

高エネルギー・核融合科学研究部会

核融合研究班

## スーパーSINET利用研究成果報告

- ・ 核融合研究班・参加研究者構成
- ・ ネットワーク接続の概要
- ・ 核融合研究班・研究プロジェクト
- ・ 研究プロジェクトの研究内容
- ・ まとめ

班長 上村鉄雄（核融合科学研究所）

平成 16 年 3 月 19 日

## 核融合研究班・参加研究者構成

班 長： 上村鉄雄	(核融合科学研究所)
小川雄一、森川惇二、大國浩太郎	(東大高温プラズマ研究センター)
高村秀一、大野哲靖	(名大大学院工学研究科)
佐野史道、岡田浩之	(京大エネルギー理工学研究所)
飯尾俊二、筒井広明	(東工大原子炉工学研究所)
間瀬 淳、近木祐一郎	(九大先端科学技術共同研究センター)
笹尾真実子、北島澄男	(東北大大学院量子エネルギー工学研究科)
西野信博	(広大大学院工学研究科)
西原功修、福田優子	(阪大レーザー核融合研究センター)

須藤 滋、小森彰夫、三戸利行、田村 仁、柳 長門、増崎 貴、渡辺清政、川端一男、  
長山好夫、田中謙治、森崎友宏、西浦正樹、磯部光孝、江本雅彦、駒田誠司  
津田健三 (核融合科学研究所)

## ネットワーク接続の概念図 (平成 15 年度末現在)



図1 核融合研究班・スーパーSINET接続概念図

## 核融合研究班・研究プロジェクト



図2 核融合研究班・研究プロジェクト概念図

### (1) LHD 遠隔実験 (平成 14 年度～)

代表責任者 : 須藤 滋 (核融合科学研究所)

目的 : 核融合科学研究所の大型ヘリカル装置実験データのリアルタイム伝送及び遠隔機器制御による大学研究者の遠隔実験参画

### (2) 超伝導実験遠隔制御システム (平成 13 年度～)

代表責任者 : 小川雄一 (東京大学高温プラズマ研究センター)

目的 : 東京大学高温プラズマ研究センターの超伝導コイルを用いたプラズマ実験装置の遠隔制御システムの開発

### (3) 大規模プラズマシミュレーション研究 (平成 16 年度以降)

代表責任者 : 未定

目的 : 核融合科学研究所のスーパーコンピュータをスーパーSINET 経由で遠隔利用し、大規模シミュレーション研究遂行

## ・ 研究プロジェクトの研究内容

### (1) LHD 遠隔実験 (平成 14 年度～)

代表責任者： 須藤 滋 (核融合科学研究所)

目的： 核融合科学研究所の大型ヘリカル装置実験データのリアルタイム伝送及び遠隔機器制御による大学研究者の遠隔実験参画

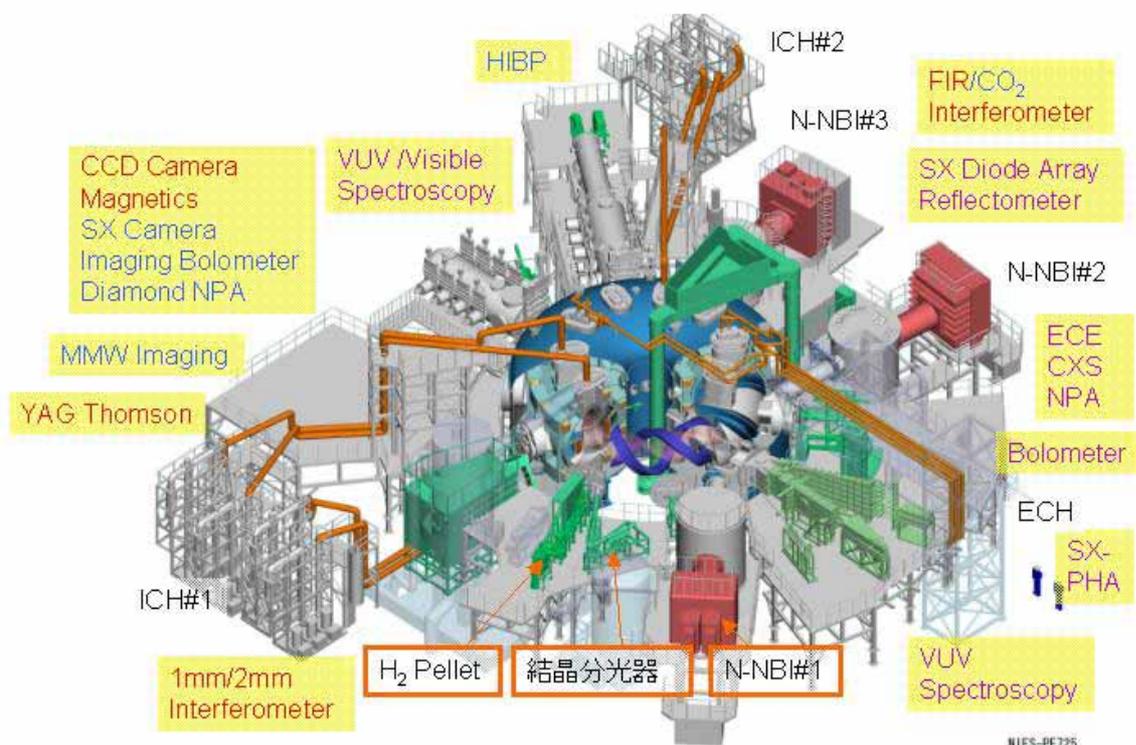


図3 LHD 計測装置群 (1ショット当たり約1GBのデータ量が生み出される)

## LHD 周辺プラズマ揺動計測

### 1. 参加研究者構成

分担責任者 高村秀一 (名古屋大学工学部)  
参加研究者 大野哲靖、三好秀暁、上杉喜彦、辻 義之、高木 誠 (名古屋大学工学部)  
V. BUDAEV (クルチャトフ研究所)  
小森彰夫、増崎 貴、森崎友宏、上村鉄雄、津田健三 (核融合科学研究所)

### 2. 研究概要

LHD 周辺プラズマ中の密度揺動をダイバータプローブ群を用いて遠隔地より計測し、フーリエ解析、Wavelet 解析、確率分布関数 (PDF) をベースとした統計的解析を行ない、その特性を明らかにする。さらに、周辺プラズマの輸送現象を解明する。(図4参照)

プラズマ中の揺動による磁力線を横切る方向のプラズマ輸送の増大 → 核融合装置の閉じ込め性能の劣化！

揺動の性質の理解 → 揺動の制御 → 閉じ込め性能の改善！

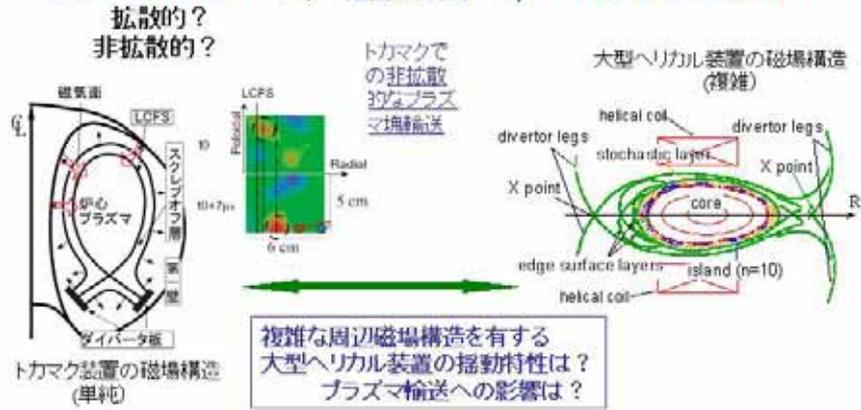


図4 周辺プラズマ領域の揺動による粒子・熱輸送

### 3. 遠隔計測システム

名古屋大学の高村研究室から、ダイバータプローブ群を用いてLHD周辺プラズマ中の密度揺動を直接計測するため、スーパーSINETを利用した遠隔揺動計測システムを開発・完成させた。このシステムを第6サイクル(平成14年10月~平成15年2月)及び第7サイクル(平成15年9月~平成16年1月)LHD実験に適用し、実験データサーバへのアクセスとショット間のデータ転送・解析、及び、LHD制御室スクリーン画像データの同時転送を行ない、遠隔実験参画システムの有用性を実証した。

