

# 欧米の核融合実用化加速計画 について(2)

岡野邦彦

電力中央研究所

2003年8月12日 第7回核融合開発基本問題検討会

# 米国の早期実用化計画案

経緯: DOEの科学部長Raymond Orbachは35年以内に電力の系統投入を行うことの実現性の検討をFESAC(Fusion Energy Science Advisory Committee)に依頼。 FESAC Development Path Panel (chaired by Prof. R. Goldstone, Princeton Univ.)を設置して検討。

## 米国の事情

- 1) ITERから脱退して以後、**磁場方式核融合(MFE)**の予算は大きく減ってきた。現在の予算規模では**慣性核融合(IFE)**の方が大きい。
- 2) 国内の小規模な燃焼試験用トカマク**FIRE**の計画を推進して来た。
- 3) IFEには軍事的開発費も含めて大きな予算を投入し**国立点火装置NIF**を建設中である。コミュニティーの大きさは、MFE ~ IFE。日本のMFE>>IFEの状況と大きく異なる。
- 4) MFEをトカマクだけでなく将来のための様々な代替方式(例えば球状トカマク)なども推進中。
- 5) IFEのドライバーは、レーザー、重イオンビーム、Zピンチが対等に推進されており、現時点で絞り込みの同意を得るのは難しい。ただしNIFはレーザー方式。

Fiscal Year 03 05 07 09 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47

### Theory, Simulation and Basic Plasma Science

#### Configuration Optimization

##### Concept Exploration/Proof of Principle



#### Burning Plasma

Indirect Drive Direct Drive



IFE NIF MFE ITER (or FIRE)

#### Materials Testing

##### Materials Science/Development

First Run Second Run

IFMIF

#### Component Testing

##### Engineering Science/ Technology Development

IFE ETF

MFE CTF

#### Demonstration

##### Systems Analysis / Design Studies



US Demo

03 05 07 09 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47

#### Key Decisions:

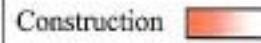
IFE IREs

MFE PEs

IFMIF

MFE or IFE

Demo



# FESAC Development Path Panel 報告の計画

現在～2009年：

MFE,IFEの燃焼のためのデータを蓄積

今後5年間の予算を2倍にして現在のマルチ路線を推進

- 1) ITER建設開始。もしITERが建設に入らなければFIRE建設開始
- 2) NIFとZR(Zピンチ)の両IFE装置が完成(NNSA予算)
- 3) MFEの魅力ある概念と先進運転を研究。  
PE(Performance Extension)装置に備える。
- 4) CTF(Component Test Facility)の概念研究
- 5) IFMIF設計に参加
- 6) ITER用ブランケットなどを研究
- 7) IFE実用化のために重要な物理・技術を開発
- 8) 高速点火法を探査研究
- 9) 直接照射爆縮をNNSA予算で推進
- 10) ZピンチもNNSA予算で推進
- 11) MFE,IFEの概念炉設計を継続的に更新
- 12) プラズマの統合シミュレーションコード開発

2008年決断： IFMIF、国内MFE新装置、IFE新装置の建設を判断

**2009年～2019年：**

**予算はさらに5割増として1980年レベルまで戻し、以下を実施**

- 1) NIFとITER(またはFIRE)により燃焼プラズマを確認。
- 2) 磁場式の**機器試験核融合装置**CTF(球状トカマクもありうる)の設計を実施
- 3) IFEの工学試験炉ETFの設計を実施
- 4) IFE, MFEとも高効率長期間運転のデモ。液体壁もあり。
- 5) IFMIF運用開始、CTF・ETFのためのデータ取得
- 6) MFE, IFEとも性能予測用の統合コードを開発

**中間決断：**MFEの高性能テスト装置PEか、IFEの統合試験装置IREの建設を決定。どちらか一方だけかもしれない。

**2019年決断：**次期DEMO炉の方式を決定。それに対応して、MFEのCTFか、IFEのETFのどちらを建設するかを選択する

注) この時点でIFEかMFEのどちらかを放棄することになる  
疑問) ITERとNIFが成果を出しているはずの時期に？

## 2020年から2029年:

- 1) ITERで燃焼プラズマ定常運転を確認
- 2) IFMIFでCTFまたはETFでテストするの材料(DEMO用)を吟味
- 3) CTF(MFE材料試験炉)かETF(IFE工学試験炉)を建設
- 4) IFMIF、CTFまたはETF、ITERの結果からDEMOのライセンシングを処理
- 5) 統合計算コードでDEMO設計を最適化

