

核融合の研究の現状と展望

九州大学応用力学研究所 伊藤早苗

1. 核融合研究の展開と現状

核融合研究は着実な進展を遂げているが、そのなかで多種の閉じ込め方式の取捨選択が行われてきた。それに連れ(1)核融合燃焼状態の実現(2)低い循環入力による維持(3)より低い放射化など環境整合性、という研究課題が明瞭になっている。つまり(1)燃焼状態の実現に向けては、閉じ込め研究の実験パラメタが核融合燃焼領域に近付いている。経験に基づく法則性や運転領域の知見が蓄積整理され、設計の基礎をなし、そしてトカマクによる燃焼実験炉の構想(ITER)がなされている。(2)循環パワーの低減化を目指す研究では、トカマクの定常化やヘリカル系の研究が進められている。(3)低中性子炉では一段と優れた閉じ込め性能とプラズマ安定性が必要であり、球状トカマクなどの萌芽的研究がある。更に慣性閉じ込め方式や、ミラー型閉じ込め研究も行われている。

核融合開発にとってプラズマ研究の果たす役割が大きい。H-modeの発見に始まるプラズマ閉じ込めの改善が、燃焼実験炉のサイズ(コスト)を大きく低減した。閉じ込めの改善は核融合燃焼実験の実現に大きなインパクトを持った。同時に、運転コストに関連する循環入力の低減についても、今後の研究の寄与が大きい事が強調される。それらにより炉の構想への科学基盤(炉形式の選択基準)が提供できる。

学術研究としての進展を見ると、多種の個物の知識が集積し普遍法則化への努力が進められている。プラズマ物性の理論的基礎付けが進んだ一例としてH-modeの発見と電場分岐と揺動抑制の理論構成があげられる。物理学としての普遍化がなされている。

こうした現在の研究成果に立脚し核融合炉心を展望するとき、重要な性質はプラズマが遷移する事である。燃焼プラズマの物性は非燃焼プラズマと連続的につながるかは本質的な課題である。

2. 今後の研究

核融合炉心、炉システムの研究としては、成果の普遍的定式化を進めるべきである。まず(1)プラズマ研究としてはプラズマ燃焼状態の研究が重要であり、物性の理解と外挿性の検証、及び定常制御性の確認、低中性子炉の探究等の研究課題があろう。特に、今までの多種(多岐)の個物の知識集積を普遍法則へと一般化することに力を入れ、未踏領域の予見をはかりつつ燃焼実験の実現を目指す。(2)技術発展には多種あるが、たとえば炉材料の研究でも段階的な研究計画策定が必要である。実験やシミュレーションの統合等による体系的な方法論へと展開を図る。(3)システム・インテグレーション(設計統合)も核融合研究の重要な要件であ

る。複雑な実験装置を統合する既存の科学技術は財産でありその存続も必要である。総合体系技術の伝承にも配慮を必要とする。（４）これらを併せて総合科学化を進める。

高温プラズマの物理の持つ普遍的学術としての牽引力を特記する。自然科学の学理には二つの源流がある。デモクリトス以来の自然の構成要素の研究と、ヘラクレイトス以来の自然の流転の研究である。２０世紀が「自然の究極の構成要素」の探究期であったなら、２１世紀の研究の主潮流は「流転する自然の探究」にあり、その方向への核融合研究の学術推進力を強調したい。

3. 研究体制

創造的な研究では、多様性のある研究プログラムが必須である。プログラムの構成要素を大別すると、燃焼実験を開拓する研究にはITER計画があり、循環入力の低減や低放射化そして長期的課題に取り組む研究では、ヘリカル系やsupport tokamak その他の実験、理論研究等の研究群がある。

ITER計画については、燃焼プラズマの実現（物性・システムとして未知の探究）と工学的試験を目的とし、建設の着手が検討されている。実行事業体は世界チームでありパートナーの計画と整合性をはかる必要があるが、研究の重要性・チャレンジ性から研究自体はAll Japanで推進されねばならない。

プロジェクトとしてはITER専任部隊があろうが、核融合燃焼状態の実現には、技術的信頼性と、安定した建設研究計画が必要である。それと独立な、タスクと予算の裏付けのある物理R&Dグループが必要である。独立性は研究の自主性の為である。そして多様性あるプログラムを展開するために、研究グループ・コンソーシアムを構想し、学術研究内容の普遍化、知識のシェア、人材の交流と協力競争を推進することが必須である。それは科学・技術財産の伝承、学問の進歩を育むものである。

4. 研究計画の評価と判断法

具体的に核融合燃焼実験炉に進むためには、その計画の可否を判断せねばならぬ。フロンティア研究の巨大科学プロジェクトには背反する要因が潜んでいる。「未踏」でありチャレンジとリスクがあるから創造的研究；大規模で使命があるから国策を要する；リスクがあり「使命」だけでは踏み切れないほど巨額の研究費を要する。「未踏領域」の計画について判断するには、新たな判断法自体の検討が必要であり、そこでは計画遂行者と計画策定者の評価・判断の区別が重要になる。その解決と進み方として、次のような考え方があろう。（１）計画の科学的可能性を評価するため、「目標パラメタ」（確実に研究すべき事柄）に併せ、「研究範囲」（チャレンジある研究課題）という概念を分ける。（２）計画遂行者としては、現存のデータベースや理解を基に統計確率的方法によりその期待値を具体的に評価する。創意を生かし研究の更なる進展を可能にするために、研究展開の多様性も保証する。（３）

計画策定者としては、使命を考え判断基準を選定し、目的達成のリスクと裕度のガイドラインを作る。

核融合研究では段階的開発を行なうとされ、燃焼実験炉はDEMO炉の前の中間ステップである。問題は目標パラメタの選択と外挿性の確保である。燃焼プラズマの確実な実現と累積燃焼時間の達成による工学試験を行なうことが目的とされる。「目標パラメタ」の一例としては、核融合パワー増倍率（Q値）を10-20程度と選んでいる。「研究範囲」としてはDEMO炉で求められるプラズマ状態の知識を得ることである。Q値としては100やそれ以上の知識が必要になろう。計画策定者としては、妥当性を判断しガイドラインを作る必要がある。

経験的知識による予測を確実にするには学術基盤を持つ研究を展開する事が必要である。普遍的な学問として成立して初めて予言力を獲得するし、それは「先端科学をひらく」と呼ぶ必要条件でもある。

5. 国際協力と競争

プラズマの性能と維持能力の進展をみると最先端をリードする4装置のうち3装置が日本の研究であり、理論研究の先進性も認められており、日本が核融合研究の指導的役割りを果たしている事が分かる。

未踏研究の先端を切り開くフロント・ランナーの研究では、研究水準を上げることにより貢献すること、そして尊厳を持ち文化をリードできる事が国際貢献である。（研究成果の導入や提供ではない。）またそれは、競争でもある。核融合研究は根幹でエネルギーの安全保障とかかわる。エネルギーの自給は科学技術の自給から始まり、また、国際規格のヘゲモニー追求も必要である。そうした努力を通じて、日本に対する「技術ただ乗り論」に応答することを始め、文化の刻印を打ち、文明のリードを図ることで国の尊厳をもたらす。

6. フロントランナー研究としての持続性

核融合研究がわが国のエネルギー開発の一環であることから、国策による研究推進を必要とする。

開発的側面からその理由をまとめると、エネルギーの安定供給は国民生活の基盤であり、チャレンジとリスクがあり大きな投資を必要とするといった事柄があげられる。文化・学術研究の側面にも重要な理由がある。核融合総合科学として学術研究の発展が必要であり、核融合研究は日本が生み出す文化の重要な一端をなす。

核融合研究は未踏の領域に取り組むフロンティア研究であり、国中の英知の増強を図る必要がある。そのためにも持続性をもって学術基盤を持つ研究を展開し、普遍性を持つ研究成果を挙げることが重要である。

核融合の研究について

九州大学応用力学研究所

伊藤早苗

プロジェクト推進側からでなく一研究者として核融合研究を見つめ、見極め、見通してみたい。

目次

1. 核融合研究の歴史的流れ
2. 研究内容の現状の認識
国際的立場と役割の認識
3. 今後必要な研究と方向性
(知識や研究成果の普遍化へ)
4. 将来展望とその判断
(5W1H; What, When, Where, Who, Why, How)
5. 研究計画の評価と判断法
(計画遂行者と計画策定者の評価・判断の区別)
6. 国際協力と競争
(国策と国際社会での役割)
7. フロントランナー研究としての持続性

5.研究計画の評価と判断法

フロンティア研究の巨大科学プロジェクトには背反する要因が含まれる。

- (1) 「未踏」でありチャレンジがあるから創造的研究。
- (2) 大規模で使命があるから国策を要する。
- (3) 「未踏」だからリスクがあり、「使命」だけでは踏み切れないほどの巨額の研究費を要する。

計画遂行者と計画策定者の評価・判断の区別が重要

その解決と進み方

計画の科学的可能性を評価するため、「技術目標パラメタ」と「研究範囲」という概念を分ける。（確実に研究できる事と、チャレンジある研究課題。）

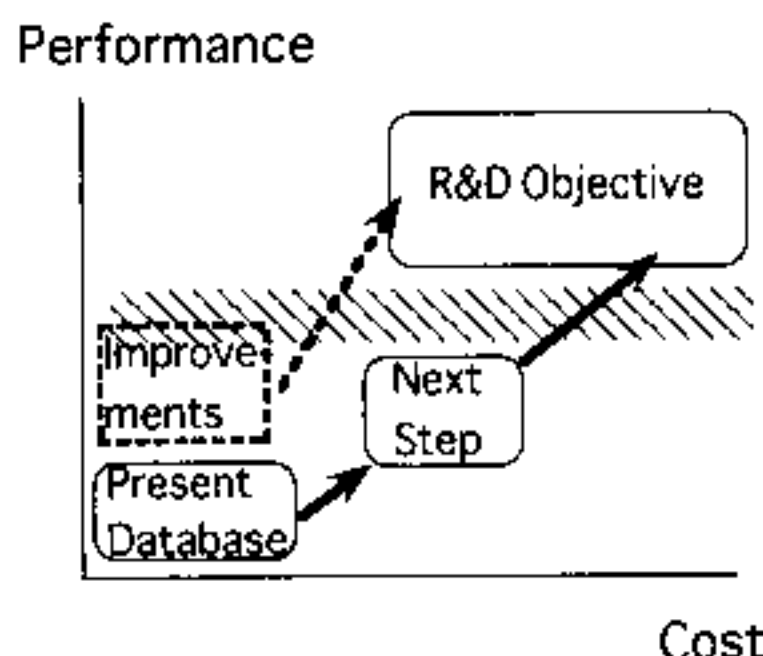
遂行者の評価：現存のデータ・ベースを基に統計・確率的方法を用い「技術目標パラメタ」と「研究範囲」の期待値を具体的に評価する。（核融合の研究を例。）

計画策定者の判断：使命を考え判断基準を選定する。目標達成のリスクと裕度のガイドラインを作る。

「未踏領域」の研究計画の信頼性を判断する基準のひとつ。

核融合研究の未踏領域への進み方

現状と目標の関係



核融合研究の段階的開発

途中に中間ステップを置き、そこで十分な外挿性
ある研究成果をあげる。

(別案) 改良方法を先に模索し(点線の矢印)、それが見つかってから進む。

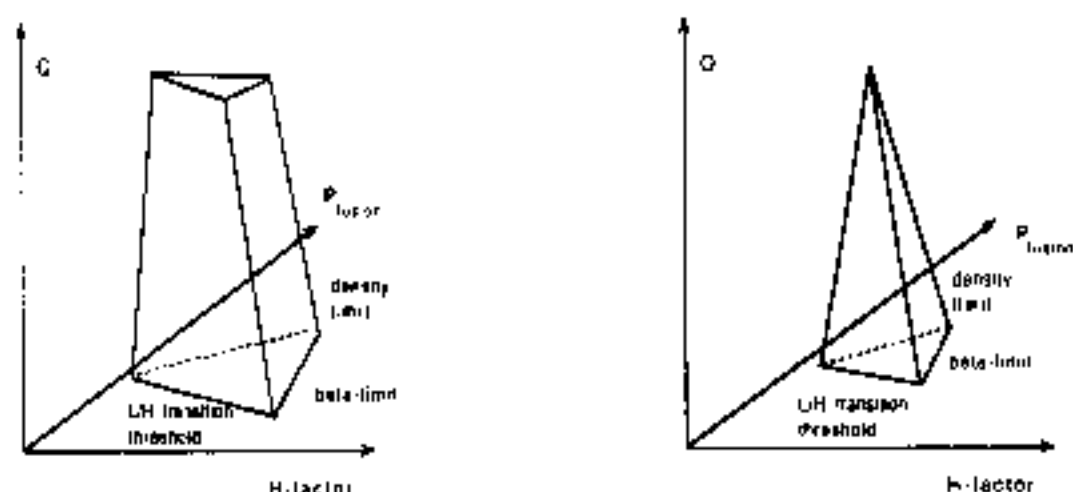
計画の当否はどこに中間を置くかにかかっている。鍵を
握る問題は

- (a) どのパラメタまで次段階で研究することが必要か
- (b) どれだけの研究費を必要とするか
- (c) 研究経費などから次段階が制限された時どう
して十分な外挿性を得るか

である。

研究範囲の評価と比較

現行の設計評価は、動作点が種々の運転限界を満たすか否か確認するものである。この評価では運転可能領域を得る。この様な領域がどのようなQ値までのびるかの運転限界コーンが研究範囲を明確に示す。概念図は下のようになろう。



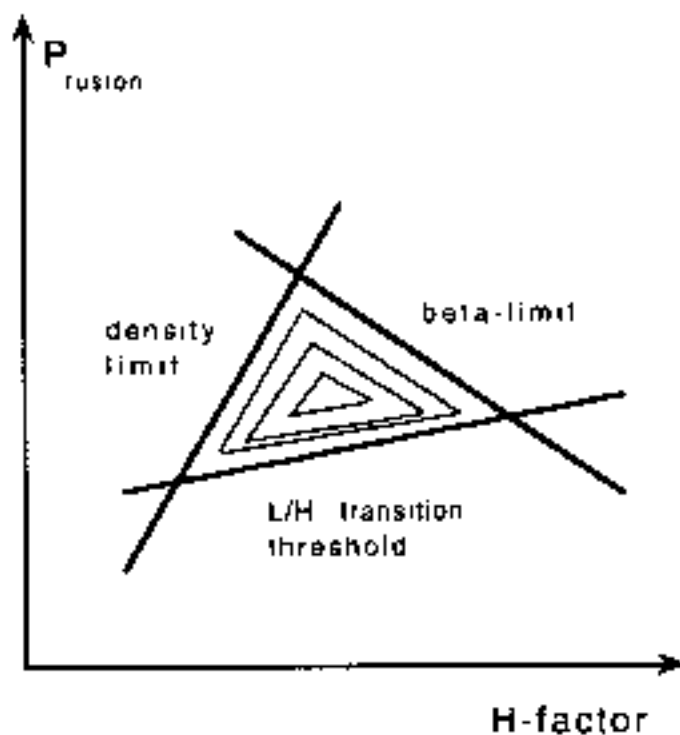
こうした比較図ができれば、コストの拘束によって「研究範囲」がどれだけ狭ばったか、そして、必要な研究領域が確保されているか（否か）が明確に示される。それによって研究展開上求められる要件達成のための可能性とリスクが比較できるようになる。

もし、「合理化」と呼ぶ様な要因があるなら、それは研究計画を「high risk, high return」型へとシフトせよとの政策的意向を意味する事になる。high riskになればなるほど、「原型炉までワンステップ」という要件が満たされているのかどうかの検定が、より明確に要求されていることになる。「研究範囲」の比較を通じ、要件が満たされているのかという評価が可能になる。

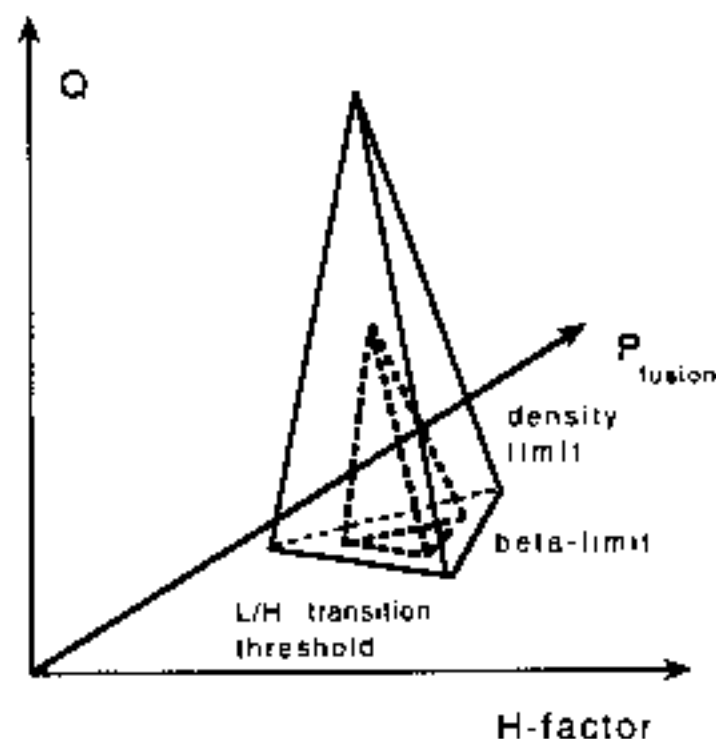
統計的・確率的描像

前節に述べたことは、決定論的描像であって、研究範囲の満たすべき必要条件を与えるものの、十分条件にはなっていない。研究範囲のコーンに入っているという事は、何回か放電を試みれば、研究可能なプラズマが得られることに相当している。

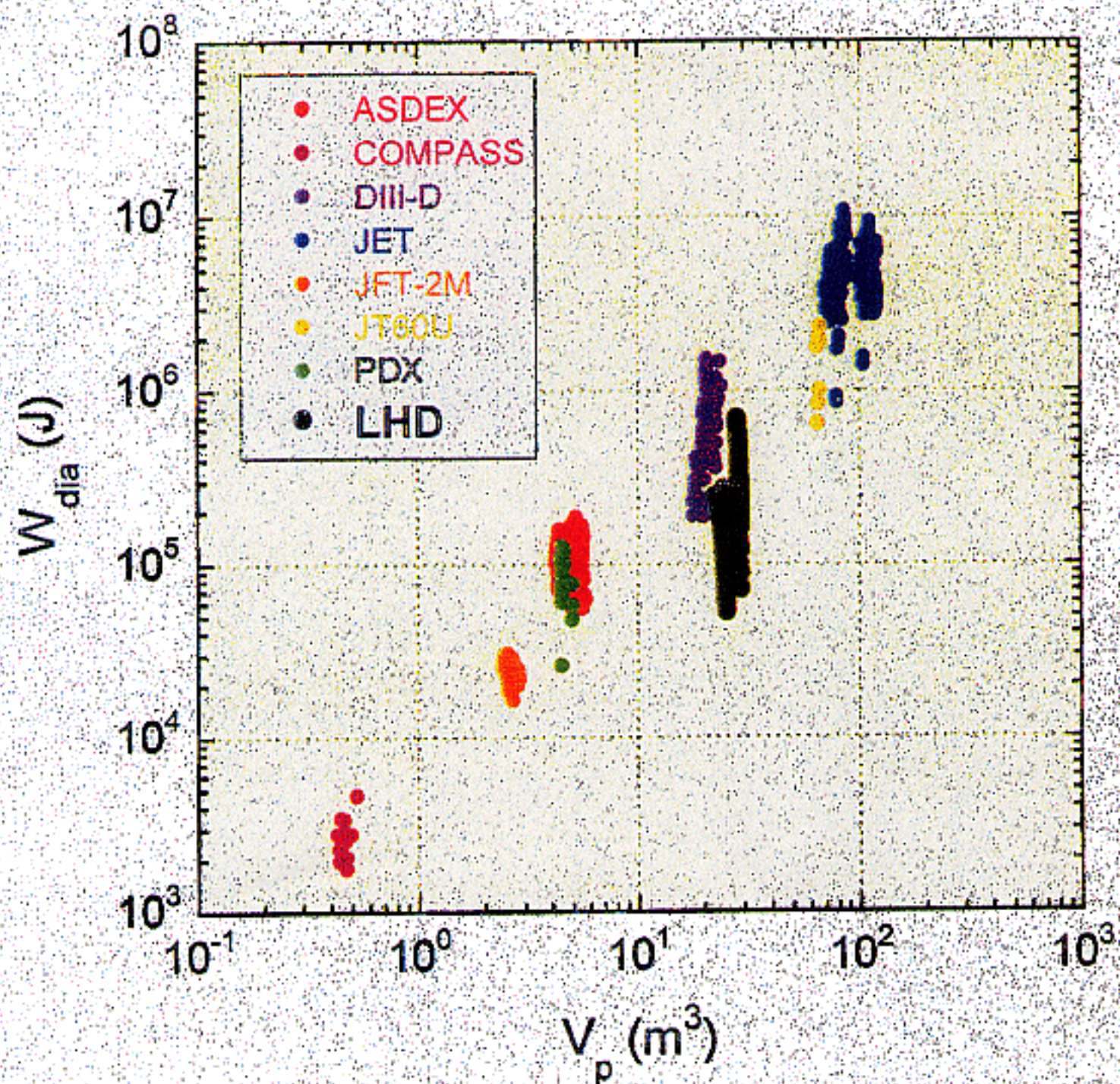
限界からの距離によって、放電が維持される確率が変化する。維持の確率は下図の様な分布を持っている。この分布図の等高線は内側ほど確率が高く、運転限界の縁に近づくほど確率が低い。



この事実に注意すると、研究領域のコーンは、決定論で描かれた図のような境界からなるコーンではなく、確率分布のコーンである。コーンの表面から内側にゆくほど確率が高まる。確率分布のコーンの概念図を下に示す。研究能力は確率で把握すべきものである。



トカマク・Hモードデータベース



併せてLHDの初期データも示す。(1999.12現在)

研究計画策定のための判断要因の例

「目標パラメタ」：燃焼プラズマの確実な実現によって、累積燃焼時間を達成し、しかるべき工学試験等を行う。

$$Q = \frac{\text{fusion output power}}{\text{input power}}$$

燃焼状態のプラズマを実現する。

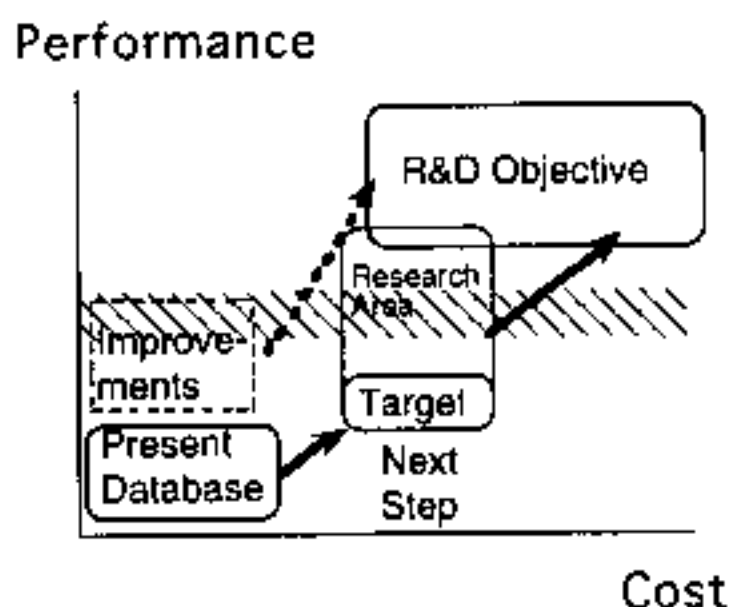
$$P_{\alpha} > \sim 3P_{ext} \Rightarrow Q > \sim 15$$

「研究範囲」：原型炉で求められる燃焼プラズマ状態を実現し、そこでの性能（変動、安定性）の知識を得る。

安全性の判断の基礎として、外部制御入力ゼロ状態での燃焼変動の知識が求められる。

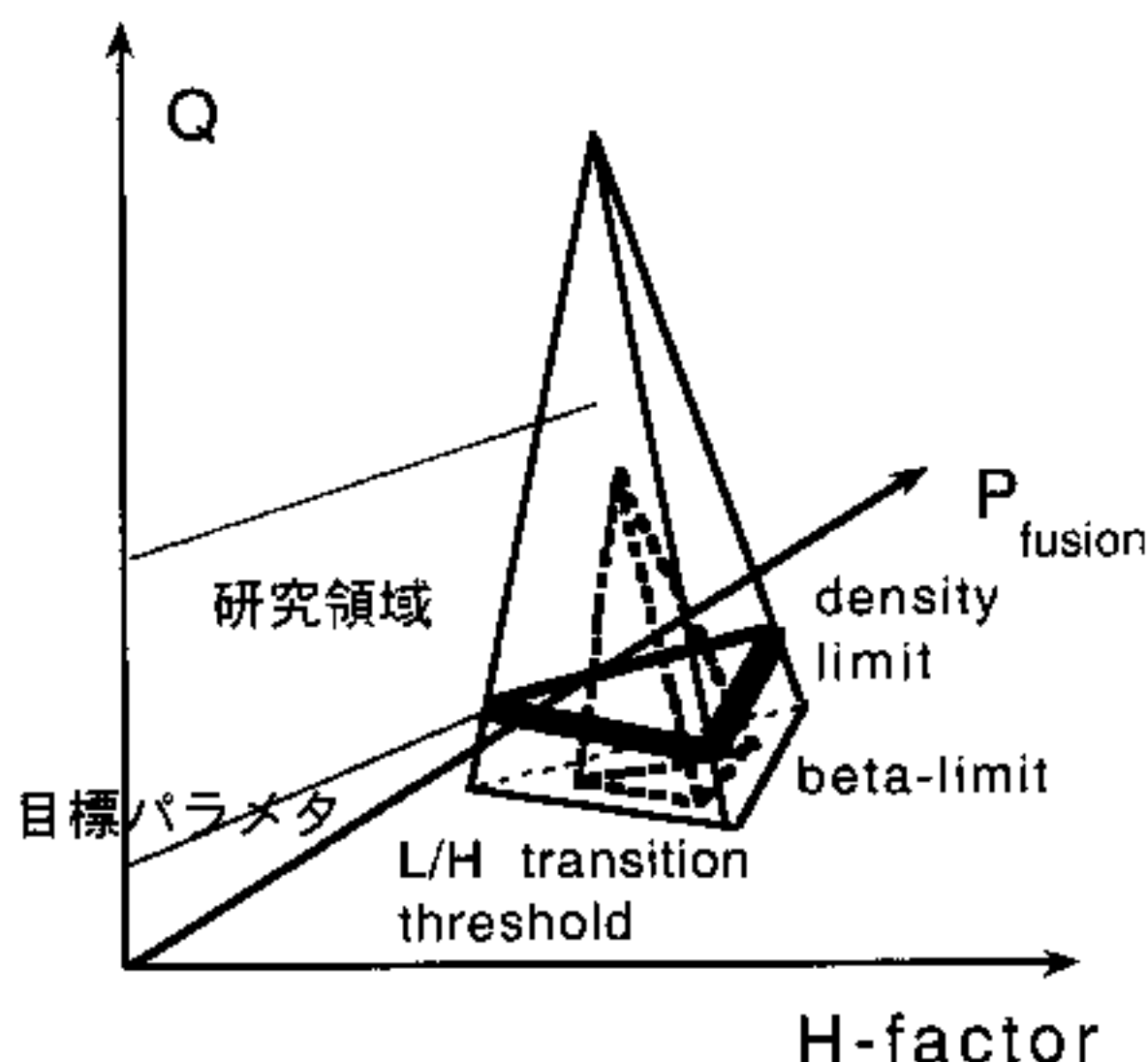
$$P_{ext} = 0 \Rightarrow Q > \sim 100 \rightarrow \infty$$

「目標パラメタ」では工学的な確実さが必要条件であり、「研究範囲」では燃焼プラズマの観測による理解が条件である。



計画策定者の判断：判断基準を選定し、目標達成のリスクと裕度のガイドラインを作る。

既存の経験則の外挿と不確定性



普遍的な学術研究の重要性

学術基盤を持つ研究を展開することにより、経験的知識を確実にする事が必要

普遍的な学問として成立して初めて予言力を獲得する

「先端科学をひらく」と呼ぶ必要条件

6. 国際協力と競争

国際協力・共同研究に見るフロント・ランナーの研究

研究水準を上げることに貢献（導入・提供ではない）。

尊厳を持ち文化をリードできる事。

特徴

- (1) 対等（交渉）の共同研究や事業
- (2) 継続的な共同研究
- (3) 相補的な課題をカバーしあえる
- (4) 意志決定までの様々なレベルで
 - 国の結んだ協定のもとでの協力・共同研究
(ITER、日米協力等)
 - 大学間の協定や研究所間の協定

多 国 間 協 力

(協力の内容)

(参加国等)

(OECD-IEA)

核融合調整
委員会
(FPCC)

三大トカマク
協力計画

JT-60 (日本)、TFTR (米国)、JET (EU) 間で研究者交流、専門家会合、情報交換等の協力。 我が国は (原研) 昭61.1締結

日本、米
国、ユー
ラトム

(核融合研
究協力の審
議機関)

TEXTOLに
よるプラズマ壁
面相互作用

プラズマと壁面との相互作用の研究。具体的にはユーラトム・独のトカマク装置TEXTOLを用いて共同実験。昭52.10.6締結。 我が国 (政府) は昭53.4締結、原研は昭54から参加

日本、米国、
ユーラトム
カナダ、
トルコ

核融合超伝導
磁石開発計画

大型コイルの実験データの取得、コイルの信頼性試験等 (LCI計画は終了) 昭52.10.6締結、我が国 (原研) は昭53.4.13締結

日本、米国、
スイス、ユー
ラトム

核融合材料の照
射損傷研究開発
計画

核融合炉構造材料、固体増殖材料など核融合材料の共同照射実験を行う。我が国 (原研) は昭56.10締結、昭60.10延長、昭62.10BEATR IX-II計画、締結

米国、カナダ、
ユーラトム、
スイス、(日
本)

核融合の環境・
安全性・経済性
研究計画

トリチウムの拡散実験等、核融合の環境影響及び安全性・経済性に関する情報交換、共同実験等を行う。 平4.7月締結

日本、米国、
ユーラトム、
カナダ

逆磁場ピンチ
研究開発計画

逆磁場ピンチ装置を用いた研究情報交換及び共同実験等を行う。 我が国 (政府) は平2.4締結

日本、米国、
ユーラトム

ステラレータ
研究協力計画

ステラレータ (ヘリカル閉じ込め方式) 装置を通じた研究情報交換及び共同実験等を行う。 我が国 (政府) は平4.10締結

日本、米国、
ユーラトム

核融合工学協
力計画

固体トリチウム増殖材、液体トリチウム増殖材、中性子工学、トリチウム取扱いに関する情報交換、共同実験等を行う。 平6.7月締結

日本、米国、
ユーラトム、
カナダ

(IAEA)

国際核融合研
究協議会
(IFRC)

核融合エネル
ギー会議

世界の核融合研究者が一同に会して研究成果を発表する。(2年に1回開催) 平8.10カナダで第16回会議を開催

IAEA
参加国

(核融合研
究協力の審
議機関)

大型トカマク
会 合

JT-60 (日本)、TFTR (米国)、JET (EC)、T-15 (ロシア) との間で専門家会議を開催し、情報交換を行う。

日本、米国、
ユーラトム、
ロシア

原子分子データ
情報交換

核融合研究開発に必要な原子及び分子の諸データの収集分布を行う。

IAEA
参加国

その他の専門家
会 合

核融合に関するトピックスについて随時専門家会合を開催し、情報交換を行う。
(例、核融合炉設計、慣性閉込め核融合)

日本、米国
ユーラトム、
ロシア

国際熱核融合
実験炉
(ITER)

ITERのための工学設計活動を実施する。
平1.4月締結

日本、米国、
ユーラトム、
ロシア

二 国 間 協 力

日米協力

日米核融合調整委員会

日米核融合協力活動の総合的な調整

交 流 計 画

核融合における総合的な 情報交換及び研究者の相互派遣等を行う

共 同 計 画

新しい共同研究のテーマを検討、決定し、発展させ、最終的には共同実験等へ発展させる（核融合物理、核融合技術などを重点事とする）

共同プロジェクト

*へ続く

プラズマ物理学

プラズマ物理の理論とコンピュータによる高度なプラズマ物理の研究をすすめるため、共同の研究機構を設置する。

*（共同プロジェクト）

ダブレット-III計画……米国のダブレット-III装置（ジェネラル・アトミックス社）に原研の研究員を派遣し、日米共同で非円形プラズマに関する研究を行う。58年度からはビッグDと呼ばれる新容器計画に参加している。昭54.8.28締結。昭58.7.29、昭63.5.19、平4.7延長。平8.7月4年間の延長。

原研-DOE実施取極……原研と米国エネルギー省との間の核融合分野における協力のための実施取極。本取極のもとに以下の共同研究が実施されている。昭58.11.8締結。

HFIR/ORR共同実験……米国オークリッジ国立研究所の原子が（HFIR/ORR）を使用して核融合が材料の共同照射研究を行う。（付属書I）

FNS共同実験……原研のFNSの施設を使用してブランケット中性子工学に関する共同研究を行った。（付属書II）昭59.10.23締結。昭62.10.23、平2.10延長。平5.10終了。

TSTA-II共同実験……米国ロスアラモス国立研究所のTSTAを用いた大量トリチウム安全取扱いシステムの実証等共同ホット試験協力。昭62.6.11締結。5年間。平4.6延長。平6.6、3年間。

超伝導ボロイダル・コイル共同実験……原研那珂研究所において米国ボロイダルコイルと原研実証ボロイダルコイルを用いた共同実験、導体の概念設計及び性能評価を行った。昭63.5.19締結。5年間。平5.5終了。

データリンク協力計画……原研とローレンスリバモア国立研究所との通信用計算機を専用回線で結び、特定プロジェクトの共同プロジェクトの共同コードの開発等に供する。平2.1.11締結。5年間。平7.1.5年間延長。（付属書IX）

負イオン源共同実験……米国ローレンス・バークレー研究所の加速器と原研が開発した負イオン源を組み合わせ、負イオンの生成・加速に関する共同実験を行う。平4.4.16締結。5年間。（付属書XI）

FFTF/MOTA共同実験……米国オークリッジ国立研究所の原子が（HFIR）を用いて共同実験を実施。（付属書I、文部省）

データリンク協力計画……文部省とローレンスリバモア国立研究所との通信用計算機を専用回線で結び、特定プロジェクトとの共同コードの開発等に資する。昭63.12締結。（付属書II、文部省）

日・加協力

原研・AECL協力

……トリチウム技術及びトカマク研究に関し、専門家会合及び情報交換を行う。昭62.4.1調印。平3.4、平8.4、5年間延長。

日・露協力

日・露科学技術協力協定

……トカマクの研究開発及び基礎研究の分野において情報交換、専門家会合などを行う。

日・豪協力

日・豪合同委員会

……トカマク等円環状プラズマの診断、実験、理論の分野で情報交換、専門家会合などを行う。

日-EU協力

日-EU核融合協力調整委員会

付属書I~III

それぞれ、文部省、通産省及び科学技術省とユートラムとの間の核融合研究分野における協力を実施し、情報・データの交換、専門家の交流等を行う。

日-EU核融合協力活動の総合的な調整が目的

プラズマ対向機器共同開発

原研とユーリッヒ原子力研究所（独）が、それぞれの高熱負荷試験装置を用いて、実験炉用プラズマ対向機器の開発を共同で実施。平2.7.10締結。平7.7月終了。

高周波過熱装置に関する研究協力

原研で開発した低域混成（LH）波アンテナモジュールをカダラッシュ研究所（仏）のLH試験装置に据付け、高周波伝送中のガス放出量に関する実験・評価を行う。平4.7.10締結。平7.7.10、3年間延長。

日・中協力

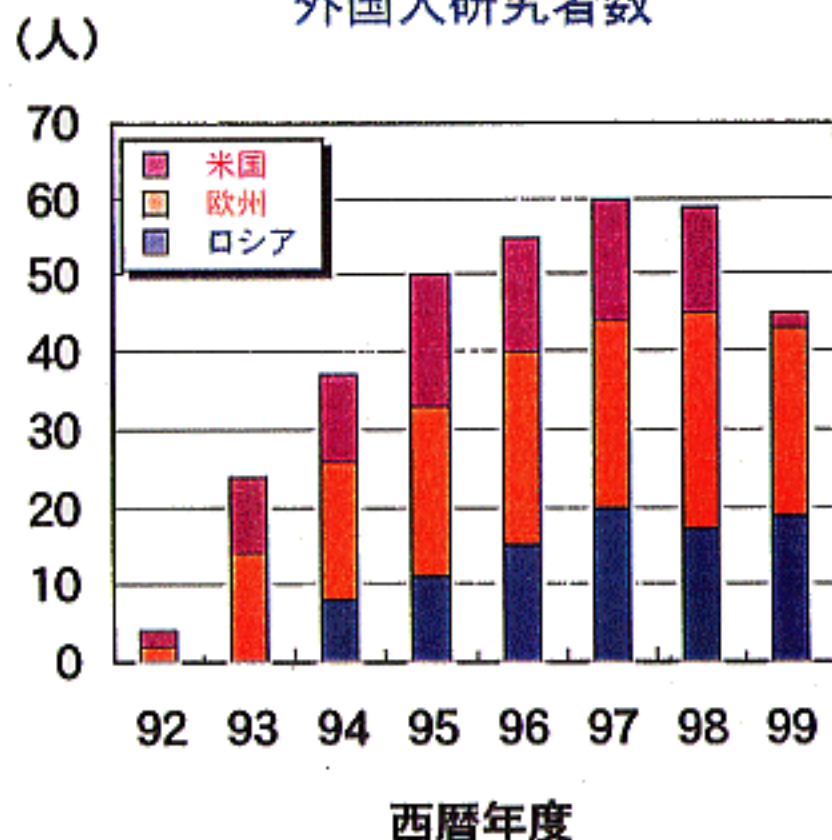
日・中科学技術協力協定

……トカマクプラズマ物理、理論解析の研究及び基礎研究分野の情報交換、専門家会合等。

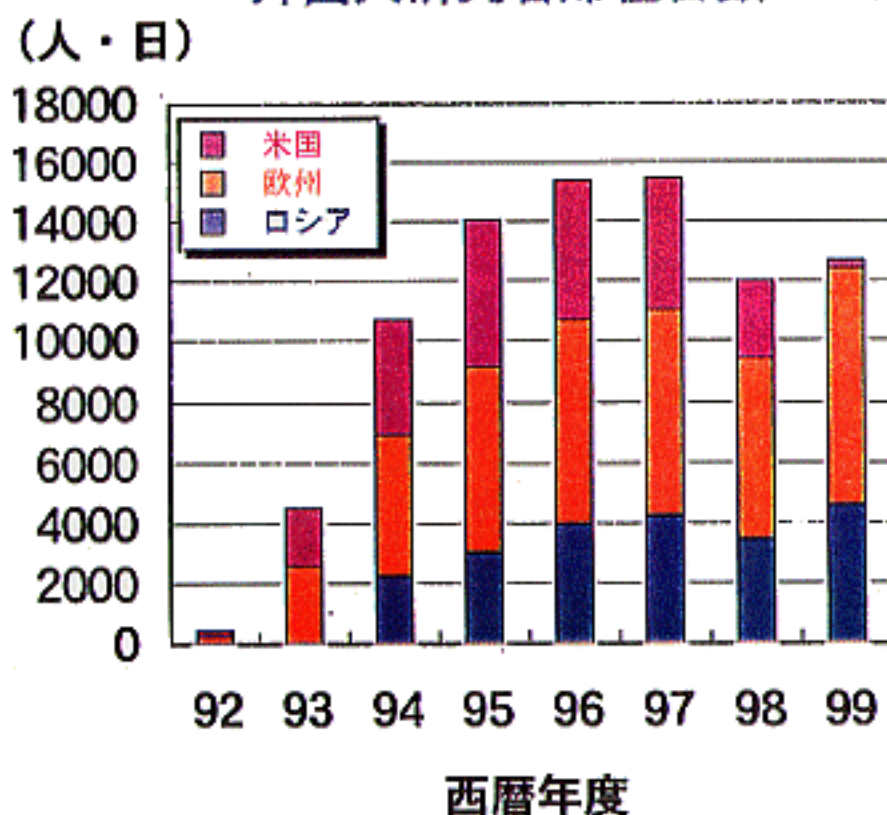
ITER計画への外国人研究者参加状況

那珂共同作業サイトの共同中央チームへの参加

外国人研究者数



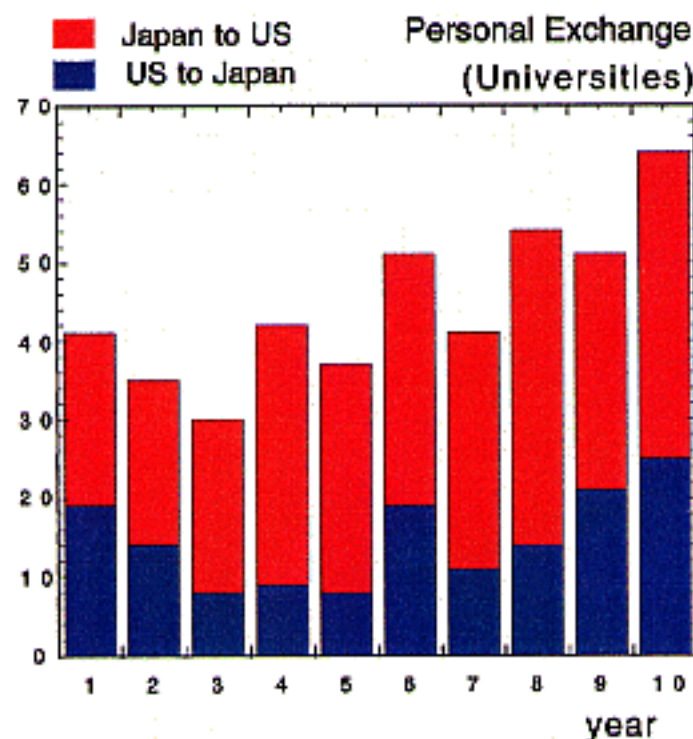
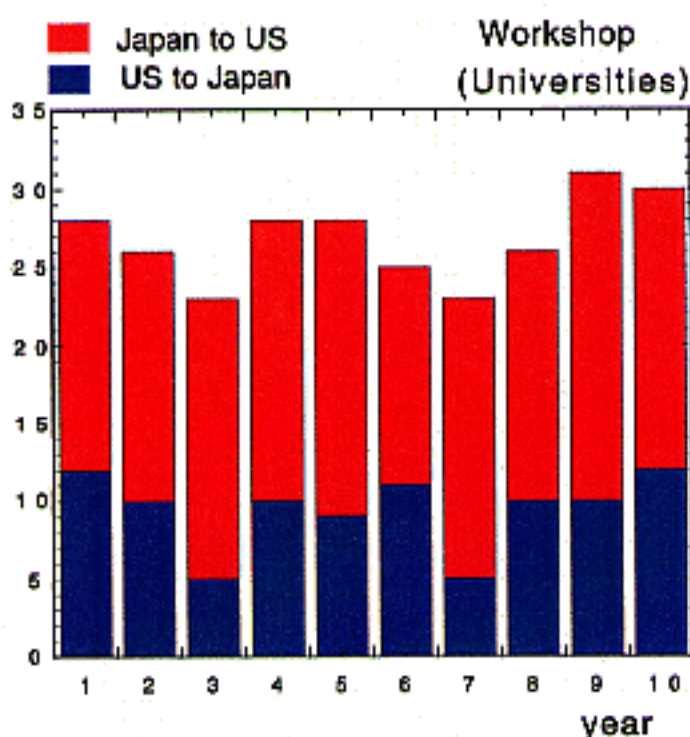
外国人研究者滞在日数



※共同中央チーム及びVHTP(Visiting Home Team Personnel)の総計

日米協力科学技術協力事業

核融合分野交流実績（文部省関係）



国際競争

エネルギーの安全保障

- (エネルギーの自給は科学技術の自給から)
- (新エネルギーに対する国際規格のヘゲモニー)

国際社会での役割分担と交渉

国威（尊厳）

- (技術ただ乗り論、文化の刻印、文明のリード)

7. フロントランナー研究としての 持続性

核融合研究はエネルギー開発の一環であることから、国策による研究推進を必要とする。

開発的側面

- (1) エネルギーの安定供給は国民生活の基盤。
(national securityの基幹要素。高い必要性。)
- (2) チャレンジとリスクがあり、同時に大きな投資を必要とする。
- (3) 短期の経済原理になじまない。
(民間の投資・開発のみに依存できない。)

文化・学術研究の側面

- (1) 核融合総合科学として学術研究の発展が必要。
(既存の学術知識、技術のみでは不十分。)
- (2) 日本が生み出す学術文化の重要な一端をなす。
(科学を生む発想には各国民の文化が反映する。)

核融合研究は未踏の領域に取り組むフロンティア研究である。国中の英知を結集する必要がある。
の増強をはかる

学術基盤を持つ研究を展開し、普遍性を持つ学術研究成果をあげることが重要である。