AIROC™ Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップおよび PSOC™ 6 MCU を使用した低電力システム設計

本書について

適用範囲と目的

AN227910 は、AIROC™ Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップおよび PSOC™ 6 MCU を使用して、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth® コンボ チップを使用した Internet of Things (IoT) アプリケーション用の低電力接続ソリューションを設計する方法を説明します。

このアプリケーション ノートの技術的な説明は、他の AIROC™ Wi-Fi & Bluetooth®コンボ チップおよび PSOC™ 6 MCU に適用されます。

28 nm ラジオと 40 nm PSOC™ 6 MCU の組合せにより、IoT アプリケーション向けの超低電力プラットフォームが可能です。このアプリケーションノートは、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップの低電力モードと機能の概要を提供し、また、低電力アシスタント (LPA) ツールを活用して、システムの電力消費を最適化するためのホストオフロード機能などのさまざまな手法について説明します。

対象者

本書は、AIROC™ Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップおよび PSOC™ 6 MCU を使用して、IoT アプリケーション用の低電力接続ソリューションを設計する方を対象とします。

目次

本書について 1
目次 2
1 はじめに 4
2 低電力の概要 5
2.1 AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ 電力モード 5
2.2 PSOC™ 6 MCU 電力モード 5
2.3 AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ電源関連のハードウェア信号 6
2.4 電力モードの遷移 8
3 WLAN 電力最適化テクニック 10
3.1 IEEE 802.11 (Wi-Fi) 省電力 10
3.1.1 ビーコン間隔 10
3.1.2 リッスン間隔 10
3.1.3 DTIM 期間 10
3.1.4 省電力方法 11
3.1.4.1 省電力ポーリング 12
3.1.4.2 ポーリングなしの 802.11 省電力 12
3.1.4.3 関連付けタイムアウト制限 13
3.1.5 802.11ac フレンドリーな機能 13
3.2 Wi-Fi 省電力の実装 14
3.2.1 Wi-Fi ホストドライバ (WHD) 省電力インタフェース 14
3.2.2 ネットワークスタックの循環タイマー 16
3.3 WLAN デバイスへのホストオフロード 17
3.3.1 ARP オフロード 17
3.3.2 パケットフィルタ オフロード 18
3.3.2.1 ネットワーク層または EtherType フィルタ 20
3.3.2.2 トランスポート層/ IP プロトコル 20
3.3.2.3 アプリケーション層/ TCP および UDP ポート番号 21
3.3.3 TCP キープアライブ オフロード 21
4 Bluetooth®電力最適化テクニック 23
4.1 アドバタイズメントイベント 23
4.2 接続イベント 24
4.2.1 接続間隔 24
4.2.2 スレーブ レイテンシの使用 24
4.2.3 Bluetooth® Configurator での Bluetooth® LE パラメーター 24
5 PSOC™ 6 MCU 電力最適化テクニック 26
5.1 コア電圧と動作周波数 26
5.2 ディープスリープでのリークの削減 26
5.3 RTOS ティックレスモード 28
5.4 追加の電力最適化手法 28
6 低電力アシスタント (LPA) 29
6.1 LPA 設定 29
6.2 ModusToolbox™ソフトウェアでの LPA の使用 32
7 CY8CKIT-062S2-43012 を使用した電力測定 36
7.1 ハードウェアのセットアップ 36
7.2 mtb-example-wifi-wlan-lowpower 37
7.3 mtb-example-wlan-offloads 43

目次

7.4 mtb-example-btstack-freertos-cts-client 47
7.5 mtb-example-btstack-freertos-cts-server 52
7.5.1 電力測定 52
8 まとめ 55
参考資料 56
改訂履歴 57
免責事項 58

1 はじめに

インフィニオン AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップは、28 nm の超低電力デバイスであり、シングルストリームのデュアルバンド IEEE 802.11n 準拠で 802.11ac 対応の Wi-Fi MAC/ベースバンド/ラジオ Bluetooth® 5.0 BR/EDR/LE をサポートしています。WLAN セクションはホスト MCU (PSOC™ 6 MCU) への SDIO インタフェースをサポートし、Bluetooth®セクションはホスト MCU への高速 4 線 UART インタフェースをサポートします。

PSOC™ 6 MCU は、高価で電力を消費するアプリケーションプロセッサと低パフォーマンスマイクロコントローラー (MCU) の間のギャップを埋めます。超低電力 PSOC™ 6 MCU アーキテクチャは、IoT デバイスに必要な処理パフォーマンスを提供し、電力とパフォーマンスのトレードオフを排除します。PSOC™ 62 シリーズは、超低電力 40 nm プラットフォーム上に構築され、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップを補完し、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップで利用可能な Wi-Fi および Bluetooth®ラジオへの超低電力ホストインタフェースを提供します。

このアプリケーションノートでは、AIROC™ Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ + PSOC™ 6 MCU プラットフォームによって提供される低電力機能とともに、さまざまな低電力設計手法とそれらをアプリケーションで使用する方法について説明します。このアプリケーションノートには、AIROC™ CYW43xxx Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップおよび PSOC™ 6 MCU アーキテクチャの基本的な知識と、ModusToolbox™ソフトウェアを使用してアプリケーションを開発する能力が必要です。

AIROC™ Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ, PSOC™ 6 MCU, または ModusToolbox™ソフトウェアを初めて使用する場合は、Getting started with PSOC™ 6 MCU on ModusToolbox™ software を参照してください。

2 低電力の概要

2.1 AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ 電力モード

AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップは、バッテリー駆動の IoT デバイスの厳しい電力消費要件を考慮して設計されています。Table 1 に、CYW43012 でサポートされる電力モードを示します。

Table 1 AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップの電力モード

電力モード	変更内容
アクティブ	• AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップのすべての WLAN ブロックは電源が投入されており、アクティブなキャリアセンシングとフレームの送受信により完全に機能します。 • 必要なすべてのレギュレータが有効になり、負荷電流に基づいて最も効率的なモードになります。 • クロック速度は、PMU シーケンサーによって動的に調整されます。
ディープスリープ (DS0)	• ラジオ、アナログドメイン、およびほとんどのリニアレギュレータの電源が切断されます。AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップの残りの部分は、アイドル/保持状態で電源投入されたままです。 • すべてのメインクロック (PLL、水晶発振器、または TCXO) がシャットダウンされ、有効電力が最小レベルに削減されます。32.768 kHz LPO クロックは、PMU シーケンサーでのみ使用できます。これは、PMU シーケンサーがチップをウェイクアップしてアクティブモードに遷移できるようにするために必要です。 • WLAN ファームウェアに必要な完全な RAM が保持されます。
パワーダウン (オフ)	• AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップは、すべての内部レギュレータをシャットダウンすることにより、実質的に電源がオフになります。チップは、内部レギュレータを再度有効にする外部ロジックによってこのモードから抜け出します。

AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップには、大幅な省電力を実現する高度な WLAN 電力管理ユニット (PMU) シーケンサーが含まれています。これにより、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ デバイスは、現在の環境や実行中のアクティビティに適したさまざまな電力管理状態に設定されます。

PMU は、必要なリソースの計算と、リソースとそれらを有効または無効にするために必要な時間との関係を説明する表に基づいて、内部レギュレータ、スイッチ、およびその他のブロックを有効または無効にします。PMU シーケンサーの構成可能なフリーランニング カウンタ (32.768 kHz LPO クロックで実行) を使用して、個々のレギュレータと電源スイッチをオン/オフします。クロック速度は現在のモードに合わせて、動的に変更されます (または完全にゲート制御されます)。可能な限り遅いクロック速度が使用されます。PMU の詳細については、AIROC™ Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップを参照してください。

2.2 PSOC™ 6 MCU 電力モード

PSOC™ 6 MCU は、デバイス全体に影響を与えるシステムモードと、1 つの CPU のみに影響を与える標準の Arm® CPU モードに分割される 7 つの電力モードを備えています。システム電力モードは、低電力 (LP), 超低電力 (ULP), ディープスリープ, およびハイバネートです。Arm® CPU 電力モードはアクティブ, スリープ, ディープスリープであり、システム LP および ULP 電力モードで使用できます。PSOC™ 6 MCU の低電力モードと電力削減技術の詳細については、AN219528 を参照してください。Table 2 は PSOC™ 6 MCU の電力モードを要約し、PSOC™ 6 MCU および AIROC™ Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ デザインでの電力モードの遷移 (Figure 1) を表すための簡略化されたバージョンを規定します。

Table 2　PSOC™ 6 MCU の電力モード

電力モード	変更内容	簡略化された電力モード
システム LP	• すべてのリソースは、最大のパワーとスピードで利用できます。 • すべての CPU 電源モードがサポートされています。	アクティブモード
システム ULP	• すべてのブロックを使用できますが、コア電圧が低下し、高周波クロック周波数が低下します。 • すべての CPU 電源モードがサポートされています。	
CPU アクティブ	• 通常の CPU コード実行 • システム LP および ULP 電力モードで利用可能	
CPU スリープ	• CPU がコードの実行を停止します • システム LP および ULP 電力モードで利用可能	スリープモード
CPU ディープスリープ	• CPU はコードの実行を停止します。 • システムのディープスリープエントリを要求 • システム LP および ULP 電力モードで利用可能	ディープスリープ
システムディープスリープ	• すべての CPU が CPU ディープスリープ状態のときに発生します • CPU、ほとんどのペリフェラル、高周波クロックはオフです。 • 低周波クロックがオンになっています。 • 低電力アナログおよび一部のデジタルペリフェラルは、動作およびウェイクアップソースとして使用できます。 • SRAM は保持されます。	
システムハイバネート	• CPU とクロックはオフです。 • GPIO 出力状態はフリーズされます。 • 低電力コンパレータ、RTC アラーム、および専用の WAKEUP ピンを使用して、システムをウェイクアップできます。 • バックアップ ドメインは使用可能。	ハイバネート

2.3　AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ電源関連のハードウェア信号

AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップには、ホスト (PSOC™ 6 MCU) への電力制御インタフェースを提供する 6 つのハードウェア信号があります。

Table 3　AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップのハードウェア信号

信号	説明
WL_REG_ON	この信号は、PMU (BT_REG_ON 付き) が WLAN セクションの電源を投入するために使用されます。これは BT_REG_ON 入力と OR ゲートされ、内部 AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ レギュレータを制御します。このピンが HIGH の場合、レギュレータが有効になり、WLAN セクションはリセットが解除されます。このピンが LOW の場合、WLAN セクションはリセットされます。BT_REG_ON と WL_REG_ON が両方とも LOW の場合、レギュレータは無効です。
BT_REG_ON	この信号は、PMU (WL_REG_ON 付き) が内部 AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ レギュレータの電源を切るかどうかを決定するために使用されます。このピンが HIGH の場合、レギュレータが有効になり、Bluetooth®セクションはリセッ

信号	説明
	トが解除されます。このピンが LOW の場合、Bluetooth®セクションはリセットされます。BT_REG_ON と WL_REG_ON が LOW の場合、レギュレータは無効です。
BT_DEV_WAKE	Bluetooth®デバイスのウェイクアップ: ホスト (PSOC™ 6 MCU) から AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップへの信号は、ホストが Bluetooth®コントローラーにデータを送信するなどの注意が必要であることを示します。 • アサート: Bluetooth®デバイスはウェイクアップするか、ウェイクアップしたままにする必要があります。 • デアサート: Bluetooth®デバイスは、他のすべてのスリープ基準が満たされたときにスリープする場合があります。 この信号の極性はソフトウェアで設定可能で、HIGH または LOW としてアサートできます。デフォルトは HIGH にアサートされます。
BT_HOST_WAKE	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ Bluetooth®コントローラーからホストへのホストウェイクアップ信号は、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ Bluetooth®コントローラーにホストのデータがあることを示します。 • アサート: ホストデバイスはウェイクアップするか、ウェイクアップしたままにする必要があります。 • デアサート: ホストデバイスは、他のすべてのスリープ基準が満たされたときにスリープする場合があります。 この信号の極性はソフトウェアで設定可能で、HIGH または LOW としてアサートできます。デフォルトは HIGH にアサートされます。
WL_HOST_WAKE	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ WLAN デバイスからホストへのホストウェイクアップ信号は、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ WLAN デバイスがホストに処理するデータを持つことを示します。この信号はアクティブ HIGH 信号です。 • HIGH: ホストデバイスはウェイクアップするか、ウェイクアップしたままにする必要があります。 • LOW: ホストデバイスは、スリープ基準が満たされたときにスリープする場合があります。
WL_DEV_WAKE	WLAN デバイスのウェイクアップ信号。この信号は現在の設計では使用されず、WLAN デバイスのウェイクアップには、SDIO ベースのウェイクアップが使用されます。

2.4 電力モードの遷移

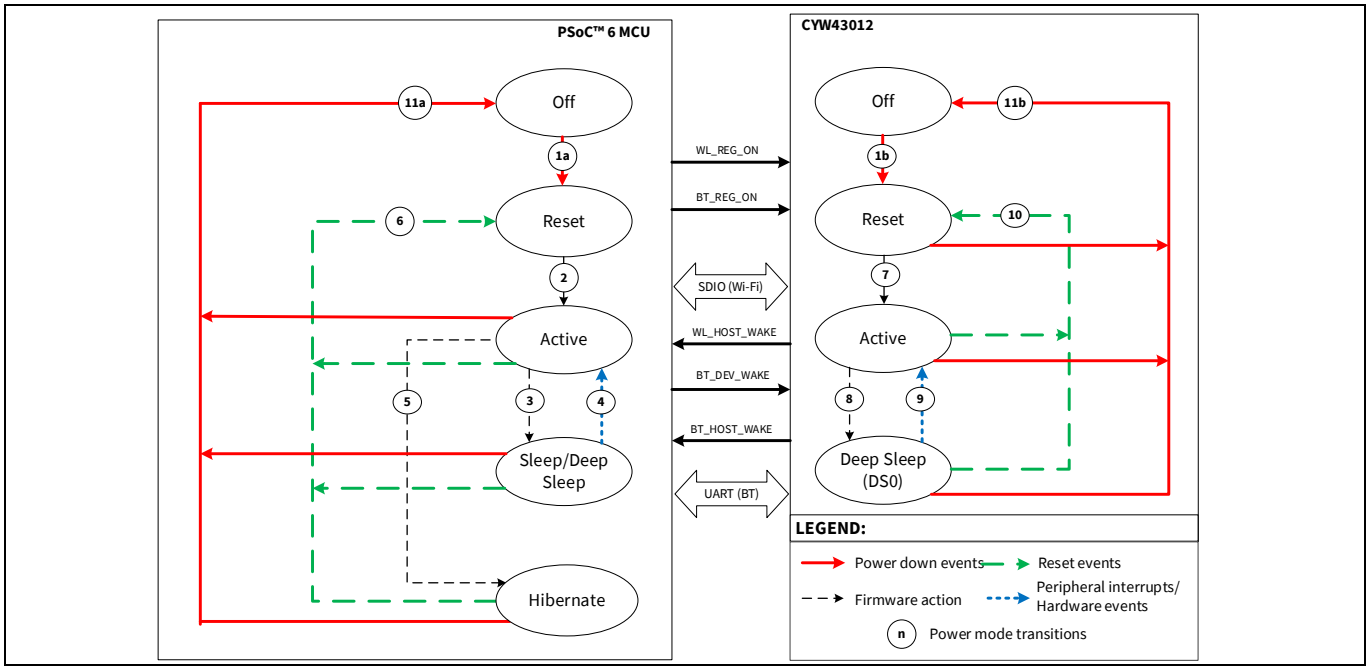

Figure 1 「PSOC™ 6 MCU[a] + AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ」デザインの簡略化された電力モード遷移

遷移	説明	トリガ
1a	PSOC™オフからリセットへの遷移	PSOC™ 6 MCU への電力供給
1b	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップオフからリセットへの遷移	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップへの電力供給
2	PSOC™リセットからアクティブへの遷移	リセットからアクティブモードへのファームウェア (ブート/スタートアップ) の遷移
3	PSOC™アクティブからスリープまたはディープスリープへの遷移	アクティブモードからスリープモードまたはディープスリープモードへのファームウェア (OS アイドルタスク) の遷移
4	PSOC™スリープまたはディープスリープからアクティブへの遷移	スリープ/ディープスリープからのウェイクアップ (割込み)。AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ デザインの一般的なソース: • WL_HOST_WAKE (ディープスリープまたはスリープ) • BT_HOST_WAKE (ディープスリープまたはスリープ) • SDIO および UART 割込み (スリープ) • 低電力タイマー割込み
5	PSOC™アクティブからハイバネートへの遷移	アクティブモードからハイバネートモードへのファームウェア (ハイバネートに入る) 遷移
6	PSOC™リセット状態への遷移	ハイバネートウェイクアップ、外部リセットなどのリセットイベント
7	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ リセットからアクティブへの遷移	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップをリセット解除に遷移する外部イベント; PSOC™ 6 MCU によって HIGH にプルされる BT_REG_ON または WL_REG_ON

遷移	説明	トリガ
8	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ アクティブからディープスリープへの遷移	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップは DS0 モードに入ります。オンチップ PMU によって管理され、デバイスの省電力を有効にする必要があります
9	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ ディープスリープからアクティブへの遷移	外部イベントまたは AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth® コンボチップをアクティブモードにする PMU の遷移；可能な PSOC™ 6 MCU アクション: • BT_DEV_WAKE • SDIO 割込み
10	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ リセット状態への遷移	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップをリセット状態に遷移する外部イベント; WL_REG_ON と BT_REG_ON の両方が PSOC™ 6 MCU によって LOW にプルされます。
11a	PSOC™はオフ状態への遷移	PSOC™ 6 MCU への電源供給の削除 (パワーダウン)
11b	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップはオフ状態への遷移	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップへの電源供給の削除 (パワーダウン)

Note: PSOC ™6 MCU の電力モードは、遷移を簡単に表すために簡略化された形式で表されています。詳細については、Table 2 を参照してください。

3 WLAN 電力最適化テクニック

3.1 IEEE 802.11 (Wi-Fi) 省電力

ここでのトピックは、IEEE 802.11 仕様ドキュメントに含まれている情報に部分的に基づいています。802.11 規格には、ステーションの省電力を可能にするいくつかのパラメーターが含まれていますが、省電力は、ステーションのスループットまたは遅延を犠牲にして実現されます。

ここでは、IEEE 仕様の節電方法と関連用語の概要のみを説明します。すでにトピックに精通しており、実装に興味がある場合は、Wi-Fi 省電力の実装を参照してください。

3.1.1 ビーコン間隔

ビーコンフレームは、サービスエリア全体で Wi-Fi ステーション (STA) に提供される接続の特性を通信するために、Wi-Fi アクセスポイント (AP) によってブロードキャストされる定期的なフレームです。この情報は、ネットワークに接続しようとしている STA と、すでに基本サービスセット (BSS) に関連付けられている STA によって使用されます。ビーコンフレームが送信される期間は、「ターゲットビーコン送信時間」 (TBTT) または単に「ビーコン間隔」と呼ばれます。ビーコン間隔は既定の AP に対して構成可能ですが、通常は 102.4 ms (100 時間単位、1 時間単位は 802.11 仕様に従って 1024 µs) に設定されています。ビーコン間隔情報は、ビーコンフレーム自体の一部として利用できます。詳細については、802.11 仕様を参照してください。さらに、各ビーコンには、STA 用にバッファリングされたパケットに関する情報を含むトラフィック通知マップ (TIM) が含まれています。TIM を読み出し、それら宛てのパケットを取得するのは STA の責任です。

3.1.2 リッスン間隔

電力を節約するために、STA はほとんどの Wi-Fi サブシステムの電源を切ることでスリープします。STA がスリープしている間、AP はそれらのフレームをバッファリングし、ビーコン TIM を介して可用性を示します。スリープ状態の STA は、トラフィックアナウンス (TIM) をリッスンするために定期的にウェイクアップし、AP にバッファされたフレームがあるかどうかを判断します。STA が AP に関連付けられる場合、Association Request フレームのデータの一部はリッスン間隔です。リッスン間隔は、省電力ステーションがウェイクアップしてビーコンフレームをリッスンする頻度を AP に示します。AP はリッスン間隔をガイドとして使用して、省電力ステーション用にバッファされたフレームを保持する期間を決定できます。リッスン間隔を大きくすると、フレームバッファリングのために、より多くの AP メモリが必要です。

AP は通常、STA から要求されたリッスン間隔を考慮しません。STA がリッスン間隔に値を設定しても、STA がスリープしている間、AP が STA に対して受信したすべてのパケットをバッファリングする保証はありません。さらに、AP が配信トラフィック通知メッセージ (DTIM) をサポートしている場合、その設定は STA が要求するリッスン間隔を上書きする可能性があります。

ほとんどの AP は、STA にアソシエーションタイムアウトを適用します。つまり、AP がアソシエーションタイムアウト (通常 60 秒) 内に STA からフレームを受信しなかった場合、または STA がキープアライブフレームに ACK を返さなかった場合、STA は分離されます。アソシエーションタイムアウトは STA によってネゴシエートできません。

3.1.3 DTIM 期間

DTIM 期間はインフラストラクチャネットワークに関連付けられたパラメーターであり、AP ビーコンフレームでアドバタイズされます。標準の TIM を使用したポーリングアプローチは、マルチキャストフレームとブロードキャストフレームを複数回送信するには容量が多すぎるため、マルチキャストフレームとブロードキャストフレームには適していません。ポーリングアプローチの代わりに、ブロードキャストフレームとマルチキャストフレームがすべての DTIM 間隔の後に配信されます。

DTIM を増やすと、STA は AP のバッファスペースを犠牲にしてより効果的に電力を節約できます。また、アクティブモードのステーションを含むすべてのステーションによるマルチキャストフレームとブロードキャストフレームの受信が遅延します。

STA がすべてのユニキャスト, マルチキャスト, およびブロードキャストパケットを受信するには、リッスン間隔が DTIM 期間と等しい (またはそれより短い) ことが推奨されることに注意してください。これにより、最適な電力と遅延のトレードオフが保証されます。

通常、DTIM 期間は、AP のビーコン間隔の数として設定されます。ほとんどの AP のデフォルトの DTIM 期間は、DTIM = 1 (ビーコンごとに DTIM), DTIM = 3 (3 番目のビーコンごとに DTIM), または DTIM = 10 のいずれかです。DTIM = 3 の場合、STA は低電力モードからウェイクアップするだけで、3 つおきのビーコンとその後のキューに入れられたブロードキャストまたはマルチキャストトラフィックを受信できます。

