

冷却原子実験のレーザー技術等 ～影の立役者～

コンテンツ

- 制御システム
- レーザー光の周波数・強度制御
- プログラマブルIC
- 大電流制御

東京大学 堀越宗一

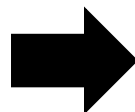
冷却原子実験

フェルミ超流動を実現し、撮影するまでには、

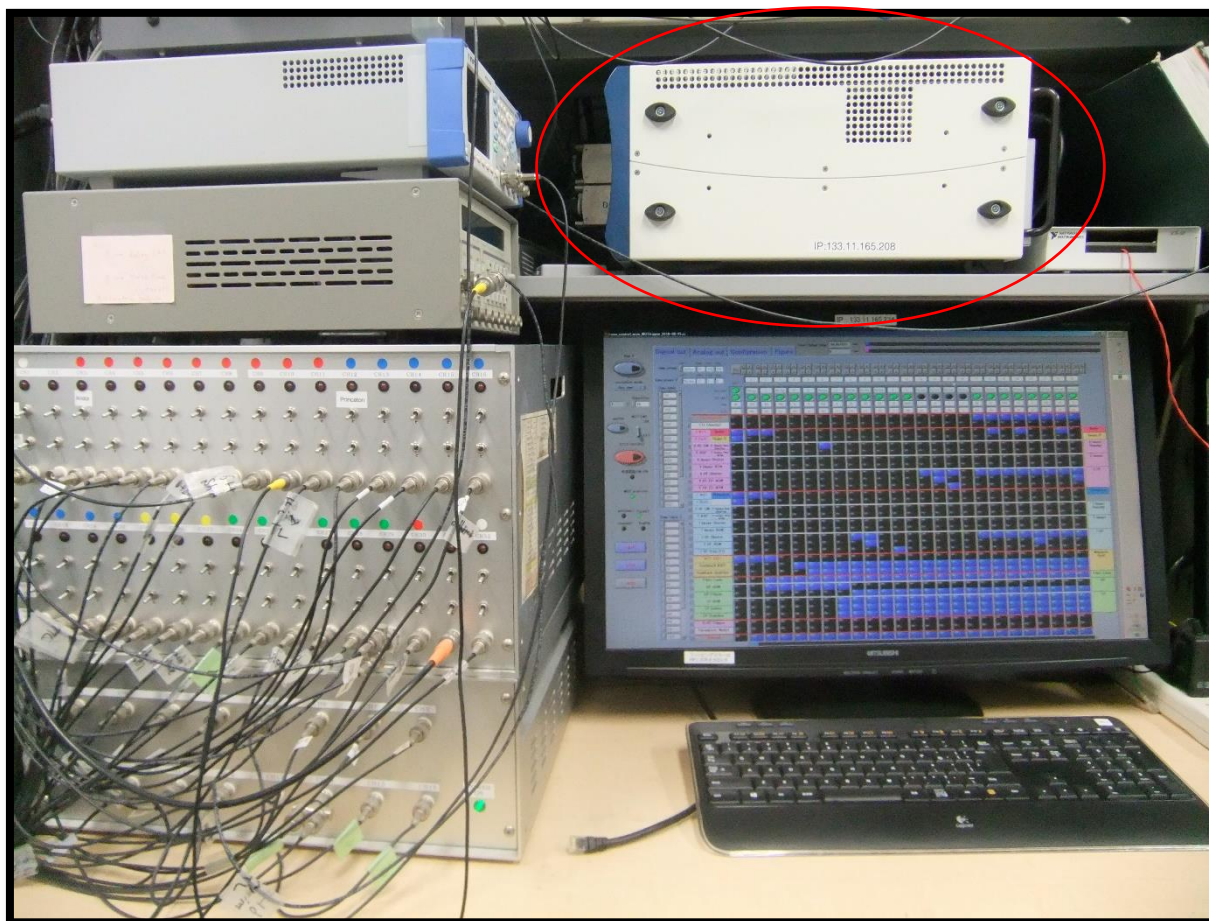
- 長い時間スケール(s)と短い時間スケール(us)でのデジタルとアナログの制御が必要
- 時間的に制御するデバイスが多数存在
- 40MHz～10GHzまでの幅広い周波数帯を扱う必要がある
(本実験では、100MHz帯：21つ、1GHz帯：2つ、10GHz帯：2つ)
- 実験のループ毎にパラメータを自動的に変えたい
- モニターが必要なものが多い(4chオシロ5台、スペアナ3台)
- フェッシュバッハ共鳴を用いる場合、大電流(>100A)の制御が必要
- 10^{-11} torr (10^{-9} Pa)の超高真空が必要
- 低ノイズ大面積高速CCDカメラが必要
- 冷却原子実験も膨大なデータ解析が必要(並列計算)

制御システム

デジタル出力 : 32ch
アナログ出力(16bit) : 16ch
デジタル入力 : 1ch
Ethernet通信
時間分解能 : 1 μ s
実験の1サイクル時間 : 30s程度



レーザー周波数・強度制御
コイル電流制御
トラップポテンシャル制御
ラジオ周波数制御



ハードウェア

デジタル出力 : 32ch
アナログ出力(16bit) : 16ch
時間分解能 : 1 μ s
実験の1サイクル時間 : 30s程度

データ量 :

$$\frac{30s}{1\mu s} \times (32ch + 16bit \times 16ch) \sim 1GB$$

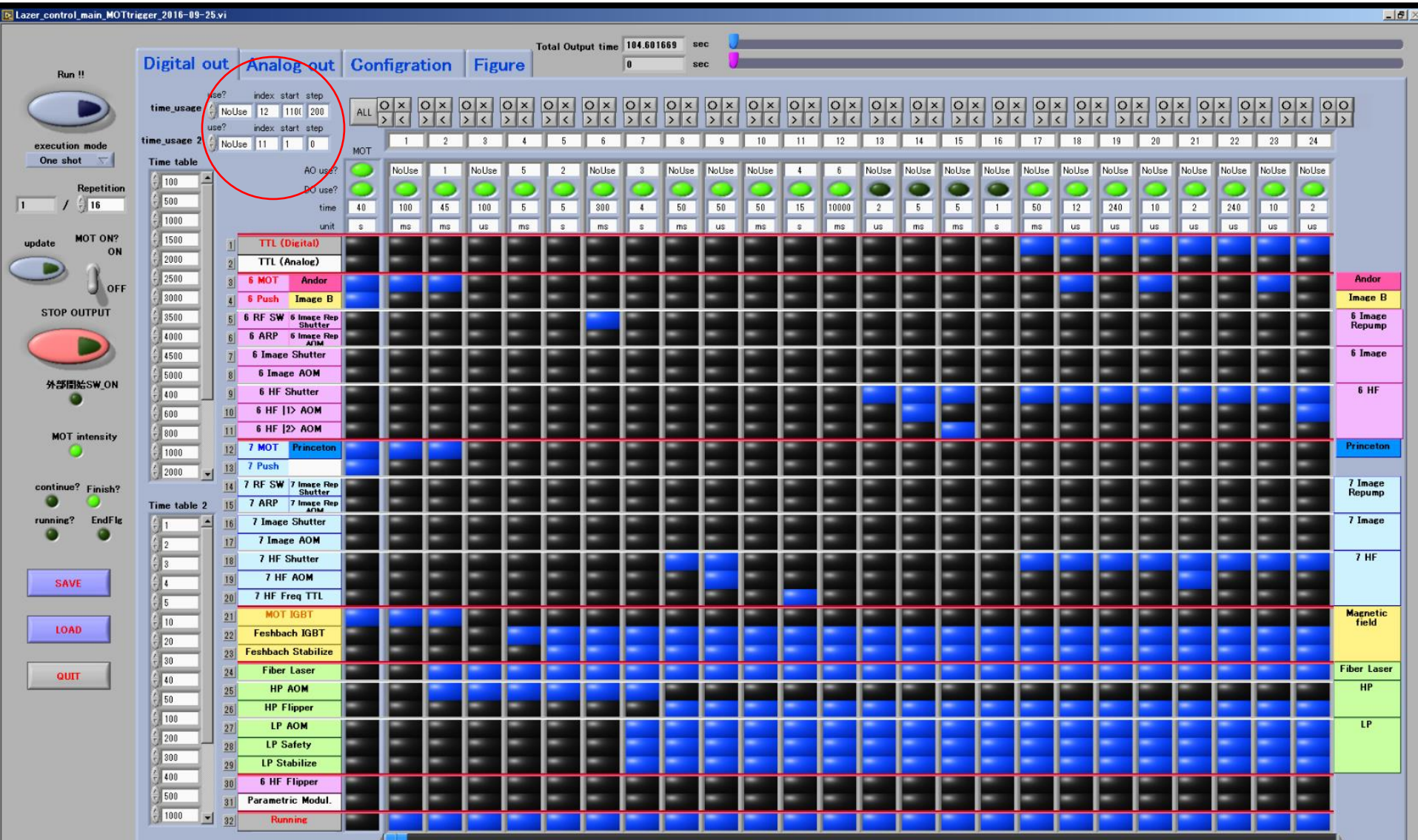
NI PXIe-1062Q
8スロット3U PXI Expressシャーシ
最大3 GB/秒
定価 : ￥582,000

