

高エネルギー・核融合科学研究部会

核融合研究班

平成16年度

スーパーSINET利用研究成果報告

班長 堀内利得 (核融合科学研究所)

【はじめに】

スーパーSINETの高速性・双方向性を活用する次の3つのプロジェクトを進めている。

- 1) LHD 実験遠隔参加
- 2) 超伝導実験遠隔制御
- 3) 大規模プラズマシミュレーション研究

図1に接続概念を、図2に研究プロジェクト概念を示す。

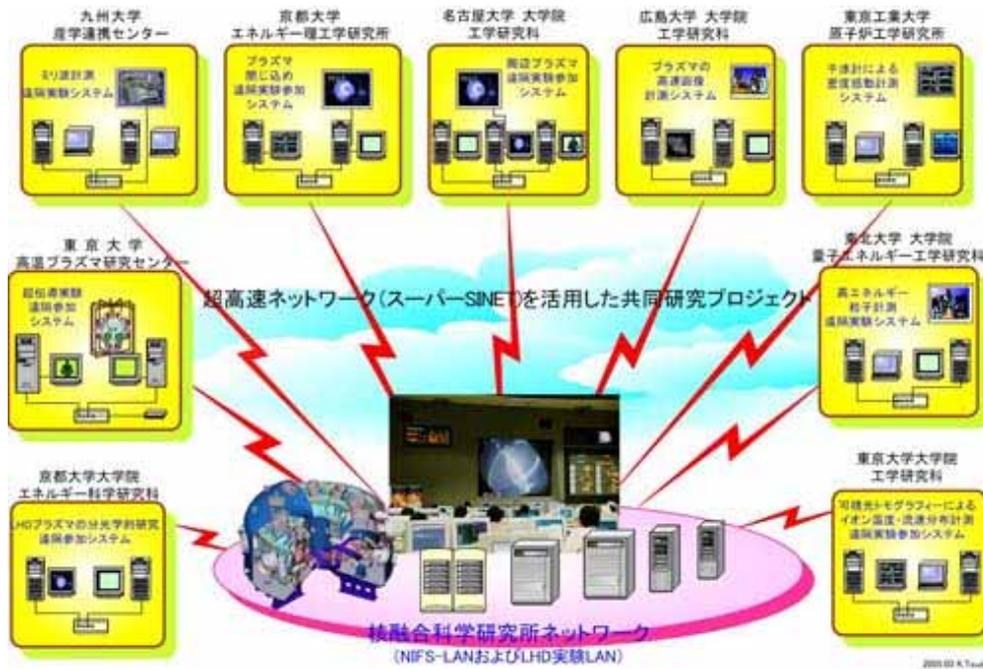


図1 核融合研究班・スーパーSINET 接続概念図



図2 核融合研究班・研究プロジェクト概念図

【研究目的】

【1】LHD 実験遠隔参加(平成 14 年度～)プロジェクト

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)実験データのリアルタイム伝送および計測機器の遠隔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(平成 13 年度～)プロジェクト

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 17 年度以降)プロジェクト

核融合科学研究所の大型シミュレーション研究用解析装置をスーパーSINET 経由で遠隔利用し、大規模シミュレーション研究の遂行

【構成員】

堀内 利得	核融合科学研究所
小川 雄一	東大高温プラズマ研究センター
森川 惇二	東大高温プラズマ研究センター
高村 秀一	名古屋大学大学院工学研究科
大野 哲靖	名古屋大学エコトピア科学研究機構
佐野 史道	京都大学エネルギー理工学研究所
岡田 浩之	京都大学エネルギー理工学研究所
飯尾 俊二	東京工業大学原子炉工学研究所
筒井 広明	東京工業大学原子炉工学研究所
間瀬 淳	九州大学産学連携センター
近木 祐一郎	九州大学産学連携センター
笹尾 眞實子	東北大学大学院量子エネルギー工学研究科
北島 澄男	東北大学大学院量子エネルギー工学研究科
西野 信博	広島大学大学院工学研究科
藤本 孝	京都大学大学院工学研究科
岩前 敦	京都大学大学院工学研究科
有本 元	京都大学大学院工学研究科
小野 靖	東京大学大学院工学研究科
西原 功修	大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
福田 優子	大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
小森 彰夫	核融合科学研究所
須藤 滋	核融合科学研究所
長山 好夫	核融合科学研究所
津田 健三	核融合科学研究所
江本 雅彦	核融合科学研究所
中西 秀哉	核融合科学研究所

駒田 誠司	核融合科学研究所
三戸 利行	核融合科学研究所
田村 仁	核融合科学研究所
柳 長門	核融合科学研究所
増崎 貴	核融合科学研究所
渡邊 清政	核融合科学研究所
川端 一男	核融合科学研究所
田中 謙治	核融合科学研究所
森崎 友宏	核融合科学研究所
西浦 正樹	核融合科学研究所
磯部 光孝	核融合科学研究所
後藤 基志	核融合科学研究所
成嶋 吉朗	核融合科学研究所

【研究プロジェクト】

研究プロジェクト一覧を表1に示す。

	課 題 名	機 関 名	共同研究者	共同研究者
1	LHD 周辺プラズマ揺動計測	名古屋大学大学院 工学研究科	高村 秀一 大野 哲靖	増崎 貴
2	LHD プラズマの閉じ込め特性	京都大学 エネルギー理工学研究所	佐野 史道 岡田 浩之 有本 元	渡辺 清政
3	ミリ波イメージング装置による揺動計測	九州大学 産学連携センター	間瀬 淳 近木 祐一郎	川端 一男 長山 好夫
4	LHD 高エネルギー粒子計測	東北大学大学院 量子エネルギー工学研究科	笹尾 真実子 北島 純男	磯部 光孝 西浦 正樹
5	干渉計による密度揺動計測	東京工業大学 原子炉工学研究所	飯尾 俊二 筒井 広明	田中 謙治
6	LHD プラズマの高速画像計測	広島大学大学院工学研究科	西野 信博	森崎 友宏
7	可視光トモグラフィーによる 2次元イオン温度・流速分布計測	東京大学大学院 工学研究科	小野 靖	成嶋 吉朗
8	LHD 周辺プラズマにおける 水素原子・分子輸送機構の解明	京都大学大学院 エネルギー科学研究科	藤本 孝 岩前 敦	後藤 基志
9	(超伝導実験遠隔制御システム) LHD 磁場制御コイルなど高温超伝導コイ ルの定常プラズマ閉じ込め装置への応用	東京大学 高温プラズマ研究センター	小川 雄一 森川 惇二	三戸 利行 田村 仁 柳 長門

表1 核融合研究班の研究プロジェクト一覧

【1】LHD実験遠隔参加(平成14年度～)

構成員

代表責任者 小森彰夫 核融合科学研究所

研究目的と研究課題

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)実験データのリアルタイム伝送および計測機器の遠隔制御による大学研究者の遠隔実験参画

1. LHD 周辺プラズマ揺動計測
2. LHD プラズマの閉じ込め特性
3. ミリ波イメージング装置による揺動計測
4. LHD 高エネルギー粒子計測
5. 干渉計による密度揺動計測
6. LHD プラズマの高速画像計測
7. 可視光トモグラフィーを用いたヘリカル系プラズマの2次元イオン密度・流速分布計測
8. LHD 周辺プラズマにおける水素原子・分子輸送機構の解明

1. LHD周辺プラズマ揺動計測

構成員

分担責任者	高村秀一	名古屋大学大学院工学研究科
参加研究者	大野哲靖	名古屋大学エコトピア科学研究機構
	三好秀暁	名古屋大学大学院工学研究科
	上杉喜彦	名古屋大学大学院工学研究科
	辻 義之	名古屋大学大学院工学研究科
	高木 誠	名古屋大学大学院工学研究科
	V.BUDAEV	クルチャトフ研究所
	増崎 貴	核融合科学研究所

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1-1参照)

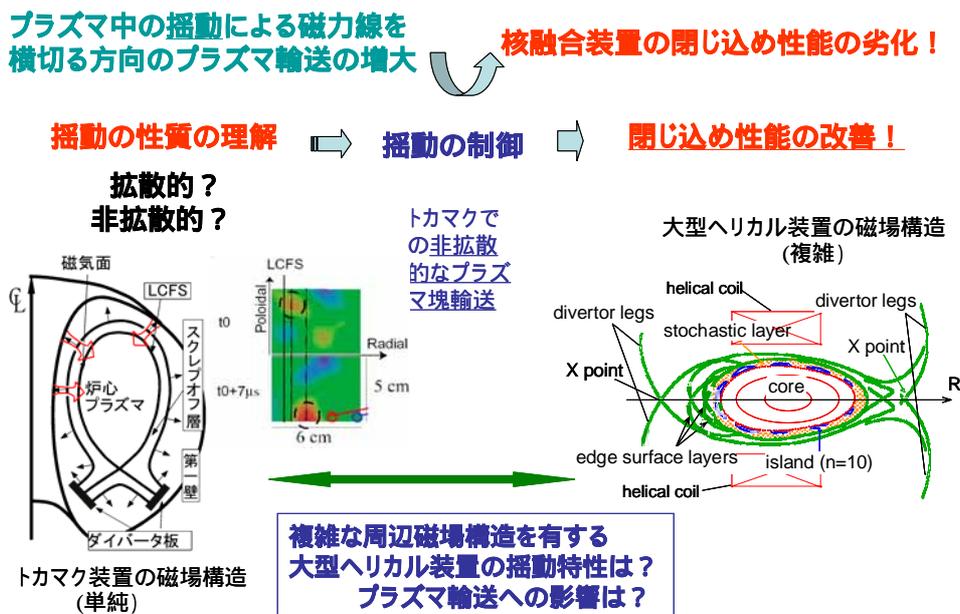


図1-1 周辺プラズマ領域の揺動による粒子・熱輸送

遠隔計測システムと解析例

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(図 1-2)。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)第 7 サイクル(平成 15 年 9 月～平成 16 年 1 月)、第 8 サイクル(平成 16 年 9 月～平成 17 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。