## 2029年: US DEMOの建設を決定する

疑問: 1) - 4)は10年でできる内容には見えないが。

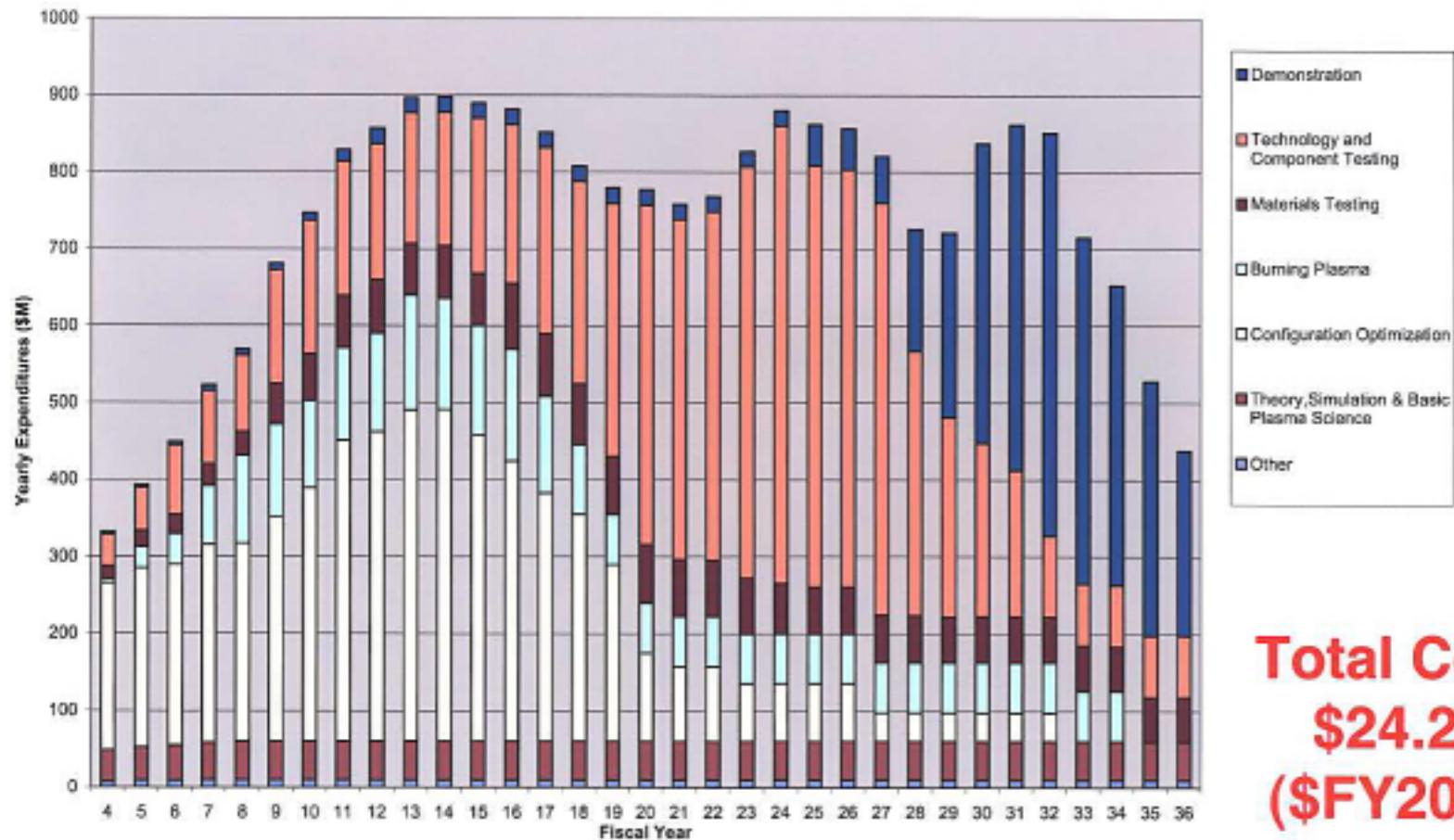
## 2030年～2035年

DEMOを建設。

魅力ある核融合動力炉の運転を実証する。

疑問: 5年で建設、運開、系統投入？

# The Fusion Budget Needs to ~ Double over the Next Five Years, and if Positive Decisions are then made, will Need to Rise by a Further ~ 50%, to ~ 1980 Level



