核融合エネルギーフォーラム「ITER機構発足記念シンポジウム」
（第２回全体会合、2007年12月19日、内幸町ホール）

核融合エネルギー実用化へのロードマップ検討と課題

ITER・BA技術推進委員会 ロードマップ等検討WG 座長
社会と核融合クラスター ロードマップ検討委員会 委員長
電力中央研究所
岡野　邦彦

核融合エネルギー

期待されている理由＝利点・長所

- 燃料資源量が非常に豊富 （海が燃料資源に！）
- 環境負荷が十分に小さい
- 主幹エネルギーとして安定かつ大量のエネルギーを供給しうる
- 燃料サイクルがプラント内で自己完結し、核燃料物質とも無縁
  社会情勢にもロバストな特性を期待可能

現状最大の弱点

- 実用化への見通しがはっきりしない。

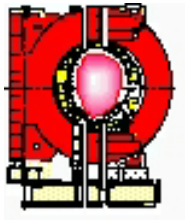
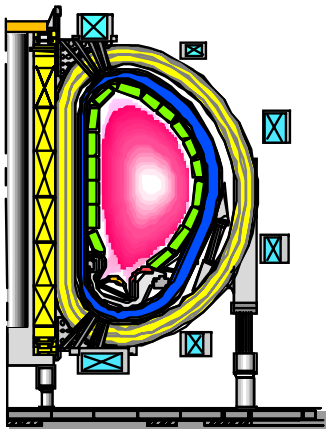
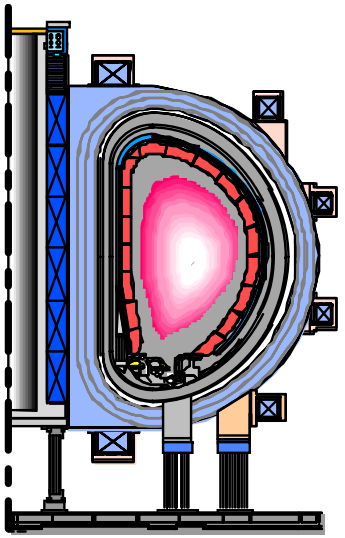
  ただし、ITERでの連続燃焼確認は、実用化への大きな前進。

