

第1節 総記

第1項 沿革

本学においては昭和33(1958)年、理学部、工学部、工学研究所、教養部にまたがる研究者によって核融合研究グループが結成され、ギリシャ語の太陽を意味する「ヘリオス」にちなんで名付けられたヘリオトロン磁場による高温プラズマ閉じ込めの研究を主体として、高温プラズマの発生、制御およびそれに関連した理論と測定の各分野において共同研究が進められるようになった。文部省科学研究費補助金によるヘリオトロンA(写真33-1)、ヘリオトロンB(写真33-2)高温プラズマ発生装置が、吉田地区の当時の工学研究所高電圧実験室に建設され、実験が続けられた。その後ヘリオトロンB装

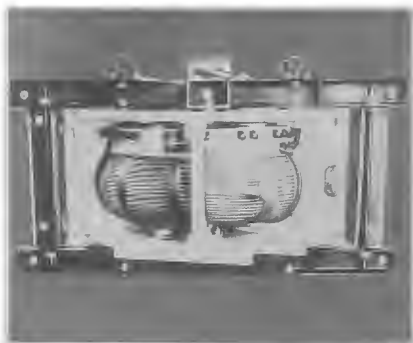


写真33-1 ヘリオトロンA高温プラズマ発生装置

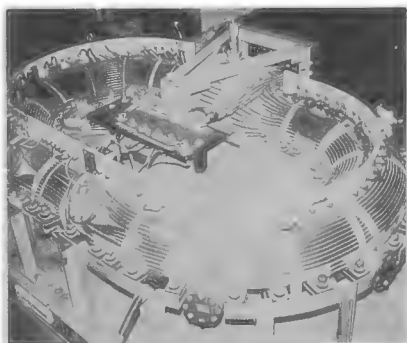


写真33-2 ヘリオトロンB高温プラズマ発生装置

*扉の写真は、ヘリオトロン核融合研究センター本館。

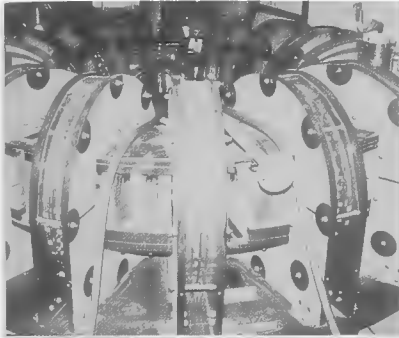


写真33-3 ヘリオトロンC装置

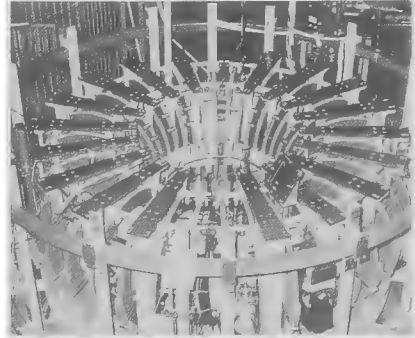


写真33-4 ヘリオトロンD実験装置

置を技術的に改良したヘリオトロンC装置(写真33-3)が名古屋大学プラズマ研究所との共同研究のもとに、昭和40(1965)年京都大学に建設された。さらに、京都大学における核融合研究のセンターとして、工学部附属の超高温プラズマ研究施設が昭和41(1966)年4月に設置された。

同研究施設では、昭和45(1970)年ヘ

リオトロンD実験装置(写真33-4)を建設し実験研究を行うこととなり、そのための実験棟を宇治構内に新設し、吉田地区から移転した。

ヘリオトロンD装置は、いわゆるヘリカル・ヘリオトロン磁場による高温プラズマ閉じ込め性能の研究を初めて行ったものである。比較的弱い閉じ込め磁場(約3 KG)であるにもかかわらず良好かつ安定に高温プラズマが閉じ込められることが実験的に確かめられ、ヘリカル磁場を用いた核融合研究の進展のきっかけを与えることとなった。引き続き、閉じ込め磁場を強化したヘリオトロンDM装置(写真33-5)を建設し、ヘリカル・ヘリオトロン磁場によるプラズマ閉じ込めの詳細な実験研究を行い、基礎的データを充実させ、ヘリカル・ヘリオトロン磁場によるプラズマ閉じ込めの原理的検証に貢

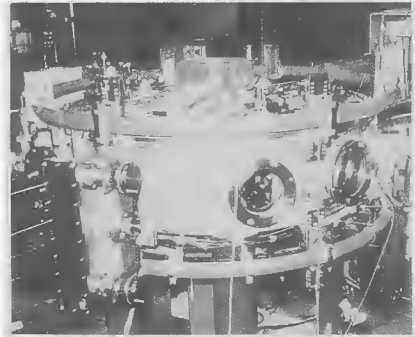


写真33-5 ヘリオトロンDM装置

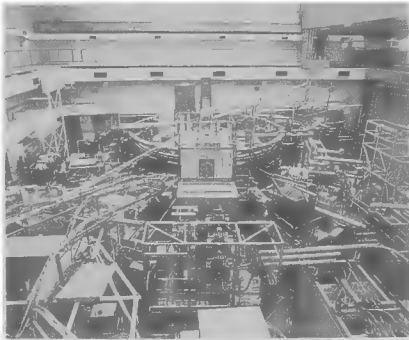


写真33-6 ヘリオトロンE強磁場高温
プラズマ実験装置

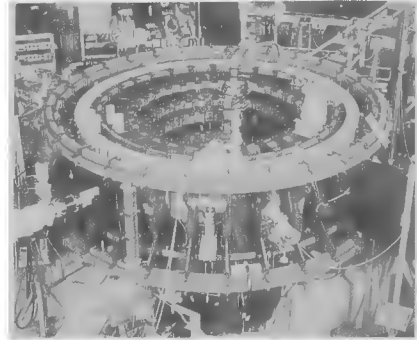


写真33-7 ヘリオトロンDR装置

献した。

ヘリオトロンD、DM装置で得られた成果は、磁場の強さやプラズマの大きさ等を考慮すると、当時核融合研究の主流であったトカマク型実験装置と比較しても遜色ないものであった。この成果をさらに進展させ、核融合研究に寄与するために、大型かつ強磁場の実験装置を建設することになり、建設・運用の組織として工学部附属超高温プラズマ研究施設を改組・転換し、学内共同教育研究施設であるヘリオトロン核融合研究センターが昭和51(1976)年5月に設立され、同時にヘリオトロンE強磁場高温プラズマ実験装置(写真33-6)の建設が開始された。

ヘリオトロンE装置は、この種の装置としては当時世界最大のものであった。実験に関連する加熱設備や計測設備にも高度の技術と独自のアイデアが盛り込まれ、これまでにヘリカル型装置としては画期的な実験データが数多く得られている。昭和56(1981)年には、高周波加熱の研究を主目的とする補助装置としてヘリオトロンDR装置(写真33-7)による研究も開始された。

ヘリオトロンE装置による研究成果は国際的に高い評価を獲得し、また大きな影響を与えた。米国ではそれまで中断していたヘリカル装置の研究を再開し、オークリッジ国立研究所でヘリカル・ヘリオトロン型磁場によるATF(閉じ込め実験装置)が建設され、実験研究を開始したことがその1例で

ある。

文部省・大学における核融合研究の進め方について審議を行っていた文部省学術審議会の特定研究領域推進分科会核融合部会は昭和60(1985)年2月に報告をまとめた。この報告では、環状磁場系の外部導体系大型ヘリカル装置(トロイダルヘリカル・ヘリオトロン型磁場)によるものとして策定するのが適当であるとしている。この答申によって文部省は具体化を進めるための準備を行った後、平成元(1989)年に核融合科学研究所を発足させた。同研究所は名古屋大学プラズマ研究所、広島大学核融合理論研究センター、京都大学ヘリオトロン核融合研究センター(一部)を統合して直轄研究所として設置された。

