

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

平成17年度SNET (スーパーSINET利用共同研究用ネットワーク)  
利用成果報告

Summary Report using SNET  
(Network for Collaboration using Super-SINET)  
in the 2005 fiscal year

編集 SNET タスク  
Edited by the SNET Task  
(Received - Sep. 25, 2006 )

NIFS-MEMO-51

Nov. 2006

RESEARCH REPORT  
NIFS-MEMO Series

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. The views presented here are solely those of the authors. This document is intended for information only and may be published in a journal after some rearrangement of its contents in the future.

Inquiries about copyright should be addressed to the Research Information Office, National Institute for Fusion Science, Oroshi-cho, Toki-shi, Gifu-ken 509-5292 Japan.

E-mail: [bunken@nifs.ac.jp](mailto:bunken@nifs.ac.jp)

**<Notice about photocopying>**

In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright for clearance by the copyright owner of this publication.

Except in the USA

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)  
6-41 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan  
Phone: 81-3-3475-5618 FAX: 81-3-3475-5619 E-mail: [jaacc@mtd.biglobe.ne.jp](mailto:jaacc@mtd.biglobe.ne.jp)

In the USA

Copyright Clearance Center, Inc.  
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA  
Phone: 1-978-750-8400 FAX: 1-978-646-8600

平成 17 年度 SNET (スーパー-SINET 利用共同研究用ネットワーク) 利用成果報告

編集 SNET タスク 座長 堀内 利得  
幹事 津田 健三  
長山 好夫  
石黒 静児  
山本 孝志  
管理人 鷹見 重幸

**Summary Report using SNET  
(Network for Collaboration using Super-SINET)  
in the 2005 fiscal year**

Edited by the SNET Task: Ritoku HORIUCHI (Chair)  
Kenzo TSUDA  
Yoshio NAGAYAMA  
Seiji ISHIGURO  
Takashi YAMAMOTO  
Shigeyuki TAKAMI (Network Manager)

**Abstract**

NIFS (National Institute for Fusion Science) has been promoting the collaboration using Super-SINET, which is an ultra high-speed network managed by National Institute of Infomatics, since the 2001 fiscal year. Twelve cites in Japanese universities have been connected to Super-SINET by the 2005 fiscal year, and collaboration researches have been carried out in the following categories: the LHD remote participation; the remote use of supercomputer system; the all Japan ST (Spherical Tokamak) research program.

The “SNET Task” is organized in order to provide comfortable network environment to collaborators. This is the summary report of collaborations using Super-SINET in the 2005 fiscal year edited by the SNET Task.

Keywords: network, collaboration, LHD remote participation, remote use of supercomputer, Spherical Tokamak research program, Super-SINET

平成 17 年度 SNET( スーパー-SINET 利用共同研究用ネットワーク )  
利用成果報告

編集 SNET タスク 座長 堀内 利得、  
幹事 津田 健三、長山 好夫\*、  
石黒 静児\*\*、山本 孝志、  
管理人 鷹見 重幸\*\*\*

核融合科学研究所計算機・情報ネットワークセンター

\* 核融合科学研究所大型ヘリカル研究部

\*\* 核融合科学研究所理論・シミュレーションセンター

\*\*\* 核融合科学研究所技術部

## も く じ

### はじめに

#### 【1】SNET タスクの拡充

- ( 1 ) SNET タスク
- ( 2 ) 共同研究プロジェクト
- ( 3 ) ネットワークの再構築と遠隔ステーションの増設
- ( 4 ) ホームページの開設

#### 【2】ネットワークの再構築

- ( 1 ) 接続機関（遠隔ステーション）と通信先
- ( 2 ) 経路制御
- ( 3 ) 核融合科学研究所側のネットワーク
- ( 4 ) 遠隔ステーション側のネットワーク
- ( 5 ) 再構築のまとめ

#### 【3】成果報告

- ( 1 ) 超伝導実験遠隔制御システム
- ( 2 ) LHD 周辺プラズマ揺動計測
- ( 3 ) LHD プラズマの閉じ込め特性
- ( 4 ) ミリ波イメージング装置による揺動計測
- ( 5 ) LHD 高エネルギー粒子計測
- ( 6 ) 干渉計による密度揺動計測
- ( 7 ) LHD プラズマの高速画像計測
- ( 8 ) 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 次元イオン温度・流速分布計測
- ( 9 ) 偏光プラズマ分光
- ( 10 ) LHD プラズマ閉じ込めの遠隔実験解析
- ( 11 ) スーパー-SINET 速度測定
- ( 12 ) 九州大学プラズマ境界力学装置を用いる遠隔実験
- ( 13 ) 核融合におけるマルチスケールシミュレーションの研究

### まとめ

# 平成 17 年度 SNET (スーパーSINET 利用共同研究用ネットワーク) 利用成果報告

## はじめに

核融合科学研究所のスーパーSINET を用いた共同研究は平成 13 年度から開始され、平成 17 年度までに 12 機関とスーパーSINET で接続して共同研究が行われている。スーパーSINET は、国立情報学研究所が運営する日本の学術研究を飛躍的に発展・増進されることを目的とした超高速ネットワークです。核融合科学研究所ではつぎの分野を設定してスーパーSINET を用いた共同研究を行っている。

- 1)LHD 実験遠隔参加
- 2)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利用した大型シミュレーション研究
- 3)球形トカマク(ST)研究のバーチャルラボラトリ

「SNET タスク」は共同研究者に SINET 利用共同研究のネットワーク環境を提供し、その運用を行っている。平成 17 年度の SNET (スーパーSINET 利用共同研究用ネットワーク) 利用成果報告を SNET タスクとして、ここに取りまとめた。

|          |     |    |    |
|----------|-----|----|----|
| SNET タスク | 座長  | 堀内 | 利得 |
|          | 幹事  | 津田 | 健三 |
|          |     | 長山 | 好夫 |
|          |     | 石黒 | 静児 |
|          |     | 山本 | 孝志 |
|          | 管理人 | 鷹見 | 重幸 |

## 【1】SNET タスクの拡充

### (1) SNET タスク

スーパーSINET 利用共同研究用ネットワーク(SNET)を運用するために、これまで「LHD 実験遠隔参加タスク」が組織されていたが、後述する共同研究プロジェクトが創設されたのを機に、体制を再編成し「SNET タスク」として発足した。SNET タスクと共同研究委員会および国立情報学研究所スーパーSINET 推進協議会との関係は図1-1に示す。

SNET タスクは SNET 共同研究の代表者と所内世話人等から構成され、SNET タスクの運営のために座長と幹事を、管理・運用のために SNET 管理人を設け、平成 18 年 1 月から活動を開始している。

座長...堀内利得

幹事...津田健三、長山好夫、石黒静児、山本孝志

管理人...鷹見重幸

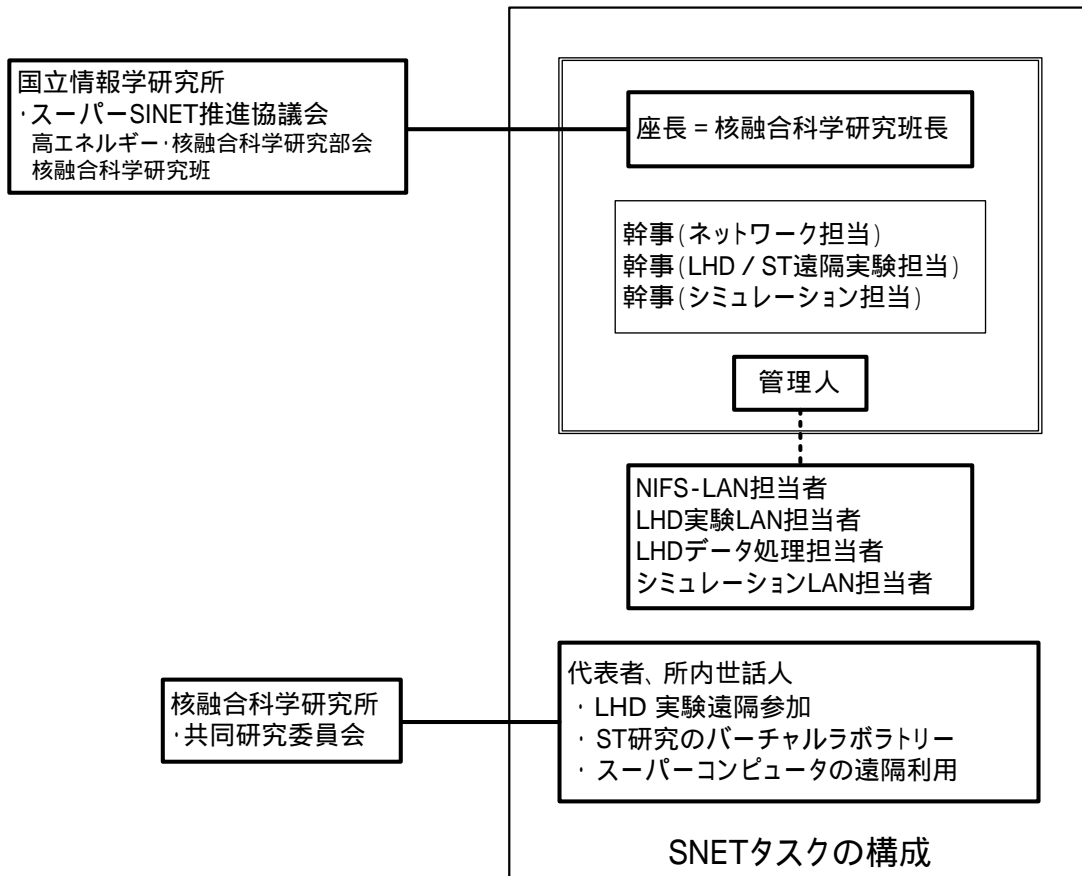


図1-1 SNET タスクの体制

SNET タスク構成員一覧を表1-1に示す。

表 1 - 1 SNET タスク構成員一覧

|        |                      |       |          |
|--------|----------------------|-------|----------|
| 堀内 利得  | 核融合科学研究所             | 津田 健三 | 核融合科学研究所 |
| 小川 雄一  | 東京大学高温プラズマ研究センター     | 長山 好夫 | 核融合科学研究所 |
| 森川 惇二  | 東京大学高温プラズマ研究センター     | 石黒 静児 | 核融合科学研究所 |
| 小野 靖   | 東京大学大学院工学研究科         | 山本 孝志 | 核融合科学研究所 |
| 高村 秀一  | 名古屋大学大学院工学研究科        | 鷹見 重幸 | 核融合科学研究所 |
| 大野 哲靖  | 名古屋大学エコトピア科学研究機構     | 須藤 滋  | 核融合科学研究所 |
| 山崎 耕造  | 名古屋大学大学院工学研究科        | 小森 彰夫 | 核融合科学研究所 |
| 有本 英樹  | 名古屋大学大学院工学研究科        | 江本 雅彦 | 核融合科学研究所 |
| 佐野 史道  | 京都大学エネルギー理工学研究所      | 中西 秀哉 | 核融合科学研究所 |
| 岡田 浩之  | 京都大学エネルギー理工学研究所      | 三戸 利行 | 核融合科学研究所 |
| 藤本 孝   | 京都大学大学院工学研究科         | 田村 仁  | 核融合科学研究所 |
| 岩前 敦   | 京都大学大学院工学研究科         | 柳 長門  | 核融合科学研究所 |
| 有本 元   | 京都大学大学院エネルギー科学研究科    | 増崎 貴  | 核融合科学研究所 |
| 飯尾 俊二  | 東京工業大学原子炉工学研究所       | 渡邊 清政 | 核融合科学研究所 |
| 筒井 広明  | 東京工業大学原子炉工学研究所       | 川端 一男 | 核融合科学研究所 |
| 間瀬 淳   | 九州大学産学連携センター         | 田中 謙治 | 核融合科学研究所 |
| 近木 祐一郎 | 九州大学産学連携センター         | 森崎 友宏 | 核融合科学研究所 |
| 矢木 雅敏  | 九州大学応用力学研究所          | 西浦 正樹 | 核融合科学研究所 |
| 佐藤 浩之助 | 九州大学応用力学研究所          | 磯部 光孝 | 核融合科学研究所 |
| 出射 浩   | 九州大学応用力学研究所          | 後藤 基志 | 核融合科学研究所 |
| 笹尾 眞實子 | 東北大学大学院量子エネルギー工学研究科  | 成嶋 吉朗 | 核融合科学研究所 |
| 北島 澄男  | 東北大学大学院量子エネルギー工学研究科  | 武藤 敬  | 核融合科学研究所 |
| 西野 信博  | 広島大学大学院工学研究科         | 中島 徳嘉 | 核融合科学研究所 |
| 西原 功修  | 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター | 宮沢 順一 | 核融合科学研究所 |
| 福田 優子  | 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター | 加藤 丈雄 | 核融合科学研究所 |

## ( 2 ) 共同研究プロジェクト

昨年度までは、スーパーSINET を利用する共同研究プロジェクトは「LHD 実験遠隔参加」のみであったが、平成 17 年度から新たに「ST (球形トカマク) 研究のバーチャルラボラトリー」と「スーパーコンピュータの遠隔利用」のプロジェクトが開始された。それぞれの共同研究プロジェクトの目的は次のとおりである。



・LHD 実験遠隔参加プロジェクト

平成 14 年度より実施しているプロジェクトで、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を目的としている。

・ST(球形トカマク)研究のバーチャルラボラトリープロジェクト

平成 17 年度に開始した新しいプロジェクトで、双方向型共同研究のもと、全国的な ST (球形トカマク) 研究のネットワークをスーパーSINET 上に構築し、超高ベータプラズマおよび超長時間運転に重点を置いた先駆的研究を推進する。

・スーパーコンピュータの遠隔利用プロジェクト

平成 17 年度に開始した新しいプロジェクトで、核融合科学研究所のスーパーコンピュータを遠隔地から利用し、大規模シミュレーション研究を推進する。

平成 17 年度の共同研究課題一覧を表 1 - 2 に示す。

表 1 - 2 平成 17 年度の研究プロジェクトと課題一覧

LHD 実験遠隔参加プロジェクト (代表: 小森 彰夫)

| 課 題   | 所 属 機 関                  | 共同研究<br>代 表 者     | NIFS 側<br>世 話 人           |
|---|--------------------------|-------------------|---------------------------|
| (超伝導実験遠隔制御システム)<br>LHD 磁場制御コイルをはじめとした高温超伝導コイルの様々な定常プラズマ閉じ込め装置への応用 | 東京大学<br>高温プラズマ研究<br>センター | 小川 雄一<br>(森川 惇二)  | 三戸 利行<br>(田村 仁)<br>(柳 長門) |
| LHD 周辺プラズマ揺動計測  | 名古屋大学<br>大学院工学研究科        | 高村 秀一<br>(大野 哲靖)  | 増崎 貴                      |
| LHD プラズマの閉じ込め特性   | 京都大学エネルギー<br>理工学研究所      | 佐野 史道<br>(岡田 浩之)  | 渡辺 清政                     |
| ミリ波イメージング装置による揺動計測  | 九州大学<br>産学連携センター         | 間瀬 淳<br>(近木祐一郎)   | 長山 好夫                     |
| 干渉計による密度揺動計測  | 東京工業大学<br>原子炉工学研究所       | 飯尾 俊二<br>(筒井 広明)  | 田中 謙治                     |
| LHD プラズマの高速画像計測   | 広島大学<br>大学院工学研究科         | 西野 信博             | 森崎 友宏                     |
| LHD 高エネルギー粒子計測  | 東北大学<br>大学院工学研究科         | 笹尾 眞實子<br>(北島 澄男) | 磯部 光孝<br>(西浦 正樹)          |
| 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 次元イオン温度・流速分布計測                         | 東京大学<br>大学院工学研究科         | 小野 靖<br>(河森栄一郎)   | 成嶋 吉朗                     |
| 偏光プラズマ分光  | 京都大学大学院工ネ<br>ルギー科学研究科    | 岩前 敦              | 後藤 基志                     |
| LHD プラズマ閉じ込めの遠隔実験解析*  | 名古屋大学<br>大学院工学研究科        | 山崎 耕造<br>(有本 英樹)  | 宮沢 順一                     |

**ST（球形トカマク）研究のバーチャルラボトリプロジェクト（代表：小森 彰夫）**

|                         |                        |                  |      |
|-------------------------|------------------------|------------------|------|
| 九州大学プラズマ境界力学装置を用いる遠隔実験* | 九州大学応用力学研究所炉心理工学研究センター | 佐藤 浩之助<br>(出射 浩) | 武藤 敬 |
|-------------------------|------------------------|------------------|------|

**スーパーコンピュータの遠隔利用プロジェクト（代表：岡本 正雄）**

|                            |                 |       |       |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|
| 核融合におけるマルチスケールシミュレーションの研究* | 九州大学<br>応用力学研究所 | 矢木 雅敏 | 中島 徳嘉 |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|

（課題名は、一般共同研究に応募された課題と異なるものもあります）

（\*は、平成 17 年度新規採択された課題を表す）

**（ 3 ）ネットワークの再構築と遠隔ステーションの増設**

平成 17 年度は、新規プロジェクトの開始に伴い SNET の再構築を行い、次の 3 箇所に遠隔ステーションを増設した。これらは国立情報学研究所の CSI 受託事業として実施した。

