

---

---

## 第 10 章 省電力機能

---

---

### ハイライト

本章では次のトピックについて説明します。

10.1	はじめに .....	10-2
10.2	マイクロコントローラ用クロックの操作 .....	10-2
10.3	命令ベースの省電力モード .....	10-2
10.4	ダズ モード .....	10-6
10.5	選択式の周辺モジュールの電力制御 .....	10-6
10.6	設計の秘訣 .....	10-9
10.7	関連する アプリケーション ノート .....	10-10
10.8	改版 履歴 .....	10-11

## 10.1 はじめに

PIC24F デバイスのすべてに電力消費を削減するために数々の工夫が組み込まれています。これらは特に電力が抑えら (バッテリー動作のような) れていて、しかもタイミングに敏感なルーチン (シリアル通信のような) ではフルパワーの動作期間が必要なアプリケーションで有効です。本章では、ハードウェアで組み込まれている次の 4 種の省電力機能について説明します。

- マイクロコントローラのクロック操作
- 命令ベースの省電力モード (スリープとアイドル)
- ハードウェアベースのダズモード
- 選択式の周辺モジュール制御

## 10.2 マイクロコントローラ用クロックの操作

通常、どんなアプリケーションでもマイクロコントローラのクロック速度を遅くすれば、クロック周波数の低減にほぼ比例して省電力化が図れます。PIC24F デバイスでは、アプリケーションの制御下で広範囲のクロック周波数から選択できます。システムクロックのコンフィギュレーションを固定していなければ、ユーザーが内蔵 RC 発振器の低電力動作と、クリスタル発振器の高速で高精度動作の間を、NOSC コンフィギュレーションビットを単に変更するだけで切り替えできます。実際に、ユーザーは、いつでも最大 4 種の発振器から選択できるので、アプリケーションの速度、周波数精度、電力消費を柔軟に構成できるようになっています。

動作中にシステムクロックを変更する処理、および、クロック変更の制限も合わせて第 6 章「発振器」で説明します。

## 10.3 命令ベースの省電力モード

PIC24F デバイスは、2 種類の特別な省電力モードをもっていて、専用の PWRSAV 命令を実行することで移行できます。

- スリープモード：CPU、システムクロック源、システムクロック源で動作しているすべての周辺モジュールが無効となります。これがデバイスの最小電力モードとなります。
- アイドルモード：CPU は無効化されますが、システムクロック源は動作続きます。周辺モジュールは動作続きますが、オプションで無効化することもできます。

PWRSAV 命令のアセンブリ構文を例 10-1 に示します。

### 例 10-1: PWRSAV アセンブリ構文

```
PWRSAV #SLEEP_MODE    ; Put the device into Sleep mode
PWRSAV #IDLE_MODE     ; Put the device into Idle mode
```

**注：**SLEEP\_MODE と IDLE\_MODE は、このデバイスのアセンブラ用インクルードファイル内で定数定義されています。

省電力モードからは、割り込み、WDT タイムアウト、デバイスリセットで抜けられます。デバイスがこの 2 つの動作モードのどちらかを抜ける場合を「ウェイクアップ」と呼びます。省電力モードの特性については以下の項で述べられています。

10.3.1 スリープモード

スリープモードの特性は次のようになります。

- システムクロック源は停止する。内蔵発振器を使用している場合は、オフとなる
- デバイスの消費電流は最小となり、I/O ピンの電流は供給されない
- システムクロック源が無効なため、フェールセーフクロック モニタ (FSCM) はスリープモード中は動作しない
- WDT が有効な場合は、LPRC クロックはスリープモード中も動作継続する
- 内蔵電圧レギュレータが有効な場合は、BOR 回路はスリープモード中も動作する
- WDT が有効な場合は、スリープモードに入る前に自動的にクリアされる
- 周辺にはスリープモード中も動作継続するものがある。これには、入力信号変化を検出する I/O ピン、外部クロック入力を使う周辺モジュールを含む。システムクロック源で動作する周辺モジュールはすべてスリープモード中は無効となる

