

磁気閉じ込め核融合

Fusion Energy Researches on Magnetic Confinement

桂井 誠*

Makoto Katsurai

1. プラズマの磁気閉じ込め^{1,2)}

核融合反応によってエネルギーを大量に取り出すには、燃料となる重水素 (D) と三重水素 (T, トリチウム) を1億度 ($\sim 10\text{keV}$) 以上の高温プラズマ状態にして、炉容器壁から隔離した状態で保持する必要がある。これをプラズマ閉じ込めと呼ぶが、その具体的手段として磁気力を用いた方法があり、これが磁気閉じ込め核融合である。

磁界は、運動する荷電粒子 (イオンとか電子) に、その速度と直交するような力を及ぼし、サイクロロン運動を生じさせる。これによってイオンと電子の集合体であるプラズマは磁力線にトラップされることになるが、その効果は磁力線に垂直方向のみであり、磁力線に平行方向については何らかの対策を必要とする。その具体的な対策として考えられているものがミラー方式とトーラス方式である。

ミラー方式とは図-1のように、二つの円形コイルを用いて、両端が絞られたような形状の磁力線を生じさせる方式である。この中央部に注入された荷電粒子は、磁力線に対して浅い角度で旋回する一群を除いて、両端部間で往復運動を行い、磁力線に閉じ込められることになる。一方、トーラス方式とは、図-2のように直線電流あるいは円環状のコイル (トロイダルコイル) を用いて閉じた磁力線を生じさせる方式である。この内部において、荷電粒子は磁力線に沿って周回し、ドーナツ状のプラズマが閉じ込められることになる。しかしながら、図-1,2に示した両方式の基本単純形は、このままではプラズマの閉じ込め能力が著しく不十分である。

そこで、磁気プラズマ閉じ込めの研究では、図-1,2の単純ミラー磁界、単純トロイダル磁界を出発点とし

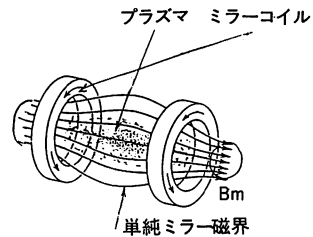


図-1 ミラー方式

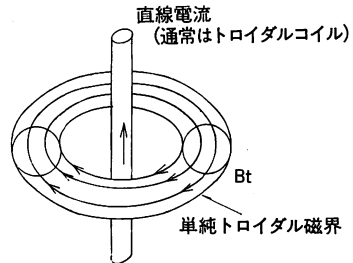


図-2 トーラス方式

て、それ等を如何に改良したら閉じ込め性能が向上するか、という課題が主要となる。図-3には、今日研究されている主要な磁気閉じ込め方式と、それ等の相互関連が示されている。

2. ミラー方式の改良

図-2に示したミラー方式は前述のように、磁力線に対して浅い角度で旋回する粒子を端部より逃がしてしまうので、内部に閉じ込められるプラズマの速度分布は熱平衡状態のマクスウェル分布から大きくはずれたものとなる。一般に、熱平衡からはずれた状態のプラズマ内には、各種の不安定現象、乱流現象が生じ、それが磁気閉じ込め効果を著しく損うことが知られている。図-1の単純ミラーもまさにその典型であって、このままでは大変密度の低いプラズマしか閉じ込められない。そこで、両端よりの粒子損失を押えるために各種の研究が行われたが、今日注目されているのは、図-

