



解説

世界エネルギーシナリオにおける核融合エネルギー導入効果の分析

Assessment of Fusion Energy Introduction under Global Energy Scenarios

魏 啓 為

GI Keii

地球環境産業技術研究機構

(原稿受付: 2020年1月30日)

気候変動対策の新たな国際枠組みであるパリ協定が発効され、国連サミットでは持続可能な開発目標が定められるなど、社会経済活動の源であるエネルギーのあり方が問われている。本解説では、核融合エネルギー導入ポテンシャル評価として、パリ協定2℃目標に相当する脱炭素シナリオの下での複数の社会経済シナリオに基づいた長期のエネルギーシステム分析について紹介する。

Keywords:

fusion energy, energy scenarios, climate change mitigation, Paris Agreement, global energy systems model

1. 背景

2015年12月に国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) COP21で採択され、2016年11月に発効したパリ協定は、各国が提出する国別貢献および低排出発展戦略と、世界全体の長期目標を特徴とする気候変動対策の新たな国際枠組みである[1]。また、2015年9月に国連サミットで採択された持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals, SDGs) では、先進国を含む国際社会全体の開発目標として、2030年を期限とする包括的な17の目標を設定している[2]。エネルギーは社会経済活動の源であり、気候変動対策のみならず、持続可能な開発においても極めて重要である。

日本政府は、第5次エネルギー基本計画 (2018(平成30)年7月)[3]、第5期科学技術基本計画 (2016(平成28)年1月)[4]、地球温暖化対策計画 (2016(平成28)年5月)[5]などにより、環境・エネルギー技術の研究開発および展開を推進している。さらに近年では、パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略 (2019(令和元)年6月)[6]を国連に提出し、革新的環境イノベーション戦略 (2020(令和2)年1月)[7]が公表された。

核融合エネルギーは燃料資源が豊富であり、発電過程で温室効果ガスを排出せず、少量の燃料から大規模な発電が可能であると共に、安全性の面でも優れた特性を有することから、超長期の基幹的エネルギー源として研究開発が進められている。日本では、文部科学省原型炉開発総合戦略タスクフォースによって原型炉開発に向けたアクションプラン[8]が取りまとめられている。また、文部科学省核融合科学技術委員会では、第6期科学技術基本計画策定に向けた核融合科学技術委員会の考え方について[9]が取りまとめられている。

原型炉に向けた重要なマイルストーンとなる国際熱核融合実験炉 ITER 計画は、世界7極による物納方式という複雑なマネジメントのため、建物や真空容器等の建設を中心に遅れが生じ、運転開始が2025年、核融合運転開始が2035年とスケジュールが延期され、プロジェクトのコストが大幅に増加する見積もりである[10]。日本の核融合研究開発の歴史は60年近くにのぼり[11]、その開発の性質上、大型プロジェクトにならざるをえず、大きな投資が必要となる。アクションプランにおいて「核融合エネルギー開発ロードマップ／原型炉設計活動に関する社会連携活動の実施」が挙げられているように、ITER計画に次ぐ原型炉プロジェクトを進めるためには、核融合エネルギーが社会経済にもたらす効果や原型炉設計活動を実施する意義を、社会に対して具体的に示していく必要がある。

国際的な気候変動の評価・分析・対策立案に際して、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) が果たしてきた役割は大きい。IPCCは5～7年程度おきに評価報告書を作成している。現在は第6次評価サイクルとなっており、第6次評価報告書は2021～22年の公表が予定されている。これまでのIPCC評価報告書では、将来シナリオにおいて核融合エネルギーに関する言及はほとんどなく、国際協力の一例として、ITER計画が触れられているに過ぎない[12,13]。一方で近年になり、パリ協定の長期目標に向けた抜本的な脱炭素化の達成に際して、従来以上に、イノベーションを通じた様々な脱炭素オプションの開発・普及が重要になってきている。例えば日本政府は、長期戦略における長期的なビジョンとして、今世紀後半のできるだけ早期の脱炭素社会の実現をめざし、2050年までに80%の温室効果ガス (GHG) の排出削減を掲げている

[6]. そのような時代の要請の中で、今まではエネルギー政策に登場してこなかった核融合エネルギーが、エネルギー転換における技術革新の一つとして、長期戦略[6]と革新的環境イノベーション戦略[7]において言及されるようになってきている。

上記のような背景に基づき、本研究ではエネルギーシナリオ分析によって核融合エネルギーの導入効果を評価し、核融合開発戦略の立案に資するような示唆を得てきた。具体的には、原型炉設計の延長線上で実現可能な核融合発電炉のモデルプラントを想定し、社会経済における不確実性や多様な開発目標と共に、パリ協定2℃目標に相当する脱炭素シナリオにおける核融合エネルギーの寄与を評価してきた[14, 15]。本稿ではその一部を紹介する。ここでの導入ポテンシャルは、ある特定の前提条件（シナリオ）における核融合エネルギーの導入規模を意味する。なお、モデルを用いた核融合発電の導入ポテンシャル評価の先行研究としては、文献[16-22]を参照されたい。

