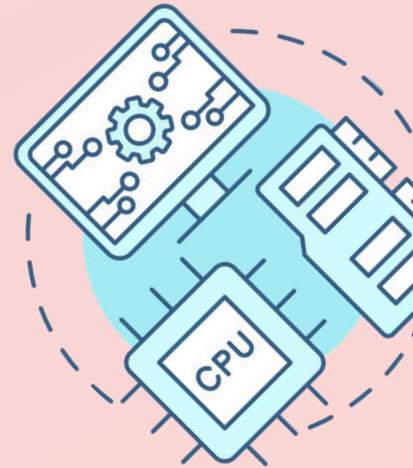


# コンピュータアーキテクチャ 演習 (3)

## Computer Architecture Exercise (3)

情報工学系 Berjab Nesrine

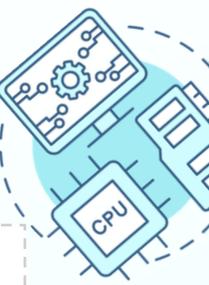


Computer Architecture support page :

<https://www.arch.cs.titech.ac.jp/lecture/CA/>



# コンピュータアーキテクチャ 演習の注意点 (1)



## □ 連絡について

- 連絡は **Slack** を使用する。登録がまだの場合は速やかに行うこと。招待メールが来ていない場合は、教員あるいはTAにmアドレスを伝え再送要求すること。

## □ 演習について

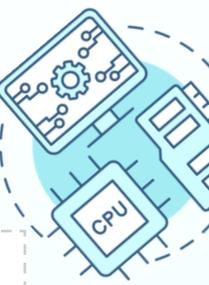
- 演習は **15:25~17:05** の時間で行う。**15:20** までに学術国際情報センター 3階、**情報工学系計算機室**に集合すること。**15:45** までに到着しない場合、欠席扱いになる。
- 最初の15分は課題の説明、その後は課題の進行とチェックポイントの確認を行う。演習ではACRi ルームを利用する。



## □ グループ作業

- 3人のグループを作成し、グループ内で情報を共有しながら演習を進める。問題が発生した場合、まずグループ内で相談し、それでも解決しない場合は TA や教員に質問すること。

# コンピュータアーキテクチャ 演習の注意点 (2)



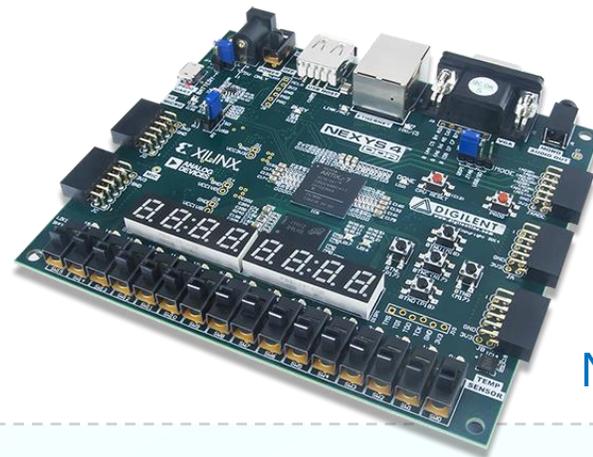
## □ 出席について

- 演習には出席点があるため、全ての授業に休まず参加すること。チェックポイントの図が演習スライドに示されている箇所で、作業の確認を受ける。全てのチェックポイントをクリアすることを目指す。



## □ 演習時間外について

- 演習時間外にも手元の FPGA ボードや ACRI ルームを利用できる。
- 手元のFPGA ボードの貸出も可能なので、独自のハードウェア設計に挑戦してみよう！



