



トカマク型核融合炉に求められる条件および ITERに要求される開発目標

若手科学者によるプラズマ研究会
2004年3月17-19日、日本原子力研究所那珂研究所

(財)電力中央研究所 狛江研究所 原子力システム部
日渡 良爾, 岡野 邦彦, 朝岡 善幸, 苫米地 顕
(財)地球環境産業技術研究機構

時松 宏治

京都大学エネルギー理工研究所

小西 哲之

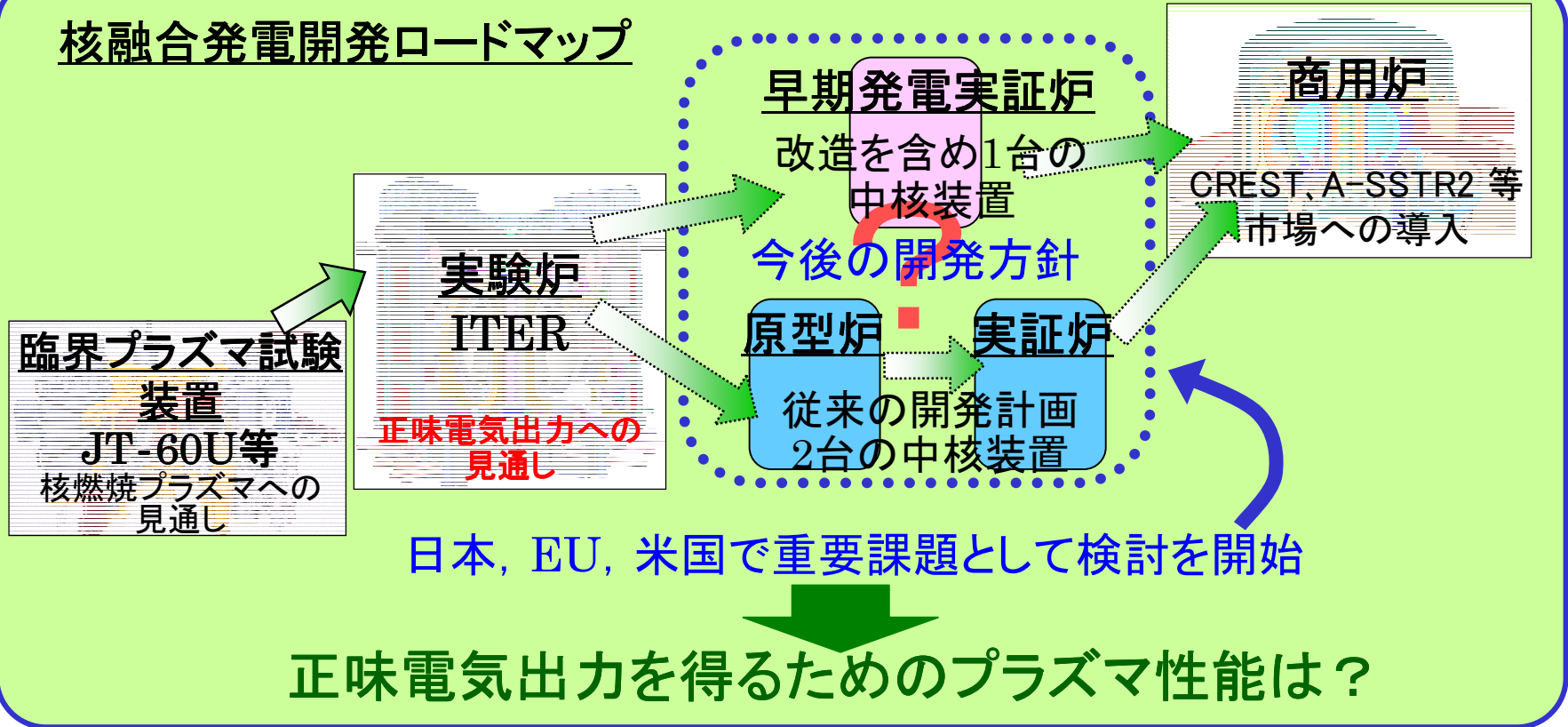
東京大学高温プラズマ研究センター

小川 雄一

研究背景



核融合発電開発ロードマップ



しかしながら...

正味電気出力に必要なプラズマ性能を具体的に調べた例はない



プラズマ性能から得られる正味電気出力を評価するために、**開発見通しが十分ある工学条件**(熱効率30%、プラズマ加熱装置効率50%、超電導磁場16T)を標準条件とし、トカマク型核融合炉における**プラズマ性能と正味電気出力の関係を明らかにする**。



ITER計画を含む核融合開発目標の具体化

プラズマ性能はどこまで上げれば将来の発電炉へ見通せるか？

相補的な関係



炉工学技術(超伝導磁場、熱効率等)はどこまで開発しなければならないか？



トカマク型核融合炉簡易設計コード(FUSAC)

- ・ITER Physics Guidelines による0Dプラズマ解析
- ・TRESOCODE (JAERI-M87-120) による工学設計 (コイル形状、配置)
- ・電中研モデル (Generomak model を改良) による経済性解析

プラズマ運転点のデータベースを作成

装置サイズ (主半径, アスペクト比), プラズマパラメータ, 構造物の形状・配置 (超電導コイル形状, ラディアルビルド), 装置重量, 建設コスト, 電気出力

正味電気出力に必要なプラズマ性能の評価

正味電気出力 (総発電量 - 所内電力) = 0MW ~ 1000MW
に必要なプラズマ性能 β_N , HH, f_{ngw}



建設費の抑制

ITER-EDA程度(～8.5m)が限度

熱効率

ITERテストブランケットモジュール
冷却水条件(330度、15MPa)より30%

最大磁場

16T(NbAl)までは十分な開発展望
(13Tまではコイルとして開発済み)

NBIシステム効率

50%までは十分な開発展望
(ITER設計値30%～40%)

