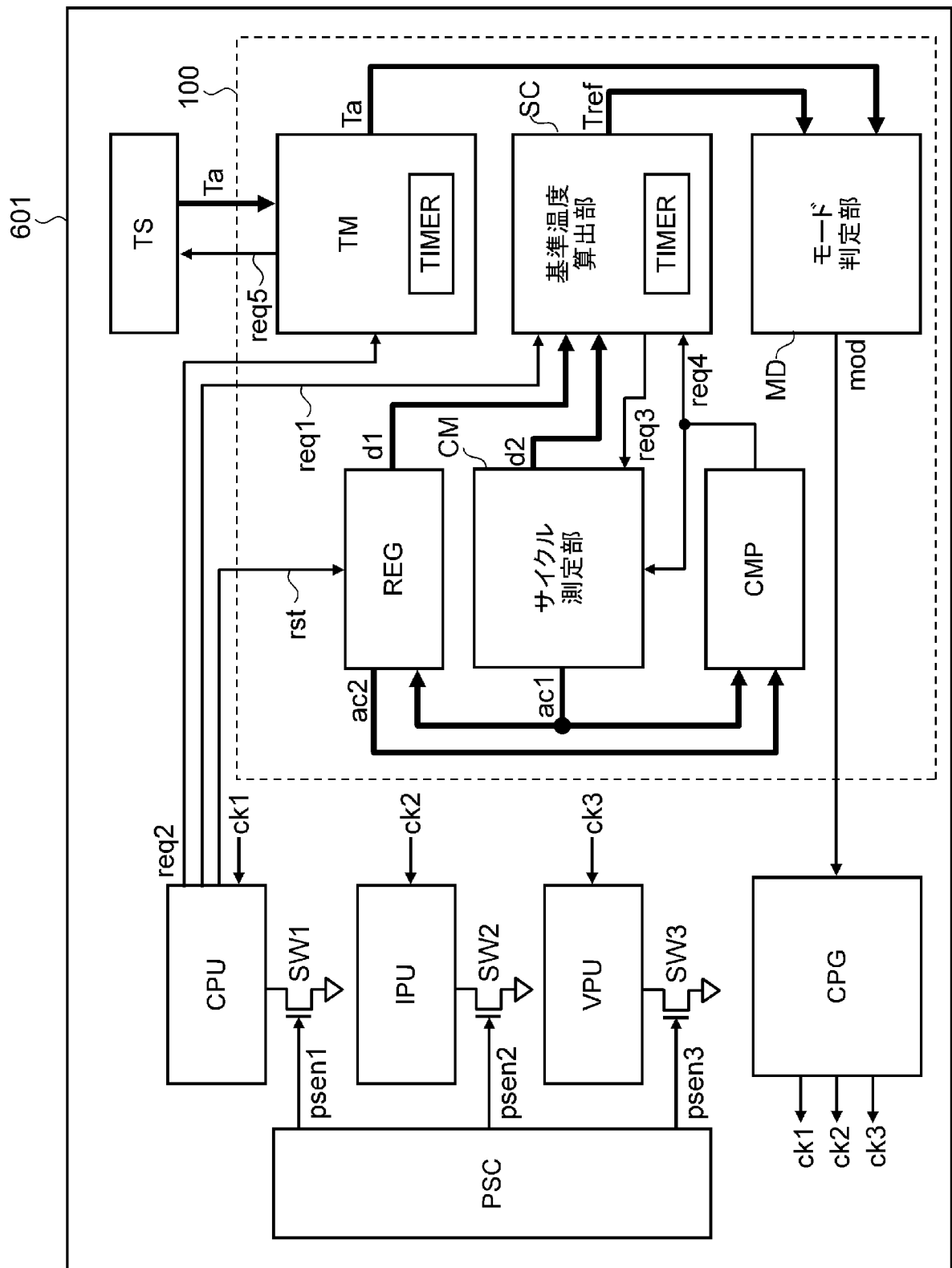


高温時 ($T_{ref} < T_a$)
リーク電力削減モード

[図12]



[図13]



[図14A]

