大学における次期大型ヘリカル装置計画

(名古屋大学核融合研究所) 藤原正巳,

(京都大学ヘリオトロロン核融合研究センター) 飯吉厚夫

核融合研究は3大トカマク(JT-60, JET, TFTR)の実験が進み、臨界条件に近いプラズマが得られるようになった。次世代トカマクは世界各国それぞれの計画や、ITERのような国際協力による核燃焼目的の研究計画が検討されている。このような時期に我が国の大学の核融合研究の次期計画として、トカマクとは異なる方式の大型ヘリカル装置による研究が大学連合の設計グループで検討されている。それに至る経緯や計画の意義・目的、装置設計等について設計グループで検討されてきた内容の概略を紹介する。

1. 大学の次期大型核融合計画検討の経緯

大学における核融合研究は、学術審議会のなかに設けられている核融合部会において時期に応じて研究進展のレビューと、それに基づく長期的推進方策が審議され、その答申に対応して進められてきている。最も新しいものは昭和59年に核融合部会が依頼した専門家によるワーキンググループの作業から始まった。このワーキンググループは核融合研究の分野を4つの大きなカテゴリー、すなわち

- (1) トカマク, RFP等の内部電流系
- (2) ヘリカル系等の外部導体系
- (3) ミラー等の開放端系
- (4) レーザー, 粒子ビーム等の慣性核融合系

に分けて、各々の現状分析, 重点課題, 今後の推進方策等を検討した。さらにこの検討結果を基にして、次期大型計画の必要性, その方式等について討議がなされ、大学の次期大型核融合計画としてはヘリカル系装置による研究を行うこととして答申がまとめられた。

この結果は、学術審議会の審議を経て昭和61年2月に「大学における今後の核融合研究について」という報告書としてまとめられた。要約は以下の通りである。

- (1) 大学における次期大型計画は外部導体系大型ヘリカル装置による研究とし、全国の研究者の英知を集めて推進する。
- (2) 新大型計画の推進母体として、岐阜県土岐市に新たに国立大学共同利用機関を設立することが望ましい。
- (3) その他の研究分野については既存装置の活用(改造増力を含む)等により引き続き推進する。同報告書を受けて、文部省はその具体化方策を検討

するため昭和61年度に「核融合研究を推進するための調査協力者会議」(主査: 早川幸男 現名古屋大学学長, 関連機関の長, 学識経験者等15名)を組織し、その下に「次期大型ヘリカル装置設計部会」(主査: 飯吉京都大学ヘリオトロロン核融合研究センター長)を設置し、大型ヘリカル装置の検討を始めた。設計部会は昭和61年度に計画の基本構想を検討し、昭和62年3月、報告書「次期大型ヘリカル装置計画の基本構想」⁽¹⁾を提出した。

これを受けて、協力者会議は基本構想についての評価部会(主査: 西川恭治 広島大学核融合理論センター長)を設け、評価・検討を行うとともに、併せて計画を推進させる新国立共同利用機関の組織についても「組織検討部会」(主査: 三好昭一 筑波大学開放端系核融合研究センター長)を設け検討を進めた。協力者会議は「基本構想」について大筋で了承し、設計部会は昭和62年度に基本構想をもとに研究実施計画および装置本体, 加熱, 計測機器の概略の設計を行なった。報告書は近く出版される予定である⁽²⁾。

大型計画としてヘリカル系環状磁場装置が選択された理由については、以下のように考えられる。

大学における次期大型計画は、予想される予算の規模から考えて、前記4つの方式の中から勇断をもって1つに絞らなければいけない段階である。その際の選択基準としては、①これまでの研究データベースが十分に活用できる、②10年先を見て十分に斬新である、③多くの研究者が結集できる、等が重要である。

これらの観点から、まず環状磁場閉じ込め方式、すなわち内部電流系とヘリカル系が選ばれた。次に、
University Program of Large Helical Device Experiment: Masami FUJIWARA, Atsuo IIYOSHI.
 (1988年4月19日 受理)

リカル系が選ばれた主な理由は、トカマクがすでに3大トカマクを中心に世界で広範囲に研究されていて、10年先にインパクトを与え得る計画とすることが難しい。これに対して、ヘリカル系は我が国のヘリオトロネに代表される独自の発展の歴史を有していること、今後さらに研究を進めることによって世界をリードできること、さらに無電流プラズマの定常実証を行うことでトカマクと相補的かつ独創的な研究が期待されること、等が評価されたと考えられる。

