米国における核融合研究の現状, (Ⅲ)

Present Status of Fusion Researches in USA, (Ⅲ)

V. ローレンスバークレイ研究所における現状

Controlled Fusion Research at University of California

Lawrence Berkeley Laboratory

By R.V. PYLE*

カリフォルニア大学ローレンスバークレイ研究所では、磁気核融合および慣性核融合の研究を行なっており、とくに新しい技術の開発研究を行なっている。

磁気核融合においては、プラズマ加熱、燃料注入、静電ポテンシャルの調整、プラズマ診断、そして将来の核融合炉プラズマ規模のプラズマにおける current drive 実験等に必要な中性粒子入射システムの開発が主要なテーマである。

慣性核融合においては、大電流、大エネルギーの重イオンを燃料ペレットに照射して加熱するに必要な加速器の開発を行なっている。

I. はじめに

カリフォルニア大学ローレンスバークレイ研究所 (LBL) における制御熱核融合の研究は、1950年代に小規模なピンチ効果およびミラー磁場によるプラズマ閉じ込めの研究に始まった。このうちミラー磁場の研究プロジェクトは間もなく新設されたローレンスリバモア国立研究所に移された。D-D反応によると思われる多量の中性子が検出されたため、ピンチによる閉じ込めの研究は1950年代中頃に発展し始めた。しかし、すぐにこの中性子は熱核融合により発生したものではなく、わずかの数の重水素が急速に成長したソーセージ不安定性により高エネルギー(およそ 100 keV)に加速されたために、作り出されていることが明らかになった。これら多くの興味ある研究課題のため、大学院生の協力を得て、ピンチや回転プラズマにおけるエネルギー蓄積、アルペン波の発生および伝播、高周波によるプラズマの生成およびこれらに関係した核物理等において、多くの実験研究が行われた。また、プラズマの統計的性質についての理論的考察も始まった。

1971年にプラズマグループにおいて、プラズマ物理

の基礎研究に加えて、さらに核融合に応用するための技術研究も始まった。とりわけローレンスリバモア国立研究所の R.F. Post および T.K. Fowler は、中性粒子の荷電粒子に換算した等価電流値を、数 mA から数 10 A に増大させることが可能であるならば、プラズマの加熱および燃料の注入に非常に役立つことを指摘した。そこで LBL では 20 kV, 10 A, 20 ms パルス長の性能を満たすイオンソースモジュールの開発を開始した。やがて中性粒子入射システムの開発は核融合において大きな地位を占めることになり、現在に至っている。

磁気核融合の研究活動は、LBL において Accelerator and Fusion Research Division において行われている。1977年からはもう1つの核融合に関する研究、すなわち慣性閉じ込めの研究もこの Division において始まった。これはレーザーを使う代わりに、高エネルギー (GeV) の重イオンビームをペレットにあててプラズマをつくり、それが熱核融合反応を始めるまで急速に加熱するものである。LBL においては特にパルス大電流加速器とその輸送システムの開発研究が行われている。

現在の LBL の主な役割は、プラズマ加熱、プラズマへの燃料注入、そしてプラズマ診断のための新しい技術の開発であり、さらに、プラズマの諸問題について実験的かつ理論的基礎研究を行うことにある。また学生を一般企業を含め米国における他の核融合プログラムに必要な技術者や物理学者に養成することもこの研究の重要な役割の1つである。

以下、最近の主な研究活動のいくつかを紹介すると

* 米国カリフォルニア大学ローレンスバークレイ研究所 (Univ. of California Lawrence Berkeley Lab., USA) (1983年 7月2日 受理)

ともに、今後数年間のわれわれの研究活動について述べる。

Ⅱ. 中性粒子入射システムの開発研究

ここ10年間の主な活動は、2XIB, TMX (Tandem Mirror Experiment), DIII(Doulet III), TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor), そして MFTF-B(Mirror Fusion Test Facility-B)のプラズマ加熱に必要な中性粒子入射システムおよびそのコンポーネントの開発にあった。これらすべての中性粒子ビームは、正イオンの生成、加速および中性化による方式に基づいて開発されたもので、この中で最も高エネルギーのものは、プリンストン大学プラズマ研究所の TFTR 実験のためのもので、120 keV, 65 A, 0.5 s を満たす12基のモジュールにより、4つのビームラインを通して、TFTR中のプラズマに18 MW の中性重水素ビームを打ち込むことができる。