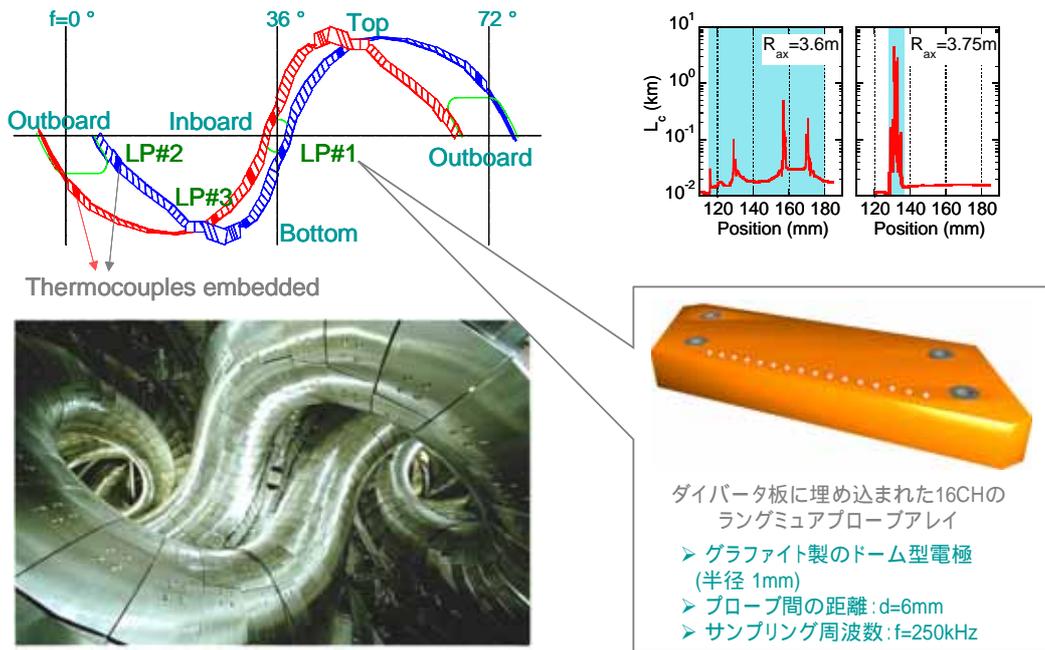


図 1-2 LHD の計測系

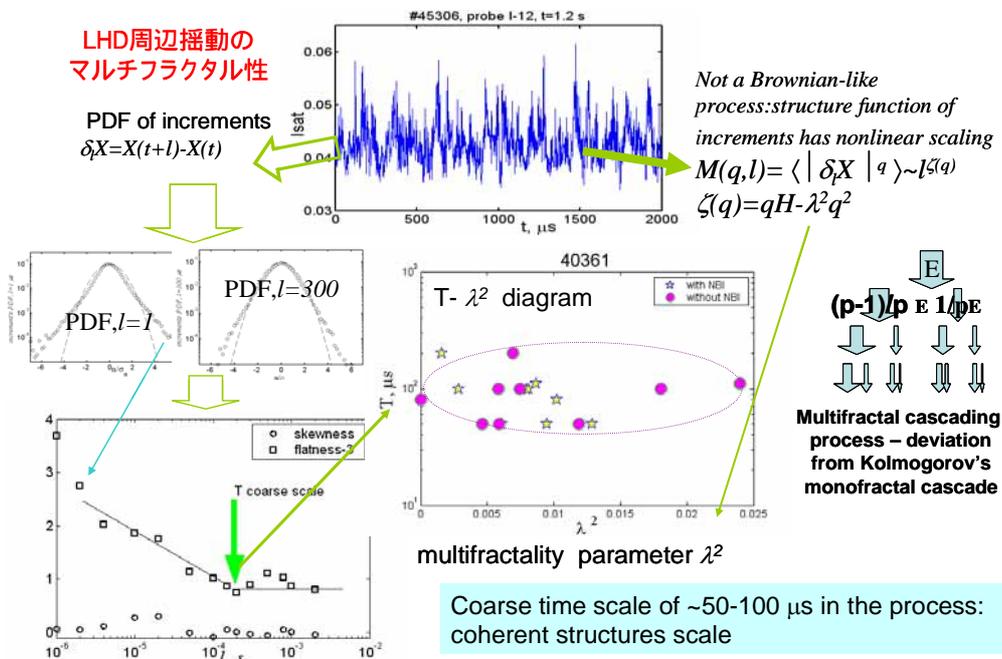
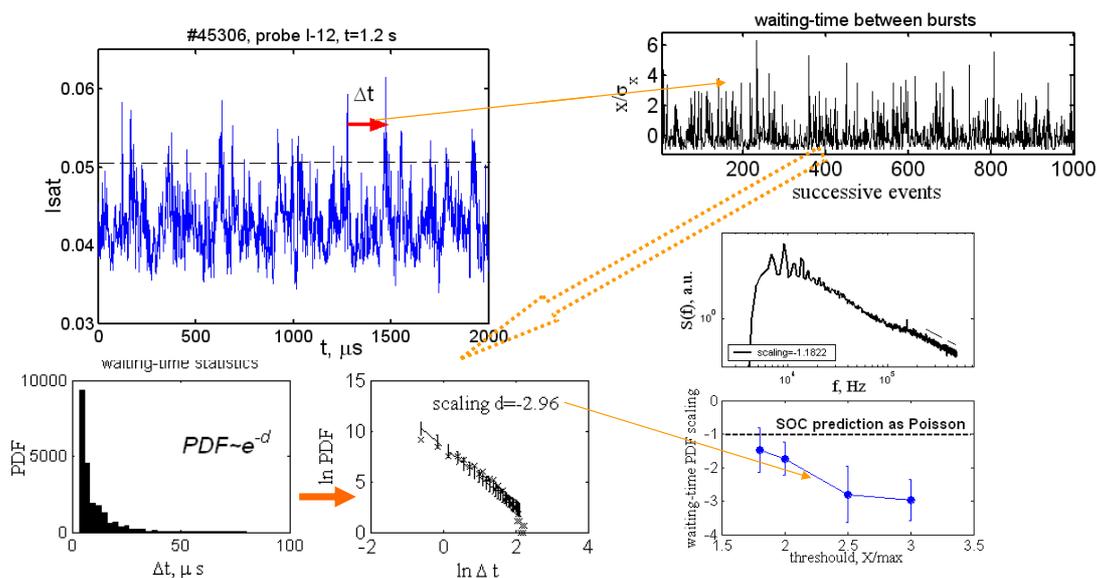


図1-3 LHD周辺揺動のマルチフラクタル性

Bursts waiting-time statistics: examination of SOC



Waiting-time is not a Poisson process.
Hierarchy of scales and parabolic scaling of moments:
evidence of multifractal time in the bursty process (LHD).
No clear signature of SOC paradigm (scaling of PDF waiting time statistics $\neq -1$)

図1-4 Bursts waiting-time statistics

まとめと今後の課題

- LHDの周辺部において測定されたイオン飽和電流に見られる揺動特性を統計的な観点から調べた。
- 2種類の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ることが分かった。
- 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。
- 磁気軸 $R_{ax}=3.75\text{m}$ の解析結果から、揺動の特性は磁力線の結合長と何らかの関係があることが考えられる。
- 磁気軸 $R_{ax}=3.6\text{m}$ の同様の結果からは、磁力線の結合長に対する依存性は見られなかった。このことから、磁力線に関して、単純な長さだけではなく、磁力線の途中経路等を併せて考える必要があると考えられる。

2. LHDプラズマの閉じ込め特性

構成員

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
	有本元	京都大学大学院エネルギー科学研究科
	渡邊清政	核融合科学研究所

はじめに

核融合炉心プラズマを実現には高温・高密度のプラズマを一定の時間以上閉じ込め、さらにプラズマを発電に供するため長時間維持することが必要である。エネルギー閉じ込め時間を改善することは勿論不可欠だが、プラズマの長時間維持のためには、これに加えてプラズマ内の水素粒子及びヘリウムを含む不純物粒子の挙動を理解し、それを基に粒子制御を行い、不純物およびヘリウム灰を効果的に除去し燃焼効率化を上げることが重要である。ヘリカルプラズマの閉じ込めを理解するために、粒子及びエネルギー閉じ込めに対する京都大学エネルギー理工学研究所ヘリオトロンJ装置での実験研究の基盤を踏まえ、遠隔実験を含めてLHDプラズマ実験に参加し閉じ込め特性の研究を行う。

研究目的

プラズマ中の粒子閉じ込めを評価するためには、プラズマの温度、密度などの基礎的パラメータの他に中性粒子密度、不純物密度等が必要である。中性粒子密度はプラズマ温度、密度及び放電管外部からの補給粒子及びプラズマ放電管壁およびダイバータでの水素リサイクリングから決まる。この中で水素リサイクリング過程はプラズマ中で荷電交換反応などによって生成された比較的高速な粒子が壁面で反射されたもの、あるいは放電管壁面に吸着されていた粒子の乖離によるものなど様々な過程を含んでいる。長時間放電を安定して制御するためにダイバータ及び粒子補給による粒子制御は必須である。本研究は分光によってH α 線スペクトルの高分解能計測を行いダイバータ部を見込む視線とそれ以外の部分での速度分布をそれぞれに求め、周辺の密度・温度制御を含めたダイバータによる中性粒子制御を目指した中性粒子挙動解明を目的とする。また、今年度からスーパーSINETを利用して分光器の遠隔操作を可能とし、実験参加時間を増加する。

研究成果

逆分散0.075nm/mmのエッセル可視分光器を用いてトロイダル方向、ポロイダル方向のH α の2次元分光像を計測した(図2-1参照)。

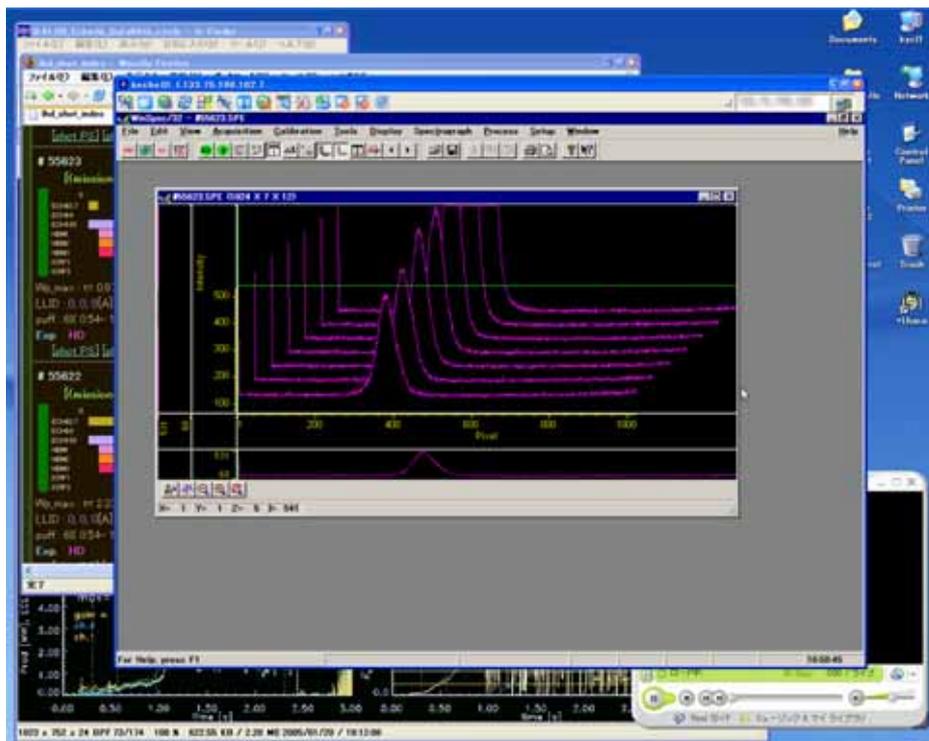


図 2-1 スーパーSINET を用いて京大側サーバ(kycl1)から
NIFS 側 H 計測用サーバ(kechell1)を遠隔操作

計測は遠隔地(京都大学エネルギー理工学研究所)でもスーパーSINET を用いることよ
って行うことができるよう整備した。その様子を図 2-2 に示す。

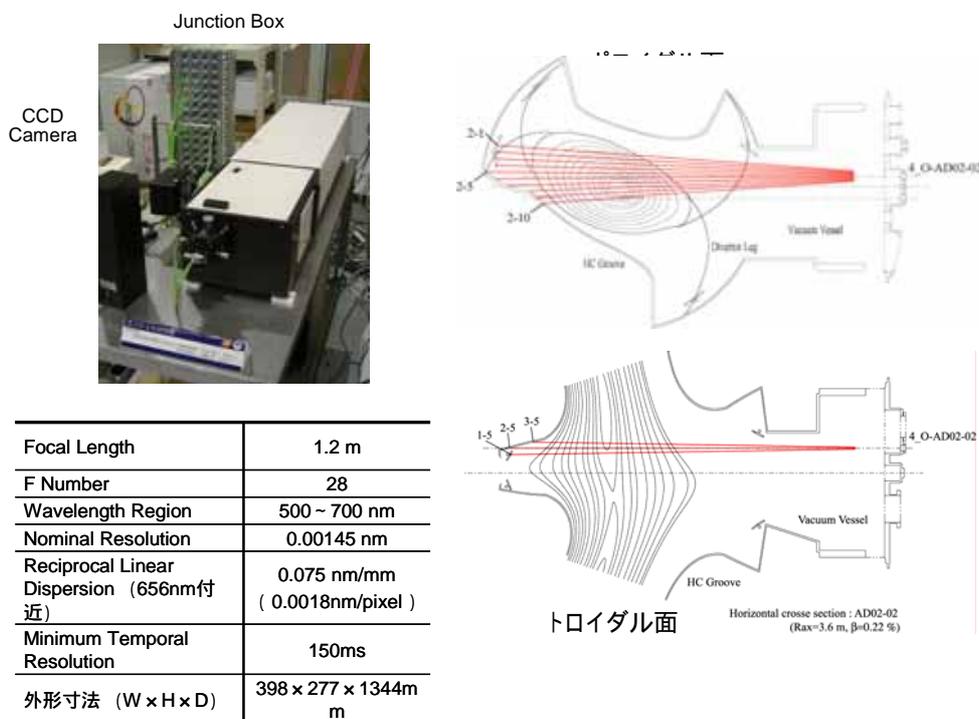


図 2-2 分光器諸元と計測位置

H スペクトルはガウス近似により、2 成分に分解できる。図 2-3 に計測データを示す。赤線が計測データ、青線が 2 成分分解した後の低温成分、緑線が高温成分である。

