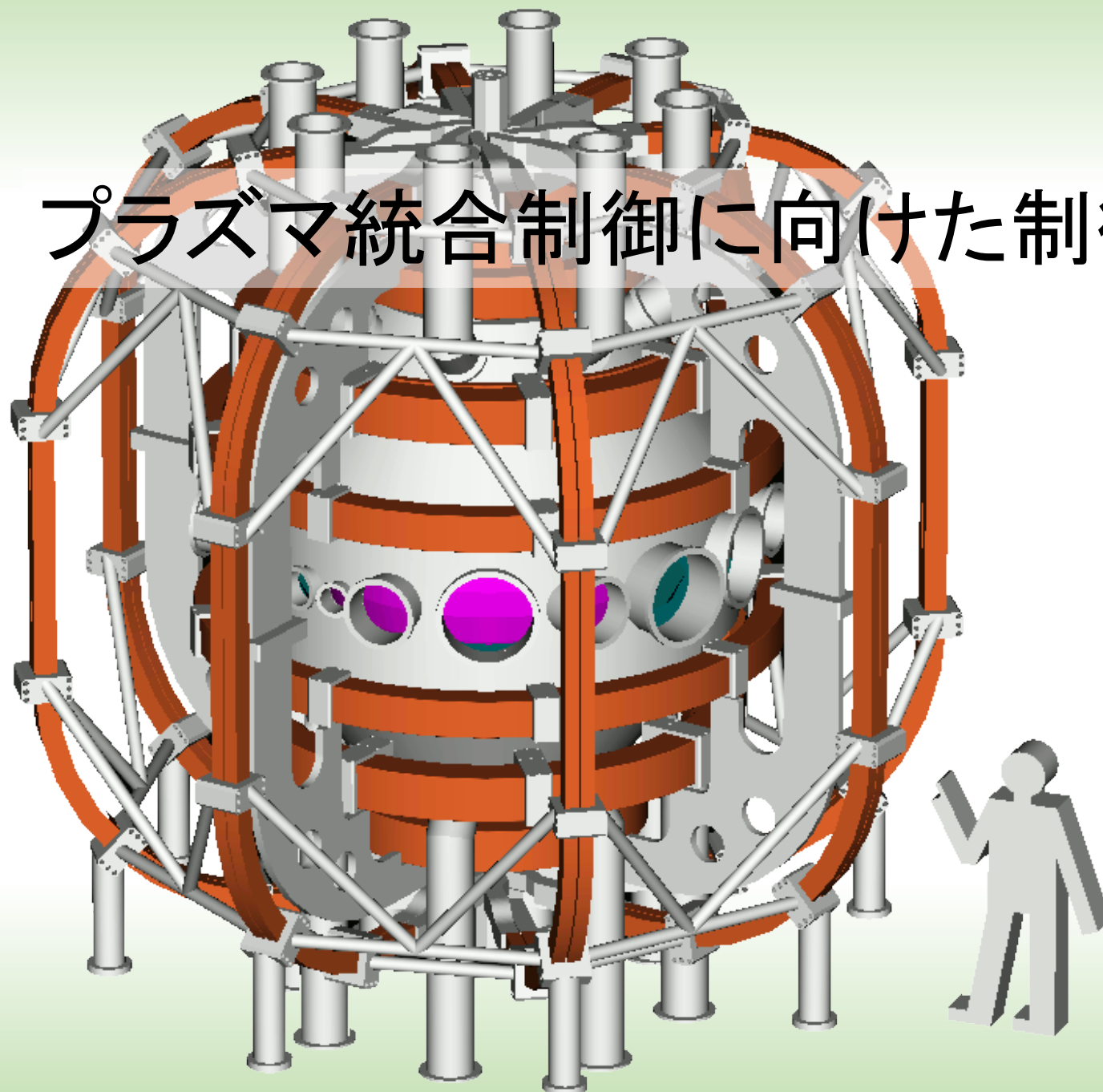


プラズマ統合制御に向けた制御システムの開発

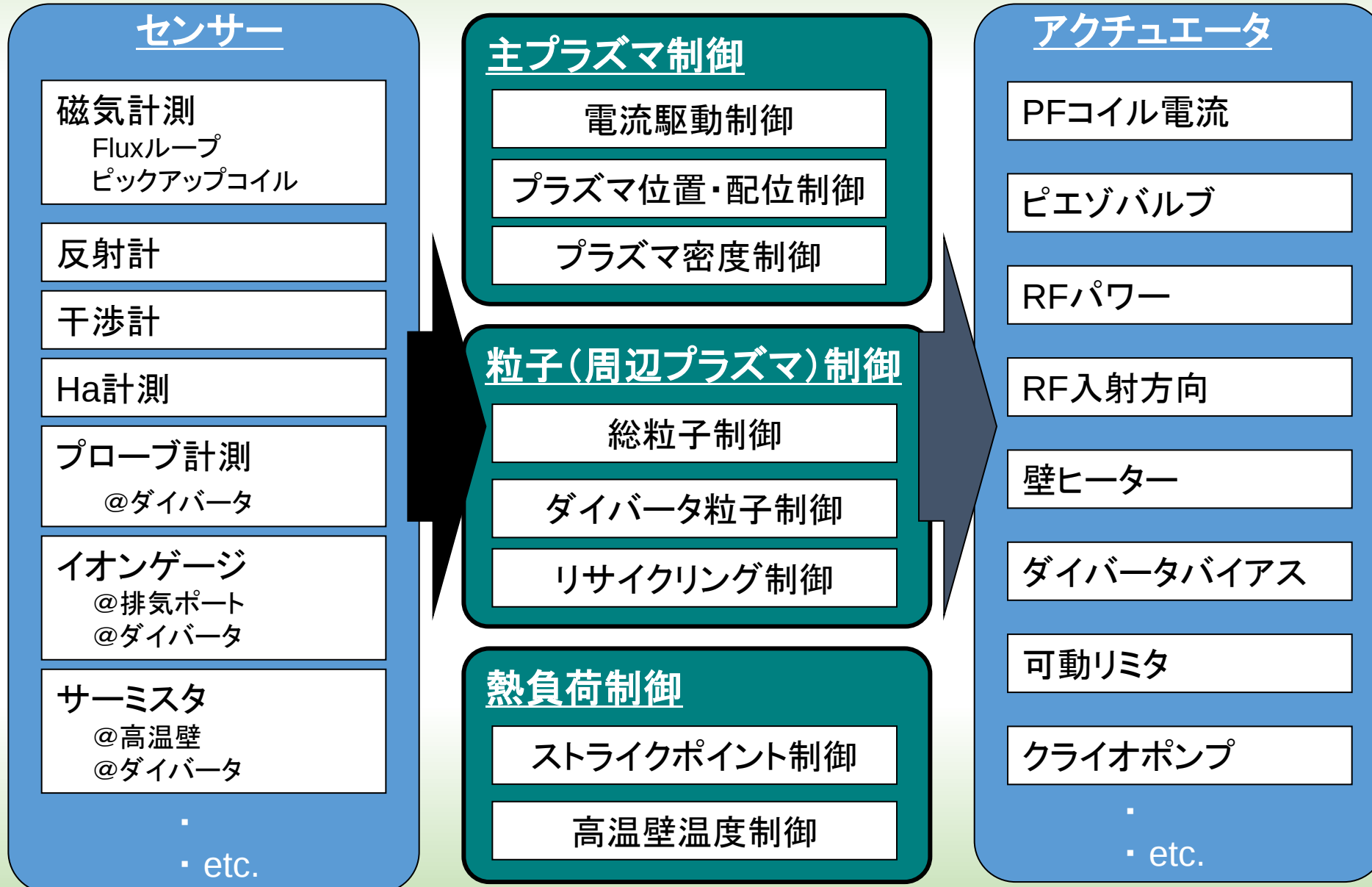
於: QUEST研究会
2015年3月11日(水)、12日(木)

九州大学 応用力学研究所
長谷川 真



今回の話でのQUEST統合制御

センサー対アクチュエータの関係が、1対1でなく多対多であるような制御。



現状:

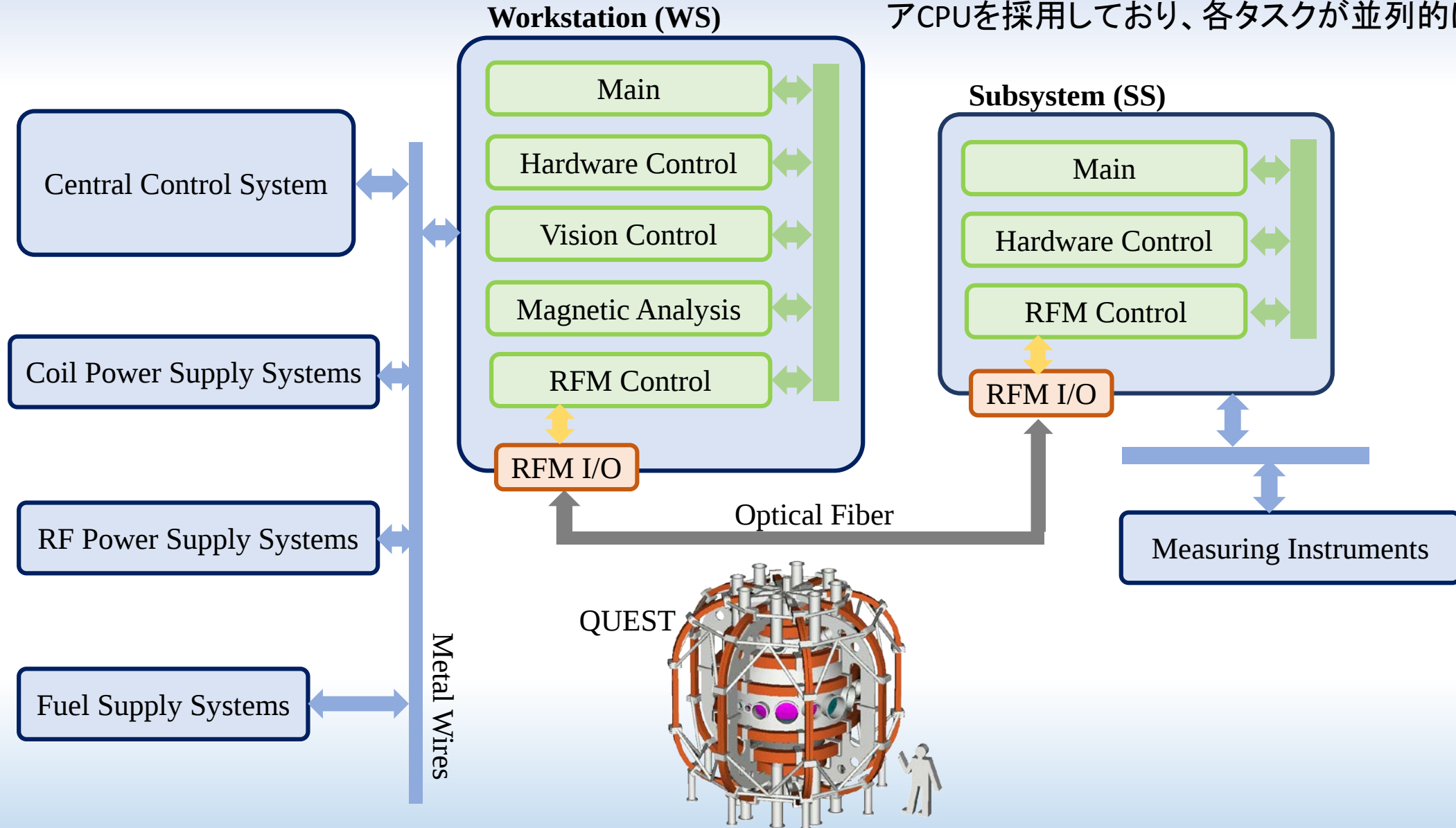
- ・ほぼ1対1の関係
- ・種類を増やしている。
- ・定常化、高速化、高性能化