以上のように京都大学における核融合研究は学内研究者グループ、工学部附属超高温プラズマ研究施設、ヘリオトロン核融合研究センターを経て三十数年継続され国内外の核融合研究進展に大きく貢献してきた。核融合研究は研究段階が進むにつれて装置規模が大型化せざるを得ないが、今後大学においては適切な規模の設備による高度の研究を進める必要があり、当センターとしては未解決の課題を探求する装置的研究や、新しい着想を育てる萌芽的研究を行い、それを通じての人材養成を行うことが重要となると考えられる。

第2項 センターの組織構成

本センターの組織構成は、図33-1に示すようにセンター長のもとに5つの研究部門(固定4、客員部門1)と技術部、事務部が設置されている。センターの管理・運営に関する重要事項を審議する協議委員会が設置され、合議の上で本センターが運営されている。本センターにおける研究活動、関連事務、およびセンター運営に関する一般事項については各々センター会議、職員会議等の会議をセンター長が適宜召集し、打ち合わせを行っている。

第33章 ヘリオトロン核融合研究センター

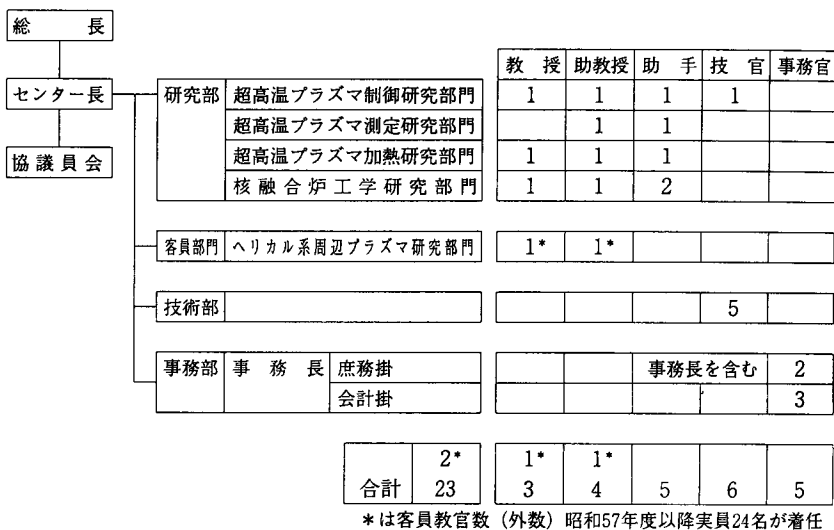


図33-1 ヘリオトロン核融合研究センター組織図

1. センター長

センター長候補者は、京都大学の専任教授の中から、ヘリオトロン核融合研究センターの協議委員会において選出される。センター長候補者の選出は、協議委員の3分の2以上の出席を必要とし単記無記名投票による選挙において過半数以上の得票者をセンター長候補者としている。

表33-1 歴代センター長

氏 名	在 任 期 間
桐榮良三(事務取扱)	昭和51年5月10日～昭和51年7月1日
宇尾光治	昭和51年7月1日～昭和63年3月31日
飯吉厚夫	昭和63年4月1日～平成元年5月28日
大引得弘	平成元年5月29日～

2. 協議員会

協議員会は、次の各号に掲げる協議員で組織する。

1. センター長
2. センター所属の教授
3. 前2号以外の京都大学教授のうちから、協議員会の議を経てセンター長が委嘱した者若干名

表33-2 平成6年3月現在の協議員会協議員

役 職	氏 名
工 学 部 長	西川 禪一
工学部教授	長尾 真
工学部教授	東 邦夫
理学部教授	加藤 利三
センター長	大引 得弘
センター教授	若谷 誠宏
センター教授	佐野 史道

表33-3 歴代協議員

役 職	氏 名	在 任 期 間
工 学 部 長	桐 榮 良三	昭和51年5月10日～昭和52年3月31日
工 学 部 長	西原 宏	昭和52年4月1日～昭和54年3月31日
工 学 部 長	西島 安則	昭和54年4月1日～昭和56年3月31日
工 学 部 長	佐藤 俊	昭和56年4月1日～昭和58年3月31日
工 学 部 長	近藤 良夫	昭和58年4月1日～昭和60年3月31日
工 学 部 長	赤井 浩一	昭和60年4月1日～昭和62年3月31日
工 学 部 長	神野 博	昭和62年4月1日～平成元年3月31日
工 学 部 長	得丸 英勝	平成元年4月1日～平成3年3月31日
工 学 部 長	中川 博次	平成3年4月1日～平成5年3月31日
工 学 部 長	西川 禪一	平成5年4月1日～
工 学 部 教 授	上之園親佐	昭和51年5月10日～昭和57年3月31日
工 学 部 教 授	前田 弘	昭和51年5月10日～昭和62年3月31日
工 学 部 教 授	水科 篤郎	昭和51年5月10日～昭和57年3月31日
工 学 部 教 授	高木 俊宜	昭和58年4月1日～昭和63年3月31日

第33章 ヘリオトロン核融合研究センター

工 学 部 教 授	長尾 真	昭和63年4月1日～
工 学 部 教 授	東 邦夫	昭和63年4月1日～
防 災 研 究 所 長	石原 安雄	昭和51年5月10日～昭和52年3月31日
防 災 研 究 所 長	若林 實	昭和56年4月1日～昭和56年4月30日
防 災 研 究 所 長	芦田 和男	昭和56年5月1日～昭和57年3月31日
防 災 研 究 所 長	奥田 節男	昭和61年4月1日～昭和62年3月31日
原 子 炉 実 験 所 長	柴田 俊一	昭和51年5月10日～昭和56年3月31日
木 材 研 究 所 長	山田 正	昭和52年4月1日～昭和53年3月31日
木 材 研 究 所 長	樋口 隆昌	昭和57年4月1日～昭和58年3月31日
木 材 研 究 所 長	西本 孝一	昭和61年4月1日～昭和62年3月31日
食 糧 科 学 研 究 所 長	森田 雄平	昭和53年4月1日～昭和54年3月31日
食 糧 科 学 研 究 所 長	森田 雄平	昭和58年4月1日～昭和59年3月31日
食 糧 科 学 研 究 所 長	森田 雄平	昭和63年4月1日～平成元年3月31日
化 学 研 究 所 長	高田 利夫	昭和55年4月1日～昭和56年3月31日
化 学 研 究 所 長	藤田 栄一	昭和57年5月17日～昭和58年3月31日
化 学 研 究 所 長	稲垣 博	昭和60年4月1日～昭和61年3月31日
原 子 エ ネ ル ギ ー 研 究 所 長	鈎 三郎	昭和52年11月1日～昭和53年3月31日
原 子 エ ネ ル ギ ー 研 究 所 長	鈎 三郎	昭和54年4月1日～昭和54年10月31日
原 子 エ ネ ル ギ ー 研 究 所 長	服部 嘉郎	昭和54年11月1日～昭和55年3月31日
原 子 エ ネ ル ギ ー 研 究 所 長	櫻井 彰	昭和59年4月1日～昭和60年3月31日
原 子 エ ネ ル ギ ー 研 究 所 教 授	櫻井 彰	昭和51年5月10日～昭和59年3月31日
原 子 エ ネ ル ギ ー 研 究 所 教 授	櫻井 彰	昭和60年4月1日～平成2年3月31日
原 子 エ ネ ル ギ ー 研 究 所 教 授	若林 二郎	平成2年4月1日～平成4年3月31日
理 学 部 教 授	田中 茂利	昭和63年5月1日～平成4年3月31日
理 学 部 教 授	加藤 利三	平成4年4月1日～
セ ン タ ー 長	宇尾 光治	昭和51年5月10日～昭和63年3月31日
セ ン タ ー 長	飯吉 厚夫	昭和63年4月1日～平成元年5月28日
セ ン タ ー 長	大引 得弘	平成元年5月29日～
セ ン タ ー 教 授	飯吉 厚夫	昭和51年5月10日～昭和63年3月31日
セ ン タ ー 教 授	秋宗 秀夫	昭和52年4月1日～平成5年3月31日
セ ン タ ー 教 授	大引 得弘	昭和57年3月1日～
セ ン タ ー 教 授	若谷 誠宏	昭和60年7月1日～
セ ン タ ー 教 授	本島 修	昭和62年7月16日～昭和63年3月31日
セ ン タ ー 教 授	森本 茂行	平成元年3月16日～平成元年5月28日
セ ン タ ー 教 授	佐野 史道	平成5年9月1日～

