コンファレンスレポート

第11回 IAEA プラズマと制御核融合
研究国際会議報告

山中千代衛*・中井貞雄*・三間 圀 興*・今崎一夫*

Report on IAEA Conference on Plasma Science and
Controlled Thermo-Nuclear Fusion

Chiyoee YAMANAKA*, Sadao NAKAI*, Kunioki MIMA* and Kazuo IMASAKI*

1. はじめに

第11回 IAEA プラズマと制御核融合研究に関する国際会議が京都国立国際会議場において開催された。1974年東京で第5回会議が開かれていたのでわが国では二度目の会議である。わが国の核融合研究計画にとっては日本原子力研究所のJT-60トカマク装置の完成直後でもあり、大学関係でも阪大のレーザー激光Ⅻ号装置をはじめ、京大ヘリオトロンE、筑波大ガンマ10などが稼働しており、きわめていい時期に開催されたと言える。会議は11月13日から20日にわたり、約600名の参加者内海外300名という大会議であった。この会議におけるハイライトはヨーロッパ連合のトカマクJET、米国のトカマクTFTRのスーパーショット実験と阪大激光Ⅻ号レーザーとLLLのNOVAレーザーのDT中性子生成10兆個のスーパーショット実験である。

ここでは慣性核融合に関する研究をとり上げることにした。

レーザー及び粒子ビームを用いた慣性核融合に関しては、口頭発表2セッション、座長R. Schriever (DOE) および山中千代衛 (阪大)、

講演10件、ポスターセッション10件、それに炉概念のセッション及び新規トレンドのセッションにポスターで各1件、合計22件の報告があった。我が国からは、阪大レーザー研より4件、他に東工大、名大プラ研、長岡技科大、電総研より各1件計7件の報告があった。外国では米国8件、フランス3件、英、独、スペイン、カナダ、中国各1件等の報告があった。ICFに関するサマリーはNRLのS. Bodnerがおこなった。

ICFにおける阪大のスーパーショットはLH-ART (Large High Aspect Ratio Target) とよぶ直径1~1.5mmで壁厚1~2 μ mのDT充填ガラス小球を、短波長整形パルスで均一に照射し、高効率で安定な爆縮を達成した。その物理は「多重衝撃波圧縮」といわれるもので、ペレットを爆縮する過程において、多数の求心衝撃波を次々に発生させ、これらが同時にペレット中心に到達するようペレット構造とレーザー波形を設計したものである。スタグネーションフリー圧縮ともよばれ、燃料全体をほとんど同時に圧縮・加熱する「体積点火」がおこなわれる。この方式は阪大の提案によるもので激光Ⅻ

* 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 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565)

Fig. 1 IAEA 国際会議
ICF IF Meeting

号を用いて、レーザー光から圧縮コアプラズマへのエネルギー結合効率 5.5%，ペレット利得 0.2% が達成された。

さらに重要なことは、この方式によりシミュレーション結果と実験値のよい一致がみられ、このコードによりブルー光 100 kJ によりイグニッション及びブレークイーブン達成への見通しが確立したことである。激光 XII 号の目標値 ($n\tau = 10^{14} \text{cm}^{-3} \text{sec}$, $T_e = 5 \text{ keV}$, 中性子 $N_p = 10^{12}$) を完全にクリアした。激光 X II 号をベースとした増力 100 kJ システムにより、ここで開発された新しい爆縮方式によるイグニッション実験が期待されている。

短波長レーザーによるペレット爆縮に関し、物理過程の研究が米国ロチェスター大学 LLE, NRL より報告された。LLE では 24 ビームを用い、均一なビームパターンをペレット上で重畳することにより 1% 以内の照射均一性をめざしている。もしこのような良好な均一照射を行えばブルー光 30 kJ でイグニッションが可能であるとのシミュレーション結果を示した。NRL では ISI (Induced Spatial incoherency) による均一照射の提案と、基礎実験データを報告した。この方法によれば、ビーム干渉によるホットスポットがなく、SBS, SRS, 高温電子等の発生の少ない均一照射が可能である。阪大では RPP (Random Phase Plate) で同様の研究をすすめている。