- ・九州大学応用力学研究所（スーパーコンピュータの遠隔利用プロジェクト）
- ・九州大学応用力学研究所炉心理工学研究センター（ST 研究のバーチャルラボトリプロジェクト）
- ・名古屋大学大学院工学研究科（山崎研究室）（LHD 実験遠隔参加プロジェクト）

**（ 4 ）ホームページの開設**

スーパーSINET 利用共同研究（SNET）に関する情報を発信するためのホームページを開設した。URL は、次のとおり。

<http://snet.nifs.ac.jp/>

図 1 - 2 に SNET Web のトップページ（ヘッダー部分）を示す。

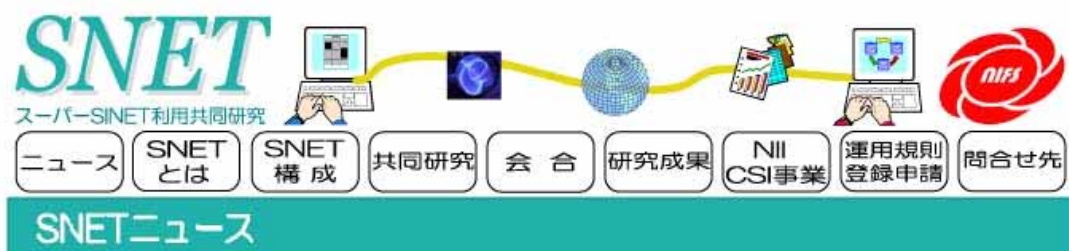


図 1 - 2 SNET のホームページ

## 【2】ネットワークの再構築

スーパーSINET 利用共同研究に採択された新規課題を遂行するために、ネットワーク (SNET) を再構築し、遠隔ステーションを増設した。これらは、国立情報学研究所の CSI (Cyber Science Infrastructure) 構築事業を受託して実施した。

### (1) 接続機関 (遠隔ステーション) と通信先

新規課題の接続機関 (共同研究プロジェクト) は、九州大学応用力学研究所 (スーパーコンピュータの遠隔利用) と九州大学応用力学研究所炉心理工学研究センター (ST 研究のバーチャルラボラトリー (V-Lab)) と名古屋大学大学院工学研究科 (山崎研究室) (LHD 実験遠隔参加) である。各共同研究プロジェクトの利用 (通信) 形態を表 2 - 1 に示す。

表 2 - 1 研究プロジェクトの利用形態

| プロジェクト名           | 利用 (通信) 形態                           |
|-------------------|--------------------------------------|
| LHD 実験遠隔参加        | 遠隔ステーションから核融合科学研究所の LHD 実験関連のサーバと通信  |
| ST 研究のバーチャルラボラトリー | 遠隔ステーション間の相互通信                       |
| スーパーコンピュータの遠隔利用   | 遠隔ステーションから核融合科学研究所のスーパーコンピュータシステムと通信 |

### (2) 経路制御

「ST 研究の V-Lab」と「LHD 実験遠隔参加」に参加する研究者は同じ学科あるいは研究室に所属するので、両プロジェクトのネットワーク制御は遠隔ステーション間の相互通信が可能となる方式にした。さらに遠隔ステーション側で個別に通信先の拒否指定ができるようにした。LHD 実験遠隔参加 / ST 研究の V-Lab 用遠隔ステーションおよび核融合研究所間の経路制御は、RIP v2 (Routing Information Protocol version 2) を採用した。

「スーパーコンピュータの遠隔利用」の遠隔ステーションは、核融合科学研究所のスーパーコンピュータシステムとの通信のみであるので、スタティックな経路制御とした。

「スーパーコンピュータの遠隔利用プロジェクト」の接続概要を図 2 - 1 に、「LHD 実験遠隔参加 / ST 研究の V-Lab プロジェクト」の接続概要を図 2 - 2 に示す。

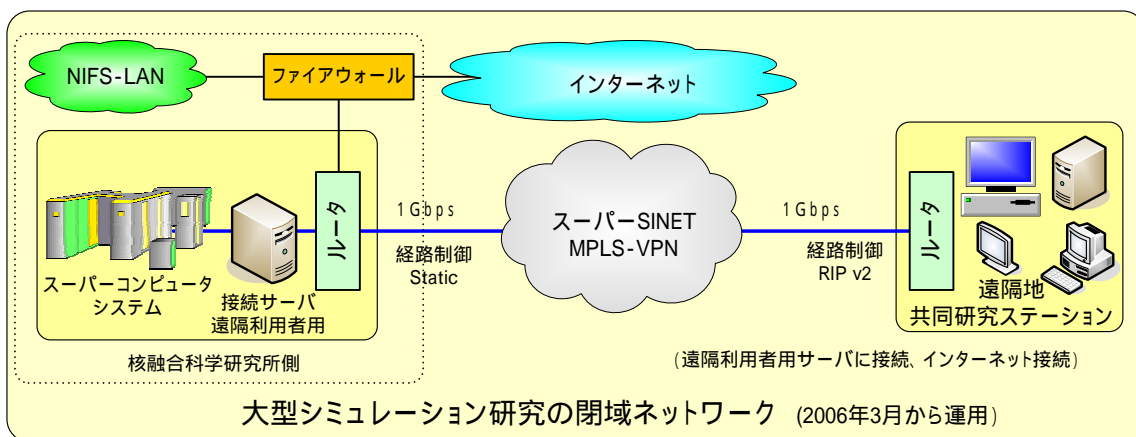


図 2 - 1 スーパーコンピュータの遠隔利用プロジェクトの接続概要

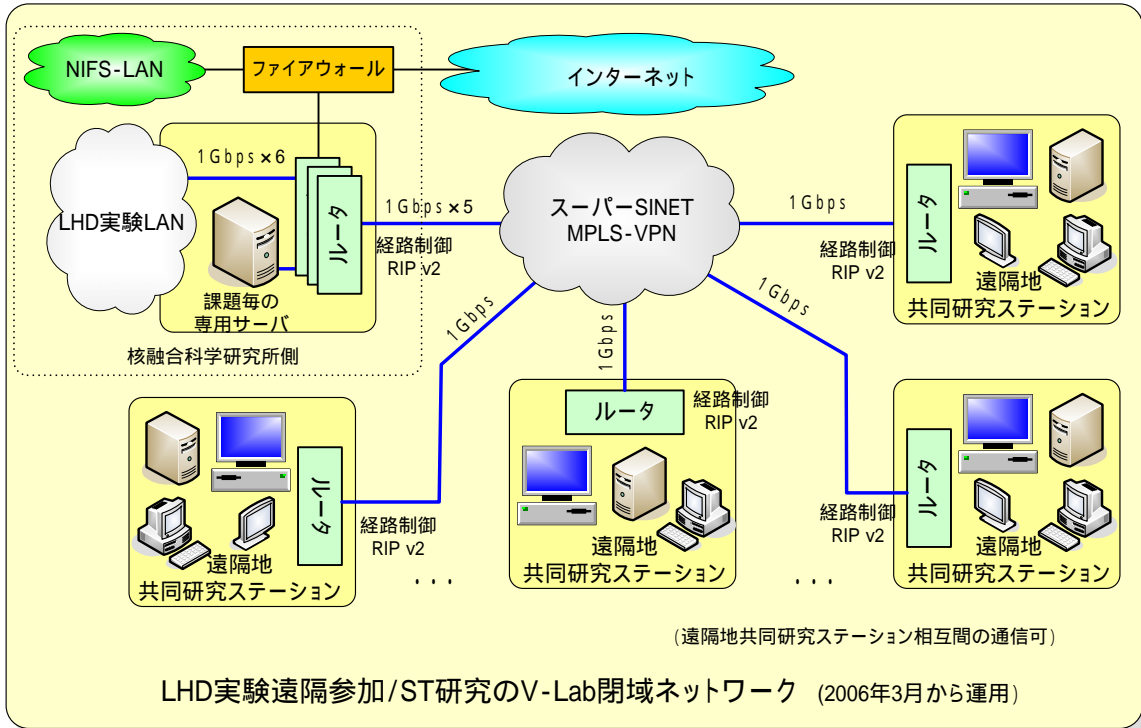


図 2 - 2 LHD 実験遠隔参加と ST 研究の V-Lab プロジェクトの接続概要

( 3 ) 核融合科学研究所側のネットワーク

核融合科学研究所に設置されているスーパーSINET ルータの使用状況を図 2 - 3 に示す。「LHD 実験遠隔参加 / ST 研究 V-Lab」用に 5 ポート、「スーパーコンピュータの遠隔利用」用に 1 ポート使用する構成に変更した。

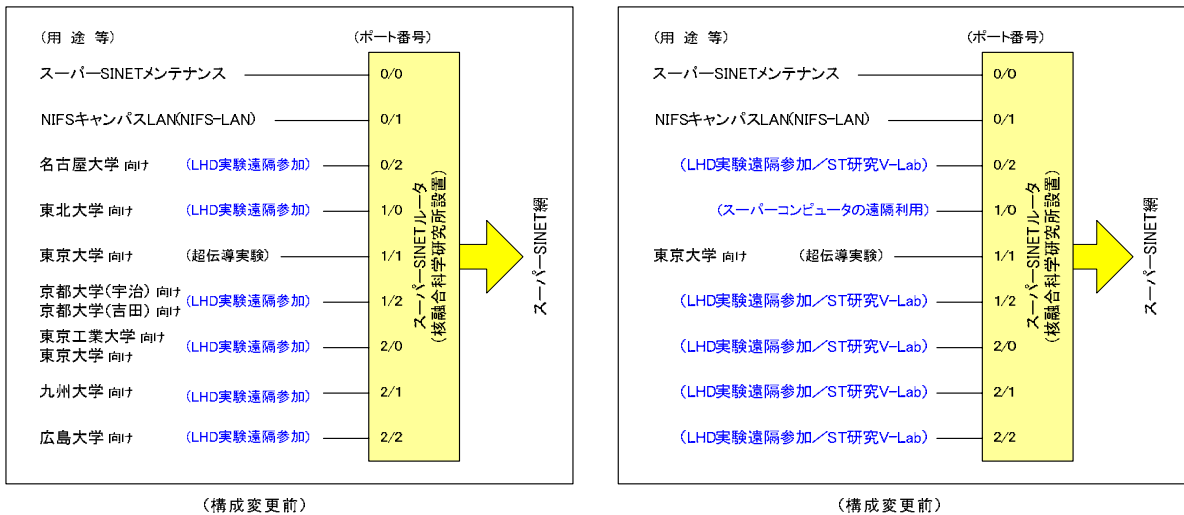


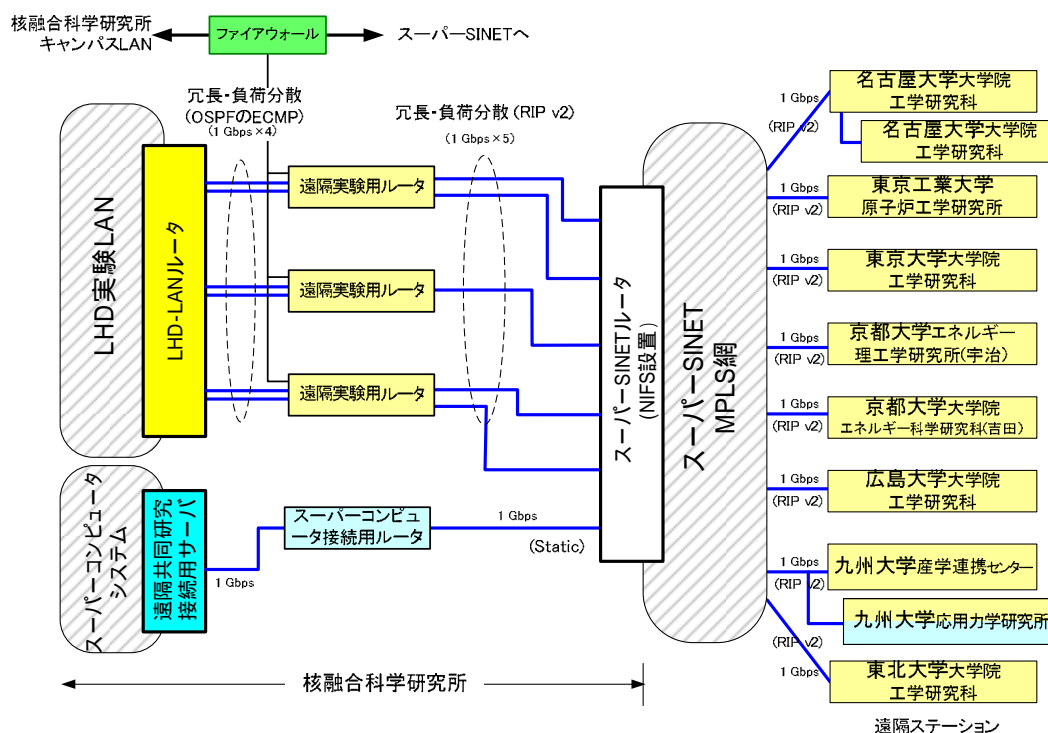
図 2 - 3 スーパーSINET ルータのポートの利用状況

核融合科学研究所内の接続概要を図 2 - 4 に示す。「LHD 実験遠隔参加 / ST 研究 V-Lab」

は、スーパーSINET ルータ - - 遠隔実験用ルータ (三台) - - LHD 実験 LAN のルータ - - LHD 実験 LAN の接続となる。スーパーSINET ルータと遠隔実験用ルータ(三台)間は、1Gether × 5 本で接続し、経路制御は RIP v2 を採用した。遠隔ステーションとの通信負荷を分散させた冗長接続となる。三台の遠隔実験用ルータと LHD 実験 LAN のルータ間は、経路制御 OSPF(Open Shortest Path First)を採用し、その ECMP(Equal Cost Multipath Protocol)機能により負荷分散を行う。ECMP 接続本数を 1Gbps × 6 本であるが、LHD 実験 LAN ルータの制約により、1Gbps × 4 本が有効となる。

「スーパーコンピュータの遠隔利用」は、スーパーSINET ルータ - - スーパーコンピュータ接続用ルータ - - 遠隔共同研究接続用サーバ - - スーパーコンピュータシステムの接続となる。経路制御はスタティックである。

遠隔ステーションから、LHD 実験 LAN あるいは遠隔共同研究接続用サーバ以外のパケットは核融合科学研究所のファイアウォールに送り経路を制御する。核融合科学研究所以外との通信は、通常のインターネット通信とみなしスーパーSINET 側にパケットを流す。核融合研究所内のサーバとの通信はファイアウォールでアクセス制限を行う。



(2006.07.19 K. Tsuda)

スーパーSINET利用共同研究用ネットワーク構成概略図

図 2 - 4 核融合科学研究所内の SNET 接続概要

#### (4) 遠隔ステーション側のネットワーク

既設の遠隔ステーション側ではレイヤー3 スイッチとスーパーSINET ルータ間の経路制御をスタティックから RIP v2 に変更した。

新設した名古屋大学大学院工学研究科（山崎研究室）の遠隔ステーションは、既設の高村研究室から学内光ファイバーで接続した。

九州大学応用力学研究所に、スーパーコンピュータ利用と ST 研究 V-Lab 用の遠隔ステーションを 2 箇所到新設した。応用力学研究所に L3 スイッチを、トライアム実験棟にスイッチングハブを設置した。遠隔ステーションから九州大学箱崎キャンパスに設置されているスーパーSINET ルータまでは、九州大学キャンパス LAN 内に VLAN を設定して接続した。九州大学内の接続概念図を図 2 - 5 に示す。