プロセッサは、次のいずれかのイベントでスリープから抜け出るかウェイク アップします。

- 個々に有効化された割り込み要因の発生
- いずれかのデバイス リセット時
- WDT タイムアウト時

10.3.1.1 スリープからウェイク アップするときのクロック選択

プロセッサは、スリープモードに入る前にアクティブであったのと同じクロック源で再スタートします。

10.3.1.2 スリープからのウェイク アップ時の遅延

スリープモードからウェイク アップする場合の、異なる発振器モードにおける再スタート遅延は表 10-1 のようになります。

表 10-1: スリープモードから出るときの遅延時間

クロック源	スリープ 脱出遅延	発振器遅延	FSCM 遅延	備考
EC	TVREG	—	—	1
ECPLL	TVREG	TLOCK	TfSCM	1, 3, 4
XT, HS	TVREG	TOST	TfSCM	1, 2, 4
XTPLL	TVREG	TOST + TLOCK	TfSCM	1, 2, 3, 4
HSPLL	TVREG	TOST + TLOCK	TfSCM	1, 2, 3, 4, 5
SOSC	(スリープ中オフ)	TOST	TfSCM	1, 2, 4
	(スリープ中オン)	—	—	1
FRC, FRCDIV, LPRC	TVREG	—	—	1
FRCPLL	TVREG	TLOCK	—	1, 3

- 注 1: TVREG = 内蔵レギュレータが有効な場合のみのスタートアップ遅延 (標準 10 μs)。  
 2: TOST = 発振器スタートアップタイム、発振器クロックがシステムにリリースされるまでの遅延は 1024 発振周期。  
 3: TLOCK = PLL ロック時間 (標準 20 ms)。  
 4: TfSCM = フェールセーフクロック モニタ遅延 (標準 100 μs)、FSCM が有効な場合。  
 5: HSPLL モードは、PIC24F の最大動作周波数を超える。

注: 最大動作周波数、TVREG、TfSCM、TLOCK の仕様値については、製品のデータ シートの「電気的特性」の項を参照して下さい。

## 10.3.1.3 クリスタル発振器または PLL でスリープモードからのウェイクアップ

システムクロック源がクリスタル発振器または PLL (あるいはその両方) から供給されている場合、システムクロック源がデバイスに対して使用可能になる前に発振器スタートアップタイマ (OST) または PLL のロック時間 (あるいはその両方) を適用しなければなりません。このルールの例外は、システムクロック源が副発振器で、スリープモード中にも動作していた場合で、このときは発振器遅延は不要です。TVREG (レギュレータが有効なとき) やその他の遅延が適用されても、クリスタル発振器 (および PLL) が発振していないことがあります。

## 10.3.1.4 FSCM 遅延とスリープモード

スリープモードからウェイクアップする時、次の両条件が成立する場合、標準で 100  $\mu$ s (TFSCM) の遅延が適用されます (レギュレータ有効のときは TVREG の後)。

- スリープモード中は発振器が停止している
- システムクロックがクリスタル発振器および、または PLL から供給されている

FSCM 遅延はほとんどの場合、デバイス実行再開の前に OST が経過し PLL が安定する時間を提供します。FSCM が有効化された場合、FSCM 遅延が経過した後システムクロック源のモニターを開始します。

## 10.3.1.5 遅い発振器のスタートアップ

パワーアップ遅延が経過する前に OST および PLL ロックタイムが経過することはありません。

したがって、FSCM が有効化された場合、デバイスはこの状態をクロック不良として検出し、クロック不良トラップが発生します。デバイスは FRC 発振器へと切り替わり、ユーザーはクロック不良トラップ サービス ルーチン内でクリスタル発振源を再度有効化できます。

FSCM を有効にしない場合、デバイスはクロックが安定するまでコード実行を開始しません。ユーザーからは、デバイスは発振器クロックが開始するまではスリープ状態にあるように見えます。

## 10.3.1.6 割り込みによるスリープからのウェイクアップ

CPU 優先レベルが 0 に設定されたユーザー割り込み要因では、割り込み要因が無効になっていることになり、CPU をスリープモードからウェイクアップさせることはできません。割り込みをウェイクアップ要因とするためには、その割り込みの CPU 優先レベルは 1 以上でなければなりません。

IECx レジスタの対応する IE 制御ビットによって個別に有効化された割り込み要因は、どれもスリープモードからプロセッサをウェイクアップできます。デバイスがスリープモードからウェイクアップする場合、次の 2 つのうち 1 つの動作が発生します。

- 割り込み要因に割り当てられた優先度が、現行の CPU 優先度より低い場合、デバイスはウェイクアップし、スリープモードを開始した PWRSAV 命令の次の命令からコード実行を継続する
- 割り込み要因に割り当てられた優先度が、現行の CPU 優先度よりも高い場合、デバイスはウェイクアップし CPU 例外処理プロセスが開始される。コード実行は ISR の最初の命令から継続される