第3項 教員組織

現在、本センターには、4つの固定研究部門(超高温プラズマ制御研究部門、超高温プラズマ測定研究部門、超高温プラズマ加熱研究部門、核融合炉工学研究部門)と1つの客員研究部門(ヘリカル系周辺プラズマ研究部門、平成14年まで)があり、教官の総定員は14名である。各研究部門の教官配置を表33-4に示す。

表33-4 教官配置

部門名	教授	助教授	助手	教務職員
超高温プラズマ制御研究部門	大引 得弘	水内 亨	長崎 百伸	
超高温プラズマ測定研究部門		近藤 克己	別生 栄	井尻 芳行
超高温プラズマ加熱研究部門	佐野 史道	花谷 清	中須賀正彦	
核融合炉工学研究部門	若谷 誠宏	岡子 秀樹	岡田 浩之 中村 祐司	
ヘリカル系周辺プラズマ研究部門	菅井 秀郎	岡村 昇一		

表33-5 歴代教官一覧

職名	氏名	在任期間	備考
教授	宇尾 光治	昭和51年5月10日～昭和63年3月31日	停年退官
	飯吉 厚夫	昭和51年5月10日～平成元年5月28日	核融合科学研究所へ転任
	秋宗 秀夫	昭和52年4月1日～平成5年3月31日	停年退官
	大引 得弘	昭和56年4月1日～	
	大田 正男	昭和57年7月1日～昭和58年3月31日	(客員、九州大学工学部)

第33章 ヘリオトロン核融合研究センター

	山科 俊郎	昭和58年10月1日～昭和60年9月30日	(客員、北海道大学工学部)
	尾田 年充	昭和58年10月16日～昭和59年3月31日	(客員、広島大学工学部)
	若谷 誠宏	昭和60年7月1日～	
	本島 修	昭和62年7月16日～昭和63年4月1日	名古屋大学へ転任
	竹尾 正勝	昭和63年4月1日～平成元年3月31日	(客員、九州大学工学部)
	本島 修	昭和63年5月16日～平成元年3月31日	(客員、核融合科学研究所)
	森本 茂行	平成元年3月16日～平成元年5月28日	核融合科学研究所へ転任
	森本 茂行	平成元年11月1日～平成2年3月31日	(客員、核融合科学研究所)
	須藤 滋	平成4年4月10日～平成5年3月31日	(客員、核融合科学研究所)
	菅井 秀郎	平成5年4月1日～	(客員、名古屋大学工学部)
	佐野 史道	平成5年9月1日～	
助教授	大引 得弘	昭和51年5月10日～昭和56年3月31日	教授昇任
	森本 茂行	昭和51年5月10日～平成元年3月15日	教授昇任
	若谷 誠宏	昭和53年4月1日～昭和60年6月30日	教授昇任
	本島 修	昭和55年5月1日～昭和62年7月15日	教授昇任
	尾田 年充	昭和57年7月1日～昭和58年10月15日	(客員、広島大学工学部)
	浜本 誠	昭和59年4月1日～昭和61年3月31日	(客員、大分大学工学部)
	佐藤 元泰	昭和59年6月1日～平成2年6月7日	核融合科学研究所へ転任
	須藤 滋	昭和59年8月1日～平成4年2月28日	核融合科学研究所へ転任
	佐野 史道	昭和59年8月1日～平成5年8月31日	教授昇任
	伊藤 公孝	昭和60年7月1日～平成元年5月28日	核融合科学研究所へ転任
	武藤 敬	昭和61年1月1日～昭和63年3月31日	名古屋大学へ転任
	赤石 憲也	昭和61年4月5日～昭和63年3月31日	名古屋大学へ転任

第1節 総記

	岡田 龍彦	昭和61年6月1日～昭和63年3月31日	(客員、九州大学工学部)
	野田 信明	昭和62年12月1日～昭和63年3月31日	名古屋大学へ転任
	武藤 敬	昭和63年5月1日～平成元年3月31日	(客員、核融合科学研究所)
	近藤 克己	昭和63年7月1日～	
	三戸 利行	昭和63年8月1日～平成元年5月28日	核融合科学研究所へ転任
	山本 純也	昭和63年10月16日～平成元年5月28日	核融合科学研究所へ転任
	伊藤 公孝	平成元年6月1日～平成元年9月30日	(客員、核融合科学研究所)
	三戸 利行	平成元年6月1日～平成2年9月30日	(客員、核融合科学研究所)
	佐藤 元泰	平成2年6月8日～平成4年3月31日	(客員、核融合科学研究所)
	岡子 秀樹	平成2年8月1日～	
	松岡 啓介	平成2年10月1日～平成4年3月31日	(客員、核融合科学研究所)
	岡村 昇一	平成4年4月10日～	(客員、核融合科学研究所)
	花谷 清亨	平成5年12月1日～	
	水内 亨	平成5年12月1日～	
助手	佐々木 愨彦	昭和51年5月10日～昭和58年12月31日	宮城高等専門学校へ転任
	近藤 克己	昭和51年5月10日～昭和63年6月30日	助教授昇任
	本島 修	昭和51年5月10日～昭和55年4月30日	助教授昇任
	佐藤 元泰	昭和51年10月1日～昭和59年5月31日	助教授昇任
	花谷 清	昭和53年2月1日～平成5年11月30日	助教授昇任
	武藤 敬	昭和53年4月1日～昭和60年12月31日	助教授昇任
	岡子 秀樹	昭和54年3月1日～平成2年7月31日	助教授昇任
	金子 博	昭和54年5月16日～平成元年5月28日	核融合科学研究所へ転任
	別生 栄	昭和55年2月16日～	
	中須賀正彦	昭和55年4月1日～	
	佐野 史道	昭和55年5月1日～昭和59年7月31日	助教授昇任

第33章 ヘリオトロン核融合研究センター

水内 亨	昭和55年5月1日～平成5年11月30日	助教授昇任
須藤 滋	昭和55年5月16日～昭和59年7月31日	助教授昇任
岡田 浩之	昭和59年3月1日～	
竹入 康彦	昭和60年4月1日～昭和63年4月15日	核融合科学研究所 へ転任
野田 信明	昭和61年4月5日～昭和62年11月30日	助教授昇任
中村 祐司	昭和62年4月1日～	
洲鎌 英雄	平成2年1月16日～平成2年6月7日	核融合科学研究所 へ転任
長崎 百伸	平成3年4月1日～	

第4項 技 術 部

ヘリオトロンE装置の運転には、電気、高圧ガス、液化ヘリウム等の安全な取り扱いが必要であるため特殊技術を有する技官がその任に当たっている。現在6名が各装置の運転、点検業務を遂行している。本センターの技官が取得している各種免状、資格を表33-6に示す。

表33-6 技官が取得している各種免状、資格

氏 名	各種免状、資格
井尻 芳行	無線従事者免状
千住 徹	高圧ガス製造保安責任者(乙種機械)、クレーン運転士、玉掛技能者、有機溶剤作業主任者
矢口 啓二	無線従事者免状
小林 策治	高圧ガス製造保安責任者(乙種機械)、クレーン運転士、危険物取扱主任者、玉掛技能者、有機溶剤作業主任者
東使 潔	高圧ガス製造保安責任者(乙種機械)、クレーン運転士、玉掛技能者、無線従事者免状
坂本 欣三	高圧ガス製造保安責任者(乙種機械)、クレーン運転士、玉掛技能者

表33-7 歴代の技官

氏名	在任期間	備考
中須賀正彦	昭和51年5月10日～昭和55年3月31日	助手昇任
大竹 勲	昭和51年5月10日～平成元年3月31日	核融合科学研究所へ転任
井尻 芳行	昭和52年10月1日～	
千住 徹	昭和53年5月1日～	
飯間 理史	昭和53年10月1日～	
川端 直志	昭和55年4月1日～平成元年4月15日	退職
矢口 啓二	昭和55年6月1日～	
馬場 智澄	昭和56年1月1日～平成5年3月31日	核融合科学研究所へ転任
江連 誠	昭和56年4月1日～昭和58年3月31日	退職
小林 策治	昭和59年4月1日～	
小池 寿英	昭和63年4月1日～平成元年2月28日	退職
埜辺 勝	平成元年3月1日～平成2年3月31日	防災研究所へ配置換え
東使 潔	平成2年1月1日～	
坂本 欣三	平成2年4月1日～	

