

核融合研究開発推進の意義と将来展望
持続可能な発展について(その2)
核融合：実現へ向けての開発戦略

井上 信幸

京都大学エネルギー理工学研究所
原子力委員会長期計画策定会議 第四分科会
平成12年3月13日

核融合研究開発が、究極のエネルギー源の実現と科学技術の両面にわたることは前回述べた。今回は、この2つの面での具体的な内容と取り組みを紹介し、原子力長期計画の中での核融合研究開発の位置付けについて提案を行いたい。

1. エネルギーとしての核融合研究開発

核融合研究は前回説明したように、エネルギー源としては数々の優れた特徴があり、21世紀後半に、エネルギーの安定供給と地球環境の保全、再生に貢献する基幹エネルギーの候補である。想定している核融合炉は、重水素とトリチウムの反応を利用して定常的に電気出力を取り出す。燃料は重水素とトリチウムであるが、トリチウムはリチウム金属からプラント内で製造する。

核融合研究開発に関して、我が国は段階的な目標を設定し、そのための中核装置を中心とした計画を総合的に推進し、目標を着実に達成する開発戦略をとっている。これは、核融合開発が大規模システムの開発であるため、リスクを最小化するために、1段進む度に次の段階へは目標達成に必要な科学技術的見通しを十分に得てから進むものである。現在は実験炉段階の入口にあり、今のところもっとも研究が先行しているトカマク方式について、国際協力で実験炉を建設するITER計画が進んでいる。

現在の最大の技術課題は核融合燃焼プラズマの実現とその長時間制御技術の確立であり、核融合燃焼を、外部から印加した制御磁場がプラズマ中に十分浸透するまで保持することを目的として実験炉ITERの設計を進めている。ここで得られる知見は、並行して進んでいる他の核融合方式の研究でもなくてはならないものであり、ITER計画は他方式の研究者からも必要性が強く認識されている。実験炉ITERでは、トカマクでの核燃焼の実証とプラズマからのエネルギー取り出しの基本的なシステム工学試験を行う。一方、経済的で高効率なプラントや、実際の発電や燃料製造に必要な先進的プラズマ閉じ込め、炉工学、材料開発は他のトカマ

ク装置および他方式の装置や強力中性子源施設等で並行した先進補完研究として行う。

以上のような実験炉段階を着実に進めることによって、核融合発電をプラント規模で実証する原型炉の建設が技術的に見通すことができることになる。これが、我が国の計画である第三段階基本計画の主旨である。原型炉段階から先の産業化については、社会の需要に応じて産業界が行うものと考えられるので、原型炉段階においては、市場参入をはかるための見通しを得ることが重要になるであろう。

ITER以降、原型炉から実用化までには、まず定常運転が課題となる。トカマクの定常化とともに、代替方式もこの解を与える可能性がある。磁場閉じ込めでは経済性向上には、炉の小型化に寄与するプラズマ閉じこめ性能の改善（ β 値の向上）や磁場の増強が重要である。工学分野では、遠隔保守技術の高度化による保守点検・交換期間の短縮、低放射化材料開発が必須である。低放射化材料は安全性向上にも貢献する。

核融合は、実用化段階では、発電だけでなく新たな利用法について多くの可能性を持っている。前回も紹介したが、核融合炉は反応で発生した中性子が核反応に寄与しないため、ブランケット、つまりエネルギー利用系の設計が本質的に自由である。この特徴を生かすことで、放射性同位元素の生産や、マイナーアクチノイドの消滅処理に利用が可能である。特に中性子スペクトルが高速14 MeV単色であることも、特色となる。エネルギー取り出しに際しては、炉心設計によらず、300℃から900℃程度まで、材料開発の進展によって自由な温度の熱媒体を選ぶことができる。これは、電力としての発電効率の向上だけではなく、様々な温度領域での熱の工業利用を可能とする。ことに、化学工業や燃料製造を通じて、水素やメタノールなどの合成燃料を2次エネルギー源とする将来型分散エネルギーシステムへの大きな適応性が期待できる。

核融合炉をエネルギー生産システムとして、より魅力的なものにしていくために、実験炉、原型炉、実用炉という段階的な研究開発をすすめて、着実にミッションを達成し、その成果を次の段階へ効果的に反映することで、核融合実現の見通しが得られる。技術的にはITERを中心とした実験炉段階は2030年ころに原型炉段階の見通しが立てられると判断される。原型炉段階の研究開発を着実に実施することによって、2050年頃には経済性を伴った核融合炉の実用化段階への移行が見通せることは十分可能であるとみられる。各段階では、それまでの知見に基づく次の目標設定と、広く国民の判断による計画策定が重要であることは言うまでもない。

