



小特集 プラズマ実験におけるデータ解析インフラストラクチャ

3. JT-60SA におけるデータ収集・解析インフラストラクチャ

3. Data Acquisition and Analysis Infrastructure in JT-60SA

3.2 JT-60SA におけるデータ収集

3.2 Data Acquisition in JT-60SA

仲野友英, 坂田信也, 山崎莉穂, 浦野 創, 戸塚俊之

NAKANO Tomohide, SAKATA Shinya, YAMAZAKI Riho, URANO Hajime and TOTSUKA Toshiyuki

量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所

(原稿受付: 2019年2月22日)

JT-60SA におけるデータの流れを概説する。分光器や干渉計などの計測器から生成されるデータは、物理データに変換され、実験データサーバに格納されるとともに、生データは元データサーバに格納される。他方、加熱装置やガスパフ装置などのトカマク本体設備から生成されるデータの一部も物理データに変換され、実験データサーバに格納される。これらの物理データのうち一部のデータはさらに他の物理データを用いて再加工され、より有用な物理データとして、ユーザに供される。JT-60SA データベース・システムでは、このような再加工された物理データもデータベースに格納できる仕組みとリビジョン管理を実施する仕組みを実装する。また、運転系データのうち、プラズマ放電に同期せず24時間連続的に収集されるデータの時間軸をプラズマ放電と同期する計測系データと共通にするため、計測系データの時間を絶対時間に置換する仕組みを実装する。

Keywords:

Diagnostic, database system, data link, processed data, raw data, JT-60SA

3.2.1 データ収集 (計測系, 運転系)

JT-60SA では数多くの計測器が設置され[1], プラズマ放電に同期して種々のデータ (計測系データ) が生成される。他方、トカマク本体には加熱装置やガスパフ装置, 真空排気装置などが付設され, オン・オフのタイミングや実績値 (加熱パワーやガスパフ量, 圧力) などのデータ (運転系データ) が生成される。運転系データは, 必ずしもプラズマ放電中だけに生成されるのではなく, 例えば, 真空容器内部の圧力や熱電対によるダイバータ板の温度などは, プラズマ放電と次のプラズマ放電の間の時間にもデータとして記録される。運転系データは, 計測系データと同様に研究に有用, 場合によっては必須である。よって, ユーザには, 運転系・計測系データの区別なく, シームレスなデータへのアクセスを提供すべきである。そのため, 種々のデータの特徴を吸収して統一性を高め, 効率よく管理することによって, データベースの利便性を高めるようにJT-60SA データベース・システムの設計を進めている。

図1にはJT-60SAにおけるデータの流れを示す。分光器や干渉計など種々の計測器は生データを生成する。生データは, 較正データなどを用いた物理データへの変換プロセス (定型処理) を経て, 実験データサーバに転送される。こ

の一連のデータの流れはプラズマ放電の終了後に直ちに実行されることが重要である。データ格納までに要する時間は, プラズマ実験実施者がデータを参照して, 次のプラズマ実験の条件決定のための思考に許される時間を左右するからである。

一方で, 生データは物理データほどに, 緊急を要さない。むしろ, 実験終了後に詳細解析のため, 物理データに変換されなかったデータを抽出する, あるいは実験データベースに格納されている物理データより高い時間分解で物理データを再評価する, などの利用方法が想定される。また, 物理データよりもデータ量が多いため, 次のプラズマ放電までに元データサーバへの転送が完了しない可能性がある。これらの理由から, 生データをプラズマ放電とプラズマ放電の間に転送するのではなく, 実験終了後の夜間に, 計測器毎に割り当てられた時間枠内で元データサーバへ転送する方針である。なお, 元データサーバには, ヘッダを含む生データだけでなく, 定型処理のために使用した較正データとデータ加工プログラムなど, 生データから物理データを生成するのに必要な全ての情報が格納される。なお, 運転系生データは各設備によって保管される。