NI PXIe-8133
1.73 GHzクアッドコア搭載
PXI Expressコントローラ
定価 : ￥456,000

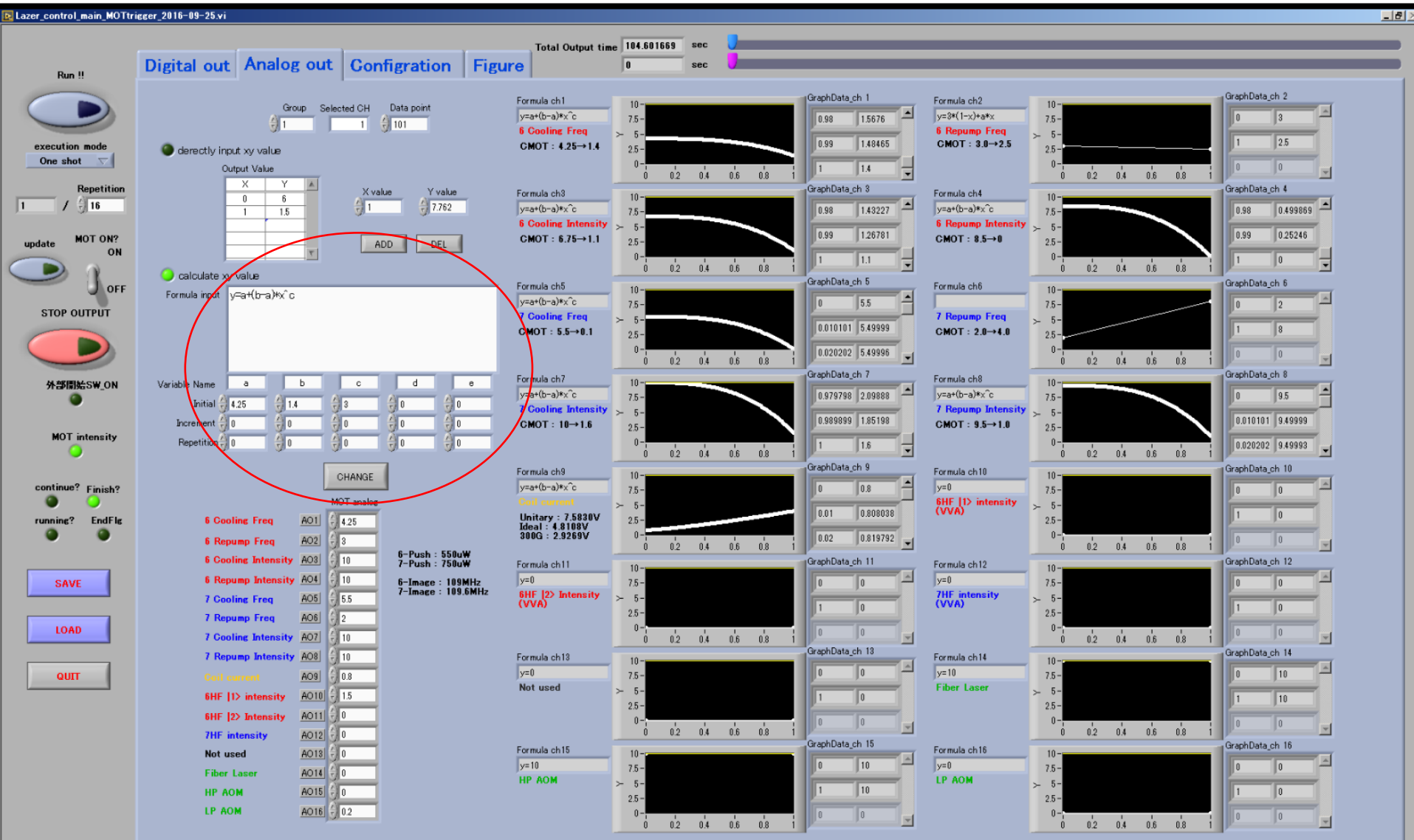
NI PXI-7853R
RシリーズマルチファンクションRIO
Xilinx Virtex-5 Family FPGAs搭載
定価 : ￥770,000 ×2枚



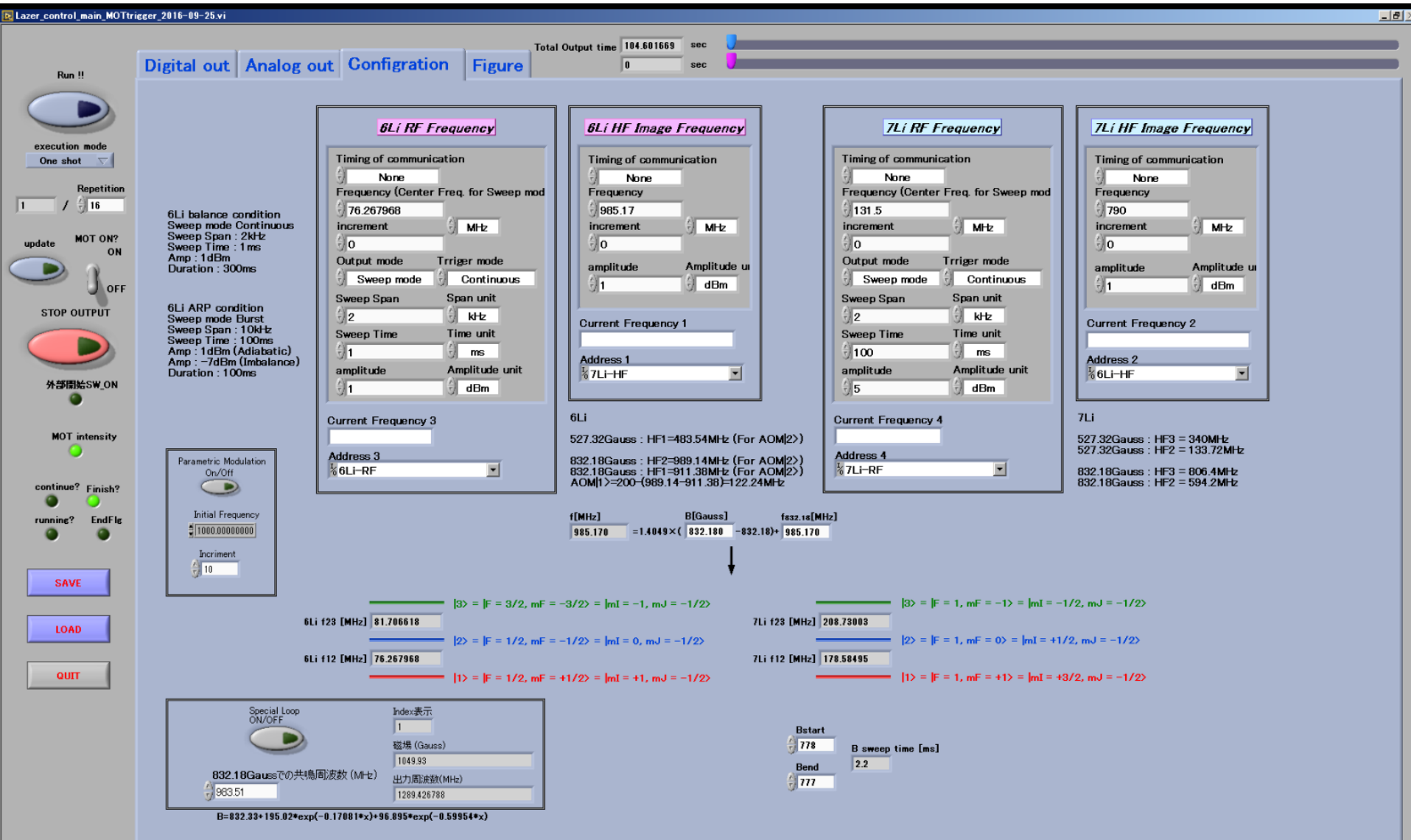
GUI画面(デジタル)