Figure 2 は、インフラストラクチャネットワークのビーコン間隔, リッスン間隔, および DTIM 期間について説明しています。

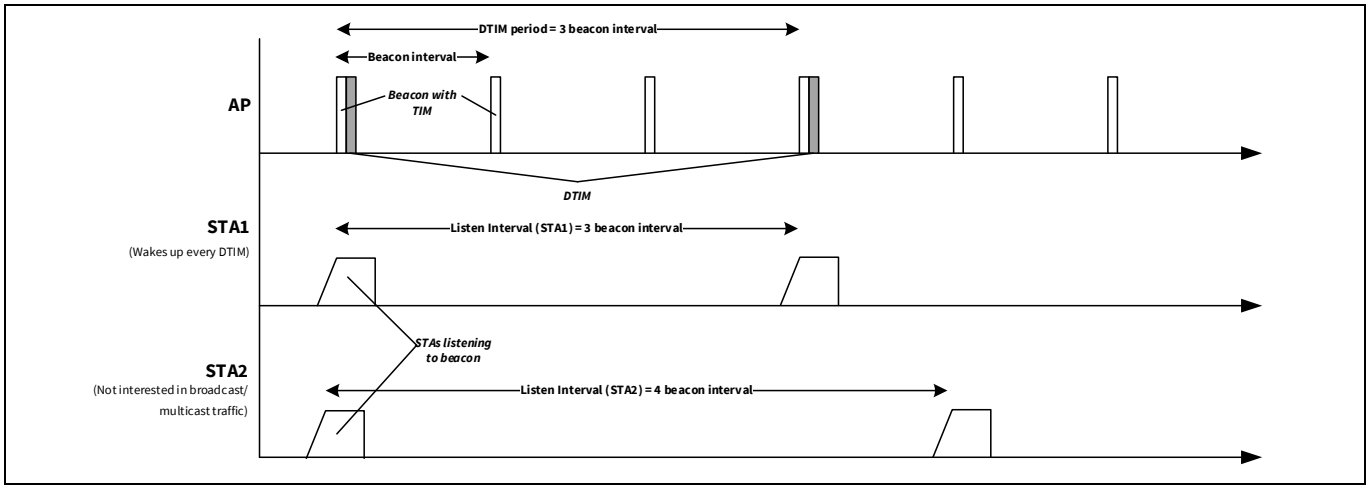

Figure 2　802.11 インフラストラクチャネットワークの運用

3.1.4　省電力方法

802.11 の送信電力消費は、受信電力消費の少なくとも 5 倍ですが、中程度の送信デューティサイクルのアプリケーションであっても、バッテリー駆動の Wi-Fi STA のエネルギーの多くはレシーバーによって消費されます。省電力技術を使用しない限り、ネットワーククライアントがリクエストに応答するのを STA が待つ間、802.11 レシーバーの電源がかなりオンになることがあります。130 mW のレシーバーの消費電力がバッテリーを放電するのに、それほど時間がかかりません。

Wi-Fi STA は、さまざまなメカニズムを使用して電力を節約します。デューティサイクルが低く、バッテリー寿命の要件が長い STA、例えば Wi-Fi センサーは、標準の 802.11 パワーセーブポーリング (PS-Poll) メカニズムを使用できます。より高いスループットを必要とする STA、例えばワイヤレススピーカーは、非標準の 802.11 省電力メカニズムの使用を検討する場合があります。これらの方法については、このセクションで説明します。

Note: STA は、さまざまなトラフィックの優先度で省電力を区別するために、よりきめ細かい省電力メカニズムを必要とするため、不定期自動省電力配信 (U-APSD) または Wi-Fi Multimedia (WMM) 省電力の使用を検討する場合があります。AIROC™CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth® コンボチップは現在、WMM 省電力をサポートしていません。

3.1.4.1 省電力ポーリング

Power Save Poll は、主にデータを低デューティサイクルで Wi-Fi ネットワークに送信する STA に適しています。PS-Poll メカニズムは次のように機能します。

1. STA は、電力管理ビットが設定された AP にフレームを送信してから、スリープ状態になります。
2. AP は、STA がスリープ状態になったことを通知し、STA のフレームをバッファリングします。
3. STA は定期的にウェイクアップし、フレームがバッファされていることを示す AP ビーコンフレームをチェックします。ウェイク期間は、設定されたリッスン間隔と、STA が DTIM を含むビーコンからグループアドレス指定されたフレームを受信するように設定されているかどうかによって異なります。
4. AP が、STA にアドレス指定されたフレームをバッファリングしたことを示す場合、STA は PS-Poll フレームを AP に送信します。
5. AP は STA にフレームを送信し、追加のフレームがバッファリングされている場合は、「More Data」ビットを設定します。
6. STA は、別の PS-Poll フレームを送信して、バッファリングされた追加のフレームを取得するか (More Data ビットが設定されている場合) 、スリープ状態に戻る場合があります。
7. STA がデータを送信する必要がある場合、AP は常にアクティブであるため、ビーコン間隔を待たずにいつでもウェイクアップしてデータを送信できます。

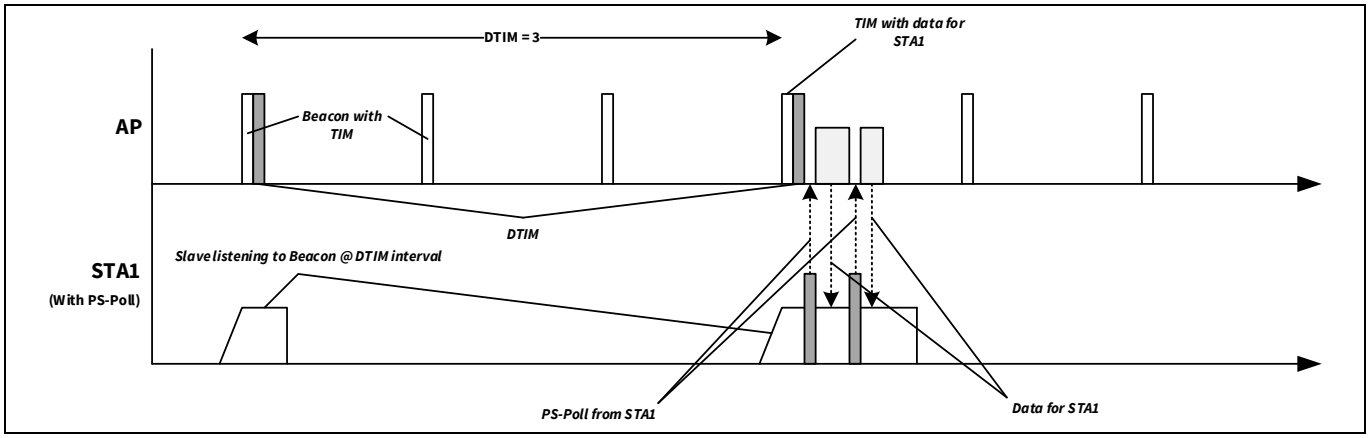

Figure 3 省電力ポーリング

3.1.4.2 ポーリングなしの 802.11 省電力

ポーリングなしの 802.11 省電力 (PS-non-Poll) として広く知られている非標準のメカニズムにより、STA は次のように「Trigger」フレームに基づいて 802.11 省電力を使用できます。

1. STA は、「Power Management」ビットが設定されたフレームを AP に送信してから、スリープ状態になります。
2. AP は、STA がスリープ状態になったことを認識し、STA のフレームをバッファリングします。
3. STA は定期的にウェイクアップします。STA は、フレームを AP に送信する前に、バッファリングされたフレームの表示について、AP ビーコンフレームを最初にチェックする (またはしない) 場合があります。
4. STA は、電力管理ビットがクリアされた状態で、ヌルファンクションデータフレームまたはデータフレーム (利用可能な場合) を AP に送信します。
5. AP は、STA がウェイクアップしていることを認識し、バッファリングされたフレームを送信します。
6. STA はフレームを受信し、タイムアウト期間を待って追加のフレーム (使用可能な場合) を受信してから、手順 1 で説明したようにスリープ状態に戻ります。

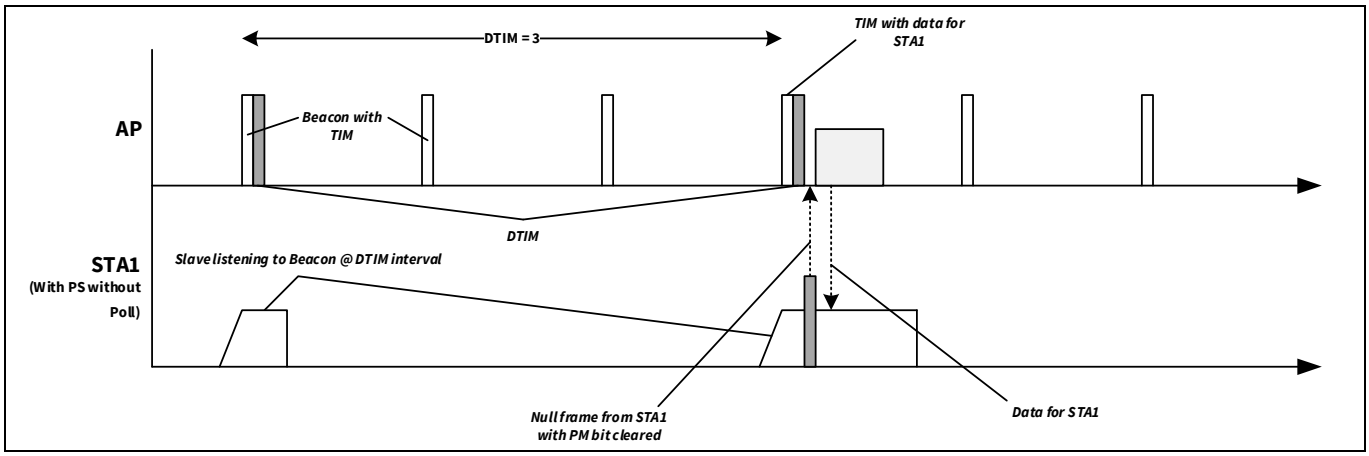

Figure 4　ポーリングなしの省電力

3.1.4.3　関連付けタイムアウト制限

STA が AP から指定されたフレームを非同期で受信することを期待しておらず、ブロードキャストまたはマルチキャストトラフィックの受信に関心がない場合は、さらに電力を節約できます。

AP には通常、デフォルト値が 60 秒のアソシエーションタイムアウト制限があるため、省電力を使用する STA は、アソシエーションタイムアウトの期限が切れる前にウェイクアップし、直接アドレス指定されたフレームを送受信して、STA がまだ関連付けられていることを AP に通知する必要があります。順守しないと、AP が STA の認証を解除します。一部の AP では、アソシエーションのタイムアウト制限を 60 秒よりも高い値に設定できますが、より高い制限は STA に通知されず、手動で設定する必要があります。

3.1.5　802.11ac フレンドリーな機能

AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップは、802.11ac AP で最大 78 Mbps のデータレートを可能にする 256-QAM (5 GHz 帯域の 20 MHz チャネル用) をサポートすることにより、802.11ac に対応しています。これによりスループットが向上し、データを送受信してからスリープ状態に戻るまでの時間が短縮されるため、デバイスの電力消費が削減されます。さらに、802.11ac の「明示的なビームフォーミング」機能をサポートし、任意の範囲で 802.11n チップセットよりも大幅に高いスループットを提供します。

3.2 Wi-Fi 省電力の実装

3.2.1 Wi-Fi ホストドライバ (WHD) 省電力インタフェース

省電力の実装は、WHD ライブラリの一部として提供されます。さらに、FreeRTOS などのプラットフォームは、WHD の上に省電力メカニズムを実装して、シームレスな低電力統合をユーザーに提供します。

Table 4 は、さまざまな省電力機能を提供する WHD の一部として利用可能な低いレベルでの機能を説明しています。詳細については、WHD API リファレンスガイドを参照してください。

Table 4 WHD 省電力 API

WHD API	説明
`whd_wifi_enable_powersave()`	デバイスで PS-Poll モードを有効にします (省電力ポーリングを参照)
`whd_wifi_enable_powersave_with_throughput()`	デバイスで 802.11 PS-non-Poll モードを有効にします (ポーリングなしの 802.11 省電力を参照)。スループットの維持が重要な場合は、このモードを使用してください。
`whd_wifi_disable_powersave()`	デバイスの省電力モードを無効にします。デフォルトでは、省電力は WLAN デバイスで有効になっています。
`whd_wifi_set_listen_interval()`	Wi-Fi チップがスリープしているときにスキップするビーコンの数を設定します。Wi-Fi 省電力が有効で、AP によってブロードキャストされる DTIM 間隔がゼロである (つまり、ネットワークに DTIM がない) 場合にのみ機能します。
`whd_wifi_get_listen_interval()`	すべてのビーコンリッスン間隔変数の現在値を取得します。

WLAN デバイスでは、デフォルトで powersave_with_throughput が有効になっていることに注意してください。省電力の有効化/無効化 API を呼び出して、WLAN の省電力オプションを変更または無効化できます。WLAN は、省電力が有効になった後、DS0 のエントリとエグジットを自動的に管理します。mtb-example-wifi-wlan-lowpower サンプルコードは、WHD 省電力 API の使用方法を示しています。

ModusToolbox™で WHD API を使用した省電力ハンドラーの実装例を以下に示します。

Code Listing 1 例: ModusToolbox™の WHD API を使用した省電力ハンドラー

```
cy_rslt_t wlan_powersave_handler(struct netif *wifi, enum wlan_powersave_mode_t
mode)
{
    cy_rslt_t result = CY_RSLT_SUCCESS;
    whd_interface_t ifp;
    whd_security_t security_param;
    whd_bss_info_t ap_info;

    if (wifi->flags & NETIF_FLAG_UP)
    {
        /* Get the instance of the WLAN interface.*/
        ifp = (whd_interface_t)wifi->state;
```

Code Listing 1　例: ModusToolbox™の WHD API を使用した省電力ハンドラー

```
        /* Obtain network parameters configured in the AP.*/
        result = whd_wifi_get_ap_info(ifp, &ap_info, &security_param);

        if (CY_RSLT_SUCCESS == result)
        {
            APP_INFO(("Beacon period = %d, DTIM period = %d\n",
                      ap_info.beacon_period, ap_info.dtim_period));
        }
        else
        {
            ERR_INFO(("Failed to get AP info.\n"));
        }

        /* Configure power-save mode of the WLAN device.*/
        switch (mode)
        {
        case POWERSAVE_WITHOUT_THROUGHPUT:
            result = whd_wifi_enable_powersave(ifp);

            if (CY_RSLT_SUCCESS != result)
            {
                ERR_INFO(("Failed to enable PM1 mode\n"));
            }

            break;
        case POWERSAVE_WITH_THROUGHPUT:
            result = whd_wifi_enable_powersave_with_throughput(ifp,
RETURN_TO_SLEEP_MS);

            if (CY_RSLT_SUCCESS != result)
            {
                ERR_INFO(("Failed to enable PM2 mode\n"));
            }

            break;
        case POWERSAVE_DISABLED:
            result = whd_wifi_disable_powersave(ifp);

            if (CY_RSLT_SUCCESS != result)
            {
                ERR_INFO(("Failed to disable powersave\n"));
```

Code Listing 1　例: ModusToolbox™の WHD API を使用した省電力ハンドラー

```
            }

            break;
        default:
            APP_INFO(("Unknown mode\n"));
            break;
        }
    }
    else
    {
        ERR_INFO(("Wi-Fi interface is not powered on. Failed to configure power-
save mode\n"));
        result = CY_RSLT_TYPE_ERROR;
    }

    return result;
}
```

3.2.2　ネットワークスタックの循環タイマー

軽量 TCP/IP スタック (LwIP) などのネットワークスタックを実装するプラットフォームは、さまざまなネットワーク関連のアクティビティに対して定期的なタイマーを実行します。これらのタイマーは、アドレス解決プロトコル (ARP) キャッシュテーブルの有効期限や動的ホスト設定プロトコル (DHCP) リース更新タイムアウトなどのネットワークアクティビティのティックとして使用されます。これらのタイマーの周期は、100 ミリ秒から 60 秒までさまざまです。これらのタイマーを処理するために定期的にウェイクアップするホストは、適切に機能するために必要です。ただし、ネットワークタイムアウトアクティビティが予期されず、低電力モードを長時間維持するためにアプリケーションがこれらのタイマーを一時停止する必要がある場合は、ネットワークスタックを一時停止して再開するオプションがあります。

この機能は、低電力アシスタントミドルウェアヘルパーファイルの一部として提供されます。*lpa/helpers/net_activity/network_activity_handler.h* ファイルで利用可能な `wait_net_suspend()`API を使用すると、指定された時間枠内でネットワークが非アクティブなままの場合、事前定義された期間、またはアクティビティが検出されるまで、ネットワーク スタックを一時停止できます。この API 関数を使用すると、ネットワークを安全に一時停止し、ネットワークアクティビティが検出されたときにいつでも再開できます。Figure 5 に、5000 ミリ秒のネットワーク一時停止期間, 150 ミリ秒のネットワーク無活動モニターウィンドウ, および 100 ミリ秒のネットワーク無活動期間があるさまざまなシナリオでの `wait_net_suspend()`操作を示します。

シナリオ 1: `wait_net_suspend()`は、150 ミリ秒のウィンドウ内で 100 ミリ秒を超えるネットワークアクティビティを検出せず、ネットワークを一時停止します。5000 ms のネットワーク一時停止期間の間、ネットワークアクティビティは検出されません。したがって、`wait_net_suspend()`は 5000 ミリ秒後にネットワークスタックを再開します。

シナリオ 2: `wait_net_suspend()`は 150 ミリ秒のウィンドウでネットワークアクティビティを検出し、非アクティブは 100 ミリ秒未満です。`wait_net_suspend()`はネットワークスタックを一時停止しません。

シナリオ 3: `wait_net_suspend()`は、150 ミリ秒のウィンドウ内で 100 ミリ秒を超えるネットワークアクティビティを検出せず、ネットワークを一時停止します。5000 ミリ秒の有効期限が切れる前に、ネットワークアクティビティが検出されます。したがって、`wait_net_suspend()`はネットワークスタックをすぐに再開します。

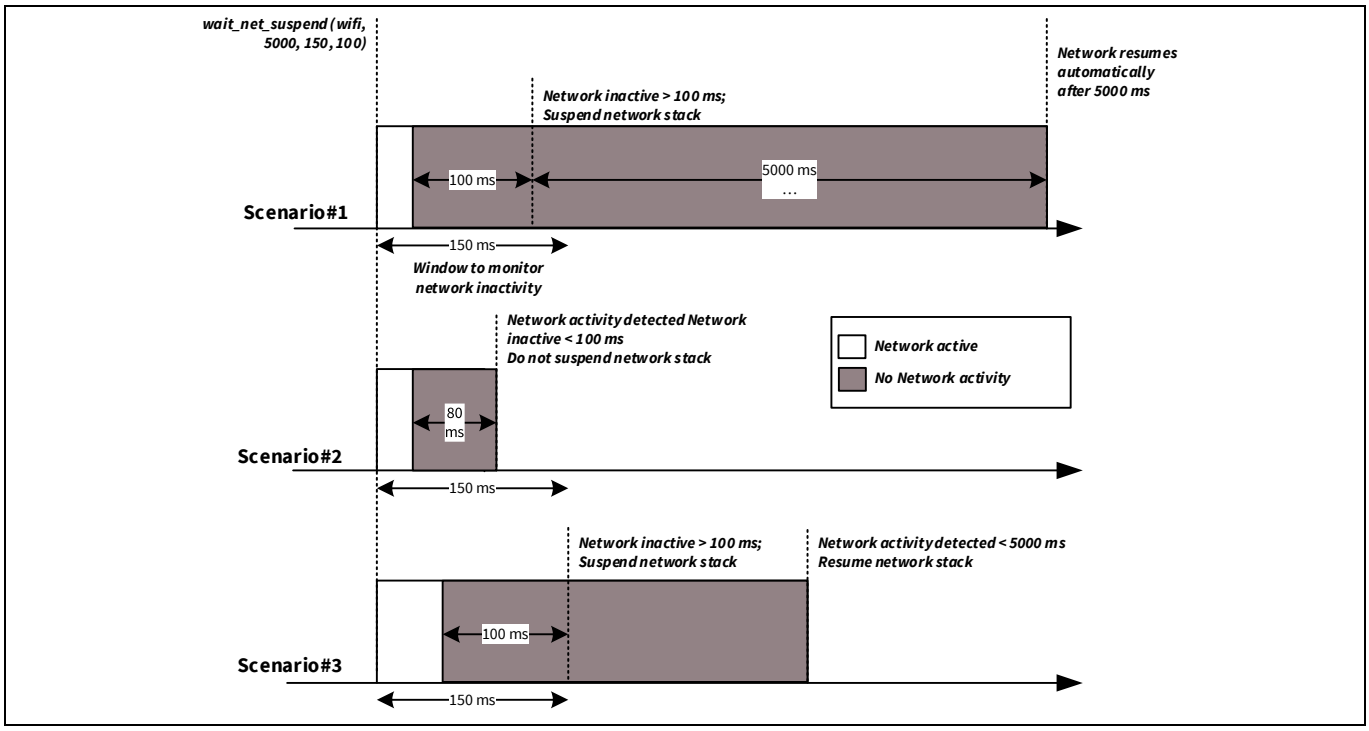

Figure 5 `wait_net_suspend()`オペレーション

ModusToolbox™ソフトウェアを使用する場合、ネットワーク一時停止機能を安全に使用する方法の詳細については、mtb-example-wifi-wlan-lowpower サンプルコードを参照してください。

これらのタイマーの詳細については、LPA ミドルウェアのドキュメントを参照してください。

3.3 WLAN デバイスへのホストオフロード

AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップには、すべての WLAN デバイスアクティビティを実行する Arm® Cortex®-M3 コアが搭載されています。ホストの状態を中断せずにホストに代わって特定の機能を実行するさまざまなオフロードをサポートします。