II. ヘリカル系トーラスプラズマの閉じ込め研究

核融合炉開発の研究は、核融合反応を起こさせる燃料によって必要とされるプラズマのパラメータ、すなわち密度、温度等が異なるが、比較的温度が低くて達成できる D-T 反応を用いた炉の場合でも超高密度 ($n \geq 10^{23}/\text{cc}$, Cryo or Pycno Nuclear Fusion) 以外の場合は、温度 $T > 10 \text{ keV}$ (1億℃以上)、密度 $n \geq 10^{14}/\text{cc}$ 、閉じ込め時間 $\tau_E \geq 1 \text{ s}$ が必要となる。

この条件を満たすべく核融合プラズマの閉じ込めの研究は行われてきた。大きく分けて2つの方向がある。1つはプラズマを構成する粒子であるイオン、電子がローレンツ力により磁力線に巻きつく運動をし、磁場を横切って逃げないことを利用した磁場閉じ込めであり、2番目はレーザー光あるいは高エネルギー粒子ビームをエネルギードライバとして燃料ターゲットに照射し、プラズマが膨張し始めるまでの短い時間に反応を起こさせてしまう慣性閉じ込め方式である。

磁場閉じ込め方式も種々あるが、得られているパラメータが比較的良好なトーラス方式について述べる。プラズマ粒子は磁場を横切って逃げないが、磁力線に沿って自由に運動するので空間的に閉じた磁力線を有する磁場配位を構成し、プラズマを閉じ込めることが必要になる。このような磁場構造はドーナツ状に閉じた磁場(トロイダル磁場)によって可能であるが、アンペールの法則でトーラス内側が強く外側が弱い不均一磁場になり、荷電粒子のドリフト運動が生じ、単純なトロイダル磁場だけではプラズマ粒子を閉じ込めることはできない。

第1図のように、 ϕ 方向のトロイダル磁場に θ 方向のポロイダル磁場を重畳させることで、初めてプラズマ粒子を閉じ込める空間的に閉じた磁場ができる。ポロイダル磁場を生成する方法としてトーラス方向のプラズマ電流による方式がトカマクであり、外部に螺旋型コイル(ヘリカルコイル)を用いるのがヘリカル系ト

主軸A, 小半径軸(磁気軸)O

第1図 トーラス座標

ーラスである。トカマクはプラズマ粒子間の衝突による抵抗、運動量の減衰、すなわち電流の減衰を補う手段(電流駆動)が定常運転のために必要であるが、ヘリカルコイル系はこの必要性がなく原理的に定常運転可能な磁場構造であるといえる。

外部磁場コイルのみによりトロイダル状の閉磁気面を形成し、プラズマ閉じ込めを達成しようという開発研究は核融合研究の当初から行われてきた。しかし、トカマクがプラズマ電流によって閉じ込め磁場を形成すると同時に、その電流によって数100kWというジュール加熱を比較的容易に行えるという利点のために早い進展を見たことに比べ、ヘリカル系はプラズマ生成・加熱のために大電力加熱用のECH(電子サイクロトロン共鳴加熱)源等の開発を待たねばならず、最近になってようやく $\sim \text{keV}$, $10^{13} \sim 10^{14}/\text{cc}$ の領域のプラズマパラメータを得るようになった。第2図に、種々の核融合開発研究で得られた結果を示す⁽³⁾。この図が核融合研究の進展の度合を示す代表図であり、この図の理解、以後の理解の助けとなる意味で nT の意味を簡単に述べる。

例えば、核融合炉の自己点火条件はプラズマのエネルギー損失 W_P/τ_E (ここで、 W_P はプラズマのエネルギー)と、核融合反応で生じる α 粒子による自己加熱入力 P_α とが釣り合う条件で決まる。

$$W_P/\tau_E = f P_\alpha$$

ここで、 f : α 粒子の直接損失、輻射損失その他の機構によるエネルギー損失を考慮した因子

α 粒子加熱入力 $3 \text{ keV} < T_i < 30 \text{ keV}$ のイオン温度範囲で

な特質を有するヘリカル系トーラスがプラズマ閉じ込めから見て核融合炉として可能性を有するかどうかという点で、炉心プラズマに外挿しうるパラメータ領域 ($n=10^3 \sim 10^4/\text{cc}$, $T_i=5 \sim 10 \text{ keV}$) で閉じ込め、磁気流体的特性、限界 β 値等の研究を行う。もちろんヘリカル系トーラス固有の課題、すなわちヘリカル状の磁場の強弱 (ヘリカルリップル) が高温・無衝突プラズマの閉じ込めを劣化させるかも知れないという事柄も当然重要な研究課題である。