内容

- QUEST制御システム全体の紹介
- プラズマ形状のリアルタイム同定とその制御
- リアルタイム同定の定常化
- 粒子供給制御など他の幾つかの制御について

制御システムの全体構成

Reflective Memory (RFM)を介して、Workstation (WS)と Subsystem (SS)で構成される。各システムではマルチコアCPUを採用しており、各タスクが並列的に実行される。



Reflective Memoryを利用した分散制御システムの開発

課題

- 制御WSのみの運用では**CPU使用率がほぼ100%**となり、入出力チャンネルを増やしたりなど、これ以上のタスクを追加できないでいた。

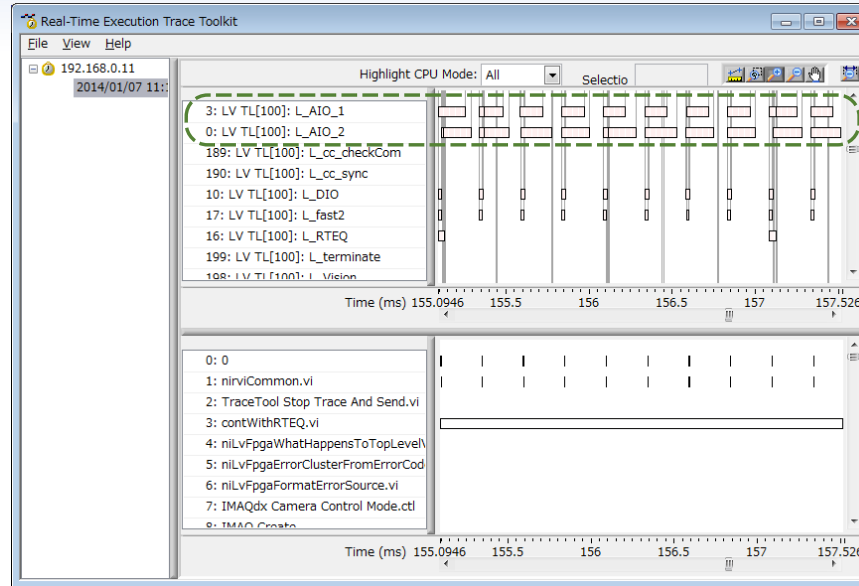
解決策

- システムを2つ以上に分散し、負荷を低減する。
- システム間は光ファイバーを介したReflective Memoryを利用してデータの送受を行う。

この方法の利点

- CPU使用率に余裕が生じ、入出力チャンネルの増加等に対応できる。
- 絶縁アンプを必要としない、**よりシンプル**な構成が可能になる。

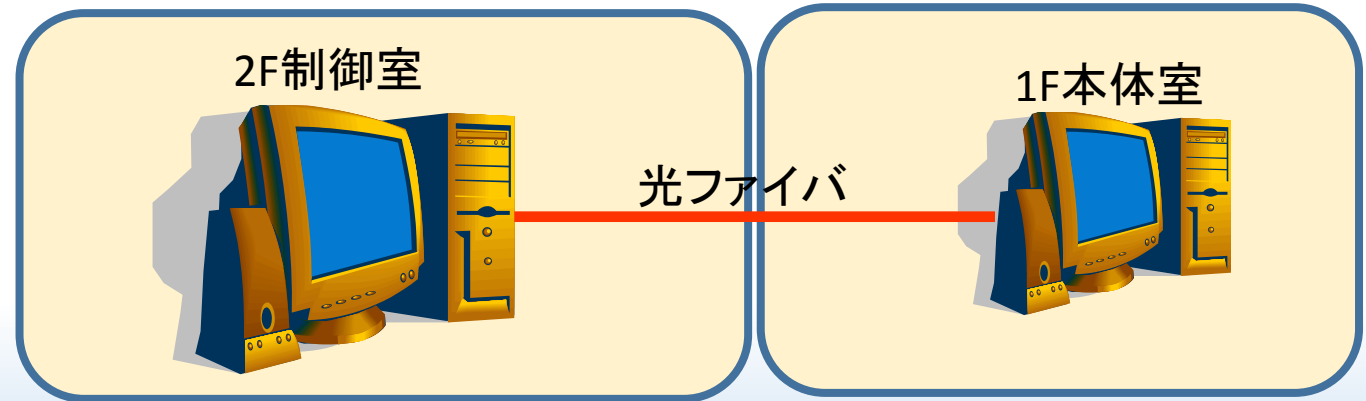
制御システムのクアッドコアCPU使用状況



リフレクティブメモリモジュール



データ転送：170Mbytes/sec



➡ 最大遅延250usecで、128個 (=1kBytes) の倍精度実数の転送を行う。

(≒4 Mbytes/sec)

Hardware Specifications of WS and SS

The WS and SS are composed of National Instruments PXI systems.

WSとSSの現状写真 @クエスト実験棟2F制御室

	Workstation	Subsystem
CPU	1.73 GHz Intel Core i7-820 Quad Core	2.26 GHz Intel Core 2 Quad Q9100
OS	LabVIEW Real-Time	LabVIEW Real-Time
AIO	40ch, 4kHz	32ch, 4kHz
DIO	16ch, 4kHz	none

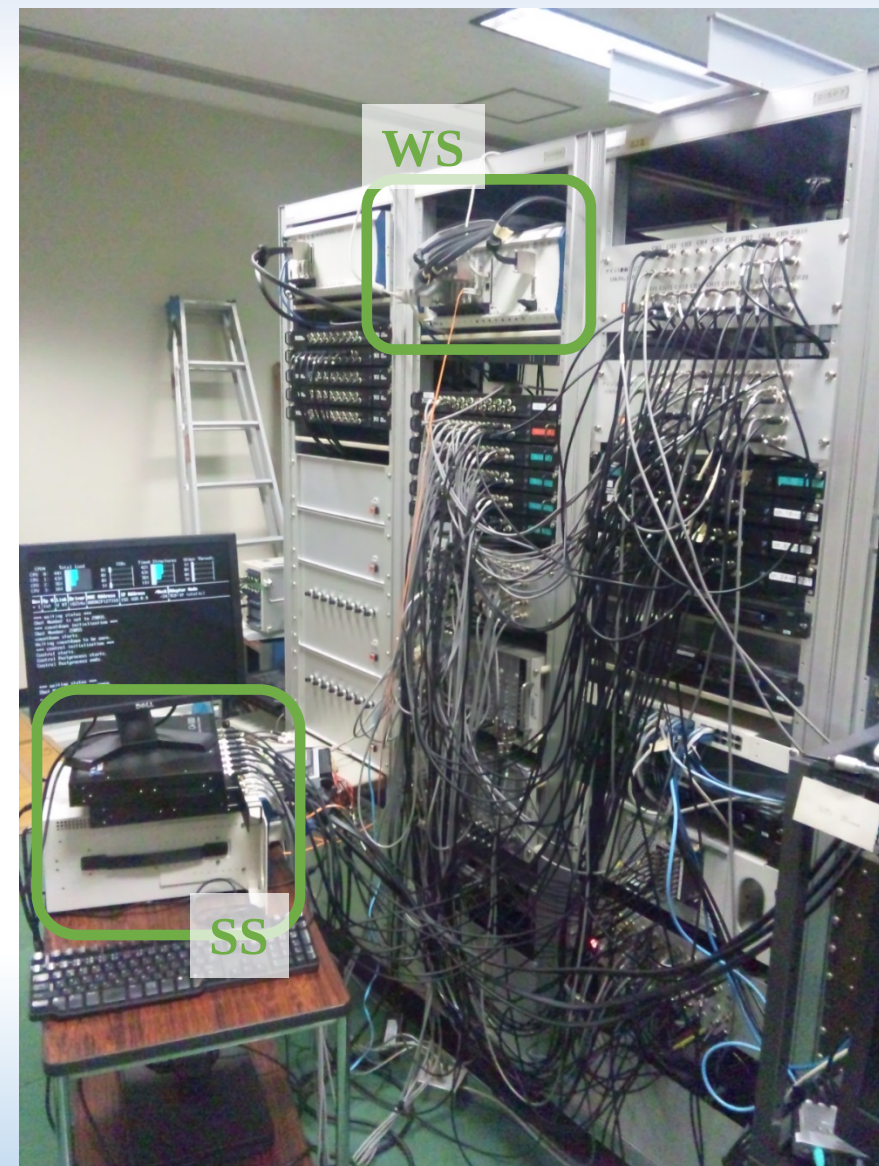
今後、Subsystemを本体室の磁気計測機器の近傍に移設して、絶縁アンプを使用しない、よりシンプルな構成で磁気計測を行う予定。

WS構成内訳

PXIe-1065 (18 slots chassis)			
Num	Model Number	Type	Application
1	PXIe-8133RT	Controller	Controller
4	PXI-7833R	FPGA	AI 8ch, AO 8ch
1	PXI-7842R	FPGA	AI 8ch, AO 8ch
1	PXI-6509	DIO	DI 16ch, DO 16ch
1	PXIe-8234	GigE Vision	Vision Input
1	GE cPCI-5565PIORC	RFM	Data Sharing

SS構成内訳

PXI-1042 (8 slots chassis)			
Num	Model Number	Type	Application
1	PXI-8110	Controller	Controller
4	PXI-7842R	FPGA	AI 8ch, AO 8ch
1	GE cPCI-5565PIORC	RFM	Data Sharing