GUI画面(アナログ)



GUI画面(Ethernet)

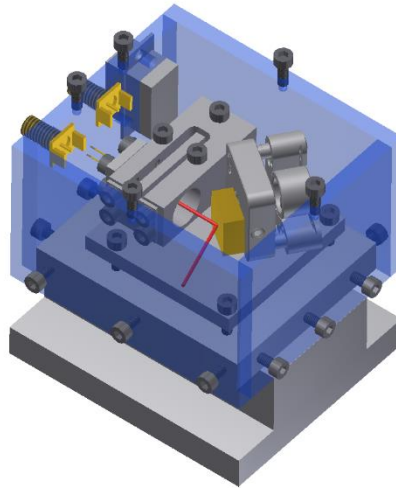


レーザー光の周波数安定化(線幅)

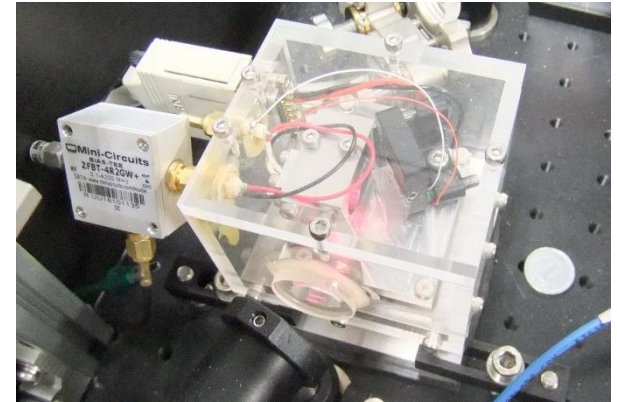
半導体レーザーを購入
波長：670nm (1.85eV)
(1個10万円)



マウントの設計

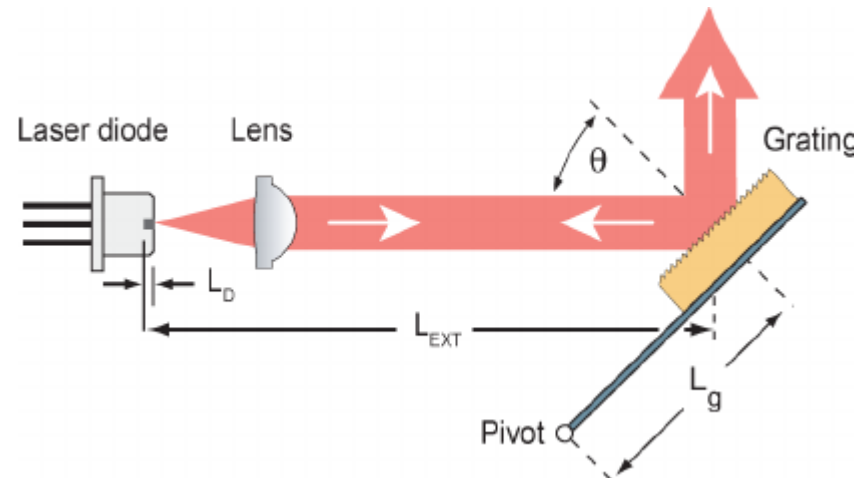


自作外部共振器レーザー
(レーザー線幅：< 1MHz)



周波数制御

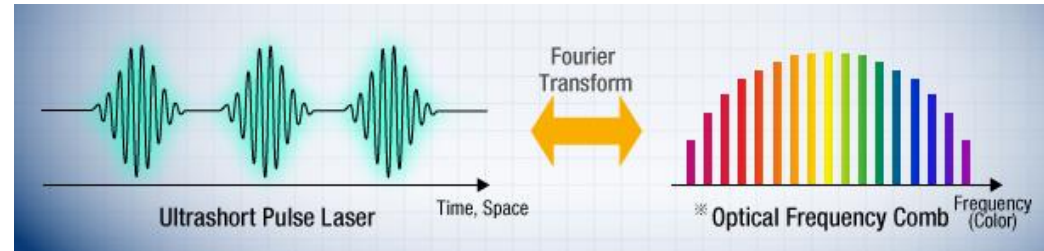
- ・ 半導体のレーザーの温度
- ・ 注入電流
- ・ 回折格子の角度



レーザー光の周波数安定化(絶対周波数)

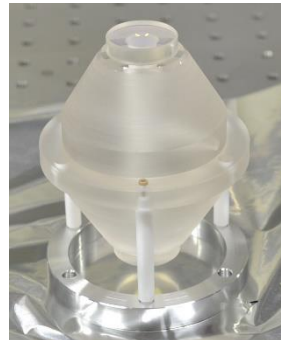
3つの方法

周波数コム :



電気通信大学、美濃島研究室のHPより

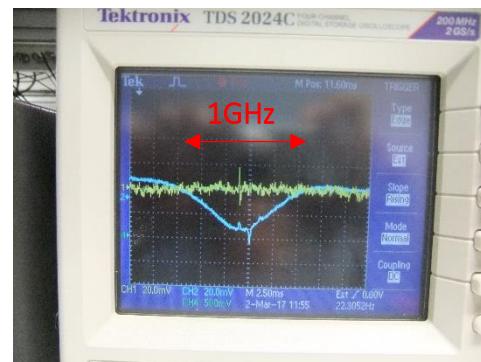
ULE共振器 :
(超低熱膨張ガラス)



東京大学、小林研究室のHPより

ドップラーフリー分光 :
(^6Li 原子)

私の実験室より



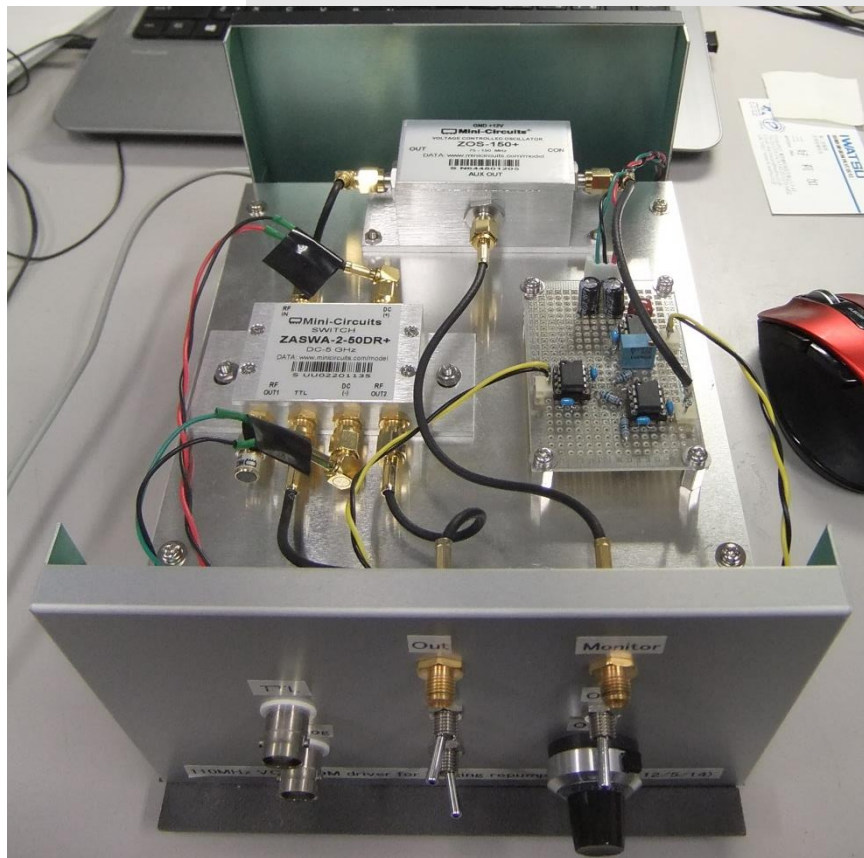
ズーム



レーザー光の強度・周波数制御

音響光学変調器(AOM)
応答速度： $<100\text{ns}$

AOMドライバ



ビームブロック

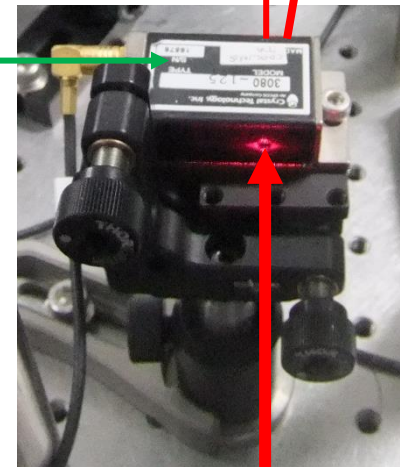
ν_{rf} (80~400MHz)

