



磁場核融合30年

藤原 正 巳 (核融合科学研究所名誉教授)

核融合の研究に携わって30年を超える。陽光柱プラズマや水銀グロー放電プラズマなどの熱揺らぎやイオン音波臨界揺らぎなどの基礎実験から移って名古屋大学プラズマ研のステラレータ JIPP-I に参加したのが始まりである。日本原子力研究所が内部導体系も含めて軸対称トラスで大学サイドは非軸対称トラスで出発だという話を聞いたことがある。

当時は装置も主半径 0.5 m, 磁場も 4 kG, プラズマの温度も低く閉じ込め研究の黎明期, 基礎的段階であった。プリンストンの一連のステラレータ実験がいわゆるボーム拡散でうまくいかず, トカマク T-3 の実験が 1 keV の温度, ms の閉じ込めを示し, 世界的に転換がおきる前後の頃である。しかし, 筆者らの行った研究はプラズマ内部の渦対流セルの起こす輸送や $E \times B$ 回転の起こす不安定性, 磁気シアによる有界面損失や種々の不安定性の抑制など今の閉じ込めの物理研究の根底をなすものであったと思っている。

プラズマ研究所はその後, 種々議論を経て JIPPT-II というステラレータ・トカマク複合型装置による計画をスタート, その後 JIPPT-IIU というトカマクに改造した計画を主力に, 複合型カスプ計画, 逆磁場ピンチ, バンピートラス, 相対論的ビームリングなど様々な閉じ込めの研究が行われた。共同利用研での種々の特徴を持つプラズマとして大学研究者の研究に役立った。またこれらの研究を通して培われた知見, 技術はその後の研究に大きく役立っている。例えばバンピートラスで言えば, 物理としてはトラスプラズマの電場の物理である。磁場の回転変換を持たないバンピートラスでは $E \times B$ 回転が鍵でありトラス状の閉じた等電位面の形成によりプラズマを閉じ込めているわけである。当然非軸対称磁場であるため電子, イオンの輸送に関連して電場が形成されるが, 得られた種々の研究の成果はトカマクの H モード物理等の基盤を与えていると思っている。またジャイロトロン技術の開発や, 重イオンビームによる電位計測なども大きな財産を残した。28 GHz, 200 kW・CW のジャイロトロン管や真空窓(当時はセラミック, サファイアなど), マイターバンドなどの伝送技術などは, その後の技術開発の根底をなしている。

そのほか大学ではヘリオトロン, タンデムミラー, 慣性核融合などが行われ, 日本は核融合に関してはほとんどの方式, 概念が研究されていた。石油ショックなども影響して新エネルギー開発の必要性が強調されたことも背景にあった。

プラズマ研が昭和53年頃から第3次計画として R 計画を検討し始めてからが新しいフェーズに入った。要するに1千万度のプラズマは2次計画で終わり, 核反応プラズマの研究へということであったが, 研究費や放射線を扱うことの大変さなどもあってなかなか出発しなかったし, 他方式の計画とのせめぎあいでも新しい時代の始まりにはいつものごとくコミュニティで激論が交わされた。昭和60年から61年の学術審議会核融合部会の専門委員会やその下部組織のワーキンググループでの年を越える議論は今でも目に浮かぶ。長い間の厳しい議論の末に大型ヘリカル計画が策定された。計画を策定できたのはヘリカル型の研究関係者の熱意は勿論のことだが, 大学の研究者がまとまってやっていこうという大人の知恵が大きな役割を果たしたと思う。この間の事情はこの短いページでは書けないので別の機会に譲りたい。大型ヘリカル装置は大学の研究者全体の努力で設計・建設が平成元年から始められ, 新しくスタートした核融合科学研究所でおよそ10年に亘って行われ無事完成した。その間, プラズマ研, 京都大学ヘリオトロン研究センター, 広島大学核融合理論研究センターの合同による研究所の設立, 建物その他の研



研究所施設建設，大型ヘリカル装置の建設と目のまわる忙しさと研究とは次元の異なる種々の困難があったが飯吉先生をはじめとして，多くの人たちのお陰で何とか乗り切れた．大型ヘリカル装置その他，研究所の研究成果はLHDで数千万～1億度の温度，0.1～0.3秒閉じ込め，最近ではベータ値3～4%達成などの重要な成果は，これまで報告されてきたとおりである．また新研究所発足の少し前に建設したCHS装置は低アスペクト比の可能性を調べる目的で建設したが，閉じ込め性能が他と同程度の性能であり，従来言われていたメルシエ不安定領域でも安定なこと，非軸対称トーラスの電場の役割，特に電位振動の発見，ヘリカル系では初めてのHモードや輸送障壁の解明，最近では帯状流と乱流輸送の物理実験など多くの興味ある重要な先駆的成果が出され，計画出発時に言われたさまざまな意見にも十分対応できたと思っている．