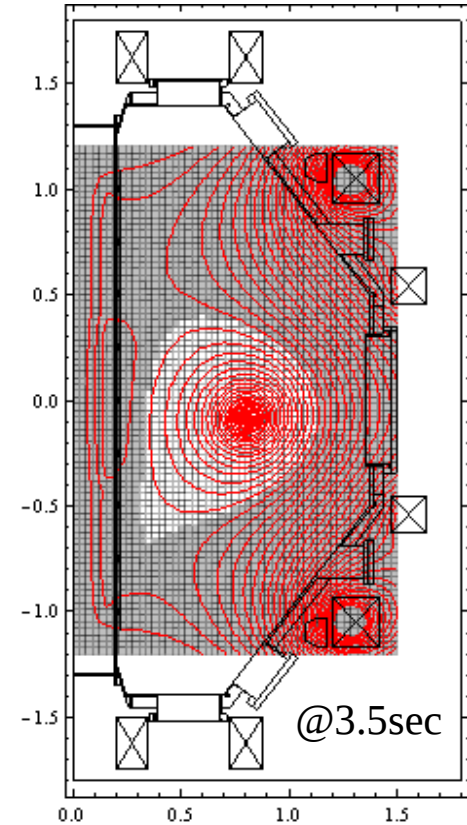
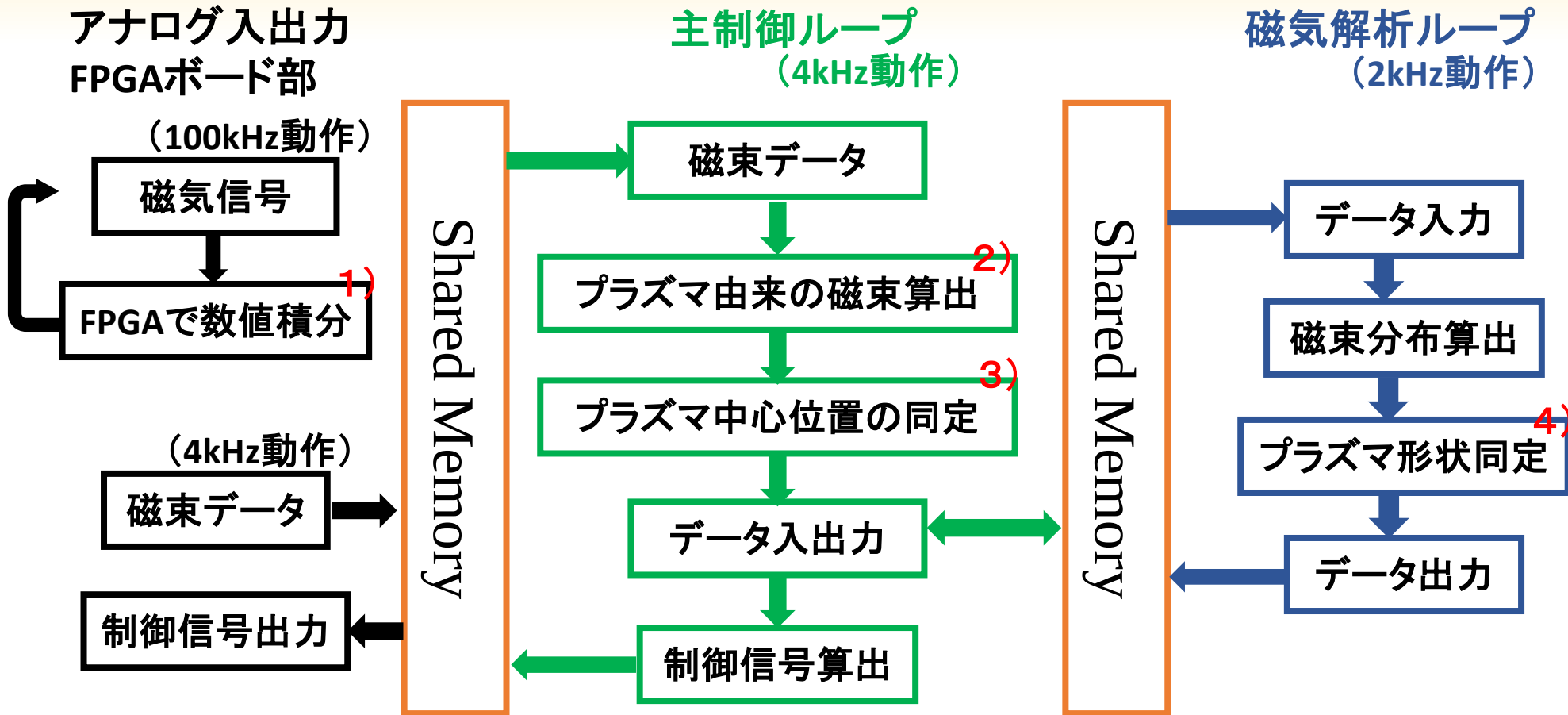


内容

- QUEST制御システム全体の紹介
- プラズマ形状のリアルタイム同定とその制御
- リアルタイム同定の定常化
- 粒子供給制御など他の幾つかの制御について

プラズマ形状のリアルタイム同定と、その制御の試み(1)

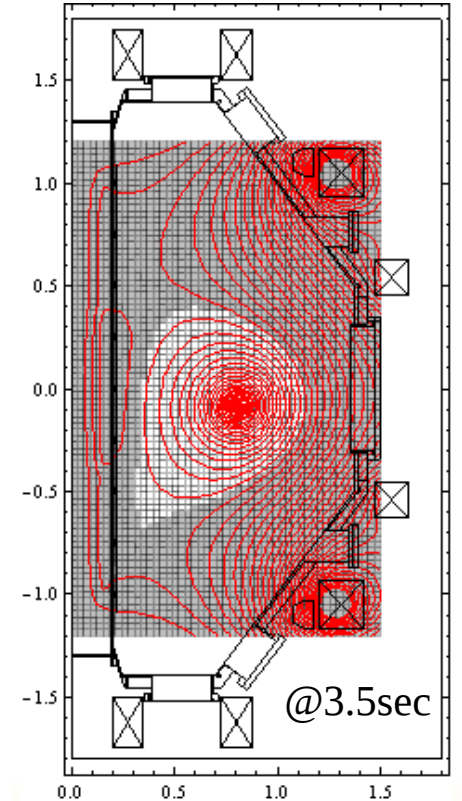
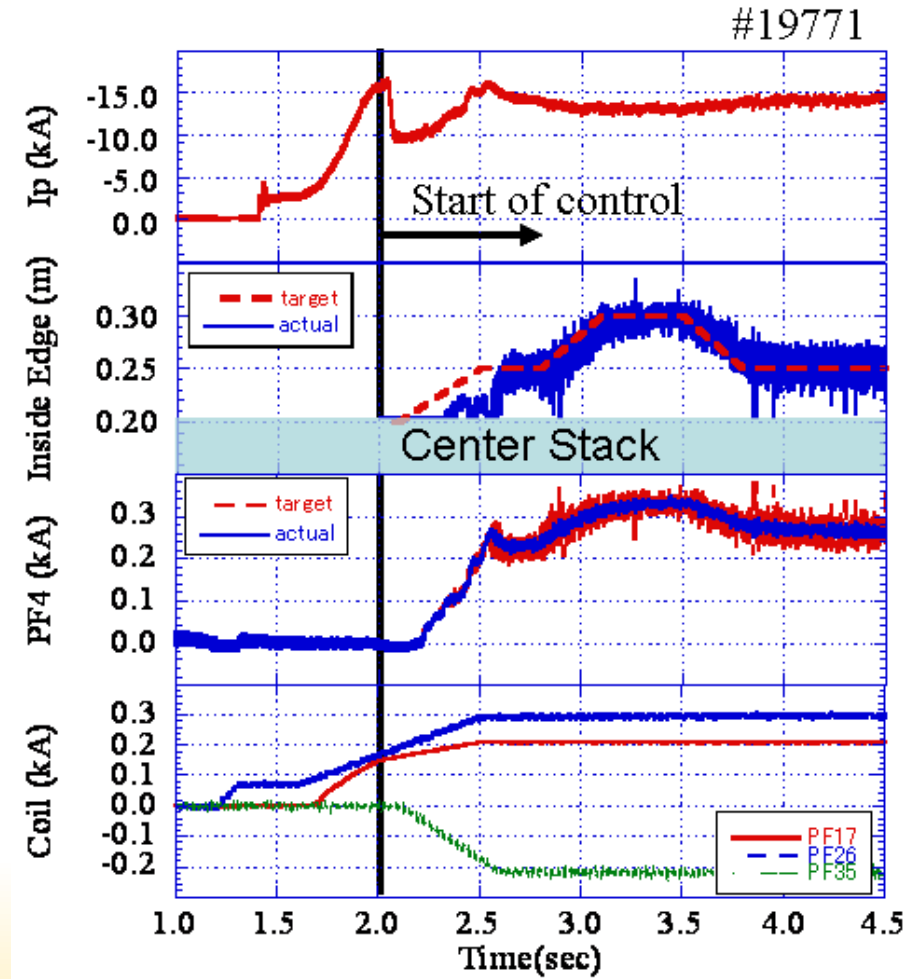
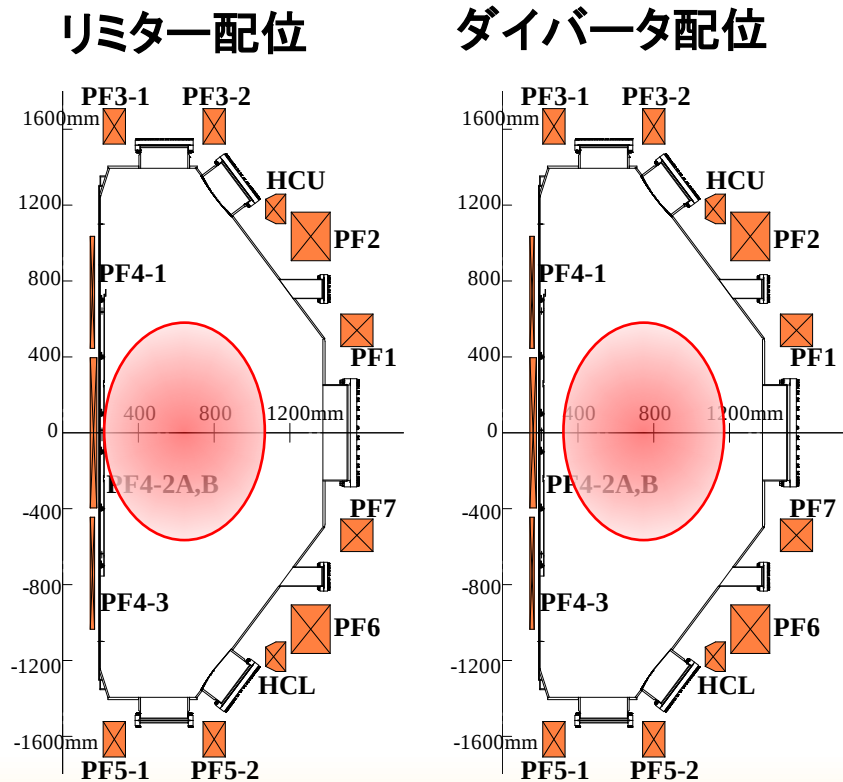
————— FPGA部で高速演算を行い、クアッドコアでタスクを並列的に実行する。 —————