仏リメーユ研究所は、米国リバモア研より導入して建設中であった、NOVA の 2 ビームに相

当する Phebus レーザーを完成させ、これによるペレット実験の開始を報告した。爆縮基礎実験に関しては、これまでの 8 ビームオクタールレーザーによる輻射輸送や衝撃波発生についての報告がなされた。エコールポリテクニクでは、6 ビーム 4 倍高調波システムによるペレット爆縮実験を行っており、球対称圧縮とそれによる中性子発生を報告した。

英ラザフォード研究所は、衝撃圧縮ペレットからの核融合 α 粒子をプローブビームとして用い、このエネルギー損失からレーリーテラー不安定性を測定するユニークな実験を報告した。

イオンビームによる慣性核融合に関しては、サンディア研究所より、PBFA-II 建設の進行状況と、これに用いるリチウムイオン源の開発がほぼ完了し、見通しのついたことが報告された。その他の発表も、収束大電流イオンビーム発生の装置技術に関する開発研究で、全体としてはサンディア研における PBFA-II の完成とその動作を見きわめようとする状況である。

MICF (Magnetically Insulated Inertial Confinement Fusion) という磁場閉じ込めと慣性核閉じ込めのハイブリッド方式が阪大レーザー研より報告され、ICF 関係のみならず MCF 関係者の注目を引いた。

ドライバーに関しては米国ロスアラモス研における KrF レーザー (Aurora) についての報告があった。これは多重ビーム増幅によりパルス幅 5 ns で 10~20 kJ のレーザー光を発生するもので、これにより核融合用 KrF レーザーの技術的な課題を点検中。ブレークイーブンから炉用ドライバーの選択に関連して、その結果が待たれる。

カリフォルニア大バークレー校からは線形誘導加速器による重イオンビーム発生・加速の基礎実験と、これにもとづく、重イオン慣性核融合への見通しが述べられた。大電流領域での予測を精度よく行うには、一層のデータ蓄積が必要であろう。リバモア研からの新型ガラスレーザーによる MJ システムの報告は、固体レーザ

一の今後の発展を示すものとして興味深いものであった。

インフォーマルミーティングが11月17日(月)の2時から6時まで開催された。これは、今回IAEA会議でのICFに割りあてられたセッション数が少なく、各国の研究者に十分な発表の場が不足したので、詳しい論議をするため設置したが、非常な好評であった。座長は山中(ILE), R. McCrory (LLE), S. Witkowski (MPQ) がつとめた。参加者は約60名、次のようなテーマが討議された。

§ ドライバー: E. Lee (Berkeley)

§ インプローション: M. Haines (Imperial College),
K. Mima (ILE)
Ripin (NRL),
E. Fabre (Palaiseau),
K. Nihsihara (ILE),
S. Bodner (NRL)

§ 計測: M. Decroisette (Limeil),
J. Soures (LLE),
G. Miley (Illinois)

§ イグニッション及び
コンセプト: H. Hora (NSW),
R. McCrory (LLE),
H. Takabe (ILE)

なお次回以降のIAEA会議において、ICFに対し十分な配慮を要望することが確認され、IAEA議長 H. Blix 宛の要望書がまとめられた。(山中千代衛)

2. レーザードライバー及び爆縮実験

レーザーの短波長化に関しては高出力ガラスレーザーを保有する研究所は、すべて高調波変換装置を用いて2倍高調波(グリーン)、3倍高調波(ブルー)、4倍高調波(紫外)での実験研究を行っている。Table Iに主なガラスレーザー装置の諸元と動作の現状をとりまとめて示す。LLNLでは出力100 kJ級のNOVAが完成した。現在 on target 20 kJで動作しており、定格動作に向けてダメージの原因となるレーザ

ーガラスへの白金混入の除去、ストレス性複屈折による高出力時での変換効率低下の補正等を行っている。仏リメーユ研究所は、これまでのレーザー自主開発を断念し、基本的にはNOVAの2ビームに対応するシステムを米国より輸入したPHEBUSシステムを早期に完成させ、レーザー核融合の新しい展開をはかっている。