SLEEP ステータスビット (RCON<3>) はウェイクアップと設定されます。

## 10.3.1.7 リセットによるスリープからのウェイクアップ

すべてのデバイスリセット要因で、プロセッサがスリープモードからウェイクアップします。プロセッサをウェイクアップするなどのリセット要因 (POR 以外) も、デバイスが以前にスリープモードであったことを示すため SLEEP ステータスビット (RCON<3>) をセットします。パワーオンリセットでは、SLEEP ビットはクリアされます。

## 10.3.1.8 ウォッチドッグタイマのタイムアウトによるスリープからのウェイクアップ

ウォッチドッグタイマ (WDT) が有効になっていて、デバイスがスリープ中にタイムアウトした場合、デバイスはウェイクアップします。WDTO および SLEEP ステータスビット (RCON<4:3>) は両方とも、WDT のタイムアウトによりデバイスが再始動したことを示すためにセットされます。このイベントはデバイスをリセットしないことに留意して下さい。スリープモードを開始した PWRSAV 命令に続く命令から動作が継続します。

### 10.3.2 アイドルモード

デバイスがアイドルモードに入ると次のイベントが発生します。

- CPU は命令実行を停止
- WDT は自動的にクリアされる
- システムクロック源は動作を継続し、周辺モジュールは、デフォルトではシステムクロックで通常動作を継続する。周辺モジュールは、オプションで、アイドル時停止制御ビットによりアイドルモード中には停止できる（詳細は周辺の説明を参照）
- WDT または FSCM が有効な場合、LPRC も動作を継続する

プロセッサは次のイベントでアイドルモードからウェイクアップします。

- 個々に有効化された割り込み発生時
- すべてのデバイスリセット発生時
- WDT タイムアウト発生時

アイドルからウェイクアップすると、クロックが CPU に再供給され、PWRSAV 命令の続きか、ISR の最初の命令から、すぐに命令実行が開始されます。

#### 10.3.2.1 割り込みによるアイドルからのウェイクアップ

CPU 優先レベルが 0 に設定されたユーザー割り込み要因では、割り込み要因が無効になっていることとなりますから、CPU をアイドルモードからウェイクアップさせることはできません。割り込みをウェイクアップ要因とするためには、その割り込みの CPU 優先レベルは 1 以上でなければなりません。

IECx レジスタの対応する IE 制御ビットにより個別に有効化され、現行の CPU 優先度を超える割り込み要因は、どれもアイドルモードからプロセッサをウェイクアップできます。デバイスがアイドルモードからウェイクアップする場合、次の 2 つのオプションのうち 1 つが起きます。

- 割り込み要因に割り当てられた優先度が現行の CPU 優先度よりも低いまたは等しい場合、デバイスはウェイクアップし、アイドルモードを開始した PWRSAV に続く命令からコード実行を継続します。
- 割り込み要因に割り当てられた優先度が現行 CPU 優先度よりも高い場合、デバイスはウェイクアップし、CPU 例外処理プロセスが開始されます。コード実行は ISR の最初の命令から継続します。

IDLE ステータスビット (RCON<2>) がウェイクアップ時にセットされます。

#### 10.3.2.2 リセットによるアイドルからのウェイクアップ

POR 以外のどのリセットでも、アイドルモードから CPU をウェイクアップさせることが可能です。POR 以外のどのデバイスリセットでも、デバイスが以前アイドルモードだったことを示すため、IDLE ステータスビット (RCON<2>) をセットします。パワーオンリセットの場合、IDLE ビットはクリアされます。

#### 10.3.2.3 WDT タイムアウトによるアイドルからのウェイクアップ

WDT が有効化されている場合、プロセッサは WDT タイムアウト時にアイドルモードからウェイクアップし、アイドルモードを開始した PWRSAV 命令の次の命令からコード実行を継続します。WDT タイムアウトはこの場合デバイスをリセットしないことに留意して下さい。WDTO および IDLE ステータスビット (RCON<4,2>) は、両方ともセットされません。

#### 10.3.2.4 アイドルモードからのウェイクアップ時の遅延

スリープモードからウェイクアップするのとは異なり、アイドルモードからウェイクアップする際には遅延はありません。システムクロックはアイドルモード中にも動作していますから、ウェイクアップ時のスタートアップタイムは要求されません。

### 10.3.3 省電力命令と割り込みの同時発生

PWRSAV 命令の実行と同時の割り込みは、スリープまたはアイドルモードへの移行が完了するまで保留されます。その後でデバイスはスリープまたはアイドルモードからウェイクアップします。

## 10.4 ダズモード

クロック速度を変更し、命令ベースの省電力モードのうちのひとつにすることは、電力消費を低減する良い方法です。しかし、これが実現できない状況もあります。例えば、他にすることが無くても、間断なく同期通信をしなければならないアプリケーションのような場合です。省電力モードでは通信が完全に停止しますし、システムクロック速度を遅くすると通信エラーを引き起こします。