そのあと、どう開発していくかは、今から考えておかねばならない。

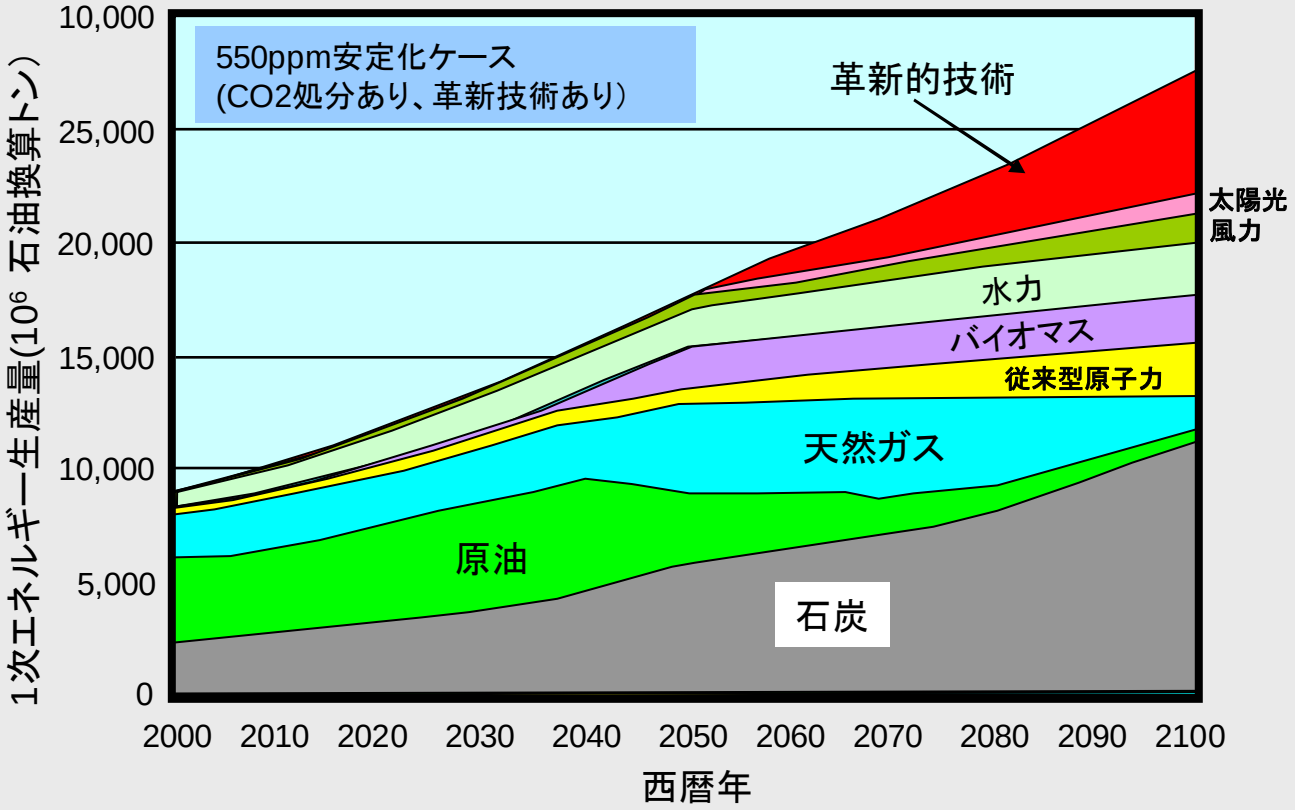
プラズマエネルギー実用化へのステップ

ITER

JT-60 → 実験炉（ITER） → 原型炉

ゼロパワー	科学技術的実証 自己燃焼プラズマ 炉工学技術	発電実証	
			実用化
Q～1、10秒	Q ＞10、400秒	Q =30～50、定常運転	

2100年に550ppmを達成可能なシナリオの例



NEDO/RITE「地球再生計画」の例より

有効な革新的技術は2050年頃から立ちあがる必要があるだろう

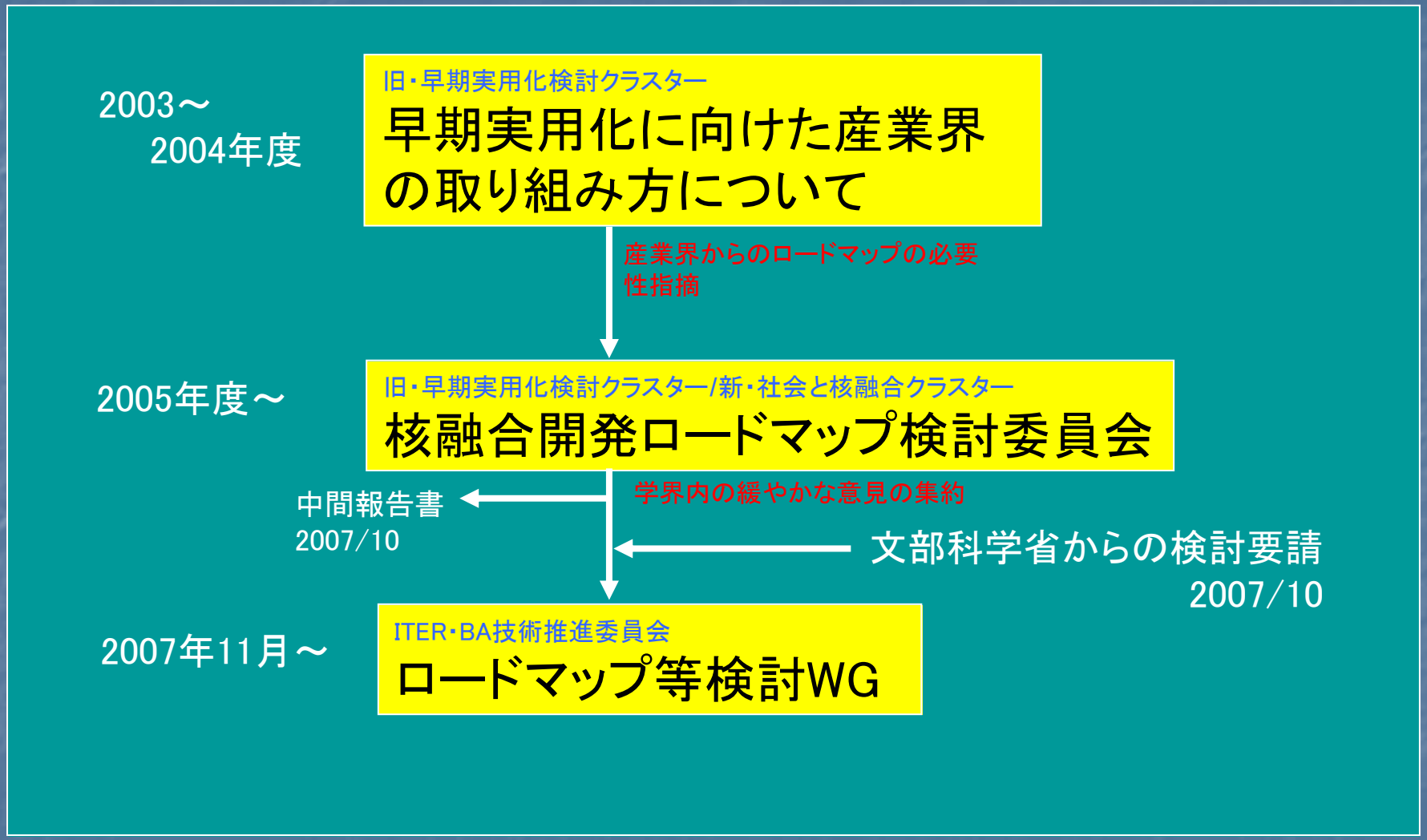
核融合エネルギーが、21世紀中に顕在化すると予想される地球環境問題の解決に有意に寄与できる技術となりうるためには、21世紀中葉までに実用化の準備が終了できる計画であることが望まれる。

