

JAERI-Review
2003-012



JP0350388



IAEA主催第19回核融合エネルギー会議概要報告
(2002年10月14日～10月19日, リヨン, フランス)

2003年3月

(編) 炉心プラズマ計画室

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

IAEA 主催第 19 回核融合エネルギー会議概要報告
(2002 年 10 月 14 日～10 月 19 日、リヨン、フランス)

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部
(編) 炉心プラズマ計画室

(2003 年 1 月 31 日受理)

本報告書は、2002 年 10 月 14 日から 10 月 19 日にかけてフランス、リヨンで開催された IAEA 主催第 19 回核融合エネルギー会議における発表論文の概要をまとめたものである。

Summary Report of the 19th IAEA Fusion Energy Conference
(October 14–19, 2002, Lyon, France)

(Ed.) Tokamak Program Division

Department of Fusion Plasma Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 31, 2003)

This report summarizes the contributed papers of the 19th IAEA Fusion Energy Conference held at Lyon, France, from October 14th to 19th, 2002.

Keywords: IAEA, Fusion Energy Conference, JAERI, Contributed Papers

目次

1. メモリアルセッション [菊池]	
1.1 開会および歓迎の挨拶	1
1.2 特別講義	1
2. 総合講演	
2.1 セッション OV/1:磁場閉じ込め核融合総合講演 1 [藤田]	2
2.2 セッション OV/2:磁場閉じ込め核融合総合講演 2 [井手]	3
2.3 セッション OV/3:慣性核融合総合講演 [西尾]	4
2.4 セッション OV/4:磁場閉じ込め核融合総合講演 3 [坂本宜]	5
2.5 セッション OV/5&EX/C1: 磁場閉じ込め核融合総合講演 4, 閉じ込め [都筑]	6
3. 実験	
3.1 セッション EX/C2:H モード, 輸送物理 [大山]	7
3.2 セッション EX/C3:電流ホール, 内部輸送障壁 [三浦]	8
3.3 セッション EX/C4:トーラス系における輸送 [藤田]	9
3.4 セッション EX/C5&TH/8: ヘリカルおよび球状トーラスにおける閉じ込め [石井]	10
3.5 セッション EX/S1:安定性, 高ベータ [諫山]	11
3.6 セッション EX/S2&TH/5: 抵抗性壁モード, ディスラプション [石井]	12
3.7 セッション EX/S3&IC&TH/6:ヘリカル系 [武智]	13
3.8 セッション EX/D1&TH/3:プラズマ境界, ダイバータ [諫山]	14
3.9 セッション EX/D2&TH/4:境界乱流, 高エネルギー粒子 [篠原]	15
3.10 セッション EX/W&TH/7:電流駆動, 高エネルギー粒子 [鈴木]	16
3.11 ポスターセッション EX/P1:JET, 小型トカマク [竹永]	17
3.12 ポスターセッション EX/P2: JT-60U, LHD, JFT-2M, NSTX, 他 [神谷]	18
3.13 ポスターセッション EX/P3:DIII-D, T-10, HT-7, 他 [鈴木]	19
3.14 ポスターセッション EX/P4: AUG, Tore Supra, FT-U, TRIAM-1M, 他 [中村]	20
3.15 ポスターセッション EX/P5: C-Mod, TCV, TEXTOR, RFX, GOL, ミラー装置 [三浦]	21
4. 理論	
4.1 セッション TH/1:プラズマ内部の乱流と輸送 [岸本]	22
4.2 セッション TH/2:非拡散性輸送, その他の輸送 [岸本]	23
4.3 ポスターセッション TH/P1: プラズマ内部の微視的不安定性と輸送 [井戸村]	24
4.4 ポスターセッション TH/P2:安定性, ダイバータ [古川]	25
4.5 ポスターセッション TH/P3:境界輸送, 安定性, 波動 [栗田]	26
5. ITER	
5.1 セッション CT:ITER [伊尾木, 嶋田]	27
5.2 ポスターセッション CT/P:ITER [嶋田]	28

6. 慣性核融合	
6.1 セッション IF: 慣性核融合 [谷口]	29
6.2 ポスターセッション IF/P:慣性核融合 [坂本慶, 西谷]	30
7. 技術開発, 工学設計	
7.1 セッション FT/1:技術開発 [石塚]	31
7.2 セッション FT/2:工学設計 [石田]	32
7.3 ポスターセッション FT/P1:技術開発 [榎枝]	33
7.4 ポスターセッション FT/P2:工学設計 [逆井]	34
8. 革新的概念, 安全性, 環境	
8.1 ポスターセッション IC/P:革新的概念 [梅田]	35
8.2 ポスターセッション SE/P:安全性, 環境 [西尾]	36
9. ポストデッドライン PD/T&PD/P [高津]	37
10. サマリー [狐崎, 菊池]	
10.1 閉じ込め, 波動・プラズマ相互作用, 高エネルギー粒子	38
10.2 安定性, ダイバータ, 革新的概念	39
10.3 理論	39
10.4 慣性核融合	40
10.5 核融合工学, 安全性, 環境	40

※ [] 内は執筆担当者

Contents

1. Memorial Session [Kikuchi]	
1.1 Opening, Welcome Address	1
1.2 Special Lecture	1
2. Overviews	
2.1 Session OV/1: Magnetic Fusion Overview 1 [Fujita]	2
2.2 Session OV/2: Magnetic Fusion Overview 2 [Ide]	3
2.3 Session OV/3: Inertial Fusion Overview [Nishio]	4
2.4 Session OV/4: Magnetic Fusion Overview 3 [Y.Sakamoto]	5
2.5 Session OV/5&EX/C1: Magnetic Fusion Overview 4, Confinement [Tsuzuki]	6
3. Experiments	
3.1 Session EX/C2: H-mode & Transport Physics [Oyama]	7
3.2 Session EX/C3: Current Hole & Internal Transport [Miura]	8
3.3 Session EX/C4: Transport in Toroidal Systems [Fujita]	9
3.4 Session EX/C5&TH/8: Confinement in Helical Systems and Spherical Tori [Ishii]	10
3.5 Session EX/S1: Stability and High Beta [Isayama]	11
3.6 Session EX/S2&TH/5: Resistive Wall Modes and Disruptions [Ishii]	12
3.7 Session EX/S3&IC&TH/6: Helical Systems [Takechi]	13
3.8 Session EX/D1&TH/3: Edge and Divertor [Isayama]	14
3.9 Session EX/D2&TH/4: Edge Turbulence and Energetic Particles [Shinohara]	15
3.10 Session EX/W&TH/7: Current Drive and Energetic Particles [Suzuki]	16
3.11 Poster Session EX/P1: JET, Small Tokamaks [Takenaga]	17
3.12 Poster Session EX/P2: JT-60U, LHD, JFT-2M, NSTX, etc. [Kamiya]	18
3.13 Poster Session EX/P3: DIII-D, T-10, HT-7, etc. [Suzuki]	19
3.14 Poster Session EX/P4: AUG, Tore Supra, FT-U, TRIAM-1M, etc. [Nakamura]	20
3.15 Poster Session EX/P5: C-Mod, TCV, TEXTOR, RFX, GOL, Mirrors [Miura]	21
4. Theory	
4.1 Session TH/1: Core Turbulence and Transport [Kishimoto]	22
4.2 Session TH/2: Non-diffusive and Other Transport [Kishimoto]	23
4.3 Poster Session TH/P1: Core Micro-instabilities and Transport [Idomura]	24
4.4 Poster Session TH/P2: Stability and Divertors [Furukawa]	25
4.5 Poster Session TH/P3: Edge Transport & Stability, Waves [Kurita]	26
5. ITER	
5.1 Session CT: ITER [Ioki, Shimada]	27
5.2 Poster Session CT/P: ITER [Shimada]	28
6. Inertial Fusion	
6.1 Session IF: Inertial Fusion [Taniguchi]	29
6.2 Poster Session IF/P: Inertial Fusion [K.Sakamoto, Nishitani]	30

7. Technology Developments, Engineering Design	
7.1 Session FT/1: Technology Developments [Ishitsuka]	31
7.2 Session FT/2: Engineering Design [Ishida]	32
7.3 Poster Session FT/P1: Technology Developments [Enoeda]	33
7.4 Poster Session FT/P2: Engineering Design [Sakasai]	34
8. Innovative Concepts, Safety and Environment	
8.1 Poster Session IC/P: Innovative Concepts [Umeda]	35
8.2 Poster Session SE/P: Safety and Environment [Nishio]	36
9. Post Deadline PD/T&PD/P [Takatsu]	37
10. Summaries [Kitsunezaki, Kikuchi]	
10.1 Confinement, Wave-plasma Interactions and Energetic Particles	38
10.2 Stability, Divertors and Innovative Concepts	39
10.3 Theory	39
10.4 Inertial Fusion	40
10.5 Fusion Technology, Safety and Environmental Aspects	40

※ The name of writer in each part is shown in [].

執筆者一覧

伊尾木 公裕⁺¹・諫山 明彦⁺²・石井 康友⁺³・石田 真一⁺⁴・石塚 悅男⁺⁵
井手 俊介⁺²・井戸村 泰宏⁺³・梅田 尚孝⁺⁶・榎枝 幹男⁺⁷・大山 直幸⁺²
神谷 健作⁺⁸・菊地 満⁺⁹・岸本 泰明⁺³・栗田 源一⁺⁴・狐崎 昌雄⁺⁹・逆井 章⁺⁴
坂本 慶司⁺¹⁰・坂本 宜照⁺²・篠原 孝司⁺⁸・嶋田 道也⁺¹・鈴木 隆博⁺²
高津 英幸⁺¹¹・武智 学⁺²・竹永 秀信⁺⁸・谷口 正樹⁺¹⁰・都筑 和泰⁺⁸
中村 幸治⁺¹²・西尾 敏⁺¹²・西谷 健夫⁺¹³・藤田 隆明⁺⁸・古川 勝⁺³・三浦 幸俊⁺²

- +1 ITER 開発室 ITER 協力調整室
- +2 炉心プラズマ研究部 炉心プラズマ実験計測開発室
- +3 炉心プラズマ研究部 プラズマ理論研究室
- +4 炉心プラズマ研究部 炉心プラズマ計画室
- +5 大洗研究所 材料試験炉部 ブランケット照射開発室
- +6 核融合装置試験部 NBI 装置試験室
- +7 核融合工学部 ブランケット工学研究室
- +8 炉心プラズマ研究部 プラズマ物理実験研究室
- +9 炉心プラズマ研究部
- +10 核融合工学部 加熱工学研究室
- +11 核融合工学部
- +12 炉心プラズマ研究部 核融合炉システム研究室
- +13 核融合工学部 核融合中性子工学研究室

List of Authors

K. Ioki⁺¹, A. Isayama⁺², Y. Ishii⁺³, S. Ishida⁺⁴, E. Ishitsuka⁺⁵, S. Ide⁺², Y. Idomura⁺³, N. Umeda⁺⁶, M. Enoda⁺⁷, N. Oyama⁺², K. Kamiya⁺⁸, M. Kikuchi⁺⁹, Y. Kishimoto⁺³, G. Kurita⁺⁴, A. Kitsunezaki⁺⁹, A. Sakasai⁺⁴, K. Sakamoto⁺¹⁰, Y. Sakamoto⁺², K. Shinohara⁺⁸, M. Shimada⁺¹, T. Suzuki⁺², H. Takatsu⁺¹¹, M. Takechi⁺², H. Takenaga⁺⁸, M. Taniguchi⁺¹⁰, K. Tsuzuki⁺⁸, Y. Nakamura⁺¹², S. Nishio⁺¹², T. Nishitani⁺¹³, T. Fujita⁺⁸, M. Furukawa⁺³, Y. Miura⁺²

- +1 International Coordination Division, Department of ITER Project
- +2 Large Tokamak Experiment and Diagnostics Division, Department of Fusion Plasma Research
- +3 Plasma Theory Laboratory, Department of Fusion Plasma Research
- +4 Tokamak Program Division, Department of Fusion Plasma Research
- +5 Blanket Irradiation and Analysis Laboratory, Department of JMTR, Oarai Research Establishment
- +6 NBI Facilities Division, Department of Fusion Facilities
- +7 Blanket Engineering Laboratory, Department of Fusion Engineering Research
- +8 Experimental Plasma Physics Laboratory, Department of Fusion Plasma Research
- +9 Department of Fusion Plasma Research
- +10 Plasma Heating Laboratory, Department of Fusion Engineering Research
- +11 Department of Fusion Engineering Research
- +12 Reactor System Laboratory, Department of Fusion Plasma Research
- +13 Fusion Neutron Laboratory, Department of Fusion Engineering Research

1. メモリアルセッション

1.1 開会および歓迎の挨拶

主催者である IAEA を代表して D.D. Sood (IAEA 部長) から挨拶があった。他に、J. G. Jacquinot, Fernandez-Luiz, U. Finzi の挨拶があった。ここ 2 年で、H.A.B. Bodin, H.P. Furth, L. Spitzer Jr., T.H. Stix などが亡くなり、これらのパイオニアに捧げるセッションとした。

1.2 特別講義

- ・ **エネルギー消費と必要性**：現在のエネルギー消費の 85 % が化石燃料であるが、その資源は急激に減少している。二酸化炭素の排出は温室効果を生み出し、気候変動を起こしている。二酸化炭素の除去は、海洋表面と深海水の交換により数百年以上のスケールが必要である。核融合は放射性毒性が小さいエネルギー源である。ここ 2 百年の間に一次エネルギーの主役は、再生可能エネルギー、石炭から石油、天然ガスへと移行してきた。今後、核エネルギー（核分裂、核融合）が貢献し、核分裂、核融合は相補的である。種々のエネルギーの発電単価には幅がある。核融合は外部性コストが風力と並んで低い。核融合は百万年以上も資源があり、トカマク、ヘルカル、レーザー、イオン加速が主要路線である。
- ・ **磁場核融合（トカマク）**：これまで 30 年の進歩は著しい。JET, TFTR の DT 実験で 16 MW 出力、22 MJ／ショットを達成。安定性評価の信頼できるコードがある。異常輸送の理解の進歩あり。球状トカマクによって高 β 化の新領域を開拓。NTM（新古典テアリングモード）の制御に成功。ジャイロ運動論シミュレーションの進歩。閉じ込め則の進歩。長時間定常運転の進歩。Tore Supra の 750 MJ 入力達成。DIII-D, JT-60U の粒子排気。FTU のペレット実験、JT-60U の 80 % 自発電流駆動。蛍光灯から ITER まで広がるプラズマの除熱の議論をした。
- ・ **磁場核融合（ステラレータ）**：定常運転と電流駆動不安定性が無いことが特徴。性能はトカマクに近いが、より高密度運転が可能、運転限界で MHD 的に静か。新古典損失を減らすこととベータ値の増加が課題。最適化手法として準軸対称がキーワード。ステラレータ閉じ込め則はトカマクと同程度。
- ・ **慣性核融合**：直接照射と間接照射それぞれに利点、欠点。600 倍の爆縮。プラズマ安定化、レーザー照射の対称性、NIF と LMJ が 2008-2010 年に運転開始。燃料ペレットのアブレーション（溶発）による流体不安定性の安定化。Z ピンチや重イオンビームの可能性。
- ・ **核融合炉への道（ITER 等）**：核融合エネルギーへのロードマップ。ITER とその目的。JET と ITER。JET の ITER 相似実験。ITER の課題 (α 物理、ELM によるダイバータ寿命、トリチウム吸蔵、NTM 制御)。政府間交渉 (ITER は 40 年間の国際的なチャレンジ)。4.6 B ユーロ必要。共同実施協定の策定。4 サイト (クリントン、カダラッシュ、六ヶ所、バンデロス) から望ましいサイトを 2003 年初めに選定。2001 年から始まった政府間交渉は 2003 年中旬に達成され協定調印に向けて各国政府に渡される予定。炉に向かって ITER が第 1 優先。炉の選択には附隨計画が不可欠。超伝導装置計画 (TS, LHD, HTU, JT-60SU, KSTAR, SST, W7-X) が定常化研究に貢献する。炉工学技術は投資が許容される範囲で実施すべき。Fast Track は 2050 年の時間スケールで予期される。欧州の加速グループの検討では条件 (ITER 遅延無し、ITER でトリチウム増殖／エネルギー取り出しと高性能定常運転、原型炉と実証炉を統合し信頼性を商用に近く、材料開発を ITER, DEMO/PROTO と並行して実施) を整えれば 10 年程早くできる。

結論：これまでの研究で核融合の優れた物理・技術基盤ができた。今日、燃焼プラズマの維持が次のゴールであり、ITER のサイトを決めて建設を進める。国際協力がキーポイントである。

2. 総合講演

2.1 セッション OV/1: 磁場閉じ込め核融合総合講演 1

OV/1-1: ITER: Fusion Research at the Dawn of a New Era

標準運転である ELM_yH モードについての物理的基盤はさらに拡充され、グリーンワルド密度 n_{GW} 近傍での高閉じ込めを達成、ELM によるパルス的な熱流束の低減についても見通しが立ちつつある。先進定常運転のためのデータも蓄積されている。超伝導コイル、モジュール型真空容器内構造物、高熱流束に耐えるプラズマ対向機器などについての工学開発も進展している。加熱装置、計測装置、プランケットモジュールは開発途上であり、世界各国の研究所からの貢献が期待される。

OV/1-2: Recent Developments towards Steady State Physics and Technology of Tokamaks in Cadarache

Tore Supra では水冷トロイダルポンプリミターの設置などにより除熱性能を高め、3MW の LH により 4 分間の放電を実現し、プラズマ投入エネルギーの世界記録を更新した。粒子バランスは定常には達していない。超音速ガス入射による効率的な粒子補給を実証した。完全電流駆動状態において中心付近の電子温度が振動する現象が見られた。また、カダラッシュ研究所では 1 MeV の負イオン源 NB や超伝導体の開発を行っている。

OV/1-3: Overview of JT-60U Results toward High Integrated Performance in Reactor-Relevant Regime

完全非誘導電流駆動の高ポロイダルベータ H モードが 1.8 MA で得られ、核融合三重積は $3.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$ に達した。実時間制御を用いた新古典テアリングモード (NTM) の抑制に成功した。電流ホールの安定な存在が観測された。高自発電流割合の負磁気シアプラズマにおける電流分布制御を実証した。中心ソレノイドコイルを用いずに、高い自発電流割合および内部輸送障壁 (ITB) を有するプラズマを生成した。電子サイクロトロン波加熱によるアルゴンの排出を観測した。

OV/1-4: Overview of JET Results

高三角度配位での高加熱入力により、不純物入射なしで ITER の運転条件 ($n/n_{GW}=0.85$, $HH_{y2}=1.0$) を満足する ELM_yH モードプラズマを得た。高密度領域では type I ELM の周期は減少する。NTM の現れる規格化ベータ値 β_N は規格化ラーマ半径 r^* の減少とともに低下する。type I ELM によるエネルギー損失はペデスター部の衝突周波数の低下とともに増大する。電子温度勾配制御、中性子発生率制御を用いて ITB を 7.5 秒間準定常に維持した。LHCD による電流分布制御を実証した。

OV/1-5: Overview of Recent Experimental Results from the DIII-D Advanced Tokamak Program