21個使っている

TTL

シャッター

$\nu_{\text{laser}} + \nu_{\text{rf}}$



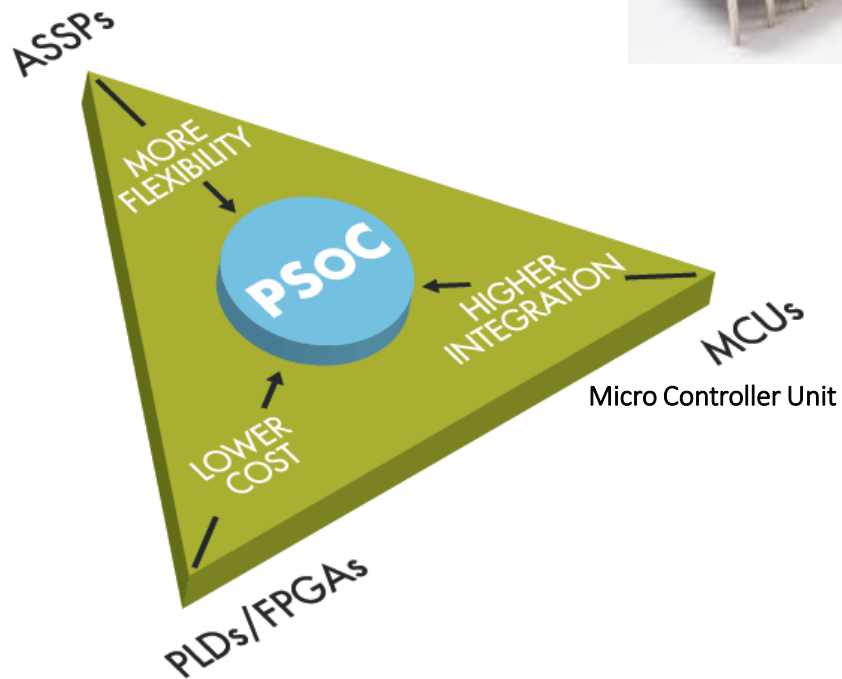
ν_{laser}

本研究で用いている使えるプログラマブルIC

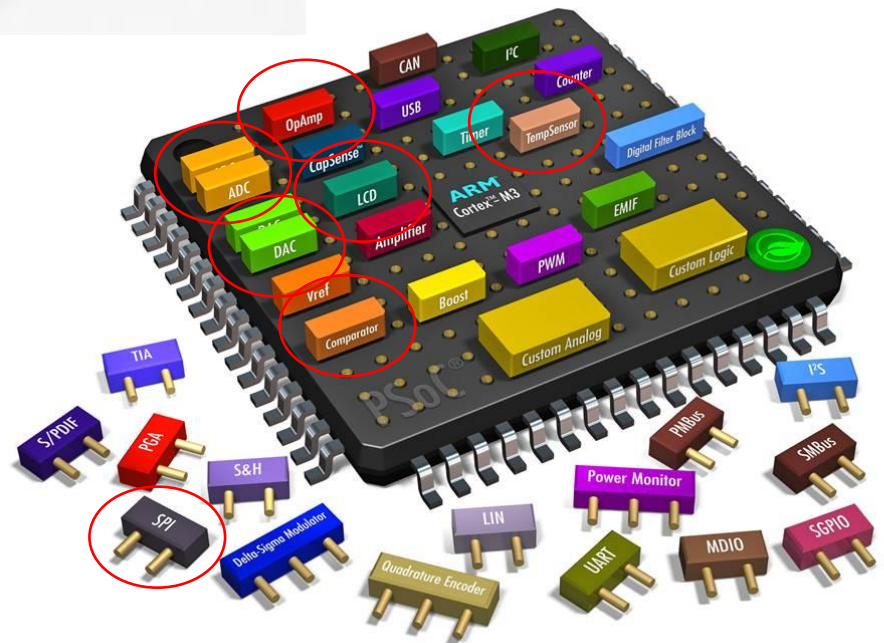
PSoC (Programmable System on Chip)



Application Specific Standard Product



Programmable Logic Device/Field Programmable Device



Brochure from Cypress Semiconductor Corporation

C言語でプログラマブルできるのが非常にありがたい

Free Software

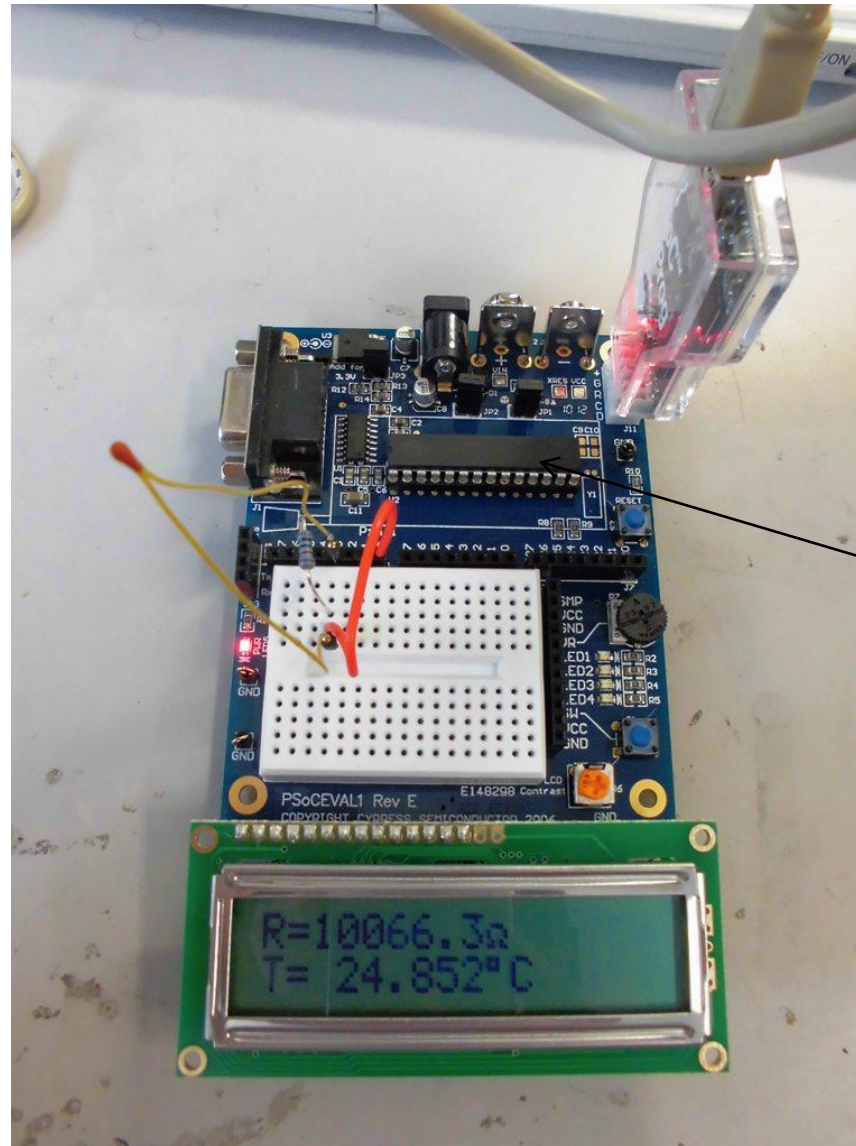
The screenshot displays the PSoC Designer 5.4 environment. The main window is divided into three panes:

- Left Pane (Chip View):** Shows a hardware schematic of the PSoC chip. It includes various components like comparators (COMP_1, COMP_2), digital buffers (DigBuf_1, DigBuf_2), LEDs (LED_1, LED_2), and PGAs (PGA_1, PGA_2). The components are interconnected with a network of buses and signals.
- Center Pane (Code Editor):** Displays the C source code for the main.c file. The code is as follows:

```
1 //-----  
2 // C main line  
3 //-----  
4  
5 #include <m8c.h>           // part specific constants and macros  
6 #include "PSoCAPI.h"      // PSoC API definitions for all User  
7 #pragma interrupt_handler COMP_1_ISR  
8  
9 int COMP_1_ISR(void)  
10 {  
11     int i;  
12     int j;  
13     int k;  
14  
15     COMP_1_DisableInt();  
16  
17     for (i=0; i<100; i++){  
18  
19  
20         if (PRT1DR & 0x02){  
21             if (PRT1DR & 0x10) {  
22                 LED_1_Switch(1);  
23                 for (j=0; j<30000; j++){  
24                     for (k=0; k<25; k++){  
25  
26                     }  
27                 }  
28             }  
29             else {  
30                 LED_1_Switch(0);  
31             }  
32  
33             COMP_1_EnableInt();  
34  
35     return 0;  
36 }
```
- Right Pane (Workspace Explorer):** Shows a tree view of the project components. The components are organized into folders: ADCs, Amplifiers, Analog Comm, Counters, DACs, Digital Comm, Filters, and Generic. The components listed include COMP_1, DigBuf_1, DigBuf_2, LED_1, PGA_1, and PGA_2.

