

発電実証への道筋について (マイルストーンの考え方、コストやファイナンスを含む)



内閣府
科学技術・イノベーション推進事務局



フュージョンエネルギーの実用化に向けた我が国の現状

- ・我が国においては、これまで、実績のあるトカマク型による実用化をめざし、QSTを中心となって、ITER計画・BA活動に参画して研究開発を進めるとともに、それをベースにした原型炉計画を進めてきた。
- ・こうした取組より、多くの技術的知見が得られてきている。また、我が国企業がITERの主要コンポーネントを製造するなど、サプライチェーンが構築されつつある。
- ・また、大学等において、ヘリカル式、レーザー式など、それ以外の方式についても研究を進めてきた。
- ・近年では、大学等で開発された技術をベースにフュージョンエネルギーの実用化を目指すスタートアップが複数設立され、研究開発を進めている。これらのいくつかの方式の中には、例えば高温超伝導（HTS）技術の採用などにより小型化・低価格化を実現できる可能性があり、成功すれば大きなインパクトが期待されるものがある。他方で、それらを実現できるかどうかは不確実性が高い。
- ・このように、我が国のフュージョンエネルギー関連技術は、世界トップレベルにあるが、フュージョンエネルギーの実用化には、信頼性・安全性・経済性などの実現が必要となるところ、いずれの方式も、現時点において、それらを実現できることを確約することは難しい状況にある。

「当面の取組」のあり方

前述の現状を踏まえ、「当面の取組」は以下の方針が適当ではないか。

- 発電実証及びその前段階の研究開発等には多くの人的・経済的リソースが必要となることから、我が国としてフュージョンエネルギーを早期実現するためには、どこかの段階でフュージョンエネルギーの方式等を絞り込み、集中的に支援することが望ましい。
- しかしながら、現時点においてどの方式が最も有力か結論を出すことは困難。
- こうしたことから、どの方式でも必要となる共通事項の技術開発・基盤整備を進めつつ、実用化の可能性があると考えられるものの研究開発を支援し、今後の進展を評価しつつ支援対象を絞り込んでいくこととし、当面、以下を進める。

①ITERやJT-60SAなど多くの蓄積があるトカマク型^(※)を発展させていくことでフュージョンエネルギーの実用化を目指す、QSTが中心となった原型炉計画を加速する。 ※低温超伝導(LTS)技術を採用

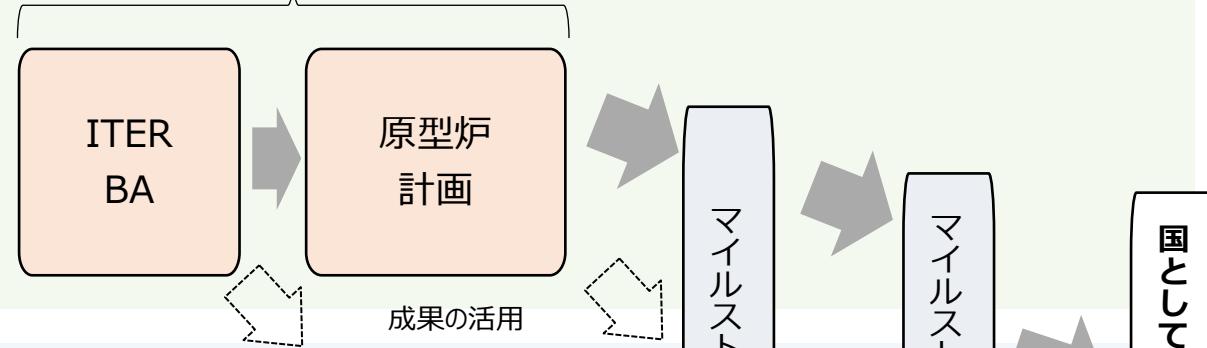
②イノベーティブな技術を取り入れることなどで、より競争力の高いシステムの実現を目指すスタートアップ等の取組のうち、実現可能性があると考えられるものについて、国の支援によりその研究開発を加速する。特に、それら実現のカギとなる要素技術の研究開発をマイルストーン方式による支援により加速し、できるだけ早期にそれらの方式の実現可能性を見極める。

③各方式に共通的に必要となる要素技術（トリチウムの取扱い、ブランケットやダイバータの開発、炉材料、遠隔保守等の開発など）について、すべてが速やかに確立できるよう、研究開発を推進する。

