

FPGAとDSPによるパワーエレ制御 システム設計

2019年10月25日

Mywayプラス株式会社

松野 知愛

目次

1. FPGA概要

- 1-1. デジタルデバイス全般
- 1-2. FPGAの構造と設計フロー
- 1-3. 効率的な開発体制

2. システム設計の勘所

- 2-1. FPGAを含むシステム
- 2-2. FPGAのタスク切り出し
- 2-3. パイプライン化と並列化

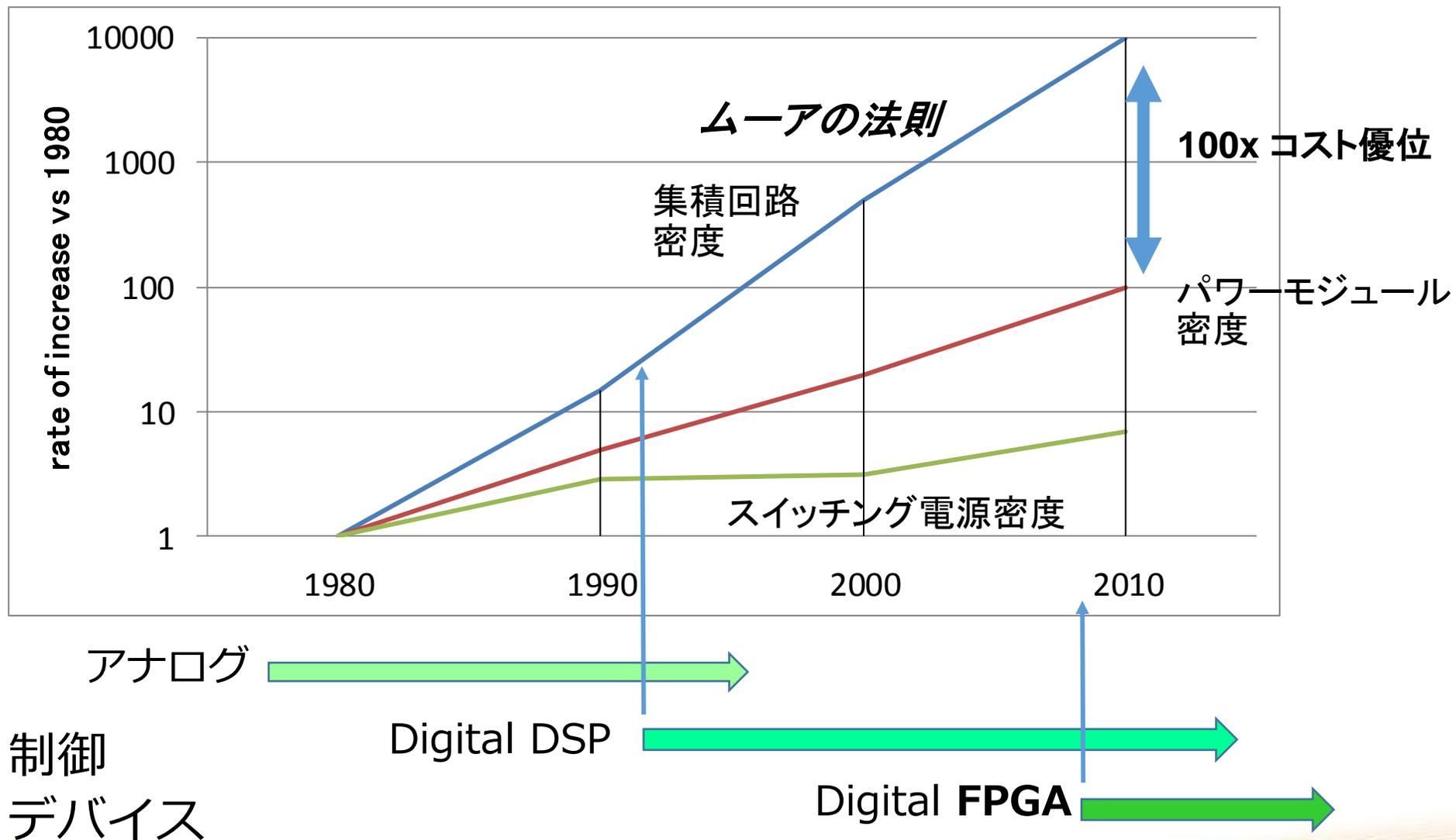
3. コーディングの勘所

- 3-1. アーキテクチャの基本形
- 3-2. センスの良いコーディング
- 3-3. より高度なコーディング

4. FPGAプラットフォーム紹介

- 4-1. PE-Expert4ご紹介
- 4-2. 製品開発事例
- 4-3. アプリケーション事例

デジタルリッチへ



1. FPGA概要

設計フローと必要スキル

1. FPGA概要

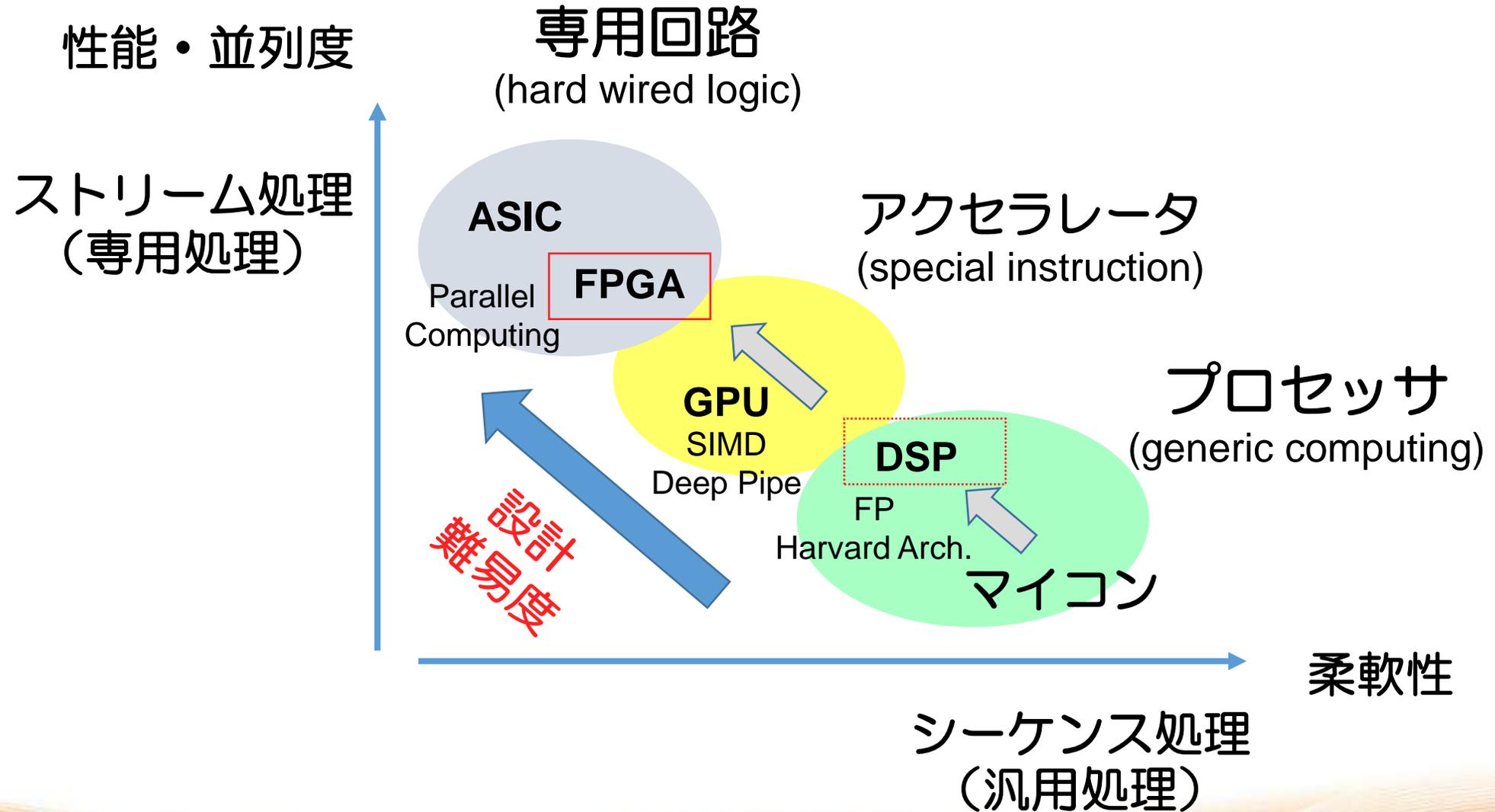
1-1. デジタルデバイス全般

1-2. FPGAの構造と設計フロー

1-3. 効率的な開発体制

デジタルデバイス全般

様々な演算デバイス



パワーエレに必要なスペック

- 演算速度
 - 動作周波数, コア数, 専用命令
- レイテンシ
 - 割り込み遅延, 内部バス
- インターフェース
 - 周辺回路(AD, GPIO) 、専用回路(PWM) 、外部バス

パワエレ制御～演算デバイス比較～

	マイコン	DSP	FPGA	ASIC	アナログ
演算能力	△	○	◎	◎	◎
レイテンシ	△	○	◎	◎	◎
インターフェース	△	△	◎	◎	○
汎用性(適用アルゴリズム柔軟性)	◎	◎	◎	◎	×
開発工数	◎	◎	△→○	×	○
部品単価	◎	○	△→○	◎	○
パワエレ用途	◎	◎	→◎	-	◎

× ←不利 有利→◎

高速処理・多ゲート制御の利点を活かせる
先端アルゴリズムに最適

FPGAによるイノベーション

- 既存機能の置き換え：
 - 高速フィードバック制御
 - システム同期制御
- 新たな付加価値：モデルベース・デジタルツイン
 - 数学モデルのリアルタイム演算
 - 例、回路モデルの数値計算
 - モデルデータのパターンマッチング
 - 例、インダクタンス空間分布テーブルによる位置推定

FPGAの構造と設計フロー

FPGAの内部構成

I/O部
外部ピン

内部配線
セルの接続

ロジックセル
演算素子

クロックネットワーク
同期システム

ブロックメモリ
HWマクロ
(機能部品)

JTAG
プログラムロード

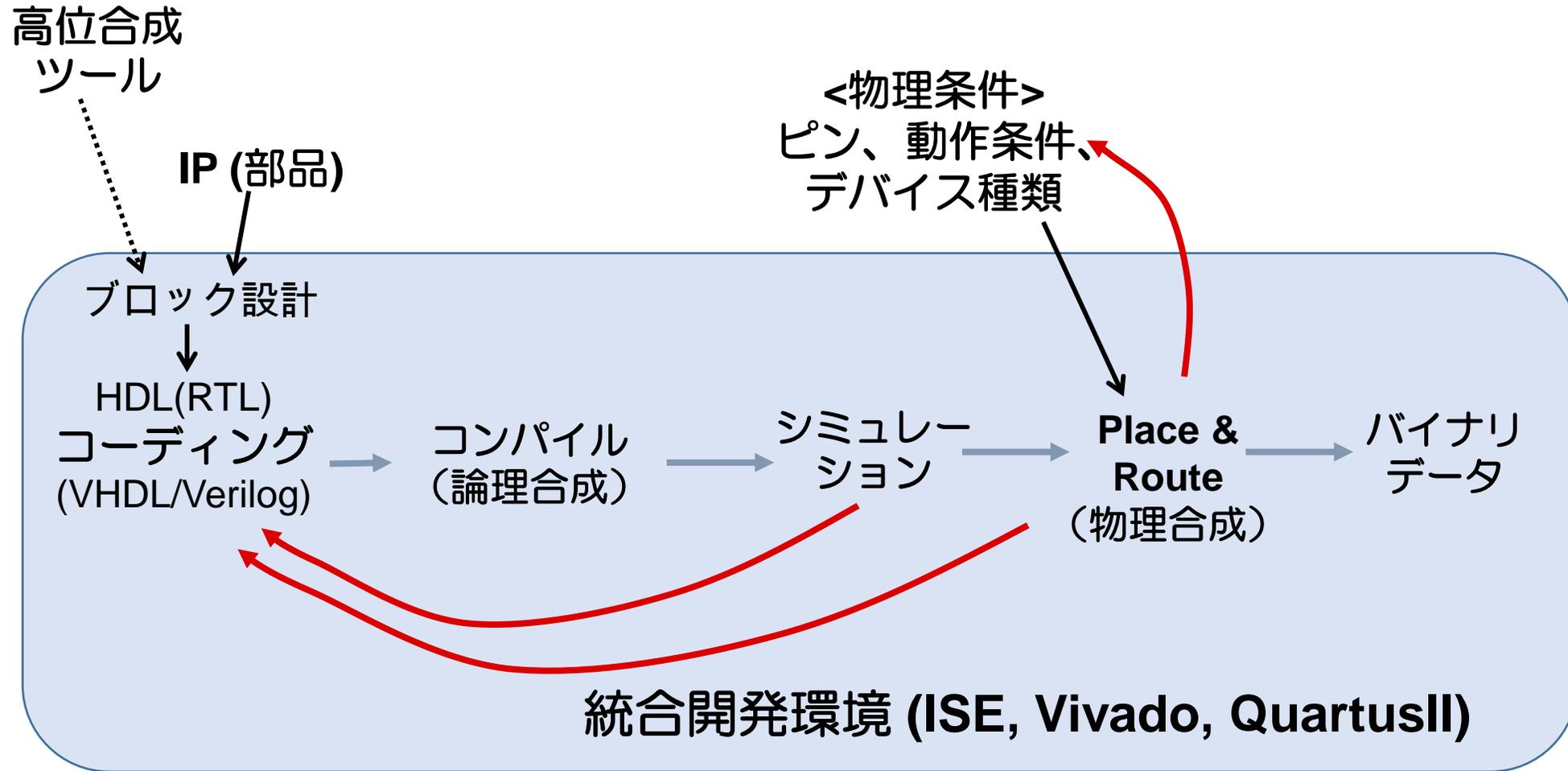
コンフィグレーション
SRAM
設定情報

設計で注意するポイント

- クロック (同期設計、クロックソース)
- リセット (起動シーケンス)
- 電源 (起動シーケンス、ノイズ、安定動作)
- I/O (バンク設定、初期値、同期設計、ノイズ)
- RAM (ブロックメモリ・IP、使用率、チップスコープ)
- JTAG/デバッグ (Flash選定、システム構成)
- 機能 (タイミングチャート、ステートマシン)

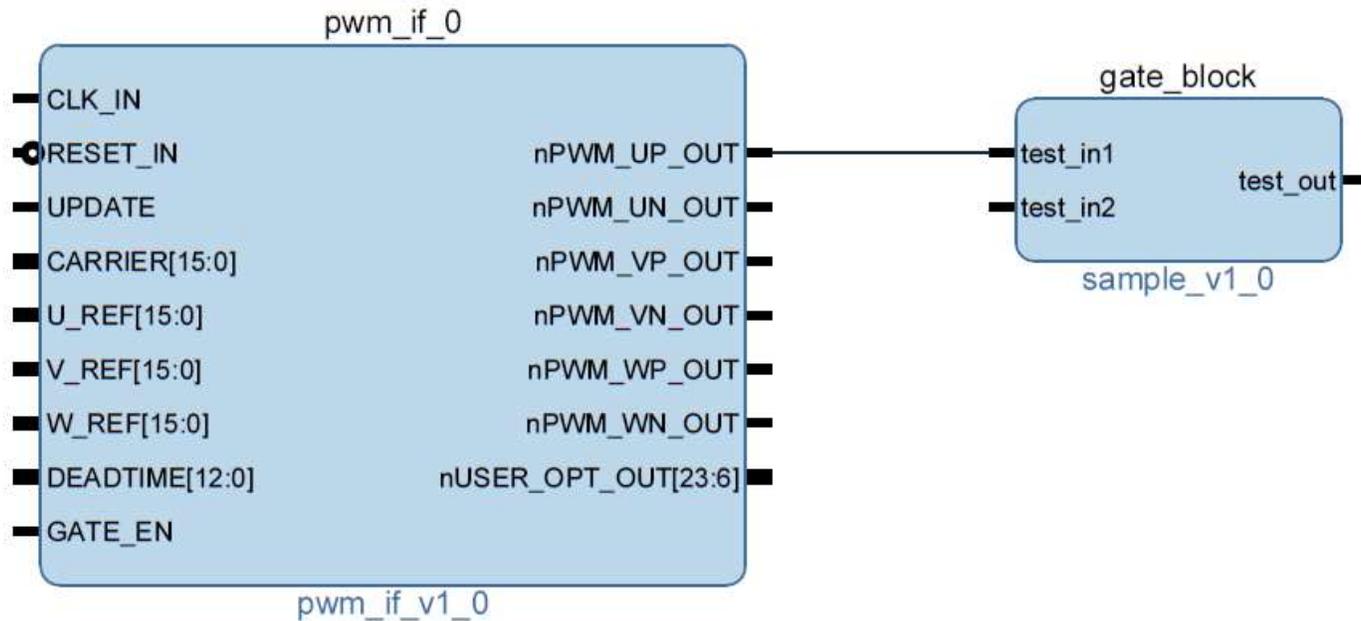
全てFPGA設計仕様書でカバーすべき項目

FPGAの設計フロー



ブロック図設計 (IP化・IP活用)

ブロック図記述 (.bd)