The bottom status bar indicates the device is "Ready".

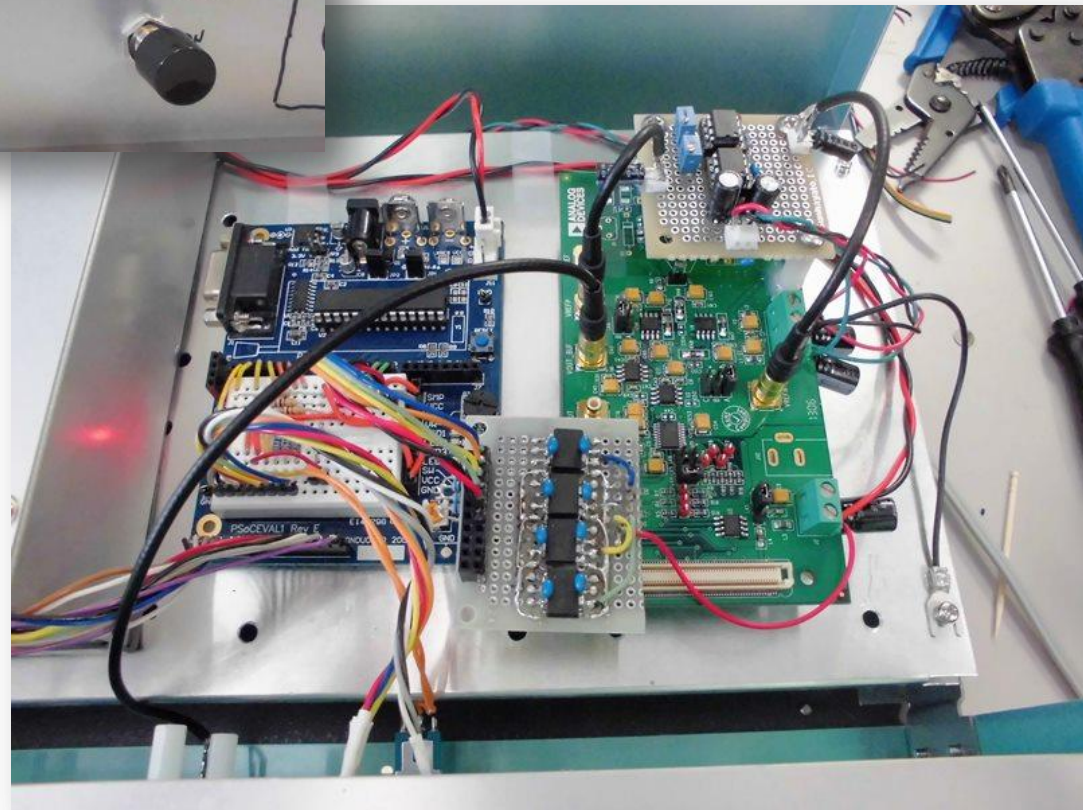
サーミスタの抵抗値からの温度測定なんて非常に簡単



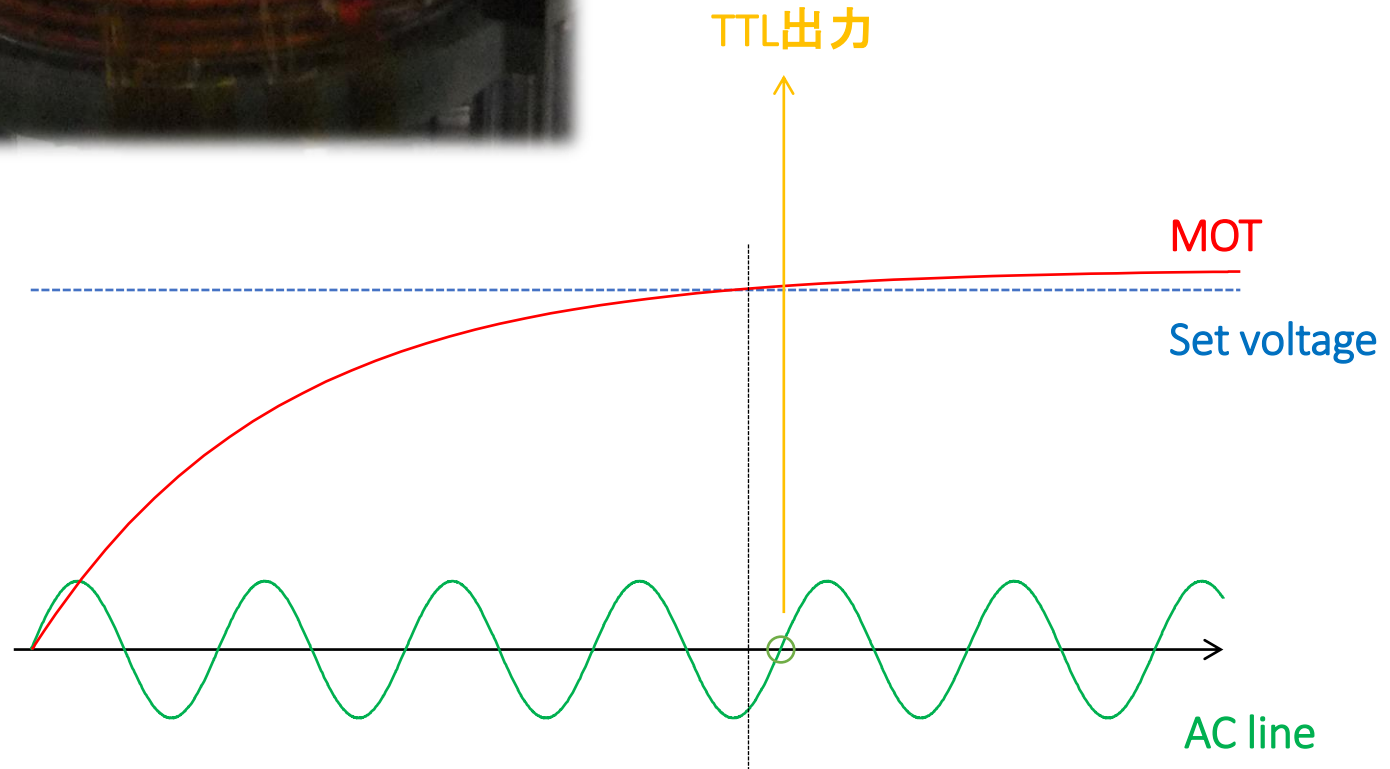
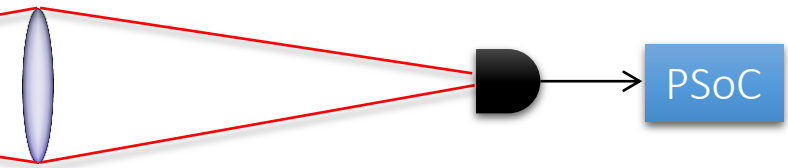
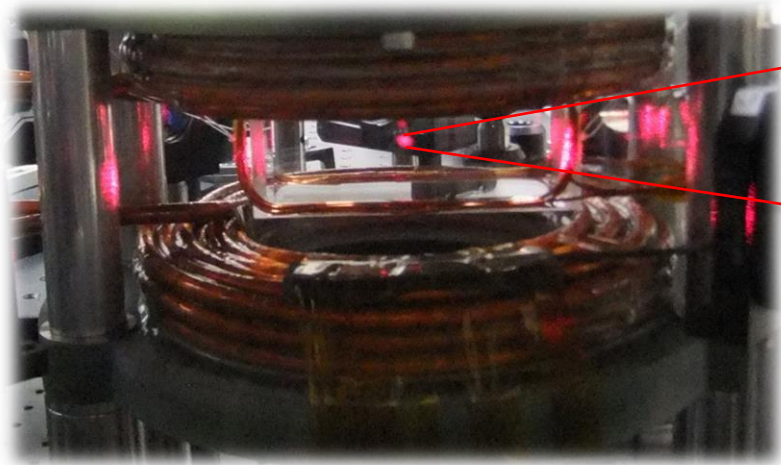
¥ 600