第5項 事務部

本センターには、表33-8の構成で事務部が置かれている。

表33-8 事務部構成

事務長	庶務掛長	会計掛長	会計掛主任	会計掛員
大橋 幸一	鈴木 良平	目鳥 繁行	岡本 健志	由良 耕士

本センターでは、事務補佐および研究活動の補佐として14名の非常勤職員が勤務している。

表33-9 歴代の事務職員

職名	氏名	在任期間	転任先
事務長	岸本 弘三	昭和59年4月1日～昭和61年3月31日	工学部へ配置換え
	北山 正雄	昭和61年4月1日～昭和62年3月31日	理学部へ配置換え
	中村睦太郎	昭和62年4月1日～平成2年3月31日	退職
	船谷 幸司	平成2年4月1日～平成3年3月31日	胸部疾患研究所へ配置換え

第33章 ヘリオトロン核融合研究センター

	宮部 芳郎	平成3年4月1日～平成4年3月31日	大型計算機センターへ配置換え
	大橋 幸一	平成4年4月1日～	
事務掛長	山本 安武	昭和51年5月10日～昭和55年3月31日	国際日本文化研究センターへ配置換え
	山村 信男	昭和55年4月1日～昭和57年3月31日	医学部へ配置換え
庶務掛長	大平 嘉彦	昭和58年4月1日～昭和60年3月31日	庶務部へ配置換え
	吉村 隆	昭和60年4月1日～平成元年3月31日	文学部へ配置換え
	吉井 良之	平成元年4月1日～平成3年9月30日	経済研究所へ配置換え
	本多 信義	平成3年10月1日～平成5年9月30日	防災研究所へ配置換え
	鈴木 良平	平成5年10月1日～	
会計掛長	北山 正雄	昭和57年4月1日～昭和59年3月31日	経理部へ配置換え
	大内 忠	昭和59年4月1日～昭和61年1月31日	経理部へ配置換え
	倉本 信義	昭和61年2月1日～昭和62年5月20日	経理部へ配置換え
	森田 彰彦	昭和62年5月21日～平成元年9月30日	経理部へ配置換え
	森 重夫	平成元年10月1日～平成4年3月31日	医学部附属病院へ配置換え
	山崎 猛司	平成4年4月1日～平成5年3月31日	経理部へ配置換え
	目鳥 繁行	平成5年4月1日～	
会計掛主任	菅原 政和	昭和57年6月16日～昭和60年6月30日	理学部へ配置換え
	西田 善吾	昭和60年7月1日～昭和63年5月31日	胸部疾患研究所へ配置換え
	本遠 義孝	昭和62年6月1日～平成3年3月31日	教養部へ配置換え
	佐藤 良男	昭和63年6月1日～平成4年1月31日	人文科学研究所へ配置換え
	岡本 健志	平成3年4月1日～平成6年3月31日	大阪教育大学へ転任
一般職員	浅田 勉	昭和51年11月1日～昭和58年6月15日	経理部へ配置換え
	木村 治美	昭和51年11月1日～昭和57年6月15日	経理部へ配置換え
	小林 策治	昭和55年4月1日～昭和59年3月31日	技術職員へ配置換え
	大当 徳則	昭和56年4月1日～昭和58年3月31日	法学部へ配置換え
	高畑 孝雄	昭和58年6月16日～昭和62年5月20日	国際日本文化研究センターへ配置換え
	由良 耕士	平成4年2月1日～	

第6項 財 政

本センターが設立された昭和51(1976)年度から平成5(1993)年度までの予算執行額の推移を表33-10に示す。

表33-10 本センターの歳出予算

(単位 千円)

年 度	物 件 費	人 件 費	合 計
昭和51年度	978,193	36,056	1,014,249
昭和52年度	1,266,374	56,478	1,322,852
昭和53年度	1,952,298	73,782	2,026,080
昭和54年度	3,469,212	86,769	3,555,981
昭和55年度	525,173	112,528	637,701
昭和56年度	465,288	131,623	596,911
昭和57年度	1,253,995	142,828	1,396,823
昭和58年度	2,164,494	151,622	2,316,116
昭和59年度	837,349	164,540	1,001,889
昭和60年度	706,226	183,380	889,606
昭和61年度	1,024,380	212,626	1,237,006
昭和62年度	1,328,475	227,479	1,555,954
昭和63年度	1,186,667	201,340	1,388,007
平成元年度	762,985	170,412	933,397
平成2年度	889,583	176,107	1,065,690
平成3年度	769,555	187,090	956,645
平成4年度	838,078	183,688	1,021,766
平成5年度	925,431	174,411	1,099,842

第2節 研究活動

第1項 実験的研究活動

1. はじめに

ヘリカルコイル(外部導体)を有する装置として世界最大のヘリオトロンE装置は4年間の建設期間を経て昭和55(1980)年春に完成し、実験が開始された。装置の規模はヘリオトロンDおよびDM装置における実験結果に基づいて決定され、電子温度にして1 KeV、 $n\tau$ 値にして $10^{18}\sim 10^{19}\text{m}^{-3}\text{sec}$ のプラズマをジュール電流加熱によって作ることを第1の目標にして建設されたが、昭和58(1983)年にはその目標値を達成した。さらにプラズマ諸量を向上させる目的で追加熱の手段として大容量の中性粒子入射加熱(中性粒子ビーム出力4 MW、パルス幅0.2秒)と高周波加熱(ECRH<電子サイクロトロン共鳴加熱>1 MW、ICRF<イオンサイクロトロン共鳴加熱>3 MW)が用意された。ジュール加熱実験終了後は、ECRH加熱(周波数28GHz、53.2GHzおよび106 GHz)を用いてプラズマ生成を行い、追加熱としてNBI(中性粒子入射)加熱およびICRF加熱を行ってプラズマの加熱、閉じ込め実験を行った。

ヘリオトロンE実験開始当時、ヘリカル系のECRH加熱実験やNBI加熱実験はほとんど未開拓の研究分野であったが、結果としてこの時期の実験研究の成果はヘリオトロン型磁場配位の閉じ込めの有効性を世界に先駆けて実証したものとなっている。具体的には、第I期(昭和56~58年)においてECRH加熱により電子温度2500eVを、また低密度ターゲットプラズマに対し約2 MWのNBI加熱によりイオン温度800eVを達成し、また第II期(昭和59~63年)において約4 MWのNBI加熱によってイオン温度1250eVを達

成した。また、ベータ値は約2%に達し圧力分布の調整によりMHD(電磁流体力学的)安定な高ベータ・プラズマの維持が可能であることを実証した。これらの実験の成功は世界の核融合研究に大きな影響を与え、例えば、米国オークリッジ国立研究所のATF(Advanced Toroidal Facility)装置建設への強い推進力になったといっても過言ではない。

2. プラズマ・パラメータ

ヘリオトロンEの追加熱実験で得られたプラズマ・パラメータをまとめると表33-11のようになる。

表33-11 達成された最高プラズマ・パラメータ

プラズマ・パラメータ	最高値	加熱法
密度	$1.8 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$	NBI+pellet
イオン温度	1250 eV	NBI
イオン温度	1600 eV	ICRF
電子温度	2500 eV	ECH
平均ベータ値	2%	NBI