その他の条件

- ・電流駆動パワー最大200MW
- ・ブランケット・遮蔽体厚さ1.4m確保
- ・電流立ち上げのフラックス確保

核融合炉簡易設計コードによる解析範囲

主半径 (m)	6.0～8.5
アスペクト比	3.0～4.0
楕円度	1.7, 1.8, 1.9 , 2.0
三角度	0.35, 0.45
プラズマ温度 (keV)	12～20
プラズマ表面q値	3.0～6.0
最大磁場 (T)	13, 16 , 19
熱効率 (%)	30 , 40
NBIシステム効率 (%)	30, 50 , 70

赤字の結果を以下に示す。

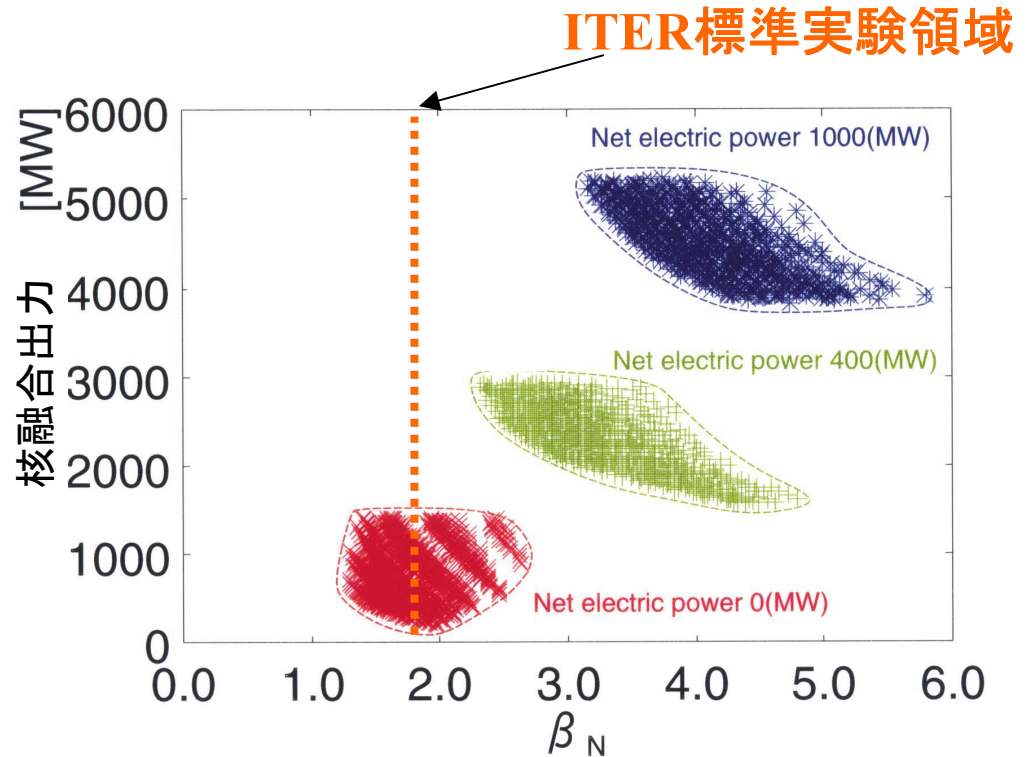
正味電気出力に必要なプラズマ性能(β_N)

$$P_e^{\text{net}}=0 \text{ MW}$$

$$1.2 \leq \beta_N \leq 2.7$$

$$P_e^{\text{net}}=1000 \text{ MW}$$

$$3.0 \leq \beta_N \leq 5.8$$



・ITERの標準実験領域($\beta_N \sim 1.8$)は、 $P_e^{\text{net}}=0$ MW条件を満たす。

・運転点の集合の幅は主半径に依存する。

正味電気出力に必要なプラズマ性能(HH)