- 1) アナログ入力32chに対して、100kHzのリアルタイム数値積分を行う。
- 2) コイル由来の渦電流効果を考慮した算出。コイル電流値に遅延のデジタルフィルターをリアルタイムで施す。
$$j_n = (i_n - j_{n-1}) \frac{\tau_s}{\tau} + j_{n-1}$$
- 3) 計測値を最もよく再現するプラズマ中心位置をデータ行列から探索。その近傍で線形近似展開して算出。
- 4) 磁束分布から最外殻磁気面の決定。アスペクト比やプラズマエッジ位置などを算出。

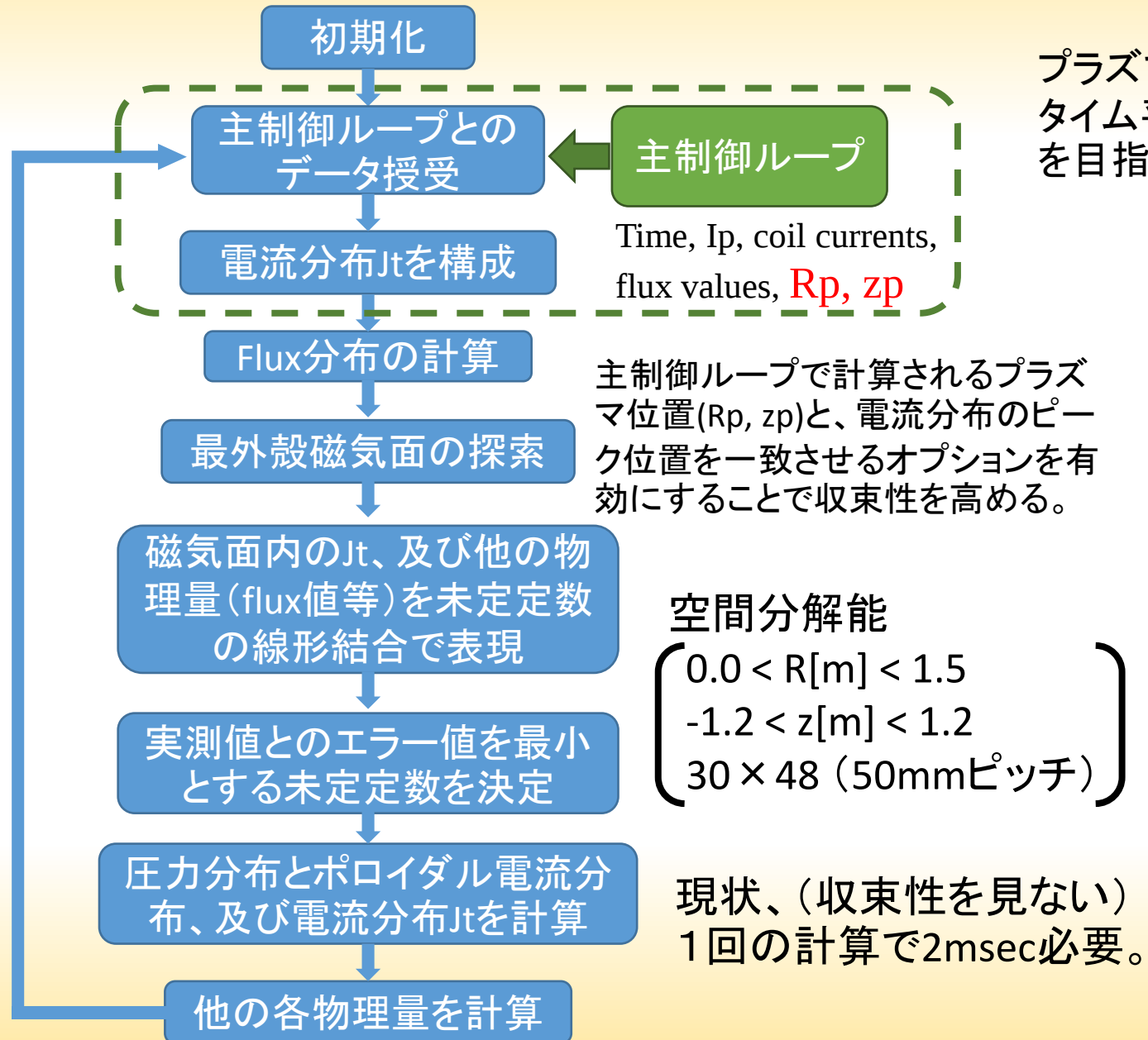
プラズマ形状のリアルタイム同定と、その制御の試み(2)

プラズマの**内側エッジの位置**を**PF4コイル**を用いて制御して、プラズマが真空容器に接しているリミター配位から、接しないダイバータ配位への移行を行い、それを維持する。

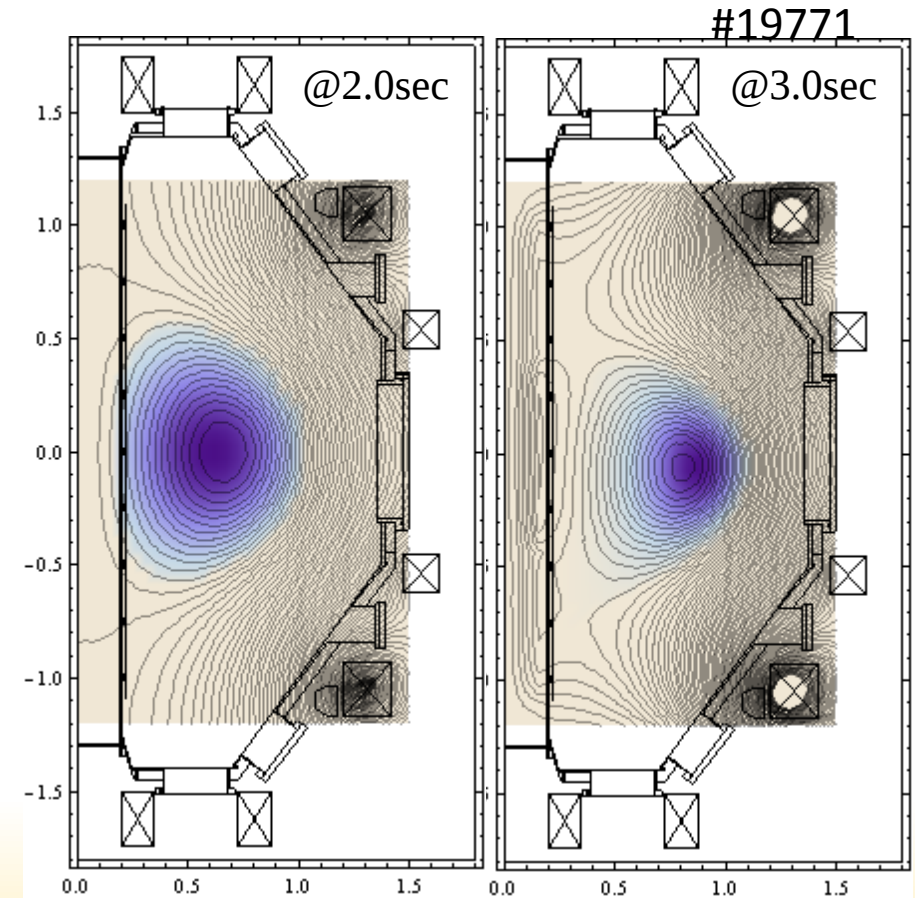


- 内側エッジ位置の制御は、位置の偏差に応じてPF4のコイル電流値を変えるPID制御で行っている。
- 外側エッジ位置の制御も試みたが、できなかった。その原因は調査中。

リアルタイム平衡計算コードの開発



プラズマ電流を線ではなく分布として扱うために、リアルタイム平衡計算を行い、より正確なプラズマ形状の同定を目指す。



青色濃淡: プラズマ電流分布、Contour: 磁束分布

FPGAを利用した高速平衡計算コードの開発

課題

- WSのQuad Core CPUを利用したリアルタイム平衡計算は、そのリアルタイム性を確保するために**粗い空間分解能**になってしまっている。また、CPUに負荷がかかり、**計算時間がかかっている**。

解決策

- FPGAを利用して、リアルタイム平衡計算を行う。

この方法の利点

- システムCPUに負荷をかけないで、**高分解能で高速に平衡計算**を実行することが期待できる。

今後の課題

- 現在、開発中。
- 従来の浮動小数点での表現から、固定小数点での表現など、特有な表現への変換を行う。

FPGA (Field-Programmable Gate Array) :