誤差磁場の低減によりトロイダル回転を維持して抵抗性壁モードを安定化した。EC により $m/n=3/2, 2/1$ の NTM を安定化した。off-axis ECCD により負磁気シアおよび ITB を維持し、非誘導電流駆動割合 90 % の高 β_N (~2.8) プラズマを得た。中心 EC 加熱により電子密度を平坦化し高 Z 不純物を排出した。不純物ガス入射によるディスラプション緩和を実証した。

OV/1-6: Recent Advance in LHD Experiment

内寄せの配位において良好な MHD 安定性と優れた閉じ込め特性を両立し、ベータ値 3% を達成するとともに、低衝突度において従来のスケーリングの 1.5 倍の閉じ込め性能を得た。EC 中心加熱により ITB を形成し、10 keV の電子温度を得た。衝突度の低下とともに磁気島の幅が小さくなることが観測された。ICRF によって 500 keV の高エネルギーイオンを生成するとともに、2 分間放電を実現した。

2.2 セッション OV/2: 磁場閉じ込め核融合総合講演 2

OV/2-1: Overview of ASDEX Upgrade Results

準垂直 NB の一部をより接線にした。より三角度の高い配位に対応できるようにダイバータを改造した。閉じ込め改善モードではないプラズマの中心と周辺に同時に ECH を行うことにより、 T_e 分布の硬直性 stiffness を調べ、 T_e 分布はほどほどに stiff であることが分かった。ECRF および ICRF 入射による不純物排出が確認できた。イオン ITB と H モードを伴った放電で、 $\beta_N \sim 4$ 、 $H_{89p} \sim 3$ が得られた。新古典テアリングモード (NTM) に ECRF を加えてこれを抑制し、さらに NB パワーを加えることにより NTM 発生の下限 β_N を超える β_N が得られた。DIII-D と似たような Quiescent H (QH) -mode が得られた。

OV/2-2: The National Spherical Torus Experiment (NSTX) Research Program and Progress towards High Beta, Long Pulse Operating Scenarios

NB 加熱により $\beta_l \sim 35\%$ が得られた。抵抗性壁モードと思われる現象が観測されたが、十分平坦な圧力分布を持った放電では no-Wall β_N 限界を超えたものがあり、高 β_N 放電においては no-Wall β_N 限界を約 30% 超えることができた。 β_N の最大値 6.5 を得た。また、NTM と思われるモードが観測された。自発電流と NBCD による非誘導電流駆動（全プラズマ電流の 60% 以下）により、放電時間を約 1 秒間まで延ばすことができた。L-mode edge および H-mode edge 両方において、 HH_{y_2} スケーリングを 50% 以上、また H_{89p} スケーリングの倍を超える閉じ込め性能が得られた。

OV/2-3: Overview of Recent Experimental Results on MAST

トーラス内側からの粒子補給により H-mode に遷移しやすいことが分かった。 $HH_{y_2} \sim 1$ の準定常 H-mode が得られた。粒子／エネルギー双方に ITB が観測された。理想 no-Wall β_N 限界近くの β_N (5 以上) が得られた。ディスラプション時のハロー電流は低く、非対称性も小さい ($I_h/I_p \times TPF < 3$) ことが確認された。プラズマ電流の約 30% の理論予測と同程度の NBCD を確認した。

OV/2-4: Major Results from Wendelstein 7-AS Stellarator

加熱／電流駆動においては、ECRF による、O-X-Bernstein wave 変換電子加熱／電流駆動を実証した。ICRF では、Beach-wave 加熱を実証した。平衡配位を一部高ベータに最適化した。ベータの上昇に対する磁気軸の変位は、計算と実験結果でおおむね一致している。中心 ECH による強い正電場の形成による "Electron Root" への到達により、中心で輸送が減少し高い電子温度が得られた。W7-AS は H-mode が得られた初めてのステラレータであるが、その閉じ込め特性はトカマクと概ね一致している。しかしながら、(1) W7-AS では軽水素と重水素で閉じ込めに違いが見られない、(2) 密度依存性がトカマクと異なる、(3) 分布が "stiff" でない、といった点で異なっている。W7-AS は、約 14 年間の運転を終えた。

2.3 セッション OV/3: 慣性核融合総合講演

慣性核融合反応は、通常、爆縮過程と点火過程に別けて論じられる。爆縮過程はレーザー等による直接照射と、重イオンビーム等でのペレット収納ホーラーム(hohlraum: 空洞容器) 照射によりあるいは大電流ZピンチによりX線を発生させ、このX線による静水圧的ペレット照射のいわゆる間接照射がある。点火過程には、強力な照射パワーにより一気に爆縮過程から点火過程に至らしめる中心点火方法とある程度まで爆縮のなされたプラズマに高出力(数10 TW)、短パルス(<1 ps) のレーザー照射により点火する高速点火方法がある。

OV/3-1: Progress in Direct-Driven Laser Fusion using GEKKO XII/PW Facility

高速点火用加熱レーザー、PWM(Peta Watt Module)の出力を1 PW(500 J, 500 fs($=10^{-15}$ s))まで増力した。他方、高密度プラズマ中での相対論的強力電子ビームの輸送現象の包括的な研究を開始した。激光XII号レーザーで爆縮させたプラズマに1PW 加熱を行い中心プラズマは1 keVに達した。発生中性子数も3桁増加し、これは相対論的電子ビームが高密度プラズマ中を伝播したことの証である。機器開発においても計測系のS/N比の向上、光学系の高精度焦点技術および激光XII号とPWMの同期の高精度化が達成された。

OV/3-2: Fusion Energy Research with Lasers, Direct Drive Targets, and Dry Wall Chambers

直接照射、固体炉壁方式のレーザー核融合開発を総合的に進めている。照射にはKrFレーザーとダイオード固体レーザー双方が仕様を満足すると考えられている。KrFレーザーはNRLのELECTRA計画として進められており、100 ns、400~700 Jが目標である。これができれば動力炉までの外挿は保証される。KrFレーザーの運動解析コード、ORESTESの開発が完了した。ダイオード固体レーザーの最終目標は10ns、100J、10Hz、10%の効率である。現状は20 ns、20 J、~1 Hzである。

OV/3-3: Recent Advances in Ignition Target Physics at CEA

CEAでの点火計画の目的は、次の10年の早い時期にメガジュールの間接照射でDT燃焼を起こさせることである。プラズマとレーザーの相互作用、ホーラームの運動、対称性及びアブレータ物理と流体不安定性の分野において期待すべき成果が得られたので、レーザー及びターゲットの仕様を高精度で決定することができるようになり、更に点火に向けての戦略が構築できるようになった。研究開発は米国DOEと協力して進められている。

OV/3-4: U.S. Heavy Ion Beam Science Towards Inertial Fusion Energy

米国における重イオン核融合開発は、強度の空間電荷状態の重イオンビームと電子ビームの輸送現象、とりわけ非一様な電流密度分布のモデル化と計測方法、および2,3ないし10程度の焦点格子区間に渡っての輸送上の不具合に起因するハロー形成の分野において著しい進歩がみられた。実験によって空隙のある高密度のビーム電流が制御できること、および2次電子を発生させないでビームの放射率を理論限界近くまで下げられることを示した。線源からターゲットまでのビーム輝度の変化を調べるための次段階の実験装置の設計も着々と進んでいる。

2.4 セッション OV/4: 磁場閉じ込め核融合総合講演 3

OV/4-1: Overview of Recent Alcator C-Mod Research

高密度・高パワー密度領域のプラズマにおいて、コアの輸送や H モードペデスターのダイナミックス等を調べた。off-axis の ICRF が内部輸送障壁 (ITB) をトリガーし、密度分布がピーキングする。鋸歯状振動による熱パルス伝播の解析から、ITB において熱拡散係数が約 10 分の 1 に低減していることを示した。外部からのトロイダルトルク入力がない時に、L-H 遷移後に運動量が周辺部からコア部へとエネルギー輸送の時間スケールで伝搬することを観測した。EDA (Enhanced D-Alpha) H モードにおいてペデスター圧力が上昇した時に小さな ELM が発生し、安定性解析の結果、 $n > 20$ の peeling-balloonning mode が不安定であることを示した。

OV/4-2: An Overview of Recent Results from the TCV Tokamak

off-axis の co-ECCD と on-axis の counter-ECCD を組み合わせることにより、負磁気シア配位を形成し、急峻かつ広い電子系 ITB の維持に成功した。その結果、完全電流駆動 (50% 以上の自発電流割合) のプラズマを、エネルギー閉じ込め時間の 500 倍 (電流拡散時間の 10 倍) 以上にわたって安定に維持することに成功した。

OV/4-3: Overview of Improved Confinement and Plasma Control in the MST Reversed Field Pinch

Pulsed Poloidal Current Drive (PPCD) によりトカマクの L モードと同程度のエネルギー閉じ込めを達成した。PPCD により磁気揺動を低減させ、その結果、中心部の電子温度は 1.2keV まで上昇し、ベータ値はこれまでの 2 倍の 15% を達成した。

OV/4-4: Magnetic Configuration and Transport Interplay in the TJ-II Flexible Heliac Experiment

グローバルな閉じ込め特性が ISS95 スケーリングのパラメータ依存性と一致した。他のステラレータ装置の H モードと同様に粒子とエネルギー閉じ込めの改善が得られ、ELM 様の現象を観測した。HIBP で測定した電場 (電位) は新古典理論値と一致した。リミターバイアス実験では、周辺部とコア部の両方に影響が観測された。

OV/4-5: Overview of the FTU Results

低域混成波電流駆動 (LHCD) により高密度領域で完全電流駆動のプラズマを 0.8 秒間維持した。LH と EC を組み合わせることにより電子温度の ITB を形成し、10keV 以上の電子温度が得られた。またイオンバーンシュタイン波 (IBW) 入射により電子密度と電子温度の両方に ITB を形成した。

OV/4-6: Overview of Steady State Tokamak Plasma Experiment on TRIAM-1M

中心ソレノイドコイルを用いずにプラズマ電流を立ち上げるシナリオを調べた。LH パワーを選ぶことにより ITER におけるプラズマ電流上昇率の工学的な制限である 150 kA/s を達成した。Enhanced Current Drive (ECD) モードへの遷移特性を調べた結果、電流駆動効率と LH パワーの関係にヒステリシスがあることが分かった。低密度 ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$) のプラズマを低パワー (< 10 kW) で 3 時間 10 分間維持することに成功した。

2.5 セッション OV/5&EX/C1: 磁場閉じ込め核融合総合講演 4, 閉じ込め

OV/5-1 : High Performance Discharges in the HT-7 and HL-1M Tokamaks

HT-7 では、リミター材の変更 ($\text{Mo} \rightarrow \text{C}$) とフェライト鋼を用いた磁場リップルの低減 ($4.2\% \rightarrow 1.6\%$) を行うことで、高性能プラズマの準定常維持実験を行ってきた。HL-1M では、電流分布制御と新古典テアリングモード抑制のため、ECRH 入射実験を行っており、ECRH 入射時に高エネルギー電子に起因する揺動を観測した。また、超音波分子ビーム入射の有効性を示した。

OV/5-2 : Transport and Turbulence Studies on T-10 Tokamak

閉じ込め時間の評価を行い、ITER のスケーリングと矛盾しない結果を得た。また、ガスパフと ECRH により、グリンワルド密度限界の 1~1.8 倍の高密度放電を得た。ECRH 入射時、輸送障壁が形成されることが示され、その発生条件を評価するとともに、輸送係数の評価、揺動との関係を議論した。

EX/C1-1 : High Performance Tokamak Experiments with Ferritic Steel Wall on JFT-2M

JFT-2M トカマクでは、原型炉の候補材料である低放射化フェライト鋼のプラズマへの適用性を実証するため、真空容器内壁の全面にフェライト鋼を設置して実験を行っている。これまでのところフェライト鋼設置に起因する悪影響は観測されず、有望な結果を得ている。また、他の先進的課題として、高 β_N プラズマ (~ 3.1) 生成、及びコンパクトトロイド入射の実験結果も紹介した。

EX/C1-2 : Overview of Quasi Single Helicity Experiments in Reversed Field Pinches

RFP 装置の閉じ込め改善として期待されている Quasi Single Helicity (QSH) の自己形成挙動について、4 台の装置 (EXRAP-T2R, TPE-RX, MST, RFX) の実験結果と理論解析の結果のレビューが行われた。QSH はどの装置でも実現され、その領域の閉じ込めが改善された。プラズマ電流が大きい方が QSH は生成されやすい傾向にあった。

EX/C1-3 : Field and Current Amplification in the SSPX Spheromak

LLNL の SSPX というスフェロマックの装置に関する研究成果が報告された。プラズマ性能の生成条件に対する依存性を調べ、磁場揺動が 1% 以下の場合には、 $T_e > 150 \text{ eV}$ 、 $\langle \beta_e \rangle \sim 4\%$ のプラズマが生成できることを示した。

EX/C1-4(R) : Extended Consolidation of Scaling Laws of Potential Covering over the Representative Tandem-Mirror Operations in GAMMA 10, Axisymmetric Magnetic Mirrors for Plasma Confinement. Recent Development and Perspectives, RF-Heating and Plasma Confinement Studies in HANBIT Mirror Device

筑波の GAMMA10、韓国の中型トандムミラー HANBIT、及びロシアの 3 台 (GDT, GOL-3, AMBAL-M) のミラー装置に関するレビュー講演を行った。GAMMA10 からは、主に電位分布の解析結果が示された。ロシアの装置では、閉じ込め向上、及び MHD 安定化のための装置形状の改良を行い、ベータ値 40 % を実現した。HANBIT に関しては第一期 (1996–2000) の実験のまとめが紹介された。

3. 実験

3.1 セッション EX/C2:H モード、輸送物理

EX/C2-1: Tolerable ELMs in Conventional and Advanced Scenarios at ASDEX Upgrade

ASDEX-U では、ダブルヌルに近いプラズマ配位を用いて、 $q_{95} > 3.5$, $\delta > 0.35$ の領域で type II ELM を伴う H-mode プラズマを得た。ペデスタルパラメータや閉じ込め性能は type I ELM が発生している時と変わらないため、ELM の変化は配位を変えたことによる周辺磁気シアの上昇の結果である。この配位を用いて、 $\delta = 0.42$, $q_{95} = 3.6$, 80~90% n_{GW} の領域で、 $\beta_N > 3.5$, $HH_{y2} = 1.3$ の高性能プラズマを得た。ペレット入射による Type I ELM 制御では、 $\Delta W_{ELM}^f f_{ELM}$ は変化しないものの、ペレット入射による f_{ELM} 上昇の結果、 ΔW_{ELM} を 1/3 に減少することに成功した。

EX/C2-2: Achievement of a High Fusion Triple Product and Steady State Sustainment in High- βp ELM My H-mode discharges in JT-60U

JT-60U では、核融合三重積 $n_D \tau_E T_i = 3.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$ をプラズマ電流 1.8 MA における完全非誘導電流駆動のもとで達成した。また、 $\beta_N \sim 2.7$ という高ベータのプラズマを 7.4 秒間 (τ_E の約 60 倍) 維持することに成功した。NTM の実時間安定化では、ECE による温度揺動の空間分布評価と CCS (Cauchy condition surface) 法によるプラズマ形状の再構成を組み合わせ、磁気島中心検出と EC ミラー位置制御を 10 ms 毎に実時間で行うことが可能になった。そして、 $\beta_N \sim 1.5$ で発生した NTM (3/2 モード) を約 3 MW の EC 入射により完全に安定化し、ベータ値および閉じ込め改善度を上昇させることに成功した。

EX/C2-3: Correlation of H-mode Density Barrier Width and Neutral Penetration Length

H-mode 密度ペデスタルの幅と中性粒子の浸入長に良い相関があることを示した。密度分布の新しい解析モデルと DIII-D の OH, L-mode, H-mode のプラズマと比較し、ペデスタル密度と幅、ペデスタル密度と密度勾配、密度分布の形状がモデルと良く合った。これらの結果から、粒子供給が H-mode 境界輸送障壁 (ETB) の大きさを主に決定していると考えられる。UEDGE コードによるシミュレーションで得られた ETB の大きさは実験データと大体一致した。

EX/C2-4: Towards the Realization on JET of an Integrated H-mode Scenario for ITER

JET では、ITER の運転領域に近いパラメータ ($\delta = 0.47$, $n/n_{GW} = 1.1$) において $HH_{y2} \sim 1$, $\beta_N > 1.8$ が得られた。低三角度 ($\delta \sim 0.2$) における Ar 入射放電では、 $P_{rad}/P_{tot} = 0.7$, $n/n_{GW} = 1.2$ において $HH_{y2} \sim 0.9$, $\beta_N \sim 2.1$ という高閉じ込めプラズマが得られた。不純物入射による ITG モードの安定化と考えられる。高三角度配位における強いガスパフや不純物入射により ELM の熱負荷が低減した。また、ELM 热負荷の v^* と τ_{II} スケーリングから、ITER のダイバータ板において、許容できる寿命で運転可能な領域があることが分かった。

EX/C2-5: H-mode Research in NSTX

NSTX における LH 遷移闘パワーは強い密度依存性を示しており、 $n = 2.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ では 0.63 MW に対し、 $n = 2.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ では 0.32 MW である。また、強磁場側からガスパフした方が闘パワーが低い。ELM の熱負荷 ($\Delta W_{ELM}/W$) はシングルヌル配位に比べてダブルヌル配位の方が小さい。ダイバータ熱負荷は 3 倍程度外側が高く、 P_{LOSS} の 70% がダイバータに到達している。

EX/C2-6: H-mode Access Physics in MAST

MAST では上下のヌル点が同じ磁気面上にあるダブルヌル配位の時に H モードに遷移する。強磁場側からガスパフすることで OH でも H モードに遷移し、遷移闘パワーは通常トカマクのスケーリングの 1.7 倍である。また、ガスパフ位置の違いによりトロイダル回転が 6 km/s 程度異なる。低密度プラズマの電流立ち上げ中に NBI 加熱を行うことで、イオン系、電子系の ITB が形成される。また、ITB の裾はトロイダル回転シアの強いところに位置している。

3.2 セッション EX/C3:電流ホール、内部輸送障壁

EX/C3-1Ra: Stable Existence of Central Current Hole in the JT-60U Tokamak, EX/C3-1Rb: Equilibria and Stability of JET Discharge with Zero Core Current Density

JT-60U と JET の電流ホールプラズマの特徴が報告された。両装置とも電流ホールは、周辺電流駆動 (JT-60U ではブートストラップ電流、JET では LHCD) により形成される。電流ホール領域の圧力分布はほぼ平坦であり、閉じ込めが存在していないように見えるが、その外側の輸送障壁に支えられて、高性能プラズマを維持できている。また、どちらの装置でも、電流ホール内に負の電流が流れることはなく、JET では、軸対称の鋸歯状振動により電流が吐き出される為であると推察しているが、実験的証拠は見つかっていない。

EX/C3-2: Core and Edge Aspects of Quiescent Double Barrier Operation on DIII-D, with Critical ITB Physics Issues

