

# JT-60SA プラズマ断面形状のライブ配信システムの開発

末岡 通治<sup>\*1</sup>, 坂本 健作<sup>\*1</sup>, 重森 祐志<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> 日本原子力研究開発機構, <sup>\*2</sup> 高度情報科学技術研究機構

## 1. はじめに

トカマク型核融合実験装置においては、プラズマ断面形状の動画映像は実験遂行上極めて重要な情報である。特に遠隔地からネットワークを介して実験に参加する研究者にとっては、実験の推移や臨場感を共有する上で必須の情報と言って良い。また、主要なプラズマパラメータの時間変化が、可視 TV の画像に加えて同一画面上で確認する事が出来れば、遠隔地の実験参加者も容易に放電の進行状況を把握する事ができ、研究を進める上で非常に強力なツールになる。

本報告は、超伝導化改造後の JT-60 装置 (JT-60SA) に向けて開発した「プラズマ断面形状 CG (動画)」をネットワークを介してライブ配信するシステムに関するものである。なお、本システムは既存の JT-60U プラズマ断面形状可視化システムの可視化技術を発展させたものである。

## 2. 画像ライブ配信方式の検討

本章では、(a)パソコンのモニタ上でネットワークを介した動画の視聴を行う場合、その仕組みはどうなっているのか？ また、(b)その仕組みは汎用の製品や無料ソフトウェアを使用する事で容易に実現可能なのか？ などについて調査すると共に、本システムへの適用性の調査及び検討を行った。なお、最終的にはインターネットを介して遠隔地の利用者に画像をライブ配信する計画であるが、現時点では社内イーサネット環境下においての性能確認に留まっている。

### 2.1 汎用実時間動画配信方式の調査

インターネット利用者がウェブ上で公開されている動画を PC で視聴する場合、そのほとんどは汎用で無料の動画再生ソフトウェア (例 : Microsoft 社 Windows Media Player、Apple 社 Quick Time、RealNetworks 社 RealPlayer 等) が利用されている。そこで、先ずこれらの汎用動画再生ソフトで視聴できる動画データの配信方式について調査を行った。

その結果、主に以下に示す 3 つの配信方式がある事が判明した。

- 1 : サーバー上に格納された動画ファイル本体を PC 上にダウンロードする → 「動画ファイルダウンロード配信」
- 2 : サーバーから出力される細分化された動画データを順次受信する → 「オンデマンド式ストリーミング配信」
- 3 : サーバーから実時間エンコードされた動画データを順次受信する → 「ライブ配信式ストリーミング配信」

そして、更に各々の仕様や特徴について調べた結果 (表 1 参照)、実時間動画配信に適した方式は、「ライブ配信式ストリーミング配信」に限定されることが判明した。

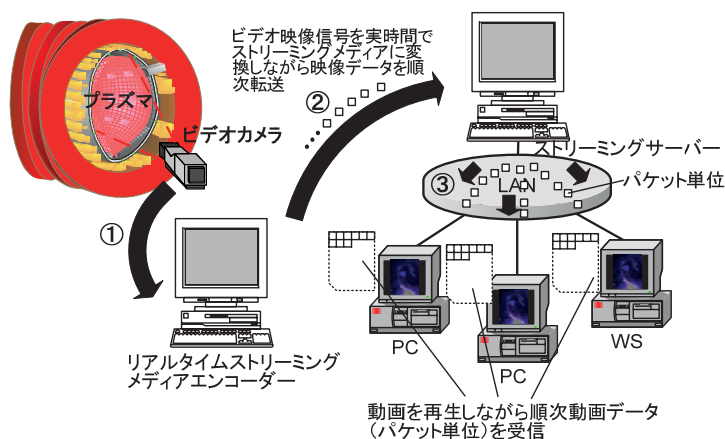
表 1 ネットワークを介した各動画配信方式における比較評価

No	動画データ配信方式	専用配信サーバ			ユーザー		実時間配信	評価	
		必要性	人的負担		拡張性	再生ソフト			利便性
			開発時	運用時					
1	ダウンロード(DL)方式	不要	/	/	/	汎用	/	不可	×
2	ストリーミング方式 (オンデマンド型)	必要	小	小	低	汎用	/	不可	×
3	ストリーミング方式 (ライブ配信型)	必要	中	大	低	汎用	○	可	○