2. 科学研究としての核融合研究開発

核融合研究開発は、未知の世界を拓く科学研究として、また我が国の科学技術力を維持拡張し、次世代の人材を育てるとともに、産業技術を発展させるものとして、重要な役割を果たしつつある。科学技術立国としての我が国の形を作っていく上でも、核融合開発は大きな貢献ができる。我が国の研究計画は、ITER を中核と据えながらも、あわせて幅広い代替方式の研究や基礎研究も並行して進めるものであり、裾野が大きな広がりを見せている。

実験炉 ITER は核融合燃焼を起こしていないプラズマで集積したデータベースで設計したものであり、その性能達成にはかなりの技術的確信が得られている。一方得られる核燃焼プラズマは、初めて実現される「地上の太陽」として、ある意味では宇宙に広く見られるものでありながらこれまで人類に知られていない新しい実体として興味深い研究対象となる。プラズマ研究は物質の状態の移り変わりを取り扱う学問として、新たな知識基盤を生み出しつつある。プラズマは、自律開放系として外界とエネルギーをやりとりしながら自己の物理的状态を自分で決める非平衡非線形系特有の性質を持ち、予測困難な面があるため、内部での核反応のエネルギーで自らを加熱する「燃焼」状態になった時には、どのような振る舞いをするか確認する必要がある。核融合燃焼しないプラズマについてはかなり理解が進んで知識基盤があるが、この燃焼プラズマの挙動については ITER における実験により解明される。

プラズマの自律性、非線形性については、トカマク以外の様々な方式の研究も大きな貢献をしている。また核融合開発では特定の閉じこめ方式に偏らず広範なアプローチが成果をあげてきた。ミラー型装置で開発された中性粒子入射装置、コンパクトトロイド入射、テータピンチプラズマで研究されたテアリングモード理論などがトカマク開発に大きな貢献をしている。プラズマ加熱・電流駆動技術、プラズマ計測技術、燃料入射技術、核融合炉工学技術等の開発は共通であり、基礎研究としても核融合研究を支えている。

核融合研究は、大学の教育研究活動を活性化して人材養成を行う重要な役割も担ってきた。核融合開発は広範な学術分野と連携している。核融合関連学会としては、プラズマ・核融合学会、日本物理学会、日本原子力学会、資源・エネルギー学会、応用物理学会等で数千人が活動しておりその年齢構成も広い。核融合開発で養成されている人材の多くは、核融合以外の分野でも活躍している。このようにして養成された人材は、ITER 開発、建設、運転の要員を充足するための人的

資源としても十分である。

3. まとめ

エネルギーセキュリティは資源に乏しい我が国にとって重要な課題であるが、特に核融合は、エネルギー自給を果たす上でいくつかの際立った利点がある。

これまで、我が国の核融合研究は、段階的な研究開発により大きな成果を挙げてきた。現在、最も重要な課題は、核燃焼プラズマを実現して核融合炉の技術的成立性を実証するとともに、核融合開発において解明すべき最後の不確定要因である燃焼プラズマの挙動を理解することである。これこそが ITER の使命であり、核融合開発は、当面 ITER を中心とした第三段階基本計画に基づいて着実にすすめることが必要である。ITER 以降は炉心性能向上や炉工学技術の革新により経済性向上が期待される。このような成果はトカマクだけでなく他の閉じこめ方式にも有用である。一方トカマク代替方式の研究開発は、トカマク方式の技術の進展にも貢献するとともに原型炉以降の閉じこめ方式の候補となる可能性がある。

学術研究にとっては、ITER による燃焼プラズマ研究が物理学にブレークスルーをもたらす可能性があるように、既存学術分野の発展に寄与するとともに新しい学術領域を拓くものである。核融合開発は広範な学術分野と連携・交流があり、人材養成では広い分野に貢献している。このような人材は我が国の基幹技術の多くの分野で活躍しており、ITER に必要な人的資源の基盤となっている。

また核融合開発は、電機、重機、素材、精密機械、総合システム工学など、科学技術立国を目指す我が国の基幹技術の最先端で進められており、これら技術の進歩に貢献している。開発された技術の産業への応用面でも多くの波及効果が期待される。

核融合は、現在世界の研究レベルの中でも日本が多くの分野でトップクラスを維持している研究分野である。この得意分野において、我が国がリーダーシップを発揮し、国際的に積極的な役割を果たし、貢献してゆくことが重要と考える。