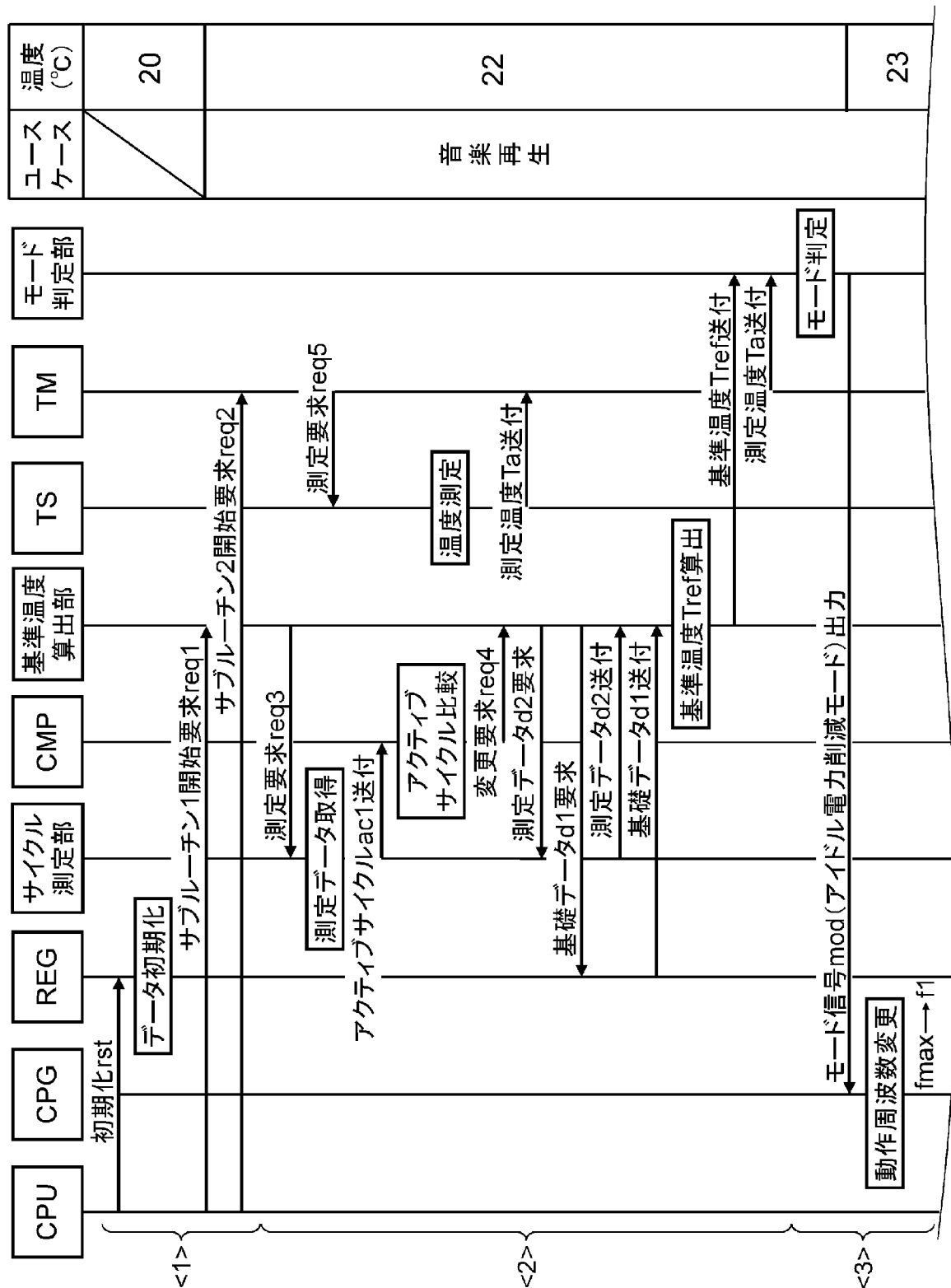


図14Bに続く

[図14B]