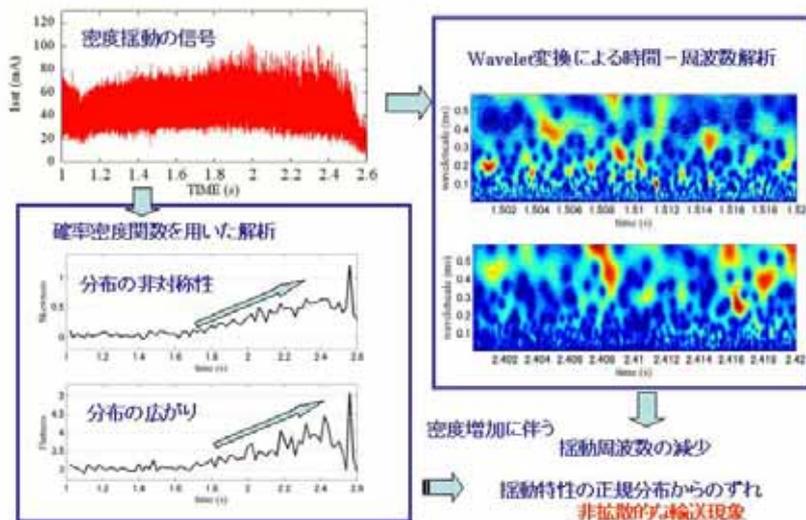


図5 プラズマ密度上昇実験での周辺揺動

#### 4．研究成果のまとめ及び今後の課題

第6及び第7サイクルLHD実験において取得した、周辺プラズマ中のイオン飽和電流の揺動の計測データについて、フーリエ解析、Wavelet解析、確率分布関数(PDF)をベースとした統計的解析を行ない、LHDの周辺部の揺動特性を評価した。(図5参照)

その結果、トカマク装置での観測と同様にLHD周辺プラズマ中においてもバースト的なイオン飽和電流が観測され、装置の磁気軸位置依存性を持つ揺動特性が明らかになった。異なる磁場配位の放電について解析することにより、周辺部へのプラズマの輸送と磁力線の結合長に関係があり、また、次元解析より、LHDの揺動はマルチフラクタル性を有し、その特性は位置によって変化することが分かった。今後は、磁場計算の結果と併せて磁力線の結合長とプラズマの輸送の関係を明らかにし、また、次元解析をさらに進めることで、揺動特性をより詳細に調べることが必要である。

### LHD プラズマの閉じ込め特性

#### 1．参加研究者構成

分担責任者 佐野史道 (京都大学エネルギー理工学研究所)  
参加研究者 岡田浩之 (京都大学エネルギー理工学研究所)  
渡辺清政 (核融合科学研究所)

#### 2．研究目的

LHD コアプラズマの閉じ込め特性を解明する。

#### 3．研究課題

H線のスペクトルプロファイルの微細構造を測定し、発光に寄与する原子の素性を明らかにする。

不純物原子のスペクトルプロファイルから速度分布を評価し、発生機構を明らかにする。

速度分布の測定からプラズマへの侵入長を評価し、周辺プラズマの密度・温度制御により不純物制御を行う。

高速イオンにより励起されるMHD不安定性の特性を明らかにする。

#### 4．スーパーSINETとの接続構成



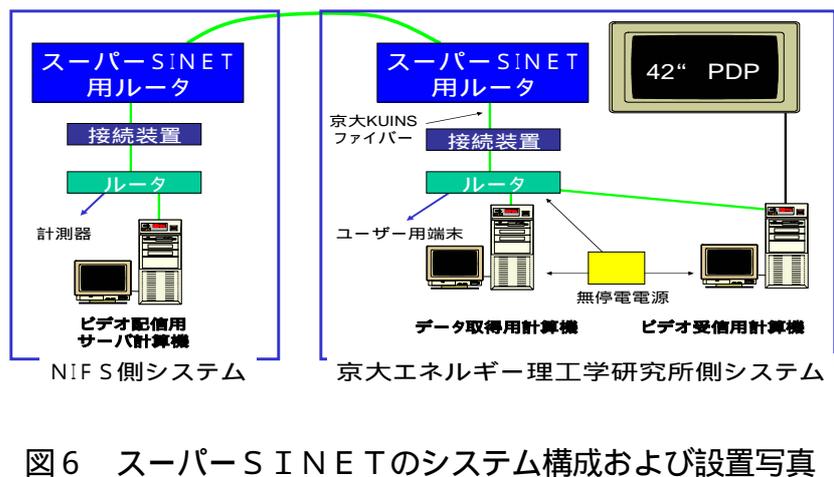


図6 スーパーSINETのシステム構成および設置写真

## 5. 研究成果

### H スペクトルプロファイルの非対称性

スーパーSINETを利用してLHD実験に遠隔地から参加し、H スペクトルプロファイルを観測した結果、非対称性のあることを発見した。

図7は、 $R_{ax}=3.6\text{ m}$ の配位において観測した非対称性スペクトルプロファイルを narrow と broad の2成分に分解したものである。

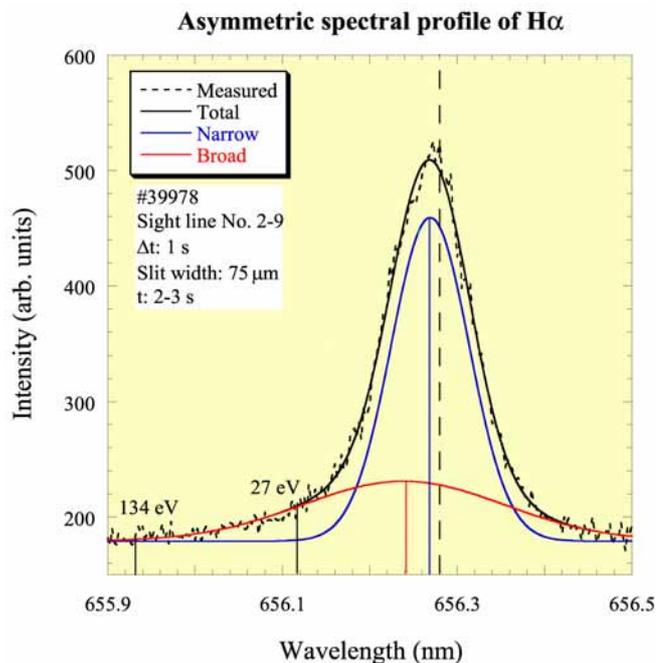


図7 H スペクトルプロファイル

## 6. 今後の計画

スーパーSINETを活用した、CCDカメラコントローラの遠隔操作、動作状況確認のためのTV画像の転送、及びリアルタイムデータ転送による遠隔実験参加を行う。

## ミリ波イメージング装置による揺動計測

### 1. 参加研究者構成

分担責任者 間瀬 淳 (九大先端科学技術共同研究センター)  
参加研究者 近木祐一郎 (九州大学ベンチャービジネスラボラトリ)  
川端一男、長山好夫、田中謙治、徳沢季彦、稲垣 滋  
(核融合科学研究所)

### 2. スーパーSINETとの接続構成

本システムは、「ミリ波イメージング、超短パルス反射計などの先端的ミリ波プラズマ診断法の大型ヘリカル装置 (LHD) への適用に関する共同研究」に使用されるものである。スーパーSINETの九州大学ノードがある情報基盤センター(箱崎キャンパス)と、当該施設である先端科学技術共同研究センター(筑紫キャンパス)は離れており、その間はキャンパス間ネットワークを併用している。

