

これまでに提起された主な論点について

1. 開発戦略について

論点	指摘内容	これまでに提示された関連する議論
1) 現実的なロードマップを提示すべき	<ul style="list-style-type: none"> 地球温暖化対策としての早期導入の実現可能性について説得力のあるロードマップが必要。 明確でより現実的なロードマップ（decision point 含む）を提示することが必要。 主要な設定目標とその達成時期を明記すること。 エネルギー取出しまでのシナリオ、実用化までのシナリオが必要。 クリティカルな課題を明確にすること。 原理・技術を追求するベクトルと実用技術としての現実的な拡大利用の道程を含めること。 2030 年までに約束できること、2050 年までに約束できることは何か。 	<ul style="list-style-type: none"> 開発戦略検討分科会報告書（平成 12 年 5 月）の図 2.1.2-2 の形でロードマップが示されている。 さらに、主要な設定目標と達成時期を明記し、かつ一層の加速を実現するための報告（核融合実用化加速案の検討資料）が、第 5 回核融合専門部会（平成 14 年 12 月）に報告されている。その主要な設定目標と達成時期は以下のとおり。 ITER と並行してトカマク国内重点化装置計画を実施し、それらの結果を踏まえ、2015 年頃までに発電実証プラントの設計に着手する。 国際核融合材料照射施設 (IFMIF) による材料試験データを 2020 年頃までに取得する。 ITER での燃焼研究の成果を 2020 年頃までに取得し、早期に発電プラント建設に着手する。 クリティカルな課題は、燃焼プラズマの制御、統合技術の確立、定常高出力密度化、及び、IFMIF を中心とした材料・ブランケットの開発と炉工学の高度化であり、前 2 者は ITER で、3 番目はトカマク国内重点化装置で、最後の課題は炉工学開発によって解決する計画である。
2) 実用化の時期がまた延びるのではないか	<ul style="list-style-type: none"> この何十年でできるとか 50 年で実用化するという話だったのが延び延びになっているような印象を受ける。 見込みだけで議論されると、また延びるのかなと考えざるをえない。 	<ul style="list-style-type: none"> 実験炉への建設着手が遅れてしまったことが遅延の主要因。 科学的に進歩がなかったから遅れているのではない。 一定期間に実現するには、それに見合った投資が必要。

<p>3) まずはITERに集中すべきではないか</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・JT-60など、他の研究炉の意義も認めるが、まずは、ITERに集中すべきではないか。ITERもやるけど、JT-60もヘリカルもレーザーも・・・はおかしい。 ・予算は限られているので、何を優先すべきかを考えねばならない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・限られた予算とこれまでの投資を活用することが重要で、定常高ベータ化計画（JT-60の改造）によりトカマク炉の開発ステップを1段階減らし、総経費を低減することを計画している。 ・トカマクの改良研究はITERにも有効。 ・大学等の研究は、学術研究、人材育成としても重要。 ・ITERのためにも計画の広がりも重要。
<p>4) 核融合の研究は、本気で電気を起こす気があるのか</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・核融合の研究は、本気で電気を起こす気があるのか、あるいは単に基礎物理をいつまでも研究していいのか、わからない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・開発に長期を要する核融合は、エネルギー開発としての側面と学術研究としての側面の両面をもつことが必要。 ・工学技術としての開発を進めるとともに、発電／水素製造炉の設計、将来の経済性、市場参入も含めて分析を進めており、電気を起こすことを目標に研究を進めている。 ・核融合研究は、外の社会に向けて言うときには、現状は科学研究の段階であるが、核融合研究者自身はエネルギー開発を目指さねばならない。
<p>5) ブランケットの開発が不十分ではないか</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・核融合炉をエネルギーシステムとするためには、ブランケットの開発が重要。 ・エネルギーを取り出すブランケットも含めたプラントシステム全体として、バランスを持たせた研究開発が実施されねばならない。炉心プラズマ関係に比べてエネルギー取り出し技術、ブランケット等は将来の展望が不十分であり、トータルシステムとしてはまだ弱いのではないか。 ・炉心プラズマの方がうまくいったとしても、構造材料を含むブランケット技術に致命的な問題が存在するとしたら、全体のシステムとしては成立しない。 ・材料によって冷却材も異なってくる。冷却材の選択に沿った形で材料開発の計画的達成が不可欠である。 ・材料の開発が不透明な状況の中では、一定の運転期間毎に炉壁を取り替えることになる可能性があるため、遠隔保守技術の開発が不可欠となる。 ・ブランケットにおけるトリチウム増殖比に余裕がなければ、 	<ul style="list-style-type: none"> ・ブランケットの要素技術は概ね開発済みで、それらを統合する工学試験が必要。要素技術の開発から工学試験へと段階を進める時期にきている。 ・ブランケットについては、低放射化フェライト鋼を主構造材料とし、固体増殖材、Be中性子増倍材、冷却方式としては高温加圧水を基本として開発を進めている。 ・炉寿命（40-50年）の間使える第1壁構造材料の開発は想定していない。原子炉の燃料交換と同様、定期的に交換することを想定している。 ・遠隔保守技術については、ITERに向けたブランケット・モジュールの遠隔保守技術は開発済み。発電実証プラントにおいても、基本的にITER用ブランケット保守概念が適用可能と考えている。