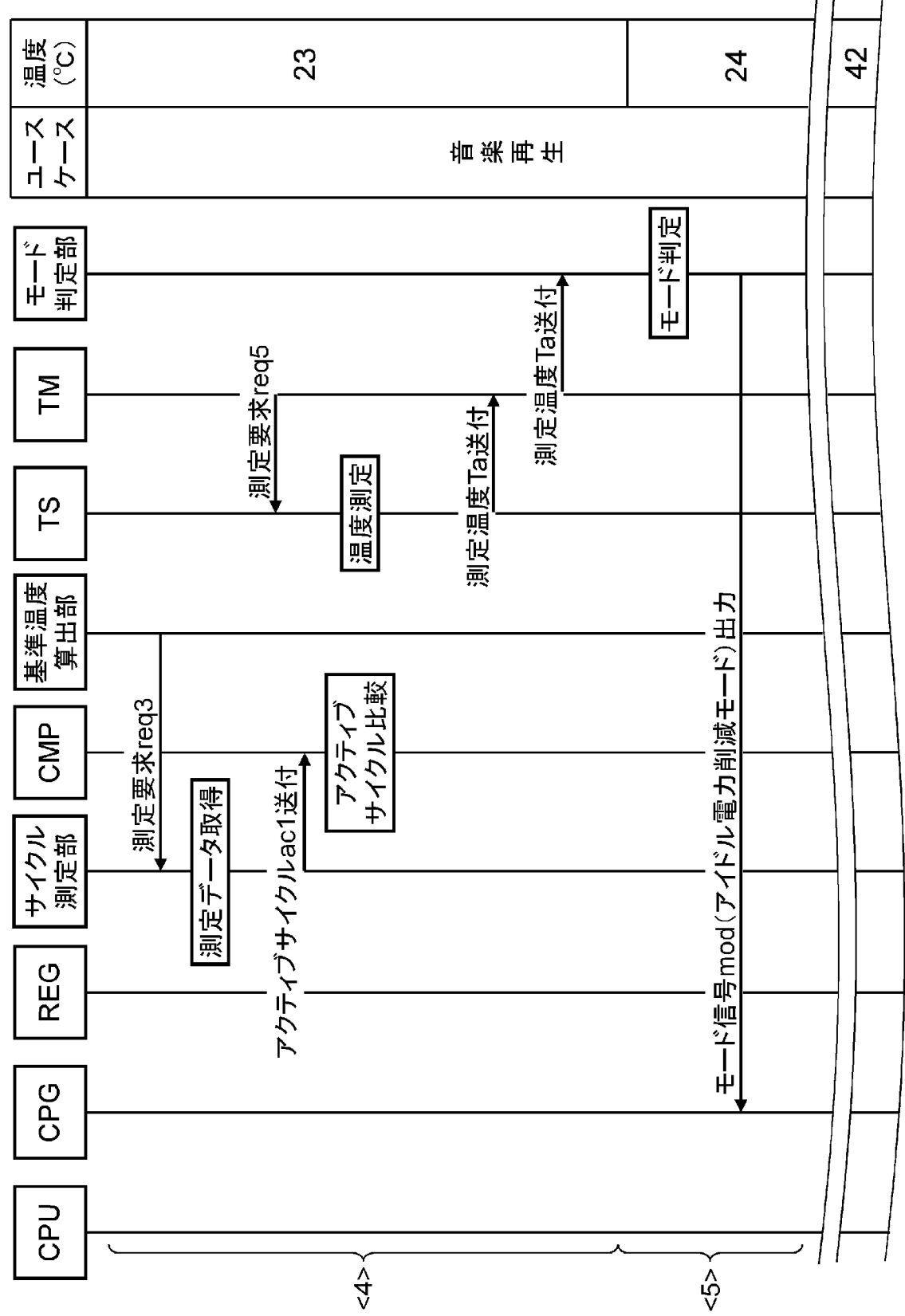


図14Cに続く

[図14C]