最高密度は、カーボン・コーティングを行った条件で、NBI加熱プラズマにガスパフを加え、さらにペレットを入射することにより得られており、 $n_e = 1.8 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ($T_e \sim 300 \text{eV}$, $B = 1.9 \text{T}$) が約60msの間(フルパワー加熱時間に相当)、ほぼ定常に得られた。特に不純物による放射損失が急上昇することなく、ディスラプションも生じていない。中間密度($n_e = 2.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$)では、NBI加熱によりイオン温度の最高値 $T_{i \text{ chord}}(\theta = 0^\circ) = 1250 \text{eV}$ ($T_{i \text{ cal}} \langle \theta \rangle = 1500 \text{eV}$) が得られている ($B = 1.9 \text{T}$, $T_e \langle \theta \rangle = 500 \sim 700 \text{eV}$)。低密度領域では、ECRH加熱により最高電子温度 $T_e(0) = 2500 \text{eV}$ が $B = 1.9 \text{T}$, $n_e = 0.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ の時、ECE(電子サイクロトロン放射)計測により得られている。また、ICRFの遅波モードで最高温度 $T_{i \text{ chord}}(\theta = 0^\circ) = 1600 \text{eV}$ が $n_e = 0.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, $B = 1.9 \text{T}$ のもとで得られている。前記の n , T 値はすべて無電流プラズマの条件のもとで得られており、ジュール加熱実験により得ら

れているものより高い。ヘリオトロン E 実験のジュール・プラズマの閉じ込め時間はプラズマ電流のドリフト・パラメータに逆比例することが示され、これがその後の追加熱実験での無電流化への強い動機付けとなった。

3. 閉じ込め特性

ヘリオトロン E の ECRH 実験は、電子の閉じ込めがプラズマ電流を減少させることで向上することを実証し、無電流化による閉じ込め向上の指針を与えた。ヘリカル系の閉じ込めで特徴的な衝突領域としては、ヘリカル磁場捕捉粒子のヘリカルミラー往復周波数で規格化された ν^{**} が 10^{-2} 程度まで実験的に調べられている。無電流プラズマを ECRH で生成維持するヘリオトロン E の ECRH 実験を 1 次元輸送コードで解析すると、電子の熱輸送係数は、中心部ではプラトー領域(リップル拡散を含む)の新古典理論値程度であり、周辺領域では異常輸送を示す。W 7-A や W 7-AS の弱シアアの実験では、回転変換が低次の有理数に一致したときには閉じ込めが急に悪化することが認められたが、強い磁気シアアを持つヘリオトロン E ではこのような現象は認められない。

ヘリオトロン E における無電流 ECRH ターゲット・プラズマに対する NBI 加熱実験が本格化するに伴って、基礎的なエネルギー輸送を解明するため、プラズマの主要パラメータの分布計測を基礎とする輸送係数の解析と、多数データの蓄積に基づく閉じ込め比例則の導出が行われた。これらの研究の一部は米国オークリッジ国立研究所との共同研究によって行われたものである。NBI 加熱プラズマの支配的なエネルギー損失過程は電子の異常輸送であって、それは加熱入力の増大で増加し、一方、イオンの熱輸送過程は新古典論値とファクター 3 程度の範囲で一致していることを見出した。導出された閉じ込め比例則は NBI 加熱入力の増大に伴う劣化と、それを相殺する平均電子密度の正の依存性があることが明らかにされた。また周辺部の局所的な電子熱伝導係数はジャイロ・レディースド・ボーム則を示唆するものであった。なお、トカマクプラズマに特有の profile consistency の制限

についてはヘリオトロン E の実験結果では見出されていない。

一方、ICRF はヘリオトロン E において 2 MW レベルまでの実験において、イオン加熱、電子加熱、高エネルギーイオンの生成などにおいて予備の結果を得ている。また、ECRH プラズマをターゲットとして ICRF での単独プラズマ加熱に成功し、RF(高周波)加熱の可能性をさらに上げた。他の波動加熱としては、アルフベン波加熱がヘリオトロン D で試みられたが、ジュール加熱プラズマへの追加加熱であり、無電流プラズマの生成の可能性を調べるための実験ではなかった。

ヘリオトロン E の異常熱輸送の解明は依然として現在も大きな問題として残されているが、この時期、NBI プラズマの放射損失・粒子サイクリングなどの評価を目的としてカーボン・コーティング実験、カーボントイル実験を行い、高ベータ・プラズマ生成時におけるプラズマ・壁相互作用の制御の重要性を検証した。また高速イオンの減速過程については古典論と矛盾のないことを見出され、ヘリカル共鳴に対応する高速イオンの軌道損失も実験的に検証されている。また、ICRF 加熱によりイオンエネルギースペクトルに 100keV 程度までのテールが生成されていることが確認されヘリオトロン磁場の高速イオンに対する閉じ込めの有効性が示された。理論研究では、径電場を含む新古典輸送理論の確立に努力が払われたが、ヘリオトロン E でも不純物のポロイダル回転の計測により、電場が評価され、NBI プラズマでは負の電位、ECRH プラズマでは正の電位となっていることが示された。イオンルート、電子ルートによる追加加熱のシナリオと閉じ込め改善に関連して、今後の研究の進展が期待される。

4. 不純物挙動と定常化

不純物挙動は高密度プラズマの定常維持の観点から極めて重要である。低密度 ECRH プラズマでは不純物イオンは中心に累積せず、したがって不純物イオンによる放射損失が小さく問題にならない。NBI 加熱実験では、不純物イオンが中心に蓄積し、特に高密度 ($n_e > 5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$) プラズマでは不純

物イオンによる放射損失が大きくなり、パワーバランスに占める割合が大きく温度上昇の障害となる。ベータ限界の近傍での閉じ込めも研究された。急峻な圧力分布で巨視的不安定性が起こると内部ディスラプションが生じる。その時でも、閉じ込め時間はあまり変わらないとされているが、不純物が蓄積する。不純物の主成分は酸素および鉄と同定された。不純物入射により、不純物の拡散係数と内向きの対流的速度が求められ、周辺電界強度および密度依存性などが示された。ヘリオトロン E では中密度のプラズマではガスパフ制御により定常維持を可能としたが、高密度ではやはり定常維持が困難であった。これを克服するため、ヘリオトロン E では真空容器内壁にカーボンコーティングを行い、鉄など金属不純物を大幅に減少(<0.1)させることができ、高密度 NBI 加熱プラズマでも定常維持することができるようになった。これは将来の定常運転やパラメータの改善に展望を与えることになった。

また、ヘリオトロン E では、カーボンコーティングを行わない条件下で NBI パルス中に ECRH パルスを印加することにより、不純物の蓄積が制御されることも見出されている。

5. MHD 特性

実験的な MHD 挙動については、ガスパフを切って圧力分布を急峻にすると、 $\beta(0) > 1\%$ の領域で緩和振動が観測されている。これは圧力駆動型不安定性の実験的検証として注目に値する。また、ベータ値に対する磁気軸のシフトの依存性が理論的予測(シャフラノフ・シフト)に合致することが確認された。MHD の理論的研究は、3次元 MHD コードの発達により、平衡と理想 MHD 線形不安定性に関しては、実験と対応づけることができるレベルに到達していて、将来の予測が可能になりつつある。MHD 不安定性の非線形発展は、トカマクと同種の簡約化 MHD 方程式系によって、モデル計算が可能になっていて、前述のヘリオトロン E の圧力駆動型不安定性による緩和振動の解析が試みられている。現在の最高ベータ値はヘリオトロ

ン磁場配位による限界ではなく、加熱入力を増し、圧力分布を平坦化することで $\beta(0) \sim 7\%$ 、平均 $\beta \sim 5\%$ に達することを予測している理論もある。電流不安定性を原因とするディスラプションは今のところ当然ながら見られていない。

ヘリオトロンEにおいては、長波長圧力駆動MHDモードの不安定性の発展が $l/2\pi=1$ の磁気面とその内部の閉じ込めを急激に劣化させる内部ディスラプションが確認されている。このしきい値は線形MHD不安定性の境界であると理解され、その反復周期や失うエネルギーの量が評価されている。1回のディスラプションで失われるエネルギーは総量の10%程度であり、エネルギー閉じ込め時間を直接支配するものではないように見えるが、カーボンコーティングを行っていない条件では不純物の急激な上昇を呼んでいる。この不安定性はガスパフにより圧力分布を平坦化することにより、ある場合には実験的に制御できている。

