

# NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

NIFS シンポジウム

「核燃焼プラズマの研究を考える—現状と今後の取り組み方」

1992年7月15日

核融合科学研究所

NIFS Symposium

Toward the Research of Fusion Burning Plasmas

-Present status and Future strategy -

July 15, 1992

National Institute for Fusion Science

(Received - June 7, 1993)

NIFS-PROC-13

July 1993

## RESEARCH REPORT NIFS-PROC Series

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. This document is intended for information only and for future publication in a journal after some rearrangements of its contents.

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to the Research Information Center, National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan.

# N I F S シンポジウム

「核燃焼プラズマの研究を考える－現状と今後の取り組み方」

1 9 9 2 年 7 月 1 5 日

核融合科学研究所

伊藤早苗

**NIFS Symposium**

**"Toward the Research of Fusion Burning Plasmas  
- Present status and Future strategy -"**

**1992 July 15**

**National Institute for Fusion Science**

**Sanae-I. Itoh**

**Keywords: Burning plasmas, Steady-burning, Critical issues,  
DT experiments, Future research, Questionnaire,  
Problem definition**

## 要旨

NIFSシンポジウム「核燃焼プラズマの研究を考える－現状と今後の取り組み方」が1992年7月15日に開催された。このシンポジウムではJETのDT実験の結果の概要やTFTRの核燃焼プラズマ研究への姿勢までも含め、多彩な内容を検討した。また研究動向や方針を考えるためのアンケート調査を行ない、そのまとめを作成した。その全体を報告する。

## Abstract

NIFS symposium, entitled "Toward the research of Fusion Burning Plasmas - Present status and Future Strategy" was held at NIFS on July 15th 1992. This NIFS symposium covers various topics related to burning plasma, e.g., JET DT experiment, Plan for DT experiment on TFTR as well as the future trends among researchers. To study the critical issues and trends of future research, a questionnaire was sent to about 100 researchers. This report presents such activities in the NIFS symposium.

## 目 次

1 .	N I F S シンポジウムプログラム	3
2 .	A . G i b s o n 博士の J E T D T 実験の講演要旨 (NIFS News ISSN0915-6704より引用)	4
3 .	シンポジウム報告 (核融合研究より引用)	6
4 .	核燃焼プラズマ研究を考えるー現状と今後の取り組み方 I (アンケート集計)	8
5 .	核燃焼プラズマ研究を考えるー現状と今後の取り組み方 II	25
6 .	自由討論の内容	39

## NIFS シンポジウム プログラム

日時：1992年7月15日(水曜日)

会場：核融合科学研究所

8階大会議室

- 10:00 開会の辞と趣旨説明 伊藤早苗  
10:20 所長挨拶とGibson博士紹介 飯吉厚夫  
10:30 招待講演 A. Gibson  
*D T Experiment on J E T*
- 12:00 昼食
- 1:15 第二部 核燃焼プラズマ研究を考える  
- 現状と今後の取り組み方 - 司会 伊藤早苗
- 1:20 *Planned Tritium Experiments on TFTR* K. McGuire
- 2:10 日本原子力研究所委託調査から (主査)若谷誠宏  
「高速イオン及びアルファ粒子の物理研究」
- 2:35 原子力委員会委託調査から (幹事)伊藤公孝  
「核融合プラズマの閉じ込め改善点」  
「核融合プラズマの長時間燃焼制御」
- 3:20 問題点の整理と研究方向への示唆
- 3:30 break
- 3:40 研究の位置づけ <<Discussion>>
- 4:50 D/T実験への参加、具体的方法、及び課題  
TFTR(1993年) 藤原正己  
JET (1995-96)
- 5:30 散会

連絡先：伊藤早苗(4557)

## 2. 「JET における DT プラズマ実験」について

—JET 共同事業体副所長 A. Gibson 博士 講演の要旨—

伊藤 公孝

去る7月15日に本研究所の共同研究の一事業として、NIFS シンポジウム「核燃焼プラズマの研究を考える—現状と今後のとり組み方」が開催されました。その機会に、本研究所を来訪中の Gibson 副所長から、JET における研究成果や、DT 実験に関する最新の結果について、講演いただきました。Gibson 副所長の講演は、JET の発祥やヨーロッパ内の協力の在り方から始まり、高性能プラズマの保持、DT 実験の計画法から結果という到達点を示し、更には今後のチャレンジに至る JET の計画の全貌を明らかにする講演でした。Gibson 博士の講演要旨を紹介します。

今日の講演の主題は、JET における最近の DT<sup>11</sup> 実験の成果紹介であるが、よい機会なので JET の全体計画の話から始める。JET (Joint European Torus) は、EC (ヨーロッパ共同体) の計画であり、計画に参加するパートナーの間で、どのように協力しているかについて一言述べたい。資金の分担については約80%は EC で、残りを各国が負担している。立地を得た英国が、人・受注とも多いが、均等になるような努力をしている。この結果、協力の実が上がり順調な成果を得ている。

JET の科学的計画が議論されたのは1971年にさかのほり、1983年から始まった実験(当初1992年まで策定)では、ミッションとして、解明すべき次の四研究課題が目標として選ばれた。すなわち、(1)核融合炉級プラズマへ進む時に、閉じ込め性能はいかにスケールするか、(2)そこでの不純物や壁との相互作用の制御、(3)その効率よい加熱、(4) $\alpha$ 粒子生成・閉じ込めとそのプラズマへの影響、に関する研究である。

(1)と(3)の課題については、既に目標を達成したと言える。 $n_i(0)T_i(0)\tau_E^{21}$  値がほぼ $10^{21}$  keV 秒 $m^{-3}$ になり、自己点火条件にファクター5程度のところまで接近できたし、またベータ値も6%になって破壊的なことが起きるのではなく、むしろ自然な燃焼制御機構になることが示されたこと等、多くの成果が上がっている。加熱パワーも全部で30MW まで達しているし、ICRF (イオンサイクロトロン加熱) もその半分まで寄与できている。一方、(2)の課題については、高パワーでは2秒くらい改善閉じ込めと高純度を保つことができるし、低パワーなら20秒以上 H-モードを維持できる。しかし、まだ改良が必須

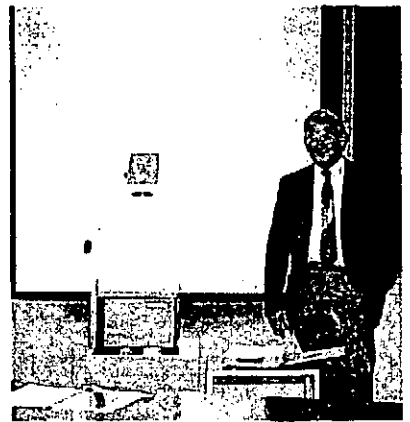
である。スポーツの言葉を借りれば「引分け再試合」といったところであり、これから改良されたダイバータを用いて、研究にチャレンジするところである。

第四の課題である $\alpha$ 粒子の発

生と閉じ込めの研究の第一歩が踏み出された。その成果をみると、D プラズマでは、既に $Q=1^{31}$  相当のプラズマが作られているが、核融合反応による加熱パワーは全加熱の0.3%程度であり、DT 換算で話が進められているだけである。昨年段階では、使えるトリチウムの量(約0.2g)も限られていたが、実際に核融合反応で相当のパワーを生み出すことを証明する意義は、核融合研究全体にとって大きい。また、放射線防護の点から負担が増えるが、既にベリリウムを導入した段階から、気密服によるトラス内での作業をしており、負担の増加には対応可能であった(DT 実験終了後 $25\mu Sv^41/hr$ まで:言い換えれば約 $1.5 \times 10^{18}$ 個の14MeV 中性子まで)。本格的DT 実験は1995年から実施されるが、そのために、今、準備実験をしておく必要がある。

この判断から初期 DT 実験に踏み切ったわけで、ここでは、(1)地上の制御核融合の実証、(2)燃料イオン成分比制御の基礎付け、(3)トリチウムの壁での吸蔵の評価、(4)トリチウム実験と廃棄物処理の経験、(5)DT 実験での計測システムのチェック、に目標を置いた。核燃焼実験の計画法についても学ぶところが大きかった。

これらの目標については、十分な成果を上げたと考えている。特記すべき事項は多い。そのうち幾つかを指摘すると、ピーク時で2MW、全体で2MJ の核反応出力を得た。また計測法でいえば、中性子計測がきちんと働いただけでなく、ビデオカメラが真っ白になるのは、印象的な(リアル・タイムの)結果であった。詳細な研究の方では、D と T の粒子輸送を調べることができ、また、 $\alpha$ 粒子が発するサ



講演する A. Gibson 博士

イクロトン放射が観測されるなど、興味深い例が数多くあり、燃焼プラズマ物理の一端を開いたものとする。トリチウム操作と除去についても貴重なデータが得られている。トーラスに約53Ci<sup>5)</sup>導入されたが、3月の時点では(0-15) Ciまで除去された(真の値は評価範囲の下の方である)。

実験のシナリオは、放電モードの選択(高イオン温度H-モード)、微量(1%)のT入射を用いたシステムとプラズマ再現性のチェック、最後に14%のT中性粒子入射による最大パワー実験、という具合に組み立てられている。放射化や許されるTの量、といった制限を受けながら(50%でなく14%なのはそのせい)、最大の実験成果を目指す、ということ自体が初めての試みであり、その点でも大きな成果があった。

今後は、ダイバータ改造後、プラズマの改善を確認した後、1993-1994年に二回目のトリチウム予備実験を行い、最終の最高出力実験を行う予定である。

これらのほかにもJETでは、「先進的トカマクの開発」とでも言うべき研究を進めている。その一例が交流トカマク実験である。非誘導電流駆動の研究も進めているが、一方では、MA級プラズマの交流運転にも成功している。将来、技術的にどちらが開発要素が少なく済むことになるか、様々な開発のオプションを開いておくべきであり、そうした観点

からも研究を進めている。

全国の研究者の熱意を反映し、大会議室からあふれんばかりに盛大なシンポジウムになりました。Gibson副所長の講演には、半時間以上の質疑応答があり、核融合研究の進め方からα粒子物理の詳細に至る突っ込んだ議論も満喫できました。JETのDT実験の成果に続き、アメリカからはTFTRのDT実験計画が説明され、また、日本の成果として、プラズマ・核融合学会が受託して行った調査研究が紹介され、今後の研究の方向を示唆する分析結果が示されました。今回のシンポジウムと講演は、燃焼プラズマ研究振興のための出発点となり、同時に、重要課題について内外の関係者が一堂に会して討論し、今後の指針を生み出すという、NIFSシンポジウムの使命を果たしたと思います。なお、NIFSシンポジウムの詳細については、世話人により「核融合研究」誌で報告される予定となっています。

(理論・データ解析研究系助教授)

- 1) D: デューテリウム(重水素)、T: トリチウム(三重水素)
- 2)  $n_i \cdot T_i \cdot T_e$ : 核融合開発の指標となるもので、イオン温度×プラズマ密度×閉じ込め時間の積値
- 3)  $Q=1$ : プラズマ加熱に必要な入力とプラズマの核融合反応による出力が等しくなることで、核融合の科学的実証の目標値
- 4)  $\mu\text{Sv}$ : マイクロシーベルト(放射線量の単位)
- 5) Ci: キュリー(放射性物質量を表す単位)



## NIFS シンポジウム 「核燃焼プラズマの研究を考える —現状と今後のとり組み方」報告

伊藤 早苗

(九州大学応用力学研究所)

(1992年8月10日受理)

表記のシンポジウムが7月15日に核融合科学研究所において開催されましたので、報告します。

既に、本誌の速報を始め学会誌等に報告されました様に、JETにおいてメガ・ワット級の核融合実験が昨年11月に実施されました。又、TFTRやJETを用いた本格的燃焼プラズマ実験が目前になっています。更に、自己点火プラズマの実証と炉工学研究を目指すITERの工学設計も今年から始まります。日本における核融合研究は、来年より第三段階に進むという原子力委員会の長期計画が発表されています。今後どのような研究を行なうか、現状を冷静に認識し、研究意義を明確にし、具体的方策を探るのは緊急の課題です。