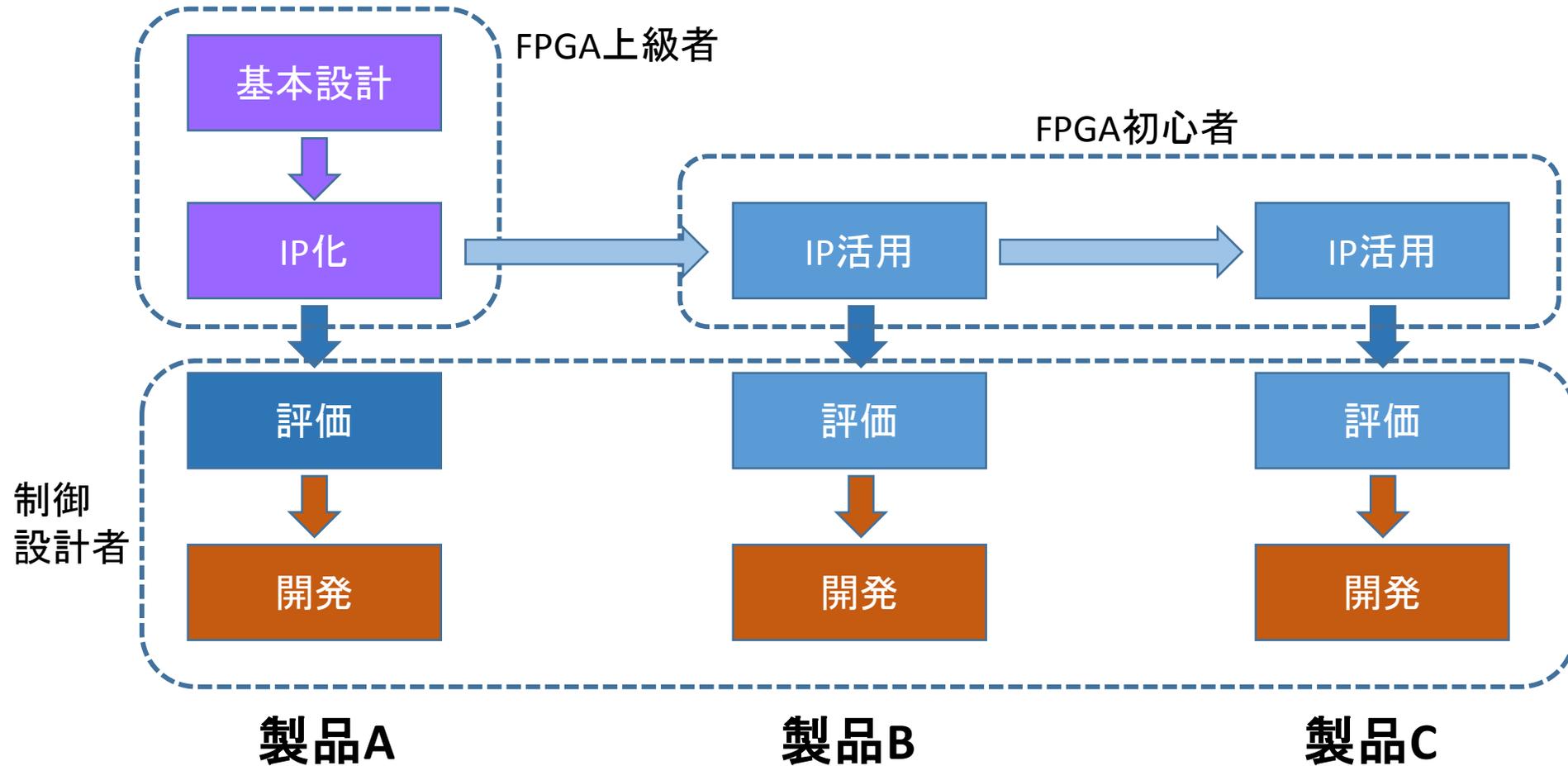
VHDLコード (.vhd)

```
entity pwm_if is
port (
CLK_IN      : in std_logic;
RESET_IN    : in std_logic;
nPWM_UP_OUT : out std_logic; --nUSER_OPT_OUT(0)
nPWM_UN_OUT : out std_logic; --nUSER_OPT_OUT(1)
nPWM_VP_OUT : out std_logic; --nUSER_OPT_OUT(2)
nPWM_VN_OUT : out std_logic; --nUSER_OPT_OUT(3)
nPWM_WP_OUT : out std_logic; --nUSER_OPT_OUT(4)
nPWM_WN_OUT : out std_logic; --nUSER_OPT_OUT(5)
nUSER_OPT_OUT : out std_logic_vector (23 downto 6);
UPDATE      : in std_logic;
CARRIER    : in std_logic_vector (15 downto 0);
U_REF       : in std_logic_vector (15 downto 0);
V_REF       : in std_logic_vector (15 downto 0);
W_REF       : in std_logic_vector (15 downto 0);
DEADTIME    : in std_logic_vector (12 downto 0);
GATE_EN     : in std_logic
);
end pwm_if;
```

IPインテグレータによりVHDLをブロック化

効率的な開発体制

開発プロセス



2. システム設計の勘所

2. システム設計の勘所

2-1. FPGAを含むシステム

2-2. FPGAのタスク切り出し

2-3. パイプライン化と並列化

FPGAを含むシステム

既存デバイスの限界

- 制御周期
 - キャリア割り込みルーチン許容時間
- 高速・精密・多ゲート制御
 - マルチレベル、インターリーブ、位相制御
- 高速システム同期制御
 - ユニット間高速通信によるシステム並列化

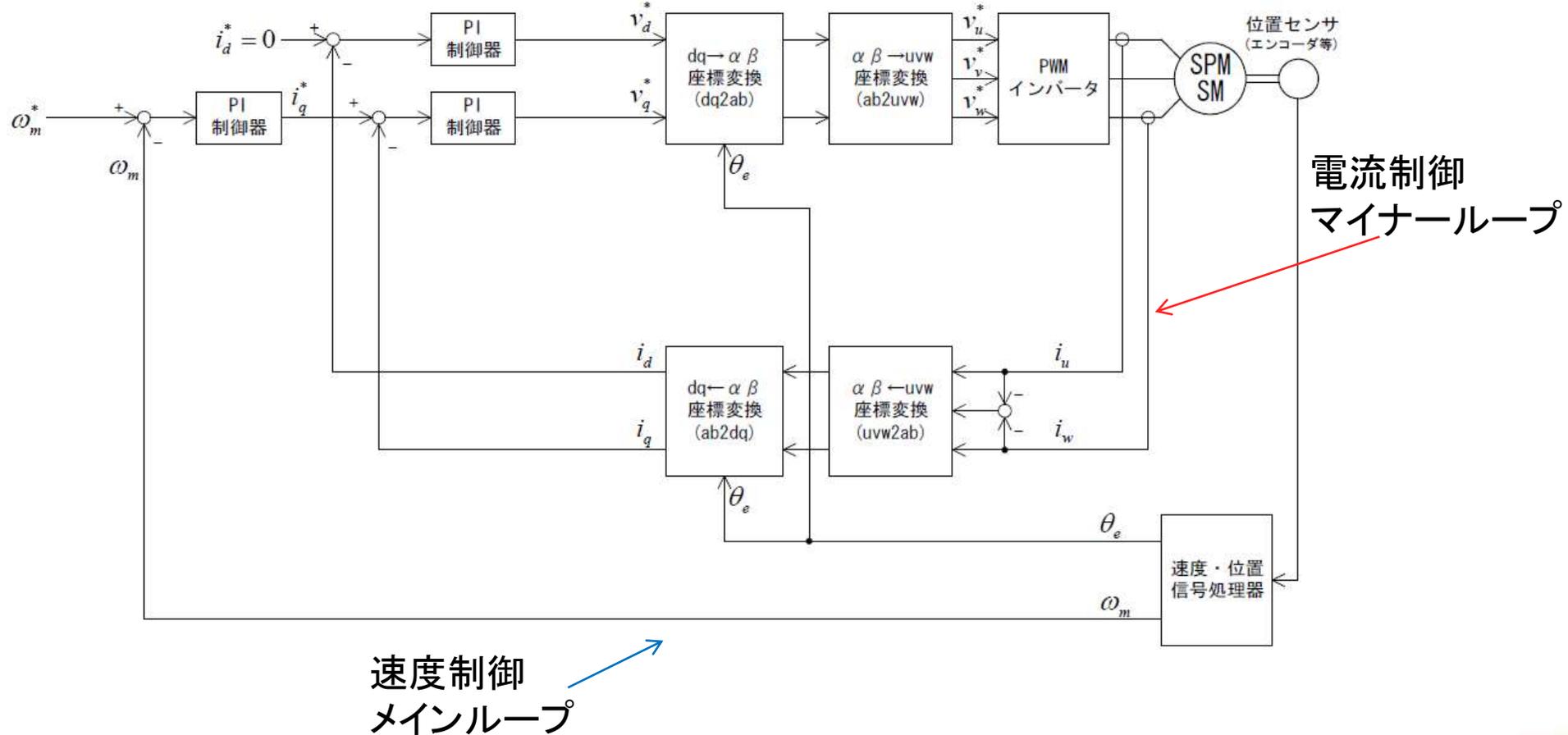
FPGAだからできること

時間と空間を自由に操る

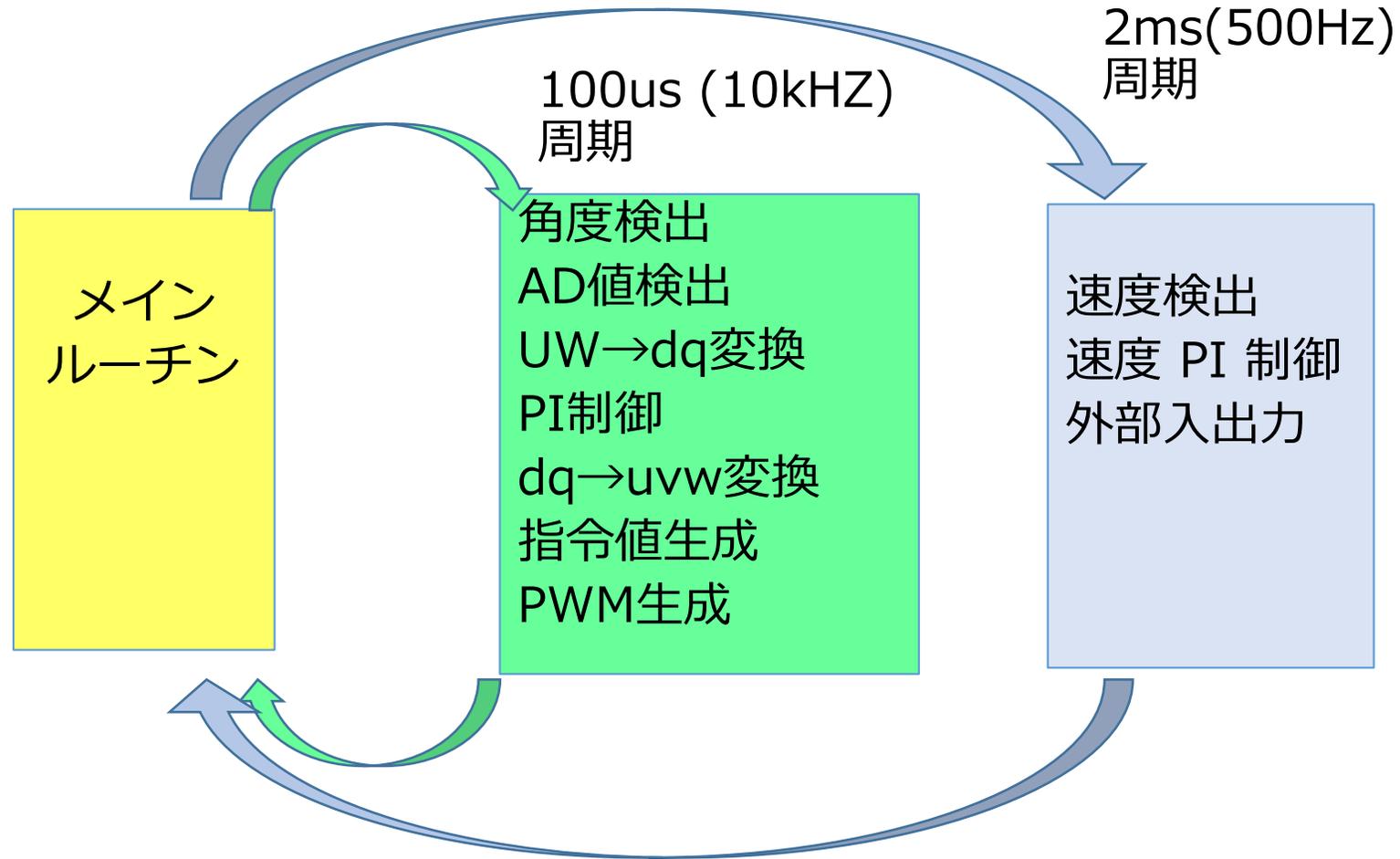
- 時間的(クロック)
 - パイプライン処理 (高速) → 通信
 - クロック単位の制御(精度) → 位相制御
- 空間的(ビット)
 - 超並列処理 (高速) → MMC、多ゲート
 - ビット単位の制御 (精度) → 高精度AD