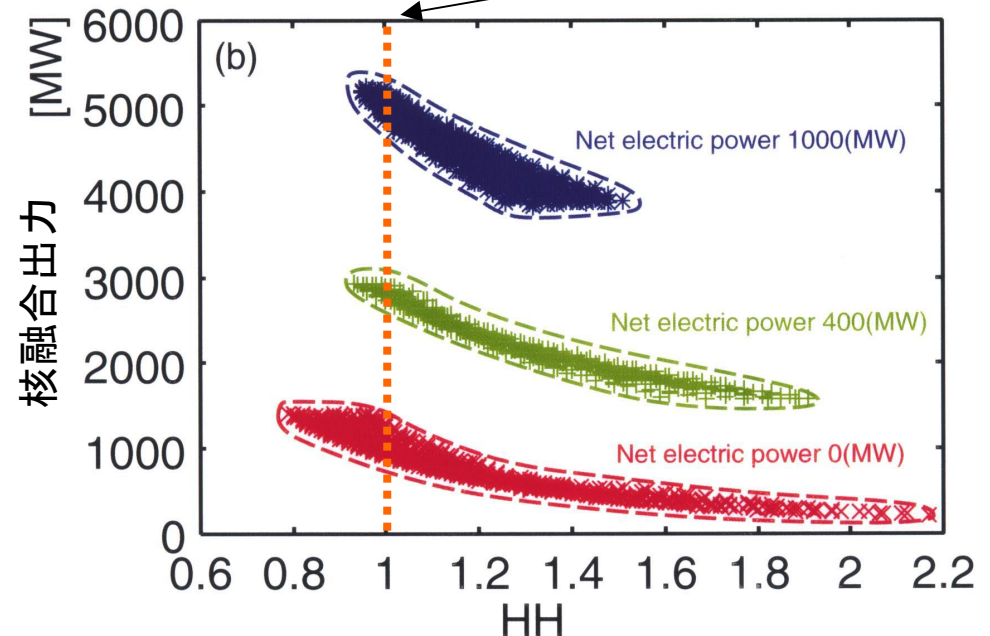
$$P_e^{\text{net}} = 0 \text{ MW}$$

$$0.8 \leq \text{HH} \leq 2.2$$

$$P_e^{\text{net}} = 1000 \text{ MW}$$

$$0.9 \leq \text{HH} \leq 1.6$$

ITER標準実験領域



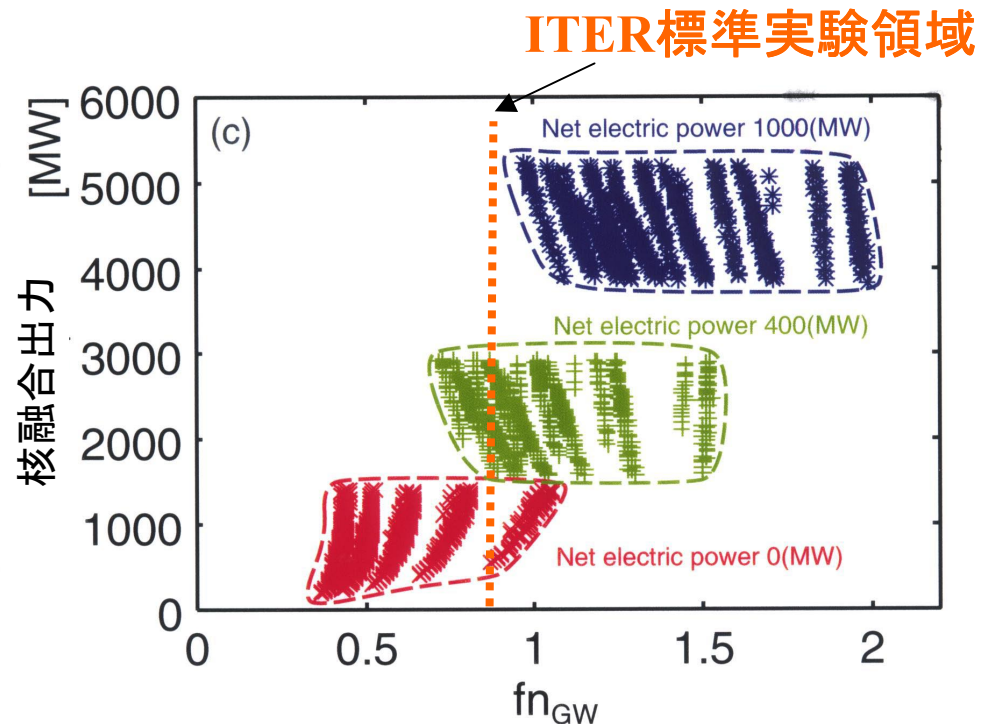
・ITERの標準実験領域(HH~1.0)は、 $P_e^{\text{net}} = 0 \text{ MW}$ 条件を満たす。

$$P_e^{\text{net}} = 0 \text{ MW}$$

$$0.4 \leq fn_{GW} \leq 1.1$$

$$P_e^{\text{net}} = 1000 \text{ MW}$$

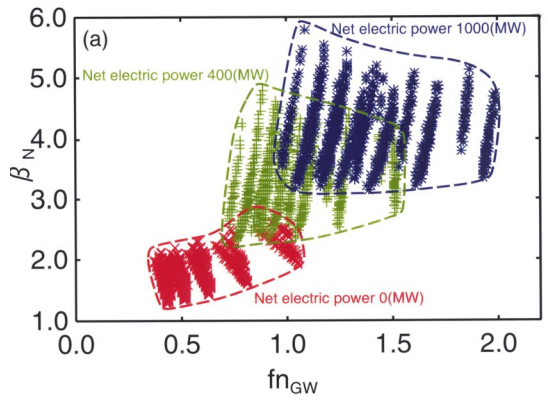
$$0.9 \leq fn_{GW} \leq 2.0$$



・ITERの標準実験領域 ($fn_{GW}=0.85$) は、 $P_e^{\text{net}}=0$ MW条件を満たす。

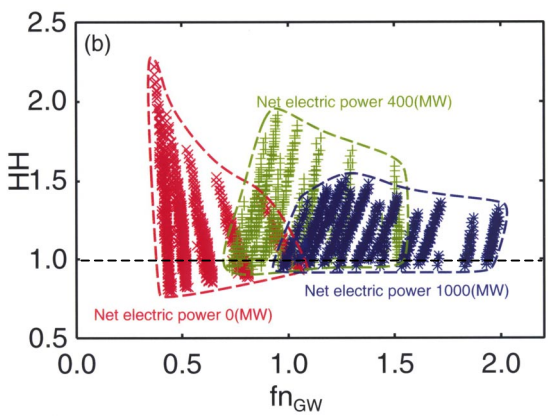
ITERの標準実験の成功により $P_e^{\text{net}}=0$ MWの実現の見通し