核融合：実現へ向けての開発戦略

持続可能な発展について（その2）

井上 信幸

京都大学エネルギー理工学研究所

原子力委員会長期計画策定会議 第四分科会

平成12年3月13日

核融合エネルギー実現へ向けての開発戦略

国際熱核融合実験炉ITER計画の必要性

エネルギー開発計画上の位置づけ

先進補完研究との関係

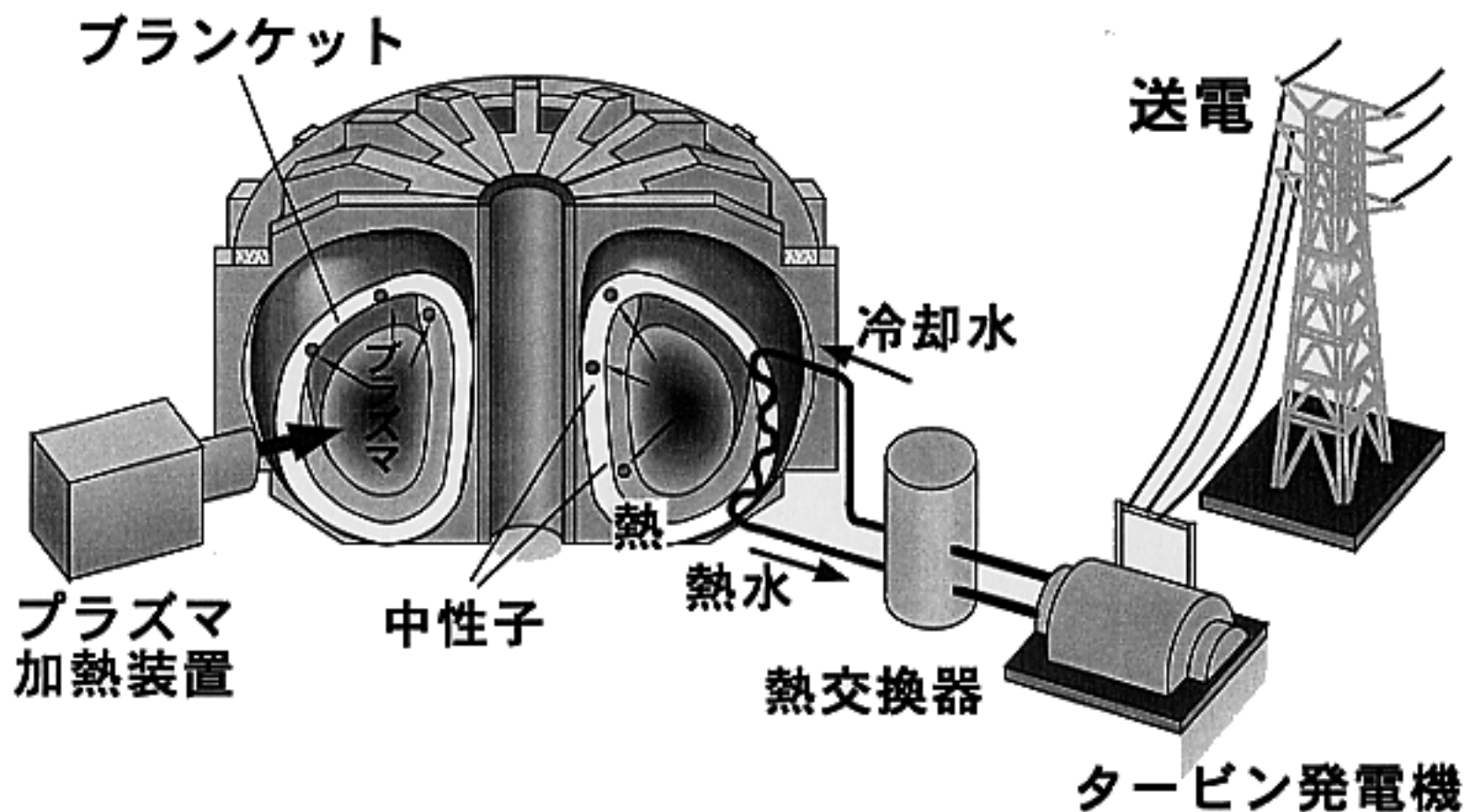
科学・工学研究としての核融合開発

燃焼プラズマの物理

先進閉じこめ方式の役割

人材育成の現状と見通し

核融合発電の原理



核融合反応： $d + t \rightarrow \alpha (3.5\text{MeV}) + n (14.1\text{MeV})$

段階的開発計画

- ・大規模システムの開発を着実に進める
 - ・次の段階へは目標達成に必要な科学技術的見通しを十分に得てから進む。
 - ・リスクを最小化する。
-
- ・現在は実験炉段階の入り口。
 - ・原型炉段階で安定な核融合発電を工学的に実証
 - ・その後、民間主導で市場参入をはかる