FPGAのタスク切り出し

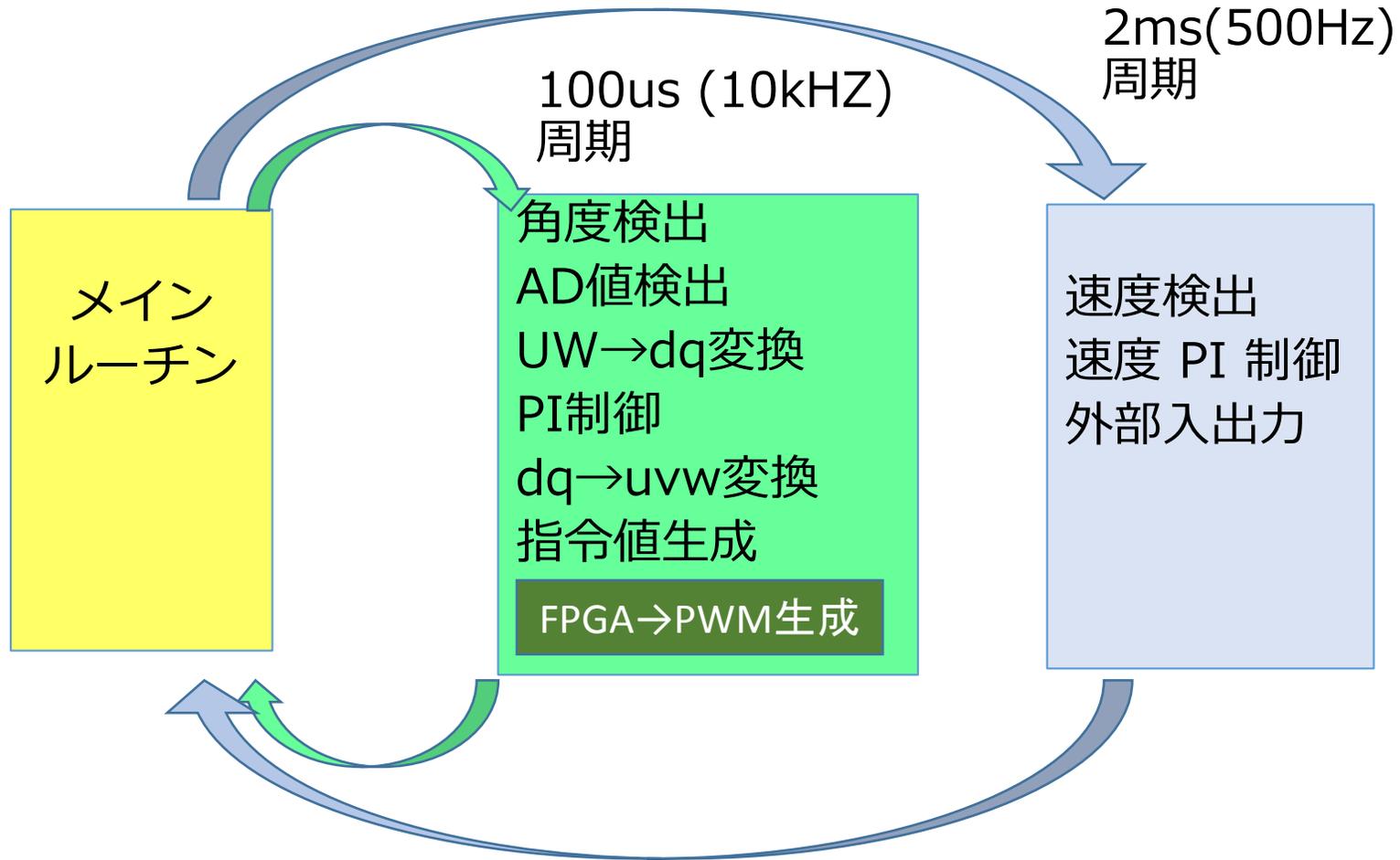
システム例：PM同期モータ ベクトル制御



DSP 制御ソフトウェア構成

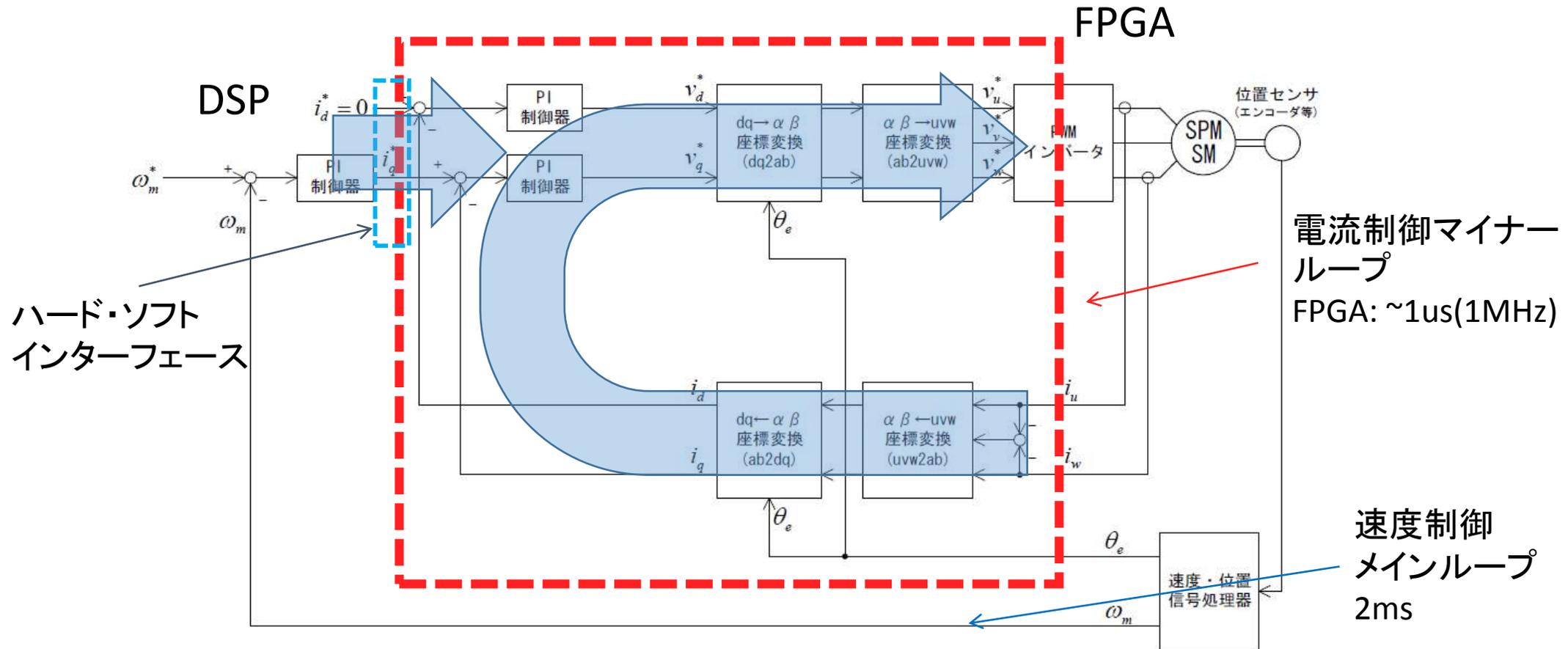


DSP + FPGA PWM生成ロジック

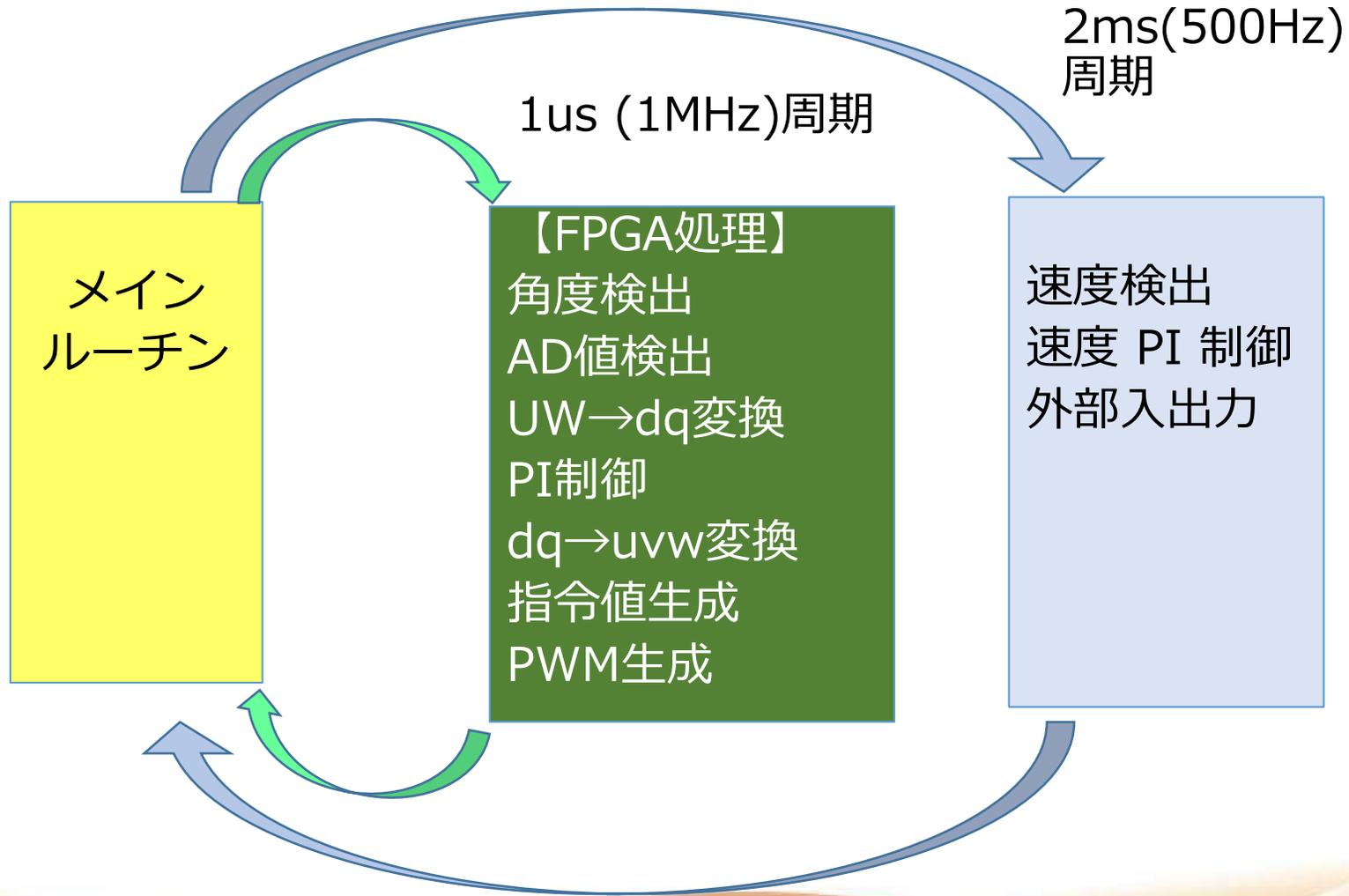


システム例：PM同期モータ ベクトル制御

マイナーループ演算部のFPGA化の例

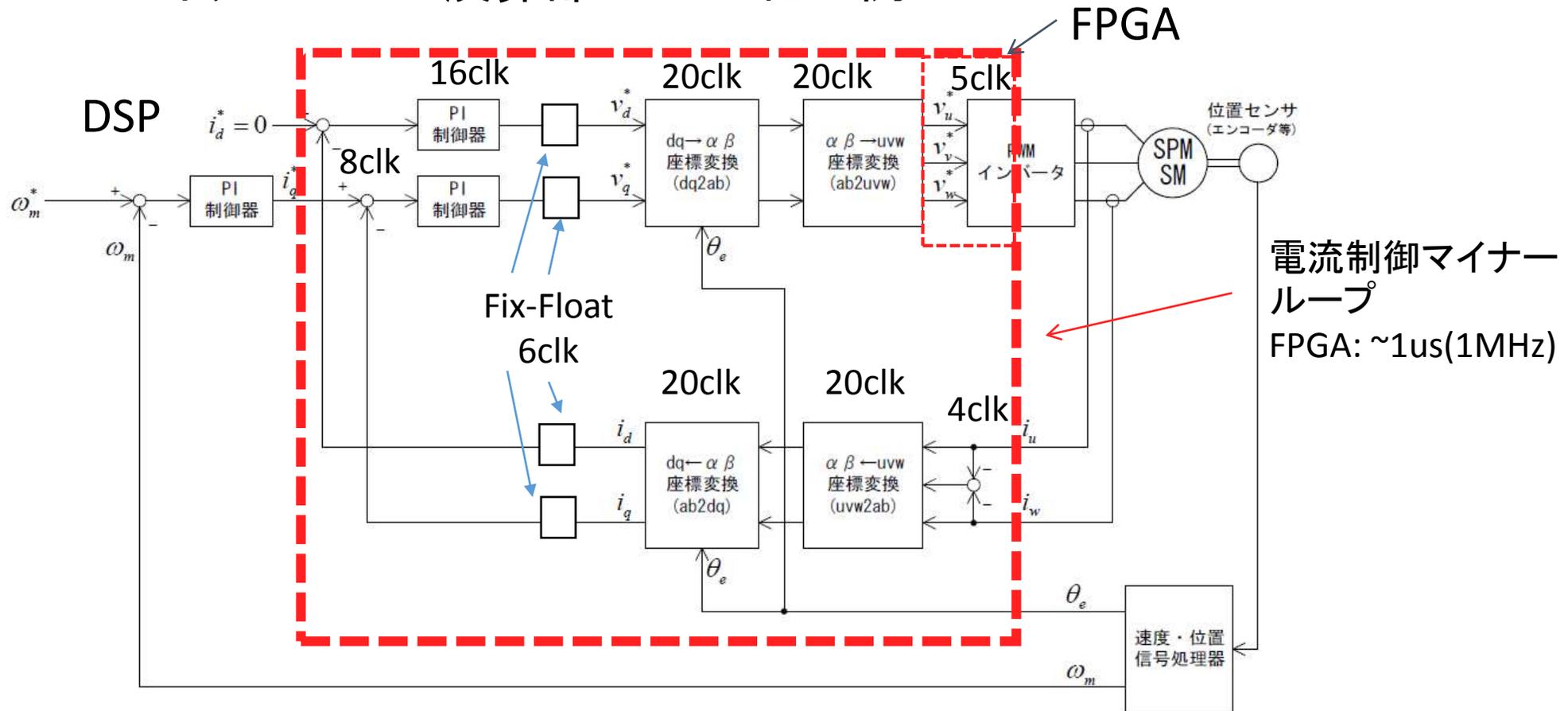


DSP + FPGA マイナーループ制御



システム例：PM同期モータ ベクトル制御

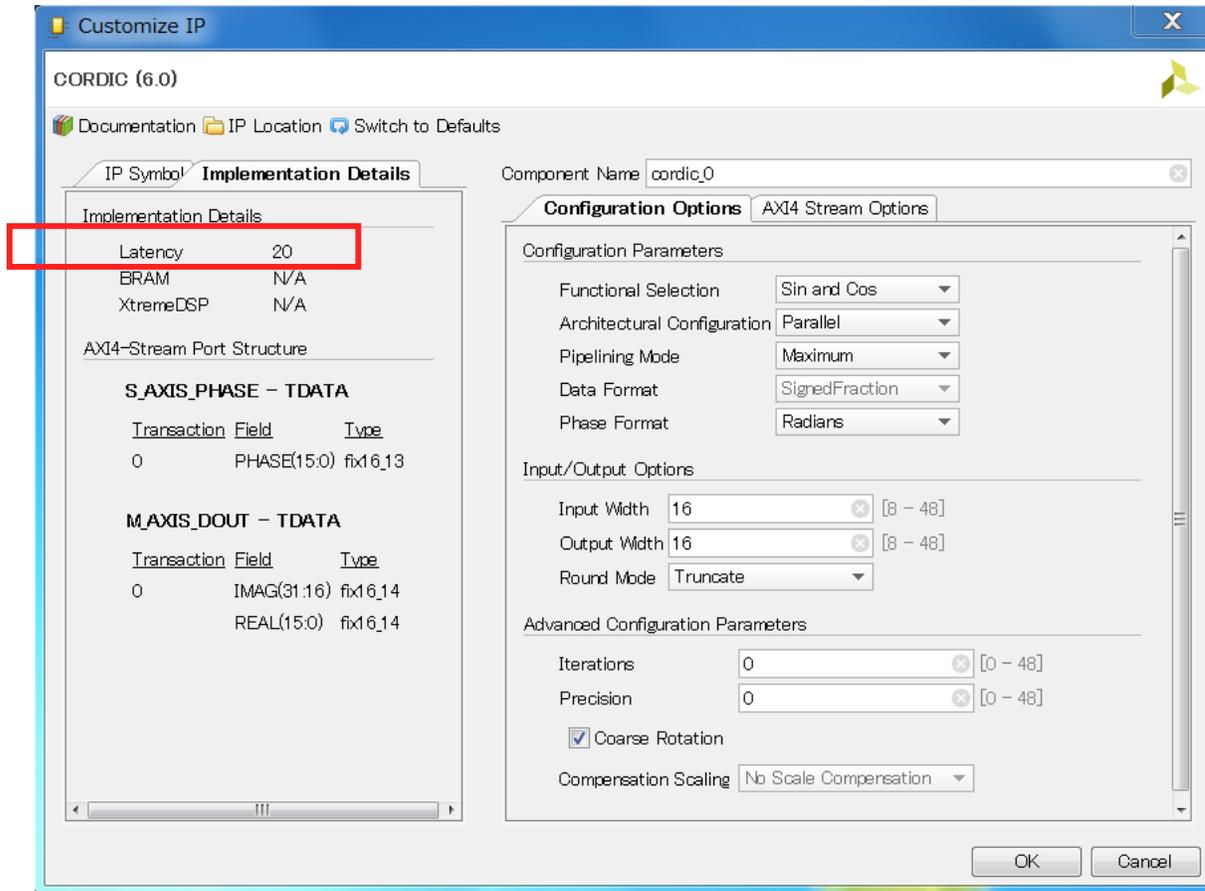
マイナーループ演算部のFPGA化の例



遅延計算

(logic) $4+20+20+6+8+16+6+20+20+5 = 125 \text{ cycle} \times 5 \text{ (ns @200MHz)} = \sim 650\text{ns}$

IPブロックの遅延(例)



Vivado IP Integrator

各種演算器の作成
(Sin/cos の例)