波長変換に関しては、 ω から 2ω へは70~80%, 3ω へは60~70%, 4ω へでも50% (エコーポリテクニク) の高効率変換が可能である。波長変換用 KDP 結晶についても、激光Ⅻ号では有効径40cmの単結晶が用いられており、NOVAでは、組合せアッセンブルにより口径70cmのビーム波長変換をおこなっている。ガラスレーザー技術の確立と相まって100 kJシステムの建設はNOVAのみならず、ソ連、フランス等でも近い将来検討される模様である。米国LLNLでは、さらに低コストのMJシステムの検討を開始しており具体的設計が報告された。激光Ⅻ号は、ブースターアンプ増設により100 kJシステムに増力しう設計となっている。ペレット爆縮実験の進展よりみて、可及的すみやかな増力による核融合点火、ブレークイーブン実験計画への着手がまれる。

ペレット爆縮実験に関する最大の成果は、多重衝撃波圧縮を実証し、高効率で安定な爆縮を達成したことである。典型的な爆縮ダイナミクスと対応したレーザー波形をFig. 2に示す。レーザー強度の上昇につれ、ガラスプッシャーが内向きに加速され、次々に内向き衝撃波を駆動する。これらの衝撃波が同時にペレット中心に到達するようペレットサイズ、プッシャー壁厚、レーザーパルスの上り時間等を設計することにより燃料ガスを一気に最大圧縮までもってゆく。この時点ではプッシャーはほぼアブレートしつつおればよく、効率の高い圧縮が可能となる。アブレートし残ったプッシャーの運動エネルギーで燃料を断熱圧縮する、いわゆるスタグネーション相がないため、プッシャー減速時のレーリー・テラー不安定がおこらず、安定な圧縮が達成された。このようなスタグネ

Table I Glass laser systems at major laboratories.

Laboratory — System	Beam No	Operation	
		fundamental	higher harmonics
ILE Osaka GEKKO XII	12	30 kJ	15 kJ (2ω) (on target)
LLNL NOVA	10	120 ~ 150 kJ	50 ~ 80 kJ (2ω , 3ω) (presently 20 kJ on target)
Rochester OMEGA	24	175 J/beam	2.5 kJ (3ω)
Rutherford VULCAN	6	1 kJ	0.5 kJ (2ω)
Limeil OCTAL	8	2 kJ (routine 1.2 kJ)	700 J (3ω) (on target)
PHEBUS	2	20 kJ (14 kJ on target)	(2ω , 3ω)
Ecole Polytech	6	450 J	290 J (2ω) 200 J (4ω) (110 J, 4ω on target)

ーションフリーモードによる圧縮により「体積点火」がおこなわれる。Fig. 3 にこのようなモードにより達成された最近の成果を示す。核融合中性子 10^{13} 個、ペレットゲイン 2×10^{-3} が達成された。

発生中性子数の増大により、圧縮コアパラメータの評価の精度が向上した。中性子放射化計測、D-D燃料を用いた場合の2次反応計測、ノックオンイオン計測、 α 粒子イメージ計測、高精度中性子 TOF 計測等である。圧縮コアの閉じ込めパラメータ $n\tau$ とイオン温度の達成値を Fig. 4 に示す。核融合点火、ブレイクイーブンへ向けて着実な進展をみせている。

今後の課題は、ペレット照射の一様性向上、爆縮のレーザー波長依存性の解明、クライオ等の新型ペレットの開発である。

照射の一様性に関しては、ロチェスター大学 LLE が24ビームシステムを用い、ビームプロファイルと、これを集光照射した場合のペレット上での照射強度分布との関係を詳細に調べ、数%程度の照射均一性をめざしている。NRL は ISI (Induced Spatial Incoherency) による均一照射の提案と基礎実験データを報告した。大口徑ビームを多数のセグメントに分割し、各セ

グメントビームの相互間の干渉性をなくし、ペレット上で均一に重ね合わせる方法である。この方法の利点として、波長 $1 \mu\text{m}$ 光で $2 \times 10^{14} \text{ w/cm}^2$ までラマン散乱がおこらないことが実証された。この方法で実現された均一な集光パターンを用いて、R-T 不安定性に関する実験が行われている。