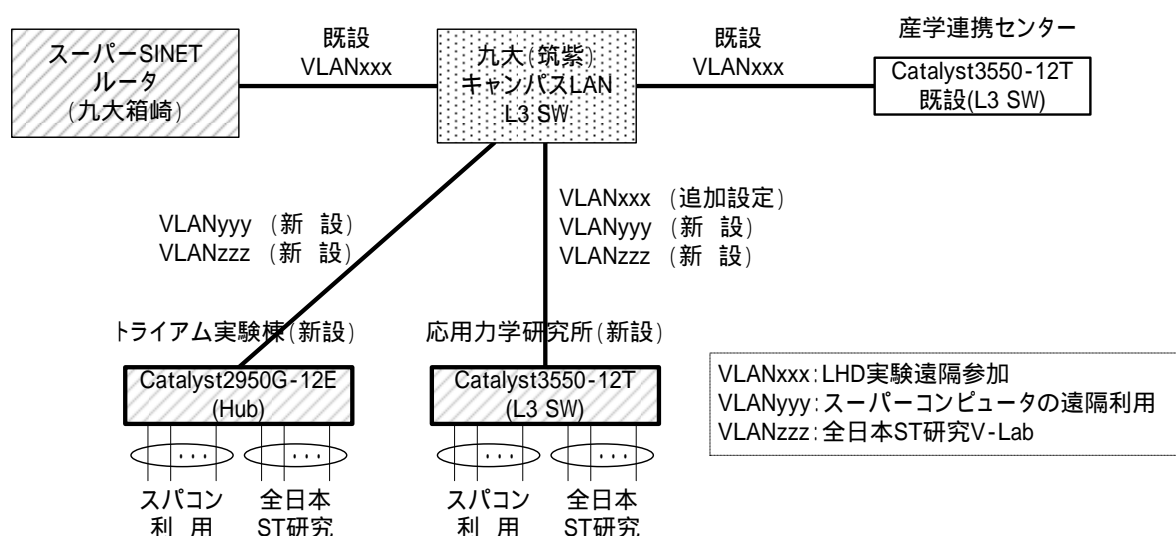


図 2 - 5 九州大学内の遠隔ステーション接続概念図

#### ( 5 ) 再構築のまとめ

- ・スーパーSINET 利用共同研究のプロジェクトが「LHD 実験遠隔参加」( 既設 ) 「スーパーコンピュータの遠隔利用」( 新設 ) 「ST 研究 V-Lab」( 新設 ) となり、各プロジェクトの遂行に合うネットワークを構築した。
- ・「スーパーコンピュータの遠隔利用」の遠隔ステーションから、核融合科学研究所内でスーパーコンピュータを利用する環境と同じネットワーク環境を実現させた。
- ・「LHD 実験遠隔参加」と「ST 研究 V-Lab」の遠隔ステーションは、遠隔ステーション相互間および核融合科学研究所 L H D 実験 LAN のアクセスが可能となった。
- ・核融合科学研究所内の LHD 実験 LAN との接続は、冗長性を持たせた負荷分散接続を実現させた。

( 謝 辞 ) SNET の再構築伴うスーパーSINET ルータの設定変更、国立情報学研究所の中尾実さんと秋吉さんに、また九州大学キャンパス LAN 内の VLAN 設定に際し、九州大学情報基盤センターの北祐一郎さんに多大なご支援をいただきました。紙面を借りてお礼を申し上げます。

( 文責 : 津田 健三 )

### 【3】成果報告

#### (1) 超伝導実験遠隔制御システム

|       |       |                  |
|-------|-------|------------------|
| 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         |

#### 1. はじめに

東京大学では、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開始した。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。東京大学と核融合科学研究所との共同研究による Mini-RT 装置の設計・建設・運転においてスーパーSINET の果たした役割は非常に大きかった。

#### 2. 超伝導コイルの冷却・励磁試験における遠隔実験参加

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 装置本体での高温超伝導コイルの冷却・励磁試験では、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た。ただし一般的に、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。

### 3．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

高性能プラズマを得るためには、磁気浮上コイルである必要がある。従って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 FB-RT 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。

### 4．YBCO 等の先進材料への発展

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ている。ここではまず直径 90mm 程度のコイルを製作した。AMSC 社の線材では特に線材の反りや巻き戻し効果もなくコイルが製作できた。これを液体窒素で冷却し永久電流モードで励磁した後、FB-RT 装置で磁気浮上実験を行い、数分にわたり安定に制御出来る事が示せた。

### 5．遠隔操作 / 制御システムの公開

スーパーSINET の高速情報通信により可能となった遠隔操作 / 制御システムのような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（SSH や SPP 活動など）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。



**【参考文献】**

- N. Yanagi, T. Mito, T. Hemmi, K. Seo, J. Morikawa, Y. Ogawa, M. Iwakuma., "Effective Resistance of the HTS Floating Coil of the Mini-RT Project", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15, No. 2 (2005) pp.1399-1402.

## (2) LHD 周辺プラズマ揺動計測

|       |           |                 |
|-------|-----------|-----------------|
| 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所 |
|       | 辻 義之      | 名古屋大学大学院工学研究科   |
|       | 長瀬 友明     | 名古屋大学大学院工学研究科   |
|       | 増崎 貴      | 核融合科学研究所        |
|       | 森崎 友宏     | 核融合科学研究所        |
|       | 小森 彰夫     | 核融合科学研究所        |
|       | V. Budaev | クルチャトフ研究所       |

### 研究概要

LHD 周辺プラズマ中の密度揺動を、大型ヘリカル装置（岐阜県土岐市）に設置されたダイバータプローブ群を用いて、遠隔地（名古屋大学）より計測を行う。取得された高時間分解長時間データ（1 プローブあたり 30MB）の解析を、確率密度関数(p.d.f), Wavelet 変換をベースとした統計的解析を行い、その特性を明らかにする。今年度は小さなプラズマの塊（blob）が磁力線を横切って輸送される非拡散的輸送現象に着目して解析を行い、ヘリカル装置における周辺プラズマ中の輸送現象に対する非拡散的輸送の役割を明らかにする。

### 研究成果

図 1 は、磁場解析コードにより計算された LHD 周辺磁場構造を表す。図 1 (a) は、磁力線の接続長（磁力線を追跡して、磁力線がダイバータ板上のある位置から出発して、真空容器まで達するまでの距離）の分布を示している。図中の  $R_{ax}$  は磁気軸を、また番号が記されている黒丸はプローブの位置を示している。プローブが設置されているダイバータ板の構造を図 1(b)に、その周りの磁場強度分布を図 1(c)に示す。図 1(a)より、磁力線の接続長は、プローブの位置により大きく異なることが分かる。今回は、磁気軸 3.53m のデータ解析を主に行い、特に磁力線の接続長が短く弱磁場側に位置するプローブ 9、磁力線の接続長が長いプローブ 10、磁力線の接続長は比較的短く、強磁場側に位置するプローブ 11 の解析を行った。

図 2 に解析結果の概要を示す。図 2(a)-(c)に示されているように、揺動の特性はプローブ位置で著しく異なる。プローブ 9 では、間欠的な正のスパイクが観測される。それに対してプローブ 10 では、間欠的な負のスパイクが観測される。一方プローブ 11 には、スパイク状の波形は観測されていない。確率密度関数を用いて各信号の解析を行ったところ、プローブ 9 では  $Skewness=1.23$ ,  $Flatness=6.46$ , プローブ 10 では  $Skewness=-0.42$ ,  $Flatness=3.51$  が得られた。信号が完全に乱雑（ポアソン過程）の場合は、 $Skewness$  は 0,  $Flatness$  は 3 の値をとる。よって、プローブ 9, 10 のデータはポアソン過程に従っておら

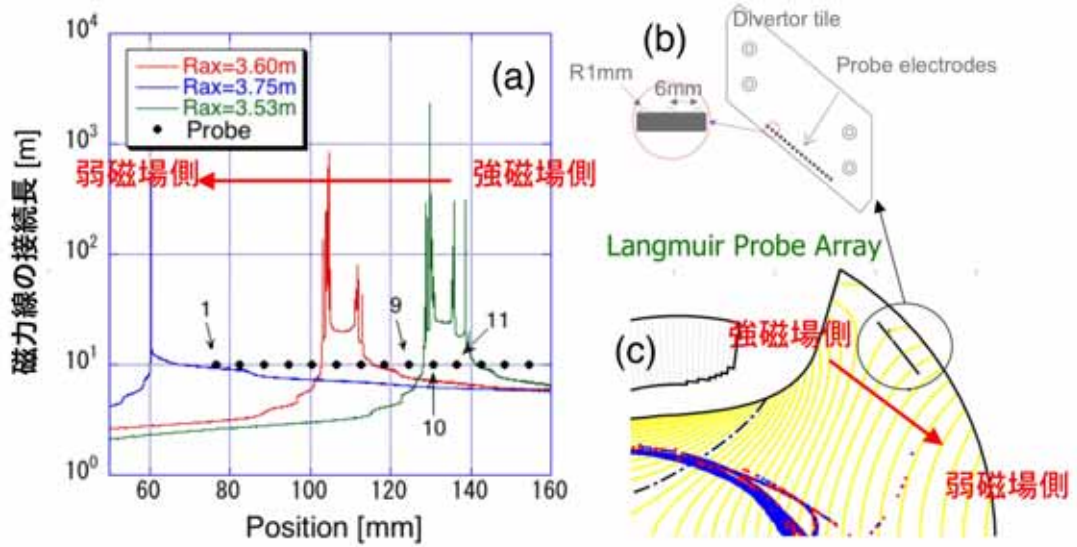


図1 大型ヘリカル装置(LHD)の周辺磁場構造。(a)磁力線の接続長分布，図中の黒丸はダイバータプローブの位置を表す。(b)ダイバータプローブアレイの構造。(c)ダイバータプローブ周辺の磁場強度の等高線分布．コイルに近い方が強磁場側となる．

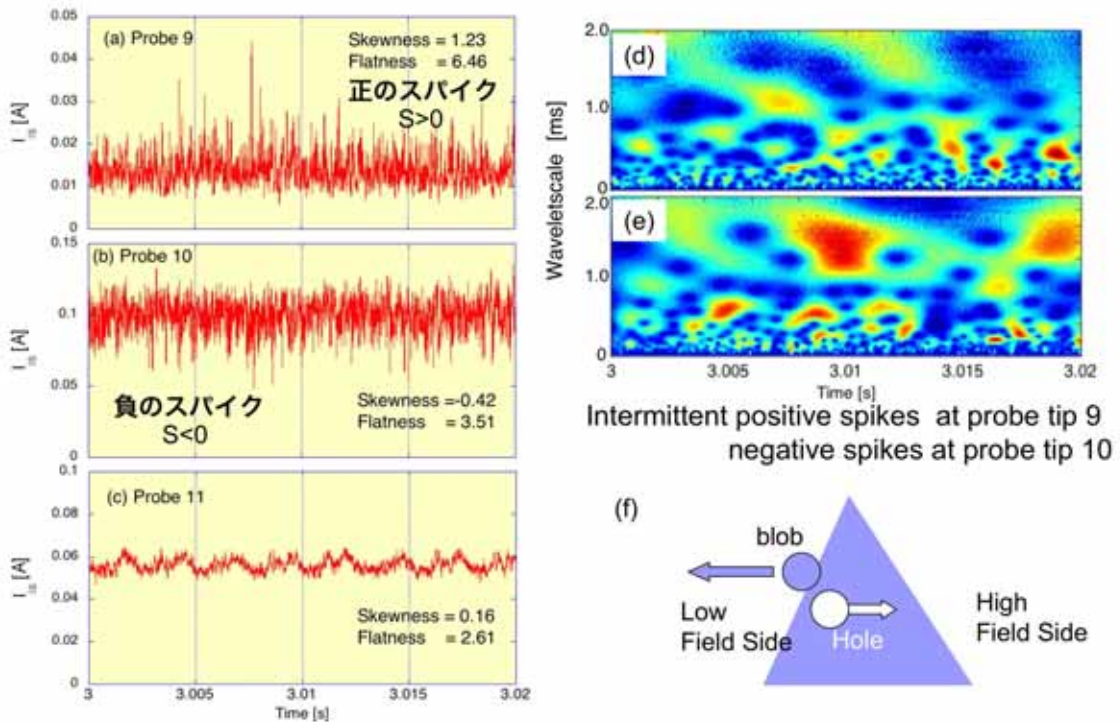


図2 解析結果の概要：(a)。(b)。(c)プローブ9，10，11で計測されたイオン飽和電流の時間発展。(d)。(e)図(a)。(b)の時系列データのWavelet解析結果，(f)プラズマブロップ(Plasma Blob)輸送の説明図．

ず、現象が拡散的ではないことを示唆している。一方、プローブ 11 のデータはよりポアソン過程に近いことがわかる。図 2 (d), (e) は、それぞれプローブ 9, 10 データの Wavelet 解析結果を示している。解析結果により、2 信号に非常に強い相関があることがわかる。

以上の結果より、図 2(f) のような物理描象が得られる。プローブ 9, 10 間で密度 blob と密度 hall が不安定性などにより間欠的に発生し、密度 blob は弱磁場側に、密度 hall は強磁場側に伝搬する。以上の結果は、トカマク型で観測されている密度 blob 伝搬と共通の現象であると考えられる。

### まとめ

ダイバータプローブアレイにより遠隔計測された LHD 周辺プラズマ揺動の解析を行い、揺動特性が周辺磁場構造に大きく依存することを明らかにし、トカマク型装置において観測されている密度 blob 伝搬に類似した現象を見いだした。

### 参考文献

[1] “Analysis on Relation between Magnetic Structure and Bursty Fluctuation in SOL/Divertor Plasmas of LHD”, N. Ohno, S. Masuzaki *et al.*, to be appeared in Contrib. Plasma Physics.

### (3) LHD プラズマの閉じ込め特性

|       |       |                   |
|-------|-------|-------------------|
| 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の実現には高温・高密度のプラズマを一定の時間以上閉じ込め、さらに発電に利用するためにはこれを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、プラズマを長時間維持するためには、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、不純物の低減およびヘリウム灰の効果的な除去を実現して燃焼効率を上げることが重要である。

本研究では、ヘリカルプラズマの閉じ込め特性を理解するために、粒子及びエネルギー閉じ込めに関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、スーパーSINET を利用した遠隔実験を含めて LHD 実験に参加し、LHD プラズマの閉じ込め特性の評価を行う。

#### 研究目的

プラズマを長時間維持するためには、プラズマの粒子バランスを制御する必要があり、外部からの粒子補給、真空容器壁面やダイバータプレートとのプラズマ - 壁相互作用によるリサイクリングを適切に制御するための知見を得る必要がある。このため、本研究では、NBI (中性粒子ビーム入射) 加熱による LHD プラズマの、周辺・ダイバータ領域における中性水素原子の挙動を解明し、水素リサイクリングに関する知見を得ることを目的とする。水素原子の挙動を表す重要なパラメータは、速度分布関数および集団的な流れの速度であり、これらの評価には、分光学的な手法に基づいて水素原子の発光線スペクトルプロファイル計測を行うのが有効である。周辺領域では閉じ込め領域に比べて電子温度が低く、多くの中性水素原子が存在するが、その発生過程は様々である。すなわち、真空容器壁やダイバータプレート表面での反射、壁面から遊離した分子の解離、損失イオンと中性原子の荷電交換反応等、様々な過程に起因する中性水素原子が存在し、これらはそれぞれに発生過程を反映したエネルギーを持つ。したがって、Doppler 効果により、これら各過程で生成した原子の速度分布および流れの速度が発光線スペクトルプロファイルに反映される。

#### 研究成果

エッセル型回折格子を用いた逆線分散 0.0024 nm/pixel の高分解能可視分光器により、

水素原子の Balmer- $\alpha$  ( $H\alpha$ ) 線スペクトルプロファイル計測を行った。2次元イメージ光ファイバーアレイ（トロイダル方向3本，ポロイダル方向10本）により計30本の視線を有し、空間分解された計測が可能である。計測はスーパーSINET経由でLHD-LAN内の計測用ホストを遠隔操作することで京都大学エネルギー理工学研究所からでも可能である。図1に計測系の概略を、図2に遠隔実験の様子を示す。

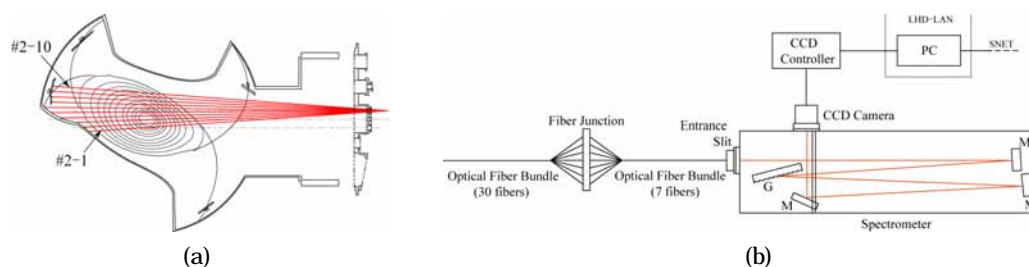


図1．計測系の概略。(a)計測ポロイダル断面における視線の配置，(b)分光計測システム。

今年度は最近の LHD 高密度実験で得られているデタッチメント[1]に着目し、アタッチメント，デタッチメントそれぞれについて、スペクトルの解析から得られるパラメータの電子密度に対する依存性の評価を行った。図3に観測されたスペクトルの一例を示す。得られたスペクトルは Narrow 成分（3~4 eV）と Broad 成分（20 eV 以上）の2温度を仮定した Gaussian プロファイルの重畳として表すことができた。Narrow 成分は分子の解離により生じた低温の原子の発光の寄与を、Broad 成分は真空容器壁面やダイバータプレートでの反射や荷電交換反応を経た原子等の高温の原子による発光の寄与を表していると考えられる。デタッチメントの場合には、ダイバータフラックスが大幅に減少し、周辺部の電子温度の低下が見られる。したがって、アタッチメントの場合に見られる高温成分の短波長側へのシフト（視線に沿って近づく方向）が見られなくなり、Doppler 幅も小さくなると考えられる。図4に  $H\alpha$ 線強度、中心波長のシフト量から見積もった流れの速度、半値幅から見積もった発光原子の温度の線平均電子密度に対する依存性を示す。アタッチメントの場合、線強度については Narrow 成分、Broad 成分ともに密度とともに増加する。ダイバータフラックスも同様の依存性を示し、ダイバータフラックスとの相関が示唆される。流れの速度、温度については Broad 成分で密度の増加に伴う減少が見られ、周辺電子温度の低下の影響がうかがえる。Narrow 成分については依存性が見られなかった。デタッチメントの