6. 閉じ込め改善の研究の進展

前記に述べたヘリオトロンEの実験成果がジュール電流を流さない「無電流プラズマ」で達成されたことは画期的な出来事であった。というのは、トカマク方式の困難の多くが、ジュール加熱電流に起因しているからである。もし、ジュール電流を流さずに高温プラズマを閉じ込めることができれば、炉の構成は非常に簡単になり、経済性が確実に増大するからである。現在得られているプラズマ・パラメータではトカマクがよい成果をあげているが、プラズマ半径が倍以上大きいことや、投入された資金や人材が多であることを考えると、ヘリオトロンの成果は注目される。そしてヘリオトロンE装置の実績を基に、現在核融合炉の前段階である次期LHD(大型ヘリカル装置)の建設計画が文部省核融合科学研究所で進められている。本センターはこの計画の中心となって設計研究に参画し、実験計画のプロジェクト研究を進めている。

一方、LHD計画の支援研究として、ヘリオトロンEの閉じ込め改善研究

が鋭意進められてきた。具体的には、ヘリオトロン E での標準配位に対して得られた閉じ込め比例則を改善する方策を見出すため①磁気軸シフトによるヘリカル対称性の回復、②補助トロイダル磁場印加による磁気面形状変化および磁気井戸効果、③リミッター挿入を用いた周辺電位制御による粒子閉じ込め改善の実験研究を行い、次の結果を得た。

(1) ヘリオトロン E 装置において垂直磁場コイルとトロイダル磁場コイルの組み合わせを用いて、粒子軌道損失と MHD 不安定性を制御して、プラズマのエネルギー閉じ込め時間が標準磁場配位に比べて50%改善されることを実験的に示した。

(2) ヘリオトロン E の中心ベータ値1%以下の NBI プラズマの圧力勾配駆動型 MHD 不安定が、磁気軸の内側シフト(~ 2 cm)とヘリカル磁場の3~8%程度のトロイダル磁場印加によって、安定化できることを実験的に検証した。

(3) 結果として、ヘリオトロン E 装置における最適磁場配位制御の実験結果は、 $\alpha^* = 0.05$ 、および $\beta^* = -0.192$ 、($\alpha^* = B_t/B_h$ 、 $\beta^* = B_v/B_h$ 、ここで B_h は磁気軸上のヘリカル磁場、 B_t は、補助トロイダル磁場、 B_v は垂直磁場の強度である)の運転パラメータが最良の閉じ込め性能を示すことを明らかにした。この磁場配位は、リミッターを用いないダイバータ配位において、MHD 安定性の改善ばかりでなく、エネルギー輸送の改善を示すことを明らかにしたが、この磁場配位の特徴は、ドリフト軌道最適化と同時に、トロイダル磁場印加によって $l/2\pi = 1$ の有理面を強い磁気シア領域のプラズマ周辺部へ移動し、かつ中心領域に浅い磁気井戸を形成させている点にある。

(4) 電子サイクロトロン共鳴加熱によって生成したプラズマに対して、炭素リミッターの挿入、磁気軸の移動、摂動磁場の印加等を変化させ、閉じ込めの最適条件を明らかにした。

(5) リミッターを用いた磁場配位制御の実験では、リミッターによるプラズマ半径の縮小の際にも、閉じ込め改善におけるドリフト軌道最適化の重要

性が実験的に再認識された。これは、また大域的な閉じ込めの a^2 則以外に、閉じ込め改善にとって、磁気シアー効果よりも、ドリフト軌道最適化の効果の方が重要であることを意味する。

(6) 密度分布制御と加熱分布制御は、ヘリオトロンE装置における閉じ込め改善の有力な実験手段を提供した。

① ペレットを用いた密度分布の急峻化は、NBIプラズマの中程度の電子密度領域において、ガスパフのみのプラズマ生成と比較して、20~30%程度エネルギー閉じ込めが改善されることが観測された。

② 106GHzの高度収束ビームによる第2高調波Xモード入射加熱ECRH実験において、粒子損失束が著しく減少した条件(「detached状態」と呼ばれる)で、しかも電子温度がピーキングしている高温プラズマを生成し得た。

(7) 炭素リミッターを用いてプラズマ径を小さくして放電管壁とプラズマとの間隔を広げ金属不純物が周辺で電離し遮蔽効果が増加することを実験的に確かめた。

(8) リミッター・NBIプラズマでの負バイアス電圧印加実験において、粒子閉じ込め時間の改善が認められた。ECRHプラズマに対しては、負バイアス電圧印加はプラズマ周辺の密度揺動の減少をもたらし、かつ、106GHzECHプラズマの「detached」状態の時間を長期化するのに効果があることが分かった。

(9) ヘリオトロン磁場固有のダイバータ配位と炭素リミタ挿入によるリミタ配位におけるスクレイプオフプラズマを比較し、プラズマ・壁相互作用の影響を明確化し、その制御の重要性を示すとともに、磁気面内に局所的な高エネルギー流束が存在する可能性があることを初めて実験的に明らかにした。

これらの研究は世界的にも大きな関心を呼び、米国オークリッジ国立研究所や独国マックス・プランク研究所等と、終始活発な討論および情報の交換を進めてきた。

最近のトピックスとしては、米国オークリッジ国立研究所の ATF グループからの35GHz ジャイロトロンを用いたヘリオトロン E でのプラズマ実験が公式の日米共同研究の枠組みで実行され、新たに35GHz ジャイロトロンを用いることにより、 $B=1.2\text{T}$ および $B=0.6\text{T}$ においての新しい領域でのエネルギー閉じ込めのデータが得られたこと、およびプラズマ・壁相互作用を改善するための新しい技術であるボロンコーティングをヘリオトロン E の放電管壁に適用し、低衝突領域での輸送改善実験に大きく寄与したこと等が挙げられる。

現在、CXRS(荷電交換再結合放射分光)計測による詳細なイオン温度分布計測が実現し、TVTS(テレビトムソン散乱)計測による詳細な電子温度分布計測も可能となりつつあるので、より充実した閉じ込め解析が期待されると同時に、106GHz ジャイロトロンの追加導入によって、より高密度・高温領域での閉じ込め特性の解明が見込まれ、この方面の研究の進展が期待されている。

また、閉じ込めにおける周辺のエルゴディック層の役割について、真空磁気面のマッピングの観点から、実験研究が進行中である。低次の磁気島の影響に関する実験的研究がこの数年間行われてきたが、今後、磁気面がプラズマ周辺でエルゴディックになるより高次のモードの影響を調べる必要がある。リミッター挿入によるのと同時に、補助的な磁場を変化させることによるエルゴディック層の生成とその補正をプラズマ実験を通して研究することにより、周辺プラズマ・パラメータおよびプラズマの中心の閉じ込めに関するエルゴディック層の役割が深く理解されるだろう。

プラズマの輸送解析については、局所的な HNBP(重中性粒子ビームプローブ)計測が、プラズマ電位とその揺動の研究のために進行中である。プラズマ電位はヘリオトロン E の輸送過程を理解するために重要であり、揺動計測もまた、プラズマ周辺領域において、揺動により誘起されるエネルギー束と全エネルギー束を定量的に比較する上で不可欠であるのは言うまでもない。高エネルギー捕捉粒子のリップル損失の評価は、ヘリカル系燃焼プラズ

マのアルファ粒子挙動を予測するのと同様、ヘリオトロンEプラズマの閉じ込め性能を最適化する上で最重要課題である。リップル損失は真空容器壁への熱負荷の計測により実験的に評価することが可能であるが、計測される熱負荷の分布は、軌道追跡モンテカルロ・コード HELIOS による計算結果と比較されなければならない。

また、プラズマ・壁相互作用の観点から、リチウムベレット入射実験が計画中である。固体リチウムは固体重水素に比べてより大きな昇華エネルギーを持つため、同一の電子密度に対してはリチウムベレットは重水素ベレットよりも深くプラズマ中に浸透し得ると予想される。したがって、燃料供給、分布変形、粒子およびエネルギー輸送、閉じ込めの密度急峻度や加熱パワー分布への依存性の研究のためにリチウムベレットを効果的に用いることができる。さらに、炭素や酸素、また低温の中性水素の粒子源となり得る真空容器壁面をゲッターリングするという効果も大いに期待できる。

