

核融合会議開発戦略検討分科会報告書の概要

核融合エネルギーの技術的実現性
計画の拡がりと裾野としての基礎研究
について

井上信幸

元核融合会議座長
東京大学名誉教授

平成 1 5 年 6 月 2 5 日 核融合研究開発基本問題検討会（第 1 回）

ITER計画懇談会の6つの課題

(ITERを我が国に誘致するか否かを判断するため)

- (1) エネルギーの長期に亘る需給調査
- (2) 代替エネルギーのフィージビリティスタディ
- (3) 核融合エネルギーの技術的実現性
- (4) 計画の拡がりあるいは裾野としての基礎研究
- (5) 研究の資源配分
- (6) 国際関係

核融合会議開発戦略検討分科会は(3), (4)について、
トカマク型核融合炉を基に検討

課題（３）

核融合エネルギーの技術的実現性

１．未来エネルギーシステムへの要請と核融合

システムの要件、資源、環境影響、安全性、経済性、総合評価

２．実験炉ITERから原型炉を経て実用化へ

ITER計画の目的と意義、ITERのコスト低減、発電への課題、
先進炉方式、開発戦略

３．技術課題と見通し

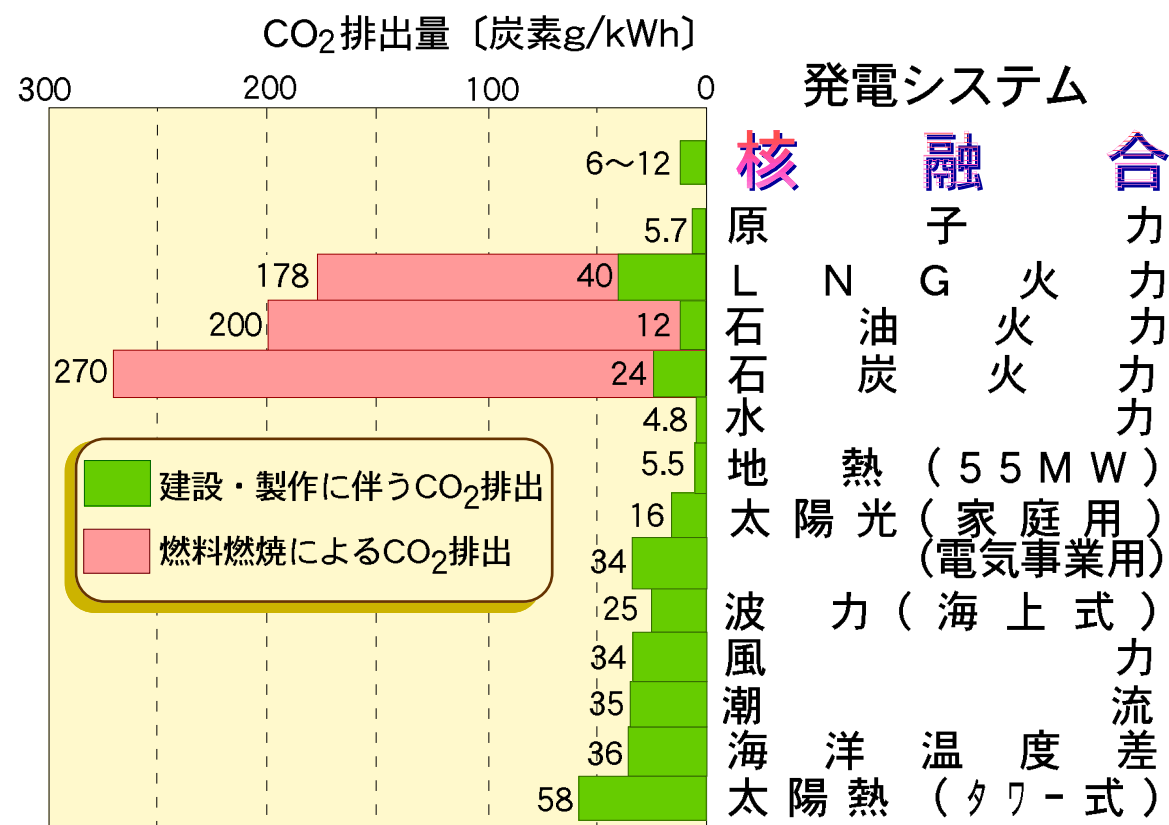
炉心プラズマ技術、工学要素技術、技術の統合化、
材料・ブランケット技術、安全性、運転・保守、製造、市場競争力