原子力委員会報告（H17年10月）にもそのように記載されている。

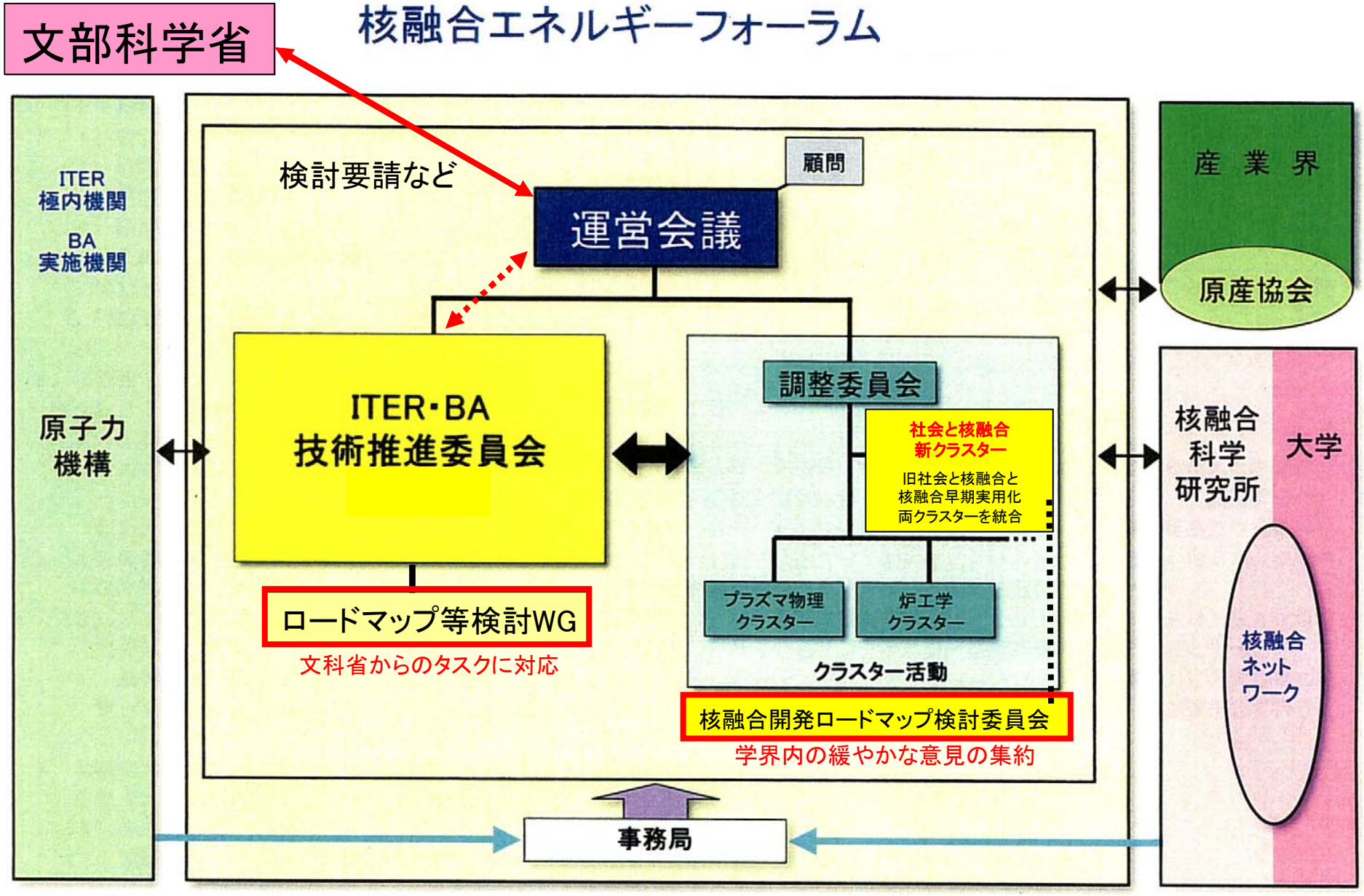
そのためには、2030年代後半には発電実証炉（原型炉）に運用が開始できる開発計画がまず必要。

ロードマップ？　道なき原野への道路建設計画？

フォーラム内でのロードマップ検討の経緯



フォーラム内でのロードマップ検討の位置づけ



核融合の早期実用化クラスター

「核融合開発ロードマップ検討委員会」

2005年度～

トカマク方式の場合を想定した原型炉実現へのロードマップを検討することを目指し、ロードマップ作成にむけた現状技術のレビュー、様々な意見の差異に関する再認識や、可能ものについては緩やかな意見の集約を進めた。