* 東京大学工学部電気工学科教授
〒113 東京都文京区本郷7-3-1

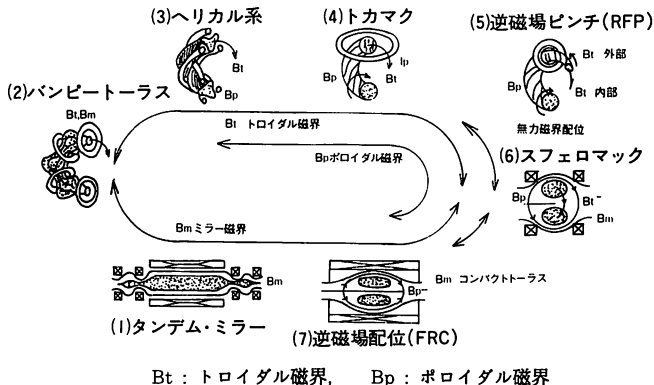


図-3 各種磁気閉じ込め方式の関連

3内(1)のタンデムミラー方式である。

タンデムミラーは単純ミラーの両端部それぞれに小型の端部ミラーを連結させたもので、端部ミラー内に、外部より高速の中性粒子を入射して軸方向に往復運動するイオンを発生し、これによって軸方向の電位分布を形成する。この電位分布を適当に制御することによって、中央部の主ミラー部に閉じ込められるプラズマの軸方向損失を軽減させることができる。

ミラー閉じ込めにおける軸方向プラズマ損失を減らす別の方法として、図-3(2)のようにミラー装置を円周上に多数個連結するバンピートーラス方式がある。またさらに別の方法として、図-3(7)のようにミラー部の中央部で周方向の電流を駆動して、磁力線を中心軸上およびその近辺で逆転させ、これによって磁力線に沿っての粒子の逃げを抑える方法もある。これは逆磁場配位 (FRC) と呼ばれている。

3. トーラス方式の改良

図-2に示した単純トーラス磁界はプラズマの閉じ込め能力がない。理由は次のとおりである。まずこの磁界の中で旋回運動をするイオンと電子は、径方向の磁界の不均一性、および磁力線に沿って運動する際に受ける遠心力、の両作用によって、それぞれ上下方向に分離してしまう。すると、この荷電分離によってプラズマ内には上下方向の電界が発生し、この電界と磁界との作用で、プラズマ内のイオンと電子は径方向にドリフト運動を起こして逃げていってしまう。これをトロイダルドリフトと呼んでいる。トロイダルドリフトを抑えるためには、上下方向に分離したイオンと電子を、何らかの方法によって中和させてやればよいわけで、その方法としては、(1)ドーナツ状の磁力線配位を

トーラス方向に凸凹構造とする。これによって粒子は周方向(ポロイダル方向)に回転を行うため、上下に分離したイオンと電子が中和される。および(2)磁界に新たに周方向成分(ポロイダル成分)を与え、磁力線をトーラス方向に回転移動させる。これを回轉變換と呼ぶ。回轉變換によって分離したイオンと電子は磁力線に沿って短絡され中和される。回轉變換を与える方法としては、図-3(3)のようにヘリカルコイルを用いるもの、図-3(4)のようにプラズマ内にトロイダル方向のプラズマ電流を流すもの、に大別される。前者は様々なコイル形状の組み合わせが用いられ、それ等を総称してヘリカル系と呼んでいる。一方後者は、よく知られたトカマクである。ヘリカル系においては、外部コイルのみで閉じ込め磁界が形成されるために、本質的に定常運転が可能であるが、トカマクにおいては、プラズマ電流はそのままでは抵抗減衰するから、定常運転のためには何らかの電流駆動を必要とする。

ところで、ヘリカル系は、基本としてヘリカル状のコイルを用いるため、磁力線はトロイダル方向に凹凸を有し、この点から図-3(2)のバンピートーラスと共通の物理を有している。

さて、トカマクにおけるトロイダル磁界 B_t に相当する成分をもプラズマ電流によって発生させようという方式がある。この場合、閉じ込め磁界は全面的にプラズマの内部電流によって発生される。このとき、プラズマが力学的に平衡状態にあるためには、プラズマ内の磁界と電流の作用力がゼロでなければならない。これが無力磁界配位であって、その例が図-3(5)の逆磁場ピンチ (RFP) である。RFPにおいては無力磁界配位の性質上、周辺部のトロイダル磁界は中心部とは逆向きになる。RFPをずんぐりさせ、さらに周辺部