1. 未来エネルギーシステムへの要請 環境影響とエネルギー収支

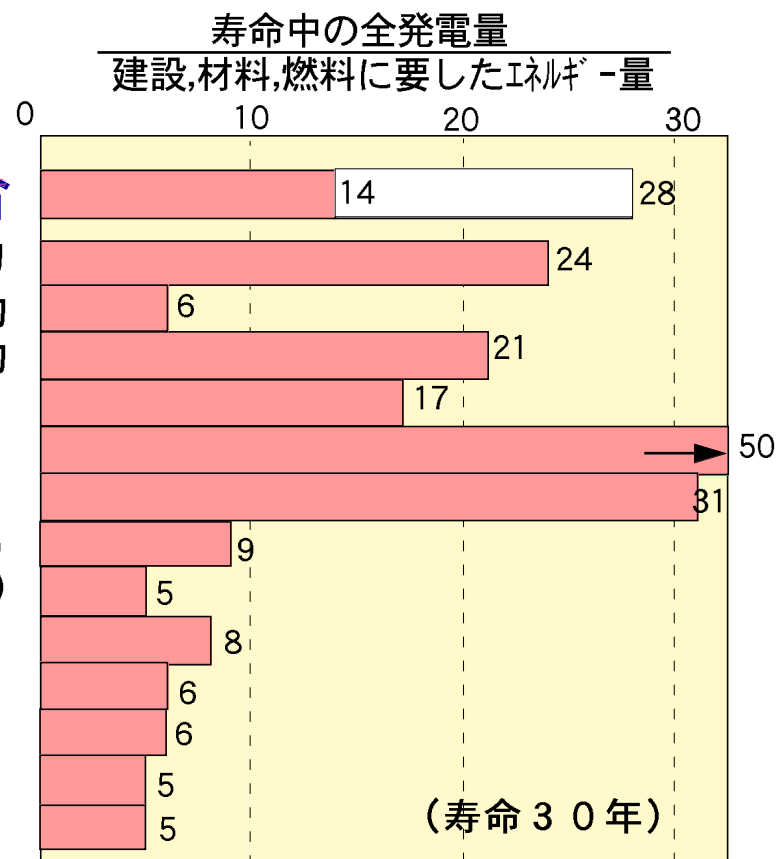
核融合エネルギーの技術的実現性

環境問題から、低いCO₂排出量で高いエネルギー収支を持つ
エネルギー源への早期転換が必要

各種発電システムのCO₂排出量の比較



発電システムのエネルギー収支比



1. 未来エネルギーシステムへの要請 核融合の安全性

核融合エネルギーの技術的実現性

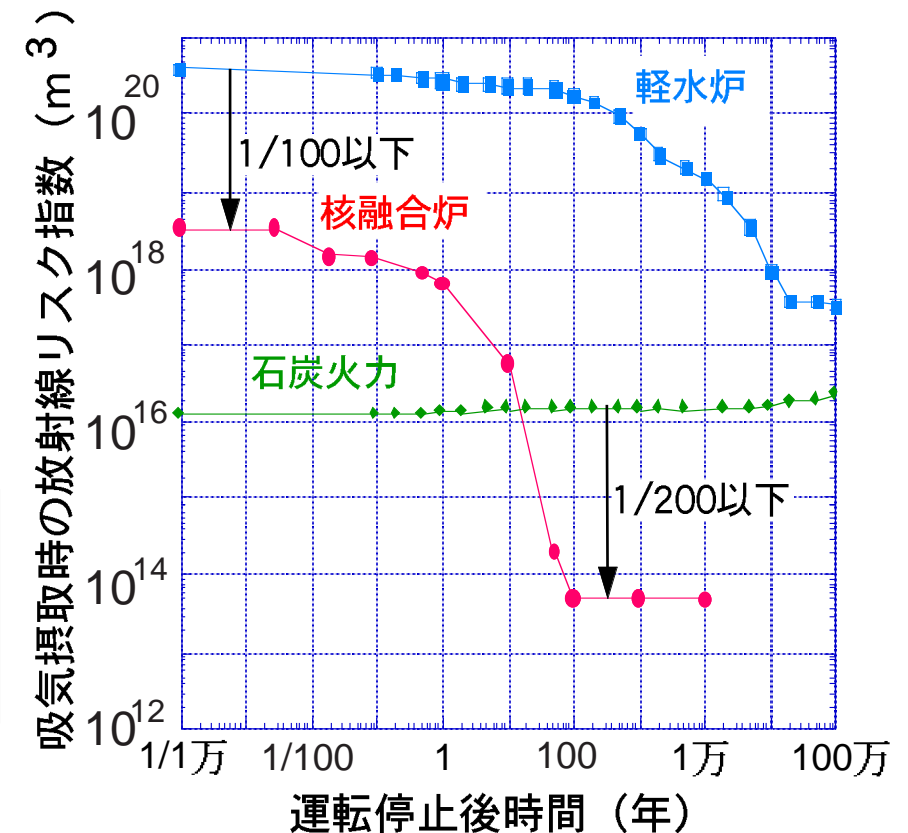
空气中許容濃度で測った放射エネルギーと比較して、核融合炉廃棄物の潜在的放射線リスク指数は、100年後には石炭火力灰の1/200以下

潜在的放射線リスク指数

- ・ 運転時で軽水炉の1/100 以下
[可動性物質では核分裂炉の1/1000 以下]
- ・ 20年後で石炭火力灰並み
- ・ 100年後で軽水炉の400万分の1
石炭火力灰の1/200 以下

潜在的放射線リスク指数

$$\frac{\text{放射エネルギー}}{\text{空气中最大許容濃度}} = \frac{\text{許容濃度まで薄めるのに必要な空気量}}{1}$$



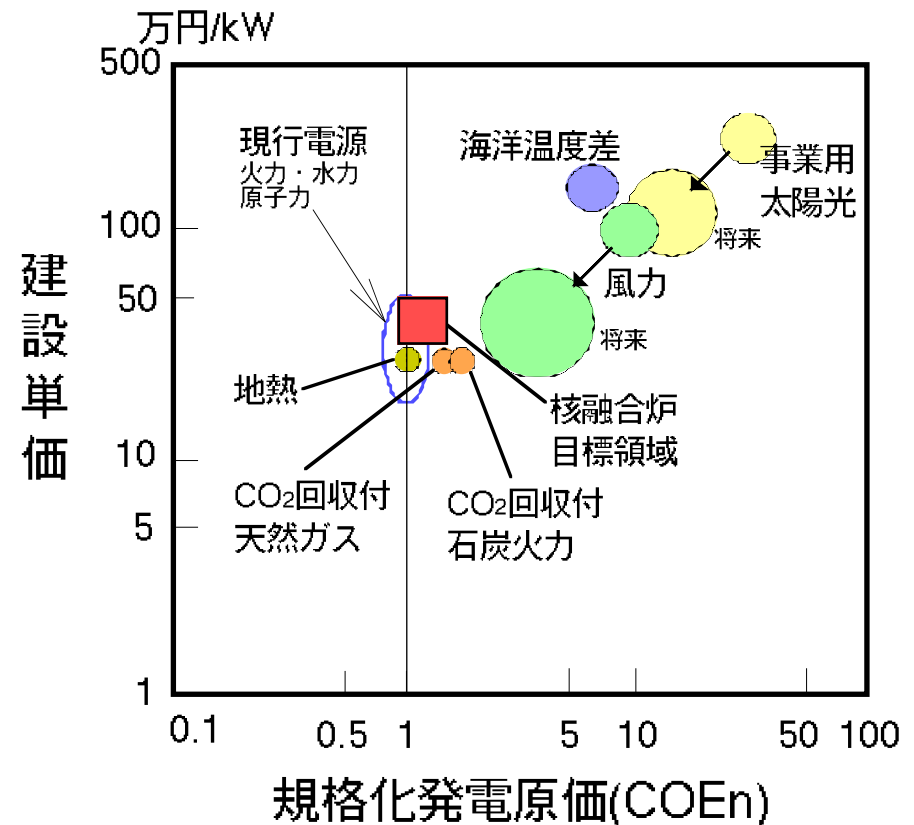
1. 未来エネルギーシステムへの要請 核融合炉に要請される経済性

核融合エネルギーの技術的実現性

核融合炉は、CO₂発生が少ない他の将来電源と競合可能な範囲のコストを達成できると予想

- ① 自然エネルギーに対しては経済性がやや有利
- ② CO₂回収火力とは、ほぼ同等コスト
- ③ 海水ウラン利用軽水炉、高速炉（高レベル処分、送電コスト無視した場合）よりはやや高い可能性