### 2.2 ライブ配信式ストリーミング配信

ライブ配信式ストリーミング配信は、他の動画配信方式と異なり、サーバー上に配信する動画ファイルは存在しない。そこで以下の図 1 を参考に本配信方式の一連の仕組みを解説する。

①ビデオカメラで撮影した映像をリアルタイムストリーミングメディアエンコーダー (Real-time Streaming Media Encoder: RSME) が入力し、②そこで即座にストリーミングデータに変換 (エンコード) して、順次ストリーミングサーバーへ転送する。③ユーザーは、汎用動画再生ソフトを用いてストリーミングサーバーから動画データを受信しながら、PC上でライブ配信動画を視聴する。



## 2.3 ライブ画像配信に求められる条件

図1 ライブ配信式ストリーミング配信の動画データの流れ

ライブ配信式ストリーミング方式 (以下「汎

用配信方式」と称す) では、配信側は効率良く動画データの配信を行う為に「専用配信サーバ」の設置が不可欠である。そして専用配信サーバでは、ユーザー側で利用率が高いとされる代表的な複数の汎用ソフトウェアに対応したストリーミングデータを作成して配信しなければならない。当然ながらシステム運用後は、常に各汎用ソフトウェアの更新情報をモニタし、配信する動画データを最新版に対応したデータに更新・維持する責任 (人的負担) も発生する。また本方式では、ユーザーが見る事ができる動画は、ユーザー全員同じ動画に限定される。

一方、JT-60SA で求められるライブ画像配信を考えてみると、配信されるプラズマパラメータを各ユーザーが自由に選択する事ができるような、汎用配信方式では実現できない「利便性や拡張性」を備えた先進的な配信方式が期待される。

そこで、本システムは、以下の開発方針に従って独自に開発を行った。

- 1) 専用配信サーバは、既存の PC を登用し、サーバ設置にかかるコストを抑える。
- 2) 実時間動画配信方式は、「ライブ配信式ストリーミング配信」の仕組みを基本にして独自の専用実時間配信方式を開発する。
- 3) CCD カメラで撮影する実映像の動画は、IP カメラのような汎用製品を使用する事で容易に外部へ配信できる上、導入・運用に要する手間やコストも低減できる為、本システムで扱う動画映像の対象から除外する。
- 4) 専用動画配信方式及び専用再生ソフトウェアを作成することで、ユーザー側には快適で高い利便性を持つ環境を提供し、運用面では、汎用ソフトの更新等の外的要因に依存する作業を無くし、人的負担の大幅な軽減を図る。

## 3. 専用実時間動画データ配信方式の検討

本システムでは、実時間プラズマ断面形状可視化システム(RVS)から出力されるデータを基にライブ動画データをユーザー側に配信する専用配信サーバ: RPMS (Real-time Plasma Movie Server) と RPMS から配信される動画データを受信してユーザーの PC 上に動画を表示する専用再生ソフトウェア: RPMV (Real-time Plasma Movie Viewer) の2つを新たに開発した。図2に本システムの構成図と動画データの流れについて示す。

### 3.1 RPMS-RPMV 間の動画データ配信方式の検討

RPMS と RPMV の間では、2つのネットワーク通信を行う。1つは、RPMS から RPMV への実時間動画データ配信用の通信 (本章で解説) であり、もう1つは RPMS と回線接続が完了した配信先 (RPMV) との間での回線接続状態をモニタする為の通信 (第6章参照) である。以下では、動画データの配信に適用したネットワークプロトコル及びネットワーク通信方法についての検討結果を述べる。

### 3.1.1 ネットワークプロトコル

ネットワークプロトコルは、一般的にUDP（User Datagram Protocol）方式とTCP（Transmission Control Protocol）方式のいずれかである。両者を簡単に比較すると、UDP方式は、コネクションレスの単純なネットワークプロトコルであり、送受信を行うシステムへの負担が小さいといった利点がある半面、エラー処理機能が無く、パケット※1欠損などの異常時にデータの補償（パケットの再送など）を行わないといった欠点がある。