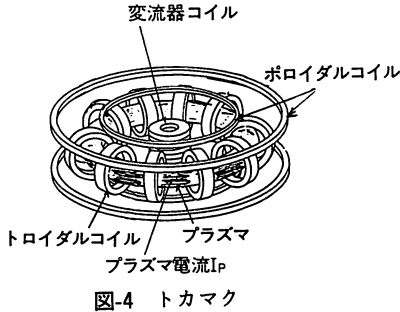


図-4 トカマク

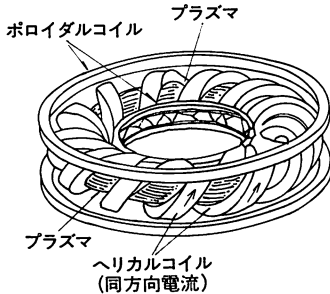


図-5 ヘリカル系 (ヘリオトロン/トルサロン方式)

のトロイダル磁界をゼロとしてしまうような配位が図-3(6)のスフェロマックである。スフェロマックにおいて中心対称軸に沿ってコイル等が貫通しておらず、見かけの構造は前述した図-3(7)のFRCと類似している。そこでこの両者はコンパクトトーラスと呼ばれている。FRCにおいては、スフェロマックが有するトロイダル磁界を有していない。

4. トカマクとヘリカル系

図-3に示した多くの磁気閉じ込め方式の中で、今日、最も研究が進んでいるものはトカマクである。そこで以下、このトカマクについてより詳細にその構造を述べ、あわせてそれに続くヘリカル系に触れておこう。

トカマクのコイル系は図-4に示すように (1)トロイダル磁界 B_t を発生するトロイダルコイル、(2)プラズマ電流 I_p を誘導する中心変流器コイル、(3)プラズマが外側へ拡がろうとするのを押えるポロイダルコイル(平衡コイル、垂直磁界コイルとも呼ばれる)、の三つのコイル系より構成されている。真空容器はトロイダルコイルの内側に設置される。動作は、まず、変流器コイルの磁束変化で真空容器内にプラズマを発生させ、同時にプラズマ電流を駆動する。このプラズマ電流の抵抗発熱によってプラズマは数10万度ないし1千万度以上に加熱される。プラズマ電流による温度上昇はこの程度が限度であって、さらに目的とする1億程度にまで加熱するため、外部より中性粒子ビームとか

高周波電力をプラズマ内に注入する。これを追加熱と呼んでいる。

一方、ヘリカル系には多くの種類があるが、その代表は図-5に示すヘリオトロン/トルサロン方式である。この方式においては、2本の線状コイルに同方向の電流を流し、コイル間に閉じ込め磁界を発生させるが、さらに図のようにポロイダルコイルによる垂直磁界を加えて磁気配位の特性を最適化する。高温プラズマを発生するには、まず高周波電力で放電を起こし、それをターゲットとして中性粒子ビーム等を注入する。このようにして、ヘリカル系においてはトカマクと異なり、内部に電流を流すことなく定期的にプラズマを保持することができる。

5. 核融合炉条件—ローソン図

ここで、重水素—三重水素(DT)反応を用いて、エネルギー源としての核融合炉を実現するための条件を説明しておこう。その条件はプラズマの温度 T [KあるいはeV]と、密度 n [個/ m^3]の他に、通常“閉じ込め時間”と呼ばれ τ_E [s]で表わされる量が問題とされる。閉じ込め時間は、しばしば、プラズマが保持されている時間、と誤解されているが、そうではなくて、エネルギーの平均滞在時間に相当するものである。すなわち、ある瞬間に注入されたエネルギーは、平均 τ_E 程度内部に滞在した後に逃げ出してしまう、という意味である。より物理的には、プラズマ内の平均エネルギー密度は $(3/2)n k T$ 、 k はボルツマン定数、で与えられるが、その時の単位時間当りの損失熱はそれを τ_E で割った $(3/2)n k T / \tau_E$ で表わされる、ということである。この時、プラズマを定常状態に保っておくには、この量と等しい加熱を外から与える必要がある。