2. 世界エネルギーシナリオ分析の概要

2.1 エネルギーシナリオ分析のフレームワーク

図1のように、世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+ (Dynamic New Earth 21+) を用いて、将来の社会経済における不確実性として共有社会経済シナリオ (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs), 2℃目標相当のCO₂排出経路における不確実性として世界全体のCO₂排出経路、核融合エネルギー開発における不確実性として核融合エネルギー開発シナリオを組み合わせ、多様な不確実性を考慮した長期のエネルギーシナリオ分析を行った。

2.2 世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+

DNE21+は、世界を54地域に分割し、エネルギー生産・転換・消費のプロセスとエネルギー技術（設備、コスト、効率など）およびCO₂対策技術を明示的にモデル化した動学的線形計画モデルである[23-25]。モデルの評価対象期間は2000～2100年であり、代表時点は2005, 2010, 2015, 2020, 2025, 2030, 2040, 2050, 2070, 2100年である。地域間輸送は、石炭、石油、天然ガス、電力、エタノール、水素を考慮している。エネルギー需要部門のうち、鉄鋼、セメント、紙パルプ、化学、アルミ、運輸、民生の一部につ

いてはボトムアップ的にモデル化しており、300程度の技術が具体的に想定されている。電力需要については、年負荷持続曲線を基に、電力負荷の大きさによって4時間帯に区分し、それぞれ需給バランスがとれるようにモデル化している。温暖化対策を想定しないベースラインにおける化石燃料価格、ボトムアップ的にモデル化している主要部門の経済活動量やサービス需要、そして各種技術の設備費や効率等は外生的な入力となっており、世界全体の割引後（割引率5%）累積総エネルギーシステムコストが最小となるように、エネルギーフローおよび設備ストックが決定される。

2.3 共有社会経済シナリオ SSPs

近年、気候変動問題に対する国際研究コミュニティにおいて、社会経済シナリオの不確実性を考慮しつつ、気候変動緩和・影響・適応について統合的な分析・評価を行い、科学的な知見を集約するため、国際的分析において SSPs が開発されている[26, 27]。SSPsは、気候変動緩和と適応の困難さという2軸において、社会経済発展のドライバーや政治・社会状況、人間開発、経済・ライフスタイル、人口・都市化、技術進歩に関する整合性のある叙述的ストーリーラインを構築し、ガイドラインによってモデルの定量的なシナリオ分析に反映する。なお、ストーリーラインからモデルへの定量的なデータの翻訳は、統一的に決められたものがあるわけではない。

本分析では5つのSSPsのうち、気候変動緩和の軸に関係が深い、SSP1: Sustainability (持続可能性)、SSP2: Middle of the Road (中位)、SSP5: Fossil-fueled Development (化石燃料発展)の3つの社会経済シナリオを、将来の社会経済における不確実性として用いた。そして SSPs のストーリーラインおよびガイドラインに従って、DNE21+のパラメータ等の前提条件を設定した[28]。

2.4 パリ協定2℃目標相当のCO₂排出経路

パリ協定における2℃目標は、産業革命前からの全球平均気温上昇を2℃より十分低く保持する、という目的であるが、達成時点や経路については言及していない。また、地球温暖化を巡る科学的不確実性として、平衡気候感度（温室効果ガス濃度が倍増し、その濃度で安定化したとき最終的に到達する気温上昇幅）が挙げられる。IPCC第5次評価報告書[29]では、それは1.5～4.5℃の範囲と指摘され

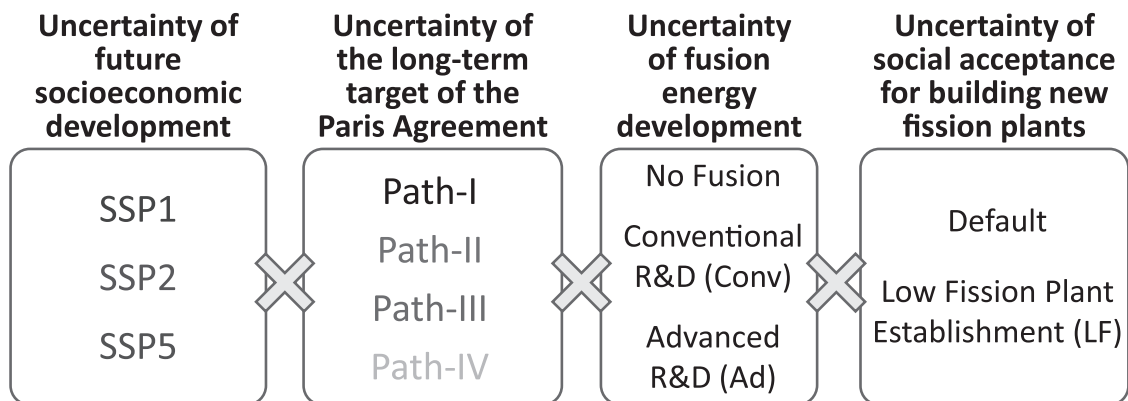


図1 世界エネルギーシナリオ分析のフレームワーク（参考文献[14]のFig.1を引用）。

たが、最良推定値は専門家により合意されなかった。ゆえに、気候感度に不確実性の幅が大きいため、気温上昇抑制目標をある一定レベルに定めても、許容される温室効果ガス濃度レベルや排出量レベルには大きな幅が生じる。一方で、累積CO₂排出量と気温上昇には線形に近い関係がみられる[29]。そのため、いずれのレベルであっても、気温を安定化するためには、いずれはCO₂のほぼゼロ排出（カーボンニュートラル）が必要になる。