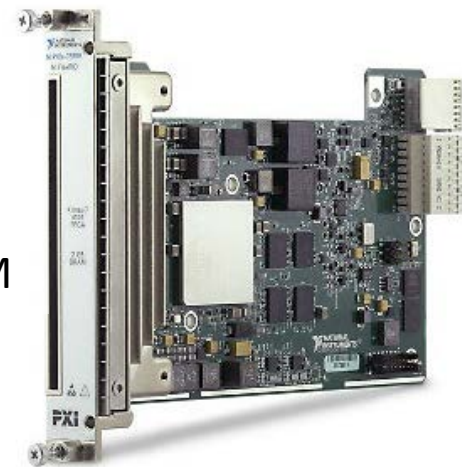
製造後に購入者や設計者が構成を設定できる集積回路

FlexRIO FPGA Module

NI PXIe-7975R

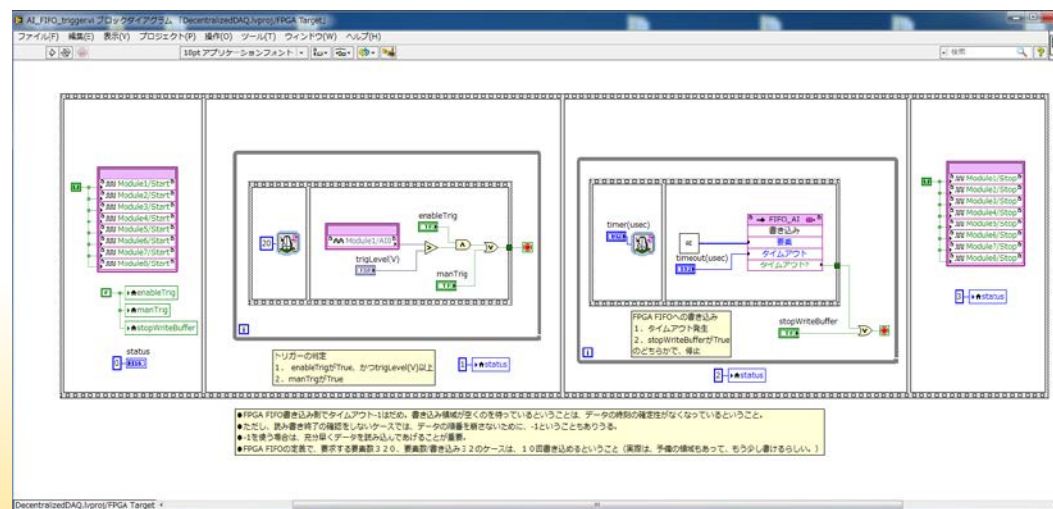
FPGA: Xilinx Kintex-7

RAM: 2GBytes, DDR3 DRAM



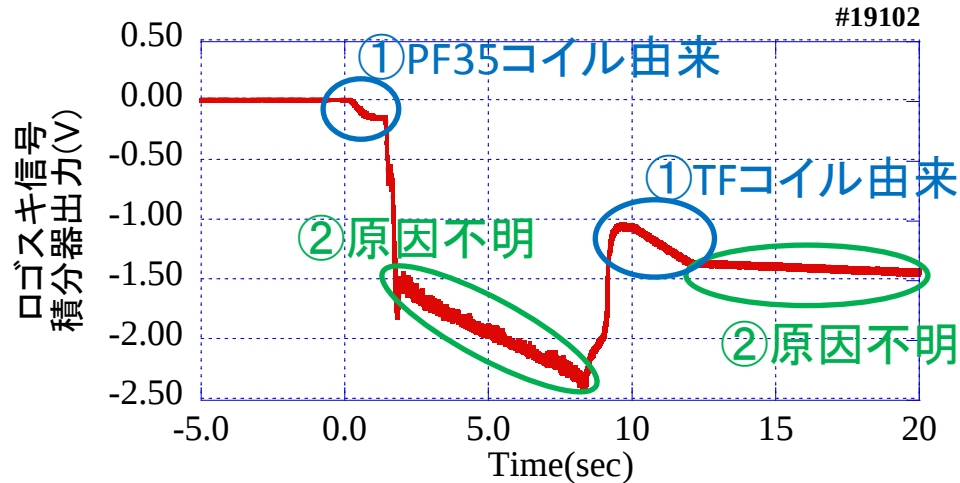
FPGAプログラムの例

NI LabVIEWを用いてグラフィカルに開発される。



プラズマ電流のReal-Timeログスキ計測補正

ログスキコイルで計測される信号成分にはプラズマ電流由来以外に、ノイズ成分として、①コイル由来のもの、②原因不明のものがある。プラズマ電流は、プラズマ制御(位置・形状制御、インターロック、etc.)を行うための基本パラメータであり、**ノイズ成分の除去をリアルタイムに行う必要**がある。



0秒からログスキ信号積分開始
1.4secから8.4secまでRFを入射。
Inboard-null配位

ログスキ計測補正方法

①コイル由来

ログスキ信号の積分開始時の各コイル電流値を記録。以降の時刻では、各コイル電流値の変動量から補正を行う。(ただし、現状はTFコイル由来のみ、補正をおこなう。)

②原因不明

2つの補正係数をプレプロで与える。1つめは、IP&RF共に存在するとき、2つめはその他の時に適用する補正係数。WSは、RFが存在することを、その指令値から、IPが存在することをログスキ信号から判断する。

このリアルタイムでの信号補正の機能はWSに実装済み。
プレプロで与える補正係数は、磁場配位にも依存するなど、補正方法が複雑になる。

時間積分を必要としないプラズマ同定手法の確立が望まれた。

内容

- QUEST制御システム全体の紹介
- プラズマ形状のリアルタイム同定とその制御
- リアルタイム同定の定常化
- 粒子供給制御など他の幾つかの制御について

定常制御のためのGigE Visionカメラを用いたプラズマ同定

課題

- ピックアップコイルなどの磁気センサーは、積分操作による**ドリフトノイズ**のため、長時間のプラズマ制御には不向き。

解決策

- プラズマ画像から、プラズマの位置・形状を算出して、磁気信号の値を推定し、**ドリフトノイズの補正**を行う。

この方法の利点

- ドリフトノイズが問題となるオーダー(数秒～数十秒)より、短い時間で収集画像の処理が行われれば良く、高いfpsを必要としない。

今後の課題

- WSへの実装は済んでいるので、実証試験を実施する。

GigE Visionカメラ:

画像データの伝送に一般的なEthernet Cableが用いられ、1000Mbps/secでカメラと収集ボード間の距離が100mまで可能。



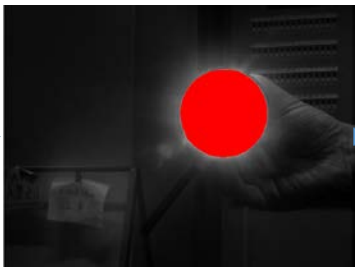
Baumer TXG02c

Sensor	SONY ICX618
Resolution	656 x 490 px
Frame rate max	140 fps
Exposure time	0.004-60000 ms
Pixel formats	BayerRG8, Mono8, etc.
Data interface	Gigabit Ethernet

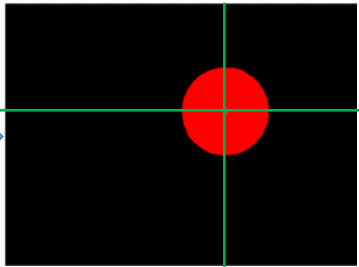
画像収集 (モノクロ8bit)



画像の2値化

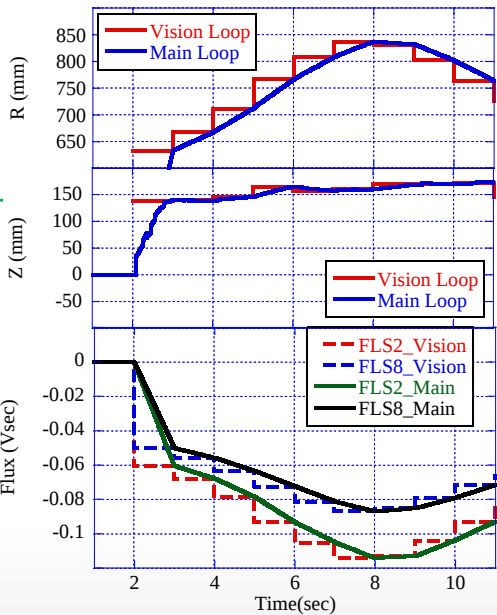


明部の重心点算出



これらのイメージフィルターはナショナルインスツルメンツ社製の“Vision Assistant”ライブラリを使用。

1msec以内にこのフィルター処理は終わることができている。
エッジ検出等の、より複雑な処理でも1秒以内で終了できることを期待。



➡ WSの制御において画像を利用することができるようになった意義は大きい。

定常制御のための3軸ホール素子によるプラズマ同定

課題

- ピックアップコイルなどの磁気センサーは、積分操作による**ドリフトノイズ**のため、長時間のプラズマ制御には不向き。

解決策

- 積分操作を必要としないホール素子を使用する。

この方法の利点

- 真空容器の外側に設置しても十分な感度を有しており、**ポートを占有しない**。**低ノイズ環境**での計測が可能。

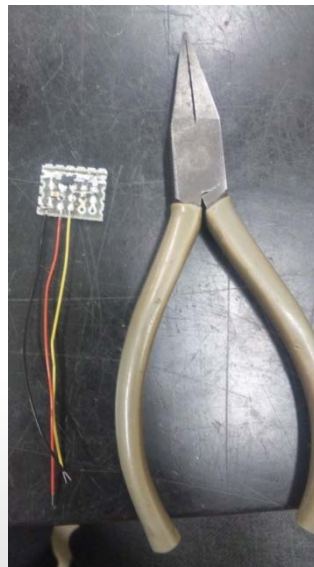
今後の課題

- 真空容器の外側に設置されるので、プラズマの時間応答は速くない。フラックスループの信号と組み合わせてプラズマ位置の同定等を行う必要がある。

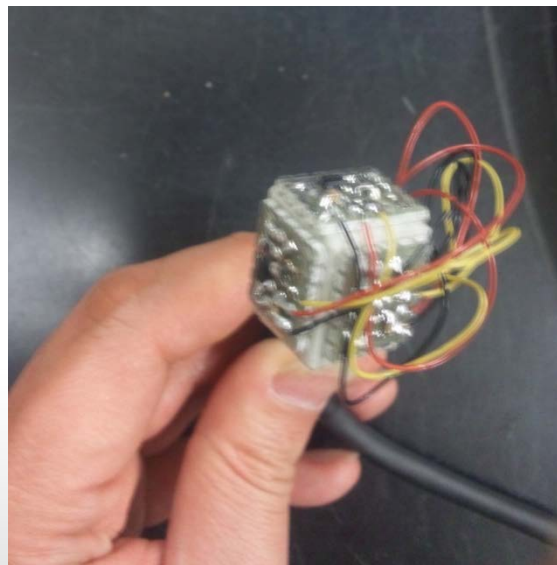


磁場検出範囲: $\pm 220\text{G}$ ($\pm 0.022\text{T}$)
(磁場感度: 9mV/Gauss)
出力電圧: $2.5 \pm 2.0\text{V}$
動作温度: $-40^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$
温度係数: $0.12\% / ^\circ\text{C}$