さて、核融合炉の条件は、温度 T と、密度と閉じ込め時間の積 $(\bar{n} \cdot \tau_E)$ 、の二つのパラメタで与えられ、図-6のローソン図で示される。同図の縦軸はプラズマの中心温度、横軸は平均密度 \bar{n} と τ_E との積である。 T 、 n の代りに中心温度 T_0 、空間平均密度 \bar{n} で表わすのは、測定値としてそれらが直接得られるからである。

同図においてゼロ出力条件とは、プラズマ加熱電力と核融合反応出力とが等しい条件であって、この達成が核融合開発の当面の目標と考えられている。しかしもう少し緩い条件として、我国では臨界プラズマ条件(時には単に臨界条件と呼ばれ、後述の点火条件と混同されている)なる用語があり、これは図-6において

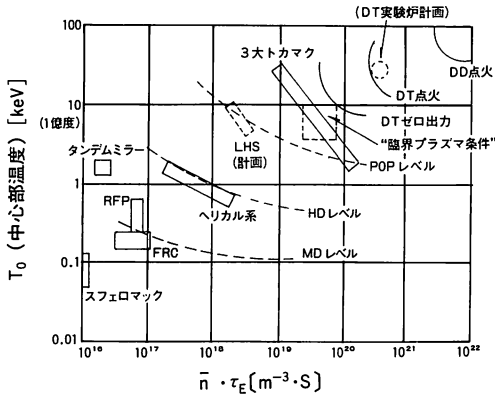


図-6 ローソン図

ゼロ出力条件の左下の枠内に相当する。この条件のプラズマに、燃料を数100keVの高速で入射するとゼロ出力条件が得られるが、それ以上の向上は望めない。

上記のゼロ出力条件達成は、核融合エネルギー源開発の科学的実証の第一歩と云われるが、これでは実用化にとって不十分で、実際は点火条件の達成が求められる。点火条件とは、DT反応において3.52MeVを持って生成される α 粒子 (He^4) が、プラズマ外へ逃げ出す以前にそのエネルギーをプラズマに与え、プラズマの熱損失を補うような条件である。この状態に到達すれば、プラズマは外部からの加熱なしに α 粒子によって内部加熱され、云ゆる核燃焼を始めることになる。なお次章に説明される慣性核融合においては、ゼロ出力条件を達成するのに α 粒子の内部加熱が必要であり、点火条件は、ゼロ出力条件と大略等価と考えられる。慣性核融合をエネルギー源として活用するには、 $\bar{n} \cdot \tau_E$ 値で $3 \sim 10^{21} [m^{-3} \cdot s]$ 程度と、磁気閉じ込めの点火条件より1桁大きい値が要求される。

以上の説明はDT反応を対象としていたが、DT反応においては天然に存在しない三重水素を炉自体において増殖する必要がある。三重水素の増殖は、真空容器の外部に設置したブランケットと呼ばれる部分で行わせる。すなわち、このブランケットの内部にリチウムLiを装荷し、それにDT反応によって生ずる中性子 n^0 を衝突させ、 n^0 によるLiの分裂反応で三重水素を作る。結局、核融合といっても、DT反応を用いる限り、その資源量はリチウムの埋蔵量で制限されることになり、それは天然ウラン並みと推定されている。DT反応のもう一つの問題点は、三重水素の増殖を効率良く行うために、14MeV中性子の経済性を高める必要があること、すなわち中性子の容器壁等での吸収を極力押えなくてはならない、という点であ

る。このためにリチウム装荷ブランケットとプラズマとを隔離する真空容器壁は、数mm以下、と大変薄くしなくてはならない。この壁の損傷問題は材料工学上大変深刻な課題と考えられている。

