

LHD における 20 バレル固体水素ペレット入射装置の制御開発

小川英樹、井上知幸、鷹見重幸、伊藤康彦、横田光弘、坂本隆一、本島巖、山田弘司

自然科学研究機構 核融合科学研究所

はじめに

固体水素ペレット入射装置^[1]（以下ペレット入射装置と呼ぶ）とは、大型ヘリカル装置(LHD)のプラズマ実験において、固体状の水素燃料（以下ペレットと呼ぶ）を高温のプラズマ中に供給するための装置である。ガスパフと呼ばれる気体状の燃料を供給する方式と比べて、プラズマ中心部に効率よく燃料供給できるという特徴がある。

今回新たに開発したペレット入射装置は、一回のプラズマ放電で既存システム^[2]の 2 倍にあたる 20 個のペレットを射出できるため、プラズマの密度をより長時間維持することが可能である。

本報告では、技術部が中心となり開発したペレット入射装置の制御システムについて報告する。

なお、ペレット入射装置の詳細については、別発表^[3]で報告されているので、そちらも参考にされたい。

1 ペレット入射装置の運転

装置の運転の流れを図 1 に示す。ペレットは、バレルと呼ばれる直径 3.4mm および 3.8mm のステンレス製のパイプ内で生成される。バレルはヒートシンクを介して冷凍機に接続されており、ペレットを生成するため、常温から 10K 以下の極低温まで約 7 時間かけて冷却する。

20 個のバレルのうちどれを使用するかは実験シーケンス開始前までに決定する。そして実験シーケンス開始と同時に、該当のバレルに水素ガスを充填し、ペレット生成を開始する。放電 10 秒前信号を受信すると、ペレット射出タイミングなどの射出条件を制御系に設定し、その後、放電開始信号をトリガとして、ペレット射出を開始する。

ペレット生成からペレット射出までの一連のシーケンスは、PC 上の射出制御プログラムおよび PLC (Programmable Logic Controller) によって自動化されており、プラズマ実験シーケンスと同期して 3 分周期で繰り返し実行される。

2 ペレット入射装置の制御システム

ペレット入射装置の制御システムの機能には、バルブ、真空ポンプなどの ON/OFF 制御や、真空計、温度計などのアナログデータ監視を行う「プラント運転監視機能」と、射出タイミングの設定、ペレット射出などを行う「射出制御機能」の 2 つがある。以下にそれらの詳細について説明する。

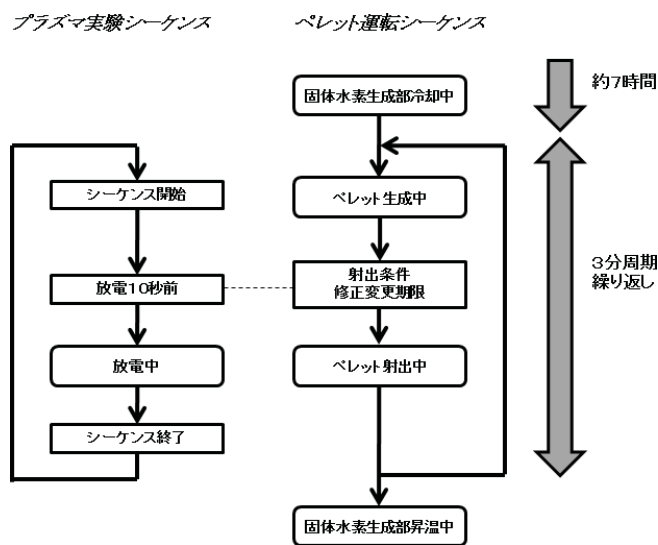


図 1. ペレット入射装置の運転の流れ

2.1 プラント運転監視機能

ペレット入射装置の計装システムは、冷凍機、真空ポンプ、バルブなど約 100 点のデジタル入出力と、真空計、温度計など約 40 点のアナログ入力から構成されており、これらの信号線は DeviceNet を介して OMRON 社製 PLC に接続されている (図 2)。

プラズマ実験中は、これらのハードウェアが設置されている現場には立ち入ることが出来ないため、約 100m 離れた制御室の運転監視用端末から遠隔制御する。運転監視に使用するユーザインターフェースは VisualBasic.Net (以下 VB.Net と呼ぶ) を用いて開発している (図 3)。このような運転監視システムは、InTouch などの SCADA ソフトを使用すれば比較的簡単に構築できるが、研究者から寄せられる幅広い要望に対応するためには、VB.Net のような汎用プログラミング言語による開発が必要となる。また、実験中に万一トラブルが発生した場合に、ソースレベルで問題解析が出来るという点は大きなメリットである。