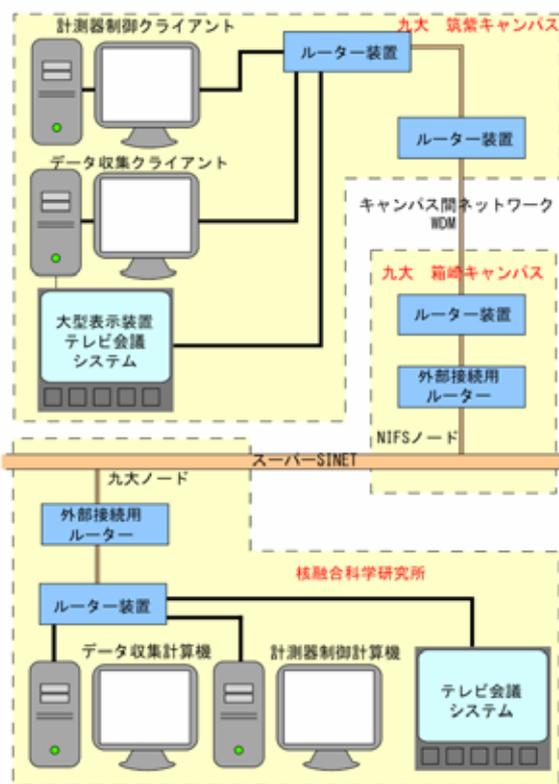


図8 システムの機器構成概要、スーパーSINETとの接続概念図、及び先端科学技術共同研究センターに設置されているシステムの写真

### 3. 研究目的・研究目標

LHD計画共同研究として九州大学の先端科学技術共同研究センターで開発が進められ、現在LHD装置に設置されている、ミリ波計測システム(電子サイクロトロン放射イメージング装置および超短パルス反射計装置)の遠隔操作およびデータ転送をオンラインで行うことにより、遠隔実験参加という新しい共同研究手法を確立していく。また、テレビ会議システムの整備により、実験結果の解析および検討を迅速かつ適確に行っていく。

## 4 . 研究課題

### 「LHDにおけるミリ波計測遠隔実験システムの確立」

電子サイクロトロン放射イメージングおよびイメージング反射計の同時測定によるプラズマおよび揺動の可視化

## 5 . 研究内容

### 5 .1 電子サイクロトロン放射イメージング( Electron Cyclotron Emission Imaging :ECEI )

電子サイクロトロン放射 (ECE) 計測は、受信周波数が磁場閉じ込めプラズマ中の半径方向の局所位置に対応するという、他の計測法にはない特徴を有しており、等磁気面上のプラズマを投影するイメージング装置と結合させることによりプラズマ断面の分布情報を空間分解良く得ることができる。また、多チャンネル検出器間の信号の相関測定によりインコヒーレントな雑音に埋もれる電子温度揺動の測定が可能となる。本研究は、この ECE イメージングシステムを核融合科学研究所大型ヘリカル装置 (LHD) に設置し、電子温度揺動のスペクトル及び分布情報を得ることを目的としている。

イメージング測定のための準光学結像系は、LHD 真空容器内に設置された回転楕円面鏡と平面鏡からなり、電子サイクロトロン放射光源の像を検出器アレイ上に結像する ( 図 9 参照 )。 検出器アレイおよび中間周波数システムを多チャンネル化し、そのデータをオンラインで転送して LHD ショット間にデータ収集する。また、局部発振器に広帯域発振器を使用し、発振周波数を遠隔制御で電氣的に掃引することにより、半径方向の広い範囲でのデータを収集する。

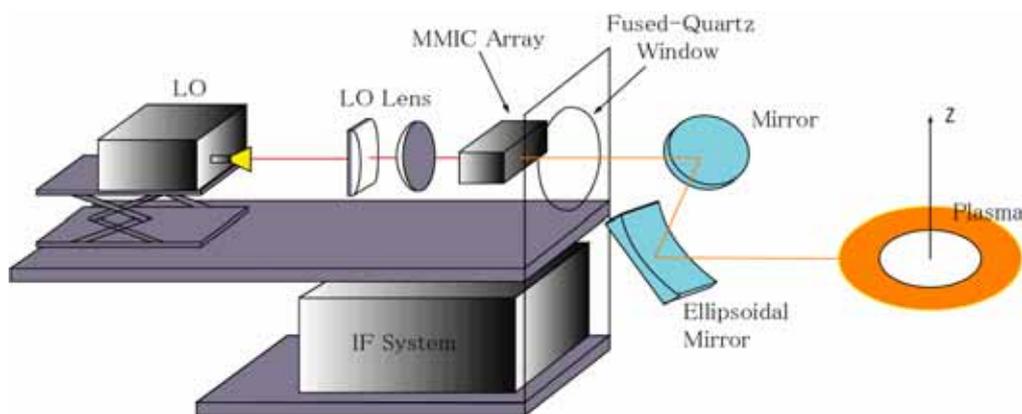


図 9 LHD に設置された ECE イメージング装置概念図

### 5 . 2 超短パルス反射計 ( Ultra-Short Pulse Reflectometry : USRM )

遠隔制御システムを用いた超短パルス反射計は以下で構成されている。超短パルス発振器からの出力を導波管を用いてチャープ化し、アクティブダブラーにより LHD プラズマの密度に対応した周波数に入射周波数を変換後、増幅器、円錐ホーンを通してプラズマに入射する。プラズマからの反射波信号は、もう一方の円錐ホーンにより受信後、低雑音アンプを用いて増幅され、サンプリングスコープを用いて直接観測される ( 図 10 参照 )。 増幅器、アクティブダブラーへの電源、サンプリングスコープ、超短パルス発振器等の装置は制御室に設置された計測器制御サーバーにより GPIB を用いて制御されており、装置の立

ち上げから、計測装置の運転条件変更、データ収集まで可能となっている。さらに、計測器制御サーバーは九州大学よりスーパーSINET を通して制御できることから、九州大学からの遠隔実験システムを実現することができた。

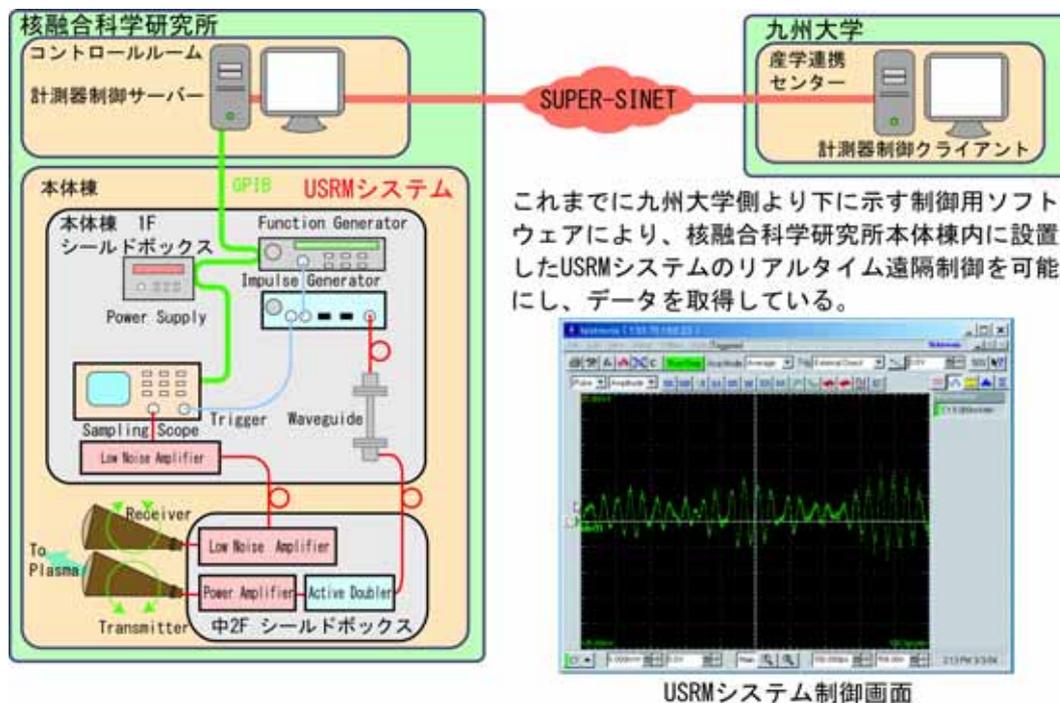


図10 スーパーSINETを用いたLHD遠隔実験参加・USRシステム

## 6. 研究成果

ECEI 装置のLHDにおける実機適用は、平成13年度後半から始まり、平成14年2月に初めて多チャンネル測定および検出器間の相互相関関数の導出に成功した。平成14年度は平成15年2月に実験およびデータ収集を行なった。一方、超短パルス反射計は平成14年12月にLHDに設置され、同15年2月初期実験が実現し、プラズマからの反射波信号を得ることに成功している。超短パルス反射計は本格稼働が始まったばかりの装置であることから、システムの運転条件を変更する必要があるが多く、スーパーSINETを用いた計測器の実タイム遠隔制御は欠く事のできないものである。九州大学 核融合科学研究所間のスーパーSINET 開通により、LHDに設置された超短パルス反射計を構成する各部品を遠隔制御可能なものへと変更した。