- (2) 今まで述べてきたように、外部コイルのみで閉じ込め磁場を形成できることから原理的に定常運転ができること、さらにその中でも次期装置として採用するヘリオトロン/トルサトロン配位は2本の連続螺旋コイルをトロイダルに沿

第3図 (a) 磁場拡散時間とプラズマ稼働時間との関係

って巻いた構造になっており(第6図), それ自身ダイバータ構造を有していることを利用して、高温プラズマの定常維持の研究を行うことができる。

長時間ないしは定常化の研究は核融合炉 (特に磁場閉じ込め方式) にとって重要な、(燃料注入) - (炉心プラズマ制御) - (熱除去・灰の取出し) のサイクルをシミュレートし、その方法を確立するための物理的・技術的課題の究明という意味で極めて重要である。時間的スケールの目安は、長いもので磁場の拡散時間、不純物の蓄積時間、プラズマ-壁相互作用の平衡時間等種々あるが、ここでは1つの例として磁場の拡散時間と運転時間の関係および次期装置での定常実証をするプラズマパラメータ領域を第3図(a), (b)に示す。

(b) 各装置の定常運転におけるプラズマパラメータ

高温、高密度プラズマの定常保持の研究では第4図に示すように、

- ガス供給, ベレット入射加熱(密度制御)
- 加熱(中性粒子ビーム入射等)による高エネルギー粒子のエネルギー緩和(加熱入力制御)
- 高温プラズマ維持(平衡制御)
- プラズマ-真空容器のガスリサイクリング, 不純物輸送
- ダイバータ系の粒子制御, 熱除去

の(a)~(e)までの過程を通じて定常運転のシナリオの確立を図る。しかし、各段階は時間的にシリー

ズになっておらず、相互に複雑に関連しており、図中に示される段階の適切な制御の方式を確立するには十分に長い時間の運転によって初めて可能で、特にダイバータシステムの付置されている本計画によって定常核融合炉のプラズマおよび装置系を含んだ一連の維持制御の物理・技術の開発が期待される。

以上に述べた(1), (2)の項目により、ヘリカル系核融合炉の可能性を調べるための研究、さらには平均無電流プラズマの閉じ込めを通して他の方式、トカマクやRFPの閉じ込めに対する相補的アプローチ、定常保持の研究等により、次期計画はトロイダルプラズマの

第4図 定常プラズマ維持のシナリオ

総合的理解を深めるために多大の寄与ができる。

次期計画の重点研究課題をまとめると、

- (1) 高 $n\tau T$ プラズマを発生し、炉心プラズマに外挿しうる輸送の研究を行う。
- (2) 炉心プラズマに必要な β 値 5% 以上のプラズマを実現し関連する物理を調べる。
- (3) ダイバータ設置、無電流プラズマの長パルス実験を行い、定常運転に必要な基礎資料を得る。
- (4) 高エネルギー粒子の振舞いを研究し、炉心プラズマの粒子のシミュレーション実験を行う。
- (5) トカマクとの相補的研究を行う。

これらの課題を実施するため、目標とするプラズマは、

高 $n\tau T$ 領域 $\bar{T}=3\sim 4\text{ keV}$, $\bar{n}=10^{20}\text{ m}^{-3}$, $B=4\text{ T}$
 $\tau_E=0.1\sim 0.3\text{ s}$

高 T_i 領域 $T_i(0)\sim 10\text{ keV}$, $\bar{n}=2\times 10^{19}\text{ m}^{-3}$

高 β 領域 $\beta\geq 5\%$, $B=1\sim 2\text{ T}$

で、第5図にそのパラメータ領域を示す。

2. 次期大型ヘリカル計画実験装置

基本構想、研究計画の目的を達成するために必要と考えられる実験装置について述べる。

装置の概略を設計するに当り、

- (1) 適正なプラズマ生成、加熱法、加熱電力で目的とするパラメータを得るのに必要な装置の寸法、磁場強度、2本のヘリカルコイルのトーラス方向の巻き数(周期数) m と主半径とコイル小半径の比のプラズマ特性との関連、プラズマ稼働および装置の運転時間の検討