Nexys4 DDR Artix-7 FPGAボード



# 【重要】ACRiルームのサーバの予約

- ❑ ACRi ルームのアカウントを使って、次の URL からログインする。

<https://gw.acri.c.titech.ac.jp/wp>

- ❑ アカウントがなければ、今、次の URL のページを参考にアカウントを申請すること。

<https://gw.acri.c.titech.ac.jp/wp/manual/apply-for-account>

- ACRi ルームでは、次の2種類のアカウントを使用している。

1. Web 予約システム用アカウント
2. Linux サーバログイン用アカウント

- 2つのアカウントで同じ「ユーザアカウント名」を使っているが、別々の「パスワード」が設定されているので注意すること。

- ❑ 「予約ページトップ」から、**vs0xx~vs7xx**で始まるサーバで演習の日の**15:00~18:00**の枠を予約すること。



ACRi ルームへようこそ！

📅 2024.09.24 🕒 2020.06.14

ようこそ。ACRi ルームは、100枚を超える FPGA ボードや [Alveo](#), [Versal](#) を含むサーバ計算機をリモートからアクセスして利用できる FPGA 利用環境です。

利用にはアカウントが必要です。[利用規約](#)と右カラムの利用説明をよく読んだ上で、[アカウントを申請](#)してください。提供された個人情報は[プライバシーポリシー](#)に従って管理・利用します。

【メンテナンス予告】ACRi ルームへのログイン時に最初に接続するサーバの更新を、9月24日 18:00 ごろに実施しました。SSH 接続時にエラーが出た場合は、`ssh-keygen -R gw.acri.c.titech.ac.jp` で既存の接続先情報を削除してください。(2024-09-24)

【復旧情報】ハードウェアトラブルにより稼働を停止していた as006 のサービスを再開しました。(2024-06-27)

ACRi ルームをより楽しむためのコンテンツとして、高位合成向けのプログラミングコンテストである [ACRi HLS Challenge](#) を開設しております。併せてご利用ください。チャレンジや高位合成に関する質問・コメントは [HLS Challenge についてのフォーラム](#) へどうぞ。

## 日別スケジュール

<前日 2024-10-08 \* 翌日> 移動 サーバ: 全て表示

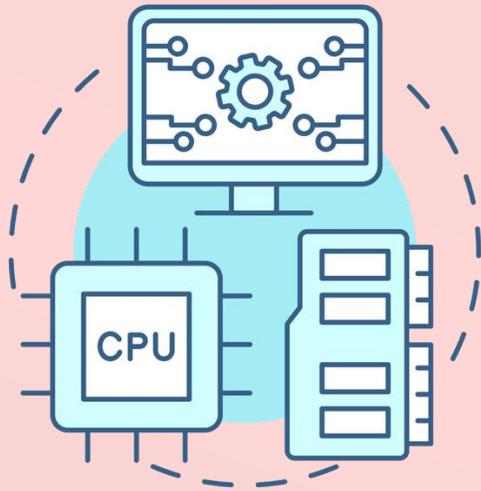
サーバ	vs001	vs002	vs003	vs004	vs005	vs006	vs007	vs008
00:00	Close							
03:00	Open							
06:00	Open							
09:00	Open							
12:00	Open							
15:00	Open							
18:00	Open							
21:00	Open							



# 演習第四回の内容 (Project 4)

## □ 目的:

- この演習の目的は、シングルサイクルのRISC-Vプロセッサを使って、文字「a」を出力するアセンブリコードを書き、その動作をシミュレーションとFPGAの両方で確認すること。
- この演習は、2つの部分に分かれている。
  - **Part 1:** アセンブリ言語プログラミング + シミュレーション。
    1. 「a」という文字を出力するアセンブリコードを記述する。
    2. Venus シミュレータを使って、アセンブリコードを機械語に変換する。
    3. 機械語をシミュレーションで実行し、「a」という文字が出力されるか確認する。
  - **Part 2:** FPGA
    1. 機械語に変換されたコードを FPGA 上で実行する。
    2. 「a」という文字が正しく出力されるかを確認する。



# Project 4

(Part 1)



# 演習第四回の内容 (Project 4-Part 1)

## □ 目的:

- この演習の目的は、シングルサイクルのRISC-Vプロセッサを使って、文字「a」を出力するアセンブリコードを書き、その動作をシミュレーションで確認すること。
- Steps:
  1. 「a」という文字を出力するアセンブリコードを記述する。
  2. Venus シミュレータを使って、アセンブリコードを機械語に変換する。
  3. 機械語をメモリに書き込む。
  4. 機械語をシミュレーションで実行し、「a」という文字が出力されるか確認する。