QH モード (Quiescent H-mode)、QDB モード (Quiescent Double Barrier) に関する研究の進展が報告された。特に大きな進展があったのは、EC を用いた安全係数分布のコントロール、不純物の吐き出しである。QH モードでは、 $\beta < 3.8\%$ 、 $S_N < 5.5 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ に達している。また、QDB モードでは、QDB 状態を 3.8 秒間維持することに成功している。

EX/C3-3: Studies of Current Profile Optimization and Influence of Electron Heating towards Advanced Tokamak Operation on JT-60U

負磁気シア (RS) プラズマにおいて電流分布制御により、グリンワルド規格化密度、閉じ込め改善度および β_N が高く、ITER の定常運転モードに匹敵するプラズマ条件を完全電流駆動状態で達成している。また、電子を主に加熱した状態での ITB の振る舞いを調べ、RS プラズマでは ITB が維持されているが、正磁気シアプラズマでは、電場勾配が小さくなり、イオン ITB が劣化することが示された。

EX/C3-4: Progress Towards Steady-State Operation and Real Time Control of Internal Transport Barriers in JET

JET の先進トカマク研究において、強い負磁気シアプラズマにすることにより得られた高性能プラズマに関して報告がなされた。過渡的には、 $I_p = 2.5 \text{ MA}$ にて $HH_{y_2} \sim 1.9$ 、 $\beta_N = 2.4$ を得ており、 $I_p = 2.0 \text{ MA}$ では、ITB を 11 秒間維持したとしている（ただし、 $HH_{y_2} \sim 1$ 、 $\beta_N = 1.7$ ）。また、LH により電流分布制御を行った結果に関しても報告がなされた。

EX/C3-5Ra: Impurity Transport in Internal Transport Barrier Discharges on JET, EX/C3-5Rb: Relationship between Particle and Heat Transport in JT-60U Plasmas with Internal Transport Barrier

JT-60U と JET のプラズマにおいて、ITB が有る場合の粒子輸送に関する報告がなされた。ITB プラズマでは、両装置において高 Z 不純物は ITB 内に蓄積される。JET では新古典論に従っているとしているが、JT-60U では新古典論より大きい輸送であると解析されている。また、JT-60U では、蓄積された不純物が ECH による密度勾配の減少により吐き出されることが示された（正磁気シアプラズマにおいて）。

EX/C3-6: Progress towards Internal Transport Barriers at High Plasma Density Sustained by Pure Electron Heating and Current Drive in the FTU Tokamak

EC と LH において ITB プラズマを生成した。この時、中心電子密度 $0.8 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ において中心電子温度は 11 keV を越えている。また、内部輸送障壁は $r/a \sim 0.4$ に達している。

EX/C3-7Ra: Double Transport Barrier Plasmas in Alcator C-Mod, EX/C3-7Rb: Dependence of Particle Transport on Heating Profiles in ASDEX Upgrade

Alcator C-Mod において観測されている ITB と EDA (Enhanced D-Alpha) を同時に持つプラズマの特性に関する報告、および ASDEX-U における粒子輸送に関する報告がなされた。C-Mod では ICRF により ITB を得ているが、定常状態は得られない。また、ASDEX-U では、粒子拡散係数は熱拡散係数にほぼ比例している事を ICRF、ECH 等を用いて示した。

3.3 セッション EX/C4:トーラス系における輸送

EX/C4-1Ra: Turbulence Regulation and Stabilization by Equilibrium and Time-Varying, Sheared Turbulence Flows

ビーム発光分光の2次元測定により、径方向に局在化しポロイダル方向に長い波長を有する約15kHzの揺動フローが観測された。これは理論的に予測されているgeodesic acoustic modeの特徴に類似する。イオン ∇B ドリフトの向きによってポロイダルフローのシアは変化し、Hモード遷移の閾値の違いに対応する。

EX/C4-1Rb: Quantitative Comparisons of DIII-D Turbulence Measurements to Gyro-Kinetic and Gyro-Fluid Turbulence Simulations

ビーム発光分光や反射計により計測されたLモードプラズマの揺動の径方向相関長は、Zonal Flowを考慮したジャイロ運動論コードの結果と類似する。ジャイロ流体コードでは実験のポロイダル波数スペクトルをほぼ再現するが、揺動レベルやイオン熱輸送については実験値より大きい値を示した。

EX/C4-2Ra: Electron Heat Transport in ASDEX Upgrade: Experiment and Modelling

小半径方向2箇所でのECHパワー摂動で生じた熱パルス伝播から電子熱拡散係数 χ_e^{HP} を評価した。 χ_e^{HP} は温度勾配依存性、温度勾配閾値およびq依存性を取り入れたモデルとよく一致した。温度勾配の閾値から捕捉電子モードの存在が示唆された。

EX/C4-2Rb: Experiments on Electron Temperature Profile Resilience in FTU Tokamak with Continuous and Modulated ECRH

ECHにより、定常状態および熱パルスに対する電子熱拡散係数を調べた。プラズマ中心付近の温度勾配が小さい領域では、分布の硬直性(stiffness)は弱く、熱拡散係数は小さいが、その外側の領域では、強い硬直性と大きな熱伝導が観測された。

EX/C4-3: Increased Understanding of Neoclassical Internal Transport Barrier on CHS

EC+NB加熱によりイオン、電子の双方にITBが形成された。プラズマの中心部は電子root、周辺部はイオンrootとなっており、その境界において強い径電場シアが形成されている。

EX/C4-4: Experimental Evidence of Fluctuations and Flows near Marginal Stability in the Plasma Boundary of Fusion Plasmas

JETおよびTJ-IIステラレータの境界プラズマの静電揺動を測定した。静電揺動のポロイダル位相速度の勾配は揺動の相関時間の逆数とほぼ一致しており、不安定性の閾値になるまでE×Bシアフローが成長することを示唆する。

EX/C4-5Ra: Response of Temperature and Density Profiles to Heat Deposition Profile and its Impact on Global Scaling in LHD

LHDのエネルギー閉じ込め時間は電子密度とともに向上するが、ある程度以上の密度では温度分布の平坦化とともに飽和するようになる。これはNBI加熱分布の平坦化で説明でき、熱輸送はボームとジャイロボームの間の温度依存性を示す。

EX/C4-5Rb: Transport Barrier Formation by Application of Localized ECH in the LHD

低密度での中心EC加熱により電子熱輸送障壁が形成され、中心電子温度10keVを達成した。電子熱輸送障壁の形成には閾パワーが存在し、密度が低い方が閾パワーが低くなる。

EX/C4-6: Core Fluctuations and Current Profile Dynamics in the MST Reversed-Field Pinch

ファラデー回転法により高温のRFPプラズマの電流分布を初めて計測した。巨視的不安定性による電流分布の平坦化、磁場揺動の増大が観測された。Pulsed Parallel Current Drive(PPCD)による閉じ込め改善時に、磁場揺動の減少が観測された。

3.4 セッション EX/C5&TH/8: ヘリカルおよび球状トーラスにおける閉じ込め TH/8-1: On the Physics of Runaway Particles in JET and MAST

MAST で観測されるイオン加速及び JET で観測される逃走電子に関して調べた。MAST における内部磁気再結合現象後の高エネルギーイオン分布は、磁気再結合により生じる電場に起因する逃走イオン加速であることを示した。JET では、ディスラプション後に逃走電子による電流が 1~2 秒程度の時間スケールで減衰することが観測されている。この現象が、クーロン衝突とシンクロトロン放射の組み合わせにより説明できることを示した。

EX/C5-1: Plasma Performance and Impurity Behavior in Long Pulse Discharges on LHD

前回の IAEA 後のキャンペーンにより、NBI 加熱プラズマを 110 秒及び、定常 ICRF 加熱プラズマを 2 分間維持できた。特に、ICH のみの 2 分間放電の達成により、長時間高閉じ込め放電の新たな領域を開くことを可能とした。内寄せ配位の高閉じ込めプラズマを、NBI と ICRF 放電双方に対して長時間維持できた。長時間の NBI 加熱水素放電時に不純物蓄積が観測された。

EX/C5-2: Confinement Studies of Auxiliary Heated NSTX Plasmas

NSTX プラズマのエネルギー閉じ込めは、L モードスケーリング (ITER97L) 及び H モードスケーリング (ITER98P) の双方から与えられる値の、それぞれ 2~3 倍及び 1.5 倍まで改善された。輸送解析により、通常のトカマクと異なった特性を持つ熱輸送および運動量輸送が示された。 χ_i はプラズマの広い領域において新古典拡散に近いレベルである。しかしながら、 χ_e は χ_i に比べるとかなり大きく、主なエネルギー損失 channel になっている。また、ネオンパフ実験により、L モード放電のプラズマ中心領域では、粒子拡散も新古典拡散レベルであると評価できた。NSTX では HHFW (High-Harmonic Fast Wave) 加熱により H モード放電を実現できた。このことは、NBI と HHFW 駆動放電を比較することにより H モード遷移及びプラズマ回転の役割を研究することに NSTX が適していることを示す。

EX/C5-3: A Demonstration of Magnetic Fields Optimization in LHD

LHD において、磁気軸を径方向に変位させた配位での新古典輸送を調べることにより、磁気軸が内側シフトした配位において、 $1/v$ 領域に対して最適な磁場配位が存在することを示した。この配位では、捕捉粒子の磁気面からのずれは非常に小さく、リアクターサイズの装置におけるエネルギー減衰時間よりも長い、 α 粒子に対する良い閉じ込め領域の存在を示した。また、実験的にも、LHD における熱粒子輸送と高エネルギー粒子閉じ込めに対する磁場配位の最適化の効果を示した。

EX/C5-4: Improved Performance of the WS-AS Stellarator with the New Island Divertor

アイランドダイバータにより、W7-AS 装置において高パワー・高密度 NBI 放電の新たな領域を達成した。以前のリミター配位に比べて、準定常放電の実験領域が、パルス長、密度、過熱パワーに対して大きく拡大した。

3.5 セッション EX/S1: 安定性, 高ベータ

EX/S1-1: Fast Dynamics of Type I ELM and Transport of ELM Pulse in JT-60U

高時間分解の計測器(反射計, 干渉計, D_α 強度測定, 磁気プローブ)を同時に用いてtype I ELMを詳細に測定した結果、密度ペデスタイルの崩壊過程に4つのフェーズがあること、密度ペデスタイルが崩壊する領域の幅は崩壊前のペデスタイル幅の2倍程度に及ぶことが分かった。また密度ペデスタイルの崩壊が弱磁場側に局在していることを実測により明らかにした。ELMにより吐き出された粒子が弱磁場側赤道面からX点に伝搬する速度およびダイバータ板の熱流速とX点近傍のイオン飽和電流の時間変化から、対流による熱輸送が主であることがわかった。

EX/S1-2: Sawtooth, Neo-Classical Tearing Mode and Error Field Studies in JET

ICRFおよびNBに起因する高速イオンによる鋸歯状振動安定化効果のシミュレーションを行い実験結果をよく再現した。また、新古典テアリングモード(NTM)の発生原因となる種磁気島(seed island)を制御した結果、高ベータでのNTM抑制に成功した。また、JETとDIII-Dにおける2/1 NTMの発生条件を調べた結果、両装置で同様の v^* , ρ^* 依存性を持つことがわかった。また、誤差磁場とプラズマ回転の関係を調べた結果、モデルと実験結果が定性的に合うことがわかった。

EX/S1-3: Increased Stable Beta in DIII-D by Suppression of a Neoclassical Tearing Mode using Electron Cyclotron Current Drive and Active Feedback

NTMに起因する磁場揺動が小さくなるようにプラズマ位置またはトロイダル磁場を実時間で変更するシステムを構築し、NTMの安定化に成功した。また、3/2 NTMを安定化した後、入力パワーを増加することにより β_N を60%増加させることに成功した。さらに、実時間システムを用いて2/1 NTMを安定化することに成功した。

EX/S1-4: Neoclassical Tearing Modes on ASDEX Upgrade: Improved Scaling Laws, High Confinement at High β_N and New Stabilization Experiments

NTM発生時の β_N に加えNTM消滅時の β_N を調べ、同様の ρ^* 依存性を持つことを明らかにした。また、1/1モード、4/3モードとの相互作用により3/2 NTMの成長が抑えられる領域が見つかり、この領域のNTMをFIR-NTM(Frequently Interrupted Regime NTM)と名付けた。FIR-NTMは通常のNTMに比べ閉じ込めの劣化が小さい。また、鋸歯状振動抑制によるNTM抑制、NTM安定化後のNBパワーアップも行い、JETやDIII-Dと同様の結果を得た。

EX/S1-5: Beta-limiting MHD instabilities in improved performance NSTX spherical torus plasmas

誤差磁場を小さくし圧力分布を平坦化することにより、巨視的なMHD不安定性を回避し、以下の高ベータプラズマを得た(同時達成ではない): $\beta_t = 35\%$, $\beta_N = 6.5$, $\langle \beta_N \rangle = 4.5$, $\beta_N/l_i = 10$, $\beta_p = 1.4$ 。また安定性解析の結果、高 β_p 放電の多くで、導体壁のない時の理想安定性限界を超えていたことがわかった。

EX/S1-6: Stability at High Performance in the MAST Spherical Tokamak

加熱装置と計測装置の拡充によりHモードプラズマの性能向上を図り、 $\beta_N = 5\text{--}6$, $\beta_t \sim 16\%$, $\beta_p = 1.9$ を得た。安定性解析によると β_N は導体壁のない時の理想安定性限界近傍にあった。また、球状トカマクにおいてNTMを初めて観測し、鋸歯状振動を抑制することにより高ベータプラズマが得られた。またELMはtype IIIと考えられる。

3.6 セッション EX/S2&TH/5: 抵抗性壁モード, ディスラプション

TH/5-1: Nonlinear Simulation Studies of Tokamaks and ST's

NSTX で観測される、電子温度分布に対するプラズマ密度の外側シフトを説明するためのシミュレーションを行った。1 及び 2 流体 MHD、ハイブリッドモデルに基づいたシミュレーションで、磁気面に対してプラズマ密度が外側に大きくシフトするという、定性的に同じ結果を得た。また球状トーラスで問題となる内部磁気再結合現象 (IRE) は、有限ベータトロイダルシミュレーションにより、3 つの異なった種類に分類されることを示した。また、トカマクプラズマで観測される電流ホールが、 $n=0$ の MHD 不安定性の非線形成長により説明できる事を示した。

TH/5-2: Long Time Scale Plasma Dynamics Driven by the Double Tearing Mode in Reversed Shear Plasmas

負磁気シアプラズマで重要なダブルテアリングモード (DTM) において、新しい非線形不安定化過程が存在することが示された。この過程では、DTM の Rutherford 型領域における緩やかな内外磁気島の成長により、外側磁気島の X 点近傍に局所的なプラズマ電流の集積（電流点）が起こる事により生じる。このとき、DTM は急激なモード成長を示し、モード成長率が抵抗値にほとんど依存しない領域が現れる。これは、低 β 負磁気シアプラズマにおけるディスラプションを説明できる可能性がある。

EX/S2-1: Resistive Wall Stabilization of High Beta Plasmas in DIII-D

DIII-D における実験により、十分なプラズマ回転により、高ベータ領域で理想 kink モードが抵抗性壁により安定化されうることを示した。静的磁場の非対称性を注意深く低減することにより、理想 MHD の壁なし限界を十分上回るプラズマ性能を可能とし、完全導体壁限界に近いプラズマを 1 秒以上保持できた。また、プラズマ回転を伴った状態で、特性壁時間より 5 倍以上速い成長率を持つ抵抗性壁モードの直接帰還制御に成功した。

EX/S2-4: Disruption Mitigation Using High-Pressure Noble Gas Injection on DIII-D

DIII-D において中間的 Z 値ガスの高圧注入を行うことにより、プラズマ崩壊で生じる 3 つの主要なダメージを同時に低減した。第一に、不純物の大部分を中心プラズマに集めることにより、第一壁へのプラズマエネルギーの 95 % 以上を散逸し、ダイバータ熱負荷を減少させた。第二に、ポロイダルハロー電流によるベッセル $J \times B$ 応力を低減した。第三に、ガス注入により生じる bound electron が電流クエンチにおける相対論的逃走電子の生成を抑制した。

EX/S2-2: The Resistive Wall Mode and Feedback Control Physics Design in NSTX

NSTX では、導体壁安定化 MHD 領域を確立することにより、最大トロイダル β で 35%、 β_N で 6.5 をそれぞれ達成した。コラップスは $n=1$ 理想 MHD β 限界を破ることと関連していると考えられる。 $n=1$ 抵抗性壁モードが広い β_N 領域で観測されており、数値計算で得られた成長率は実験的に得られたものと良く一致する。最も効果的な配位では、理想壁モード限界の 94 % まで β_N を上昇できる可能性を示した。

3.7 セッション EX/S3&IC&TH/6:ヘリカル系

EX/S3-1: Investigation of the Beta-Limit in the W7-AS Stellarator

W7-ASにおいて(1)全てのNBIをco入射可能にすること(2)高回転変換放電における表面の磁気島の消去(3)ダイバータの改良、によって $\langle\beta\rangle \sim 3.4\%$ を達成した。典型的な放電では最大到達 $\langle\beta\rangle$ は加熱パワーで決まるが、電子密度限界やトロイダル電流駆動のMHDの不安定な領域では不安定性が閉じ込め性能を劣化させている。

EX/S3-2: MHD Instabilities and Their Effects on Plasma Confinement in the Large Helical Device Plasmas

正味のプラズマ電流の無いLHDにおいてMHD不安定性とそのコアプラズマに対する影響を調べている。低磁場($\leq 0.6T$)の高 β (~2%)プラズマにおいてL-H遷移によって蓄積エネルギーが急激に上昇するが、周辺のm/n=2/3とm/n=2/2のモードによって急速に飽和する。高速イオン励起MHDについて $\langle\beta_{b||}\rangle < 5\%$ 、 $V_{b||}/V_A < 2.5$ という広いパラメータ領域において実験を行った。Helicity induced Alfvén eigenmode(HAE)を初めて観測し、トカマクの負磁気シア放電と同様なTAEからGAEへの遷移を観測した。低磁場ではTAEは高速イオンを排出するが主プラズマの閉じ込め改善を引き起こす。

IC-1: Physics Considerations in the Design of NCSX

NCSXのような準軸対称コンパクトステラレータはドリフト軌道を最適化した装置に比べ、 $\beta \sim 5\%$ 、低アスペクト比(<4.5)で、定常かつディスラプションのない磁場閉じ込め核融合方式となりうる可能性が高く、低い磁場リップル、良い磁気面、 $\beta \sim 4\%$ 程度での理想不安定性の安定化を留意して設計がなされている。

TH/6-1: Nonlinear MHD Analysis for LHD Plasmas

Reduced MHD方程式をもとにしてLHDにおける複数のヘリシティをもつ交換不安定性の解析を行った。十分低 β の場合、一つのモードが飽和し、続いて近接する他の一つのモードが励起するということがおだやかに繰り返され、圧力分布の局地的な変形をおこす。圧力分布を固定して β を上げると複数のモードが重なりあつたバーストモードとなり、全域的に圧力勾配を低下させるが、低ベータで飽和した場合の圧力分布のままベータを上げると、バーストモードを抑えられる。このことはLHDプラズマの圧力分布が高いベータを達成するために安定な経路をたどって自己組織化している可能性があることを示唆している。