核融合エネルギー実用化までの段階

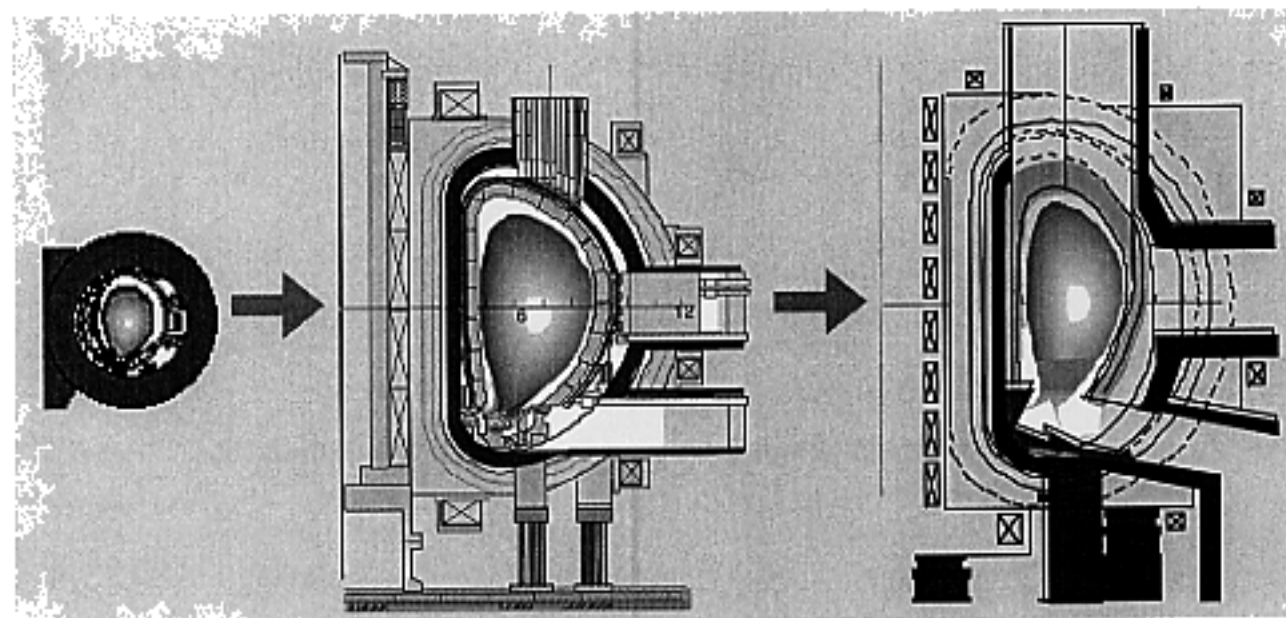
臨界プラズマ
JT-60



実験炉
ITER



原型炉
例 (SSTR)



