

## QUEST における制御システムの現状紹介と展望

長谷川, 真  
九州大学応用力学研究所 : 助教

中村, 一男  
九州大学応用力学研究所

花田, 和明  
九州大学応用力学研究所 : 教授

藤澤, 彰英  
九州大学応用力学研究所 : 教授

他

<https://doi.org/10.15017/1924415>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 153, pp.75-79, 2017-09. 九州大学応用力学研究所  
バージョン :  
権利関係 :

# QUEST における制御システムの現状紹介と展望

長谷川 真<sup>\*1</sup> 中村 一男<sup>\*1</sup> 花田 和明<sup>\*1</sup> 藤澤 彰英<sup>\*1</sup> 出射 浩<sup>\*1</sup>  
徳永 和俊<sup>\*1</sup> 永島 芳彦<sup>\*1</sup> 恩地 拓己<sup>\*1</sup> 東島 亜紀<sup>\*1</sup> 永田 貴大<sup>\*1</sup>  
川崎 昌二<sup>\*1</sup> 渡邊 理<sup>\*1</sup> 黒田 賢剛<sup>\*1</sup>

(2017 年 7 月 31 日受理)

## Present Status and Prospects of Control System on QUEST

Makoto HASEGAWA, Kazuo NAKAMURA, Kazuaki HANADA, Akihide FUJISAWA, Hiroshi IDEI,  
Kazutoshi TOKUNAGA, Yoshihiko NAGASHIMA, Takumi ONCHI, Aki HIGASHIJIMA,  
Takahiro NAGATA, Shoji KAWASAKI, Osamu WATANABE, Kengoh KURODA  
E-mail of corresponding author: *hasegawa@triam.kyushu-u.ac.jp*

### Abstract

QUEST is a middle-sized spherical tokamak, which has a capability of long term plasma discharge. Thus, the QUEST is suitable for the study of steady state operation such as energy and particle balances and particle recycling. For the sustainment of steady-state plasma, it may be required such as high performance control systems, various sensors and actuators, technics for real-time calculation methods, and so on. In this paper, the present status of control systems on QUEST are presented, and its perspectives are also described. The central control system will be improved with easy comprehensible user interface and Ethernet environment. And, the plasma control system identify the plasma position and its current with hall sensors in real-time continuously without drift errors. The plasma on QUEST will be controlled integrally with the cooperation of these systems.

**Keywords:** *control system, user interface, hall sensor, Ethernet environment, integrated control*

## 1. 緒言

QUEST 装置は中型の球状トカマク装置であって、QUEST 計画では、プラズマの定常維持の実現に資することが目標の一つとして掲げられている。その装置の特徴として、加熱機器やコイル電源などは一部を除いて基本的に定常運転が可能であって、長時間放電における粒子バランスやエネルギーバランスに関する研究など、定常維持に関する研究を行なうのに適した装置といえる。また、将来的には電気ヒーターおよび冷却水により、プラズマ第一壁の温度の制御が可能になるなど、プラズマの定常維持に関して更に多くの知見が得られるようになる予想される。これらを実現するためには、様々な機器を用いてプラズマの状態を同定して制御していく必要があるが、本稿では QUEST における制御システムの全体構成や、いくつかの機器に関して紹介を行なうと共に今後の展望等について述べたい。

## 2. QUEST 制御システムの現状

### 2.1 全体構成

QUEST 装置の制御システムは、大きく二つのシステムに分けられる。一つは、プラズマ制御システム (Plasma Control System, PCS) であって、これはプラズマの放電を行なっている最中に、リアルタイムに計測機器等からの信号を受け取ってプラズマの状態等を計算にて求め、それを基に他の制御機器に指令値等を送出するシステムである。もう一つは、中央制御システム (Central Control System, CCS) であって、プラズマ放電を開始して終了するまでの全体的なシーケンスを司り、同時にプラズマの放電の有無にかかわらず機器全般の監視を定期的に行い、プラズマの放電が安全に行なえるように警報の発呼や機器の保護動作を行なうものである。QUEST 装置は TRIAM-1M 装置の稼動終了後に、同じ場所に新たにリプレースされた装置であるが、