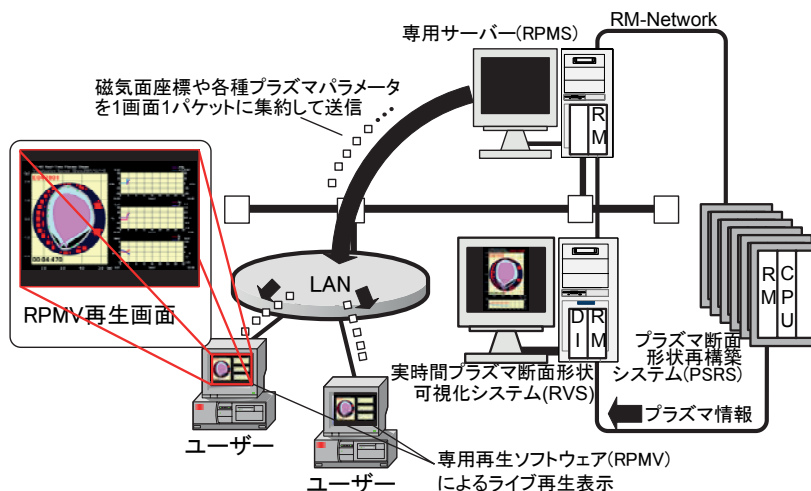


図2 実時間 JT-60SA プラズマ断面形状動画配信システム構成図

一方のTCP方式は、クライアント-サーバ間で接続処理を行い、1対1の通信を行う。

パケット欠損時の再送処理などエラー訂正機能を持ち、信頼性の高いデータ転送が可能である。ただし通信制御を行うため、送受信を行うシステムの負担はUDP方式よりも大きく速度も遅い。

では、本システムに採用するプロトコルに適する方式はどちらか？を考えると、損失したデータの補償よりも速度が速くて定期的に新しいデータを送信できる方式の方が適していると判断して「UDP方式」を採用する。

表2 ネットワークプロトコルの評価

プロトコル	対象送信先	データの信頼性	ネットワークへの負荷	通信速度	評価
UDP方式	1対多数	低い	小さい	速い	○
TCP方式	1対1	高い	大きい	遅い	△

### 3.1.2 ネットワーク通信方式

次に、本システムで利用する通信方式を検討する。一般的な通信方式には、ユニキャスト（Unicast）：1対1の通信、マルチキャスト（Multicast）：1対特定多数の通信、ブロードキャスト（Broadcast）：1対不特定多数の通信、の3つの通信方式に分けられる。

まずユニキャスト方式は、主に特定した単一の送信相手にデータを送信する通信方法であり、最もシンプルな通信方法である。

マルチキャスト方式は、マルチキャストアドレスと呼ばれる独自のアドレスでグループ化されたノード（特定した多数）に対してのみデータ（パケット）を送信する通信方法である。本システムのような特定した多数のユーザーに対して同一データを送信するには最適な通信方式と言える。しかし、マルチキャスト方式の運用には、サーバークライアント間の通信経路に配する通信機器（ルータやスイッチ）全てがマルチキャスト方式に対応した機器で構成される必要がある。

最後に、ブロードキャスト方式は、送信するブロードキャストパケットがネットワークに存在する全てのノードに送信されるため、不特定多数の相手に対して同じ情報（データ）を同時に送る目的で使用する場合には効果的な通信方法である。

本システムで採用するネットワーク通信方式は、通信機器（ルータ等）の制約にとらわれず、そしてネットワークへの負荷が極力小さい方式が望ましい。そこで、上記の3者について検討を行った。

まずマルチキャスト方式は、ハード面の制約をクリアできない為、この時点で採用できない方式であった。

次にブロードキャスト方式は、上記で述べたように1つのパケットが全てのノードに送信されるので便利な半面、それ

※1 パケット：データ通信においてネットワークを流れる分割されたデータの単位。大きなデータ容量のファイル等を多数のパケットに分割して送受信することで、ネットワーク回線を効率良く利用することができる。

を必要としないノードもパケットを受信してしまうデメリットがある。今回のように短い周期でパケットを継続して出力するような用途に採用した場合、ネットワークに存在するノード全体に負荷をかけてしまう事が容易に想像できた為、採用には不適切な方式だと考えた。

最後にユニキャスト方式は、主に「1 対 1 の特定の相手との通信方式」であり、1 度のデータ送信で複数のユーザーへ届ける事が出来ない点がデメリットであるが、この点を対処する事が出来れば最適な方式と言える。