プラズマ性能の相互関係



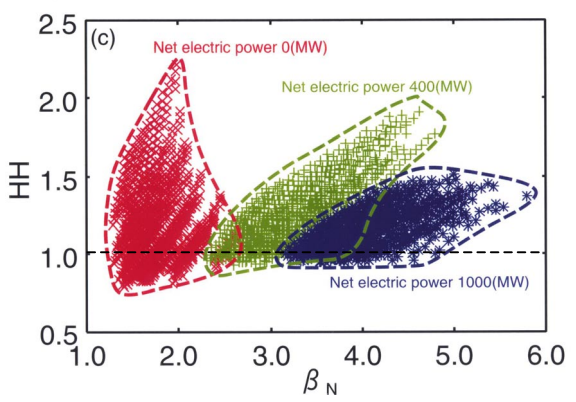
fn_{GW} と β_N の関係

正味電気出力の増加に合わせて、 fn_{GW} と β_N は同時に性能を上げる必要がある。



fn_{GW} とHHの関係

明瞭な相関無し



β_N とHHの関係

明瞭な相関無し

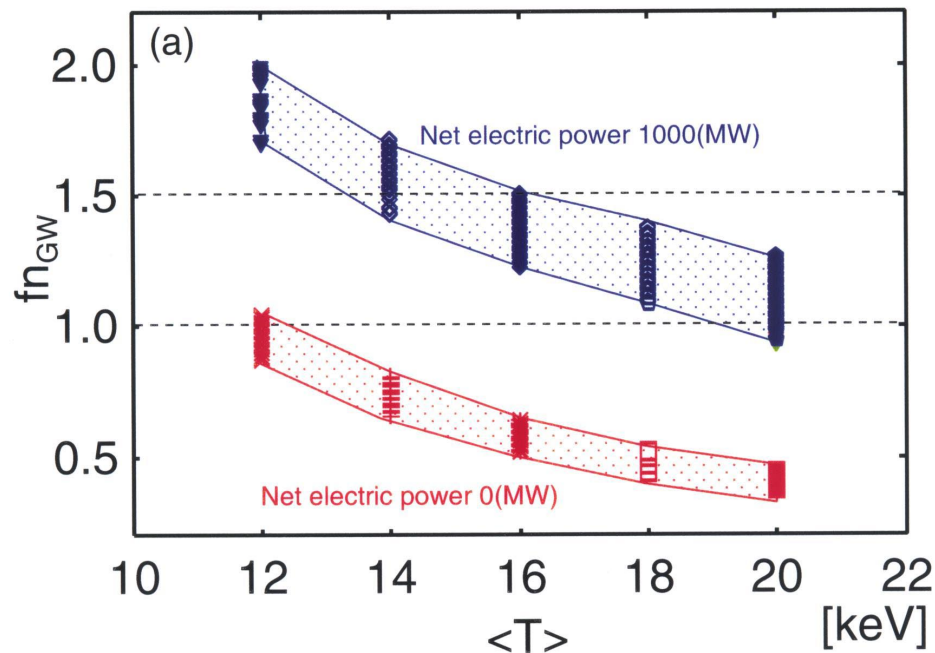
HH > 0.8を満たすことが正味電気出力に最低限必要

プラズマ運転温度と fn_{GW} の関係

温度の増加と共に fn_{GW} の条件が緩和



ダイバーターとの関係を考えながら
高温運転 or 高 fn_{GW} の選択が必要



プラズマ性能と正味電気出力

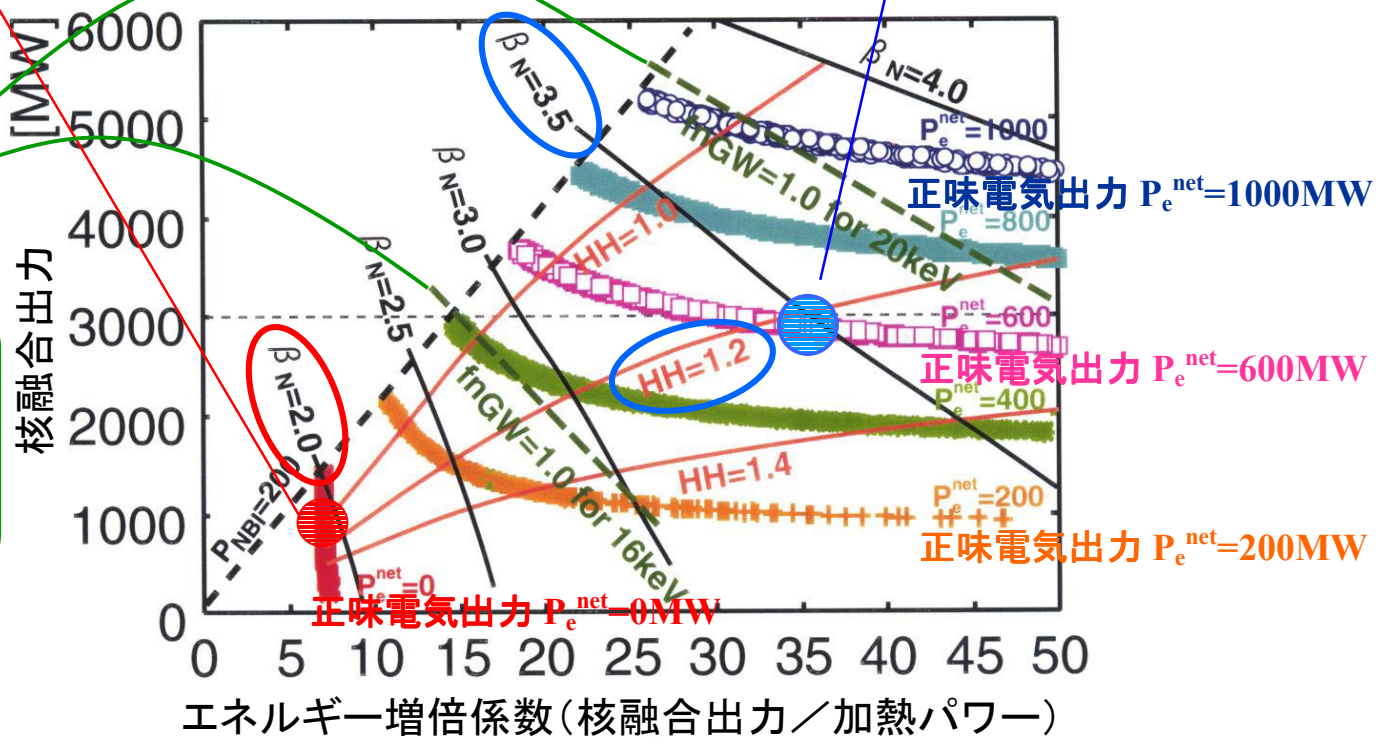
エネルギー増倍係数 Q —核融合出力 P_f 図上での正味電気出力に必要なプラズマ性能

主半径 $R=7.5m$, 熱効率 $\eta_e=30\%$ の場合

$\beta_N \sim 2.0$ かつ $HH \sim 1.0$:
核融合出力 $P_f \sim 1000MW$
正味電気出力 $P_e^{net} \sim 0 MW$

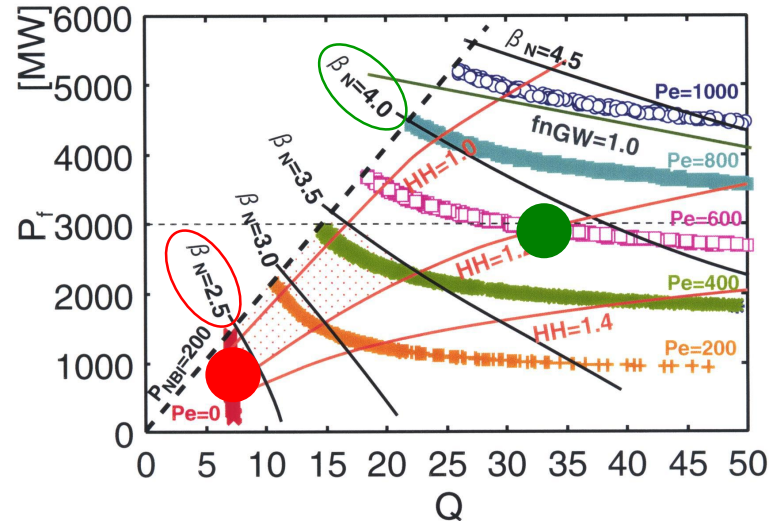
$\beta_N \sim 3.5$ かつ $HH \sim 1.2$:
核融合出力 $P_f \sim 3000MW$
正味電気出力 $P_e^{net} \sim 600 MW$