\*1 九州大学応用力学研究所

TRIAM-1M 装置で使われていた CCS が現在の QUEST 装置でも一部流用されている。一方、QUEST 装置で新たに設置される周辺機器に対しては、QUEST 装置用に新たに用意した CCS が監視を行なうようにしている。このように QUEST 装置における CCS は TRIAM-1M の時から使用している従来の CCS と QUEST の時から使用している新規の CCS が並立して動作している状況である。

## 2.2 中央制御システムについて

従来の CCS は TRIAM-1M 装置用に設計・開発されたものであって、超伝導コイルを冷却するためのヘリウム液化冷凍設備制御盤や超伝導コイルに通電するための精密直流電源監視制御盤など、TRIAM-1M 装置に特有な周辺設備の監視もその役割に含まれている。しかし、QUEST 装置ではこれらの設備は用いられず、これらの存在は、従来の CCS を流用することにおいて却って運用を複雑化させており、CCS 全体のメンテナンス性を下げてしまっている。また、従来の CCS および周辺機器のユーザーインターフェースは、ほとんどがランプやプッシュボタンを用いて、ハードウェア的に構成されている。その例として Fig. 1 に TRIAM-1M 装置の時から利用されている真空排気系監視盤のユーザーインターフェースを示す。この真空排気系監視盤によれば、TRIAM-1M 装置においてプラズマを生成・維持するための超高真空排気系、プラズマに燃料を供給するためのガス導入系、超伝導コイルの超伝導状態を保つための断熱容器真空排気系と3つの系統がある。現在の QUEST 装置でも、この真空排気系監視盤のユーザーイ

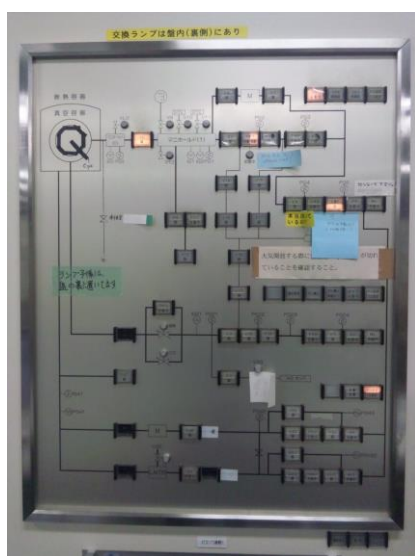


Fig. 1 ハードウェアで構成された真空排気系監視盤

ンターフェースを使用しているが、このうちガス導入系は使用されなくなっており、断熱容器真空排気系はプラズマを生成・維持するための真空容器の粗引き系として流用されている。このように、真空排気系監視盤で表示されている系統図と、現在の実際の系統は必ずしも一致しておらず、現状の実態を反映していない。このようなインターフェースは、事実を誤認させ、誤操作を招く恐れがあるため、実態を確実に反映しているインターフェースを提供することが望ましい。しかし、系統をランプやプッシュボタンを用いて、ハードウェア的に表現していると、その修正や変更はなかなか難しいといえる。他方、プラズマの生成・維持を行なうために、様々な周辺機器や制御盤を用いて、それらの間で信号の送受信を行い全体として協調動作をするのは従来の CCS においても同様である。1982 年度から建設が開始され、1986 年にファーストプラズマの生成に成功した TRIAM-1M 装置における当時の CCS では、それらの信号の送受信に当たって、基本的にはその信号ごとにケーブルが用意されている。従って、機器間で送受信される信号の種類が多くなるほど、多くのケーブルを敷設する必要に迫られるし、増設等で新たに信号の種類が増える場合には、新たにケーブルを敷設する必要にせまられる。また、当時の CCS で使用されているシーケンサは老朽化が進んでおり、代替部品の手配もままならない状況にある。