	十分なトリチウムが確保できず、トリチウムの減衰が意外と早い ため、長期の運転停止の後、再起動できないことが起こりうる。	
6) 材料の課題が 未解決	<ul style="list-style-type: none"> 設備の信頼性の観点からは、ブランケットの構造材料が過酷な条件に晒されることなどが課題。 	<ul style="list-style-type: none"> ブランケットの構造材料については、低放射化フェライト鋼を第1候補材料としつつ、バナジウム、SiC/SiC 複合材料を先進材料として開発を進めている。 低放射化フェライト鋼の場合、耐照射性について、目標領域の数分の1の照射量まで、中性子照射で評価済み。 さらに核融合中性子を模擬した照射施設（IFMIF）により、今後、材料試験データを取得することが考えられている。
7) 安定運転の見 通しが不十分	<ul style="list-style-type: none"> 運転信頼性の観点からは、炉心プラズマの安定運転に対する見通しを実証されていないことが課題。 	<ul style="list-style-type: none"> ITER では、1000-3000 秒程度の安定運転が実証される。 トカマク国内重点化装置計画では、超長時間（8 時間程度）の安定運転の実証も視野に入っている。
8) 構造を簡素化 するための研 究開発が必要 ではないか	<ul style="list-style-type: none"> トカマクの構造は格段に複雑であり、実用化は難しいのではないかと。 開発を進めるに従って、構造が簡単になるのであれば、コストは下がる。 	<ul style="list-style-type: none"> ITER は実験炉であり、最大限の可能性を追求せねばならない。簡素化を指向するのは実験炉の次の段階。 中心ソレノイドコイルを無くせば大幅な軽量化があり得ることが明らかになった。
9) 核融合の特徴 を生かして実 用化を早める べき	<ul style="list-style-type: none"> 核分裂炉は多くの機能が炉心部に集中しているのに対し、核融合炉は機能が分散的である。 機能が分散的であることを生かした開発戦略をとるべき。 核融合炉の開発に際し、多くの炉型のステップアップは望めないのではないかと。 ITER を最大限に利用し、実用に近いところまで開発を進められないかと。 	<ul style="list-style-type: none"> ITER と並行してトカマク国内重点化装置計画を進めることにより、発電実証（原型炉）と経済性実証（実証炉）を1装置で実現することで、ステップ数を減らすことを想定している。 ITER の利用可能性については検討中。 ITER を十二分に利用していくという視点は重要であるが、一方、ITER は国際計画である点にも配慮が必要。