20keVが可能
 $fn_{GW} \sim 1.0$ でO.K.
16keVが限界
 $fn_{GW} > 1.0$ が必要



プラズマ性能と装置サイズの関係

主半径R=6.5mの場合

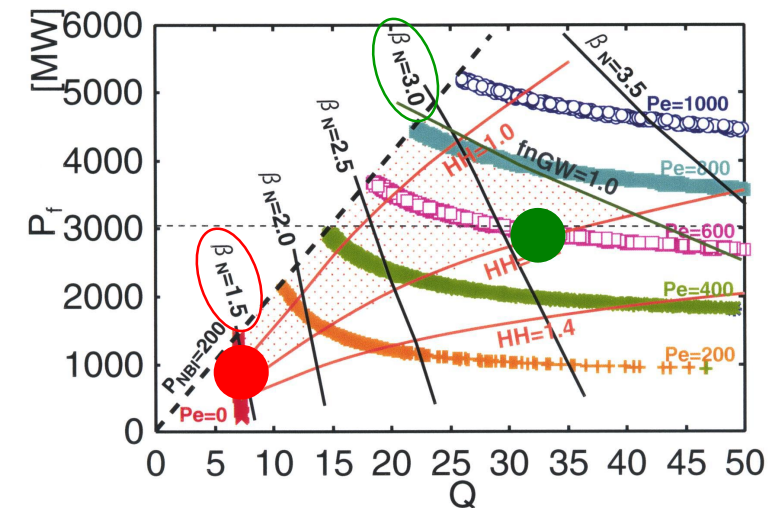


$\beta_N \sim 2.5$ で $P_e^{net} \sim 0$ MW

$\beta_N \sim 4.0$ で $P_e^{net} \sim 600$ MW

ITERで高性能プラズマ性能がすぐに達成
 できる見通しが得られた場合には6.5m級へ

主半径R=8.5mの場合



$\beta_N \sim 1.5$ で $P_e^{net} \sim 0$ MW

$\beta_N \sim 3.0$ で $P_e^{net} \sim 600$ MW

装置が巨大になるため経済性を見通しを
 えるのが難しくなる。

炉工学条件とプラズマ性能(1)

- $P_e^{net}=0\text{MW}$
- $P_e^{net}=600\text{MW}$ を目指すときの熱効率, NBIシステム効率の影響

熱効率40%の場合

$\beta_N \sim 1.5$ で $P_e^{net} \sim 0\text{ MW}$

$\beta_N \sim 3.0$ で $P_e^{net} \sim 600\text{ MW}$

熱効率10%の向上



β_N 値0.5の緩和

NBIシステム効率30%の場合

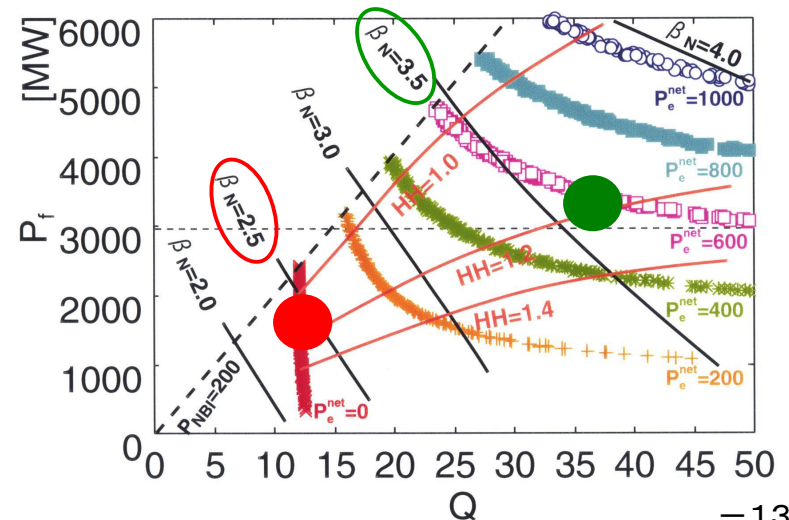
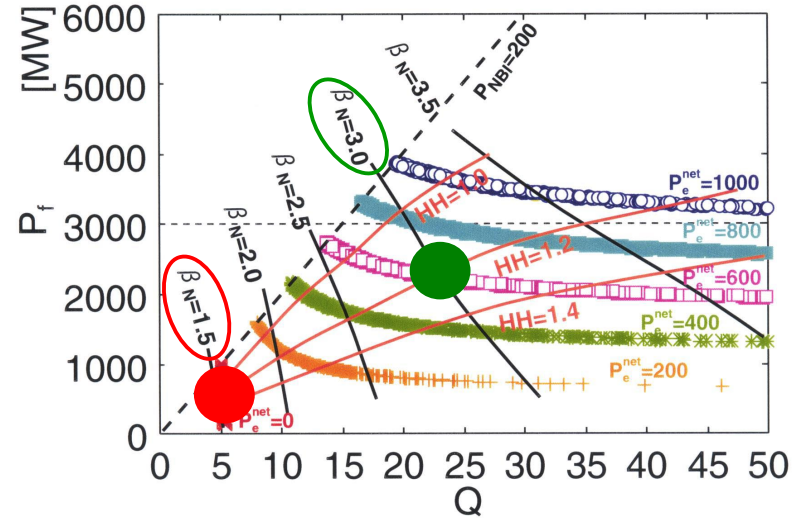
$\beta_N \sim 2.5$ で $P_e^{net} \sim 0\text{ MW}$

$\beta_N \sim 3.5$ で $P_e^{net} \sim 600\text{ MW}$

NBIシステム効率20%の場合



β_N 値0.5の緩和



炉工学条件とプラズマ性能(2)