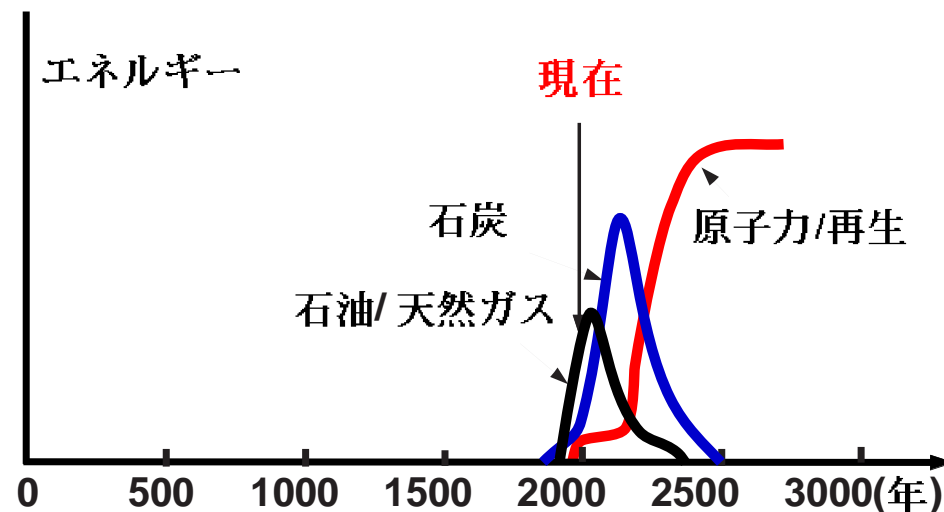
$$COEn = \frac{\text{各方式の発電原価}}{\text{石炭火力の発電原価}}$$