そこで、予め利用ユーザー数(N)を設定し、RPMS に N 人分のユニキャスト方式の回線を配備する事で「1 対特定多数通信」の実現を試みた (図 3 参照)。

この場合、サーバーは利用者数 (N 人) 分のパケット (データ) を毎回ネットワーク上に出力する事になる為、他の通信方式と比べてネットワークに与える負荷は増大する傾向にあるが、ネットワークへの負荷低減対策を実施する事で、ネットワーク全体に支障を来さないレベルに抑える事が出来れば、十分実用可能であると判断できる。そこで、第 4 章ではネットワーク負荷を最小限にするために実施した対策について報告する。

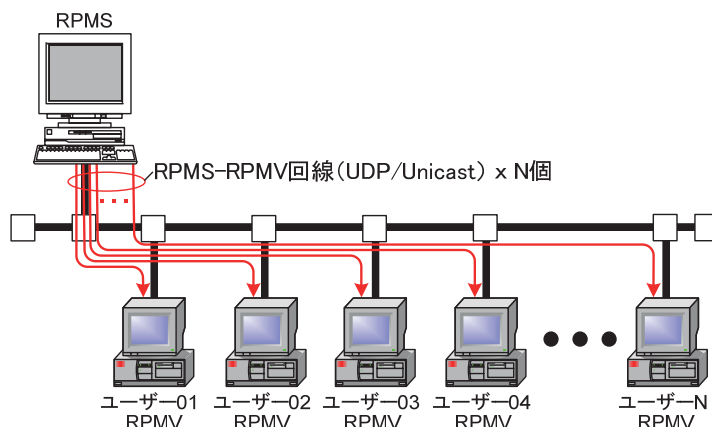


図 3 N ユーザー分のユニキャスト回線を用いたデータ配信

#### 4. ネットワークへの負荷低減対策

本システムにおける動画配信方式には、複数の利用者を対象に「安全性、高速性、利便性、信頼性、拡張性」を兼ね備えた方式が求められる。そして第 3 章で提案した「N 人分のユニキャスト方式を用いた通信回線」の運用の実現には、本システムを運用した際にネットワークに及ぼす負荷がネットワーク全体に支障を来さないことが必要不可欠である。

そこで本章では、本システムが実施したネットワーク負荷の低減対策としての工夫や機能について報告する。

##### 4.1 配信データの最小化

ユーザー側 PC の RPMV において、1 動画フレーム (1 時刻当たりの 1 動画画面 (フレーム) の意) を表示するのに要するデータの集合体のサイズを「1 パケット未満」とした。そして更に、その 1 パケットのデータ容量の最小化を図り、1 パケットのデータサイズを最大約 1400byte に抑える事ができた。これは RPMS から RPMV に配信するパケットが、常に 1 イーサフレーム<sup>※2</sup>(1500byte)に収まることを意味し、これにより以下のメリットが期待できる。

###### 4.1.1 データ配信効率の向上

1 動画フレームを表示するのに必要なデータが 1 パケットに全て収まっているならば、1 パケット分のデータ受信所要時間だけで画面表示が可能となる。その結果、ネットワークへの負荷および描画の遅延時間が最小限に抑えられる。もし、1 動画フレームのデータが複数のパケットに分割されていた場合、RPMV は表示に必要なパケットを全てを受信するまで、その動画画像を表示する事ができない。

###### 4.1.2 通信データの信頼性の向上

本システムの通信は UDP 方式を使用した為、ユーザー側でパケット損失が起きた場合、それはダイレクトにその時に

<sup>※2</sup> イーサフレーム：イーサネットのネットワーク通信で使用されるデータフォーマット。一般的に使用されるイーサフレームの EthernetII のデータ部には、最小 46byte、最大 1500byte のデータが入れられる。

表示する動画画像の表示が出来ない事を意味する。例えば、1 動画フレームを表示するのに要するデータが 2 パケットに分割された場合、どちらか一方のパケットが失われた時点でその動画画像は表示する事ができない。一方、1 動画フレーム=1 パケットならば、2 パケット/動画フレームの場合よりもデータを損失する確率は 2 分の 1 に低減する事ができる。