2. エネルギー・環境問題解決への役割について

論点	指摘内容	これまでに提示された関連する議論
1) モデル試算結果に依存するのは非常に危険	<ul style="list-style-type: none"> ・モデル計算によるエネルギー普及量などは、前提次第であるから、それに基づいて、核融合にはこれだけの意義があるとかいうのは非常に危険であり、誤解を招きかねない。 ・前提条件を明確にすることが必要である。 	
2) 核融合炉なしでも環境問題は解決できるのではないか	<ul style="list-style-type: none"> ・核融合炉はなくても、2100年のCO₂濃度は550ppmにできるのではないか。 	
3) FBR実現より前に発電を実証できなければ、開発する意義はない	<ul style="list-style-type: none"> ・電気エネルギー発生システムであることをFBR実現より前に実証できないなら開発する意義はない。 ・FBRと競争（コストの面、運転・保守の面など）できないと、電気エネルギー発生システムとしての意味はない。 ・エネルギー発生源市場に、いち早く参入すべき。それもFBR体制の実現の目処が立つよりも先に。「良いものは売れる」は間違いである。 	<ul style="list-style-type: none"> ・まずは技術的成立性を立証してエネルギー市場の俎上にあげることが必要。 ・エネルギー安全保障のほか、技術安全保障という観点も重要。
4) 経済的競合性を持たねば参入は困難	<ul style="list-style-type: none"> ・海水ウラン、核燃料サイクル・FBR、宇宙太陽光発電などが21世紀後半に参入する可能性がある。核融合は、これらの他革新的技術との経済的競合性を持たねば割り込むことができない恐れがある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・海水ウラン、核燃料サイクル・FBRについては、核拡散の問題から世界的な普及には懸念がある。 ・宇宙太陽光の発電単価よりは低く押さえられると評価している。
5) 核融合は技術習熟効果を期待しにくい	<ul style="list-style-type: none"> ・太陽光発電や風力発電は、ガスタービンと比較してコストは高いものの、技術習熟効果によって建設単価が下がることを期待できる。 ・出力重量密度が小さい核融合は小型分散技術と比較して、技術習熟効果が期待しにくい。 	

6) エネルギーシステムの導入には時間を要する	<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギーシステムにおける変化は数十年かかる、基本的に極めてゆっくりしたペースである。軽水炉でも、40年かかって、一次エネルギー供給の1割弱（発電シェアで2割弱）を占めるようになった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・市場への浸透に30～50年かかるであろうというのは認識しており、核融合炉の市場参入評価でもそのような結果を得ている。早期開発が望まれる。
7) CO ₂ 濃度安定化には遅すぎるのではないか	<ul style="list-style-type: none"> ・技術の実現から市場への浸透には50年かかるため、核融合を含む革新的技術がCO₂濃度安定化に寄与するのは困難ではないか。 	<ul style="list-style-type: none"> ・2030年に原型1号機ができ、その後大幅なコスト低減ができれば2100年までに市場浸透は可能であり、CO₂濃度安定化に寄与し得る。
8) 核融合は、発展途上国への核エネルギー貢献に適する	<ul style="list-style-type: none"> ・核融合は、核拡散の問題がないため、発展途上国への導入に適する。 ・発展途上国は、核融合による大規模ベース電源の有望市場になりうる。 	
9) 水素製造を行った場合はその役割はより大きくなる	<ul style="list-style-type: none"> ・核融合などの将来的原子力で水素製造を行うと、化石燃料起源水素への依存からの脱却を加速できるため、その役割はより大きくなる。 	

3. 費用対効果について

論点	指摘内容	これまでに提示された関連する議論
1) 経費や期間について評価が必要	<ul style="list-style-type: none"> ・技術的実現性について、実用化に至るまでに要する資金や期間についての評価が必要。 ・原型炉から実用化段階に至る研究開発が極めて多額の経費と長い期間を要することに留意すべき。 ・許認可対応（基準・考え方の整備、データ取得等）にも配慮が必要。 ・費用対効果の評価は今後重要性が増大する。 ・核融合の研究開発にあたっては、中長期的な原子力エネルギー政策とのバランス、重点的投資の時期及び緊急性、投資対効果等の慎重な考慮が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・米国における最新の経費評価では、実用化までの所用の資金は24.2B\$（120 円/ドルとして2.9 兆円）程度が必要としている。 ・実験炉、原型炉、実証炉、実用化という開発ステップは、高速炉開発に際して採用されたもの。核融合の特徴を生かせば、これを踏襲する必要はないのではないか。 ・ITER については、炉規制法の適用は必要無いとの評価が原子力安全委員会でなされている。発電炉についても核融合炉の特徴を踏まえた規制が行われることが期待される。
2) 短期的な効能を志向するのは疑問である	<ul style="list-style-type: none"> ・地球温暖化対策として見た場合、CO2 発生の抑制効果という点では、核融合炉も核分裂炉も効果自体はそれほど変わらないので、核融合の早期導入を目指し、短期的な効能を志向して多額の費用を費やすことにどれだけ意味があるのか疑問である。 ・より長期的に、積分効果として着実に役割を果たしていくという方向の方が現実的である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・核分裂炉にあるような安全受容性や核拡散の問題が無い又は小さいと考えられるなどの重要な利点があり、核融合の早期導入を図る意義は極めて高い。