TH/6-2: Constructing Integrable Full-Pressure Full-Current Free-Boundary Stellarator Magnetohydrodynamic Equilibrium Solutions

自由境界、高圧力、全電流のステラレータMHD平衡においてPrinceton Iterative Equilibrium Solverを用いることにより磁気島を消滅させることができる。反復計算を繰り返すことによりキンク不安定性に対して安定な磁場配位でさらに工学的に建設可能なコイル配置とすることが可能となった。

TH/6-3: Nonlinear MHD Simulations of Spherical Tokamak and Helical Plasmas

球状トカマク(ST)とヘリカルプラズマにおける緩和現象の非線形MHDシミュレーションを3Dで行っている。STにおいては中程度のnのバルーニングモードの2ステップの発展と、それに続くn=1の内部崩壊が観測された。LHDにおけるHINT(3次元平衡コード)の計算の結果、m=2/n=1の圧力駆動モードが観測されたが、これは中程度のバルーニングモードよりも大きな成長率と飽和レベルを持つ。

3.8 セッション EX/D1&TH/3: プラズマ境界, ダイバータ

EX/D1-1: Steady State and Transient Power Handling in JET

JET の MIIGB ダイバータにおける定常的および過渡的な熱負荷を測定した。その結果 SOL 部の輸送は古典モデルが実験結果を最もよく再現することが分かった。また、実験値から ITER における Type I ELM の熱負荷を予想すると、壁材料の限界よりわずかに低いという結果を得た。更に、ディスラプション時にダイバータに到達する熱は非常に小さく(蓄積エネルギーの数%)、ITER で想定されている状況と大きく異なることがわかった。

EX/D1-2: Exhaust, ELM and Halo Physics using the MAST Tokamak

球状トカマク MAST の SOL 特性を詳細に測定した。全ての配位において、ELM を含めたコア部の熱損失の大部分(>80%)は外側ダイバータ板に到達した。ELM 時のエネルギー損失は対流輸送であり、ELM は type III であった。またトロイダル方向に非対称にバイアスを印加したところ L モードプラズマでは熱流束幅が広くなるのが観測された。また垂直位置不安定性が発生したときの熱流のトロイダル非対称性は ITER と同程度であった。

EX/D1-3: Driving Mechanism of SOL Plasma Flow and Effects on the Divertor Performance in JT-60U

強磁場側と弱磁場側の SOL 流と分布測定を初めて行い、SOL 流の特性と駆動機構を明らかにした。また ∇B ドリフトがダイバータ方向のときセパラトリックス近傍で「逆流現象」が起こることを明らかにした。SOL 流および分布はプラズマのドリフトを考慮して UEDGE コードで計算した結果と同等であった(ただしマッハ数は実験値の方が大きかった)。またガスパフおよびダイバータポンプ(パフ&ポンプ)時の粒子束を測定した結果、マッハ数と衝突度が強磁場側で顕著に増大するのが観測された。

EX/D1-4: Operation of ASDEX Upgrade with Tungsten coated Walls

ASDEX-U では第 1 壁にタングステンを装着した(中心支柱の 87%)が、プラズマ運転に顕著な悪影響はなかった。様々な運転領域において、コア部のタングステンの蓄積はタングステン壁の侵食よりもコア部の輸送により決まることが分かった。また、中心加熱を行うと顕著な閉じ込め劣化を伴わずにコア部のタングステンの蓄積を制御できた。また、リミタフェーズにタングステンの侵食が予想以上に大きくなることがわかった。

EX/D1-5: Power Exhaust and Edge Control in Steady State Tore Supra Plasma

Tore Supra では強制水冷が可能なトロイダルポンプリミタを設置した(熱除去能力 15 MW、最大熱負荷 10 MW/m^2)。その結果、6 MW の加熱時 3.6 MW の熱除去を行うことができ、260 秒放電の間リミタ表面温度は 400°C で安定した。最大熱流速は 3 MW/m^2 で熱流束や熱分布は設計計算と非常によく合った。また、2002 年の LH/IC 加熱時に高速電子/イオンに起因する新たな熱流束が重畠して現れたが、許容値以下だった(詳細は解析中)。

TH/3-1: ELMs and Constraints on the H-mode Pedestal: A Model Based on Peeling-Ballooning Modes

急峻な周辺圧力勾配の結果生じた自発電流により Peeling-Ballooning mode が成長するという、ELM およびペデスタルのモデルを構築した。安定性解析の結果、中程度($n=4-40$)の波長の Peeling-Ballooning mode が最も不安定になることが分かった。またペデスタル部の安定性解析用に開発した ELITE コードにより、実験時の ELM 発生時刻、ELM の深さ、衝突度やプラズマ形状によるペデスタル高の違いを再現できた。

3.9 セッション EX/D2&TH/4: 境界乱流, 高エネルギー粒子

EXD2/1: Density Limit and Cross- Field Edge Transport Scaling in ALCATOR C-MOD

密度限界に至る過程で、周辺プラズマにおける磁力線を横切る粒子輸送の4段階にわたる特徴的な変化を観測した。このことは、SOLとプラズマ周辺部の輸送とスケーリングが密度限界のスケーリングに重要な役目を果たしているという示唆している。

TH4/1: Blobs and Cross- Field Transport in the Tokamak Edge Plasmas

バルクプラズマから剥がれ落ちて発生し、磁力線に沿ってコヒーレントな構造をもつプラズマプロブ(blob)と呼ばれる構造・現象がある。SOLで速い対流的な輸送現象が、観測されているが、これはプラズマプロブで解釈できることを解析的に、および、2D、3Dモデルのコードで示し、プラズマプロブが SOL の輸送において重要な役目を担っていると主張している。

TH4/2: Electrostatic Turbulence and Transport with Stochastic Magnetic Field Lines

フラックス駆動型抵抗性バルーニング揺動の3次元数値計算にて、ストキャスティックな磁場が静電揺動に与える影響を調べた。結果、(a) 静電揺動のレベルは下がるが対流束は減らなかった。また、(b) ストキャスティックな磁場による異常摩擦によりポロイダル回転は減速し、zonal フローは減った。

TH4/3: Alfvén Eigenmodes in Shear Reversed Plasmas

負磁気シア配位において、 q_{\min} の値に応じて擬似周期的な周波数增加掃引現象アルヴェンカスケードが発生する場合がある。数値計算を使って、アルヴェンカスケードが JET の実験結果をうまく説明できることがわかった。また、アルヴェンカスケードが q_{\min} に敏感なことを利用すれば、 q_{\min} の計測に有用である。

TH4/4: Collective Effects and Self- Consistent Energetic Particle Dynamics in Advanced Tokamaks

先進トカマク運転時のホローな q 分布時には二つのタイプの Energetic Particle Mode (EPM) が観測されることが解析的に予想されるが、この二つは減衰機構が異なるだけで同じ分散関係で記述できる。また、Hybrid MHD-Gyrokinetic Code (HMG) による解析で、EPM による高速イオンの輸送機構を relay runner モデルで解釈可能としている。

TH4/5: Field- Reversed Configuration (FRC) Equilibrium and Stability

FRC の運動論的安定性解析に、適切な内部構造を取り入れたゆっくりとした Z 方向の変化と有限電子温度を取り込んだ結果、解析から求めた安定性限界が実験のスケーリングと同レベルであった。

TH4/6: Predicting the Behaviour of Magnetic Reconnection Processes in Fusion Burning Plasma Experiments

核燃焼プラズマではリコネクションへの様々な運動論的效果が新たに加わる。核燃焼プラズマ領域でのリコネクション現象について議論。(1) 鋸歯状振動については M1TEV コードを新たに開発し、実験結果と概ね合う結果を得た。(2) ドリフトアーリングモードとドリフト音波 (drift-acoustic wave) との結合がこれらのモードの安定性を増す。(3) X 点でのリコネクションが軸対称なプラズマの動きで重要な役目を果たす可能性がある。

3.10 セッション EX/W&TH/7:電流駆動, 高エネルギー粒子

EX/W-1: Heating, Current Drive and Energetic Particles Studies on JET in Preparation of ITER Operation

プラズマの形状と CD_4 の使用により結合を改善し、3.4 MW の LH パワーを NBI と ICRF による 15 MW 以上の加熱パワーと共に ITB プラズマに投入し、負磁気シアの安全係数分布と ITB を 8 秒間維持した。 α 粒子を模擬するために 120 keV の ^4He をビーム入射し三倍高調波の ICRF を用いて高速イオン (2 MeV) を生成した。Q=10 に等価な制御を模擬した。

EX/W-2: Heating and Current Drive by Electron Cyclotron Waves in JT-60U

LHCD による負磁気シアプラズマ中に EC 波加熱を行い、26 keV の電子温度 (ECE 計測) を達成した。EC 波加熱/電流駆動を組み合わせて ITER クラスの電子温度 21 keV での ECCD を実現し、駆動電流分布と電流駆動効率 $0.42 \times 10^{19} \text{ A/W/m}^2$ を測定した。捕捉粒子による ECCD 規格化電流駆動効率の減少を測定し、捕捉粒子効果が電子密度の上昇と共に弱くなることを示した。

EX/W-3: ECRH at W7-AS

2002 年 7 月 31 日にシャットダウンした W7-AS での EC 波実験 (電子温度 6.8 keV まで、電子密度 $3.5 \times 10^{20} / \text{m}^3$ まで) を歴史的にまとめた。ステラレータ磁場に固有な捕捉粒子と波との相互作用を議論した。最初の Bernstein 波による電流駆動実験を報告した。

EX/W-4: Physics of Electron Cyclotron Current Drive on DIII-D

測定した ECCD 規格化電流駆動効率は co-/ctr- のいずれも、吸収位置が赤道面内側で小さな小半径になるに従い増加した。測定した規格化電流駆動効率は電子密度の増加または電子温度の増加と共に増加した。統計的な比較により、実験結果は線形理論よりも準線形理論と良い一致を示す。

EX/W-5: Electron Cyclotron Current Drive and Suprathermal Electron Dynamics in the TCV Tokamak

ECCD による高速電子の割合を硬 X 線カメラと強磁場側 ECE によって測定し、径方向粒子輸送を考慮した準線形 Fokker-Planck コードのモデリング結果との比較を行った。実験に矛盾の無い物理描像は、ECCD において非熱化電子の径方向拡散が重要であることを示した。

EX/W-6: Property of Alfvén Eigenmode in JT-60U Reversed Shear and Weak Shear Discharges

NNB または IC 波加熱した低 β_h の負磁気シア放電において、安全係数最小値の減少と共に急速な周波数掃引とその後の周波数の飽和を伴う AE を観測した。新しいタイプの AE (RSAE) を導入し、これを用いて複雑な周波数の変化を説明した。負磁気シアプラズマにおいて強い高速イオン損失を避けるために、 $n=1$ AE の q_{\min} 遷移が起こる領域 ($2.4 < q_{\min} < 2.7$) を避けて運転することが、望ましい。

TH/7-1Ra: Theory and Observations of High Frequency Alfvén Eigenmodes in Low Aspect Ratio Plasma

NSTX における低アスペクト比プラズマでのサイクロトロン周波数以下の不安定性を新たに観測した。低アスペクト比プラズマにおける圧縮 AE とグローバルシア AE を用いて、観測される高周波不安定性を説明した。

TH/7-1Rb: Fast Particle Destabilization of TAE Type Modes in NSTX, JT-60U and Proposed Burning Plasma Devices

NSTX と JT-60U 及び ITER, FIRE, IGNITOR と JET の DT 運転における DT 燃焼プラズマにおける高速イオン駆動 TAE の特性を調べた。解析は実験結果を良く再現した。提案されている DT 燃焼プラズマ実験では TAE は ITER と FIRE において不安定である。

3.11 ポスターセッション EX/P1:JET, 小型トカマク

同セッションでは、JET からの 6 件の発表 [04,08,09,13,14,17] をはじめ、Damavand [01]、CT-6B [07]（イラン）、ADITYA [02]（インド）、TUMAN-3M [03]、T-11M [12]、T-10 [16]（ロシア）、TCABR [05]（ブラジル）、CASTOR [06,11]（チェコ）、ISTTOK [10]（ポルトガル）、STOR-M [18]（カナダ）のトカマク装置における実験結果が報告された。また、トカマク装置に関する報告として、軌道追跡コード ASCOT による ELM の熱負荷シミュレーション [22]、及び helicity injection [15] に関するものがあった。トカマク装置以外では、ZaP Flow Z-Pinch[19]（アメリカ）、Inertial-Electrostatic Fusion Neutron Source [20]（日本）、Plasma-Focus Discharge [21]（ポーランド）に関する報告がなされた。以下では、JET からの報告を紹介する。

EX/P1-04 では、摂動輸送実験の結果について報告がなされた。L モードプラズマにおける ICH のモジュレーション実験では、電子温度の摂動成分から導出した χ_e^{pert} が、 $(-\nabla T_e/T_e) < 1.8 \text{ m}^{-1}$ ではパワーバランスから導出した χ_e^{PB} と同程度になり、 $(-\nabla T_e/T_e) > 1.8 \text{ m}^{-1}$ では χ_e^{pert} が χ_e^{PB} より 10 倍程度大きい値になることが報告された。R/L_T=5.4 を閾値とした分布の硬直性 (stiffness) を考慮したモデルを用いることで、摂動成分と非摂動成分が統一的に説明できることが示された。また、コールドパルス実験では非常に速い熱伝搬が観測され、非局所的な輸送の影響が指摘された。さらに、ITB プラズマでは、ITB でコールドパルスが大きくなることが観測され、IFS-PPPL、GLF23 及び MM95 では説明できないことが示された。3D ITG/TEM fluid turbulence コード TRB では説明できるとしているが、詳細については別論文 [TH2-1] にて報告された。

JET の ELM に関しては 3 件の報告があった。EX/P1-08 では、Type I ELM で失われるエネルギーとペデスタルパラメータとの関係が報告された。実験的に、 $\Delta W_{\text{ELM}}/W_{\text{ped}}$ は ELM が起きる前のペデスタルでの衝突周波数もしくは SOL でのイオンの輸送時間に依存することが報告された。実験結果の外挿から、ITER において ELM 熱負荷が問題になる可能性が示され、外挿の精度をより高めるために物理モデルの確立の重要性が指摘された。EX/P1-09 では ELM の熱負荷を減らすために Type I ELM My H モードに Ar を入射した場合と、Type III ELM My H モードに N を入射した場合の結果が報告された。両者ともペデスタルのエネルギーを低下させることにより、 $\Delta W_{\text{ELM}}/W_{\text{ped}}$ を減少させることができているが、 $\Delta W_{\text{ELM}}/W_{\text{ped}}$ とペデスタルの衝突周波数との関係は、不純物を入射しない放電とほぼ同様であることが報告された。EX/P1-14 では、ELM 前後の MHD について報告がなされた。Palm tree mode と呼ぶ MHD モードが type I ELM により励起されることが示され、ELM による周辺磁場の乱れにより作られた磁気島がその発生原因であると指摘された。また、ELM の 0.5-1 ms 前にトロイダルモード数が 1-14 であるキンク的でコヒーレントな MHD モードが観測されることも報告された。

EX/P1-13 では、ITB の形成が q=有理面に関係していると報告された。正磁気シアプラズマでは、q=有理面での MHD によりポロイダル回転が変化し、シアフローにより ITG が抑制されるモデルが提唱された。負磁気シアプラズマでは、磁気シアゼロ、q=有理面近傍での輸送が ITB 形成に影響するモデルが提唱された。EX/P1-17 では、AE に関する報告がなされた。低磁気シアプラズマでは、AE と kinetic Alfvén 波のカップリングが n=1 の TAE の減衰係数に影響することが予測されており、この効果を取り込んだ NOVA-K コードの計算結果と実験結果との比較が示された。計算された減衰係数は実験値より小さく、さらなる減衰機構解明の必要性が指摘された。

3.12 ポスターセッション EX/P2: JT-60U, LHD, JFT-2M, NSTX, 他

このポスターセッションでは、JT-60U, LHD, JFT-2M, NSTX, Gamma-10 およびその他の磁場閉じ込め装置からの報告があった。

JT-60U からは、まず境界輸送障壁 (ETB) に関するトピックスとして、Ar 入射による ELM My H-mode で高密度高放射損失で高閉じ込めプラズマ、およびダイバータの外側ヒットポイントをドーム上に乗せた配位で比較的高い三角度を有するプラズマでの ELM の熱負荷低減に関する結果 (EX/P2-03)、Type I および Type II (grassy) ELM についてのペデスタル部の詳細な測定と安定性を決定するパラメータに関する実験結果と Type II が得られる運転領域を低 q にまで拡張できたことに関する報告 (EX/P2-04) があった。また内部輸送障壁 (ITB) に関するトピックスとしては、ITB 形成における低次の有理面の役割に関する研究 (EX/P2-06)、また ITB 形成時のイオンの熱輸送係数と径電場との関係について磁気シアの異なるプラズマ（正磁気シア及び負磁気シア）を詳細に比較して、ITB 磁気シアの構造磁気シア (weak/strong) 磁気シアと径電場シアとを直接定量的に関係付けた研究 (EX/P2-08) に関する報告があった。さらにダイバータ板、ドームおよびバッフル板におけるグラファイトタイル上のトリチウムの堆積分布の詳細測定結果 (EX/P2-11) が報告された。

LHD からは、外部コイルによって作られる有理面における電場構造と輸送について、ペレット入射による詳細な研究 (EX/P2-16)、プローブ法による第一壁とプラズマとの相互作用について様々な実験条件について調べた研究 (EX/P2-17)、EC, IC および NB による電子およびイオン加熱についての比較研究 (EX/P2-18)、ICRF 加熱の増力後の種々の加熱モードについて閉じ込め特性および高エネルギー粒子に関する物理に関する研究 (EX/P2-19) が報告された。

JFT-2M からは、高リサイクリング定常 H-mode 運転領域の開拓についての研究 (EX/P2-05)、フェライト鋼による複雑リップル構造が高速イオンの損失に与える影響についての研究 (EX/P2-14) が報告された。

NSTX からは、ST トカマクにおける高速イオン損失の詳細測定とモデル化に関する研究 (EX/P2-01)、および HHFW (High Harmonic Fast wave) による高周波加熱と電流駆動に関する良好な入射結果 (EX/P2-13) が報告された。

Gamma-10 からは、ミラー型装置における高密度プラズマのポテンシャル構造の形成と閉じ込めとの関係についての研究 (EX/P2-09) が報告された。

他の磁場閉じ込め装置からは、RFP 型装置における導体壁効果に関する研究 (EX/P2-02) と PPCD による MHD 不安定性の制御と閉じ込め改善の結果 (EX/P2-07)、EBW による高ベータプラズマにおける加熱および電流駆動に関するコードによる検討結果 (EX/P2-12)、同様に HL-2A における高閉じ込めモードを得るための LHCD 等に関するシミュレーション結果 (EX/P2-20) が報告された。