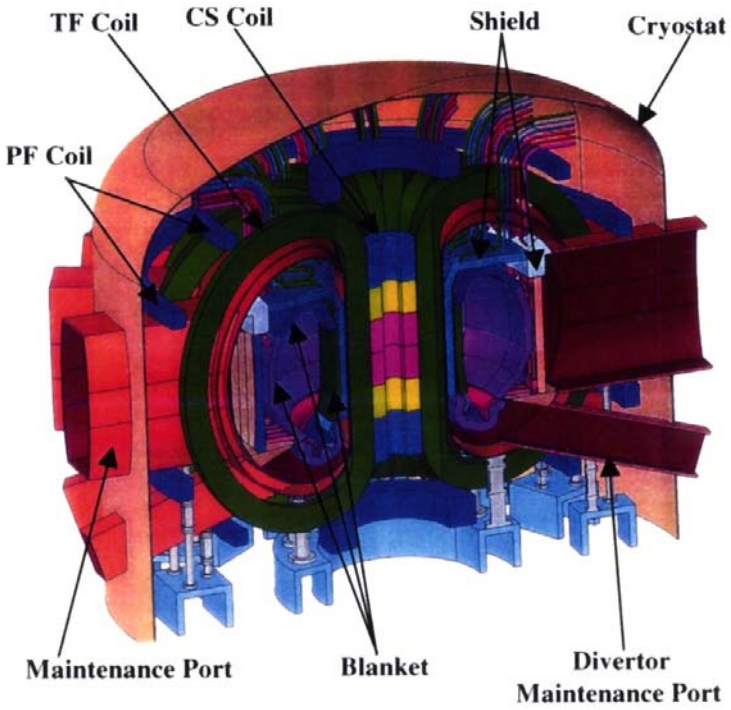
- ●ロードマップ検討準備会（2005年12月）
- ●第１回ロードマップ検討委員会（2006年3月）
- ●第２回ロードマップ検討委員会（2006年11月）
- ●第３回ロードマップ検討委員会（2007年3月）
- ●第４回ロードマップ検討委員会（2007年9月）
- ●中間報告書をITER・BA技術委に提出(2007年10月）

各回の議事録と資料は核融合フォーラムホームページからダウンロード可能

1．原型炉イメージの共有（国内）

JAEA　飛田健次先生の資料より

Demo-CREST(電中研)

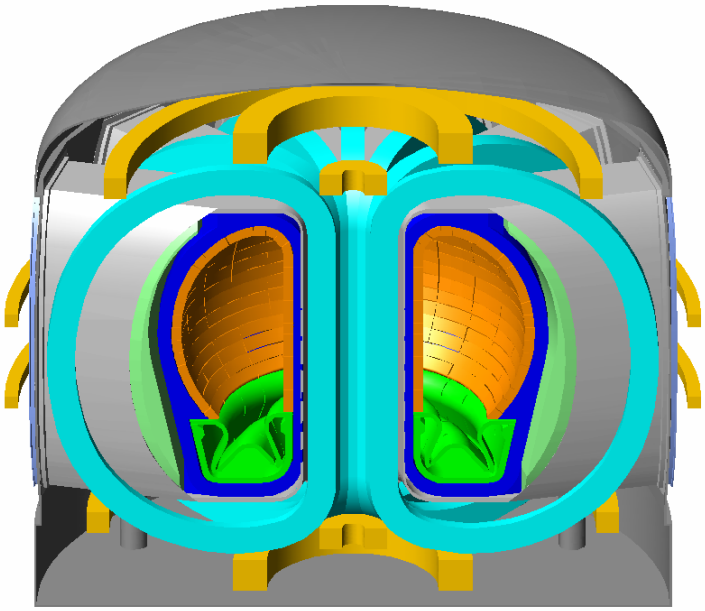


R_p = 7.3 m, A = 3.4,
B_{max} = 16 T, $\beta_N \geq 3.4$

出来るだけ早く発電実証

ITERとの連続性

SlimCS（原子力機構）



R_p = 5.5 m, A = 2.6,
B_{max} = 16.4 T, β_N = 4.3

定格運転時の炉心パラメータは比較的楽

コンパクト

ブランケット設計の自由度

国内の原型炉・2案の共通点・相違点

共通点	相違点
・コンパクト炉 原子力委：ITER程度の炉心寸法 ・固体増殖、水冷却 ・フェライト鋼 ・Nb_3Al　~16 T ・NBおよびECによる外部電流駆動 ・BS電流主体の電流駆動 ・RWM安定化による高β化	・メンテナンス方式 D-CREST: モジュール方式 SlimCS: セクター方式 ・CS供給磁束 D-CREST: CSでflattop到達 SlimCS: CS誘導は4MA ・アスペクト比 D-CREST: 3.4 SlimCS: 2.6