¥ 13,200

SPI通信を用いた20bit DACへの書き込み

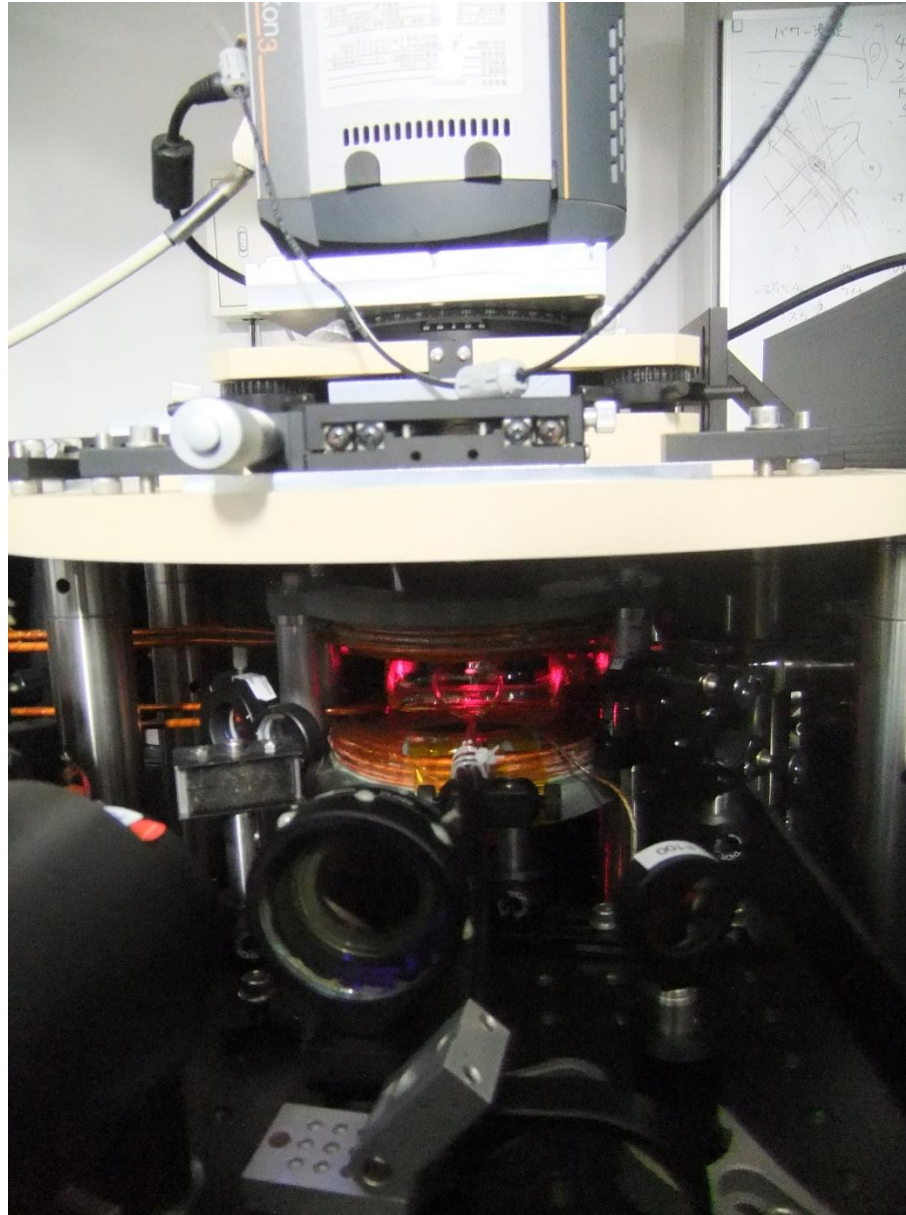


冷却原子数のモニターとANラインとの同期



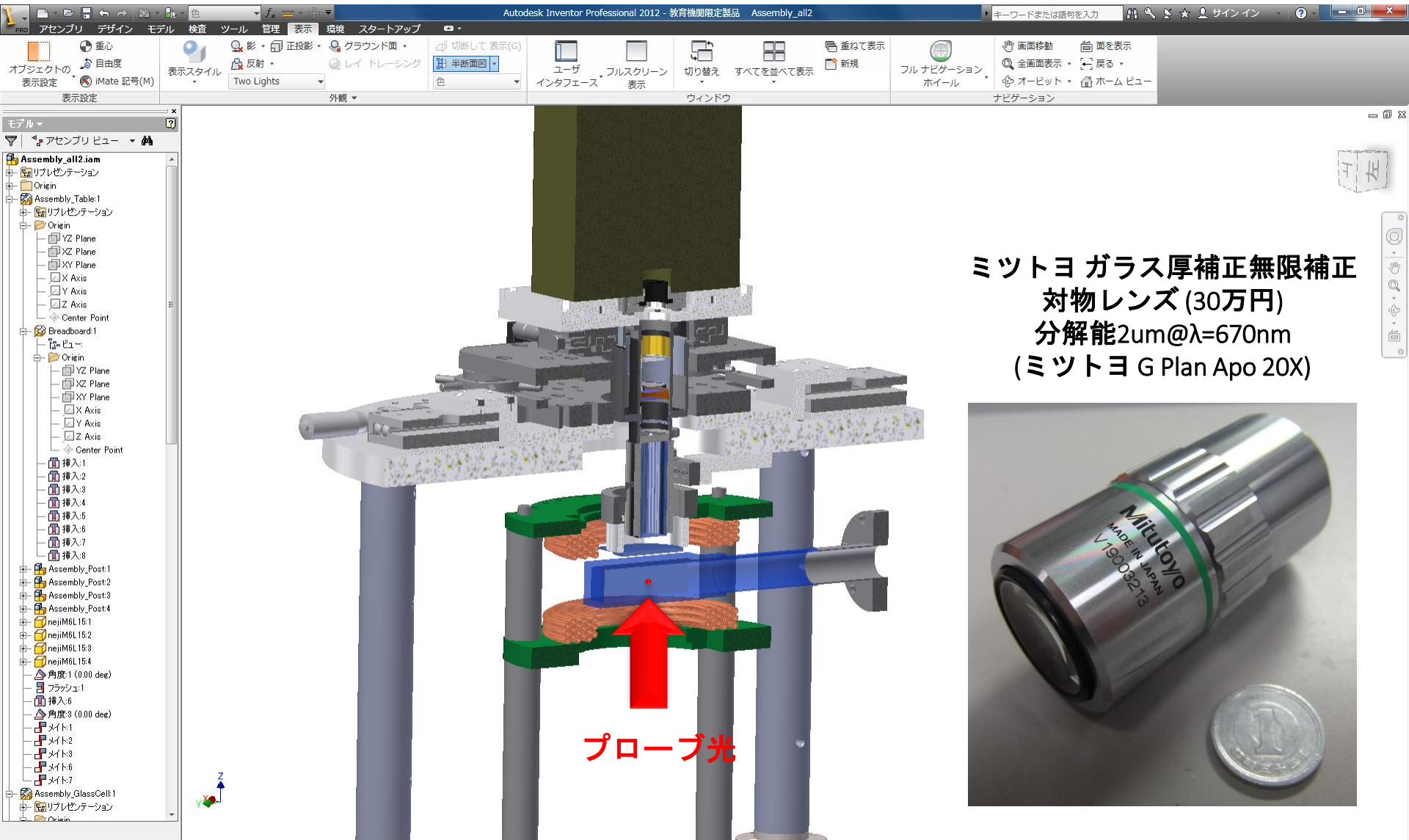
イメージング系

[M.Horikoshi, arXiv:1608.07152]