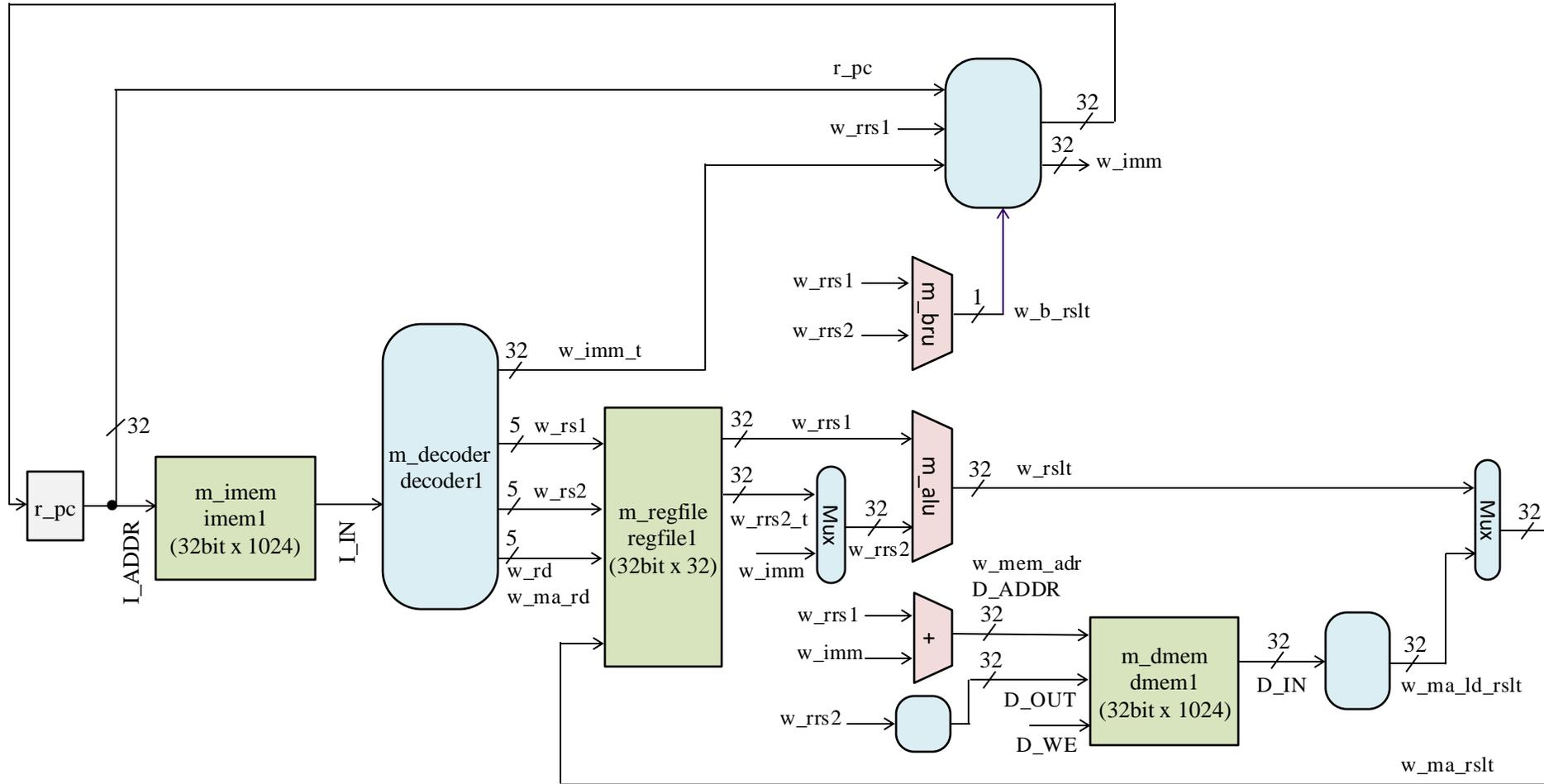
# RVCore シングルサイクルのRISC-Vプロセッサ

## □ この演習で使用する RISC-V シングルサイクルプロセッサの主な特徴

- 単一クロックサイクルでの命令実行。
- 32ビットの RISC-V 基本整数命令セットである RV32I をサポート。
- 4KiB の命令/データメモリ。
- UART を使って文字を出力するためのメモリマップド I/O。
- ALU (Arithmetic Logic Unit): 加減算、ビット演算 (AND, OR, XOR)、シフト演算をサポート。
- BRU (Branch Resolution Unit): 条件分岐 (branch) 命令、無条件分岐 (jump) 命令をサポート。
- Load/Store: バイト (8-bit)、ハーフワード (16-bit)、ワード (32-bit) 単位でのメモリのロード/ストア命令をサポート。
- レジスタファイル: 32個の32ビットレジスタを搭載し、立ち上がりエッジで書き込み。
- 即値生成: I, S, B, U, J 形式の命令の即値を生成。



# module m\_rvcore in proc1.v (RV32I, single-cycle processor)



(The source code of `proc1.v` is available in `/home/u_nesrine/ca2024/src`)



# ステップ1: 文字「a」を出力するアセンブリコード (1/2)

## □ 目的:

- シングルサイクルのRISC-Vプロセッサを使って、文字「a」を出力するアセンブリコードを書いてもらう。プロセッサはメモリマップされたI/Oデバイス (UART) とやり取りし、「a」を表示する。
- ヒント:
  - プロセッサは UART デバイスがメモリマップドされているアドレス (0x40008000) にデータを書き込むことで、文字を出力したり、シミュレーションを終了したりすることができる。
  - こちらの図に示されているように、UART デバイスに書き込むデータのフォーマットは「コマンド (CMD)」と「文字データ (CHAR)」から成る。
  - CMD==1 は「文字出力コマンド」であり、CHAR にセットされている ASCII 値を出力する。
  - CMD==2 は「終了コマンド」であり、シミュレーションを終了する。(CHAR は無視される)