Latency 20 clock

パイプライン化と並列化

さらなる高速化を目指す

パイプラインと並列処理

高速化手法

- 並列処理: 空間方向に処理分割
- パイプライン: 時間方向に処理分割

高速化の例

ロジック



処理時間 400ns

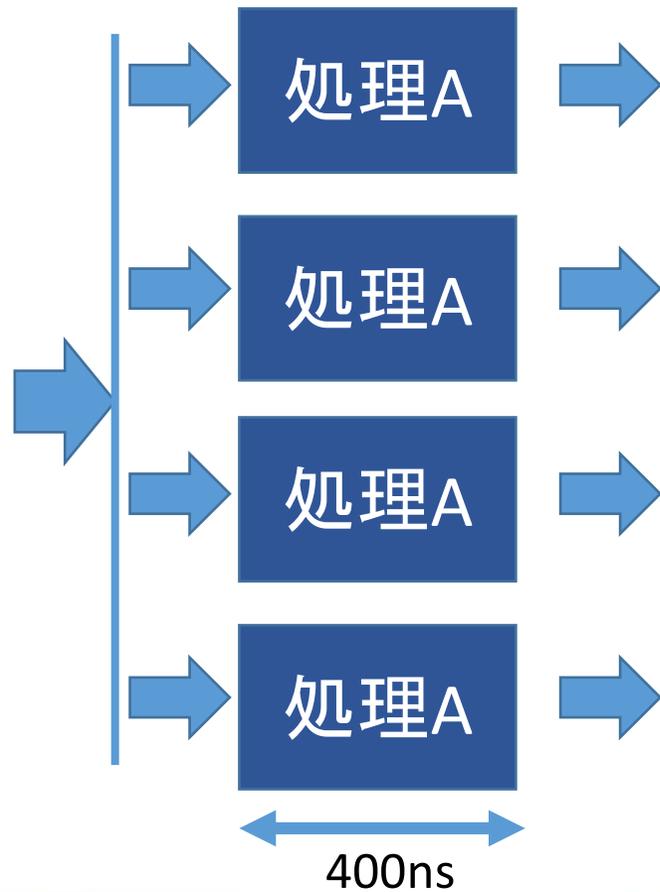
スループット: 2.5MHz

レイテンシ: 400ns

リソース: x1

高速化 ① 並列処理

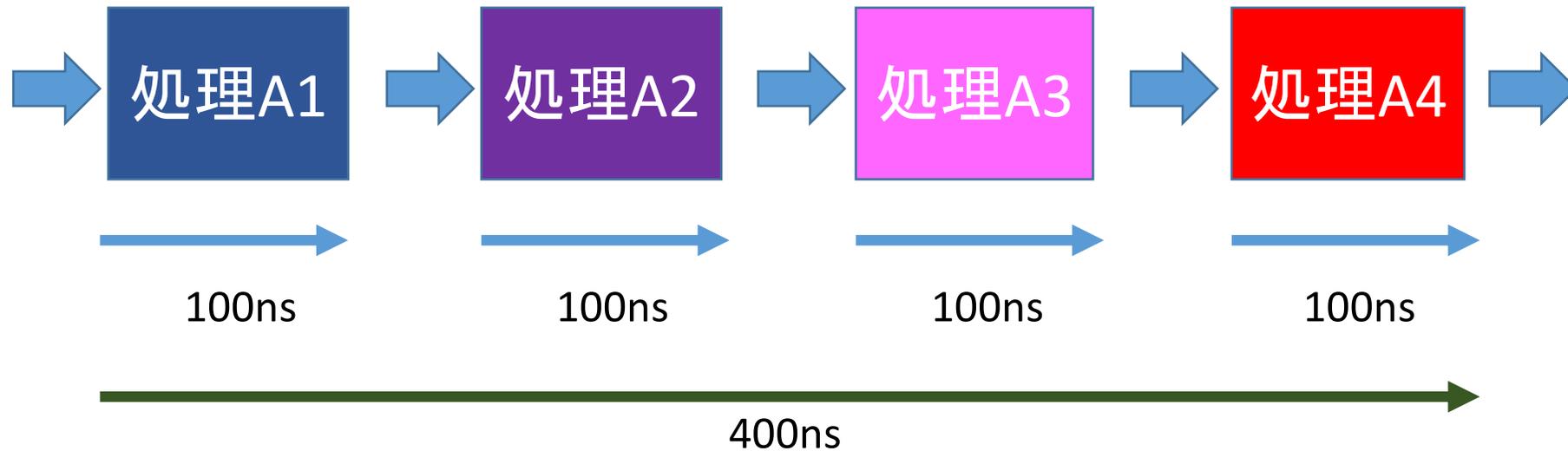
「依存関係のない」処理は分割し空間方向へ拡張



- スループット: 2.5MHz x4 → 10MHz
- レイテンシ: 400ns
- リソース: **x4**

高速化 ②パイプライン処理

「時間方向」の並列処理



スループット: 2.5MHz x 4倍 → 10MHz

レイテンシ: 400ns

リソース: **x1**

3. コーディングの勘所

「センスの良い」設計

3. コーディングの勘所

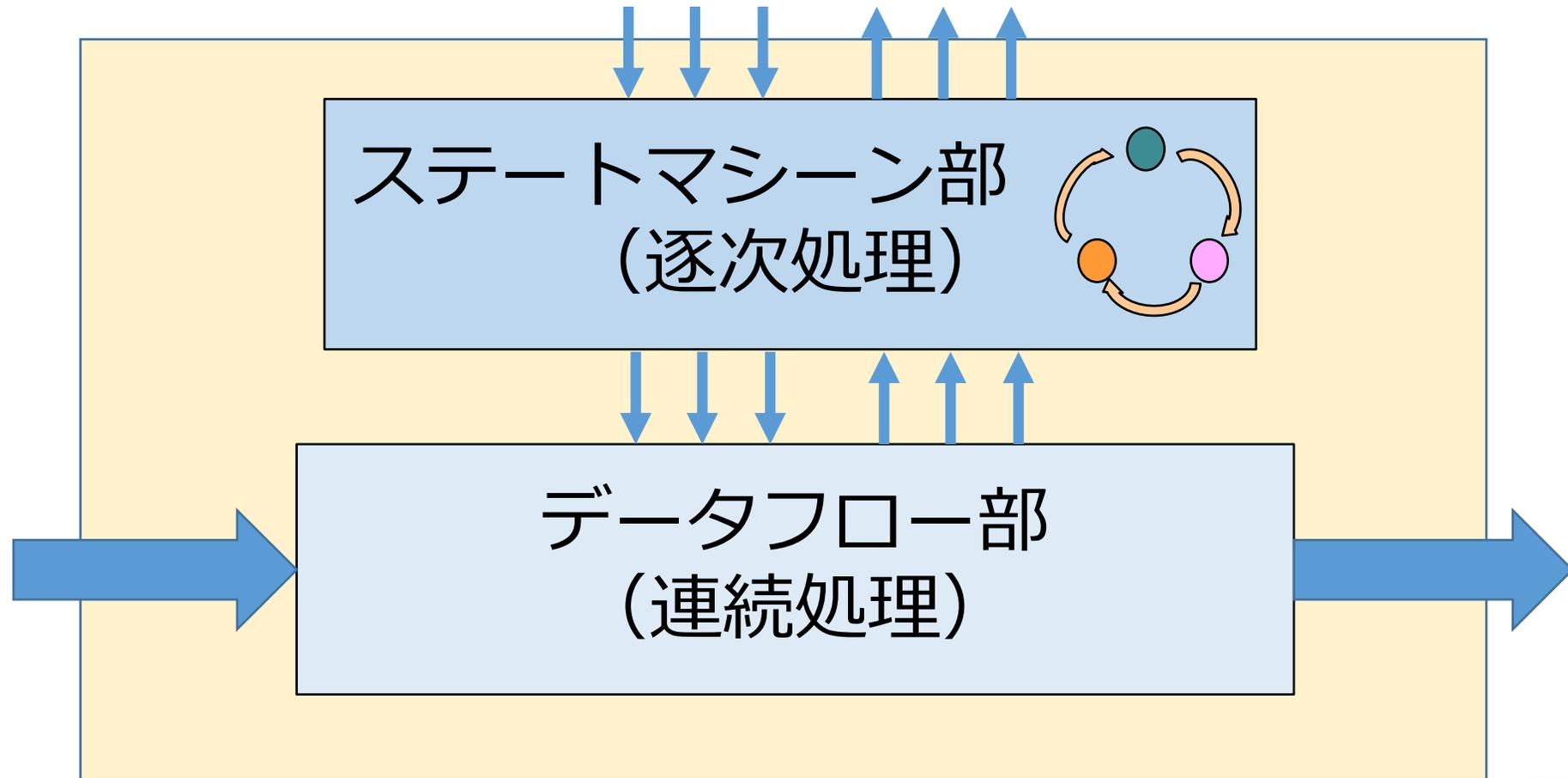
3-1. アーキテクチャの基本形

3-2. センスの良いコーディング

3-3. より高度なコーディング

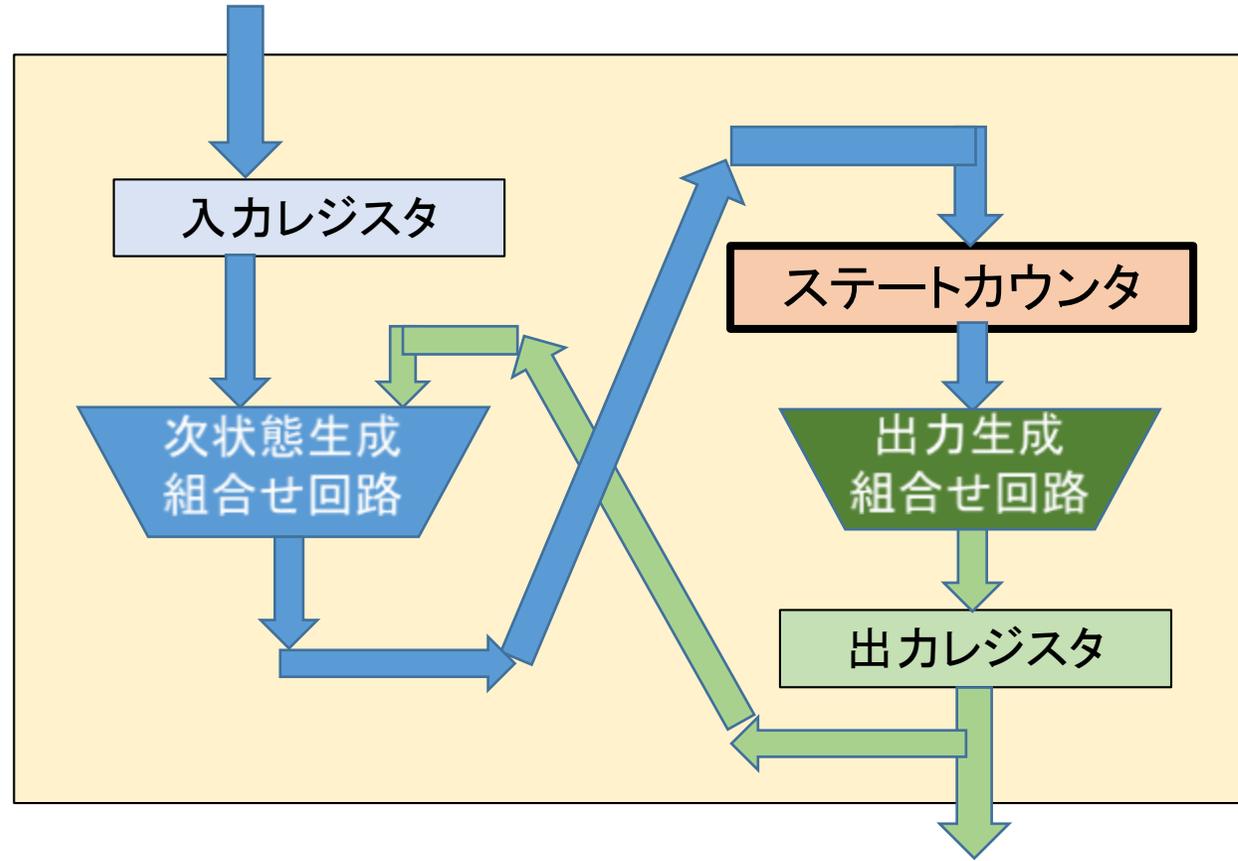
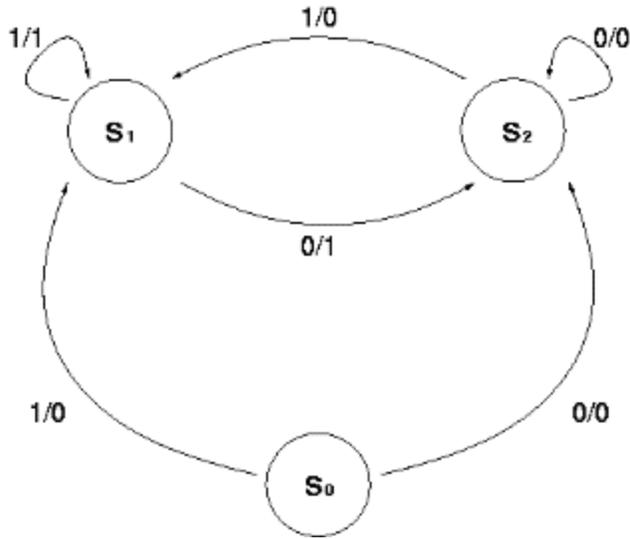
アーキテクチャの基本形

FPGA 一般的な論理回路構成



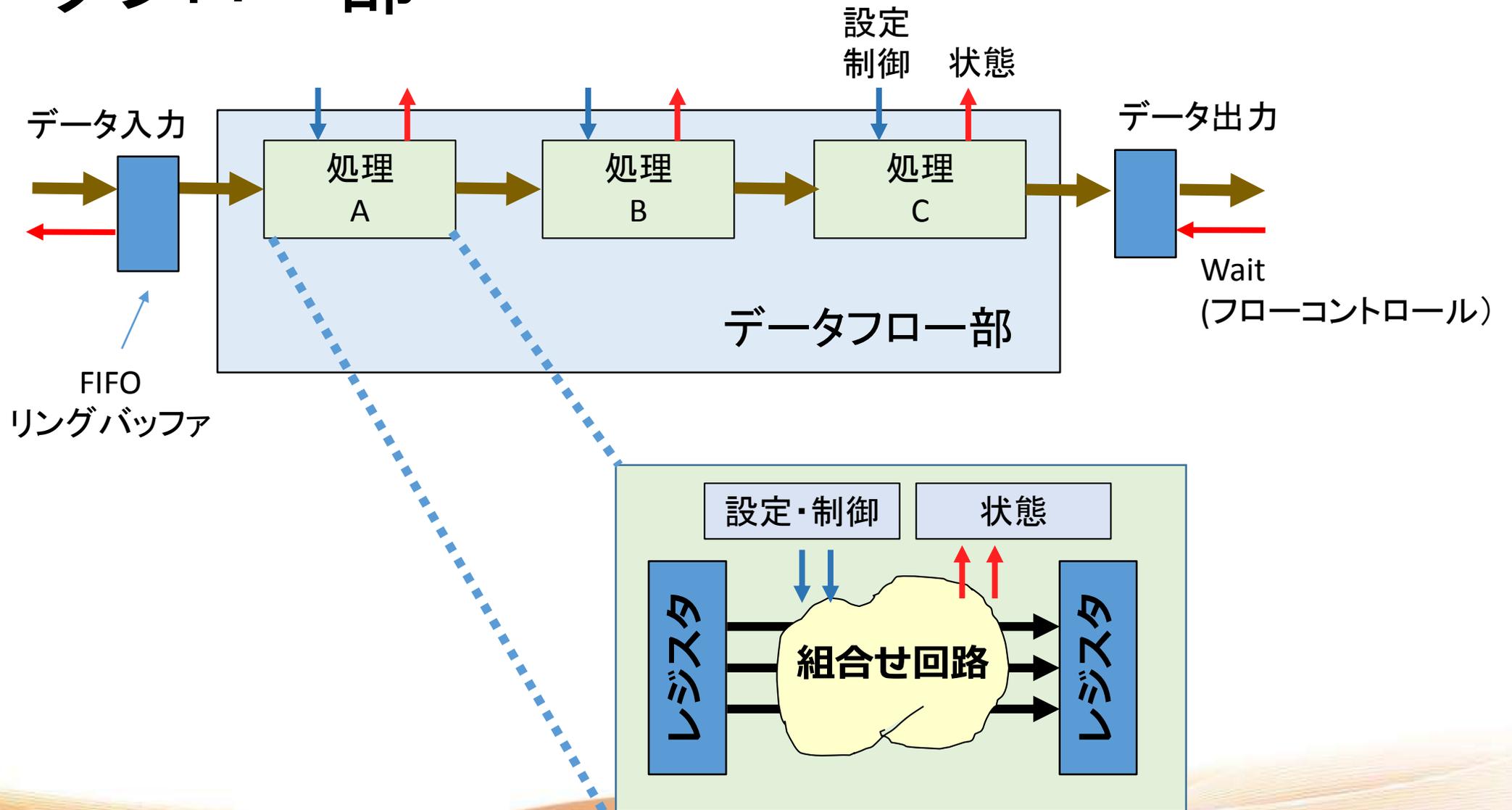
ステートマシン部

入力信号(内部状態、外部入力、設定パラメータ)

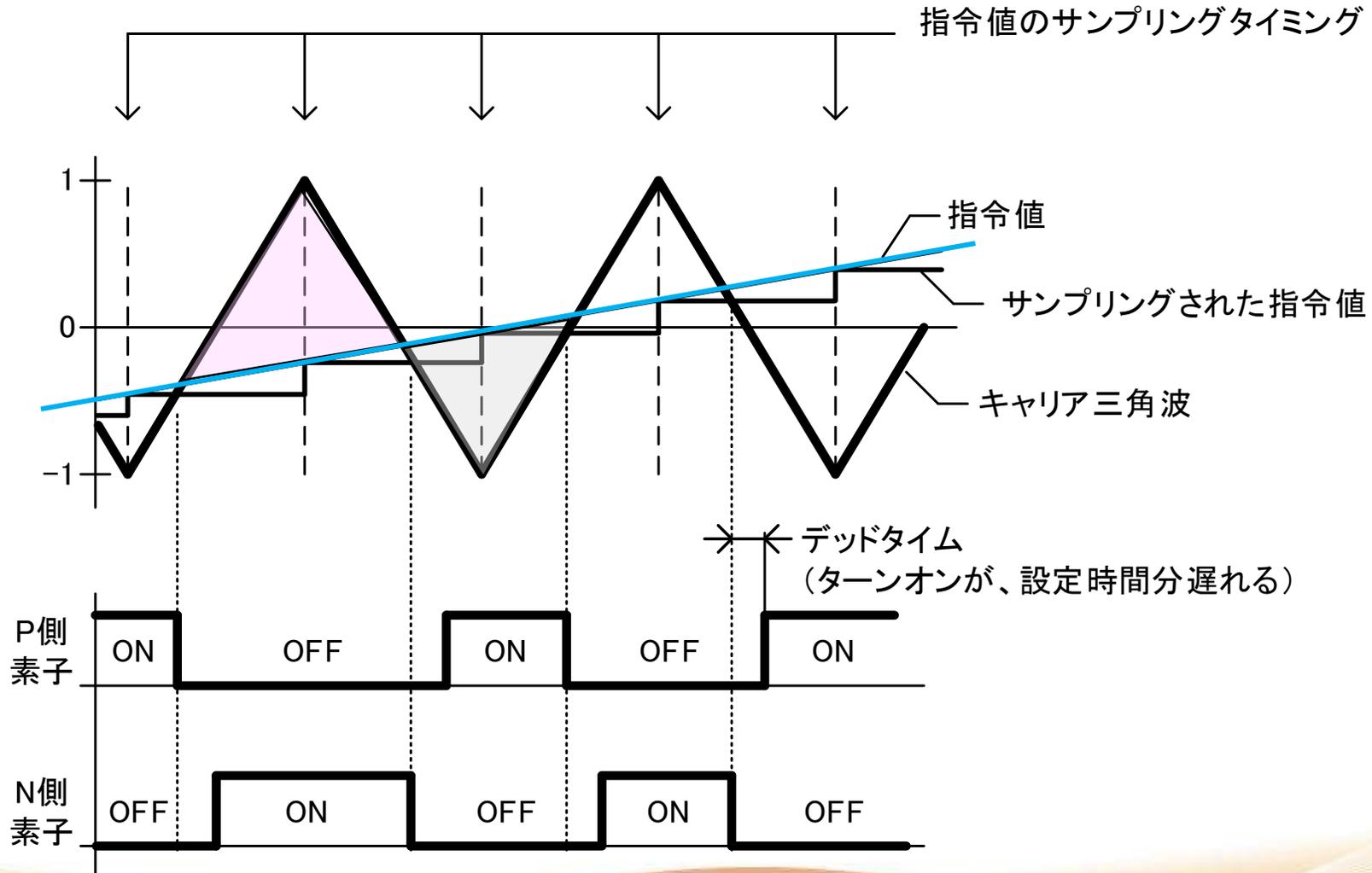


出力信号(内部設定、制御指令、外部出力)