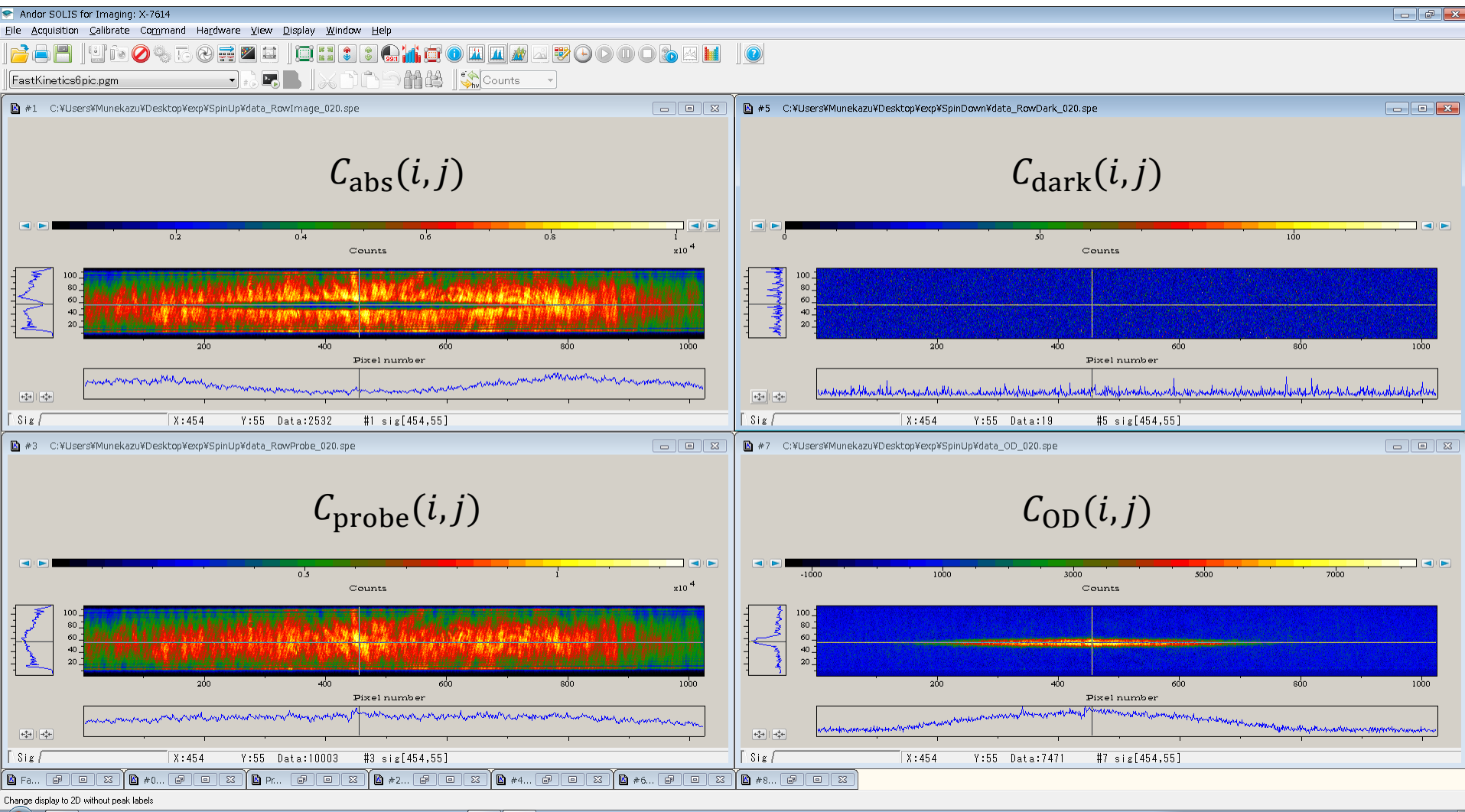
イメージング系

[M.Horikoshi, arXiv:1608.07152]



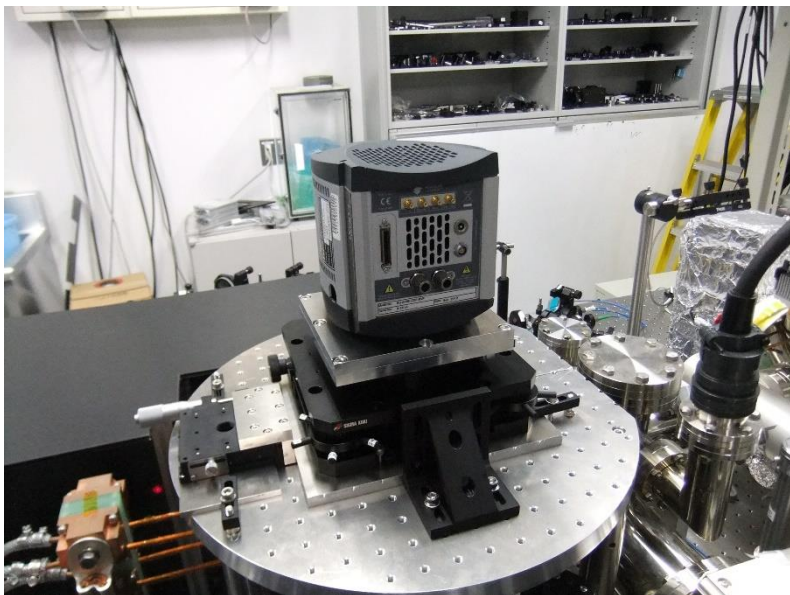
イメージング系

[M.Horikoshi, arXiv:1608.07152]

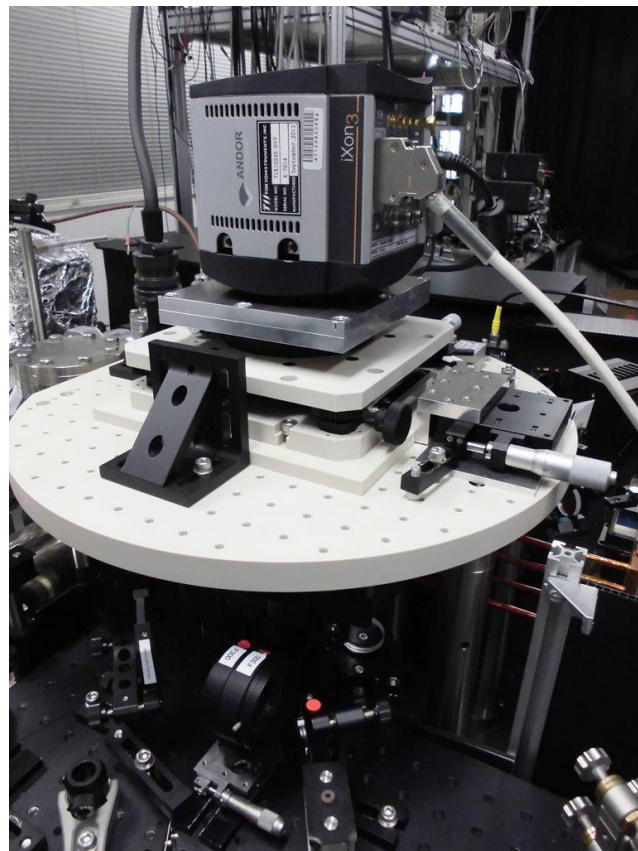
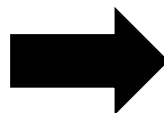