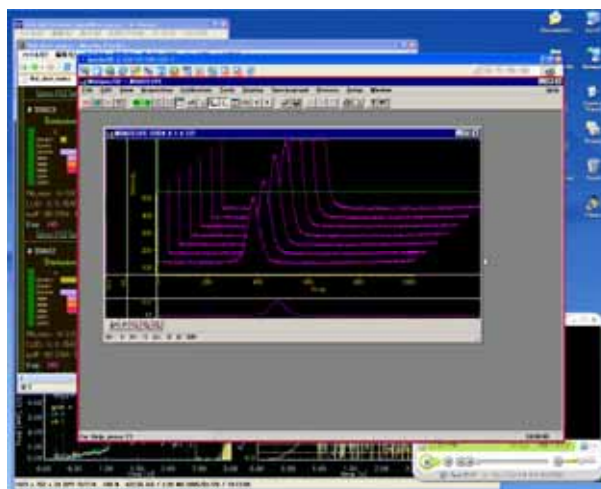


図2．遠隔実験の様子。LHD-LAN内の計測用ホスト（赤枠内）を遠隔操作

（視線に沿って近づく方向）が見られなくなり、Doppler 幅も小さくなると考えられる。図4に  $H\alpha$ 線強度、中心波長のシフト量から見積もった流れの速度、半値幅から見積もった発光原子の温度の線平均電子密度に対する依存性を示す。アタッチメントの場合、線強度については Narrow 成分、Broad 成分ともに密度とともに増加する。ダイバータフラックスも同様の依存性を示し、ダイバータフラックスとの相関が示唆される。流れの速度、温度については Broad 成分で密度の増加に伴う減少が見られ、周辺電子温度の低下の影響がうかがえる。Narrow 成分については依存性が見られなかった。デタッチメントの

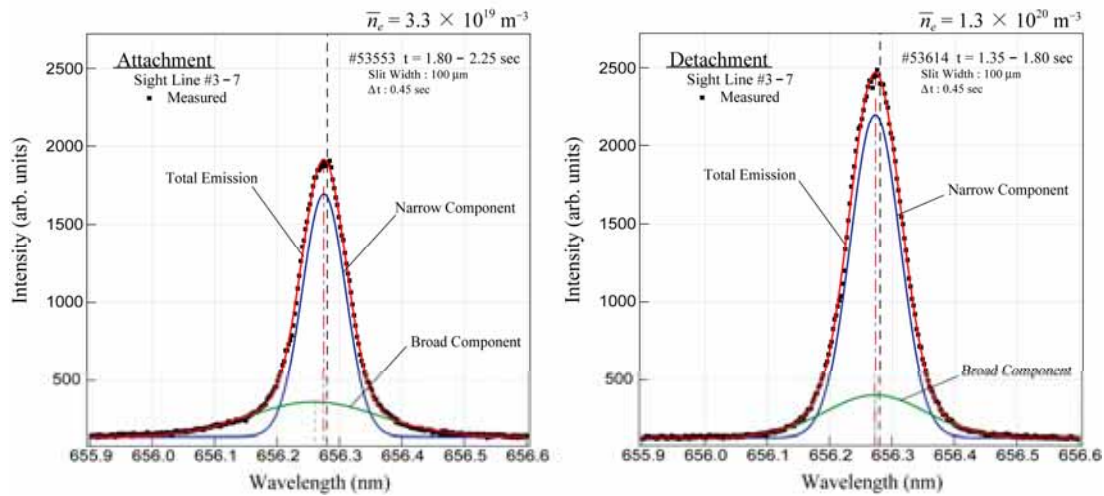


図3 . H $\alpha$ 線スペクトルプロファイル。左が Attachment , 右が Detachment の場合である。

場合、線強度は両成分ともばらつきがあるものの、高密度・高パワーであるほど大きい傾向がある。ダイバータフラックスは大幅に減少しており、発光位置、水素原子の生成過程ともに変化していると考えられる。また、流れの速度、温度については依存性が見られない。Broad 成分の温度についてはアタッチメントの場合よりも低下しており、これについても周辺電子温度の低下の影響が示唆される。

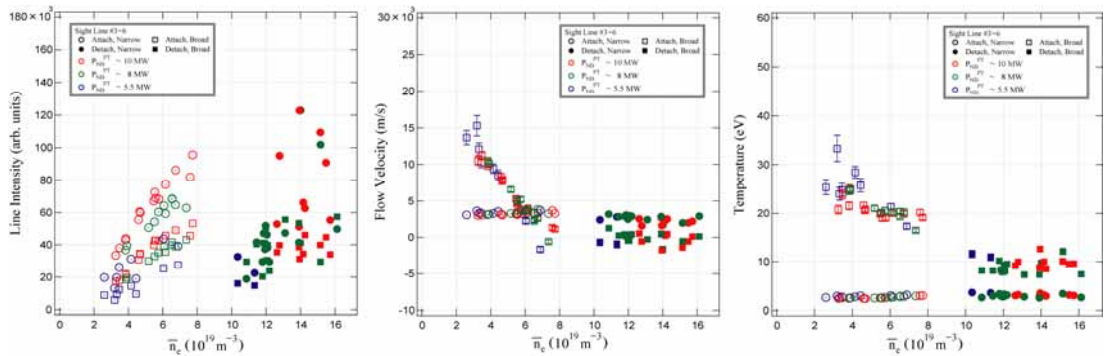


図4 . 各パラメータの電子密度依存性。左から線強度 , 流れの速度 , 温度である。

## まとめ

LHD ダイバータ領域での水素リサイクリングを研究するために、H $\alpha$ 線スペクトルプロファイルの高分解計測を行った。スーパーSINET 経由での京都大学エネルギー理工学研究所からの遠隔計測が可能である。LHD で観測されているデタッチメントについて、スペクトルの解析により Narrow 成分、Broad 成分の線平均電子密度に対する依存性を明らかにした。デタッチメントに伴うダイバータフラックスの大幅な減少、周辺電子温度の低下により、中性水素原子の生成過程および発光位置の変化を示唆する結果が得られた。今後さらに定量的な解析へとつなげていく予定である。

### 今後の計画・課題

水素リサイクリングを評価するためのデータをさらに蓄積し、数値モデルとの比較を行いながら、ダイバータ領域における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。

[1] J. Miyazawa *et al*, J. Plasma Fusion Res. **81**(2005) 5 331



#### (4) ミリ波イメージング装置による揺動計測

|       |        |              |
|-------|--------|--------------|
| 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 | 九州大学産学連携センター |
|       | 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。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。

#### 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により、LHD への定期的な実験参加を図っていくことを目的としている。

#### 研究内容・成果

##### A. 超短パルス反射計

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 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遜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，Signal Record Analysis (SRA) 法により密度分布として再構成される。

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。さらに，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，アンテナ角度遠隔制御装置を導入している。制御プログラムは Visual Basic net を利用して構築，

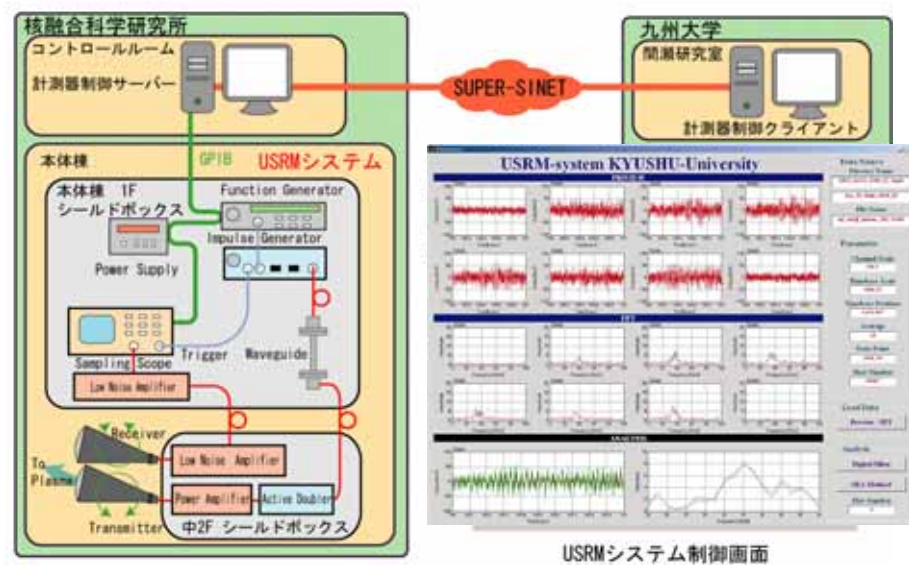


図1 遠隔実験システムを用いた超短パルス反射計装置。

構築したプログラムは GUI 化され，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。

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1右下に示す。左側が反射波とスペクトルの時間変化を，右側が制御パラメータを示す。

平成17年度も本システムによりルーチン的な測定を進めてきている。反射計で密度分布を再構成する際，密度がゼロになる値，すなわち初期値を設定する必要がある。昨年度はLHDのセパトリティクス位置を初期値と設定していたが，平成17年度では，遠赤外レーザー干渉計で得られた分布を参照して初期値を設定する試みを行っている。

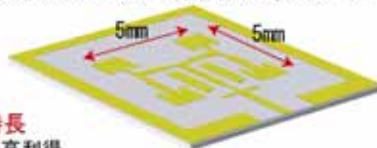
## B．電子サイクロトロン放射イメージング

ミリ波を用いたイメージング測定は、位相イメージング、電子サイクロトロン放射イメージング (ECEI)、反射計イメージング (MIR) と適用が広がっている。ミリ波イメージング装置ではヘテロダイン検波方式が多く使用されており、SN 比の向上のため中間周波数 (IF) として 1-10 GHz を利用することが多い。また、イメージング計測のためには多チャンネル方式が不可欠となっている。特に電子温度揺動測定では ECEI 装置で受信される温度揺動信号の強度が装置雑音や熱雑音と同程度なため、高精度なシステムの開発が要求されている。

ECE 信号を受信するアンテナアレイの性能は非常に重要であり、ゲイン、帯域等を評価基準として高性能化を図ってきた。当研究室でもボウタイアンテナ、ダブルバランストミキサアンテナ (DBMA) などの製作評価を行ってきたが、図 2 に示すパッチアンテナを用いると、研究室内での製作も可能で最適化が容易であるため、本アンテナでの測定準備を進めている。IF 回路の集積化及び多チャンネル化も進めている。アンテナアレイで受信される ECE 信号は局部発振器の LO 信号によりヘテロダイン検波され、IF 信号受信回路で処理される。IF 信号回路の製作にはマイクロストリップ線路を用いた。広帯域及び狭帯域アンプ、帯域通過フィルタ、検波器より構成される。電磁界シミュレータによる設計と開発を行い、基板加工装置による加工作業、実測による試験と評価を行った。受信回路の広帯域及び狭帯域アンプは回路パターンに半導体素子などを組み込み製作した。製作された回路の特性を評価し、図 3 に示すように、シミュレーションとほぼ対応する結果が得られた。

今回製作した検出器アレイおよび IF 回路を LHD の ECEI に設置するべく準備中である。光学系は図 4 にも示されるマイクロ波イメージング反射計 (MIR) の光学系を利用し、ダイクロイックフィルタで分離することにより MIR と ECEI の同時測定が可能となる。17 年度の実機実験を目標としている。

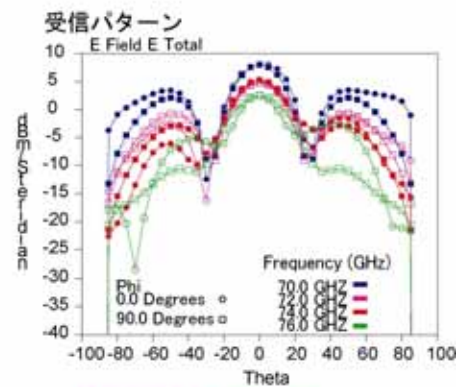
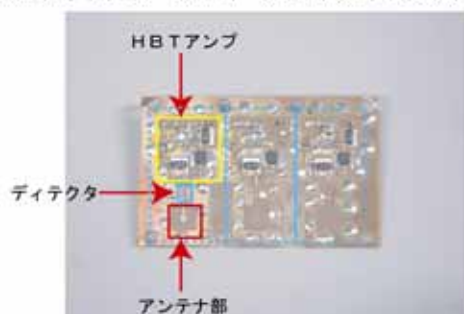
ECE受信用アンテナの開発 (4 patch array)



**特長**

- ・高利得
- ・アンバランス出力のため信号の取出しが容易
- ・製作が容易 (基板製作システムで製作時間3h)

ECEディテクターアレイ (プロトタイプ, 3ch)



70-76GHzの周波数帯域で軸対称な受信パターンを実現した。

図 2 70 GHz 帯用イメージングアレイと受信パターン。

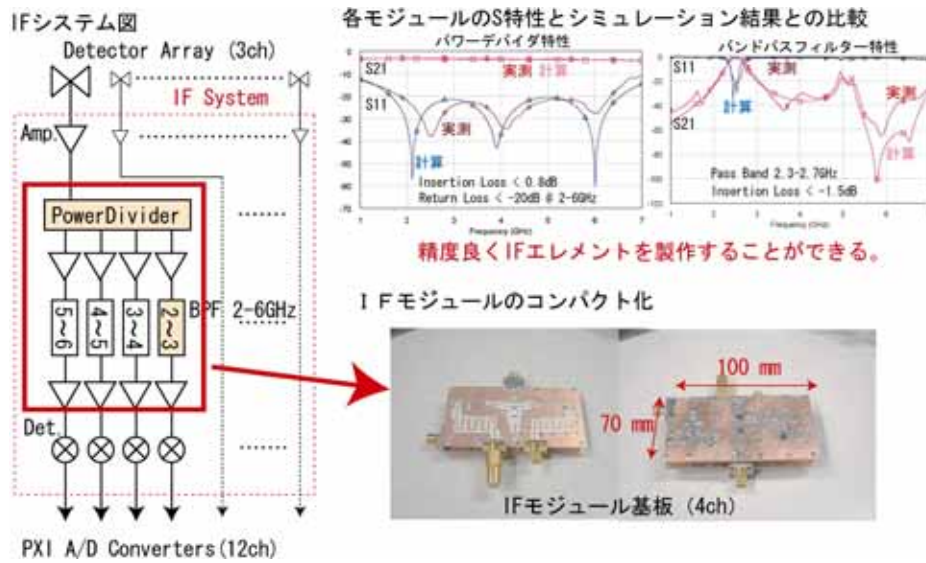


図3 マイクロ波集積回路技術を用いたIF回路の製作。

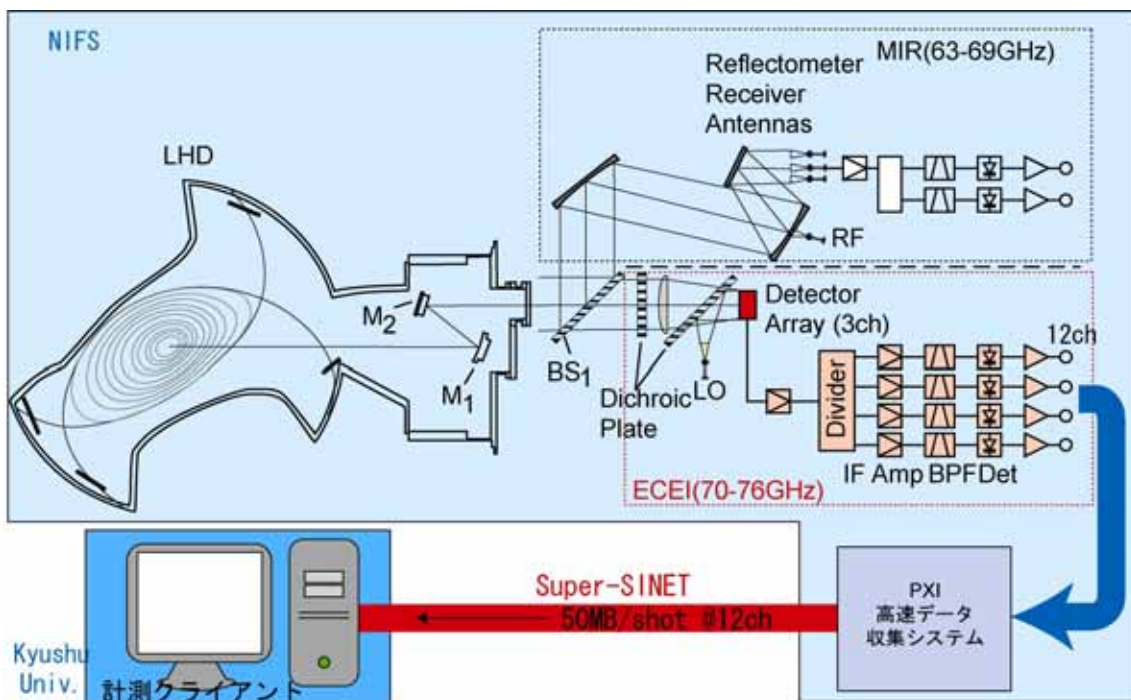


図4 Super-SINETを用いたミリ波イメージングシステム。

### まとめ

超短パルス反射計システムではルーチン的な稼動を進めてきた。また、電子サイクロトロン放射イメージングのためのイメージングアレイおよびIF回路の設計・製作を進め、LHD本体への適用を進めた。

## 今後の計画・課題

超短パル反射計および電子サイクロトロン放射イメージング装置について，平成 18 年度システムの信頼度向上を図り，オンラインでの LHD 周辺プラズマの密度分布情報ないし，電子温度スペクトルの情報提供を図っていく。

### 【参考文献】

- [1] 横田，間瀬，内田，近木，徳沢，川端，田中，長山，第22回プラズマ・核融合学会年会，タワーホール船堀 (2005).
- [2] 横田，間瀬，内田，近木，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 第9回支部大会，長崎 (2005).
- [3] 工藤，近木，間瀬，伊藤，長山，山口，川端，坂田，大山，第 22 回プラズマ・核融合学会年会，タワーホール船堀 (2005).
- [4] 工藤，近木，間瀬，伊藤，長山，山口，川端，坂田，大山，プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第9回支部大会，長崎 (2005).
- [5] Y. Kogi, A. Mase, K. Kudo, M. Ignatenko, N. Ito, T. Tokuzawa, Y. Nagayama, K. Kawahata, M. Aoi, E. Sakata, Int. J. Infrared and Millimeter Waves (to be published).