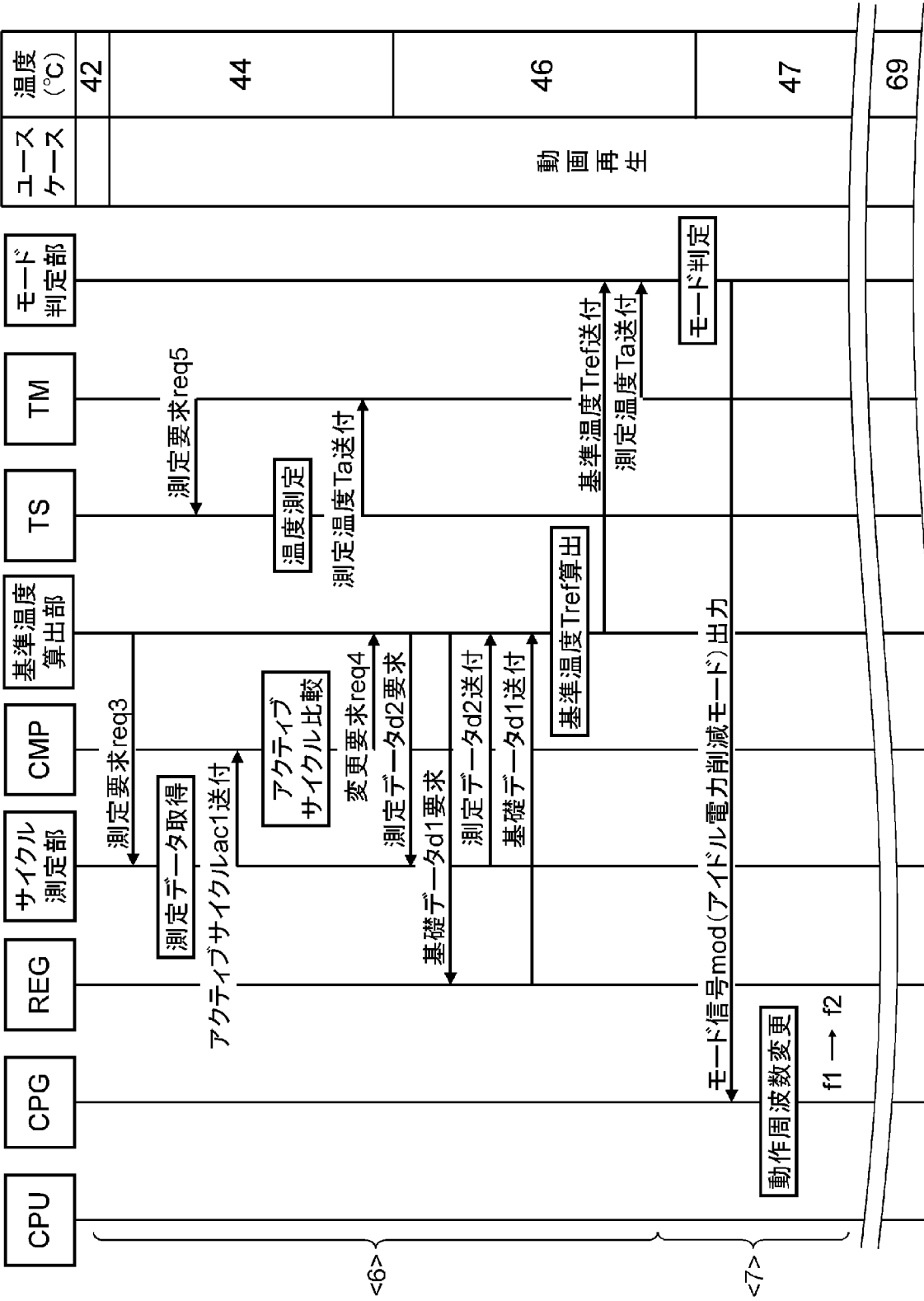


図14Dに続く

[図14D]