実用化
経済性

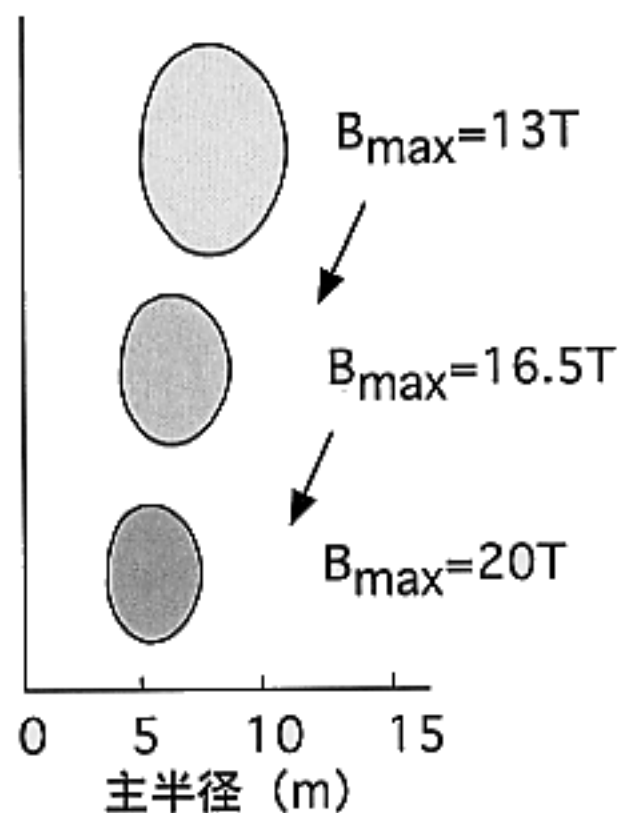
等価 $Q=1$
常伝導
DD 燃料
ステンレス鋼

$Q=10\sim20$ 以上
超伝導
DT 燃料
ステンレス鋼/
フェライト鋼

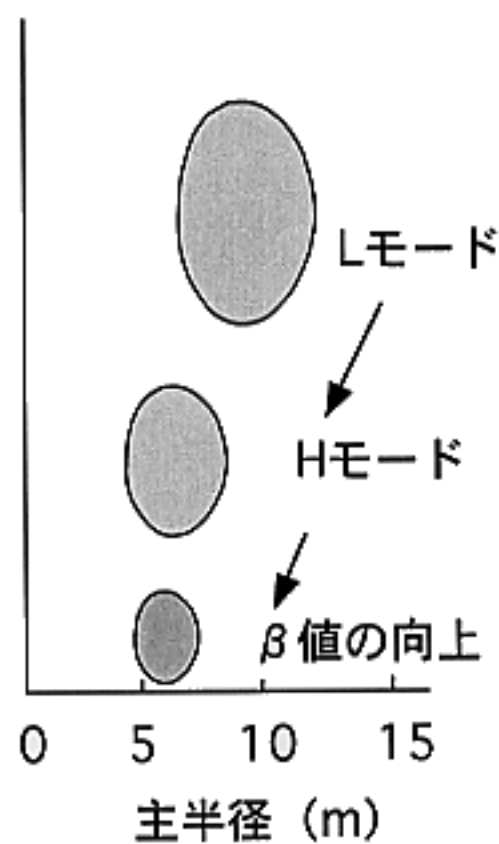
$Q=30\sim50$ 以上
超伝導/先進超伝導
DT 燃料
フェライト鋼/
先進材料