さて、このように、DT反応におけるトリチウム問題を抜本的に解釈する方法は、DT反応に代って、重水素のみのDD反応を利用することである。ところが、DD反応の反応率はDT反応に比べ大変低く、DD点火条件を達成するには、図-6の右上のようにさらに厳しいプラズマ条件を必要し、その達成可能性は未知である。

今日の核融合プラズマ閉じ込め研究は、図-6に示すようにトカマク方式が先行しており、プラズマパラメータとしてはDTゼロ出力の一步手前にまで到達している。プラズマ閉じ込めの研究は、図-6の左下から右上へと上昇する様子でその進展の状況が把握でき、便宜的に、MD (中位開発) レベル、HD (高度開発) レベル、POP (原理実証) レベル、等に分けることができる。この分け方に従うとトカマクは約10年前にPOPレベルに到達し、今後数年以内にゼロ出力レベルに到達するものと期待されている。

一方、二番手としてトカマクの後を追っているのはヘリカル系であり、さらにその後をミラー方式、RFP方式が追っている。コンパクトトラスのFRC、スフェロマックは未だ基礎研究の段階である。バンビートラスはHDレベルに到達したもののPOPへ発展されることなく計画が中止されている。

6. 主要装置

ここで目下活躍中あるいは建設中のプラズマ閉じ込め実験装置の代表的なものを幾つか紹介する。

6.1 トカマク³⁾

今日、三大トカマクと呼ばれるものが米国、EC、日本でそれぞれ稼動している。すなわち、

- 米国、TFTR プリンストン大学
- EC、JET (英国) カラム研究所
- 日本、JT-60 日本原子力研究所

これらの装置は図-7に示すように大半径3m程度、プラズマ小半径1m程度、プラズマ中心磁界3~5T、プラズマ電流3~6MA、追加熱電力10~20MW、装置建設コスト1~2千億円見当、という規模で、すでに2~3年の本格的運転を行っている。実は、これ等の装置が10年前に設計された時点においては、トカマクのエネルギー閉じ込め時間 τ_E のスケーリングにつ

いては楽観的予測がなされ、ゼロ出力条件の達成が見込まれていた。しかし実際に研究が開始されると、 τ_E が、追加熱電力の増大に伴って急激に劣化を始めるという現象が発見され、云ゆるLモードスケリング (L: low) と呼ばれる深刻な事態に陥った。今日では、Lモードを共通の出発点として、そこから如何に脱却するかがトカマク研究の最大の課題となっている。その具体的な有効策については、三大トカマクそれぞれの装置設計上の個性、および研究機関の個性があって、異なった方法が模索されている。例えばTFTRにおいては低密度運転でスーパーショットと呼ばれるモードを発見、JETにおいてはプラズマ周辺部の密度制御でHモード (H: high) と呼ばれるモードを実現、またJT-60においては、固体ペレットを打ち込むことによって改良Lモードと呼ばれるモードを見出している。しかし、いずれもが、今日の装置をもってしてはゼロ出力条件を達成するのは困難であり、JETとJT-60は改造を計画中である。一方TFTRは改造というより、スーパーショットのさらなる特性改善を研究中である。JETとTFTRは、数年後に実際にDTプラズマを用いて核融合反応を起こさせる計画を有し、それに備えた環境整備が可能ないように計画が練られている。一方JT-60は改造後に重水素実験 (目下は水素H) を行うのみで、今後DT実験については我国は大きく遅れをとることが確実であり、残念なことである。

6.2 ミラー方式

ミラー方式、特にタンデムミラー方式は、10年前にはトカマクと同等の性能を期待されており、三大トカマクと同規模でゼロ出力達成を目標とする装置MFTFが、米国、ローレンス・リバモア国立研究所に建設された。しかし、その後、中型の装置での研究によって、ゼロ出力達成の展望が悲観的になったこと、また予算面での情勢が厳しくなったこと、等の理由で、同装置は完成段階において計画が中止されることになった。今日のミラー方式の研究は、我国、筑波大学のガンマー-10装置を中心にした基礎的研究に戻っている。

