



核融合研究の新しい展開

核融合科学研究所 藤原正巳

西暦2000年の新千年紀はまさにプラズマ核融合の研究にとっては大きな節目の年である。20世紀は2度の世界大戦を始めとする多くの戦争の時代であり、一方で輝くばかりの科学の発展の時代でもあった。数々の悲惨な戦争の経験、多くの分野の科学技術の進展と人間の知識の増大、情報革命等々の集約として、ようやくにして人口、食料、エネルギー、環境等の面で人類の行末について世界規模での検討がなされるようになった。

核融合の研究は、資源、環境、社会への受容性などの観点で未来のエネルギーとして囑望されつつも、超高温プラズマの制御の難しさで研究開始から半世紀に近い長い年月を要したが、近年何とか炉心プラズマに近い状態を手の内に入れられるところまで来た。次期計画として実際に自己燃焼に近い大きな核融合出力を実証するITER（国際熱核融合実験炉）計画を検討し、過去ほぼ10年にわたる設計活動と、必要な工学R&Dを世界規模で行い、かなり煮詰まってきた。

一方、ヘリカル型装置は核融合科学研究所のLHD（大型ヘリカル装置）を中心に大きな進歩を見せており、数千万度のプラズマの実現に漕ぎ着け、2千万度を超えるプラズマの80秒運転を達成している。ドイツでも一連のWendelsteinシリーズの研究を基盤にしてLHDと同規模の超伝導ステラレータ（W7-X装置）を建設し2006年完成をめざしている。またいくつかの新しい閉じ込め磁場構造（Quasi Helical Symmetry, Quasi-Axisymmetry, Quasi-Iso-Dynamics等）を生み出しているのもヘリカル系の研究の活力を示している。そのほか、球状トカマクが平均 β 値で40%に達する等の進展もあり、ミラー閉じ込めでは静電プラグ実験や高 β での揺動の研究が続けられている。慣性核融合も固体の千倍圧縮の実現や高強度レーザー技術の発展と相まって高速点火等の新しいアイデアの進歩を示し、またNIF（国立点火施設）やLMJ（メガジュールレーザー装置）などが建設されている。

プラズマの物理も昔の線形波動、エコー、ソリトン等の頃から比べるとクーロン結晶、渦結晶等の興味ある基礎物理の進展もあるが、核融合プラズマに関してHモード、VHモード、負磁気シアモード等の閉じ込め改善モードの研究、ダイナモ機構、リコネクション、磁気流体乱流に関する理解や、ヘリカルプラズマの電位振動に関連した典型的な分岐状態の研究など多くの知見が得られてきている。

さて冒頭にも述べたが、今年は核融合の研究にとって、(1)ITERや大学、日本原子力研究所等の種々の研究をどうするか、(2)省庁統合と研究の推進方策、(3)大学および共同利用機関の独立行政法人化、とプラズマ・核融合の研究および体制等に深く関連する問題が重なり合い、かつこれらに対しては早急に目途を立てねばならないと考えられる。

核融合の研究は最初にも述べたように研究が進展し、核融合開発のステップとして重要な核融合燃焼プラズマ研究のための基盤が整ってきたと考えられ、ITER計画が検討されている。最近の設計によれば $Q \sim 10$ 、 ≥ 400 秒運転、 ≥ 400 MW核融合出力を標準運転としている。アルファ粒子加熱が70%以上で自己加熱、十分な平衡状態の燃焼プラズマの知見を得ようというものである。そのほか $Q \sim 20$ の短時間運転、 $Q \sim 5$ の定常運転などを研究の主要目標としている。いわば長時間核燃焼実験炉の位置づけである。技術的には発電を除いて、核融合炉に必要な炉工学技術の大略（すなわち40~50 GJの超伝導磁場、第一壁構造材やダイバータ等の材料技術、ブランケット、トリチウム燃料技術、安全工学等）が盛り込まれている。中性子束強度や全照射量が以前の6割程度になっているが概略は以前の設計と同じである。本来核融合、特にDT炉の場合、単なるローソン条件の $n\tau T$ だけでなく β 値の制限、制動輻射や熱的不安定性の制限や等温プラズマ条件などに加えて、中性子壁負荷制限なども考慮すれば、平均10 keV、 10^{20} m^{-3} のプラ

メータならば 1 MWm^{-3} の核融合出力密度となる。500 MW 出力ならば現段階では ITER 程度の装置規模になる。もちろん核融合炉開発としては今後小型化、定常化等の研究をしていかねばならないが、いずれにしても核融合をエネルギー源として世に示すことが必要な時期にそろそろ来ているのではと考える。

