

氏 名 江 本 雅 彦

学位（専攻分野） 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大乙第117号

学位授与の日付 平成15年3月24日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 LHDコンピュータシステムの統合化の研究

論 文 審 査 委 員	主 査 教授	小 森 彰 夫
	教授	日 比 野 靖
	教授	上 村 鉄 雄
	教授	須 藤 滋
	教授	寺 町 康 昌

論文内容の要旨

核融合実験装置では、制御機器や計測機器の数が多く、収集されるデータが膨大になるため、これらを管理するコンピュータシステムは実験を遂行する上で必要不可欠な要素になっている。このため、日本トラス装置 60 (JT60)、欧州共同トラス装置 (JET) のような大型核融合実験装置では、計画当初からコンピュータシステムが組み込まれて設計、製作が行われており、各種データは収集から保存、提供等の機能が一体化した、しかもセキュリティに配慮した結果クローズドに近いシステムで通常処理されている。

核融合科学研究所の大型ヘリカル実験装置 (LHD) は、世界最大にして世界初のヘリカル型超伝導核融合装置であり、非常に大規模で複雑な機器構成となっている。LHD は、超伝導に必要な真空排気装置、冷却装置等に故障が生じた場合、致命的な損傷を受けることから、制御は LHD が安全にしかも長期間高い信頼度で稼動することを最優先に行われる必要があり、超伝導、励磁、プラズマ生成等を含む中央制御システムと表裏一体の LMS (LHD Man-machine interface System) と呼ばれるコンピュータシステムは、当初意図的にクローズド化した独自のシステムとして構築された。また、逆に軽微な故障等により実験が止まらぬよう、中央制御システムには重要な情報だけが送られ、他の情報は、真空排気装置、冷却装置、場電源装置等が装置毎にリアルタイムモニタリングシステムを構築し、装置に最適な制御を個々に行う方式が取られた。計測機器も、精力的に R&D を行って空間分解能や時間分解能を従来より 1 桁近く改善する等、高性能化に成功したが、多くの機器が個別データ収集システムと呼ばれる独自のデータ処理システムを持つ必要性が生じることとなった。統一した形式で処理できる計測機器には、プラズマ物理データ計測システムが導入され、LHD のコンピュータシステムは、先に述べた大型核融合実験装置とは異なり、独立した複数のシステムから成る、ハードウェア優先のシステムとして完成した。

LHD 実験開始後、この LHD 型コンピュータシステムは、当初の計画通り安全にしかも長期間高い信頼度で稼動することに成功し、多大な実験成果を上げることができた。このため、次の段階の要求として当初設定していなかった以下のようなことが、コンピュータシステムに求められることとなった。まず、核融合科学研究所は全国共同利用研究施設であり、LHD が初期実験で成果を収めてからは内外の共同研究数が大幅に増加したことから、遠隔地の共同研究者の利便性を考慮してインターネットを利用した所外共同研究者へのデータ公開と、更に一步進んで遠隔地からの実験参加の実現が求められた。即ち、外部へのオープン化が強く求められた。また、実験データを解析するには、全計測機器のデータはもちろんのこととして装置が保有する実験条件等の全ての情報を総合的に把握する必要があり、実験を効率的にしかも見落としすることなく進めるには、全情報の把握が処理端末で随時、瞬時に行えること、即ち、独立したコンピュータシステムの情報を統合化することが求められた。これら 2 点は、LHD が当初設定した方針とは、全く反対の方針になるため、LHD のコンピュータシステムは、当初の設定を維持しつつ、それとは反対の要求も満たさなくてはならないと言う難しい問題を抱え込むこととなった。統合化で特筆すべき問題は、プラズマの長時間放電である。これは LHD 計画の主要な目的の一つであるが、通常の 1 分程度以下の放電に比べて 3 時間を超えるような長時間放電を目指して