# 米国の計画のまとめ

方式の最適化( ~2019)

燃焼プラズマ研究(NIF、ITER or FIRE) 2009 ~

材料試験(IFMIF) 2015 ~

機器試験(MFEのCTFまたはIFEのETF) 2020 ~

原型炉 2035 ~

と進む計画である。\$24B(2.9兆円くらい)かかる。

MFEの場合で見れば、機器試験(CTF)の存在と  
FIREのパスを残している点を除けば日、欧と基本  
的には同じといえる。

# 欧洲の核融合早期実現計画 (Fast Track)

経緯： E F D A (European Fusion Development Association) が2000年に核融合開発のロードマップをまとめたのが出発点(下図)。

1) ITER建設決定から35年後にDEMO炉で発電実証

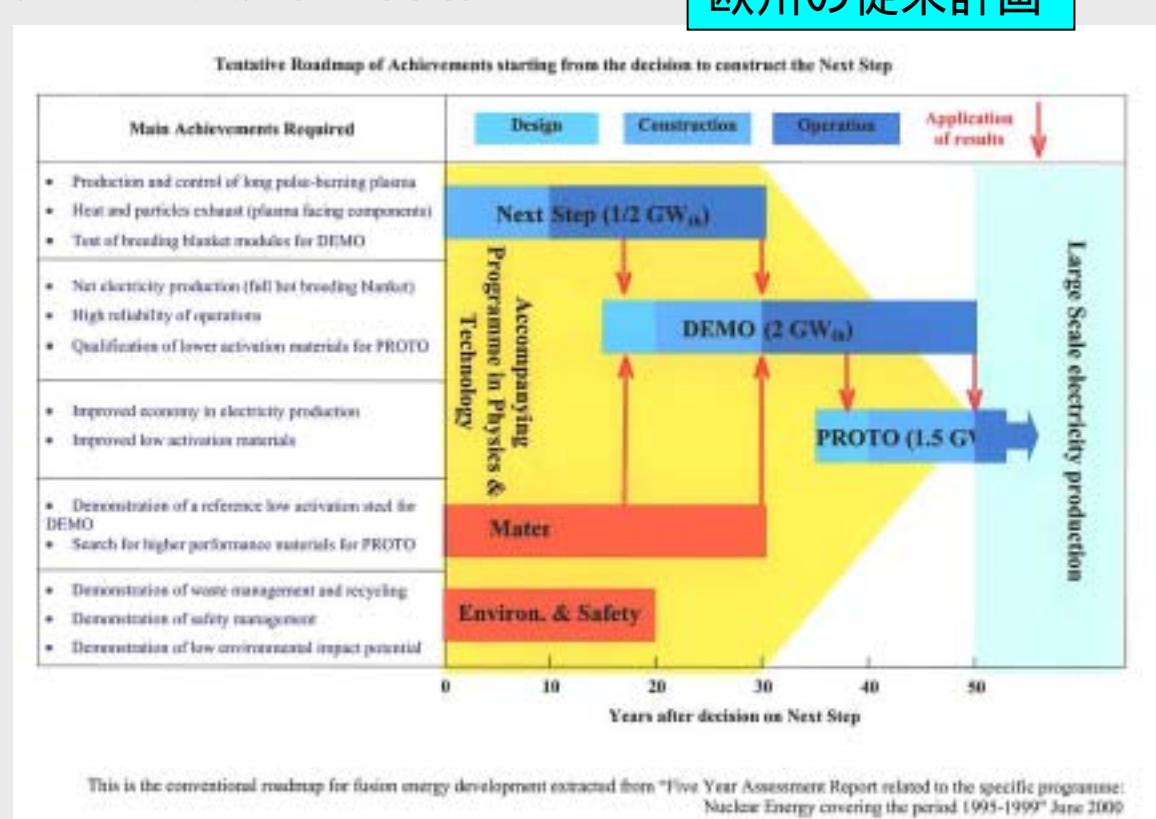
2) その後、実証炉PROTOを建造して実用化を目指し

3) 実用炉段階は50年後

これに対して、欧洲科学  
研究大臣理事会から、  
20-30年後にエネル  
ギーを生成できることを  
示す計画が可能か否か  
の検討指示がでた。

その回答をまとめた  
のが2001年末にてた  
King's Report

欧洲の従来計画



# King's report の要旨

Expert group chaired by Prof.  
David King. (英、伊、独、スペイン、  
仏、ベルギー、スウェーデン)

ITER: 実験炉といえども、実用炉に近い性能を持っている

大きくない外挿で動力炉まで予測可能。熱出力の取り出しやトリチウム増殖を行うプランケットモジュールテストも可能。材料問題を除き、大規模発電実証炉建設に必要なデータはそろう。