ただし、巨額の費用を要することや、将来の炉のイメージを備えた最初の装置であるという点で種々の角度から十分に慎重な議論を必要とし、研究の進め方にも以下に述べる事柄等の幅広い視野が強く求められる。

ITER を実施するならば、トカマク方式の核融合の開発の中心装置として遂行するだけではなく、大事なのは磁場核融合燃焼プラズマの物理、技術をあらゆる角度から徹底して研究し普遍的な成果を蓄積することである。磁場核融合にとって共通の重要なベースとなるような研究になるべきで、大学等の研究者の参画する意義もそこにあり、また研究の進め方もそのようになるべく進められねばならない。

さらに、大切なことは、これまで大学、核融合科学研究所を中心として行われているいわゆる、先進方式の研究は一層の充実発展を図るべきで、どれかをやるから、どれかを止めるという議論では核融合の研究は幅の狭い、発展のないものになっていくだろう。実際、核融合炉実現のためには、ITER 以外の研究は必須である。ITER が実現すれば、それによって超高温燃焼状態のプラズマに対して研究を行うことができるものの、核融合炉の実現のためには、循環パワーを極力減らすための研究や、さらには環境整合性の観点からアドバンスド燃料核融合の研究も別途並行して推進する必要がある。炉工学技術に関しても同様で、実用炉をめざして（例えば中性子源を用いた低放射化材料開発等）の広範にわたる炉工学分野の研究が大学等で進められていくことが重要である。理論研究もしかりである。大学の幅広い、多様な研究が大きなプロジェクト研究の基盤として充実していることが、取りも直さずプロジェクトを成功に導き、その後の研究の進展に不可欠のことと考える。強調しなければいけないのは、研究者が独創的な発見をする機会を作り出すことで、そのための研究計画を拡大しなければならない。特に核融合のような長期研究はそうである。ただし、これまでの大学の多岐路線もアドバンスド核融合の研究等も視野に入れて一度見直しが必要である。

なお、大学の研究には学術（共通の学問分野の形成、宇宙、天体、その他の分野へのつながり）としてのプラ

ズマ核融合研究の発展という大きな使命が課せられてきているわけで、今後もこの点は極めて重要である。これまでの大学のコンセプトの開発研究もその観点からも再検討し、また ITER を進めるならそれも含めての幅広い学術的基盤を充実発展させることができるように全体のビジョンを作り上げる必要がある。

ITER 建設に着手するにあたっては、何よりも大切なことは、10年以上の長きにわたって、本当に熱意ある大型装置建設の経験者と意欲に富んだ若手研究者の組織ができるかにかかっているのではと思う。

また、ITER はいずれにしても国際協力事業であり、専任部隊も当然国際チームになるわけで、組織は独立のものであるが、日本国内に大学、核融合科学研究所、日本原子力研究所の研究が一体になってこれに参画するような研究の総合的推進体制を作ることが求められるだろう。組織的には疎結合であっても研究は密接に連携する体制である。

省庁統合に関しては2001年正月からとなっており、前述の大学、原研、ITER、核融合科学研究所の研究の相互関係、すなわち研究内容、推進方策、体制をどうするかという研究全般にかかわる広く大きな問題である。ややもすると研究体制のみで議論することになりかねない。まず核融合研究を今後どうするかという検討が第一で、その後、そのための体制の検討をすることが手順であろう。今まで述べてきたようなことを背景として、昨年発足した大学および研究機関間の連携協力に関する協議会や拡大核融合研究ネットワークがこれらのことを検討することに寄与できればと思う。

なお、最後になったが、大学、大学共同利用機関の今後について大きな検討課題となっている独立行政法人化については、学問・研究の自由の確保、学術研究・高等教育に関する自主性・自律性の確保と自己責任、適切な評価システムの確立、財源の確保等、組織・運営等が重要な検討項目となっている。大学共同利用機関は大学研究者とともに国際的に最先端の学術研究の推進を行うことや、その特質を活かした高等教育の場であることがその設立の趣旨であるので、大学共同利用機関の役割、機能に留意しつつ大学と歩調を合わせるのが自然であるというのが主な検討の方向となっている。

いずれにしても核融合の研究はこの1、2年が大きな節目であると考えられ、それだけに十分な議論と種々の点で従来の枠にとらわれない発想が重要となろう。