上記システムを第7サイクル(平成15年9月～平成16年1月)LHD実験に適用した結果、プラズマがある時ノイズの強度が大きくなる現象が見られたものの、プラズマからの反射波と思われるパルスを観測することに成功した。

今後、この反射波信号を用いて密度分布の再構成を行うと共に、フィルタ等を用いたノイズ処理を行うことで、より信頼性の高い計測システムへと発展させる予定である。

また、本遠隔実験システムとは別に制御室前の大型モニター画面の九州大学への転送やテレビ会議システム、実験情報の取得などにもスーパーSINETが活用されている。

# LHD 高エネルギー粒子計測遠隔実験

## 1. 参加研究者構成

分担責任者 笹尾真実子 (東北大学 工学研究科)  
参加研究者 北島澄男、高橋 誠 (東北大学 工学研究科)  
西浦正樹、磯部光孝 (核融合科学研究所)

## 2. 研究目的・研究目標

核融合研究所のLHD実験に共同研究として参加しているが、実際に実験に参加できる人数や回数、延べ日数には限度がある。そこで、スーパーSINETを利用して東北大学からデータ取得ができるようにすると同時に、計測系のスリット駆動、監視等の遠隔実験が可能になるように整備し、より積極的にLHD実験に参加する。

## 3. 研究内容

半導体検出器(ダイヤモンド検出器)を用いた、LHD装置中の高エネルギーイオンの挙動解析が研究課題である。高速中性粒子が作るパルス信号の波高分析を行うことにより、プラズマ中に存在する高速イオンのエネルギー分布の情報を得る(図11)。検出器に到達する単位時間当たりの高速中性粒子数が計測システムの許容計数率を越えると、時間的に隣り合うパルス同士が重なり合う所謂パイルアップにより、正しい計測が出来なくなる。本共同研究では、可動スリットを東北大から遠隔操作することにより、計測システムが許容する計数率以下となるよう中性粒子束を制御する。

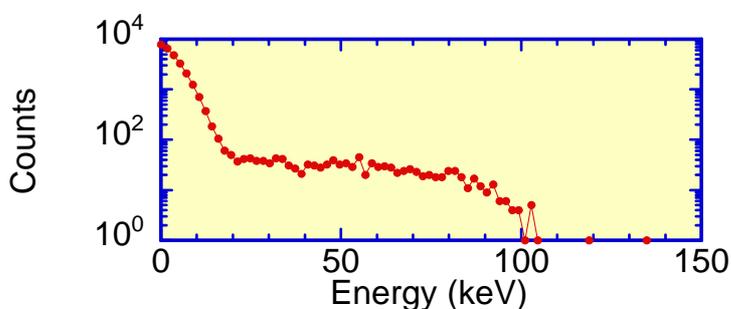


図11 高エネルギーイオンのエネルギー分布例

## 4. 本年度の成果

本年度は、スーパーSINETを利用した中性粒子束制御スリットの遠隔操作システムを確立し、LHDデータベース計算機への高速アクセスも実現した。来年度から本システムをLHD実験へ本格適用し、遠隔実験に参加する。

尚、スーパーSINETによる遠隔実験システムの完成によって、研究室の学生に核融合プラズマ研究の現場を直接体験させることが出来るようになり、非常に実験への参加意欲を促す結果になった点は特筆しておきたい。

# レーザーを用いた散乱測定による乱流密度揺動計測

## 1. 参加研究者構成

分担責任者 高飯尾俊 (東京工業大学)  
参加研究者 筒井広明 (東京工業大学)  
秋山毅彦、田中謙治、川端一男 (核融合科学研究所)

## 2. 研究目的・研究目標

CO<sub>2</sub> レーザー干渉計を用いLHD で測定したプラズマの電子密度揺動、及び電子密度分布データをスーパーSINET を利用してリアルタイムで東京工業大学飯尾研究室に転送し、詳細密度分布の再構成、遠隔地からの迅速な揺動信号の解析を目標とする。また、それらとプラズマの閉じ込め特性の相関をさぐる。

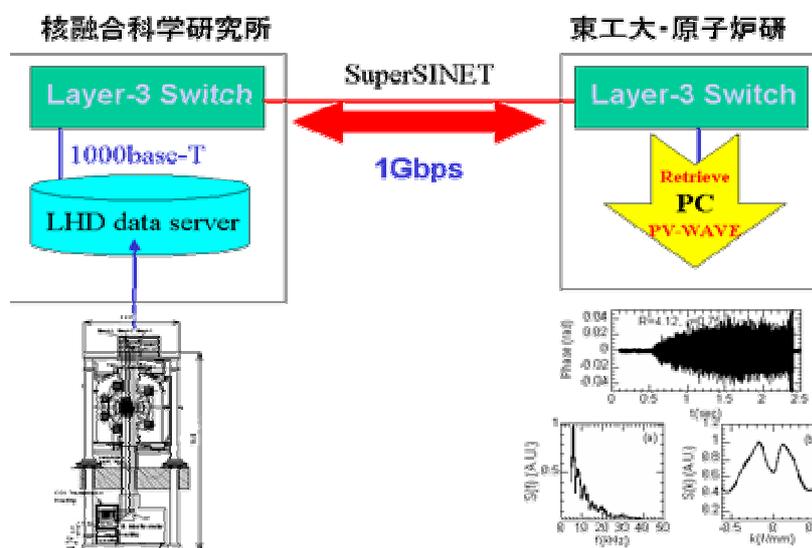


図 1 2 CO<sub>2</sub> レーザー干渉計システム概念図および取得データ例

## 3. 本年度の成果

本年度は、図 1 2 の概念図に示すような計測システムおよびデータ転送システムの構築をほぼ完成した。来年度からは、LHD で取得したデータをリアルタイムで東京工業大学側へ転送し、ルーチン的な遠隔実験を行うことが可能になった。LHD 実験ネットワークについては基本的に東京工業大学側の端末で核融合研究所内と同様の操作ができ、データ解析の他にテレビ会議の接続も出来るようになった。

一方、CO<sub>2</sub> レーザー干渉計システムの整備を続け、プラズマ全領域でのヘテロダイン干渉計を用いた密度分布計測、および 2 次元位相コントラスト干渉計を用いた密度揺動の局所計測に着手し、それぞれ初期的なデータの取得に成功した。1 ショットあたり密度分布計測は 25MB、密度揺動計測は 8.25MB のデータを取得した。密度分布計測の内訳は CO<sub>2</sub> レーザー干渉計 24ch(1MB/1ch)、振動補正用 YAG レーザー干渉計 8ch(128kB/ch)、密度揺動計測の内訳は長時間取得用 6ch(512kB/ch)、短時間取得 42ch(128kB/ch)である。

現在のところデータ取得は 3 分周期で間に合っているが、今後、揺動データは高周波成

分の取得のためサンプリングタイムを現在の1秒から0.5秒に変更する予定である。その場合、1ショットあたりのデータ量が増加するためメモリを増強する必要がある。場合によっては、選択してデータを転送するなどの対応策が必要になる可能性がある。