材料: 発電実証炉のための候補はある。

その性能確認、改良とライセンスのための照射試験が必要

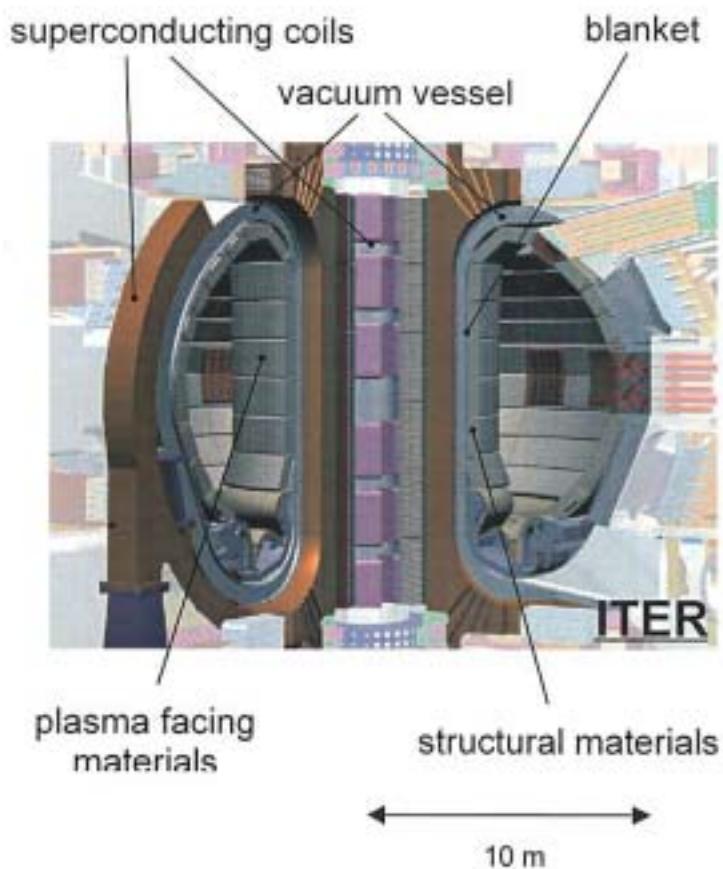
## FAST TRACK

DEMO炉とPROTO炉は統合し実用炉まで1機の建設とすることが可能

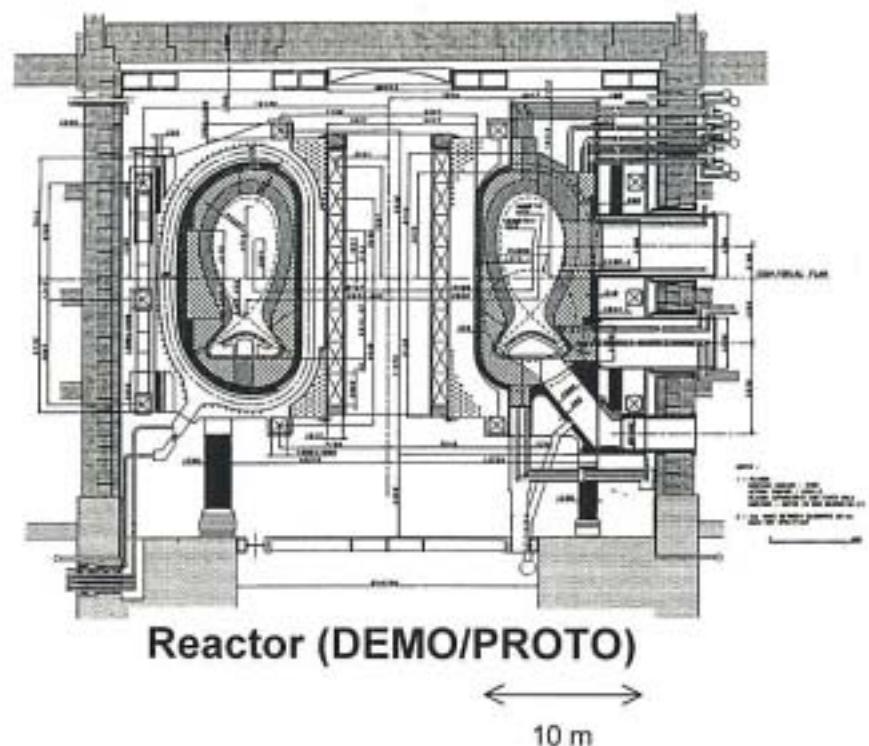
20-25年でDEMO/PROTO機の建設のためのすべてを整えることは可能

このDEMO/PROTO機をベースに、2040年以後に系統投入・大規模発電

DEMO/PROTO炉の1次案はITERを大きく上回る大型の装置になっている。



主半径 = 6.2m

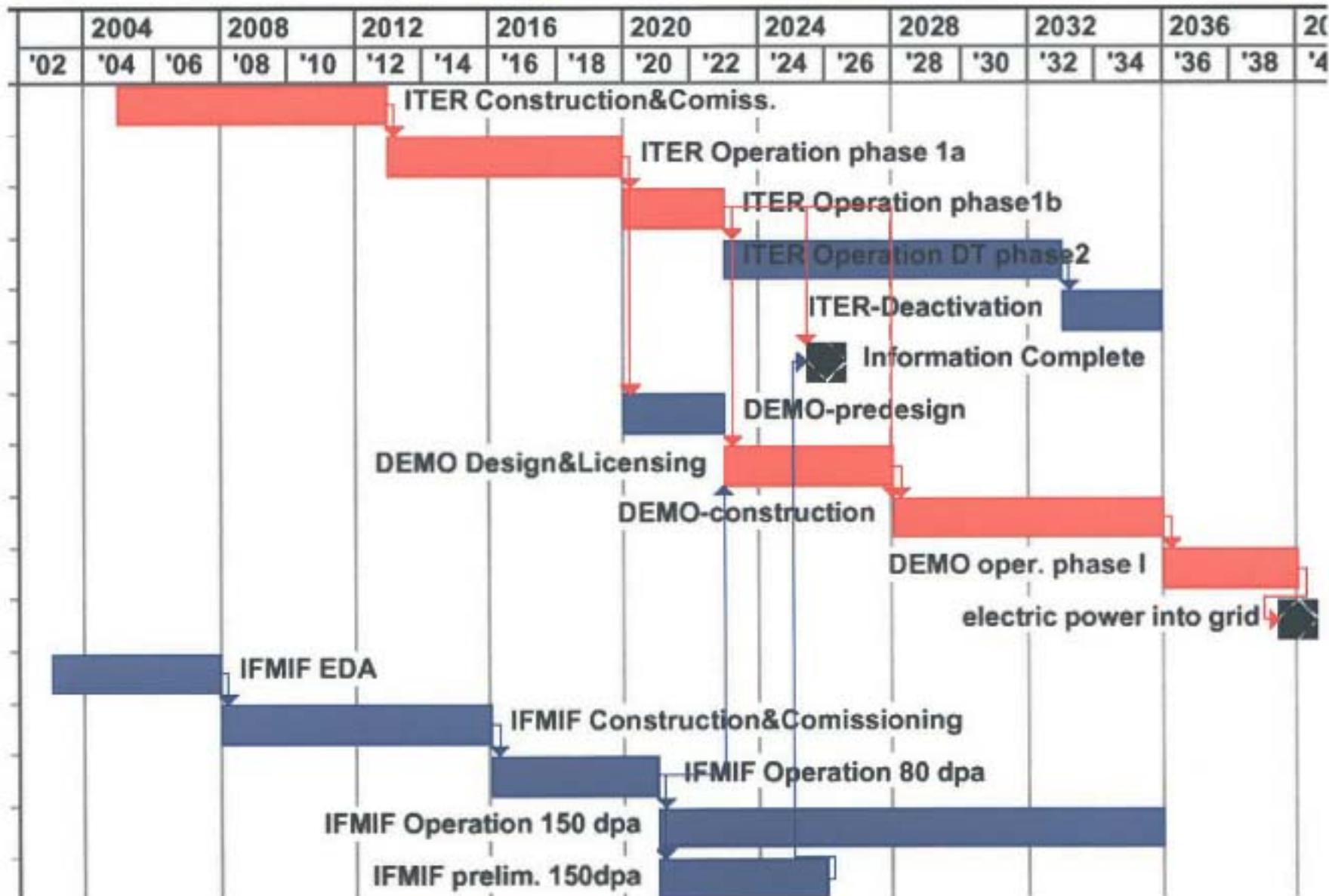


主半径 ~ 9 m

# Power Plant Conceptual Design Studies: the spectrum of reactor designs

	R=8.7m PPCD -B	R=7.5m PPCD - C	R=6.1m PPCD - D	R=5.2m ARIES-AT
fBS	0,36	0,69	0,76	0,92
$\beta N$	3,3	4,0	4,5	5,4
Q	15	30	35	51
plant factor	75-80%	75-80%	75-80%	76/85%