プラズマ実験と並行して、プラズマ加熱およびプラズマ計測に関わる新技術の開発も重要である。現在、TVTS 計測およびマルチチャンネル ECE 計測が既に稼働に入っている。これ以外に本センターで成果をあげた新技術として下記のものが挙げられる。

(1) 2ステージ・ガスガン方式により固体水素ベレットを加速し、ベアー・ベレットとしては世界最高の 3.2km/s を達成した。これは、大口径高速高圧弁の開発に成功したことと、ピストンの最適化が進展したこと等による。

(2) 光電子離脱法により、京大型バケット・負イオン源のプラズマ中の負イオン密度 $n^-(\text{H}^-/\text{D}^-)$ の定量測定が可能となった。現在水素プラズマで $n^-/n_e < 1$, $n^- < 10^{11}\text{cm}^{-3}$ が得られ、引き出しイオン電流密度 ($\text{H}^0 + \text{H}^-$)、 $j_- = 22\text{mA/cm}^2$ を達成した。

わが国は経済大国として国際的責任を果たしていないといわれて久しい。核融合という人類共通の財産になるプロジェクトを国際的な規模で主導していくことは、そうした批判に対する1つの回答でもある。ヘリオトロンはま

さに日本の生んだアイデアと技術であり、ヘリオトロンE実験での共同研究という形での国際協力を通して、多くの貢献が可能であると考えている。

第2項 理論的研究活動

京都大学における核融合研究の中心となって世界的に評価される成果をあげ、現在も発展しつつあるのはヘリオトロン方式核融合である。その最大の特徴は、京都大学の研究者が独自の発想に基づき試行錯誤を重ねながらヘリオトロン方式を確立してきたことにある。

ヘリカルヘリオトロン磁場は、トーラスを2周して元に戻る1本のヘリカルコイルが作る真空磁場が基本になっている。しかし、磁場構造自体が3次元構造を有しているために理論解析は容易ではなかった。そのために、ヘリオトロンD装置は、真空磁場の特性からプラズマ閉じ込めに対する性能を予測しただけで、その優れた点は実験データで実証する方向で研究が始められた。昭和47(1972)年から次々に予想どおりのあるいは予想以上の研究成果が発表され、国内だけでなく国際会議を通して多くの研究者の注目を集めるようになった。また、この頃から京都大学における大型計算機センターの電子計算機の実環境が整備され、演算速度と記憶容量がプラズマ閉じ込めの理論計算に活用できるレベルになり、定量的な研究が可能となってきた。

電子計算機による大規模数値計算あるいは数値シミュレーションが可能になったことは、ヘリオトロン磁場特性の理論解析が飛躍的に進展する契機になった。特に、ヘリオトロンDの良好な実験結果を説明できるような理論の研究が始められた。しかし、当時の大型計算機センターの電子計算機の性能は、今日の普通のパーソナルコンピューターが有する性能とほとんど変わらないレベルであり、現実のヘリオトロン磁場を正確に考慮した理論解析は無理であった。そのため、計算が容易なモデル磁場を用いたプラズマ閉じ込めの理論研究が中心であった。モデル磁場を用いると現実のヘリオトロン磁場を正確に再現することはできないが、その見通しのよきのためにプラズマ

閉じ込めを支配する特性の解明には有効であった。MHD 不安定性とベータ限界値など MHD 特性は理論解析が皆無であったが、ヘリオトロン方式の核融合を推進するためには、理論解析は重視すべきであると考え、昭和53(1978)年には理論グループをスタートさせた。最初に取り組んだ研究課題は、有限ベータの MHD 平衡計算と MHD 不安定性によるベータ限界値の確定であった。また、ヘリオトロン磁場における高速イオンの閉じ込め研究もほぼ同時に研究を始めている。前者の研究により、ヘリオトロン磁場は、MHD 平衡に対しては問題がないが、MHD 不安定性を完全に抑制するのは困難であり、プラズマの圧力分布を十分に制御できなければベータ限界値はそれほど高くないことが判明してきた。定量的にベータ限界値を確定するには正確なヘリオトロン E 装置の磁場を考慮する必要がある、また、スーパーコンピュータが京都大学で使用できるようになるまで(昭和59<1984>年)待たなければならなかったが、最初に理論的に得られた平均ベータ値が1~2%付近に限界値があるという結果を大きくは変えなかった。

高速イオンの閉じ込めは、中性粒子入射加熱やイオンサイクロトロン加熱のために不可欠であると同時に、将来の核融合炉における核反応生成イオンの閉じ込めにも直接関係する重要なテーマである。ヘリオトロン E 磁場における高速イオンの閉じ込めは良好であり、垂直方向から中性粒子入射を行ってもかなりの加熱効率が得られることが示された。ヘリオトロン磁場におけるプラズマ閉じ込めの理論研究の結果明らかになったことは、高速イオンの閉じ込めがよく、同時にベータ限界値も高い磁場配位を得ることは容易ではなく、現在でも根本的な解決は得られていない。ヘリオトロン E 装置は高速イオン閉じ込め重視型であるが、その後建設された ATF 装置(米国オークリッジ国立研究所)や CHS 装置(文部省核融合科学研究所)はベータ限界重視型であり、現在建設中の大型装置である LHD 装置(文部省核融合科学研究所)は高速イオンの良好な閉じ込めと高いベータ限界値を両立させることを目指している。

ヘリオトロン磁場に閉じ込められたプラズマの物性研究は、理論と実験の

比較を中心に、精密化が進展した。昭和62(1987)年から昭和63(1988)年にかけては、大型ヘリカル装置の設計のための理論計算に多くの時間を費やし、LHD装置のパラメータ決定に寄与してきた。LHD装置の建設決定後も、プラズマ・パラメータの定量的な予測を目指して文部省核融合科学研究所の理論データ解析系と共同研究を進めている。昭和63(1988)年から、ヘリオトロンE装置の研究が輸送現象と閉じ込め改善モードの探索に移っているのに合わせ、理論研究のテーマも乱流輸送に重点を移しつつある。同時に、新古典輸送の精密な計算も進めている。閉じ込め改善では、径電場とシア一流によるプラズマ乱流の抑制を目指した研究が中心である。トカマクプラズマでは、L/H遷移によるHモードプラズマが注目を集め、CHS装置などでも類似のL/H遷移が観測され始めている。ヘリオトロンEプラズマでは、現段階では、トカマクプラズマにおけるような明確なL/H遷移が見出されていない。ヘリオトロンEプラズマの閉じ込め改善研究は、LHD装置におけるプラズマ閉じ込めに寄与するだけでなく、トカマクプラズマも含めてトロイダルプラズマの物理に寄与する面も多く、重要な研究テーマとして今後も取り組む予定である。理論的研究としては、ヘリオトロン磁場とは異なる原理の無電流プラズマ閉じ込めのための磁場の探索も重要と考え推進しつつある。

第3項 研究設備

本センターの主な研究設備は、図33-2に示すように主半径2.2m、ポロイダル断面が小半径0.41m×0.21mのレーストラック型をしたヘリオトロンE装置本体を中心にして、ヘリカルコイルに大電流を供給する発電設備、プラズマ発生加熱装置、プラズマ計測装置、データ解析用計算機システム、理論計算用計算機システムから構成されている。