以上のような事柄から、メンテナンス性を下げてしまっている従来の CCS の利用をできるだけ減らして、QUEST 制御システムの全体的な刷新を行ない、様々な箇所まで現在までの新しい技術を導入したいと考えている。その対応の一つとして、ユーザーインターフェースのソフトウェア化が挙げられる。これは、従来の実際のランプやプッシュボタンを、ディスプレイ上にソフトウェア的に表現するものであって、この機能を提供するために National Instruments 社が提供するグラフィカルプログラミング言語 LabVIEW を採用することを想定している。従来の CCS と並立動作している新規の CCS は、この言語を用いて開発が行なわれている。LabVIEW は、プログラミン

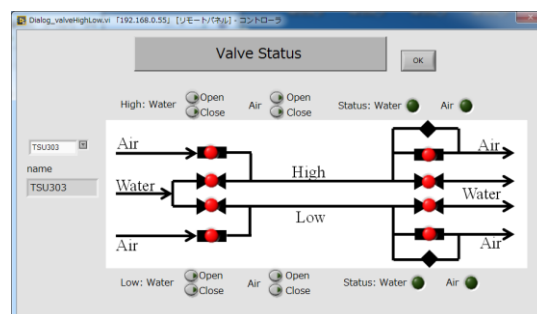


Fig. 2 GUI の一例。加熱冷却パネルの冷却水および圧縮空気を操作するバルブの状態表示とその開閉を操作するボタン群

グの開発がグラフィカルに行なわれ、グラフィカルユーザーインターフェース (Graphical User Interface, GUI)も簡便に提供できる開発言語である。Fig. 2 に GUI の一例を示す。この例は QUEST のプラズマ対向壁に相当する加熱冷却パネルにおいて、冷却水および圧縮空気を操作するバルブの状態表示とバルブを開閉するボタン群が表示されている。バルブが閉じている場合には赤色のランプが点灯して、開いている場合には緑色のランプが点灯する。また、開閉の途中段階ではランプが消灯するといったように、ソフトウェアでユーザーインターフェースを構成することで多彩な表現方式が可能になり、ランプの色の変更や系統の変更などにも、柔軟に対応できるようになる。

QUEST 制御システムの全体的な刷新に関して、他には Ethernet の積極的な活用が挙げられる。最近は、多くの計測器や制御器において、LAN コネクタが付いており、リモートでそれら機器を操作できることが多い。Ethernet を用いれば、送受信する情報の種類や量が変わっても柔軟に対応することができ、従来の CCS のように新たにケーブルを敷設する必要はない。ただし、Ethernet を用いた機器間の情報のやり取りに関しては、TCP/IP, UDP/IP プロトコルや Samba によるファイル共有など、一般的な技術を用いて行なうことを心がける。これは、QUEST 実験においては、多くのメーカー製の機器やソフトウェアが利用されるはずであり、そのメーカーやソフトウェアが提供する独自の技術やプロトコルの利用は、機器間の互換性を妨げることに繋がると考えるからである。実際、新規の CCS と他機器の通信で用いている通信は UDP/IP による文字列の通信であって、タブコードとリターンコードをデリミタとして、パラメータ名称とその値の送受信を行うという極めて簡便な基本的技術が用いられている。UDP/IP はコネクションレス型のプロトコルであり、TCP/IP より信頼性が低いといわれているが、複数の相手に同じデータを同時に転送することができるなどの利点も有している。この利点を利用して、新規の CCS は、UDP/IP のブロードキャストにより、同じネットワークにある機器にショット番号や、シーケンスステータス、シーケンスタイムなどを広報している。また、UDP/IP を用いることに対して信頼性を上げるために、各機器は通信相手に対して、定期的にデータを送信するようにしている。このようにすることで、パケットロスが発生しても問題がないようにしているのと同時に、定期的に受信できていることを確認することで、送信側の機器が正常動作しているという確認をすることもできる。

### 2.3 プラズマ制御システムについて

QUEST のプラズマ制御システム(PCS)は、日本ナショ

ナルインストルメンツ社製の PXI システムを用いて構成されている。これは、シャーシに AIO (Analog Input and Output)モジュールや DIO (Digital Input and Output)モジュールなど必要なモジュールを差し込んで要求される機能を構築するものである。