本分析では、気候感度の想定および温度経路が異なる4つの2℃目標相当の世界全体のCO₂排出経路を、パリ協定2℃目標における不確実性として設定した（図2）。

2.5 核融合エネルギー開発シナリオ

原型炉設計合同特別チームによる核融合開発シナリオ[30]では、ITERから原型炉、商用炉初号基から量産型商用炉に向けて、定常運転化・稼働率向上、高出力化、小型化、保守性向上、簡素化、先進材料の使用、製造方法における効率化と先進設計による、核融合発電炉の設備費低減シナリオが提示されている。そこでは、現状では原型炉から商用炉への整合的な見通しは存在しないため、核融合商用炉としてCREST[31]とSlim-CS[32]を参考とし、量産型商用炉のコストなどが検討されている。そのため、原型炉との関係性に関する議論は整合的ではないことに留意されたい。

本分析では、核融合開発シナリオに基づいて、核融合オプションが無い場合（No Fusion, No）と、現状R&D（Conventional R&D, Conv）、強化R&D（Advanced R&D, Ad）という異なる設備費をもった2つの核融合発電炉のケースを想定した（表1）。ここでの設備費は10基目相当のものを想定しており、分析期間中は一定である。また核融合発電炉の新設設備制約としては、1970年から2000年の核分裂発電（以下、原子力という）の設備容量の変化を元に、DNE21+における地域別年間導入量が2 GW/yr 以下と想定した。なお、核融合発電の想定はSSP間で同一としている。核融合発電の利用可能地域は、核不拡散などを考慮して設定しているDNE21+における原子力発電の利用可能地域を参考に、ITER 参画国（日本、米国、EU28、ロシア、中

表1 本分析における核融合発電の想定（参考文献[14]のTable 3を引用）。

	Conventional R&D (Conv)	Advanced R&D (Ad)
Capital costs per unit [US\$2000/W]	8.5	6.6
Plant availability [%]	90	90
Life time [yr]	40	40
Annual expense ratio [%]	12	12
Fuel and back-end costs [US\$2000/MWh]	2.0	2.0
Capacity constraint	Maximum limit of annual capacity introduction of 2 GW/yr by region.	

国、インド、韓国）では2050年から、その他利用可能な地域（カナダ、その他西欧、ASEAN、その他アジア、中東・北アフリカ、トルコ、南アフリカ、ラテンアメリカ、その他東欧）は2070年から、核融合発電炉の新設が可能になると想定した。

本分析では上記の核融合オプションに対する3ケースのうち、No ケースと Conv ケースに対して新設の原子力発電がDNE21+のデフォルト想定と比べて社会受容性が低下した場合（Low Fission Plant Establishment, LF）を、No（LF）および Conv（LF）として計算した。ここでは、DNE21+のデフォルト値に対して、日本の原子力発電設備容量が2050～2100年では最大で30 GW、原子力発電の設備拡大制約がデフォルトの3分の1（地域別原子力発電増加量が総電力需要の最大で0.11%/yr）と、原子力制約の変更を行った。原子力制約としては、上記の2つの制約に加えて、電源構成におけるシェアが最大50%という条件が課されている。

3. 核融合エネルギーの導入ポテンシャル

3.1 核融合発電炉のブレイクイーブンコストの評価例

ここではまず、表1の技術条件に基づいた核融合発電炉の設備費におけるブレイクイーブンコストを分析する。ブレイクイーブンコストとは、核融合発電炉が導入されるかどうかの閾値となるコストであり、そのコストより核融合