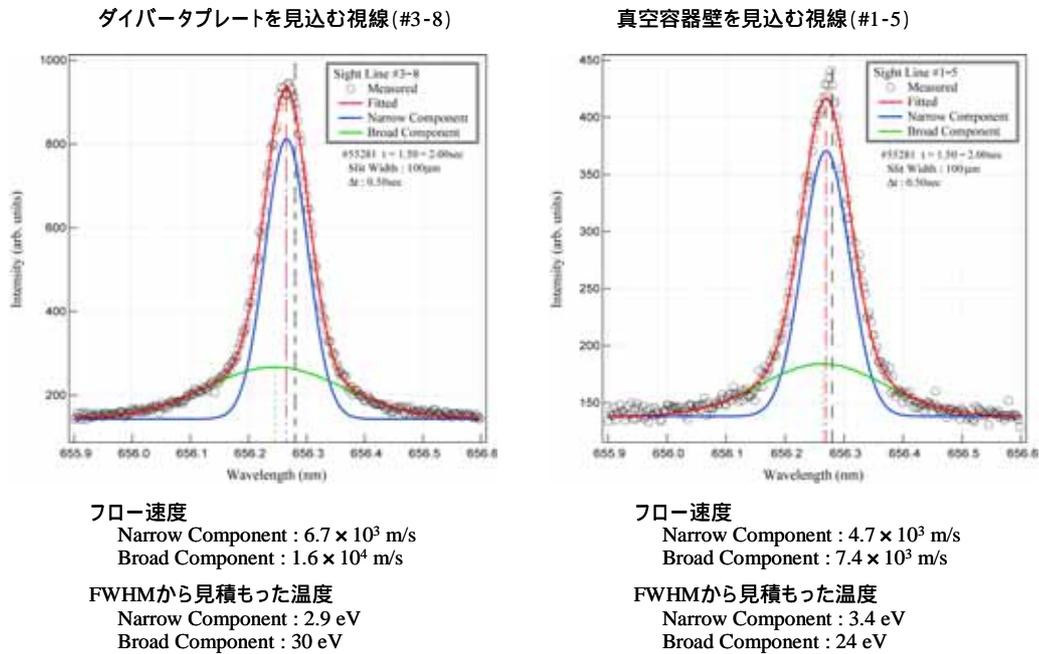


図 2-3 Rax = 3.6m の配位におけるダイバータ部およびその他の壁面の H 線スペクトル

ドップラー広がり(温度 に相当)が 3eV 程度の成分と 20eV 以上の成分である。この 2 成分はダイバータプレートを見込む視線、それ以外の視線両方で同様に認められた。スペクトルは 2 成分とも青色側へシフトしており、分光器の光学系に向かう速度成分を有する粒子が多いことを示す。シフト量は高温成分の方が大きい。発光量についてはダイバータプレートを含む視線の方が 2 倍以上大である。プラズマからの荷電粒子の多くは磁力線に従って壁面に到達するのでダイバータ部で発光量が多いのは当然である。

平均電子密度 1.5 から $6.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の範囲では、密度を上げるとダイバータを見込む視線では $3.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 以上で高温成分の温度が減少する。また、低温成分は変化がない。シフトについても同様の傾向がある。

発光の極大がダイバータプレートに接している場合 (Attach) と離れている場合 (Detach) ではダイバータプレートを見込む視線とその他の場合ともに大きな変化が観測された(図 2-4 参照)。

ダイバータプレート
を見込む視線
(#3-7)

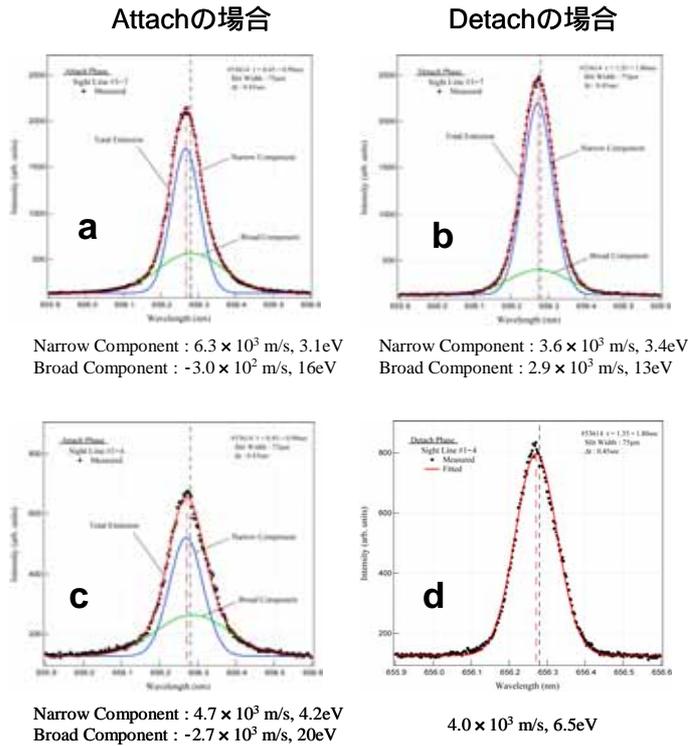


図 2-4 ダイバータ部(a, b)とその他の壁面(c, d)の Attach、Detach 条件での H スペクトル

Detach 状態になると高温成分が両視線で減少し、ほとんど低温成分のみになる。また、シフト量も小さくなる傾向がある。この変化を図2-4に挙げる。発光量に関してはAttachとDetachではほとんど変化せず、ダイバータ部とそれ以外の部分の強度比についても変化は小さい。

まとめ

プラズマ中の水素のリサイクリングを研究するために、LHDのダイバータ部を含む視線と、それ以外の視線を二次元ファイバアレイを用いて高分解能の分光計測を行った。計測はスーパーSINETを用いて京大からでも可能になった。ダイバータ部を中心とした分布および、スペクトル線の解析により低温成分、高温成分の分離を行い、密度に対する依存性を明らかにした。さらに、Attach、Detachの場合の発光の変化についても解析し、Detach後は高温成分がすべての位置で減少することが分かった。ただし、発光量については変化は小さかった。

今後の計画・課題

中性粒子の輸送解析のためのデータをさらに蓄積し、数値モデルを用いて様々な配位での中性粒子輸送を明らかにし、ダイバータ部およびその外の領域での粒子リサイクリングの機構を解明する。また、計測装置の遠隔制御をさらに進め、効率的な実験参加の体制を確立し、データ解析時のプラズマパラメータ参照を含めスーパーSINET 利用を促進しデータ解析の円滑化を図る。

3. ミリ波イメージング装置による揺動計測

構成員

分担責任者	間瀬淳	九州大学産学連携センター
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	核融合科学研究所
	長山好夫	核融合科学研究所
	田中謙治	核融合科学研究所
	徳沢季彦	核融合科学研究所
	稲垣滋	核融合科学研究所

はじめに

磁場閉じ込めプラズマでは、不安定性に起因する揺動成分が閉じ込めを支配していると考えられているが、その物理機構について十分に解明されたとは言い難い。最大の原因は、揺動計測から得られる実験的情報の欠如であると云われている。プラズマの揺動計測では、プラズマを乱さないことは勿論、i) 周波数および波数スペクトルが得られること、ii) 時間変化および空間分布が得られること、が重要な点であるが、i)、ii) を同時に満足する手法が未だ確立していないのが現状である。マイクロ波/ミリ波を用いた反射計あるいはサイクロトロン放射(ECE)測定は、プラズマ諸量(密度・温度、磁場等)の二・三次元分布と同時に、揺動成分のスペクトル分布測定を可能とするため。上記課題を解決する最適手段の一つとして期待されている。本研究は、これら計測法の開発と核融合科学研究所LHD装置への適用を有効に進めていくためスーパーSINETを利用していくものである。本報告では、主として今年度当該システムが極めて有効に機能した超短パルス反射計実験について記述する。

研究目的

本研究では、LHD 計画共同研究プロジェクトにより開発が進められ、現在 LHD 本体に設置されているミリ波計測システム、すなわち、電子サイクロトロン放射(ECE)イメージングおよび超短パルス反射計について、実験装置の制御からデータの取得・転送および解析までの全てを遠隔で実現するシステムを、スーパーSINET を介して構築することを目的としている。

研究内容・成果

遠隔実験システムを用いた超短パルス反射計の全体図を図 3-1 に示す。本体棟1階シールドボックス内に設置されているインパルス発生器からの超短パルス波(22 ps, 3 V)は、WRD-750 導波管(帯域 7-20 GHz)により低周波成分がカットされると共に、導波管の分散特性によりチャ-プ化されたパルスとなる。これを 14 m の低損失同軸ケーブルによりLHD 本体近傍まで伝送され、アクティブダブラーで逡倍された後さらにマイクロ波パワーアンプ(26-40 GHz, 30 dB)で増幅されたものを入射波として用いている。反射波信号は、同

じ同軸ケーブルでシールドボックスまで伝送されるが伝送損失を補償するため前後でマイクロ波低雑音アンプを使用している(26-40 GHz, 28 dB)。信号波形は周波数帯域50 GHzの高速サンプリングスコープにより直接記録される。