「当面の取組」のイメージ

取組①

QSTが中心となり推進



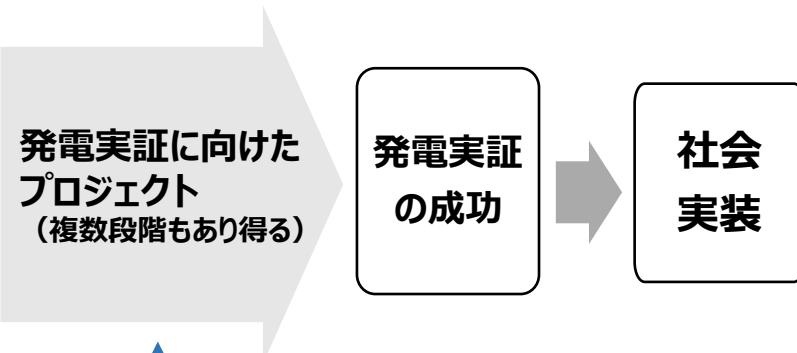
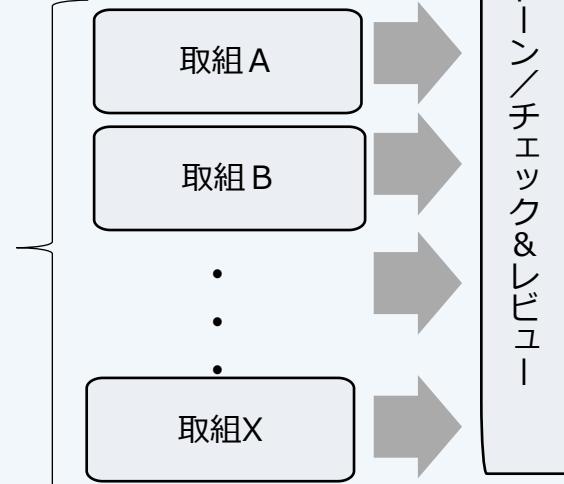
取組① ITERやJT-60SAなど多くの蓄積があるトカマク型を発展させていくことでfusionエネルギーの実用化を目指す、QSTが中心となった原型炉計画を加速する。

取組②イノベーティブな技術を取り入れることなどで、より競争力の高いシステムの実現を目指すスタートアップ等の取組のうち、実現可能性があると考えられるものについて、国の支援によりその研究開発を加速する。特に、それら実現のカギとなる要素技術の研究開発をマイルストーン方式による支援により加速し、できるだけ早期にそれらの方式の実現可能性を見極める。

取組③各方式に共通的に必要となる要素技術（トリチウムの取扱い、ブランケットやダライバータの開発、炉材料、遠隔保守等の開発など）について、すべてが速やかに確立できるよう、研究開発を推進する。

取組②

スタートアップ等の民間企業



取組③

国研、アカデミア、民間企業が分担・連携

共通的に必要な技術の開発・確立・基盤整備

「当面の取組」の具体的な内容①

① ITERやJT-60SAなど多くの蓄積があるトカマク型を発展させていくことでフュージョンエネルギーの実用化を目指す、QSTを中心とした原型炉計画を加速する。

- ITER計画及びBA活動、原型炉に向けた研究開発など、要素技術の確立に向けた研究開発を引き続き推進する。（これらの技術の多くは、磁気閉じ込め方式に共通的に必要）
- 概念設計が完了した段階で、以下を評価し、工学設計・実規模技術開発を含めた今後の取組のあり方を整理してはどうか。

本資料のP 8「発電実証に向けた道筋（方式の絞り込みなど）」に示す、

- ・実現可能性
- ・技術が確立された際の市場性
- ・開発体制 等

「当面の取組」の具体的な内容②

② イノベーティブな技術を取り入れることなどで、より競争力の高いシステムの実現を目指すスタートアップ等の取組のうち、実現可能性があると考えられるものについて、国の支援によりその研究開発を加速する。特に、それら実現のカギとなる要素技術の研究開発をマイルストーン方式による支援により加速し、できるだけ早期にそれらの方式の実現可能性を見極める。