センサーの大きさ



プラスチックの立方体の3方向に貼りつけ



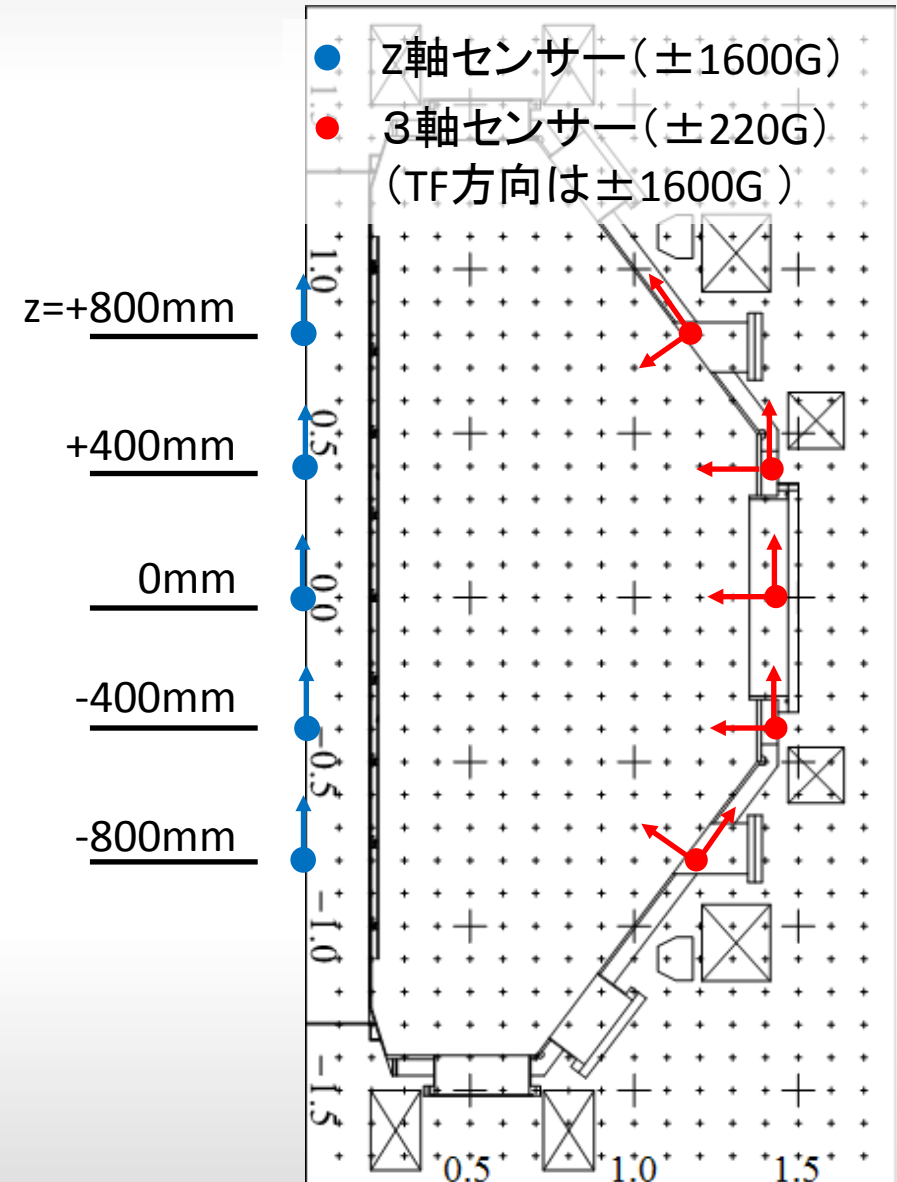
真空容器の大気側の赤道面に張り付けたところ。



ホール素子によるプラズマ位置及び電流の算出

- プラズマ電流を1本のフィラメント電流として、プラズマ位置及び電流を算出する。
- 本算出は、制御のためにリアルタイムに計算する必要があり、その計算速度は、充分速い ($\ll 250\mu\text{s}$) ことが望ましい。
- プラズマの位置は、各ホール素子間の信号の比を求め、その比からもっともらしいプラズマ位置を算出する。
- プラズマ電流は、位置を算出後、そのホール素子信号の強度から求める。

ホール素子の設置位置



ホール素子によるプラズマ位置及び電流の算出

各プラズマ位置 ($0.25\text{m} < R_p < 1.25\text{m}$,
 $-0.45\text{m} < Z_p < 0.45\text{m}$, step 0.05m) に応じて、
各ホール素子の設置位置において計測されべき値を、事前に計算

事前の計算

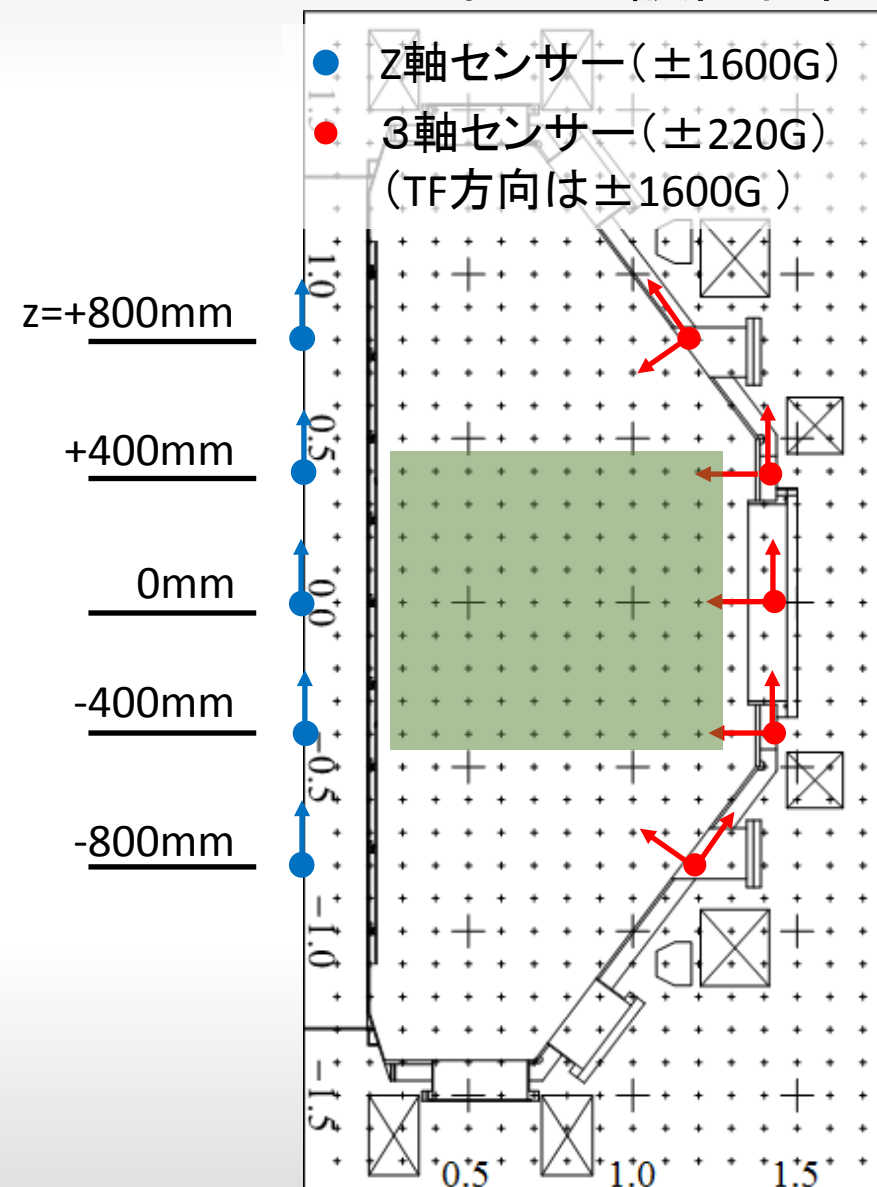
リアルタイムの計算

信号強度比を最も良く再現するグリッドポイント(プラズマ位置)を探索して、粗く位置の同定を行う。

グリッドポイント近傍の線形近似関数を作成して、再度、最も良く再現するプラズマ位置を連続的な値を持つものとして探索

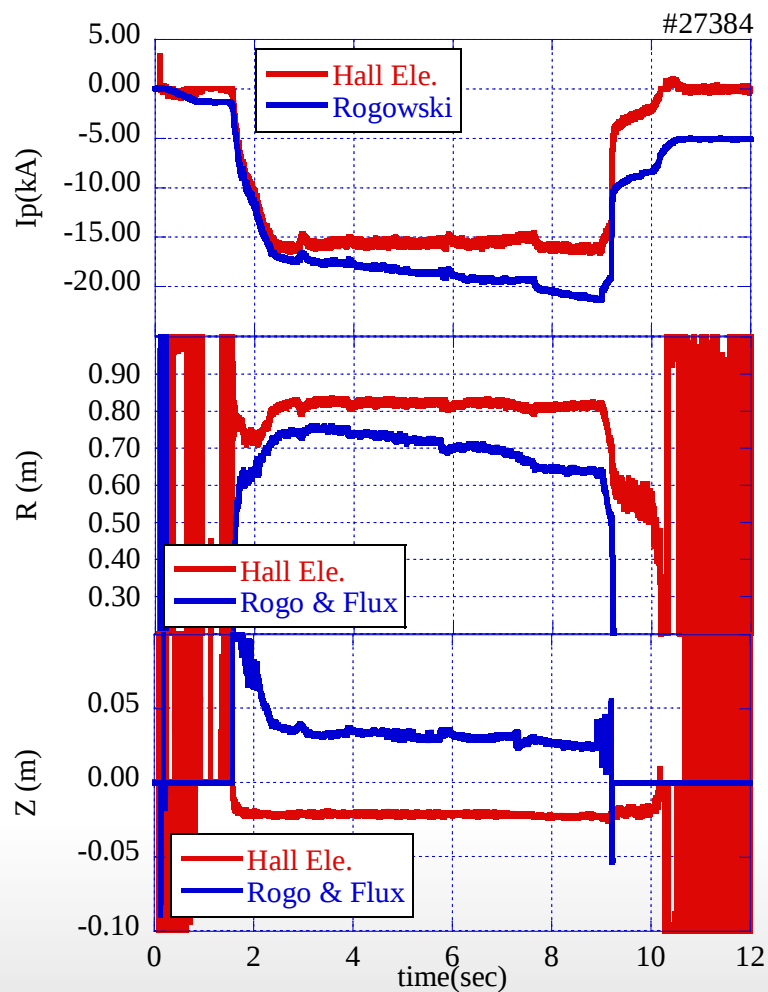
その位置において、線形近似関数を作成して、信号強度を最も良く再現するプラズマ電流を算出