ダズモードは、デバイスの命令実行を継続しつつ、電力消費を減らす別の方法を提供します。このモードでは、システムクロックは同一クロック源で同じ速度で動作継続します。周辺モジュールは CPU クロックが減速しても、元と同じ速度のクロックで動作継続します。2つのクロック領域間の同期は維持され、CPU の命令実行速度が遅くなっても、周辺は SFR をアクセスできます。

ダズモードは DOZEN ビット (CLKDIV<11>) をセットすることで有効化されます。周辺モジュールとコアのクロック速度比は、DOZE2:DOZE0 ビット (CLKDIV<14:12>) で決定されます。1:1 から 1:256 までの 8 種類の設定ができます。デフォルトの設定は 1:1 です。

### 10.4.1 割り込みによるダズモードからの復帰

ダズモードは、割り込みイベントで自動的にフルスピードの CPU 実行状態に戻るよう設定できます。割り込みで自動的にフルスピード CPU 動作に戻るのを有効にするのは、ROI ビット (CLKDIV<15>) をセットすることでできます。デフォルトでは ROI ビットはクリアされていて、割り込みイベントはダズモード動作に影響を与えません。ROI がセットされている状態でダズモード中に割り込みイベントが起きると、DOZEN ビットが自動的にクリアされます。

ダズモードからの復帰機能は、同期通信などのクロックに敏感な機能を可能とし、CPU が非常に低速で命令の実行を行っている間に間断なく動作を継続し、割り込みルーチンを実行してもとの速度に戻すイベントを待ちます。

## 10.5 選択式の周辺モジュールの電力制御

スリープ、アイドル、ダズモードは CPU クロックを減速したり停止させることでユーザーは実質的に消費電力を減らすことができます。しかし周辺モジュールへのクロック供給は残りますのでいくらかの電力を消費します。アプリケーションによっては、これらのモードではサポートしていない周辺モジュールによる電力消費を完全に停止し、限られた電力の全てを CPU に持っていく機能が必要である場合もあるでしょう。PIC24F デバイスは、この要求に応えるため、周辺モジュールを選択して有効化、無効化ができるようにして電力消費の削減または停止ができるようにしています。

### 10.5.1 周辺モジュールの無効化

PIC24F ファミリのアーキテクチャの大部分の周辺モジュールは、選択的に無効化ができ、すべての動作モード中にそれらの電力消費を低減あるいは実質的に停止できます。2つの異なるオプションが用意されていて、少し異なった効果となります。

### 10.5.2 モジュール有効化ビット (XXXEN)

多くの周辺モジュールには、「XXXEN」という名前のモジュール有効化ビットがあり、通常、その制御レジスタ (またはより複雑なモジュールでは主制御レジスタ) のビット 15 に配置されています。ここで「XXX」はモジュール名のモジュールのニーモニックを表しています。例えば、SPI™ モジュールの有効化ビットは「SPIEN」というようになります。このビットはすべてのシリアルまたはパラレル通信モジュールとリアルタイムクロックにあります。このビットをクリアすると、モジュール動作を無効としますが、クロック信号の受信だけは継続し、最小限の電流は流れます。

初期の全ての PICmicro® デバイスのように、タイムは選択した動作で動作継続し、15 ビット目に配置された個々の TON ビットで制御されます。A/D コンバータも従来からの有効化ビット「ADON」を持っていて、これは XXXEN ビットと同じ機能を持っています。I/O ポートと、それに関する入力変化通知と入力キャプチャなどの機能は、固有のモジュール有効化ビットを持っていません。これはそれらの動作が他のモジュールの 2 次的なものだからです。

モジュールの無効化で、特別なアプリケーションなしに、アプリケーションを実行しながらソフトウェア制御で選択的に動的に電力消費を調整できます。

### 10.5.3 周辺モジュール無効化ビット (XXXPMD)

すべての周辺モジュール (I/O ポートを除く) は、それらの機能を無効にできる 2 番目の制御ビットを持っています。そのビットは周辺モジュール無効化 (PMD) ビットと呼ばれ、通常「XXXPMD」(「XXX」には前述のようにモジュール名のニーモニックが使われる) と名前がついています。これらのビットは PMD<sub>x</sub> 特殊機能レジスタに配置されています。モジュール有効化ビットと異なり、PMD<sub>x</sub> ビットはモジュールを無効にするときセット (=1) にする必要があります。