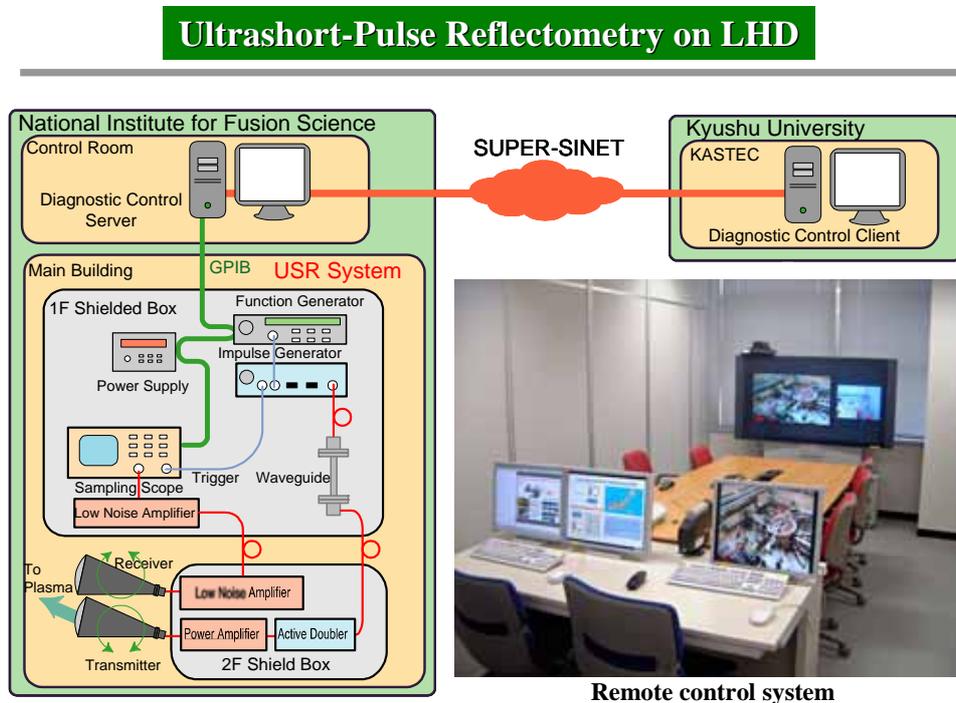


図3-1 遠隔実験システムを用いた超短パルス反射計装置

サンプリングスコープは波形の SN 比を上げるため、積分を行っている。従って、本システムに入ることが可能な周波数領域(26 GHz 以上)でノイズが混入すれば、波形の同定が困難となる。このようなノイズとしては、他の反射計信号や加熱マイクロ波が考えられ、それら周波数成分を抑制するためノッチフィルターを導入した。

遠隔実験システムについては、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の立ち上げから、計測装置の運転条件変更をまず可能とした。この制御は GPIB により行うので、MATLAB の Graphical User Interface (GUI) を構築した。一方、実験中は本体室への入室が禁止されているため、反射計送受信アンテナの角度を変更したい場合は、実験開始前ないし終了後に調整しなければならない。適宜変更される運転条件に合わせたフレキシブルなアンテナ角度変更を可能にするため、本年度アンテナ角度遠隔制御装置を導入した。駆動部は外注とし、制御プログラムとアプリケーション作成を行った。プログラムは Visual Basic net を利用して構築した。構築したプログラムは GUI 化され、Windows アプリケーションと同様に、Windows が OS としてインストールされている PC 全てで使用することができる。アンテナ角度制御装置は、送受信アンテナそれぞれを ± 8 度、0.1 度刻みで聴視することができる。図3-2にLHD本体に設置された送受信アンテナおよび操作GUI画面を示す。アンテナ遠隔制御システムにより、実験条件に従って最適の位置に設定することもできるようになった。

Profile Reconstruction Using Signal Record Analysis

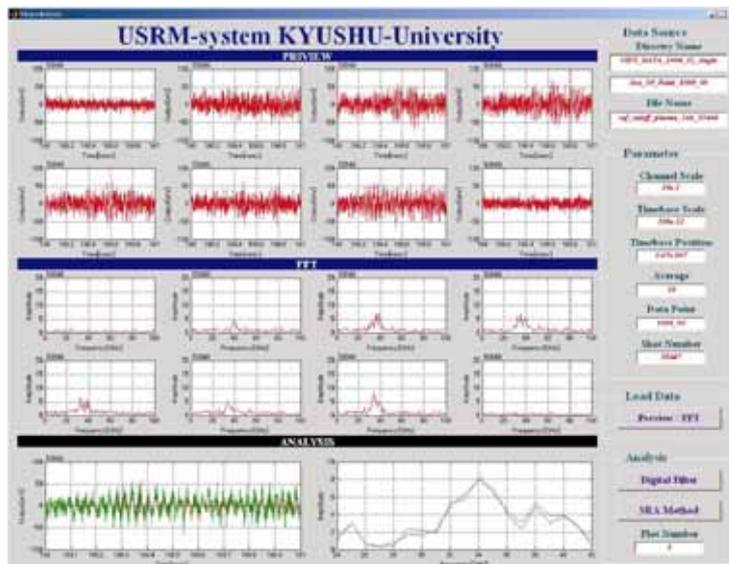


図3-2 反射計アンテナ本体およびアンテナ角度遠隔制御操作GUI画面

計測された反射計信号波形は、データ解析ソフト MATLAB により収集・解析を行う。システムの遠隔制御と同様に MATLAB の GUI ツールを用いて、測定データ解析用プログラムを作成した。その画面を図 3-3 に示す。図左が反射波とスペクトルの時間変化を、図右が制御パラメータを示す。プラズマが維持されている時間帯で反射波形にコヒーレントな成分が観測されていることが見られる。

サンプリングスコープにより記録された波形は、当該研究室で開発された反射波の波形を直接解析する Signal Record Analysis (SRA) 法により密度分布再構成を行う。SRA法により得られた密度分布の例を図3-4に示す。セパラトリックスの位置を0 cmとしプラズマの境界とした。高密度運転と低密度運転で特徴的な差が見られることが分かる。

Graphical User Interface (MATLAB-GUI)



The USRM system display at Kyushu University. The system is controlled by using GPIB.

図3-3 MATLAB-Graphical User Interface (GUI) の構築

Profile Reconstruction Using Signal Record Analysis

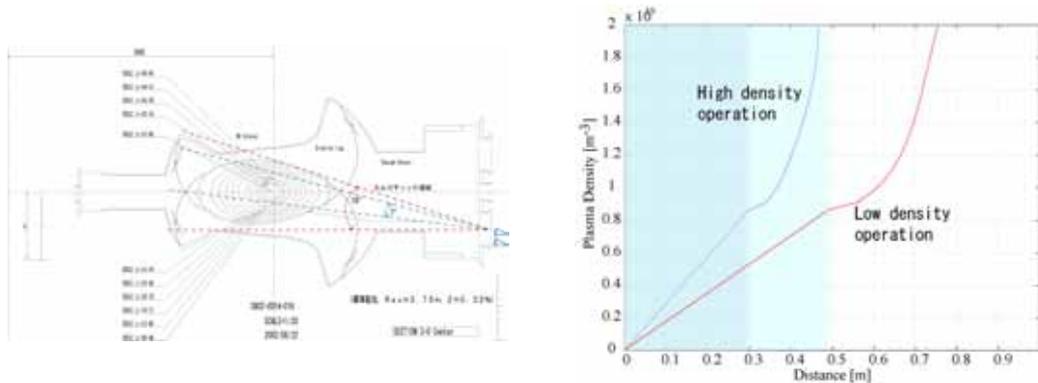


図3-4 密度分布再構成の例

まとめ

超短パルス反射計システムの改良および遠隔実験制御システムの構築を図り、プラズマからの反射波信号を得ることができた。また、波形の直接解析による再構成で、従来の手法では不可能な高分解の密度分布が得られた。周辺プラズマの密度分布情報の詳細は、既設の遠赤外レーザー干渉計では困難であり、本システムを定常的に運転することによりLHD実験に有用なデータを提供できるものと考えている。

今後の計画・課題

超短パルス反射計システムの改良として、1)8-26 GHzの低周波領域への拡張、および2)パルスの高速掃引による時間分解の向上を図り、スーパーSINETを用いたシステム全体の遠隔制御と相まって、オンラインでLHD周辺プラズマの密度分布情報を提供し、研究の進展に寄与する。

ミリ波イメージング装置については、平成16年度はイメージングアレイアンテナの改良設計および製作と性能評価を行ってきた。平成17年度は本体に設置し、全システムの稼働を進めていく。

【参考文献】

- [1] L. G. Bruskin, A. Mase, A. Yamamoto, and Y. Kogi, Plasma Phys. Control. Fusion **43**, 1333 (2001).
- [2] Y. Kogi, K. Uchida, A. Mase, L. Bruskin, M. Ignatenko, T. Tokuzawa, Y. Nagayama, and K. Kawahata, Rev. Sci. Instrum. **75**, 3837 (2004).
- [3] 内田、近木、間瀬、Bruskin、北條、江尻、徳沢、川端、田中、長山、第21回プラズマ・核融合学会年会、静岡 (2004).
- [4] 内田、近木、間瀬、BRUSKIN、北條、江尻、徳沢、川端、田中、長山、プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部大会、福岡 (2004).

4. LHD高エネルギー粒子計測

構成員

分担責任者	笹尾眞實子	東北大学院量子エネルギー工学研究科
参加研究者	北島純男	東北大学院量子エネルギー工学研究科
	田中豊	東北大学院量子エネルギー工学研究科
	西浦正樹	核融合科学研究所
	磯部光孝	核融合科学研究所

はじめに

核融合の炉心プラズマ研究においては、高エネルギーイオン閉じ込め性能が重要事項の一つとなっている。核融合反応で発生した高エネルギーイオンはそのままプラズマ内部に閉じ込められることにより外部からの加熱入力がほとんどない状態での燃焼の持続が可能となるからである。本研究では核融合科学研究所の大型ヘリカル装置での実験に参加し、ヘリカルシステムにおける高エネルギーイオン閉じ込め性能の研究を行う。

研究目的

本研究の目的は、LHDにおける高精度の高エネルギー粒子計測を行い、スーパーサイネットの活用により多角的かつ効率的に高速イオン閉じ込めの研究を行うことにある。具体的には LHD にとりつけられている、ダイヤモンド検出器や高エネルギー粒子損失計測プローブのデータの取得、また関連する計測データを取得し、検出器のスリット等の調整を遠隔制御し、実験状況を即座に把握するためのビデオ信号などを東北大学において取得し、テレビ会議の活用で活発に議論に参加、あるいは綿密な打ち合わせをおこなうことにより、実験にリアルタイムで遠隔参加する。

研究成果

今年度はLHDにおける高エネルギー粒子損失計測プローブが稼働を開始し、ダイヤモンド検出器についても垂直視線、接線視線の2方向からのデータが定常的に取得され、多くの測定データをスーパーサイネットにより東北大学でモニタ、解析することができた。高エネルギー粒子損失計測プローブのデータ例を下記にしめす。プローブ先端にあるシンチレーターはイオンの衝突により発光し、発光箇所からイオンのジャイロ半径、ピッチ角を求める(図4-1)。シンチレーター上の各点(図4-1参照)の発光強度は特定のジャイロ半径、ピッチ角をもつ入射イオン数に比例し、その時間変化は光電子倍增管で図4-2に示すような情報となる。ICH加熱時にPMT CH5のカウント数が増加するのがわかる。ICRF高次高調波加熱実験においてNDD-count(高速中性粒子の数)とシンチレーター型損失イオンプローブch5の計数值(損失イオン数)の相関を図4-3にしめす。このような解析を今年度は東北大からできるようになった。

この間の研究成果をいくつかの会合で発表、論文にまとめた[1-3]。また本年度のスーパーSINET を用いた遠隔実験では、制御室のビデオ画像と音声の配信が始まり、よりリアルに実験に参加できたこと、制御室内での打ち合わせにテレビ会議システムにより参加でき、実験速報なども即座に配信、受信できたことである。