ホール素子の設置位置

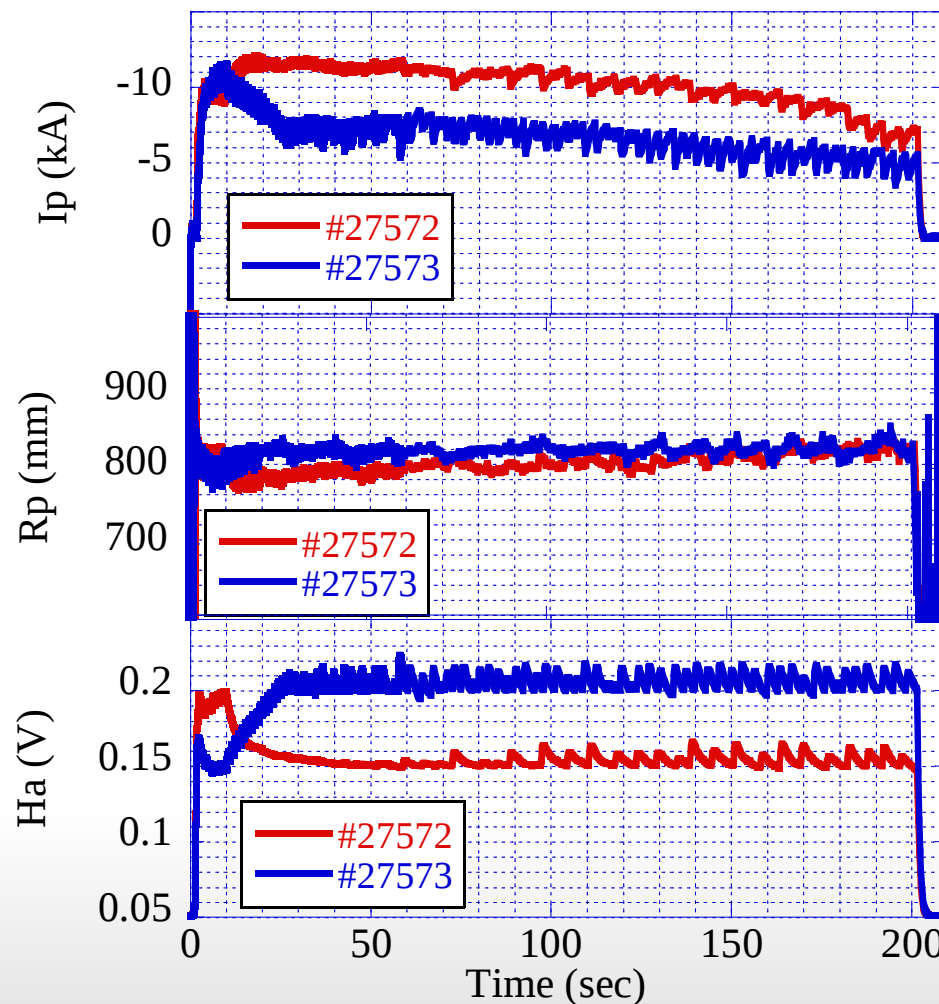


ホール素子によるプラズマ位置及び電流の算出例

ホール素子から求めたものと、Rogowski CoilとFlux Loopから求めたものとの比較



ホール素子から求めた長時間放電時のプラズマ電流とその位置



- ホール素子から求めたものは、Rogowski CoilとFlux Loopから求めたプラズマ位置および電流に良く一致する。
- ホール素子から求めたものは、長時間放電においてドリフトエラーのようなものは見られない。

今後の予定と課題

- ホール素子信号を平衡計算コードに組み込む。
- 真空容器大気側に設置している関係でプラズマの速い応答はモニターできていない。Flux Loop等と組み合わせる必要があるかも知れない。
- ダイバータ配位、オーミック放電ではCSに通電する関係で、CSに設置されているホール素子が使えなくなる。

内容

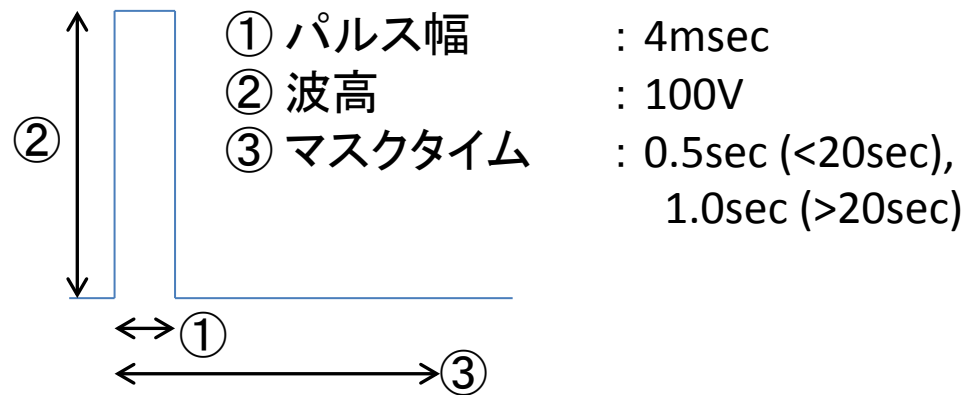
- QUEST制御システム全体の紹介
- プラズマ形状のリアルタイム同定とその制御
- リアルタイム同定の定常化
- 粒子供給制御など他の幾つかの制御について

Ha信号を参照したガスパフのフィードバック制御の例

目的: プラズマへのガス供給量のフィードバック制御を行う。
ガス供給としてガスパフを用い、参照信号としてHa信号を用いる。

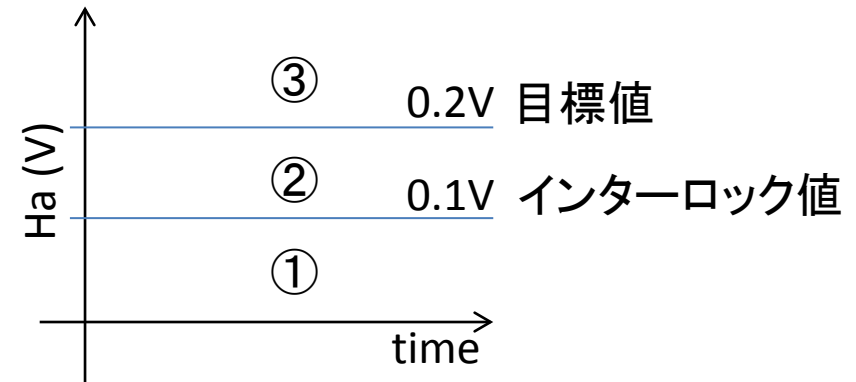
方法: Ha信号が設定値以下になったらパルス状にガスパフを行う。
Ha信号にソフトウェア的なローパスをリアルタイムに施し、時間平均したものを参照信号とする。

ピエゾ電圧波形



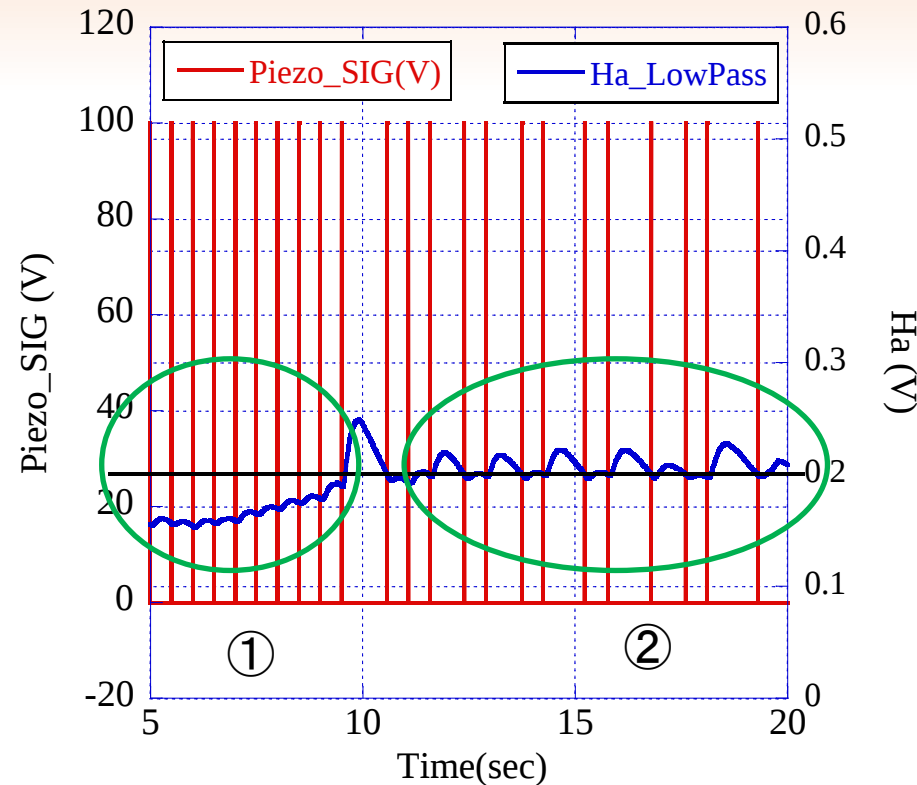
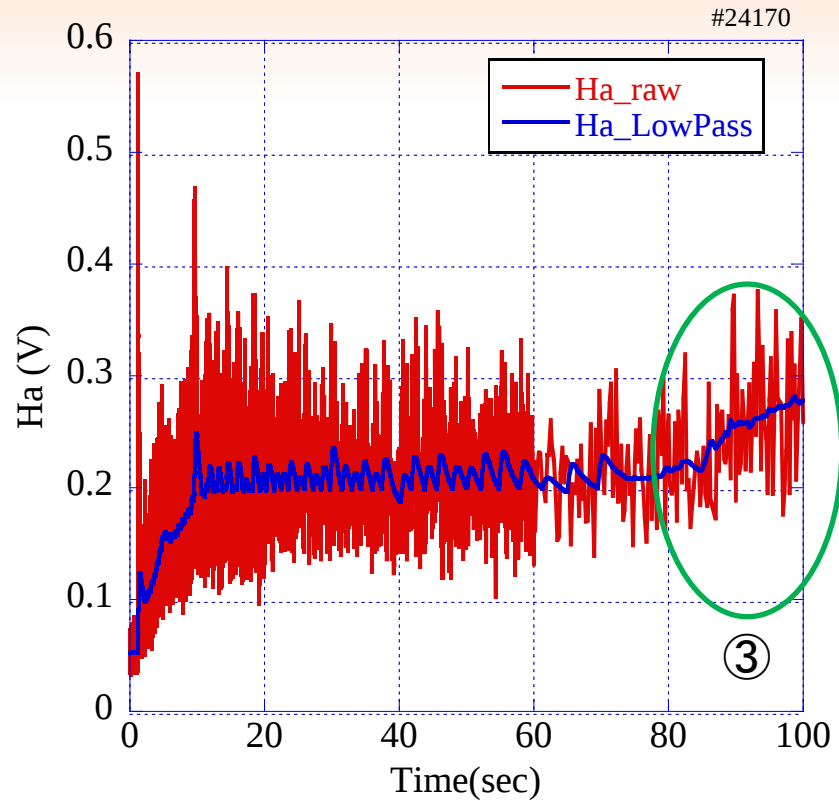
マスクタイムの時間帯はガスパフをしない。

