コンファレンスレポート

第10回プラズマ物理と制御核融合国際会議

山中千代衛*・中井貞雄・三間 罔 興*

The 10th International Conference on Plasma Physics and
Controlled Nuclear Fusion Research

Chiyoe YAMANAKA*, Sadao NAKAI* and Kunioki MIMA*

はじめに

国際原子力機関 (IAEA) 主催になる上記国際会議は、いわば世界の核融合研究のオリンピックである。発表論文は各国における国内審査を経て採決され、参加者は各国代表という資格である。したがってそれぞれ国を挙げての成果を競い合うことになる。2年毎の開催であり、前回1982年米国バルチモアにおける第9回について、今回は1984年9月12日(水)より19日(水)まで、ロンドンのインペリアルカレッジで開催された。

研究内容別講演発表論文数はトカマク実験48、慣性閉じ込め核融合28件、開放端13、プラズマ加熱18、新方式他53、磁気閉じ込め理論26、基礎他7、技術13、INTOR 8、とりまとめ5、である。我が国の採択論文は37編で、米国の69編について第2位。第3位のソ連21編をはるかに引き離している。今回は初めて中華人民共和国からの参加、論文発表があった。

今回の会議でのハイライトは、1983年6月から稼動している欧州連合の大型トカマク JET (Joint European Torus) の最新の成果と、1983年12月から稼動している我が国における世界最大のレーザー激光Ⅻ号によるキャノンボール型燃料ペレット爆縮の成果であろう。この結

果慣性核融合において閉じ込めパラメータ $n\tau \sim 10^{14} (\text{cm}^3 \text{sec})$ 、温度 $T \sim 3 \text{ KeV}$ が達成され、核融合点火に向って着実な進展がみられた。核融合エネルギー開発は、このように全く異なるアプローチが、それぞれ独自の課題を解決しながらほぼ同じレベルに到達した。このような状況を反映して、会議全体のふん囲気は活発で、参加者には積極的な姿勢が感じられた。核融合研究開発の実現をより確実なものとするには、磁気閉じ込め核融合と慣性閉じ込め核融合の最適方式を当分の間対置して進めることが必要と思われる。

磁場閉じ込め核融合

米国、欧州、日本、ソ連における世界4大トカマクのうち、米国プリンストン大学における TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor, 主半径2.5m, 副半径0.85m) は1982年12月から、欧州連合のJET (主半径3m, 副半径: 縦2.1m, 横1.25m) は、1983年6月から運転を開始した。JETでは、エネルギー閉じ込め時間、 τ_E で0.62秒の世界最高記録が達成され、プラズマ放電時間は10秒であった。この時のプラズマ密度は $4.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 閉じ込めパラメータは $n\tau_E \approx 2.8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \text{sec}$ であり、温度3 KeVが達成されている。

* 大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565 吹田市山田丘2-6)

* Institute of Laser Engineering, Osaka University. (2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565)

閉じ込め時間, τ_E の比例則では, $\tau_E \propto naR^2q^{0.8}$ がよく成立していた。ここに, プラズマ副半径を a , 主半径を R , 電子密度を n , 安全係数を q とした。

MIT (米国) の Alcator C では燃料注入方式をペレット入射に変えたところ, $\tau_E \propto n$ の関係が, $2 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 以上の密度領域でもなりつつことが示された。その結果, 閉じ込めパラメータ, $n\tau_E$ は $0.6 \sim 0.8 \times 10^{14} \text{cm}^3 \text{sec}$ となり, 低温 (1.5 KeV) ながらゼロパワーの条件を満たした。

前回, ASDEX (西独) で, ダイバーターを用いて NBI (中性粒子ビーム入射) で閉じ込め時間の長い H モード運転が発見された。今回, プリンストン大の PDX, GA での原研, 米国共同研究の D-III 等のダイバーター付きトカマクで H モード運転が再現された。L モードに比べて, H モードではプラズマの境界領域の温度や密度勾配が大きくなり, リサイクリングが小さくなり, 閉じ込め特性が良くなると考えられている。しかし, τ_E が長くなる機構の詳細はまだ明らかになっていない。また, 高ベータ化のため, 非円形断面の一種として, そらまめ状の断面となるトカマク, PBX (Princeton Beta Experiment) が製作された。理論予測で, 第2安定領域と呼ばれる高ベータ運転がこの装置で実現されることが期待されており, 初期データでは $\beta \geq 4\%$ が実現された。