## 高速カメラを使ったプラズマ計測

### 1. 参加研究者構成

分担責任者 西野信博 (広島大学工学研究科)  
参加研究者 近藤克己、水内 亨 (京大エネルギー理工学研究所)  
森本茂行 (金沢工大)  
凶子秀樹 (九大応用力学研究所)  
政宗貞夫 (京都工繊大)  
永田正義 (姫路工大)  
森崎友宏、須藤 滋、坂本隆一、庄司 主、宮澤順一  
(核融合科学研究所)

### 2. 研究経緯・研究目的

高速カメラを用いた2次元分光のプラズマ計測によりプラズマ周辺部の乱流構造に関する情報、ペレット溶発やガスパフ等に関する情報を得る事が可能である。数年前から核融合科学研究所の大型ヘリカル実験装置 LHD において高速カメラを使ったプラズマ計測共同研究を行っている。高速カメラは、データ量が極めて大きく(1ショットあたり512MB)、かつ、LHDは3分間に1ショットの放電を行うため、1日当たりのデータ量も極めて大きくなる。従って、従来の LAN 環境下においては、遠隔実験参加が不可能であったが、スーパーSINET を用いることにより、ノイズが少なく、精度の高い高速画像転送が実現でき、高速撮影の唯一の欠点である多量データの転送(移動)・保存・保守などの問題が解決できる。

本研究の目的は、スーパーSINET を用いて広島大学の研究室と核融合研究所を直接つなぐ事により、LHD における高速カメラを用いた遠隔計測実験を実現することである。

さらに、スーパーSINET に接続している他大学の研究者に対しても、高速カメラによる生画像や解析結果の精細なデータを高速で配布し、LHD 遠隔実験研究の充実を図る。

### 3. 本年度の成果

本年度は当該研究の初年度であることと、スーパーSINETの接続時期と、第7サイクル LHD 実験と日程(平成15年9月~平成16年1月)が合わなくて、実験に遠隔参加する事ができなかったが、通信試験では、核融合科学研究所内のスイッチからカメラコントローラー、および、広島大学内のデータ収集装置からカメラ制御装置間の接続に満足できるスピードを得ることが出来た。また、カメラの遠隔操作にあわせて遠隔で焦点、絞り、ズームの動作が遠隔制御可能なレンズを開発し、プラズマパラメータにあわせて撮影が可能になった。本レンズは実験中に撮影条件を変更できる点で重要である。また本装置の特徴は、磁場中で使用するため、非磁性の超音波モーターを動力に用いている点である。

図13は本年度完成した超音波モーターつきレンズである。また、そのレンズを用いて明るさを調整したプラズマ画像の撮影例を図14に示す。



図 1 3 超音波モーターを利用した強磁場中で動作可能なレンズ

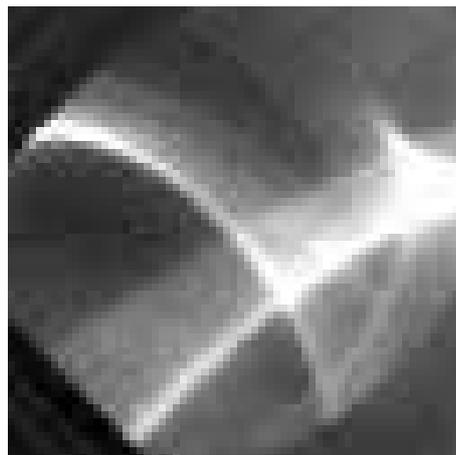


図 1 4 接線ポートから見たLHDプラズマの挙動、40500 駒/秒、64x64 画素、(動画ではないが、X-point 付近から線状の filament がよく見える。明るさを調整後の撮影例)

#### 4 . 今後の計画・課題

現状では高速カメラとコントローラーが LHD 本体室にあり、制御用パソコンが計測機器室にある。単独のパソコンで制御・データ収集を行っているスタンドアロン形式であるので、今後は画像データを LHD の共通データとして利用できる状態にする。スーパー SIN ET が稼動し始めたので、カメラ制御用のパソコンをソフトで遠隔制御し、NIFS-広大間でカメラデータを収集できるようにして、LHD 遠隔実験を実現する。また、ギガビット LAN の特性を生かし高速画像を配信できるようなサーバー環境を広島大学内に構築したい。図 1 5 にシステム全体の計画概要を示す。

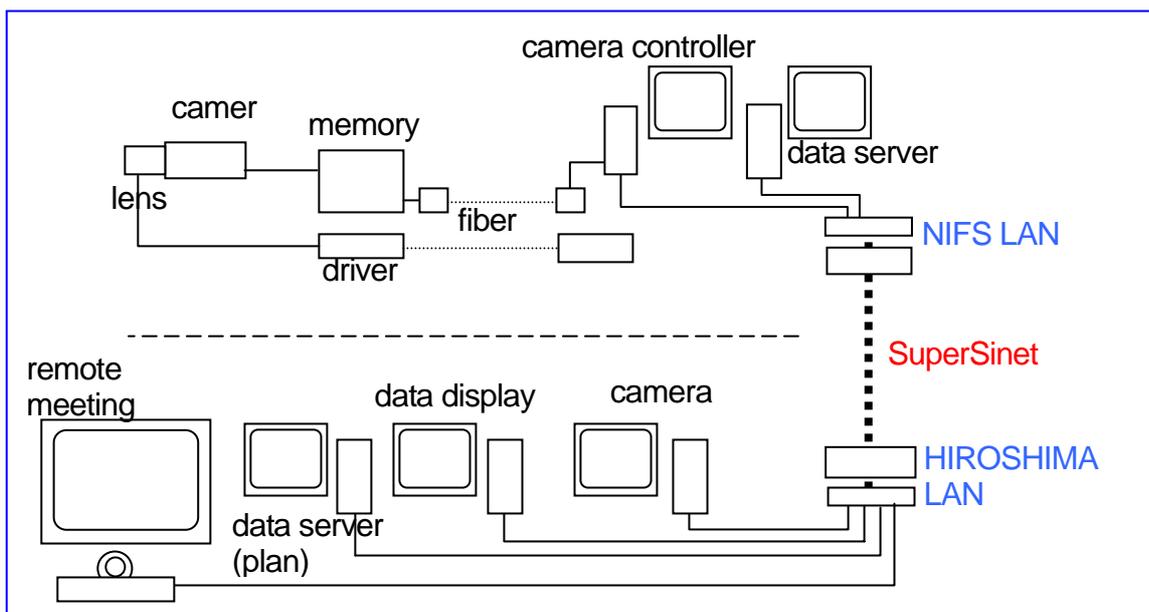


図 1 5 スーパー Sinet (NIFS-広島大学) のシステム全体の概要

H16 年度以降は、本格的な LHD 実験遠隔参加が可能となり、カメラの制御、データ収集、データ転送、保存・保守などをスーパーSINET で行う予定である。また、H16 年度に新規に申請する「ガスパファイメージング実験」(仮題)で LHD 実験遠隔参加を継続して行う予定である。

最後に、現在のカメラの性能は、1 回の計測あたり 512MB であるが、カメラからパソコンへの収集時間(ローカルな転送時間)が 15 分以上かかるため、スーパーSINET の通信で時間制限される事はない。将来のカメラにおいてもローカルな転送時間が 1GB / 分程度となるが 1Gbps = 1GB / 8 秒であるから、理論性能上では特に問題なさそうである。但し、広大のノード構成から考えて、理論性能が出るとは考えにくく、将来のカメラの性能向上とともに、スーパーSINET の向上が望まれる。

## スーパーSINET 共同研究に関連するデータ処理システム

### 1. 参加研究者構成

分担責任者 中西秀哉 (核融合科学研究所)