⇒令和7年度補正予算において、フュージョンエネルギーの発電実証に取り組むスタートアップ等の技術開発を支援する補助事業を措置（以下、事業概要（一部検討中））

予算額：200億円×3年間（国庫債務負担行為）

期間：～2028年度まで（2026年春頃に公募開始予定）

支援対象：フュージョン発電実証に向けたプロジェクトに取り組むスタートアップ等の研究開発

補助率：2／3補助

※公募の際に、政府として目指すべき大きな目標を明示した上で、申請者はその実現に向けたプロジェクトの計画を策定。より競争力の高いシステムの実現に向けた技術成熟度向上を含め、発電実証までの計画・体制が抜け漏れなく検討されており、適切なマイルストーン目標が設定されているものを採択。

まずは3年後を目処に進捗状況を評価し、目標が達成できているか・将来的に発電実証が達成できるかを評価し、継続して支援するかどうかを判断。（マイルストーン方式）

☆スタートアップの目指す個々の方式により、より詳細・具体的な目標は異なることに留意する。

「当面の取組」の具体的な内容③

③ 各方式に共通的に必要となる要素技術（トリチウムの取扱い、ブランケットやダイバータの開発、炉材料、遠隔保守等の開発など）について、すべてが速やかに確立できるよう、研究開発を推進する。

- 国研、アカデミア、民間企業等が適切に分担・協力して取組を進める。共通的に必要となる要素技術のうち、技術的成熟度の低いものは国が主導して研究開発を推進。
- それらの研究開発を加速するため、フュージョンイノベーション拠点（QST、NIFS、ILE）において、実規模技術開発等のための試験施設・設備を整備し、民間企業等に供用する。その際、3拠点が相互に連携し、役割分担をして進めていく。

参考：内閣府及び文部科学省が連携して進める「イノベーション拠点化」の予算措置状況

| QST | | NIFS | | ILE | |
|------|-----------------------------|------|-----------------|------|--------------------|
| R6補正 | 核融合燃料分析整備 | R6補正 | 高温プラズマ実験システム | R6補正 | 核融合燃料模擬試験装置(第1期) |
| R6補正 | 発電ブランケット用熱負荷試験装置 | R6補正 | フュージョン・ナノ計測基盤装置 | R6補正 | 核融合燃料高密度圧縮装置(第1期) |
| R6補正 | フュージョンインフォマティクス用計算機 冷却設備 | R7補正 | 超伝導技術の評価装置の整備 | R7補正 | 連続レーザーフュージョン基盤開発装置 |
| R7補正 | 燃料システム安全試験施設設備整備 | R7補正 | 先進炉材料研究開発設備 | R7補正 | フュージョン反応試験装置 |
| R7補正 | ブランケット開発・試験施設設備 | R7補正 | スーパーコンピュータ | | |
| R7補正 | 理論・シミュレーション研究支援設備 | R7補正 | 負イオン源中性粒子ビーム整備 | | |
| R7補正 | 产学共同研究開発施設設備 | R7補正 | 計測器開発プラットフォーム | | |
| | | R7補正 | 多価イオン実験装置 | | |

(参考) フュージョンエネルギーの実現にあたり克服が必要となる技術課題と対応関係の例

| | | JT-60SA | ITER | DONES | フュージョン・イノベーション拠点 (QST、NIFS、ILE) | フュージョンエネルギー発電実証推進事業 | フュージョン発電実証プラント | 商用プラント |
|----------|-------------------|------------|--------------|-------|------------------------------------|---------------------|--------------------------|-------------|
| | 発電 | × | × | — | — | TBD | ◎ | ◎ |
| システム統合 | 炉設計 | ◎ | ◎ | — | — | TBD | ◎ | ◎ |
| | 安全確保 (燃料取扱) | ○ (DD) | ○ (DD→DT) | ◎ | ○ | TBD | ○ (DT) | ○ (DT) |
| | プラントエンジニアリング | ○ | ◎ | — | ○ | TBD | ◎ | ◎ |
| | メンテナンス | ○ | ◎ | ◎ | ○ | TBD | ◎ | ◎ |
| コア技術 | 超伝導 | ○ (LTS) | ○ (LTS) | — | ○ (HTS) | TBD | ○ (LTS and/or HTS) | ○ (HTS?) |
| | プラズマ | ○ | ◎ | — | ○ | TBD | ◎ | ◎ |
| | 燃料増殖 (ブランケット) | × | ◎ | — | ○ | TBD | ◎ | ◎ |
| | 炉材料 (炉壁・ダイバータ) | ○ (DD) | ○ (DD→DT) | ◎ | ○ | TBD | ○ (DT) | ○ (DT) |
| コスト・環境整備 | 経済成立性 | — | — | — | — | TBD | ◎ | ◎ |
| | 廃止措置 | ○ | ○ (DD→DT) | — | — | TBD | ○ (DT) | ○ (DT) |