6.3 ヘリカル方式

ヘリカル方式の研究はトカマク以上に古く1960年代に米国プリンストン大学において中規模のステラレータC装置が稼動していたが、閉じ込め特性に進展が見られず、結局、ソ連でのトカマク研究の成果に刺激されて同装置はトカマクに改造されてしまった。同研究所はその後トカマクにおいてPOPレベルのPLT、PD X装置を生み、今日のTFTRへとそれを育て上げるこ

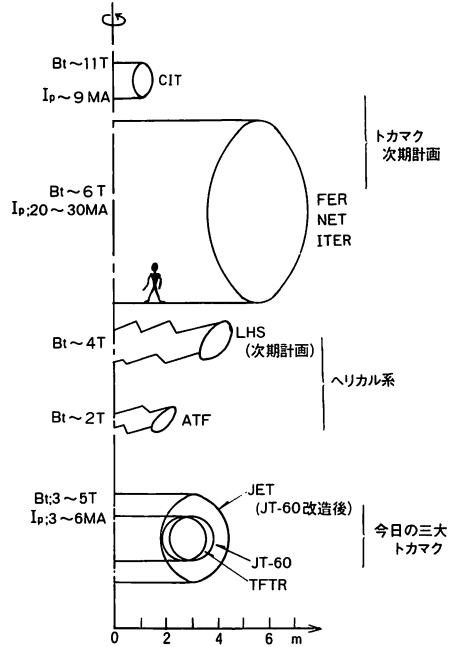


図-7 プラズマ寸法の比較

とに成功した。しかし元々のステラレータは米国において大型研究が中止され、代って我国の京都大学とか、西独、ガルヒン研究所が、その後のヘリカル系研究の中心となった。特に京都大学のヘリオトロンE装置と、ガルヒン研究所のペンデルシュタイナー-7装置は図-6、MDレベルのプラズマ閉じ込めに成功し、同規模のトカマクと同等の閉じ込めの特性を有することを確認し、ヘリカル系の再生をもたらした。この成果を受け、米国においてもオークリッジ研究所にATF装置が建設され、実験を開始する段階になった。我国においては、大学関係の次期計画として、ATF装置をより大型化したPOPレベルのLHS計画⁴⁾をスタートさせている。図-7参照。

6.4 RFP

RFPはトカマクと同様、中心変流器を持っていて、これでプラズマ電流を流すのであるが、トカマクとは異なって主トロイダルコイルを有さず、トロイダル磁界は主にプラズマ中のポロイダル方向電流 I_p で発生させる。如何にして I_p を発生させるかという点、これはトロイダル方向のプラズマ電流 I_p から特別な機構を通して自動的に誘起されるのである。このような機構をダイナモ機構と呼んでいる。結局、RFPはトカマクのような大きなトロイダルコイルは不要である反面、プラズマ内にトロイダル、ポロイダル両方向電

流を供給するために大きな容量の変流器コイルを必要とすることになる。目下のRFPは図-6のMDレベルであるが、これをHD~POPレベルへと引き上げようという計画が、米国のロスアラモス国立研究所、イタリーのフラスカッティ研究所で進行中である。我国においては、この分野で両者に匹敵するような大型計画はない。

7. 今後の展望

トカマク方式を中心に進展してきた核融合プラズマ閉じ込め研究は、30年の歴史を持ってようやく、DT炉条件の達成を見通せる段階に達したといえよう。その達成を実現し、炉工学上の試験を行うための装置は実験炉と呼ばれているが、これについて、如何なる規模にするか、各国で検討が進んでいる。例えばECのNET計画、我国、日本原子力研究所のFER計画、等が知られているが、いずれもが今日のトカマクを土台としているので、類似した構想となっている。そこで、この機会に各国が協力してトカマク実験炉の設計研究を行おうという提案がなされ、目下、EC、米、ソ連、日本の四者が集ってITER (International Tokamak Experimental Reactor)⁵⁾と呼ばれるプロジェクトが、西独、ガルヒン研究所内に本部を置いて活動している。