第5図 次期装置の目標とするプラズマ領域

- (2) 装置本体の設計ではコイルの設計、すなわち通常の電気銅(NC)および超伝導線材(SC)の選択について技術的可能性、消費電力、電源設備、冷却系、加熱、計測機器の設置し易さ等の面からの検討
- (3) 加熱機器の検討、初期プラズマの生成法としてのECH(電子サイクロトロン共鳴加熱)、プラズマ高温化のためのNBI加熱(中性粒子入射)、ICRF(イオンサイクロトロン加熱)等について検討
- (4) 研究目的達成に必要な計測機器の検討、特にへ

リカル系トラスプラズマは3次元計測が重要であることを踏まえての検討

等を行なった。

現段階で設計検討の最も重要なことは、装置本体のコイルとしてSC, NC のどちらを用いるかの判断であった。

(i) 物理研究内容の点では、SC 装置の方がより高いプラズマパラメータで一連の“無電流”プラズマの長パルスでの閉じ込め実験が可能、さらにダイバータによる不純物制御を含めた定常実証実験が本格的に可能であること、(ii) 技術的には、SC コイルシステムの製作可能の見通しが得られたこと、NC 装置は $B=4\text{ T}$, $R=4\text{ m}$ では受電容量を越えるため小型化の必要があること、(iii) コスト、製作年限の点では、SC, NC システム共に全体として大差ないこと、製作年限はR&Dを含めてSCの方が1~2年長くかかること、等の検討結果を踏まえて、次期装置としてはSCを採用することとしてより具体的設計を始めている。装置の設計パラメータ第1表をに示す。SC コイルを用いての設計に当り考慮すべき点は

(a) 蓄積全磁場エネルギー: 2 GJ 前後

(b) 導体の線材の選定: $B_{\max} \sim 7.5\text{ T}$ で NbTi 系

第1表 次期装置の主要パラメータ
(SC/NC 装置仕様)

		超伝導 装 置	常伝導 装 置
装置大半径	(m)	4	4
コイル小半径	(m)	1.051	0.958
平均プラズマ小半径	(m)	約0.5	0.5
プラズマアスペクト比		8	8
l		2	2
m		$10^{(1)}$	$10^{(2)}$
$\gamma^{(3)}=m/2 \cdot a_c/R$		1.3	1.2
ポロイダルコイル数		6(3対)	8(4対)
磁場強度			
プラズマ中心	(T)	4	4
コイル直下	(T)	8	8
ヘリカルコイル電流 (MAT)		8	8
コイル電流密度 (kA/cm^2)		約2.5	約2.0
プラズマ体積	(m^3)	20	20
回転変換			
中 心		0.35	0.3
境 界		0.8	0.8
ヘリカルリップル		0.2	0.2
プラズマ生成時間	(s)	5以上	5以下
繰返し時間	(min)	10(5)	10以上
プラズマ加熱パワー	(MW)	20	20
磁気エネルギー	(GJ)	2	1.8
冷凍パワー	(kW)	5~7	0

第 6 図 次期計画・超伝導ヘリカル装置の概念図の 1 例

- (c) 冷却方式と導体電流: 浸漬冷却(10~20 kA), 二相流冷却(10~20 kA), 強制冷却(40 kA)
- (d) 起磁力 8 MAT/コイルが必要なので200~400ターンが要求され, コイル導体を途中で接続する方式になること(接続の信頼), 大半径 $R \sim 4$ m のトーラスにヘリカルコイルを一体巻きで作ることから現地巻きになること, 等の一連の工程の配慮
- (e) 高精度磁場($\delta B/B \sim 10^{-4}$)が望ましいこと
- (f) 垂直磁場コイル等の動的制御, すなわち時間変動磁場(0.15 T/s 程度)の影響に対する配慮等が挙げられる。他にも多くの重要項目があるが, これらの検討は, 設計部会に加えて大学の核融合分野の専門家, 科研費「エネルギー特別研究」(核融合)第4班/

超伝導班, メーカーの技術者等の協力により進められている。本体装置の概念図の1例を第6図に示す。

プラズマの生成・加熱についても, 今までの研究を通して蓄積された物理・技術の知識を集めて検討されている。現在考えられている種々の方法を第2表に示す。各手法についても

(i) ECH は 100 GHz 以上, 出力 MW 以上の発振器や伝送系

(ii) NBI も高エネルギー (<100 keV) 大電力 (>10 MW)