■ フュージョン装置・フュージョン炉

■ コア技術のための試験施設・設備

■ 発電実証に向けた支援事業

発電実証に向けた道筋（方式の絞り込みなど）

発電実証及びその前段階の研究開発等には多くの人的・経済的リソースが必要となることから、我が国としてフュージョンエネルギーを早期実現するためには、どこかの段階でフュージョンエネルギーの方式等を絞り込み、集中的に支援することが望ましい。その際、以下のような点を評価して判断することが適当ではないか。

● 実現可能性

- ・必要な要素技術のすべてについて、確立する見込みが得られつつあるか
- ・それを統合する発電システムの概念は適当か

● 技術が確立された際の市場性

- ・技術的に確立された際に、市場性を獲得できる見込みはあるか
- ・確立された技術を民間事業者採用する見込みがあるか

　例えば、発電コストについては、他のエネルギーと比較して競争力のあることが求められるのではないか

　注) 経産省の「発電コスト検証に関するとりまとめ」における現時点での各電源の試算は10～30円/kwh程度となっている。

- ・海外の競合と比較して、競争力のあるシステムとなる見込みはあるか

（フュージョンエネルギーの実用化には経済性も重要。市場性の見込みがない方式では、発電実証に成功しても社会実装にはつながらない。）

● 開発体制

- ・発電実証を実施する適切な組織体制を構築できる見込みがあるか
- ・将来の社会実装（ビジネス化）に向けて、自ら一部費用を負担して発電実証を進めようという意欲のある者が参加しているか（参加する見込みはあるか）

参考：方式の絞り込みにおける「実現可能性」に関する評価項目の例

前頁の「実現可能性」の評価について、令和5年7月に核融合科学技術委員会にて策定された「原型炉開発に向けたアクションプラン」では、方式ごとに以下の項目が示されている。

【磁場閉じ込め方式】

- ・超伝導
- ・プラズマ
- ・燃料増殖（ブランケット）
- ・炉材料（炉壁・ダイバータ）
- ・炉設計
- ・安全確保（燃料取扱）
- ・プラントエンジニアリング
- ・メンテナンス
- ・経済成立性
- ・廃止措置 等

【慣性閉じ込め方式】

- ・プラズマ（高利得炉心プラズマ）
- ・炉材料（炉壁）
- ・安全確保（燃料取扱）
- ・繰り返し炉工試験装置
(ペレット製造・入射技術、レーザー開発)
- ・プラントエンジニアリング
- ・メンテナンス
- ・経済成立性
- ・廃止措置 等

発電実証に向けた支援の在り方について

発電実証に向けた支援対象を絞り込んだ後は、実用化につながる発電実証が速やかに実施できるよう、発電実証に必要な技術の確立に向けた研究開発や実施主体の体制整備などを集中的に支援する。

注)

- ・ その後の実用化につなげていくため、実用化の一歩手前の発電実証は次ページのようなものであることが必要。それを速やかに実施できるよう、必要な技術の確立や実施主体の体制整備等を推進する。
- ・ なお、その一環として、必要な技術の一部を実証する簡易な発電実証を行う場合もあり得ると考えられる。

発電実証の在り方について

第4回社会実装検討タスクフォース（12/12）資料2-1を一部更新

バックキャストによるロードマップから考慮すると、実用化の一歩手前の発電実証は、以下が求められる。

- 商用プラントの建設・運用に必要な技術的知見やノウハウが獲得できること。
 - 商用プラントに必要な主な技術（耐久性、連續運転、メンテナンス、トリチウム増殖などを含む）を全て実証できるものであることが重要
 - その後の商用化を実現しようとする事業者が参画していることが重要
- フュージョンエネルギー発電がビジネスとして成立することを技術的に示せること。（技術的成立性を示すことでフュージョンエネルギーの商用化を行おうとする事業者が、必要な資金を集めることができるようになることが必要）
 - 発電実証においても、経済性は重要
- 安全が確保され、周辺地域の理解が得られていること。