3.13 ポスターセッション EX/P3:DIII-D, T-10, HT-7, 他

全体にプラズマ電流/安全係数分布に着目した高閉じ込め、高安定性の研究が目立った。DIII-D、T-10 では EC 波、HT-7 では LH 波とイオンバーンシュタイン(IB)波を使用した電流駆動が主である。ヘリオトロン J では ISS95 則より 1.5 倍良い閉じ込めを得た。また、TS-3 におけるスフェロマックの合体とトロイダル磁場の印加により生成した高 β ST は Troyon スケーリングの 6-17 倍という高い安定性を示している点で興味深い。以下に代表的な発表をまとめる。

EX/P3-01: High Density Experiments with Strong Gas-Puffing under ECRH in T-10

ECH/ECCD 下でのガスパフにより表面の安全係数 $q(a) \sim 10$ で Greenwald 密度の 1.8 倍を超えた。ただし $q(a)=3$ では 1 倍に減少した。密度限界までは密度上昇による閉じ込めの劣化は顕著でない。

EX/P3-02: Confinement Characteristics of ECH Plasmas in Heliotron J

低密度 $0.4 \times 10^{19} / m^3$ で $v^* << 0.1$ の無衝突プラズマを得ると共に、中程度の密度 $0.5 < n_{e19} < 2$ で中心加熱することにより、ISS95 則より 1.5 倍良い閉じ込めを得た。

EX/P3-12: Physics and Control of ELMing H-mode Negative Central Shear Advanced Tokamak Scenario Based on Experimental Profiles for ITER

DIII-D の AT 実験とモデリングの結果を用いて ITER の負磁気シア AT シナリオにおける物理と制御を調べた。理想/抵抗性安定性解析により、 $\beta_N = 3.0-3.5$ の領域で運転するためには、回転駆動または磁束保存制御コイルによる抵抗性壁モードの帰還制御が本質的であった。コア輸送と乱流解析により、回転シア分布の制御が高 β に必要な良い閉じ込めを保つために必要であることを示した。エッジの安定性とコアの輸送を考慮すると、目標とする核融合性能のためには広いペデスタルが必要である。

EX/P3-13: Demonstration in the DIII-D Tokamak of an Alternate Baseline Scenario for ITER and Other Burning Plasma Experiments

核融合ゲインの指標 $\beta_N H_{89P} / q_{95}$ を $Q=10$ に相当する値で 6 秒間 (エネルギー閉じ込め時間の 36 倍、抵抗性拡散時間の 2 倍) 維持した。 $q_{min} > 1$ の定常電流分布への緩和により、壁なしの理想 β 限界までの安定な運転が可能になった。

EX/P3-15: High-Beta Characteristics of First and Second-Stable Spherical Tokamaks in Reconnection Heating Experiments of TS-3

逆方向のトロイダル磁場を持つ二つのスフェロマックの合体により形成した FRC に外部トロイダル磁場を印加することで、超高 β ST ($\beta_i \sim 0.8$) を生成した。生成した ST は第二安定化領域にあり、Troyon スケーリングに対して 6-17 倍良い安定性を示す。

EX/P3-17: High Confinement Plasma by Lower Hybrid Current Drive on HT-7 Superconducting Tokamak

LHCD を用いて ITB が形成され、 H_{89P} は 0.78 から 1.42 に増加した。最外殻磁気面付近のエッジプラズマの特性を Langmuir プローブにより調べた。エッジプラズマの乱流と輸送は LH 波により抑制された。高閉じ込めは変化した径電場によるシア流のためと考えられる。

EX/P3-20: Investigation of the Synergy of IBW and LHCD for Integrated High Performance Operation in the HT-7 Tokamak

off-axis の LHCD と IBW との協同効果により電流密度分布の制御を実現した。IBW は十分局在化した高速電子電流チャンネルを生成し、高電子温度領域を拡張することで LHCD 電流駆動効率を改善した。

3.14 ポスターセッション EX/P4; AUG, Tore Supra, FT-U, TRIAM-1M, 他

トカマクの定常化に必要な燃料供給法に関して、Tore Supra で中性の超音速高密度雲 (cloud) を粒子閉じ込め時間に比べて非常に短く入射する新しい燃料入射法によって、30–50 % の高い注入効率を得た（ガスパフでは 10–20 % 程度）。この方法は、ガスパフ入射に比べて壁吸着が低く飽和し難いことが分かった（P4-04）。HL-1M トカマクでも超音速・高圧力の多パルス分子ビーム入射（MBI）の実験が行なわれた（P4-08）。入射ペレットが $q=1$ 面近くで蒸発する際に成長する $m=1$ 磁気島の磁気再結合によって、 $q=1$ 領域とプラズマ中心域が混じり合い、ペレットの侵入を実効的に高めることが FTU で示された（P4-11）。TRIAM-1M では 3 時間 10 分におよぶ長時間放電を行ない、粒子の壁吸収と放出バランスを調べた。放電開始後約 30 分で粒子リサイクリングは定常化し、プラズマ密度は放電停止までの間、燃料供給なしに一定に維持された（P4-07）。また、完全電流駆動のための 4 種類の非誘導方式についてその駆動効率を調べた（P4-15）。

ASDEX Upgrade では、電子・イオン温度障壁の位置と q 分布との関係を精査した。輸送障壁の頂上部（輸送障壁の上端）は負磁気シア領域にあるが脚部（輸送障壁の下端）は常に正磁気シア領域にあり、輸送障壁部はシアのない領域を含むことを明らかにした。これに基づき考案した放電シナリオによって、 $T_i(0) = 21$ keV、 $\beta_N = 4.0$ 、 $H_{89P} = 3.3$ のように ASDEX Upgrade の記録を更新した（P4-03）。一方、ELMy H-mode における境界輸送障壁（ETB）では、輸送障壁脚部のエッジ密度がリサイクリングと強く関係する一方、障壁脚部からペデスタルに向かう密度増大がプラズマ電流や形状に依存するなど、電子密度や温度の勾配長が強く関係する（P4-05）。三角度を上げるダイバータ改修によって、セパラトリックス内部の温度勾配を大きくとれるようにした結果、L-H 遷移閾値を 20% 低下させた（P4-06）。

球状トカマクでは、LATEにおいて ECH 単独（同時に垂直磁場印加）で、プラズマ電流 5 kA、アスペクト比 $A \sim 1.4$ 、楕円度 $\kappa \sim 1.2$ のプラズマを立ち上げた（P4-16）。CDX-U では、本格的な液体リチウムリミタを用いた性能改善実験を初めて行なった（P4-19）。TST-2 球状トカマクでは、プラズマ電流の正スパイクが現れる強い MHD 現象が生じると、ポロイダル磁場エネルギーの減少に応じて不純物イオン温度が急激かつ顕著に増加することが報告された（P4-10）。HIST では、 $n=1$ 不安定性の緩和がトロイダル磁場のみならずポロイダル磁場も自発的に反転する flipped ST 配位の維持に重要であることを明らかにした（P4-17）。

ASDEX Upgrade のディスラプションでは、 q が 2 を切ると $m/n=1/1$ の非対称構造を持つハロー電流（トロイダル・ピーキング・ファクター $TPF = 3.5$ ）が発生すること、また、 N_e を大量（120 mbar.l）に吹き込むことで、電磁力および真空容器変位を大幅に緩和できることを示した（P4-14）。VDE は、熱消滅時のプラズマ電流分布が急激に平坦化することで大きく影響され、またこれが、プラズマの上下非対称性に強く依存することが実験とシミュレーションとの比較によって示された（P4-13）。

逆転磁場ピンチ MST や FRC プラズマで、鋸歯状崩壊の後観測されたプラズマ電流分布や運動量分布の平坦化の機構、さらに、平衡磁場エネルギーの変化によるイオンの異常加熱機構を調べた（P4-01, P4-18）。off-axis ECRH の加熱効率、鋸歯状振動や fishbone、 $m/n=1/1$ モードの安定性を HL-1M トカマクで調べた（P4-21）。

3.15 ポスターセッション EX/P5:C-Mod, TCV, TEXTOR, RFX, GOL, ミラー装置

このセッションでは、ミラー 2 件、RFP 2 件、トカマク 11 件の合計 15 件の発表が行われた。トカマク関連の論文では、JET & ASDEX-U & C-Mod, JET & TEXTOR, C-Mod & DIII-D & NSTX, TCV & ASDEX-U と 4 件の論文が各装置の結果を比較した共同研究結果の報告であった。

(1) ミラーに関する報告：一件はリミターとセングメント化したエンドプレートにバイアスして径電場を作り、閉じ込めと MHD 安定領域が変化したことが報告された。もう一件は GOL-3 装置 (12 m のマルチミラー：ロシア) において、1 MeV, 30 kA の電子ビームで加熱し、密度 $0.5-2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 、 $nT=0.5-2 \times 10^{21} \text{ keVm}^{-3}$ に達し、閉じ込め時間は 0.3 ミリ秒に達したことが報告された。

(2) RFP に関する報告：一件は PPCD (Pulsed Poloidal Current Drive) の効果に関する研究結果であり、PPCD によりダイナモが無くなり、磁場揺動と輸送が減少したことが報告された。もう一件は、スタンダード RFP と PPCD 時のモデリングであり、large-scale MHD modes の重要性を確認したことが報告された。

(3) トカマクに関する報告：Alcator C-Mod 単独の報告では、非線形ドリフト波不安定性解析の結果が報告されており、IFS-PPPL モデルでは C-Mod の H モードプラズマの輸送を説明することができないとしている。TCV からは、ECH を用いた多くの実験結果が報告されており、(1) 電子系 ITB の生成に成功し、強い RS プラズマで ($H_{89p} \sim 1.6$)、80 % のブートストラップ電流を維持したこと、(2) off-axis の ECH によりブロードな電流分布とし、非円形度 2.5 を得ていること、(3) 3 倍の高調波 ECH のほぼ 100 % が吸収されていること等が報告された。TEXTOR からは RI モード、PWI 等に関する概観と DED (Dynamic Ergodic Divertor) の設置が完了したことが報告された。HYBTOK-II からは回転ヘリカル磁場の浸透に関する研究結果が報告されており、プラズマの回転速度により、磁気島が成長する場合と抑制される場合があることが示された。JET & ASDEX-U & C-Mod の共同研究では、無次元輸送実験の結果が報告されており、JET と ASDEX-U では同様の ρ^* 、 v^* 、 β で L/H 遷移が起こることが示されたが、ASDEX-U では、C-Mod で観測されている EDA を得ることができていない (H/L 遷移が先に起こる)。JET & TEXTOR による燃料保持 (retention) 等の研究結果では、全壁炭素材の装置では金属第一壁の装置に比較して燃料保持が大きくなることが示された。C-Mod & DIII-D & NSTX の共同研究では、ガスパフと高速フレームカメラを用いた揺動測定、あるいは BES (Beam Emission Spectroscopy) による揺動測定により SOL の揺動を調べた結果が報告された。三つの装置で SOL のパラメータは大きく異なるが、SOL の揺動は間欠的な描像でよく示されているとしており、「Blobs」と呼んでいる。TCV & ASDEX-U の共同研究では、鋸歯状振動の抑制が NTM の抑制にとって重要であるとの動機から、ECH/ECCD による鋸歯状振動の抑制実験を行い、どちらの装置でも鋸歯状振動反転位置の外側への ECH/ECCD が有効であるとしている。

4. 理論

4.1 セッション TH/1: プラズマ内部の乱流と輸送

本セッションは、トカマクを中心とするトーラスプラズマの異常輸送を支配する微視的不安定性と、それに伴う乱流輸送特性に関する計6件（米国1件、欧州2件、日本2件、中国1件）の理論・シミュレーション研究の報告である。とりわけ超並列計算機の進展を背景とした数値シミュレーションプロジェクトの進展が報告された。ジャイロ運動論モデルに基づくトカマクの全領域を計算対象としたグローバルな乱流コード開発では、これまでの電子を断熱モデルで扱った静電的なイオン系中心の輸送解析から、捕捉電子効果等の電子のダイナミックスや電磁効果を取り入れたシミュレーション研究が報告されている。

TH/1-1 (Size Scaling of Turbulent Transport in Tokamak Plasmas) では、米国の代表的な乱流輸送研究として前回 IAEA 会議においても同様の位置を獲得した PPPL の Lin 博士等のグローバルジャイロ粒子シミュレーションに基づく輸送研究が報告された。特にイオン温度勾配モード (ITG) 乱流特性が、小型の装置サイズに対してはボーム様、大型装置サイズに対してはジャイロボーム様となり、サイズスケーリングが装置サイズに依存して変化するとの注目すべき報告がなされた。これらを説明するモデルとして線形安定領域への乱流拡散等に関する理論が提案されたが、ボーム性・ジャイロボーム性は、乱流構造とともに乱流自身が生成する帶状流とのバランスによって定まることから、本シミュレーションでこれまでの論争に決着がついたとは言い難い。実際、米国内で競争関係にある GA 社の研究者と論争となり、また本コードの帶状流の扱いには問題があるとの指摘が THP1/8 のポスター発表でなされ、今後数年のレベルで論争は継続するものと思われる。

類似のジャイロ粒子コード開発とシミュレーション研究が、スイスローザンヌ大学の Villard 博士から報告された。このグループは、乱流輸送の非線形計算等においては Lin 等のグループから若干遅れをとっているものの、 δf 法におけるノイズレベル低減の新計算手法の開発や電磁効果を取り入れたジャイロ運動論モデルの展開、また捕捉電子等の電子系応答の導入等、将来における格段の進展を予見させる着実な成果が報告されている。また前回 IAEA の流れを受けて、電子系の輸送に本質的役割を果たすと考えられている電子温度勾配モード (ETG) 乱流のプラソフシミュレーションがマックスプランク研究所 (IPP) の Jenko 博士から報告された (TH/1-2)。特に、ETG モードの混合長理論では再現できない高い電子熱拡散係数を説明するモデルとして、径方向に巨視的な構造を示すストリーマの存在が報告された。中国西南物理研究所からは、実験解析と関連した ETG モードの丹念な線形理論に基づく解析が報告された (TH/1-6)。

また、今回の新たな特徴として、時空間スケールの大きな差異のためにこれまで個別に扱っていた乱流理論やシミュレーションを統合的に扱う試みが日本を中心に提案されている (TH/1-2, TH/1-4, TH/1-5)。波数・周波数空間の幅広いダイナミックレンジの中での乱流間の相互作用が新たな輸送ダイナミックスを創出する可能性が指摘され、乱流輸送研究の新たな展開と位置付けられる。九州大学の矢木博士 (TH/1-4) からは、異なった乱流間の直接的相互作用がトリガーとなり新たな分岐現象の出現が指摘される一方、原研の岸本博士 (TH/1-5) からは、短波長の電子系乱流の作る帶状流が長波長の ITG 乱流に与える影響に関するジャイロ流体シミュレーションと理論が提案され、間欠現象等の新たな非線形ダイナミックスのパラダイムが報告された。また電子系からイオン系を一体として解析するシミュレーションが、不完全ながら今会議で報告され、今後の輸送研究の方向性を予見させた (TH/1-2)。

4.2 セッション TH/2: 非拡散性輸送、その他の輸送

本セッションは、トカマクを中心とした様々な磁場閉じ込め装置中の輸送現象における間欠特性や非拡散過程、SOC (Self-Organized Criticality) 現象等、これまでの平均場近似に基づく混合長理論や拡散近似が成立しない輸送過程や、またプラズマ中に磁気島が存在する場合の輸送現象に関する計6件（米国3件、欧州1件、インド1件、ロシア1件）の報告がなされている。近年と数値トカマク研究に代表される大規模な乱流シミュレーションや詳細な実験計測に基づいた新しい輸送研究の流れを予見させる興味深いセッションである。

TH/2-1 (Micro-stability and Transport Modeling of Internal Transport Barriers on JET) では、Garbet 博士等が JET で観測されている内部輸送障壁 (ITB) 形成の物理過程の詳細な検討を行っている。従来の微視的不安定性に対する線形成長率と $E \times B$ 速度シア流による乱流抑制率を比較した解析に加え、低 m/n モードの有理面における MHD 現象との関係および低 m/n モードの有理面密度と障壁形成の関係に関して考察が深めている点は興味深い。特に、安全係数 $q=2$ の有理数において MHD 現象が発生した際に明確な輸送障壁が形成されるとの JET の実験を紹介している。MHD 現象に伴うプラズマ流もしくは空間電界等がトリガーになっている可能性が高いことから、セッション TH/1 において議論された異なった揺らぎ間の相互作用による新しいダイナミックスと位置付けることができる。また、ITG 等の乱流スケールから巨視的な MHD スケールの広範囲の波数空間のシミュレーションを行った CUTIE コードの結果が示され、低 m/n の有理面と輸送障壁の関係が明確に示されている。これに関連した理論研究として、TH/2-6 (Plasma and Momentum Transport Processes in the Vicinity of a Magnetic Island in a Tokamak) では、Shaing 博士等が、トカマクにおける磁気島近辺でのトロイダル方向における対称性の破れに起因した運動量散逸に伴う電場形成の可能性とそれに伴う乱流輸送低減の可能性が指摘されており、MHD 現象と輸送現象が切り離せない概念となりつつあることを示している。

トカマクを中心とした乱流拡散特性が、TH/2-3 (Anomalous Diffusion in Plasma Turbulence Models) 及び TH/2-4 (Intermittency and Structures in Drift Wave Turbulence) において、Carreras 博士や Kim 博士等によって報告されている。Carreras 博士は、抵抗性交換型モード乱流、抵抗性バルーニングモード乱流、および ITG モード乱流の流体シミュレーションにおいてテスト粒子法によるリアプロフ数の計測を行い、いずれの乱流に対しても輸送過程は非拡散的 (super-diffusive) であるとの結論を得ている。また、Kim 博士は、輸送現象は決定論的な考察に基づく異常拡散輸送係数としてではなく、熱流束の確率密度関数 (PDF) を決定する必要があるとの立場でドリフト波乱流輸送における確率理論を展開している。特に、PDF におけるテイル成分と輸送特性における間欠現象の関係、あるいは乱流と帶状流の関係等に関して議論を行っている。TH/1 のセッションにおいて輸送現象のボーム性・ジャイロボーム性が議論されているが、乱流構造の PDF におけるテイル成分との関係でボーム性が出現する可能性等が議論されている点は興味深い。今後、数値トカマク等の数値シミュレーションの解析においてこれら PDF 等の確率モデルに基づく統計理論が重要な位置を占めつつあることを示している。また、非拡散的な輸送現象を、輸送方程式のレベルで再現する試みが TH/2-2 において Tangri 博士等からなされ、トカマクにおける熱輸送の SOC 的挙動やプラズマ分布の同一性 (profile consistency) 等が再現できるとしている。

4.3 ポスターセッション TH/P1:プラズマ内部の微視的不安定性と輸送

本セッションでは新古典理論1件、輸送コード3件、乱流シミュレーション3件、線形理論3件、乱流理論3件、その他7件の報告があった。NTMの解析において重要な磁気島周辺でのブートストラップ電流及び分極電流の挙動がシミュレーションにより明らかになった(THP1/1)。ジャイロ運動論シミュレーションに関しては、静電的ITG乱流シミュレーションにおける従来のモデルの問題点が指摘された(THP1/8)。また、米国のグループからITG乱流シミュレーションへの電磁モデル、運動論的電子、衝突効果等の拡張が報告されたが(THP1/13、THP1/19)、MHD理論との整合性、電子系乱流の理解といった問題点が未解決のままコード開発が進められており、これらは今後の課題である。