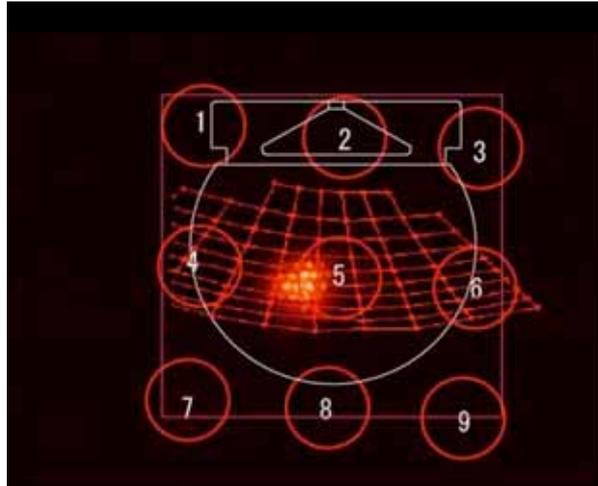


図 4-1 シンチレーター上の発光箇所

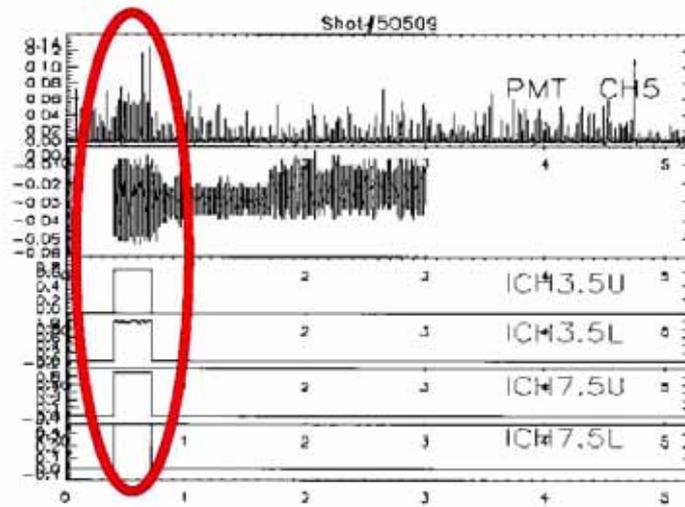


図 4-2 5番(図 4-1)の発光強度時間変化

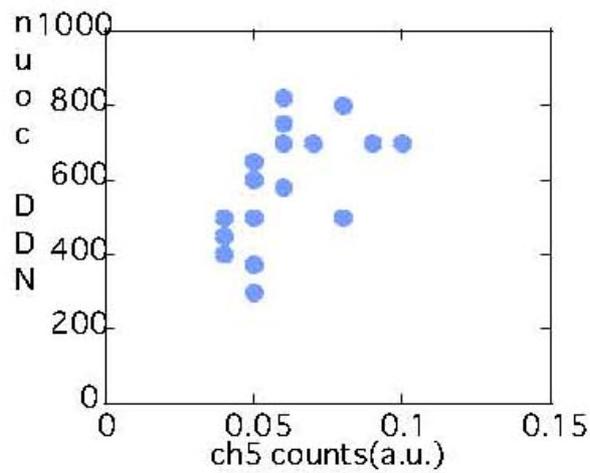


図 4-3 NDD-count との相関

まとめ

平成16年度、LHD においては高エネルギー粒子損失計測プローブが稼動を開始し、ダイヤモンド検出器についても垂直視線、接線視線の 2 方向からのデータが定常的に取得され、その他数多くの高エネルギー粒子の測定データが得られている。これらをスーパーサイネットにより東北大学でモニタ、解析することにより、遠隔実験の内容が充実してきている。

【参考文献】

- [1] Effect of Neoclassical Transport optimization on Energetic Ion Confinement in LHD, S. Murakami, H. Yamada, M. Sasao, M. Isobe, T. Ozaki, T. Saida, et al., Fusion Science and Technology 46 (2004) Pages 241-247
- [2] 損失アルファ粒子計測のためのセラミックシンチレーターの開発
久保直紀、四竈樹男、西浦正樹、磯部光孝、菅原大志、竹内崇、笹尾真実子、北島純男
第21回プラズマ核融合学会年会(2004, 11月, 静岡)25pB35
- [3] LHD における高エネルギーイオンのピッチ角散乱スペクトル形状
西村秀俊、西浦正樹、磯部光孝、岡田耕一、笹尾真実子、北島純男
第21回プラズマ核融合学会年会(2004, 11月, 静岡)25pB30

5. CO₂レーザー干渉計を用いた密度揺動計測

構成員

分担責任者	飯尾俊二	東京工業大学原子炉工学研究所
参加研究者	筒井広明	東京工業大学原子炉工学研究所
	田中謙治	核融合科学研究所

はじめに

核融合プラズマ研究において、その閉じ込めを決めている揺動の実験的解明は非常に重要な課題である。核融合科学研究所 LHD 装置に設置した CO₂ レーザー干渉計により得られたデータをもとに、密度揺動解析を行う。

研究目的

まず、密度変調実験で拡散係数、対流速度を評価し、それらがどのようなパラメータで決まっているか明らかにする。次に、その結果にもとづき粒子閉じ込めが違うときに揺動がどのような違いを持つかを実験的に明らかにする。密度揺動だけでは情報が不十分ではあるが、波数、周波数スペクトルのパラメータ依存性、および理論モデルとの比較によりそれがどのようなタイプの不安定性が同定できる可能性がある。さらに、将来的には小半径方向揺動の速度揺らぎを計測しそれと密度揺動から揺動誘起による粒子束を直接測定することを目指す。

研究成果

昨年度完成したデータ転送システムの転送テストを行った。その結果、最大 65Mbps の転送速度が得られた。かなり高速ではあるが、期待していた転送速度(平均 100Mbps)は得られていない。次に、本システムを用い、1次元位相コントラスト干渉計により得られた揺動データのデータ転送及び、スペクトル解析を行った。図 5-1 にその実行例を示す。

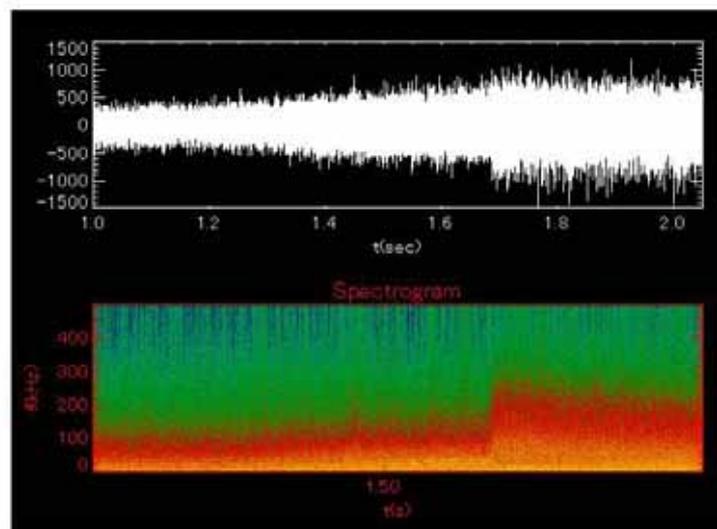


図 5-1 得られた揺動データ(上図)と、その周波数スペクトル(下図)

さらに、そのデータを元に揺動の周波数波数スペクトル解析を行った。図 5-2 にその解析例を示す。

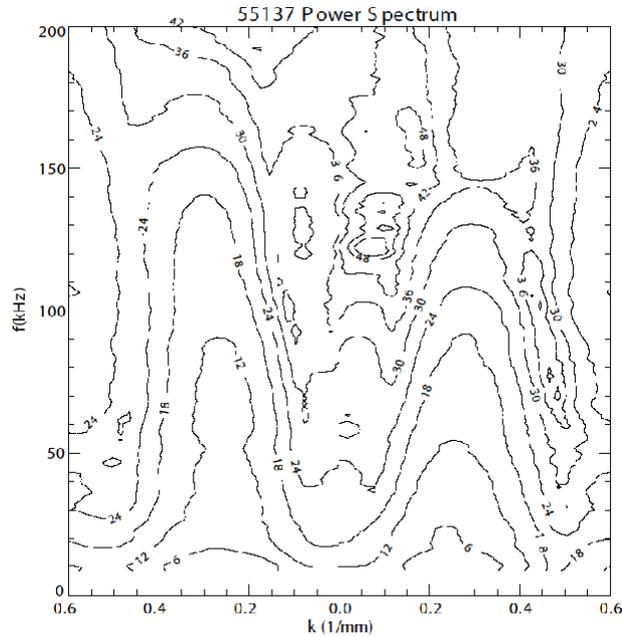


図 5-2 揺動データ周波数・波数スペクトルの等高線図。図 5-1 のデータの、時刻 1.75 秒から 1.84 秒までのデータを解析した。

まとめ

核融合科学研究所 LHD 装置の CO₂ レーザー干渉計(位相コントラスト干渉計、及びヘテロダイン干渉計)により得られたデータを、東工大側でスペクトル解析を出来る環境が整った。今年度はこの解析を進め、拡散係数、対流速度を評価する。

今後の計画・課題

ヘテロダイン干渉計により得られたデータも含め、周波数スペクトルの時間変化を見るために、wavelet 解析を導入する予定である。さらに、2次元位相コントラスト干渉計により得られたデータの解析も進める。

6. LHD プラズマの高速画像計測

構成員

分担責任者	西野信博	広島大学大学院工学研究科
参加研究者	森崎友宏	核融合科学研究所

はじめに

プラズマ中の乱流状態により、核融合プラズマで最も重要なエネルギー閉じ込め性能が決まる理論的・数値計算的な予想があり、近年、プラズマ計測でもこの乱流状態を間接的・直接的に測定する試みがなされている。一方、ガスパフにより、LHDの周辺部のみが良く光る事は既に通常のカメラ計測でわかっている。そこで、本研究では周辺プラズマが可視域の光を強く発する性質を利用して、2次元的に乱流計測を試みる計測であり、乱流計測の直接的計測のひとつと位置づけられる。

研究目的

ガスパフ時におけるプラズマをガスパフポートからプラズマを見上げる方向で高速カメラ測定することで、周辺揺動の二次元的な構造が測定できる。フィルターは使用するガスが水素であれば、H α 用などを使用し、He であれば、HeI か HeII 用を使用する(通常は、HeII)。発光の原理は主に電子衝突による励起であるため、周辺プラズマの密度、温度変動を測定することができる。密度と温度の情報はカメラ測定だけでは単純には切り離せないが、他の測定(例えば、可動式プローブなど)を併用する事により、将来的には温度、密度情報を切り離せる可能性もある。

研究成果

LHD においてカメラを5.5L のポートに取り付けた。5L の位置でガスパフを使用する実験であれば、研究目的に述べた 2 次元状の光分布計測に活用できる。測定に使用する高速カメラは、昨年来から使用実績の高いフォトロン社製の FASTCAM Ultima-SE で、最高撮影速度は 40500 駒毎秒(64 × 64 画素)である。本年度はカメラの取り付けを 10 月末に行い、Sinet での調整後、カメラの視野角の調整(これは、出張で現地作業)などを行ってから本格的に LHD 実験に参加した。

- **コンポーネント**
 - 超音波モーター
 - レンズ制御系
 - ドライバー
 - 光通信 (RS-232C)
 - コントローラー

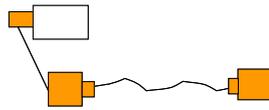


図 6-1 強磁場対応リモートレンズ駆動装置

まとめ

得られた結果の一例を示す。これは、高密度プラズマ(#55654)で、フィラメント(プラズマの乱流の一種と言われている)が良く見えている。時系列で上段の左から右に、次に、下段の左から右に進む。(40500FPS で撮影)