WLAN デバイスが 802.11 ローミング, ARP, IPv6 ネイバー解決, キーローテーション, TCP キープアライブなどのタスクを処理する間、オフロードによりホストが長時間ディープスリープ状態になるため、ホストオフロードはホストの電力消費を決定する上で重要な役割を果たします。さらに、これらのオフロードにより、ホスト CPU が解放され、オーディオやセンサーデータ処理などのより強力なタスクが実行されます。これにより、システム全体の効率と電力が改善されます。

以下のセクションでは、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップでサポートされるオフロードについて説明します。オフロードは、インフィニオンの低電力アシスタント (LPA) ミドルウェアを使用して有効にできます。ModusToolbox™での LPA ミドルウェアの使用については、低電力アシスタント (LPA)で説明されています。

3.3.1 ARP オフロード

ARP は、IP アドレスをデバイスの物理 MAC アドレスにマッピングするためのデータリンク層プロトコルです。そのようなマッピングは、WLAN デバイスがネットワーク内の近くにあるすべてのデバイスの

[IP:MAC]詳細を最新の状態に保つために必要です。ARP プロトコルを使用して、デバイスはネットワーク内の重複した IP アドレスを検出できます。これは、IP アドレスの変更をピアデバイスに通知する場合にも役立ちます。

ARP 要求と応答パケットは、どの WLAN ネットワークでも一般的なアクティビティであるため、通常、ホストデバイスは多くの要求でフラッディングされます。特に混雑したネットワークでは、ホストはそのような要求に応答するためにアクティブなままである必要があります。ピアからの ARP 要求パケットは、通常、ホストがスリープしている場合はホストをウェイクアップします。AIROC™ Wi-Fi & Bluetooth® コンボチップの ARP オフロード機能が、ピアからの ARP 要求への応答を処理するため、これらの要求がホストを妨害することはありません。AIROC™ Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ デバイスは (8 エントリの) キャッシュを保持します。Figure 6 に示すように、キャッシュミスが発生した場合にのみ、ホストがウェイクアップされます。

ピアへの自動応答に加えて、AIROC™ Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップは、ホストがネットワークに ARP 要求を送信するときにも、キャッシュを使用してホスト (PSOC™ 6 MCU) に応答できます。このホストの自動応答機能は、ピアの自動応答と同様に機能します。この場合、キャッシュミスはネットワークに転送され、キャッシュヒットは ARP 応答をすぐにホストに返します。この機能は、ホストネットワーク通信から ARP 情報をスヌープする AIROC™ Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ デバイスの機能によって補完されます。つまり、ホストが ARP 応答パケットをネットワークに送信するたびに、[IP:MAC]情報が AIROC™ Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ ARP キャッシュテーブルにキャッシュされます。

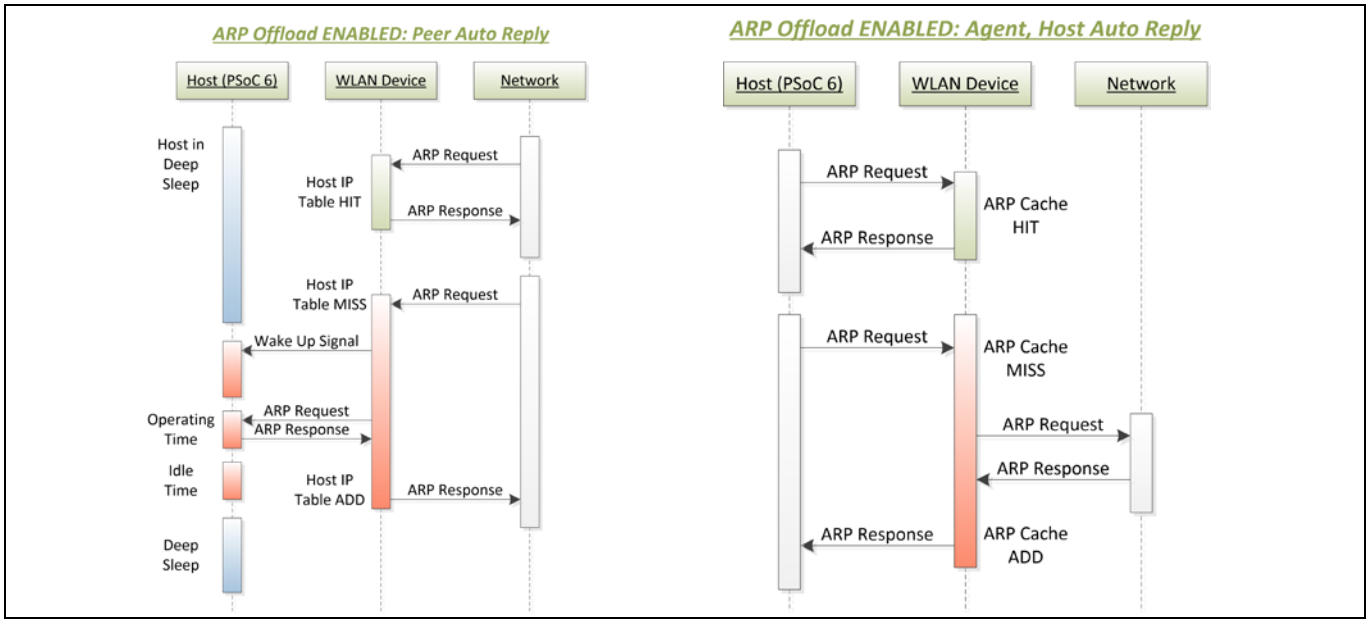

Figure 6　ARP オフロード機能

3.3.2　パケットフィルタ オフロード

パケットフィルタを使用すると、ホストは、WLAN デバイスからホストプロセッサに渡されるパケットの種類を制限できます。これは、ホストを省電力ディープスリープモードから復帰させたり、ディープスリープモードに入るのを妨げたりする可能性があるネットワークからの不要なパケットを防ぐのに役立ちます。

一般に、WLAN パケットの宛先がホストの場合、WLAN デバイスはホストがスリープ状態の場合はウェイクアップさせて、ホストがパケットを取得して処理できるようにする必要があります。多くの場合、ホストネットワークスタックはパケットを処理するだけであり、パケットが使用されていないポートまたはサービスに向けられている場合など、パケットが破棄される必要があることを検出します。パケットフィルタを使用すると、ホストが中断されないように、これらのタイプのパケットを WLAN プロセッサ自体でフィルタリングして破棄できます。

つまり、パケットフィルタは次の場合に役立ちます。

- 不要なトラフィックをフィルタリングすることにより、ホストプロセッサを可能な限りディープスリープ状態に保ちたい (またはできるだけ早くディープスリープ状態にしたい)。
- 必要なトラフィックのみをフィルタリングして通過させることにより、ホストプロセッサの関与を最小限に抑えたい。

フィルタは、ホストプロセッサがアクティブまたはスリープ (またはその両方) のときにアクティブになるように設定できます。同時に動作するように複数のフィルタを設定できます。1 つのセットは目覚めている間に機能し、別のセットはスリープ中に機能し、ホストを目覚めさせるために使用できます。さらに、フィルタを破棄または保持 (ホストに送信) するように設定できます。破棄するように設定されている場合、指定されたパケットのみが破棄され、特にフィルタされていない他のパケットはホストに渡されます。逆に、パケットを保持するように設定されている場合、指定されたパケットのみがホストに渡され、残りは破棄されます。

典型的なモデルは、アプリケーションが処理する必要のあるすべてのタイプのパケットを認識している「保持」フィルタのみを使用することです。言い換えると、「保持」フィルタを使用して、ホストが対象とするパケットタイプの完全なリストを指定し、残りを破棄します。これは、ホストが受信したいパケットのリストを作成するほうが、不要なパケットの完全なリストを作成するよりもはるかに簡単であるため、推奨されます。保持フィルタを使用する場合は、ネットワークプロトコルが適切に機能するために十分なパケットが通過できるように注意する必要があります。

例えば、目覚めている間、プロセッサはネットワークに参加し、DHCP アドレスを取得し、ARP を実行し、ネットワークキーを共有できる必要があります。これらのタイプのパケットを通過させるのに十分な保持フィルタを作成しないと、ホストがネットワークに参加することさえできなくなります。保持フィルタの合理的な最小限のセットには、以下のものを含める必要があります。

- ARP (ARP パケットを許可)
- IEEE 802.1X (セキュリティパケットを許可)
- DHCP (UDP ポート 68)
- DNS (UDP ポート 53)

破棄フィルタを有効にするときに必要なフィルタの最小セットはありません。ただし、オフロード内のすべてのフィルタ タイプは保持または破棄のいずれかであり、両方の組合せではないことに注意してください。これは、保持および破棄フィルタの補完的な性質が予期しない動作を引き起こすためです。

スタックレイヤ, プロトコル, およびパケットフィルタの関係を示す Figure 7 でわかるように、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップでは標準ネットワークスタックに基づいて 3 種類のパケットフィルタがサポートされています。

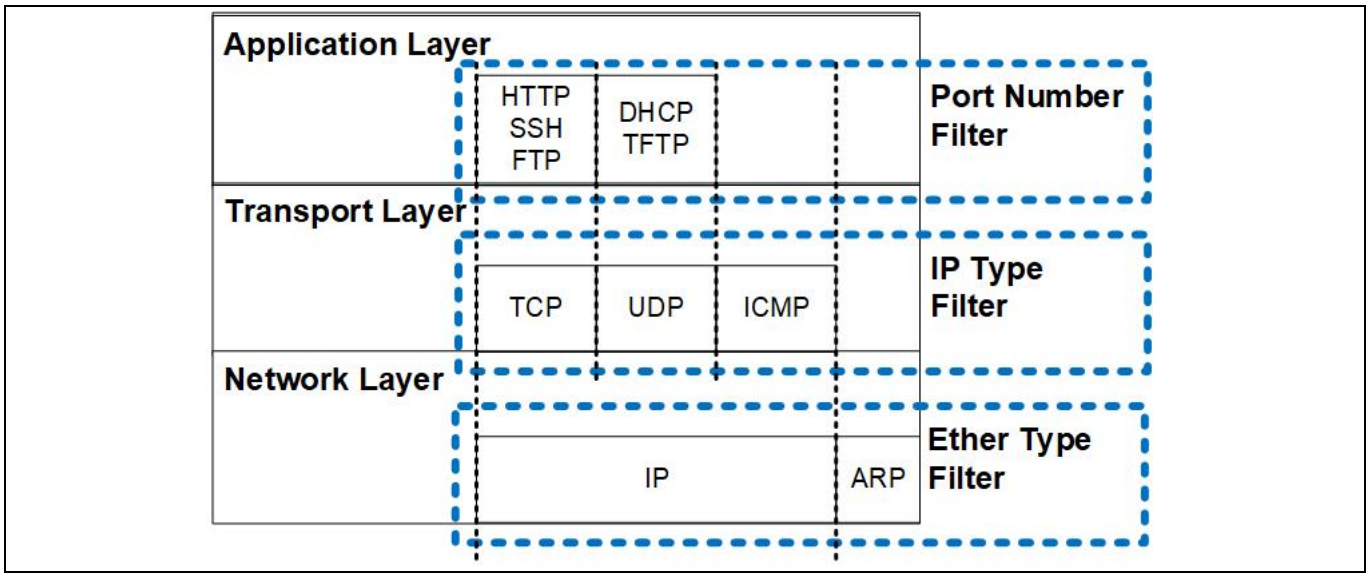

Figure 7　パケットフィルタ

Note: AIROC™CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth® コンボチップでは、破棄パケットフィルタ オフロードの数は 1 つに制限されています。つまり、デザインで有効にできる破棄パケットフィルタは 1 つだけです。複数の破棄フィルタを有効にすると、すべてのパケットが通過します(フィルタなし)。

3.3.2.1　ネットワーク層または EtherType フィルタ

EtherType フィルタは、ネットワーク層で確かめられるイーサネットパケットに存在する 16 ビット EtherType フィールドに基づいてパケットをフィルタします (Internet Assigned Numbers Authority (IANA)を参照) 。最も一般的に使用されるプロトコル (および最も有用なフィルタ) は次のとおりです。

- IP (EtherType = 0x800)
- ARP (EtherType = 0x806)
- IEEE 802.1X または EAP over LAN (EtherType = 0x888E)

IP EtherType でのフィルタリングは、ネットワークからのすべての IP パケットに一致します。これは非常に粗いフィルタであり、Figure 7 に示すように、すべての ICMP, TCP, および UDP パケットが含まれます。ARP または IEEE 802.1X でのフィルタリングはより細かくなります。それぞれのパケットにのみ一致します。すべての IP パケットをフィルタリングすると、かなりの数のパケットが一致するため多大な影響があり、通常の使用には推奨されません。有効な EtherType フィルタは、0x800 以上の 16 ビットの数値で構成されます。

3.3.2.2　トランスポート層/ IP プロトコル

スタックの次の層はトランスポート層で、TCP、UDP、ICMP などのさまざまな IP ベースのプロトコルで構成されています。 プロトコル自体の説明はアプリケーションノートの範囲外ですが、広く利用可能であり、プロトコル番号のリストは IANA などの多数のソースにあります。

Ip プロトコル フィルタは、単一の 8 ビットの数値で構成されます。フィルタは、この 8 ビットの数値に対して検証チェックを実行せず、数値に一致するパケットをフィルタするだけです。これは、ベンダーがこの層で独自の番号とプロトコルを使用できるためです。TCP/UDP プロトコルでのフィルタリングはまだ粗く、ホストプロセッサ宛てのほとんどのパケットが含まれる可能性があることに注意してください (アプリケーションによって異なります)。ポート番号に基づくアプリケーション層フィルタは、次のレベルのフィルタ調整であり、ネットワークで受信される大部分のパケットをより細かく制御できます。

3.3.2.3 アプリケーション層/ TCP および UDP ポート番号

アプリケーション層フィルタまたは単にポートフィルタは、トランスポート層パケットの送信元または宛先ポートに基づいてパケットフィルタを実行します。これらのポート番号は、さまざまな TCP および UDP ベースのプロトコルを識別するために使用される既知の番号です。(IANA を参照)。これらは 16 ビットのポート番号です。たとえば、ポートフィルタを使用すると、ユーザーは SSH パケットのみ (ポート 22), FTP パケットのみ (ポート 20), またはサポートされている他の多くのアプリケーションでフィルタできます。多数で常に変化するポート定義のため、フィルタは使用可能なアプリケーションに対してポート番号を検証しません。

トランスポート層パケットには、送信元ポートと宛先ポートの両方があります。宛先ポートは、IANA リンクに記述されている既知のポート番号であり、一般的に最も便利です。送信元ポートは、パケットを送信するホストによって使用される短命で一時的なポート番号を示し、オンザフライで生成され、あまり知られていません。送信元ポートは事前にわかっていないため、送信元ポートフィルタの作成は困難です。このケースをカバーするために、さまざまな送信元ポートに一致するように、ポートの範囲 (開始ポートと終了ポートの間) をフィルタするようにフィルタを設計できます。TCP と UDP はどちらもポート番号を使用します。したがって、フィルタは TCP または UDP を選択するように設計できます。TCP と UDP の両方をポートでフィルタリングする必要がある場合は、2 つのフィルタを作成できます。

3.3.3 TCP キープアライブ オフロード

TCP キープアライブ パケットは、その名のとおり、2 つのホスト間で確立された TCP/IP 接続をアクティブに保つために使用されるパケットです。これは、ホストから通常 45 秒または 60 秒の周期で送信される空の TCP パケットです。相手ホストはパケットを ACK することが期待されており、事前に設定された数の TCP キープアライブパケットを ACK しない場合、接続は切れたとみなされます。

アイドルの場合、TCP 接続を確立した後、ホストは定期的にウェイクアップして TCP キープアライブ パケットを送信します。TCP 接続に他の活動 (例えば着信トラフィックなど) が検出されると、ホストはそれを処理するためにウェイクアップします。TCP キープアライブ オフロードが無効の場合に発生する TCP トランザクションを、Figure 8 に示します。トランザクションを処理するために、ホストがディープスリープから繰り返しウェイクアップしなければならないことに注目してください。

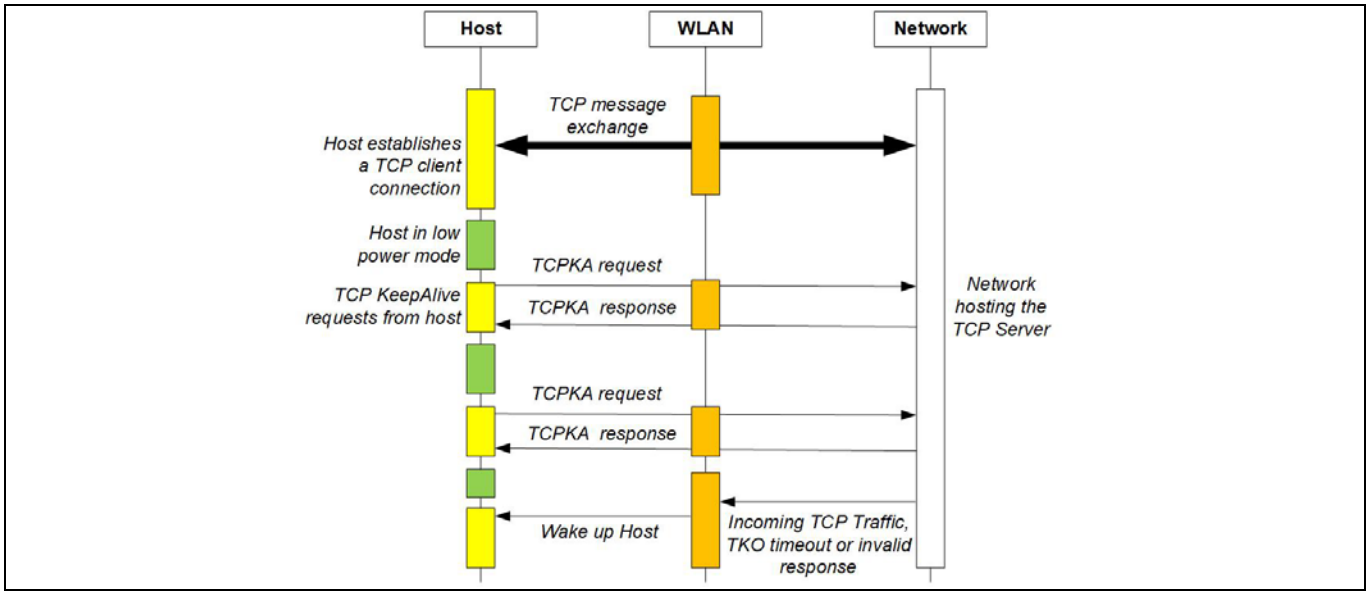

Figure 8 TCP キープアライブ オフロード無効時の TCP アクティビティ

オフロードが設定され有効になっている場合、TCP 接続が確立された後、ホスト MCU は WLAN デバイスに TCP キープアライブ パケットを送信するように設定します。その後、ホスト MCU はディープスリー

プになります。TCP キープアライブ要求を受信すると、WLAN デバイスはその応答処理を行います。TCP トラフィックの着信または TCP キープアライブのタイムアウトがあった場合、WLAN デバイスは処理のためにホストをウェイクアップします。TCP キープアライブ オフロードが設定されている場合の TCP アクティビティを、Figure 9 に示します。ホストがどのようにディープスリープ状態を長く維持し、受信した TCP トラフィックに応答するときにだけ起動することに注目してください。

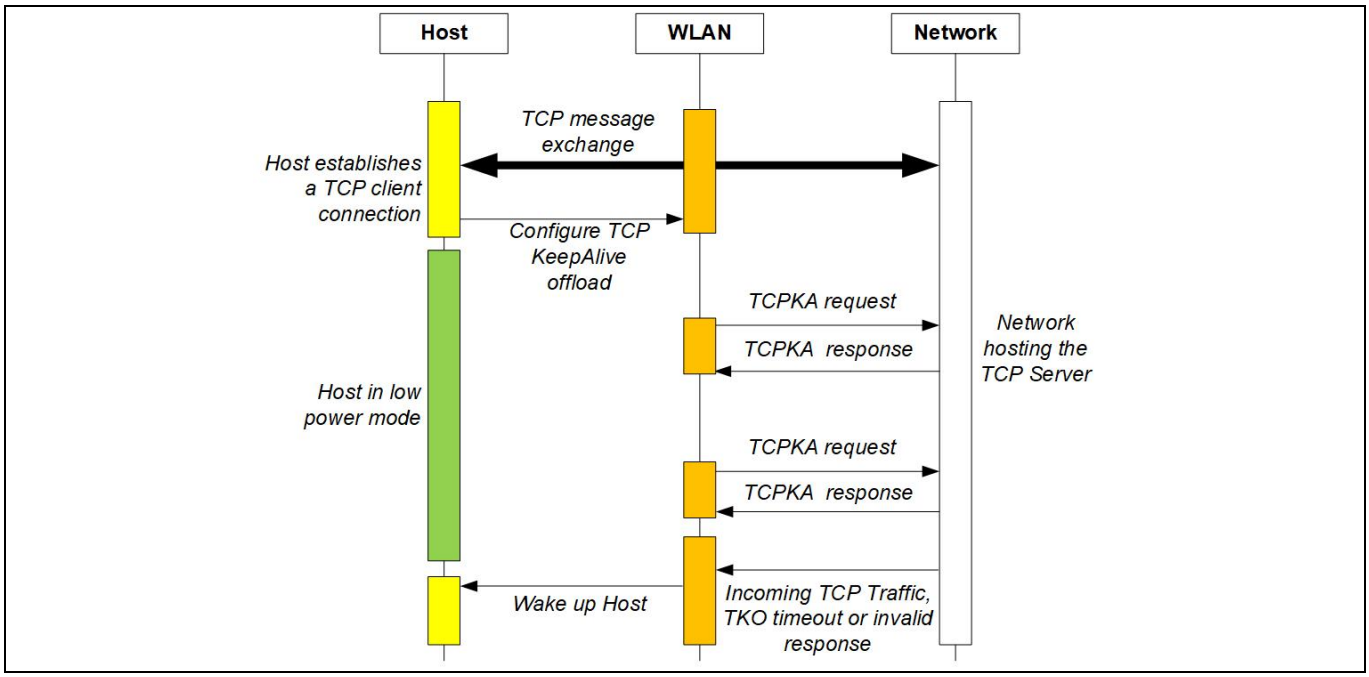

Figure 9　TCP キープアライブ オフロードが有効の時の TCP アクティビティ

4 Bluetooth®電力最適化テクニック

AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップは、Bluetooth® 5.0 BR/EDR/Bluetooth® LE ラジオをサポートしています。ここでは、電力最適化手法について説明します。