PCS は、計測機器からデータを受け取り、プラズマ等の状態を計算して、周辺制御機器へ制御信号を送るといったことをリアルタイムで行なう必要があり、高い処理能力が要求される。このため、QUEST 装置の PCS では、PXI システムを分散化、すなわち2台用意して処理能力を上げている。具体的には、Workstation (WS)と呼んでいる主たる PXI システムに、Subsystem (SS)と呼んでいる従たる PXI システムを用意しており、WS と SS 間はリフレクティブモジュールを介して、データの共有がなされている。その同期速度は 4kHz であって、128 個の倍精度実数、すなわち 1kBytes が WS と SS 間で共有されている。WS と SS は、いずれも Intel 社製の Quad Core が採用されており、それぞれのシステムにおいて、各タスクが並列的に実行されている。

PCS では、ロゴスキーコイルで計測したプラズマ電流と、フラックスループで計測した磁束、および各 Poloidal Field (PF) コイルの電流値から、プラズマ由来の磁束を算出して、プラズマの位置を算出している。これはプラズマ電流を一本のフィラメント電流と仮定して、最小二乗法を用いてプラズマ由来の磁束を最もよく再現できるフィラメント位置を求めるものである。ただし、ここで用いているロゴスキーコイルやフラックスループは、その信号処理において時間積分を必要とするものであり、僅かな計測誤差があった場合、長時間の計測では誤差が積み重なって、正確な値が算出できなくなるという欠点がある。ここでは、この誤差をドリフトエラーと呼ぶことにする。

一方、ホール素子と呼ばれる磁場を計測するセンサーは、時間積分をする必要がなく、センサーの出力電圧が、そのまま磁場に対応しているため、長時間の計測に



Fig. 3 3軸ホール素子の外形写真

適している。QUEST 装置では3軸ホール素子を製作し、それらを用いて磁場の計測を行なっている。この3軸ホール素子を Fig. 3 に示す。サイズが  $30 \times 20 \times 20\text{mm}$  のプラスチック製の内壁の3方向にそれぞれホール素子が据え付けられており、 $x, y, z$  の3方向の磁場の計測が可能である。特に、プラズマ電流やその位置を算出するのに用いられるのは  $z = 0, \pm 400, \pm 800\text{mm}$  で、真空容器壁の大気側に設置され、壁面に沿った方向の磁場を計測する5つのホール素子と、中心軸に設置され  $z$  軸方向の磁場を計測する5つのホール素子である。上側に設置されたホール素子の信号強度が、下側のそれに比べて強いならプラズマの位置は上側にある、というように、最初に各ホール素子のそれぞれの信号強度の比からプラズマの位置を計算している。その後、信号強度の絶対値からプラズマ電流を求めている。リアルタイムに計算を行なうために、プラズマ電流を模したフィラメント電流を真空容器内の各位置においた場合において、各ホール素子における磁場を事前にデータ配列として計算して保存している。このデータを基に、もっともらしいフィラメント位置をデータ配列から大雑把に離散的に求め、その後、データ配列のデータから近似式を算出して、線形式を解くことで連続的な値としてフィラメント位置を算出するという工夫を行なっている[1, 2]。このようにして求めたプラズマ電流とその位置において、ホール素子から求めた場合とログスキーコイルとフラックスループから求めた場合の比較を Fig. 4 に示す。ホール素子から求めたものは、ドリフトエラーが発生しておらず、例えば、ゼロから始まったプラズマ電流は、放電が終わった後、確かにゼロに戻っており、長時間の測定に適していることがわかる。他方、QUEST 装置の中心軸上に設置されているホール素子は、センターソレノイド(Center Solenoid, CS)コイルの軸上にあり、このコイルに通電する放電、すなわちダイバータ配位の放電とオーミック放電では、このコイルが作る磁場が強くホール素子の測定範囲を超えてしまうので、プラズマ電流と位置の同定の計算に用いることができず、計算の精度は下がると予想される。