爆縮のレーザー波長依存性については、Table I に示すように、ほとんどの研究所が 2ω ないし 3ω でのペレット爆縮と関連基礎実験を行っており、レーザー吸収、エネルギー輸送、アブレーション圧力の発生等に関し短波長ほどすぐれた特性を示している。 4ω まで波長を短くしたときも、さらに総合的な爆縮性能が向上するか否かが最適波長を見いだすために必要である。この点に関し、仏エコールポリテクニクのグループが6ビーム 4ω システムを用いて意欲的にデータを集積している。レーザープラズマカップリングに関しては優れた特性を示している。しかしペレット爆縮に関する評価は出力ビームエネルギーが小さく、 2ω , 3ω での実験と比較しうるレベルにはまだない。100 J の投射エネルギーで $(1 \sim 2) \times 10^8$ /ショットの中性子が発生し、球対象爆縮のX線像が得られており、

Fig. 2 Flow diagram and the positions of the Pusher-fuel contact surface which are measured by X-ray streak camera.

Fig. 3 Neutron yield and pellet gain versus laser energy from ILE, Osaka Univ., LLNL and LLE.

ビーム数の増大とハイパワー化により効率のよい爆縮の可能性を示している。

新型ペレットの開発については、多重衝撃波圧縮を可能とした LHART ペレットが製作された。直径 $1500\mu\text{m}$ 、壁厚 $1.3\mu\text{m}$ 、アスペクト比 500 以上で真球度、表面状態のよい DT 封入ガラス小球である。次の段階は DT クライオペレットである。これまでガラス小球に封入された DT ガスを固化し、レーザー照射、爆縮させる実験が阪大 ILE、米 KMSF で行われた。封入可能な燃料ガス圧に限度があるため、クライオ DT 層を充分厚くすることができず、シミュレーションで予測されるような DT クライオペレットの優秀性を実証するまでにはいたっていない。この困難点を克服するため、ガス封入セルを用いず、フリースタンディング DT クライオ

Fig. 4 Progress of pellet implosion toward the ignition condition.

シェル燃料の製作が試みられている。このような固化あるいは液化 DT シェルの骨組みとなるのは、低密度フォームである。 $50\text{mg}/\text{cm}^3$ 程度の低密度でかつ稠密な発泡物質を中空シェルペレット形状に製作し液化 DT をしみこませる。このようなクライオペレット開発状況が LLNL より紹介された。今後数年間各グループ間での開発競争と、爆縮パラメータの飛躍的向上の中心技術課題であろう。

(中井 貞雄)

3. 慣性核融合の理論

短波長レーザーによる爆縮が研究の中心課題となり、レーザーとプラズマの相互作用に伴うプラズマ不安定性から、エネルギー輸送・流体運動へ話題の中心が移ってきた。特に、爆縮の対称性が理論及び実験の重要な課題として取り上げられた。ロチエスター大学、LLE、NRL、Rutherford Appleton Lab、大阪大学、電総研、Ecole Polytechnique から照射不均一、レーリ-テイラー不安定性、爆縮コアの非対称性、熱的平滑化、照射不均一による磁場発生の効果等についての報告があった。大阪大学レーザー核融合研究センターからはスタグネーション時の燃料とプッシャーの混合を最小限にとどめる爆縮モードの提案があり、リバモア研究所と並び、 10^{13} 個の中性子発生に成功した。

Table II Two dimensional hydrodynamic codes of various institute for inertial confinement fusion.

Institute	Code	Method
ILE, Osaka Univ.	ILESTA	Linear Analysis
	HISHO- 2 D	Lagrangian
	IZANAMI	Fluid Particle in Cell
ILE, Rochester Univ.	ORCHID	Lagrangian
NRL	FAST 2 D	FCT Eulerian
Rutherford Appleton Lab.	POLLUX	FCT Eulerian
LLNL LANL	2 D-LASNEX	Lagrangian

3.1 レーリーテイラー不安定性

2次元のシミュレーションコードが各国の研究所で整備され、流体力学的不安定性の解析が進められるようになった。Table II には、今回のIAEA京都会議で報告された主な2次元流体コードとその計算手法をまとめている。