General Atomic (現 GA Technologies)の DIII 実験のための最初の80 keV のビームラインは、LBL/GA 共同で設計開発された。この実験のための最後の80 keV, 0.5 s のソースモジュールは、LBL でちょうどテストを終了したところである。

MFTF-Bの実験においては、ほぼ同型の80 keV, 0.5 s, そしてさらにいくつかの80 keV, 30 s のソースモジュールが必要であるが、イオンソースの運転時間を0.5から30 s まで延ばすには大きな技術的進歩が必要である。それは、プラズマ領域や加速領域の構造材(電極等)の熱容量では、1回のパルス運転の間に出る熱量をすべて蓄えることができないため、すべての部分を十分に冷却しなければならない。満足のいく30 s モジュールが完成したことを示すためには、それにふさわしいテストスタンドが必要である。そのための大きな国内共同利用テストスタンドが LBL に完成した。これは Neutral Beam Engineering Test Facility (NBETF) と呼ばれる施設で、80 keV, 40 A, 30 s の重水素モジュールを10%の duty factor でテストすることができ、また重水素の使用に耐えるよう十分な中性子遮蔽が施されている。

正イオンソースの開発段階で、特にアーク放電および中性化セルの中でいくつかの興味あるプラズマ物理に関する問題が研究された。正イオンは“magnetic bucket”の中の大電流放電によってつくられたプラズマ($n \approx 10^{12} \text{cm}^{-3}$)から引き出されて加速される。ここで“magnetic bucket”というのは壁面が永久磁石の多極磁場配列で覆われた容器のことで、これによってプラ

ズマ中の電子およびイオンの閉じ込め時間を長くすることができる。加速されたイオン中で単原子(D^+)である割合をいかに大きくできるかということは、非常に大切な問題の1つである。というのは分子イオン(D_2^+, D_3^+)は低エネルギーの中性ビーム(D^0 ビーム)を派生するので好ましくない。われわれの実験結果およびそれに伴う理論的考察により、イオンの引き出し領域の電子温度が低く、かつイオン生成領域の電子温度が高い場合、 $D^+/(D^++D_2^++D_3^+)$ の比率が極めて高くなることが明らかとなった。実験装置を第1図に示す。

フィラメントから放出された電子は、放電容器の長さよりも長い平均自由行程を持っている。電子は、容器の外側に取り付けてある列状の永久磁石の磁場によって壁面で反射され、電離あるいは解離によって、 D^+ および D_2^+ イオンを容器内に一様につくり出す。また D_2^+ イオンと D_2 分子間の反応によって D_3^+ イオンもつくられる。数本の長くて薄い棒状磁石によってつくられる横向きの弱い磁場によって、放電容器を2つの領域に分けることができる。これによって“source”領域の高エネルギー電子が、“extraction”領域に流れ込むことを、衝突の助けを借りずに妨げることができ、“extraction”領域の電子エネルギーを低くすることができる。“extraction”領域の低エネルギー電子は D_2^+ イオンをつくることはできないが、 D_2^+ を解離することにより D^+ の割合を増やす。プラズマを2つの異なった電子温度を持った領域に分けるこの方法は、負イオンの生成など他にも応用することが可能である。

Ⅲ. 負イオン源の開発研究

負イオンを加速して中性化する原理に基づいた中性粒子入射システムは、まもなくLBLにおける主要研究および開発テーマとなるであろう。負イオンが有益なことは、第1表および第2図を見れば明らかであろう。

第1表は、現在米国において検討されている核融合炉に必要な中性粒子入射システムの主要諸元である。実際につくられる核融合炉は、第1表に示されたものとは異なってくると思われるが、数100 keV のビームエネルギーが必要とされることは明らかである。