magnets	Nb3Sn	Nb3Sn	Nb3Sn	Nb3Sn/HTS
structural materials	Eurofer	Eurofer+SiCSiC inserts; Eurofer ODS for first wall	SiC/SiC	SiC/SiC
blanket coolant	He	He+PbLi	PbLi	PbLi
breeding blanket	HCPB	PbLi	PbLi	PbLi
divertor coolant	He	He	He or PbLi	PbLi
design divertor heat load	10	10	5	5
thermal power cycle efficiency	40,5%	~43%	~59%	59%
<neutron wall load>[MW/m <sup>2</sup> ]	1,8	2,2	2,4	3,3

# roadmap to fusion power



# Fast Track実現へのキーは

ITERはできる限り早く建設されるべき。EUはITERの関連R&Dとプラズマ物理研究に集中すべきである。**2014年**からITERを運転する。

ITERと並行して材料試験装置(*IFMIF: International Fusion Material Irradiation Facility*)の建造を推進するべき。設計は**2006年**までに終了して建設開始。**2016年**より運用。**2021年**までにはライセンシングに必要な材料試験(80dpa)を終了する。**2024年**に次期炉設計開始。

現存装置、特にJETはITERのために多くの役割を果たし得るので、すぐには止めるべきでない。ITER実現後は段階的にJETのプログラムを終了する。

ITERとIFMIFを並行して推進するため、**追加予算が2011年までは必要**。DEMOとPROTOを統合できることが明らかになれば、長期的には大幅な予算削減となる。

国際協力を推進する必要がある

核融合研究におけるEUの立場を国際的に明確にするべきである

# 欧洲のFast Track計画のまとめ

早期発電実証炉はトカマク方式に絞る

ITERを非常に重視

材料研究を加速 (IFMIF)

原型炉(DEMO)と実証炉(PROTO)を一基に統合する

やや大型のトカマクを建設し、とにかくまず電力の発生を示す

日本の考え方とほとんど同じ。ただし、日本は、プラズマ・材料・炉工学の今後の進展具合に応じて、比較的小型な発電実証炉から、ITER程度の技術でも建造可能な大型の発電実証炉までの可能性を広く調べている。欧洲でも同様の解析は進んでいる模様。最終的には小型化しないと経済性を確保できない。

参考：日本の核融合開発線戦略分科会の報告書に示された計画は、実証炉＝初代実用炉と考えており、原型炉が欧州のDEMO/PROTOに匹敵していると見ることができ。さらに数年の前倒しは検討中。