  - よって、文字「a」を出力するには、UART アドレス (0x40008000) に「文字出力コマンド」と文字「a」の ASCII 値 0x61 を組み合わせた 0x00010061 をストアすればよい。
  - 文字を出力後は「終了コマンド」(0x00020000) を UART アドレスにストアしてから、それ以上命令を実行しないように無限ループに入るようにする。

tohost_data format			
31	17 16	7	0
+-----+-----+-----+-----+			
	CMD		CHAR
+-----+-----+-----+-----+			



# ステップ1: 文字「a」を出力するアセンブリコード (2/2)

## □ Pseudo code:

1. UART アドレスをレジスタにセットする。
  - `reg0 = 0x40008000` (UART デバイスのアドレス)
2. UART アドレスに送る「文字出力コマンド」と「文字データ」を別のレジスタにセットする。
  - `reg1 = 0x00010061`
3. UART アドレスにデータをストアする。
  - `mem[reg0] = reg1`
4. UART アドレスに「終了コマンド」をレジスタにセットする。
  - `reg2 = 0x00020000`
5. UART アドレスにデータをストアする。
  - `mem[reg0] = reg2`
6. プログラムをそれ以上実行しないように無限ループに入る。



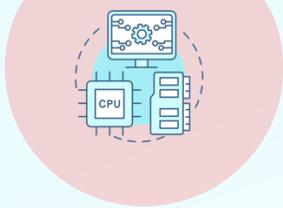
## ステップ2: Venus シミュレーター を使用

### □ 目的:

- Venus シミュレーターを使って、記述したアセンブリコードを機械語に変換する。

<https://venus.cs61c.org> 🔍

- 左側のタブ **Editor** を使って、RISC-V アセンブリコードを書く。
- 次はタブ **Simulator** を使って、**Assemble & Simulate** ボタンをクリックして、シミュレーターでコードを実行する。
- **Dump** タブを使って、コード中のすべての命令の16進数表現を生成する。
- その後、**Download** を押すと、出力された機械語をテキストファイルにコピーする。
  - ファイル名（例: **sample1.txt**）を入力し保存する。