Ha信号

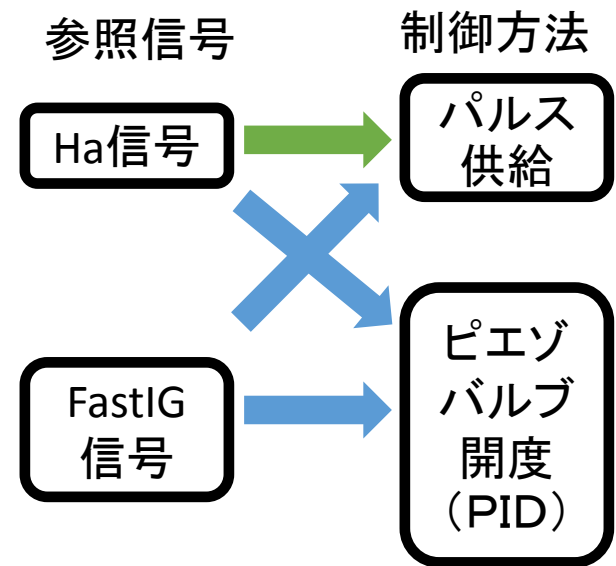


- ① ガスパフせず
プラズマは存在しないと判断
- ② ガスパフ実施
ガス供給過少と判断
- ③ ガスパフせず
ガス供給過多と判断

Ha信号を参照したガスパフのフィードバック制御の例



その他のガス供給手法として

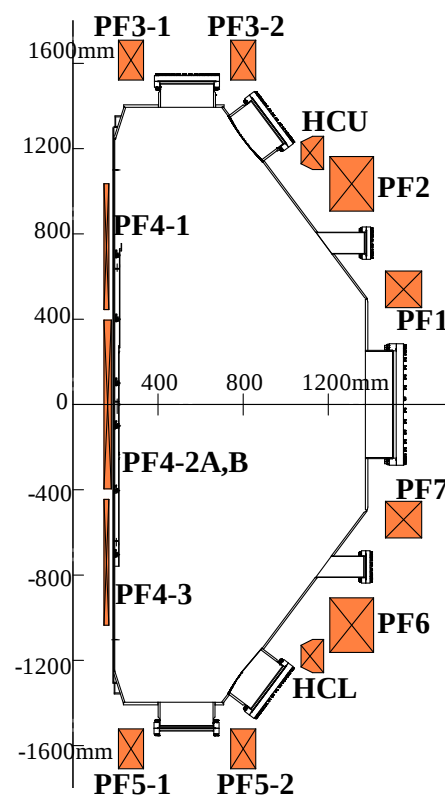
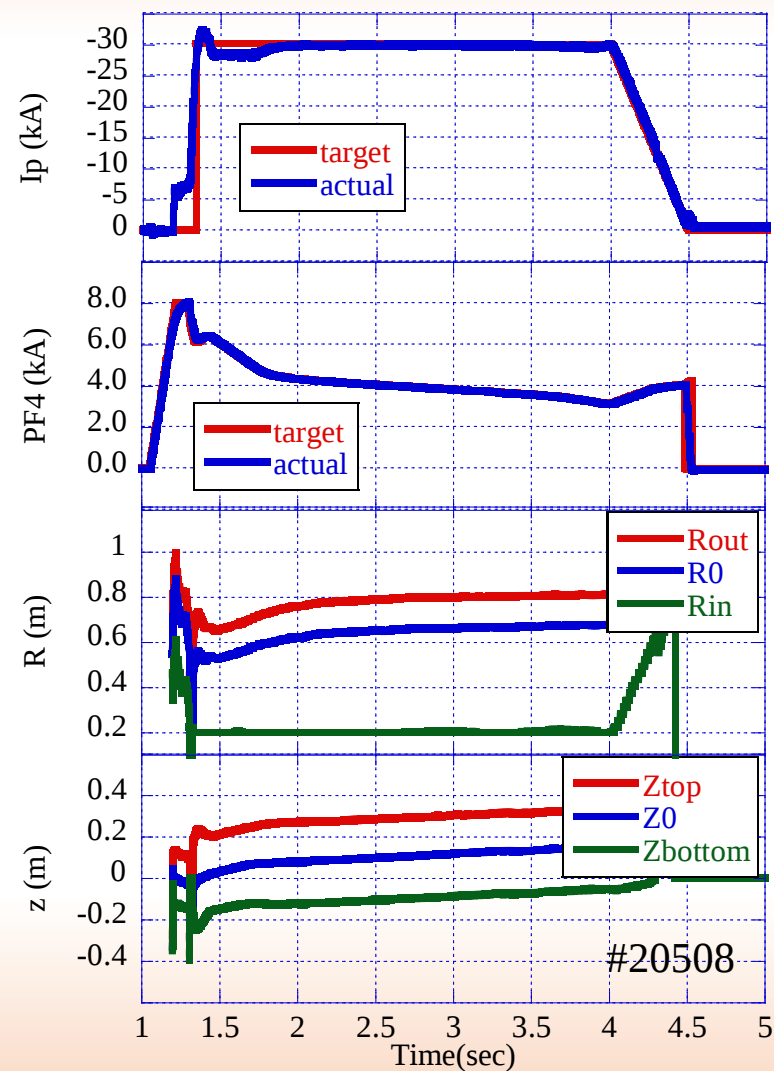


などの手法を実装済み。

- ① 設定値0.2Vよりも小さい値なので、マスク時間終了と同時にガスパフ入射
- ② ガスパフ後、設定値に到達した時点で、ガスパフ入射
- ③ Ha信号が下がらず、ガスパフなし。生信号を参照する従来の方法では、瞬間的に0.2Vを下回ることがあるので、この時間帯でもガスパフを行っていた。

他のプラズマ制御の例

PF4コイルによるプラズマ電流制御



その他のプラズマ電流制御手法として

参照信号

プラズマ電流信号

制御方法

PF4コイルによる
誘導電場

PF26コイルによる
誘導電場

RFパワーの入力

プラズマ垂直位置

HCUコイルによる
水平磁場

他のプラズマ制御の例（準備中）

干渉計によるプラズマ電子密度のリアルタイム計測

- FPGAを利用してデータ収集と電子密度のリアルタイム算出を行う。
- 高速サンプリング（50～100kHz??）によるフリンジジャンプの低減

（WSにてFPGAによる100kHzの数値積分は既に実装）

FPGA board: PXI-7842R



8AI (200kS/s, $\pm 10V$, 16bit) & 8AO (1MS/s, $\pm 10V$, 16bit)
FPGA: Virtex-5

（Ha信号でなく）プラズマ電子密度を直接参照した燃料供給制御の実現

マスフローコントローラによる定常的な粒子供給量の把握



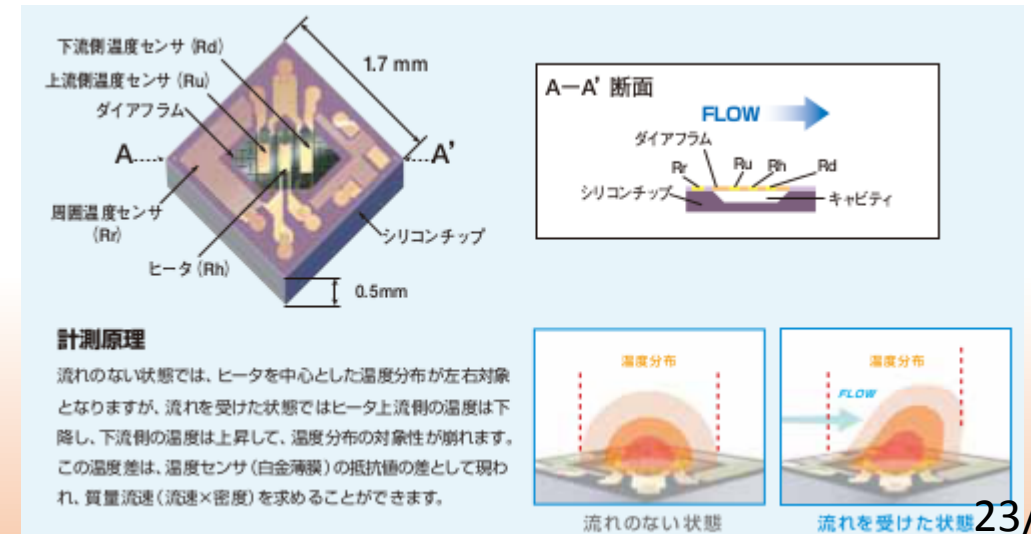
300ms～500msの高速制御性を有し、下の範囲で流量を制御できるコントローラを2系統用意

0.2～20.0 mL/min

0.04～5.00 L/min

アズビル株式会社製
マスフローコントローラ

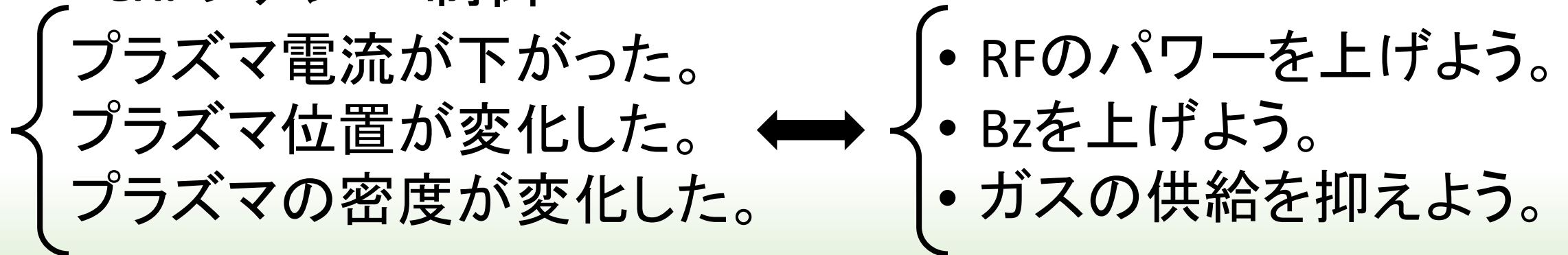
マイクロフローセンサー概略



まとめ

- 一つ一つのセンサーや、アクチュエータは、リアルタイムかつ長時間での運用が可能になってきている。
- 今後、これらのセンサーやアクチュエータを、1対1ではなく多対多の関係で運用して、プラズマを総合的に理解して制御することを目指す。

ex. ファジー制御



どういうルールを組み込むのが有効か？どのルールが優位に働いているか？