ITERの研究を通して明かにされた問題点の一つは、点火条件に必要なとされるプラズマ電流が、20MA程度と、今日の三大トカマクの3~5倍も大きい値を必要とする点である。この電流を流すために装置は図-7に示すように大変大きくなってしまふ。さらにトカマクにおいてはディスラプションと呼ばれる確率的な電流しゃ断と、それに伴うプラズマ崩壊が発生する。これが起こると、周囲の導電性構造物に巨大な渦電流が誘導され、それが強いトロイダル磁界と作用して、各種の機械的歪および損傷をもたらされる。20MAもの電流しゃ断が起っても装置は健全性を保ち得るのか、また、損傷を前提としたとき、高度に放射化した巨大装置に対する何らかの修理手段を開発し得るのか、この辺が大変深刻な問題を提起している。もっとも装置が完成しても、当分はプラズマ閉じ込めの物理実験を行う期間があるから、その間に種々の対応を検討すればよからう、というのんびりした考えもある。

ITERが本当に建設まで行くには多くの紆余曲折が予想され、その間、各国の実験炉計画は足踏み状態となってしまう。これに対応し、米国ではCIT計画というものが独自に進行している。これはプリンストン大

学のTFTR装置の電源等を生かし、その容量の範囲でDT燃焼実験を行おうとするもので、装置を小型化するため、10T程度の高磁界を使うことを前提としている。目的はDTプラズマのパルスの点火条件の達成、および核燃焼プラズマ物理研究が主であって、実験炉としての性格は持っていない。しかし、この計画も点火条件の達成については不安を残している、要するに、今日のトカマクの性能をいくら外挿してみても、単純には点火条件の達成に自信が持てないということである。そこで、DT点火装置を一まず置いておいて、トカマクの閉じ込め性能向上を改めて追求してみようという動きも出てきている。

8. 結 言

磁気核融合を代表するトカマク方式は、DT点火条件~炉心プラズマの実現、というプラズマ閉じ込め研究の最終目標へ飛躍する段階に至って、多くの物理的、工学的問題を有することが明かになってきた。これを楽観論、プラス政治手腕で乗り切っていくのか、あるいは一步後退してトカマクの性能向上に望みをかけた基礎研究を行うのか、あるいはトカマクを見限って、ヘリカル系とかRFPの生長を気長に持つのか、いずれにせよ世界の核融合研究は一つの大きな山場に差しかかっているのが現状といえよう。

プラズマ関係者の一つの期待は、点火条件レベルのプラズマ内では、高速のアルファ粒子が、圧力にして10~20%程度存在し、これが閉じ込めに好ましい効果を及ぼすのではないか(逆の恐れも多い)ということである。そこで、何らかのDT燃焼装置を早急に稼働させて、その期待を検証してみたいということである。その具体的計画を有さぬ我国はこの面で米国、ECに大きく遅れをとることが必至である。

参 考 文 献

- 1) G.S.ヴォロノフ著、関口忠、飯田慶幸 訳；「核融合—臨界への挑戦」(1988) オーム社
- 2) 関口忠 編著；「現代プラズマ理工学」(1979) オーム社
- 3) Wesson, J.; Tokamaks (1988) Clarendon Press
- 4) 飯吉厚夫、他；次期大型ヘリカル装置計画(1988)次期大型ヘリカル装置設計部会。(問合せ)；名古屋大学内、核融合科学研究所(仮称)準備室
- 5) ITER Management Committee；ITER Concept Definition, (1988) (問合せ) 日本原子力研究所