3.2.2 一次および二次物理データの生成とデータベース・システムによる管理

多くの物理データは、図1の左下枠内に示すように、他の物理データを必要とせず、1種のみ計測器から生成される。たとえば、主プラズマ中のイオン温度は、荷電交換過程に由来して放射されるスペクトル線C VI ($n=7-8: 529 \text{ nm}$) を分光器によって測定し、波長校正されたスペクトル線のドップラー拡がりの幅から導出される。他方、1種のみ計測器で生成される物理データではプラズマ物理研究には不十分な場合があり、その場合には他の物理データを用いてより有用な物理データを生成する必要がある。たとえば、プラズマ実効電荷数 Z_{eff} を導出するには、以下の式で示されるように、制動放射光強度に加えて、電子温度と密度が必要である[2] (実際には、電子温度・密度分布のマッピングのため、磁場平衡も必要)。

$$P^B(\nu) d\nu = n_e n_Z J (R/T_e)^{0.5} \exp(-h\nu/T_e) \frac{1}{2} g_{\text{ff}} d\nu,$$

$$\text{with } J = \frac{2^7}{3^{1.5}} (2\pi)^{0.5} a \left(\frac{z^2 R}{mc^2} \right)^{1.5} hc (a_0/z)^2,$$

$$\text{and } Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_Z n_Z z^2}{n_e}.$$

ここで、 $P^B(\nu)$ は周波数 ν の制動放射光放射率、 n_Z は価数 Z の不純物密度、 R はリュードベリ定数 ($=13.6 \text{ eV}$)、 h はプランク定数 ($=6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}$)、 g_{ff} はガウントファクター、 a は微細構造定数 ($\sim 1/137$)、 m は電子の質量 ($=9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$)、 c は光速 ($=3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$)、および a_0 はボーア半径 ($=5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$) である。制動放射光強度は多くのプラズマ物理研究者にとってあまり有用ではない。制動放射光強度よりもプラズマ実効電荷数の方が有用であるのは明らかである。そこで、データベースに登録済みの

複数の物理データ (この例では制動放射光強度、電子温度・密度) を使用して、二次的な物理データ (同、プラズマ実効電荷数) を導出する仕組みが必要であり、導出された二次物理データも実験データサーバに登録できるようなデータベース・システムの柔軟性と二次物理データに特有の管理が必要である。二次物理データのレビジョン管理には、二次物理データと一次物理データの紐付けが必要になる。この紐付けによって、一次物理データが修正された場合に二次物理データが適切に修正される。上の例では、制動放射光強度の校正係数が変更された場合はもとより、電子温度や電子密度、さらには磁場平衡が修正された場合にも、プラズマ実効電荷数の修正が必要になる。この一連の修正作業を人間が解析手順を遡って構成データ一覧を調べるのではなく、プラズマ実効電荷数のレビジョンに対応する制動放射光強度、電子温度・密度のレビジョンを監視し、それらに不整合が認められた場合にはプラズマ実効電荷数の修正・再計算を自動的に促すようレビジョン管理の仕組みが必要であり、JT-60SA データベース・システムに実装を進めている。

このような管理機能を持たせたデータベース・システムを構築することによって、複数の計測器で生成された生データおよび一次物理データを用いて、二次物理データの高空間分解化や整合性の確認、冗長性の確保など、これまで持たなかった価値を生み出す利用方法に発展させることができる。図2には、制動放射光強度を測定可能な計測器を示す。X線イメージング結晶分光器(XICS)と荷電交換再結合分光(CXR)では、それぞれフォトンエネルギー5 keVおよび波長529 nmのスペクトル線とともに制動放射光が連続光として測定される。軟X線放射計測(SX)と可視分光(Visible)では、それぞれフォトンエネルギー1-2 keV付近および波長523 nmの制動放射光強度が測定