渦電流対策

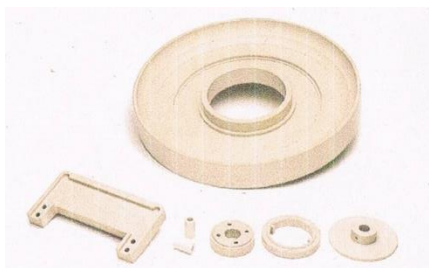
磁場が完全に消えるまで~50ms



磁場が完全に消えるまで<5ms



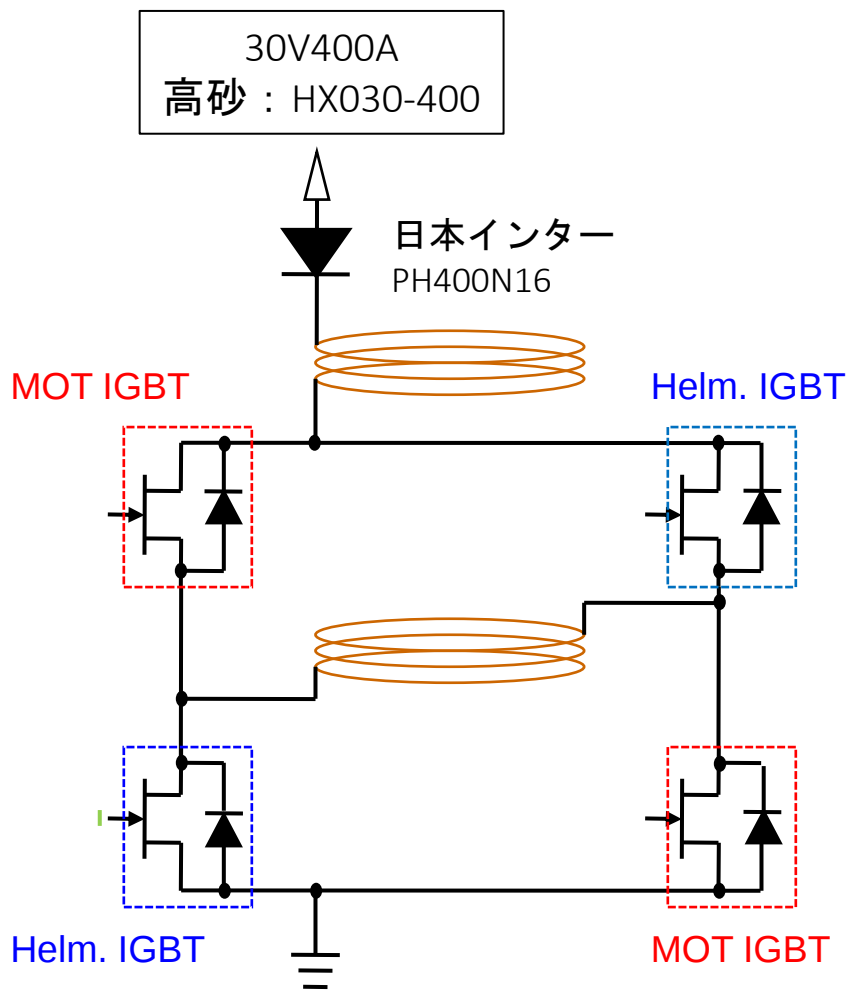
カメラマウントを金属から
PPS（ポリフェニレンサルファイド）に変更



結晶性樹脂

- ✓ 高強度
- ✓ 剛性
- ✓ 寸法安定性
- ✓ 切削加工性

コイル電流の制御

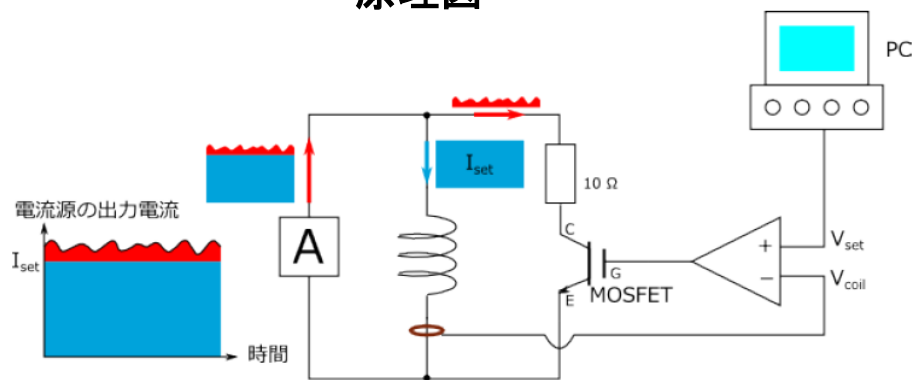


IGBT : Infineon FZ600R65KE3 (600A, 6.5kV)
concept IGBT driver

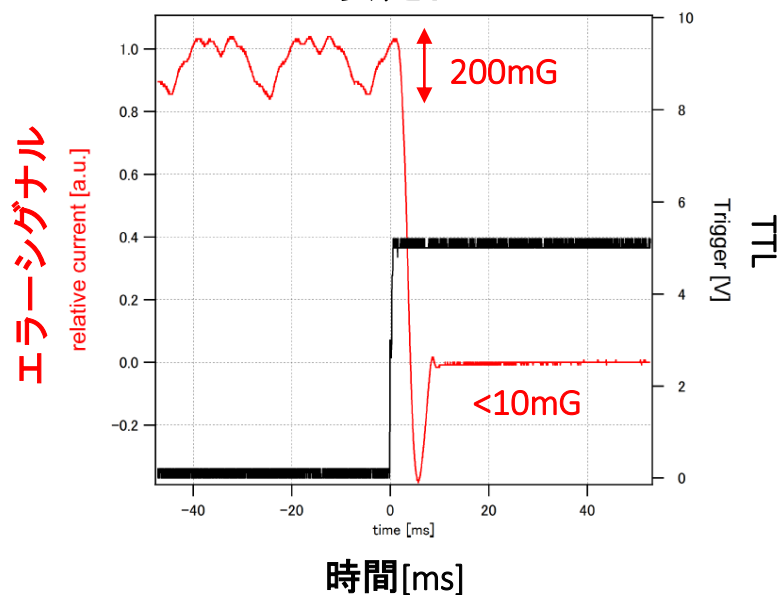


コイル電流の安定化

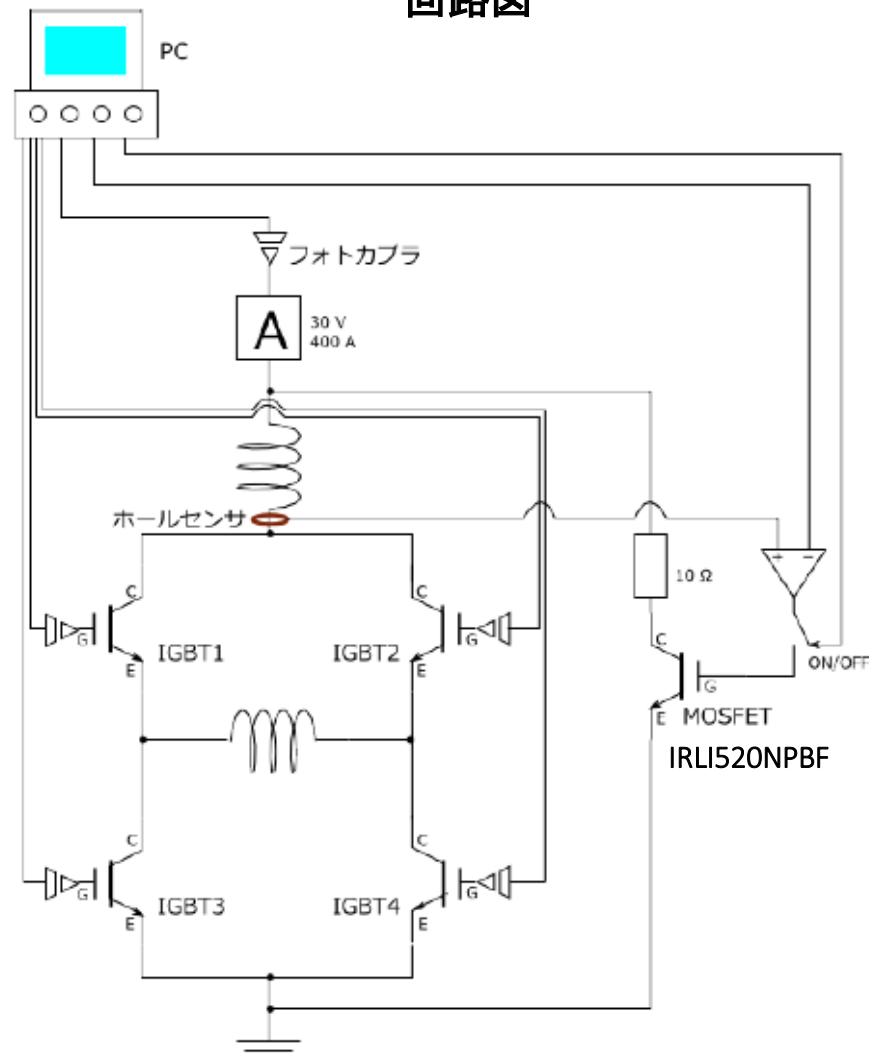
原理図



安定化



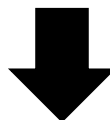
回路図



まとめ

冷却原子実験に限らず、物性や量子情報の実験では似たような要求が多い

- 長い時間スケール(s)と短い時間スケール(us)でのデジタルとアナログの制御が必要
- 時間的に制御するデバイスが多数存在
- 40MHz～10GHzまでの幅広い周波数帯を扱う必要がある
(本実験では、100MHz帯：21つ、1GHz帯：2つ、10GHz帯：2つ)
- 実験のループ毎にパラメータを自動的に変えたい
- モニターが必要なものが多い(4chオシロ5台、スペアナ3台)



汎用なシステムがFPGA+DDS+GUIで提供できれば大勢の研究者が喜ぶ