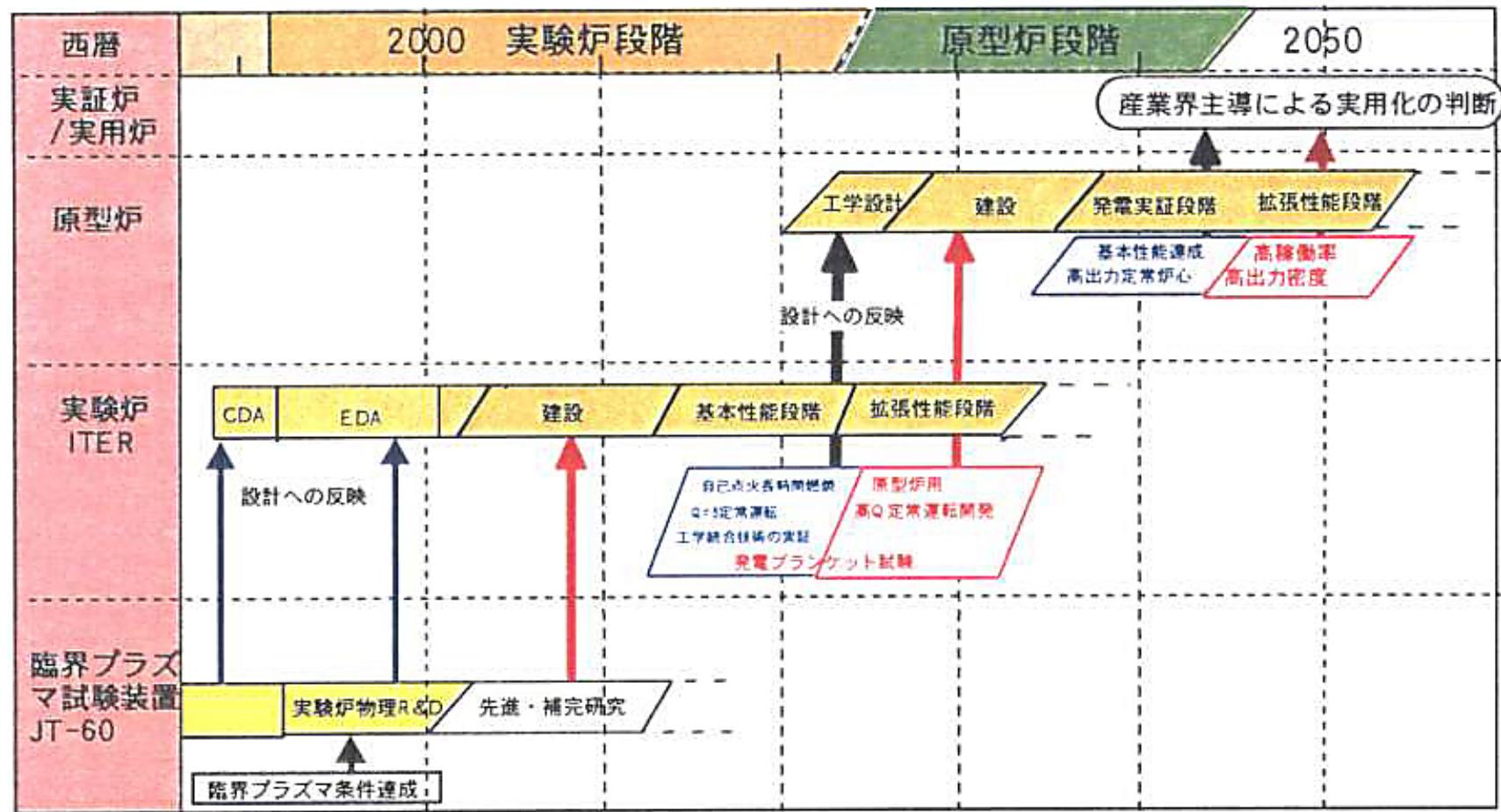
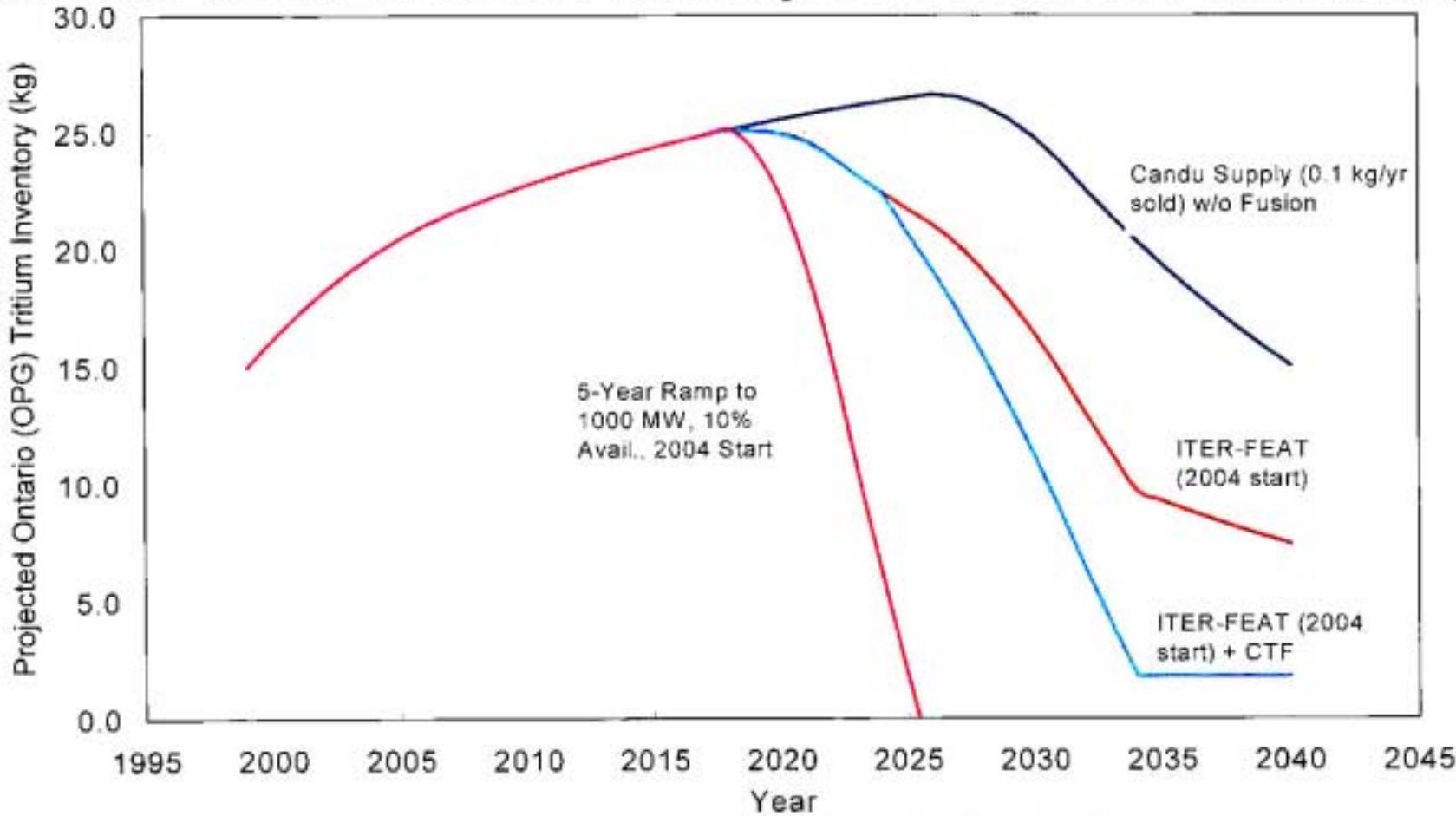


図 2.1.2-2 トカマク型核融合炉開発計画例

## World Tritium Supply would be Exhausted by 2025 if ITER were to run at 1000 MW fusion power with 10% availability



- Large Power DT Fusion Devices are not practical for blanket/PFC development.
- We need 5-10 kg of tritium as "start-up" inventory for DEMO (can be provided from CTF operating with TBR > 1 at later stage of operation)
- **Blanket/PFC must be developed prior to DEMO (and we cannot wait very long for blanket/PFC development even if we want to delay DEMO).**