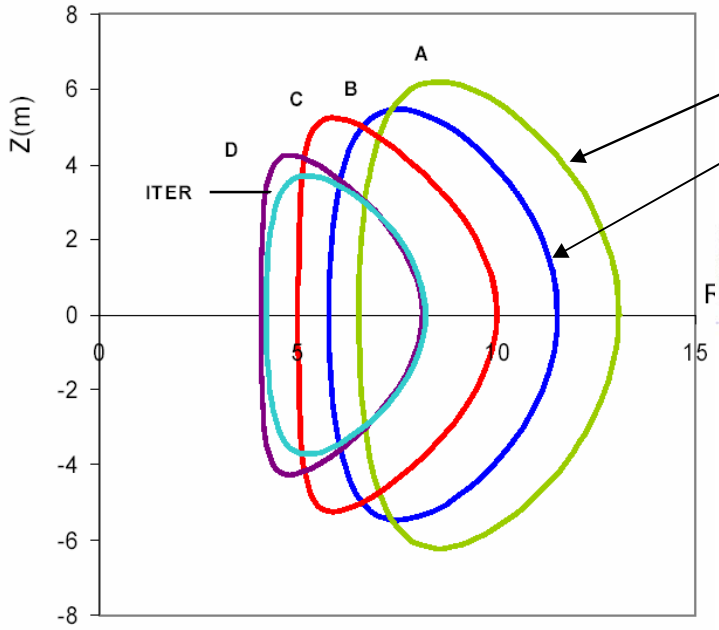
プラズマ性能の差を除き、日本の両原型炉案の基本的技術課題は共通と認識された

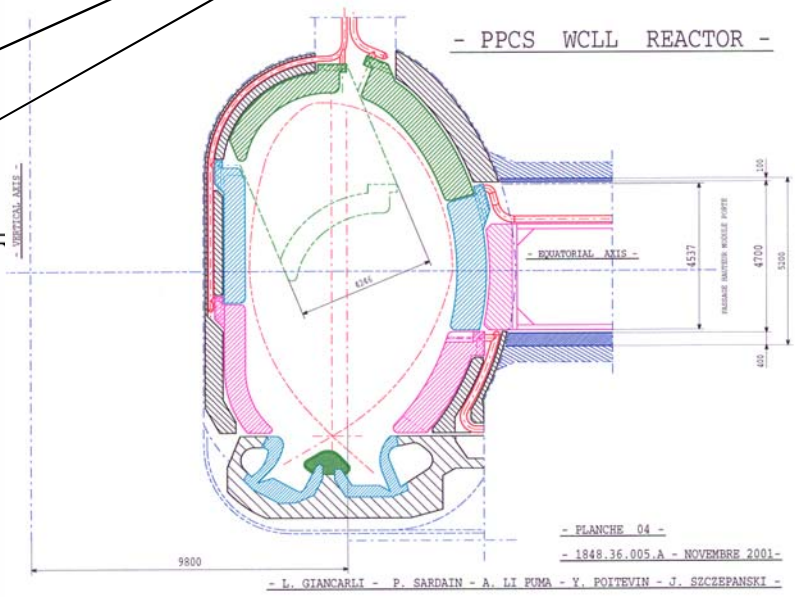
JAEA　飛田健次先生の資料より

EUの設計指針

PPCS Models

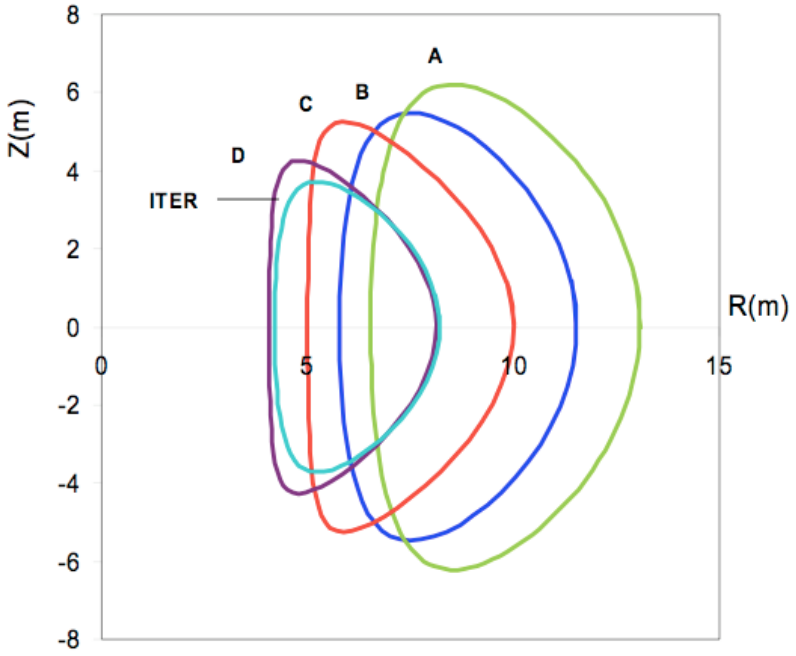
プラズマ断面の大きさは、ITERや日本の両原型炉案より大きなA,Bを基本とする。





EU案と日本の原型炉に関する考察

- BS電流主体（f_{BS} ~70-80%）の定常運転は、
  EU炉の45%よりかなり難しい
  - ➡ 日本独自の開発プランが必要 （JT-60SAで対応する）
- 他の炉心プラズマパラメータでは、EU炉が断然楽なわけでもない。