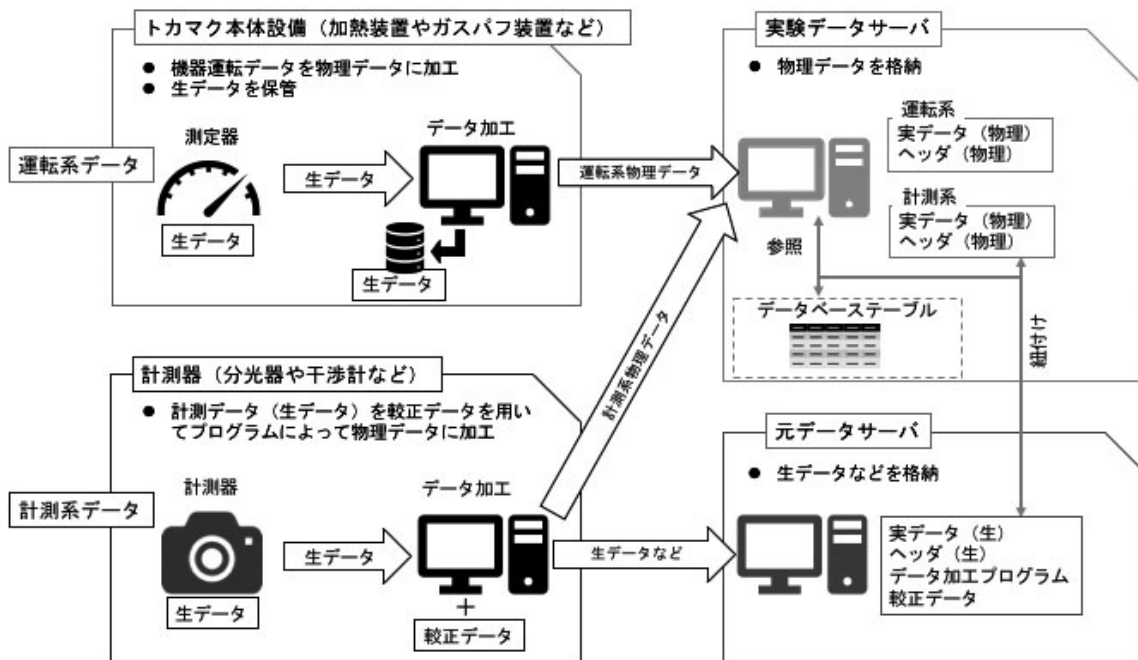


図1 JT-60SAにおけるデータ収集とデータの流れ。

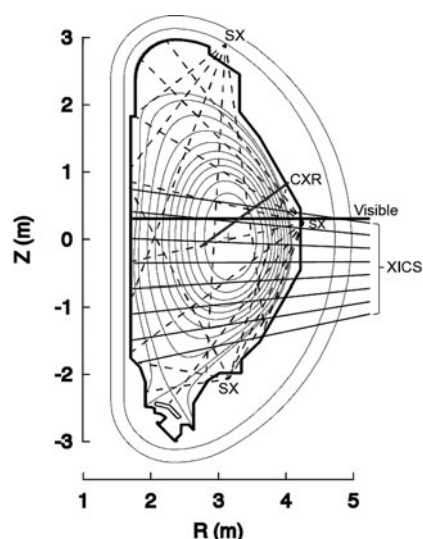


図2 JT-60SA 磁場平衡と分布計測の例. 間引いた視線を示す. XICS: X線イメージング結晶分光, CXR: 荷電交換再結合分光 (視線があるポロイダル断面を貫く位置), SX: 軟X線放射計測および Visible: 可視分光. (注)検討中の計測器の視線も含まれており, 必ずしも全ての計測器が実装されるのではない.