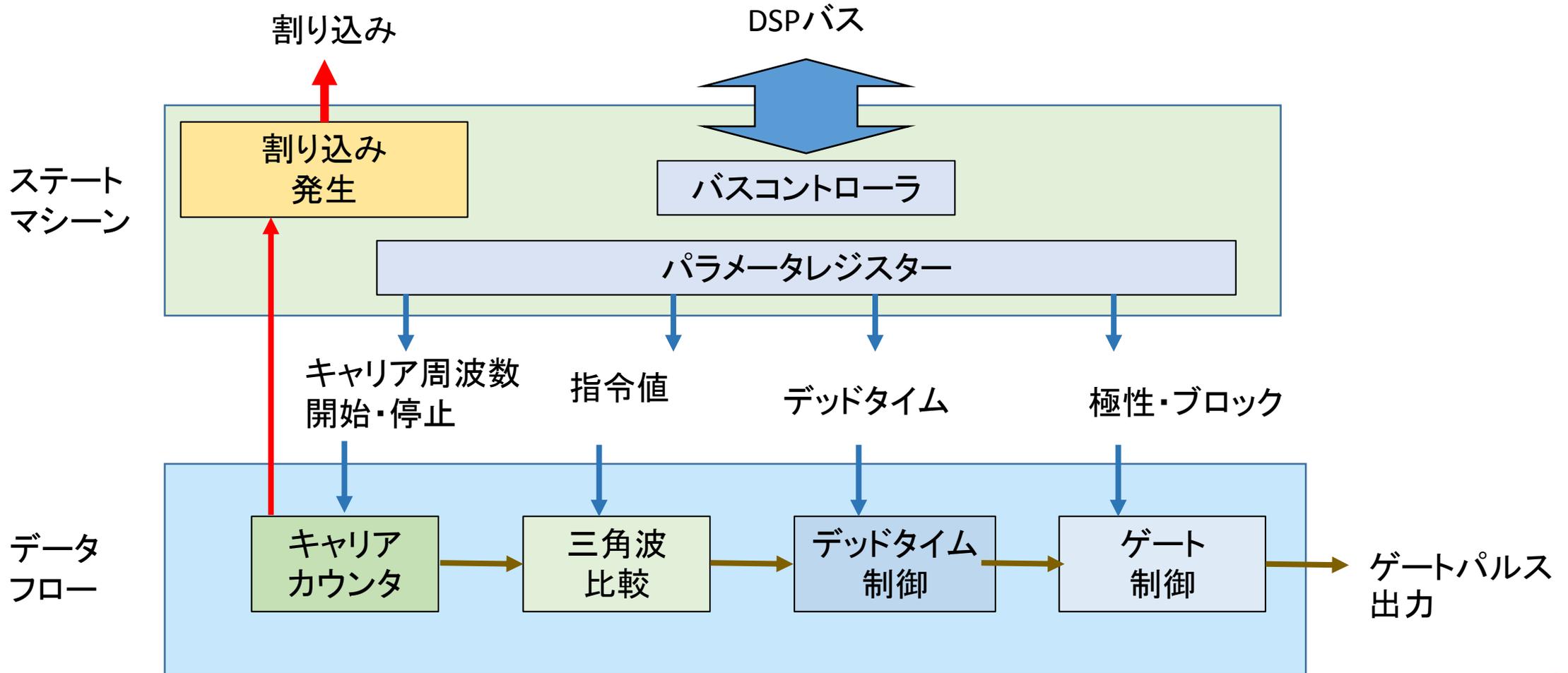
データフロー部



PWMゲートパルス生成部の例

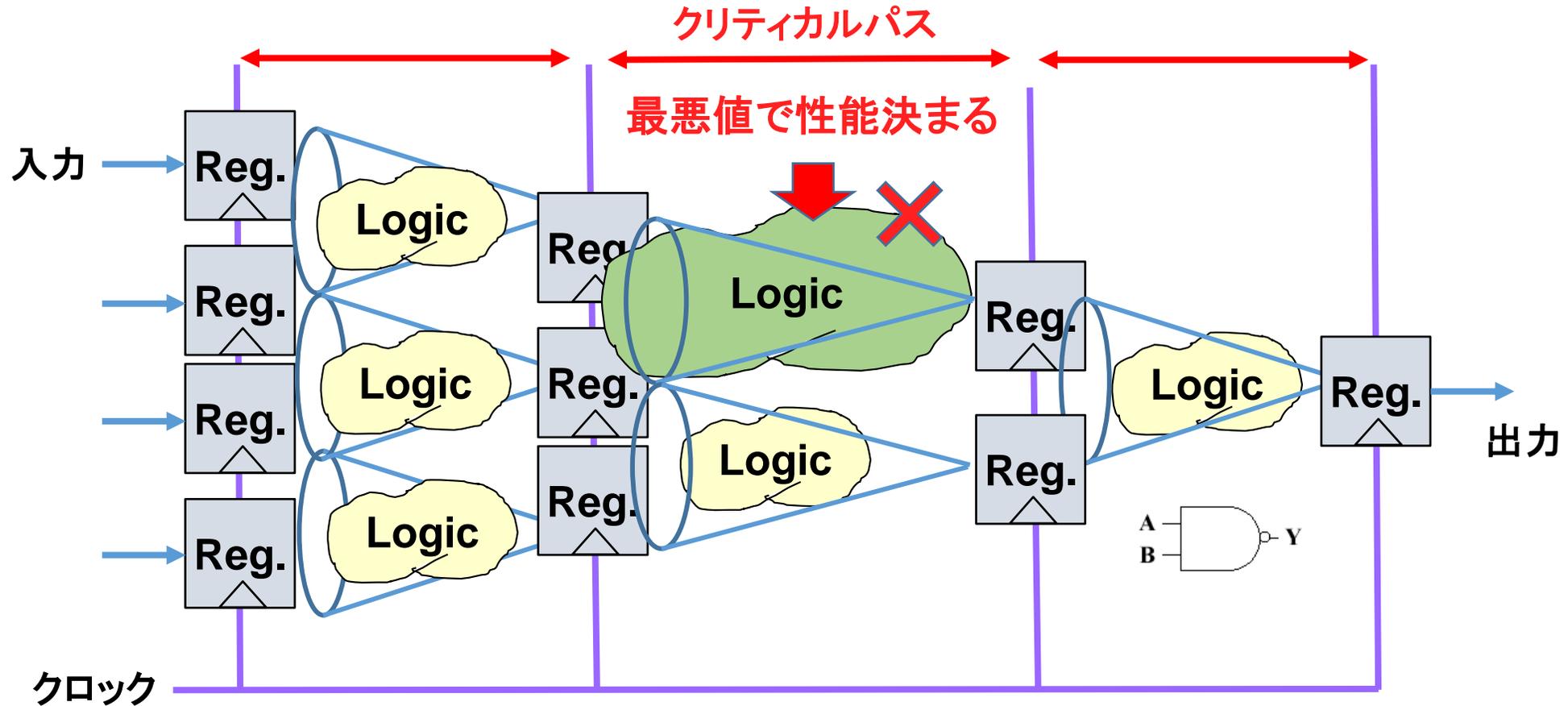


PWMゲートパルス生成部ブロック図



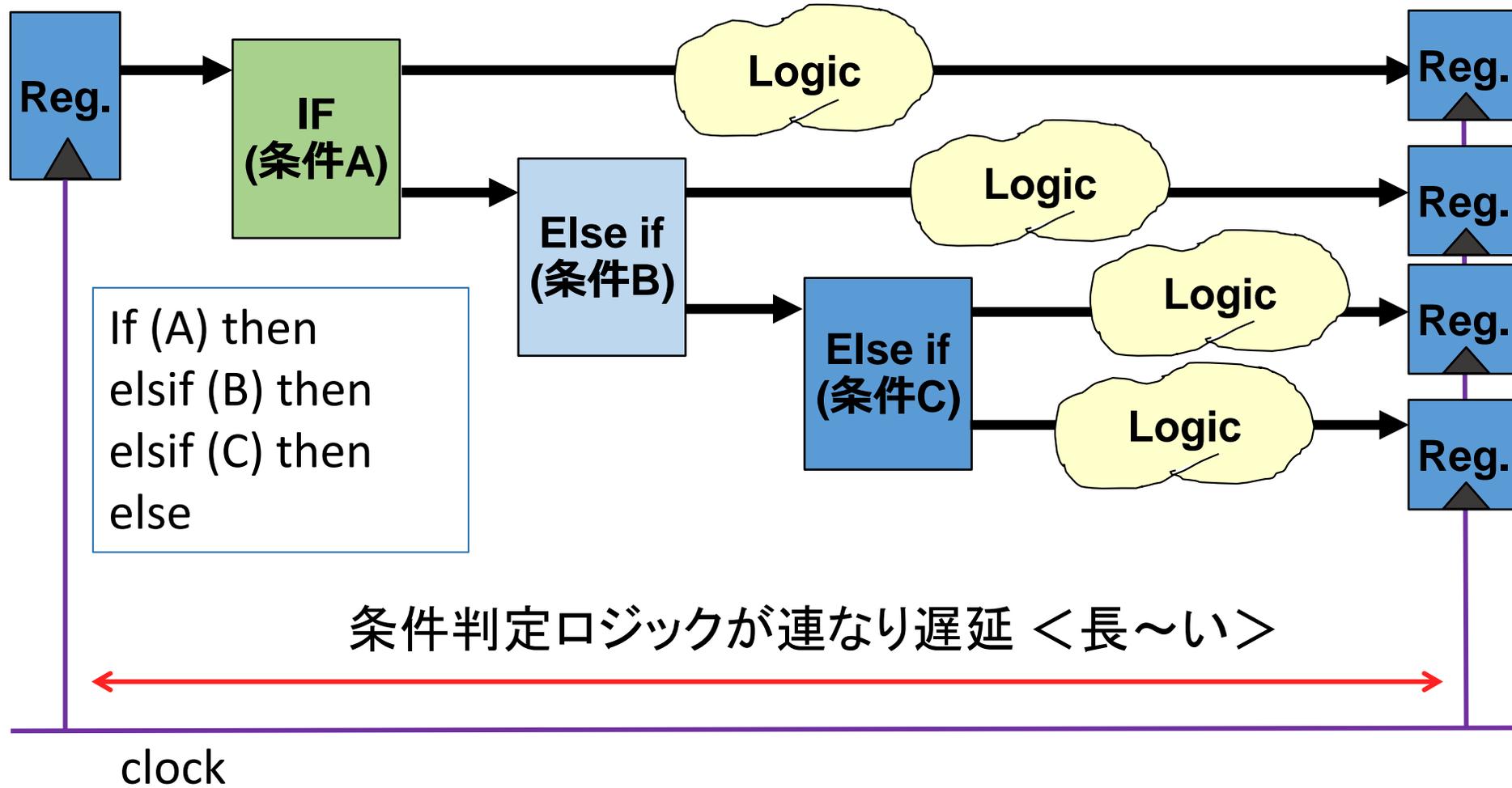
センスの良いコーディング

合成結果の回路を常に意識



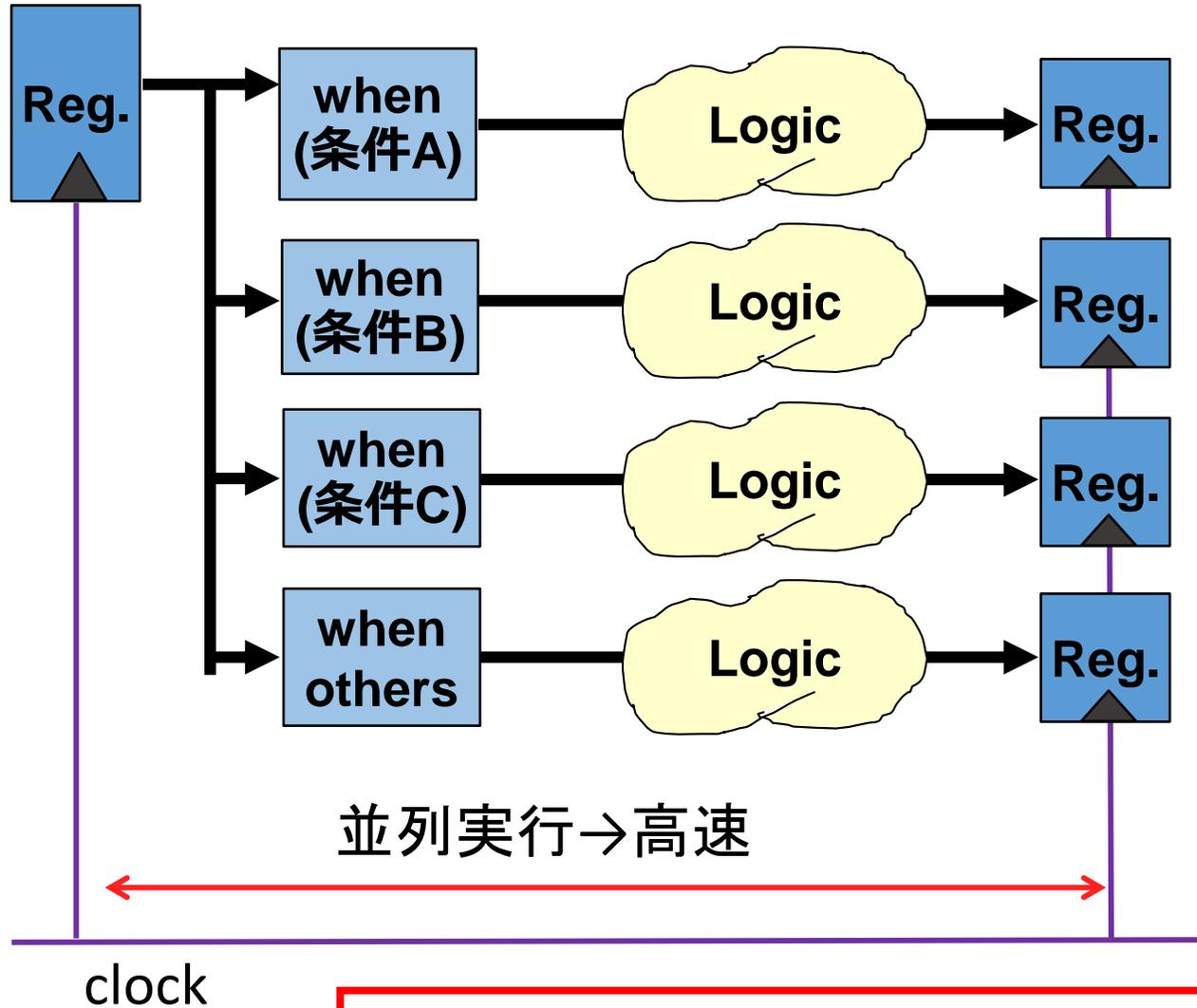
合成結果の回路をイメージして「バランス設計」
「最悪値」(クリティカルパス)が全てを台無し

プライオリティエンコーダは要注意 △



IFの連続に注意

Case文を活用しよう ○



条件成立が排他

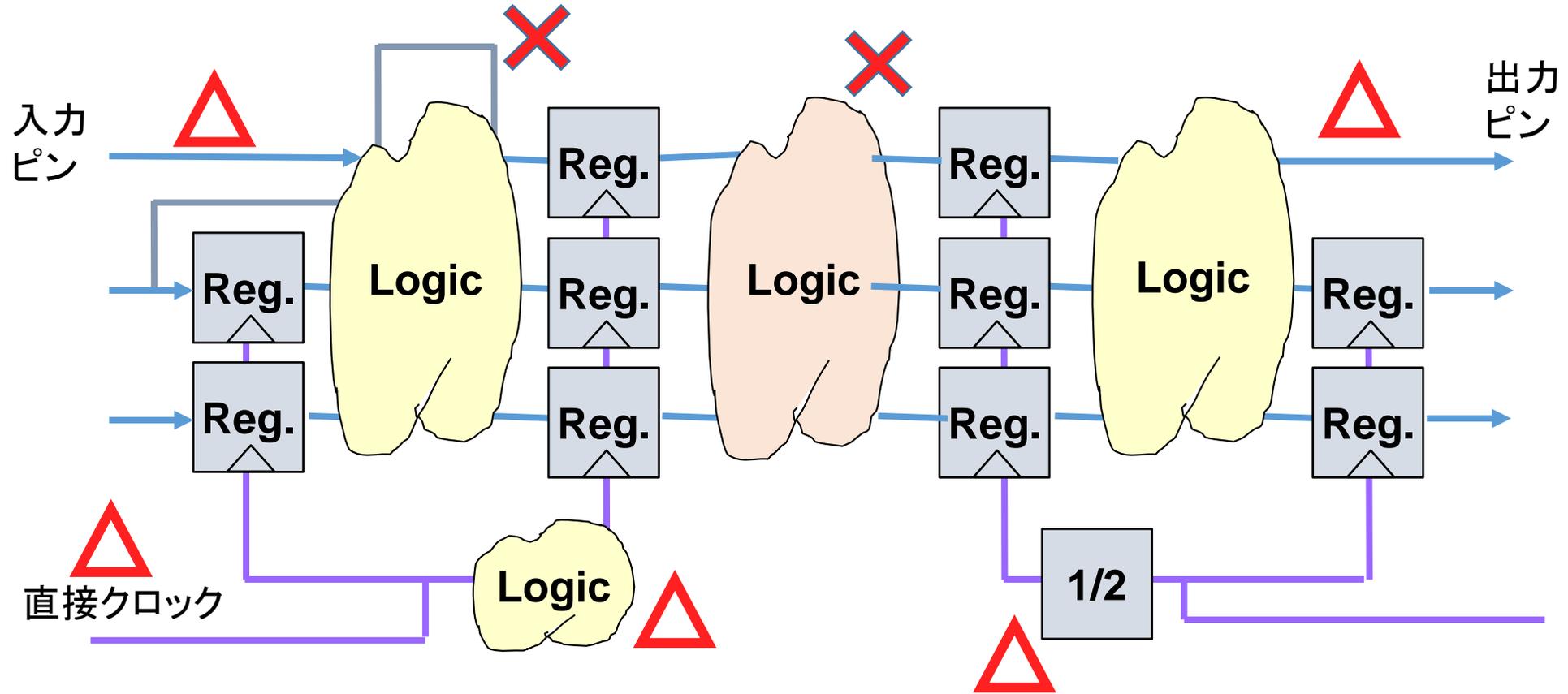
Case ABC is
when A
when B
when C
when others

ステートマシンの基本形

こんなことはありませんか？

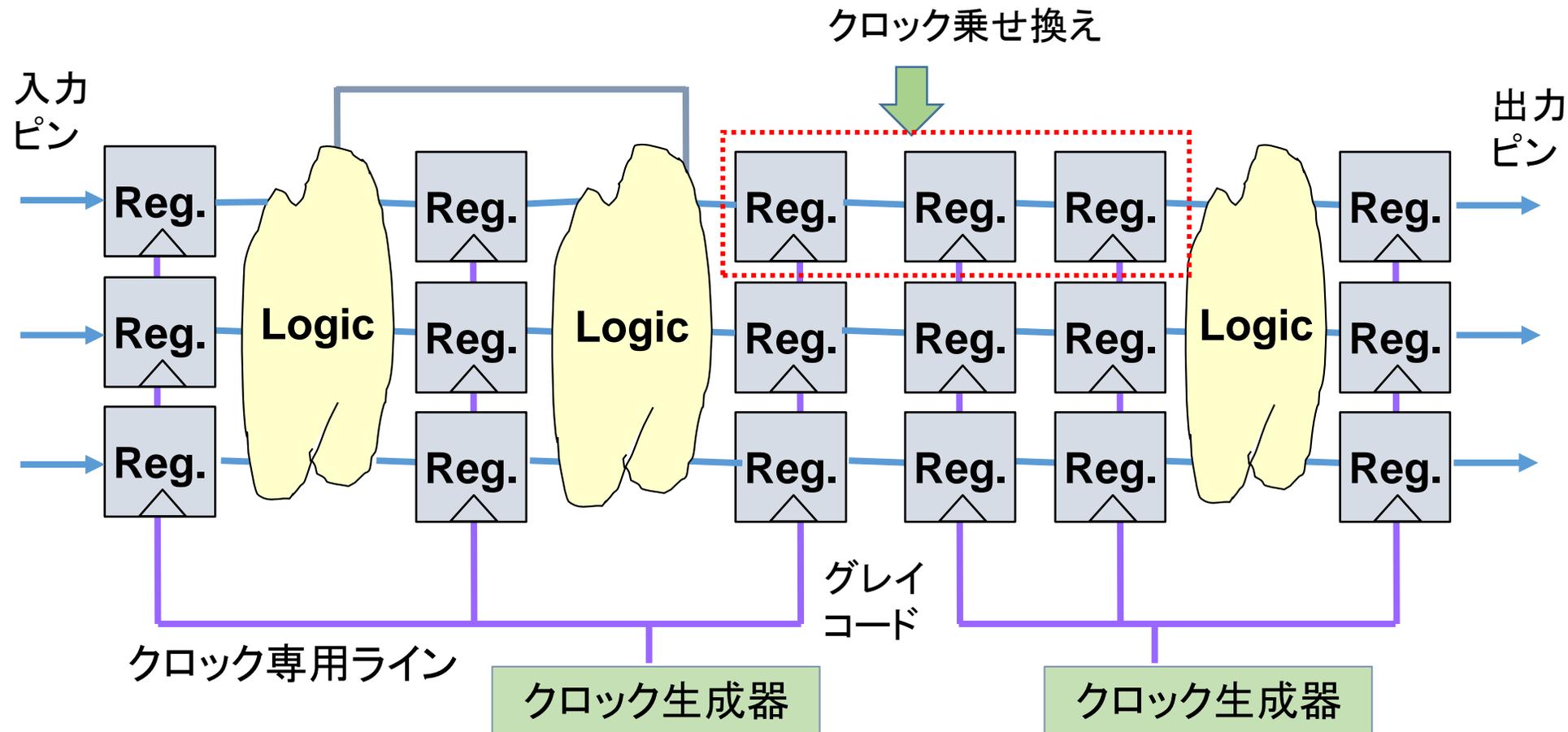
- コンパイルの度に動作が変わる
- 昨日は動いたのに、今朝は動かない
- 設計変更したら、無関係のはずの機能がおかしくなった
- 個体差で動作にばらつきがある

原因はこれかも・・・ 非同期設計



メタステーブル、ラッチ、レーシング、ヒゲ

同期設計 ○



単一クロック推奨、非同期は丁寧に乗せ換え
外部入出力はレジスタ受け・出し

より高度なコーディング

さらにより高度な設計へ

- IP活用、構造化設計
 - 再利用性、IPツール活用、パワエレ専用IP(Myway)
- 多様・高速なゲートパターン生成
 - 大規模高速カウンタ(分散・並列化)・テーブル活用
- 最後は物理設計
 - PAR(Place & Route)で高速回路(500MHz超 PWM)
- SoC (System on Chip)
 - DSP+FPGA バスを自在に
- 高位合成ツール？

高位合成ツール(参考)

- Mathworks社
 - HDL Coder: SimuLinkアルゴリズム設計→汎用HDL
- Xilinx社
 - System Generator: 信号処理マクロ+ブロックセット
 - Vivado HLS: C言語によるIP作成