## (5) LHD 高エネルギー粒子計測

|       |        |                     |
|-------|--------|---------------------|
| 責任者   | 笹尾 眞實子 | 東北大学大学院量子エネルギー工学研究科 |
| 参加研究者 | 北島 純男  | 東北大学大学院量子エネルギー工学研究科 |
|       | 田中 豊   | 東北大学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 充孝  | 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1)。シンチレーター上の各点(図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の計数値(損失イオン数)の相関を図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。

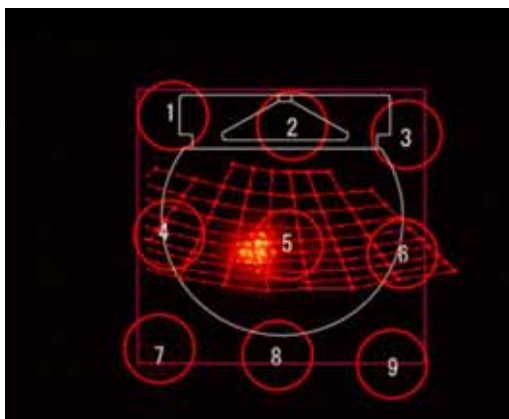


図1 シンチレーター上の発光箇所



図2 5番(図1)の発光強度時間変化

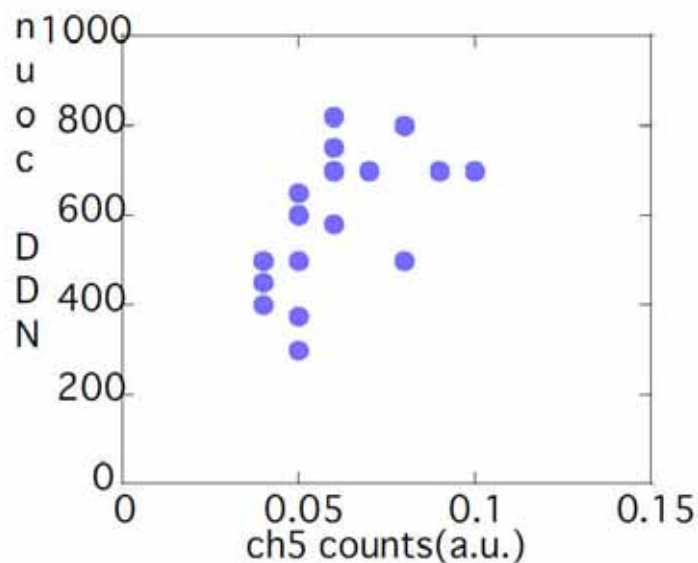


図3 NDD-count との相関

### 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



## (6) 干渉計による密度揺動計測

|       |       |                |
|-------|-------|----------------|
| 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       |
|       | 秋山 毅志 | 核融合科学研究所       |
|       | 川端 一男 | 核融合科学研究所       |
|       | 岡村 昇一 | 核融合科学研究所       |
|       | 岡島 茂樹 | 中部大学           |

### 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 及び CHS 装置に設置した干渉計用レーザーにより得られた干渉及び散乱データをもとに、密度揺動解析を行う。

### 研究目的

まず、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か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により、最大 65Mbps の転送速度が得られた。本年度は、CHS の HCN レーザー干渉計のプローブームを用いたヘテロダイン散乱計測により得られた揺動データの転送及び、スペクトル解析を行った。図 1 に H モード放電での、加熱とガスパフタイミング、線平均密度、 $H_{\alpha}$  線強度、プラズマ蓄積エネルギーの時間変化、及び、電子密度揺動の時間変化を示す。ETB は 2 台の NBI 入射後、約 53 ms において  $H_{\alpha}$  線信号に急激な自発的減少として観測された。この時、プラズマ蓄積エネルギーが上昇し、電子密度揺動が減少していることが分かる。

次に、リヒートモード放電と呼ばれる、比較的強いガスパフを切った後にプラズマ蓄積エネルギーが過渡的に上昇する放電について調べた。図 2 に線平均電子密度、加熱パワーとガスパフ、プラズマ蓄積エネルギーの時間変化、及び、密度揺動の 2 乗に比例する値である揺動スペクトルの積分値と線平均電子密度の関係を示す。リヒート前は密度が上昇するにつれて揺動は増加しており、リヒートを開始すると急激に揺動が減少し、プラズマ蓄積エネルギーが減少に転じた後にスペクトル強度の増加が見られた。

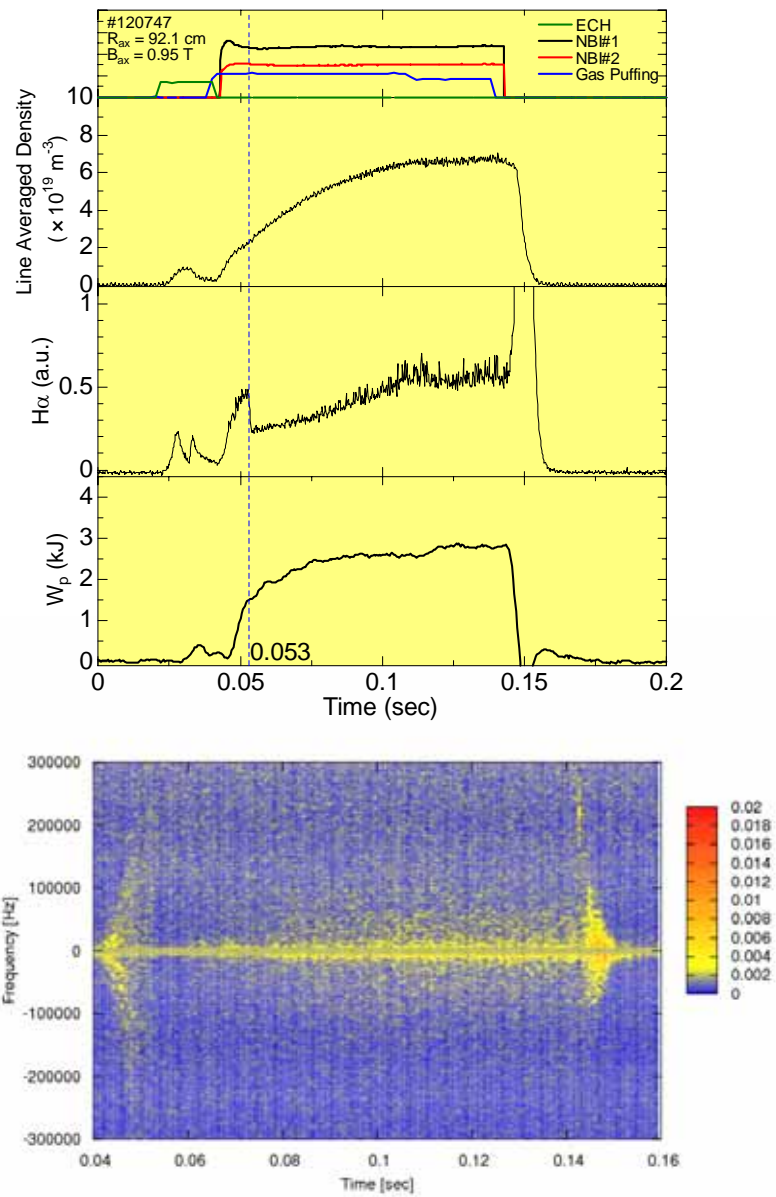


図 1. ETB形成時における、加熱とガスパフタイミング、線平均密度、 $H\alpha$ 線強度、プラズマ蓄積エネルギー、電子密度揺動スペクトルの時間変化。

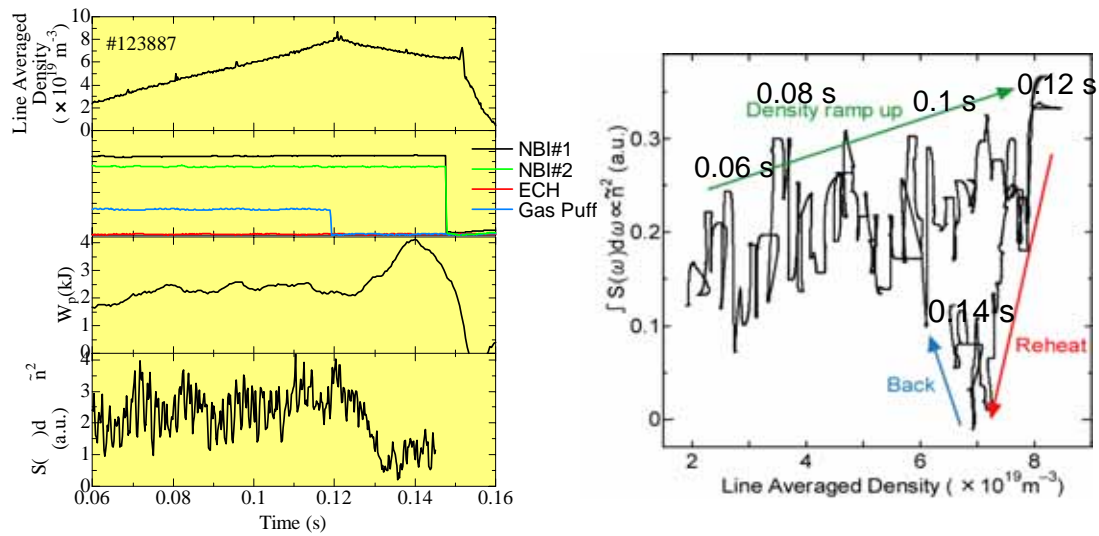


図 2. リヒートモード放電の、加熱とガスパフタイミング、線平均密度、 $H_{\alpha}$ 線強度、プラズマ蓄積エネルギーの時間変化、及び、密度揺動と線平均電子密度の関係。

### まとめ

CHS において HCN レーザー干渉計の光学系を用いてヘテロダイン散乱計測を実施し、以下の結果を得た。

- 1) ETB 形成時の揺動レベルの急激な減少を観測した。
- 2) ガスパフを切った後のリヒート時は、密度揺動レベルの減少に対応してエネルギー閉じ込めが改善した。

### 今後の計画・課題

LHD において 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を進める。さらに、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。

## (7) LHD プラズマの高速画像計測

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

### 本計測の背景と目的

Tokamak、ST ではプラズマの 2 次元画像撮影として高速カメラを使用した計測がされており、主に、プラズマ形状 (MHD 挙動) や L/H 遷移の計測、また、プラズマ制御への利用 (長時間ではない) に使用されている。また、近年の高速カメラ技術の進展には目を見張るものがあり、2 次元計測の主流となりつつある。これらの現状を踏まえて、2000 年から高速カメラを使用した LHD プラズマ計測を行っている。周辺プラズマ挙動やプラズマ - 壁相互作用などの分野でも短時間不規則現象の測定は重要なテーマであり、長時間放電を行っている LHD での測定は容易でないが、高速カメラにより従来も多くの現象を捉えられるようになってきている。それゆえに、高速カメラのプラズマ計測への数多くの応用が期待できる。

本研究の主たる目的としては、LHD 周辺プラズマの揺動計測に高速カメラを適用することとしている。

### 昨年度までの状況

本研究テーマは 1999 年度から核融合科学研究所の計画共同研究としてスタートし、2000 年度に高速カメラを購入した。2001 年度まで計画共同研究として続け、その後、通常の共同研究として継続している。研究申請者である西野は広島にいる状況なので、Snet による共同研究として申請したのが 2002 年度である。採択後の運用はハードが揃った 2003 年度末からで、その年度の LHD 実験はすでに終了していたため、本年度は実質 2 年目にあたる。

昨年度の研究状況を簡単に示すと、

1. ポート変更に伴う治具の設計と製作 (6 - 7 月)
2. 高速カメラを LHD5.5L のポートに設置 (10 月)
3. 実験参加 (11 月 - 翌 1 月)
4. 遠隔制御レンズ部の改良 (6-10 月)

実験には延べ日数で 17 日間参加した。全てのデータ容量はおおよそ 50GB であった。約 3GB/日のデータ転送量であるが、カメラの性能が格段と上がっているため、もし、新型カメラを購入すれば、約 300GB/日となろう。

### 本年度の状況

本年度から、核融合科学研究所内での作業が世話人である森崎中心に行われることになり、完全な遠隔実験参加の形に移行した。それに伴い、カメラによる従来からの受動計測 (ポートに設置してプラズマ光を測定する方法) から、シート状 Li ビームによる周辺密度

計測に使用して周辺密度とその揺動を計測する、能動的計測に切り替えた。それゆえに、ポートの変更とカメラの設置や計測システムの制御、データ関連の保守などの作業があったが、この計測方法にすることにより、従来不可能であった発光場所を同定するなどの 3次元情報を求めることが可能となる。以下、この計測に関して概説する。

シート状の Li ビームがプラズマ中に入ると、主に電子衝突励起により、Li 中性原子が発光する。Li の電離ポテンシャルはプラズマ中心の電子温度に比べてきわめて低いので、Li はほとんどが周辺で電離し、そのままではプラズマ中心には到達しない。入射する Li ビームの量はあらかじめ分かっているため、発光量が Li 原子密度と電子密度、励起率の積で与えられるから、発光量から電子密度を推定できる。

図 1 に、LHD プラズマの水平断面図上にプラズマとシート状 Li ビームの位置関係を示す。図 2 に、シート状 Li ビーム装置の配置（垂直断面図）を示す。Li ビームはプラズマ中心で、厚さ方向に約 5cm と LHD プラズマに比べて薄くなっており、LHD プラズマの断面を捉えることが分かる。

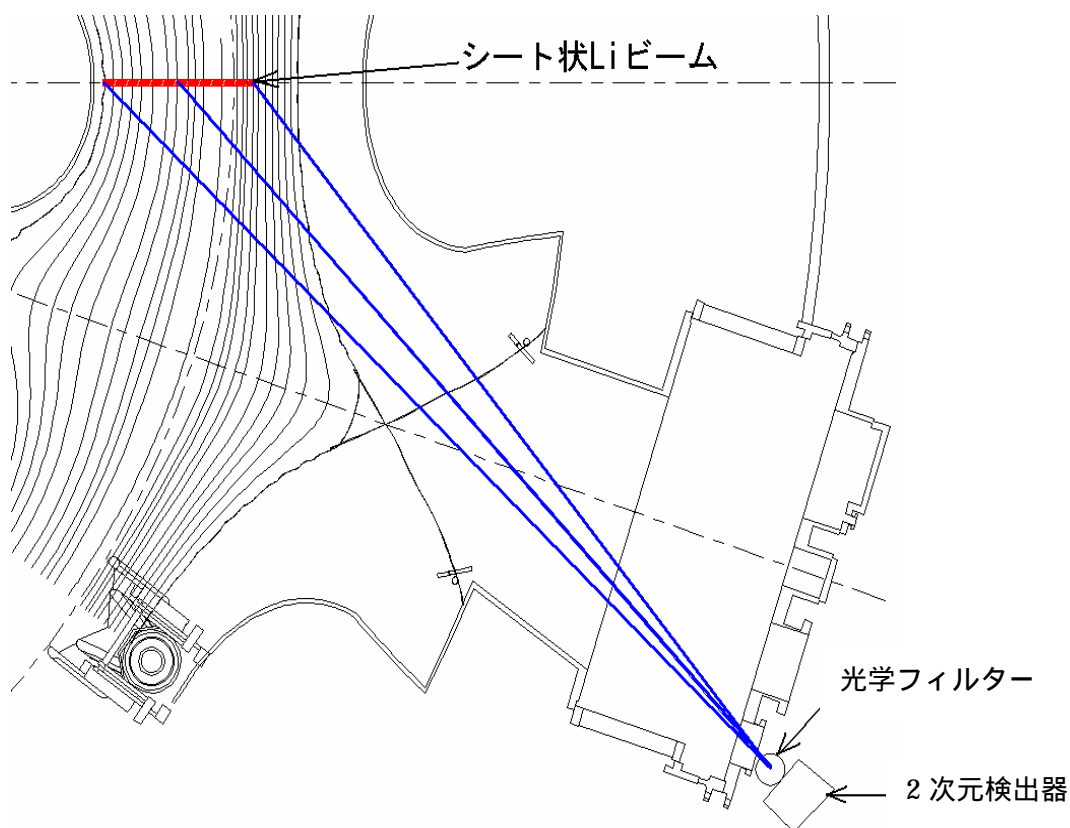


図 1 LHD プラズマとシート状 Li ビームの位置関係の水平断面図

検出器には、当初には通常の CCD カメラ計測を予定しているが、これを高速カメラに切り替えることにより、電子密度の揺動を伴う MHD などの高速現象が測定できることが期待できる。