# ステップ3: 機械語をメモリに書き込む

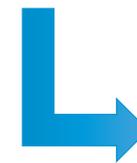
## □ 目的:

- 機械語をプロセッサが実行できるように、メモリを初期化する。
- Venusシミュレーターからダウンロードした機械語を手動でメモリ情報に変換し、`mem[ ]`配列に書き込む必要がある。
- 各命令を正しいメモリアドレスに割り当て、プロセッサがそれを実行できるように設定する。
- 結果: このプロセスにより、Venus から得た機械語が正しくメモリにロードされ、シミュレーションまたはFPGAで実行できるようになる。

- 例: `0X 00000013` という機械語を `mem[ 0 ] = 32'h 00000013;` に変換して、メモリのアドレス0に格納する。

- `0X 00000013` はRISC-V命令の16進数表現。
- `mem[ 0 ] = 32'h 00000013;` は、メモリの特定のアドレス(この場合は0番目)に機械語を格納するためのコード。

```
sample1.txt
1 0x00000013
2 0x00000033
3 0x000000b3
4 0x00000133
5 0x000001b3
```



```
sample1.txt
1 mem[ 0 ] = 32'h00000013;
2 mem[ 1 ] = 32'h00000033;
3 mem[ 2 ] = 32'h000000b3;
4 mem[ 3 ] = 32'h00000133;
5 mem[ 4 ] = 32'h000001b3;
6 mem[ 5 ] = 32'h00000233;
```



# ステップ4: シミュレーション

## □ 目的:

- 機械語をシミュレーションで実行し、正しく動作を確認する。

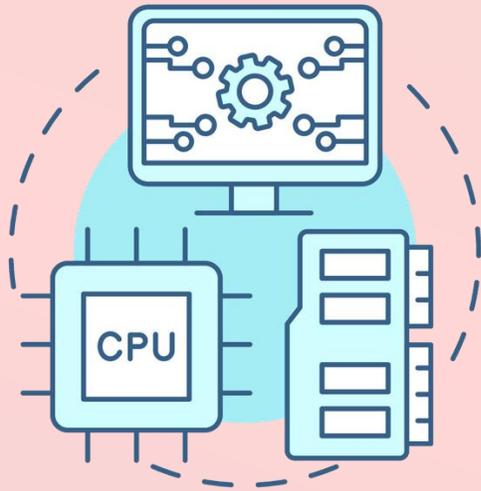
```
$ cd ~/ca2024/  
$ cp /home/u_nesrine/ca2024/src/proc1.v .  
$ /tools/cad/bin/verilator --binary -o simv proc1.v  
$ ./obj_dir/simv
```

「a」 という文字が正しく出力される →

```
== VERIFY is defined and generate verify.txt  
a  
simulation finished.  
- proc1.v:411: Verilog $finish  
- Simulation Report: Verilator 5.028 2024-08-21  
- Verilator: $finish at 900ps; walltime 0.005 s; speed 973.741 ns/s  
- Verilator: cpu 0.001 s on 1 threads; allocated 8 MB
```



Check Point 4



# Project 4

(Part 2)



# 演習第四回の内容 (Project 4-Part 2 )

## □ 目的:

- この演習の目的は、シングルサイクルのRISC-Vプロセッサを使って、文字「a」を出力するアセンブリコードを書き、その動作をFPGAで確認すること。
- Steps:
  1. 新しいVivado Project 「project\_4」 を作る。
  2. シングルサイクル (main4.v) プロセッサの修正する。
  3. Clocking Wizard でclock を変化させる。
  4. VIOを設定する。
  5. バイナリ形式でメモリの内容 (sample1.txt) が出力する。
  6. UARTによるシリアル通信。
  7. VIO で「a」という文字が出力されるか確認する。

