

核融合研究の現状と今後の課題

Present Situation and Future Plans on Controlled Fusion Research

内 田 岱 二 郎*

1. 現 状

核融合研究はその激しい開発の歴史の中で、今、比較的期待に満ちた余裕の見られる時代にあるといえる。

それは、一にも二にも、米国プリンストン研究所にある装置 P L T (Princeton Large Torus の略) が一昨年示したデータによる。これが出る前に比べると推進者や関係者にとってはやっと肩の凝りをほぐし、胸を張り、顎を引く等の姿勢を変えられるゆとりを瞬間でも与えてくれたような事件であった。

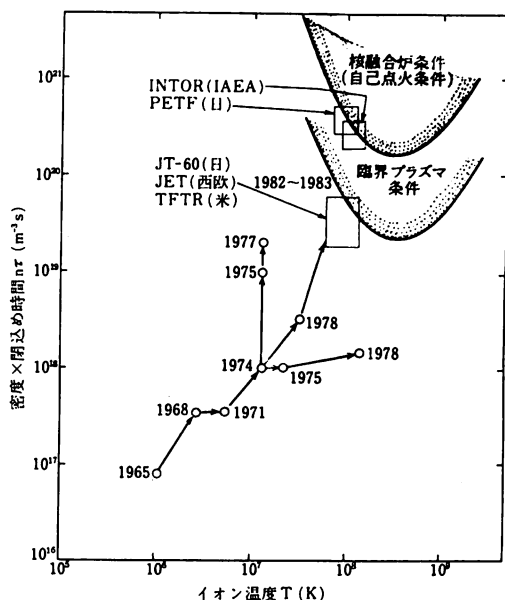
いつもながら核融合の解説には必ず出てくる、プラズマ温度 T を Y 軸にとり、 X 軸に“閉じ込め”と名付けられる物理量：即ちプラズマ密度 n と閉じ込め時間 t の積をとって、目標とする核融合制御の領域を表わすダイアグラム： $T-n t$ 図表の上で、P L T は大きな前進をもたらしたのである。

20数年前に出されたこの図表の示す内容が今日尚意味あるものということは、逆に言ってその間の進歩がいかによろしいものであったかということの証左である。換言すれば、人類がいかによろしく見ていたかの証拠でもある。今日、やっとその門前に到達するに至るまでの開発の歴史はまことに興味深いものであるが、それはさておき、その憂むべき現状を迎えた今としてはその紹介からはじめるべきであろう。

プラズマの温度として P L T は、約 2 MW を越す中性粒子入射加熱によって 6 千万度から 8 千万度という高温を確実に実現してみせた。これは目標とする 1 億度の大台とまさに指呼の間である。閉じ込めの方は、記録としては P L T より優れた値を出した M I T のアルカトル C (Alcator C) があり、それによると目

標値の約 3 分の 1 に迫っている。この方は P L T より強磁場、高密度の場合であるが、この 2 台の結果は今後の研究の方向を見定める大きな指針を与えた。

よく知られているように、日本原子力研究所では目下 J T - 60 という大型トカマク装置を建設中である。これは先の $T-n t$ 図表に示されるローソン条件を百パーセント近く実現するためのもので、J T は Japan Torus の略、60 はプラズマの体積が 60 m^3 あることを意味している。同種のものとして、米国プリンストン研究所の T F T R (Tokamak Fusion Test Reactor の略) と欧州共同体 E C による英国カラム研究所の J E T (Joint European Torus の略) とが同様に建設



トカマク型閉じ込め性能の進展を示す

$T-n t$ 図表 (日本原子力研究所の資料より)

* 東京大学工学部教授

中である。

装置の現状を仮にプラズマの体積で表わすならば、TFTRはJT-60とほぼ同じ55m³、JETは約100m³で、これら3装置のうちがJT-60を除く他の2装置では運転の末期に数千回に及ぶ三重水素：トリチウム使用の実験を予定している。

現在の見通しでは、これらのうちTFTRが最も早く1983年に運転に入るといわれており、JT-60は1985年の開始という。

前に述べたPLTの装置によるデータの意味は、これら3装置が収めるであろう成果の確実性を著しく増した点にあり、その歴史的意義は極めて大きい。お蔭で世界は次の世代の装置について考察することができるようになった。その具体的な行動が次節に述べる国際計画INTOR (International Torusの意)である。

2. 今後の課題 その1

1977年頃、MITのダビッドローズ教授は、次の世代の装置を世界で共同で設計製作し、これを例えばアイスランドのような僻地で実験したらどうかという提案をした。ちょうど時期的に受けた形でこれを国際原子力機関IAEAの核融合会議IFRCがとりあげ、いかに進めたらよいか議論し、結局1979年当初より1年かけて次期装置としてはどのような目標をたて、どのような装置をつくるべきであるかの検討をすることになり、この計画をINTORと名付けた。日本原子力研究所の森茂東海研究所副所長が座長となって、日、米、ソ連、ECより各4名からなる計16名の作業グループが結成され、数回にわたる国際的な共同検討作業をへて、1980年当初に厚さ数cmにもなる英文の報告書を提出した。その検討の集約として構想された次期装置INTORの目標や規模、機能が表1に示されている。