- LHD高密度プラズマの計測例(#55654)
- 時間は、上段左から右、次段以降も左から右
- 1frame毎に $24.7\mu\text{s}(=1/40500\text{s})$ 進む

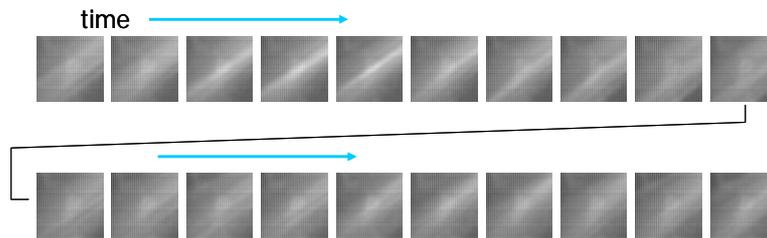


図 6-2 LHD プラズマの高速カメラ映像

今後の計画・課題

昨年度までは、カメラに付けた強磁場対応リモートレンズ駆動装置を LHD 計測機器室からマニュアルで操作していたが、本年度は Sinet を利用するためマニュアル操作ができず、ソフトで操作する必要があった。しかし、制御ソフトの開発が間に合わなかったため、本年度のプラズマ実験の撮影は全て $f=50\text{mm}$ の単焦点レンズで行っている。

Sinet の本格的な利用は 11 月からで、大学の授業などの関係で全ての LHD 実験には参加できてはいないが、トータルで 17 日実験参加し、データ量では 50GB 以上の画像データを取得することができた。一日平均 3GB 程度のデータ量となる。ただし、現状の NIFS-広大間の Sinet は公証 1 ギガビット毎秒であるが、実測ではかなり遅い (Windows の FTP で 1MB 毎秒程度が限度) ので、ショット間でのファイル転送はできない。通常は、実験終了後の夜にデータ転送をしており、この点は今後改善すべきであろう。

次年度は、リモートズームレンズの制御ソフトを開発し、Sinnet でカメラとレンズを広島大学から操作し、LHD 実験に参加する予定である。また、もし予算があれば、遠隔操作の干渉フィルター交換機を製作し、取得する光の波長(線スペクトル)を実験条件で変更する。

7. 可視光トモグラフィーによる2次元イオン温度・流速分布計測

構成員

分担責任者 小野靖 東京大学大学院工学研究科

参加研究者 成嶋吉朗 核融合科学研究所

研究目的

ヘリカルプラズマで問題になる高Z不純物蓄積等の不純物輸送評価のため、また不安定に伴うイオン加熱・流れを解明するため、開発した2次元可視光トモグラフィー計測を最適化して現象の解明に当たる。

まとめ

平成16年末にスーパーSINETに接続し、クライアント装置等の調整中。次年度から本格的に遠隔実験参画の予定である。

8. LHD周辺プラズマにおける水素原子・分子輸送機構の解明

構成員

分担責任者	藤本孝	京都大学大学院工学研究科
参加研究者	岩前敦	京都大学大学院工学研究科
	安宅誠	京都大学大学院工学研究科
	坂上篤史	京都大学大学院工学研究科
	澤田圭司	信州大学工学部
	後藤基志	核融合科学研究所
	片井隆志	核融合科学研究所
	森田繁	核融合科学研究所

はじめに

磁場閉じ込めプラズマにおいて、周辺領域における中性水素原子・分子は、粒子リサイクリングを通してプラズマ全体の粒子バランス・エネルギーバランスに重要な役割を担っている。水素原子・分子の電離・再結合・解離等の反応や空間的な流れなどの詳細な情報はプラズマの密度・温度分布、H-モードなど主プラズマの研究を深めるためにも不可欠であり、長時間放電ではとくにリサイクリングの理解が重要となる。しかしながら周辺部の水素原子・分子の挙動やプラズマパラメータ等は十分に明らかにはなっていない。

ヘリウム原子については、後藤・森田が Hel 728.1 nm 発光線スペクトルのゼーマンプロファイルから視線 2ヶ所の発光位置と視線方向相対速度を決定した[1]。水素原子バルマー線は、プラズマ中磁場構造が複雑なために偏光を分けない測定ではそのゼーマン・パターンが分離されなかったが、LHD 赤道面近傍の1視線において偏光を分けることでゼーマン・パターンが分離計測された[2]。プラズマ中磁場パラメータと組み合わせることによってバルマー線の発光位置、原子温度、プラズマ中心方向への移動速さが決定された。荷電交換衝突の結果と思われる高温成分のほかに、トーラス内側、外側ともに低温、中温の2成分が同定された。後者は水素分子ないし分子イオン起源であることが示唆された。

研究目的

ポロイダル断面全体を計測する複数の偏光分離観測視線を設け、各視線で観測されるプロファイルと発光線上準位原子密度の計測から周辺プラズマ原子流束を決定し、加えて中性粒子輸送コードによるそれらの実験結果の解析を通じ水素リサイクリングについての知見を得る。

実験方法

グラントムソプリズムを用いた偏光分離光学系(図 8-1)を製作した。偏光分離光学系により紙面垂直方向の偏光は直進し、紙面に平行な偏光は 45 度方向に反射され側面に射出される。10本の偏光分離光学系を LHD 1-O ポートに設置した。それらの視線はポロイ

ダル断面を覆う(図 8-2)。プラズマからの発光は偏光分離光学系・レンズ・光ファイバー(400 μm コア径 24 本)を通じ LHD 本体室のツェルニーターナ分光器(McPherson209 焦点距離 1.3m 回折格子 1800 本/mm)に導入した。光ファイバーの 1 本に水素もしくはヘリウム放電ランプからの発光を導入し波長標準とした。光学系は計測シリーズ毎に絶対感度較正を行った。また、8-O ポートに 2 本の偏光分離光学系を設置し 0,45,90,135 度の偏光方向に分け、NBI の水素原子 Motional Stark 効果(MSE)によるバルマー線のスペクトル形状を計測した。1-O ポートではヘリウム・水素原子からの発光線のほかにアルゴンの多価イオンからの磁気双極子遷移による発光線プロファイルを観測した。

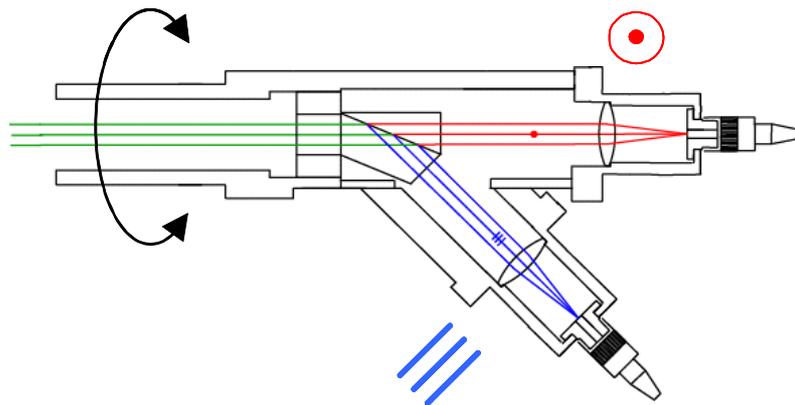
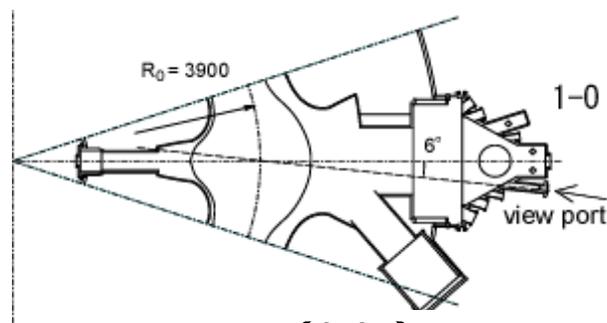
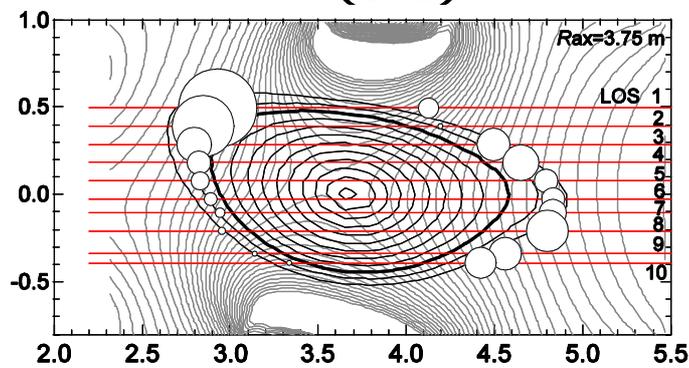


図 8-1 グラントムソンプリズムを用いた偏光分離光学系



(8-2a)



(8-2b)

図 8-2 LHD 1-O ポートに設置した偏光分離光学系

結果・考察

NBI1号機から入射された水素原子H α 線のMSEスペクトルは2つのイオン源による高速原子の寄与から成る。観測スペクトルプロファイルはプラズマ中での磁場配位と励起状態原子密度分布からほぼ再現できた。発光線強度の σ 成分に上準位のポピュレーション分布が等方的でない可能性が見出された。それを調べるためにNBIのイオン源を一つのみ動作させ中性粒子ビームのエネルギーを変えて主プラズマに入射し、H α 線のMSEスペクトルを計測した。その結果をもとに、プロトン衝突によるアライメント生成の可能性を定量的に評価する予定である。

ヘリウム放電に対し250ms毎にスペクトルを観測した。図8-3に視線5の位置で記録した発光線HeI λ 667.8nm(2^1P-3^1D)を示す。露光時間は231msである。図中左上の丸中の線は偏光方向を、縦線は667.81516nm(2^1P-3^1D)の波長位置を表している。放電ショット番号52105は逆磁場配位 $B = -2.640$ Tでありポロイダル外側では磁場は向かって左上から右下方向を、内側では左下から右上方向を向いている。図8-3上では外側位置での発光線成分と内側位置での成分が主な強度成分として観測され、下図には外側位置での発光線成分と内側位置での成分が主な強度成分として観測されている。図8-3上の光の中心波長がわずかに赤方に遷移していることから外側の原子集団は観測者から遠ざかる方向(プラズマ中心方向)に向かい、下の光の中心波長が青方に偏移していることから観測者に向かう方向(プラズマ中心方向)に向かっている。対応する光成分の波長位置を中心に光2本の波長分離距離は発光位置の磁場強度に比例する。

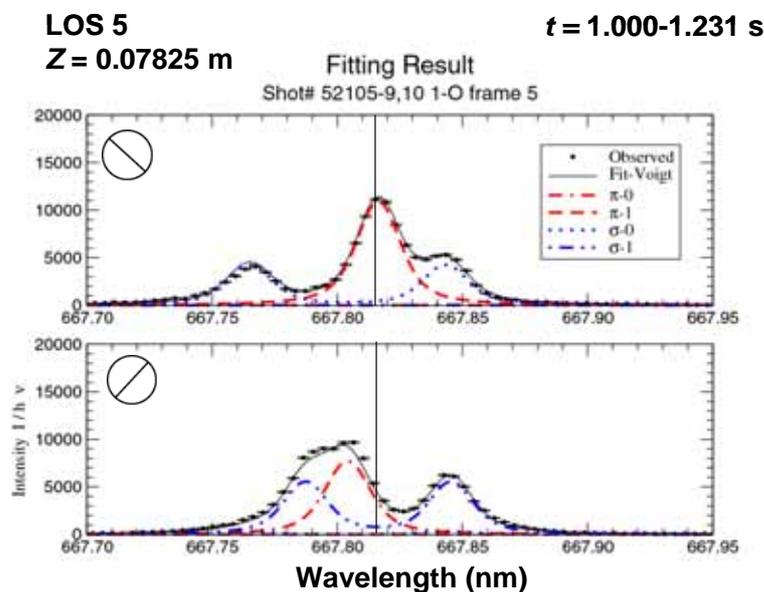


図 8-3 ヘリウム放電に対するスペクトル

He I 発光線プロファイルは一温度のガウシアンで表せない。Voigt プロファイルを仮定し、視線上の2ヶ所での発光位置を、磁場データを基にした最小自乗あてはめにより決定した。発光位置は内側 $R_{in} = 2.83$ m、 ($B_{in} = 1.88$ T) 外側は $R_{out} = 4.79$ m、 ($B_{out} = 1.40$ T) と求ま