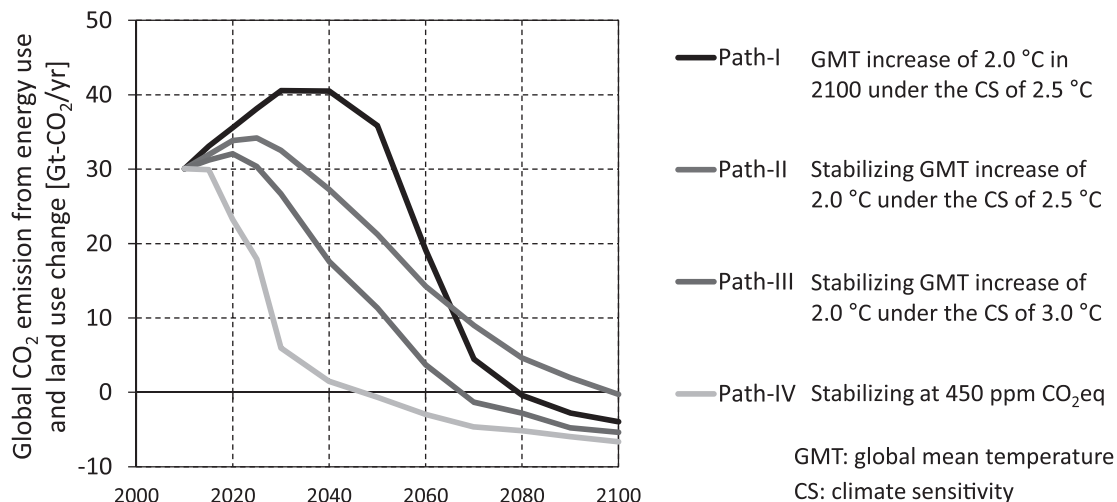


図2 パリ協定2℃目標に相当する世界全体のCO₂排出経路（参考文献[14]のFig. 2を引用）。

発電炉のコストが小さければ、経済合理的には核融合発電が導入されると判別できる指標である。

表2は、主要地域における核融合発電のブレイクイーブンコストの例である。ブレイクイーブンコストはCO₂排出制約、国内のエネルギー需要、低炭素エネルギー源の供給ポテンシャル・コスト、エネルギー技術の効率・コスト等に影響され、導入条件が緩い地域（日本、韓国、トルコ）から、やや緩い地域（EU28、中国、ASEAN、インド、ロシア）、やや厳しい地域（米国、カナダ、その他西欧、その他アジア、中東・北アフリカ、南アフリカ）、厳しい地域（ラテンアメリカ、その他東欧）に分けられる。LF ケースでは、デフォルトケースにおいても原子力発電が相対的にコスト効率的な電源となっていた地域（日本、中国、韓国、インド）にて、核融合発電のブレイクイーブンコストが高くなる。これは、LF ケースでは発電部門における脱炭素オプションが限定されるためである。それに対し、米国、カナダ、EU28、その他西欧、その他アジア、トルコでは、いくつかの限定されたケースにおいては核融合発電のブレイクイーブンコストが上昇する。一方で、ASEAN、南アフリカ、ラテンアメリカ、ロシア、その他東欧では、デフォルトケースと LF ケースの間で核融合発電炉のブレイクイーブンコストにほとんど変化がない。なお、SSP5 Path-IV ケースは解が存在しなかった。これは、SSP 5 で想定しているような特に途上国で急増するエネルギーサービス需要を満たしつつ Path-IV の短期における急激な脱炭素化を達成することが、モデルで想定している技術では不可能であることを意味する。

ブレイクイーブンコストの分析により、将来の核融合発

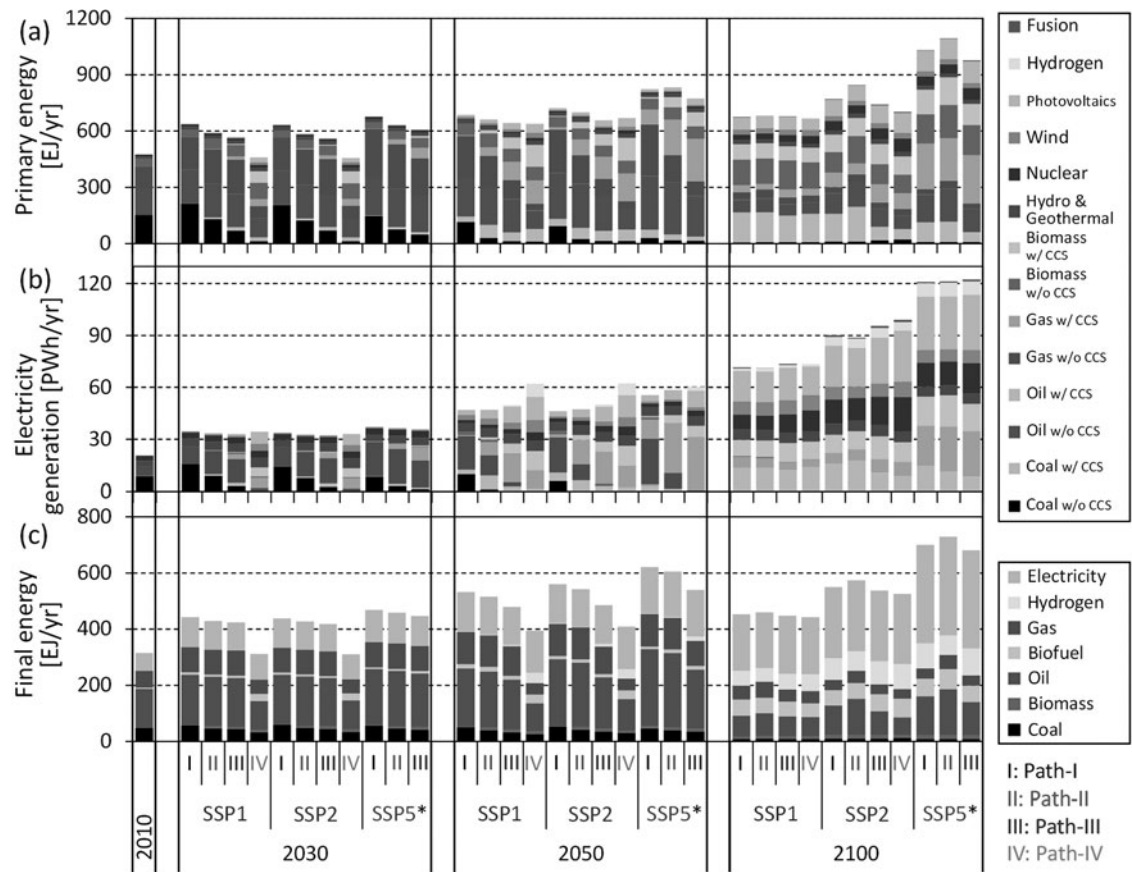
電炉がめざすべき経済性に、大きな地域差があることがわかる。例えば日本では、二酸化炭素回収・貯留（CCS）の貯蔵量や経済効率的な再生可能エネルギー（以下、再エネという）の供給量が限られ、原子力の拡大が上限に達しているため、核融合発電の直近の競合相手は非効率な再エネと CCS 付ガス火力となる。一方で、米国では豊富な天然ガス生産量と CCS 貯蔵可能量を持ち、再エネの供給ポテンシャルも高いため、核融合発電はそれらと競争可能なレベルまでコストを低減することが求められる。