EU炉：炉心プラズマへの要請は

- HHy2 ~ 1.2
- n/n_G ~ 1.2-1.5
- $\beta_N \geq 3.5$

➡ ITERの目標を超える！

大型炉とはいえ易しくはない

ダイバータ除熱に関してもほぼ同等

設計条件： 10-15 MW/m^2

（P_f=5GWのため、除熱面積が広い効果は帳消し）

JAEA 飛田健次先生の資料より

ロードマップ検討委員会の中間報告書で描かれた時間的に各分野個別計画と整合がとれたタイムテーブル例

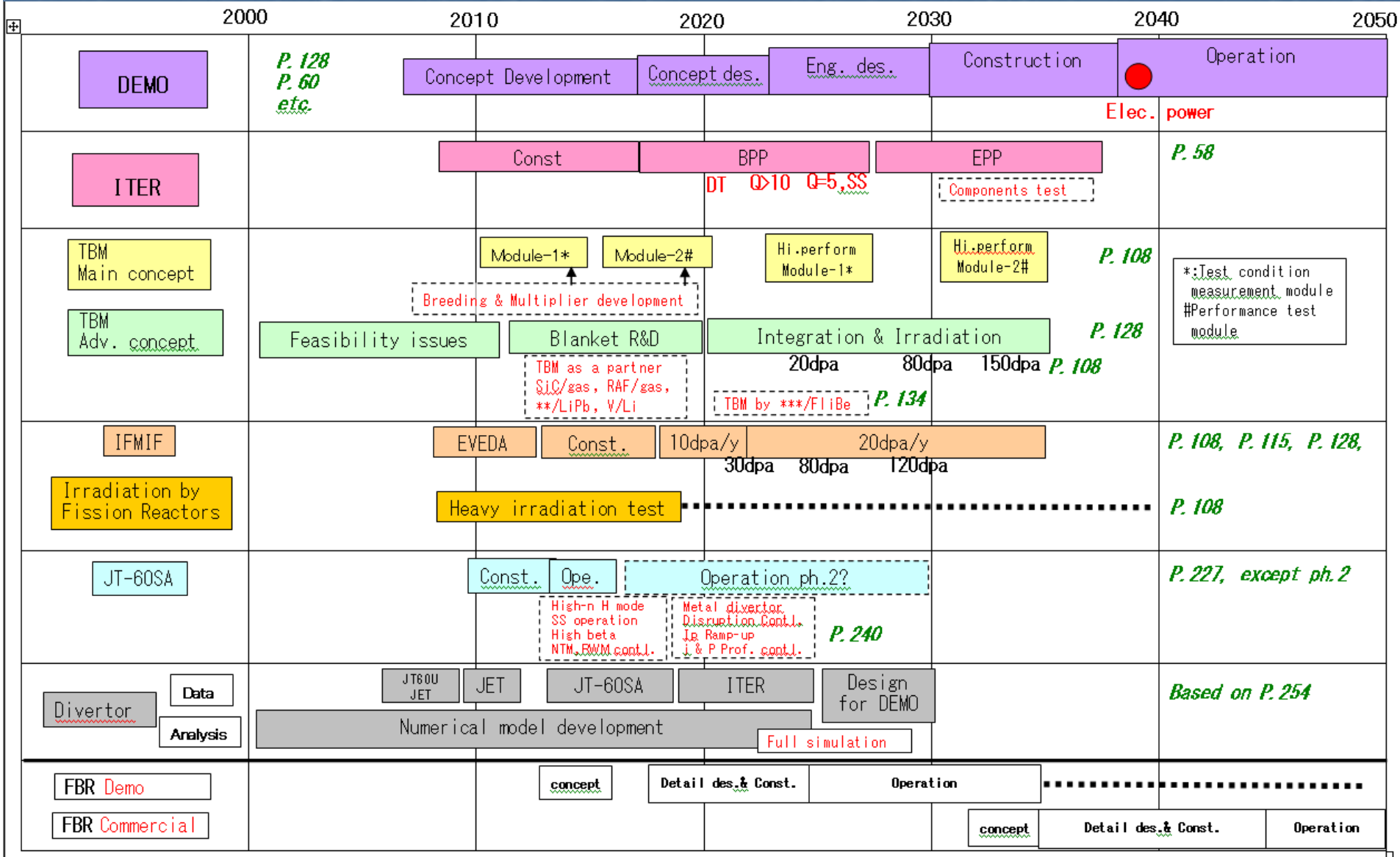


図 6-2　本委員会で作成した 2040 年までに発電実証を行うためのタイムテーブル例（**,***は構造材候補複数の意味）

斜体緑字は参照したページ

ロードマップ検討委員会の中間報告書で示唆された時間制約

2030年台後半での発電実証を目指すならば、

- ITER　BPPフェーズ前半から概念設計を開始する必要あり
- ITER　EPPフェーズ中盤では原型炉建設を開始する必要あり
  （その5年ほど前に建設に向けた設計を開始）
- 材料は基本的には分裂炉照射データで設計を開始し、
  IFMIFで性能を確認する
- ITERの高Q・連続燃焼確認と、JT-60SAで確認できた範囲の
  定常プラズマ性能を基準に設計を開始する
- ダイバータなどはITER, JT-60SAでの実験開発と、シミュレーションによる研究を同時に進める必要がある

これは全体の概略な時間スケジュールに過ぎず、ロードマップを描くには、さらに詳細な技術マップを作成し、その項目ごとの実現すべき時期と、技術的リスクなどとの調整も含めて、検討を進める必要あり。

文部科学省から核融合エネルギーフォーラムへの依頼事項 （2007年10月18日）

①21世紀中葉までに核融合エネルギーの実用化準備を完了するためのロードマップ作成

②産業界を含めた日本の技術戦略、枠組み、役割分担の検討

③人材育成や確保の分析、計画の提案

④若い人材が魅力を感じられるための広報の在り方

ITER・BA技術推進委員会下に、ロードマップ等検討ワーキンググループを設置し、クラスター活動としてのロードマップ検討委員会の中間報告も参考に、改めて①、②、③を検討する。ただし

①、② は、トカマクで実現する場合を想定したケーススタディー
③は、 ITER、BA、トカマク原型炉を進めるための部分のみの検討（他方式、学術分野の人材育成は検討の範囲外）。
④については別途検討する。

ロードマップ等検討ワーキンググループ・メンバー

岡野 邦彦	電力中央研究所
今川 信作	核融合科学研究所
小川 雄一	東京大学
小西 哲之	京都大学
谷川 博康	日本原子力研究開発機構
飛田 健次	日本原子力研究開発機構
長谷川 満	日本原子力産業協会
堀池 寛	大阪大学
森 清治	日本原子力産業協会