発電実証の実施主体の在り方について

第4回社会実装検討タスクフォース（12/12）資料2-1を一部更新

発電実証を行う実施主体は、以下が重要。

- ◆ フュージョン発電実証プラントを建設・運用できる技術・ノウハウ・組織体制・資金力を有していること。
 - フュージョン発電実証プラントは、高度かつ大規模な技術体系であることから、必要な技術・ノウハウを有していることに加えて、全体を統合・調整できるシステムインテグレーション能力を有し、運転に伴い発生する放射化物等の管理を含め、責任をもって確実に安全を確保することができる組織であることが必要。
- ◆ 実証のステージの進展に応じて、発電実証で獲得した技術やノウハウをその後の商用プラントの実現に活用できる者であること。
 - 例えば、発電実証の成果を用いて、商用プラントを建設・運用し、発電事業を行うという構想を有している企業が参画していることが必要。

発電実証に関する「コスト」のイメージ

発電実証を、市場性のあるフュージョンエネルギー発電システムの実現につながるものとするためには、発電実証プラントのコストも合理的な金額に収まっている必要があるのではないか。

例えば、米国政府は民間企業を支援するにあたり、米国科学・工学・医学アカデミーからパイロットプラントは発電容量50 MWe以上で総建設コストを約1兆円未満に抑える必要があると指摘されていることを念頭に、支援事業の目標を定めている。

米国における民間・国の取り組み



- 米国においては、スタートアップを中心とする民間企業がフュージョン産業をけん引している。
- フュージョンパイロットプラント（FPP）の実現に向けての要件を定義。
- 政府としては、民間企業に実現に向けたマイルストーンを提案させ、達成した際に支払う形のプログラムによって支援を実施。民間企業による意欲的な取り組みの支援と投資の呼び込みを喚起し、産業のエコシステムを構築している。

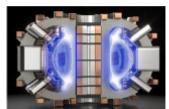
注：これを踏まえ、米国DOEは「少なくとも3時間連続して50MW以上の正味電力を生成し、1年間のフルパワー運転への迅速な道筋を持つものとし、その資本コストが民間投資家や商業化パートナーを引き付ける条件を満たすもの」と目標を設定。

民間企業の活況

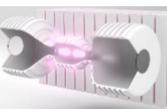
- フュージョンエネルギー関連スタートアップへの投資額が急増



- 主たるプレイヤー（例）



Commonwealth
Fusion Systems
2,800億円以上を調達
ヒル・ガイツ、Googleなど



Helion Energy
800億円以上を調達
サム・アルトマンなど

発電実証を目指す様々な炉型を主体としたスタートアップに対して、VCや投資家が巨額投資

（出典）米国エネルギー省「MILESTONE-BASED FUSION DEVELOPMENT PROGRAM」公募要項、

The National Academies of SCIENCES-ENGINEERING-MEDICINE, Bringing Fusion to the U.S. Grid, 2021 等から内閣府作成

フュージョンパイロットプラント実現に向けての要件

- 米国科学・工学・医学アカデミーの報告書において、パイロットプラントはFOAK（商用初号機）を可能とするための主要な性能とコストの実証が求められており、以下の定義がされている。
 - ・フュージョンパイロットプラント：
発電容量50MWe以上で、総建設コスト50-60億ドル未満に抑える必要
 - ・FOAK核融合発電所：
米国電力市場で実現可能で、**運用寿命40年とすれば総建設コストを50-60億ドル未満に抑える必要**

政府としての支援

- 上記の定義を元にフュージョンパイロットプラントの実現に向けたマイルストーンを民間企業に提案させ、達成時に支払いを行うマイルストーンプログラムを実施。
- 2023年採択発表以降、受賞企業はマイルストーンに対して政府が拠出した4,600万ドルに対し、3億5,000万ドル超の新たな民間資金を集めている。