高利得の直接照射ペレットの爆縮では、爆縮時のアスペクト比(in flight aspect ratio)は100 ~ 150 となり、加速時のレーリーテイラー不安定性の成長率が古典値($\sqrt{k g}$)より十分小さく抑制されることが必要である。ロチェスター大学、ラザフォード研究所、大阪大学及びNRLでの2次元シミュレーションにより、0.35 μm もしくは0.25 μm のレーザーでは成長率が古典値の30%になることが明らかになった。これは、高利得直接照射ペレット爆縮を可能にするものである。

大阪大学及びロチェスター大学では、減速相での安定性についても解析がなされ、不均一照射に伴うペレット利得の低下が評価された。ロチェスター大学のペレット設計では、モード数 $l=8$ の照射不均一が2%以上で利得が1桁以上も低下することが示された。大阪大学のペレット設計では $l=10$ の3%照射不均一で利得の低下が1桁であった。今後、より高次のモードの不均一に対し、ホットスパークと主燃料との混合の問題を含め、ペレット利得への影響を調べる必要がある。より高次モードの解析

Fig. 5 The nonlinear growth of Rayleigh Taylor instabilities is shown in density contour plots at 0.5, 0.75 and 1.0 and 1.2 ns where the shaded regions correspond to $\rho > 1.2\text{g/cm}^3$ (solid density)

を可能にするためには、数値計算法について、新しい手法を開発しなければならない。

レーリーテイラーモードの非線形現象を、ラザフォード研究所では、POLLUX (2 Dシミュレーションコード) を用いて調べた。その結果より、線形成長は表面のひずみが波長の0.04倍以下の場合に限られることを示した。非線形過程では、spikeの部分は gt^2 (g は加速度) で成長し、bubbleの部分は $0.05 \sim 0.15 gt^2$ に従って成長することが示された。また、爆縮するshellの破壊はbubbleの成長により起り、shell

thickness, $\Delta R \simeq 0.05 \sim 0.15 \times g t_B^2$ で破壊までの時間が決定されることが明らかになった。ラザフォードのシミュレーションでは, Kelvin-Helmholtz Instabilityによる「きのこ形状」は見られなかった。シミュレーション結果をFig. 5に示す。

3.2 DT 燃焼の点火

Foam Cryogenic Target がリヴァモア研究所等から提案され, 直接照射による点火・DT 燃焼用のターゲット設計が明確になってきた。ロチェスター大学と NRL のターゲット設計では流体力学効率が10~15%に達しており, ホットスパークの球対称性, 温度, 密度, ρR とベレット利得の関係を爆縮シミュレーションにより明らかにした。

3.3 X線輻射と Radiation Driven Target

大阪大学とマックスプランク研究所 (ガルヒン) の共同実験の結果をもとに, キャビティ内の X線輻射スペクトルと輻射輸送のシミュレーション (ILE の 1 D 流体コード MIMICO による。) が比較された。平均イオンモデルを改良したプラズマ中の原子モデルを用い, 非熱平衡効果も取り入れた結果, X線強度及び全体的なスペクトル形状をよくシミュレート出来た。キャビティからのスペクトルが平板ターゲットの場合に比べ, いかに黒体輻射スペクトルに近づくかを明らかにした。ただし, X線スペクトルと O shell 及び N shell の輻射との対応は明らかでなく, 今後のプラズマ内の原子モデルの改良が必要である。

LANL (Los Alamos National Laboratory) / LLE から $0.35 \mu\text{m}$ 光で金コートの CH 球を照射した実験と LASNEX による輻射変換のシミュレーションとの対比につき報告があった。実験を説明する flux limiter が 24 ビーム (1600 J) と 6 ビーム (250 J) 照射に対し, 0.08 と 0.03 で異なることが指摘された。X線への変換効率はシミュレーション, * 実験とも 24 ビームでは $10^{13} \sim 10^{14} \text{ w/cm}^2$ で 80%, $10^{14} \sim 10^{15} \text{ w/cm}^2$ で 60