磁場に対する依存性

主半径7.5m(19T), 8.5m(16T)の比較

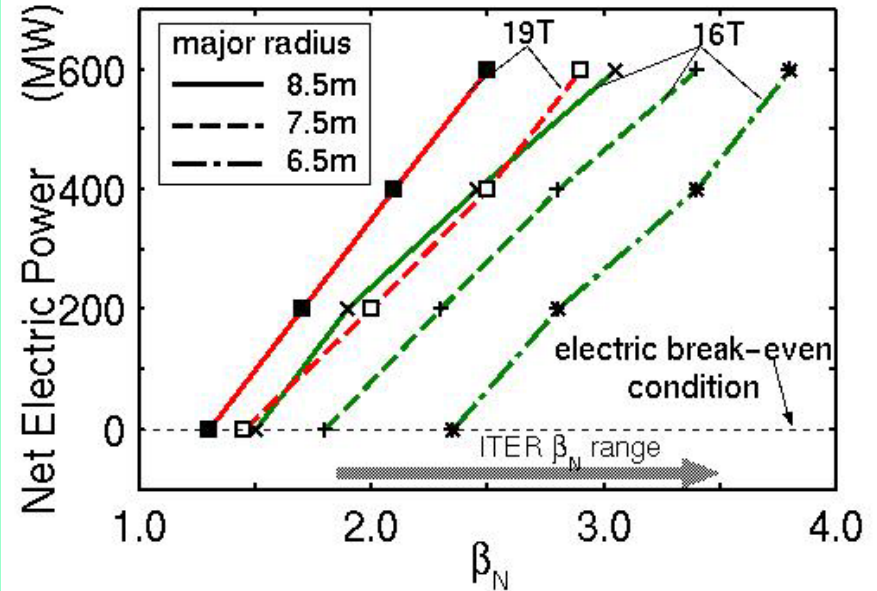
3Tの高磁場化

→ 1mの装置サイズの小型化

19T-6.5mでの運転点が無い



電流立ち上げに必要なCSコイルスペース確保困難から設計点無し



20T近い高磁場化を最大限生かすためにはCSコイルによらない電流立ち上げならびに平衡制御手法の確立が必要。

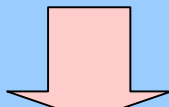
ITERから得られる正味電気出力の見通し

エネルギー増倍係数 Q —核融合出力 P_f 図上での正味電気出力に必要なプラズマ性能

ITER標準実験

プラズマ性能

$\beta_N \sim 1.8$, $HH \sim 1.0$, $fn_{GW} \sim 0.85$

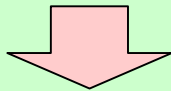


正味電気出力 $P_e^{net} \sim 0$ MWの見通し

ITER高性能実験

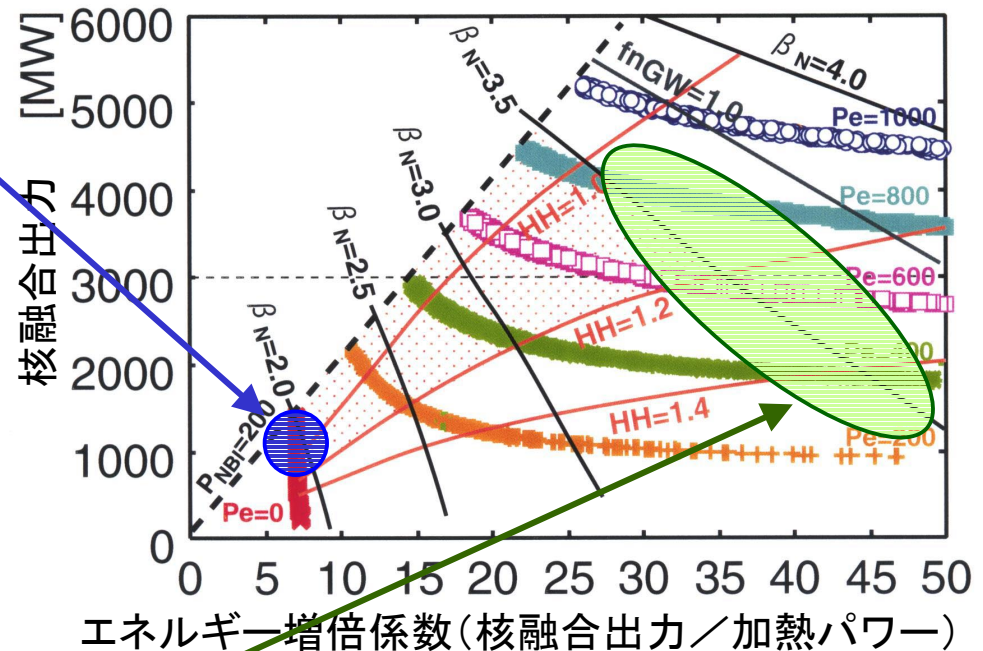
プラズマ性能

$\beta_N \sim 3.6$, $HH \sim 1.5$, $fn_{GW} \sim 1.0$



正味電気出力 $P_e^{net} \sim 600$ MW (核融合出力 $P_f \sim 3000$ MW)の見通し.