#### 4.2 同時接続回線数を制限

RPMS に接続された複数のユーザー (RPMV) に対して RPMS が配信するパケット (データ) が、ネットワーク全体にどれ位の負荷を与えることになるのか? を調査する為、本システムの RPMS へ同時に接続できるユーザー数は、初期値として 20 ユーザーとした。

#### 4.3 配信パケット出力 (更新) 周期の伸長

日本のアナログ式テレビ放送は、NTSC 方式<sup>※3</sup> と言うアナログ信号放送の規格に準じている。NTSC 方式では、動画フレームの更新周期は、30fps<sup>※4</sup> と定められている。そこで、RPMS が RPMV にパケットを配信する周期は、当初この基準に準じ 30fps とした。しかしその後、RPMV 上に表示されるプラズマ断面形状 CG を確認 (人間の目で見て動画と認識できる限界を見極める) しながら、動画フレームの更新周期を段階的に伸長し、RPMS がネットワークにパケットを出力する頻度の低減を図った。最終的には RPMS からのパケット配信周期は 20fps となり、この結果 30fps 時よりも約 33% の配信データの軽減を実現した。

#### 4.4 ネットワーク負荷低減対策の効果

本項では、4.1~4.3 で挙げた負荷低減対策を実施した場合の予想結果を以下に記す。

本システムのネットワーク帯域は、以下のように試算する事が出来、その値は最大約 4.48Mbps (=20fps\*20ch\*1400b yte\*8 (1b yte=8bit)) となる。これは、仮に社内のネットワークが Ethernet 100Mbps 帯域とすれば、本システムが社内ネットワークを占有する割合は 5%未滿 ((4.48Mbps÷100Mbps) x100=4.48%) という結果となり、この程度の負荷なら実際の運用でも問題ない範囲の負荷であるといえる。

### 5. 専用再生ソフトウェア (RPMV) の動画表示画面

実際の実験放電実施時に RPMV の画面上に表示される実時間ライブ動画配信の画面例 (図 4.1、4.2 参照) と特徴を以下に示す。

- ①画面左半分の領域は、真空容器内で刻々と形状を変化させるプラズマ断面形状の CG 動画を表示する。
- ②画面右半分の領域は、6 種類のプラズマパラメータの時刻変化を 3 つの折れ線 (縦軸 x2) グラフで表示する。
- ③上記②の 6 本のグラフは、実時間で算出される 20 種類の主要なプラズマパラメータの中から利用者が任意に 6 種類を選択する事が出来、自分用にアレンジする事が可能である。
- ④RPMS との回線接続がエラーの場合は、その原因が RPMV 上に表示される (図 4.2 参照および 6 章参照)。
- ⑤実験放電の状態がポロイダル磁場コイルの色の変化 (放電中は赤色、放電中以外は緑色で表示) で視覚的に表現される (図 4.2 参照)。

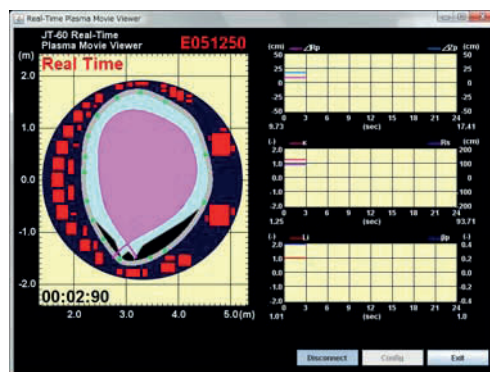


図 4.1 RPMV : 実時間ライブ動画配信中

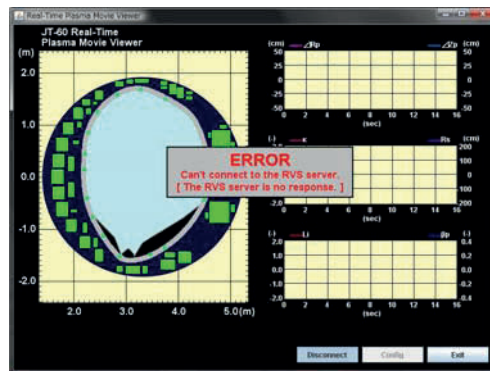


図 4.2 RPMV : 実時間ライブ動画配待機中

※3 NTSC 方式 : アメリカの放送標準化委員会 (the National Television Systems Committee) の略称であり、この委員会が策定した方式。日米の他、カナダ、台湾、韓国などの国が、アナログ放送の規格として採用している。