高周波加熱及び電流駆動についても多数の研究成果が報告された。PLT では重水素プラズマに ^3He を混入し, 2.6MW の RF 電力により, イオンサイクロトロン共鳴で, イオン温度が 1 KeV から 3.6 KeV まで加熱された。電流駆動に関し, 低域混成波を用いた実験結果の報告が多数あった。PLT, Alcator C (MIT) の実験では吸収されたエネルギーの約 20% が磁気エネルギーに変換された。また, WT-2 (京大) と JIPPT-II U (名大) では, 電子サイクロトロン共鳴加熱, 低域混成波加熱のみにより, プラズマ発生, プラズマ電流の立ちあげとトカマク平衡を得ることに成功した。

開放端系に関しては LLNL (米国) の TMX

-U 及び筑波大の GAMMA10 の大型装置による実験の進展状況につき報告があった。実験対象はエネルギー閉じ込め特性を良くするための①サーマルバリア電位形成による端損失抑制, ②軸対称化による径方向損失の抑制の検証であった。サーマルバリア電位の形成の結果, 軸方向粒子閉じ込め時間が, TMX-U, GAMMA10 の両装置で 100 msec に達した。しかし, TMX-U では非軸対称であり, 径方向への拡散が支配的になっている。一方, GAMMA10 では軸対称化タンデムであり, 径方向の閉じ込め時間が軸方向閉じ込め時間より長くなっている。

ヘリオトロン・ステラレーター・トルサトロン等の外部コイル系で, 現在稼動中の大型装置はヘリオトロン E (京大) とベンデルシュタイン VII A (西独, ガルヒン) であり, 1986 年末より ATF-1 (米) と W7AS (西独) が稼動予定である。上記大型装置では, 無電流。温度 1 KeV で $0.2 \sim 1.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ の密度のプラズマが実現され, ヘリオトロンでは $n\tau = 5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3} \text{sec}$, β 値 2% が得られている。無電流プラズマの生成方式として, これらの装置では, 電子サイクロトロン加熱, 及び中性粒子入射による方法が採用されている。

ピンチ・コンパクトトーラスに関しては TPE-1RM (電総研), REPUTE-1 (東大), ZT-40M (米), OHTE (米), HBTXIA (英) 及び ETA-BETA II (伊) が逆転磁場ピンチ (RF P) 装置として稼動中である。ZT-40M では放電時間が 27 ms に達し, 逆転磁場配位の長時間保持にダイナモ効果が有効であることを支持している。また, OHTE では, プラズマ電流 500 KA で $n\tau \approx 10^{10} \text{cm}^{-3} \text{sec}$, $\beta = 20\%$ の実験結果が得られている。また, 逆転磁場配位達成の過程につき計算機実験 (広大) がおこなわれ, REPUTE-1 の結果との対応が明らかにされている。

コンパクトトーラスとしては, プリンストン大学の S-1 スフエロマックが稼動開始し, 主半径 45~65 cm, 350 KA のトロイダル電流のプラズマが生成された。その他に, CTCC-1 (阪大), CTX (米) 等の装置では同軸プラズマガンによ

りスフェロマック型プラズマが生成されている。また、SPAC-VIII (名大)では相対論的電子ビームによりアストロンスフエレーター配位を実現している。

慣性閉じ込め核融合

慣性核融合研究に関して今回特筆すべきことは、新世代の大型エネルギードライバー、激光Ⅻ号、NOVETTEが稼動状態に入り、10KJ級の爆縮実験結果が報告されたことであろう。また、100KJ級のドライバーとしてNOVA (120 KJ/120TW)が完成間近であることが報告された。