平成 15 年度の大型ヘリカル装置(LHD)第 7 サイクル実験では、長時間プラズマ保持(定常化)実験の本格化に伴い、以下のような新たな成果が得られた。

### 2. 定常データ収集・保存系の稼働開始

従来の核融合プラズマ実験は、ショットと呼ばれる 10 秒以下の短パルス・プラズマ放電がほとんどであり、計測データ収集系も CAMAC 規格等の放電後一括処理を行うデジタイザの利用が主流であった。LHD では新たに、定常動作可能なデジタイザの応用を果たし、横河電機製 WE7000 シリーズ(～1.6MB/s)や、CompactPCI 規格の NI 製 PXI シリーズ(～80MB/s)などを用いて、定常収集系の運転を開始した。

### 3. 収集データ量の急伸

約 1,000 秒の LHD 長時間プラズマ実験で、上記 2 の定常データ収集・保存系を稼働させ、一実験あたりの収集データ量として核融合実験の分野で世界第一位となる 3.16GB のデータ収集を達成した。

また従来と同じ短パルス実験では、1 実験あたり 1GB 強のデータ収集を 3 分間隔で繰返し、1 日あたり 170 回程度収集運転を行なっている。計測データは収集直後に全て圧縮処理されるため、参照等でネットワーク上を流れたり、ストレージに保管されるサイズは、生データの数分の一になっている。それでも、4.7GB DVD-R 換算で毎日約 7 枚、新データが増え続けており、増加の傾向は治まらない。

### 4. 遠隔ストレージ構築計画

LHD のある岐阜県土岐市は、東南海・南海地震の災害強化指定地域に位置し、東海地震の同地域にも隣接している。そのため、データ量の増加とも相まって、ギガビット級ネットワークを利用した、遠隔ストレージ構築による実験データ保全を具体的に検討し始めて

いる。その候補として、共同研究先やスーパーSINET ノードである国立天文台、あるいは地域の岐阜情報スーパーハイウェイとスーパーSINET との併用案などを検討中である。今後、DataGrid などへの展開も視野に入れている。

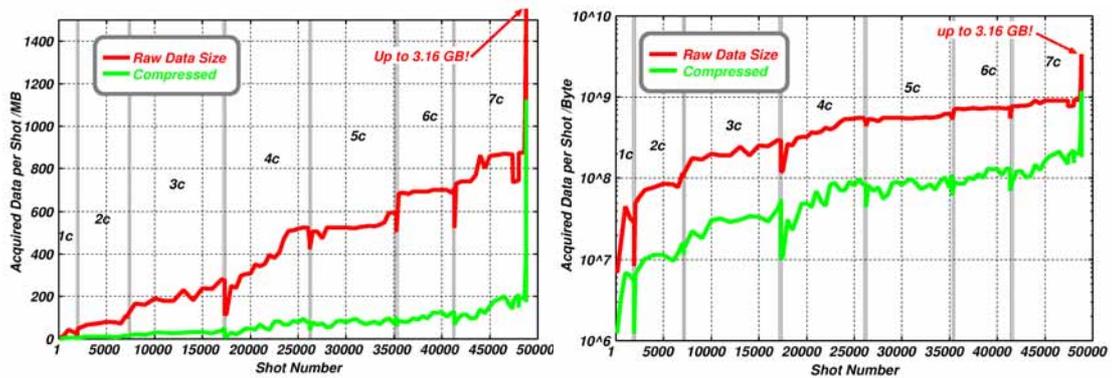


図 16 LHD 実験一回あたりの計測データ収集量の変遷：  
 (右)は(左)を片対数表示にしたもの．横軸は実験番号．  
**赤線**はデジタイザより収集された生データ量，  
**緑線**は圧縮処理されデータ・ストレージ装置に保管されるサイズ．  
 1c～7c は年度毎の実験期間(サイクル)を示す．

## (2) 超伝導実験遠隔制御システム (平成13年度~)

代表責任者 : 小川雄一 (東京大学高温プラズマ研究センター)

目的 : 東京大学高温プラズマ研究センターの超伝導コイルを用いたプラズマ実験装置の遠隔制御システムの開発

### 超伝導実験遠隔制御システム開発

#### 1. 参加研究者構成

分担責任者 小川雄一 (東京大学高温プラズマ研究センター)  
参加研究者 森川惇二、大國浩太郎 (東京大学高温プラズマ研究センター)  
三戸利行、柳 長門、田村 仁 (核融合科学研究所)

#### 2. スーパーSINET との接続構成

東京大学高温プラズマ研究センターと核融合科学研究所の間では、東京大学の情報基盤研究センターと核融合科学研究所の低温実験棟がそれぞれの窓口となってスーパーSINET回線が接続されている。実質的な運用形態としては、低温実験棟の実験用ネットワークが東京大学まで延長されているイメージとなっており、データの共有等に関して、セキュリティ上の問題が発生しないことが特長である。

#### 3. 研究概要

東京大学高温プラズマ研究センターでは、内部導体プラズマ閉じ込め装置 Mini-RT が建設され、新しい緩和過程を利用した非中性超高ベータプラズマの閉じ込め実験を開始している。この装置では高温超伝導線材で巻線された直径 300 mm のリング状コイルが用いられ、この超伝導コイルが直径 1 m の真空容器内で真空容器外側上部に設置された銅製の吊り上げコイルにより空中に磁気浮上する。高温超伝導コイルの核融合プラズマ実験装置への適用は世界で初めての試みであるとともに、磁気浮上させる高温超伝導コイルも世界で初めてのものである。このため、このコイルの開発にあたっては、当初より核融合科学研究所の低温・超伝導グループと九州大学超伝導研究センターとの共同研究として開始し、コイルの設計から始め、装置完成後の冷却・励磁試験、およびプラズマ実験についても緊密な協力関係のもとで遂行してきている。遠隔地間の共同研究をスムーズに進めるうえで、高速のネットワークを用いた情報の共有は非常に有益であり、スーパーSINET が設置されて以降、共同研究のアクティビティがさらに高まっている。

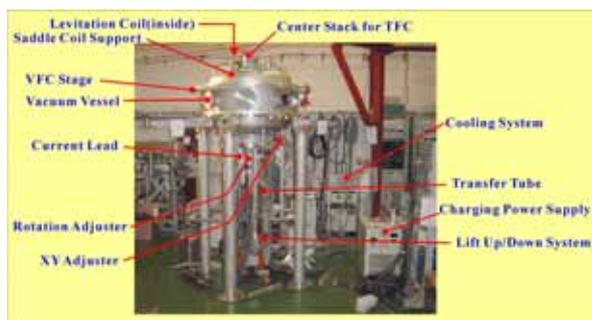


図 17 Mini-RT 装置の外観

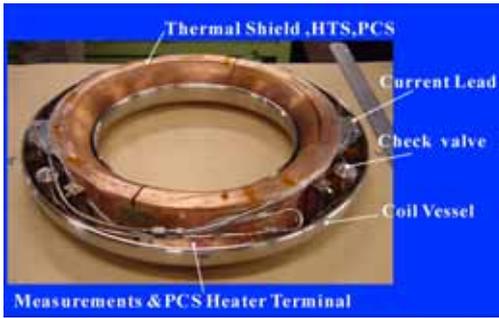


図 18 Mini-RT 装置の高温超伝導コイル



図 19 Mini-RT 装置の真空容器の内部

## 4 . 研究詳細

### 4 . 1 超伝導コイルの冷却・励磁試験における遠隔実験参加

高温超伝導コイルの冷却・励磁試験は、東京大学高温プラズマ研究センターの実験室に設置された Mini-RT 装置本体で行っている。このため、核融合科学研究所から実験に参加する共同研究者が短期あるいは長期で出張し、直接実験に参加している。ただし、諸般の事情により、毎回の実験において共同研究者全員が参加することは極めて難しい。そこでデータ（具体的には、超伝導コイルおよび冷却システムの各部の温度、電圧、電流、磁場など）を収集しているパソコンをスーパーSINET に接続し、核融合科学研究所の低温実験棟内に設置したパソコンに転送することによって、核融合科学研究所においてリアルタイムで参照することが可能となった。このため、核融合科学研究所側の低温工学・応用超伝導工学を専門とする研究者の判断や的確な指示が必要に応じて受けられるようになり、これらの研究者が現場で実験に参加しなくても、必要な機器の運転や実験を遂行することが可能となった。また、取得されたデータについては、核融合科学研究所側においてすぐに解析を行うことが可能となり、超伝導コイルの運転の最適化を短時間で行えるようになった。また、実際にこのおかげで試験開始当初に遭遇した数多くの技術的困難をすべて克服していくことに成功した。