NIFSシンポジウムは、重要課題について内外の関係者が一堂に会し討論する場を提供する目的を持ち、核融合科学研究所が共同研究事業として行っているものです。核燃焼プラズマ研究の進め方に関する研究者の熱意と強い興味のため、会場から溢れんばかりに盛大なシンポジウムになりました。出席者名簿に頂いた署名から見ても、出席者91名(内訳はNIFS 56名、大学26名、原研6名、メーカー3名)という全日本の活動を映した充実したものでした。

プログラムを後ろに添付します。ここでは基幹発表と討議からなる内容を、かい摘んで説明します。

基幹発表は、日米欧の研究の前線を総覧する、力のこもったものとなりました。ヨーロッパからは、JETのDT実験の成果が副所長Gibson博士によって詳しく述べられ、アメリカからは、1993年7月から実施されるTFTRのDT実験計画がTFTR物理部長のMcGuire博士により説明されました。数多くの実験結果の討論があり、将来計画の展望が得られました。日本からの成果としては、プラズマ核融合学会が受託して行われた一連の調査研究が若谷誠宏博士及び伊藤公孝博士によって紹介され、今後の研究の方向を示唆する分析結果が示されました。実験結果の討論と将来計画の展望については、最新かつ最善の報告であると思われる。

Gibson副所長の講演は、1) JETの発祥の説明や 2) ヨーロッパ内の協力の在り方から始まり、3) JETでの高性能プラズマの保持、4) DT実験の計画法から実施に至る過程、5) またその結果と成果、及び 6) 今後のチャレンジに至るまで、JETの到達点をも明かにする講演でありました。

一方、TFTRではsupershotに基づいたDT実験計画が詳細に紹介され、日本からの参加法をも述べられ、国際的な協力研究の呼び掛けも兼ねていました。米国の次期計画であるTPX(Tokamak Physics Experiment)の紹介も付加されました。

日本の調査は、アルファ粒子に纏わる物理や、核燃焼計画を進める為のデータ・ベースと研究意義を分析し、プラズマ燃焼学の構築の基礎を調査研究したものでした。

これらは日米欧の、核燃焼プラズマ研究に対する研究段階と体制をはっきり表しています。それは燃焼プラズマの展望はまだ見通し明確ではなく、日米欧の三極の成果を併せることによって全体像を作り上げられていくという実態も反映しています。これだけの広さと深さを併せ持つことができた研究発表会は我が国では稀であろうと思われます。更に、充分議論が持てた点も特筆すべきです。何れの発表に対しても、発表時

間の4分の1近くが質疑応答に充てられることになり、聴衆として只聞くだけではなく、突き詰めて聞きかっ考えるチャンスが得られたと思います。

これらの燃焼プラズマに対しての現状と近い将来の計画、及び中長期的な研究意義に関する基幹発表を基にして、討論が行われました。会議出席予定者には、前もってアンケート形式で質問が配られ、意見の収集が行われました。アンケートの回収がやや手間取り、集計や分析は終わっていません。研究領域の答えから回答者を3つのグループ(プラズマ理工学、炉心物理、炉工・核融合工)に分けると、それぞれプライオリティを置く課題とそれを表現する言葉が違っていることがよく分かります。1つのグループの課題は、他のグループの「漠然とした」課題として認識されている事が多く見受けられます。(返事はまだこれから出すという出席者もあります。読者で返事を出していない方は、今からでも遅くはありません。至急御返事を！集計・分析した結果は、いずれ本誌に報告する予定です。)

研究の今後のとり組み方や進め方に関する議論も活発に行われました。データ・ベースの積み上げ・吟味・統合の重要性が力説され、燃焼プラズマの性能予想が収束する事の重要性が指摘されました。その動機の一つには、許認可手続きがある事も指摘されました。つまり、燃焼プラズマの定量的な性能予測値が装置の建設認可の必須条件になる可能性もあるからです。また、データ・ベースの構築には、装置が大型であることが本質的ではなく、集積したデータを分析する見識が十分に体系化されている事がより大切である、という指摘もされ、例が論じられました。

最後に TFTR や JET での DT 実験に実際に研究参加するために、どのような国際協力の枠や手段があるかも藤原正巳総主幹の話題提供を基にして議論されました。TFTR については、日米科学技術協力事業の一貫として参加するチャンスがあり、先方からの呼び掛けもあります。MuGuire 博士の話題は、その目的をも含んでいました。しかし、来年7月から実験は始まるため、イニシアティブを持った参加の為には日本からの計画を早急に固める必要があり、その過程や日程なども示され、事の緊急性が認識されました。各自の提案は、日米協力の各分野のキーパーソンと連絡を取り、計画案を練り上げていくという方向性が出されました。具体的な事はキーパーソンにお尋ね下さい。

主催者(伊藤早苗)の趣旨説明の後、飯吉所長による Gibson 博士の紹介でシンポジウムの発表が始まり、藤原総主幹のリードによる参加方法に関する議論に及んだこの会議は、大学や NIFS が今後この方面で果たす役割を考えるよいきっかけになったと思います。燃焼プラズマの研究振興のための出発点となる事を期待します。今回は、炉心プラズマに重点を置く立場からプログラムが作られていて、これから色々な研究・検討が行われる必要があります。今回は、NIFS シンポジウムの特徴を生かした会合を持つことができたと思います。この場を借りて、企画を支持して下さい。会合の準備に御協力頂いた皆様に感謝致します。

今回のシンポジウムに対する御意見や御感想、また次年度への持続性などについての御希望がございましたら、核融合研究誌の編集委員長(高村秀一)までお寄せ下さい。研究誌の紙上で意見交換などが出来れば、もっと研究の方向性が明かにできると思います。

なお、本シンポジウムの発表、ビューグラフ集は核融合科学研究所、研究・企画情報センターにあります。御興味のある方はセンターにお問合せ下さい。

#### NIFS シンポジウムプログラム

日時：1992年7月15日(木曜日)	2:10	日本原子力研究所委託調査から (主査)若谷誠宏 「高速イオン及びアルファ粒子の物理研究」
会場：核融合科学研究所 新館8階大会議室	2:35	原子力委員会委託調査から (幹事)伊藤公孝 「核融合プラズマの閉じ込め改善点」 「核融合プラズマの長時間燃焼制御」
10:00 開会の辞と趣旨説明 伊藤早苗	3:20	問題点の整理と研究方向への示唆
10:20 所長挨拶と Gibson 博士紹介 飯吉厚夫	3:30	break
10:30 招待講演 A. Gibson	3:40	研究の位置づけ(Discussion)
DT Experiment on JET	4:50	D/T 実験への参加、具体的方法、及び課題
12:00 昼食	5:30	TFTR (1993年) JET (1995-96) 藤原正巳
1:15 第二部 核燃焼プラズマ研究を考える -現状と今後の取り組み方- 司会 伊藤早苗		散会
1:20 Planned Tritium Experiments on TFTR		
		連絡先：伊藤早苗
		(核融合研究 68巻(1992年)442頁 より引用)

K. McGuire

#### 4. 核燃焼プラズマ研究を考える－現状と今後の取り組み方 I

－NIFSシンポジウム アンケートの集計より問題点の抽出へ－

平成5年度のNIFSシンポジウムとして「核燃焼プラズマ研究を考える－現状と今後の取り組み方」が1992年7月15日に開催されました。その会議報告は核融合研究誌(1992.Vol.68p442)に既に成されましたが、その際に集めました皆様のアンケートの集計結果をここに報告したいと思います。

アンケートはまず、回答を寄せて下さった方々が現在どの様な分野に携わっているのかを知るために、まず1)プラズマ理工学、2)炉心物理学、3)核融合工学、4)炉工学、5)原子核工学(含 中性子)、6)炉材料学、7)その他、のうちの複数個の選択を許して、自己評価していただきました。様々な組み合わせが現われましたが、結局、全体の人を三つのグループに大別するのが適当と判断してA)プラズマ理工学派、B)炉心物理(核融合)学派、C)炉工・核融合工学派にカテゴリー分けをして集計を進めました。分類の基準はA)は現在の分野に1)のプラズマ理工学のみを選択された方、B)は2)の炉心物理学を含んで選択された方、C)は3)の核融合工学もしくは4)の炉工学を中心に選択された方です。

アンケートはシンポジウム参加者の多数及び賛同者に約100余りを配布し、そのうち

回答数は52、

回答拒否を表明した数は10、

他は無回答でした。

回答数52の内訳は、A)プラズマ理工学派24、B)炉心物理(核融合)学派15、C)炉工・核融合工学派13でした。将来取り組みたい分野の質問には、上記1)～7)の項目の他に、8)核燃焼物理学、9)核燃焼工学を増やしました。その希望調査の整理を示します。

現在	プラズマ理工学			炉心物理(核融合)		炉工・核融合工学		計
		24			15		13	
将来	プラズマ理工	炉心物理	核燃焼(理)	炉心物理	核燃焼(理)	炉工	核燃焼(工)	計
	13	3	8	4	11	8	5	52

表の中で、将来取り組みたい分野としての核燃焼関係の選択数は次の様にしました。例えば、プラズマ理工学に属する人（24名）が将来取り組みたい分野として、核燃焼物理学を選択したり付加した場合の数です。各分野とも多数の方々（約50%弱）が核燃焼関係を選択された事からも、その方面の研究への興味の強さが伺われます。

質問内容の選択は核燃焼時代に向けて、今後どの様な問題や課題があり、それらがどの様に認識されているか、又どのような分野の研究が欠けているのかを明らかにするために、その基礎資料を作る事を目的としました。本稿では、まずアンケートの概略を以下に示し、また必要に応じて3学派に分けた回答例を並列に記させてもらいます。これはあくまでも回答の集計結果とその整理であり、詳細な分析や総合化の研究は今後の大きな課題と思われれます。

質問内容の概略は、

1. 【核燃焼時代に向けて】

- 1-1) 今後問題となりうる物理課題と炉心物理課題
- 1-2) 今後問題となりうる物理-工学の複合領域の課題（特にプラズマとの接合領域）
- 1-3) 接合領域の問題が炉心になげかける拘束条件について
- 1-4) 物理課題の解決（未解決）がニュークリア・システムとしての条件に与える影響
- 1-5) 接合領域の問題がニュークリア・システムの拘束を受けた時の課題への影響
- 1-6) 核燃焼炉心を評価する物性パラメータ
- 1-7) 炉心と接合領域まで含めたシステムを評価するパラメータ

2. 【近将来のD/T実験に向けて】（TFTR 1993～、  
JET 1995～96）

- 2-1) 参加の希望
- 2-2) 参加の具体的研究内容及び方法
- 2-3) TFTR/JETのDT実験で得られる知見の予想
- 2-4) TFTR/JETのDT実験で得られない知見の予想

解答形式が、答えを寄せて下さったの方々によって広汎に渡ったため、整理の際、てにをはを整えるなど文体を変更した所があります事をご了承下さい。

1. 核燃焼時代に向けて

1-1) 今後問題となりうる物理課題は？

プラズマ理工学派

- $\alpha$  粒子による不安定性
- $\alpha$  粒子の単粒子としての閉じ込め
- $\alpha$  粒子の集団効果が巨視的な閉じ込めに与える効果 (MHDモード等)
- 燃料・ $\alpha$  粒子の閉じ込め特性 (希釈化、拡散)
- $\alpha$  粒子との波と粒子相互作用
- $\alpha$  加熱プラズマのスケーリング
- $\alpha$  粒子損失によるプラズマの帯電、回転
- $\alpha$  粒子の速度分布関数の計測
- $\beta$ -limit 近くの熱及び粒子の輸送現象
- 乱流と輸送
- 高エネルギー粒子等を含む多成分プラズマのダイナミックス
- ブートストラップ電流に関する理工学的問題 (制御)
- 閉じ込め改善
- 長時間燃焼に伴う内部構造の変化 (成分比、分布...など)
- 構造解析 (粒子の発生、mass の変化、熱波) 及び測定との比較
- ダイバータの熱負荷 (壁への熱流、中性子流制御)
- 核反応サイクル(放射線を含む)を考慮に入れた高温プラズマ物性(局所・大局的応答)
- 炉心プラズマの定常維持
- 燃料と灰の定常的抽入と取り出し
- 高ベータ化 (第二安定領域)
- ディスラプション回避
- 燃焼計測制御、反応生成物がプラズマ計測器に及ぼす影響
- $\alpha$  粒子による計測、Heビーム計測 他 特殊計測技術