これらの設備は、昭和51(1976)年度から製作が開始され、昭和54(1979)年度末に完成された。当時世界的にもこの装置に匹敵するものはなくプラズマ

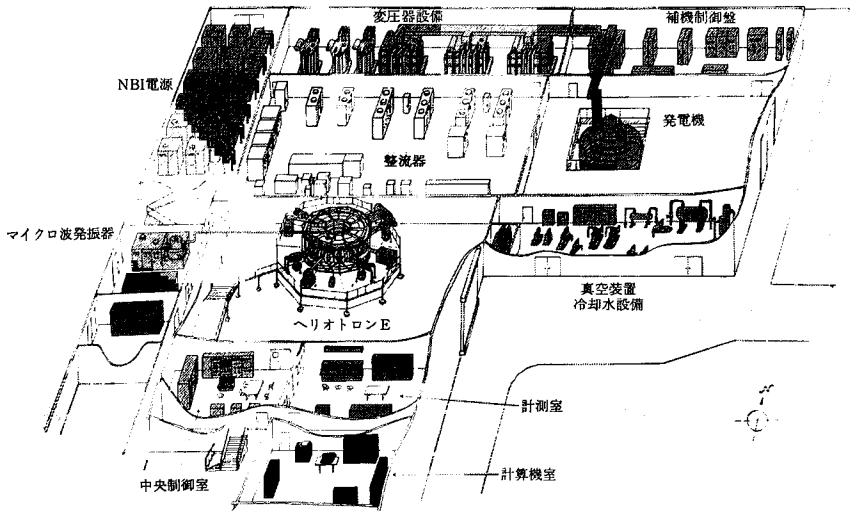


図33-2 ヘリオトロンE装置とその周辺機器

を閉じ込める真空容器の製作、ヘリカルコイルの製作巻きつけにおける精度管理には数多くのR&D(調査と試作)を行い、当初の目標仕様に合格する製作方法を確立した。この経験は、その後のわが国におけるヘリカル型装置建設(文部省核融合科学研究所CHS、LHD装置)のための貴重な財産となった。

本センターでは、このヘリオトロンE装置を用い、各年度ごとの予算を有効に活用してプラズマ加熱装置の増強、プラズマ計測装置の精密化を図りヘリオトロン磁場に閉じ込められた高温プラズマの理解を深めるよう核融合の基礎からプラズマ物理まで幅広く研究している。

本研究センターの主な設備概要は次のとおりである。

1. ヘリオトロンE装置

ヘリオトロン磁場による核融合プラズマ閉じ込めを研究するための基幹設備であり、プラズマを閉じ込めるための磁場と真空空間を提供するものである。

第33章 ヘリオトロン核融合研究センター

本設備は、①プラズマを生成・維持する良質な真空空間をつくる放電管、真空排気装置、放電管加熱冷却装置、②ヘリオトロン磁場をつくる主コイル（ヘリカル磁場コイル、バーチカルコイル）、磁場配位を制御するために用いられる補助磁場コイル、補正用バーチカルコイル、磁気島補正用コイル、プラズマ中に電流を流すために使われた空心コイル、③ヘリオトロンE装置本体の磁場コイルを励磁したり、プラズマ加熱装置へ電力を供給する電源、④ヘリオトロンE装置の磁場コイルや真空排気装置および電源装置等で発生する熱を水冷し、適切な動作温度を維持するための冷却水設備、から構成されている。

主な仕様を次に示す。

放電管	大半径	2.2m
	小半径	0.41m、0.21m(非円形断面)
	材質	高耐カステンレス鋼(YUS-170)
	到達真空度	2×10^{-8} torr 以下
	ベーキング温度	110°C
ヘリカル磁場コイル	大半径	2.2m
	小半径	0.293m
	ヘリカル巻数	19
	材質	無酸素銅
	最大磁場	2T
	最大電流	129kA
	通電時間	1.3秒
電動発電機	形式	縦軸回転磁界全閉内冷形3相交流発電機
	出力	330MVA
	電圧	18kV

	電	流	10585A
	回	転	速
	度		650~500rpm
循環式冷却水設備	送	水	量
			658m ³ /h
	冷	却	水
	槽		150m ³
純水冷却水装置	送	水	量
			45m ³ /h
	冷	却	水
	槽		50m ³

2. プラズマ加熱装置

a 電子サイクロトロン共鳴加熱装置

電子サイクロトロン共鳴の原理を用いてプラズマ生成、電子加熱を行う装置でヘリカル系装置では無電流プラズマを生成する最も基本的な装置である。

本設備は、①大電力高周波を発生する高周波発振管、②高周波発振管を動作させるための電源および制御系、③高周波電力を効率よく伝送する高周波伝送システム、④伝送された高周波電力をプラズマ中に入射する高周波放射アンテナ、から構成されている。

主な仕様を次に示す。

高周波発振管	周波数および出力	28GHz	200kW×1
		53GHz	200kW×4
		106GHz	400kW×1、 140kW×1
高圧電源	ビーム電圧	-80kV	
	ビーム電流	40A	
	パルス幅	200ms	

b 中性粒子ビーム入射加熱装置

中性の高エネルギー粒子をプラズマ中に入射し、プラズマ粒子による電離をされた後、クーロン衝突を通じてエネルギーを電子・イオンに伝達し加熱する装置である。

第33章 ヘリオトロン核融合研究センター

本設備は、①ビーム拡がり角が小さくプロトン比の高いイオン源、②イオン源を動作させるための電源および制御系、③イオン源で生成・加速された高エネルギーイオンを磁場に妨げられることなくプラズマ中に入射できる中性粒子に変換するための中性化システムと液体ヘリウム冷却のクライオポンプを用いた差動排気系、から構成されている。

主な仕様を次に示す。

イオン源	加速電圧	30kV
	加速電流	50A
	最小拡がり角	1.2°
	プロトン比	90%
	パルス幅	200ms
中性化システム	中性化効率	65%
差動排気系	排気量	100,000~500,000 l/sec

c ICRF 高周波加熱装置

イオンサイクロトロン共鳴周波数領域の高周波をプラズマ中に入射してイオン電子を加熱する装置である。

本設備は、①HF・VHF帯領域の高周波発振器、②電源および制御系、③整合回路、④アンテナ、から構成されている。

主な仕様を次に示す。

高周波発振器	発振周波数	17.8MHz、26.7MHz、53.4MHz
	発振出力	3 MW
電源	電圧	24kV
	電流	275A
整合回路	構成	真空バリコン 2スタブ(モーター駆動可能)
アンテナ	形状	ループ、最外殻磁気面に沿う形状

3. プラズマ計測・データ処理システム

プラズマ計測システムは多くの設備によって構成されているが、ここでは最近整備されたトムソン散乱測定システムの紹介をする。

a トムソン散乱測定システム

ヘリオトロンE装置に閉じ込められたプラズマの輸送解析を行う上で最も重要な電子温度および電子密度の空間分布をルビーレーザー光のトムソン散乱によって測定するシステムである。

本装置は、①高出力ルビーレーザー、②入射・散乱光学系、③分光器、④2次元検出器、⑤制御・データ処理装置、から構成されている。

主な仕様を以下に示す。

高出力ルビーレーザー

波 長	694.3nm
出 力	10J
パルス幅	30~50nsec
ビーム発散角	1 mrad

入射・散乱光学系

測定領域でのレーザービーム径	3 mm
大半径方向	9点に入射光軸設定可能

分光器

分 散	3.2nm/mm
-----	----------

2次元検出器

構 成	フレーミングカメラ+CCDカメラ
画像素数	1000×1000(2分割して使用)
露光時間	200nsec
分解能	0.1mm/ch(空間方向)0.2nm/ch(波長方向)

制御・データ処理装置

画像データ	12bit
-------	-------

第33章 ヘリオトロン核融合研究センター

1 ショット当たりのデータ量 6 MB

データ保管 光ディスク

b データ処理システム

ヘリオトロンE装置を用いて行われるプラズマ実験で得られる各種実験データの収集、処理、解析、保管を行う計算機システムである。

本システムは、①CAMAC規格のアナログ・デジタル変換器等データ入力機器、②ワークステーション、③光磁気ディスク、④高速プリンター、⑤専用データ処理ソフトウェア、から構成されている。

主な仕様を以下に示す。

データチャンネル数	約300チャンネル
サーバー型ワークステーション	2台
ワークステーション	7台
X 端末	5台
ネットワークプリンター	1台
高速プリンター	1台
専用データ処理ソフトウェア	1式

c その他の主な測定設備

(測定量)	(設備)
電子密度	遠赤外レーザー干渉計、プローブ
電子温度	電子サイクロトロン放射計
イオン温度	可視分光器、中性粒子エネルギー分析器
不純物	真空紫外分光器
放射損失	ボロメータ
揺らぎ	軟X線検出器、炭酸ガスレーザー散乱