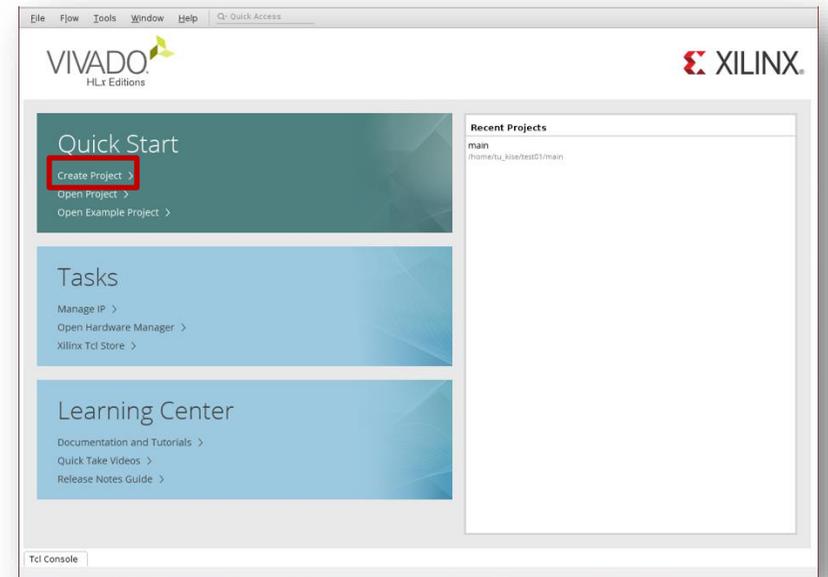


# ステップ1:新しい Vivado Project を作る (1/2)

- ❑ 新しいVivado Project 「project\_4」 を作る。
- ❑ ターミナルで次のコマンドを入力し, Vivado を起動する。
  - ❑ 「Vivado 2024.1」 を利用する。

```
$ source /tools/Xilinx/Vivado/2024.1/settings64.sh  
$ vivado &
```

- ❑ Select Create Project, Click **Next**
- ❑ Project name “**project\_4**” and location “/home/your\_username/ca2024” are selected.
  - Check “Create project subdirectory”.
- ❑ Click **Next**
- ❑ In **Default Part** window, select **Parts**, and write **XC7A35TICSG324-1L**.





# ステップ1:新しい Vivado Project を作る (2/2)

## ❑ Source codeをコピーする

❑ ターミナルで, ファイルをコピーする。

❑ /home/u\_nesrine/ca2024/src/ に保存されている `main4.v` と `main4.xdc` を, 作成したプロジェクトのディレクトリ `~/ca2024/project_4` にコピーする。

```
$ cd ~/ca2024/project_4
$ cp /home/u_nesrine/ca2024/src/main4.v .
$ cp /home/u_nesrine/ca2024/src/main4.xdc .
```

❑ Click `Add Sources`, then select `Add or create design sources` and click `Next`.

❑ In `Add or Create Design Sources` window, click `Add Files`, select `main4.v` in `project_4` directory, and click `OK`.

❑ Click `Finish`.

❑ Click `Add Sources`, then select `Add or create constraints` and click `Next`.

❑ In `Add or Create Constraints` window, click `Add Files`, select `main4.xdc` in `project_4` directory, and click `OK`.

❑ Click `Finish`.