炉心物理 (核融合) 派

- 燃焼時の  $\alpha$ 、灰、燃料の定常閉じ込めバランス
- $\alpha$  粒子の閉じ込めとプラズマの輸送変化 (高エネルギー粒子)
- Hモードと  $\alpha$  粒子加熱の整合性
- 燃焼による燃料の対流とそれに伴う構造
- 燃焼生成物による相転移
- 燃焼流体の輸送と動特性
- 粒子閉じ込め (灰、不純物を含めた密度分布制御)

閉じ込め改善

粒子輸送の体系化（静電場を含む）

熱不安定性の成長レベルと出力変動

自己燃焼の維持と制御法の確立

定常（長時間）燃焼

プラズマ対向材の閉じ込めへの影響（相互作用）

He粒子のリサイクリングコントロール

電流駆動

ダイバータの定常的排熱と不純物制御

炉工、核融合工学派

$\alpha$ 排気、エネルギー緩和過程、燃焼制御

燃焼制御（He除去、不純物制御、炉の起動と停止など含む）

燃料供給と燃料比のコントロールと排気（希釈を含む）

長時間燃焼

核燃焼率の制御

灰選択的排気

炉心（燃焼）の動特性、出力変動時の時定数と可変範囲

実用材料の開発（対向材含む）

トリチウムの挙動、水素同位体のリサイクリング効果

スクレープ・オフの物理（カーボンプルームの抑制）

電流駆動

排熱の新しい方法開発（例えばシンクロトロン輻射）

ディスラプション制御

ブランケット工学と燃料サイクルシステムの確立

安全性評価

経済性評価

1-2) 今後問題となりうる物理-工学Interfaceの課題は？

プラズマ理工学派

壁に期待をかけない閉じ込め改善のテクニックが必要

$\alpha$ -加熱プラズマのスケーリング

ブートストラップ電流の抑制

閉じ込め時間の制御と不純物、灰除去/ダイバータ負荷の制御

ダイバータと壁材料が、定常的運転・閉じ込めの良い状態と両立可能か？

壁への熱流、壁からの粒子流と炉心プラズマの熱い粒子、及び運動量の流量に関する条件、熱流制御

プラズマ周辺部の物理的課題の解明（壁やブランケット等、技術的課題）

ダイバータにおけるダイバータ板の構造及び排気技術

$\alpha$  粒子によるターゲットプレートの損傷

He 粒子の選択的排出

ダイバータ・プラズマ中での制御

燃料補給に関する課題は工学（技術）が開発が先決

不純物制御のためのダイバータ物質

炉心への要請を軽減する方策としての interface の考察

従来のプラズマ診断制御手法の核計装化、炉材料

炉心計測は、中性子照射、装置へのアクセス、遠隔操作等、工学的要素が大きい

どちらの分野にも新鮮と感じられる実験（計測）データの算出

炉心動作条件並びに発生粒子、エネルギー等に対する外部からの制御性の確立

D-T を実施する時の「安全法規制」のあり方

炉心物理（核融合）派

L/H 遷移制御方法の開発

シンクロトロン放射の反射吸収

燃焼制御（火力、原子力発電は最終的には人間の判断で制御する部分あり）

ダイバータ核熱除去

壁の熱負荷とその処理法

SOL-ダイバータ部の粒子束、熱束処理

プラズマの保持するエネルギーが増大したときの第一壁の保証

高効率電流駆動

ダイバータ制御

高密度低温ダイバータ、ターゲット・熱負荷軽減

ダイバータ熱負荷軽減（炉心の閉じ込め特性、 $\beta$  値などに影響なしで）

He 粒子閉じ込めの制御には He 排気システム／排気方法の工学的確立が必要

粒子閉じ込め制御

燃料補給法の開発

不純物問題

ヘリウム排気

核燃焼工学研究という条件からの PFC の選択条件、既存の閉じ込めデータベースの改良の可能性と研究方針の作成

第一壁材、中性子による放射化、メンテナンス

中性子照射下での特殊変化の少ない材料開発（期待薄）

ディスラプションの回数や ELM の大きさ等の制御を通じて運転条件を制限したデータベースの利用の可能性

ディスラプションに対する裕度とその回避技術の確立

制御に必要なセンサーの開発

定常運転→定常炉出力、完全定常が困難ならば duty cycle はどの位か？

安全運転の模索（トリチウム、放射線、中性子）

$\alpha$ 加熱

炉心動特性のモデル化と制御方法・設備・アルゴリズムの確立

燃焼制御（He除去、不純物制御、炉の起動と停止を含む）の確立

核融合燃焼サイクルの側面から、燃焼効率と燃料組成との関係

排気制御

シンクロトロン放射熱の第一壁反射率の増大

境界プラズマ

ダイバータ部のD、T、 $\alpha$ 不純物排気

プラズマ壁相互作用の諸問題（中性子負荷を含む）

プラズマ壁相互作用

壁での交換反応

カーボン・ブルームの抑制とプラズマ対向材料の開発

周辺プラズマから炉心プラズマへの粒子輸送の同位体効果

不純物発生の機構/動特性：リサイクリング排気

炉全体におけるトリチウム・インベントリー及びリテンション分布

燃料 ( $^3\text{H}$ ) に伴う放射熱

ディスラプション制御

ブランケット工学と燃料サイクルシステムの発展と確立

安全性の評価の確立

経済的評価

早い機会に炉心物理を卒業すること

1-3) Interfaceの問題は核燃焼、炉心をどう拘束するとお考えですか？

プラズマ理工学派

周辺機器、材料の選択における整合性

外壁のleading問題の解消等、炉心状態に対する要請

材料の放射化が燃焼プラズマのパラメータを拘束

核燃焼炉心学挙動を最も効率的に把握する情報量の取捨選択

定常解が存在するのか、一義的に決まるのか？ いかなるフィード・バックが必要か？

見通しがありません

あまり拘束しない

一口では言えない

D-T反応からD-He<sup>3</sup>反応へ進むことを考える必要あり



材料側に大きな進展がなければプラズマに大きな負荷を与える

原型炉の  $> 50 \text{ MW/m}^2 \rightarrow \sim 15 \text{ MW/m}^2$  熱分布技術の必要性和閉じ込めとの関連

SOLプラズマと炉心プラズマ中の粒子制御が必要

中性子損傷や熱特性で使用可能な材料が限定され、Be、ボロン、炭素が使えなければ、現在

の炉心データの大部分は、そのままでは将来のデータベースにならない

装置が目標を達成できるかどうか

運転性能の安全率の問題と炉心パラメータの制約

He排気量（速度）は、Tインベントリーにより制約される

全体のサイズ、あるいはエネルギー値に上限を与える

炉心プラズマの密度、温度の最適パラメータ条件の決定

エネルギーの閉じ込めが悪ければ、炉心は大きくなる

D-<sup>3</sup>He燃料、直接発電（変換）

核融合反応をある程度抑えた運転を考える必要あり

設定可能な配位の開発

適用電源に供することが可能かどうかの鍵になる

安全対策上からは、物理現象の理解よりは、システム工学的な炉心の理解が重要

定常化に向け克服しなければならない炉心プラズマの問題があまりに多い

炉工・核融合工学派

Interfaceがカバーできる範囲の炉心のみが許される？

うまくいけばコンパクトへ、下手すると一層巨大化へ

炉心の超高温保持と安定化

場合によっては核燃焼炉心の定常維持が困難

中性子とトリチウムについての対策

材料損傷（中性子）；放射化物、トリチウムの管理／処理

Nuclear Systemの安全性の観点からシステム全体におけるTインベントリー及

びリテンションの低減化の必要（効率的燃料システムの開発、Tリテンションの少ない材料開発）

原子炉の安全性問題、安全審査

致命的なものとはならない

1-4) (1-1)の物理的課題はNuclear Systemとしての拘束条件

をどう変えるとお考えですか

プラズマ理工学派

$\alpha$ 粒子が影響を与えると思われるが、これはプラズマ物理の問題

オペレーション領域の縮小

同位体の輸送・閉じ込めについての知見がどこまで役立つかわからない

H, Dで優れたdeviceが核燃焼でも優れているという保証がない

条件によっては望ましくない放射性物質の生成が増える

反応条件の選択により、工学的に緩和される部分と、厳しくなる部分が生じる

(個別条件比較と総合的評価法の確立が必要)

装置の性能評価の基準を何処に置くべきか

第一壁材料を考える上で大きな影響を持つ

DTからDD、又はD<sup>3</sup>He fuelへの可能性と材料問題の軽減化

限られたアクセス下での計測

特に変わらない

炉裁判法に近いものがD-T実験に適用される場合、ITER/実験炉以前にD-T燃焼で

(1-1)の課題を実施するのは困難

炉心物理(核融合)派

核融合反応をある程度抑えた運転を考える必要あり

閉じ込めの劣化が生ずると、装置の物理的パラメータを増大

システムのコンパクト化、高エネルギー密度化

密度制御は中性子よりトリチウムの必要量に影響

ダイバータ炉等の熱除去が炉心として成立するのかどうかに関係あり

直接的な関係が見通せない(Nuclear環境下でのエッジの条件の変化と影響)

2次排気システムの必要のない大容量He排気

ダイバータによる排気制御の必要

熱負荷の定常化

D装置の保守問題

遠隔操作

現在の「拘束条件」は法的側面か、又は研究のステップを1MWa/m<sup>2</sup>とするといった目標

選択の側面がある。後者は選択の可能性や上限・両立性を変える

ECCSが必要か否か

炉工、核融合工学派

点火条件での長時間運転の決定

炉としての加熱装置のコンパクト化

安全工学的に成立する核燃焼でなければならない

ブルームの抑制と対向材料の開発を克服しない限り燃焼状態を保持出来ない

壁材料の選択/保守

部品の遠隔操作交換

ブランケット工学、燃焼サイクルシステムの発展と燃焼制御の確立は炉心物理として不可欠  
本来的に核融合はトリチウムから逃げられないので拘束条件は変わらない  
直接的拘束は受けない  
安全性+経済性が原子炉とほぼ同等以上でなければ炉の建設は認められない

1-5) (1-2) の Interface の課題は Nuclear System としての拘束を受けるとどう変わると考えられますか

プラズマ理工学派

より高熱流束対応、低放射化の材料開発  
ダイバータ板の放射化による取り扱いの困難さ  
高温状態の材料強度の大幅劣化 (中性子照射による)  
材料の変質、耐久性、放射化とその処理  
中性子による材料のダメージがある  
熱流と中性子束をなるべく独立に変えられる様にする  
H-factor ~ 2 程度の閉じ込め、その定常炉という路線がなくなる可能性  
良いプラズマ閉じ込めと安全な (有害な放射線が外部に出ない) 装置の実現と中身を良く調べて物理課題を追求することは相矛盾している  
放射線安全、熱的・力学的安全等の条件 (材料の選択含む)  
エネルギー発生システムとしての効率改善  
必要最小限且つ高信頼度システムの要求  
法規制が許せば、日本での ITER のサテライト装置で DT 実施の可能性あり