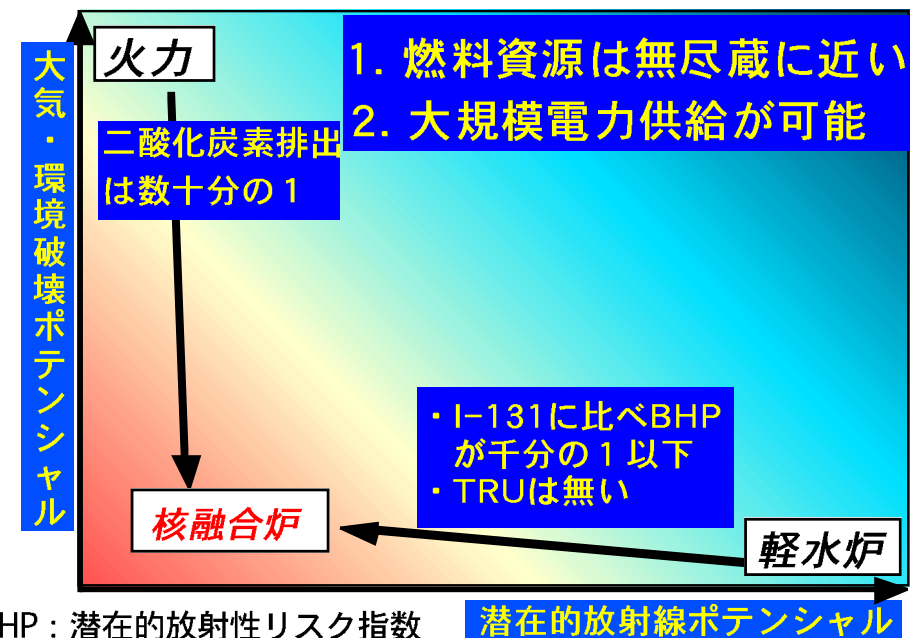
1. 未来エネルギーシステムへの要請 総合評価

核融合エネルギーは、既存の主力電源が抱える課題（地球温暖化、放射線リスク）を同時に大幅に低減でき、「安心」に大きな貢献。

・化石燃料エネルギー：
人類の長い歴史の中でいずれは枯渇する。
高いCO₂排出原単位⇒地球温暖化問題



・核分裂エネルギー：
海水ウランで燃料は実質無尽蔵
高い潜在的放射線リスク指数（PA問題）

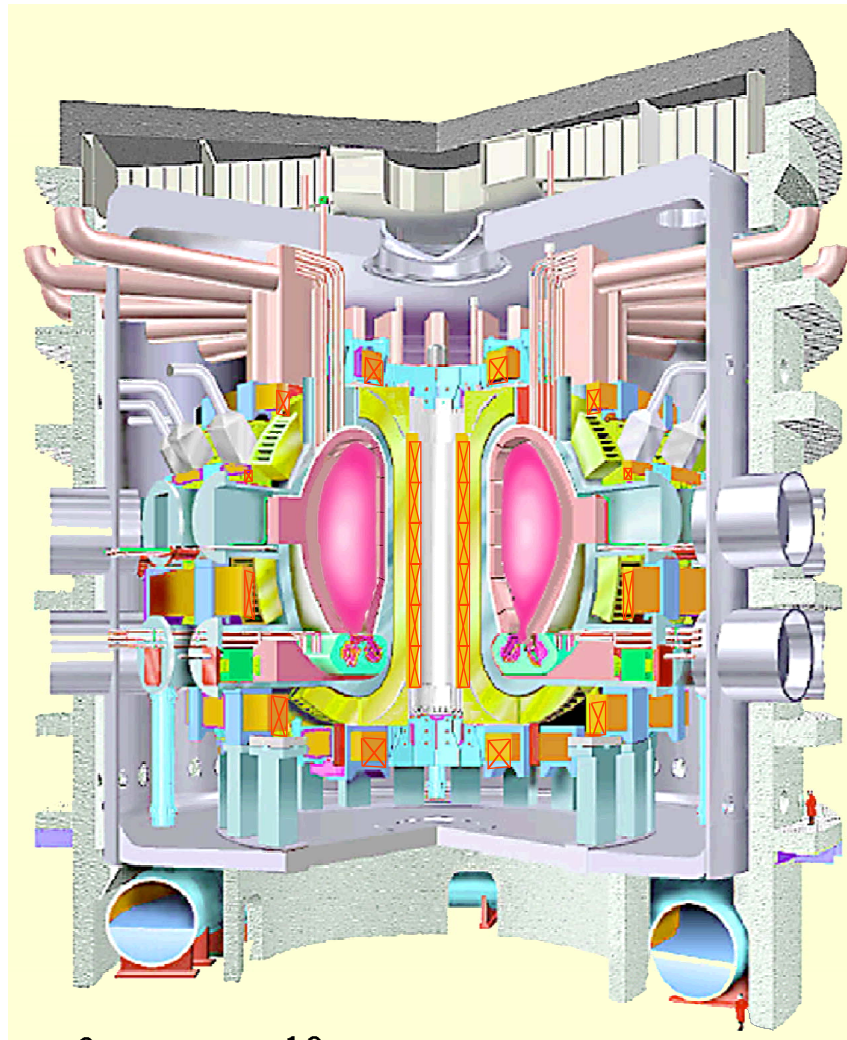


BHP：潜在的放射性リスク指数

TRU：超ウラン元素

2. ITERから原型炉を通して実用化へ ITER計画の目的と意義

核融合エネルギーの技術的実現性



単位：m 0 10m 20m 30m

目的

核融合炉の科学的・工学的実証

- ・ 重水素とトリチウムを用い制御された点火と長時間燃焼を実現。定常運転が最終目標。
- ・ 核融合炉工学技術の総合試験

意義

核融合エネルギー実現の見通しを得る

- ・ 核燃焼プラズマの閉じ込めと定常化の研究
- ・ 総合システムの信頼性及び保守技術の実証
- ・ 環境・安全性の実証

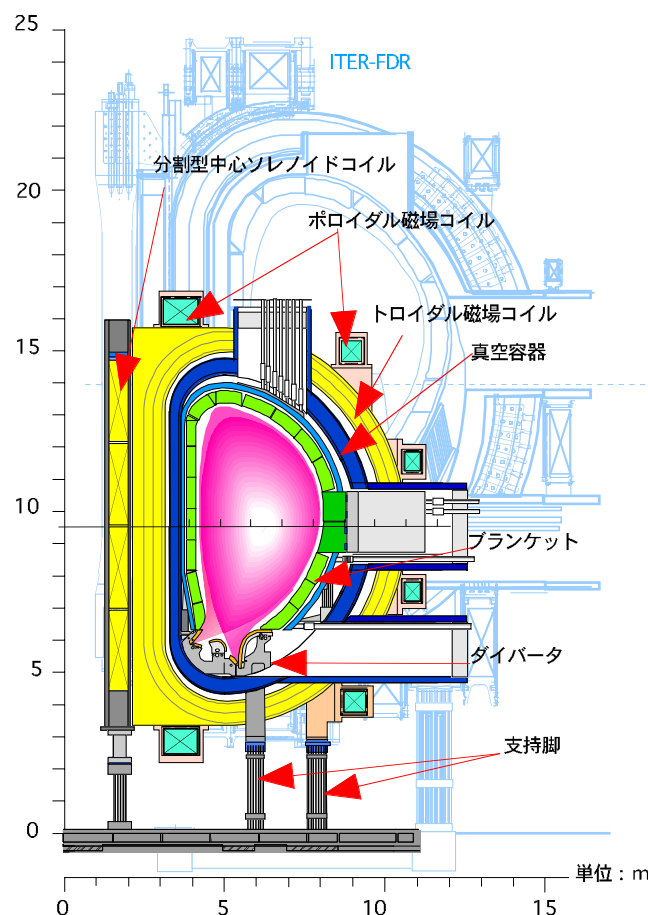
大規模な国際共同事業

2. ITERから原型炉を通して実用化へ ITERのコスト低減

核融合エネルギーの技術的実現性

「計画の費用を最小化することも最重要な条件である。」という懇談会の指摘
⇒ ITER-FDRに比べてコストが半額程度となるような検討を実施。

自己加熱（アルファ粒子加熱）割合が主要となる $Q=10$ 以上の燃焼プラズマ制御による定常運転核融合炉を目指した設計へと変更。

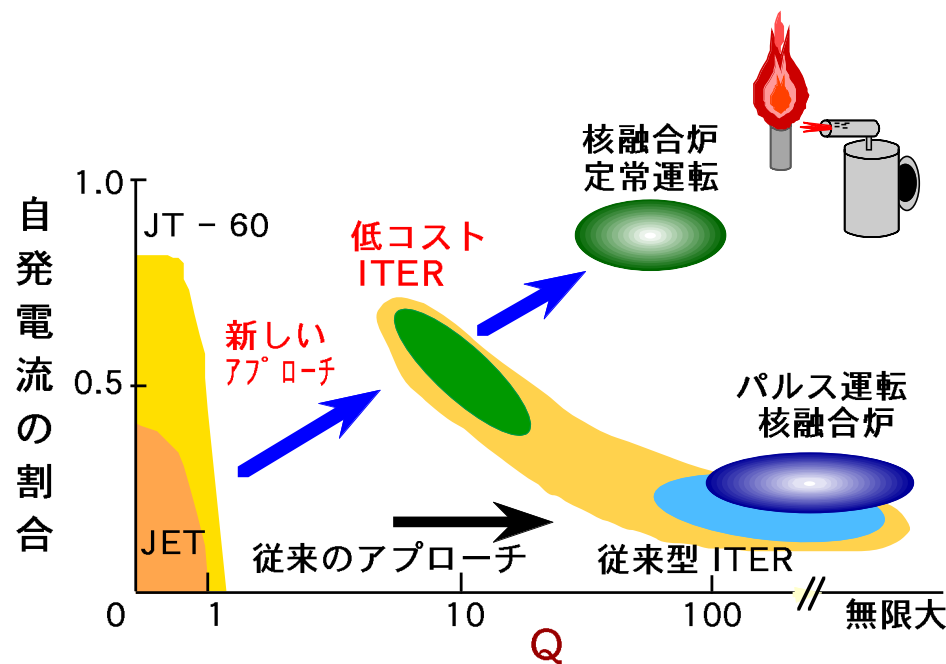


| 主要パラメータ | ITER- FDR | ITER |
|--------------------------------|-----------|---------|
| 主半径(m) | 8.14 | 6.2 |
| プラズマ電流(MA) | 21 | ~15 |
| トロイダル磁場強度(T) | 5.7 | 5.3 |
| 核融合出力(MW) | 1500 | 500~700 |
| 燃焼時間(秒) | 1000 | ~400 |
| エネルギー増倍率 | ∞ | 10-(50) |
| 中性子壁負荷(MW/m ²) | 1.0 | ~0.6 |
| 中性子フル-インス(MWa/m ²) | 1.0 | > 0.3 |

2. ITERから核融合エネルギー実現へ 自己加熱としての高Q核燃焼

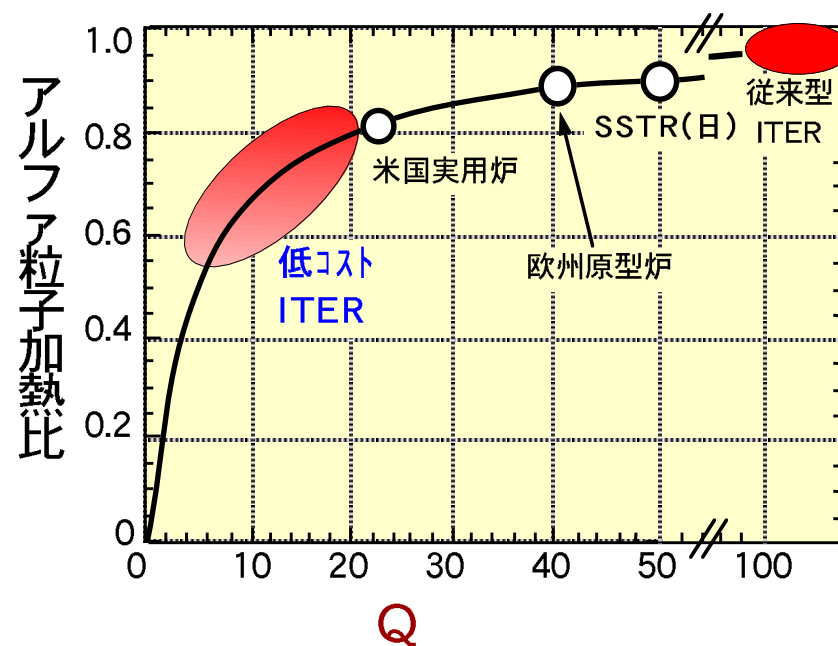
核融合エネルギーの技術的実現性

- ・ エネルギー増倍率 $Q=10$ 以上ではアルファ加熱による自己加熱が主要。
この自己加熱領域のプラズマ理解が、核融合実用化に不可欠。
- ・ トカマク型定常運転核融合炉は、 Q 値は20～50程度