第2図は、正イオンの中性化される効率が高エネルギー領域では極めて低いことを示している。一方、負イオンの方は原理的には100%に近い中性化効率を得ることができる。

大型の負水素イオン源には現在3つの方法が考えられており、開発研究の行われた順に以下に説明する。

まず、荷電交換を利用した正イオンの負イオンへの

第 1 図 原子イオンの比率を高めるための“磁場フィルタ”プラズマ源

変換実験が行われた。これは大電流、低エネルギー正イオンビームが、アルカリあるいはアルカリ土類金属の蒸気の中を通ると、 H^+ 、 H^0 および H^- の混合物となって出てくる性質を利用したものである。実際 thick target から得られる負イオンは低イオンエネルギーにおいては50%にも達する。しかしながら、実用的な観点からは、利用できる正イオンの密度および散乱や空間電荷の効果等の影響も考慮しなければならない。

この方式では、複雑な装置である重金属を使った荷

電交換セルが必要で、またその重金属蒸気が核融合装置を汚染する可能性が大きいと、この方式による負イオン源開発は surface production による方式に比べて実用的でないと考えられ、現在米国においては、この方式に基づいた開発は行われていない。

現時点で採用された方法は、プラズマイオンおよび中性粒子を金属表面へ衝突させることによって負イオンをつくる方法(surface production)である。負イオンの生成効率は大きな原子番号ならびに低い仕事関数を

第1表 核融合炉に必要な中性粒子入射装置の代表的性能

Class of machine	Representative machine	Beam application	Energy (keV)	Power into plasma (MW)
Next-generation reactor	Tokamak ETR (FED-A)	Heating	400~800	
		Current drive	Steady state 400~800	40~50
			Internal transformer 175~400	20~40
	Mirror ETR	Plug cell potential barrier	Steady state 475	9.5
	INTOR-class tokamak	Heating	400	40
		Current drive	Steady state 1,000~2,000	110
			Internal transformer 400	60
	MARS tandem mirror	Anchor cell potential barrier	Steady state 475	18

第2図 正および負イオンの最大中性化効率

持つ金属表面で一番高い。低い仕事関数を得るためには放電中に Cs を加える。これにより Cs の一部は金属表面について部分的に単原子層をつくる。1 A の負イオン源の概要図を第3図に示す。

プラズマ中の volume production による D⁻イオンの生成は現在の研究テーマの1つで, Csを必要としないので将来最も有望な負イオンをつくる方法として注目されている。というのは加速器や閉じ込め装置の近くでどちらかといえばCsを使用したくないからである。さて, プラズマ中には予想外に高い密度の H⁻イオンが存在していることが知られている(核融合装置に必要な大電流を volume production により得られるかどうか, また充分に電子およびガスを制御できるかどうか, 今後の研究課題である)。

いま提案されている負イオンの生成原理は, 振動励起状態の水素分子に, 低エネルギーの電子が dissociative attachment するためであると考えられている。

プラズマからの正イオンはプラズマ中に設けられた低仕事関数の湾曲した金属表面に衝突する。生じた負イオンは -200 V のバイアス電界により, 表面より加速され, 右側の加速部へと収束される。

第3図 1 A surface production 負イオン源

すなわち

プラズマや容器の壁面における振動励起状態の分子の生成および消滅が今後の重要な研究課題である。

Ⅳ. 他 の 研 究

原子核が偏極した核融合燃料を使うことが現在興味をもって探究されている新しい課題である。もし偏極

状態を十分に長く作り出せるならば、2つの効果をもたらすことができる。すなわち、まず反応断面積をふやすことも減らすこともできるし、さらに反応生成物(α 粒子、中性子など)の飛ぶ方向を調整することが可能となる。燃料を核融合プラズマに供給する3つの方法(neutral beams, gas puffing, pellet injection)のうちで、現在高エネルギー中性粒子が大きな運動エネルギーを持っているため、最も望ましくない方法と考えられている。しかしながら、結果が何であれ、これは応用物理としては非常におもしろい分野である。

いかにして多量の偏極した重水素および三重水素を作ることができるだろうか。プラズマイオンが真空容器の壁まで拡散した時あるいはプラズマに戻る時の depolarization 確率はどのくらいであろうか。LBLで行われている関連研究への展望は、ひとえにこれらの問題への解答いかににかかわっている。