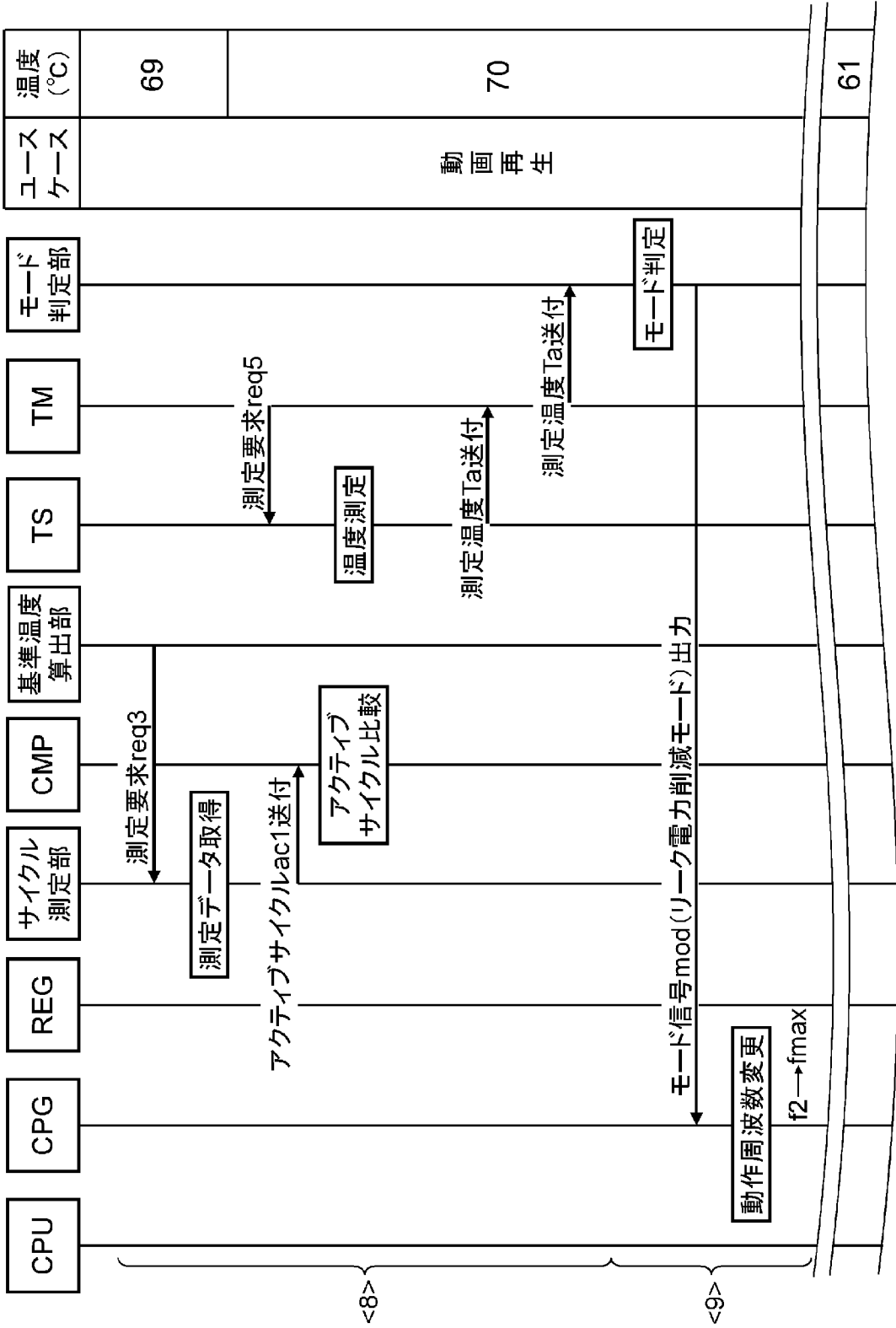
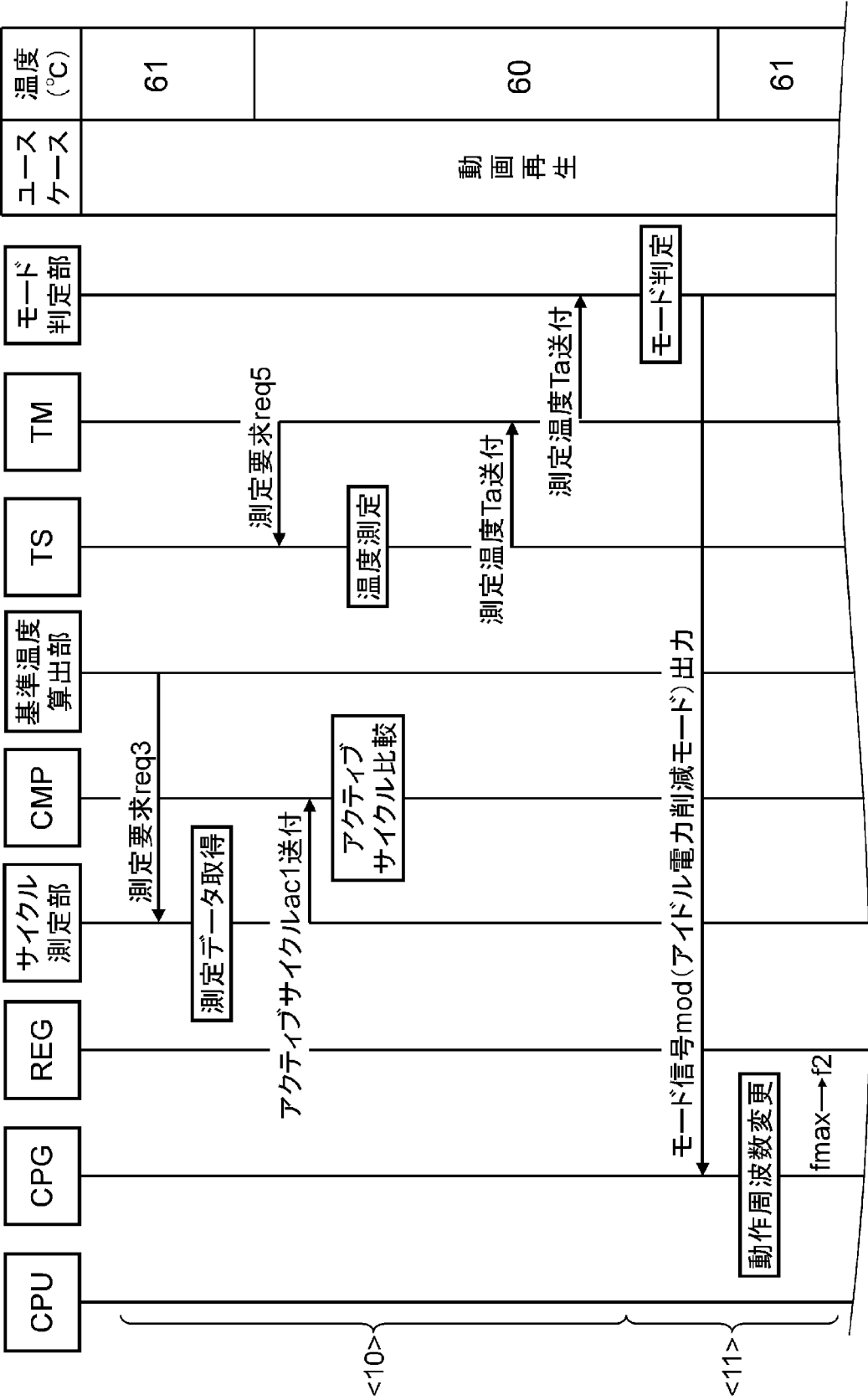
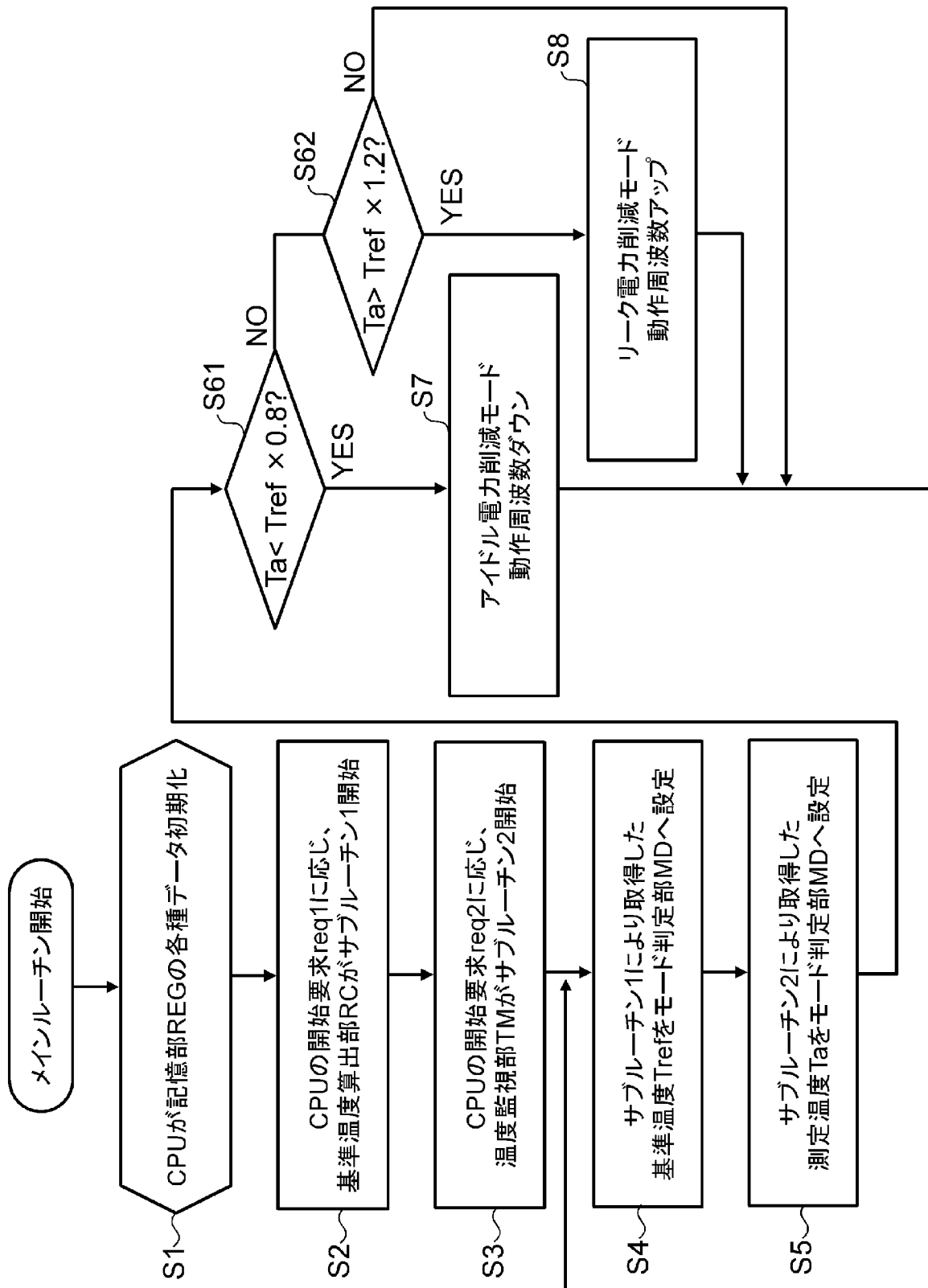