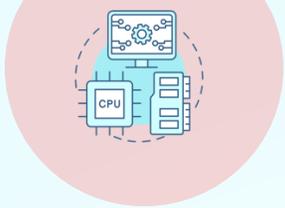
## ステップ2: シングルサイクル (main4.v) プロセッサの修正

- m\_main モジュールを完成させ、「a」の16進数値がVIOを通じて表示されるか確認する。

### Main4.v

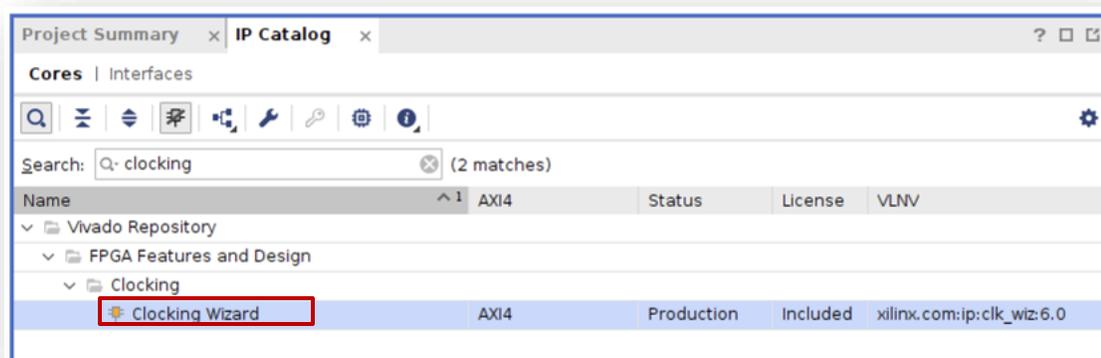
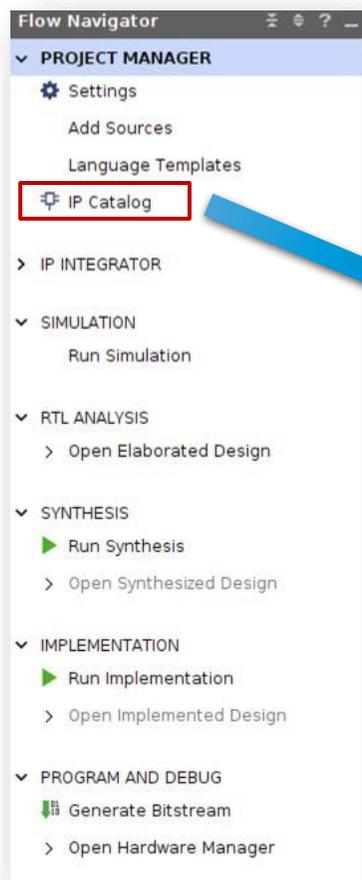
(Source code available in /home/u\_nesrine/ca2024/src)

```
module m_main (  
    input wire w_clk,          // 100MHz clock signal  
    input wire w_uart_rx,     // UART rx, data line from PC to FPGA  
    output wire w_uart_tx     // UART tx, data line from FPGA to PC  
);  
  
//Code  
  
// Checkpoint 5: Complete here  
reg [7:0] r_tohost_char;  
reg [1:0] r_vio_tohost_cmd;  
  
always @(posedge w_clk50m) begin  
    //Complete here  
end  
  
vio_0 vio_inst (  
    .clk          (),          // Complete here to connect to the 50 MHz clock  
    .probe_in0(),          // Complete here to connect UART character to VIO input  
);  
  
endmodule
```



# ステップ3: Clocking Wizard でclock を変化させる (1/2)

- ❑ Click IP Catalog
- ❑ Double click Clocking Wizard in IP Catalog window





# ステップ3: Clocking Wizard でclock を変化させる (2/2)

□ 50MHzのクロックを出力するIP を生成する。

- In Output Clocks, set the frequency to 50.000 for clk\_out1 to generate 50MHz clock signal. Click OK.
- In Generate Output Products window, click Generate.

Re-customize IP

Clocking Wizard (6.0)

Documentation IP Location Switch to Defaults

Component Name: clk\_wiz\_0

Output Clocks

The phase is calculated relative to the active input clock.

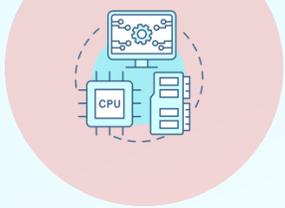
Output Clock	Port Name	Output Freq (MHz)		Phase (degrees)		Duty Cycle (%)
		Requested	Actual	Requested	Actual	
<input checked="" type="checkbox"/>	clk_out1	50.000	50.00000	0.000	0.000	50.000
<input type="checkbox"/>	clk_out2	100.000	N/A	0.000	N/A	50.000
<input type="checkbox"/>	clk_out3	100.000	N/A	0.000	N/A	50.000
<input type="checkbox"/>	clk_out4	100.000	N/A	0.000	N/A	50.000
<input type="checkbox"/>	clk_out5	100.000	N/A	0.000	N/A	50.000
<input type="checkbox"/>	clk_out6	100.000	N/A	0.000	N/A	50.000
<input type="checkbox"/>	clk_out7	100.000	N/A	0.000	N/A	50.000