炉心物理 (核融合) 派

ダイバータ板の熱負荷の軽減  
灰排気  
第一壁材は開発しないと炉は成立しない  
放射損傷を受ける分だけ熱処理系の設計により大きな余裕度が要求される  
放射線、中性子環境下で熱伝導率などの PSI の性質の変化 → ダイバータ熱負荷への余裕度の減少  
電流駆動装置のアンテナ等が中性子照射に耐えられない可能性あり  
"定常" のタイム・スケールが問題となる  
SOL-ダイバータ部は遠隔操作、廃棄物処理の容易さを考慮する必要あり  
遠隔操作  
熱センサー、電磁気センサー、中性子センサーのみでプラズマを制御する必要性  
計測関連が特に厳しくなる  
負帰還制御と再起が非常に重い  
効率よい実験の遂行と研究成果とのジレンマ  
ニュークリアシステムとしての条件を大きくすればする程、課題が増す

実験方法（一台の燃焼装置といった方法）に困難が増す

D装置の保守問題

法的規制を受けて、自由で柔軟な運転が出来なくなる

炉工、核融合工学派

トリチウム保持、循環、浸透（量、化学形、分布）の影響

中性子照射による検出・制御機器への影響

炉心部機器の交換技術

遠隔交換が必須

安全性の観点から、システム全体におけるTインベントリー及びリテンションの低減化の必要

（効率的燃料システムの開発、Tリテンションの少ない材料開発）

安全問題（炉心崩壊）

安全性の面から、モデルや手法の妥当性の保証が重要になる

そう変わらない

直接的拘束は受けない

#### 1-6) 核燃焼炉心を評価する物性パラメータは何でしょう（3学派）

核融合積  $nT\tau$

ベータ値  $\beta$

Q

出力密度（単位体積当たり）

全出力

$\tau_E, \tau_p, \tau_p / \tau_E$

$Z_{eff}$ （希釈度）、不純物混入特性

核融合反応生成物量

中性子（発生量、全発生数）、発生率（密度）

放射損失

シンクロトロン輻射損失

イオン反応生成物の密度・分布・時間的推移（ $\alpha$ 、He燃料、高エネルギー粒子の輸送時間）

熱伝導係数、拡散係数、粘性係数

燃焼プロファイル（イオン温度／温度／密度）

電流分布、磁束（変化）

電場、回転速度分布

安定性に関するパラメータ

炉心に対する有効加熱率とそのプラズマパラメータ依存性

エネルギー発生密度と分布

炉内でのバーン・アップ  
 余剰反応度  
 燃焼度 (D/T)、燃焼率  
 燃焼効果と燃焼組成比  
 燃料の種類、組成比率  
 燃焼分布、燃料イオンの密度、分圧、燃料イオンの  $\beta$   
 反応度の時定数  
 燃焼動特性の時定数  
 燃焼対流速度やその乱流状態のパラメータ  
 放電維持時間  
 持続時間と反応速度  
 定常、準定常の制御性  
 システムとしては制御性  
 コンポーネントの寿命  
 ダイバータのピーク/平均熱流量 面密度/第一壁の反射率  
 材料パラメータ  
 固体表面と水素同位体の相互作用に関するデータ  
 原子・分子過程  
 トリチウム増殖比  
 トリチウム循環  
 どの様な見地で評価するかによる

1-7) 核燃焼炉心と Interface まで入れた系で炉心进行评估するパラメーター (評価関数)  
 は何でしょうか? (3学派)

$\tau_E, \tau_p, \tau_p^*$   
 $\beta$  (ベータ値)  
 エネルギー増倍率 (Q)  
 単位体積当たりの出力パワー  
 熱発生量及び熱フラックス密度  
 出力  
 中性子発生量、中性子束、中性粒子流  
 発生中性子数 (積分値) / プラズマ生成・加熱に要した総エネルギー  
 $Z_{eff}$  (密度比  $H_e / (D, T)$ , 不純物流)  
 放射パワー  
 核反応生成物の生成分布、エネルギー分布の時間的推移  
 プラズマイオンのエネルギー分布と時間的・空間的推移  
 He の輸送  
 不純物制御 (ダイバータを含む)  
 熱流

物質及びエネルギーの循環率

バーン・アップ

燃焼率

燃焼率・燃焼時間の積

燃焼変動率

燃焼効率 (Q値、稼働率)

熱変換効率

安全出力調整のできる範囲

核燃焼炉心プラズマの制御性の良さ (定量的に何で表わせるのか、未だ不明)

外部じょう乱に対する安定性 (定量化は難しい)

安定性、安全性

放電時間

燃焼持続時間

制御性

負荷追従運転の可否

材料特性

ダイバータ部単位面積当たりの熱流束

ブランケットをいかにゆっくり加熱するか (分裂炉と比べて厳しい)

材料、冷却方式、燃料注入方式等を変えた事による不純物や中性子の長時間挙動

コンポーネントの寿命

トリチウムの粒子補給効率

トリチウム増殖比

トリチウム透過

Tリテンション

$^3\text{H}$ インベントリー

放射線、強度、放射流、放射化量

放射能管理の安全性/信頼度 → 廃棄物処理 (利用?)

環境安全性

早期実現可能性 (単純さ)

炉心装置のコスト

電力密度/電力コスト

\$!! (break down すればQ、寿命等)

難問です!!

2. 近将来のD/T実験に向けて (TFTR 1993~) (JET 1995~96)

2-1) 実際に参加して研究したいとお考えですか?

	はい	いいえ	その他
プラズマ理工学派	9	6	9
炉心物理 (核融合) 派	6	6	3
炉工・核融合工学派	8	2	3

2-2) 具体的研究内容及び具体的方法 (方策) は何ですか? (3学派)

- α粒子の挙動とMHD平衡・安定性の関係を理解すること
- α粒子閉じ込め、緩和
- α粒子の空間分布/CXRS
- α粒子の振る舞いとスペクトル線の構造及び振る舞い
- αによる不安定性と磁場配位依存性の実験的研究
- 核燃焼物理 (α粒子分布計測)
- Fuelingに関する課題 (特に長時間 [定常] の分布制御)
- TAEモード等をはじめとする燃焼時の物理とその計測
- 同位体効果等をはじめとする燃焼時の閉じ込め特性の一部
- 加熱効果
- プラズマダイナミックスの実験的研究、MHD、f(v)の測定
- 燃料と灰の挙動
- D/T粒子バランスの制御
- 燃焼による相転移は (燃焼後のH-mode構造の研究)
- 炉心燃焼動特性のモデル化と制御手段の探索 (具体的には未検討)
- ダイバータ工学 (色々な材料のテスト)
- プラズマのディスラプション制御
- 核燃焼に関連する計測研究
- DT中性子計測によるプラズマ診断
- α粒子計測
- 遠隔操作の有効性テスト
- トリチウムインベントリーの分布測定
- トリチウムマイクロバランスの評価とトータル除去システム評価
- T操作と放射化の問題解決のためのデータ蓄積
- 文部省科研申請中

個人的に IAEA、日米ワークショップ等を通じて、JET や TFTR の研究者とコミュニケーションしていくしか現状では方法がない  
三大トカマク会議等、JT-60 をもっと開かれたのにして、大局的に参加するのがよい。

2-3) TFTR、JET の DT 実験でどのような知見が得られると思いますか

プラズマ理工学派

$\alpha$  粒子の高速イオンとしての挙動に関する知見  
 $\alpha$  粒子の閉じ込め、加熱特性  
中性子に関する情報  
 $\alpha$  粒子による不安定性の危険性について  
14 MeV 中性子、3.5 MeV  $\alpha$  粒子の発生挙動  
不安定性 (TAE 等) による閉じ込め劣化  
 $\alpha$  粒子による MHD モードの変形  
 $\alpha$  粒子の輸送と He 灰対策  
 $\alpha$  粒子と MHD モードの結合  
同位体効果等をはじめとする燃焼時の閉じ込め特性の一部  
加熱効果  
大きな  $\beta$  値に対する安定性  
燃焼の可能性と制御性  
分布形状の変化と閉じ込め劣化  
短時間放電の殆どのパラメータ、長時間でゆっくり変化する状態の情報は無理  
H-mode との両立性  
トリチウム (50%) プラズマの閉じ込め性能  
He 灰の蓄積、 $\beta$  値の上昇、核燃焼の低下  
DT 中性子に対する機器の挙動  
壁-プラズマ相互作用によるプラズマへの悪影響の顕在化  
核燃焼に関連する計測研究  
計測に関する問題点が指摘される  
遠隔操作機器の有効性  
トリチウム取り扱い安全の実証  
トリチウム取り扱いの基本手法  
放射化の基礎データ  
研究者の意欲が向上したかどうか

炉心物理 (核融合) 派

$\alpha$  粒子 → 電子 → イオンへのパワーの流れ  
TAE の重要性



$\alpha$  粒子の閉じ込め  
 $\alpha$  粒子と異常輸送との関連  
 $\alpha$  粒子の軌道損失  
 $\alpha$  粒子とMHD不安定性との関連  
 $\alpha$  粒子による不安定性  
 $\alpha$  加熱パワーによる閉じ込め劣化  
燃料対流の受動的な応答  
閉じ込めスケーリングのアイソトープ効果  
核融合反応生成粒子のプラズマ特性への影響  
閉じ込め特性の質量依存性  
燃料イオンの輸送  
閉じ込め時間のD-T質量依存性  
不純物は制御可能か  
燃焼による相転移  
炉壁の損傷の程度  
トリチウムの取り扱い  
トリチウム処理技術についての知見

炉工・核融合工学派

$\alpha$  加熱の基礎過程  
 $\alpha$  粒子の振る舞い（閉じ込め）  
D、T燃料の高密度化と高出力化  
Heを含んだプラズマの挙動  
D/Tの粒子バランス  
燃焼という現象の時定数など動特性  
核燃焼率と閉じ込め条件  
やや長いパルスのD T燃焼が実際に生じることの実証  
プラズマ対向材料中のトリチウムリテンション分布  
TFTR：壁強度が低いため、トリチウムのインベントリーも必然的に高くなって、将来の炉  
に対し多くは望めない。  
JET：Beで実験を行なうと、将来のhigh Z金属へのある程度の示唆  
長燃焼時間実験における問題点の抽出  
炉室周辺におけるトリチウムの挙動  
トリチウム使用、中性子発生に伴う工学的な経験  
T操作と放射化の問題解決のためのデータ蓄積

2-4) どのような知見は得られないと思いますか？（3学派）

グローバルな熱的不安定性に関する知見  
 $\alpha$  粒子とプラズマ特性の関係

熱的不安定性

燃焼時の詳細な閉じ込め特性

スケーリング

炉心プラズマとしての全く新しい展開

燃焼のつくる自由エネルギーが生み出す対流

$\tau_{D\alpha} / \tau_S$  と燃焼停止に対する実験的知見

バルクへの影響

大出力  $\alpha$  燃焼での閉じ込め

燃焼安定性 (成長率)

燃焼の安定した持続に関する手法・技術

燃焼制御

核分裂炉の余剰反応度のようなもの

暴走特性

PFCが燃焼に与える影響

材料損傷

$\alpha$  粒子計測法を開発、適用する。

核融合炉として必要な”定常”

長時間の反応の影響

長時間運転 (成長率の遅い不安定性あり?)

核融合炉の工学的成立性

DTシステムとしての総合的評価

炉工に必要な要素の大部分

炉心へのフィードバック

実用炉への見通し

核融合炉建設の為の将来性に関する知見

大規模超伝導コイルの適用可能性

商用炉実現のためのエネルギーフローの確立と工学的実現可能性

放射化に対する材料技術に関する知見

トリチウム増殖を含む実用的中性子取り扱い

トリチウム増殖の可能性

炉としての経済性

プラズマ研究者が”期待しない”知見は得られないのでしょうか

御回答者リスト (五十音順)

井口 哲夫	井口 春和	池上 英雄	居田 克巳	市口 勝治
伊藤 公孝	犬竹 正明	井上 信幸	大林 治夫	岡村 昇一
岡本 眞實	奥野 健二	加藤 隆子	佐藤 浩	佐貫 平二
嶋田 隆一	関子 秀樹	高瀬 治彦	高村 秀一	竹内 一浩
竹内 浩	田中 知	田辺 哲朗	谷 啓二	玉野 輝男
常松 俊秀	遠山 潤志	内藤 裕志	永見 正幸	西川 正史
西川 雅弘	野田 信明	林 隆也	飛田 健次	福山 淳
藤田 順治	政井 邦昭	松山 政夫	御手洗 修	宮本 健郎
村岡 克紀	毛利 明博	百田 弘	森田 健治	森田 繁
山崎 耕造	山科 俊郎	山田 弘司	吉川 潔	吉田 善章
若谷 誠宏	渡辺 国昭			

1. 定常核融合燃焼に係わるプラズマ物理の課題

定常燃焼プラズマに関しての現在までの実験的な成果は限られており、今後一層の研究方針の練り方が必要である事がわかる。

第一に、プラズマ炉心物理の研究は

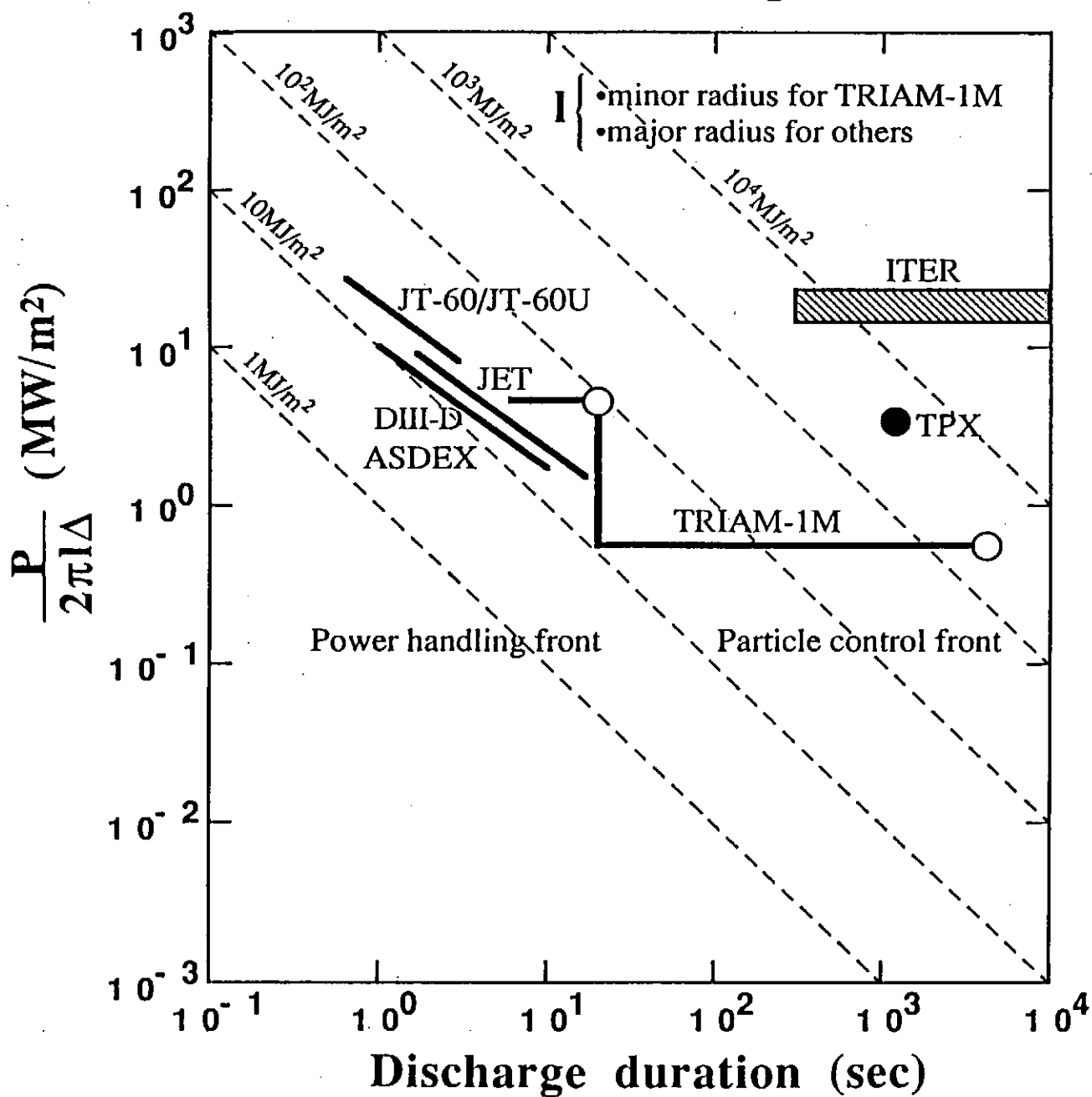
1) 核融合燃焼運転に向かう研究

2) 定常運転に向かう研究

が別々に行われている事である。所謂、大型トカマクにおける大入力プラズマの運転は1)を志向しているものである。一方、核融合研究の歴史から考えても、定常運転、それも十分長いプラズマの運転に関しては1)を志向している装置における研究量に比して、ほんの僅かである。2)の定常燃焼プラズマ運転を実現するためには、核融合燃焼というプラズマの質的変化を伴うプラズマ燃焼物理に係わる問題と、それを実現するための燃料補給や燃焼結果として現れる灰の除去や熱流束の処理といった問題を、分布を維持しながら、それも長時間維持し続けるという、パワーと時間という2つの大きな軸を考えた研究が必要であることがわかる。

核融合燃焼の研究については、対向機器との整合性（壁材の耐熱量、耐熱流束）などから放電時間は数秒のオーダーに限られているが、JETが初めて予備DT実験を行うなど、端緒がついている。一方、長時間運転についてはTRIAM-1Mは長時間運転を実現しているが、全パワーは100kw程度と小さい。また粒子制御系や熱処理系、及び対向機器の対質に関する整合性などについては未だ十分には解明されていない。現在に至るまでの世界の研究成果を、単位面積当たりの処理パワーとその放電時間面

### Power handling



上にプロットしたものを第一図に示す。(原子力委員会委託調査「核融合プラズマの長時間燃焼制御に関する調査研究(1991)」の報告書より引用、伊藤公孝による。)

この様な研究の現状を踏まえて、本章では物理的課題を2つに大別し、その相互関係の洗い出しを行う基礎を作る。

## 2. 核燃焼プラズマの物理研究

核反応プラズマ実験で何が分かれなければならないかを考える事こそ、「核燃焼プラズマ物理の研究」である。見通しを立ててその critical issue を洗いし、それらの priority 付けを行うこと、研究方針をよりの確なものにし、研究を遂行してゆくことが研究の主題である。

核燃焼プラズマ物理は、まだ正確な位置づけや把握がなされていない。物理的見地から質的に変化するものを考えると、“核反応があるプラズマと反応の無いプラズマとを比べた場合に物性定数として何が違い、またどの位の差があるか”という事に集約されよう。核融合におけるプラズマ燃焼物理学、プラズマ燃焼化学の構築が必要とされてきている。

### 2-1) 反応の発熱効果と高速イオン

反応によって粒子体系(例えばD-Tプラズマの場合、D-TイオンのプラズマからD, T,  $\alpha$ , n,  $^3\text{He}$ , pの体系へ)が変化する。この混合度が変化する。そして発熱を伴う。D-T炉心プラズマでは、プラズマへ移る熱は $\alpha$ 粒子がもって出てくる。この高速イオンが衝突によって減速しながら、まわりの燃料イオン(DとT)をまた加熱する。

一連の $\alpha$ 粒子などが起こす(もしくは変化させる)事象のなかで、不安定性については、Thermonuclear Instabilities と総称される。状態変化の中で、主に高エネルギー粒子という発熱作用からくる一つの面に注目した場合の不安定性群である。粒子や熱の異常輸送や巨視的運動へのエネルギー変換が問題となる。異常輸送については、イオン混合率の変化や、加熱率、空間構造などに影響を及ぼす。巨視的運動への変換には、collapse, disruption, sawtooth、回転、L/H 遷移などがあり、いわゆるアブノーマルな運転に到らしめる危険性がある。 $\alpha$ 粒子とバルク粒子との個数比、もしくは圧力比に応じて、各不安定性の発生閾値や、高エネルギー粒子による安定化が研究されている。

それらについて現れると予測される現象を表1に示す。これらの事象は、当然高エネルギー粒子数に閾値を持つ。一般に Thermonuclear Instabilities は  $n_{\alpha}/n \sim 10^{-3}$  程度、圧力比としては、バルク・プラズマと同程度になった時に現れるとされている。critical condition は実験の規模、つまり想定Q値と維持時間に依存する。性能のよい定常値に達するまでに、十分な反応が炉心で維持されれば、色々な現象変化が現れてくるはずである。1991年のJETの実験の#26148のショットでは、 $Q=0.15$ であった。この時に、 $\alpha$ 粒子の持ったパワーと平均圧力比は、各々320kWと2%(電子との密度比は0.08%)である。

1996年ごろの full performance 実験で、どこまで性能を上げられるかは、燃料の mixing-control と purity-control, Plasma Facing Component (PFC)での熱や粒子の処理等を通じての良い放電状態の維持に鍵がある。ITER級プラズマを例にとって考えてみる。制御した反応が始まったとすると、秒のオーダーで  $n_{\alpha}/n_e$ が1%位となる。一連の Thermonuclear Instability の兆しは、このころから現れる。

現象	対応する物理	Critical Condition に 関連する量	炉心への影響	$\alpha$ 粒子への効果	観測量	実験的検証の現状
磁場リップロス (I) 磁場リップロス (II) ロスコーン損失**	粒子軌道 粒子軌道の変化 Hモード**	磁場配位, リップル率 $\delta, I_p$ 電場 ( $E_r$ ), Hモード	直接損失 (壁への局所的) 壁への損失場所, 巾の変化 $\tau_p$ 遷移**	損失スペクトラムの変化 $\tau_{pa}$ **	外部壁での直接観測	高エネルギーイオンの観測 にて可能**
Sawtooth Onset rise time (sharktooth) period stabilized	$q \simeq 1$ , MHD, $m=1$ モード* 電子温度上昇の割合 回転/粘性** 抵抗性, $m=1$ モード*, 粘性**	$P_\alpha(\tau_{st}, t)$ の変化 $\tau_{st} \sim \tau_A^{2/7} \tau_R^{3/7} \tau_h^{2/7}$ $\frac{n_\alpha}{n} > C_0$ , hot-ion population	Effective $P_\alpha$ の減少 加熱分布 加熱率 $T_e(\tau_{st}) \nearrow$ , Sawtooth 抑制	径方向の異常損失 異常損失の低減	マルチ $X_{ray}(\tau, t)$ " 振動停止, $T_e(\tau)$	ICRF 高エネルギー (JET) Heat Pulse 実験では $P_\alpha \nearrow$ で period $\nearrow$ 高速イオン放電
Sawtooth crash TAE onset Fish bone onset	無衝突リコネクティング モード*, ストカシテシテイ** TAE ( $n=1$ ) モード $q \simeq 1$ , 捕獲性, $m=1$ モード*	$J(\tau), T_e(\tau), \tau_{st}$ $J(\tau), V_\alpha \gtrsim V_A$ (?)** $\frac{n_\alpha}{n} > C_1 \left\{ \beta_\alpha \geq \frac{R}{r} \frac{R}{V_A} \omega_\alpha \right\}$ $\omega_\alpha = \left( \frac{E_0}{cBR} \right) / R$	ELM トリガー** $P_\alpha$ の激減, 燃焼率低下 異常輸送, Cavity 効果** $n_\alpha$ の減少, 加熱率 壁へのビーム的損失 ELM トリガー**	中心部の orbit 径方向移送 $ v  \simeq \frac{R^2}{r} \frac{b}{(1-q)} \omega_\alpha$ の速度で 移送	Pulses $\Delta P_\alpha(t)$ の径方向伝搬 $\dot{W}_\alpha(\tau), \dot{B}$ , 直接観測 $\dot{W}(\tau), \dot{B}$ , 直接観測	Collapse**, ELM** Large (Heat) Pulse** C, Be プルーム** TAE(Beam Driven) モード Fishbone 不安定性
Micro instabilities	サイクロトロン波帯 high $m$ ドリフト波帯 high $m$		エネルギー交換率 } 増加 粘性率 } $\chi_{e,i}, D_{e,i}$ 増加	$D_\alpha / \chi_\alpha$ 粒子, 熱のはきだし 及びピンチ, 両方の可能性	$V_\sigma(\tau), T_\sigma(\tau)$ $T_\sigma(\tau), n_\sigma(\tau)$	サイクロトロン波不安定性 加熱分布, 加熱率
Hモード ELM (SELM, GELM)**	Edge の電場, 回転構造や幅** 粘性**	$\frac{\partial E}{\partial r} < 0$ 幅とタイムスケール**	相転移** 遷移** 粒子の輸送障壁 (熱も) 燃焼の分岐, ** 遷移**	軌道変化, リップル損失 $\tau_{pa}$ ** ロスコーン損失**	$E_r(\tau), U_i, P(\tau)$ ELM**, バースト**	高エネルギー粒子の損失** 電場, 回転の測定** $\tau_p$ ** 局所的, 非定常損失 C, Be プルーム**
波動電流駆動	$\alpha$ 粒子による吸収	$\omega \simeq k_{  } V_\alpha$ , スペクトラム $\omega \simeq n \Omega_\alpha$	駆動率の低下と電流分布変化 不安定性の条件変化**	$\alpha$ 粒子の再加速, 再加熱** ブート・ストラップ電流**	$J(\tau)$ , Deposition Profile 電流拡散係数	輸送コードを介した Deposition 解析, 周波数帯
$\alpha$ 粒子蓄積 不純物蓄積 燃料混合比**, 全混合比**	熱的定常な二重解 Dilution, 熱的定常解消滅 燃焼率**, 粒子体系**	$n_\alpha/n = F(n\tau_E, T, \tau_P/\tau_E)$ $(2n_\alpha + Zn_Z)/n < C_2$	熱的不安定性, 燃焼制御法** 熱的定常解の消滅 燃焼平衡** 燃焼の分岐, 遷移**	生成率の低下 生成の停止	neutron, $T_e(\tau)$ ... neutron, $T_e(\tau)$ ...	$D_\alpha \sim 0.5 \text{m}^2/\text{s}$ ** Isotope 依存性, 分布

(注) \*モードについては種々のモデルによって異なる。 \*\*1992年現在変更点あり。 SELM, GERM は Small ELM, Giant ELM の略。



## 2-2) 電流分布への影響と問題

定常運転のためには炉心への電流駆動とその分布制御が必要である。しかし、核燃焼が存在すると物理は単純ではない。というのは、別の機構が働き電流分布を変えてしまう可能性もあるからである。電流駆動を波動で行ったと仮定すると、電流駆動するためのパワーは電子に全て行くわけではない。方向性を持った波動はアルファ粒子によって吸収されてしまい、そこで deposit されるべき運動量は減ってしまう。希望の電流分布を作ろうとしていたのが、まず阻害され、全体の駆動効率は下がり、空間分布も違ったものになる。

この場合、減速してきたアルファ粒子を再度加熱することにもなる。また電流駆動はアルファ粒子を媒介にした間接的な電子加熱になる可能性もある。バルクの圧力を増加させるわけでもあるので、所謂 Bootstrap 電流が誘起される。この Bootstrap 電流も通常予測される分布とは違ったものになる。

上記の二つの過程を考えあわせると、希望する電流分布から、ずれた分布になる事は想像に難くない。電流分布の変化に応じて、 $\beta$ -limit や stability boundary 及び輸送は変化する。全体像や、より定量的な議論は今後の解析に依存する。

## 2-3) 灰 (ash) と Thermal (Burning) Quench

輸送係数の比 (ルイス数)  $D/\chi$  の値によっては、燃焼は持続しえない。(ここでいう燃焼とは、自己燃焼をさす。) 一反応当たり単位エネルギーと一個の  $\alpha$  粒子を出すのが、灰として残存しだすと、Thermal (Burning) Quench を起こしうる。この指標が  $D/\chi$  の値で

あり、炉心全体から見ると  $\tau_E/\tau_p$  に代表される。灰粒子の閉じ込めが良すぎると、性能が劣化する。また外への排気が悪いと燃焼はくすぶることになる ( $R \sim 1$ )。例えば、排気機能が悪いと事態は更に悪化する。現状のプラズマから得られているこの  $D/\alpha$  値は、

- 1) Lモード時には、燃焼維持の合格範囲、
- 2) Hモード時にはマージナル(か落第に近い)程度である。

また、現在得られているデータは主に軽元素であり、もし重金属がプラズマ対向機器に一部でも使用されるとすれば、その影響についてはわかっていない。

プラズマから外への排出機能を活性化するために、ELM (Edge Localized Mode) 活動の利用が真剣に考えられている。

#### 2-4) 燃料混合比による燃焼分岐

反応による熱のバランスを考えると、平衡解が温度に対してだけではなく、密度の変動に対しても多重解を持つことが知られている(プラズマの閉じ込め時間を一定と仮定した場合)。この事は、今までの熱的不安定性の描像(つまり、「温度が上昇すれば反応率が上がり、ますます温度があがり暴走しかねない」というもの)を塗り変えている事に注意が必要である。単純な温度の変化だけではなく、密度の変化と燃料の希釈度とが相互に結び付き、拘束しあって燃焼するという描像が必要である。温度・純度に対して多重解を持つ系が、燃焼によって落ち着く先はどのようなものであろうか。空間分布の時間発展まで考えた描像の構築と研究が必要である。

## 2-5) 炉心の相転移と燃焼変化

燃焼制御、熱的不安定性の描像の変更は、H-モード遷移現象からもせまれる。H-モードは閉じ込めの良さを示すものとしては周知だが、実際は重大な物理的問題の存在を示している。プラズマが相転移を示すものと捉えられることである。高温プラズマは遷移性を持つ非線型媒質である。炉心に反応がある時に、反応自体がその非線型な分岐現象を示す原因となる可能性がある。反応の結果、別の（次の）遷移があったり、連鎖性の遷移が進行したり、組み合わせさったりするという可能性も想像できる。その反映として、グローバルな比熱やエネルギー増倍率が大きく変化することになる。相転移の典型的な現象であり、燃焼流体物理にも類似性がある。

表面相転移現象であるH-モードからの類推から考えると、表面状態の変化のみで、炉心全体の応答関数が変わってしまう。内部の発熱作用が遷移を誘起する場合を想定すれば、slowing downして拡散してくる位の時間、つまり、プラズマ半径を $a(m)$ とすると $2a^2$ 秒程度のオーダーの時間が一つの目安であろう。直接の粒子損失が関与すると考えれば、もっと早い時間で起こりうるし、損失形態の違い（例えばリップル損失やロスコーン損失）や損失粒子種の違い（例えば、電子損失やイオン損失の大きさや連鎖の違いによる $H^+$ や $H^-$ ）によっても、別々のものが存在しうる。このような考え方に則った理論モデルは出来始めたばかりである。

## 2-6) 炉心の動的特性と燃焼制御法（各時定数の不確定性）

H-モード遷移は、イオンの高温成分のロスが関与する。たとえL-モードで炉心を運転していても自発的にH-モードに遷移してし

もう可能性もある。その時の物性定数（応答関数）の変化は速い。この様な相転移という観点からの炉心制御、燃焼制御に関する研究は殆ど無い。遷移による早い（もしくは時定数の知れない）燃焼変化・相変化にどう対処するかが問題で、従来の燃焼制御の描像とは全く違ったアプローチの研究が必要である。

### 3. 炉心の定常運転の研究

炉心性能の長時間維持という観点からの整合性研究は、まだ条件の洗い出しが済んでいないのが実情である。ITER物理R&Dの項目でも不備が目立ち、的確な評価関数の導入と条件式の拡張が今後の大きな課題である。現在までの調査研究結果の一部を示す。

#### 3-1) 低温ダイバータ条件

対向機器とプラズマとの整合性条件が一番大きな障壁とされている。 $T_{div}$ を低下させようという研究が進んでいる。

$$T_{div} = \frac{1}{rG} \frac{P_{out} - P_{rad}}{\Gamma_{out}} = \frac{1}{rG} \left[ \frac{T\tau_p^*}{\tau_E} - \frac{P_{rad}}{\Gamma_{out}} \right] < 10 \sim 20 \text{ eV}$$

$r$ は熱伝達係数、 $G$ は粒子増倍率で、 $\tau_p^*$ はリサイクリング率を入れた粒子閉じ込め時間、 $\tau_E$ はエネルギー閉じ込め時間、 $T$ はプラズマ平均温度、 $P_{rad}$ は放射損失、 $\Gamma_{out}$ はプラズマからの粒子流束である。

まず熱伝達率を変化させようという試みや、その値を正しく評価しようという動向がある。シースの問題やダイバータ・バイアスの効果などに関連するもので、 $r$ を能動的に変化させようとし

た場合、何をどれだけの値、変化させる事ができるかが鍵である。

また放射損失、 $P_{rad}$  を大きくしようという方向の開発研究もある。しかし現段階における SOL の輸送コードには、放射冷却をより定量的に評価する解析モデルは組み込まれていない。その主な理由は原子過程の物理モデルの導入が不備である事による。主なもので必要なものを列挙すると、

- A) 中性粒子とプラズマイオンや電子との衝突過程
- B) 不純物のダイナミクスとそれによる放射の影響
- C) 壁やダイバータ面上での不純物等の条件

などである。ITER の R.Parker 博士との会見によれば、今後能動的な放射冷却機構の開発が重要であり、そのためには上記の様な素過程のモデル的な導入と、その実験的な評価が必要となる。これらは、ITER の reference コードとして代表される UED A コードにも組み込まれていないと指摘された。A) は中性粒子によってどれだけ磁力線を横切った熱処理が可能かという問題に定量的に答えるために必要であるし、B) は例えば Marfe の様なものを能動的に SOL 領域で作成して、そこにおける冷却可能性を調べるために大事である。

### 3-2) 灰除去の条件

燃焼を持続させるための条件が明らかになってきており、 $\tau_p/\tau_E$  の比に上限 7 ~ 10 が課せられている。粒子拡散とリサイクリング率に対する拘束条件であり、壁材の選択を規定するがデータベースは乏しい。現状では、lowZ 素材より highZ 材の方が長時間の観点からみると有利であるとされている。粒子閉じ込め、イオン燃料比のバランス、灰蓄積 (ash poisoning) などは対向機器の材料に大きく依存し、整合性が重要な問題となる。現在のデータベ

ースに依れば、壁との平衡状態に達するには数10秒以上を要すると考えられる。軽元素と重金属では値が違し、到達燃料比のバランスに対しての知見は少ない。また原子過程の理解が十分には明らかでない。モデリングは多くの仮定を踏まえたものになってしまう。

### 3-3) 閉じ込め改善度と整合性

閉じ込め改善といっても、改善がプラズマのエネルギーの閉じ込めなのか、粒子の閉じ込めなのかで問題は大きく違う。粒子閉じ込めのみが良くなる場合には、対向機器などの整合性は悪くなる。1)の低温ダイバータ条件から、ダイバータに来る熱流が増し  $T_{div}$  が上昇してしまう。一方、対向面の性質によって炉心プラズマの閉じ込め性能が変わってしまうことは、H-モードの質の変化から知られている。閉じ込め性能を良くするために軽元素の素材が用いられてきた。その結果判った事は、

- (1) 金属と軽元素の場合では閉じ込め改善が異なる、
- (2) ボロン・コーティング、炭素板、ベリリウムの間でも異なる。

炉心プラズマ(D-T混合イオン)と素材との相性については知られていない。高温D-Tプラズマと壁の相互作用、それも準定常的な状態での相性は、1993年に再スタートする改造後のJETの実験でも解決できない。ダイバータ・ポンプ部が改善されても、実験は full power ならば数秒が今の所の予定範囲だからである。

### 3-4) 対向機器の素材

対向面の素材や処理の方式などの選び方は、今後の規模の大きい D-T 実験、及び高エネルギー実験や高熱流束実験の結果に依存していく可能性が多大である。更に重金属の壁材を導入する場合は、現存のプラズマ閉じ込めのデータ・ベースが不十分で、役立たない可能性も高い。

一方、要請に見合ったものを新たに開発しようという努力がある。10~15MW/m<sup>2</sup>の熱処理できる材料で、かつ軽元素がプラズマ対向面に向いているものとして CFC と金属の接合材や CFC-Cu などの傾斜機能材などの材料開発がある。

### 3-5) Exotic Wall Condition

壁材の選び方によっては、リサイクル率や粒子バランスへの影響のみならず、反応自体の体系を変化させる可能性がある。ボロン系材の使用や Li の壁などは、ブランケットの概念と合い間っている事からわかる様に、別の反応系を核燃焼に持ち込む。それらの燃焼平衡という観点から考え直されなければならない。Rebut 博士の Li を持ち込むという個人的意見が反映された場合に、どの様な理論モデルが必要なのか、まだ評価はできていない。

## 謝 辞

本研究に当たり、伊藤公孝博士、福山淳博士をはじめ、全日本的に多くの方々にお世話になりました。またITERチームのP. Rebut 博士、R. Parker 博士、JET研究所のM. Keilhacker 博士、A. Gibson 博士、J. Jacquinot 博士、D. Campbell 博士などとの長年に渡る討論や各氏からの情報や知識の収集による所が多大です。この場をかりて皆様にお礼を申し上げます。



## 6. 自由討論の内容

"燃えろフラスコ"をつくるために"

# Discussions

## 安全性/健全性

## 燃えろフラスコ

Over heat ?  
 → (limit, relaxation by Zeff, Por ?)

Heat load / → Diverter condition ←

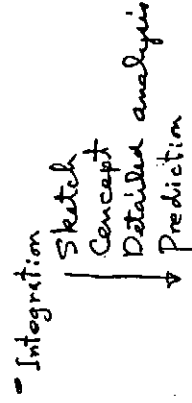
Time evolution of heat load ?

Thermal Insta (QZ20?)  
 ←  $\alpha$   
 Edge  $\leftrightarrow$  confinement  
 ←  $\alpha$ , material, time evolution ?

Central / Edge Insta.  
 ←  $\alpha$ , material !

Prediction の 確度

"知速?"  
 "及VOM!"  
 "外圧?"



## 研究の位置付け

1992. 7. 15

- ・ 現在でもできる核燃焼フラスコでの物理研究
- ・ DT実験に今加えてある物理・工学研究
  - 近将来のDT実験と見通し -
- ・ 今後問題となる物理的課題と研究の方向
- ・ 今後問題となる物理-工学と対応する課題と研究の方向

残, 2. 3 問題点.

現状という整理研究を進んでいく

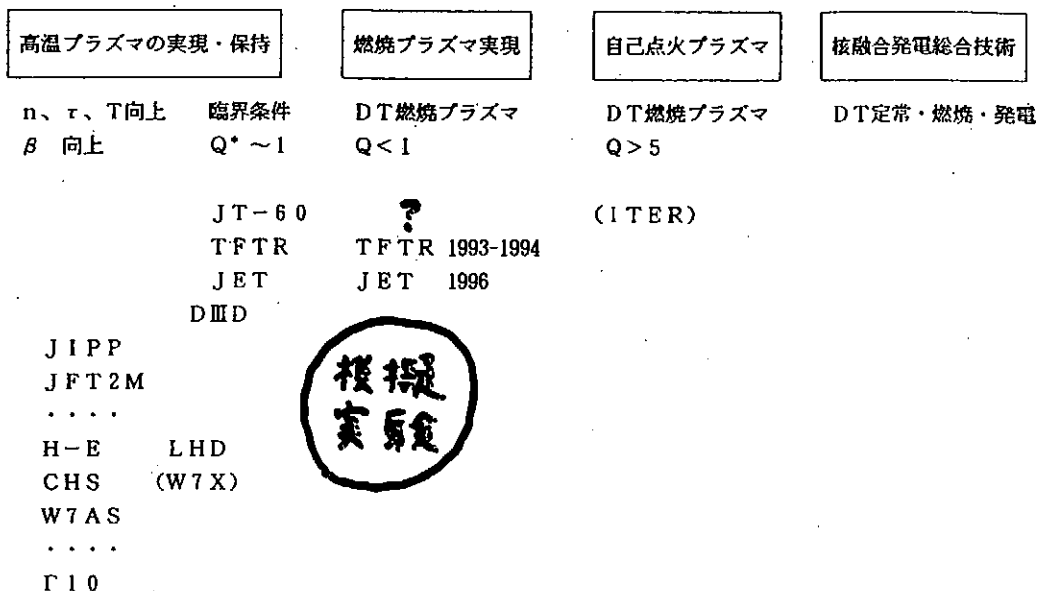
## アンケート調査実施

- ・ 現在集計中 - (33)
- ・ フラスコで理工学の人々に押し并れ, 下もの
- ・ ある程度子細な報告書と可成り (7/11)

・ 次年度以降の活動はどうかあはれませんか?

	現象論			原理的理解	
	短パルス	長パルス	弱燃焼	実身	モデル理解
燃焼プロセス物理					
エネルギー閉じ込め					
自己加熱	/			最近	進行中
外部加熱	H-モード	少量	○		
中性閉じ込め	デュープ	大量	○	最近	少量
不純物	"	少量	○		"
給排気	最近	少量	部分的	最近	少量
構造形成	モード	X	○	最近	最近
高速粒子の物理	最近	X	○	最近	最近
厚膜領域と限界					
Abnormal Op.	多量のデュープ	少量	○		一部説明
発生領域と確率	Discriminant Analysis	X			
危険度	分析				
定常と準定常モード	分析	少量			
PFC・構造との協力現象					
PFCと閉じ込め特性	最近	L-モード	部分的	最近	分析
ダイバータ機能と負荷	分析	X	○	分析	最近
部分的負荷	分析	少量	○		最近
制御法					
加熱法	多量のデュープ	ごくわずか	○	分析	
電流駆動	"	少量	部分的	分析	分析
安定化	分析	X	部分的	少量	分析
Innovation					少量

1. 核融合研究の流れ



2. DT燃焼実験の時代での日本の研究

(1) Q < 1での実験の意義

- 燃焼プラズマの基礎物理の把握
- 物理・技術の種々の重要なデータが取得可能、ITER等の次段階への準備
  - ・DTプラズマの閉じ込め
  - ・燃焼プラズマの粒子のフロー、灰等のフロー
  - ・核融合反応粒子のエネルギー緩和、エネルギー輸送
  - ・核融合反応粒子の輸送、軌道損失
  - ・高エネルギー粒子誘起不安定性
  - ・DTプラズマの加熱
  - ・Tに関する壁相互作用、Tの流れ、回収等
  - ・燃料注入技術、取扱技術
  - .....

(2) 日本では、種々の理由からDT実験は近未来では不可能と考えられる。

(3) 従って、TFTR、JETへの研究参加という形態で行う。

- 日米科学技術協力の核融合分野の協力
- 日・EC協力
- 三大トカマク協力 (原研)

大学関係は、主として日米協力、日・EC協力による研究協力形態をとることになる。更に、派遣費用等の財源は、日米は一応ある程度の枠があり、しっかりした協力計画ができれば、次年度の協力事業計画に反映できる。

日・ECについては特別の財源が確保されているわけではないのが、JETのDT実験まではまだ時間があり、何らかの方策を立てることも可能で、これもまずは協力計画の中身を作ることが先決。

3. 日米協力とTFTRのDT実験について

(1) 日米協力のカテゴリー

- 核融合物理協力計画 FPPC (田村・藤原)
- 井上 CORE PLASMA PHENOMENA (FUSION PLASMA, BURNING PLASMA)
- 玉田 PLASMA EDGE BEHAVIOUR AND CONTROL
- 大引 HEATING AND CURRENT DRIVE
- 藤田 NEW APPROACHES AND DIAGNOSTICS
- 月本 ○核融合技術協力
- 本島 ○核融合理論 JIFT

(2) TFTRの研究については、PPPLの方からは

- ①データの解析
  - ② $\alpha$ 粒子物理
  - \*③計測 中性子、その他
  - \*④ICRF Heating
  - \*\*⑤T Retention
- のような領域の研究の協力が考えられると言ってきているが、これに限らなくても良い。
- 夏までに研究協力の概要を知らせてくれとのこと。
- 協力の形態は通常の協力研究と同じだが、T実験なので少し長期に滞在し、安全その他の講習、教育も受けたうえでのことになる。

(3) スケジュール

- 1992・ -1993・7 種々の準備
- 1993・7-1994・9 実験

- ③の中性子計測に関しては、既に交渉を開始している。
- その他、T関連研究者の協力希望がある。

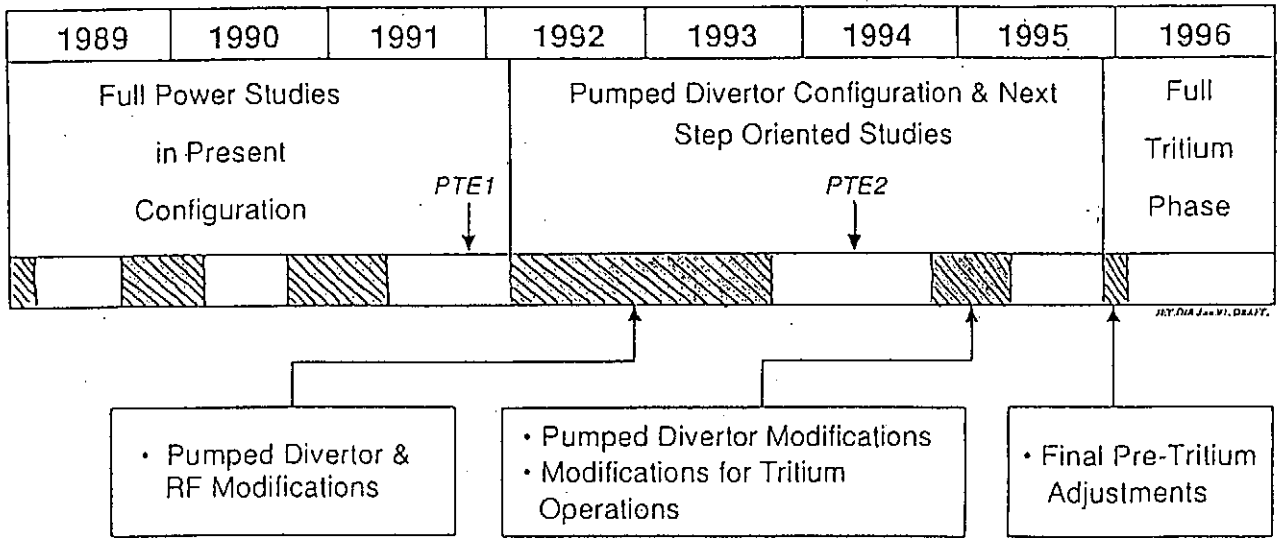
(4) 具体的計画のつめと、交渉

- 本日のシンポジウムの結果を反映
  - ・研究計画の具体的内容
  - ・派遣スケジュール 時期、期間、人数、研究者名
  - ・研究グループのようなものを組織すると良い。
- 今年度は臨時措置
  - 計測関係 1~2人 DT w/s (Feb.)
  - 理論解析 1~2人
  - T技術関連 1~2人
 を派遣し、状況の把握と協力内容の検討をしてくる。
- 来年度の計画の準備

H4  
 ~7月 proposal 口内メモ  
 8月 PPPL contact  
 11月12/13 FPPC at LLNL  
 11月 H5 日米協力の口内申込み  
 H5 12~1月 口内案作成  
 3月 ESM 2月 DT Phys. w/s  
 5月 CCFE H5 計画 fix  
 6~7月 EXP. start

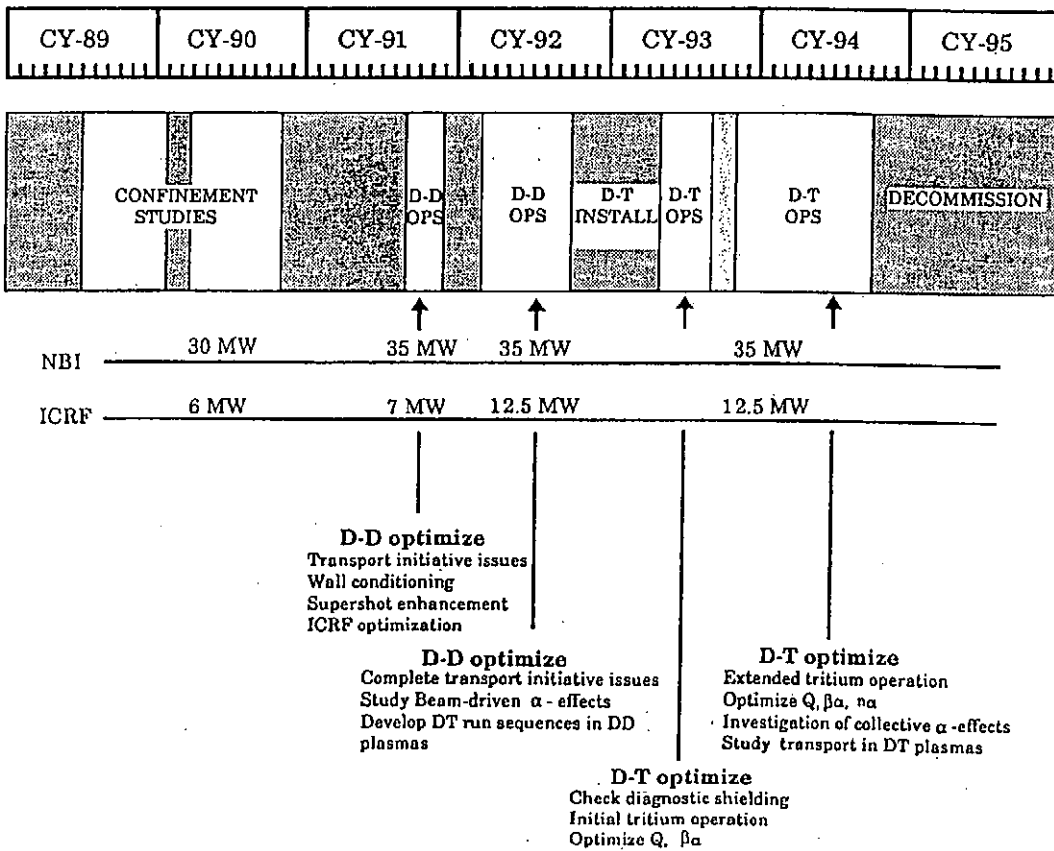
Figure 1

## JET Programme Schedule 1989-1996



PTE : Preliminary Tritium Experiment

## TFTR RESEARCH PLAN



TFTR

# Shielding for D-T

- Design objective is to restrict dose at site boundary from all sources to < 10 mrem/yr.
- Radiation dose from D-D and D-T neutrons has been studied and used to determine dose at site boundary.
- Measurements were independently verified by EML.
- Present analysis indicates:

	<u>CY93</u>	<u>CY94</u>	<u>Total</u>
Neutrons ( $10^{21}$ )	1	1	2
Q ~ 1 shots	50	50	100
Q ~ 0.3 shots	150	150	300
Q ~ 0.1 shots	400	400	800
 Total high power D-T shots			<u>1200</u>

Table 1.4

### TFTR DT projections

Use experimental  $\chi_e$  and  $\chi_i$  for DT equivalents  
 $Q_{DT} = 0.5$  and  $1.0$  extrapolated from shot 55851  
 Held  $\chi_e$  and  $\chi_i$  constant for 'no  $P_a$ ' cases.

	55806	55851	55851	55851
$Q_{DT}$	0.30	0.32	0.5	1.0
$P_{heat}$	32.5	25	35	25
$P_{fusion}$	10	8	17	25
$\bar{n}_e$	5.0	4.6	5.8	7.5
$\bar{n}_{eo}$	9	9	11	15
$T_{eo}$	10.5	10.2	11.9	16.4
no $P_a$	9.1	8.9	9.8	11.0
$T_{io}$	26	25	26	25
no $P_a$	24	23	23	18
$\tau_{E, total}$	0.17	0.19	0.20	0.32
$Z_{eff}$	2.85	2.75	2.0	1.5
$\chi_e(a/2)$	0.6	0.7	0.7	0.3
$\chi_i(a/2)$	1.5	1.8	1.7	0.8
$\langle \beta_{tot} \rangle$	1.2	1.0	1.5	1.9
$(\tau < a/4)$	4.8	4.2	6.3	9.0
$I_p/T_{region}$	1.8	1.5	2.3	2.9
$P_{fb}/P_{fusion}$	0.3	0.3	0.4	0.7
$P_a/P_{heat}$	0.06	0.06	0.09	0.17
$(\tau < a/4)$	0.12	0.12	0.18	0.39
$\tau_{therm}^a(0)$	0.47	0.45	0.42	0.44
$\langle \bar{n}_a/\bar{n}_e \rangle (\tau < a/4)$	0.40	0.34	0.54	0.75
$\langle \beta_a \rangle (\tau < a/4)$	0.42	0.35	0.7	1.4
$\langle \beta_a \rangle$	0.07	0.05	0.11	0.19

$$I_p/T_{region} = \alpha B_0 \langle \beta_{tot} \rangle / 2.7 \quad (\text{MA; m, T, \%})$$

JBT

0.15

14

1.7 MW

~15

0.1

D-T Plan  
Sept. '91

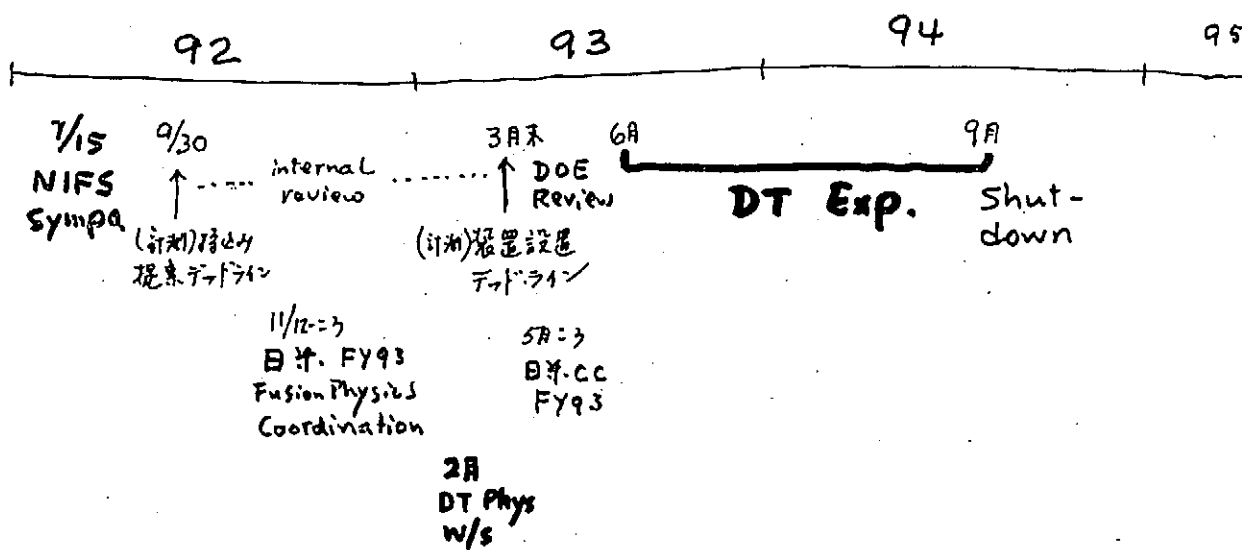
1-29

TABLE 1.1 TFTR DT Physics Phenomena

Burning plasma phenomena in TFTR and BPX. A check (✓) indicates the first experiment, going from left to right, in which the phenomena might be diagnosed.

	DD	Trace T (TFTR)	Low Q (TFTR)	Q ≤ 0.5 (TFTR)	Q = 1 (TFTR)	Q > 5 (BPX)
n <sub>T</sub> /(n <sub>D</sub> + n <sub>T</sub> )	≈ 0.0	≈ 0.001	0.1 - 1.0	0.5	0.5	0.5
Alpha first-orbit loss	✓					
Alpha thermalization	✓					
Fluctuation-induced transport of "single" alpha particles	✓					
TF ripple Loss of alphas	✓					
Tritium Particle confinement & fueling		✓				
RF Heating with tritium			✓			
Species Scaling with tritium			✓			
Alpha collective instabilities				✓		
Helium Ash transport				✓		
Alpha Heating					✓	
Burn Control						✓
Helium ash removal						✓

# TFTR α-Physics 実験と日米協力





## Recent Issues of NIFS-PROC Series

- NIFS-PROC-1 *U.S.-Japan on Comparison of Theoretical and Experimental Transport in Toroidal Systems* Oct. 23-27, 1989  
Mar. 1990
- NIFS-PROC-2 *Structures in Confined Plasmas –Proceedings of Workshop of US-Japan Joint Institute for Fusion Theory Program–* ; Mar. 1990
- NIFS-PROC-3 *Proceedings of the First International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion –Next Generation Experiments in Helical Systems–* Dec. 4-7, 1989  
Mar. 1990
- NIFS-PROC-4 *Plasma Spectroscopy and Atomic Processes –Proceedings of the Workshop at Data & Planning Center in NIFS–*; Sep. 1990
- NIFS-PROC-5 *Symposium on Development of Intensified Pulsed Particle Beams and Its Applications* February 20 1990; Oct. 1990
- NIFS-PROC-6 *Proceedings of the Second International TOKI Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion , Nonlinear Phenomena in Fusion Plasmas -Theory and Computer Simulation-;* Apr. 1991
- NIFS-PROC-7 *Proceedings of Workshop on Emissions from Heavy Current Carrying High Density Plasma and Diagnostics;* May 1991
- NIFS-PROC-8 *Symposium on Development and Applications of Intense Pulsed Particle Beams, December 6 - 7, 1990;* Jun. 1991
- NIFS-PROC-9 *X-ray Radiation from Hot Dense Plasmas and Atomic Processes;* Oct. 1991
- NIFS-PROC-10 *U.S.-Japan Workshop on "RF Heating and Current Drive in Confinement Systems Tokamaks"* Nov. 18-21, 1991, Jan. 1992
- NIFS-PROC-11 *Plasma-Based and Novel Accelerators (Proceedings of Workshop on Plasma-Based and Novel Accelerators)* Nagoya, Japan, Dec. 1991; May 1992
- NIFS-PROC-12 *Proceedings of Japan-U.S. Workshop P-196 on High Heat Flux Components and Plasma Surface Interactions for Next Devices;* Mar. 1993