図14Eに続く

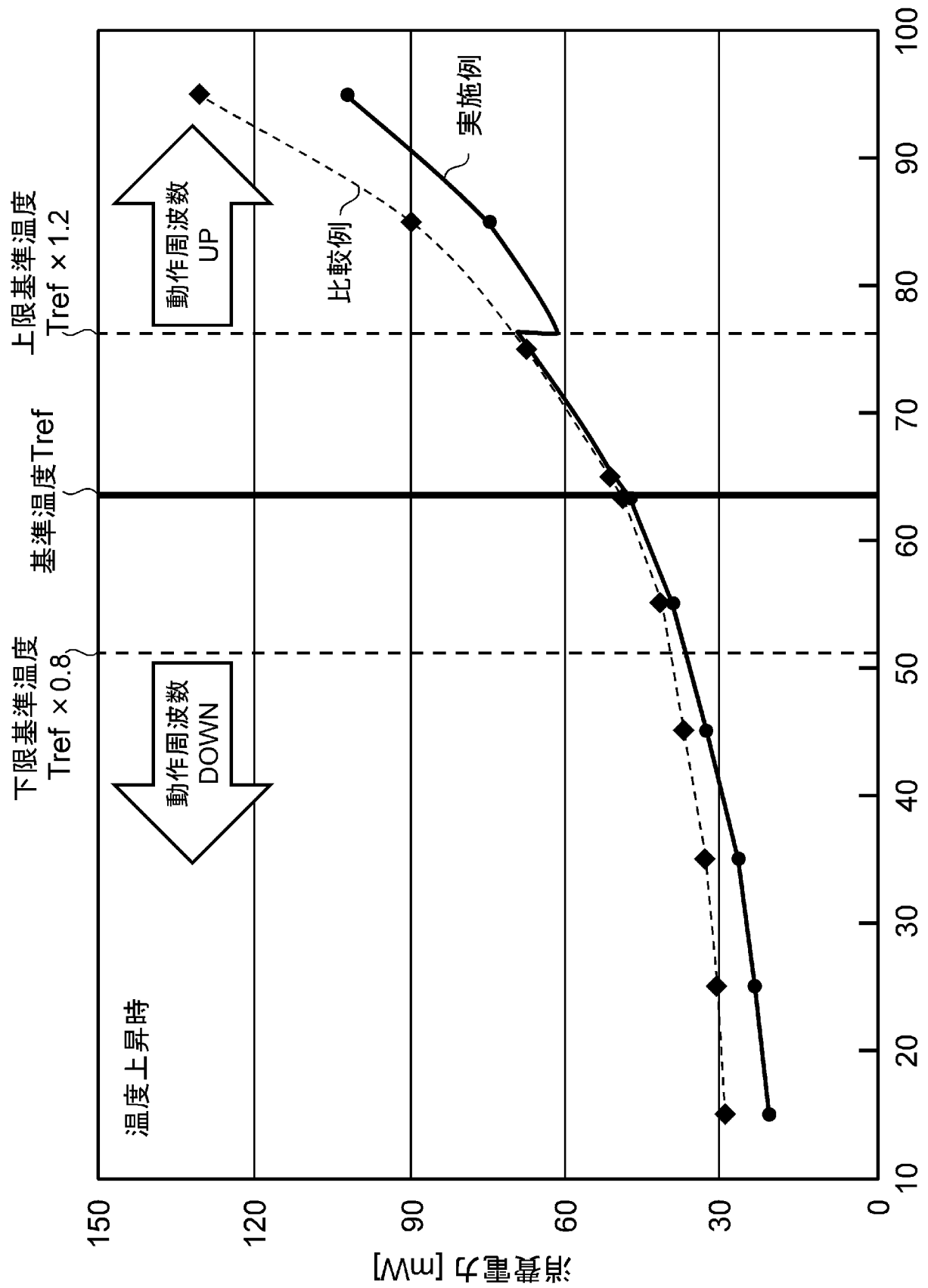
[図14E]