ホール素子は、真空容器の大気側に設置されており、センサーの故障が起きたとしても、真空容器の大気開放をしないで交換できるなど、メンテナンス性に優れている。また、真空容器の外での計測は、プラズマや RF など起因とするノイズの影響を受けにくいと、高い精度で計測を行なえるなどの利点を有している。一方、真空容器壁の渦電流効果により、真空容器内のプラズマ電流や位置が急に変化したとしても、ホール素子ではちょうど約  $10\text{msec}$  の時定数のローパスフィルターを通したような信号が計測されることになり、早い計測には適していない。他方、フラックスループやログスキーコイル、磁気ピックアップコイルなどは通常、真空容器内に設置されるの

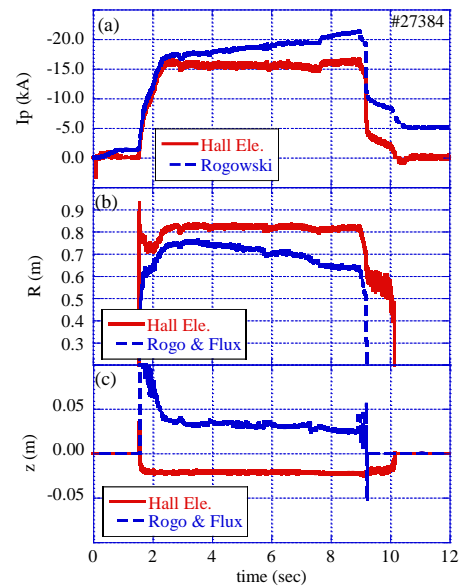


Fig. 4 ホール素子およびフラックスループとログスキーコイルから求めたプラズマ電流とその位置

で、早い計測に適している。従って今後は、このようにお互いの短所・長所を補った形での計測を行い、プラズマ電流や位置・形状の同定を行なっていくことになると考えられる。

プラズマの形状の同定方法として、プラズマの形状をプラズマの幾何学的中心位置  $R_0, z_0$ 、電流のピーク位置  $R_{ax}, z_{ax}$ 、楕円度  $\kappa$ 、三角度  $\delta$  と計 6 つのパラメータで表現して、最小二乗法を用いて磁束の計測結果を最もよく再現するこれらパラメータの値を求めることを試みた[3]。しかし、この方法によるプラズマ形状の同定には、数パーセントという測定精度で磁束や磁場の計測が行なえている必要があることもわかり、現実的にはプラズマの形状の同定は難しい。そこで、現在はゼロ次近似として、プラズマ電流をフィラメント電流として、PFコイル等による磁束を含めた真空容器内の全磁束の分布からプラズマ形状の算出を行なっている。すなわち磁束分布を求めると、フィラメント電流が存在する箇所の近傍が極小値を持つと考えられる。フィラメント電流の方向によっては極大値になるが、その時には磁束の値を正負反転させて極小値を持つようにする。プラズマ形状の探索は、ちょうどこの極小値というぼみに仮想的に水を徐々に注いでいくことに相当する。水を注ぐにつれて、その表面積は増えていくが、その水が真空容器壁に達したら、その時点で探索を終了し、そのとき溜まった水の形状がプラズマの形状であって、この場合はリミター配位であるということになる。他方、磁束分布に鞍点があつて、水が窪みからあふれ始めた場合も、その時点で探索を終了し、やはりそのとき溜まった水の形状がプラズマ形状に相当し、

この場合はダイバータ配位であるということになる。このようなアルゴリズムを用いて、プラズマの形状をリアルタイムに同定するコードを開発して、プラズマの形状制御を試みた[4]。この際は、内側のプラズマ位置、また外側のプラズマ位置をその近傍の PF コイルを用いることで制御することを試みた。結果は、内側のプラズマ位置の制御は CS コイルを用いることで行なえたものの、外側のプラズマ位置はその近傍の PF コイルのみでは制御できなかった。外側の PF コイル電流の変動は、意図しない周回電圧の印加などの可能性もあり、より詳細な計測を今後、継続する予定である。