Bluetooth® LE アプリケーションの電力消費に関連する一般的な操作には、アドバタイズメントイベントと接続イベントがあります。電力消費を削減するために、アドバタイズメントイベントと接続イベントの両方に関連するさまざまなパラメーターを最適化する方法について説明します。ここでは、Bluetooth® LE の基礎知識があることを前提としています。Bluetooth® LE の基礎については、最新の Bluetooth®コア仕様の第 6 巻: コアシステムパッケージ [低エネルギーコントローラー] を参照してください。

4.1 アドバタイズメントイベント

アドバタイズメントイベントは、Bluetooth® LE ペリフェラルデバイスの機能を、イベントをリッスンする Bluetooth® LE セントラルデバイスにブロードキャストします。これらのイベントは、慎重に選択しなければ、Bluetooth®デバイスのバッテリー消費の主要な部分を占める可能性があります。ペリフェラルからの 2 つの連続するアドバタイズメントイベント間の間隔は、アドバタイズメント間隔を形成します。アドバタイズメント間隔は、固定にも、最小間隔と最大間隔の間のランダムな値にもできます。

アドバタイズメントイベント中に可能な限り低い電力を実現するには、アドバタイズメント間隔を最大化する必要があります。ただし、アドバタイズメント間隔を長くすると、セントラルデバイスでの検出時間が長くなり、セントラルに接続するための時間が長くなります。アドバタイズメント間隔は 20 ミリ秒から 10.24 秒の間でなければいけません。さらに、アドバタイズメントの間隔を最小と最大の間にすると、電力とレイテンシの間のトレードオフが改善されるだけでなく、アドバタイズメントパケットが送信される時間をランダム化することにより、ノイズの多い環境での検出確率も向上します。

Table 5 アドバタイズメント間隔の選択

アプリケーション要件	推奨されるアドバタイズメント間隔
アプリケーションは、オーディオデバイスやリアルタイムデータを送信するデバイスなど、より短い検出および接続確立期間を必要とします。	20〜100 ミリ秒
アプリケーションには積極的な接続要件はありませんが、フィットネストラッカーやスマートウォッチなどの低遅延を優先します。	100〜1000 ミリ秒
アプリケーションは待ち時間を気にせず、ビーコンなどの電力消費がより重要です。	1000〜10000 ミリ秒

アドバタイズメント間隔に加えて、アドバタイズメント中に送信されるデータの量は、アドバタイズメントイベント中の電力消費に影響します。アドバタイズメントペイロードが小さいほど、消費電力は低くなります。

Bluetooth® Configurator

Bluetooth®周辺機器には、「Bluetooth® Configurator」と呼ばれる追加のコンフィギュレーターがあります。AIROC™ Bluetooth® LE GATT データベースとアプリケーションのさまざまな Bluetooth®設定を生成するために使用されます。これらの設定は、*design.cybt* という名前のファイルに保存されます。Device Configurator とは異なり、Bluetooth® Configurator の設定とファイルはそれぞれのアプリケーションに対してローカルであることに注意してください。

Bluetooth® Configurator の使用方法の詳細については、Bluetooth® Configurator ガイドを参照してください。

4.2 接続イベント

4.2.1 接続間隔

ペリフェラル デバイスで接続が確立される時、Bluetooth® LE リンクの接続間隔はセントラル デバイスによって設定されます。ペリフェラルには、ペリフェラルからのセンサーデータがセントラルデバイスに送信される速度と一致する接続間隔が必要です。セントラルによって設定された初期接続間隔が必要なものよりも短い場合、ペリフェラルはセントラルに接続間隔を増やして現在の消費を減らすように要求する必要があります。これは、接続が確立された後、「接続パラメーター更新要求」をセントラルに送信することで実行できます。

4.2.2 スレーブ レイテンシの使用

スレーブ レイテンシは、ペリフェラルが減少した速度で接続イベント中のセントラル デバイスをリッスンすることを可能にする Bluetooth® LE 機能です。これはペリフェラル デバイスがしばらくの間に活動しておらず、セントラル デバイスにデータを送信するためにいくつかの動作の発生を待つ必要がある場合に有用です。しばらくの間に動作が検出されない場合、ペリフェラルはセントラルに接続更新要求を送信することによって、スレーブ レイテンシを使用できます。ペリフェラルは、セントラルをリッスンする接続イベントの間隔を拡張できます。これにより、Bluetooth® LE デバイスとホストをより長い時間ディープスリープモードにできます。

スレーブレイテンシを使用する主な利点は、ペリフェラルアプリケーションがアクティビティを検出すると、Bluetooth® LE デバイスをオンに切り替えて、データ転送が完了するまで元の接続間隔でセントラルをリッスンできることです。これは最初の動作の際にデータ送信のレイテンシを回避できます。

4.2.3 Bluetooth® Configurator での Bluetooth® LE パラメーター

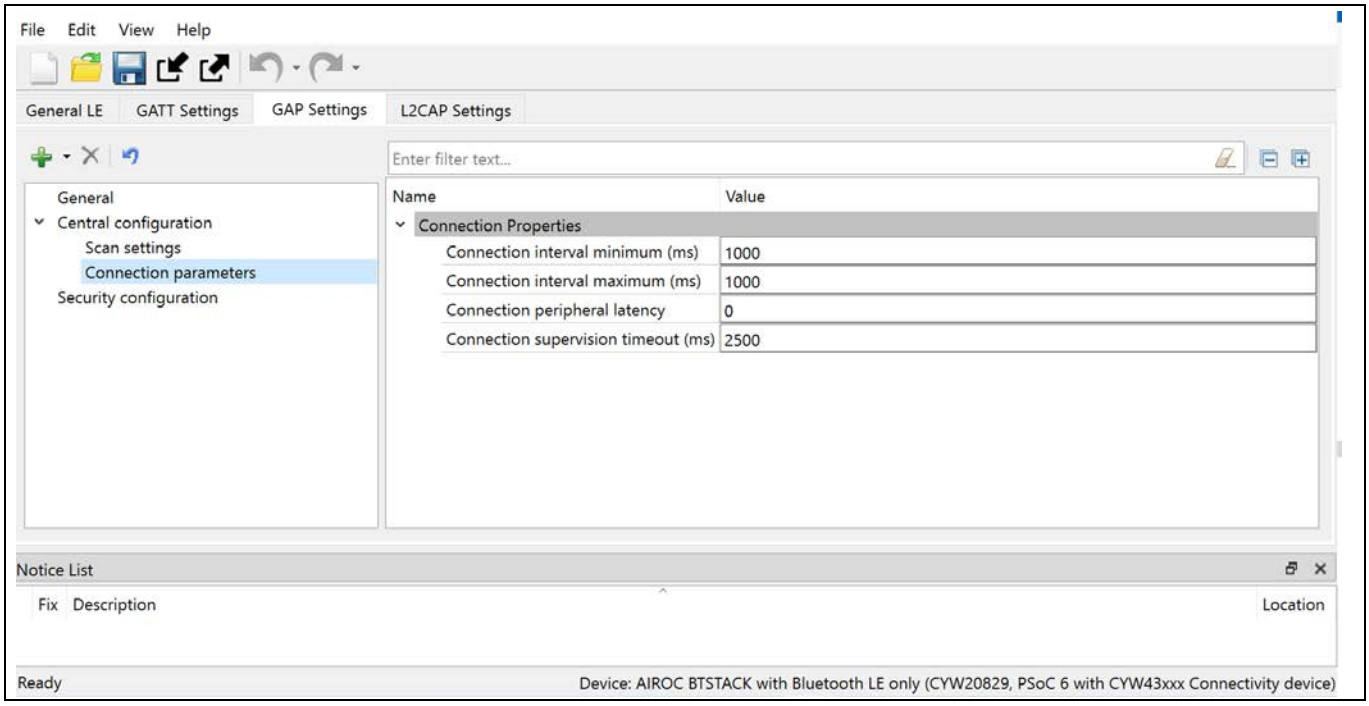

Figure 10 Bluetooth® Configurator の接続パラメーター

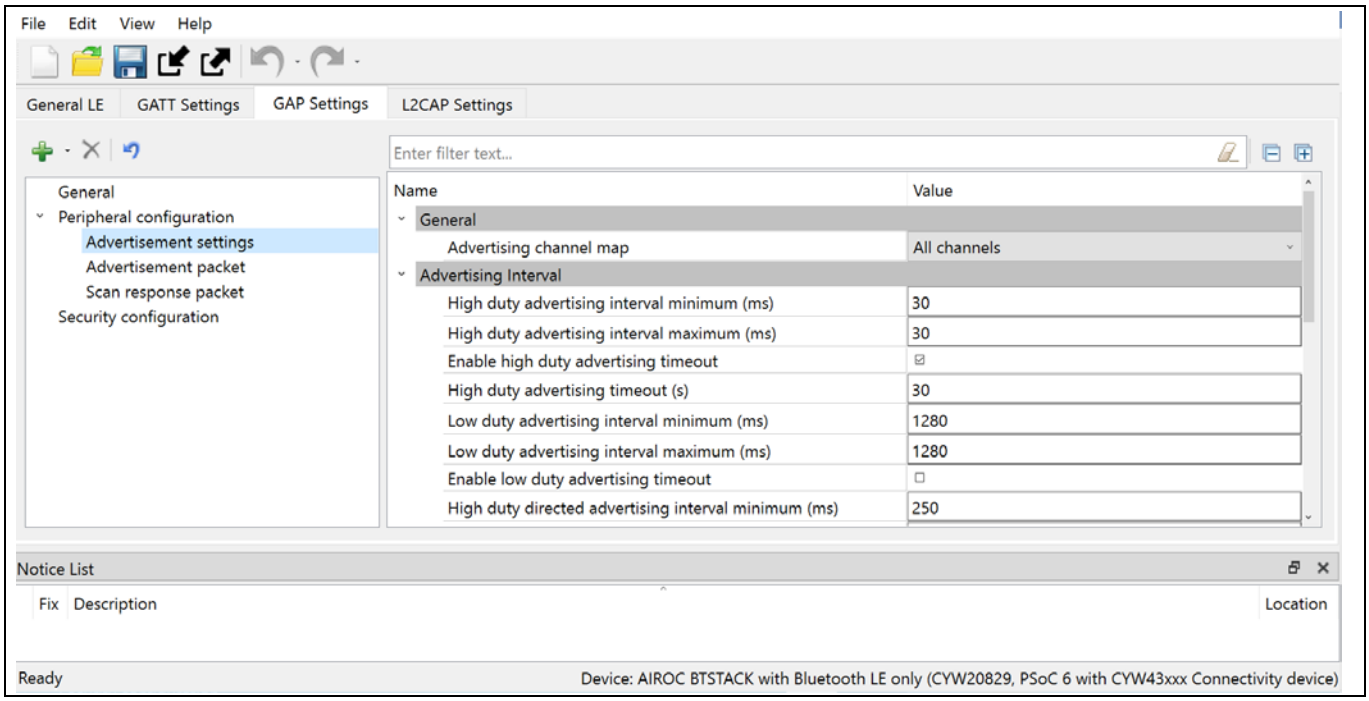

Figure 11　Bluetooth® Configurator のアドバタイズ設定

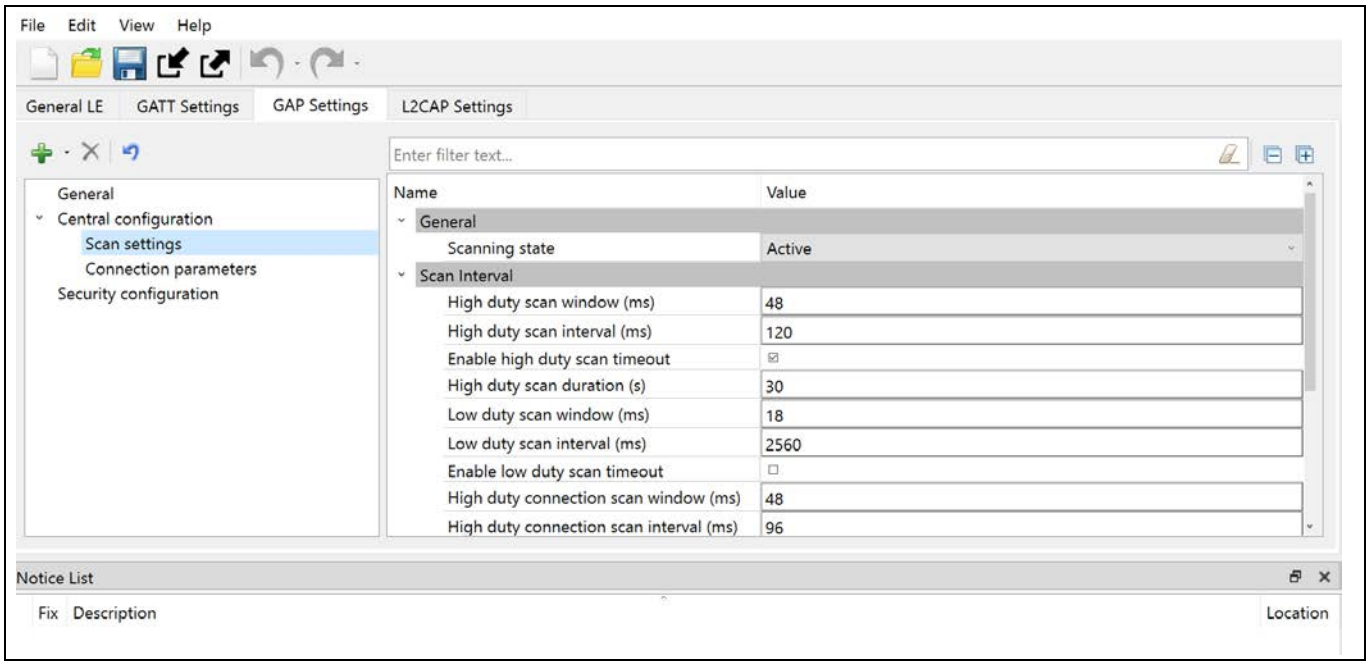

Figure 12　Bluetooth® Configurator のスキャン設定

5 PSOC™ 6 MCU 電力最適化テクニック

5.1 コア電圧と動作周波数

PSOC™ 6 MCU は、LDO または Buck の 2 つのコアレギュレータをサポートします。どちらも CPU コアへの電力供給に使用できます。さらに、システムは 2 つのアクティブな電力モード (システム LP とシステム ULP) をサポートしています。システム LP 電力モードでは、CPU 周波数は最大 150 MHz に達する可能性があります。一方、システム ULP モードでは、CPU 周波数は 50 MHz に制限されます。CPU が消費する電力は、システム ULP モードでははるかに低くなります。

デフォルトでは、LDO がコアに電力を供給し、システム LP モードです。LDO レギュレータは、LP または ULP モードに関係なく、同じ CPU クロック周波数でアクティブモード (> 50%) の Buck レギュレータより高い電力を消費します。ただし、LP モードでは、Buck レギュレータと比較して LDO レギュレータを使用すると、ディープスリープでのリークは低くなります (約 20%)。アプリケーションがアクティブモードの 0.01% (10 秒のうち 1 ms) より短い時間を費やす場合を除いて、Buck レギュレータをコアレギュレータとして使用することを推奨します。これは、Buck レギュレータを使用したディープスリープでの追加のリークが、アクティブモードでの省電力の方を上回るためです。ULP モードをアクティブ電力モードに使用する場合、ULP モードのリークはシステム ULP モードの LDO よりも低いため、常に Buck レギュレータを使用することを推奨します。

Table 6 コアレギュレータとアクティブ電力モードの選択

アプリケーションの使用例	コアレギュレータ	システムアクティブ電力モード
(CPU クロック> 50 MHz またはペリクロック> 25 MHz) および CPU のアクティブ/スリープ時間< 0.01%。 0.01%= 10 秒のうち 1 ミリ秒。	LDO	LP
(CPU クロック> 50 MHz またはペリクロック> 25 MHz) および CPU のアクティブ/スリープ時間> 0.01%。 0.01%= 10 秒のうち 1 ミリ秒。	Buck	LP
(CPU クロック< 50 MHz およびペリクロック< 25 MHz)	Buck	ULP

電力モードの詳細については AN219528 を、電力パラメーターの詳細については PSOC™ 6 MCU データシートを参照してください。

5.2 ディープスリープでのリークの削減

PSOC™ 6 MCU は、デバイスがディープスリープに入ると、32 KB のサイズの SRAM の選択的な保持をサポートします。ディープスリープで保持される SRAM の量が少ないほど、ディープスリープの消費電力は低くなります。アプリケーションで使用する予定の SRAM の量がわかっている場合は、未使用の SRAM ブロックを無効にして、ディープスリープの消費電力を改善できます。ただし、SRAM ブロックを無効にするときは、いくつかのガイドラインに留意する必要があります。

1. いくつかのプラットフォームは、未使用の SRAM をヒープに割り当てます。その結果、ヒープ (またはコード内で動的に割り当てられたオブジェクト) によって消費される SRAM の量を考慮して、使用量に追加する必要があります。
2. PSOC™ 6 MCU でサポートされるシステムコールは、デバイスに存在する SRAM 領域の最後で利用可能な 2 KB の SRAM を使用します。その結果、アプリケーションがフラッシュ書き込み/消去などのシステムコールを使用/必要とする場合、SRAM の最後のブロック (288 KB RAM を搭載した PSOC™ 6 MCU デバイスのブロック 8) を無効にできません。ただし、ディープスリープに入る前にブロックをオフにできます (システムコールはアクティブモードでのみ実行されるため)。

3. すべてのプロジェクトで、M0 +コアの SRAM 領域の最初に 8 KB (0x2000) の SRAM を予約する必要があり、これはアプリケーションの全体的な SRAM 消費量に含める必要があります。

コードで未使用の SRAM ブロックを無効にするには、次の手順を実行します。

1. アプリケーションが消費する SRAM を調べます。プラットフォームでサポートされている CPU スタック統計およびその他のメモリアナライザーツールを使用して、メモリ使用量を確認できます。
2. リンカスクリプトを更新して、RAM サイズを上記で計算された値から減らします。32 KB の倍数にし、手順 1 で計算したサイズに合わせます。この手順もコンパイラに依存します。

GCC (cy8c6xx*_cm4_dual.ld file):

```
ram                (rwx)   : ORIGIN = 0x08002000, LENGTH = 0xFD800
```

ARM (cy8c6xx*_cm4_dual.sct file):

```
#define RAM_SIZE                  0x000FD800
```

IAR (cy8c6xx*_cm4_dual.icf file):

```
define symbol __ICFEDIT_region_IRAM1_start__ = 0x08002000;
define symbol __ICFEDIT_region_IRAM1_end__   = 0x080FF7FF;
```

CLANG (cy8c6xx*_dual.mk file):

```
export RAM_SIZE_CM4       := 0x000FD800
```

3. 使用するデバイスとメモリに応じて、SRAM ブロックやコントローラーを無効にするコードを追加します。例えば、次の場合を考えます。

   a) 1 MB の SRAM を搭載した PSOC™ 6 MCU には、SRAM0 (512 KB), SRAM1 (256 KB), および SRAM2 (256 KB) の 3 つのコントローラーがあります。例えば、アプリケーションで必要な SRAM が 450 KB (= 480 KB, 32 KB の倍数) だけの場合、次のコードを使用して、SRAM1 および SRAM2 コントローラーと SRAM0 の最後のブロックを完全に無効にできます。

```
CPUSS->RAM0_PWR_MACRO_CTL[15]= 0x05FA0000; //Disable block 15 in SRAM0
CPUSS->RAM1_PWR_CTL= 0x05FA0000;//Disable SRAM1
CPUSS->RAM2_PWR_CTL= 0x05FA0000;//Disable SRAM2
```

   b) 同じアプリケーションでシステムコールを追加したい場合、SRAM2 の最後の 32KB のブロックは無効にしてはいけません。

```
CPUSS->RAM0_PWR_MACRO_CTL[15]= 0x05FA0000;
CPUSS->RAM1_PWR_CTL= 0x05FA0000;
for(int32 i = 0; i < 15; i++) //Do not disable block 15 alone.
CPUSS-> RAM0_PWR_MACRO_CTL[i]= 0x05FA0000;
```

5.3 RTOS ティックレスモード

すべての RTOS には、タスクのタイミングと管理にクロックまたは「ティック」が必要です。これらのティックは通常、小さな RTOS カーネルタスクであり、定期的にウェイクアップし、遅延, タイムアウト, およびその他のタイミング関連タスクで使用される RTOS ティックカウントを更新します。多くの場合、これらの目盛りは ms で設定されます。これにより、有用なタスクが実行されていなくても、ティックタスクを処理するために CPU が頻繁にウェイクアップします。

遅延やタイムアウトを使用しない、または大きな遅延を使用するアプリケーションは、これを頻繁にウェイクアップする必要がなく、プラットフォームが提供するティックレスモードに入ることができます。ティックレスモードでは、RTOS はティックタスクを一時停止し、CPU を長時間低電力状態 (ディープスリープ) に移行させます。この期間は通常、遅延に依存する次のタスクをトリガするのに必要な時間によって決まります。遅延に依存するタスクがない場合、外部イベント (GPIO 割込みなど) がデバイスをウェイクアップしてタスクをトリガするまで、デバイスは無期限に低電力状態を維持できます。

ティックレスモードに入るときに遅延が発生する場合、システムのディープスリープ状態でアクティブなタイマーは、遅延が経過した後に割込みを生成するように設定されます。

5.4 追加の電力最適化手法

PSOC™ 6 MCU での追加の電力最適化手法については、AN219528 を参照してください。

6 低電力アシスタント (LPA)

インフィニオンの低電力アシスタント (LPA) により、PSOC™ 6 MCU ホストおよび WLAN (Wi-Fi/Bluetooth® ラジオ) デバイスを設定して、低電力機能を提供できます。LPA の主な特長は次のとおりです。