った。視線 1 - 10 での最小自乗あてはめの結果をまとめた(図 8-4)。円の直径は線積分がピュレーションに比例し、矢印の長さは視線方向速度成分を表す。同時刻のプラズマの映像も示されている。放電時間 3 秒の間の 12 枚の発光位置マップが得られた。

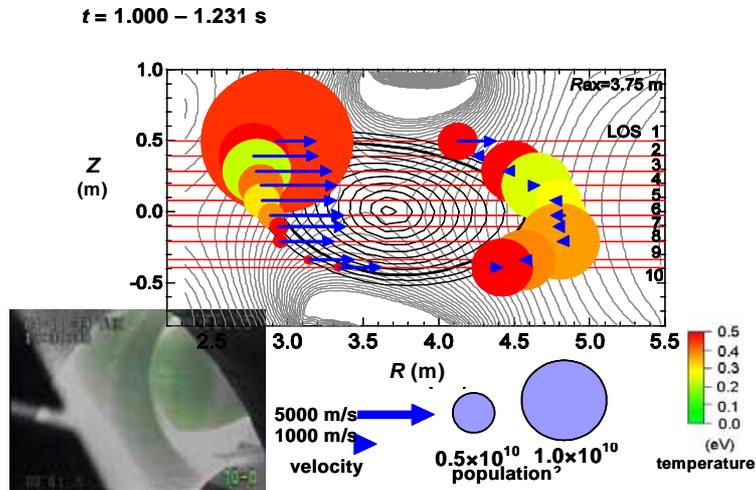


図 8-4 視線 1 - 10 での最小自乗あてはめの結果

H 線の偏光分離スペクトルを図 8-5 に示す。左・右図がそれぞれショット番号 52148 , 41292 である。各ゼーマン成分のスペクトル拡がりは左図 52148 の方が大きい。FIR による線平均電子密度は 52148, 41292 それぞれ 6.5×10^{19} , $1.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ であった。ゼーマン分離したスペクトル線のシュタルク広がりを定量的に検討中である。52148 はポロナイゼーションの翌日に得られたスペクトルであり、図 8-5 はリサイクリング粒子の状態(原子か分子、放出エネルギー)が壁表面の状態に大きく依存することを示している可能性もある。

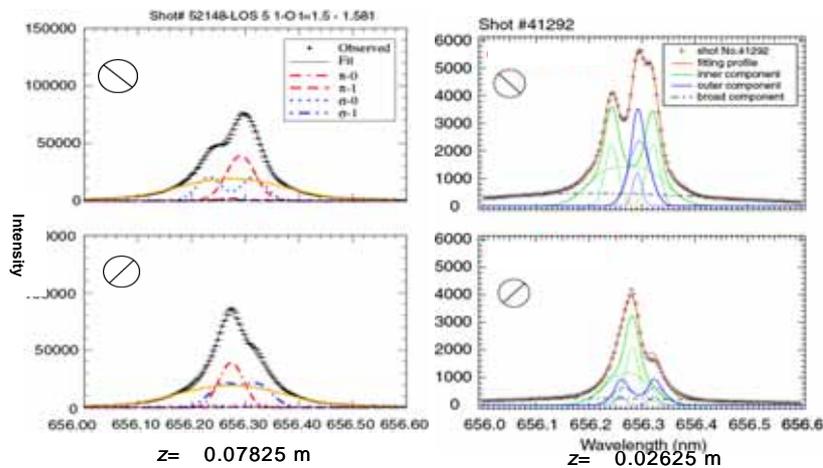
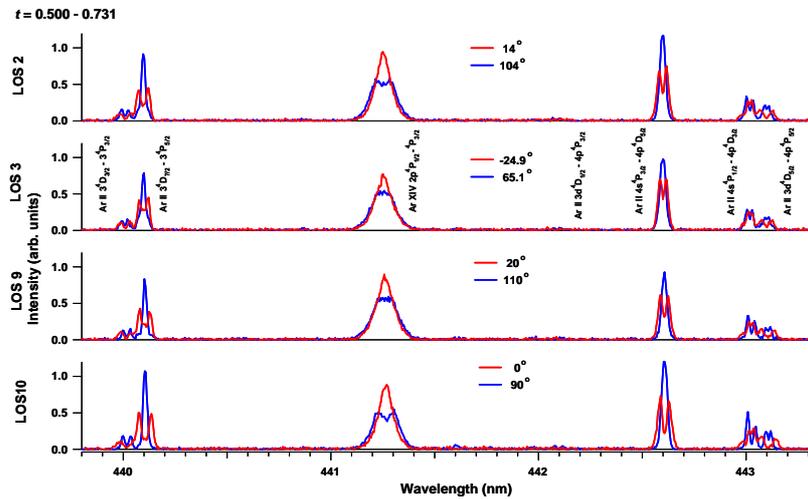


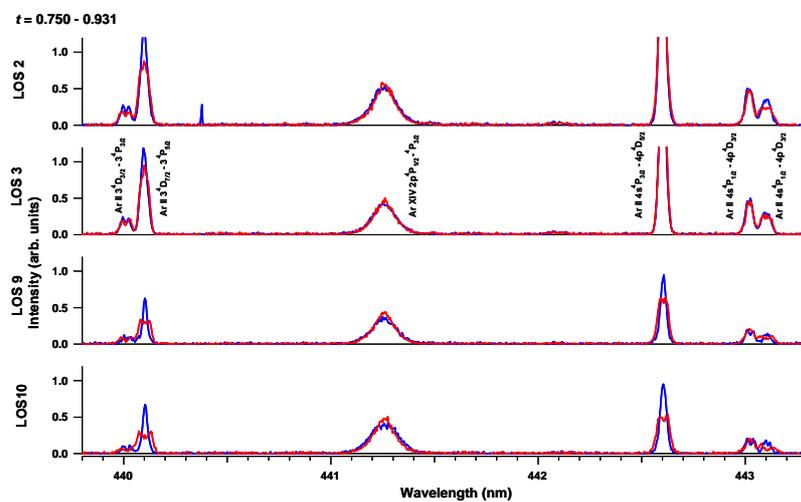
図 8-5 H 線の偏光分離スペクトル

アルゴンを動作ガスとし NBI 加熱によりプラズマを生成した。可視域 Ar X 553.3 nm, XI 691.7 nm, XIV 441.2 nm, XV 594.4 nm 磁気双極子遷移発光を偏光分離計測した(図 8-6)。異常ゼーマン効果による分裂が見られた。偏光方向と磁場方向との関係は電気双極子のそれと逆である。



(a)

図 8-6a 磁気双極子遷移発光の偏光分離計測



(b)

図 8-6b 磁気双極子遷移発光の偏光分離計測

中性粒子輸送モンテカルロシミュレーションコードによりプラズマ周辺部における励起状態水素原子 ($n=3$) の速度分布が得られた。磁場強度・方向と発光線の強度・偏光方向を踏まえた詳しい解析を現在進めている。

平成 16 年 12 月より京都大学から SNET を通じ NIFS の実験ネットワーク接続が可能となり、LHD 本体室に設置された分光器の波長を変化させるなどしてスペクトルデータを取得することが可能であることが確認された。

今後の計画

平成 17 年度には高分解分光器を一台増設し 1 視線上の異なる 2 波長のスペクトル計測を行う。ヘリウム原子の 2 本の発光線強度比から電子温度・密度の情報を得ることが期待される。NBI 入射時のアルゴン磁気双極子遷移の発光線の偏光はプロトンの速度分布関数の非等方性が現れている可能性が高い断面積データの整備を行い、偏光とプロトン速度分布の非等方性の定量評価を目指す。

【参考文献】

- [1] Goto M. and Morita S. Phys. Rev. E **65** (2002) 026401
- [2] Iwamae A., Hayakawa M., Atake M. and Fujimoto T. Phys. Plasmas **12** (2005) 042502

【成果発表】

Iwamae A., Hayakawa M., Atake M. and Fujimoto T. Phys. Plasmas **12** (2005) 042502
日本物理学会 2004 年秋季大会 LHD におけるモーショナルシュタルク効果の偏光観測
安宅誠, 岩前敦, 藤本孝, 後藤基志 A, 森田繁 A 京大院工, 核融合研 A

【2】超伝導実験遠隔制御システム(平成13年度～)

構成員

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
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	東京大学高温プラズマ研究センター
	三戸利行	核融合科学研究所
	柳長門	核融合科学研究所
	田村仁	核融合科学研究所

はじめに

東京大学高温プラズマ研究センターでは、高温超伝導コイルを真空容器内で磁気浮上させた内部導体プラズマ閉じ込め装置 Mini-RT を建設し、新しい緩和過程を利用した超高ベータプラズマの閉じ込め実験を行っている。この装置では永久電流スイッチを有した Bi-2223 高温超伝導コイル(直径 300 mm)を、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吊り上げコイルにより中空に磁気浮上している。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。

また近年、理科教育の重要性が謳われてきており、スーパーサイエンスハイスクール(SSH)活動などが盛んになってきている。その一環として、多くの高校生が大学の研究室を訪問する機会も増えてきており、本研究での高温超伝導コイルの磁気浮上実験も活用されている。高校生達は本磁気浮上システムの遠隔での操作に高い関心を示しており、多くの高校生が遠隔操作を実体験する場として大いに役立っている。

研究目的

本研究では、超小型の高温超伝導コイル(FB-RT 装置)を用いた磁気浮上実験での経験と実績を踏まえて、プラズマ実験が可能な小型高温超伝導コイルを有する内部導体装置(Mini-RT)の設計・建設・運転を行っている。

FB-RT 装置は液体窒素で直接冷却された高温超伝導コイルを大気中で磁気浮上させるものであり、まずはアナログ制御での実験に成功した。今後は、これをデジタル制御や画像処理制御へと発展させることを狙っている。

Mini-RT装置では比較的大口径の真空容器内に高温超伝導コイルを磁気浮上させ、そのダイポール磁場で高温・高ベータプラズマの閉じ込めを狙ったものである。Mini-RT装置では、着脱式のトランスファーチューブ・チャッキ弁システム、着脱式の電流リード、そして永久電流スイッチなどを開発することにより、所期の目的である50 kAのコイル電流での永久

電流モードが達成された。さらにこれを20ミクロン程度の精度で1時間以上にわたり安定に制御でき、プラズマ実験に至った。現在は装置の信頼性向上と高性能プラズマ生成に向けて実験を進めている。