THP1/1:Monte Carlo δf Simulations of Neoclassical Phenomena in Tokamak Plasmas

ピッチ角散乱を含む δf モンテカルロコードHAGISによるドリフト運動論シミュレーションを用いて、NTMに深く関係している(1)ヘリカル摂動による磁気島内のブートストラップ電流、(2)回転する磁気島内の分極電流を調べた。磁気島が軌道幅(バナナ幅)より小さければ、磁気島内のイオンブートストラップ電流は非摂動状態の電流値が維持されていることがわかった。この結果はASDEX-UpgradeにおけるNTMの発生条件に関する β_N のスケーリングを説明し得る。磁気島回転によるイオン分極電流に関しては、磁気島が軌道幅の2倍以下ならば、分極電流は軌道幅を考慮しない理論に比べてきわめて低い値となる。また、分極電流の衝突度に対する依存性は、広いパラメータ領域で衝突度が小さい極限の理論に近いことが分かった。

THP1/8:Gyrokinetic Global Analysis of Ion Temperature Gradient Driven Mode in Reversed Shear Tokamaks

ジャイロ運動論的グローバルトロイダル粒子コードGT3Dを開発した。コードは軸対称トロイダル系における3つの運動の恒量(P_ϕ, ϵ, μ)により定義される正準マックスウェル分布を用いて実装されており、軸対称モードに対する応答が正しく表現されている。また、準バルーニング展開により高(m,n)モードまでグローバル解析を行える。ITGモードの解析がら、高温負磁気シアトカマクにおいては、最大成長率を有する高(m,n)モードは q_{\min} 面の外側の正磁気シア領域に励起され、 q_{\min} 領域では、成長率が低くスラブモード的な性質を示す低(m,n)のグローバルモードが残ることがわかった。このことから、負磁気シア配位は q_{\min} 領域におけるITGモードの実質的な安定化に寄与する。非線形シミュレーションでは、従来の局所マックスウェル分布に基づくコードでは得られなかった $E \times B$ 帯状流の減衰係数がGT3Dでは正しく得られることを確認した。

THP1/19:Comprehensive Gyrokinetic Simulation of Tokamak Turbulence at Finite Relative Gyroradius

ジャイロ運動論的プラソフコードGYROを開発した。モデルにはイオン以外にも捕捉電子、通過電子が含まれ、有限ベータ効果(電磁モデル)、衝突効果も含まれている。また、配位としてはブラックスチューブ配位以外にも、適当な吸収境界条件と粒子・エネルギーのソースモデルを用いれば、分布効果が入ったグローバルチューブ配位も計算できる。前者ではジャイロボームスケーリングが暗に仮定されているが、後者ではその制約はない。静電的ITG乱流シミュレーションにおいて、分布変化の反磁性効果による $E \times B$ シア率とITGモードの最大成長率の競合により ρ^* のスケーリングがジャイロボームからボームに変化することを見出した。また、上記全ての効果を含んだGYROシミュレーションとDIII-Dにおける ρ^* スケーリングLモード実験の定量的比較を行った。

4.4 ポスターセッション TH/P2: 安定性, ダイバータ

THP2/02: Effect of Beta and Collisionality on the Vacuum Magnetic Field Islands in Stellarators

小さな真空磁気島は、局所的に圧力を平坦化しプラズマ安定性を改善する。高ベータ・高衝突周波数のプラズマ中では、磁気島を小さくする効果のあるシア流が減衰しやすく、磁気島は真空時より大きくなり、逆に低衝突周波数では磁気島が小さくなることを示した。

THP2/03: Geometrical Improvements of Rotational Stabilization of High-n Ballooning Modes in Tokamaks

トロイダル流シアが短波長 MHD モードの摂動エネルギーを減衰させることを示した。この減衰が、悪い磁場曲率に対応した指数的成長を上回る場合、短波長 MHD モードは安定化される。この安定化機構を通じて、プラズマ断面形状を D 型にするなどの工夫により、プラズマ流シアの安定化をより効率化できることを示した。

THP2/04: Dissipative Drift Ballooning Instabilities in Tokamak Plasmas

トカマクにおける高モード数ドリフト-バルーニングモードの分散関係を、抵抗・粘性を含み、モード周波数が音波・反磁性周波数と同程度とし、 $s-\alpha$ 平衡を使ったモデル方程式から求めた。トカマク周辺部の典型的パラメータでは中モード数が不安定になることを示した。

THP2/05: Nonlinear MHD Dynamics of Tokamak Plasmas on Multiple Time Scales

NIMROD コードによるシミュレーション：(1) 平衡圧力を加熱時間スケールで上昇させた場合の圧力勾配駆動型不安定性。理論的に導かれていた加熱/MHD 混合時間スケールで不安定性が成長した。(2) モード数 1/1 の鋸歯状振動。非線形性とトロイダルカップリングにより、新古典テアリングモードの種磁気島となり得る 3/2 モードが励起された。

THP2/09: Kelvin-Helmholtz Instability and Kinetic Internal Kink Modes in Tokamaks

電子慣性・有限温度効果を含めたジャイロ簡約化 MHD シミュレーションにより、鋸歯状振動を説明し得る現象を見つけた。運動論的内部キンクモード (KIK) と Kelvin-Helmholtz (K-H) モードが $E \times B$ 流を介してエネルギーをやり取りする。

THP2/10: MHD Equilibrium and Pressure Driven Instability in L=1 Heliotron Plasmas

3 つの平衡コードの結果比較から、低磁気シアのヘリオトロンプラズマでは低ベータでも自由境界計算が必要であることを示した。ヘリカルバルーニングモードの局所/非局所解析は良い相関を示した。固有モードは磁束管に局在し、正の回転変換シアが安定性に好ましい。

THP2/12: Nonlinear MHD and Energetic Particle Modes in Stellarators

M3D (Multi-level 3D) プロジェクトの 1 つとしてコンパクト準軸対称ステラレータの安定性シミュレーションを行った結果、(1) 抵抗性バルーニングモードは 2 流体反磁性ドリフトによって安定化されベータ限界が上昇すること、(2) 周期 2 のステラレータにおける TAE モード成長率は、等価な分布・形状のトカマクに比べて小さいことがわかった。

THP2/15: High Mach Flow Associated with Plasma Detachment in JT-60U

JT-60U デタッチダイバータ実験で、SOL 領域に速いプラズマ流が観測されている。B2-EIRENE コードによりシミュレーションを行い、同様の速いプラズマ流ができるなどを示した。また、イオン化領域と運動量損失領域を分離した磁力線方向 1 次元モデルを開発し、実験および B2 シミュレーション結果を定性的に説明した。

4.5 ポスターセッション TH/P3: 境界輸送, 安定性, 波動

このセッションは、ELM、ペデスタル等のプラズマ境界の輸送、物理、またRWMとその制御に関するポスター発表が全部で20件行われた。以下に主要な発表をまとめる。

THP3-01 : Edge Pedestal and Er-Layer Formation by X-Transport in a Diverted Tokamak

ダイバータ・トカマクのX輸送による境界ペデスタルとEr層のシミュレーションが行われた。その結果、同様のプラズマ・パラメータに対して $E \times B$ のflow velocityが、NSTXの場合、DIII-Dの約2倍ほど大きくなることが示された。

THP3-03 : Effect of Poloidal Density Variation of Neutral Atoms on the Tokamak Edge

中性原子の効果は、原子のポロイダル位置に大きく依存する。ここで解析で境界プラズマにおける径方向電場とトロイダルフロー速度は、原子がトーラスの外側より内側に集中したほうが大きいことが見いだされた。この効果は、最近 MAST や COMPASS-D の H モードがペレット内側供給でより簡単に起こるという実験結果が説明できる可能性を示している。

THP3-10 : Modeling of Feedback and Rotation Stabilization of the Resistive Wall Mode in Tokamaks

トロイダル回転と拡散のあるトカマクのフィードバック安定化に対して一般的な定式化が行われ、DIII-Dで行われた外部共鳴磁場実験の結果と比較して定性的な一致が得られた。ITER-FEATにおけるRWM安定化のシミュレーションがONETWO輸送コードと組み合わされたMARSコードを使って行われ、ITER-FEATはフィードバックがなくても33MWの負NBIの入射でRWM安定化に必要なプラズマ回転を維持できることが示された。

THP3-12 : Feedback Control of Resistive Wall Modes in Toroidal Devices

RWMのフィードバックの数値解析が高ベータ・トカマクにおいて行われ、ポロイダル磁場センサーを持った一個のポロイダルアレイのフィードバック・コイルでプラズマ圧力、プラズマ電流、プラズマ回転速度の変動に対して十分な制御が可能であることが示された。

THP3-13 : Active Feedback Control of Kink Modes in Tokamaks : 3D VALEN Modeling and HBT-EP Experiments

HBT-EPに対するベンチマーク実験によって能動的"スマートシェル"フィードバック制御を使って共鳴した q_{edge} におけるディスラプションの抑制の成功、RWMに対して理想壁限界まで運転できるよう設計された直結合コイルの最初のテストの初期化が示された。一方、壁の安定化効果に対して実際のポートの穴があった場合の計算を行い、FIREではポート穴がない場合と比較して限界 β_N の値が4.5から3.5に下ることが示された。

THP3-17 : Excitation of Alfvénic Instabilities in Spherical Tokamaks

MASTのオーミック放電で軸対称アルヴェン的モードの活動が観測されているが、これらは、数値解析によって、低周波MHDによって瞬間的に引き起こされる $n=0$ と低 n のGAE(大域的アルヴェン固有モード)の励起とコンシスティントであることが示された。

THP3-18 : Simulation Study of Beam Ion Loss due to Alfvén Eigenmode Bursts

TAEの続けて起こるバーストが、自己無撞着なシミュレーション・モデルを使って調べられた。実験パラメータを使ったシミュレーションにより TFRの中性粒子入射実験で観測されているビームイオン損失のバーストを再現し、かつ同調させたTAEバーストが2.9ms、実験では2.2ms、の間隔で起こることが示された。

5. ITER

5.1 セッション CT:ITER

このセッションにおいては ITER の物理と工学に関する性能評価、設計及び R&D の口頭発表が行なわれた。

CT-1: The ITER Magnets: Preparation for Full Size Construction Based on the Results of the Model Coil Programme

ITER の超電導磁石の製作については、特に TF コイルがスケジュール的に厳しい。現在、発注仕様書の作成を進めているが、広く国際協力で製作を進める必要があり、EU と日本の、各々一方が Leader/Follower として責任を持って推進する。モデルコイル製作と実験を通して得た知見に基づいて実機を製作する。

CT-2 : Performance of ITER as Burning Plasma Experiment

ITER の性能評価の概観。理論モデル及び経験則を用いた解析を行ない、誘導運転で $Q \geq 10$ を達成できることを確認。ペレット入射によって ELM を抑制し、ダイバータ板の寿命を長くできる。閉じ込めとベータへの要請がそれほど高くない定常運転シナリオを開発。その運転で要求される β_N の領域では抵抗性壁モードの安定化が可能。DEMO 炉の模擬を行なえる可能性があるが、 β_N で 3.6 を達成することが要請される。

CT-3 : Characteristics of the H-mode Pedestal and Extrapolation to ITER

実験で測定されている H モード・ペデスタルの圧力勾配は peeling-balloonning モードの理論計算とよく一致するが、ペデスタルの幅については未解明。しかしながらペデスタルの幅が小半径に比例するとすると、ITER において要請されるペデスタル温度は達成可能。

CT-4: Design Improvements and R&D Achievements for VV and In-vessel Components Towards ITER Construction

真空容器・ブランケット・ダイバータにおける最近の設計の進展と、ここ 2 年間の R&D の成果の報告。真空容器ではポートの切断試験・非破壊検査（超音波や Photothermal 法）・低流速の熱伝達実験などの成果、ダイバータでは実機大の第一壁パネルやシールド・ブロックの製作、カーボン Deposition 実験などが進展。

CT-5: ITER Diagnostics: Design Choices and Solutions

装置保護と誘導運転の制御に必須の計測器については、計測仕様を満たす設計が可能。先進モード運転の制御及び物理研究に必要な計測器についても多くの場合仕様を満たす設計が可能であるが、電流分布測定など課題が残っているものもある。

CT-6Ra-d : 1 MeV 負イオン源および負イオン中性粒子入射装置の開発状況の報告。到達した加速電圧、電流密度、持続時間は (EU: > 900 keV, 30 A/m²)、(EU: 600 keV, 74 A/m²)、(日本: 971 keV, 1 s)。JT-60U 加熱用の負イオン中性粒子入射装置は重水素で 400 kV, 5.8 MW、水素で 355 keV, 2.6 MW, 10 s を達成。LHD の負イオン中性粒子入射装置は、9 MW × 2 s, 0.1 MW × 110 s を達成。

CT-7Ra-d: ITER 用 170 GHz、JT-60U 用 110 GHz ジャイロトロンの開発において、これまでに 0.9 MW × 9.2 s, 0.5 MW × 30 s (170GHz)、1.3 MW × 1.5 s, 1 MW × 5 s (110GHz) を達成し、連続出力化への見通しを得た。JT-60U では、110 GHz ジャイロトロン 4 本で 3 MW / 2.7 s 入射に成功し、27 keV までの電子加熱及び新古典アーリング・モード抑制の成果につなげた。EU では (140 GHz, 0.9 MW, 180 s)、ロシアでは (140 GHz, 0.6 MW, 6 s), (170 GHz, 0.55 MW, 40 s) を達成。米国では (110 GHz, 1 MW, 10 s) を達成し、100 m の伝送に 14 個のベンドを使った状態で伝送損失を 20 % に抑制。

5.2 ポスターセッション CT/P:ITER

このポスターセッションでは、ITER の物理性能解析、国際トカマク物理活動 (ITPA) 、及び ITER 工学 R&D の成果が発表された。

(1) ITER の物理性能解析

JT-60U 実験で確認された重水素とヘリウムとの弾性衝突の効果をダイバータの輸送計算に考慮するとヘリウム排気の効率が数倍改善できる。そのため ITER の炉心の性能が顕著に（例えば $Q=10$ から 14 に）改善できることが期待される (CT/P-03)。理論をベースとした閉じ込め性能の予測法の研究が進展し、ITER 誘導運転において $Q \sim 10$ を達成するという経験則の予測を裏付けた (CT/P-03)。ITER においてペレット入射によって頻繁に ELM (周辺局在モード) を誘起することにより、ELM の熱負荷を許容限度以下に低減してダイバータ板の寿命を長期化できる可能性がある (CT/P-09)。閉じ込め性能及びベータへの要請が比較的低い ($HH_{y2} \geq 1.3$, $\beta_N \geq 2.6$) $Q \geq 5$ を満たす定常運転シナリオを開発した (CT/P-08)。この領域の β_N であれば、現有のサドルコイル及び電源で安定化が可能であることを、真空容器の二重壁構造を考慮した解析モデルを用いて明らかにした (CT/P-12)。ダイバータの輸送計算を系統的に行ない、ダイバータ及びスクレイプオフ層のパラメータの比例則を導出した (CT/P-07)。

(2) 国際トカマク物理活動 (ITPA)

ELM による熱流束の立ち上がり時間から、ELM の熱輸送は対流によることが示唆される (CT/P-01)。スクレイプオフ層では、磁力線に沿って低磁場領域から高磁場領域に向かう、 ∇B ドリフトに駆動されたプラズマの流れが存在する (CT/P-01)。国際データベースからペデスタイルとコアの部分からなる比例則を検討しているが、まだ不確定性要素が大きい (CT/P-02)。ASDEX-Upgrade、DIII-D、JETにおいては、グリーンワルド密度を 10% 越えた領域でも $HH_{y2} = 1$ の閉じ込め性能を保持できている (CT/P-04)。ITB のデータベースを整備しているが、理論ベースの輸送計算は測定された分布と合っていない (CT/P-05)。計測の R&D が進展し、RIEMF と反射鏡の損耗の問題については ITER では解決可能であることが明らかになった (CT/P-10,11)。JET においてトロイダルアルヴェンモード (TAE) の実験を行ない、TAE モードが形状及びシア制御で抑制可能である、という理論の予測を裏付けた (CT/P-6)。Inductive 運転で想定している正磁気シアでは、TAE モードは安定であるが、定常運転で想定している負磁気シアの場合には TAE モードが不安定になることが予測される (CT/P-6)。

(3) ITER の工学設計及び R&D

高周波加熱装置は、要請された効率を満足するためには更なる R&D が必要 (CT/P-13)。トロイダル磁場モデルコイルは、初期の運転を終え、仕様性能を超える運転を行なって設計の裕度を確認する (CT/P-14)。パンケーキ接合部の試験も首尾よく進み、接合部は再現性よく低抵抗を達成 (CT/P-15)。ローザンヌの高磁場試験施設では、過渡状態の AC 損失と安定性などについて成果を得て、ITER のコイルの裕度を低減してコストの節約につなげた (CT/P-16)。ITER の運転、保守点検、事故の際の放射線・放射性物質の流出量及び作業者の被爆量を評価し、設置国の安全審査に資するべく報告書 Generic Site Safety Report (GSSR) にまとめた (CT/P-17)。

6. 慣性核融合

6.1 セッション IF: 慣性核融合

IF-1: Progress in Direct-Drive Inertial Confinement Fusion Research at the Laboratory for Laser Energetics

ロチェスター大レーザーエネルギー研における直接駆動慣性核融合研究、特にターゲット物理に関する研究の進展が紹介された。30kJ-OMEGA レーザーシステムを使用した照射試験では、現在までのところ、核融合積 ($n\tau T$) で $7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$ の領域まで到達している。

IF-2: Recent Advances in Indirect Drive ICF Target Physics

National Ignition Facility (NIF) の建設状況と、ターゲットデザインの進展について報告された。NIF は建家がすでに完成しており、2004 年から 1 本のビームラインが使用可能となり、すべてのビームライン (48 本) が完成するのは 2009 年である。

IF-3: Fast Ignition Experimental and Theoretical Researches toward FIREX

激光 XII の最大出力は 2001 年までに 500J/0.8ps まで増力されている。ターゲットへの照射試験 (エネルギー 2–3kJ/ns) を実施した結果、円錐殻ターゲットでは中性子収率が 10^5 から 10^7 へ増大することが観測された。中性子エネルギースペクトルの解析結果から円錐殻により、コアプラズマが効率よく加熱されることが分かった。自己点火実験 (FIREX-II) に向けては、50kJ/10ps クラスの大出力レーザーの開発が望まれる。

IF-4Ra: Progress in Physics of Wire Array Z-pinch Implosions

ワイヤー配列 Z ピンチを用いた慣性核融合研究の進展が示された。本方式ではレーザー点火と爆縮過程が異なり、MAGPIE 装置を用いた実験及びシミュレーション結果から中心部におけるコロナプラズマの生成が爆縮過程に大きな影響を与えることが明らかとなった。

IF-4Rb: ICF High Current Experiments Aimed at the “Baikal” Program

ロシアで計画されているワイヤー配列慣性核融合研究計画「バイカルプロジェクト」の概要が紹介された。現在の計画では、最大 3.2~3.5 MV, パルス幅 100 ns の大出力パルスパワー装置にて Z ピンチプラズマ実験を行う予定である。