大型レーザーによる爆縮実験の結果は、ドイツ、マックスプランク量子光学研究所ウィトコフスキー博士によりICFに関するサマリーとしてまとめられた。達成された燃料圧縮のパラメータは阪大ILE, カリフォルニア大LLNLの報告によると、 $\rho = 10 \sim 50 \text{ g/cm}^3$ [$n = (2 \sim 10) \times 10^{24} \text{ cm}^{-3}$], $\rho R = 0.01 \sim 0.05 \text{ g/cm}^2$, $T_i = 1 \sim 3 \text{ KeV}$ になっている。これらのデータは大型トカマクのデータと比肩するものであり、大型装置の短波長化による圧縮パラメータの向上の期待が高まっている。また、ペレット設計の多様化も一般に認められるところとなっており、阪大ILEではキャノンボール爆縮、あるいはX線輻射を用いた爆縮等の間接照射型爆縮と直接照射爆縮が対比して論じられ、爆縮パラメータの向上が計られている。

各種爆縮の物理、技術的問題点、特徴、および圧縮パラメータ等が、実験結果と爆縮の計算機シミュレーションとの比較のもとに報告された。総合性能として、キャノンボールの内球をさらに2重構造とした、いわゆる“ダブルシェルインキャノンボール”ターゲットで良い結果を出したことが特に注目を集めた。他方、英、仏その他での中小型レーザーでは爆縮基礎過程が調べられており、その成果をもとに、日本の大型レーザーによる爆縮実験の共同研究が希望されている。

爆縮の基礎過程として、今回のIAEA会議で

のトピックスは爆縮の球対称性であった。キャノンボールターゲット等の間接照射方式ではレーザーエネルギーがX線もしくは高温プラズマに変換されたのち、燃料ペレット表面に爆縮駆動エネルギーとして注入されるため高度の球対称性が保証される。残る問題はその安定性であるがレーリー・テラー不安定性の成長率が実験および理論・シミュレーションにより検討され、古典的な成長率の $\frac{1}{2}$ (Rutherford Lab., NRL)になることが報告された。これは、燃料球表面のアブレーションによるレーリー・テラーモードの安定化として予想されていたもので、その効果が実験的に定量化された。また、短波長レーザーによるアブレーションではその効果がより顕著で、 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$ 程度まで抑制されることが予想されている。これらの結果として、高アスペクト化 ($A \approx 50 \sim 100$)の燃料ペレットが適用可能となるが、阪大ILEでの高アスペクトターゲット爆縮結果も高い体積圧縮率を示しており、爆縮対称性に関し明るいニュースとなった。短波長レーザーによる直接照射爆縮では、安定性の他に照射一様性が問題となる。すなわち、短波長化によりペレット表面での熱伝導による温度分布の均一化が困難になる結果、より高い照射均一度が要求される。この点につき、2つの重要な技術開発が提案された。一つは、波長 $0.35 \mu\text{m}$ のレーザービームの強度分布の均一化をはかり、その計測結果にもとづき、24ビーム照射での吸収分布の一様性が評価された (ロチェスター大学LLE)。その結果により、吸収強度の最大-最小の差が平均強度の10%以下になることが報告された。他方、ILEとは独立にNRLは、空間的な干渉性を取り除くことによりビームの強度分布が平滑化することを提案した。また、エコーポリテクニクからは、レーザー照射条件をアウトフォーカスにすることにより均一度が改善されることがコメントされた。

レーザー波長の短波長化について、前回のIAEA会議に引き続きその有効性が実験的に確認された。例えば高温電子発生について定量的な測定がおこなわれた。爆縮に必要なレーザー

強度, 10^{15} W/cm^2 の前後で高温電子エネルギーの全吸収エネルギーに対する割合が評価され, $1.05 \mu\text{m}$ では数十パーセントになるのに対し, $0.35 \mu\text{m}$ では1%以下のレベルにとどまることが明らかにされた(リメール, ロチェスター大LLE)。また, 誘導ラマン散乱及び Two Plasmon Decay と高温電子発生の関連についても, 短波長レーザーについてLLNL, LLEその他の研究所から報告があった。将来ターゲットが大型化した場合, 密度スケール長が大きくなることでこれらのプラズマ不安定性が主たる高温電子源となる心配がある。しかし, 現在の所, レーザー強度, プラズマスケール長によらず, これらの不安定性による高温電子発生量は予備加熱の観点から十分許容範囲におさまるものであった。