ロードマップ等検討WGで進んでいる議論の概要

（2007年11月より5回の会合を持った）

目指すべき原型炉計画の条件整理

必須条件：

（1）21世紀中葉に核融合商用炉建設の準備が整うこと
→ 原型炉の運転開始は、遅くとも2030年代後半。

（2）ITERと同程度の規模で建設できること。

（3）定常運転が示されること → 炉設計は、定常運転を前提とする。

●プラズマ条件

・最終的に定常プラズマ運転を目指す。

・誘導電流を主としたパルス（またはハイブリッド）モードから、
段階的に定格の定常プラズマに移行。
最終的には、定常でQ=20以上。

●発電実証の定義
・最終的には、正の発電が必要と考える。
・ただし、発電量はプラズマ性能の上昇に伴って段階的に上昇し、
最終的に正の発電となる、という運用が合理的である。

●運転期間（装置寿命）の定義
・フルスペック運転で15～20年。
・恒久的コンポーネントの寿命による交換を余儀なくされるまでの
フルエンスをフルスペックの15～20年とする、という意味。
・途中で先進的ブランケットへの交換により性能向上を図る。
（性能向上のための主要コンポーネントの交換もありうると考えている。）

●開発開始時期

・概念設計に続く工学設計は、ITER　DT燃焼実験を待たずに進め、ITER でDT燃焼制御が示される時期には、工学設計はおおよそできているようにする。

・ITERの燃焼プラズマはスケーリング則からは大きく外れないという前提で設計を進める。
ITERでそれを確認してから、建設のための設計へ進む。

●その他の要件

・原型炉段階においても、より優れた先進概念ブランケットの開発を推進するため、ITERにおけるTBMのような、コンポーネントテストができる設計とする。

ロードマップ作成の進め方

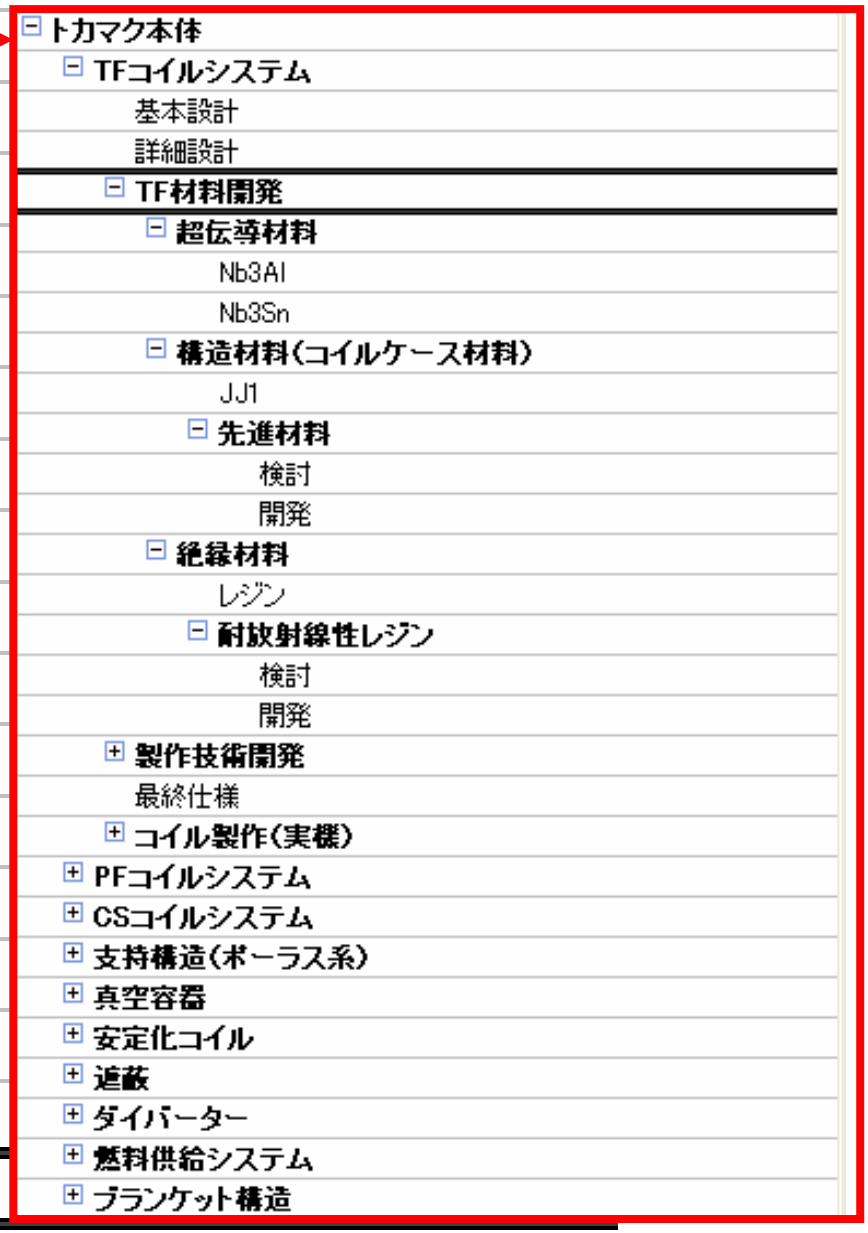
必要技術を網羅した技術マップをまず作成し、各項目の開発時間を積み上げる

●現在研究が進んでいる（研究者が現存する）領域だけの技術リストにならないことが非常に重要。

●ITERでもBAでもカバーされない課題も多数ある。
それらも摘出し、ロードマップに反映する。

●現行法規制による縛りは考えないが、法律整備（基準・規格・規制）を盛り込むことは必須。電気事業法や環境アセス法、既存RI法との整合性に留意する。

	タスク名
1	原型炉仕様
17	トカマク本体
191	トカマク周辺機器
223	流体制御
240	電源制御
251	加熱電流駆動
275	プラズマ
310	ブランケット開発
1175	トリチウム
1526	計装制御
1535	メンテナンス
1571	サイト建物
1599	発電プラント
1609	概念設計作業
1663	エンジニアリング
1674	安全環境
1680	プロジェクト管理
1691	バックエンド



	タスク名
1	⊞ 原型炉仕様
17	⊞ トカマク本体
191	⊞ トカマク周辺機器
223	⊞ 流体制御
240	⊞ 電源制御
251	⊞ 加熱電流駆動
275	⊞ プラズマ
310	⊞ ブランケット開発
1175	⊞ トリチウム
1526	⊞ 計装制御
1535	⊞ メンテナンス
1571	⊞ サイト建物
1599	⊞ 発電プラント
1609	⊞ 概念設計作業
1663	⊞ エンジニアリング
1674	⊞ 安全環境
1680	⊞ プロジェクト管理
1691	⊞ バックエンド

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
WDS	項目	ITER Phase	ITER建設期			ITER運転期 (HH, DD, DT初期)		ITER運転期 (DT後期～EPP)		ITER運転期 (EPP)		技術分類(D,I,F)		
		DEMO Phase	DEMO概念設計 － 工学設計			DEMO工学設計、建設判断		DEMO建設期		DEMO運転期				