### まとめ

本年度は、Li ビームの設置に時間がかかり、高速カメラ撮影は報告書作成時点では間に合っていない。しかしながら、今後、高速カメラを用いて密度揺動計測やペレット、超音速ガスパフ等の過渡現象の計測も可能であり、早ければ、本年度の実験に間に合わせる。遅くとも、来年度からは計測が開始される。

従って、昨年度のようなデータ転送等の実績は、本年度はほとんどない。しかしながら、本計測技術が確立すれば、LHD において高速で、且つ、局所的な周辺電子密度情報が得られるため、特に、周辺揺動計測の分野においては画期的といえる。

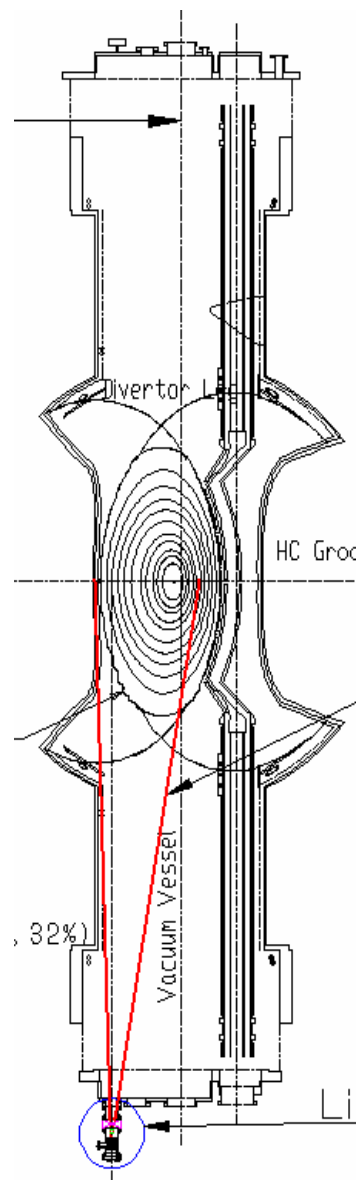


図2 シート状 Li ビームの配置

## (8) 可視光トモグラフィを用いたヘリカル系プラズマの2次元イオン温度・流速分布計測

責任者 小野 靖 東京大学大学院新領域創成科学研究科  
 参加研究者 河森 栄一郎 東京大学大学院新領域創成科学研究科  
 成嶋 吉朗 核融合科学研究所

### Two Dimensional Ion Temperature and Velocity Measurements by Use of Visible Light Tomography Technique and Super SINET

Ono, Y., Balandin, A. L, Imazawa, R., Kawamori, E., Murata, Y., Itagaki, T., Yamanoue, T., Sato, K, Arimoto, K, Timura, T., Tawara, T., (Univ.Tokyo, High Temperature Plasma Cent. / Dept. Electr. Eng.), Narushima Y., Nagayama Y. and Yamazaki K. (NIFS)

For the past five years, we have been developing a new visible-light tomography system for two dimensional (2-D) measurements of ion temperature and velocity. In 2005, we developed, (1) a new reconstruction software for 2-D plasma velocity measurement and (2) a part of optical fiber system and optical lens system for this system. As for (1), we reconstructed the local 2-D plasma velocity profile from the measured line-integrated line spectrum with Doppler shift. The 2-D plasma velocity profile is composed of two components as shown in  $\mathbf{v} = \nabla \times \psi + \nabla \phi$ ------(1), so that we obtain the following Radon transformation form:

$$R\{\zeta\}(u, \eta) = - \int_{-\infty}^u \mathbf{v}\{\theta\}(u', \eta) du' \text{-----}(2),$$

based on an assumption that our plasma is incompressible as  $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ . We solved the equation (2) using the maximum entropy method. Figure 2 shows the 2-D velocity profiles (vectors plot) (a) and the 2-D vorticity  $\psi$  contours (b) for an assumed toroidal velocity profile of low aspect ratio toroid, which was

peaked at the magnetic axis. Artificially, 10% white noises (n=1 component) were added to the line-integrated signals of line spectrum. Figures 2 indicate that the assumed 2-D velocity profile was reconstructed successfully within the error of 20%. As for (2), we installed the initial set of optical fibers: 9 channels to complete the 1-D velocity measurement system in order to test one section of the 2-D measurement system for TS-4 and LHD with Super SINET data transfer. Figure 3 shows the measured radial velocity profile of two merging spheromaks with counter helicity. It indicates that the bipolar toroidal velocity by the counter helicity reconnection was reconstructed successfully using our 1-D velocity measurement system.

### References

- [1] A.Balandin, Y.Ono, J Comp. Phys. **202**, (2005), 52.

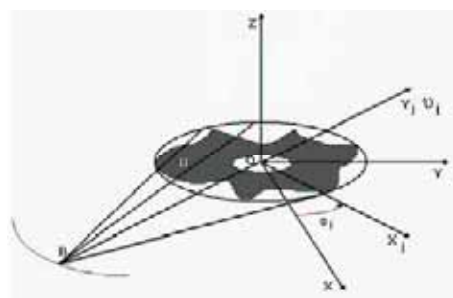
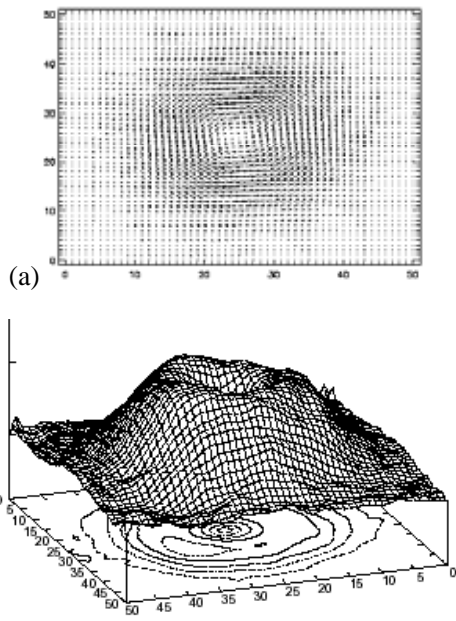


Fig. 1 Ion flow measurement by the vector tomography technology for visible light Doppler spectroscopy.



(b)  
 Fig. 2 2-D contours of plasma velocity (a) and vorticity (b) for a low aspect ratio toroid.

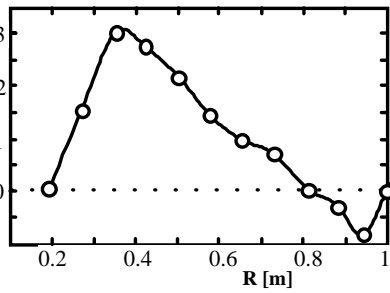


Fig. 3 Radial velocity profile of the two merging spheromaks with counter-helicity, which was measured by Doppler shift of ArII line.



## (9) LHD 周辺プラズマにおける水素原子・分子輸送機構の解明(偏光プラズマ分光) スーパーSINET を利用した分光器のリモート操作によるスペクトルデータ解析

|       |       |              |
|-------|-------|--------------|
| 責任者   | 岩前 敦  | 京都大学大学院工学研究科 |
| 参加研究者 | 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 |
|       | 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     |
|       | 澤田 圭司 | 信州大学工学部      |

### 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じ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。周辺プラズマで起こる水素原子・分子の電離、再結合、解離等の反応や粒子の空間的な流れ等の詳細な情報は、プラズマの密度・温度分布、Hモードなど主プラズマの理解を進めるにも不可欠である。長時間放電では特に水素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なっていない。

後藤・森田はLHDにおいてヘリウム原子についてHe I 発光線(1728.1 nm, 1667.8 nm)のゼーマン分離スペクトルプロファイルと観測ポロイダル面の磁場強度から視線上の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(H)線は、偏光を分けない測定ではそのゼーマン分離スペクトルプロファイルが分離して観測されなかった。しかしながらLHD赤道面近傍の1視線において互いに垂直な偏光に分け同時に計測し、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度が決定された[2]。荷電交換衝突の結果と思われる高温成分のほか、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を計測する。中性粒子輸送コードによってスペクトルプロファイルの再現シミュレーションを行い水素リサイクリングについての知見を得る。H線スペクトル強度比による、水素原子・分子密度の推定[3,4]、加えてヘリウム発光線強度比を利用したプラズマの電子密度・電子温度の推定[5,6]を行い、これら情報を中性粒子輸送コードにフィードバックし粒子輸送機構に対する知見を得る。

## 実験

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た。京都大学から新たに高分解能分光器(Jobin Yvon THR-1000, 焦点距離 1 m, 回折格子 2400 本/mm)を移設し, LHD 本体室に既設の高分解能分光器(McPherson209 焦点距離 1.3 m 回折格子 1800 本/mm)と共に京都大学エネルギー科学研究科プラズマ実験棟から波長設定・CCD制御を行い, LHD放電時にスペクトルデータ取得した。図 1 にヘリウムガス放電(ショット番号 63566)の He I 587.6 nm( $2^3P-3^3D$ ), 706.5 nm( $2^3P-3^3S$ )発光線のスペクトルプロファイルを示す。587.6 nm発光線はJobin Yvon分光器により取得し, 706.5 nm発光線はMcPherson分光器により得た。この放電ではFIR(nI)3750 の線平均電子密度が時間  $t=0.8$  s で  $4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  から  $t=1.2$  s で  $15 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  に上昇した。プラズマ中心での線平均密度が上昇と周辺部のヘリウム原子スペクトルの広がりに関連のあることが見出された。観測系は絶対感度較正がなされており, 発光線強度比と衝突輻射モデルによる解析から電子密度を得る。

澤田の開発した粒子シミュレーションコードによりLHD周辺プラズマ中の水素原子  $n = 3$  のポピュレーション分布を得た。LHDの磁場ベクトル情報を与え励起状態原子の視線方向速度分布からH 線の発光プロファイルを再構成した。図 2 に L H D 赤道面付近(高さ  $z = -0.38$  m) での実験との比較を示す。偏光方向は  $45^\circ$ ,  $-45^\circ$  に分離した。荷電交換による広がったスペクトルの上に, 水素分子からの解離によりエネルギーを得た水素原子のプロファイルが重なっている。シミュレーションでは周辺プラズマのパラメーターを  $T_e = 0.1$  eV,  $n_e = 10^{16} \text{m}^{-3}$  とした。今後, 線強度比による観測から得た温度密度データをシミュレーションコードに取り込み実験でのプロファイルの再現を精査する。

## 参考文献

1. M. Goto and S. Morita, Phys. Rev. E **65** (2002) 026401
2. A. Iwamae *et al.*, Phys. Plasmas **12** (2005) 042502
3. T. Fujimoto *et al.*, Nucl. Fusion **28** (1988) 1255
4. T. Fujimoto *et al.*, J. Appl. Phys. **66** (1989) 2315
5. M. Goto, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **78** (2003) 331
6. A. Iwamae *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **47** (2005) L41

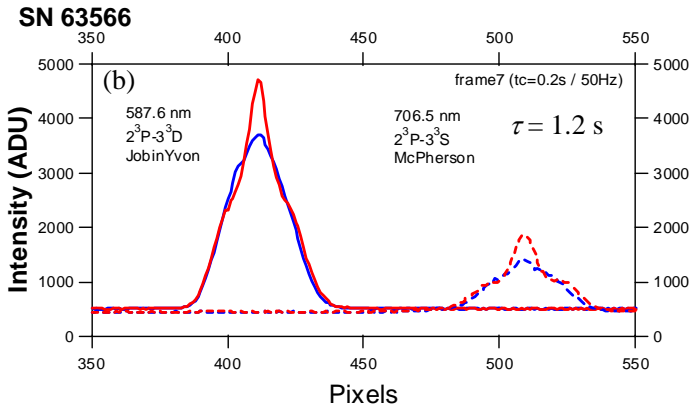
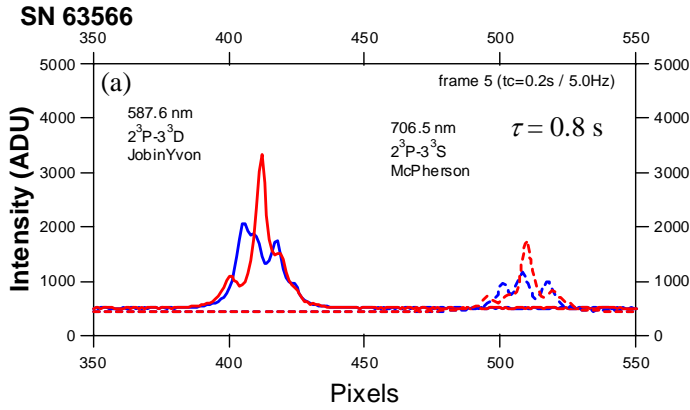


図 1 . He I 587.6 nm ( $2^3P-3^3D$ ), 706.5 nm ( $2^3P-3^3S$ ) 偏光分離発光線プロファイル . 2 台の高分解能分光器による同時計測 (SN63566) .

(a)時刻  $\tau = 0.8$  s (b)時刻  $\tau = 1.2$  s 発光線の強度比・上準位ポピュレーションの比  $n(3^3D)/n(3^3S)$  は電子密度と相関がある . 時刻 1.2 s では時刻 0.8 s に比べ 587.6 nm/706.5 nm 強度比が増加しており、発光領域での電子密度上昇が推察される .

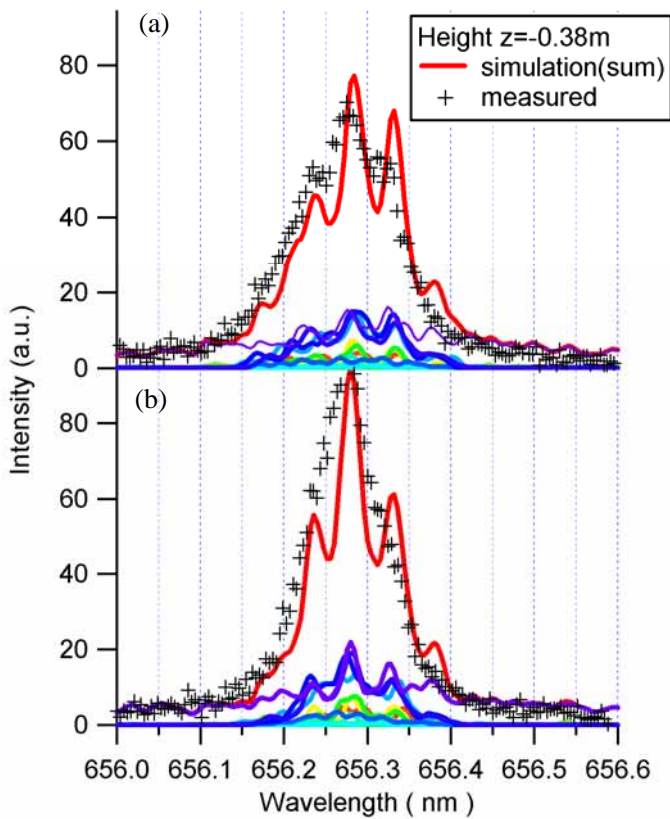


図 2 . 水素バルマー線 656.3 nm 偏光分離発光線プロファイル(観測 +) . 澤田らによる 3 次元粒子シミュレーションコードによる計算値 (赤線) . 水素分子からのかい離過程を含む .