画面のデザインには Microsoft の WPF (Windows Presentation Foundation) を採用することで開発の効率化を図っている。WPF アプリケーションの部品デザインは、XAML と呼ばれるテキスト形式のフォーマットで表現されており、それらは自由に編集し、既存の部品にスタイルとして適用することが出来る。例えば、図 3 のバルブやポンプ等の画面部品は、VB.Net でよく使用されるコマンドボタンに自作のスタイルを適用したものである。

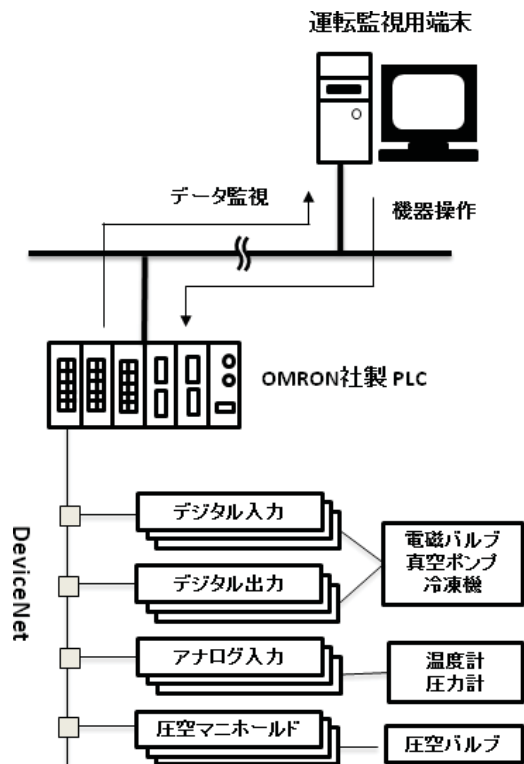


図 2. ハードウェア構成 1

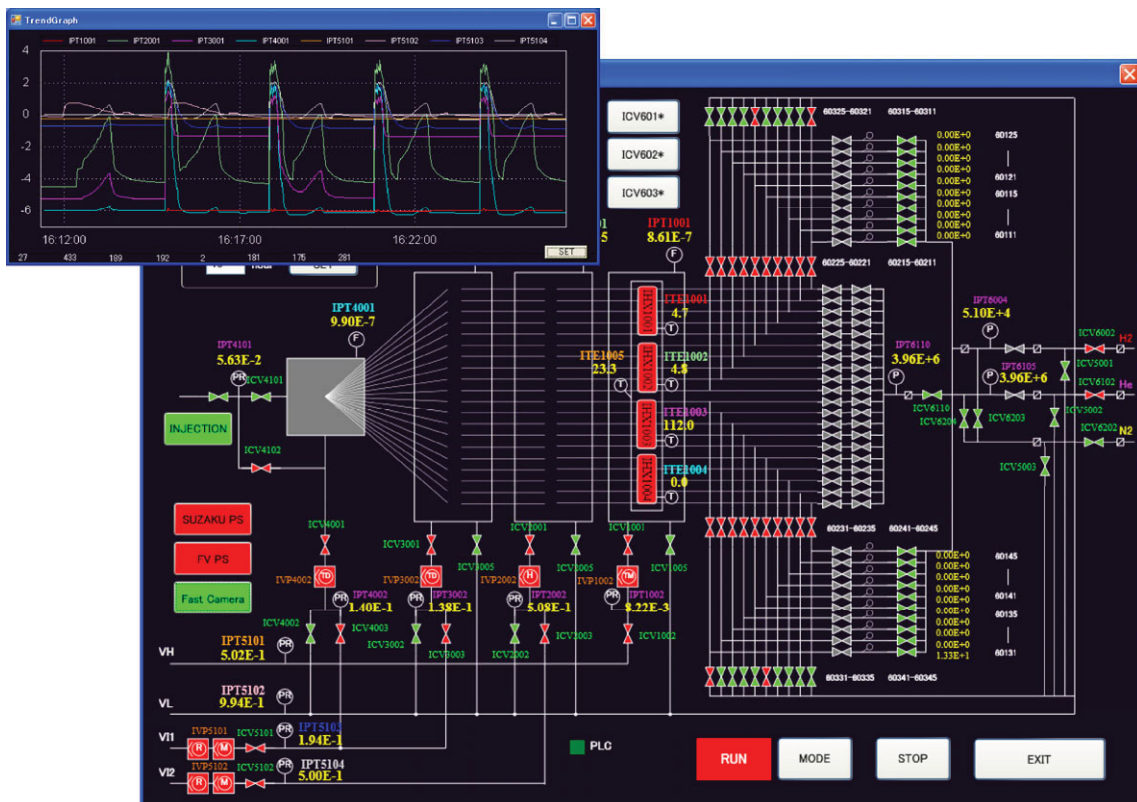


図 3. プラント運転監視画面とトレンドグラフ

また、収集された定周期データは、CSV形式のファイルに自動保存されると同時に、オープンソースのグラフ描画コンポーネント（ZedGraph）を使用して画面上にトレンド表示される。

WPFは3Dグラフィックスやアニメーションなどもサポートしているため、今後これらを積極的に活用することで、よりビジュアルで使用性の高いユーザインターフェースの構築を行いたい。

2.2 射出制御機能

ペレット射出制御の方式にはプレプロ方式とフィードバック方式（以下FB方式と呼ぶ）があり、20個のバレル毎にいずれかの方式を選択する。プレプロ方式が選択されたバレルについては、放電開始信号を受けてから、設定された時間だけ遅延されたあと、高速作動弁に射出トリガを送信する。