ここ30年の間，研究環境の変化はめまぐるしい激動の時代であったが，核融合研究そのものの進展は目を見張るものがある．T-3の結果が出るまでの核融合研究の当時の困難は，いろいろの装置で研究したがなかなか1千万度のプラズマが実現できず，どうやったら作れるかの1点であった．既に述べたようにミラー，ヘリカル，バンピートーラス，レーザー，ビーム，内部導体，多くの方式が試行錯誤された．それらのいくつかはうまくいかず中止されてきたが，その特徴あるプラズマの研究や，そこで開発された技術はその後の進展に大きく役立った．今日ではトカマクは勿論，ヘリカルなども炉心に近い状態を実現しつつある．

さてITERについてはレーガン・ゴルバチョフ会談(1985年)で話が出て以来CDA3年，EDA6年，延長期間，等々で既に20年近くになる．核融合が1億度，秒のオーダーの閉じ込め時間を達成して，次に自己点火・燃焼を目指すのはエネルギー開発として当然の必要不可欠なステップである．燃焼プラズマの知識が現実を得られてこそはじめて実際の炉が設計できるわけである．ITERについてもやはり核融合が新しいフェーズに入る時期の議論が更に激しく起こった．特に平成11年頃から原子力委員会核融合会議，特別に設けられたITER懇談会での議論では，核融合がエネルギー開発としてどのように進むべきかについてコミュニティ内外の識者により真摯な検討がなされた．この間の事情，経緯も科学・社会・政治等々に関連して今後の研究，特に巨大科学の進め方に極めて貴重な参考になるが，あまりに膨大すぎてとてもここに書けるものではない．機会があれば改めて述べたいと考えている．多くの人たちが長く厳しい議論の末に決めたことであり，日本が主役を果たせることを今後の若い人たちに期待したい．大型ヘリカルの時もそうであったが，核融合の研究はその実現に向けて新しい知見を得るために常に先端を切り開いていくことが重要で，ITERも核燃焼プラズマ実現という核融合に必須のステップに取り組むものとして方式の議論を超えた重要課題である．研究は，着実にやっていくことは勿論大切だが，先端を息咳切って切り拓いていくことにより進んでいくものであると思う．

しかし現実に1億度を超えるプラズマを手に入れ，その

知見をベースに核融合炉を想定してみると，装置の大きさ，磁場エネルギーの膨大さその他はこの30年で新しく解明されてきたものに基づいて想定されるものというよりは，ずっと以前に出されたロシアのグロービン炉と大して変わらない大きさにおさまっているわけである．1億度， 10^{20} m^{-3} の核融合プラズマが出力1～2 W/ccで軽水炉の30～50 W/ccに比べてずっと低いので装置がある程度大きなものになることはすぐわかるが，今までは高温プラズマの閉じ込めにくさからとてつもなく大きなものになるのでは思われていたのが100万 KW レベルのエネルギーを出すのに，例えばITERなどの規模の核燃焼装置でできる，というところまで研究が進んできたといえる．他方，核融合炉は，軽水炉のように蜂の巣構造で多数の燃料棒を冷却媒体などが取り囲み，第一壁や冷却のための面積が十分に確保できる構造とは違って，一体ものであるプラズマを囲む外側の第一壁などの面積はそう大きく確保できない．磁場核融合では，例えば閉じ込め性能が10倍よくなり，ベータ値も向上したとしても，今度は中性子壁負荷の限界から炉壁の面積がある程度大きくなければならず，装置をコンパクトにするにはプラズマの高ベータ化は勿論，質的飛躍をもたらす新しい材料の開発も重要である．閉じ込めの研究が進んで小さな装置でできるようになれば低コストの炉ができるという人がよくいるが，同じ出力密度のままでは総出力も小さく，結局エネルギー単価は安くないわけである．いわば，核融合炉はもともとの基本概念のところでもう少し工夫が必要であるのではと思うこの頃である．

しかしながら，エネルギー問題は中国を含め，巨大な人口を抱えるアジア，アフリカなどの国々のこれからの経済発展に伴う膨大なエネルギー需要を考えれば，量的には勿論，また炭酸ガス排出に伴う地球温暖化の観点からも，どうしても資源豊富で環境に適した新しいエネルギー源の開発は最重要課題であることは間違いない．核融合研究もそこに大きな価値があり社会から期待もされているわけで，毎年100億以上の予算が投入されているのもそこにある．単なる基礎科学ではないからである．

ここ2年くらい原子力委員会核融合専門部会で平成4年に策定された核融合開発基本計画の見直しをしてきた．学術として進めることが重要である半面，環境問題がシリアスな状況に至る前に基幹エネルギーの候補として役に立つには時間がそうないのではと考えられる．この検討内容が核融合のこれからのあるべき方向にいくらかでもお役立てる報告になればと思っている．

ITERのサイトが決まって核融合が新しいフェーズになるのを待っていたため巻頭言が延び延びになってしまった．関係者の努力にもかかわらずサイト決定は膠着状態が続いている．

ITERは，プラズマが自身の核融合燃焼により自己加熱し，燃焼を維持し続けるという核融合研究50年で初めての試みであり，早期にサイト決定され，計画が進むことを望みたい．