~70% になっている。Flux limiter の相違は前回の IAEA 会議で NRL 等から提案のあった, 不均一照射に伴う自発磁場の影響等が考えられる。

3.4 エネルギー輸送・磁場発生等

英国・インペリアルカレッジのグループから自発磁場の輸送及び Weibel Instability による発生につき報告があった。コロナ領域で不均一照射により発生するメガガウス級の磁場は, ネルンスト効果により, コロナからアブレーション面近傍へ輸送され, 横方向への熱伝導を抑制する。その様子が Fokker-Planck 方程式を解くことにより解析された。その結果, 熱速度の数倍の速度を持つ電子が熱輸送を支配していることを明らかにした。

マックスウエル分布のテイルの電子が熱輸送を支配していることから, 温度分布の特性長が平均自由行程の数10倍でも, Spitzer-Härm の熱伝導からずればじめる。リメール研究所 (フランス), Ecole-polytechnique (フランス), インペリアルカレッジ (イギリス), 大阪大学, リバモア研究所 (米国) 等の研究所で Fokker-Planck 方程式による非局所熱伝導の研究が進められ, 熱輸送のモデルを提案した。流体シミュレーションで非局所熱伝導を取り扱うための積分表示のモデルの提案及び新しいモデルによるアブレーションの解析 (大阪大学等) につき報告があった。高アスペクト比で高い流体力学効率を目標とするターゲット設計では非局所熱伝導が特に重要であると思われる。今後のターゲット設計での課題の一つである。

リメール研究所, リバモア研究所では, 古典吸収により加熱されたプラズマの電子分布がマックスウエルでなく, Super-Maxwell ; $\exp(-v^5)$ になることを取り上げ, 熱伝導係数が 0.31 ~ 1 の範囲で小さくなることを提案した。古典吸収により加熱されるプラズマの電子エネルギー分布と熱伝導及びアブレーションとの関係は, 短波長レーザーで遮断密度面がアブレーション面に近くなるほど重要になる。今後, より正確な解析が必要になってくるとと思われる。

(三間 罔興)

4. ビーム慣性核融合

ビーム慣性核融合における口頭発表は、米国、サンディア研究所および日本、阪大レーザー研より各1件合計2件であった。内容はそれぞれ軽イオンビーム (LIB) に関してであった。またポスター発表として、米国ローレンスバークレー研究所より重イオンビーム (HIB) について、スペイン、マドリッド工科大学よりイオンビームターゲットの計算機シミュレーションが、また日本より東工大及び長岡技科大より、軽イオンビームに関する発表があった。

慣性核融合の当面の目標は点火であるが、軽イオンビームはその可能性を秘めたドライバーとして有望視されている。当分野の重要研究課題は、1) 高性能パルスパワー電源の開発、2) 高輝度イオンビーム発生ダイオードの開発、3) ビームの収束・伝送技術の開発、4) イオンビームターゲット爆縮機構の解明である。それぞれの課題に関して、各国の研究機関で活発に研究が進行中である。

4.1 米国における研究

サンディア研究所では、LIBを用いた慣性核融合をめざしている。点火が期待できるLIB加速装置 PBFA II が稼動状態に入り、オペレ

Fig. 6 Artist's cutaway drawing of PBFA II. Energy from the capacitors in the outer annulus is delivered to the target in the center through the multi-module power-conditioning network.

ーション、高性能化、ビーム源開発を中心に研究が進展している。Fig. 6にPBFA IIの概略図を示す。

初期エネルギーとして、36モジュールのマルチクス発生器に13MJが蓄積される。モジュール間のジッターは、この段階において20nsである。パルス立上りは1 μ s程度である。

パルス成形部では、初期入力パルスの1/8にパルス幅を圧縮する。出力スイッチはレーザートリガー方式で、ns以下のジッターを実現している。KrFレーザーを用いSF₆ガススイッチを始動する。出力は100 TW 5.8MJで電圧は3.2 MVである。各パルスラインの出力は、スタック方式により12MVまで昇圧される。このスタックライン部でのエネルギー伝送効率は80%であり、4.6 MJが、インピーダンス変換伝送ラインへ送り出される。

伝送ライン数は72で、2.2 mの長さを有しており、4.3 Ω から10 Ω へとインピーダンスが連続的に変化し、電圧が約1.5倍に昇圧される。このときのエネルギー伝送効率は、輻射損失等を無視すると約95%である。

真空絶縁部は、直径3.6 m高さ4.8 mで、パルスパワーは、磁気絶縁ラインを通り、プラズマオープニングスイッチへと導かれる。この部分で2~3倍にパルス圧縮・昇圧され必要なダ

Fig. 7 The PBFA II diode and plasma opening switch (POS), which will produce the high-energy ion beam and direct it onto the central target.