粒子と波の相互作用の研究は、基礎プラズマ理論グループによって general geometryにおいて行われてきた。ここでは6次元相空間(position, wave vector)における action density および5次元相空間(position, parallel velocity, magnetic moment)における guiding center density の概念を用いている。

非共鳴効果は energy function から導かれ、また incoherenceへの遷移やcoherent wave, incoherent waveの両方を取り扱うことができる。波は互いに非線形に干渉し合うとともに、バックグラウンドのプラズマとも相互作用する。後者の相互作用は, discrete effect およびcollective effect, 線形および非線形効果, さらに共鳴および非共鳴効果を含む。これらの式はself consist-

第4図 4 MeV, 500 A/cm², 100 GHz 自由電子レーザーの理論的 radiation intensity vs. amplifier length

ency が満たされるように組み立てられており、プラズマ不安定性, 乱れ, そしてプラズマの波動加熱に適用することができる。

閉じ込められたプラズマを加熱するもう1つの方法に、高出力のマイクロ波のエネルギーをプラズマに吸収させる方法がある。研究上興味のある周波数領域は100~200 GHz である。強い相対論的電子ビームが、電磁石によって周期的に偏向されて光を発生する自由電子レーザーを使うと、原理的には高い効率で大きな出力を作り出すことができる。ローレンスリバモア国立研究所との共同研究により、空間電荷場および輻射場において self consistent に解析してデザインされた

第5図 誘導加速器を用いた重イオン核融合システムの概略図

システムが目下テストされている。これは GW 級の 100 GHz マイクロ波パルスを作り出せるもので、実験では 1 kA, 4.5 MeV の電子ビームを使用している。wiggler 中での代表的な radiation power density vs. position の結果を第 4 図に示す。

LBL における慣性核融合(ICF)の研究は、大電流、重イオン加速器を使って電気エネルギーを作り出すことを指向している。重イオン慣性核融合システムの概要図は第 5 図に示されている。LBL における開発計画では、100 A ソーセージ型ビームを短パルス、数 kA, 数 GeV ビームに加速変換するために、single-pass linear accelerator 中に多くの induction-modules を使っている。

複数の平行チャンネル中で加速されたビームは燃料ペレットにぶつかり、およそ 10^{25}cm^{-3} の密度のプラズマを作る。これは磁場によって閉じ込められた核融合炉よりもおよそ 10^{10} 倍密度が高い。この加速器の初段部は LBL でテストされている。また beam optics の研究および診断方法開発のため Cs^+ ビームが用いられている。

V. 将来の計画

将来の展望として、まず中性粒子ビームのプロジェクトから述べる。正イオンを使用した中性粒子システムは 1990 年代も使用されると思われるが、LBL において研究開発のための活動はあと 2 年程度で終了するで

あろう。 D^+ 比率を 90% にふやし、不純物をできるだけ減らすことがこの分野の最主要研究テーマであり、また重要な課題は中性粒子システムの信頼度および寿命を長くすることで、高周波でイオンソースのプラズマをつくることはその 1 つの方法で、今後実験で評価する予定である。

正イオン源への研究努力の減少とともに、負イオンを使った中性粒子システムの研究開発が盛んになるであろう。負イオン源を使った 400 keV の中性粒子システムの概念設計図を第 6 図に示す。実用核融合炉に应用到に当っては、放射線遮蔽外に大部分のシステムを置くことが望ましく、たぶんそうせざるを得ないであろう。最近の 3 つの分野における進歩がこれを可能にしたように思われる。すなわち、まず大電流(1A 以上、定常)のイオンソースが開発された。

次に、strong focusing (transverse field focusing) 加速および輸送概念が実現できそうであることがわかった。また、高出力、定常の化学レーザーの急速な進歩によって photo detachment による、 D^- イオンの効果的な中性化が実現できそうになった。Proof-of-principle のため 160 keV, 1 A (D^-)、定常実験を通して、この 3 つの要素がすべて今後研究されるであろう。現在実用のための目標は、1990 年代の初期に tandem mirror の実験において、200 keV のビーム打込みを実現させることである。