いるため、通常の放電とはタイムスケールが全く異なることから、当初計画では別個のコンピュータシステムで処理することが考えられていた。

本論文は、LHD を含む従来の大型核融合装置のコンピュータシステム構築構想を持っては満たすことのできない上記要求、即ち、多数のクローズドシステムから成る大型核融合装置用コンピュータシステムの情報の統合化、オープン化の研究を行い、これを成就することができたことから、成果をまとめたものである。本論文では、個々の計測システムや計算機群に制限を与えないでシステム全体を統合化、オープン化するため、世界に先駆けて、この種のコンピュータシステムではそれまで考慮されることのなかったオープン・システム技術の採用、即ち、オープンなネットワーク技術（IP マルチキャスト）の利用、可読性の高いテキスト形式のデータ・ファイルの採用、オープン・ソースウェアの利用を図り、研究の要とした。

以下、LHDで行ったコンピュータシステムの情報の統合化、オープン化の研究成果の概要を述べる。これらの研究の目標を端的に表しているものは、遠隔実験参加である。遠隔実験参加には、

1. 必要なデータを迅速かつ容易に検索できること、
 2. データの形式に依存しないでデータの参照が行えること、
 3. そのためのオープンソースである可視化ツールの提供、
 4. 十分な帯域でないネットワークを経由しても必要なデータの転送が可能であること、
- 等が求められており、これらを達成できればLHDコンピュータシステムの情報の統合化、オープン化が成就することとなる。また、これらを実行するために十分なセキュリティが確保されている必要がある。

データ転送の問題に関しては、以下のように研究を進め、要求を達成することに成功している。計測機器の3分の2のコンピュータシステムでは、Windows NT ベースのPCクラスタを利用したOODB（オブジェクト指向型データベース）を使用しているが、このOODBではデータの検索処理はクライアント側で行われることから、多くのデータがクライアントに転送されるため、インターネットのような必ずしも高速の帯域が確保できないネットワークでの利用は困難であった。この問題に対しては、実験データの情報を実験データそのものと分離し、OODBによる検索はサーバ側だけで行い、結果だけを別のプロトコルで送信するシステムを構築する研究を行った。これによって、データ転送量を減らすことができ、10MbpsのLAN上で200秒程かかっていた処理時間を30秒以下に短縮することが可能となった。

次に、上記システムの考え方をういて、計測機器側で処理の終わったデータを保存する解析済みデータサーバシステムの研究を行い、システムの統合化を図った。即ち、データの形式に依存しないでデータの参照が行えるシステムの研究を行った。このシステムでは、OSに依存しない技術を用いることによってWindows以外のOSからでも容易にデータを統一的に参照できるよう、メタ情報の検索にオープンソースのリレーショナルデータベースであるPostgreSQLを、またデータの送受信にFTPを導入するとともに、データをテキストファイルに統一することとした。テキストファイルは、機種非依存性であり、どの機種でも読むことが可能であることから、異なったシステムで利用しやすい利点がある。但し、テキストファイルは、バイナリファイルに比較して容量が大きくなることから、こ

れまで実験データのような大規模なデータには使用されることがなかった。しかし、最近では圧縮技術の発達やハードディスクの大容量化・低価格化が目覚ましく、より大きなテキストファイルデータが利用可能になってきている。実際、HTML やXML 等のテキストファイルが広く普及してきたことから、現在では、LHD の解析データにコメント部分を活用することが出来るテキストファイルを採用しており、将来の拡張性を確保するとともに、ポータビリティの向上を図っている。何れにせよ、本研究では、将来更に広く普及し拡張性のある方式を世界に先駆けて採用することにより、大型核融合実験装置のようなクローズドシステムを前提に構築された大規模コンピュータシステムでも、オープン化できることを実証することができた。