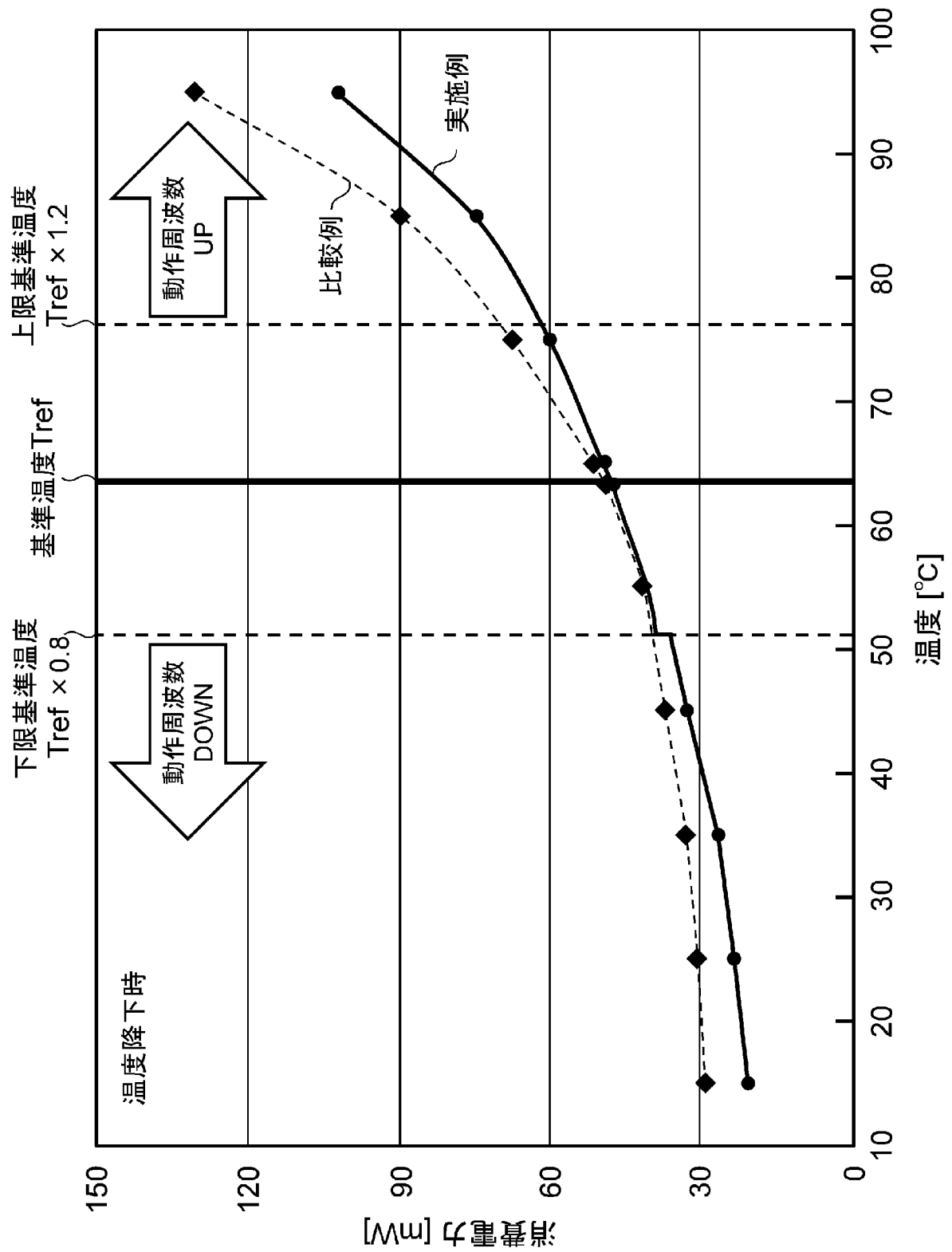
[図15]