流体力学的効率(熱輸送あるいはコロナーコアカップリング)についてもいくつかの報告があった。例えば, リメール研究所より, アブレーション層の z 値と中性子発生量との関係が報告された。すなわち, $z=10$ の場合に比べ, $z=79$ の場合には中性子が約1桁多くなった。その解釈として, 高 z アブレーションではプラズマの膨脹速度が小さくなり, 加熱された電子とコアプラズマとの結合が良くなることが提案された。また, アブレーションの波長比例則について, 波長 $0.26 \mu\text{m}$ のデータが電総研及びエコールポリテクニクにより追加された。アブレーション圧力は 10^{15} W/cm^2 で50 Mbar以上が達成されている。エコールポリテクニクでは, $0.26 \mu\text{m}$ のレーザーにより2重膜ターゲットの第1膜を加速し, 第2膜との衝突により超高压(400 Mbar)の発生に成功した。この事は, 薄膜が十分低温に保持されたままで高速($\geq 2 \times 10^7 \text{ cm/sec}$)まで加速されたことを実証するものであり, 慣性核融合にとって有利な成果と考えられる。

慣性核融合の理論解析に関し, ポスターセッションで3件報告があった。1次元・2次元の流体コードが整備され, 実験結果の解析, ターゲット設計及び核融合炉設計に応用されるようになっている(阪大ILE, スペインDENIM,

米国の各研究所等)。阪大では2次元流体コードが完成し, 高エネルギー電子輸送, 原子・X線輻射過程, 状態方程式等の取り扱いが改善され, その結果がキャノンボール爆縮, X線輻射爆縮, 等に適用され, 実験結果との比較検討がなされた。スペインDENIMでは1次元流体コードがよく整備され, 主として軽イオンビーム核融合の炉設計及びターゲット設計に適用した結果の報告があった。また, NRLからは2次元シミュレーションでの不均一照射, 磁場発生と磁場による熱輸送抑制に関する報告があった。その結果によると, 熱輸送抑制因子, $f=0.03$ が平面ターゲットでは磁場により説明出来ることを示した。均一照射に近い球ターゲットでは抑制効果が小さくなることに関し実験結果を良く説明することも報告された。また慣性核融合炉用として必要なドライバーエネルギーは, 1979年以来評価は数MJ(LLNL)となっているが, 核スピン分極燃料を用いれば同じ燃焼率に対しドライバーエネルギーが約 $\frac{1}{2}$ になることも発表されている。

ガラスレーザー及びその高調波による研究成果をまとめると, 10KJ級のエネルギードライバーの完成により, 種々の間接・直接照射方式についての爆縮実験及びペレット設計が可能となった。また, 波長 $0.53 \mu\text{m}$, $0.35 \mu\text{m}$, $0.26 \mu\text{m}$ 等短波長レーザーによる爆縮データが蓄積され, その有効性が確認された。わが国が研究の進展とその公開方針により世界の共同研究の中心として高く評価されている。

波長 $10 \mu\text{m}$ の炭酸ガスレーザーによる高温電子駆動爆縮に関しては, 前回バルチモアにおけるIAEA会議での報告につづいて, 今回も, その後の進展について阪大ILEより報告があった。長波長レーザーでは, 吸収エネルギーは効率よく, 高温電子に変換される。これがエネルギー輸送の媒体として, 高密度領域でエネルギー散逸をおこすことにより, 高いアブレーション圧力を発生する。他方, 高温電子の高エネルギー成分が, 燃料内部まで侵入し, プリヒートをおこし, 圧縮効率を低下させる可能性が高い。こ