IF-5: Fundamental Issues in Fast Ignition Physics: from Relativistic Electron Generation to proton Driven Ignition

本講演では、ペタワットレーザーによる高速点火における基礎的な過程、特に電子ビームの不安定性や固体ターゲットへのエネルギー付与、陽子ビームによる高速点火などの問題に関する理論研究の成果が紹介された。

IF-6: Advances in Radiation-Hydrodynamics and Atomic Physics Simulation for Current and New Neutronless Target

慣性閉じこめ方式による $\text{P}-^{11}\text{B}$ 反応などの Advanced-Fusion サイクルでは高い点火温度が要求される。そのような高温における核融合燃焼波の伝搬のシミュレーション結果が示された。この場合、古典的なプラズマとはエネルギー損失機構が異なることが明らかとなった。

6.2 ポスターセッション IF/P:慣性核融合

IF/P04 : 高速点火用 1 PW Nd ガラスレーザーシステムの開発について述べた論文。光学パラメトリックチャーピドパルス増幅器 (OPCPA) 、光学位相修正用表面形状可変ミラー等の新技術を導入し、燃料ターゲットに 420J、パルス幅は 0.47 ピコ秒の入射に成功した。

IF/P05 : プラズマと高強度レーザーの相互作用の計算機シミュレーションを行い、フランス応用光学研究所の実験と比較した。プラズマ中にレーザーが通過することにより生じるウエイク場 (wake field) により、200MeV までの高速電子が生じる。これがタンクステンターゲットで減速される時、MeV 級 X 線を放出する。これは、実験結果と一致する。

IF/P-08 : 相対論的電子によるコアプラズマ加熱過程を、Fokker-Planck/流体結合計算により解析した。高速電子の減速過程では、ラングミュア波による減速も電子一電子衝突と同様に重要であることを指摘。

IFP-11 : GA では、陽子ビームによる高速点火を目的として、超高強度準中性陽子ビームとプラズマの相互作用のシミュレーション研究を行った。その結果、高速点火のためには、高強度の準中性陽子ビームが必要であるが、ビーム自身が引き起こす電磁不安定性により、爆縮プラズマを乱してしまうことが分かった。

IFP-12 : ローレンスリバモア、ロスアラモス両国立研究所を中心に進めている磁場ターゲット核融合では、ベータ値が 1 以上になりかつプラズマが直接爆縮シェルと接触しない。そこで 2 次元シミュレーションコードを開発した。その結果微視的運動とそれに伴う異常輸送はそれほど閉じ込めを劣化させないことが分かった。

IFP-13 : ロシアにおける重イオン高速点火方式の炉の概念設計が示された。線形加速器で 100 GeV に加速したプラチナイオンで点火を行う。約 5 MJ の爆縮用ビームと約 0.4 J の高速点火用ビームにより、繰り返し 2 Hz で 600 MJ の核融合出力が期待できる。

IFP-14 : 重イオン慣性閉じ込めの設計では、ビーム電流の増加と焦点サイズの減少が要求される。ここで問題となる空間電荷は、電子によるビームの中性化効果を入れることにより、ビームの焦点サイズをさらに減少できることがわかった。

IFP-15 : 大阪大学レーザーセンターで、流体力学的レリーテーラー不安定性の成長時定数を測定した。またレーザー照射ターゲットのアブレーションプラズマ密度を測定することに成功した。

IFP-16 : OMEGA を用いて、間接爆縮における高速点火ターゲットの試験を行った。連続ラジオグラフィーで爆縮過程を撮影したところ、シミュレーションとよく一致した。しかし、ホーラーム (hohlraum) の金からの X 線が高速点火用コーンを透過し、コーンの表面を蒸発させ爆縮コアに高 Z 不純物が入り込むという現象が観測された。

7. 技術開発、工学設計

7.1 セッション FT/1:技術開発

- FT/ 1- 1Ra, Recent Progress in Reduced Activation Ferritic Steels R& D in Japan
 FT/ 1- 1Rb, On the Potentially of Using Ferritic/Martensitic Steels as Structural Materials for Fusion Reactors
 FT/ 1- 1Rc, Reduced Activation Structural Materials for Fusion Power Plants the European Union Program
 FT/ 1- 1Rd, Progress and Status of Fusion Technology and Materials Research in China

DEMO 炉に向けた構造材の開発として、低放射化フェライト鋼、バナジウム合金、SiC の開発状況についての報告。核融合炉を模擬した照射条件で照射試験を実施中。IEA のもとで実施した低放射化フェライト鋼のサーベイランス試験結果は、データベースで公開されていること、Cr 添加による DBTT (延性脆性遷移温度) の低下阻止、600 appmHe まで強度変化がないこと、構造材の開発における IFMIF の重要性等を強調された。バナジウム合金及び SiC の研究の進展に関する質問に関しては、実証段階に移行できるとの見解が示された。

FT/ 1- 2, Recent Advances at the International Fusion Materials Irradiation Facility IFMIF

IFMIF の開発状況についての報告。試験片と試験条件、イオン源、加速機、ターゲット、リチウムループ及びテストセルの開発の現状について概説された。加速器開発の進展に関する質問に対しては、80%完了との見解が示された。

FT/ 1- 3Ra, Addressing Key Science and Technology Issues for IFE Chambers, Target Fabrication and Target Injection

FT/ 1- 3Rb, Design and Fabrication of Form-insulated Cryogenic Target for Wet-walled Laser Fusion

コストを考慮した最適なターゲットの製造技術開発についての報告。ターゲット皮膜の材料や製造法を改良。liquid 及び dry 壁容器の設計についても報告。どれほどの出力エネルギーが得られるかとの質問に対して、1000 MJ まで可能との見解を示した。

FT/ 1- 4, Design Innovations of the Next-Step Spherical Torus Experiment and Spherical Torus Development Path

FT/ 1- 5, The Spherical Tokamak Power Plant

高ベータを目指した ST の DEMO 炉についての報告。オーム加熱起動なし、液体窒素冷却コイルを採用。中心ソレノイドコイルに熱伝導の良い銅合金を採用し、遠隔交換を想定。DEMO 炉になりうるかとの質問に対し、現在は、実現可能性の研究中であるが、最適化を行えば、DEMO 炉になりうるとの見解を示した。

FT/ 1- 6, Recent Development in Helias Reactor Studies

Wendelstein 7X の次期装置として、ヘリアス実験炉の設計について報告。数種の主半径の設計について紹介。

7.2 セッション FT/2: 工学設計

FT/2-1: Overview of the KSTAR Tokamak Project

KSTAR プロジェクトは 1996 年に開始され、1998 年に概念設計 ($I_p=2\text{MA}$, $B_t=3.5\text{T}$, $R_p=1.8\text{m}$, $a=0.5\text{m}$ 、ダブルヌル配位、20–300 秒) を終了した。工学 R&D のプロトタイプ製作、実験棟の建設を含め工学設計は 2002 年 3 月に終了し、本体の組立は 2003 年半ばより始まる予定。2002 年中に超伝導試験設備での TF00 コイル、PF-type コイルの試験を予定している。実規模のプロトタイプ真空容器セクターが製作され、リーク試験に成功した。2005 年末の運転開始を目指し、建設が進んでいる。

FT/2-2: Test Results on Systems Developed for SST-1 Tokamak

SST-1 ($I_p=0.22\text{MA}$, $B_t=3\text{T}$, $R_p=1.1\text{m}$, $a=0.2\text{m}$ 、ダブルヌル配位、水素運転、1000 秒) はインドに建設中の高アスペクト比のフル超伝導トカマクである。TF コイル及び PF コイルに用いるケーブルインコンジット型の NbTi 導体のモデルコイル試験に成功した。超伝導コイルの製作は完了し、現在内部パンケーキジョイントの作業が進んでいる。プラズマ対向壁は $1\text{MW}/\text{m}^2$ に耐えるよう設計され、モックアップ試験では $2\text{MW}/\text{m}^3$ のサイクル試験に耐えた。加熱装置は、定常で ICRF 1.5 MW、LH 0.5 MW×2、ECH 0.2 MW 及び NBI 0.8 MW である。

FT/2-3: Status of WENDELSTAIN 7-X Construction

W7-X ($R_p=5.5\text{m}$, $a=0.53\text{m}$, $\iota=5/5 \sim 5/4$, $B=3\text{T}$ 、加熱パワー 15/30 MW) は、W7-AS の後継装置として、グライフスバルドに建設中の大型超伝導ヘリカル装置である。 $\iota=5/5$ の磁場配位は 50 個の非平板コイルで生成され、さらに 20 個のコイルで $\iota=5/9 \sim 5/4$ の範囲で ι を可変させることができる。昨年から連続的に製作を開始した超伝導導体の製作過程における不具合の発生で、まだ全体の 1/5 しか超伝導導体が調達されておらず、プロジェクト工程への影響が懸念されている。

FT/2-4: Engineering Aspects of Compact Stellarator

NCSX (1.4 m, 2 T : 原理実証段階の装置) と QPS (0.9 m, 1 T : 概念探索段階の装置) は、それぞれ PPPL および ORNL で設計が進められている現在概念設計フェーズのコンパクト・ステラレータである。いずれもモジュラーコイルを用いるが、複雑なコイル形状のため、柔軟な撲線ケーブル型のコイルを採用する。QPS では、低アスペクト比 2.7 のため真空容器内部にコイルを設置する構造を採用している。

FT/2-5: Objectives and Design of the JT-60 Superconducting Tokamak

JT-60SC ($R_p=2.8\text{m}$, $B_t=3.8\text{T}$, $I_p=4\text{MA}$, 100 秒 / 15MW) は、既存設備を有効利用したフル超伝導トカマクであり、現在概念設計段階にある。JT-60SC では、炉心級の低 ρ^* , v^* 領域において原型炉の経済性改善のために高ベータ ($\beta_N=3.5 \sim 5.5$) を目指し、環境適合性改善のためにフェライト鋼を全面的に使用する。超伝導トロイダル磁場コイルには、先進的な Nb₃Al 導体を採用して、コンパクトなコイルを実現する。

FT/2-6: Exploration of Burning Plasmas in FIRE

FIRE ($R_p=2.14\text{m}$, $a=0.595\text{m}$, $B_t=10\text{T}$, $I_p=7.7\text{MA}$, 20 秒、ダブルヌル配位) は、低コストで $Q \sim 10$ の DT プラズマを生成する強磁場でコンパクトな 80 K プリクール型銅コイル装置である。まずは電流立ち上げ初期の燃焼プラズマ物理の解明に取り組むが、後期には LHCD を追加できるフレキシビリティを持たせる。20 MW の LHCD を増力すれば、70% 自発電流割合で $\beta_N \sim 3.5$ を $Q > 5$ で 1~3 倍の電流拡散時間程度維持することが可能となる。

7.3 ポスターセッション FT/P1:技術開発

このポスターセッションでは、(1)構造材等の材料開発、実用環境下の影響評価、(2)ブランケット開発および、関連するニュートロニクス評価とブランケット材料開発、(3)球状トカマクやヘリカルなどの炉設計、(4)慣性核融合の工学技術開発、の4つの分野に関する報告があった。

(1) 構造材等の材料開発、実用環境下の影響評価

日本から、低放射化フェライト鋼の疲労耐久性に及ぼす照射効果および核変換ヘリウムの効果(FT/P1-1)が報告された。また、京都大学において新規開発されたNITEプロセスによるSiC/SiC複合材の機械強度がこれまでに類を見ないほどに優れていること、照射効果も優れていること(FT/P1-2)が報告された。また、低放射化フェライト鋼の強磁性効果がトカマクの β 限界に及ぼす影響(FT/P1-6)が報告された。水素同位体と構造材との相互作用に関する基礎研究(FT/P1-4)や、銅合金の照射損傷研究(FT/P1-5)について報告があった。材料物性のモデリングに関しては、慣性核融合炉条件に対するフェライト鋼、SiC/SiC複合材の照射効果(FT/P1-7)に関して報告された。また、磁場閉じ込め、慣性核融合の共通課題として、タングステン第一壁アーマに及ぼす、炭素イオン入射の影響に関する研究(FT/P1-15)が報告された。

(2) ブランケット、中性子工学評価とブランケット材料開発

原研から原型炉ブランケットの設計と製作技術開発(FT/P1-8)、中性子工学実験によるトリチウム増殖率と放射化の精度評価(FT/P1-10)、増殖・増倍材の製作技術開発(FT/P1-9)について報告があり、超臨界圧水冷方式を採用するというこれまでにない新しい概念で、原型炉設計と炉工学の最新の研究成果とを協調させて、経済的な魅力の高いブランケット開発を設計・技術開発両面で進めている点が高く評価された。また、原型炉のブランケット開発に必要なITERのテストモジュールの照射損傷解析(FT/P1-11)や、核計算においてもっとも重要となる核データのEUでの総括的な整備開発計画の進行状況(FT/P1-12)が報告された。

(3) 球状トカマクやヘリカルなどの炉設計

EUにおける原型炉設計研究の現状のレビュー(FT/P1-19)が報告された。また、球状トカマクの炉設計に関して、動力炉設計(FT/P1-21)から中性子利用によるアクチニド消滅処理装置としての設計(FT/P1-22)まで幅広く行われ、発表件数が前回より増加した。そのほか、ヘリカル炉のシステム設計のトカマク炉との比較評価(FT/P1-20)、ミラー炉型の中性子源発生装置設計(FT/P1-24)や、ビリアル定理によるコイル加重負荷一様型炉の概念(FT/P1-13)に関する報告がされた。

(4) 慣性核融合の工学技術開発

慣性核融合炉の工学技術に関しては、燃料ターゲットの製造技術や入射技術、レーザードライバーの技術(FT/P1-26)、レーザー炉KOYOの動力システムに関する設計研究と乾式第一壁構造や湿式第一壁構造を採用する場合の設計範囲の評価(FT/P1-25)に関する報告があった。

7.4 ポスターセッション FT/P2:工学設計

このポスターセッションでは、KSTAR, HT-7U, W7-X, LHD, JT-60SC, Ignitor 等の建設中、設計中、あるいは稼働中の核融合装置の超伝導コイル、真空容器（プラズマ対向機器を含む）、加熱装置等の工学設計や技術開発に関する報告があった。

韓国の KSTAR (FT/P2-01, 02) は中型の超伝導トカマク装置として現在建設中であり、2005 年末の建設、組立完了を目指して、超伝導コイル、真空容器（プラズマ対向機器、容器内コイルを含む）、クライオスタッフに関する実機ベースの技術開発を実施している。併せて、300 s の長時間運転に向けて、NBI, ICRF, LHCD, ECH 等の加熱、電流駆動装置、電源、及び計測の技術開発を進めている。実機製作に向けて、超伝導 TF コイルのコイルケースや真空容器のプロトタイプの製作が進行中である。容器内コイルは、位置制御、誤差磁場補正、RWM 制御の 3 つの機能を満たすように設計変更が行われ、4 コイルで構成されるコイル一式が 4 箇所に設置される。

中国の HT-7U (FT/P2-03) は、すべての超伝導コイルに NbTi のケーブル・イン・コンジット導体 (CICC) を採用し、ICRF (3 MW), LHCD (3.5 MW), ECH (0.5 MW) の加熱で 1000 s の長時間運転を目指した小型の超伝導トカマク装置である。2003 年の組立、2004 年末の実験開始を目指し、工学設計と併せ研究所内の施設で TF コイル及び CS の実機サイズの超伝導コイル R&D を実施している。

ドイツの W7-X (FT/P2-04) は、現在建設中のヘリアス配位の大型ステラレータ装置であり、併行してダイバータの概念設計とプラズマ対向機器の設計を実施している。幅広い運転パラメータ領域に対応するためオープンダイバータを選択し、除熱・粒子排気能力に柔軟性を持たせている。ステラレータでは、ディスラプションによる密度限界がないので、高密度、かつ高い輻射損失の運転が有効であり、ダイバータ板への熱負荷はかなり軽減される。

LHD (FT/P2-05) では、非誘導電流駆動による回転変換分布制御を可能とするため、進行波を励起できる ICRF 速波用コムラインアンテナを新規に開発した。このアンテナは、フィッシュボーンアンテナと呼ばれ、70 MHz を中心として 10 MHz 以上 (10dB) の広い帯域に対応可能であり、LHD の真空容器の内側に 2 箇所、プラズマの形状に合わせるように設置された。H ∞ コントローラを用いたフィードフォワード制御 (FT/P2-08) を用いて LHD の超伝導コイルの 6 系統の DC 電源の制御システムを構築した結果、応答時間 0.3 s 以内で目標値に対し 0.01% 以下の精度で制御可能となった。

米国の NCSX 及び QPS のコンパクト・ステラレータ (FT/P2-06) では、モジュールコイルやコイル配置の工学設計が進められ、プラズマ性能向上を図るためにプラズマ形状の最適化が行われた。

JFT-2M では、これまで CT 入射 (FT/P2-06) は水平入射実験を行ってきた。しかし、45° 及び 90° のドリフト管を用いて CT 入射を行った単独試験で良好な結果を得られ、 ∇B ドリフトによる力を軽減できる垂直入射の可能性を確認した。

JT-60SC (FT/P2-09) では、原型炉に繋がる先進的な核融合技術として超伝導マグネット技術やプラズマ対向機器を開発した。JT-60SC の超伝導 TF コイル用として、高い銅比 4 の二オブアルミ超伝導素線を新規に開発し、実機サイズの CICC を製作した。この導体を用いて、リアクト&ワインド法（熱処理後に巻線作業を行う製作方法）を実証する R&D を進めている。JT-60SC のダイバータへの熱負荷 10–15 MW/m² に耐える機器として、スクリュウ管を銅製ヒートシンクに設け、これと炭素纖維複合材、緩衝材を一体ロウ付けすることで、高性能のプラズマ対向機器を開発した。

8. 革新的概念、安全性、環境

8.1 ポスターセッション IC/P:革新的概念

球状トカマクのプラズマ不安定性に関する発表 (ICP-01)、Ergodic ダイバータによる磁場配位に関する実験および解析 (ICP-02, ICP-03)、ステラレータに関する解析 (ICP-05, ICP-07, ICP-08)、反転磁場ピンチに関する理論研究 (ICP-09)、ヘリシティ入射に関するもの (ICP-10, ICP-14) などプラズマ閉じ込めに関する新しい手法・概念が発表された。以下に代表的なものを述べる。

ICP-01: Experimental Study on the Practicability of a Self-Created Spherical Tokamak in the Coilless STPC-EX Machine

球状トカマク装置 STPC-EX で、2 軸 Z ピンチと呼ばれる新しい形成機構によって球状トカマクが形成され、 $0.4 \sim 0.6$ の高 β と 1.25 のアスペクト比が得られた。

ICP-02: Overview of Magnetic Structure Induced by the TEXTOR-DED and the Related Transport

Dynamic Ergodic Divertor (DED) が TEXTOR トカマクに設置されている。DED はダイバータ板への熱負荷分布を広げる回転磁場での運転も可能であり、DED での磁場の構造やプラズマ端部での磁力線の ergodic や laminar zone の形成について数値的に調べ、熱や粒子の輸送についてのモデル化が行われた。