- 設定を自動的に検出し、ユーザーからの追加の API 呼び出しなしで適切な低電力機能を有効にする自己認識ファームウェア
- FreeRTOS などの複数のプラットフォームをサポート
- 使いやすい GUI ベースの構成
- PSOC™ 6 MCU、Wi-Fi および Bluetooth®の低電力構成をサポート

LPA を使用すると、デザインのさまざまな部分を最適化してエネルギー効率を高めることができます。LPA 設定は、3 つの主要部分に分かれています。

- **PSOC™ 6 MCU (ホスト) 低電力設定:** コア電圧, レギュレータの選択, gRTOS アイドル電力モードなどの PSOC™ 6 MCU 固有の低電力設定を含みます。
- **Wi-Fi 低電力設定:** Wi-Fi ホストウェイクシグナルの選択やホストオフロード設定 (ARP およびパケットフィルタ) などの Wi-Fi 固有の低電力設定を含みます。
- **Bluetooth®低電力設定:** ホストウェイク割込み信号 (デバイスからホスト) および関連するデバイス統合などの Bluetooth®低電力設定を含みます。

これらの設定は、ModusToolbox™ソフトウェアの Device Configurator で生成するか、コードで手動で追加できます。設定が単純であることを考えると、コードを使用して設定を追加することは難しくありません。ただし、コンフィギュレーターを使用すると、生成された設定を将来簡単にアップグレードできることに加えて、GUI ベースのコンフィギュレーターを利用できます。低電力設定を作成するための推奨される方法です。

ミドルウェア, コンフィギュレーター, およびクイックスタートの詳細については、LPA のドキュメントを参照してください。以下のセクションでは、利用可能な PSOC™ 6 MCU, Wi-Fi, および Bluetooth®低電力設定の概要と、さまざまなプラットフォームでのそれらの使用法について説明します。

6.1 LPA 設定

アプリケーションで LPA を使用するためには、いくつかの設定を入力する必要があります。LPA 設定を設定するには、BSP キットに付属の design.modus デバイス設定ファイルを使用します。LPA 設定は、PSOC™ 6 MCU 関連の電力設定の場合は **design.modus** > **[PSOC™ 6 MCU device in target]** > **System** > **Power**、Wi-Fi および Bluetooth®設定の場合は **design.modus** > **[AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth® combo chip device in target]** > **Power** > **WiFi or BT** で利用できます。Figure 10 に、CY8CKIT-062S2-43012 ターゲットの PSOC™ 6 MCU および Wi-Fi LPA (電力) 設定を示します。LPA 設定の生成を有効にするためには、「Power」設定を有効にする必要があります。すべての設定の詳細については、LPA のドキュメントを参照してください。

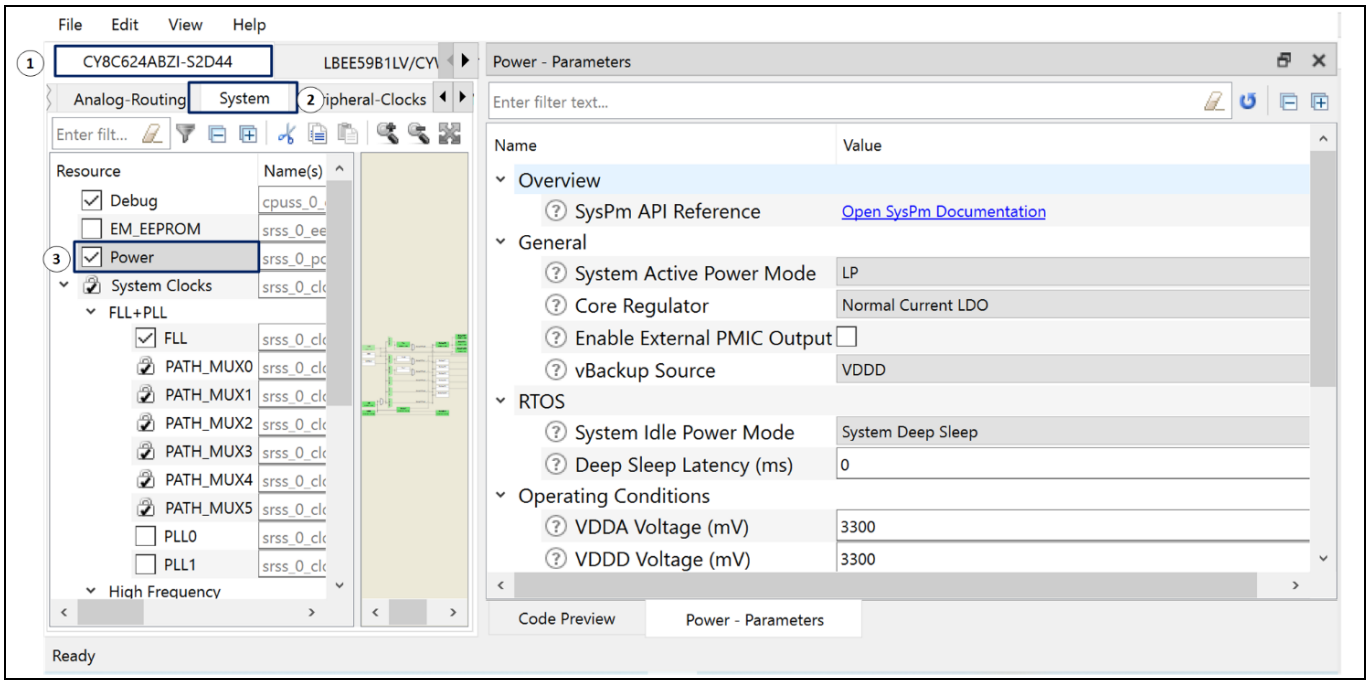

Figure 13 ***design.modus*** **での PSOC™ 6 MCU LPA 設定**

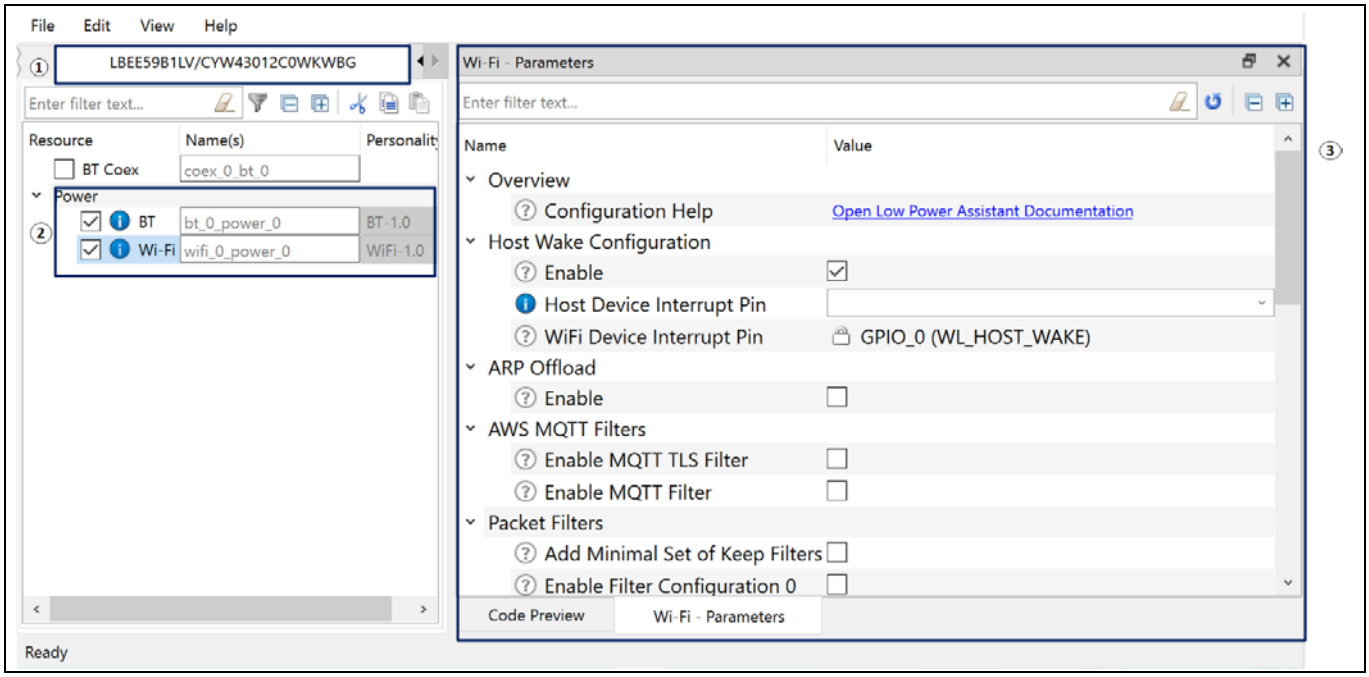

Figure 14 ***design.modus*** **での Wi-Fi/Bluetooth® LPA 設定**

Table 7 LPA 設定のガイドライン

項目	説明	推奨設定
PSOC™ 6 MCU (ホスト)		
システムアクティブ電力モード	アクティブ時にコアが動作する電力モードを選択します – LP または ULP	Table 6 を参照してください。
コアレギュレータ	コアに電力を供給するレギュレータのタイプを選択します	

項目	説明	推奨設定
システムアイドル電力モード	アイドル時にコアが動作する電力モードを選択します-アクティブ, スリープ, またはディープスリープ	ディープスリープ (最大の省電力) アクティブ (最小の待ち時間)
ディープスリープレイテンシ (ミリ秒)	ディープスリープに入る前に CPU がアイドル状態でなければいけない最小時間を選択します	0 (アイドル状態ですぐにディープスリープに入ります) ディープスリープのウェイクアップレイテンシは< 50 us であるため、デバイスがアイドル状態になり次第、ディープスリープに入ることができます。 このパラメーターを大きくするのは、アプリケーションに、2〜3 ミリ秒ごとにウェイクアップ/実行する必要があるタスクが含まれる場合のみです。
Wi-Fi		
ホストウェイク設定	WLAN デバイスがディープスリープからホストをウェイクアップする機能を有効にします	有効 (チェックボックスをチェック)
ホストデバイス割り込みピン	WLAN デバイスからのホストウェイク信号として構成するピンをホストから選択します	最初に、WL_HOST_WAKE に接続されている PSOC™ 6 MCU のピンを設定します (ボード回路図を参照)。ピン設定には、ドライブモードを **Digital Hi-Z** に設定し、割込みトリガタイプを **Falling Edge** に設定することが含まれます。割込みトリガタイプは、CYW43012 からの WL_HOST_WAKE 信号の極性を選択します。立ち下りは「Active LOW」設定を選択し、立ち上りは「Active HIGH」設定を選択します。 例えば、CY8CKIT-062S2-43012 では、P4[1]が AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ デバイスの WL_HOST_WAKE に接続されています。したがって、ピンを有効にして、ドライブモードを **Digital Hi-Z** に設定し、割込みトリガタイプを **Falling Edge** に設定して、ドロップダウンから選択します。
ARP オフロード	ARP オフロード機能を有効にします	有効
ARP オフロード機能	ARP オフロードの機能を選択します	Peer Auto Reply でほとんどのユースケースに対応
トラフィックからのスヌープホスト IP	AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ デバイスがホスト ARP 応答からの ARP 情報をスヌープするかどうかを選択します	有効

項目	説明	推奨設定
パケットフィルタ	複数のパケットフィルタを設定する	アプリケーションによって異なります。パケットフィルタ オフロードを参照してください。 「保持」フィルタを使用する場合は、**Add Minimal Set of Keep Filters** オプションを有効にします。
Bluetooth®		
有効	低電力の Bluetooth®操作を可能にします	有効
ホスト ウェイクアップ設定	Bluetooth®デバイスからのウェイクアップ信号として設定するピンをホストから選択します。	ボードに依存し、WiFi の「ホストデバイス割込みピン」設定に似ています。
デバイス ウェイクアップ設定	Bluetooth®デバイスへのウェイクアップ信号として設定するピンをホストから選択します。	

6.2 ModusToolbox™ソフトウェアでの LPA の使用

Wi-Fi または Bluetooth® ModusToolbox™ソフトウェアのサンプル コードに低電力アシスタントを含めるために、Library manager を開き、低電力アシスタントミドルウェアを追加してください。Library manager は、低消費電力アシスタントミドルウェアが必要とする依存関係を取得します。

例で使用されているターゲットの *design.modus* を開くには、次の手順を実行します。

1. [Install directory]/ModusToolbox/tools_version/device-configurator/device-configurator.exe を開きます。
2. Device configurator で、File > Open を選択します。
3. 次のフォルダ例内にあるターゲットの design.modus ファイルに移動します。
4. [Example_directory]/bsps /TARGET_[CY_BOARD]/config/design.modus
4. Figure 15 に示すようなエラーメッセージが表示された場合は、[OK]をクリックし、以下の指示に従ってください。
   a) ModusToolbox™ 3.0 以前の設計:
   [Example_directory]/../mtb_shared/mtb-pdl-cat1/[release_version]/ に移動し、devicesupport.xml ファイルを選択します。
   b) ModusToolbox™ 3.0 以降の設計:
   [Example_directory]/../mtb_shared/mtb-pdl-cat1/release-version/props.json に移動します。
   [Users_directory]/../.modustoolbox/global/device-db/release-version/props.json に移動します。

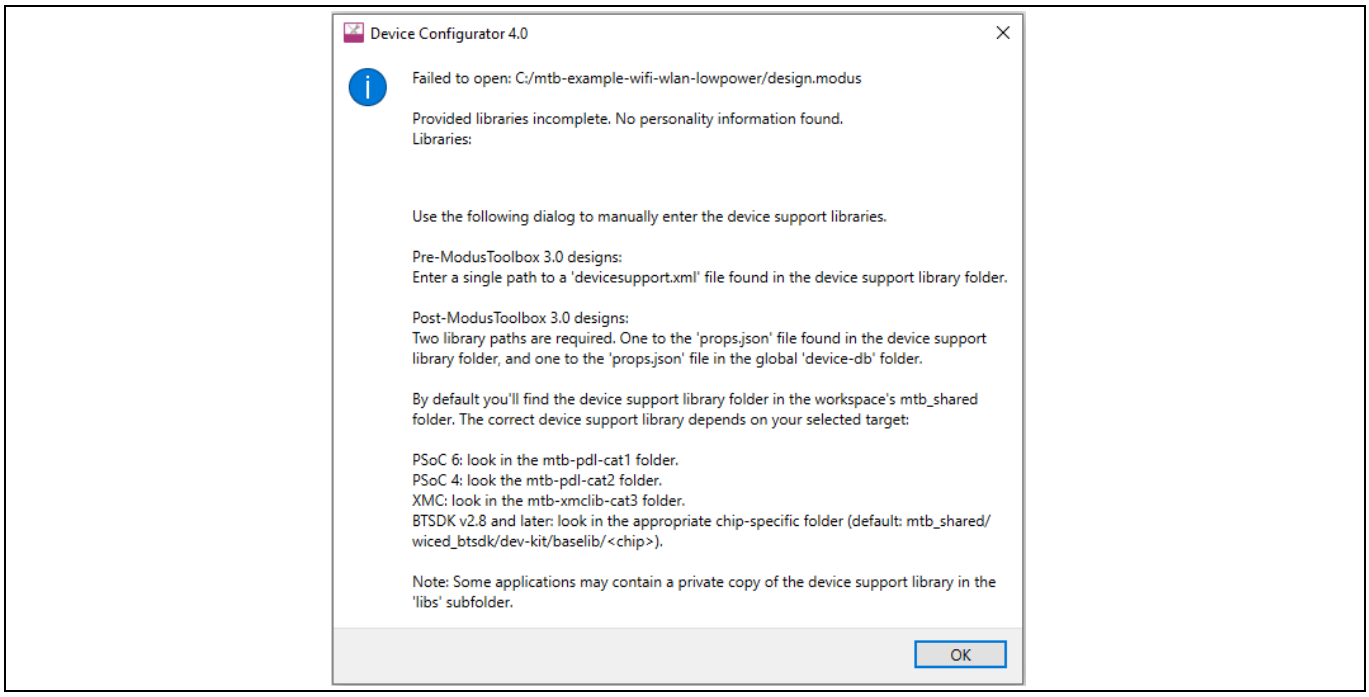

Figure 15　「デバイスサポートライブラリ」パスが見つからないエラー

5. 必要に応じて、既存の *design.modus* ファイルをバックアップします。LPA configuration で説明されているように、*design.modus* を開き、LPA を設定します。例えば、GitHub で利用可能な MQTT クライアントの例で低電力を有効にするには、提供されている設定を使用できます。

Table 8　LPA 設定の例

パラメーター	設定	備考
PSOC™ 6 MCU (ホスト)		
システムアクティブ電力モード	LP	Wi-Fi アプリケーションには 50 MHz 以上の M0+が必要
コアレギュレータ	降圧	CPU は Wi-Fi アクティビティを処理するために頻繁にウェイクアップします (> 0.1%)
システムアイドル電力モード	ディープスリープ	アイドル時の消費電力を最小化
ディープスリープレイテンシ (ミリ秒)	0	アイドル状態ですぐにディープスリープに入ります
Wi-Fi		
ホストウェイク設定	有効	低電力に必要
ホストデバイス割込みピン	< P4.1 (CY8CKIT_062S2_43012 の場合) >	-
ARP オフロード	有効	ホストへの ARP 要求の数を減らし、電力消費を改善します
ARP オフロード機能	Peer Auto Reply	
トラフィックからのスヌープホスト IP	有効	

パラメーター	設定	備考
パケットフィルタ	**Add Minimal Set of Keep Filters** オプションを有効にする	デバイスが Wi-Fi AP に接続して IP アドレスを取得できることを確認します
	MQTT TLS filter を有効にする **MQTT filter** を有効にする その他の設定 - アクション: **保持** プロトコル: **TCP** 方向: **送信元ポート**	すべての MQTT パケットがホストに到達するようにします。AP への接続後、ホストは MQTT パケットのみを受信します。

6. PSOC™ 6 MCU の CAPSENSE™, シリアル通信ブロック (SCB), およびクワッド シリアル メモリ インタフェースなどのペリフェラルを、例で使用されていないのに有効の場合、無効にしてください。

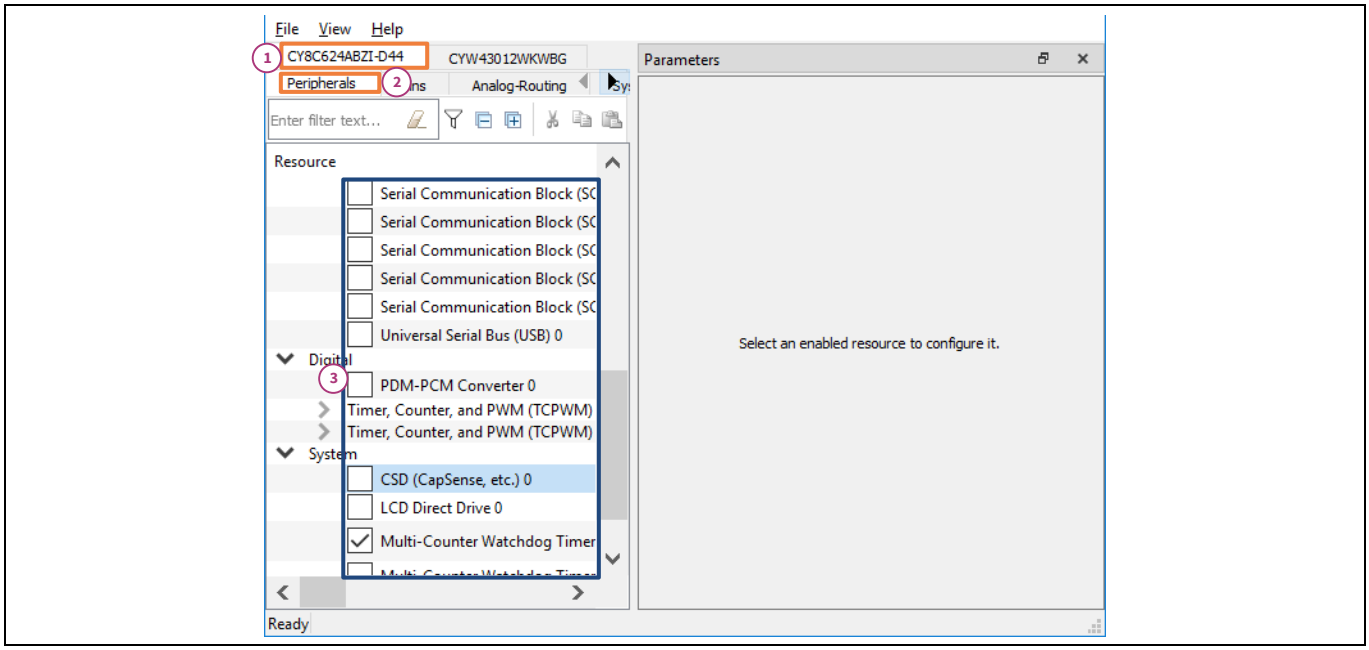

Figure 16 *design.modus* でペリフェラルを無効にする

7. システムクロック設定を確認し、未使用のクロックパスと PLL を無効にします。例えば、CY8CKIT-062S2-43012 *design.modus* では、USB を使用しない場合、PLL1 を無効にできます。さらに電力を節約するために、PLL0 を無効にして、FLL を CLK_HF0 (CPU クロック) にルーティングできます。

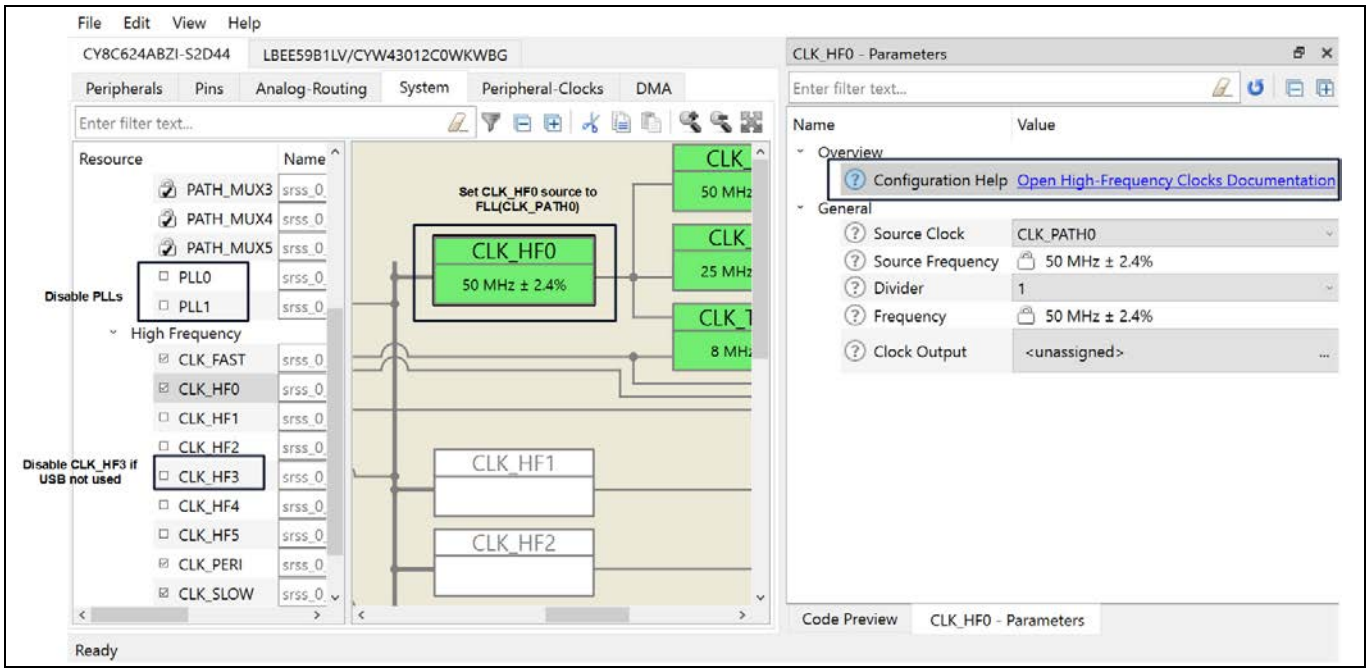

Figure 17　低電力用の CY8CKIT-062S2-43012 クロックセットアップ

8. **File** > **Save** を選択して設定を保存してください。
9. ModusToolbox™ソフトウェア用の Eclipse IDE からサンプルをビルドし、プログラミングしてください。

ModusToolbox™ソフトウェアで利用可能な LPA 例のリストを、Table 9 に示します。

Table 9　LPA の ModusToolbox™ソフトウェアの例

例	説明	LPA 機能
mtb-example-wlan-lowpower	WLAN 低電力モードとホストネットワーク一時停止機能を示す簡単な例	Wi-Fi ウェイクホスト信号
mtb-example-wlan-offloads	このサンプルコードは、アドレス解決プロトコル (ARP) オフロード, パケット フィルタ オフロード, TCP キープアライブ オフロード機能などのさまざまな WLAN オフロードを示します	Wi-Fi ウェイクホスト信号、TCP キープアライブ オフロード

7 CY8CKIT-062S2-43012 を使用した電力測定

7.1 ハードウェアのセットアップ

電力測定には、Keysight の N6705B などのパワー アナライザーを使用します。これにより、電力の推移に関する洞察が得られ、オフロードを使用して達成される電力節約をより正確に見積もれます。パワー アナライザーを利用できない場合は、シンプルな 6½桁マルチメーターを使用して、PSOC™ 6 MCU および WLAN 平均電力を個別に監視します。Figure 18 に、CY8CKIT-062S2-43012 キットで利用可能なさまざまな電力測定ジャンパーを示します。

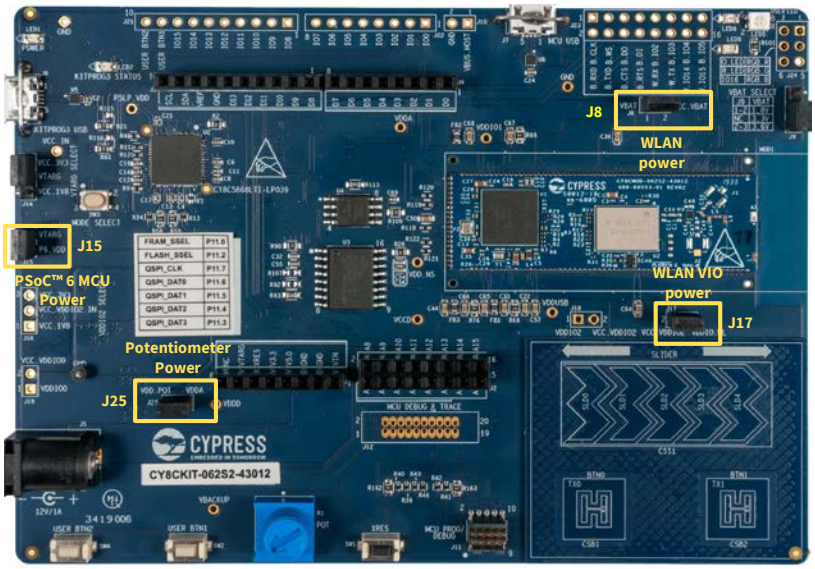

Figure 18 CY8CKIT-062S2-43012 の電力測定ジャンパー

CY8CKIT-062S2-43012 で電力測定を行うには、以下を実行します。

1. VTARG と P6.VDD にまたがる J15 で、PSOC™ 6 の電流を測定してください。
2. J25 が取り外されていることを確認してください。これにより、ポテンショメータ R1 を介した VDDA からのリーク電流が排除されます。
3. VBAT と VCC.VBAT にまたがる J8 で、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ VBAT の電流を測定してください。
4. VDDIO.WL と VCC.VDDIO2 にまたがる J17 で、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ VDDIO の電流を測定してください。
5. Keysight の N6705B パワーアナライザーを使用した設定例については、Figure 19 を参照してください。PSOC™ 6 MCU (VTARG) と AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ (VBAT) の電圧は、セットアップに示されているものと同じであることを確認してください。このセットアップでは AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ VDDIO を測定しません。これは、通常変動し、SDIO ラインのアクティビティに依存し、アクティブな電力測定中の影響が最小限であるためです。

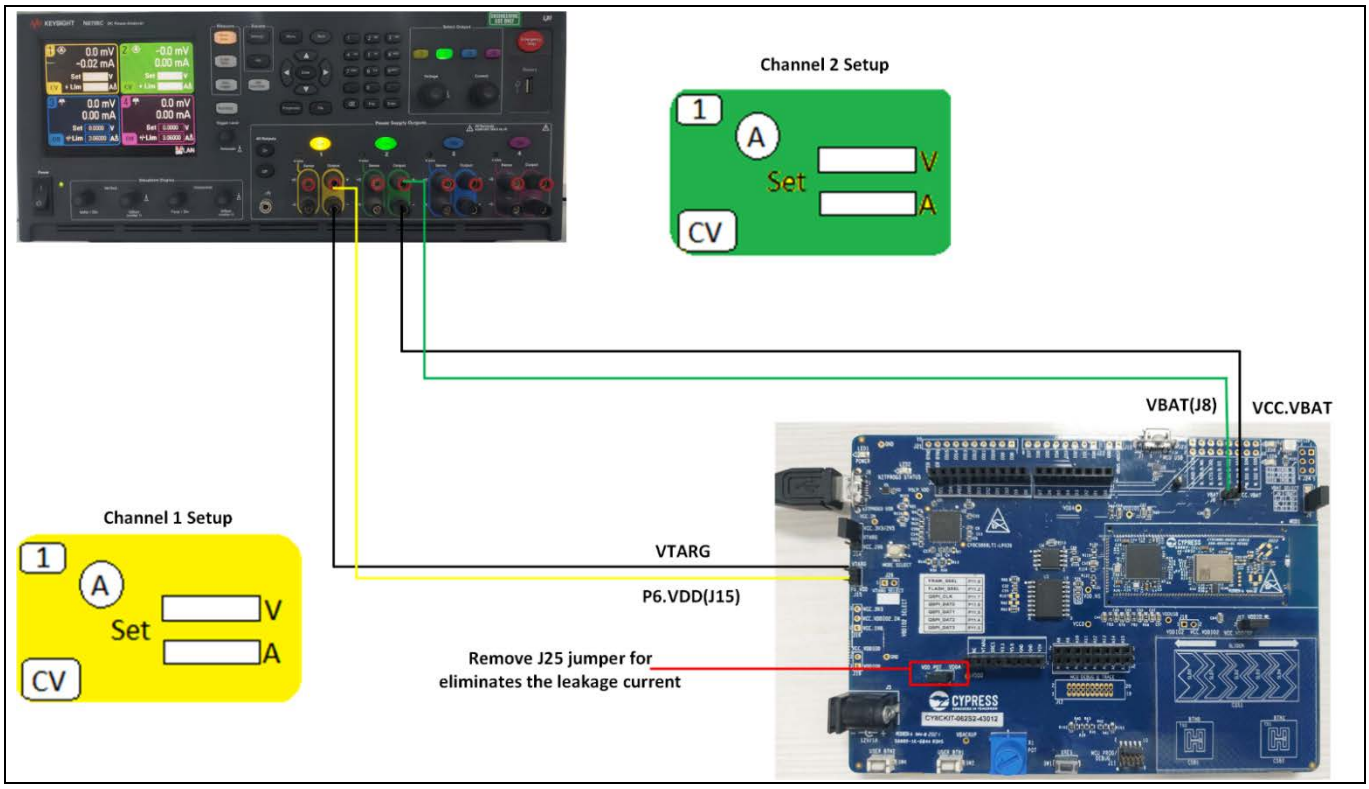

Figure 19　Keysight の N6705B パワーアナライザーを使用した電力測定のセットアップ

7.2　mtb-example-wifi-wlan-lowpower

ここでは、mtb-example-wifi-wlan-lowpower サンプルコードを使用して、CY8CKIT-062S2-43012 での電力測定の詳細を説明します。この例は、データシートに記載されている AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップの消費電力を測定するために使用できます。

デフォルトでは、サンプルは AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップをポーリングなしでの省電力 (PS-non-Poll) モードに設定してスループットを向上させ、ネットワークスタックを一時停止して、ネットワークでアクティビティが検出されないかぎり、PSOC™ 6 MCU がディープスリープ状態を維持するようにします。アクセスポイントの名前/パスワードの設定、およびサンプルコードをキットにプログラミングする方法の詳細については、サンプル Web ページに従ってください。

1. ハードウェアのセットアップで説明されているように、CY8CKIT-062S2-43012 キットをセットアップしてください。ここでは、電力を測定するためのリファレンス設定として Keysight の N6705B を使用していることに注意してください。
2. チャネルをオンにして、Keysight の N6705B パワーアナライザーから PSOC™ 6 MCU および AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップに電力を供給してください。オンボードの KitProg を接続して、COM ポート経由でターミナルソフトウェアのログを表示できます。
3. 設定した Wi-Fi AP が範囲内にあり、デバイスがそれに接続していることを確認してください (Figure 20)。

```
==========================================================
CE230106 - WLAN Lowpower
==========================================================

WLAN MAC Address : C0:EE:40:80:26:CA
WLAN Firmware    : wl0: Jun 17 2021 01:06:37 version 13.10.246.254 (1c95bab CY) FWID 01-b69f0903
WLAN CLM         : API: 12.2 Data: Laird.LWB5+Diversity1.35.0 Compiler: 1.35.0 ClmImport: 1.39.1 Customization: v1 20/09/02 Creation: 2020-09-02 08:41:20
WHD VERSION      : v2.0.0 : v2.0.0 : GCC 9.3 : 2021-09-03 13:30:24 +0800
Offloads not configured
Info: Connecting to AP
Info: Successfully connected to Wi-Fi network 'Rohith's Galaxy M31s'.
Info: Assigned IP address = 192.168.34.94
Info: Beacon period = 100, DTIM period = 2

Network Stack Suspended, MCU will enter DeepSleep power mode
Resuming Network Stack, Network stack was suspended for 4925ms

==================================================
WHD Stats..
tx_total:61, rx_total:63, tx_no_mem:0, rx_no_mem:0
tx_fail:0, no_credit:0, flow_control:0
Bus Stats..
cmd52:3045, cmd53_read:320, cmd53_write:692
cmd52_fail:0, cmd53_read_fail:0, cmd53_write_fail:0
oob_intrs:62, sdio_intrs:127, error_intrs:0, read_aborts:0
==================================================
Network is active. Resuming network stack
```

Figure 20　AP に接続し、ネットワーク スタックを一時停止する

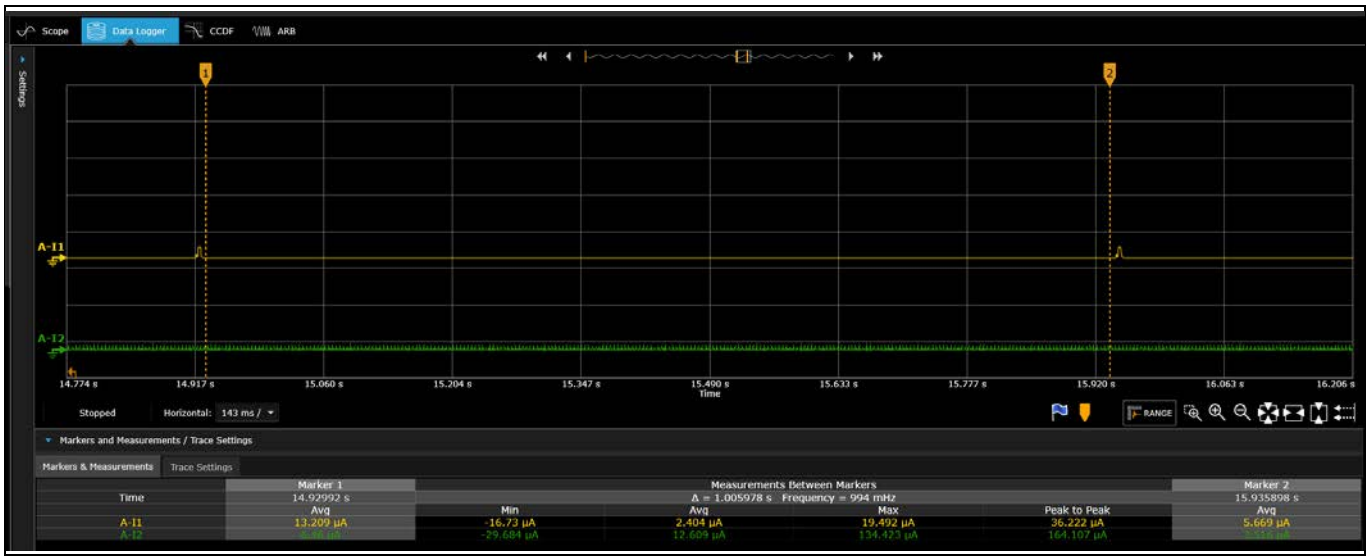

Figure 21　ディープスリープ電流の測定値

4. P6.VDD および VBAT で消費電力を監視します。Figure 22 に、ボードの初期化と AP との関連付け後の PSOC™ 6 MCU (P6.VDD) と AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップ (VBAT) の両方の消費電力を示します。黄色のパルスは AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth® コンボ チップの電流を表し、緑色のパルスは PSOC™ 6 MCU の電流を表します。AP は、ビーコン間隔が 100 ミリ秒で DTIM = 1、およびビーコン間隔が 100 ミリ秒で DTIM = 2 に設定されています。
   平均消費電力は DTIM 間隔によって異なることに注意してください。これは、他の Wi-Fi ネットワーク、Bluetooth® (2.4 GHz)、Long-Term Evolution (2.4 GHz の LTE) 干渉など、Wi-Fi スペクトル (2.4 GHz または 5 GHz) 内の他のアクティビティによって、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth® コンボ チップが AP からの DTIM パケットをリッスンする時間が長くなるためです。このタイプのアクティビティによって平均消費電力が増加します。データシートの数値を取得するには、干渉を避けるためにシールドされた環境で電力を測定してください。

Note:　Figure 22 は、シールドされていないテストセットアップで行われた測定を示しています。理想的なテスト条件 (シールド環境) での電力測定については、データシートを参照してください。

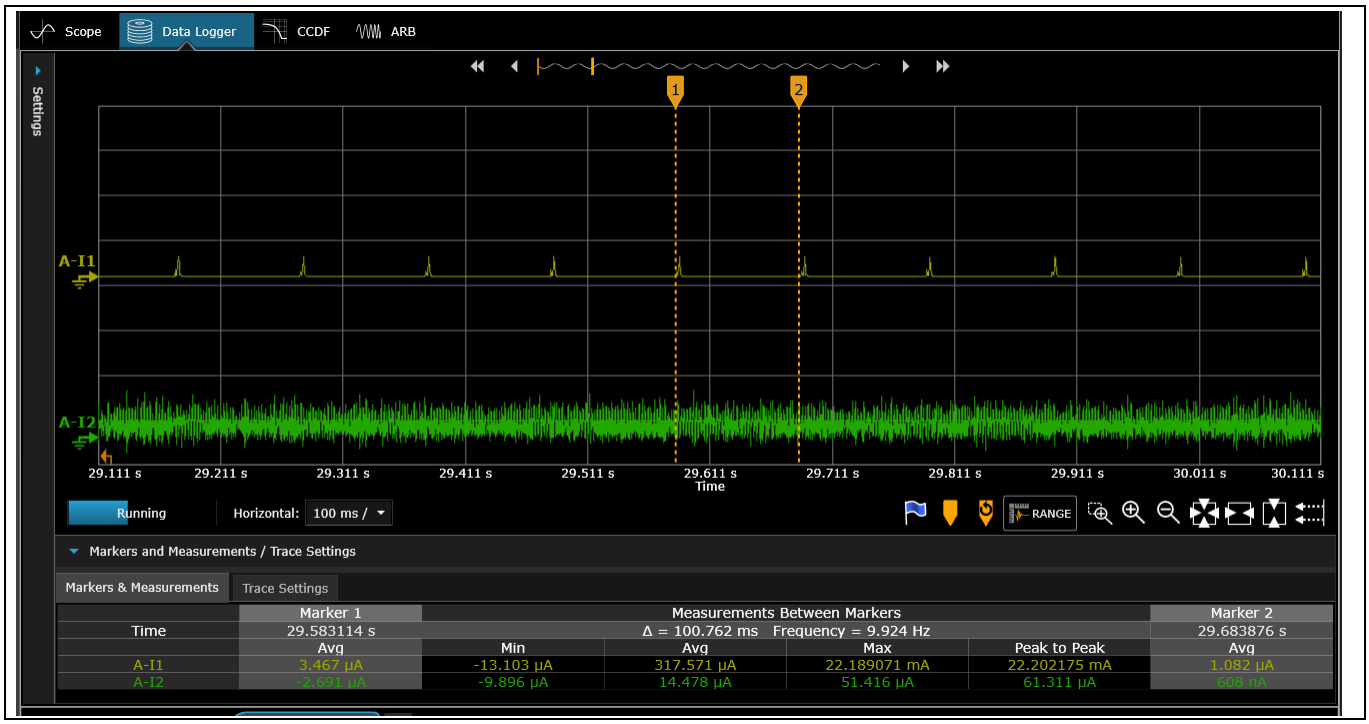

Figure 22　CY8CKIT-062S-43012 消費電力 (Associated、DTIM = 1, 2.4 GHz)

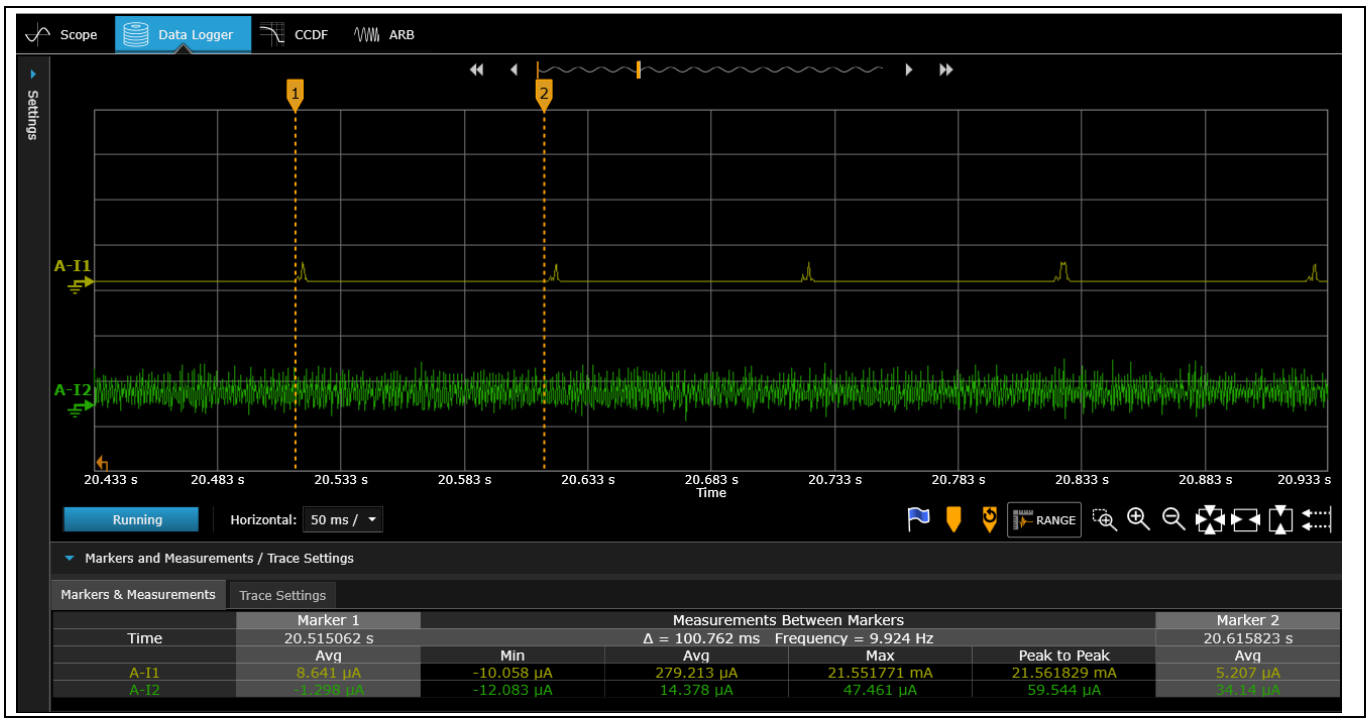

Figure 23　CY8CKIT-062S-43012 の消費電力 (Associated、DTIM = 1, 5 GHz)

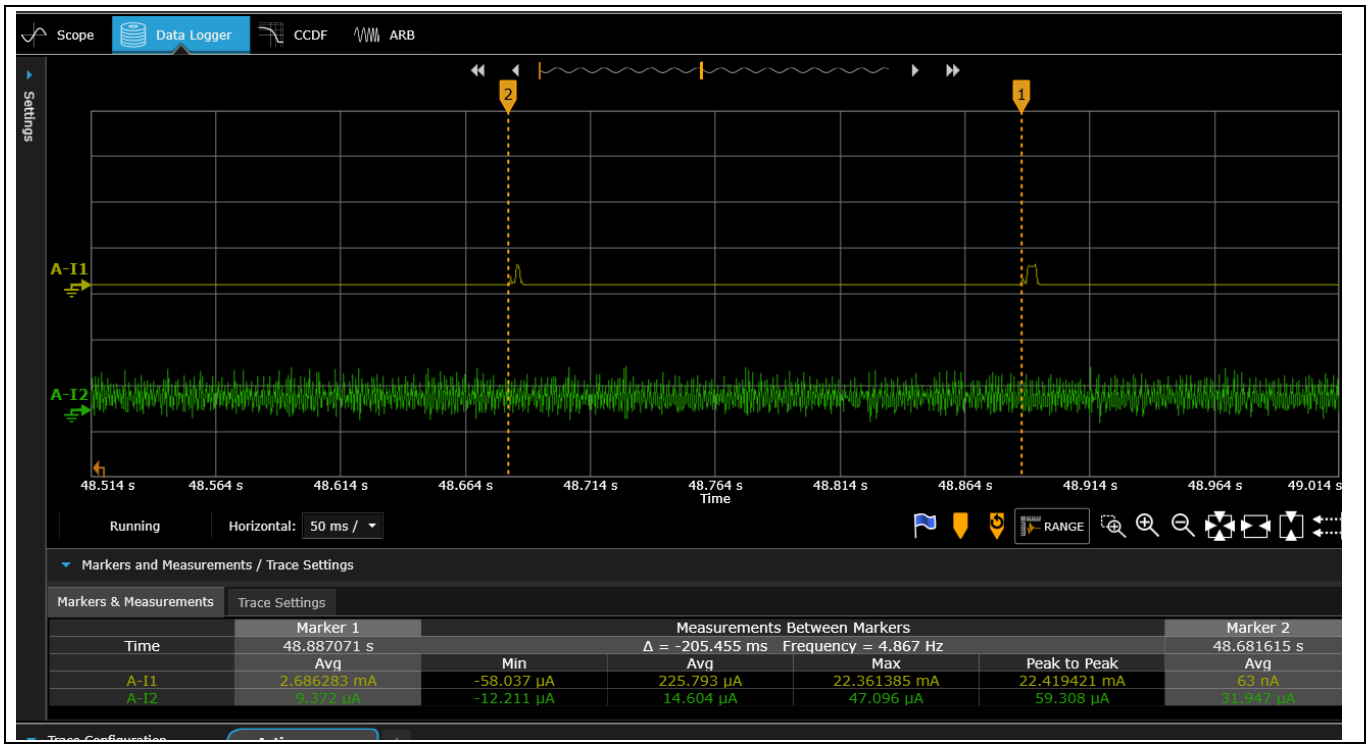

Figure 24　CY8CKIT-062S-43012 の消費電力 (Associated、DTIM = 2, 2.4 GHz)

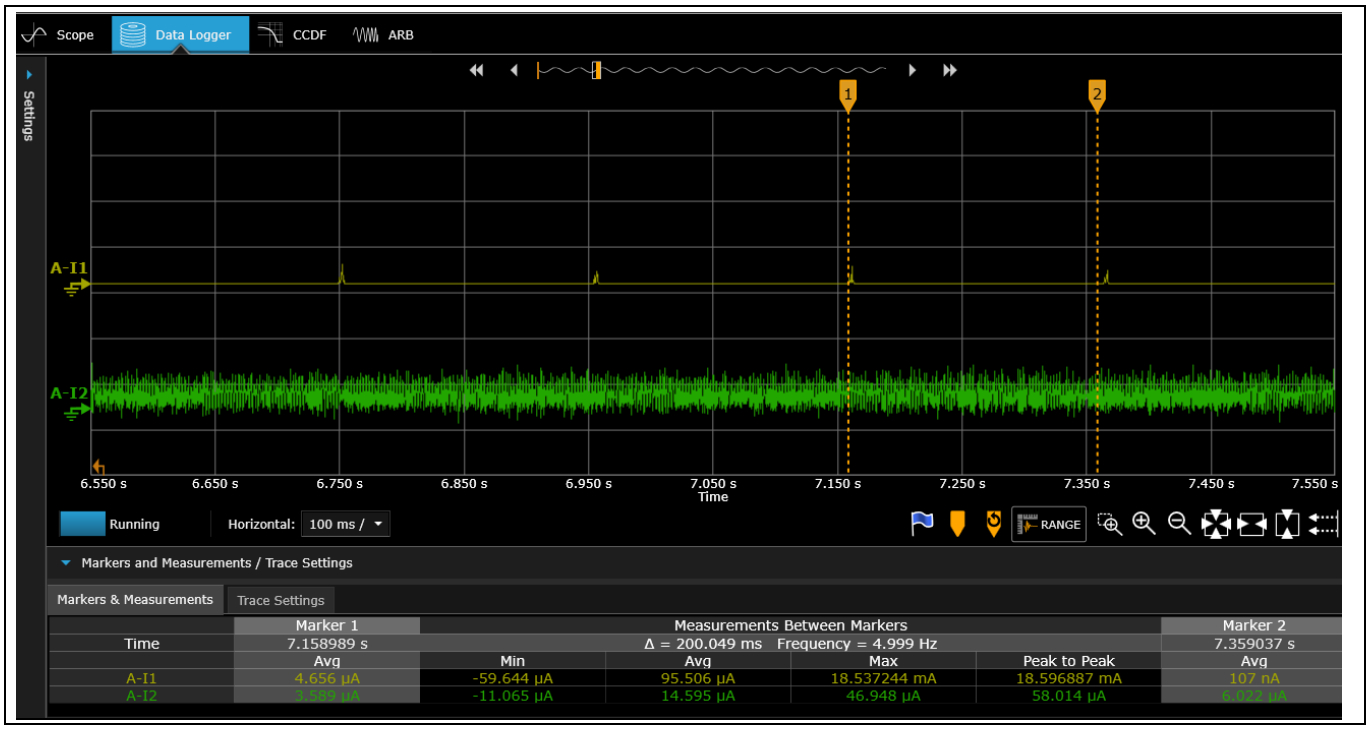

Figure 25　CY8CKIT-062S-43012 の消費電力 (Associated、DTIM = 2, 5 GHz)

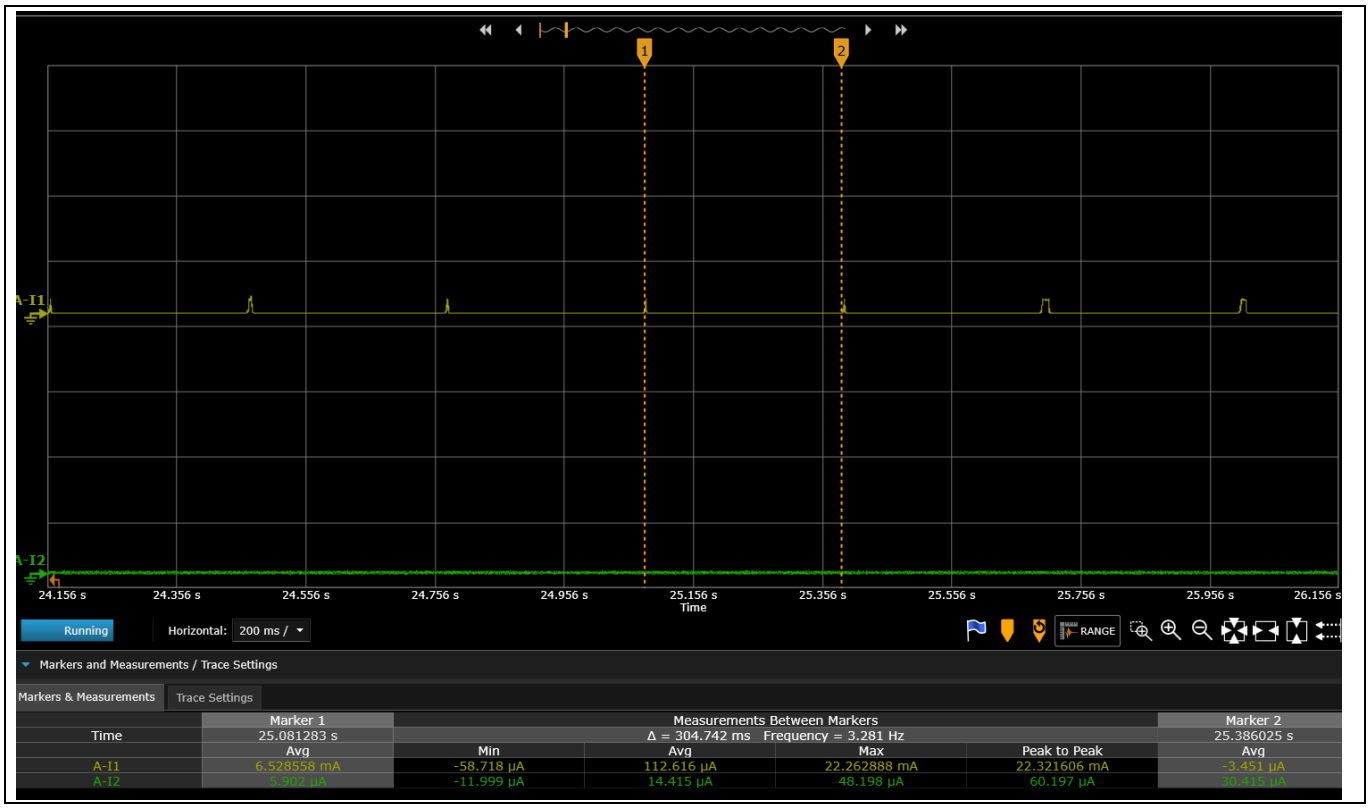

Figure 26　CY8CKIT-062S-43012 の消費電力 (Associated、DTIM = 3, 2.4 GHz)

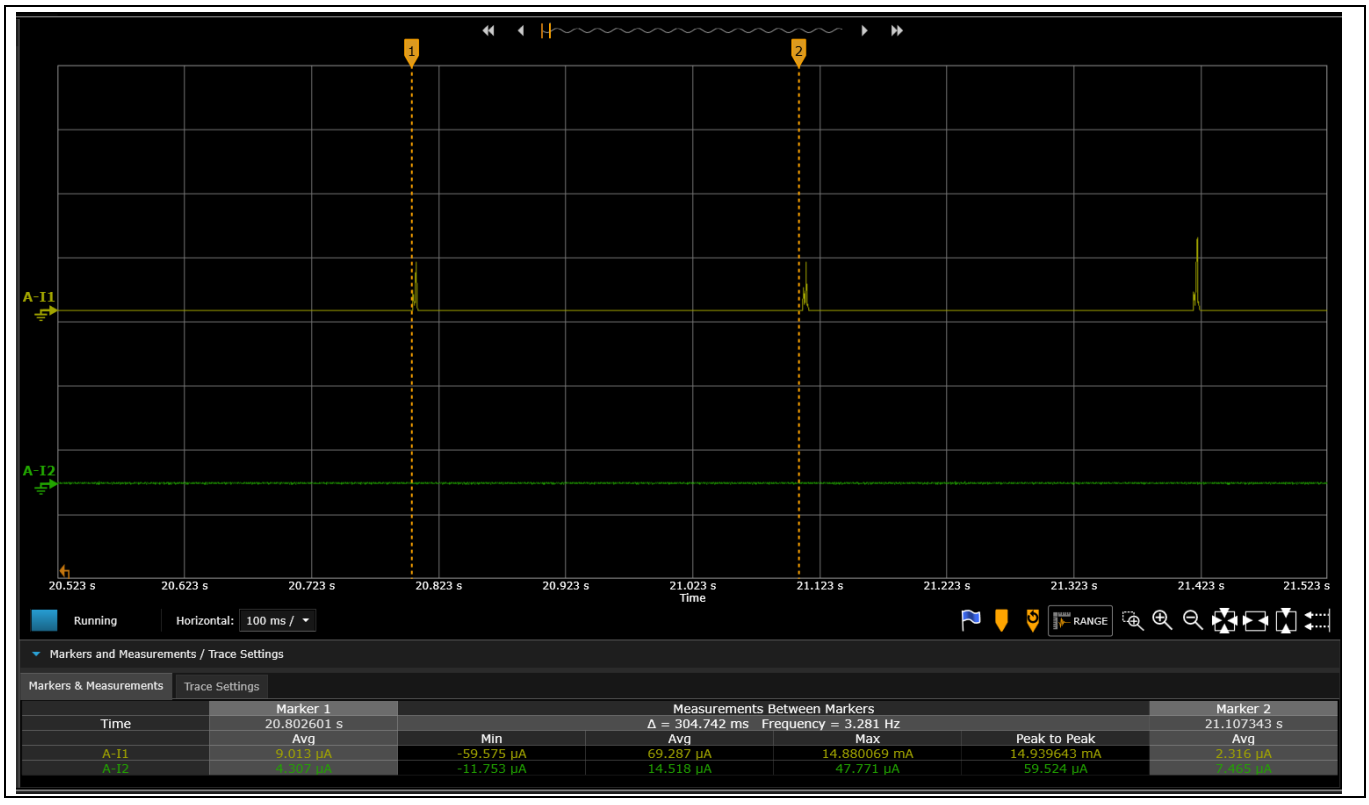

Figure 27　CY8CKIT-062S-43012 の消費電力 (Associated、DTIM = 3, 5 GHz)

5. コマンドプロンプトを開き、シリアル ターミナルに表示されている IP アドレスに ping を実行してください: **`ping <IP address>`**。ネットワークスタックが再開されます。デバイスは、端末上にディープスリープと Wi-Fi SDIO バスの統計を表示します。ネットワークスタックを再開すると LED が切り替わり、その後ネットワークアクティビティが検出されるまでネットワークスタックは再び一時停止されます。

ホスト MCU はあらゆるネットワークアクティビティで起動しますが、必ずしも PC からの ping が原因であるとは限りません。ネットワークアクティビティの原因は、AP によって発行されたブロードキャストパケットまたはマルチキャストパケットである可能性があります。パケットフィルタリングなどのオフロード機能を使用すると、さらに電力を節約できます。これにより、ホスト MCU がディープスリープになる時間を増やせます。

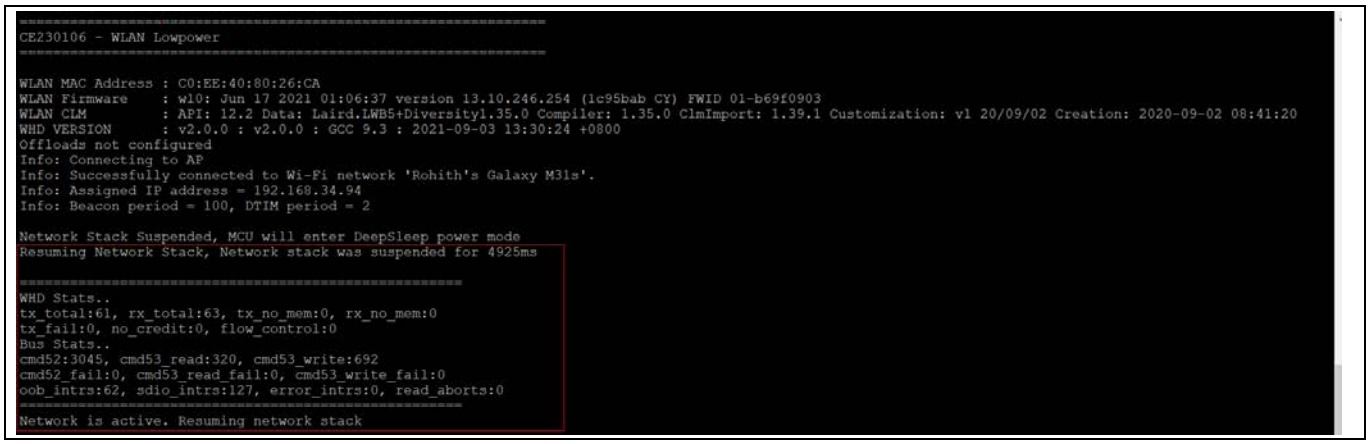

Figure 28　ネットワークスタックの再開

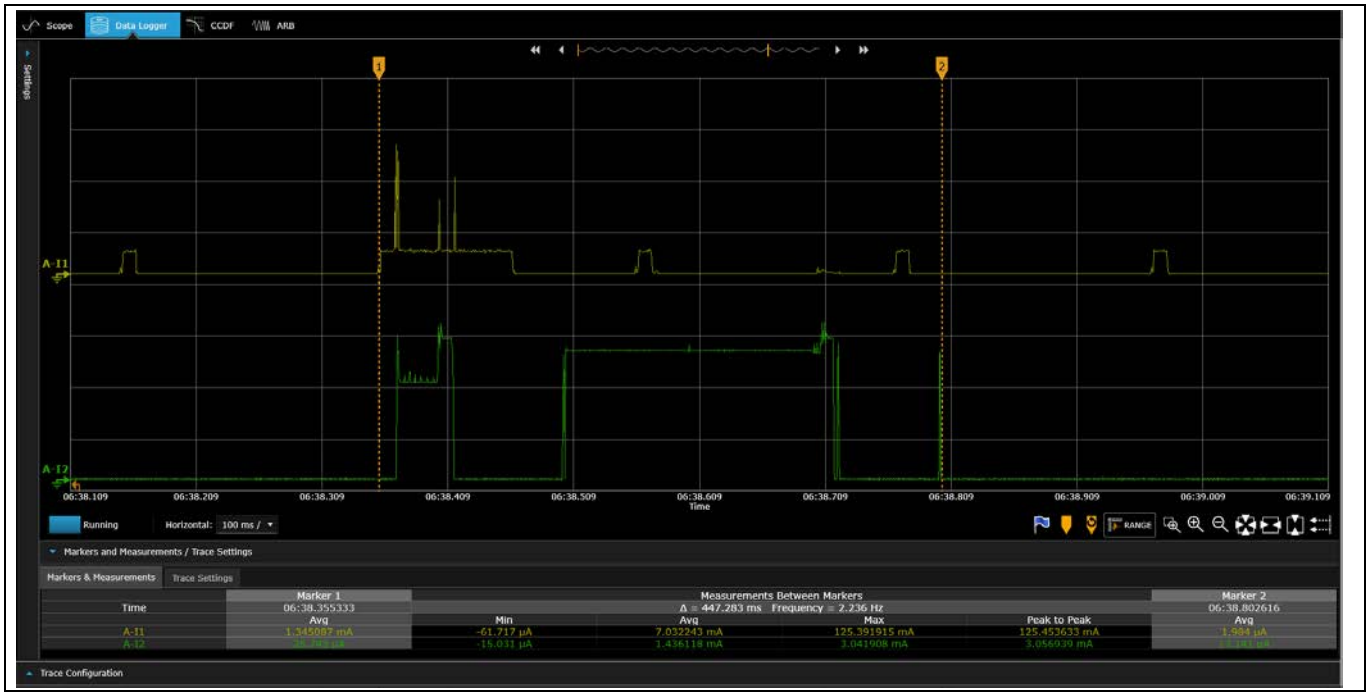

Figure 29　ping アクティビティ中の CY8CKIT-062S-43012 の電力消費

Table 10 mtb-example-wifi-wlan-lowpower の標準的な電流値

状態	デバイス	電流
ディープスリープ	PSOC™ 6 MCU	12.6 µA
	CYW43012 (VBAT)	2.4 µA
この AP 設定 (2.4 GHz) のビーコン間隔が 100、AP DTIM が 1 の平均電流	PSOC™ 6 MCU	14 µA
	CYW43012 (VBAT)	317.5 µA
この AP 設定 (2.4 GHz) のビーコン間隔が 100、AP DTIM が 2 の平均電流	PSOC™ 6 MCU	14 µA
	CYW43012 (VBAT)	225.7 µA
この AP 設定 (2.4 GHz) のビーコン間隔が 100、AP DTIM が 3 の平均電流	PSOC™ 6 MCU	14 µA
	CYW43012 (VBAT)	112.6 µA
この AP 設定 (5 GHz) のビーコン間隔が 100、AP DTIM が 1 の平均電流	PSOC™ 6 MCU	14 µA
	CYW43012 (VBAT)	279.2 µA
この AP 設定 (5 GHz) のビーコン間隔が 100、AP DTIM が 2 の平均電流	PSOC™ 6 MCU	14 µA
	CYW43012 (VBAT)	95.5 µA
この AP 設定 (5 GHz) のビーコン間隔が 100、AP DTIM が 3 の平均電流	PSOC™ 6 MCU	14 µA
	CYW43012 (VBAT)	69.2 µA

7.3 mtb-example-wlan-offloads

ここでは、mtb-example-wlan-offloads サンプルコードを使用した CY8CKIT-062S2-43012 での電力測定について説明します。このサンプルコードでは、アドレス解決プロトコル (ARP) オフロード, パケット フィルタオフロード, PSOC™ 6 MCU を使用する Infineon AIROC™ Wi-Fi デバイスによって提供される TCP キープアライブオフロード機能など、さまざまな WLAN オフロードを示します。

WLAN オフロード機能を使用すると、WLAN デバイスがネットワークからの受信 TCP キープアライブ, アドレス解決プロトコル (ARP), およびパケットフィルタパケットを独自に処理できるため、PSOC™ 6 MCU がより長く低電力モードに留まることができます。

デフォルトでは、すべての WLAN オフロードは有効です。

1. ハードウェアのセットアップで説明されているように、CY8CKIT-062S2-43012 キットをセットアップしてください。ここでは、電力を測定するためのリファレンス設定として Keysight N6705B パワーアナライザーを使用していることに注意してください。
2. チャネルをオンにして、N6705B から PSOC™ 6 MCU および AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップに電力を供給してください。オンボードの KitProg を接続して、COM ポート経由でターミナルソフトウェアのログを表示できます。
3. 設定された Wi-Fi AP が範囲内にあり、デバイスがそれに接続していることを確認してください。