フィラメント電流から求めるプラズマ形状でなく、より適切に求めるためにリアルタイムの平衡計算コードの開発も行なっている[5]。オフライン解析での平衡計算では一つの入力データに対して反復計算を行い、収束した時点で計算を終了するが、ここでのリアルタイム平衡計算では、一つの入力データに対して一回計算を行い、その次にまた新しいデータを入力して一回計算を行なうという手順を連続的に行なっている。現在までに  $30 \times 48$  のメッシュサイズ(50mm ピッチ)で一回の計算に 2msec かかる平衡計算コードを開発しているが、将来的には FPGA 等を利用して、更に細かいメッシュ、および早い計算速度での平衡計算を実現したいと考えている。

### 3. 今後の課題や展望など、まとめ

QUEST 装置は、今後更に様々な計測機器や加熱機器など、プラズマの状態を同定するためのセンサーや、状態を変化させるためのアクチュエータなどが実装される予定である。例えば、今後は QUEST 装置の特徴の一つである高温壁において、ヒーターによる加熱システムや冷却水による冷却システムを構築して、互いに連携させて、プラズマの長時間放電時の高温壁の温度制御を行なう予定である。これら更なるセンサーやアクチュエータの増加に対応するために、中央制御システムおよびプラズマ制御システム、その他各サブシステムの高性能化・高速化を図り、互いに様々な情報がリアルタイムに共有できるようなネットワーク化を図っていく必要がある。

また、例えば、電子密度を上げようとして、燃料を供給すると、それは、他に電子温度やプラズマ電流などにも影響を与えることが予想される。すなわち、ただ一つのアクチュエータを動作させた場合であっても、それはプラズマのいくつかのパラメータに影響を及ぼし、その因果関係は単純ではない。これらを制御に対して、例えば先の例についていえば、燃料を供給すると同時に、電子温度を調整するために加熱入力パワーの調整をする必

要や、プラズマ電流を調整するために PF コイル等による誘導電場の印加等の調整を同時に行なう必要があるかもしれない。以上のように、先に述べたハードウェア上の強化と共に、このような複雑な制御を統合的に行なうためのソフトウェアの開発も順次行なっていく必要があると考えている。

### 参考文献

- 1) M. Hasegawa, K. Nakamura, H. Zushi, K. Hanada, A. Fujisawa, K. Tokunaga, H. Idei, Y. Nagashima, S. Kawasaki, H. Nakashima, and A. Higashijima, Current status and prospect of plasma control system for steady-state operation on QUEST, Fusion Engineering and Design, 112, 699–702, 2016
- 2) M. Hasegawa, K. Nakamura, H. Zushi, K. Hanada, A. Fujisawa, H. Idei, K. Tokunaga, Y. Nagashima, A. Higashijima, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Kuzmin, T. Onchi, O. Watanabe, and K. Mishra, Real-time identification of plasma current and its position with hall sensors for long-pulse operation on QUEST, 九州大学応用力学研究所所報, 149, 10-15, 2015
- 3) M. Hasegawa, K. Nakamura, K. Tokunaga, H. Zushi, K. Hanada, A. Fujisawa, H. Idei, S. Kawasaki, H. Nakashima, and A. Higashijima, A plasma shape identification with magnetic analysis for the real-time control on QUEST, IEEJ, 132, Sec. A, 477-484, 2012
- 4) M. Hasegawa, K. Nakamura, H. Zushi, K. Hanada, A. Fujisawa, K. Matsuoka, O. Mitarai, H. Idei, Y. Nagashima, K. Tokunaga, S. Kawasaki, H. Nakashima, and A. Higashijima, Development of plasma control system for divertor configuration on QUEST, Fusion Engineering and Design, 88, 1074-1077, 2013
- 5) M. Hasegawa, K. Nakamura, H. Zushi, K. Hanada, A. Fujisawa, O. Mitarai, K. Tokunaga, H. Idei, Y. Nagashima, S. Kawasaki, H. Nakashima, and A. Higashijima, Development of a high-performance control system by decentralization with reflective memory on QUEST, Fusion Engineering and Design, 96–97, 629–632, 2015