ツールの限界 ≠ 自分の限界

開発の効率化 ≠ 習得の効率化

効率化の対象、開発フェーズ、費用対効果で活用

4. FPGAプラットフォーム紹介

4. FPGAプラットフォーム紹介

4-1. PE-Expert4ご紹介

4-2. 製品開発事例

4-3. アプリケーション事例

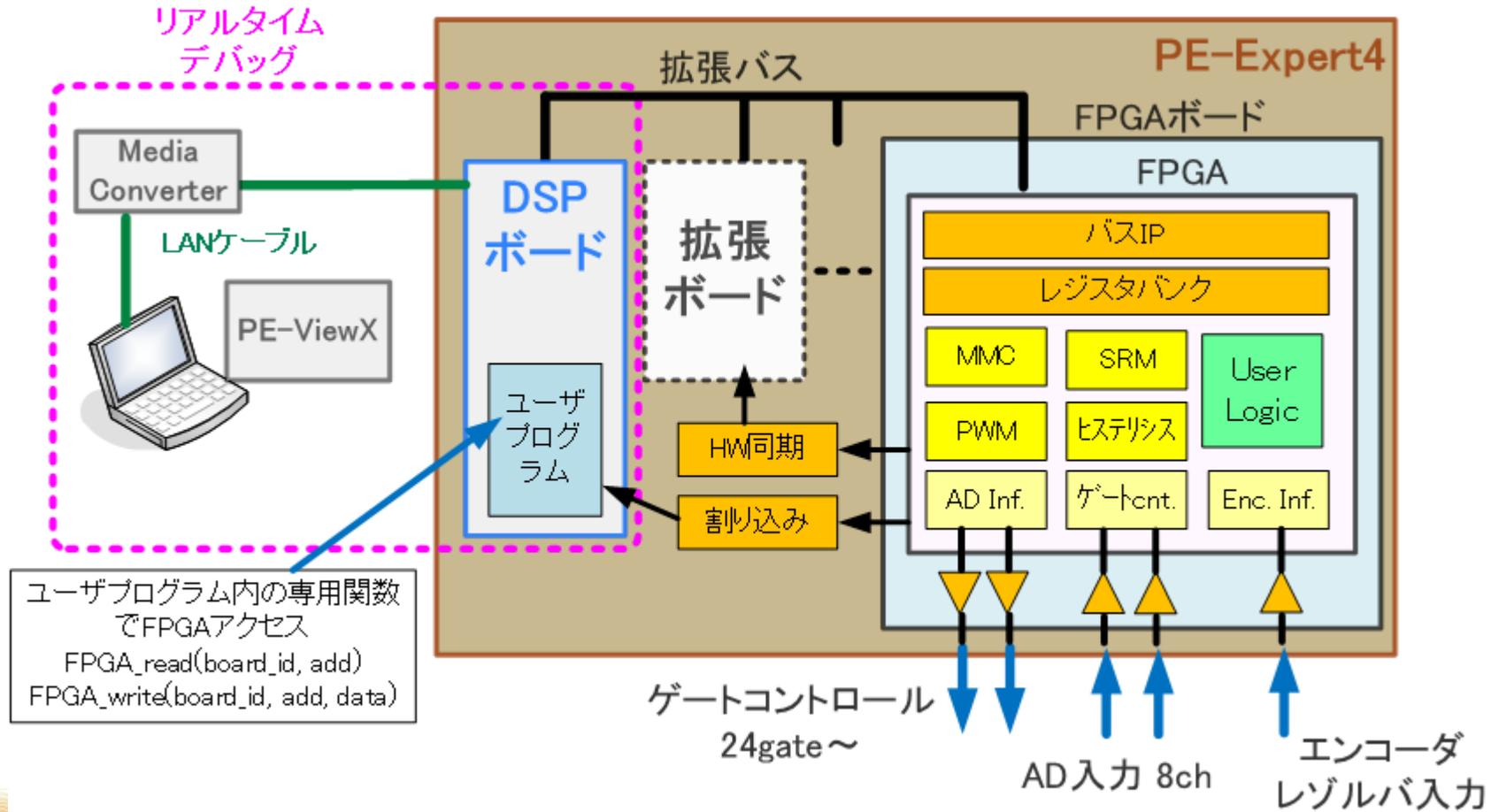
PE-Expert4ご紹介

パワエレFPGAプラットフォーム

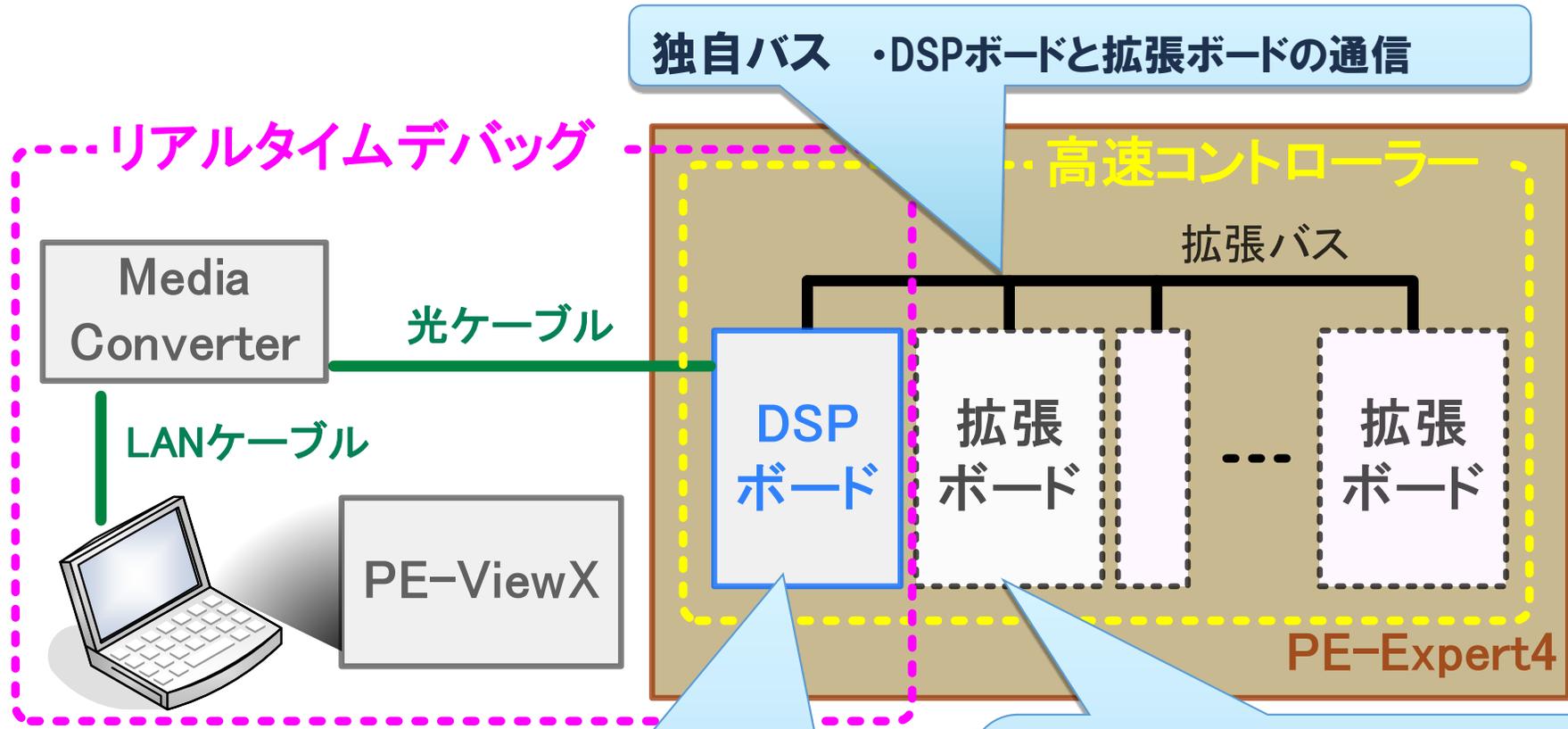


PE-Expert4 FPGAボード

パワエレ専用FPGAサンプル回路(IP)で効率開発



システム構成



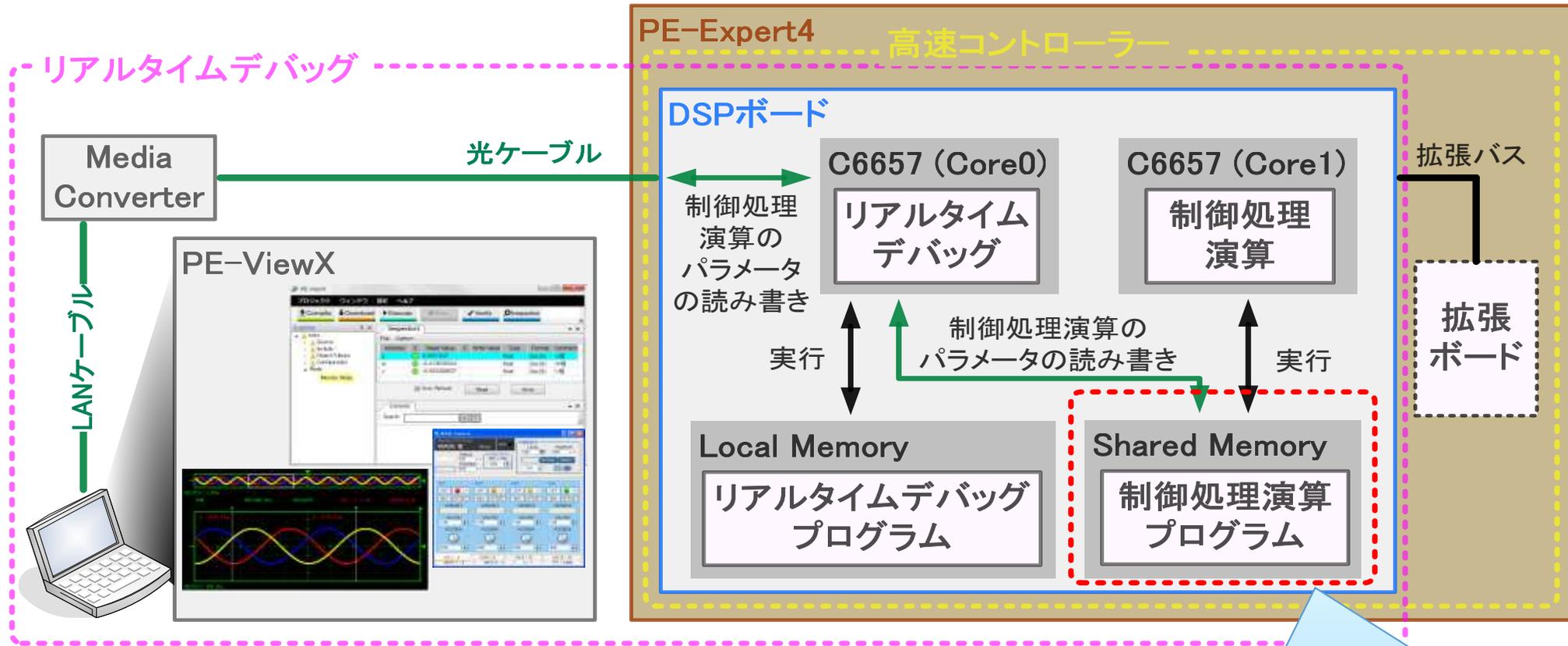
DSPボード

- ・制御処理演算 (1.25GHz)
- ・リアルタイムデバッグ (Dual Core) (TI TMS320C6657)

- ・PEVボード PWM制御
- ・ADCボード: AD変換
- ・DACボード: DA変換
- ・PIOボード: デジタルインターフェース
- ・FPGAボード: Xilinx FPGA搭載

リアルタイムデバッグ

制御とリアルタイムデバッグを、デュアルコアで独立に実現



- 両方のコアから同時アクセスできる
- 両方のコアは独立実行できる

製品開発事例

製品事例

大容量バッテリー充放電システム

MWCDS-060-040A1/MWCDS-075-04

選べる2つのモデル



電流リップル重畳機能により電池評価機能が向上

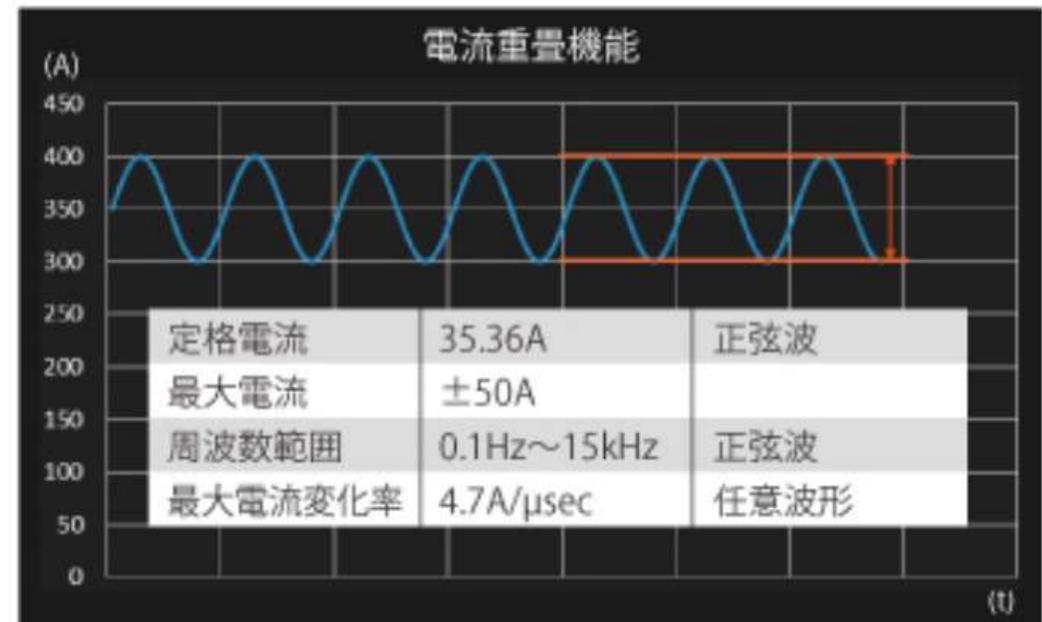
MWCDS-060-040A1

600V版

(600V/±400A/±100kW)

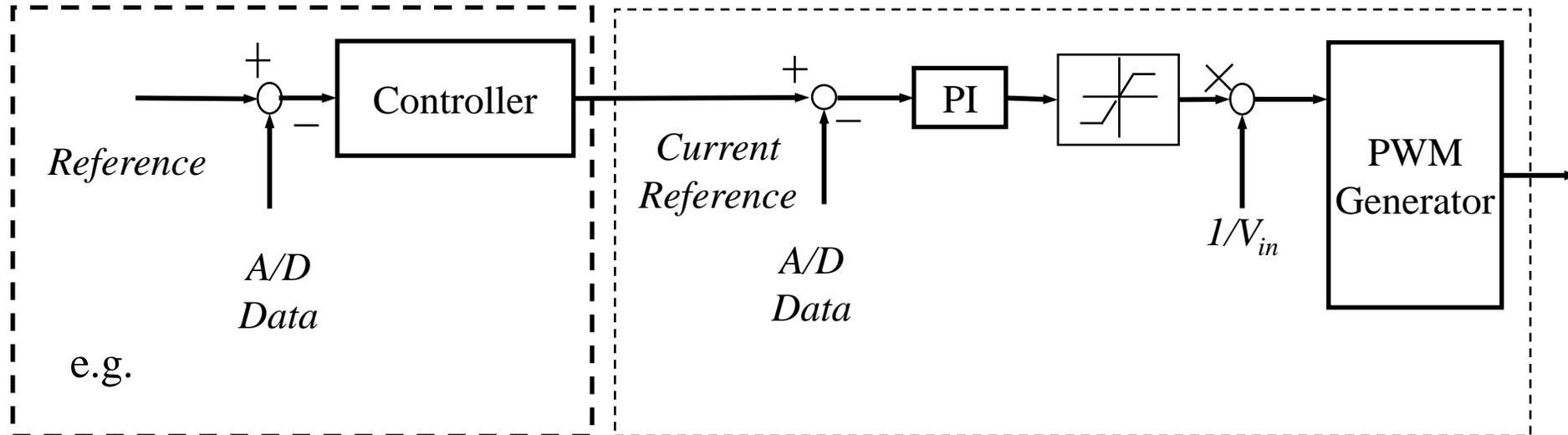
- 関連論文 (ECCE2018)
- Design Method of DC Power Supply for Superposing 20kHz/100A Peak to Peak Sinusoidal Current with Several Hundred DC Current to Analyze Battery AC Impedance
- [10.1109/ECCE.2018.8558032](https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8558032)

電流リップル重畳機能 (600Vモデルのみ)



High speed current control method

Brief control blocks between CPU and FPGA



CPU

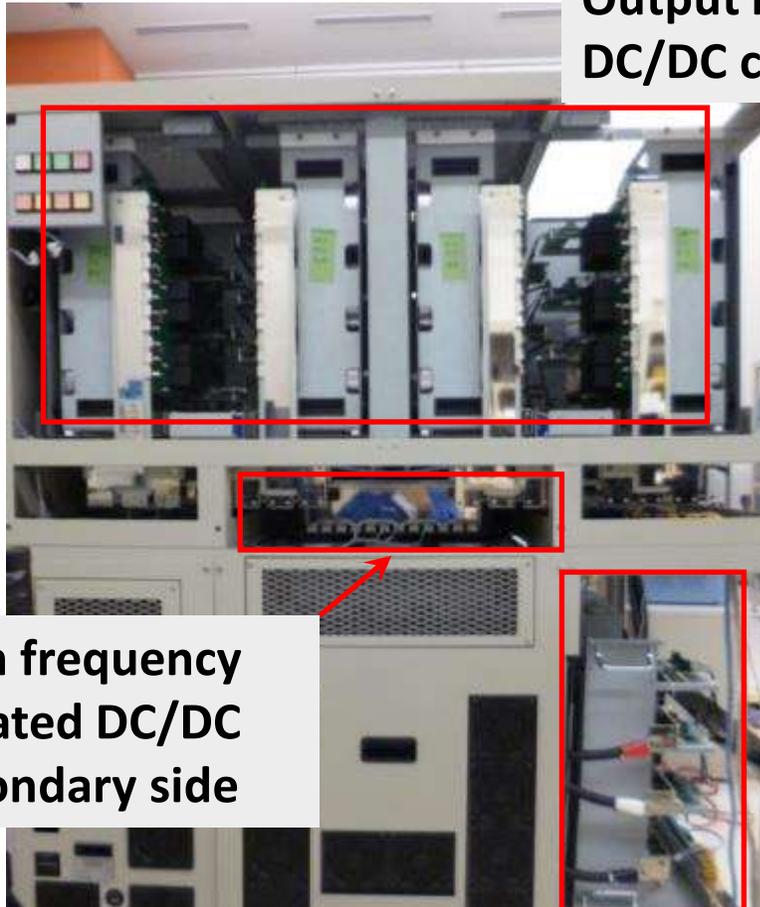
Control period: 50kHz

FPGA

Control period: 600kHz

Experimental results

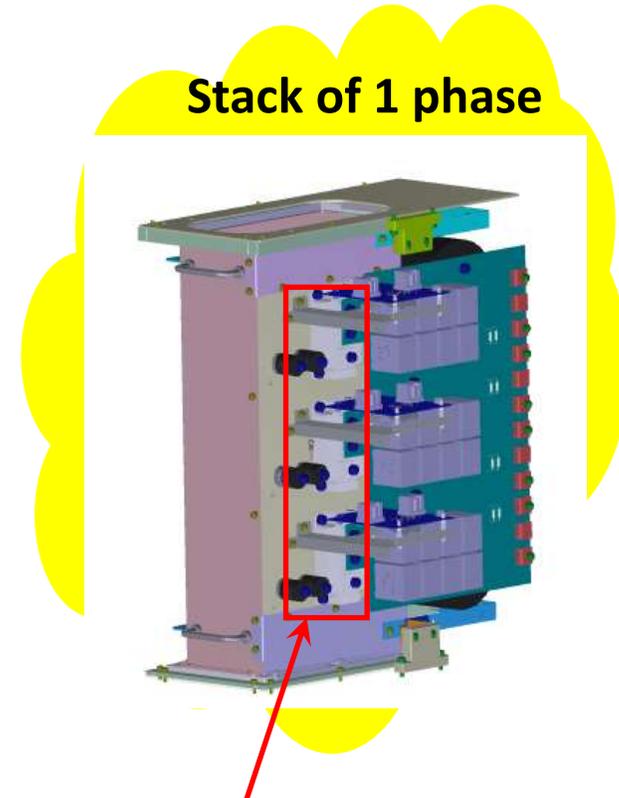
Bidirectional DC power supply(pCUBE-H)