(iii) ICRF も大電力の伝送系, ヘリカル系に適合するアンテナ系等の開発

等の多くの新しい物理・技術の開発が必要とされる。

装置本体, 加熱機器, 計測系の整備を行い, 研究計画

第2表 プラズマ生成・加熱の方式および概略仕様

目	的	仕	様	特徴・意義・必要性
カテゴリー 1				
ECH	<ul style="list-style-type: none">・ターゲットプラズマ生成・電子ルートの輸送実験・高密度領域における加熱実験・加熱入力分布および入射モードの影響	<ul style="list-style-type: none">・周波数 ~ 100 GHz帯 ~ 56 GHz・発振装置出力 5$\sim$10 MW 400 kW・パルス幅 10 s$\sim$CW CW	<ul style="list-style-type: none">・ターゲットプラズマ生成・維持・加熱の手段としてはほぼ確立されている。・伝送系の開発が必要	
NBI	<ul style="list-style-type: none">・目標プラズマパラメータ達成・高$n\tau$, 高T_e, 高β時の物理実験用プラズマの生成・維持	<ul style="list-style-type: none">・$E_0=150\sim 250$ keV (D^0), (70$\sim$130 keV(H^0))・$P_{NBI}\sim 20$ MW(ポート通過)・ビームライン数 2基 (D^0 ビーム) 4基 (H^0 ビーム)・イオン源 正または負イオン源・パルス幅 ~ 10 s (20 MW) ~ 30 min (4$\sim$5 MW)	<ul style="list-style-type: none">・ヘリカル系での追加熱法として確立されていてデータベースの蓄積が多く, 目標プラズマパラメータ達成の可能性が高い。・プラズマを有効に加熱・維持できるパラメータ領域が広い。	
カテゴリー 2				
ICRF	<ul style="list-style-type: none">・Fast-wave 加熱の有効性の検証・IBW 加熱の有効性の検証・高T_e モード物理実験・核反応シミュレーション実験	<ul style="list-style-type: none">・周波数 30$\sim$90 MHz(可変)・発振出力 15 MW・パルス幅 ~ 10 s (15 MW) $\sim$CW(5 MW)	<ul style="list-style-type: none">・大型トカマクでは確立された加熱法であり, データベースの蓄積が多い。・加熱装置の建設が容易で, 現段階では単位出力当りの建設費が安い。・アンテナ等の開発が必要	
LHCD	<ul style="list-style-type: none">・電流駆動・制御の可能性の検証	<ul style="list-style-type: none">・周波数 3.7 GHz・発振出力 ~ 5 MW・パルス幅 ~ 100 s	<ul style="list-style-type: none">・ヘリカル系での波動による電流制御と閉じ込めとの関連・発振装置建設が容易・ランチャー開発必要	
Whistler wave	<ul style="list-style-type: none">・磁場強度に依存しないプラズマ加熱生成	<ul style="list-style-type: none">・周波数 ~ 500 MHz・発振出力 ~ 5 MW・パルス幅 ~ 10 s	<ul style="list-style-type: none">・磁場強度に依存しない実験・アンテナ最適化必要・発振装置建設が容易	

カテゴリー 1: 主にプラズマパラメータ達成用, カテゴリー 2: 主に物理実験研究用

第 7 図 実験実施計画の流れ

としては第7図に示されているような手順を経て着実に研究目標を達成していく予定である。

スケジュールとしては、土岐市における新国立共同利用機関を設立すべく昭和63年度に創設準備室が動き出し、新研設立の準備をするとともに、装置の詳細設計を進め、昭和69年ないしは70年に装置完成を目指して装置の製作、加熱・計測の諸機器の製作を進めていく。もちろん各分野のR&Dを踏まえてのことである。本計画が大学全体の核融合次期計画として関連分野の研究者の協力により推進されることが望まれる。

終りに、本報は次期大型ヘリカル計画の設計グルー

プの作業報告を同グループに代わって紹介させていただきます。設計グループ、評価部会、その他の方々のご協力に感謝いたします。

— 参 考 文 献 —

- (1) 次期大型ヘリカル装置設計グループ：次期大型ヘリカル装置計画の基本構想（昭62.3.）。
- (2) 同 上：次期大型ヘリカル装置計画報告書（第1部（研究計画）、第2部（本体並びに基本設計）、第3部（各分野別報告書））、（昭63.3.）。
- (3) 宮本健郎：“核融合のためのプラズマ物理”，（1987），岩波書店。