※4 fps : frame per second (1 秒間あたりに表示する動画フレームの数)



## 6. RPMS-RPMV 間接続状態監視回線の導入

本システムでは、RPMS から RPMV へ動画データを配信しり以外に以下の目的で専用の通信を実施している。

- ①利用者が本システムの利用状態を容易に確認する事が出来る。
- ②運用者 (RPMS) が動画データの配信先を正確に認識する事が出来る。
- ③運用者 (RPMS) が動画データ配信先の接続状態をモニタし、常に効率の良い通信環境を提供する事が出来る。

### 6.1 利用者への接続エラー状態通知

利用者が RPMV を起動し RPMS へ接続要求を実行すると、接続に問題が無ければ即座に両者間の回線接続は成立する。

但し、接続に異常があった場合、その接続要求はエラーとなり以下の図 5.1, 5.2 に示す何れかのエラー要因が RPMV 上に表示される。図 5.1 は、RPMS がダウンしているか RPMS と RPMV の間に何らかの異常があり RPMS から応答がない場合のエラーであり、図 5.2 は、RPMS が許容している最大回線接続数を超過していた場合のエラーである。(具体的な画面は図 4.2 を参照)。

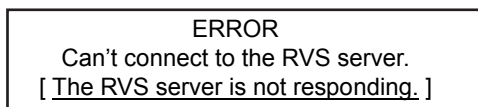


図 5.1 RPMS やネットワークに起因する障害の場合

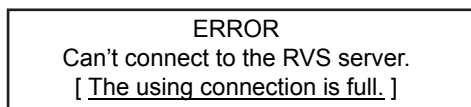


図 5.2 RPMS の最大接続回線数超過の場合

### 6.2 利用環境の効率化

RPMS は、自身で設定している最大回線接続数 (20 ユーザー) を超えて接続要求があった場合、その接続要求は拒否する (図 5.2 参照)。但し、RPMS は既に接続が成立したユーザーに対して定期的に接続状態をモニタし、一定時間 (初期設定値: 10 秒) 反応が無いユーザーが確認できた場合は、その接続先との回線を遮断し、待機するユーザーに回線を開放すると共に、ネットワーク上への無駄なデータ配信の低減を図っている。

## 7. まとめ

JT-60SA の実験放電では、国内外の研究拠点・機関との共同実験が計画されている。そこで、遠隔地から実験に参加する研究者に向けて、那珂サイトと遜色ない環境でプラズマ断面形状 CG や放電パラメータのライブ配信を行うシステムの開発を行った。本報告では、JT-60U をベースに開発したプロトタイプシステムの概要を紹介した。

本システムでは、実時間ライブ動画配信方式、専用配信サーバー (RPMS)、専用再生ソフトウェア (RPMV) をそれぞれ独自に開発し、汎用配信方式にはない高い将来性を備えたシステムを実現した。特に、画質の劣化が無い高画質画像のライブ配信や、ユーザー毎に異なる情報を PC 上に表示する事ができると言った機能を備えた本実時間ライブ動画配信方式は、汎用配信方式とは一線を画するもので、新たに「実時間ベクタ<sup>※5</sup>配信方式」として提案するものである (表 3 参照)。

表 3 実時間ベクタ配信方式ストリーミング配信の機能評価

No	動画データ配信方式	専用配信サーバ				ユーザー		実時間配信	評価
		必要性	人的負担		拡張性	再生ソフト	利便性		
			開発時	運用時					
4	ストリーミング方式 (実時間ベクタ配信型)	必要	大	小	高	専用	◎	可	◎

今後は、①本システムを基本にした JT-60SA 版への更新および開発、②遠隔地の拠点を対象に運用する際に生じる課題の抽出、③抽出した課題の対策や工夫など、本システムの完成を目指して、順次進めていく予定である。

※5 ベクタ (データ): 正式には点や線の座標や距離等を数式的に保持しているデータ形式を指し、どのように変形しても画質が荒れず、データ量が小さいという利点を持つ。本稿では、ユーザー側で表示される動画の画質が劣化しない点や表示する情報を任意に変更できる点、配信データが小さい点が共通する為「ベクタ (データ) 配信」と言えると判断した。