Output multiphase DC/DC converter

High frequency isolated DC/DC secondary side

Three-phase PWM converter



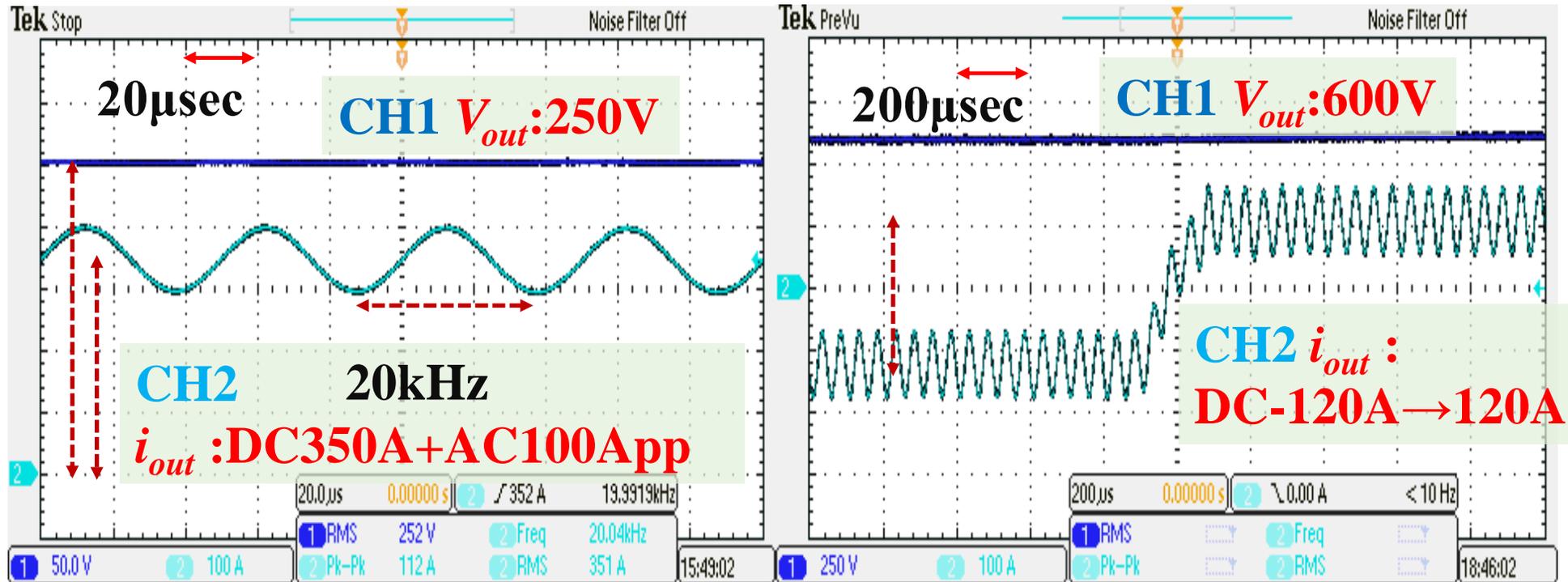
Stack of 1 phase

SiC MOSFET

Specification (**ALL SiC devices**): $V_{out} = 600V$ $i_{out} = 400A_{max}$ $P=100kW$

Experimental results

Electronic load using pCUBE-H



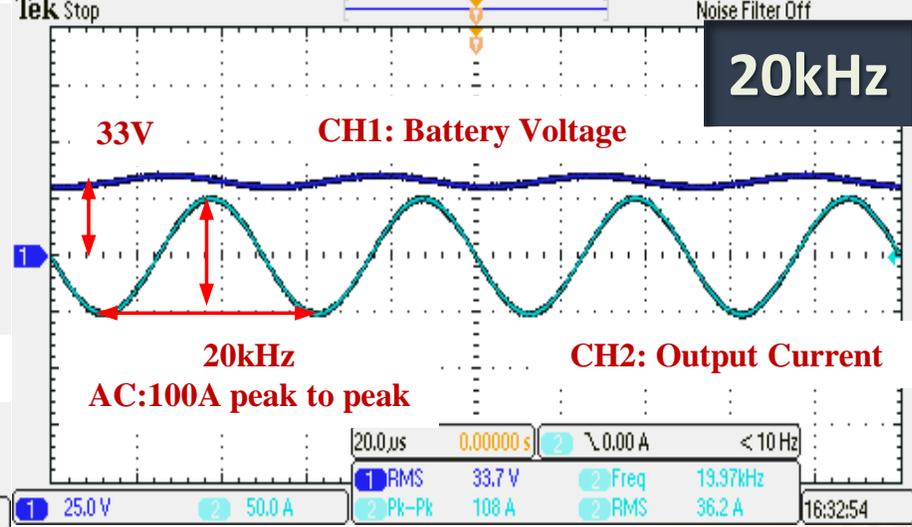
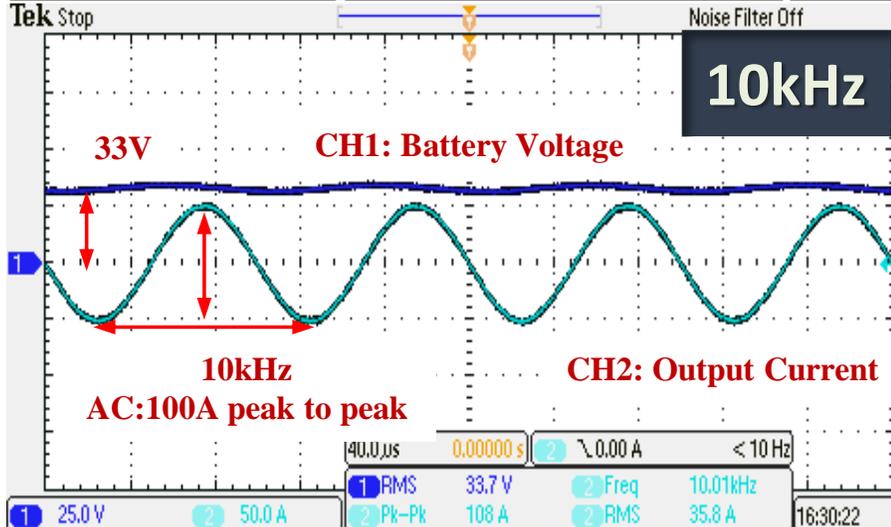
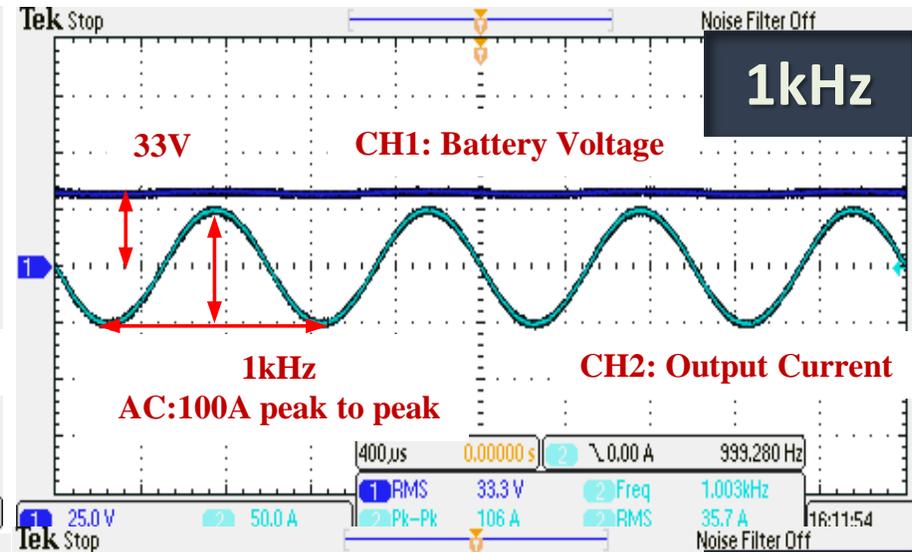
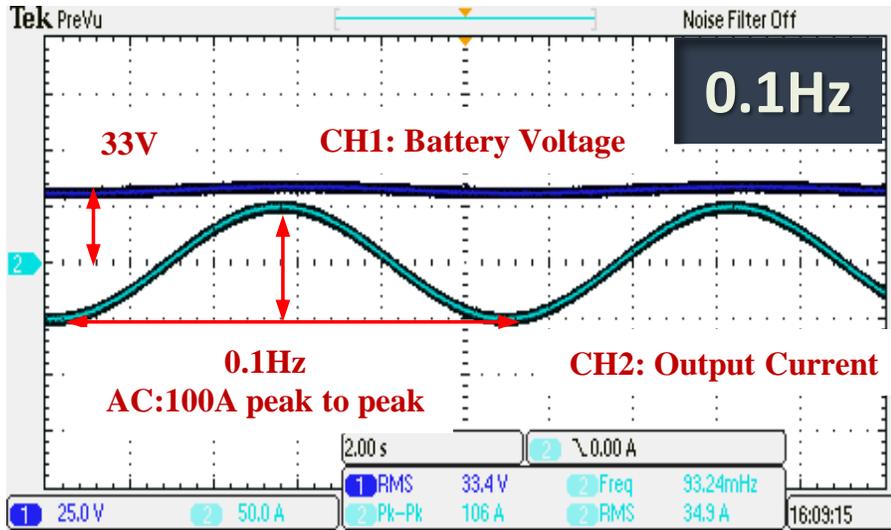
$V_{out} = 250V$, $i_{out} = DC 350A$
AC current is 100A_{pp} at 20kHz

$V_{out} = 600V$, $i_{out} = DC -120A \rightarrow 120A$
AC current is 100A_{pp} at 20kHz