## ( 1 0 ) LHD プラズマ閉じ込めの遠隔実験解析

|       |        |               |
|-------|--------|---------------|
| 責任者   | 山崎 耕造  | 名古屋大学大学院工学研究科 |
| 参加研究者 | 有本 英樹  | 名古屋大学大学院工学研究科 |
|       | 庄司 多津男 | 名古屋大学大学院工学研究科 |
|       | 濱村 賢司  | 名古屋大学大学院工学研究科 |
|       | 渡邊 大輔  | 名古屋大学大学院工学研究科 |
|       | 宮沢 順一  | 核融合科学研究所      |

### はじめに

名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻の山崎研究室は、平成17年4月から教育研究活動を開始した。その山崎研究室でのLHD遠隔実験参加のためのスーパーSINET研究計画が本年度開始された。本計画の分担責任者のこれまでのLHD実験へのかかわりとしては、核融合研究所立ち上げ(新研準備室)、LHD装置設計・建設(新研準備室、NIFS)、LHD装置運転・実験(NIFS)、輸送解析のデータベース作成、独自の輸送解析TOTALコードの開発利用(NIFS,名大)である。これを踏まえて、現在は名古屋大学からの通常のインターネット経由での実験解析を行ってきている。

本格的な遠隔実験解析のためには、LHD実験データに高速かつ柔軟にアクセスするための高速のネットワーク接続が必須であり、スーパーSINETの接続が平成17年度末に完了する。現在、名古屋大学内の高村研(5号館)までNIFSのLANが設置されているので、そこから8号館まで光ケーブルを延長する(図1)。



図1 スーパーSINETの山崎研への平成17年度接続予定

工学部研究科5号館のハブから8号館南館4階のハブまでの光ケーブルは、名古屋大学内の配線を借用する。工学部研究科5号館のエネルギー理工学専攻高村研究室から5号館内のターミナルボックスまでと、8号館南館4階のターミナルボックスから8号館南館山崎研究室404号室までの結線工事を予定している(図2)。新規ルータは、工学部8号館南館4階404

号室内の南東隅に設置予定である。

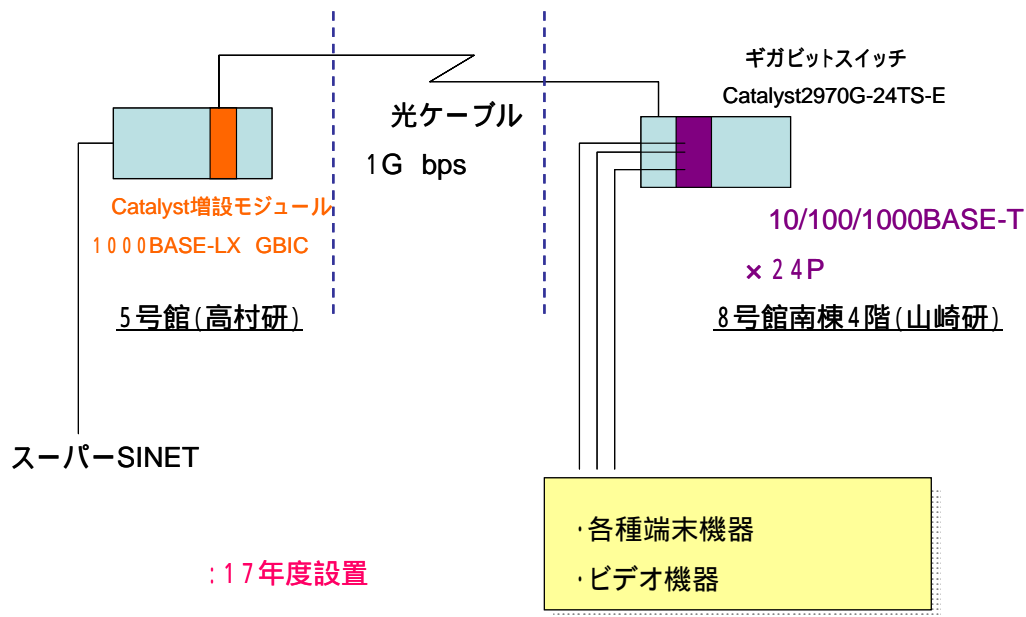


図2 ネットワーク接続予定機器

## 研究目的

本計画では、スーパーSINETを利用して、LHD実験解析の共同研究を推進することである。実験データに高速かつ柔軟にアクセスし(解析機能)、実験の状況を高速で確認する(ビデオ機能)ことが必要である。具体的な研究目的としては、

- (1) 実験解析コードTOTALによるプラズマ平衡と輸送解明
- (2) ヘリカル磁場配位の制御と磁場配位最適化研究
- (3) トーラスプラズマの知的制御に関する研究
- (4) 環状磁場核融合炉の最適化研究

である。これらの目的のために、LHD実験データを利用・解析する。その他、LHD実験解析の為にLHD数値解析システムへ高速アクセスすることと、遠隔実験解析結果の理解の為に核融合関連文献検索の高速利用をも計画している。

## 研究成果

平成17年度には、NIFS一般共同研究・大型ヘリカル装置(LHD)プロジェクトとして、「閉じ込め解析コードの開発と磁場配位の制御(代表:山崎耕造、世話人:舟場久芳)」を進めた。特に、『LHDでのヘリカルコイルによるエネルギー測定』として、博士課程前期課程2年生の修士論文用のデータ解析が行われた(図3)。この研究課題では、( )ヘリカルコイルを用いた世界で最初の測定方式を実証、( )その可能性と限界の明確化、( )既存の反磁性測定、平衡解析との比較検討、等を行うことである。

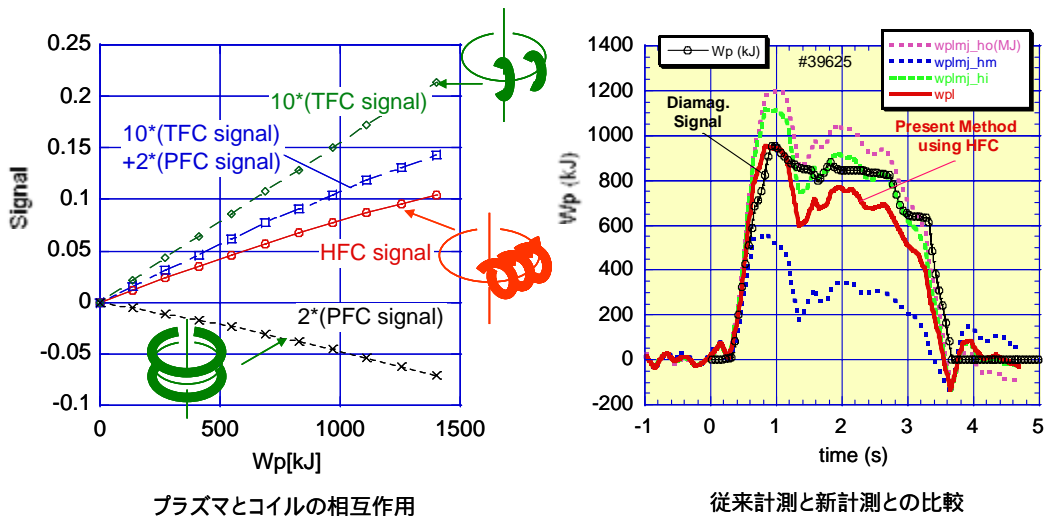


図3 LHDでのヘリカルコイルによるエネルギー測定の結果

- 『TOTALコードを用いたの輸送実験解析』も主要な研究テーマであり、これまでは、
- ( ) VMECコードによる平衡再構成 (輸送解析の基礎)
    - 特に高ベータ時解析に、ビーム成分を含めた平衡再構成、平衡プラズマの境界の明確化
  - ( ) プラズマ半径、磁場強度の定義とデータベース構築
  - ( ) 新スケール則導出による炉への展望 (図4)
    - 特に、R & B 依存性の検討、局所と大域則の比較検討を進めてきている。

まとめ

平成17年度末に、名古屋大学工学研究科8号館南館の山崎研にスーパーSINETのネットワーク接続がなされ、LHD遠隔参加実験解析の研究計画がスタートした。

今後の計画・課題

今後はこの高速ネットワークを有効利用してのLHDプラズマ閉じ込め実験解析等を進める予定である。

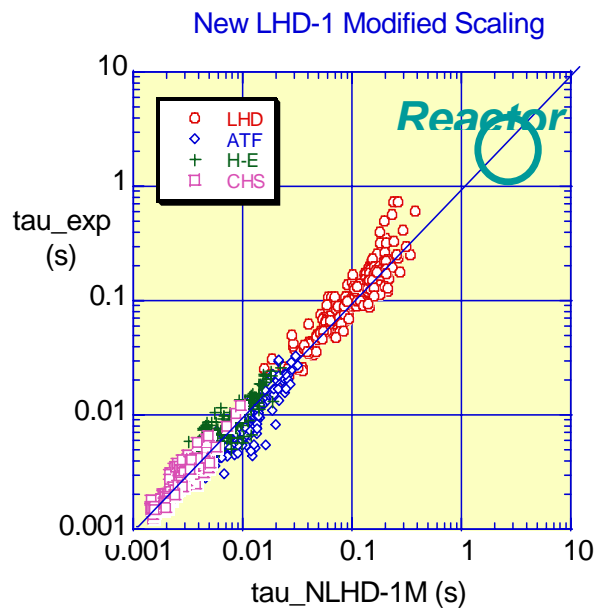


図4 TOTALコードを用いたのLHD輸送実験解析によるスケール則の導出

## (11) スーパー SINET 速度測定

江本 雅彦 核融合科学研究所

### 概要

遠隔ステーション設置直後より、スーパーSINET によるファイルの転送が期待通り速度が出ないことが報告されていた。ここでは、その問題点を探るとともに、解決策を探した。

### 測定方法

核融合科学研究所と京都大学エネルギー理工学研究所双方の Linux PC を利用し、ネットワークの転送速度を測定した。使用した PC のスペックを表 1 に示す。

表 1 測定に使用した Linux PC の仕様

|        | A                | B               |
|--------|------------------|-----------------|
| 設置場所   | 核融合科学研究所         | 京都大学エネルギー理工学研究所 |
| CPU    | Xeon 2GHz × 2    | Pentium 4 2GHz  |
| Memory | 2GB              | 1GB             |
| NIC    | BROADCOM BCM5701 | Intel Pro 1000  |
| OS     | LASER5 Linux 7.2 | Turbo Linux 7   |

### 測定結果

#### 測定 1 : ping による応答時間

ping コマンドにより核融合科学研究所、京都大学間の応答時間を測定する。TCP プロトコルはパケット毎に到達の可否を確認しながら送受信するプロトコルであるので、この時間が長いと通信速度が遅くなる。ping コマンドの応答時間は次の通り。

|           |          |
|-----------|----------|
| A - - > B | 10.5(ms) |
| B - - > A | 10.5(ms) |

この結果、例えば、パケット長が 1500 バイト(Ethernet の MTU)の場合、転送速度は  $1500 / 10.5(\text{ms}) = 14.3 \text{ KB/s} = 1.14 \text{ Mbps}$  が限界となる。

#### 測定 2 : netperf による UDP ストリームの測定

netperf コマンドにより京都大学から核融合科学研究所間の UDP での転送速度を測定した(表 2)。この結果、約 700Mbps のスループットが得られた。これは 1Gbps のネットワークとしては妥当な数字であると思われる。

表 2 B - - > A UDP 転送速度測定

| Socket Size (bytes) | Message Size(bytes) | Throughput (M bits/s) |
|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 65536               | 64                  | 136                   |
| 65536               | 1024                | 629.26                |



|       |      |        |
|-------|------|--------|
| 65536 | 1472 | 688.93 |
|-------|------|--------|

### 測定 3： netperf による TCP ストリームの測定

TCP ではパケットの到達を確認しながら通信を行うため、応答時間が長い場合、一パケット毎到達を確認すると著しく速度が遅くなる。そのため、TCP ではスライディングウィンドウという方法を取り、パケットの確認を遅延させ、スループットを上げることができる。この試験ではウィンドウのサイズを変えることにより、TCP の速度の影響を調べた。また、TCP の送受信にはソケット通信が行われるが、ソケットの送受信バッファのサイズを大きくすることで、一度に送るデータを大きくしオーバーヘッドを小さくすることができる。今回の試験ではソケットバッファの依存度も調べた。

TCP のウィンドウサイズを変えた試験では、デフォルトのサイズが最も高速であり、これはシステム側で最適な値に最適化されているものと思われる。一方、ソケットバッファのサイズ変更は大きく速度に寄与し、2MB までとることにより、600Mbps 以上の速度が得られた。ウィンドウサイズがデフォルトの値の時、ソケットサイズとスループットの関係を図 1 に示す。

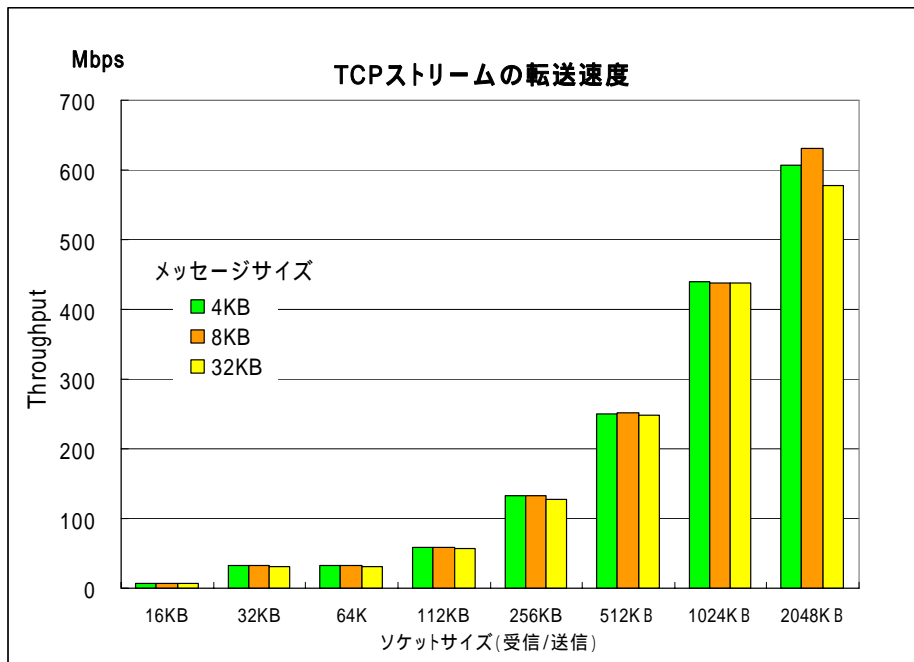


図 1 TCP ストリームのスループット測定

### 測定 4： FTP による転送速度

上記の試験でソケットバッファを大きくすることで速度が向上することがわかった。この設定で ftp により、A の 200MB のファイルを B の RAM ディスク上にコピーし、転送速度を測定した。



|                    |           |
|--------------------|-----------|
| ソケットサイズデフォルトの時     | 45.2 Mbps |
| システムソケットサイズ 2MB の時 | 47.1 Mbps |

この結果、システムの最大ソケットサイズには影響を受けないことがわかった。これはソフトウェア内部でソケットサイズの設定を行っており、システム側の最大ソケットサイズを利用するためには、プログラムの変更が必要になると思われる。

### 測定 5 : bbftp による転送速度

bbftp は巨大なファイルの高速転送を行うためのファイル転送ソフトウェアで、複数のストリームを同時に使用し、ファイルを転送することができる。この試験ではストリーム数と転送速度の影響を調べた。使用したファイルは 200MB で、ftp のテストと同様に RAM ディスク上に書き込んだ。結果を表 3 と図 2 に示す。

表 3 転送方向 B - - > A、ソケットサイズ=2MB

| ストリーム数 | 速度(Mbps) |
|--------|----------|
| 1      | 227.00   |
| 2      | 388.06   |
| 4      | 499.63   |
| 8      | 407.35   |

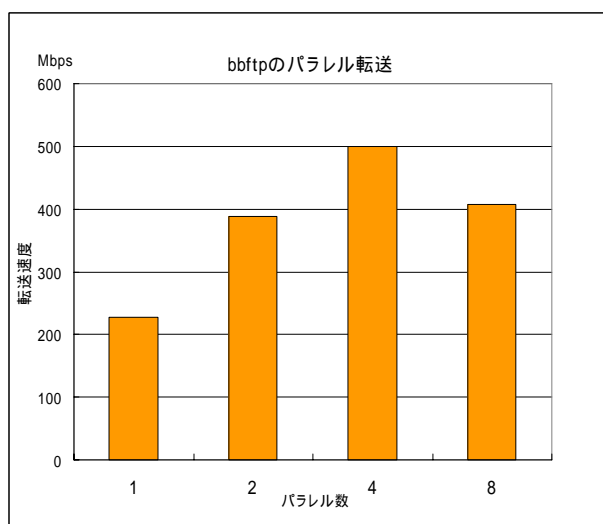


図 2 bbftp のパラレル数と転送速度

この結果から、ストリーム数を 4 にすることで 500Mbps 近い速度が得られた。ストリーム数を 8 にすると逆に速度が低下した。オーバーヘッドが原因かもしれない。最適なストリーム数はファイルの大きさ等によると思われる。

### 測定 6 : ftp の複数セッションによる転送速度

bbftp の結果から複数セッションを張ることにより、全体としての速度が上がるのがわかった。さらに、ftp を同一 PC で複数実行することにより全体との速度がどのように変化するかを測定した。測定は 200MB のファイルの転送を 5 回繰り返すというプロセスを同時に複数プロセス実行し、全プロセスの実行時間から全体としての転送速度を測定した。測定結果を表 4 と図 3 に示す。ftp はバッチ的に起動し、バックグラウンドで実行させている

ことから、全プロセスはほぼ同時に実行されていると期待される。

結果：ftp を複数実行することで全体としての転送速度が上げられることが確認できた。  
なお、inetd や ftp により、コネクション数等制限があるので、複数セッション実行できるように変更しなければならない。