第1回社会実装検討タスクフォース
(9/5) 資料2-1より引用

発電実証の費用のイメージ

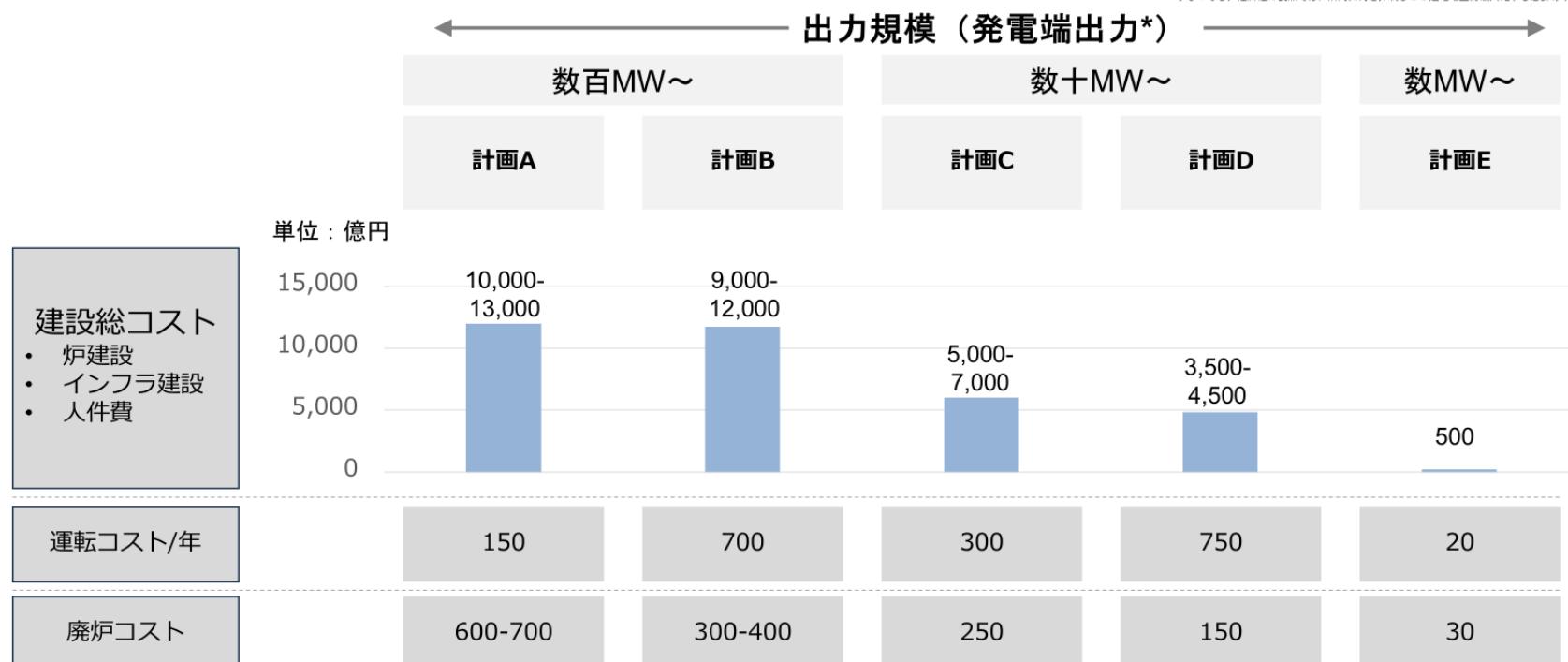
我が国のスタートアップ企業においては、フュージョンエネルギーの発電実証プロジェクトに要する費用について、以下のように試算している。

(参考) J-Fusionによる各事業者の発電実証プロジェクトに要する費用のまとめ

フュージョン装置数値計画について（発電プラント）

発電を含む計画として数百MWクラス以上で兆円規模、数十MWクラス以上で数千億円規模の建設総コストが想定されている

*発電機（タービン発電機等）の端子で得られる発電電力であり、所内負荷（自己消費電力）を差し引く前の値。フュージョン発電プランでは所内負荷が火力・原子力に比べて大きくなり得るため、送電端出力（ネット発電量＝発電端出力 - 所内負荷）は発電端出力より小さくなる。経済性の観点では、所内負荷を抑制しつつ送電端出力最大化する必要あり。



発電実証に要する費用の負担のあり方について

発電実証に要する費用の負担のあり方については、以下の考え方が適当ではないか。

- フュージョンエネルギーの発電実証は、成功した場合、フュージョンエネルギーの事業化につながるものであることから、その成果を活用して事業化を進めようとする者が投資して行うべきもの。
- しかしながら、フュージョンエネルギーは、多くの新たな要素技術を組み合わせる高度かつ大規模な技術体系であって、技術的実現性の確認段階であり、現時点では、投資に対するリターンの見通し得ることは困難。そのため、民間のみで十分な資金を確保するのは容易ではない。
- また、フュージョンエネルギーの実用化は、カーボンニュートラルやエネルギー安全保障などの面で、広く国民が裨益するもの。したがって、その早期実現に向けて、発電実証に対しても国が一定の支援を行うことが適当と考えられる。



発電実証は、フュージョンエネルギーの社会実装（ビジネス化）をめざす民間事業者と国が、応分の負担により進めることが適当ではないか。