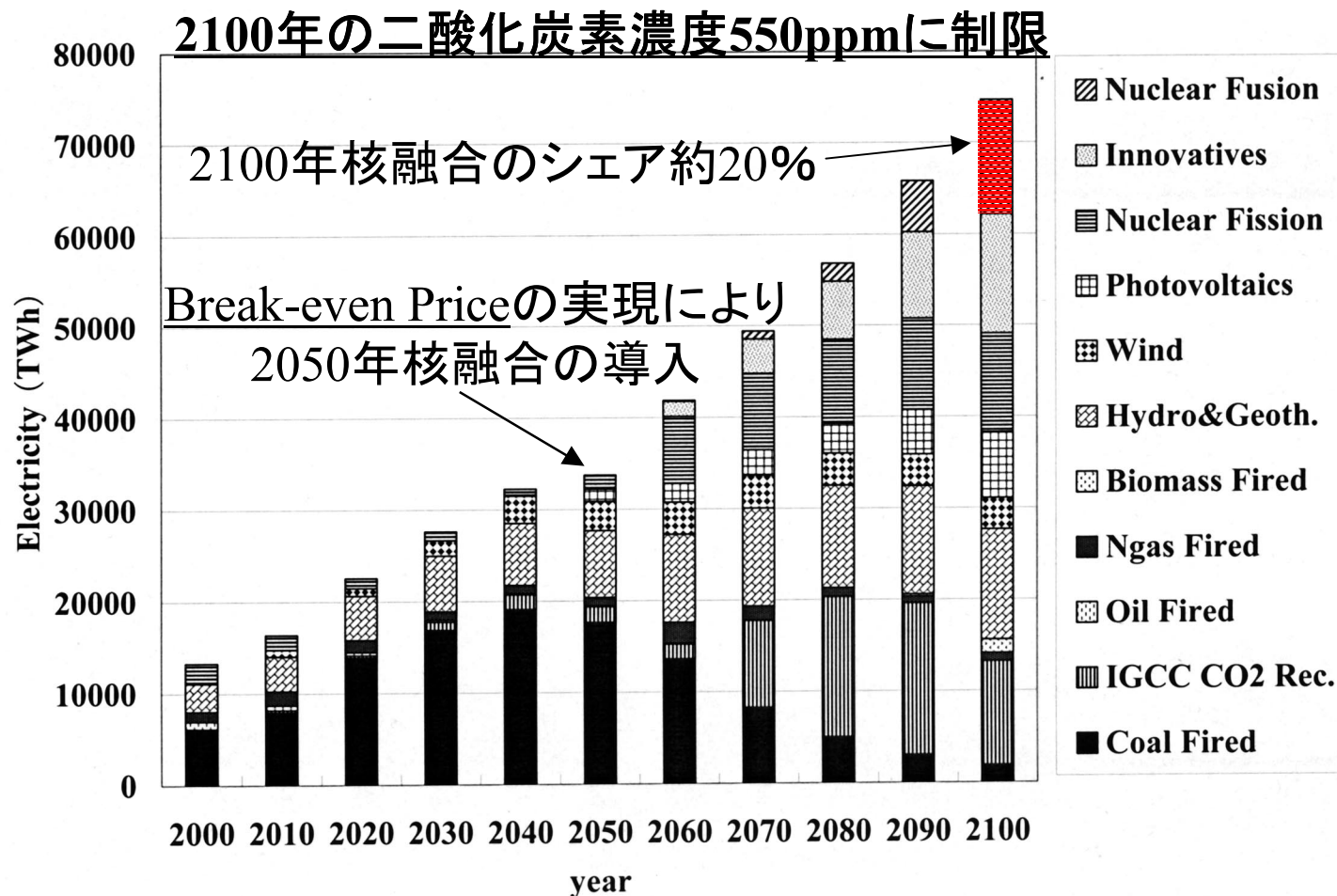
主半径 $R=7.5$ m, 熱効率 $\eta_e=30\%$ の場合



核融合がエネルギーシナリオに入る条件



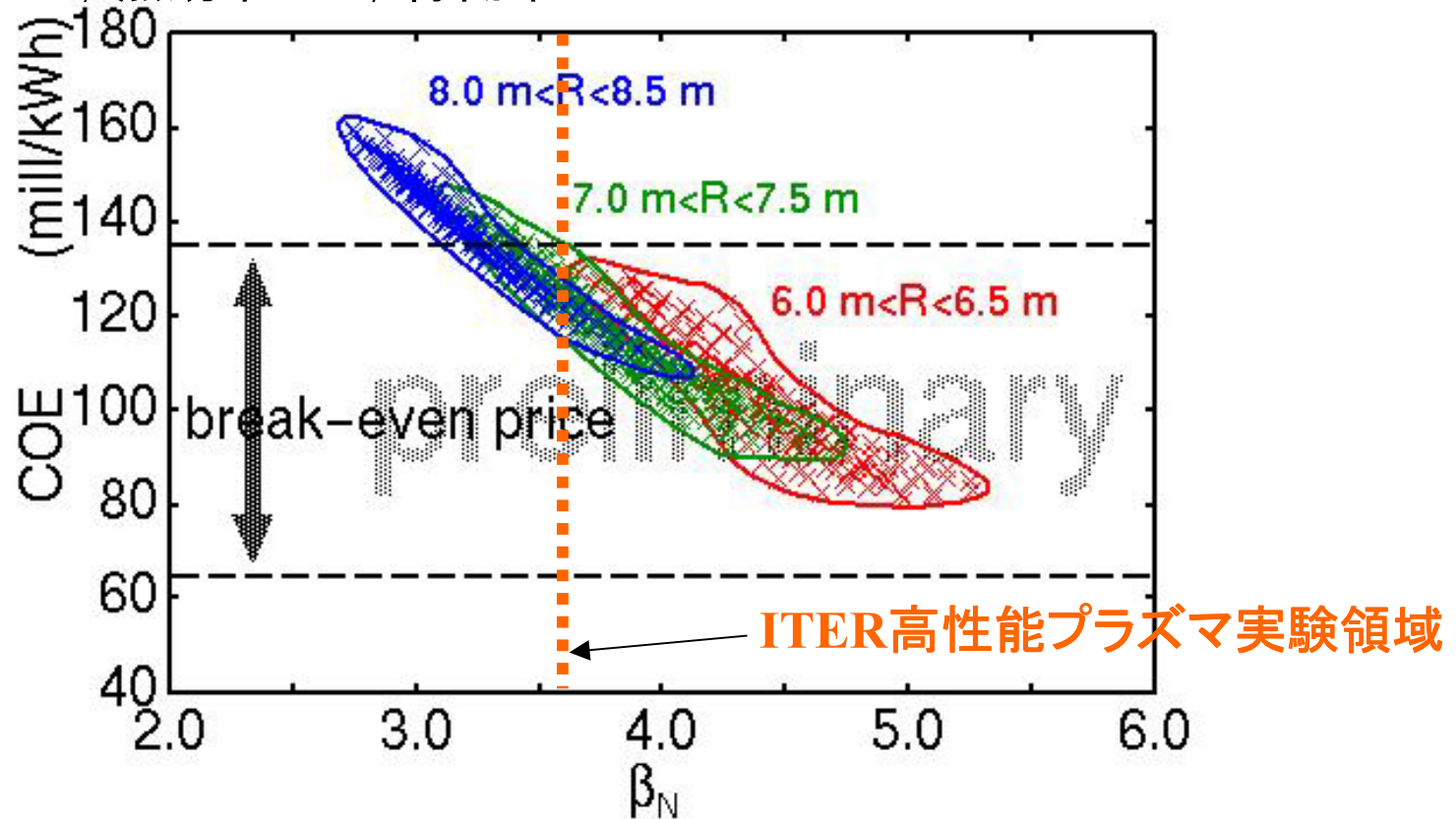
核融合へのLinearized DNE21(Dynamic New Earth 21) modelの適用例