PMD とモジュール有効化ビットはいずれもモジュール機能を無効化し、PMD ビットは完全に周辺モジュールをシャットダウンします。効果的にすべての回路をオフにし、全クロック源を遮断します。さらに、SFR 領域にマップされるすべてのモジュールの制御およびバッファレジスタの動作を停止します。いいかえると、PMD ビットがモジュールの無効化に使用されると、周辺

の停止は、PMD ビットがクリアされるまで続きます。モジュール有効化ビットを使用した場合には、周辺動作が無効化されていても、周辺は再構成されていてバッファレジスタには事前ロードされているという点で異なります。

PMD ビットは、わずかの電力消費の低減でもそのアプリケーションの機能に対する能力を決定するような電力消費に非常に厳しいアプリケーションの場合に有効です。このような場合には、全く使用しない周辺モジュールを削除するために、このビットをアプリケーションのメイン部に入る前にセットできます。

### 10.5.4 アイドルモードでのモジュールの選択的無効化

さらに省電力をするため、アイドルモードにするとき常に、周辺モジュールを選択的に無効化できます。これは、アイドル時停止制御ビット (SIDL) でできます。このビットは通常大部分の周辺モジュールの制御レジスタの 13 番目のビットに配置されています。一般的な名称形式は、「XXXSIDL」(「XXX」には前述のように周辺モジュールのニーモニックが使われる) です。アイドル時停止の機能により、アイドルモード時の消費電力をさらに削減でき、極度に電力に厳しいアプリケーションでの省電力化を高めます。

周辺モジュールの多くは、モジュール有効化ビットを持たなくても、アイドル時停止ビットを持っています (入力キャプチャ、出力コンペア)。リアルタイムクロックモジュールは例外で、リアルタイムクロックが必要なアプリケーションでは、モジュールを動作継続させることが必要と考えているためです。

表 10-2: 省電力機能 レジスタ マップ

ファイル名	ビット 15	ビット 14	ビット 13	ビット 12	ビット 11	ビット 10	ビット 9	ビット 8	ビット 7	ビット 6	ビット 5	ビット 4	ビット 3	ビット 2	ビット 1	ビット 0	リセット値
RCON	TRAPR	IOPUWR	—	—	—	—	CM	VREGS	EXTR	SWR	SWDTEN	WDTO	SLEEP	IDLE	BOR	POR	xxxx <sup>(1)</sup>
CLKDIV	ROI	DOZE2	DOZE1	DOZE0	DOZEN	RCDIV2	RCDIV1	RCDIV0	—	—	—	—	—	—	—	—	0300
PMDx	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	XXMD	0000

凡例: x = リセット時の値は不定、— = 未実装、読むと「0」。リセット時の値は 16 進数で示す。

注 1: RCON レジスタのリセット時の値はリセットのタイプによります。

## 10.6 設計の秘訣

**質問 1: スリープやアイドル モードに入る前には、ソフトウェアで何をすべきですか？**

**回答:** デバイスをウェイクさせようとする要因の IE ビットはセットされているか確認して下さい。さらに、その割り込み要因がデバイスをウェイクさせることが可能かも確認して下さい。要因によってはデバイスがスリープ中は機能しないものがあります。

デバイスがアイドルモードになったら、各周辺モジュールの「アイドル時停止」制御ビットが適切にセットされているかを確認して下さい。これらの制御ビットは、周辺モジュールをアイドルモード時に動作させるかどうかを決定します。詳細については、本書の個々の周辺モジュールの章を参照して下さい。

**質問 2: どうすれば、どの周辺モジュールがデバイスをスリープやアイドル モードからウェイク アップさせたかが判りますか？**

**回答:** ウェイク アップさせた要因を確認するために、有効な割り込み要因の IF ビットをポーリングできます。

## 10.7 関連する アプリケーション ノート

この項では、マニュアルのこの章に関連するアプリケーション ノートをリストアップします。これらのアプリケーション ノートは、特に PIC24F デバイス ファミリー用に書かれているわけではありませんが、その概念は適切であり、変更、あるいは制限事項も考慮に入れて使用可能です。現状、省電力機能に関連するアプリケーション ノートは以下の通りです。

タイトル	アプリケーション ノート #
PICmicro® マイクロ コントローラを用いた低電力設計	AN606

**注：** PIC24F ファミリ デバイスのその他のアプリケーション ノートやコード例については、マイクロチップのウェブサイト ([www.microchip.com](http://www.microchip.com)) をご覧下さい。

### 10.8 改版履歴

#### リビジョン A (2006 年 8 月)

本文書の初版リリース。

ノート: