

ITERの目標と設定値の妥当性

京都大学エネルギー理工学研究所

井上 信幸

ITER計画懇談会第4回会合

平成9年5月26日

内容

背景

炉心プラズマ条件

規模縮小の可能性について

燃焼時間

核融合出力

エネルギー増倍率

磁場強度

まとめ

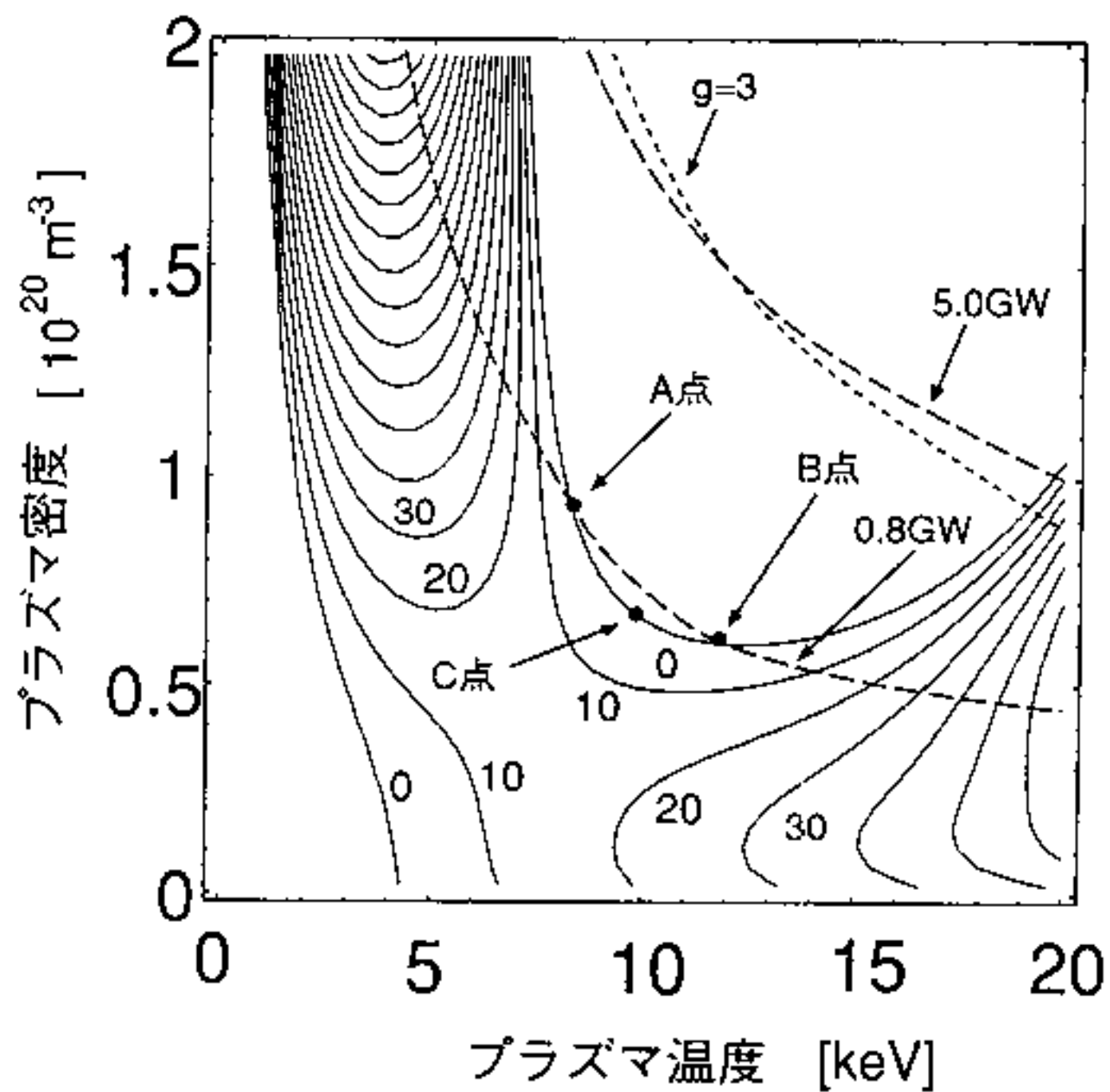
ITERの目標

- ✓ 重水素, 三重水素プラズマの制御された点火, および長時間燃焼の実証: 燃焼時間は当面は1,000秒だが, 完全定常燃焼が究極の目標.
- ✓ 統合されたシステムでの核融合炉に不可欠な技術の実証: 排気・廃熱, 超伝導コイル, トリチウム燃料自己増殖, 安全確保等.
- ✓ 核融合エネルギーを実用化するために必要な高熱流束, および核工学要素の総合的試験を実施: 材料開発, ブランケット技術の構築等.

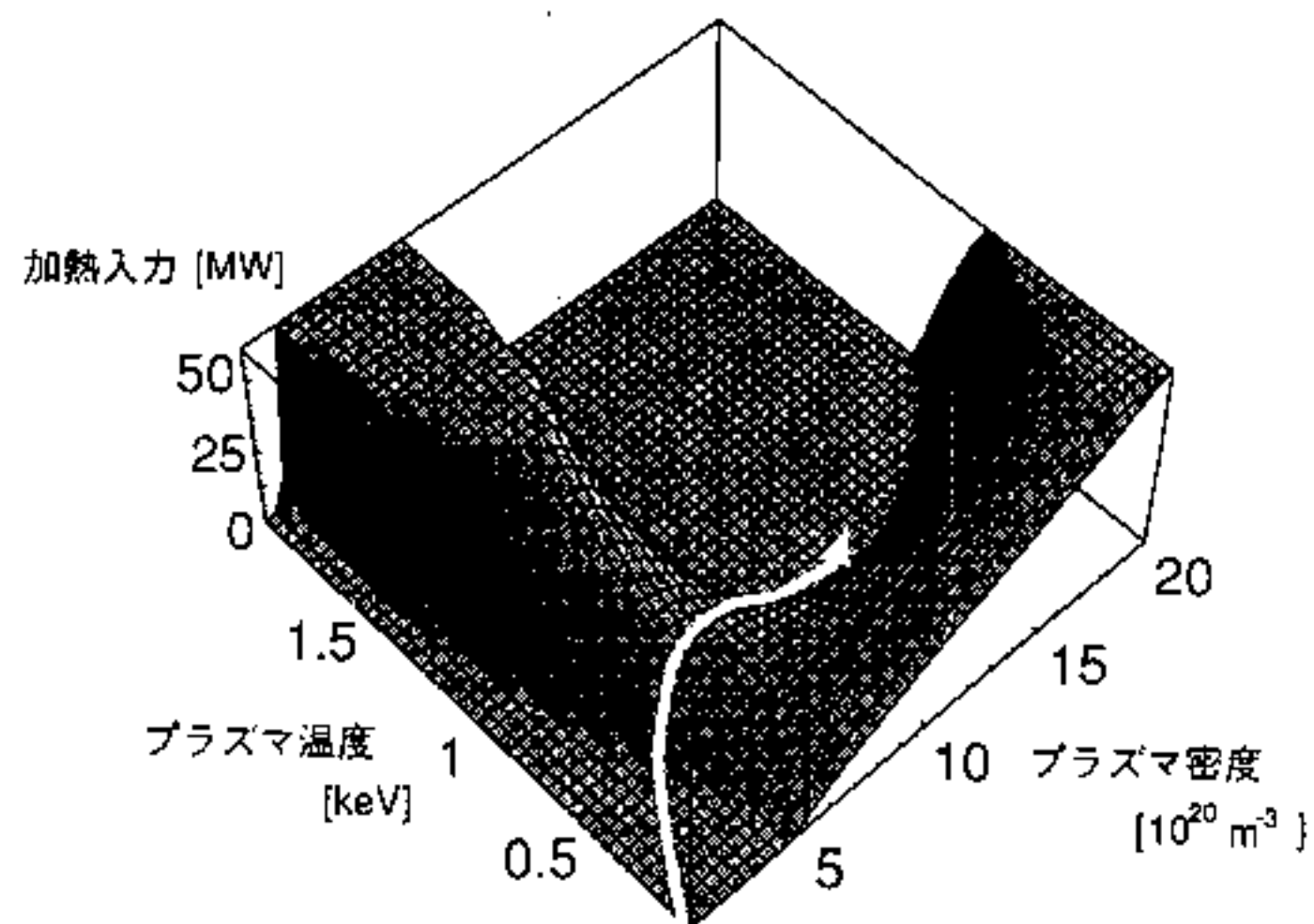
既存の装置で培った制御技術が自己点火プラズマの制御に通用するか否かは目標達成のためのキーポイント.

炉心プラズマが燃え続けるには

- ✓ 核融合反応を持続するには、炉心プラズマを高温度、高密度(燃料濃度)に維持しなければならない。
- ✓ 高温高密度プラズマからの熱損失は極めて大きい。プラズマが冷えないように、損失とバランスする加熱入力が必要である。
- ✓ 核融合炉では、核融合反応で生じるアルファ粒子がその役割を担う。
- ✓ アルファ粒子加熱だけでは不十分ならば、外部からの加熱入力によって補足する。
- ✓ とくに、核融合炉の起動時には、燃料が点火するまでの間、外部からの加熱入力が必要(wet wood burner)。



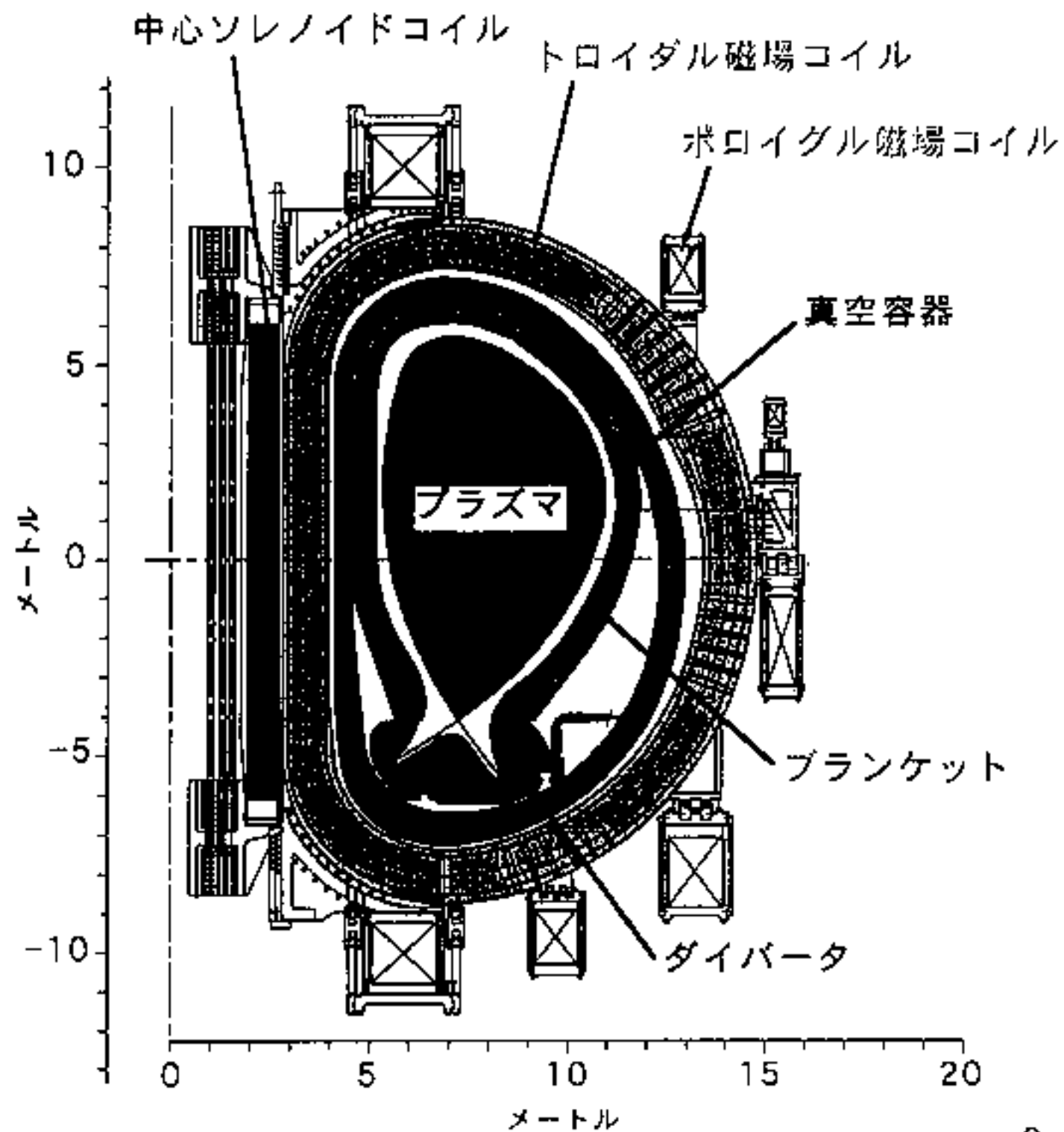
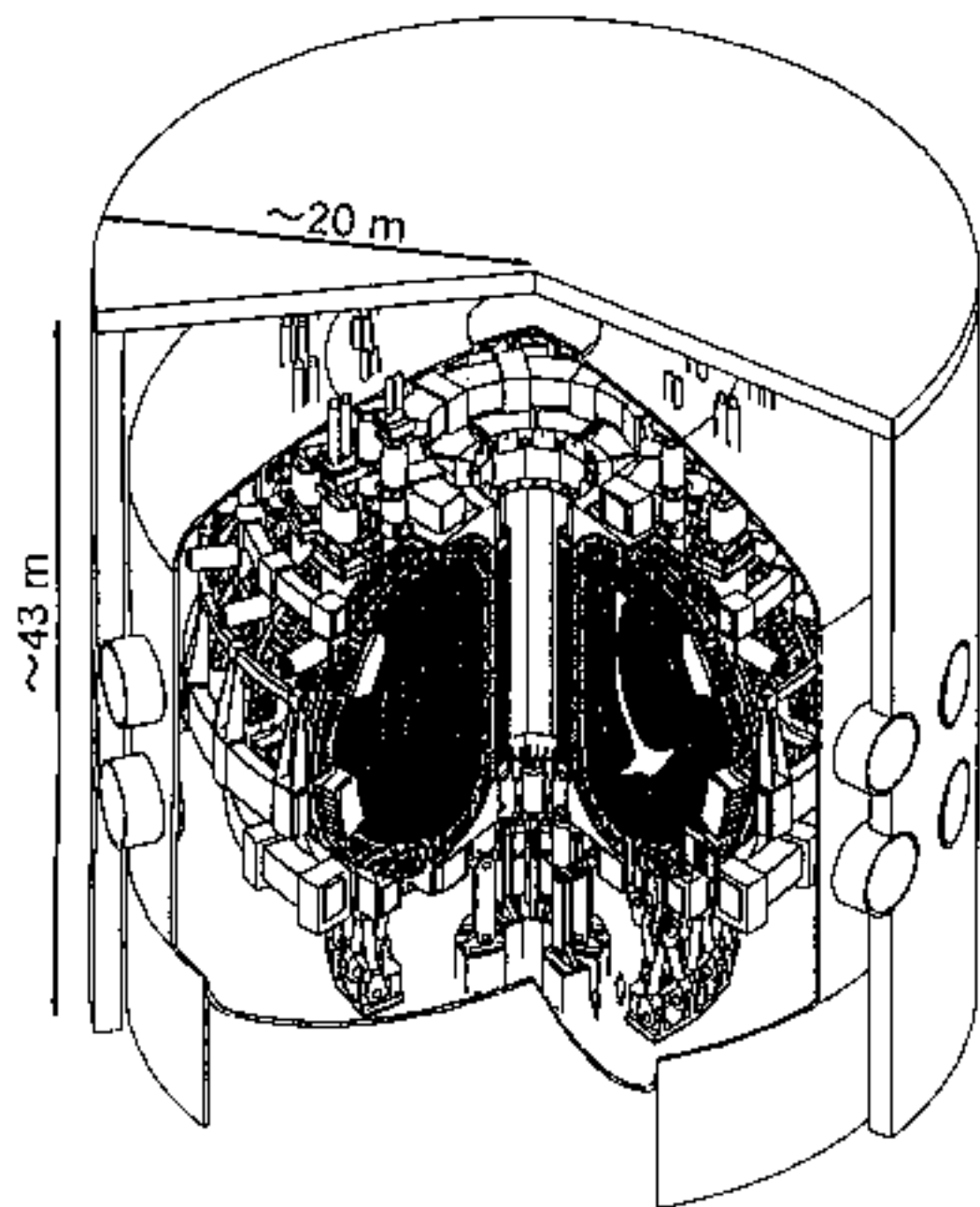
POPCON図 $B=7.125[\text{T}]$, $f_{Be}=0.015$



立体的に表したPOPCON図

エネルギー閉じ込め時間

- ✓ プラズマの加熱効率を上げ、熱損失を小さくするには、プラズマ中にエネルギーをできるだけ長時間保持すればよい。
- ✓ 長い「エネルギー閉じ込め時間」が必要。
- ✓ 高温プラズマは物体に触れるとすぐに冷えるので、エネルギー閉じ込めをよくするには、壁から離して真空中に浮かす必要がある。
- ✓ このため、磁気圧を利用して、プラズマの釣り合いをとる。
- ✓ 多数の装置を用いた実験によって、エネルギー閉じ込め時間についての経験則が導出された。
- ✓ 閉じ込め時間はプラズマサイズ、磁場、電流等に依存。



ITER 装置

炉心プラズマ条件

- ✓ 炉心のエネルギー増倍率:

$$Q = (\text{核融合出力}) / (\text{プラズマへの外部入力}).$$

- ✓ 自己点火条件: $Q \sim \infty$.

実用炉の経済性の観点からは, Q は30程度で十分.

- ✓ 臨界条件: $Q \sim 1$.

JT-60とJETで達成. トリチウムは使わず, 水素, または重水素プラズマで模擬.

- ✓ トカマクはプラズマ電流を流さなければ停止するので, 定常運転には電流駆動用外部入力が不可欠. このため, Q は無限大にはならない.

規模縮小の可能性

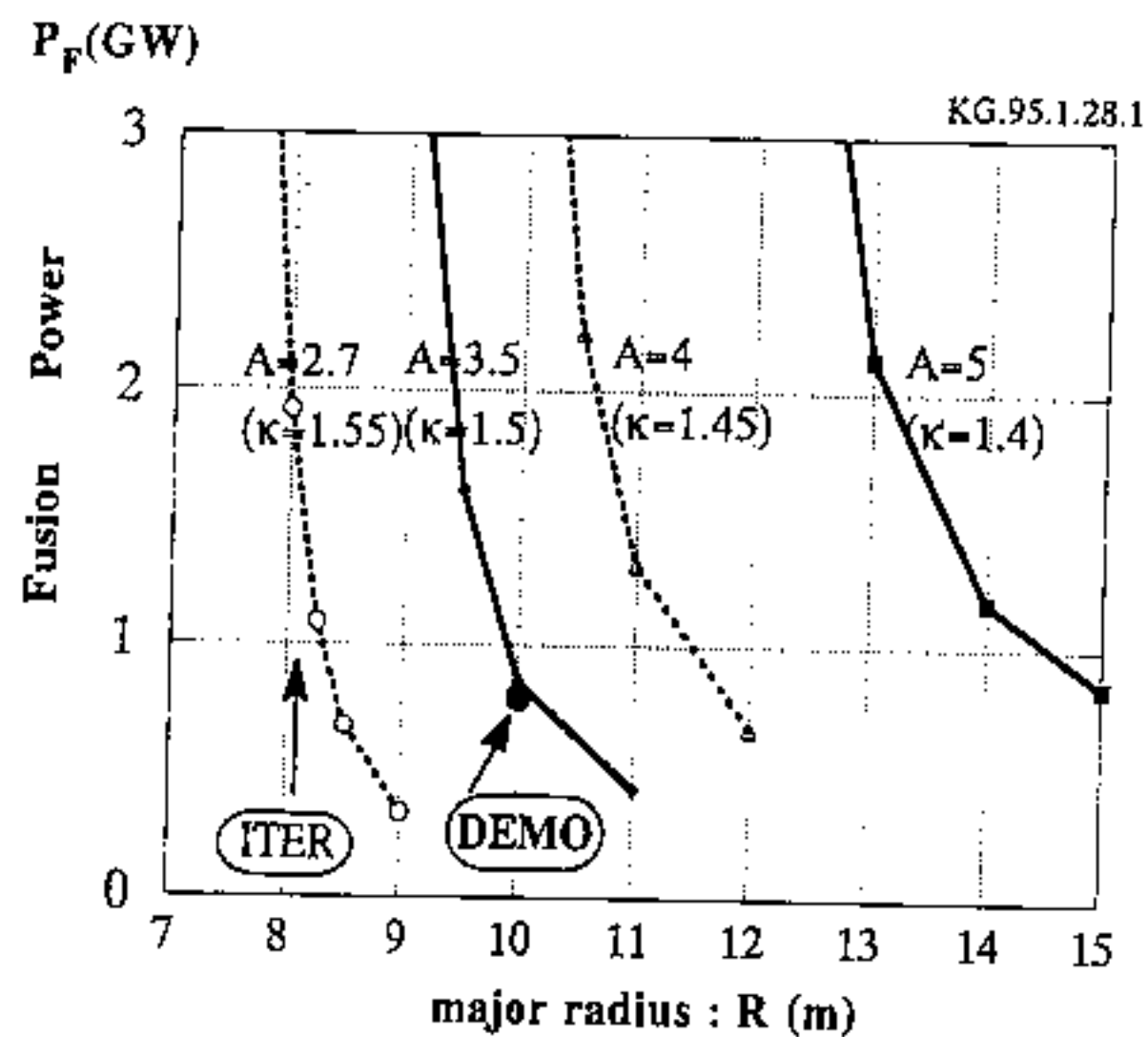
- ✓ 燃焼時間短縮
- ✓ 出力低減
- ✓ エネルギー増倍率 Q の低減
- ✓ 磁場低下

燃焼時間の妥当性

実用炉開発にあたっては、次の各種時間よりも長い燃焼時間のもとの確証実験が不可欠。

- ✓ 核燃焼により生じるアルファ粒子の灰（プラズマにとっては不純物であり、燃料を希釈して核融合出力低下のもととなる）の蓄積量が平衡に達するまでの時間：約20秒。
- ✓ 制御磁場がプラズマに浸透する時間：約500秒。
- ✓ プラズマと壁の相互作用（原子物理学的、あるいは材料科学的見地からの）が平衡に達するまでの時間：100－1,000秒。
- ✓ ブランケットを含む周辺機器が熱平衡に達する時間：1,000秒以上。

——— 少なくとも1,000秒は必要 ———



色々なアスペクト比における
自己点火に必要な核融合出力

核融合出力1,500メガワット(百五十万キロワット)の妥当性

- ✓ 核融合出力を減らせば, アルファ粒子によるプラズマ加熱パワーが減少し, 自己点火条件の維持が困難になる.
- ✓ エネルギー閉じ込め時間の経験則に従えば, これを克服するには装置サイズを大型化しなければならない.
- ✓ 大型化の一方で中性子発生量が減るので, 面積当たりの中性子照射量が小さくなる. 材料の寿命は伸びるが, 目標の一つである核工学試験の達成が難しくなる. 大型化するとコストが上昇する.
- ✓ 核融合出力を増やせば, 中性子照射量が増加するため, 壁材料の寿命が短くなる. その分交換頻度を上げる必要が生じ, 時間とコストの損失を招く.
- ✓ 崩壊熱が増えて安全上問題となる可能性がある.

--小型化と高出力化が同時に達成できる材料開発は今後の課題--

エネルギー増倍率 Q の低減

- ✓ 核融合出力を下げて、外部加熱入力を増加すれば Q は下がる(例えば5). この運転モードはITERよりも小規模な装置でも実施可能である.
- ✓ 低い Q でも定常運転ができれば、高中性子照射量を必要とする核工学試験に応用できる.
- ✓ しかし、大量のアルファ粒子の発生効果を調べる、炉心プラズマ物理の研究には向かない.
- ✓ 実用炉開発のためには、自己点火に近い大きい Q が発生できる装置による研究が不可欠で、この装置は現データベースに依拠すれば、やはりITERと同規模になる.
- ✓ ITER計画では、核工学試験のために低い Q での連続運転モードが予定されている.

磁場の低減

- ✓ 磁場を低減すること自体はコスト低下に結びつくが、炉心条件を満たすに必要な各種パラメータの範囲(窓)を著しく狭くするため、技術的成立が困難になる。その結果装置が巨大化し、結局はコスト増を来す。
- ✓ ITER後の核融合開発計画では、より強い磁場を追求して装置を小型化する方向で検討されている。

まとめ

- ✓ ITERで設定された目標は、いずれも核融合炉実現のため回避できない研究開発課題。これらは、既存の実験装置では解決できない。
- ✓ 設定された目標の一部を放棄すれば、別の設備で補う必要が生じ、開発コストと時間の損失を招く可能性が大きい。
- ✓ 現在の知識基盤に基づいた保守的設計が行われ、目標達成のために最適化されている。
- ✓ プラズマ物理学、炉工学ともにITERの合理化につながる萌芽的、先進的研究成果はあるが、今設計に採用するにはリスクが大きい。R&Dを通して確証を得るまでにはかなりの年月がかかる(とくに材料開発)。