一方、FB方式では計測器から提供されるプラズマ密度信号と、あらかじめ設定されたFBリファレンス波形を比較し、プラズマ密度を一定以上に保つようにペレット射出を制御する。図4は、VB.Netで開発した射出タイミング設定画面である。画面左側で20chの射出タイミング（ミリ秒単位）、右側でFBリファレンス波形が設定出来る。

ペレット射出制御では、精度の高いタイミング制御が必要なことから、FPGAが搭載された組み込みマイコンボード（AtmarkTechno社製SUZAKU-S）を使用している（図5）。VHDLによるデジタルロジックの実装と、C言語による通信インターフェースのプログラミングを組み合わせることで非常に自由度の高いシステム開発が可能で、コンパクトで高機能なシステムを低コストで構築することが出来た。

2.3 通信プロトコル

運転監視用PCと各コントローラ間の通信には、KEKの放射光で開発されたSTARS^[4]（Simple Transmission and Retrieval System）を採用している（図6）。STARSとは、小規模制御システム向けのメッセージ配信ミドルウェアで、本システムのようにネットワーク上に分散された複数のノードを協調してコントロールするようなケースでは非常に有用である。Windowsをはじめ様々なOSに対応した開発ライブラリが提供されており、SUZAKU-Sに搭載されているuClinuxにも問題なく適用できた。