個々のプラズマ放電に付けられる実験番号はプラズマ放電を特定する上で最も基本となるデータであり、LMS によって管理されている。しかし、これまでのコンピュータシステムでは、LMS 以外のシステムから LMS に実験番号を参照することは非常に困難であった。本研究で、実験番号等の配信に IP マルチキャストを用いたことにより、複数のシステムに同時に実験番号等のデータを配信することが可能となり、異なるシステム間におけるデータ収集の同時性、データ参照の信頼性等を大幅に向上させることができた。また、IP マルチキャストを利用することによって、パケットを要求するネットワークだけに同時に配信することができるため、サーバやネットワークの負荷を抑えることが可能となった。これまで、IP マルチキャストは通常データ通信に用いられる TCP に比べ信頼性が低いことから、確実なデータ送信には独自のパケット制御が必要であり、実験番号の更新のような場合には利点が活かされないとされてきた。しかし、マルチキャストパケットの送受信研究の結果、パケットのロス等は観測されず、また、実験番号の配信はネットワークが混雑する放電直後ではなく比較的空いている放電開始前に行われるため、十分に信頼性が高く、実験番号の更新でもその利点を十分に活かせることが実証された。

実験データの参照に必要なオープンソースの提供と必要なデータの迅速かつ容易な検索システムは、核融合科学研究所のコンピュータシステムに不慣れな外国人を含む所外共同研究者のために必要不可欠である。本研究では、データの中から必要なものを効率よく見つけ出せるよう、諸実験条件のデータベース及び NIFScope と呼ばれる可視化ツールを研究し、容易に必要なデータを取得できるシステムを実現することに成功している。特に、NIFScope は、オブジェクト指向型言語を内蔵することにより、自然な形で数式を記述すること及びデータフォーマットの違いを吸収することが可能となったため、解析データ以外のシステムで収集・解析された多様なフォーマットのデータにも対応できた。これは、従来の何れのシステムでも持ち得なかった機能である。また、遠隔地から利用する場合に必要な利便性への配慮と高い安全性の確保を両立させるため、ミラーサーバを設置すること等により、安全かつ使いやすいデータ公開システムを実現した。

プラズマ放電時間が1分程度以下の放電を繰り返し行う、短パルス繰り返し放電では、通常、放電中にデータを収集し、次の放電までにデータを処理するという方法が取られている。しかし、この方法をそのまま長時間放電に適用すると数時間に及ぶプラズマ放電中、データを参照することができないことになる。このため、IP マルチキャストを利用したモニタリングシステムの研究を進め、取得したデータをネットワーク上に直接配信することによって、複数のクライアントでリアルタイムデータを参照することが可能なシステム

を構築することに成功している。このシステムでは、ネットワークに依存した部分と物理量に変換する部分が完全に分離されていることにより、実験者が物理量に変換する部分を容易に更新することも可能になっている。

以上のように、特定環境に依存しないようオープンソースを用いて、LHD のコンピュータシステムの情報の統合化、オープン化の研究を行った。その結果構築された統合システムは、実際に LHD の初期実験後必要となった諸要求を満たして可動することが実証された。OODB を使った収集システムのデータ転送の高速化により、収集されたデータをすぐに参照することができるようになった。この結果、収集データを元にゲイン等の計測パラメタの調整を速やかに行えるようになり、限られたマシンタイムを有効に活用できるようになった。平成 14 年 10 月 13 日からの 2 ヶ月間に一放電あたり 150MB 以上（データ圧縮後）、一日あたり 15GB 以上の計測データが収集されたが、これらのデータを個々の利用者が直接利用することは、ネットワーク負荷を考えると不可能である。一方、これらのデータを元に作成された解析済みデータは一放電あたり 700KB、一日あたり 80MB 程度であり、この程度のデータであれば、十分なネットワーク帯域が確保できないインターネット等からの利用も十分可能である。また、この間の利用状況は、登録が延べ 76,000 件、参照が 190,000 件となっている。参照のうち、95,000 件は同一ユーザからの 2 機種以上の計測機器データの同時参照であり、最大では 9 計測機器のデータが同時に取得されている。複数データの同時参照、取得は、統合したシステムで初めて可能であること、特に、システム間の情報伝達の同時性、高信頼性が得られた結果、放電終了後速やかにデータを登録できるようになったことによるものである。また、利用されているクライアントには、Windows 以外に Linux や Solaris 等が含まれるが、これは OS に依存しないオープン技術を利用した結果によるところが大きい。オープン技術の利用により、LHD のコンピュータシステムは、他の研究施設への移植や将来の更なる拡張に柔軟に対応することが可能になっている。