3.2 核融合発電の導入ポテンシャルの評価例

図3に2℃シナリオにおける世界全体のエネルギー需給の例（Conv ケース）、図4に2100年における地域別の核融合発電導入容量を示す。エネルギー効率が大幅に向上する一方で最終エネルギー需要が増加する中、エネルギー供給および需要の両面において、化石燃料から低炭素・ゼロエミッションエネルギー源への抜本的なエネルギー転換がみられる。2100年には、電力（43–51%）と水素（9–17%）が最終エネルギー消費において大きなシェアを持つようになる。SSP 5 はサービス需要が大きいいため、エネルギー消費量も多い。発電部門は、世界全体でみると、本分析で想定した核融合発電のコストは相対的に高価であるため、日本、韓国、トルコといった安価なゼロエミッションエネルギー源が乏しい国においては核融合発電が最大限に導入されるが、EU28、インド、中国では限定的なケースでのみ核融合が導入され、米国およびロシアでは全く導入されない。そのため、温暖化対策としての核融合発電の有用性は、世界全体でみると限定的である。一方、日本にとって核融合エネルギーは有効な脱炭素オプションであるといえる。

表2 2℃シナリオにおける核融合発電炉のブレイクイーブン設備コスト（LF ケース）（参考文献[14]の Table 4 を引用）。

Capital costs per unit [US\$2000/W]												
Breakeven capital cost [US\$2000/W]	SSP1				SSP2				SSP5			
	Path-I	Path-II	Path-III	Path-IV	Path-I	Path-II	Path-III	Path-IV	Path-I	Path-II	Path-III	Path-IV
United States												
Canada												
EU28												
Other Western Europe												
Japan												
China												
Korea												
ASEAN												
India												
Other Asia												
Middle East & North Africa												
Turkey												
South Africa												
Latin America												
Russia												
Other Eastern Europe												
Infeasible												
Med	5-6	5-6	5-6	5-6	6-7	6-7	7-8	7-8	5-6	5-6	5-6	-
Min	2-	2-	2-	2-	3-	3-	3-	3-	2-	2-	2-	-
Max	11	10	11	11	13	13	14	14	12	12	13	-



*SSP5 Path-IV is infeasible.

図3 2℃シナリオにおける世界全体の(a)一次エネルギー供給、(b)発電、(c)最終エネルギー消費 (Conv ケース) (参考文献[14]の Fig. 4を引用)。