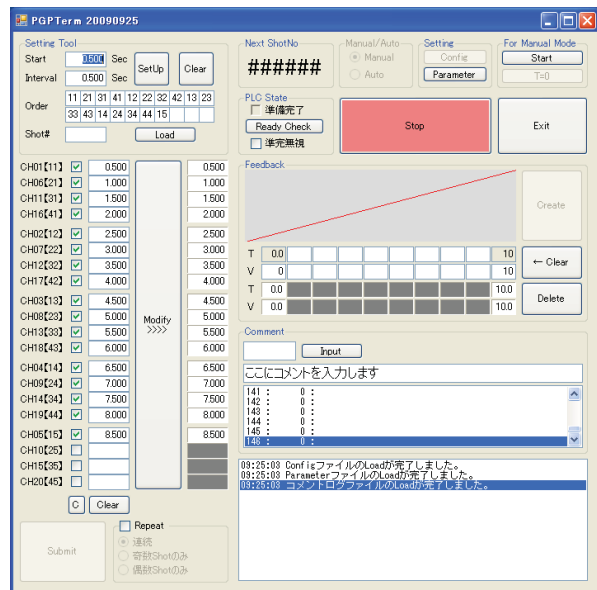


図4. 射出タイミング設定画面

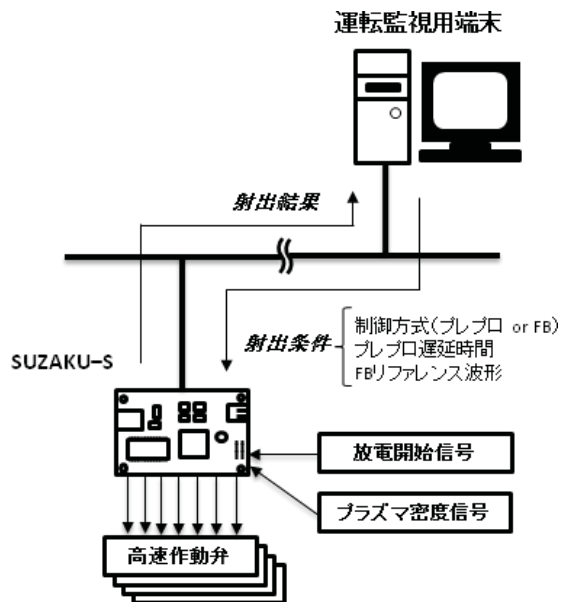


図5. ハードウェア構成2

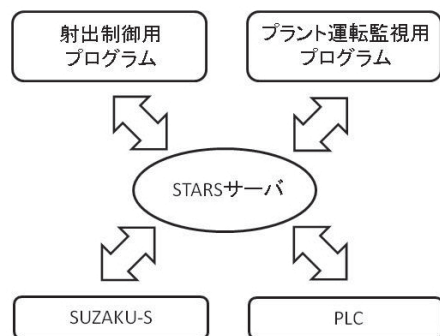


図6. STARSによる通信

運転監視用端末と PLC が取り交わすコマンドの一例を表 1 に示す。オブジェクト指向的な考え方でコマンドを実装出来るため、直感的でわかりやすく、コマンドの変更や新規追加が発生した際にも、取合い確認を非常にスムーズに行えた。

表 1. STARS コマンド例

バルブ開閉	要求	PLC.VALVE・SET [バルブ名] OPEN
		PLC.VALVE・SET [バルブ名] CLOSE
	応答	PLC.VALVE>TERM1・@SET・OK
アナログデータ取得	要求	PLC.ANALOG・GET
	応答	PLC.ANALOG>TERM1・@GET・1.23E+4,2.34E+5…
射出条件設定	要求	SUZAKU.PARAM SET パラメータ羅列
	応答	SUZAKU.PARAM>TERM1 @SET OK

3 まとめ

今年度、技術部が中心となり、ペレット入射装置の制御システムを開発した。システム設計から構築、試験までを一貫して担当し、10月から開始されたプラズマ実験においては、プラズマ密度の長時間維持に貢献することが出来た (図 7)。来年度は、20 バレル固体水素ペレット入射装置の後段に、連続ペレット入射装置^[5]が接続される予定である。これに伴い、両装置の制御システム間で STARS による設定パラメータの連携と、プラント監視部の一部見直しが必要となる。

ペレット入射装置の制御システム開発を終えて、WPF による自由度の高い画面開発、および SUZAKU-S によるコンパクトかつ高機能なコントローラの開発は、ペレット装置以外の様々な装置にも適用できる可能性があると感じた。今回得たノウハウを、ぜひ次のシステム開発にも引き継いでいきたい。

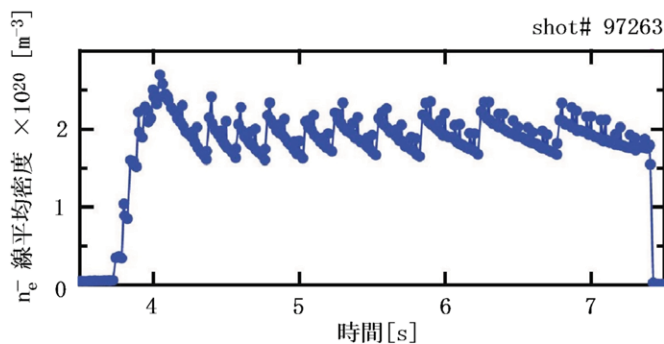


図 7. ペレット入射時のプラズマ密度

参考文献

- [1] 坂本隆一、山田弘司、“NIFS-TECH-13”、<http://www.nifs.ac.jp/report/nifstech.html>
- [2] 井上知幸,他,“パイプガン式固体水素ペレット入射装置の改造”,平成 15 年度 高エネルギー加速器研究機構技術研究会報告集
- [3] 林 浩己,他,“LHD における 20 バレル固体水素ペレット入射装置の設計・組立”,平成 21 年度 高エネルギー加速器研究機構技術研究会報告集
- [4] STARS web ページ <http://stars.kek.jp>
- [5] 鷹見重幸,他,“連続ペレット入射装置制御システムの開発”,平成 14 年度 東京大学技術研究会報告集,平成 15 年 3 月, P3-21-P3-23