表4 ftp のプロセス数と転送速度

| プロセス数 | 転送速度 B - > A (Mbps) | 転送速度 A - > B (Mbps) |
|-------|---------------------|---------------------|
| 1     | 45.1                | 24.4                |
| 2     | 90.6                | 48.3                |
| 4     | 180.5               | 92.9                |
| 8     | 350.9               | 155.8               |
| 16    | 635.6               | 265.3               |
| 20    | 412.3               | 287.0               |
| 32    | NA                  | 311.5               |
| 64    | NA                  | 335.4               |

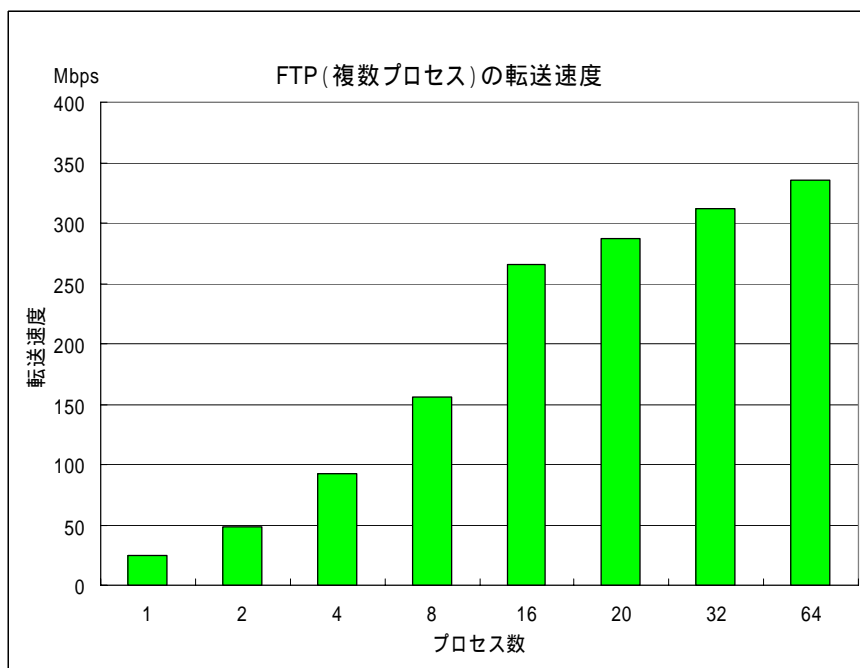


図3 FTP (プロセス数) 転送速度

## 結論

UDP では 700Mbps 程度の速度が得られ、この値は 1Gbps のネットワークでは妥当なものと思われる。TCP を利用した FTP 等で速度が得られないのは、TCP の原理上不可避であると考えられる。TCP のウィンドウサイズを変更することで速度が上がることを期待されたが、十分な速度を得ることができなかった。しかしながら、短期的な方策として、

- bbftp でストリーム数を増やす
- ftp を複数起動する

等の方法で、ストリームを増やすことにより全体としての速度を上げることが可能である。  
より長期的には、ネットワーク事情を考慮した転送プロトコルの開発が必要であろう。

## (11) スーパー SINET 速度測定

江本 雅彦 核融合科学研究所

### 概要

遠隔ステーション設置直後より、スーパーSINET によるファイルの転送が期待通り速度が出ないことが報告されていた。ここでは、その問題点を探るとともに、解決策を探した。

### 測定方法

核融合科学研究所と京都大学エネルギー理工学研究所双方の Linux PC を利用し、ネットワークの転送速度を測定した。使用した PC のスペックを表 1 に示す。

表 1 測定に使用した Linux PC の仕様

|        | A                | B               |
|--------|------------------|-----------------|
| 設置場所   | 核融合科学研究所         | 京都大学エネルギー理工学研究所 |
| CPU    | Xeon 2GHz × 2    | Pentium 4 2GHz  |
| Memory | 2GB              | 1GB             |
| NIC    | BROADCOM BCM5701 | Intel Pro 1000  |
| OS     | LASER5 Linux 7.2 | Turbo Linux 7   |

### 測定結果

#### 測定 1 : ping による応答時間

ping コマンドにより核融合科学研究所、京都大学間の応答時間を測定する。TCP プロトコルはパケット毎に到達の可否を確認しながら送受信するプロトコルであるので、この時間が長いと通信速度が遅くなる。ping コマンドの応答時間は次の通り。

|           |          |
|-----------|----------|
| A - - > B | 10.5(ms) |
| B - - > A | 10.5(ms) |

この結果、例えば、パケット長が 1500 バイト(Ethernet の MTU)の場合、転送速度は  $1500 / 10.5(\text{ms}) = 14.3 \text{ KB/s} = 1.14 \text{ Mbps}$  が限界となる。

#### 測定 2 : netperf による UDP ストリームの測定

netperf コマンドにより京都大学から核融合科学研究所間の UDP での転送速度を測定した(表 2)。この結果、約 700Mbps のスループットが得られた。これは 1Gbps のネットワークとしては妥当な数字であると思われる。

表 2 B - - > A UDP 転送速度測定

| Socket Size (bytes) | Message Size(bytes) | Throughput (M bits/s) |
|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 65536               | 64                  | 136                   |
| 65536               | 1024                | 629.26                |

|       |      |        |
|-------|------|--------|
| 65536 | 1472 | 688.93 |
|-------|------|--------|

### 測定 3： netperf による TCP ストリームの測定

TCP ではパケットの到達を確認しながら通信を行うため、応答時間が長い場合、一パケット毎到達を確認すると著しく速度が遅くなる。そのため、TCP ではスライディングウィンドウという方法を取り、パケットの確認を遅延させ、スループットを上げることができる。この試験ではウィンドウのサイズを変えることにより、TCP の速度の影響を調べた。また、TCP の送受信にはソケット通信が行われるが、ソケットの送受信バッファのサイズを大きくすることで、一度に送るデータを大きくしオーバーヘッドを小さくすることができる。今回の試験ではソケットバッファの依存度も調べた。

TCP のウィンドウサイズを変えた試験では、デフォルトのサイズが最も高速であり、これはシステム側で最適な値に最適化されているものと思われる。一方、ソケットバッファのサイズ変更は大きく速度に寄与し、2MB までとることにより、600Mbps 以上の速度が得られた。ウィンドウサイズがデフォルトの値の時、ソケットサイズとスループットの関係を図 1 に示す。

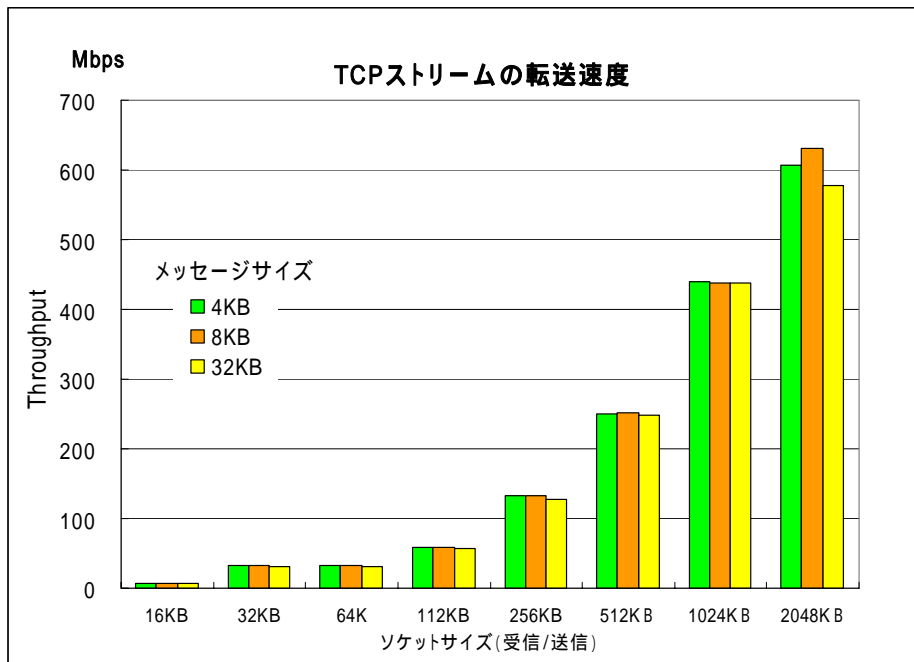


図 1 TCP ストリームのスループット測定

### 測定 4： FTP による転送速度

上記の試験でソケットバッファを大きくすることで速度が向上することがわかった。この設定で ftp により、A の 200MB のファイルを B の RAM ディスク上にコピーし、転送速度を測定した。

|                    |           |
|--------------------|-----------|
| ソケットサイズデフォルトの時     | 45.2 Mbps |
| システムソケットサイズ 2MB の時 | 47.1 Mbps |

この結果、システムの最大ソケットサイズには影響を受けないことがわかった。これはソフトウェア内部でソケットサイズの設定を行っており、システム側の最大ソケットサイズを利用するためには、プログラムの変更が必要になると思われる。

### 測定 5 : bbftp による転送速度

bbftp は巨大なファイルの高速転送を行うためのファイル転送ソフトウェアで、複数のストリームを同時に使用し、ファイルを転送することができる。この試験ではストリーム数と転送速度の影響を調べた。使用したファイルは 200MB で、ftp のテストと同様に RAM ディスク上に書き込んだ。結果を表 3 と図 2 に示す。

表 3 転送方向 B - - > A、ソケットサイズ=2MB

| ストリーム数 | 速度(Mbps) |
|--------|----------|
| 1      | 227.00   |
| 2      | 388.06   |
| 4      | 499.63   |
| 8      | 407.35   |

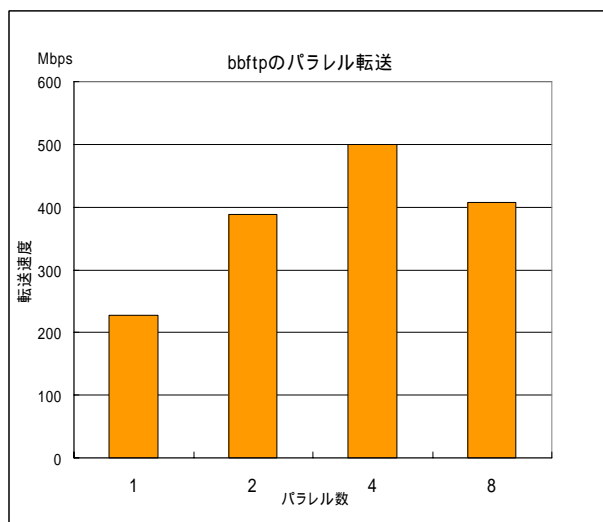


図 2 bbftp のパラレル数と転送速度

この結果から、ストリーム数を 4 にすることで 500Mbps 近い速度が得られた。ストリーム数を 8 にすると逆に速度が低下した。オーバーヘッドが原因かもしれない。最適なストリーム数はファイルの大きさ等によると思われる。

### 測定 6 : ftp の複数セッションによる転送速度

bbftp の結果から複数セッションを張ることにより、全体としての速度が上がるのがわかった。さらに、ftp を同一 PC で複数実行することにより全体との速度がどのように変化するかを測定した。測定は 200MB のファイルの転送を 5 回繰り返すというプロセスを同時に複数プロセス実行し、全プロセスの実行時間から全体としての転送速度を測定した。測定結果を表 4 と図 3 に示す。ftp はバッチ的に起動し、バックグラウンドで実行させている

ことから、全プロセスはほぼ同時に実行されていると期待される。

結果：ftp を複数実行することで全体としての転送速度が上げられることが確認できた。  
なお、inetd や ftp により、コネクション数等制限があるので、複数セッション実行できるように変更しなければならない。

表4 ftp のプロセス数と転送速度

| プロセス数 | 転送速度 B - > A (Mbps) | 転送速度 A - > B (Mbps) |
|-------|---------------------|---------------------|
| 1     | 45.1                | 24.4                |
| 2     | 90.6                | 48.3                |
| 4     | 180.5               | 92.9                |
| 8     | 350.9               | 155.8               |
| 16    | 635.6               | 265.3               |
| 20    | 412.3               | 287.0               |
| 32    | NA                  | 311.5               |
| 64    | NA                  | 335.4               |

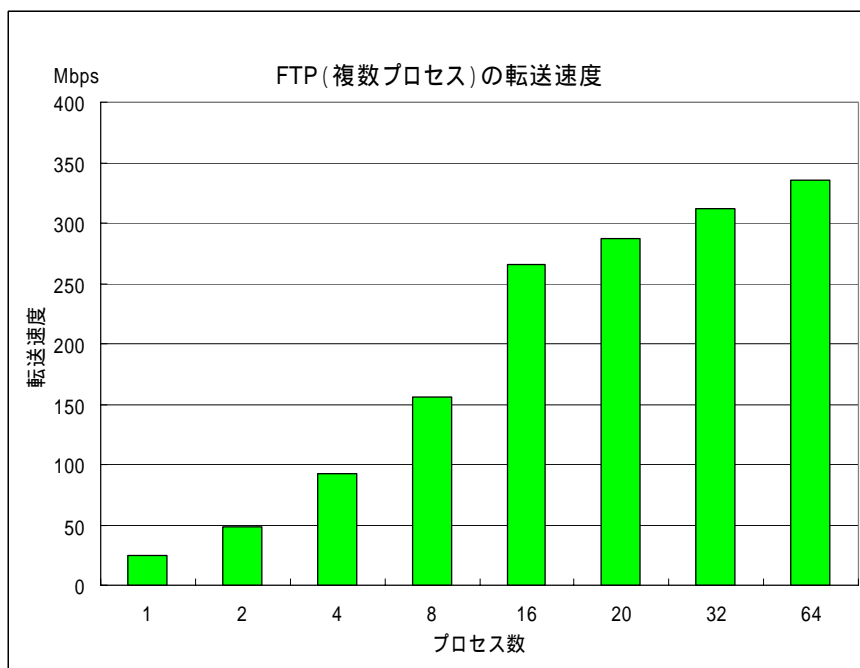


図3 FTP (プロセス数) 転送速度

## 結論

UDP では 700Mbps 程度の速度が得られ、この値は 1Gbps のネットワークでは妥当なものと思われる。TCP を利用した FTP 等で速度が得られないのは、TCP の原理上不可避であると考えられる。TCP のウィンドウサイズを変更することで速度が上がることを期待されたが、十分な速度を得ることができなかった。しかしながら、短期的な方策として、

- bbftp でストリーム数を増やす
- ftp を複数起動する

等の方法で、ストリームを増やすことにより全体としての速度を上げることが可能である。  
より長期的には、ネットワーク事情を考慮した転送プロトコルの開発が必要であろう。



## ( 1 2 ) 九州大学プラズマ境界力学装置を用いる遠隔実験

|       |        |                        |
|-------|--------|------------------------|
| 責任者   | 佐藤 浩之助 | 九州大学応用力学研究所炉心理工学研究センター |
| 参加研究者 | 関子 秀樹  | 九州大学応用力学研究所            |
|       | 花田 和明  | 九州大学応用力学研究所            |
|       | 坂本 瑞樹  | 九州大学応用力学研究所            |
|       | 出射 浩   | 九州大学応用力学研究所            |
|       | 長谷川 真  | 九州大学応用力学研究所            |
|       | 武藤 敬   | 核融合科学研究所               |
|       | 中村 一男  | 核融合科学研究所               |

### はじめに

九州大学で計画されているプラズマ境界力学装置 ( QUEST ) に関して、全日本 ST 計画と連携して装置設計・シミュレーションを行う。

### まとめ

平成 17 年度末にスーパーSINET に接続し、クライアント装置等の調整中。次年度から実質的な活用を開始する。

### ( 1 3 ) 核融合におけるマルチスケールシミュレーションの研究

責任者            矢木 雅敏            九州大学応用力学研究所  
参加研究者       中島 徳嘉            核融合科学研究所

#### はじめに

核融合科学研究所のプラズマシミュレータ(スーパーコンピュータシステム)を利用して、核融合におけるマルチスケールシミュレーションの研究を行う。

#### まとめ

平成 17 年度末にスーパーSINET に接続し、クライアント装置等の調整中。次年度から実質的な活用を開始する。

## まとめ

平成 13 年度から開始されたスーパーSINET 利用共同研究は、当初計画していた「LHD 実験遠隔参加」と「スーパーコンピュータの遠隔利用」に、「ST 研究のバーチャルラボラトリ」を加えた三つの分野になり、それらの用途に合わせた SNET 利用環境の整備を行った。

( 1 ) これまでの SNET は核融合科学研究所の関連ネットワークとそれぞれの遠隔ステーションをつなぐ個別の閉域接続であったが、平成 17 年度には「LHD 実験遠隔参加」と「ST 研究のバーチャルラボラトリ」の全遠隔ステーションを包含する閉域ネットワークに再構築した。これにより遠隔ステーション間の通信が可能となり、新しい研究スタイルの共同研究が可能となった。

( 2 ) 核融合科学研究所の「スーパーコンピュータの遠隔利用」は接続環境が整い、平成 17 年度に共同研究が開始できた。

( 3 ) 実行転送速度を向上させるための開発研究が行われ、実用に耐えうる方策が見出された。

( 4 ) スーパーSINET を介して大学の研究室から大型核融合装置の実験に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、後継研究者の育成に役立ち、波及効果は非常に大きい。今後も遠隔参加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。