の点に関し、燃料球表面に、Ni, Al, Cu等を多層にコートし、各層からのK α 線を分光測定することにより、ペレット内部に向う高温電子のスペクトルを求める手法を開発し、これを用いて各種ペレット構造についてのプリヒート抑制効果を実験的に検討した。この結果によると、キャノンボールターゲットにおいて、燃料内球を直接照射すると、発生した高温電子の高エネルギー成分は、外球シェルで吸収され、内球中心へ向う高温電子スペクトルは、高エネルギー成分がカットされた分布になっている。この効果を導入すると炭酸ガスレーザーでも低プリヒート、高密度圧縮が可能なが報告された。

ソ連レベデフ研究所から、シミュレーションではあるが、高温電子駆動爆縮を詳細に解明し、これによる高密度圧縮の有効性を示す報告がポストデッドラインペーパーで報告された。特にこれまでに公表されている爆縮実験データとの対比を行ない、定量的に一致した結果を示している。

粒子ビームICFでは、励電Ⅳ号による6.4 MeV, 100 TW/cm² rad²の高輝度ビーム発生の実験結果が報告され、LIB・ICFの最も重要な課題が達成された。さらに、輝度の電圧に対する比例則が得られ、電圧上昇により所要の輝度が達成しうることが示された。次の課題は、このような高輝度ビームを一点に強く収束することで、磁場による偏向、不完全中和による発散、幾何学的収束における収差等に注意を払う必要がある。これに関しては、サンディア研究所ではPROTO-Iによる収束実験で、ほぼビームの発散角 $\Delta\theta$ できまる限界収束径 $R=f\Delta\theta$ (f は幾何学的焦点距離)までのシャープなビーム収束を得ている。これらの成果は、ビームの収束性がネックとなっていたLIB・ICFにとって極めて大きな進展である。

ダイオード内の電界分布のシュタルク効果による分光計測(コーネル)、クライオアノードによる高純度イオンビーム発生技術の開発(東工大)、プラズマエロージョンによる高速オープニングスイッチの開発(NRL, ILE) LiFアノ

ードの放電処理による高純度Liビーム発生技術(サンディア)等、軽イオンビームによるペレット爆縮へ向けての必要な技術開発が着々と進んでいる。

慣性核融合に関する新知見をまとめると次のようになる。

- (1) レーザー施設としては激光Ⅺ号ガラスレーザーの30 KJ/50 TWをトップとして10 KJ級のレーザーが稼動を開始し、新しい実験結果が続々とあらわれて来た。
- (2) 短波長レーザーの有利性が実験的に確立してきたため、各国のレーザーは一斉にブルー化の努力を推進している。0.25 μ の紫外化もすすんでいる。
- (3) ビーム数を増大させ一様照射の条件が探究され、その均一度の評価が定まってきた。
- (4) 爆縮に際してレーリー・テラー不安定性の研究が推進され、その危険度は予想よりはるかに小であることが判明し、高アスペクト比の実験が遂行され、爆縮の性能が大幅に向上した。
- (5) インダイレクトドライブの構想がキャノンボールターゲットで実行され、高い結合効率と均一圧縮が実証され、新しい展開が見られた。
- (6) 空間的、時間的に解像力のすぐれた新しい診断技術の進歩がみられ、爆縮圧力や爆縮速度の適確なデータが得られた。
- (7) 計算機シミュレーションコードが大幅に進歩し各国ともかなりのコードが備えられ、核融合炉の計画も定量的にすすめられるようになった。また偏極燃料の効果も論じられている。
- (8) CO₂レーザーで代表される長波長レーザーも新しい希望が持たれるように見え、今後の発展が望まれている。
- (9) レーザー核融合のみならず、軽イオンビームも輝度10¹⁴ W/cm² (rad)²以上に達する性能を備えるようになり今後のプラズマ実験が期待される。
- (10) 重イオンビーム核融合の研究も徐々にではあるが計画がすすみつつある。

慣性核融合は磁気核融合にくらべその歴史は浅いのであるが、最近の急進展は誠に眼ざまし

いものがあり、米国の核融合理論センターのローゼンブルース教授の言によれば、イグニッションに、より早く到達するのではないかとこのこ

とである。炉設計の段階に達すればきわめて有力な見通しがあるので、現在のブレイクスルーであるイグニッションが待望されるのである。