トカマク経済性向上に向けて

トカマクは、プラズマ物理、炉工学の進歩によって、小型高性能化が期待される。材料の進歩が必須



強磁場の実現



閉じ込めの向上

第三段階基本計画

核融合燃焼プラズマの制御技術の確立

— 中核装置としてトカマク型実験炉ITERを建設

— 核融合燃焼を、外部から印加した制御磁場が

プラズマ中に十分浸透するまで保持

それに必要な要素技術の開発と、システムとしての技術
の成立性を立証。

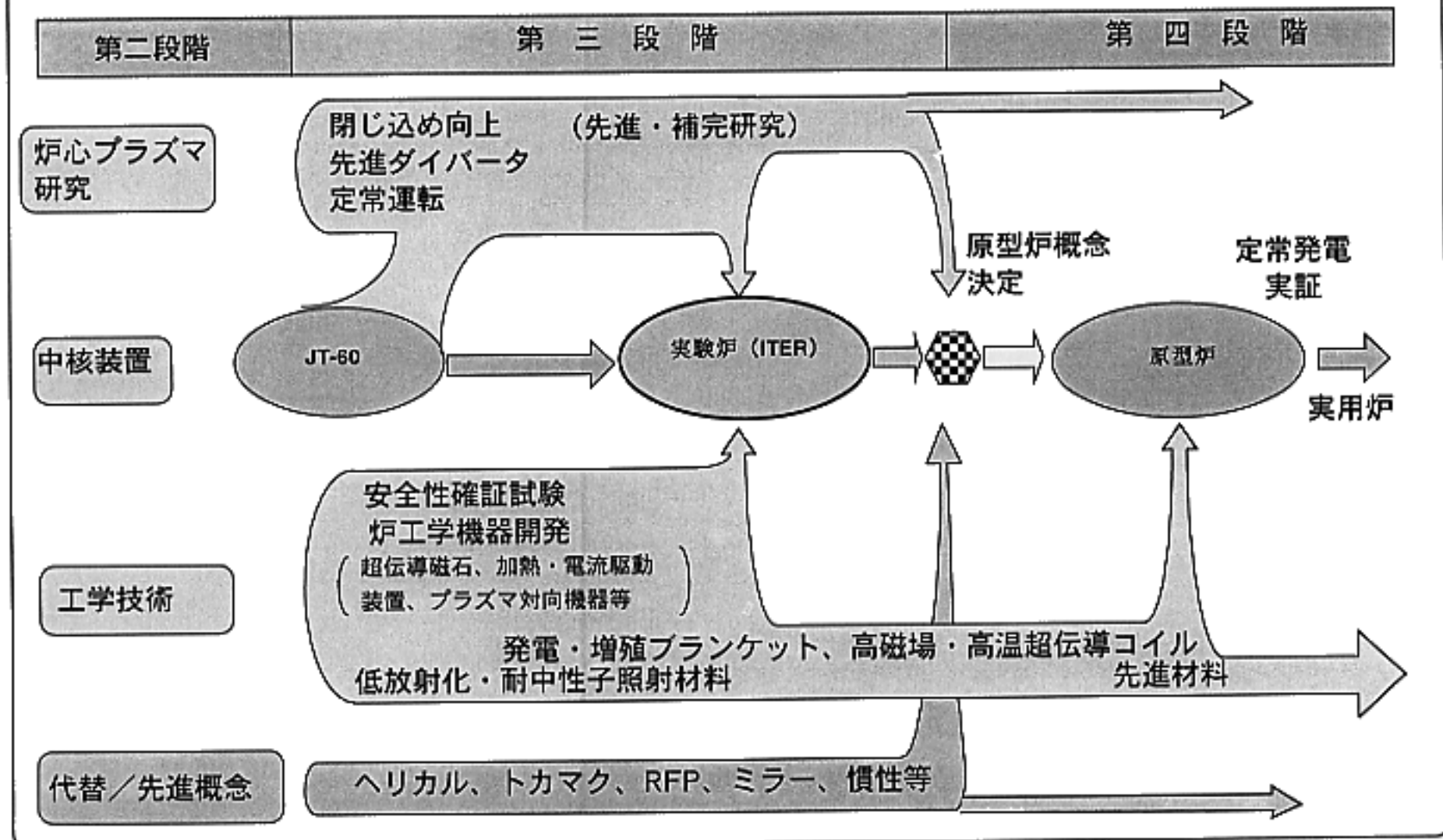
先進補完研究と代替方式研究を並行して実施

— 中核装置でできない必要技術を開発

— トカマク方式にない利点を有する方式を研究

— 学術研究として有意義

核融合研究の段階的開発計画



燃焼プラズマ制御実験の重要性

ITERは核融合燃焼していないプラズマのデータベースで設計
プラズマは自律開放系：

自己の物理的状态を自分で決める