される. これら4種の計測器から得られる制動放射光強度データのうち最初の3種は物理データとして実験データサーバに登録されず, 生データとして元データサーバに保管され, 一般には利用されない場合が多い. しかし, これらの生データを較正データなどを用いて適切に加工することによって, 制動放射光強度の物理データを生成することが可能である. これによって, 本来は制動放射光強度の計測は可視分光 (Visible) の1視線のみであるため分布計測は不可能であるが, 他の3種の計測器の生データを利用することによって分布計測へ発展する. これによって, アーベル変換により制動放射光強度の径方向分布を導出し, さらに電子温度・密度の径方向分布を用いて, プラズマ実効電荷数の径方向分布を導出することが可能である. 導出されたプラズマ実効電荷数の径方向分布を比較することによって, これら計測器間の整合性を検証することにもつながり, これらの計測器の妥当性の確認という観点で成果が本来目的の物理データ (例えば, SXなら軟X放射強度の絶対値およびチャンネル間の相対強度の信頼性の向上, CXRならC VIスペクトル線強度の絶対値の信頼性の向上, など) に還元される. JT-60SA データベース・システムでは, このような解析を実行できるようにツール整備 (3.3節, eDAS) を進めている. さらには, 全ての計測器で整合するプラズマ実効電荷数の二次元空間分布を再構築することも可能であろう (注: これら4種の計測器で測定される制動放射光のフォトンエネルギーまたは波長が異なるため, これらの制動放射光強度をそのまま使ったアーベル変換あるいはコンピュータ・トモグラフィーによる空間分布の再構築はできないので, プラズマ実効電荷数などを介する解析が必要).

このような二次物理データやその空間分布の導出を自動的かつ省力化された保守のもとで行うには, 径方向分布

データのフィッティングルーチンや磁場平衡へのマッピングルーチンの共通化, 磁場平衡の統一性など, 標準ライブラリの整備といった技術的な基盤の構築も重要である.

3.2.3 実験データベースとして格納される運転系データ

運転系データは, プラズマ放電と同期して収集される設備放電データ, プラズマ放電とは同期せずに24時間連続的に収集される設備監視データから構成される.

設備放電データは, プラズマの生成・維持に直接的に必要となる装置の入出力データ, 例えばガスパフ装置やポロイダルコイルの制御設定値やその実績データなどである. これらの生データは, 既に, 図1で示したように, 物理データに変換後, 実験データベースの一部として格納され, ユーザに提供される. なお, プラズマ放電の開始時刻や終了時刻などのプラズマ放電に関わる情報データも設備放電データとして格納される.

また, 設備監視データは, 実験運転中に機器状態の監視のため連続的に運転される装置, 例えば真空容器内圧力やダイバータ板温度などのデータである. JT-60SA 実験運転より, その一部の生データが物理データに変換された後, 15分周期で実験データサーバに転送され, 実験データベースの一部として格納される.

3.2.4 設備監視データの利用

設備監視データを実験データベースとして格納するにあたり, 粒子バランス研究等のプラズマ研究を目的としたデータ, 例えば真空容器内圧力や容器内外の温度や排気系の質量分析器などのデータ, 設備の機器状態の監視・開発等を目的としたデータ, 例えば超伝導コイル関連のヘリウム冷凍系減圧機の回転数や減圧ポンプの出口オイル温度などのデータを選定した. ただし, 2020年3月末より開始される統合コミッショニング期においては, 真空容器内圧力, 質量分析データおよびガスパフ装置などのトカマク本体設備が収集する全ての設備監視データ最大で約600点, 加えて超伝導コイル関連のヘリウム冷凍機に関する全ての設備監視データ約2000点を実験データベースに格納できるように準備を進めている.

プラズマ研究を目的とした設備監視データの利用時には, プラズマ放電時に同期して収集される計測系データとの時間的な一致が必要不可欠である. しかし, 計測系データがハードウェアのタイミング信号を介して厳密にデータ収集機器間の同期を図るのに対し, 設備監視データのデータ収集機器間の同期は厳密に図られてはいない. また, 計測系データの収集に関わる機器はプラズマ放電開始時刻を基準とした相対時間をデータ収集時の時間軸とするので設備監視データも同様の時間軸でも表示できるような仕組みが必要である. この目的のため, 設備放電データの一つであるプラズマ放電開始時刻及び終了時刻の絶対時刻を利用して, 設備監視データの時間軸を計測系データ同様にプラズマ放電開始時刻からの相対時間に変換する仕組みを実装する. これに伴い, プラズマ運転に関わるデータ収集機