4. 経済性について

論点	指摘内容	これまでに提示された関連する議論
1) 発電コストの達成に対する根拠が乏しい	<ul style="list-style-type: none"> ・10 円/kWh の発電コスト(開発戦略検討分科会報告書に記載) の達成に対する技術的な根拠に乏しく、単なる目標値としか見えない。 ・トータルシステムの設計を詰め、10 円/kWh 達成のための技術課題を整理することが必要。 ・軽水炉に比べてトカマクは構造が複雑であり、機器の数も多いので、コストはかなりかかるのではないか。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ITER を実際に 5000 億円で建設すれば、コストの技術的根拠は格段に高まる。 ・コストは検査体系に強く依存するが、ITER には炉規制法の適用がなく、規制が緩和される可能性がある。 ・核融合のもつ固有の安全性が検査体系に反映され、コストが下がる可能性がある。
2) 発電コストの目標値が甘すぎる	<ul style="list-style-type: none"> ・電力自由化等により将来一層の経済性向上を求められる状況下では、10 円/kWh の目標設定は甘く(現在の軽水炉でさえ 5～6 円/kWh であり) より積極的な姿勢で高い利益をねらうことが必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・かつての軽水炉のコスト評価に合わせて資本費の償却年数を 16 年としているために、高く見えている。 ・使用年数を 40～60 年に増やせば、最近の軽水炉の発電単価(5～6 円/kWh) とほぼ同じ目標値となる。

5. 安全性について

論点	指摘内容	これまでに提示された関連する議論
1) 安全性の確保が不十分ではないか	<ul style="list-style-type: none"> ・施設に内在する放射性物質のリスクのポテンシャルが低い が、これは安全確保への負担が相対的に少なくてすむ(確保が比較的容易) というにすぎない。実際のシステム(ブランケットや冷却系を含む) に沿った安全性の議論が必要である。 	

6. 廃棄物について

論点	指摘内容	これまでに提示された関連する議論
1) 放射性廃棄物が多すぎるのではないか	<ul style="list-style-type: none"> ・核融合では、中性子発生部とは異なる比較的広い周辺の物質との薄い反応により、放射化物が多くなる。 ・金属の放射化によって生じる高 廃棄物や低レベル廃棄物は大量に排出され、その量は核分裂炉に比べてはるかに多く、エネルギー取り出し技術と併せ、これらを低減する技術が重要。 ・材料の開発が不透明な状況の中では、一定の運転期間毎に炉壁を取り替えることになる可能性がある。高 廃棄物が大量に発生することへの対策が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・低レベル放射性廃棄物の物量は、遮蔽材料と遮蔽厚を最適化することで大幅に低減できる。 ・高 廃棄物も合わせて2千トン程度にまで低減可能との試算あり。
2) 処分のリスクを正に評価して比較すべき	<ul style="list-style-type: none"> ・核融合では高レベル放射性廃棄物は発生しない。しかし、ポテンシャルハザードではなく、処分のリスクとして核分裂炉とどうか、物量はどうか、化学毒性はどうか、などを正に評価し、その限界内で比較すべき。 	<ul style="list-style-type: none"> ・核融合炉の廃棄物の長期リスクについては、すでに評価されている。代表的な核融合炉である SSTR の評価によると、100年以降、個人被ばく線量は分裂炉に比べて大幅に低減すると予想される。

7. 部外者の理解促進について

論点	指摘内容	これまでに提示された関連する議論
1) 広報活動が全く不十分である	<ul style="list-style-type: none"> ・核融合以外の原子力関係者で、商用核融合炉が2100年までに稼動すると思っている人はほとんどいない。 	