→燃焼プラズマの正確な予測は困難
実験により解明の要あり。

そのあとは既存の工学技術の革新

→未知の非線形物理現象よりは予測可能

ITERで核融合炉実現可能性についての確証が得られる。

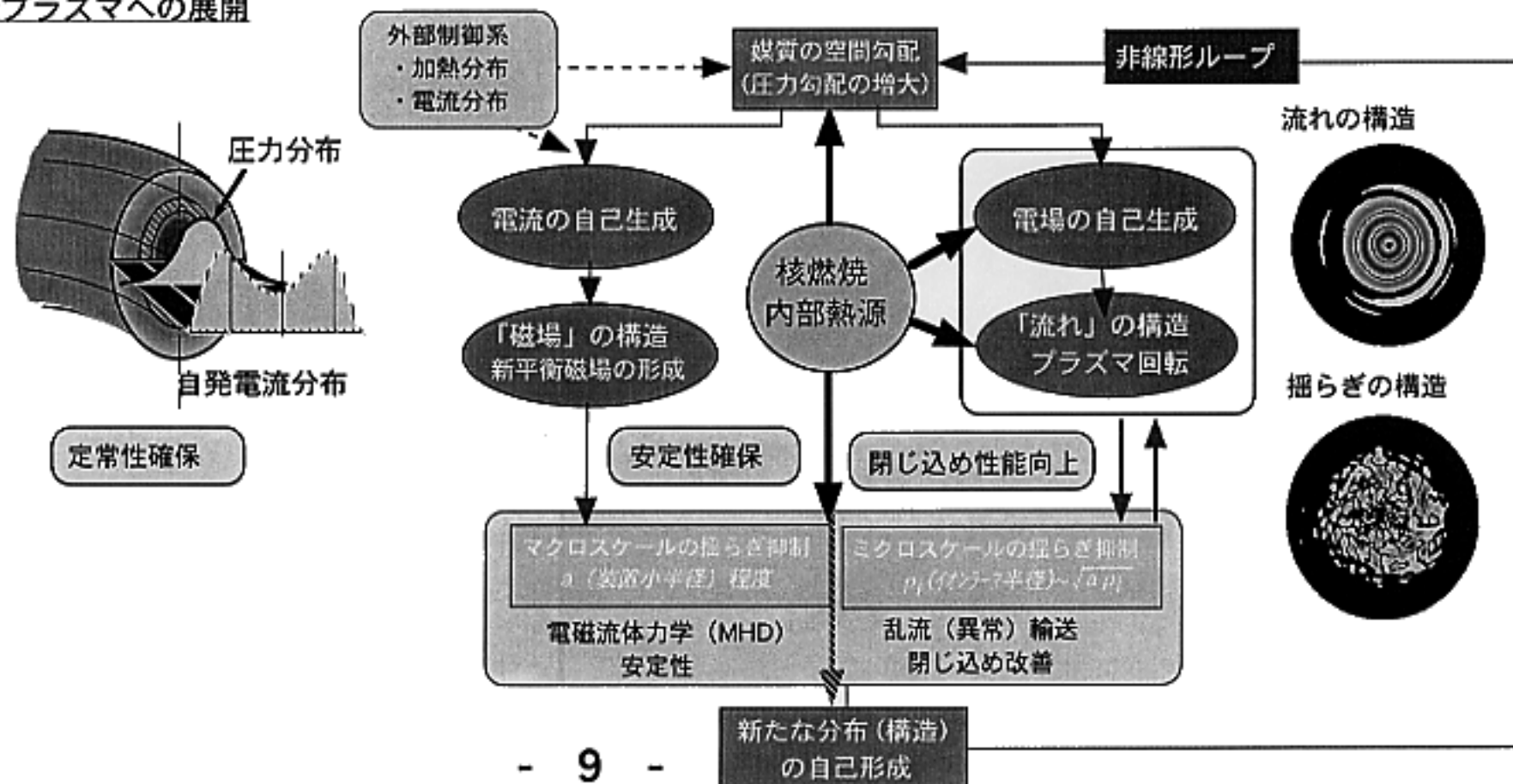
ITER 燃焼プラズマの物理

ITER: 「自律系の物理」が支配する核融合プラズマ

これまでに得られた知見

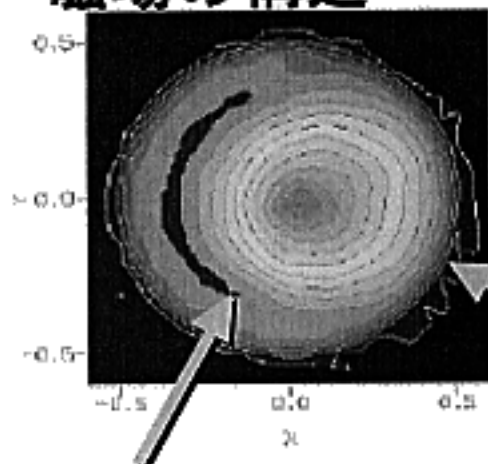
高いエネルギー増倍率を有する
燃焼プラズマへの展開

- 内部輸送障壁を中心とした多彩なプラズマ分布の自己形成
 - ・ 「磁場の構造」「揺らぎの構造」「流れの構造」等が関与した複雑現象
 - ・ 高い圧力状態（高性能プラズマ）であることを自ら支える物理系
- 「安定性能（輸送改善）」と「定常性能（自発電流）」を同時確保した物理系
- 外部から最小限の制御因子を導入、自己生成されるプラズマの制御