ICP-05: Physics Issues for a Very-Low-Aspect-Ration Quasi-Poloidal Stellarator (QPS)

現行の $1/2$ から $1/4$ の非常に小さいプラズマアスペクト比の準ポロイダルステラレータは究極的に高 β のコンパクトステラレータにつながる新しい閉じ込めであり、超高 β 配位でトカマクの $1/3$ から $1/5$ のブートストラップ電流が理論的に得られた。

ICP-07: Physics Design of Quasi-Axisymmetric Stellarator CHS-qa

準軸対称配位の低アスペクト比ステラレータ CHS-qa が設計されており、非常に小さい非対称のトロイダル配位における新古典輸送特性を計算する新しい手法を開発した。

ICP-09: High Beta Plasma Confinement and Neoclassical Effects in a Small Aspect Ratio Reversed Field Pinch

小さなアスペクト比の反転磁場ピンチ (RFP) の高ベータでの安定性が理論的に計算され、安定分布、高ベータ限界、ブートストラップ電流への影響が評価された。

ICP-10: Progress with Helicity Injection Current Drive

NSTX と HIT-II における同軸ヘリシティ入射 (CHI) 実験が報告された。CHI 立上げ手法は壁状態が悪い場合でも誘導電流放電の再構成や安定性を大きく改善した。

ICP-12: Levitated Superconductor Ring Trap (Mini-RT) Project-A new Self-Organized Structure with Strong Plasma Flow

高温超伝導コイルを持った浮遊コイルを備えている Mini-RT が建設中である。10 keV 以上のエネルギーを持った電子は円柱状のプラズマの外側の領域に逃げ、半径方向の電場を強くすることが示された。

ICP-13: Stability of Axisymmetric Plasmas in Closed Line Magnetic Fields

閉じたポロイダル磁場によって閉じ込められる軸対称プラズマの安定性が評価され、ドリフトモードの安定性に対する衝突散逸の影響が明確に評価され Z ピンチに応用されている。

8.2 ポスターセッション SE/P: 安全性、環境

本節には 4 件の論文が予定されていたが、実際に発表されたのは 2 件のみであった。

SE/P-03: Evaluation of Economical Introduction of Nuclear Fusion Based on a Long-Term World Energy and Environment Model

核融合発電がいつごろから経済的に市場参入できるかを調べた。解析モデルは世界のエネルギー・システム総コストを最小化するように構成されている。1 次エネルギー資源の採掘から輸送（エネルギー資源の国際移送）・転換（化学プラント、発電プラント）・2 次エネルギー需要、省エネルギーを通して最終エネルギー需要（固体、液体、気体、電力）を満たす構造となっている。CO₂回収処分とともに、水素・メタノールなどの 2 次流体燃料合成など有効利用もモデル化されている。解析結果は以下の通りである。

規制なしでは核融合が経済的にエネルギー市場に導入されるのは困難であろうが、CO₂濃度 550 ppm 制約下では 2050 年から参入の可能性はある。

エネルギー市場へ核融合を 2050 年から導入することで、世界全体でエネルギー供給のために支払うコストを年間 1 兆円オーダーで削減可能である。ただし核融合の導入が遅れるほどその額は小さくなり、2080 年導入では 1/5 程度にまで減少する。

同様に核融合を 2050 年に導入することにより、炭素削減に必要な仮想上のコスト（シャドープライス）を、導入時から 2100 年までの積算で最大 10% 程度低減できることが見込まれるが、この値も 2080 年の導入では 1/5 まで減少する。

SE/P-04: EU Socio-Economic Research on Fusion, Findings and Program

核融合コストの幅の推定を行った。結果は 70~130 mill/kWh [13] である。将来の核融合炉の外部コストは数 mill/kWh のオーダーであり、現在の核分裂炉の半分以下、石油・天然ガス火力の 5~10 分の 1、石炭火力の 20 分の 1 である。核分裂炉に対しても割引率（4% 程度）が 1000 年以上にわたって適用されており楽観的すぎるとこの論文の著者は考えている。

巨大科学技術のプロジェクトに関する公衆へのヒアリング等の実施を行った。結果は、少なくとも核融合発電の実現可能性が立証されるまでは核融合開発を続けることに全てのグループ（恐らく様々な公衆 "グループ" にヒアリングしたのであろう）が賛成したものの、公衆は自然エネルギーと関連研究への投資に強い選好を示していた。また 1997 年にイタリア政府が ITER 誘致を考えた際に、イタリアの地域住民の反応を調べるために "European Awareness Scenario Workshop" 法により実験を行ったところ、実験開始時は核融合の話を地域住民や代表者にすることも極めて難しかったが、"awareness" プロセスの終わりには、ITER 建設に好意的な結論を持つようになっていた。この研究結果は、地域住民は自領域なら意思決定プロセスには積極的に参加することと、効果的な参加プロセスには地域レベルの次元を含まねばならないことを示している。

ヨーロッパ MARKAL の検討以外に、インド MARKAL による検討も行われた。インドの 70 年後のエネルギー需要は 80 倍になり、CO₂ 制約が無いケースでは主に石炭と天然ガス、2025 年から CO₂ 制約を開始して 550ppm 達成するときは、21 世紀末の電力市場の 10% になるであろう、と試算している。

9. ポストデッドライン

10 編の Post Deadline 論文が発表された。その内 3 編 (PD/T1~3 : いずれもトカマク実験) は口頭発表、残りの 7 編 (PD/P-1~7) はポスター発表であった。各論文の概要は以下の通り。

PD/T1 : Self-consistent, integrated, advanced tokamak operation in DIII-D

先進トカマク運転に関する最近の成果として、off-axis の ECCD を用いた電流分布の制御により、 $q_{min} > 2.0$ の、理想的な安定性限界に近い放電において、 β 値～2.9%、非誘導電流駆動割合 90%、閉じ込め $H_{89P} \sim 2.5$ を得て、2 秒間安定に保持（放電時間は ECCD のパルス幅で制限）。ECCD が重要な役割を果たしており、中央部で負磁気シアを形成し、弱い輸送障壁を形成するのに貢献している。

PD/T2 : Formation of an advanced tokamak plasma without the use of ohmic heating solenoid in JT-60U

中心ソレノイド・コイルを使用せず、その替わりに垂直磁場コイルや形状制御用コイルを用いてプラズマを立ち上げ、非誘導電流駆動 (LHCD) により電流を増加させ、先進トカマク放電の実現に向けた挑戦の成果として、世界で初めて、この様な運転手法により、自発電流が 100% 近く、閉じ込めも良好であり、 β 限界に近い先進トカマクを実現することに成功。本成果は、中心ソレノイド・コイルが無くても定常運転に必要な高自発電流割合の先進トカマク運転が可能であることを示したもので、核融合炉の小型化の観点から、炉設計にも大きな影響を与える成果である。

PD/T3 : Major progress on Tore Supra toward steady state operation of tokamaks

長パルス・高性能放電に向けた研究の成果として、4 分 25 秒の安定な放電を実現 ($I_p=0.51$ MA、LHCD=3 MW、 $T_i(0)=1.6$ keV)。この様な長時間放電でも、密度は安定に制御 ($n_e(0)=2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) されているが、壁は依然として飽和状態には至っていない。長時間放電に伴う技術的な課題にも直面しており、クライストロン出力の低下（単機性能試験では 450 kW × 1,000 s、Tore Supra での長パルス運転中には 250 kW レベル）、トロイダル・ポンプ・リミター（除熱性能は期待通り）裏側の炭素フレーク堆積、リップル・ロス粒子による壁の損傷等を報告。

この他、ポスター発表では、JET におけるイオン・バーンシュタイン波による内部輸送障壁の形成に関する試み (PD/P-1)、2 台の重イオンビーム・プローブによる CHS プラズマの内部電場と揺動の測定、それに基づく電磁不安定性のダイナミクスに関する実験結果 (PD/P-2)、レーザー光の薄膜透過性に関する解析的評価 (PD/P-3)、トロイダル・プラズマの L-H 遷移に關し、半径方向の電場の分岐に関する統計モデルの提案 (PD/P-4)、NSTX と HIT-II における同軸ヘリシティ入射実験の進展 (PD/P-5)、日本が ITER サイトとして提案している六ヶ所サイトの技術的な紹介 (PD/P-6)、FTU で行われた ITER 条件に近い密度領域での LHCD 実験の成果 (PD/P-7) が報告された。

10. サマリー

10.1 閉じ込め、波動・プラズマ相互作用、高エネルギー粒子

講演者：TEXTOR の F.C. Schueller

まず、論文数の統計を示したが、それによると磁気核融合の実験 211、理論 88、炉工学 59、慣性核融合 37、また、磁気核融合の実験 211 のうち 168 がトカマクである。その後、ミラー、RFP（逆磁場ピンチ）、ステラレータ（ヘリカル）、球形トカマクの順で話し、その後に JT-60 や JET、DIII-D、AUG (ASDEX Upgrade) などの大型、中型トカマクの成果を、加熱と粒子補給、輸送、ITB（内部輸送障壁）などのトピックスという 3 章に亘って報告した。この章建てから、トカマク以外の研究に光を当てようとの意図があると思われた。

ミラー装置では、GAMMA10（筑波）、Anbal-M、GDT、GOL-3（3 台ともロシア）、Hanbit（韓国）がとりあげられ、GAMMA10 で ECH による電界障壁の生成のスケーリングが得られたなどの成果があった。

RFP では、MST（米国 Wisconsin）、RFX（伊）、EXTRAP-T2R（スウェーデン）、TPE-RX（産総研）、SSPX（米国 LLNL、スフェロマック）が取り上げられ、MST でベータ 15%、電子温度 1.3keV が得られた、などの成果があった。ステラレータでは、核融合科学研の LHD で電子温度 10keV、蓄積エネルギー 1.2MJ とヘリカルとしては飛躍的な値が得られた。ドイツの W7-AS では、タイバータをつけて不純物の混入を避けて良いプラズマを得たが、既に運転終了になり、次に建設中の W7-X は工程が遅れている。LHD でもスペインの TJ-II でも ITB が観測された。

球形トカマクとしてはロシアの Globus-M などいくつかの報告があったが、このサマリでは、米国 Princeton の NSTX と EU カラムの MAST だけが取り上げられた。この 2 台はほぼおなじパラメータの装置で、トカマクと同様な閉じ込め比例則、ITB の存在、周辺揺動（ELM）などを報告した。

この後はトカマクの成果で、最初に JT-60 の成果を 3 枚の OHP で示した。完全非誘導電流駆動のプラズマで核融合三重積の記録値 $3.1 \times 10^{20} \text{ keVs/m}^3$ を得たこと、完全非誘導のプラズマの総合特性の ITER に必要な特性との比較、高ベータ高閉じ込めを充分長時間（閉じ込め時間との比で ITER に必要な値）維持したこと、と先進トカマク研究（トカマクの定常運転に関する研究）で JT-60 が世界をリードしていることが示された。フランスの超伝導トカマク Tore Supra では、真空容器内の床に排気機能のある円盤（トロイダル・リミタ）を設置して 4 分半のプラズマ維持に成功した。九州大学の TRIAM-1M では 3 時間以上のプラズマ維持をしているが、そのことには触れなかった。JET では規格化した値での総合的な特性が ITER の設計パラメータと同じプラズマを生成した。DIII-D は β_N が 3 で閉じ込めの良いプラズマを 7 秒間、また AUG では β_N が 3.5 以上のプラズマを 3 秒間維持した。JT-60 の EC 加熱による電子温度 3 億度も取り上げられた。電流ホールについては JET の報告がとりあげられたが、プラズマの中心部で JT-60 のような完全なゼロ電流には至っていない。結論では、ITER に必要な特性は得られる見通しであることと、今後の課題として、内部輸送障壁、非局在現象、内向きの対流、磁気島による輸送についても研究が重要であるとした。

10.2 安定性、ダイバータ、革新的概念

講演者：ロシア TRINITI の S. Mirnov（トカマク初期の MHD 研究の第 1 人者だった。磁気プローブに名を残している。）

論文数は、ELM 関連 9、境界層 (SOL) 関連 15、粒子補給・第 1 壁など 11、MHD 安定性 14、MHD 制御 8、ディスラプション 4、トカマク新概念 5、非トカマク新概念 8。

ELM について、JET のプラズマ周辺部での衝突頻度が高くなるとパルスの熱が下がるという結果、JT-60 での q と三角度で ELM のタイプが変化するとの結果などを出した。JT-60 で ELM の詳細な時間変化を測定したことは大きな進歩だと考えられるが Mirnov は取り上げなかった。SOL での現象の研究も多く報告されたが、JT-60 での SOL 内での流れの反転や、Alcator C-mod と DIII-D で SOL にプラズマの塊 (Blob) が吐き出されるとの計測結果など新しい発見があった。タングステンを AUG で使用。また、リチウムを T-11 などで使用した。LHD でキンクモードが見られ、また ELM 様の現象も見られた。AUG で新しい NTM を発見。MAST、NSTX でも NTM が出た。DIII-D では、コイルにより RWM を制御した。ディスラプション時に中立点があることを JT-60, AUG, Alcator C-mod で確認したことを原研から報告した。超伝導浮上コイル装置（東大）、擬軸対称ヘリカル装置（核科研）などの新概念の報告もあった。

Mirnov は、ITER によって大きな進歩があったが、ITER に含まれない人々には困難もあったと述べ、ELM などは大きな問題とはならないだろうし、NTM や RWM の制御もできそうなので、困難はあるだろうが将来に期待するとし、最後には日本の富士山の写真を出して、山腹にはリップルが見えるがそれらを迂回して、長いジグザグの道かもしれないが頂上を目指して登っていこうと結んだ。

10.3 理論

講演者：核融合科学研の伊藤公孝氏

100 の理論の発表論文についてのまとめで、核融合の理論研究の現状がよく分る報告であった。その目次だけでも、何が世界の理論研究の中心的課題となっているかが分るので、そのまま引用する。

1. Theory of transport phenomena / 1.1 Transport code analysis / 1.2 Transport barrier mechanism (core/edge) / 1.3 Anomalous torque, off-diagonal elements, etc. [Zonal / 1.4 Self-organized criticality (SOC) model / 1.5 Alternative modelling based on variational principle / 1.6 Large orbit neoclassical transport theory / 1.7 Linear instabilities : basics of analysis /
2. Direct simulation and turbulent transport / 2.1 Progress of codes and benchmarking / 2.2 Multiple scale turbulence / 2.3 Global simulation and Bohm's vs gyro-Bohm / 2.4 Combined with global profiles / 2.5 Mesoscales / 2.6 Modelling helical plasmas /
3. MHD: understanding and control / 3.1 Global understanding including plasma shapes / 3.2 Fast events, Nonlinear instabilities / 3.3 Helical systems and others / 3.4 Control (of RWM)

4. Energetic particles and Alfvén eigenmodes /4.1 Role of geometry /4.2 Combined analysis of large-scale dynamics of waves and particles /4.3 Runaway electrons and ions
5. Heating and current drive
6. Edge modelling /6.1 Transport A&M analysis /6.2 Other important phenomena (Marfe, X-point transport, New boundary concept) /6.3 ELMs and pedestal /
7. Statistical approaches (importance of tail component)

高速大容量の計算機を駆使した大規模なシミュレーション計算によってプラズマの中の様子の解明が格段に進み、かつ、さらに進みつつあることが示された。最後にいろいろなスケールの相互作用を正規化してインテグレーション（総合化）することが重要と指摘した。また、理論分野の進展が早いので、次回からは理論の総合講演セッションを設けることを提案した。

10.4 慣性核融合

講演者：J. Lindl（リバモア研究所）

米国の NIF (National Ignition Facility) とフランスの LMJ (Laser Mega Joule) とが計画進行中。NIF の最初の 4 ビームは 1 年以内に稼働し、約 200 ビームの NIF は 2013 年にイグニションの計画。LMJ については、その前段階である LIL (Linear Integration Laser) が 2003 年末に稼働の計画。NIF, LMJ 両計画でのターゲットの設計も進んでいる。一例は、中心に DT のガス、半径 1.5 mm から 1.7 mm まで固体 DT、半径 1.96 mm まで CH の泡 (foam) と DT、最表面に 30 nm の金の膜、というもの。泡の部分はレーザ光の吸収を高めるとともに、熱い炉の中でレーザ照射前に固体 DT が融けて真球性が崩れないようにするため。また、200 本程度のレーザで球圧縮する直接照射と、ターゲットの数倍の直径の管の中にターゲットを固定して、管の両端から多数のレーザビームを入射する方式（間接照射、管の壁からでる X 線でターゲットを圧縮）など、いずれも真球性を保って圧縮するために工夫した方式の実験が進んでいる。イオンビームや Z ピンチによる間接照射で研究の進展があった。米国ロチェスター大学での直接照射の進歩があった。阪大ではじめた金のコーンを用いた高速点火方式とペタワット装置 (0.47ps の間に 420J) に注目が集った。（この原稿の筆者は阪大の 10ps 単位での計測技術を評価すべきだと思う。）KrF レーザの開発や炉設計、また、炉では毎秒約 10 個（一日に 80 万個）使うターゲットの安価な製作方法などの多くの発表があった。

10.5 核融合工学、安全性、環境

講演者：松田慎三郎原研理事

ITER のプラズマ特性の予測について比例則などによる進展があった。最近の実験の成果により、ITER の定常運転についても $Q=5$ の可能性が高まり、抵抗性壁モード (RWM) のサドルコイルによる制御やより高いベータ値への期待も高まっている。ITER の計測、制御についての検討も進んでいる。工学技術では、ITER 超伝導コイル（中心ソレノイドコイル）の実験が成功し、ITER のコイルは技術的に製作開始の

準備が整った。ITER の真空容器、ブランケットの第一壁、タイバータ板などの R&D も成功した。負イオンビームも $1 \text{ MeV} \times 0.1\text{A}$ と $0.5\text{MeV} \times 20\text{A}$ のビームが開発され、ITER のビーム装置の開発に確信が持てる状況である。高周波のジャイロトロンの開発も進んだ。超伝導トカマクや新型のヘリカル装置の計画が進んでいる。レーザ核融合については、爆縮のみでなく、高繰り返しの検討、研究も進んでいる。材料開発については、EU がバナジウムを放棄したとの発表をした。米国も追従している模様で、将来の材料は鉄（フェライトと ODS = 酸化物分散強化鋼）と SiC となった。これらの開発、特性試験のために IFMIF 計画が IEA のもとの国際協力で進められている。トカマク、球形トカマク (ST)、ヘリカル、ミラーの炉設計の発表があり、ST の炉が注目された。しかし、中心軸部分のコイルの寿命など工学的な検討、およびプラズマの特性の実験的研究は今後の課題である。

総じて、プラズマ特性の予想や工学 R&D の成果により、ITER の建設の準備が整った。将来の方向としては先進トカマクも ST もヘリカルも定常、高ベータの方向である。慣性核融合の分野も大きな進歩があった。ブランケット、材料の分野でも進展があるが、将来のエネルギー源としての重要性から、この分野のより大きな進展が期待される。

This is a blank page.

IAEA主催第19回核融合エネルギー会議概要報告書（2002年10月14日～10月19日、リヨン、フランス）

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています