

内外情報/国際会議報告

IEA / 逆磁場ピンチワークショップ報告

早瀬 喜代司
 (電子技術総合研究所)
 (1995年4月10日受理)

1. はじめに

表記ワークショップが1995年2月20～22日イタリア北部のパドバに所在する研究所 Istituto Gas Ionizzati del CNR (IGI) で開催された。逆磁場ピンチ (Reversed Field Pinch, RFP) 関係の研究者以外には馴染みが少ないかも知れないが、本研究所はユーラトムにおける逆磁場ピンチ研究センターで、世界最大の装置 RFX を有している。逆磁場ピンチ関連の国際研究協力を進めるため、OECD/IEA のもとにユーラトム、日本国政府、米 DOE の間で署名された「逆磁場ピンチの研究開発のための実施協定」があるが、協定発効(1990年)以来、通常の研究者交流の他に、その活動の一貫としてワークショップを開催してきた。研究者数はトカマクやヘリカルシステムほど多くはないので日米協力のもとでのワークショップと共催というかたちで開催してきたこともあったが、今回で丁度3回目になる。また、ワークショップではないが、一昨年9月にはこの地で少数の専門家による逆磁場ピンチ研究のレビュー&計画パネルを開催している。

今回のワークショップへの参加研究機関はユーラトムが前述の IGI グループの他に、スウェーデンの RIT (Royal Institute of Technology) グループ、米国はウイスコンシン大学グループ、日本は電総研グループと大学グループ(東大工、京都工繊大)である。その他、かつて世界の逆磁場ピンチ研究をリードした英国カラム研究所の Bodin

氏と米国ロスアラモス国立研究所の DiMarco 氏(2人とも退職し、今はフリーの身)が特別参加して総勢40名を越えるものになった。今回のワークショップは主として作業グループを組織して調査中の3課題—不整磁場(安定化シェルのカット部による)の影響とその抑制、プラズマ—壁相互作用の制御、閉じ込め比例則の確立—に関してその中間報告と評価を行うために開催したものである。初日は「各国研究機関のレビュー」と「プラズマ制御(安定化シェルカットに係わる不整磁場の影響評価、モードロック、電流分布制御等)」、2日目は「不純物制御」と「周回電圧、ダイナモ関連」、3日目は「比例則」、「その他」と「将来計画、国際協力課題」に関してそれぞれ発表、討議が行われた。以下にその概要を述べる。

2. 各研究機関での研究の概要と計画

RFX 装置 ($R/r = 2.0\text{m}/0.45\text{m}$, $I_p = 2\text{MA}$, 放電持続時間 = 0.25s) はプラズマ電流 0.5MA の初期実験を終え、本格的な 1MA 実験に向けて準備中である。エネルギー閉じ込め時間は最大 2.5ms が得られ、ほぼ従来の比例則に従っていることが示された。まだ、安定化シェルのカット部における不整磁場の影響(磁力線が壁を横切ることによるヘリシティ損失、高エネルギー電子によるグラファイトタイトルの損傷)が大きく、また、それによるとと思われる周回電圧異常成分も大きい(20V 以上)ので、現在補正を含めて改良中で

ある。今年中に1MAまでのデータを取り終え、来年からは目標の2MA放電(目標エネルギー閉じ込め時間10~20ms)を行う予定である。その後は抵抗性シェル(時定数~50ms)での平衡制御と第一壁構造の最適化に取り組む。その結果が順調ならば4MA計画に挑戦することになるであろう。プラズマ測定では軟X線やボロメータのコンピュータ・トモグラフィ計測も準備され、これから精度の良い本格的な分布測定が行われつつあるとよい。スウェーデンの小型装置T1($R/r = 0.50\text{m}/0.06\text{m}$, $I_p = 0.12\text{MA}$)は大電流密度($\approx 10\text{MA}/\text{m}^2$), 大アスペクト比($A \approx 8$)が特徴である。小型装置ながらダイナモ現象の研究をよくこなしている。米国GAの旧装置OHTEを購入し再組立したT2装置($R/r = 1.24\text{m}/0.2\text{m}$, $I_p = 0.2\text{MA}$)はすでに各試験が終了し、放電洗浄とプラズマ生成実験を繰り返しながら実験が立ち上がりつつある。当面は抵抗性シェルでのテアリングモード、ダイナモ現象の研究が中心となる。かつてのOHTEと英カラム研究所のHBTXの両装置での実験結果の矛盾に回答を出すものと期待されている。

ウィスコンシン大学のMST装置($R/r = 1.5\text{m}/0.5\text{m}$, $I_p = 0.6\text{MA}$, 放電持続時間 = 0.085s)はコイル, 安定化シェル, 真空容器が共通一体となった特徴ある装置構造をとっている。RFX装置よりも先に運転を始めたので実験データも豊富で研究としては最も進展している。ウィスコンシン大学の研究は, ロスアラモス国立研究所が建設していた米国での逆磁場ピンチ主計画装置ZT-H($I_p = 4\text{MA}$)がDoEの政策変更でシャットダウン以後, 米国での研究の中心となっている。揺動と輸送との関係の解明, 閉じ込め概念の改善の研究が主である。最近, 短パルス(~20ms)であるが, ダイナモフリー状態が観測され, これによって周回電圧の半減, エネルギー閉じ込め時間の倍増(2.7ms)を果たしている。今後の実験計画では, 現在得られているダイナモフリーの状態の詳細解析, 最も得意な輸送現象の解明は当然として, ポロイダル電流分布制御によるダイナモフリーの状態の定常的実現に重点を置いている。

電総研からはTPE-1RM20装置($R/r = 0.75\text{m}/0.2\text{m}$, $I_p = 0.25\text{MA}$)とTPE-2M装置(TPE-1RM20装置と同規模)の結果が発表された。前者では高 Θ 領域での高ベータ化と電子密度分布の計測が, 後者ではポロイダルダイバータプラズマの計測の進展が報告された。今年からRFXやMST両装置の規模の $I_p = 1\text{MA}$, $r = 0.45\text{m}$ の装置の建設に入ることになっているが, これら先行装置の経験を生かし, 将来に亘って逆磁場ピンチが魅力ある核融合研究として発展していくような斬新な装置が先進欧米機関から期待された。大学からは京都工芸繊維大のSTE-2, 名古屋大のSTP-3M, 日大のATRAS-RFP, 岩手大のIFTES各逆磁場ピンチ装置, それに東大のREPUTE-I, IQ低 q トーラスの紹介がなされた。大学ではダイナモ現象の解明, イオン加熱機構等の基礎研究が行われている。日本は多くの小型装置があり, 研究活動が活発であるのが特徴である。

3. プラズマ制御

MSTとRFX両装置は安定化シェルのカットによる不整磁場の発生状況とそのダイナモおよび閉じ込め特性に与える影響を丁寧に測定した。そして両装置ともにダイナモに関するモードのシェルカット部へのフェイズロック及び周回電圧異常への影響を観測している。MST装置では $m = 4$ までの補正コイルによって影響を緩和することに成功している。シェルの近接性は一方で重要なことながら, 不可避のシェルカットから生じる不整磁場の影響除去というむずかしい問題を付随しているので精度の高い補正が要求される。TPE-1RM20装置が採用している薄肉シェルと厚肉シェルの重ね合わせ構造ではロックはあまり観測されないことから, この方法で影響をまず緩和するのも一手法と思われる。MST装置では電流分布制御によるダイナモ制御の可能性をポロイダルパルス電流駆動で実証し, 今後は多数の小型プラズマ電子銃を壁面に取り付けて電流分布制御を行う実験計画を示した。根本的にはLHCD等で定常制御することの必要性を指摘し, 電流分布制御の計算結果を示した。

4. 不純物制御

T2 装置の He グロー放電洗浄とボロナイゼーション, MST と RFX 両装置でのボロナイゼーション結果, STE-2 と TPE-2M 両装置でのポロイダルダイバータ実験の結果がそれぞれ発表された。ボロナイゼーションはすべての装置で酸素の低減に成功している。ガス放電でなく, 簡単にロッドをプラズマ中に挿入しプラズマスパッタリングで蒸着しても良い結果が得られている。MST 装置はアルミ壁, グラファイトリミタであるが, ダイナモフリーの改良された放電 (エネルギー閉じ込め時間が倍増) が得られた。RFX 装置は全面グラファイトタイルで覆われている (リミタなし) が, 酸素と炭素成分の低減が観測されている。TPE-1RM20 装置は SUS 壁, Mo リミタであるが, 高密度化による高ベータ化 ($\beta_p = 0.1 \rightarrow 0.2$) を実現することができた。ポロイダルダイバータの実験では STE-2 装置が高温電子のダイバータ磁場に沿って運動する様子をよく観測している。TPE-2M 装置は磁場と分光による配位形成の確認が主であった。両者ともパルス持続時間がまだ短い (TPE-2M 装置で 3ms 以下) ので, リサイクリングの実験はこれからの課題である。また, 各装置でのエッジプラズマパラメータと主要不純物の一覧表がその計測法とともにまとめて作業グループから報告された。

5. 周回電圧, 揺動と輸送

逆磁場ピンチでは周回電圧は古典的抵抗値とプラズマ電流の積から計算される値よりかなり大きく, その抵抗値に依存しない成分を周回電圧異常と称している。異常成分の分析, 解明では TPE-1RM15 と 20 両装置でのシェル近接性効果の比較, 及び RFX 装置での平衡位置やその他プラズマパラメータ依存性が発表された。RFX 装置ではまだ異常成分が小型装置の TPE-1RM20 装置より大きく改善の余地がある。T1 装置ではテアリングモードのモード成長と非線形結合に関して精密な測定結果が発表された。MST 装置では周辺部の揺動解析が進み, 輸送との関係を明らかにしつつある。一方, 理論では運動論的取扱いによる

高速電子の粒子-波動相互作用への影響の解析, 磁力線のストキャシティによる拡散の計算が発表された。

6. 比例則

TPE-1RM15 と 20 両装置でのデータのまとめと分析, RFX 装置の初期実験でのまとめが発表され, 温度, 密度, エネルギー閉じ込め時間, ベータ値のデータベースが出揃いつつある。また, 作業グループで行っていた全装置のデータの統一解釈, 比例則確立の試みも報告された。エネルギー閉じ込め時間は基本的には各装置とも DiMarco 則上にあるが, β_p の I_p 依存性の強さ等, さらに実験, 検討を要する項目もある。また, 温度や密度の分布, 実効電荷数のデータベースも必要となろう。MST 装置の実験データから得られた輸送係数を用い, RFX 装置の 1MA 放電と 2MA 放電のプラズマ閉じ込めパラメータを予測した計算結果も発表された。

7. あとがき

逆磁場ピンチ特有のダイナモによる配位維持機構, また, 出遅れていた揺動と輸送機構の関係の解明が進み, 今後はトーラス系での統一的輸送機構理解にも役立つものと思われる。各装置での閉じ込め比例則も出揃い現状ではほぼまとまりつつあるが, 今後, 異常周回電圧の小さい, また, 高 β_p での運転領域が広がれば改良された比例則が得られるだろう。ダイナモによる配位維持では必然的にそれに伴うエネルギー損失が生じる。MST 装置で観測された短時間ではあるがダイナモフリーの状態では損失は半減しているので, これによる閉じ込め改良が可能であることを示していると言える。このダイナモフリー状態の長時間維持あるいはダイナモの能動的定常制御は閉じ込め概念改善の一重要課題となる。一方, 1MA 級の大電流放電でのプラズマ閉じ込め実験 (電流加熱入力 $\geq 15\text{MW}$) に入りつつあるので, エネルギー閉じ込め時間が従来の比例則に従って伸びるかどうかとともに, プラズマ-壁相互作用制御の進展も重要性を増すと思われる。