研究成果

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。

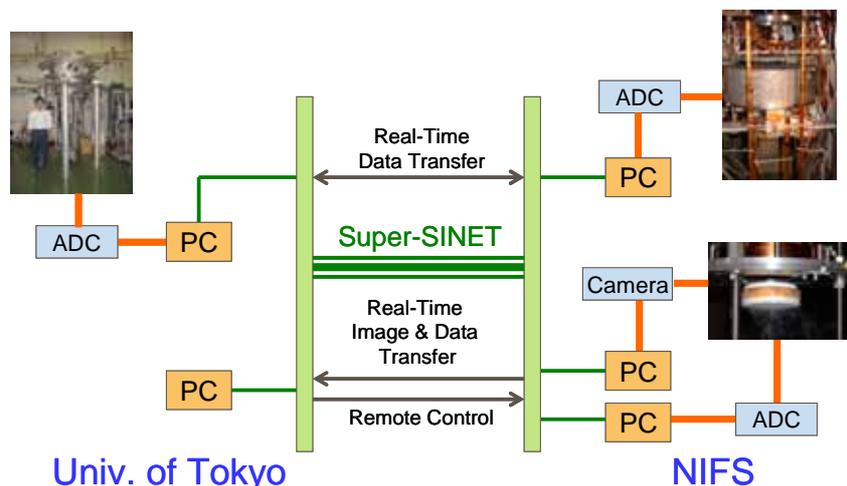


図 9-1 磁気浮上高温超伝導装置開発のための遠隔実験参加、遠隔制御システム

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。

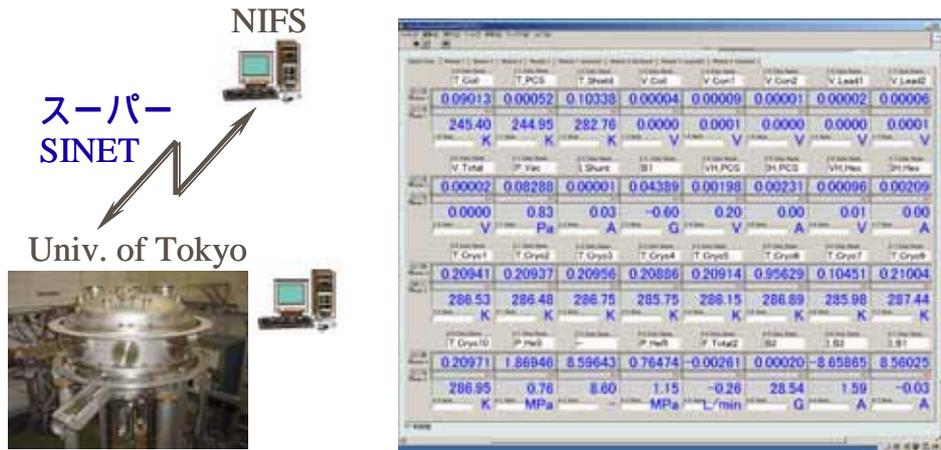


図 9-2 Mini-RT 超伝導コイルの冷却・励磁監視システム

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。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。

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事が可能となった。

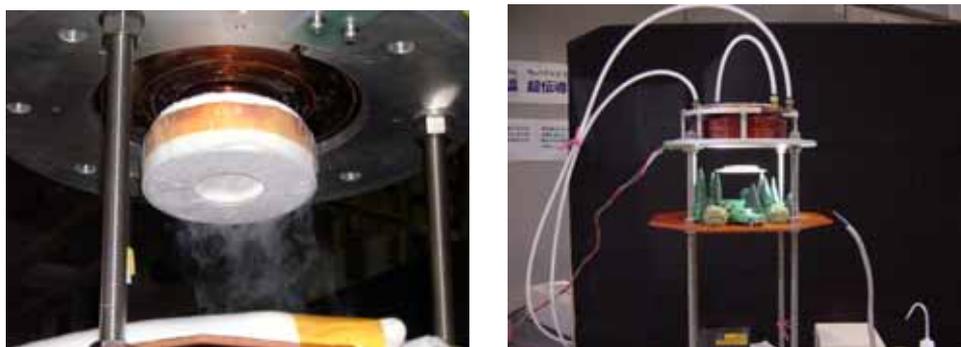


図 9-3 磁気浮上制御方式の最適化と遠隔操作。

浮上コイルの画像情報はリアルタイムで転送されるとともに、核融合研に設置された FB-RT 装置に対して、東大側から浮上位置の設定や制御定数の変更を行うことが可能である。

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、科学技術創造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。

まとめ

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 装置での冷却・励磁・プラズマ実験において、多種多様な実験データを長時間にわたりスーパーSINET を用いて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。

一方、核融合科学研究所の低温実験棟に設置されている超小型の高温超伝導コイルの磁気浮上システム (FB-RT 装置) のデジタル制御や浮上位置制御のリアルタイム制御が可能となり、今後の研究発展にとって大変有益なシステムが構築できたと同時に、高校生を対象とした SSH 活動などにおいて、遠隔操作・制御システムの実体験の場として活用することができるようになった。

今後の計画・課題

従来の研究はビスマス系の高温超伝導線材を用いたものであったが、高温超伝導線材としては、その温度特性や磁場特性においてイットリウム系の線材の方が優れている。ただしイットリウム系線材は長尺テープの製造実績がなかったが、最近になって10 m程度のテープの製造ができるようになった。これをコイル化した時の特性劣化や磁気浮上制御などは、まさにこれからの研究課題である。

我々はFB-RT装置及びMini-RT装置で培ったビスマス系超伝導線材を用いた永久電流モード運転および磁気浮上技術を、イットリウム系超伝導線材での研究へと発展させる事を計画している。そこではイットリウム系線材の接続部での抵抗や低電界領域での磁束フロア抵抗などに対する新たな課題が生じる可能性がある。

【参考文献】

- ・小川雄一, 森川惇二, 大國浩太郎, 二瓶仁, 堀暖, 山越茂雄, 後藤拓也, 三戸利行, 柳長門, 岩熊成卓, 上出俊夫, 磁気浮上内部導体装置 Mini-RT の全体設計, 低温工学, 第 39 巻, 2004 年, 175-181.
- ・三戸利行, 柳長門, 小川雄一, 森川惇二, 大國浩太郎, 岩熊成卓, 上出俊夫, 能瀬眞

- 一, 伊藤郁夫, 福居滋夫, 長山俊毅, 奥野純一, Mini-RT 装置の設計・製作, 低温工学, 第 39 卷, 2004 年, 182 - 192.
- ・柳長門, 三戸利行, 森川惇二, 小川雄一, 濱口真司, 菱沼良光, 大國浩太郎, 堀暖, 岩熊成卓, 上出俊夫, Mini-RT装置用高温超伝導磁気浮上コイルの開発, 低温工学, 第 39 卷, 2004 年, 193 - 200.
- ・柳長門, 森川惇二, 三戸利行, 小川雄一, 大國浩太郎, 堀暖, 山越茂雄, 岩熊成卓, 上出俊夫, Mini-RT 装置用高温超伝導磁気浮上コイルの冷却・励磁試験, 低温工学, 第 39 卷, 2004 年, 201-208.
- ・森川惇二, 大國浩太郎, 堀暖, 山越茂雄, 後藤拓也, 小川雄一, 柳長門, 三戸利行, 内部導体装置 Mini-RT におけるプラズマ生成と高温超伝導コイルの磁気浮上実験, 低温工学, 第 39 卷, 2004 年, 209-215.
- ・Yanagi, N., Mito, T., Morikawa, J., Ogawa, Y., Ohkuni, K., Hori, D., Yamakoshi, S., Iwakuma, M., Uede, T., Itoh, I., Fukagawa, M., Fukui, S.; "Experiments of the HTS Floating Coil System in the Mini-RT Project", IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.14, No.2 (2004) pp. 1539-1542.

【3】大規模プラズマシミュレーション研究 (平成17年度以降)

代表責任者 未定

研究目的

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。

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)

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。

期待される効果

期待される大規模シミュレーション例を図10-1に示す。

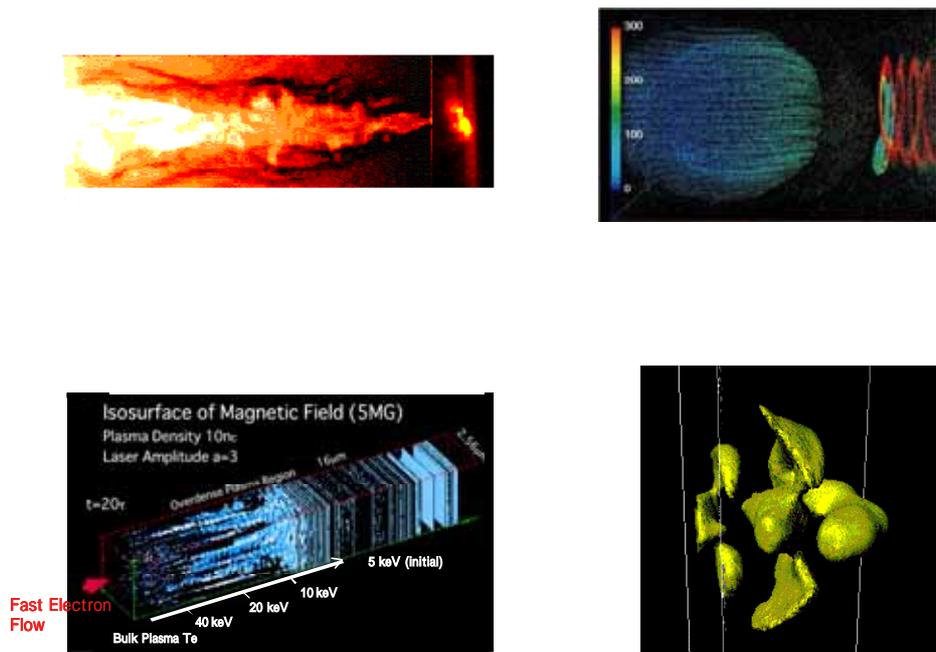


図10-1 大規模シミュレーション例

まとめ

(1) 核融合研究班のLHD実験遠隔参加プロジェクトは、平成14年度に名古屋大学、京都大学(宇治)の研究室がスーパーSINETを介して接続され、その後逐次九州大学、東京工業大学、広島大学、東北大学、東京大学、京都大学(吉田)と接続してきた。当初は研究室内LANとLHD実験LAN内のサーバと1対1の閉域接続であったが、核融合科学研究所内のネットワーク構成変更を行い、研究室LANとLHD実験LANの閉域(LAN to LAN)接続に変更した。これにより、研究室は核融合科学研究所の実験棟にいるのと同じネットワーク環境が実現された。研究室からLHD実験に直接参画が容易になり、実時間で実験データの収集・解析はもとより、計測装置の遠隔制御も可能となった。スーパーSINETの高速性とMPLSの閉域性によるセキュリティ確保により、研究室の研究者がLHD実験への遠隔参画が実現できた。

(2) 超伝導実験遠隔制御システム研究プロジェクトは、平成13年度に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とをスーパーSINETで接続した。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、核融合科学研究所側の研究者が遠隔制御システムを介して遠隔実験参加が実現した。平成14年度から平成16年度は引き続き、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。

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低温・超伝導グループとの双方向型共同研究の遂行、さらに九州大学超伝導研究センターを含めたネットワーク構築が超伝導関連の研究進展に寄与するものと期待される。

(3) 大学共同利用機関に設置された大型核融合装置の実験にスーパーSINETを介して大学の研究室から直接参画できることは、大学院学生に対する教育効果が高く、後継研究者の育成と増加につながり、波及効果は大きい。今後も遠隔参画を希望している大学の研究室に対して、計画的にスーパーSINET接続を行っていく必要がある。

(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、次年度には進展を図る予定である。