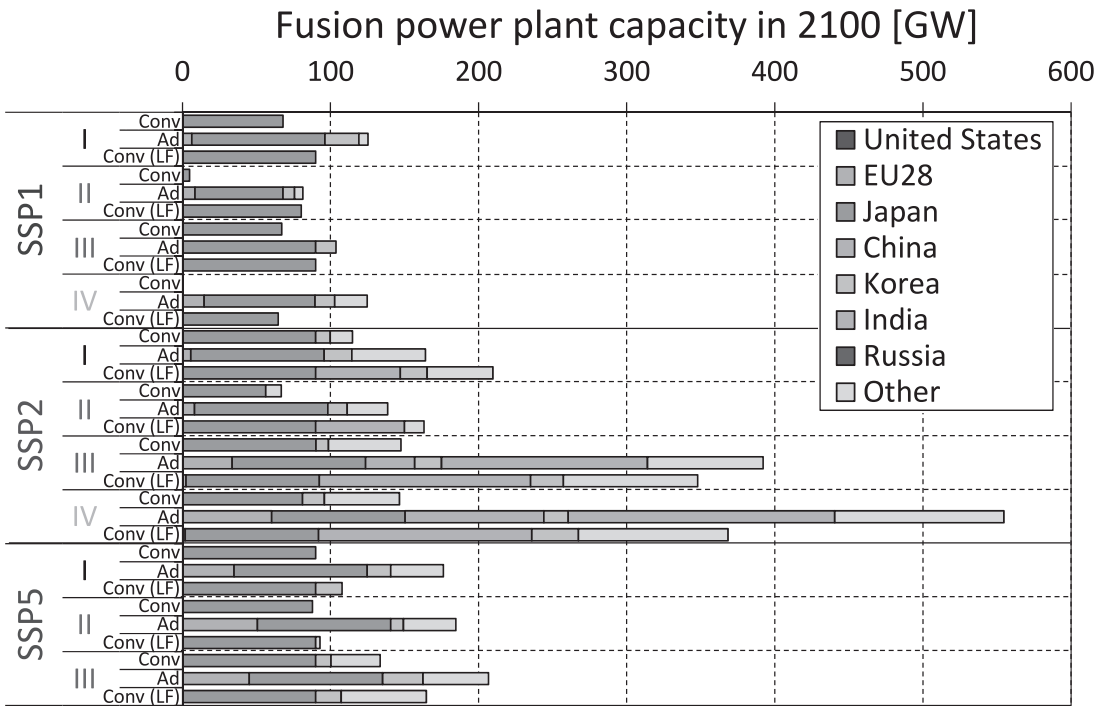


図4 2℃シナリオにおける2100年の地域別核融合発電導入容量(参考文献[14]の Fig. 6を引用)。

4. 日本におけるCO₂排出削減に関わるエネルギーシステムコストの削減

本節では、日本において核融合オプションがある場合にエネルギーシステムコストがどのように変化するかに対して、日本のCO₂排出経路を固定したケースを設定し、分析を行う。第2章の分析フレームワーク（将来の社会経済における不確実性（SSPs）、2℃目標のCO₂排出経路における不確実性（世界全体のCO₂排出経路）、核融合エネルギー開発における不確実性（無し：No, デフォルト：Conv, Ad, 原子力制約：Conv (LF)）は維持しつつ、新たに日本のCO₂排出削減目標の不確実性を考慮した。第1章で述べたように、日本のGHG排出削減目標としては、2050年に▲80%が掲げられている。ただ、基準年は明示されておらず、国内での排出削減割合についても政府として合意されたものはない。そのため、ここでは日本のCO₂排出削減経路として、エネルギー起源CO₂が2050年に2015年比で▲65%（path-65）と▲80%（path-80）の2ケースを設定した。いずれの場合においても、2070年に2015年比で▲95%、2100年にゼロエミッションと想定した。

図5は、2050～2100年平均における年間総エネルギーシステムコストの変化（No ケースもしくはNo (LF) ケース比）と核融合発電容量の相関である。設備拡大制約の上限

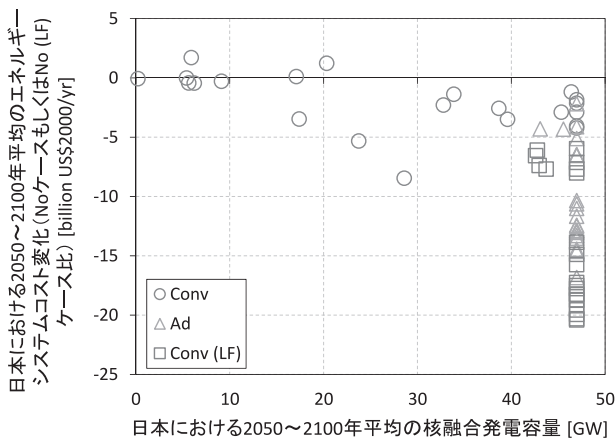


図5 日本における2050～2100年平均の年間総エネルギーシステムコストの変化と核融合発電容量の相関（参考文献[15]の図7を引用）。

で核融合発電炉が導入された場合、21世紀後半の平均で47 GW となる。核融合エネルギーの導入便益、つまり核融合オプションがある場合と無い場合を比べたときの年間総エネルギーシステムコストの差は、Conv ケースでは平均▲2 billion \$/yr, Ad ケースでは平均▲10 billion \$/yr, Conv (LF) ケースでは平均▲14 billion \$/yr となる。ゆえに、21世紀後半において、核融合発電の導入によって、およそ10 billion \$/yrのエネルギーシステムコストの削減効果が見込まれる。その量は、核融合炉の経済性、原子力新設の社会制約、社会経済シナリオに大きく依存し、全球CO₂排出経路には多少影響され、▲65%や▲80%といった日本の厳しい排出削減目標ではその差はあまり大きくない。

5. 主要国との核融合炉開発戦略の違い

5.1 主要国における磁場閉じ込め核融合エネルギー開発ロードマップ

ITER 計画に参画している国・地域は、原型炉に向けた核融合エネルギー開発ロードマップを策定および検討している。表3に、主要国における磁場閉じ込め核融合エネルギー開発ロードマップと実証炉・原型炉案を整理する。

5.2 主要国における核融合発電の導入ポテンシャルの評価例

本節では、日本、EU28、米国、中国の4カ国・地域について、2℃シナリオにおける21世紀後半のエネルギー需給を比較する。いずれの国・地域においても、部門ごとの特徴は異なるが、21世紀後半に向けて、電力および水素へ最終エネルギー消費が燃料転換し、総消費量が減少する。

主要国間の違いとしては、電源構成に際立った特徴がみられる。Conv (LF) ケースの21世紀後半の平均では、日本は、化石燃料+CCS (28(11–43)%)と再エネ (27(19–37)%) は相対的に小さく、原子力 (14(12–16)%)、水素 (8(0–21)%)、核融合 (23(18–26%)) の役割がある。EU28は、化石燃料+CCS (45(25–57)%)と再エネ (47(38–57)%) が大宗を占め、原子力 (8(3–17)%) がわずかで、水素および核融合の寄与はほとんどない。米国もEU28と同様のシェアであり、とりわけガス火力+CCS (51(30–86)%)と風力 (16(6–27)%) の寄与が大きい。中国は、再エネ（特に太陽光 (33(29–43)%)）のポテンシャルが大