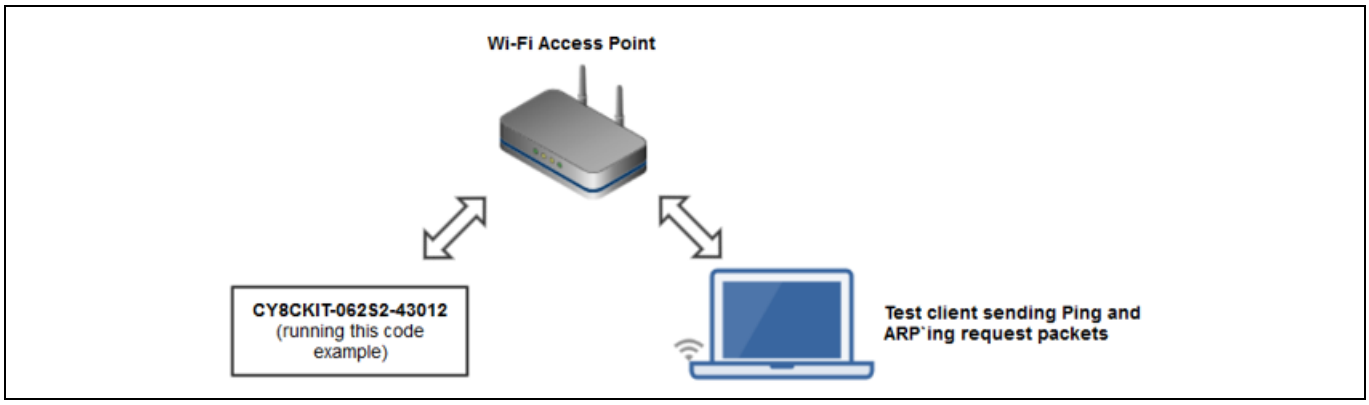

Figure 30　テストネットワークのセットアップ

4. WLAN オフロードの機能と、省電力の観点からホスト MCU に与える影響を理解するために、次のケースを考慮して電流測定が行われました。
5. 混雑したネットワーク環境をシミュレートするために、別の Wi-Fi クライアント デバイスが、ターゲットキットが関連付けられているのと同じネットワークに関連付けられています。これらすべての現在の測定ケースにおいて、クライアントデバイスの役割は、設定された間隔でターゲットキットの IP アドレスに ping および ARP 要求パケットを定期的に送信することです。LPA オフロードが有効かどうかに基づいて、ホスト MCU はディープスリープ電力モードのままになるか、クライアントデバイスからの ping および arp-ping 要求によってウェイクアップします。
6. WLAN オフロードは、デバイスコンフィギュレーターを使用して Wi-Fi パラメーターで有効または無効にできます。

Note: PSOC™6 MCU および Wi-Fi デバイスの電流値は、以下のすべてのケースで 20 秒にわたって測定され、平均されました。現在の測定は、関連する Wi-Fi クライアントが 5 秒ごとに ping リクエストを送信し、10 秒ごとに arp-ping リクエストをターゲットキットの IP ドレスに送信したときに取得されます。

AP 設定:

- DTIM: 3
- ビーコン間隔: 100 ms
- 帯域: 5 GHz

ケース 1: すべての WLAN オフロードが有効 (デフォルト)

- PSOC™ 6 MCU はディープスリープのまま
- WLAN デバイスは ARP 要求パケットに応答
- WLAN デバイスは要求パケットを破棄



Figure 31　ping アクティビティ中の CY8CKIT-062S-43012 の消費電力

Table 11　Case 1: 消費電力

PSOC™ 6 MCU 電流	CYW43012 Wi-Fi 電流	PSOC™ 6 MCU + CYW43012 Wi-Fi 電流
27 µA	270 µA	297 µA

ケース 2: ARP オフロードは無効 (デバイスコンフィギュレーターを使用して無効にする)

- PSOC™ 6 MCU が起動して ARP 要求パケットに応答
- WLAN デバイスは ping 要求パケットを破棄



Figure 32　ping アクティビティ中の CY8CKIT-062S-43012 の消費電力

Table 12　ケース 2: 消費電力

PSOC™ 6 MCU 電流	CYW43012 Wi-Fi 電流	PSOC™ 6 MCU + CYW43012 Wi-Fi 電流
66 µA	634 µA	700 µA

ケース 3: ARP およびパケットフィルタオフロードは無効 (デバイスコンフィギュレーターを使用して無効にする)

- PSOC™ 6 MCU が起動して、ARP リクエストおよび ping リクエストパケットに応答



Figure 33 ping アクティビティ中の CY8CKIT-062S-43012 の消費電力

Table 13 ケース 3: 消費電力

PSOC™ 6 MCU 電流	CYW43012 Wi-Fi 電流	PSOC™ 6 MCU + CYW43012 Wi-Fi 電流
117 µA	1229 µA	1346 µA

7.4 mtb-example-btstack-freertos-cts-client

ここでは、mtb-example-btstack-freertos-cts-client サンプルコードを使用して、CY8CKIT-062S2-43012 での電力測定について説明します。この例では、RF アクティビティなし, 高デューティのアドバタイズメント, 低デューティのアドバタイズメント, および接続状態などのさまざまな状態で電流を測定できます。

1. ハードウェアのセットアップで説明されているように、CY8CKIT-062S2-43012 キットをセットアップしてください。ここでは、電力を測定するためのリファレンス設定として Keysight N6705B パワーアナライザーを使用していることに注意してください。
2. チャネルをオンにして、パワーアナライザーから PSOC™ 6 MCU および AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップに電力を供給してください。オンボードの KitProg を接続して、COM ポート経由でターミナルソフトウェアのログを表示できます。
3. 起動時に、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップは RF アクティビティを開始しません。この状態で PSOC™ 6 MCU と AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップの電流に注目してください。USER_BTN1 (SW2) を押して、高デューティのアドバタイズメントを開始します。
   Figure 34 の、黄色のパルスは AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップの電流を、緑のパルスは PSOC™ 6 MCU の高デューティ アドバタイズメントが実行されているときの電流を表します。

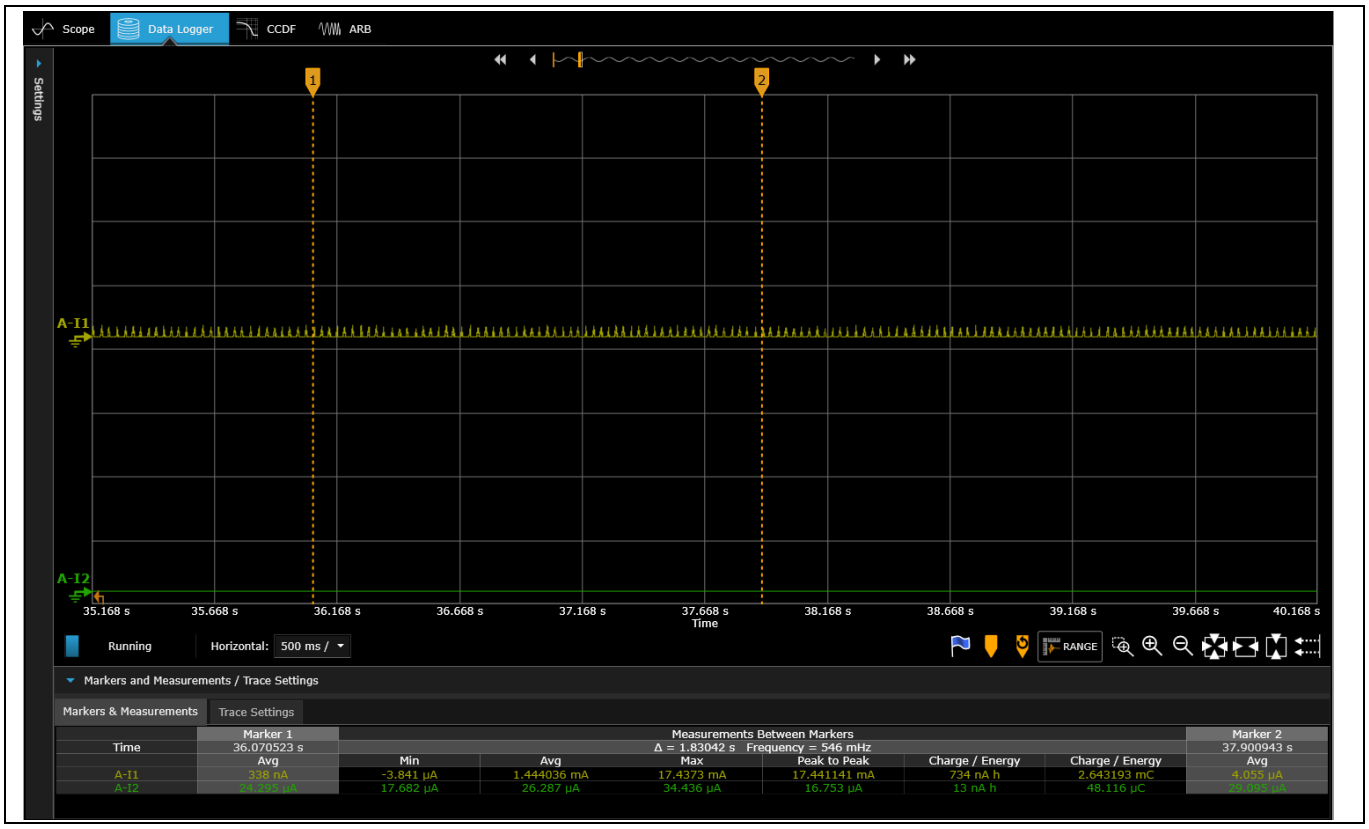

Figure 34　高デューティのアドバタイズメント時の消費電流

60 秒後、デバイスは 1.28 秒の間隔で低デューティ アドバタイズメントに切り替わります。AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth® コンボ チップが PSOC™ 6 MCU を起動し、低デューティ アドバタイズメントが開始されたことを通知していることを、黄色のパルスが示しています。Figure 35 は、低デューティ アドバタイズメント時でのアドバタイズメントピークを拡大表示したものです。



Figure 35　低デューティのアドバタイズメント時の消費電流

グラフを見ると、低デューティアドバタイズメント期間の電流の方がピークが高いように見えるかもしれません。これは、デバイスがスリープモードであるため、アドバタイズメントイベントのたびにウェイクアップする必要があるためです。しかし、高デューティアドバタイズメント期間と比較すると、平均電流はかなり低くなります。



Figure 36　接続間隔 10ms の消費電流



Figure 37　接続間隔 50ms の消費電流



Figure 38　接続間隔 500ms の消費電流



Figure 39　接続間隔 1000ms の消費電流

Table 14　mtb-example-btstack-freertos-cts-client の標準的な電流値

Bluetooth®状態	設定	デバイス	CY8CKIT-062S2-43012
高デューティアドバタイズメント	ADV 間隔: 30 ms	PSOC™ 6 MCU	26 µA
		CYW43012 (VBAT)	1.44 mA
低デューティアドバタイズメント	ADV 間隔: 1.28 s	PSOC™ 6 MCU	26 µA
		CYW43012 (VBAT)	42.73 µA
接続	接続間隔: 8.75 ms	PSOC™ 6 MCU	26 µA
		CYW43012 (VBAT)	1.15 mA
接続	接続間隔: 10 ms	PSOC™ 6 MCU	26 µA
		CYW43012 (VBAT)	1.56 mA
接続	接続間隔: 50 ms	PSOC™ 6 MCU	26 µA
		CYW43012 (VBAT)	402.5 µA
接続	接続間隔: 500 ms	PSOC™ 6 MCU	26 µA
		CYW43012 (VBAT)	53.15 µA
接続	接続間隔: 1 s	PSOC™ 6 MCU	26 µA
		CYW43012 (VBAT)	32.05 µA

7.5 mtb-example-btstack-freertos-cts-server

ここでは、mtb-example-btstack-freertos-cts-server サンプルコードを使用して、CY8CKIT-062S2-43012 での電力測定の詳細を説明します。この例では、デバイスが高デューティおよび低デューティでスキャンしている間の電流を測定できます。

デフォルトでは、サンプルは GATT サーバとして CTS サービスを実装しています。

1. ハードウェアのセットアップで説明されているように、CY8CKIT-062S2-43012 キットをセットアップします。ここでは、電力を測定するためのリファレンス設定として Keysight N6705B パワーアナライザーを使用していることに注意してください。
2. チャネルをオンにして、パワーアナライザーから PSOC™ 6 MCU および AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップに電力を供給します。オンボードの KitProg を接続して、COM ポート経由でターミナルソフトウェアのログを表示できます。
3. 起動時に、AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップは RF アクティビティを持ちません。USER_BTN1 (SW2) を押して、高デューティスキャンを開始します。

7.5.1 電力測定

この例では、スタンバイ, スキャン, および接続状態の 3 つの異なる AIROC™ Bluetooth® LE 状態で電力を測定できます。次の手順に従って各状態に入り、異なるキットの電力を測定します。

異なる状態に入る

- スタンバイ状態: デバイスのプログラミング後、AIROC™ Bluetooth® LE は初期化され、スタンバイ状態になります。端末で「Bluetooth®スタックの初期化に成功しました」というメッセージを確認すると、スタンバイ状態の電力を測定できるようになります。
- スキャン状態: キットのユーザーボタン (SW2) を押してスキャンを開始します。CTS クライアント CE を含むキットは、スキャンの開始時にアドバタイズする必要があることに注意してください。ピアデバイスを検出すると、接続要求を送信します。高デューティスキャンは最初に 30 秒間実行されます。その後、デバイスはタイムアウトなしで低デューティスキャンに切り替わります。より迅速な検出を実現するために、30 秒の高デューティスキャンが選択されます。この設定は、必要に応じて、Modustoolbox™のインストールに付属するツール「bt-configurator」を使用して変更できます。

- 接続状態: スキャナが広告主を検出すると、接続が確立されます。端末には「Connected : BDA xx:xx:xx:xx:xx:xx」というメッセージが表示されます。



Figure 40　高デューティスキャン時の消費電流

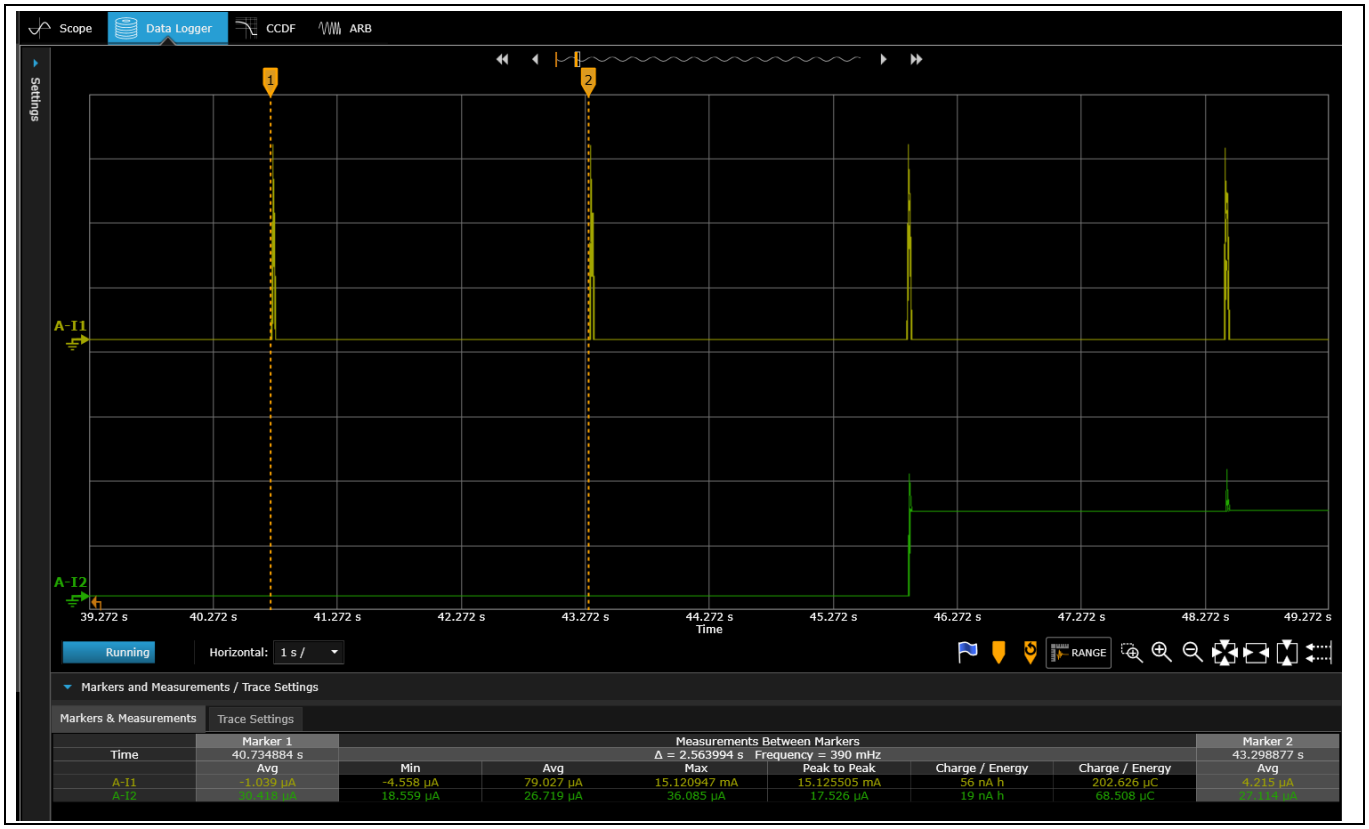

Figure 41　低デューティスキャン時の消費電流

Table 15 mtb-example-btstack-freertos-cts-server の標準的な電流値

Bluetooth®状態	設定	デバイス	CY8CKIT-062S2-43012
高デューティスキャン	スキャン間隔: 120 ms	PSOC™ 6 MCU	26 µA
		CYW43012 (VBAT)	4.14 mA
低デューティスキャン	スキャン間隔: 2560 ms	PSOC™ 6 MCU	26 µA
		CYW43012 (VBAT)	79.02 µA

8 まとめ

PSOC™ 6 MCU および AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth®コンボチップは、多くの電力管理オプションを提供する業界最先端の低電力 IoT プラットフォームを提供します。インフィニオン低電力アシスタントミドルウェアにより、IoT 設計に低電力動作を簡単に追加できます。適切な方法と設計手法に従うことにより、パフォーマンスを低下させることなく、システムを最適化して、可能な限り低い電力消費を実現できます。

参考資料

PSOC™ 6 MCU リソースの包括的なリストについては、インフィニオンコミュニティの KBA223067 を参照してください。

アプリケーションノート

[1] AN221774 – Getting started with PSOC™ 6 MCU

[2] AN218241 – PSOC™ 6 MCU ハードウェア設計上の注意事項

[3] AN219528 – PSOC™ 6 MCU low-power modes and power reduction techniques

サンプル コード

[4] mtb-example-wifi-wlan-lowpower

[5] mtb-example-wlan-offloads

[6] mtb-example-btstack-freertos-cts-client

[7] mtb-example-btstack-freertos-cts-server

デバイスドキュメント

[8] PSOC™ 6 MCU: PSOC™ 62 datasheet

[9] PSOC™ 6 MCU: PSOC™ 62 architecture technical reference manual

[10] AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth® combo chip datasheet

開発キットとドキュメント

[11] CY8CKIT-062S2-43012 PSOC™ 6 Wi-Fi Bluetooth® Pioneer Kit (with AIROC™ CYW43012 Wi-Fi & Bluetooth® combo chip)

ツールとドキュメント

[12] ModusToolbox™ software

[13] PSOC™ 6 peripheral driver library (PDL)

[14] Hardware abstraction layer (HAL) library

[15] Low power assistant

改訂履歴

版数	発行日	変更内容
**	2020-10-19	本版は英語版 002-27910 Rev. **について、CYPRESS DEVELOPER COMMUNITY の参画者によって日本語に翻訳されたドキュメントです。
*A	2021-05-17	テンプレートの変更を実施。 これは英語版 002-27910 Rev. *A を翻訳した日本語版 Rev. *A です。
*B	2022-12-09	これは英語版 002-27910 Rev. *B を翻訳した日本語版 Rev. *B です。
*C	2023-09-06	これは英語版 002-27910 Rev. *C を翻訳した日本語版 Rev. *C です。
*D	2024-10-28	これは英語版 002-27910 Rev. *D を翻訳した日本語版 Rev. *D です。

Trademarks
All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.
The Bluetooth® word mark and logos are registered trademarks owned by Bluetooth SIG, Inc., and any use of such marks by Infineon is under license.

Edition 2024-10-28
Published by
Infineon Technologies AG
81726 Munich, Germany

© 2024 Infineon Technologies AG.
All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?

Email: erratum@infineon.com

Document reference
002-31587 Rev. *D

重要事項

本手引書に記載された本製品の使用に関する手引きとして提供されるものであり、いかなる場合も、本製品における特定の機能性能や品質について保証するものではありません。本製品の使用の前に、当該手引書の受領者は実際の使用環境の下であらゆる本製品の機能及びその他本手引書に記された一切の技術的情報について確認する義務が有ります。インフィニオンテクノロジーズはここに当該手引書内で記される情報につき、第三者の知的所有権の不侵害の保証を含むがこれに限らず、あらゆる種類の一切の保証および責任を否定いたします。

本文書に含まれるデータは、技術的訓練を受けた従業員のみを対象としています。本製品の対象用途への適合性、およびこれら用途に関連して本文書に記載された製品情報の完全性についての評価は、お客様の技術部門の責任にて実施してください。

警告事項

技術的要件に伴い、製品には危険物質が含まれる可能性があります。当該種別の詳細については、インフィニオンの最寄りの営業所までお問い合わせください。
インフィニオンの正式代表者が署名した書面を通じ、インフィニオンによる明示の承認が存在する場合を除き、インフィニオンの製品は、当該製品の障害またはその使用に関する一切の結果が、合理的に人的傷害を招く恐れのある一切の用途に使用することはできないこと予めご了承ください。