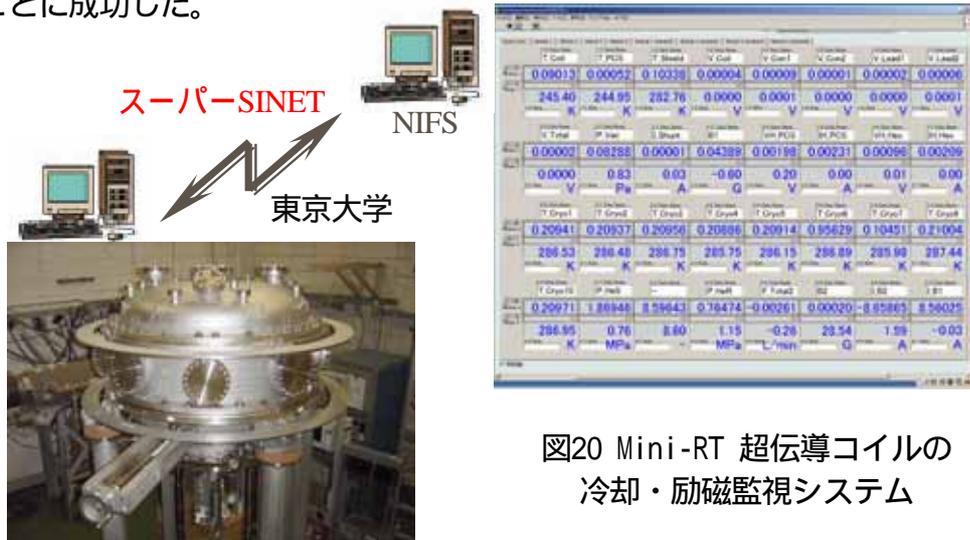


図20 Mini-RT 超伝導コイルの冷却・励磁監視システム

東京大学高温プラズマ研究センター磁気浮上内部導体装置Mini-RTの高温超伝導コイル各部の温度や電流値などの情報を核融合科学研究所のクライアントPCにおいて参照し、実験遂行のために必要な情報をリアルタイムで読み取ることができる。

## 5．遠隔操作／制御システムの公開

以上のような遠隔操作／制御システムはスーパーSINET の高速情報通信により可能となった。この最新技術に高校生などの若い世代の人たちが接することは、科学技術立国を目指す日本にとって非常に有益である。東京大学高温プラズマ研究センターでは、プラズマ・核融合学会の活動の一環として、高校生を対象とした科学教育プログラムに参加し、スーパーSINET を利用したテレビ会議室システムの利用と共に、上述の最新技術を用いた遠隔操作／制御システムを高校生に実際に操作してもらい、科学技術への興味喚起に活用した。

プラズマ・核融合学会の活動の一環として高校生を対象とした科学教育プログラムを導入。今年度4校の生徒が最新の技術を用いた遠隔操作／制御システムに参加した。

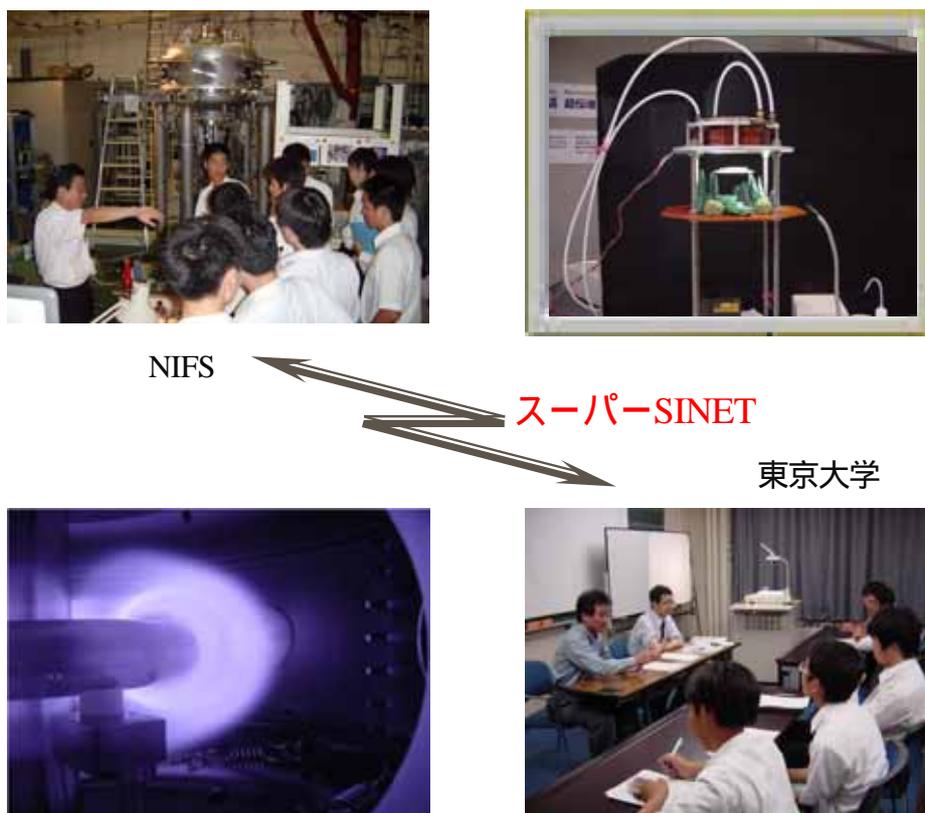


図2 2 サイエンス・パートナーシップ・プログラム (SPP)

## 6．次期中型磁気浮上プラズマ閉込め装置設計・製作の為の活用 (テレビ会議)

Mini-RT の後継機として、より大型の磁気浮上プラズマ閉じ込め装置 "S-RT" (図 2 3 参照) の製作を計画しており、現在、その設計活動を開始している。このために、現在は研究者が直接会って議論を行う通常の打ち合わせや電子メールによる意見交換等が主な活動となっているが、今後、スーパーSINET の高速通信を利用したビデオ会議システムの導入によって、打ち合わせの簡便化と活性化を図っていくことは非常に大きなメリットがあると考えている。

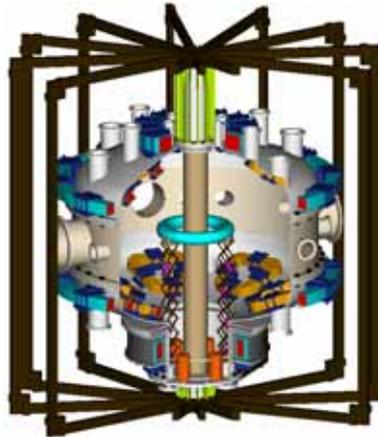


図 2 3 次期超伝導磁気浮上方式プラズマ閉じ込め装置 "S-RT"

## 7. 今後の計画

このプロジェクトとしては、次期中型装置の建設計画も控えているため、今後もより積極的な研究協力体制を必要としている。この観点から、今後ますますスーパーSINET の活用を図りたいと考えている。また、東京大学高温プラズマ研究センターは、柏キャンパスに移転する予定となっているが、新しい建物においても引き続きスーパーSINET の利用ができる環境を早急に整備することによって、これまでと同様の共同研究体制を維持していくことが可能になると期待している。

### (3) 大規模プラズマシミュレーション研究 (平成 16 年度以降)

代表責任者 : 未定

目的 : 核融合科学研究所のスーパーコンピュータをスーパーSINET 経由で遠隔利用し、大規模シミュレーション研究遂行

当該研究プロジェクトは平成 16 年度以降に開始される予定

#### 1. 研究課題

- レーザーの伝播特性解明
- 高エネルギー粒子の生成機構の解明
- 高エネルギー電子流のエネルギー輸送解明

爆縮高密度燃焼の加熱法開発  
 核融合点火・燃焼の仮想実験  
 (要素物理：超高強度レーザーと物質との相対論的な相互作用)