新しい学術分野の進展に寄与

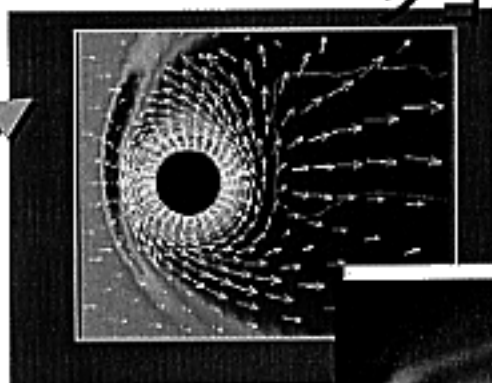
JT-60で観測した
磁場の構造



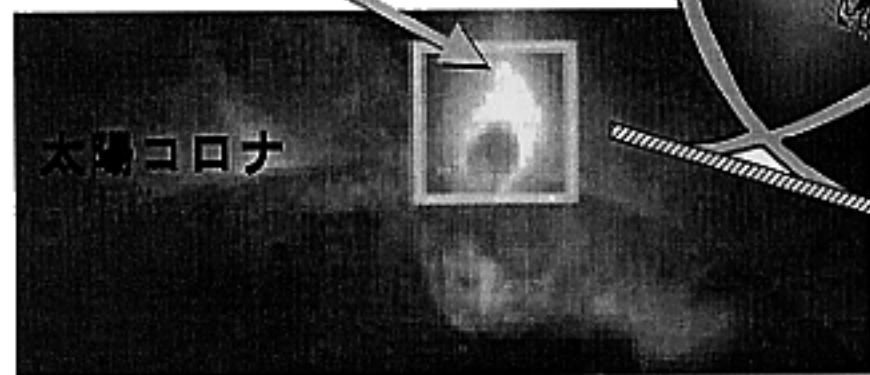
プラズマ流と磁場
との相互作用



太陽風による
木星磁気圏の
ショック構造

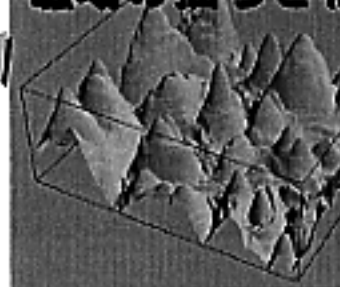


磁力線の再結合現象



オーロラ現象
複雑系、自律系の現象

磁場の揺らぎ構造



砂山の崩れ
方法則



トカマク代替方式開発の意義

トカマク方式に並行して代替方式開発が必要

- 広範なアプローチが成果

- ミラー型装置で開発された、中性粒子入射装置

- コンパクトトロイド入射

- テータピンチによる不安定性の理論

- トカマク開発に貢献

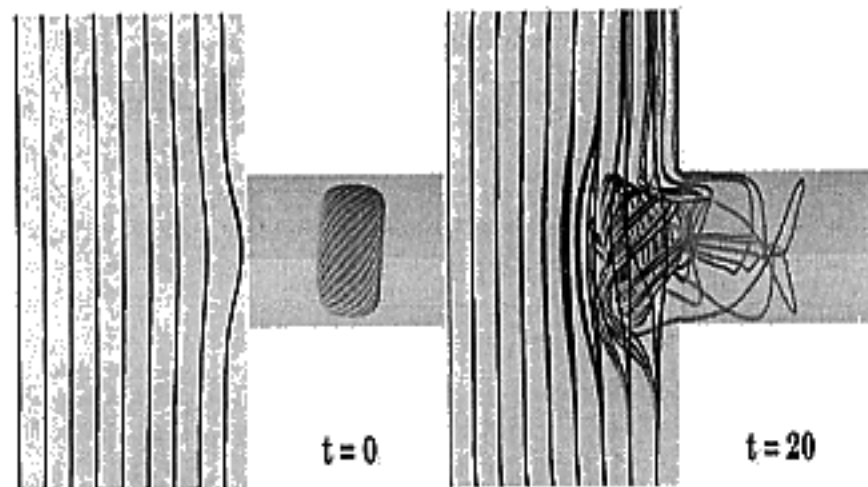
- トカマクで未解決の問題を内包しない方式

- ヘリカル方式一定常、電流崩壊不安定性がない

- 共通の技術

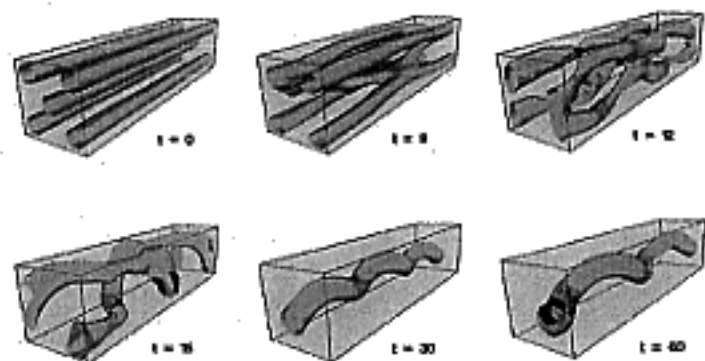
- プラズマ加熱、電流駆動、計測、燃料入射、工学技術

基礎研究によるプラズマ物理の進歩



代替方式研究の
トカマク研究との連携例

スフェロマック入射による燃料補給の
シミュレーション



基礎研究によるプラズマの理解

MHD自己組織化の時間発展

○核融合は多くの学会と関連：

プラズマ・核融合学会、日本物理学会、日本原子力学会、資源・エネルギー学会、応用物理学会、低温工学協会、電気学会、日本機械学会、日本金属学会、日本真空協会、溶接学会、レーザー学会、日本放射線影響学会等

○大学の研究活動を活性化

○人材養成

プラズマ物理研究、先端技術研究で人材を養成
産業界、核融合以外の分野で活躍。

－ITERで必要な人的資源の潜在的基盤

核融合研究者の推移

研究者数(人)

1200

800

600

400

200

0

研究機関

大学等

会社等

1978 1979 1980 1981 1982 1983 1984 1985 1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996

核融合研究者数と構成の推移

まとめ

- 核融合研究は、段階的計画により進展。
- 今最大の課題 :核融合の技術的成立性の実証。
燃焼プラズマの挙動の解明。
- ITERはトカマク以外の方式の研究者も支持。
- 代替方式研究はITERなどトカマク方式とも連携。

- ITERによる燃焼プラズマ研究は物理学の新しい展開。
- 核融合は広範な学術分野と連携・交流。新領域を拡大。
- 核融合は我が国の基幹技術の多くの進歩に貢献。波及効果大。
- 先端技術に携わる多数の人材を養成。
 - 一我が国は核融合分野の研究開発で世界のトップクラス。
 - ITERを通じて国際的なリーダーシップを示すことが必要。