2	トカマク本体	分類	ITERとその延長上で行いえる開発項目	BA内で行われる開発項目	計画が必要な開発項目	最終設計仕様決定に必要な項目	DEMO建設準備に必要な項目	各コンポーネント製作上重要な項目	建設上必要な項目	メンテナンス、補修、定期検査等運転しながらの開発となる項目	定常化(定常発電)に必要な項目	設計上での分類	建設上での分類	
02.1	**TFコイルシステム**													
02.1.1	基本設計				○	●						D		
02.1.2	詳細設計					○	●					D		
02.1.3	TF材料開発													
02.1.3.1	超伝導材料				○	●						I		
02.1.3.1.1	Nb3Al				○	●						D or I		
02.1.3.1.2	Nb3Sn		○			●						I		
02.1.3.2	構造材料(コイルケース材料)		○			●								
02.1.3.2.1	JJ1		○			●						D		
02.1.3.2.2	先進材料				○	◎	●					I		
02.1.3.2.2.1	検討				●							D		
02.1.3.2.2.2	開発				○	◎	●					I		
02.1.3.3	絶縁材料				○	◎	●					I or F		
02.1.3.3.1	耐放射線性絶縁材				○	◎	●					I or F		
02.1.3.3.2	耐放射線性レジン				○	◎	●					I or F		
02.1.3.3.2.1	検討				○	●						D		
02.1.3.3.2.2	開発				○	◎	●					I or F		
02.1.4	製作技術開発											D		
02.1.4.1	超伝導材料量産製造技術					○	●					I		
02.1.4.1.1	量産試作					○	●					I		
02.1.4.2	超電導導体量産製造技術					○		●				I		
02.1.4.2.1	量産試作						○	●				I		
02.1.4.2.2	導体試験サンプル製作&試験				○	●						D		
02.1.4.3	巻線製造技術				○	●						D		
02.1.4.3.2	縮小サイズモデルコイル製作＆試験				○	●						D		
02.1.4.4	構造材量産製造技術(コイルケース)					○		●				I		
02.1.4.4.1	量産試作					○		●				I		
02.1.4.5	コイル支持構造製造技術(コイルケース)					○		●				D		
02.1.4.6	コイル製造技術					○		●				D		
02.1.4.6.1	実機サイズモデルコイル製作						○	●				D		
02.1.5	最終仕様					●						D		
02.1.6	コイル製作(実機)							○	●			D		
02.1.6.1	超伝導材料							○	●			D		
02.1.6.2	導線							○	●			D		
02.1.6.3	構造材料							○	●			D		
02.1.6.4	巻線							○	●			D		
02.1.6.5	コイル構造							○	●			D		
02.1.6.6	コイル							○	●			D		
02.1.6.7	全体組み立て							○	●			D		
02.1.6.8	試験							○	●			D		
02.2	**PFコイルシステム**													

全画面表示
全画面表示を閉じる(C

ロードマップ検討作業：現状のまとめ

- およそ1500項目にわたる原型炉のための技術マップを作成した。ロードマップ検討に必要な技術項目は網羅したと考えている。
- 深いレベルにある目立たぬ技術でありながら、最終的に原型炉実現を支配する可能性がある技術には特に注意を払った。
- おもな項目ごとに開発開始時期、完成のデッドラインを示した
- 今後は、技術マップの各項目間の連携・順序を考えつつ、ロードマップを作成する。