Fig. 8 Schematic of current concept for a 3.3 MJ driver that uses ions with $A = 200$, $q = 3$.

イオード電圧30 MV に達する。プラズマオープニングスイッチの開路機構の物理的な説明および高速化についての研究が進行中である。

ダイオードの出力は30 MV で 5 MA となる。ビームイオン種は、リチウムを用いることを予定しており、イオン源の開発が行われている。Fig. 7 にダイオード部の構造を示す。

ローレンスバークレー研究所において、核融合用重イオンビーム (HIB) 加速器の基礎研究が進行中である。誘導線形型加速器を用い、低価格で建設できると考えている。Fig. 8 にこの概略図を示す。誘導コアには、アモルファスコアを使用する予定であり、これの特性を調査している。装置は4ビームで、3.3 MJ の出力を持つ。原子量 200, 荷電数 3 の粒子について、加速・伝送の計算を行ない設計が行なわれた。粒子のエネルギーは、100 GeV, 10 ns のパルス幅で、1 ビーム当り 100 kA となっている。このような大電流を得るためには、装置内でビームの重畳、バンチングが必要であり、この原理実証実験が今後の課題となる。

4.2 日本における研究

大阪大学レーザー研において励電Ⅵ号 (2 TW, 6.5 MV 0.3 MA, 30 ns) を用い、LIB による慣性核融合の基礎的な研究が進行中である。

高性能パルスパワー装置として超高電圧電源 (SHVS) が開発された。SHVS は、励電Ⅵ号の出力をケーブルで分岐し、誘導キャビティで電圧重畳を行ない、超高電圧を得る。現在設計

Fig. 9 a) The system of Super High Voltage Source. A pulsed power was guided from the ISC to the additional PFL. 40 outlets were set at the end of distribution live DL and were connected to the power feed cables. Voltages were added in induction cavities.
b) Structure of Induction Cavity.

ではパルス成形部からの出力の10～20倍を得ることが出来る。一部分が完成し原理実証、動特性研究が行なわれた。Fig. 9 (a) にシステムの概略および (b) に誘導電圧重畳キャビティの構造を示す。

ダイオード実験は、励電Ⅵ号パルス成形部からの出力を、インピーダンス変換ラインで2倍に、プラズマオープニングスイッチで3倍、合計6倍に昇圧して行ない、6.5 MVで行なったそのとき $10^{14} \text{ W/cm}^2 \text{ rad}^2$ の高輝度ビームを達成している。ビーム収束に関しては、自己磁場効果および仮想陰極効果の影響が大きいことを実験的に調べた。対策として、アノード曲面を非球面状に補正した。この結果収束径が1/2に改善された。

種々のターゲットに対するLIB照射により発生する爆縮駆動圧力が実験およびシミュレーションにより求められた。Fig. 10 にこの結果を示す。3 MeV のマホービンターゲットにおいて

通常のアブレーション型圧力の4～5倍高い値を得た。これは、キャノンボール効果によるものと考えられる。計算機シミュレーションの結果は実験結果とよく一致している。

東工大において、ダイオードイオン源の研究を主として行なっている。クライオジェニッ

ダイオードによるチッ素、アルゴン等のイオン発生が研究された。また0.2.Hzの繰返しパルスパワーシステムが稼動している。長岡技科大において、線形誘導形イオン加速器の研究、種々の形状のダイオード特性研究および計測器開発が進行中である。

4.3 スペイン

マドリッド工科大学において、爆縮の計算機シミュレーションの研究が行なわれている。HIBおよびLIBターゲット爆縮のプログラムが開発され、点火—高利得ターゲットの設計が調べられている。またLIBとアブレーションプラズマの集団的な相互作用に関する理論的な研究が進行中である。

(今崎 一夫)