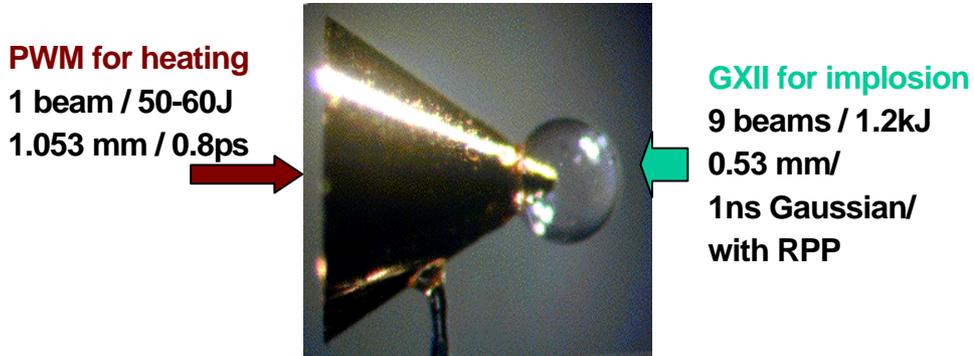


図 24 コーン付き燃料ターゲット

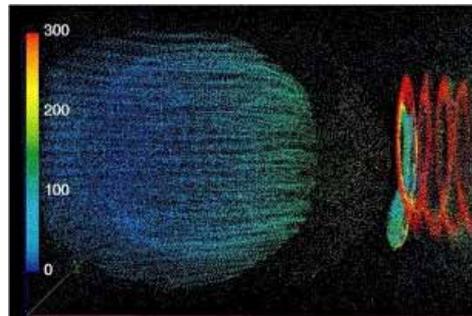
2. 研究計画

核融合科学研究所のスーパーコンピュータをスーパーSINET 経由で遠隔利用し、高速点火レーザー核融合の大規模シミュレーションを遂行する。

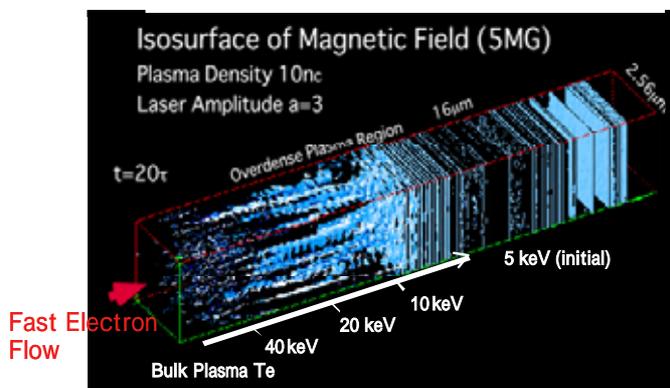
3. 期待される成果 (図 25 : シミュレーション例)



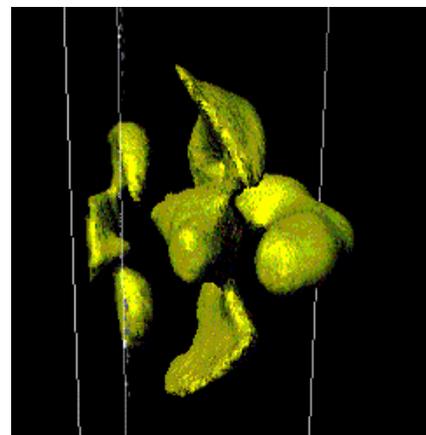
レーザー伝播、高エネルギー粒子生成



GeV陽子の生成の様子



相対論的電子流のフィラメント化と結合



相対論的レーザー伝播

## まとめ

(1) 核融合研究班の「LHD 遠隔実験」研究プロジェクトに関して、平成 14 年度に、名古屋大学、京都大学、及び九州大学の三つの研究機関の研究室がスーパーSINET 接続され、核融合科学研究所に設置された L H D 装置の実験データを、研究室から直接、実時間で収集・解析することが可能となった。それぞれの遠隔計測システムは第 6 サイクル L H D 実験（平成 14 年 10 月～平成 15 年 2 月）に適用され、有効性が実証されると共に、これらの研究室の研究者の **L H D 遠隔実験参画が実現した**。

平成 15 年度も引き続きそれぞれの遠隔計測システムを利用して、第 7 サイクル L H D 実験（平成 15 年 9 月～平成 16 年 1 月）に遠隔参画し、研究成果を得ることが出来た。

更に、今年度は、東北大学、東工大、広島大の三つの研究機関の研究室がスーパーSINET 接続され、L H D 装置の実験データを、各研究室から直接、実時間で収集・解析することが可能となり、平成 16 年度の第 8 サイクル L H D 実験に本格的に適用される。

更に、平成 16 年度は、遠隔参画を希望している東大の二つ研究室及び原研をスーパーSINET に追加接続する計画である。

(2) 「超伝導実験遠隔制御システム」研究プロジェクトに関しては、平成 13 年度において核融合科学研究所・低温実験棟の実験ネットワークにスーパーSINET 接続された、東京大学高温プラズマ研究センターの超伝導コイルを用いたプラズマ装置実験に対して、超伝導実験遠隔制御システムが稼働を開始し、核融合科学研究所側の研究者の遠隔実験参加が実現した。

平成 14 年度及び平成 15 年度は引き続き、核融合科学研究所・低温実験棟の実験ネットワークと東京大学高温プラズマ研究センターをスーパーSINET 接続し、超伝導コイルを用いたプラズマ装置に対して、双方向的な遠隔共同実験を進め、研究成果を挙げた。

スーパーSINET を使った、この**双方向型共同実験は、大学法人化後の共同研究の新しい展開として注目されている**

(3) スーパーSINET を利用して、大学共同利用機関に設置された大型核融合装置実験に、大学の研究室から直接参画が出来ることの波及効果は大きい。特に、指導教官から**大学院学生に対する教育効果**を指摘する声が出ている。当該分野の研究を志望する若い研究者の増加に繋がることも期待できる。

今後、当該分野で研究活動し、遠隔参画を希望している他の大学の研究室に対して、計画的に同様の展開を計って行く必要がある。

(4) 核融合研究班のもう一つの研究プロジェクトである、核融合科学研究所のスーパー・コンピュータを使用する「**大規模プラズマシミュレーション研究**」は、大阪大学レーザー核融合研究センター及び広島大学から 2 件の研究計画が提案されているが、スーパーコンピュータとネットワークとの接続環境の不調整により、平成 15 年度中の実現は困難な見込みであるが、次年度には進展を図る予定。

#### 4.2 小型の磁気浮上試験装置を用いたデジタル浮上制御開発

高温超伝導コイルを安定に磁気浮上させる制御技術を開発することも重要な課題である。特に、実際に高温超伝導コイルを用いて浮上制御を行うことが重要であり、このために小型（直径 77 mm）の高温超伝導コイルを有した磁気浮上試験装置が核融合科学研究所の低温実験棟に設置されている。本実験を遂行するために、従来は東京大学側から研究者が出張し、核融合科学研究所において短期・長期にわたって滞在してきた。この実験装置において磁気浮上のデジタル制御を行っているパソコンについてもスーパーSINET に接続することにより、ビデオカメラによる画像転送を行い磁気浮上の様子を直接的に観測することが可能となるとともに、浮上位置のリアルタイム変更や制御パラメータの逐次変更等を行い、さまざまな条件に対して最適な磁気浮上制御を試みることも可能となった。



図 2 1 小型の磁気浮上制御技術開発システム  
(左：超小型高温超伝導磁気浮上コイルを用いた浮上制御実験、  
右：永久磁石を用いた浮上制御実験)

この制御には、グラフィック計測制御ソフトウェア LabVIEW を用いているが、これは、2002 年度の LabVIEW アプリケーション・コンテストにおいて優秀賞を獲得している。