この1979年の作業は、正式には零フェーズの作業と呼称された。つまり、我ら何をなすべきか、に対して一つの答を示す作業であった。もとより技術的な開発がその内容であるから、そこには常に何をなせるかがつきまとう。その評価、その予想の食い違いの調整が作業の中心となった。

問題点を確かめては分担を定め、母国に持ち帰って対策を練った後、一定期間を経て持ち寄り、作業グループとしての案に練り上げていった。数回にわたる往復の後にまとめられた成果：前述の数cm厚の報告書へは、正に期待以上との高い評価がよせられている。

表1 INTOR装置の性能仕様

主半径, R (m)	5.0 ~ 5.5
プラズマ半径, a (m)	1.2 ~ 1.6
管内半径, r _w (m)	1.3 ~ 1.7
プラズマ電流, I (MA)	4 ~ 8
トロイダル磁場, B (T)	5.0 ~ 5.5
プラズマ楕円率	1.6
核燃焼時間, (S)	100
デューティサイクル, (%)	70
平均ベータ値, β (%)	6
平均D T密度, n _i (m ⁻³)	1.4 × 10 ²⁰
平均イオン温度, T _i (keV)	10
熱出力, P _{th} (MW)	800
実験回数 (核燃焼ないとき)	10 ⁶
中性粒子加熱, P _B (MW)	75
中性粒子エネルギー, E _B (keV)	175
燃料注入	ペレット型及びガス注入
不純物制御	ダイバーター
トロイダル磁場コイル	NbTi又はNb ₃ Sn
ポロイダル磁場コイル	NbTi
トリチウム保有量, (kg)	3
最高稼働率, (%)	50

内容的に特記すべきは、作業の結果、T-nt 図表上次の目標である自己点火条件を満足する実験装置を10年計画で製作することの意義と可能性について、世界的なコンセンサスを得たことである。トリチウムを使い、約百秒にわたる核燃焼時間を実現することがあと10年で可能であるというような判断、あるいは確かな予想はこれまでになかったこと、言い換えると、10年先がかなりの確度で語れるようになったのは核融合にとって初めてのことといえる。冒頭に、比較的余裕のみられる時代にあると述べたのは、この理由からである。

もとより、INTORを実現するにR&Dが全く必要ないというわけでは決してない。他にも書いたことであるが、閉じ込め時間にしても現在得られている値：約10分の1を千倍にせねばならない。10年という歳月が千倍の性能向上を保証するものであるか否かは、常識的には意見がわかれて不思議はないところであるが、核融合の開発の歴史の中にはそれを可能にしたいくつの実例がある。

例えば、追加熱に用いられている中性粒子束入射器

の出力が好例である。1台の出力が10年でキロワットからメガワットへと飛躍することに成功し、それが前述のようにPLTの今日の成果を生んだ。一つの技術革新が事態の基本的変革をもたらした例は、米国やソ連ではこのほか未だ数多く見られ、この辺、やや急速なソフト化を遂げつつあるわが国としては見習うべき点である。

さて、INTOR計画は1980年初頭から第一フェーズに進み、概念設計を行うこととなった。この段階は別名デフニションフェーズ（definition phase）とも呼ばれるが、このことからわかるように、この段階を終ったところで、世界としてINTORをすすめるか否か、わが国としてはこれに参加するか否かを決める時期を迎えることになる。あと約1年半後である。

しかし、事はそう簡単ではない。既に察しておられるように、国際協力というのは各関係国の利益得失が複雑にからみあって、政治的課題になり易く、遅々として進まぬことがよくある。前掲のECの装置JETの設置場所決定の際には、約2年半が空費された。ましてや西も東も含めてである。既にソ連、フィンランド、デンマーク、オーストラリア等から招へいの運動があるときく、これらを聞く欧州関係者の気持ちは複雑であろう。

従って日米だけで実施しようという声も出はじめている。これらにどう対応するか、それは結局のところ自国の計画を練りあげ、その関連において決めるしかない。

米国では自国の計画としてTFTRの次にETF（Experimental Test Facility）という計画を立案中であり、ECはJETの次にNET（Next European Torus）を検討中という。いずれもINTOR-likeなもので、熱出力数百メガワットである。従ってINTORへの参加がそれぞれ自国の計画に影響を及ぼすことは避け難い。