[図16A]



[図16B]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/008187

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F1/04(2006.01)i, H01L21/822(2006.01)i, H01L27/04(2006.01)i

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)

G06F1/04, H01L21/822, H01L27/04

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

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2013

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2013 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2013

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.
X	US 2007/0250219 A1 (Gaskins et al.), 25 October 2007 (25.10.2007), paragraphs [0037], [0043] to [0060], [0067] to [0077]; fig. 5	1-3, 8-11, 16-20
X	JP 2008-146189 A (Renesas Technology Corp.), 26 June 2008 (26.06.2008), paragraphs [0028] to [0029], [0041] to [0042]; fig. 8	1-3, 8-11, 16-20
A	US 2012/0053897 A1 (Naffziger), 01 March 2012 (01.03.2012), paragraphs [0090] to [0094]; fig. 9	1-20

☒ 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
25 January, 2013 (25.01.13)Date of mailing of the international search report
05 February, 2013 (05.02.13)Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/008187

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2004-280378 A (Semiconductor Technology Academic Research Center), 07 October 2004 (07.10.2004), entire text; all drawings	1-20
A	WO 2009/078081 A1 (Fujitsu Ltd.), 25 June 2009 (25.06.2009), entire text; all drawings	1-20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2012/008187

US 2007/0250219 A1 2007.10.25

US 2005/0182983 A1
US 2005/0044429 A1
US 2005/0138444 A1
US 2007/0250736 A1
US 2007/0255972 A1
US 2008/0036613 A1
US 2010/0324750 A1
EP 1965285 A2
EP 1544717 A2
EP 1975761 A2
EP 1965286 A2
EP 1965287 A2
CN 101241392 A
CN 1664754 A
CN 1523473 A
CN 1645293 A
TW 837547 A
TW 257066 B
TW 260544 B

JP 2008-146189 A 2008.06.26

US 2010/0017636 A1
WO 2008/069023 A1
CN 101606115 A

US 2012/0053897 A1 2012.03.01

(Family: none)

JP 2004-280378 A 2004.10.07

WO 2004/081775 A1
TW 236583 B

WO 2009/078081 A1 2009.06.25

US 2010/0244942 A1

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. G06F1/04(2006.01)i, H01L21/822(2006.01)i, H01L27/04(2006.01)i

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 (I P C))

Int.Cl. G06F1/04, H01L21/822, H01L27/04

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

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 3 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 3 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 3 年

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)

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
X	US 2007/0250219 A1 (Gaskins et al.) 2007.10.25, 段落 [0037], [0043]-[0060], [0067]-[0077], 図 5	1-3, 8-11, 16- 20
X	JP 2008-146189 A (株式会社ルネサステクノロジ) 2008.06.26, 段 落[0028]-[0029], [0041]-[0042], 図 8	1-3, 8-11, 16- 20
A	US 2012/0053897 A1 (Naffziger) 2012.03.01, 段落[0090]-[0094], 図 9	1-20

☒ 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。

* 引用文献のカテゴリー

「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
「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
「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)
「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

「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矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「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
「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
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

2 5 . 0 1 . 2 0 1 3

国際調査報告の発送日

0 5 . 0 2 . 2 0 1 3

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目 4 番 3 号

特許庁審査官 (権限のある職員)

田中 友章

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 5 2 1

5 E

9 3 7 6

C (続き) . 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 2004-280378 A (株式会社半導体理工学研究センター) 2004. 10. 07, 全文、全図	1-20
A	WO 2009/078081 A1 (富士通株式会社) 2009. 06. 25, 全文、全図	1-20

US 2007/0250219 A1	2007. 10. 25	US 2005/0182983 A1 US 2005/0044429 A1 US 2005/0138444 A1 US 2007/0250736 A1 US 2007/0255972 A1 US 2008/0036613 A1 US 2010/0324750 A1 EP 1965285 A2 EP 1544717 A2 EP 1975761 A2 EP 1965286 A2 EP 1965287 A2 CN 101241392 A CN 1664754 A CN 1523473 A CN 1645293 A TW 837547 A TW 257066 B TW 260544 B
JP 2008-146189 A	2008. 06. 26	US 2010/0017636 A1 WO 2008/069023 A1 CN 101606115 A
US 2012/0053897 A1	2012. 03. 01	ファミリーなし
JP 2004-280378 A	2004. 10. 07	WO 2004/081775 A1 TW 236583 B
WO 2009/078081 A1	2009. 06. 25	US 2010/0244942 A1