$$\text{エネルギー増倍率}(Q) = \frac{\text{核融合出力}}{\text{外部加熱入力}}$$

$$\text{アルファ粒子加熱比} = \frac{\alpha \text{ 粒子による加熱パワー}}{\text{プラズマ加熱パワー}}$$



2. ITERから核融合エネルギーの実現へ ITERから発電実証原型炉へ

核融合エネルギーの技術的実現性

原型炉を見通して開発すべき技術

ITERでは、原型炉へワンステップで移行するために、ITERと並行して進められる研究開発の成果を可能な限り取り入れ、原型炉に必要な技術を開発・実証する。

(i)定常運転技術の確立

トカマク方式の定常運転技術については、既存のトカマク装置を活用して鋭意研究を進め、成果をITERの運転に適用する。

(ii)発電用ブランケットの開発

遮蔽、燃料の自己増殖と熱エネルギーの回収という三つの機能を果たす発電用ブランケットの開発を行うとともにITERではモジュール規模での試験を行う。

(iii)中性子照射試験

原型炉以降で使用する材料については、有力な候補とされる材料の特性データベースを中性子照射試験等により確認する。

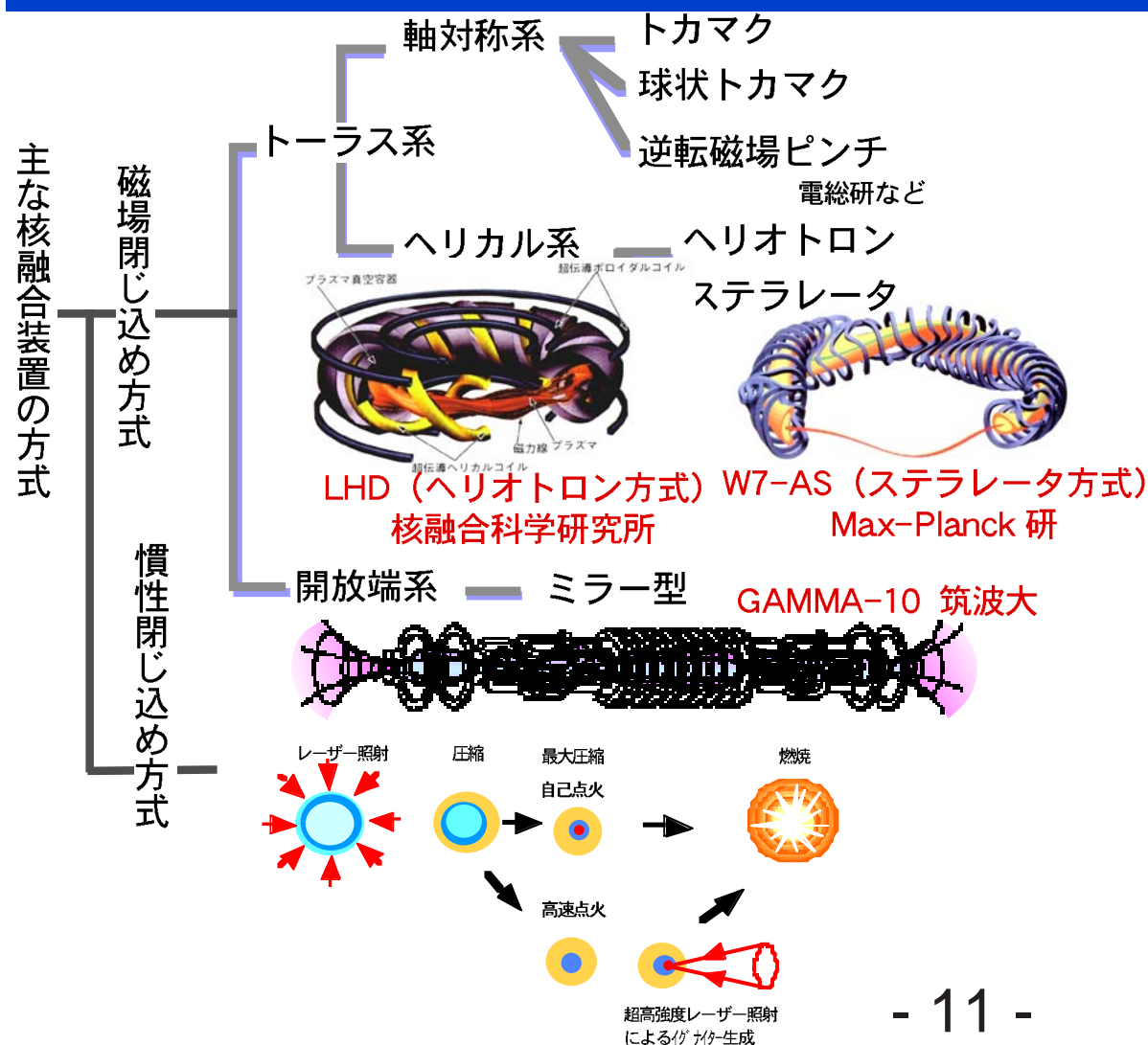
(iv)先進炉方式の研究

トカマク方式を上回る可能性を追求する。

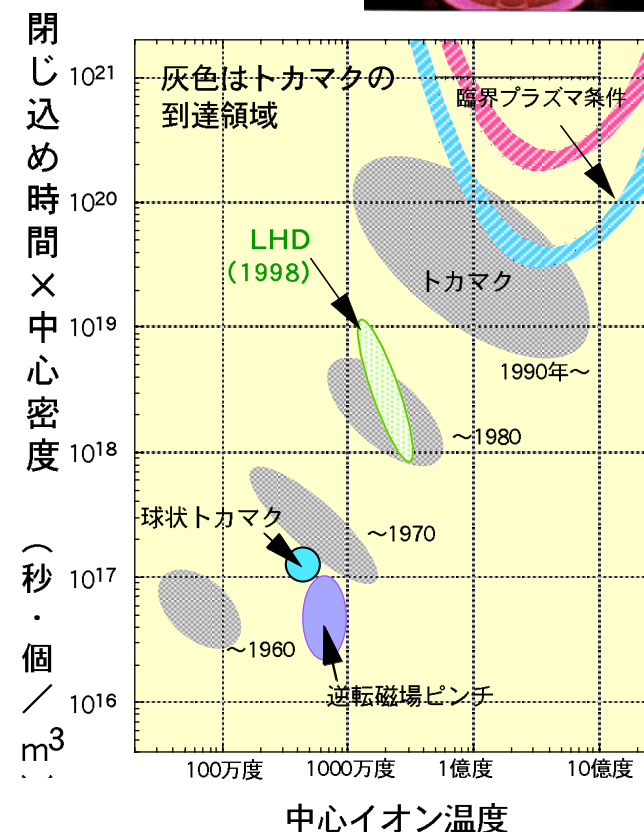
2. ITERから原型炉を通して実用化へ 先進炉方式の研究

核融合エネルギーの技術的実現性

大学等においては、核融合エネルギーの研究開発としてトカマク型以外の先進方式の研究を行うと同時に、学術研究として高温プラズマ挙動の制御に必要な知識基盤の体系化と強化を目指して、幅広く研究開発に取り組んでいる。