表3 主要国における磁場閉じ込め核融合エネルギー開発ロードマップ。

	ロードマップ・研究開発戦略	実証炉・原型炉案
日本	原型炉研究開発ロードマップ[33] アクションプラン[8]	JA DEMO[34]: $P_{\text{fus}} = 1462/1085 \text{ MW}$ $P_{\text{net}} = 303/185 \text{ MWe}$
EU28	European Research Roadmap to the Realization of Fusion Energy[35]	DEMO Baseline / Flexi-DEMO[36] $P_{\text{fus}} = 2000 \text{ MW}$
米国	Final Report of the Committee on a Strategic Plan for U.S. Burning Plasma Research[37]	MIT: SPARC (→ARC[38]) $P_{\text{fus}} = 50 - 100 \text{ MW}$ PPPL/GA: FNSF[39] (→Pilot Plant)
中国	CN MCF Roadmap[40]	CFETR[41] (→PFPP) $P_{\text{fus}} = 2192 \text{ MW}$ $P_{\text{net}} = 891/738 \text{ MWe}$
韓国	Koran Fusion Energy Development Plan[42]	K-DEMO[43]
ロシア	Strategy for Fusion-Fission development	DEMO-FNS hybrid facility[44]

きく、次いで化石燃料+CCS (33(13-42)%)、原子力 (10(9-12)%)、水素 (3(0-17)%) という順番のシェアとなる。核融合はシェアでみると小さい (1(0-3)%) が、量は多い (88(0-345)TWh/yr)。SSP5では、天然ガスの国際貿易に顕著な拡大がみられる。日本は、天然ガスの輸入が多く、21世紀後半になると水素、バイオ燃料の輸入も拡大する。水素は、日本では輸入水素と天然ガス改質によって供給される。EU28では主に域内生産の石炭改質、米国では主に域内生産の天然ガス改質によって水素が精製される。EU28、米国、中国のいくつかのケースでは、水電気分解による水素製造もみられる。

主要国間を比較すると、社会経済シナリオと脱炭素経路に応じて、エネルギー需要量や域内のエネルギー供給量・経済性に大きな違いがみられる。そのため、核融合発電を経済合理的に導入・普及させる上では、主要国で異なった原型炉開発戦略が考えられる。例えば、日本は核融合エネルギー開発シナリオにおける経済性の追求が重要であるのに対し、米国ではこれまでの研究開発の延長線上にないような経済性を達成するための革新的コンセプトやそれを可能とする基礎技術 (例えば高温超電導線材の安定的量産) の研究開発と確立を優先すべき、ということがいえる。

6. おわりに

本解説では、まずエネルギーを巡る社会情勢として、パリ協定とそれに対する日本政府のエネルギー関連政策や核融合エネルギーへの期待の変化について述べ、核融合エネルギー開発が社会経済にもたらす効果や原型炉設計活動を実施する意義を提示する必要性を示した。次に、世界エネルギーシステム・温暖化対策評価モデル DNE21+を用いたパリ協定2℃シナリオにおける核融合エネルギーのポテンシャル評価について紹介した。

日本では脱炭素を達成する方策が限定されているため、核融合発電は21世紀後半における重要なオプションになりうる。日本における核融合の導入便益は、21世紀後半においておよそ1兆円/年と推計された。その価値は、核融合炉の設備費が低減した場合にさらに高くなり、原子力発電の新設に対するハードルが高い場合と世界全体で21世紀後半により急激な脱炭素化をめざす場合に大きくなる。様々な不確実性が取り巻く状況下では、核融合エネルギーの開発は経済性の追及が最もロバストな戦略となる。核融合開発特有の特徴として、①長期間・大規模なプロジェクト、②原型炉がITERと商用炉との間に唯一存在するステップ、という2点を考えると、原型炉開発における経済性の実証あるいは見通しは、極めて重要な位置づけとなる。

本稿では触れなかったが、日本では核融合発電の導入によってコスト効率的な水素供給システムが輸入水素および天然ガス改質から水電気分解に一部シフトし、エネルギー自給率の向上とエネルギー輸入コストの低減をもたらす可能性があることがわかった[14, 15]。核融合炉では高エネルギーをブランクで得ることができるため、高温水蒸気電解による水素製造[45]を原型炉設計・開発のオプショ

ンとすることも、核融合発電炉の経済性向上に資すると考えられる。

現段階では原型炉から商用炉への整合的な見通しが存在しないため、発電炉のコスト・技術想定および原型炉との関係性に関しては、今後の原型炉概念設計研究の進展を踏まえて、エネルギーシナリオ分析に反映していくことが不可欠である。また、核融合エネルギー開発戦略における大きな不確実要因として、核融合発電以外のエネルギー供給・需要技術 (特に発電部門) のコスト動向が挙げられる。したがって、これらの不確実性を考慮した上で、定期的 (例えば5年ごと) にシナリオ分析を実施し、核融合エネルギー開発戦略を精査・更新していくことが望ましい。

エネルギーシステムは、従来の化石燃料の供給を中心としたシステムから、脱炭素、デジタル化、分散化、持続可能な開発、に向けて、部門およびバリューチェーンの構造を急速に転換しようとしている。核融合エネルギーにおける長期の研究開発を行う上で継続的な投資を呼び込むためには、開発途上において得られた技術、例えば高磁場・超電導技術、中性子源、リチウム回収技術などをより一層社会に対して積極的に発信・展開し、核融合開発の"economy of scope"を追求すべきであると考えられる。