第 6 図 400 keV 中性粒子入射装置の概念図

1980年代後半の重イオン核融合加速器研究プログラムの目標は、電子密度およそ 10^{22} cm^{-3} 、電子温度50～100 eV のプラズマをつくり、加速器と beam target 間の物理的関係を明らかにすることである。パラメータはまだ決められていないが、現在研究されている例としては、10 ns パルス、100 MeV、3 kJ の Na イオンビームである。最初の電流パルスは5 A で5 μs の予定である。

自由電子レーザープログラムの将来は現在の実験結果次第であり、またある部分はプラズマ加熱のための短時間大出力マイクロ波のパルスの適合性にも依存している。

VII. あとがき

LBLにおいては、磁気核融合、そして慣性核融合における研究および開発、ことに新しい技術の R & D が

行われている。これらの新しい技術は、他の国立研究所や、その他の研究機関でも応用されるだろう。

磁気核融合の分野においては、1990年代初頭までに tandem mirror 実験に利用できる負イオン源を使用した、中性粒子入射の技術確立に大部分の努力が注がれるであろう。

慣性核融合の分野においては、必要な加速器技術の確立および beam-target の相互作用を解明するための、高温実験の設計に努力が注がれるであろう。

紙数の制限のため謝辞ならびに引用を充分取ることができなかったが、とくに内容や図面等でご配慮頂いた A. Sessler, W. Cooper, D. Keef, K. Ehlers の各氏に感謝いたします。

本研究は米国エネルギー省核融合局との契約 DE-AC 03-76 SF 00098 の支援によるものである。

○セミナー・FA(Factory/Automation)○ のための構内通信方式

主 催 日本自動制御協会、協 賛 本会ほか13学協会

会 期 <大阪> 9月28日(水)・29日(木)

<東京> 10月6日(木)・7日(金)

会 場 <大阪> 大阪科学技術センター 8階小ホール
(大阪市西区御本町)

<東京> ダイアモンドホール(東京都千代田区霞が関)

○プログラム○

9月28日・10月6日 (9:30～16:50)

LAN の開発と標準化動向	(日本電気) 島 直
FA と PBX	(立石電機) 江戸鶴男
Ring か Bus か	(神戸大) 岡田博美
同軸か光か	(住友電工) 加藤正昭

9月29日・10月7日

住友電工による実例	(住友電工) 未 定
一貫製鉄所におけるネットワークシステム	(住友金属) 山崎郁太郎

トヨタ自動車における実例	(トヨタ自工) 未 定
パネル「これからの構内通信方式」	

パネラー (阪大) 寺田浩昭, (電々公社) 千本倅生,
(阪大) 真田英彦, 他

定 員 各 100名(定員になり次第締切)

参加料 会員(協賛学協会員含む) 25,000円, 学生 12,000円

(非会員 35,000円) (いずれもテキスト1冊含む)

テキストのみ 会員 3,500円(非会員 4,000円)

申込方法 所定申込書にご記入の上、下記宛へ。

申込先 (〒606) 京都市左京区吉田河原町14

近畿地方発明センタービル内

日本自動制御協会「FA のための構内通信方式」係

(Tel. 075-751-6413)

○「原子力・バイオハザードに関する○ 廃棄物封込技術」特別講演会

主 催 日本機械学会、協 賛 本会ほか5学協会

日 時 11月11日(金) 13:00～17:00

会 場 ダイアモンドホール

(東京都千代田区霞が関1-4-2, Tel. 03-504-6779)

○プログラム○

[司会 田中博国(三機工業), 高田秋一(在原製作所)]

(1) 各種固化封込処理技術(コンクリート・アスファルト・
プラスチック・ガラス) (在原製作所) 林 忠正

(2) 気体液体封込処理技術 (神戸製鋼) 金沢俊夫

(3) 放射性廃棄物の保管とモニタリング

(放射線安全技術センター) 町田忠司

(4) バイオハザードにおける封込技術 (三機工業) 柴田稜威夫

定 員 100名, 聴講料(無料)

問合せ先 (〒151) 東京都渋谷区代々木2-4-9

日本機械学会総務課 (Tel. 03-379-6781)