START (球状トカマク)
Culham 研

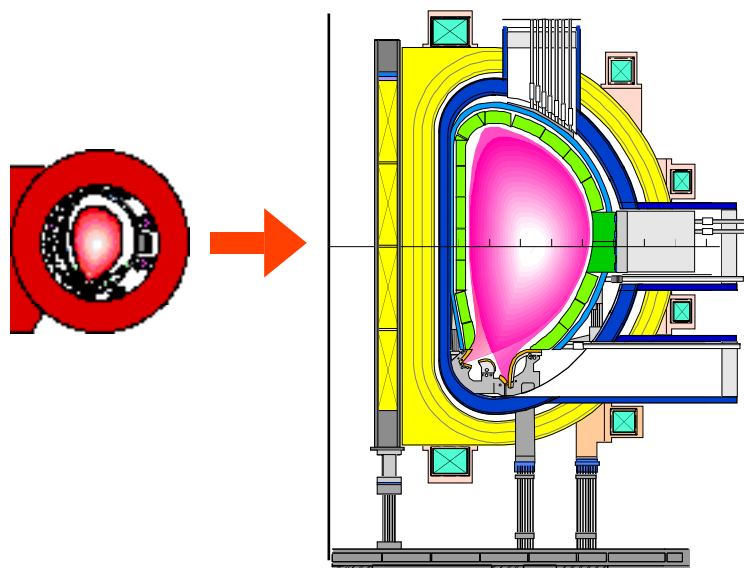
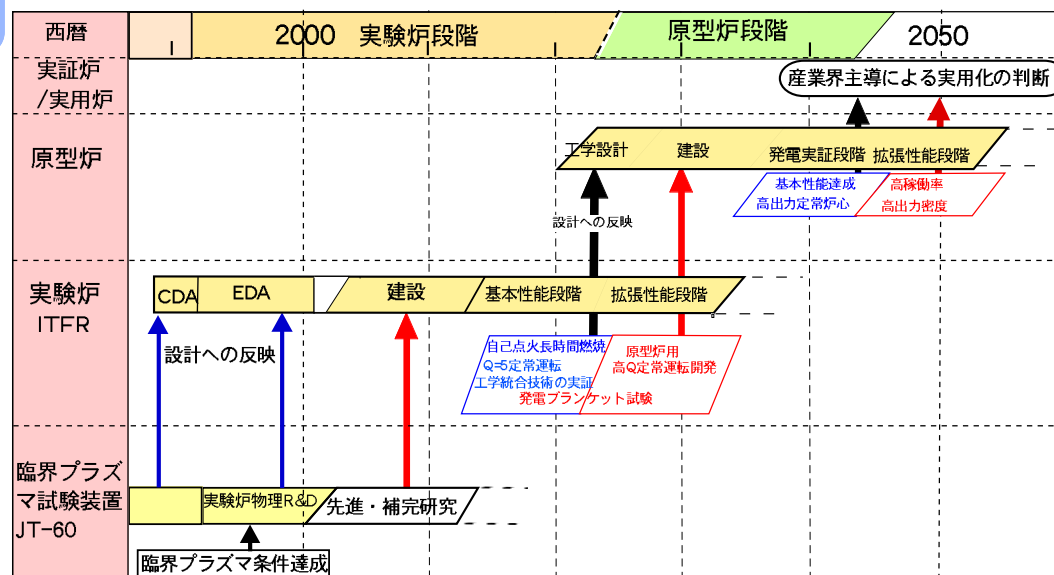


2. ITERから核融合エネルギーの実現へ 核融合エネルギーに至る道筋

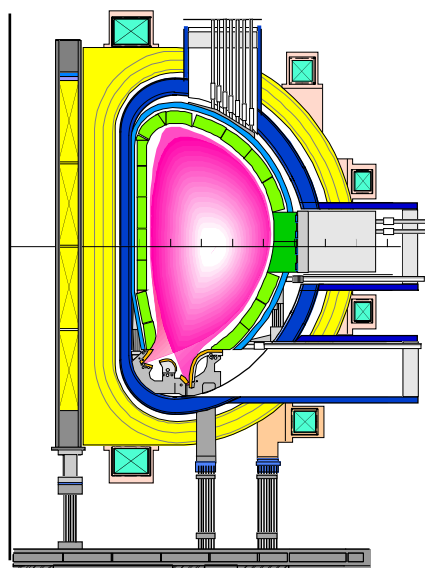
計画が順調に進展した場合、核融合
発電の技術的実証は2040年頃に可能

本格的な核融合発電は原型炉段階ではじめて実現する。ITERによる研究開発とその後の原型炉の建設が順調に進展した場合、数十万～百万kWの発電能力をもつ核融合原型炉による**核融合発電の技術的実証が2040年頃に可能**になると推定される。

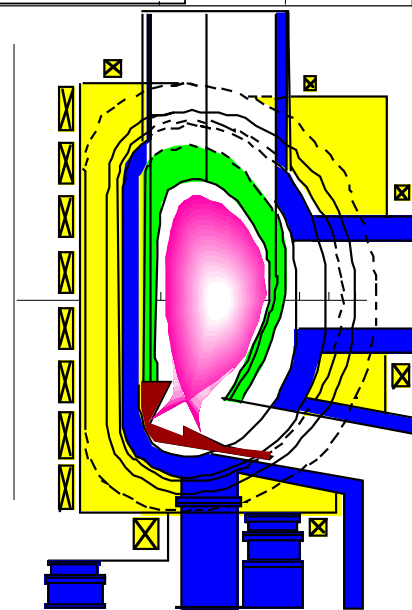
核融合エネルギーの技術的実現性



JT-60等価Q~1



実験炉ITER Q=10-20以上



原型炉 例(SSTR) Q=30-50以上

実用化
経済性

3. 技術的課題と見通し

核融合エネルギーの技術的実現性

技術の統合化が必要

超伝導コイル

- ・性能はCSモデルコイルで実証済み
- ・製作の基盤技術は確立

炉心プラズマ技術

- ・核燃焼プラズマ
- ・定常化

(十分な確度で達成できる見通し)