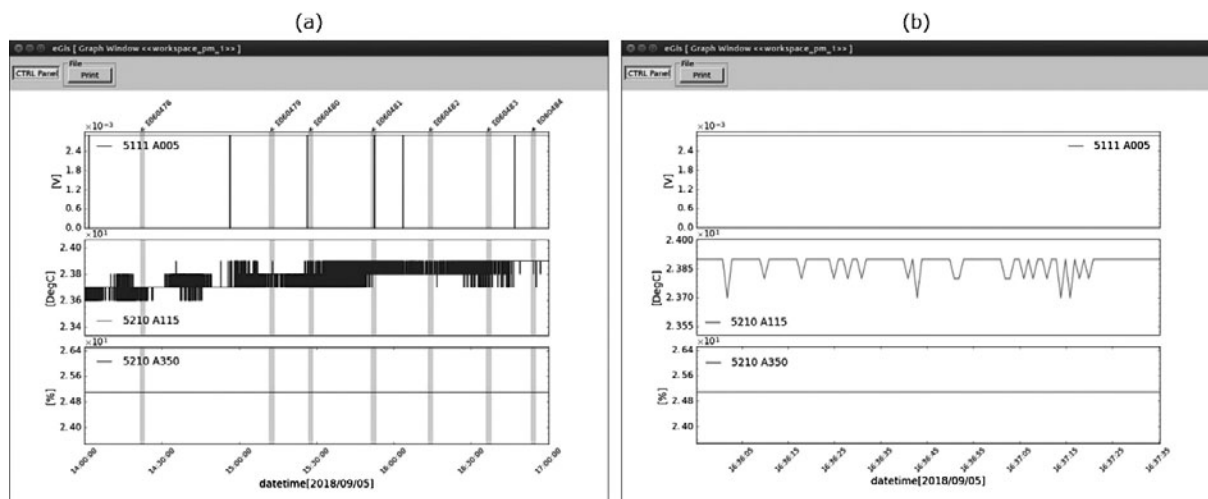


図3 利用者への運転系データ提供例。(a)時刻に対する上段：TFコイル10-11クエンチ電圧，中段：減圧ポンプ出口オイル温度，下段：ヘリウム圧縮機回転数，および(b)ショット番号 E060483 放電中の拡大図。図(a)では，幅広い時刻（3時間）にわたって機器の運転状態を監視でき，図(b)では，これらの機器とプラズマ放電に同期して収集されるデータ，例えば計測系データ，との比較を想定している。(注)これらのデータは通信試験に用いた模擬データの表示である。

器間の時刻の同期を目的とした全設備共通のNTP (Network Time Protocol) サーバの設置および設備監視データの時間軸として絶対時刻を採用するようデータフォーマットを共通化する。

また，これらの対策に併せ，設備監視データを利用者に提供するためのツールの整備を進めている。図3に利用者への設備監視データ提供例として，超伝導コイル関連のヘリウム冷凍機データ（模擬データ）の表示を記す。図3(a)は，機器の運転状態の監視を目的とした表示である。なお，グラフ上に時間軸の範囲内に行われたプラズマ放電をマーキングすることでプラズマ放電との関連を容易に調べられる。図3(b)は，プラズマ放電に同期して収集される計測系データとの比較を目的とした表示である。プラズマ放電開始時刻と終了時刻を時間軸に設定することでプラズマ放電に同期した設備機器の状態変化をより詳細に把握することが可能である。

放電情報データの利用，NTPサーバの設置および運転系データのデータフォーマットの共通化により，設備監視データ利用における課題を解決し，より有効に活用できる環境を整備する。JT-60SA 実験運転より新たに実験データベースの一部となる設備監視データの活用がプラズマ研究の進展および設備機器の開発において大きく貢献することが期待される。

参考文献

- [1] JT-60SA Research Plan v4.0, JT-60SA Research Unit; http://www.jt60sa.org/pdfs/JT-60SA_Res_Plan.pdf (current as of Feb. 1, 2019).
- [2] T. Fujimoto, *Plasma Spectroscopy* (International Series of Monographs on Physics vol. 123) (Oxford, Oxford University Press 12004).