謝 辞

本研究のご支援をいただいた原型炉設計合同特別チームに感謝を申し上げます。

参 考 文 献

- [1] UNFCCC, Adoption of the Paris Agreement (2015).
- [2] UN, Sustainable Development Goals (2015).
- [3] 日本政府: 第5次エネルギー基本計画 (2018).
- [4] 日本政府: 第5期科学技術基本計画 (2016).
- [5] 日本政府: 地球温暖化対策計画 (2016).
- [6] 日本政府: パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略 (2019).
- [7] 日本政府: 革新的環境イノベーション戦略 (2020).
- [8] 文部科学省: アクションプラン構成表, 第12回核融合科学技術委員会 (2017).
- [9] 文部科学省核融合科学技術委員会: 第6期科学技術基本計画策定に向けた核融合科学技術委員会の考え方について (2019).
- [10] 文部科学省: ITER計画の新たなスケジュール及びコストについて, 第8回核融合科学技術委員会 (2016).
- [11] 松田慎三郎 他: プラズマ・核融合学会誌 84, 631 (2008).
- [12] IPCC AR5 WG3, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (Cambridge University Press, 2014).
- [13] IPCC AR4 WG3, Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change (Cambridge University Press 2007).
- [14] K. Gi *et al.*, Energy Strategy Rev. 27, 100432 (2020).
- [15] 魏 啓為 他: エネルギー・資源学会論文誌 40, 170 (2019).
- [16] K. Vaillancourt *et al.*, Energy Policy 36, 2296 (2008).
- [17] P. Muehlich and T. Hamacher, Fusion Eng. Des. 84, 1361 (2009).
- [18] E. Gnansounou and D. Bednyagin, Fusion Sci. Technol. 52, 388 (2007).
- [19] D. Turnbull *et al.*, Energy Econ. 51, 346 (2015).

- [20] K. Tokimatsu *et al.*, Nucl. Fusion **42**, 1289 (2002).
- [21] K. Tokimatsu *et al.*, Energy Policy **31**, 775 (2003).
- [22] H. Cabal *et al.*, Energy Strategy Rev. **15**, 1 (2017).
- [23] K. Akimoto *et al.*, Energy Policy **38-7**, 3384 (2010).
- [24] K. Akimoto *et al.*, Energy Strategy Rev. **2**, 246 (2014).
- [25] RITE: RITE GHG Mitigation Assessment Model DNE21+ (2015).
- [26] B. O'Neill *et al.*, Glob. Environ. Chang. **42**, 169 (2017).
- [27] K. Riahi *et al.*, Glob. Environ. Chang. **42**, 153 (2017).
- [28] RITE：地球温暖化対策技術の分析・評価に関する国際連携事業 平成28年度成果報告書 (2017)。
- [29] IPCC AR5 WG1, Climate Change 2013: The Physical Science Basis (Cambridge University Press 2013).
- [30] R. Hiwatari *et al.*, Plasma Fusion Res. **14**, 1305047 (2019).
- [31] K. Okano *et al.*, Nucl. Fusion **40**, 635 (2000).
- [32] K. Tobita *et al.*, Nucl. Fusion **47**, 892 (2007).
- [33] 文部科学省核融合科学技術委員会：原型炉研究開発ロードマップについて（一次まとめ）(2018)。
- [34] Y. Sakamoto *et al.*, 27th IAEA Fusion Energy Conference, FIP/3-2 (2018).
- [35] EUROfusion, European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy (2018).
- [36] G. Federici *et al.*, 27th IAEA Fusion Energy Conference, FIP/3-1 (2018).
- [37] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Final Report of the Committee on a Strategic Plan for U.S. Burning Plasma Research (2018).
- [38] E.A. Tolman *et al.*, 27th IAEA Fusion Energy Conference, FIP/P1-22 (2018).
- [39] J.E. Menard *et al.*, 27th IAEA Fusion Energy Conference, OV/P-6 (2018).
- [40] J. Li *et al.*, J. Fusion Energy **38**, 113 (2019).
- [41] G. Zhuang *et al.*, 27th IAEA Fusion Energy Conference, OV/3-2 (2018).
- [42] Y.S. Hwang, The meeting of Committee on a Strategic Plan for U.S. Burning Plasma Research, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2018).
- [43] K. Kim *et al.*, Nucl. Fusion **55**, 053027 (2015).
- [44] Y.S. Shpanskiy *et al.*, 27th IAEA Fusion Energy Conference, FIP/P7-7 (2018).
- [45] 岡野邦彦 他：プラズマ・核融合学会誌 **77**, 601 (2001).



ぎ けい い
魏 啓 為

2015年3月 東京大学大学院 新領域創成科学研究科博士課程修了。科学博士。2015年4月 公益財団法人 地球環境産業技術研究機構 入所，システム研究グループ研究員。2019年4月，同 主任研究員，現在に至る。2016年 国際応用システム分析研究所（IIASA）客員研究員。2018年 World Energy Council Future Energy Leaders' Programme。気候変動緩和シナリオ，持続可能な発展に向けたエネルギーシステムの構築，財・サービス需要の研究，に従事している。