材料・ブランケット

- ・有力な候補材料あり
- ・ITERにおけるモジュール試験で判断

安全性

- ・高レベル放射性廃棄物なし
- ・固有の安全性という特長を活かした安全技術の実証段階

製造業から見た技術課題

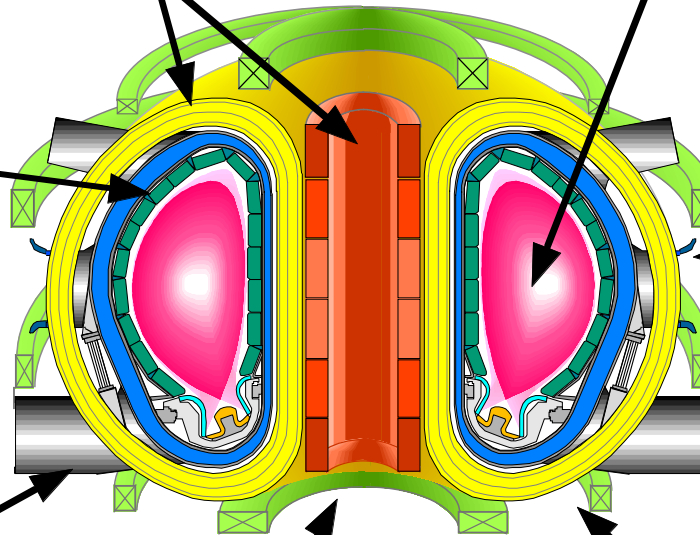
- ・産業界には十分な技術ポテンシャルがある

市場競争力

- ・技術の高度化によって市場競争力の獲得は可能

運転・保守

- ・軽水炉並の稼働率は可能
- ・出力調整が容易



課題（４）

計画の拡がりあるいは裾野としての基礎研究

1.新しい学問研究の先導

2. 核融合炉技術の波及効果

3. 人材の育成と連携体制

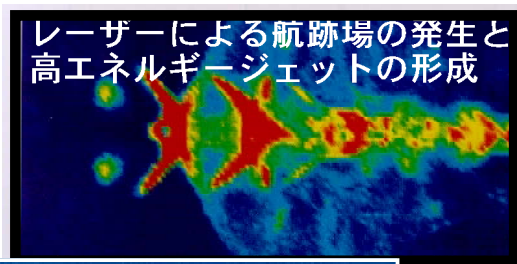
核融合ネットワークの構成

4. 国際協力について

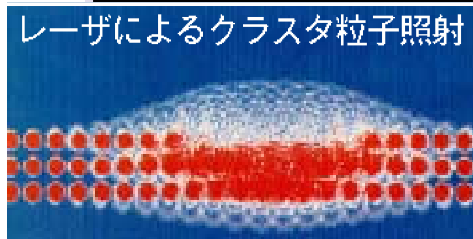
1.新しい学問研究の先導

計画の拡がりあるいは裾野としての基礎研究

高パワーレーザと物質
との相互作用現象



レーザによるクラスタ粒子照射

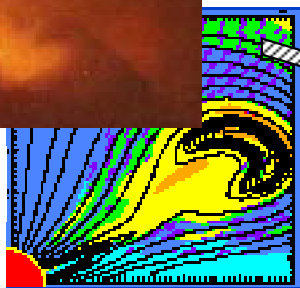


磁力線再結合現象



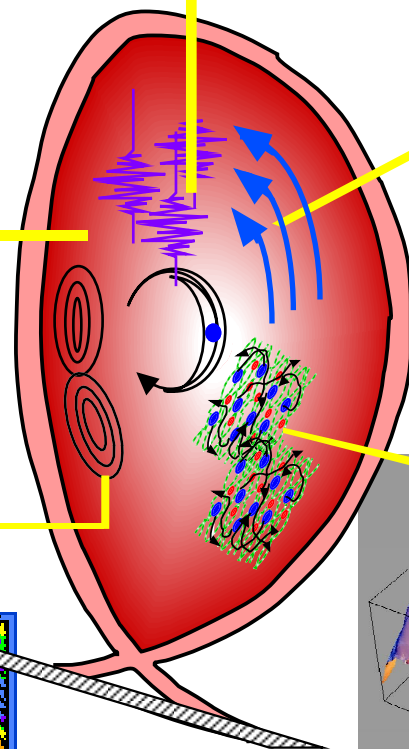
太陽コロナ

惑星形成時における
ジェット生成

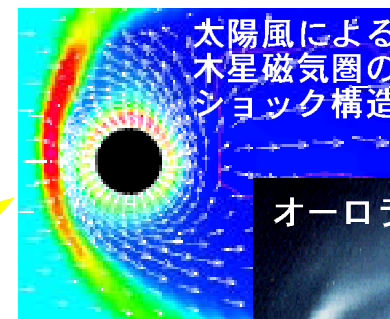


原始星

核燃焼プラズマの
物理



プラズマ流と惑星磁場の相互作用



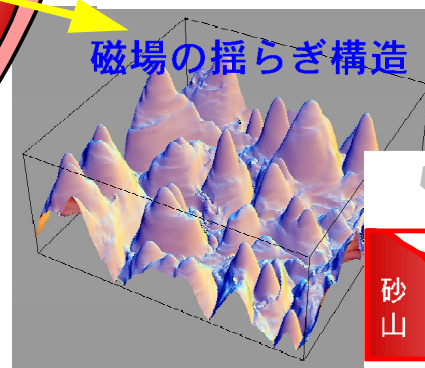
太陽風による
木星磁気圏の
ショック構造

オーロラ形成

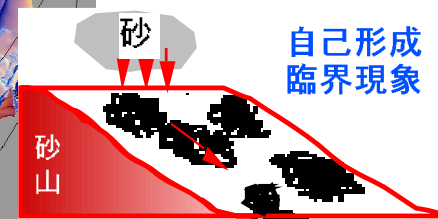


乱流輸送、カオス、自己組織化現象

磁場の揺らぎ構造



自己形成
臨界現象



2次元MHD乱流の
自己形成とシート電流

3. 人材育成と連携体制

計画の拡がりあるいは裾野としての基礎研究

- ・ 長期にわたる核融合研究の着実な推進とそれを担う人材の育成が重要
- ・ 産業界、大学及び研究機関の協力関係の一層強化が必要

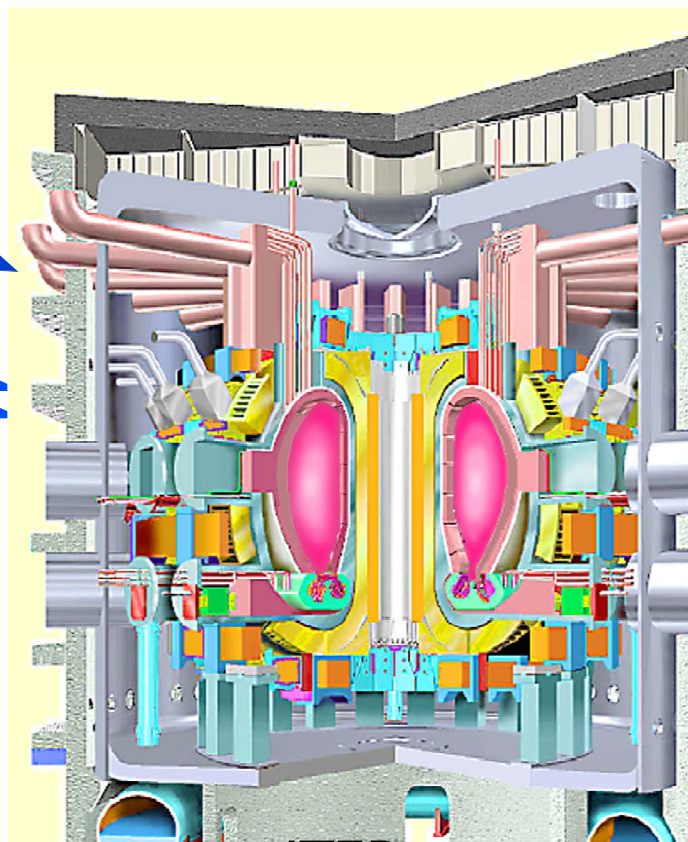