The AC current can be **regulated instantaneously**

Experimental results

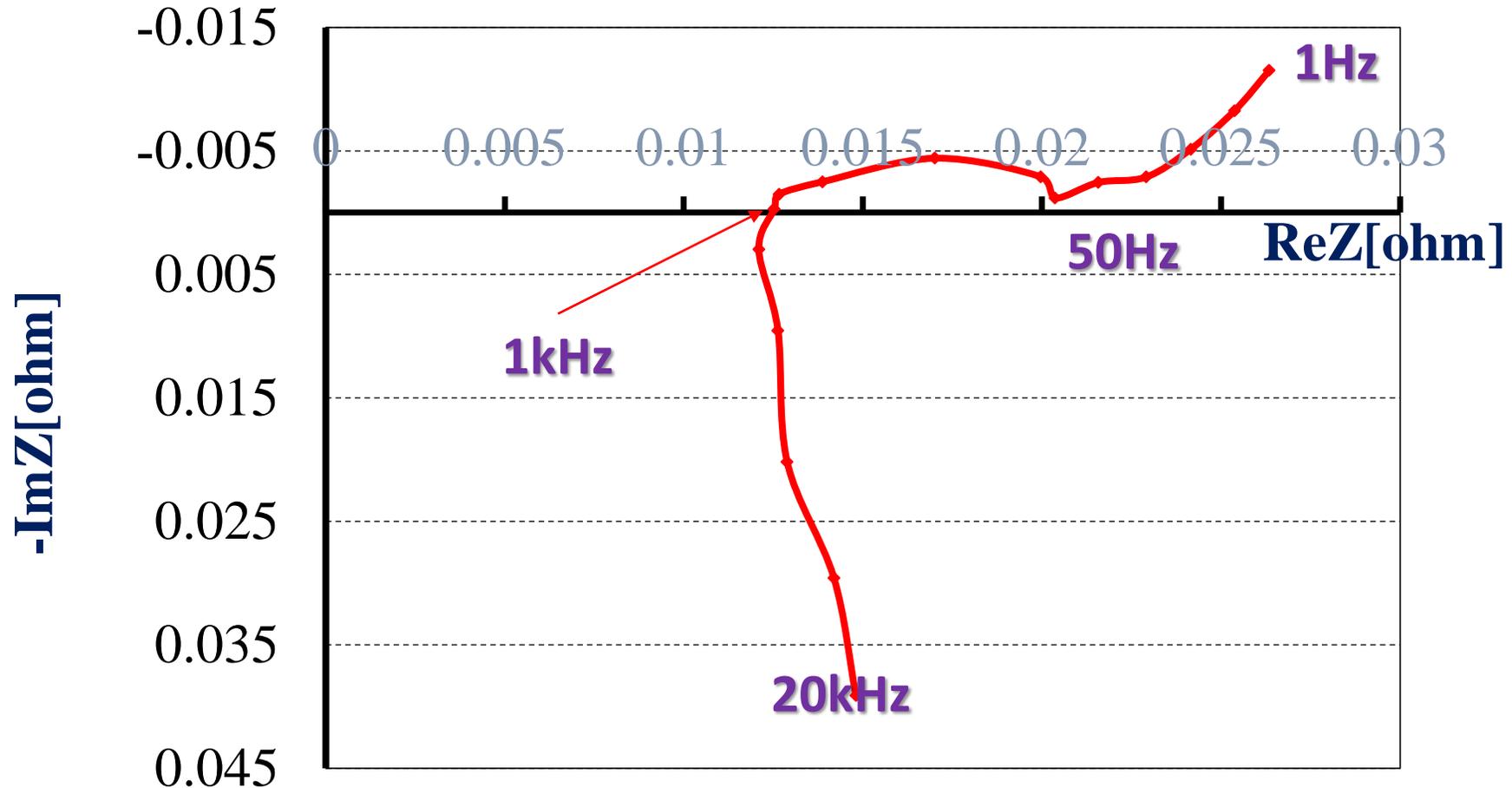
Battery load



$V_{battery} = 33V$, AC current is 100App from 0.1Hz to 20kHz

Experimental results

Battery impedance

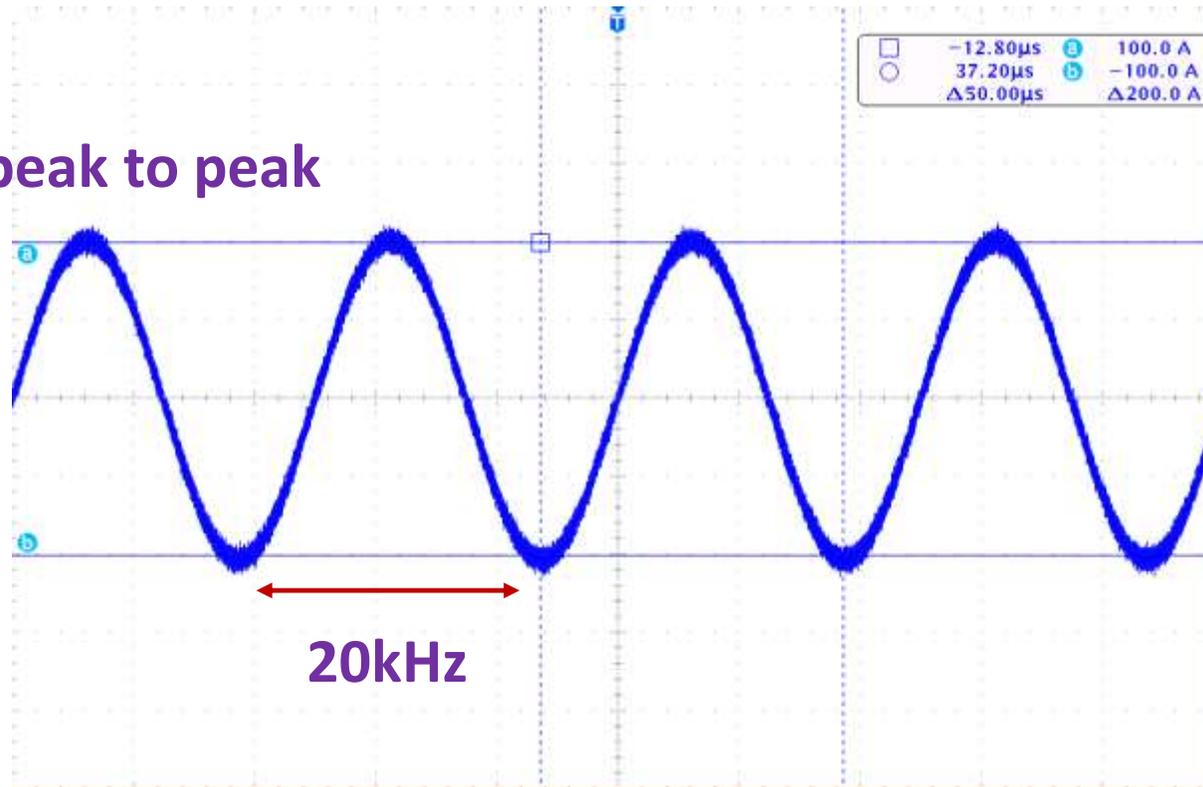


**the proposed method can satisfy the demands of analyzing
battery AC impedance**

Experimental results

Parallel connection

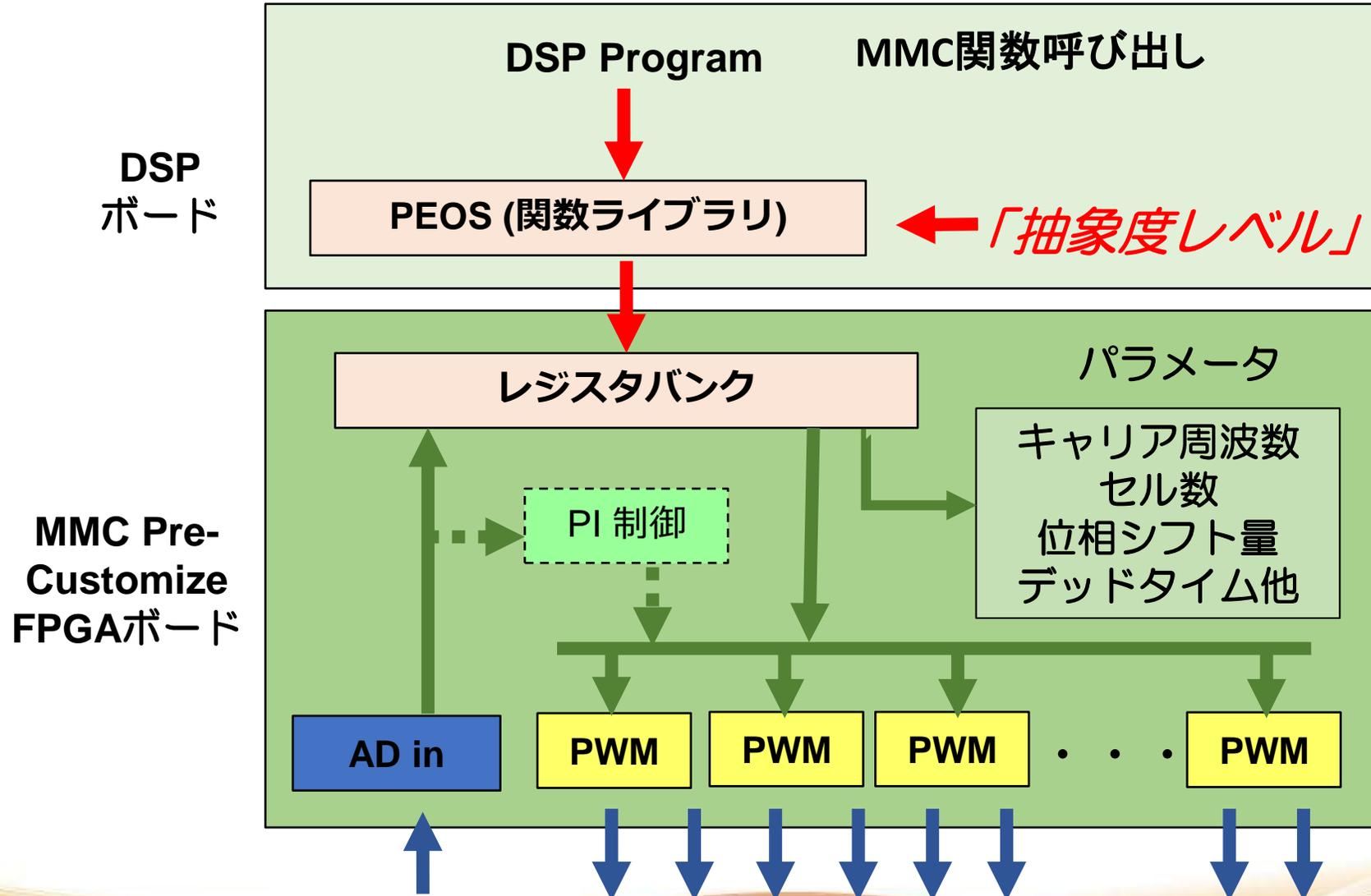
AC200A peak to peak



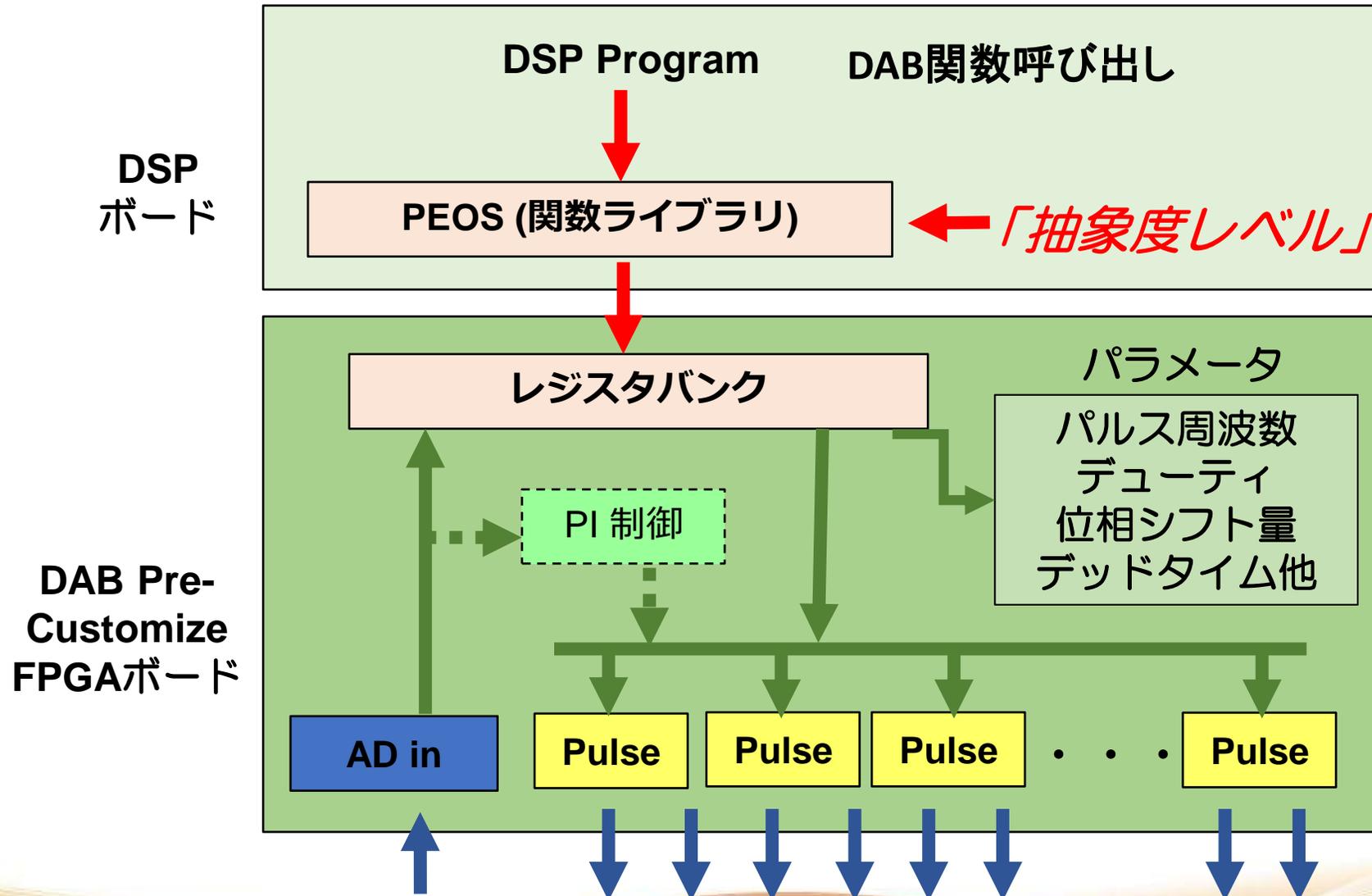
- **Low current distortion**
- **Phase synchronization**

アプリケーション事例

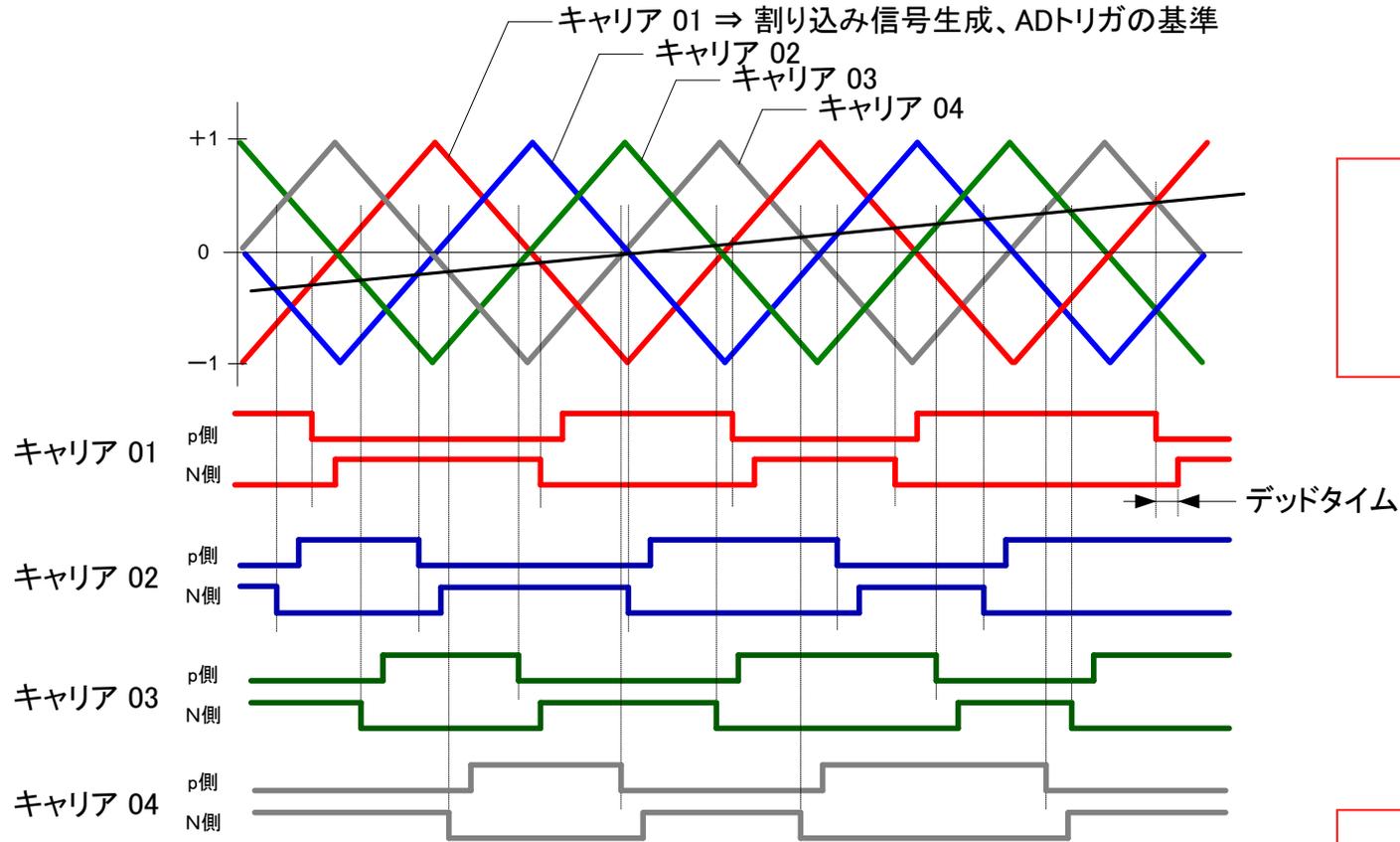
専用C関数からFPGAを制御



高精度位相制御 DAB



マルチフェーズ キャリアシフトPWM制御



空間的拡張性
の活用
(多ゲート制御)

HWロジックとSWの切
り分け(適材適所)

SWインターフェース

関数機能: マルチレベルPWM生成機能の初期化

```
INT32 MLPWM_inverter_init ( INT32 bdn, INT32 fc, INT32 level, INT32 dt);
```

関数機能: 三角波キャリア比較変調の指令値設定

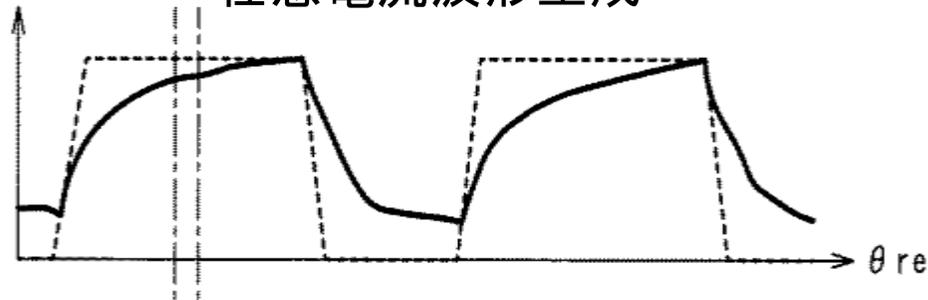
```
INT32 MLPWM_inverter_set_uvw ( INT32 bdn, FLOAT32 u, FLOAT32 v, FLOAT32 w);
```

FPGA活用例 任意波形

事例紹介

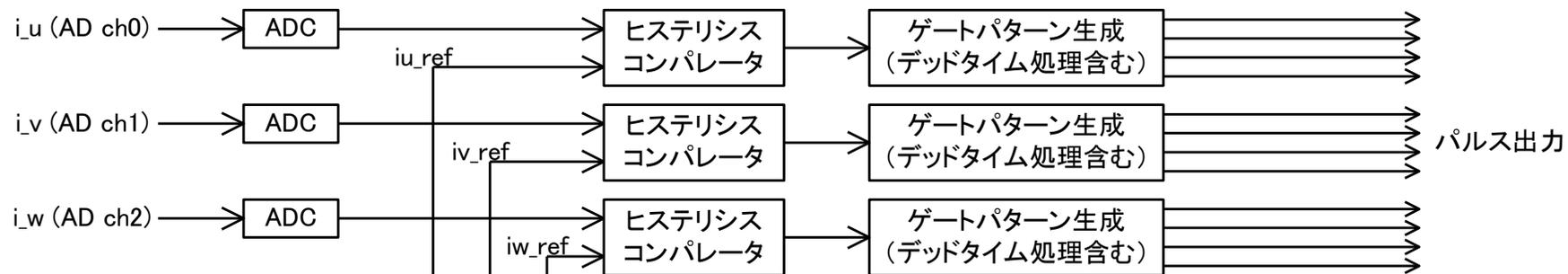


任意電流波形生成



電流値

FPGAブロック図



Hブリッジゲート制御
(正・負・ゼロ)

角度
情報

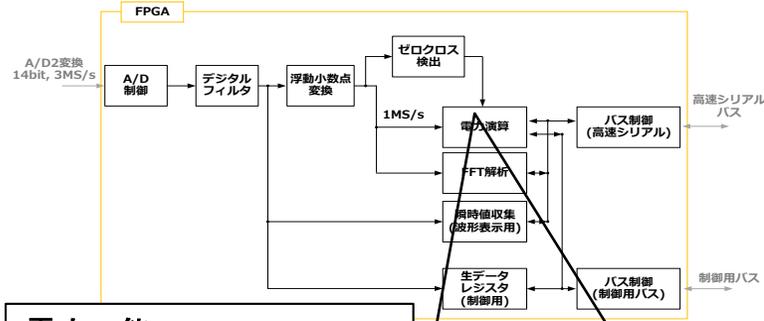


任意波形テーブル(各相個別)

パワーメータ機能の概要(計測項目)

事例紹介

Myway
it's a passion way



電力LC能
(サンプリング: 1MS/s)

$$X_{rms}(i) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{s=1}^M (X(i)s)^2}$$

$$X_{mn}(i) = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M |X(i)s|$$

$$S(i) = U_{rms}(i) \times I_{rms}(i)$$

$$P(i) = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M (U(i)s \times I(i)s)$$

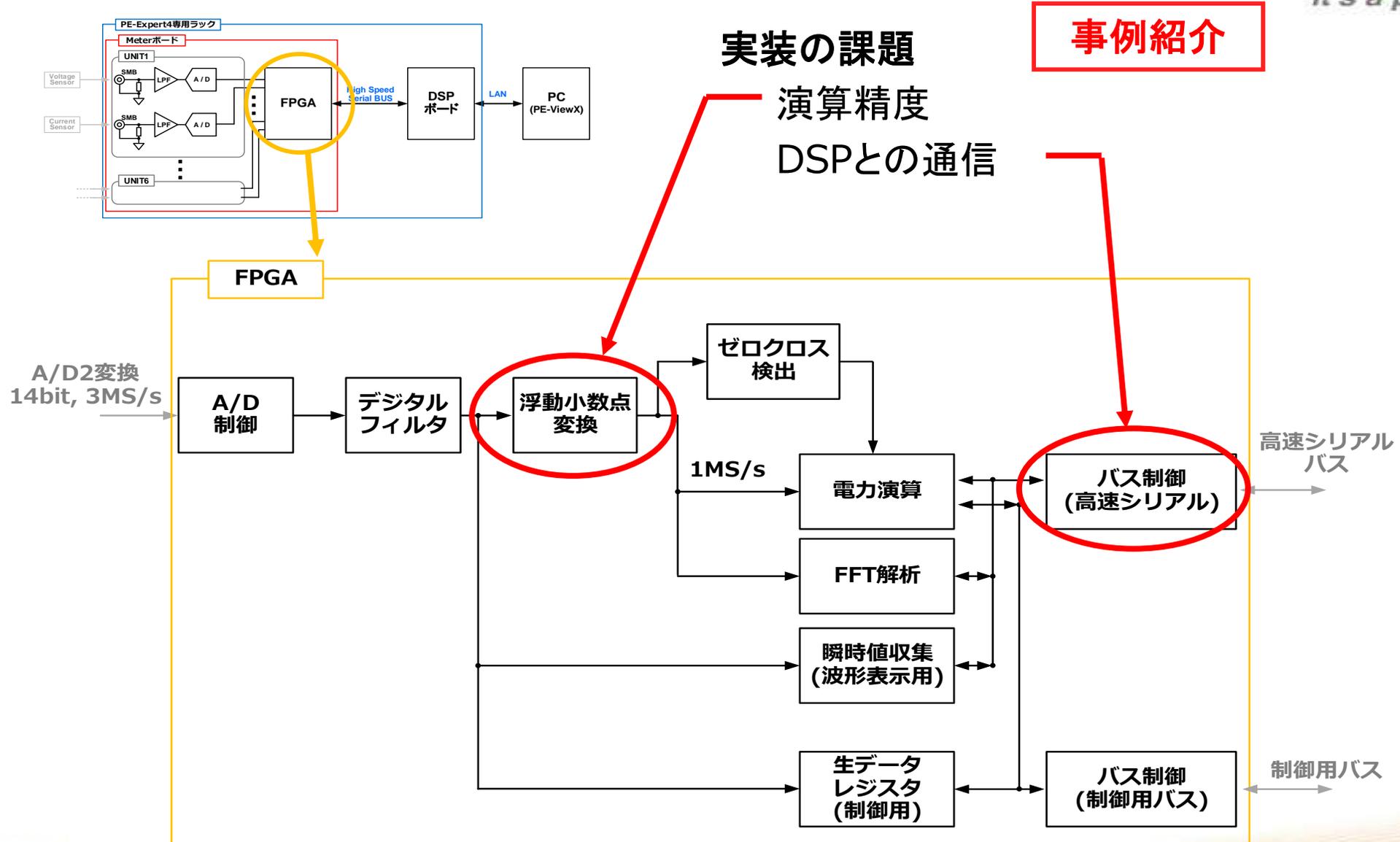
$$Q(i) = si(i) \sqrt{S(i)^2 - P(i)^2}$$

⋮

計測項目	記号	単位
電力系計測項目		
有効電力	P	W
無効電力	Q	var
皮相電力	S	VA
位相角	φ	deg.
力率	λ	
電圧実効値	Urms	V
電流実効値	Irms	A
電圧平均値整流実効値換算	Umn	V
電流平均値整流実効値換算	Imn	A
電圧直流成分	Udc	V
電圧交流成分	Uac	V
電流直流成分	Idc	A
電流交流成分	Iac	A
周波数	f	Hz
電圧ピーク+	Upk+	V
電圧ピーク-	Upk-	V
電流ピーク+	Ipk+	A
電流ピーク-	Ipk-	A
電圧瞬時値	U	V
電流瞬時値	I	A
効率	η1~η4	%
高調波解析計測項目		
高調波電圧値	—	V
電圧高調波含有率	—	%(for Fud)
高調波電流値	—	A
電流高調波含有率	—	%(for Fud)
高調波有効電力	—	W
総合高調波電圧歪率	THD	%
総合高調波電流歪率	THD	%
機械系計測項目		
回転		
トルク		
温度計測項目		
温度	temp	℃

既存の計測機器と同様の計測項目を実装

パワーメータ機能の概要(システム構成)



ご清聴ありがとうございました

The screenshot shows the PWEL website's community section. At the top left is the PWEL logo (power electronics association) and the text '一般社団法人 日本パワーエレクトロニクス協会'. To the right are buttons for 'お問い合わせフォーム', '会員登録', and 'ログイン'. A navigation bar contains links for '協会について', '入会案内', 'お知らせ', 'コミュニティ', 'eラーニング', '技術情報', 'セミナー情報', '推薦図書', and 'マイページ'. Below this is a search bar with the text 'キーワードで検索' and buttons for '未回答', '検索', and '質問する・投稿する'. The main content area is divided into two columns. The left column, titled '人気の記事(閲覧数順)', lists five articles with their titles and categories. The right column, titled '質問カテゴリ', lists various technical topics such as '回路シミュレータPSIM', '統合開発環境', '組込基板開発', '電力変換回路', 'パワーデバイス', 'インバータ・コンバータ', 'モーター制御', and '充放電試験装置'. Below this is a '投稿カテゴリ' section with links for 'パワエレ教材制作コンテスト', '自作回路・試作品紹介', and 'お知らせ'. At the bottom right, there is a '新着 (質問・投稿一覧)' section.

「日本パワエレ協会」「PWEL」で検索(pwel.jp)→「コミュニティ」をクリック