本論文で扱った課題は LHD に限らず、今後登場するこの種の大型実験装置に共通する課題であり、本論文はその解決策を提示するものである。

論文の審査結果の要旨

本博士論文では、複数の閉じたシステムからなる核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）用コンピュータシステムの統合化、オープン化の研究を行っている。

LHD は、世界最大で唯一のヘリカル型超伝導核融合装置であり、非常に大規模で複雑な機器構成となっている。LHD は、超伝導用機器に故障が生じた場合、致命的な損傷を受けることから、安全性と長期間の高い信頼性を最優先に建設されており、中央制御システムと表裏一体のコンピュータシステムも、当初意図的に閉じたシステムとして構築された。また、多くの計測機器も、先進的な開発研究を行った結果、個別データ収集システムと呼ばれる独自のデータ処理システムを持つこととなった。実験開始後、コンピュータシステムは計画通り稼動し、多大な実験成果を上げることができた。このため、次の段階として、当初設定していなかった以下のようなことがコンピュータシステムに求められることとなった。まず、内外の共同研究者数が大幅に増加したことから、遠隔地からの利便性を考慮してインターネットを用いた所外へのデータ公開と、更に一歩進んで遠隔地からの実験参加の実現が求められた。また、実験データを解析するには、計測機器のデータはもちろん、装置が有する実験条件等の全ての情報を総合的に把握する必要があり、全情報の把握が処理端末で随時、瞬時に行えること、即ち、情報を統合化することが求められた。

本論文では、個々の計測システムや計算機群に制限を与えないでシステム全体を統合化、オープン化するため、従来の大型核融合実験装置用コンピュータシステムでは考慮されたことのなかったオープン・システム技術の採用、即ち、オープンなネットワーク技術（IP マルチキャスト）の導入、可読性の高いテキスト形式の解析データ・ファイルの採用、オープン・ソースウェアの導入を世界に先駆けて図り、研究の要としている。本研究で解析データ用データサーバを設けることによって構築された統合システムでは、データの迅速かつ容易な検索、データ形式によらないデータの参照、そのためのオープンソースである可視化ツールの提供、速度の遅いネットワークによる必要なデータの転送等が可能となり、実際に上記要求を満たしていることが実証された。特に、可視化ツールは、オブジェクト指向型言語を内蔵したことにより、自然な形で数式を記述すること及びデータフォーマットの違いを吸収することが可能となったため、解析データ以外のシステムで収集・解析された多様なフォーマットのデータにも対応できた。これは、従来のこの種の何れのシステムでも持ち得なかった機能である。また、遠隔地からの利用に対しては、必要な利便性への配慮と高い安全性の確保を両立させるため、ミラーサーバを設置すること等により、安全で使いやすいデータ公開システムを実現した。

平成 14 年度の実験で収集されている計測データは、一放電あたりデータ圧縮後 150MB 以上、一日あたり 15GB 以上であり、これらのデータを元に作成された解析データは一放電あたり 700KB、一日あたり 80MB 程度である。これにより、十分な帯域が確保できないインターネットからの利用も可能となっている。また、最近の 2 ヶ月間の解析データ用データサーバの参照は約 190,000 件あり、95,000 件は同一ユーザからの 2 計測機器以上の同時参照となっている。最大では 9 計測機器のデータが同時に参照、取得されている。同時参照は、統合したシステムで初めて可能となるもので、特に、統合後、各システム間の情報伝達の同時性、高信頼性が得られた結果、放電終了後の速やかなデータ登録

が可能になったことによるものである。

本論文で扱った課題は、LHD に限らず今後登場するこの種の大型実験装置に共通する課題であり、本論文はその解決策を提示するものである。本論文は、内容に独創性と新規性が認められ、得られた知見はこの分野の発展に寄与するものと認められる。よって、本論文が博士学位論文として十分な水準にあり、本専攻にふさわしい内容を持つものであると判断した。