日本では、先に長期計画策定において、自己点火に到る前の段階を設定して炉心工学試験装置と名付けた装置を構想し、これをJT-60の次期装置と想定した。しかし、PLTの成果、INTORの検討結果をみてその見直しをすることになり、INTOR-likeなJETOR（著者仮称）の建設も含め、検討を始めた段階である。

では、INTORあるいはINTOR-likeな実験装置による研究開発の進展のみを見守っていればよいのであろうか。

3. 今後の課題 その2

核融合反応の利用を目指した研究は、トカマクばかりではない。

そもそも核融合反応制御の方式には、磁場閉じ込め方式と慣性閉じ込め方式とがあり、トカマクは前者の一形態である。つまり、磁場閉じ込めとは磁場で高温プラズマを壁から離して空間的に浮かす方式で、プラズマの形としては今までのところドーナツ型と棒状との2つが研究の対象となっている。トカマクはドーナツ型の一つで、ドーナツに沿って数万ガウス以上の強い磁場をかけ、数メガアンペアの大電流を流してプラズマを作る。従ってプラズマのつくり方、閉じ込め方にその他いくつかの方法があって不思議はない。

現在までのところ、トカマクとは別のものとして、ミラー型と呼ばれる。ちょうどねじり飴のような形のプラズマを閉じ込める方式や、わが国で有名な京都大学のヘリオトロンのような、ドーナツプラズマに電流を流さない方式など、いろいろ研究がなされてきている。

ところが、そのいずれをとってもトカマクに関する知識の深さに及ぶものはない。トカマクはソ連で始められてから約10年後に世界に紹介され、世界中に建設されて各国の知識が交換され、共通のものとなった。その点、他のいずれも劣っているといわざるを得ない。

従ってINTORまでは九分通りトカマクでゆくであろう。だが問題はその後である。

例えばトカマクに流す電流は環状電流であるから、これに錯交する磁束密度変化による誘導電場で環状電流を流さねばならない。これは原理的に定常にはなり得ない。つまり、トカマクでは原理的にパルス運転を強いられることになる。そのパルス巾を何分何時間にするかは設計の問題であるが、いずれにせよパルス運転は装置に繰返し荷重をかけることになり、その性能は定常運転に比べれば工学的にはるかに厳しいものとなる。

要するにトカマクを炉にまでもってゆくためには、どうしても定常運転化をはかる必要があり、その時点でトカマクの改善もしくはトカマクに代るものの登場が必要となってくる。

以上から、一方でトカマクを進展させると共に、他方でその改善もしくはこれに代るものを同時に育成しておくことが必要なのである。

トカマクに代るものとしては、何も磁場閉じ込め方

式に限ることはない。周囲からの急激なエネルギー投入により重水素とトリチウムの小さなペレット内に爆縮を起させ、その慣性がきいている間に反応させてしまおうとする慣性閉じ込め方式には、そのエネルギードライバーの種類によって、レーザー方式、粒子ビーム方式があるが、これらもその候補となりうる。

そのうち、ガラスレーザー方式や軽イオンビーム方式などかなりの進展がみられるが、一般に慣性閉じ込めはわが国を除き軍事研究との関係が密接で、果して純粹に核融合制御、即ち水爆の平和利用か判然としない。しかしながらその知識の深さにおいては、現時点で未だトカマクより劣っていると思われる。

以上、トカマクに代る方式育成の必要性を述べてきたが、今一つ、別の視点にたった今後の課題がある。

それは、核融合反応によって出てきたエネルギーの利用の仕方である。

これまで構想されてきた核融合制御利用の最終形態はほとんどが発電炉というイメージであった。しかし、例えば重水素DとトリチウムTを利用する場合、出てくるエネルギーのほとんどは14 MeVの中性子と3MeVのヘリウム粒子の運動エネルギーである。これをどういう形で利用するかは未だ確定しているわけではない。

最近ソ連では、DT核融合反応でできる多量の中性子を核分裂に利用するいわゆる混成炉を強く提唱しており、これが一つの考え方である。

又、米国では混成炉のほか、そのエネルギーを化学的なものにおきかえて、いわゆる水素エネルギー的利用をはかるというシンフェール方式の研究が、とみに盛んになってきている。

このどちらも、INTOR級の核融合炉を必要とするが、純粹の核融合発電炉に比べると小型ですみ、時間的にも少し手前に現実性があるという予想がなされている。

いずれにせよ、炉心となるプラズマの制御がすすむにつれてその利用の仕方に考察が移るのは当然であり、核融合全体の開発形態としては順調な動きというべきであろう。

しかしながら、水爆の経験のないわが国としては、例えば米、ソの大国が既に自在なトリチウム取扱い技術を手に行っているのをみると、理想を追う者の道の厳しさを感じざるを得ない。結局それらは、国際協力と自国の環境保存の間で独自に達成してゆくしかないのである。