USE CLOCK SEQUENCING

Clocking Feedback

Output Clock	Sequence Number	Source	Signaling
clk_out1	1	<input checked="" type="radio"/> Automatic Control On-Chip	<input checked="" type="radio"/> Single-ended
clk_out2	1	<input type="radio"/> Automatic Control Off-Chip	<input type="radio"/> Differential
clk_out3	1	<input type="radio"/> User-Controlled On-Chip	
clk_out4	1	<input type="radio"/> User-Controlled Off-Chip	
clk_out5	1		
clk_out6	1		
clk_out7	1		

OK Cancel



# ステップ4: VIOを使った確認する

□ 最後に、VIO (Virtual Input/Output)を使った確認する。

□ VIO のコンフィギュレーション:

1. Vivadoで IP Catalog を開き、vio を検索する。
2. 以下のようにVIOを設定する：
  - Input Probe Count: 1
  - Probe Width: 8
3. Click **Generate and** click **OK** if asked in Generate Output Products window.

□ ビットストリームを生成し、FPGAにプログラムする。

The screenshot shows the Vivado 2022.2 interface. The IP Catalog is open, and 'vio' is searched, showing 'VIO (Virtual Input/Output)' as the result. A blue arrow points from the IP Catalog to the 'Component Name' dialog for 'vio\_0'. In this dialog, the 'Input Probe Count' is set to 1 and the 'Probe Width' is set to 8. A second dialog shows the 'PROBE\_IN Ports(0..0)' configuration, where the 'Probe Width' is set to 8.

1: IP Catalog button

2: Type vio

3: Double click

4: Input Probe Count: 1

5: Probe Width: 8



# ステップ5:バイナリ形式でメモリの内容が出力する

## □ 目的:

- Pythonファイル (`generate_bin_file.py`) を使ってメモリの内容をバイナリ形式に変換する。
  - `generate_bin_file.py` と同じディレクトリに `sample1.txt` も必要。

```
$ cd ~/ca2024/  
$ cp /home/u_nesrine/ca2024/src/generate_bin_file.py  
$ python3 generate_bin_file.py
```

## `generate_bin_file.py`

```
import struct  
  
# Read the machine code from the file 'sample1.txt'  
with open("sample1.txt", "r") as file:  
    # Read all lines from the file and strip any extra whitespace/newlines  
    hex_instructions = [line.strip() for line in file.readlines()]  
  
# Open a binary file to write the output  
with open("sample1.bin", "wb") as bin_file:  
    for hex_instruction in hex_instructions:  
        # Convert each hex string to an integer  
        instruction = int(hex_instruction, 16)  
        # Convert the 32-bit integer to a 4-byte binary format (little-endian)  
        bin_file.write(struct.pack('<I', instruction))  
  
print("Binary file 'sample1.bin' generated successfully from 'sample1.txt'.")
```

(Source code available in `/home/u_nesrine/ca2024/src`)



## ステップ6: UARTによるシリアル通信

- UART を用いてバイナリデータを FPGA に送信する。
  - ターミナルを開いて、次のコマンドを実行して `sample1.bin` をFPGAに送信する。
    - GtkTerm でボーレートなどを設定してからコマンドを実行すること。
    - `cat sample1.bin > /dev/ttyUSB1`

```
Terminal ×
u_nesrine@vs305:~/ca2024/src$ cat sample1.bin > /dev/ttyUSB1
```



## ステップ7: VIO で「a」という文字が出力されるか確認する

- 生成した `sample1.bin` を送信して, 転送されたデータの値が `0x61` となることを VIO を用いて確認する。

hw_vio_1				
Name	Value	Activ...	Direct...	VIO
> <code>r_tohost_char[7:0]</code>	[H] 61		Input	hw_vio_1
> <code>r_tohost_cmd[1:0]</code>	[H] 2		Input	hw_vio_1



Check Point 5