大学



先進炉研究

人材

連携



ITER

核融合

産業界

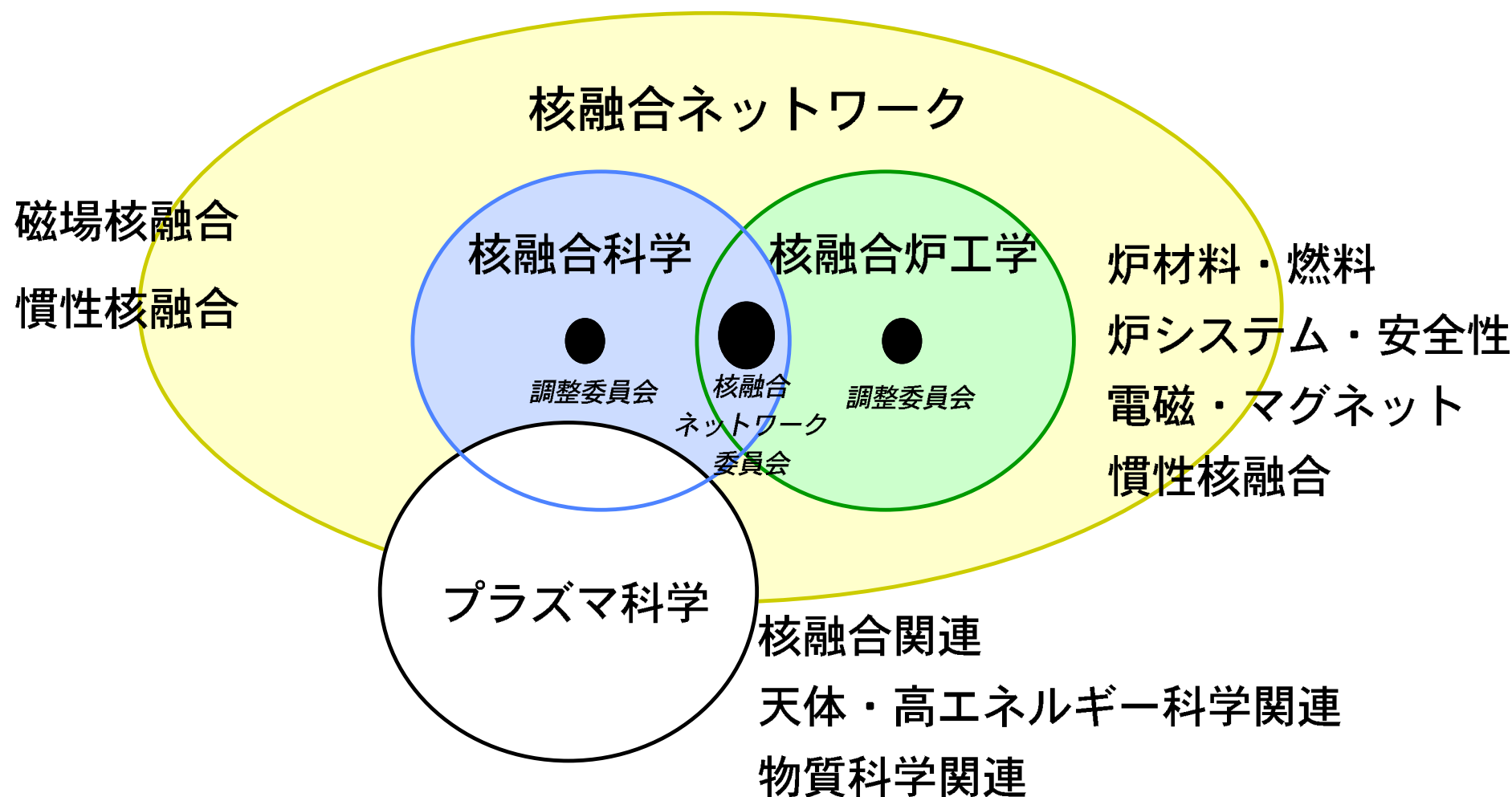


高い製作技術
品質管理

技術の
フィードバック

3. 人材育成と連携体制 核融合ネットワークの構成

計画の拡がりあるいは裾野としての基礎研究



4. 国際協力としての意義

計画の拡がりあるいは裾野としての基礎研究

- ・ 核融合開発は、冷戦時代においても政治体制を超えて国際協力を推進してきた。
- ・ 21世紀は、IT技術の進歩に裏付けられ、国家間の距離がさらに縮まり、「対立」の世紀から「協同」の世紀への転換がなされる。
- ・ 核融合エネルギーの開発という国益に関わる研究開発を国際協力で実施することには、資金的な負担の大きさの軽減だけでなく、

- ①「協同」の世紀への転換のシンボルの事業を我が国が主導的に実施する政治的意義、
- ②人類共通の財産となるITERによる核燃焼プラズマの科学的知見の開拓に主体的に貢献する学術的意義、
- ③核融合が先導して生み出す先端科学技術開発の推進という技術的意義、
- ④協同作業を通じた人的交流による社会・文化面での意義、

を見い出すことができる。

まとめ （その１）

○核融合エネルギーの技術的実現性

- ・ 実験炉ITERで核融合燃焼プラズマの制御技術の確立と、統合された核融合装置としての技術的成立性を実証することによって、核融合発電の技術的実現を確約できるようになる。
- ・ ITERの技術を高度化し、研究開発努力を着実に積み重ねて行くことにより、核融合エネルギーの実用化は技術的に可能と判断している。

まとめ （その２）

○計画の拡がりと裾野としての基礎研究

- ・ 核融合開発はプラズマ理工学や核融合炉工学を通して、極めて広い学術分野と関わり、各々の領域の拡張や深化に貢献。
- ・ 我が国には核融合開発を強力に推進する学界、産業界の堅固な組織基盤があり、超長期にわたる核融合開発を支える優秀な人材を養成。
現状が維持されればITERに必要な人材は充足。
- ・ 核融合研究の基盤を充実発展させるためには、大学等の核融合研究と産業界の核融合技術開発の絶え間なき活性化が重要である。
- ・ 産業界、大学及び研究機関間の協力関係の一層の強化が重要である。