2050年のBreak-even Priceは65mill/kWh~135mill/kWhと予測

Break-even Price達成に必要なプラズマ性能(1)

$P_e^{\text{net}}=1000\text{MW}$, 熱効率40%, 稼働率60%



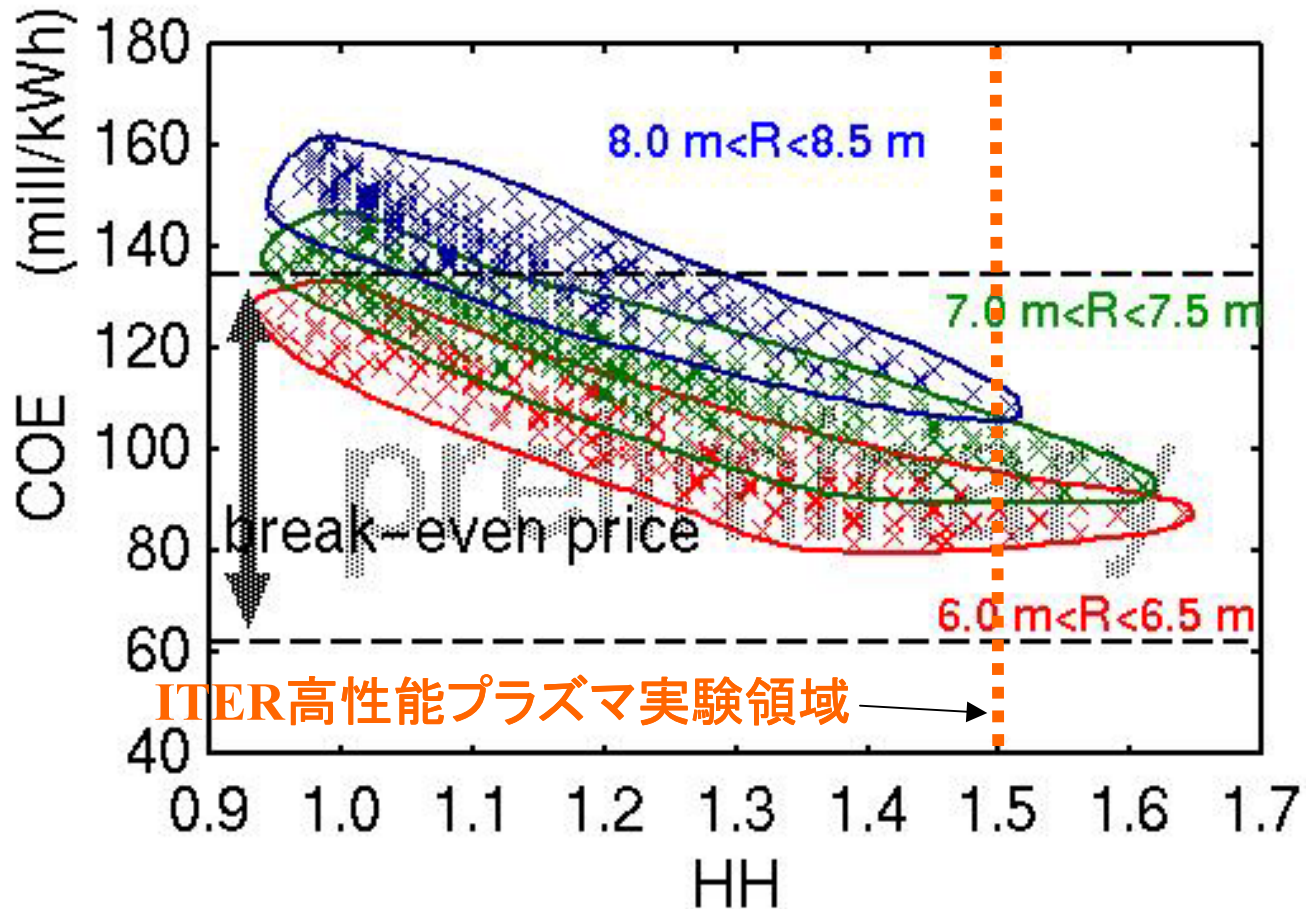
総発電量を需要大の場合 (BP=135mill/kWh)

$\beta_N > 3.0$ 以上で2050年に市場に導入される可能性が出てくる。

総発電量の需要小・トリチウム入手難の場合 (BP=65mill/kWh)

$\beta_N > 5.0$ 以上、装置サイズ $R < 6.0\text{m}$ が必要となってくる。

Break-even Price達成に必要なプラズマ性能(2)



HH>1.3を目指すと経済性に有利

➡ 電流駆動用設備(NBI)コスト減につながるため

まとめ



•ITERから見通しが得られる正味電気出力(主半径7.5mについて)

		炉工学技術の進展		
		ITER設計時の 炉工学技術レベル	初代発電炉建設時の 炉工学技術レベル	実用化に望まれる 炉工学技術レベル
		コイル磁場13T	コイル磁場16T	コイル磁場16T
		熱電変換効率30%	熱電変換効率30%	熱電変換効率40%
		加熱装置効率30%	加熱装置効率50%	加熱装置効率50%
ITERで目指す プラズマ性能	標準プラズマ $\beta_N \sim 1.9$	×	0kW	30万kW
	高性能プラズマ $\beta_N \sim 3.6$	20万kW	60万kW	90万kW

•経済性まで含めて核融合炉が2050年のエネルギーシナリオに入るためには、 β_N で少なくとも3.0以上、最も厳しいケースの場合5.0以上を目指す必要がある。