

核融合工学部会セッション

社会受容性の更なる拡大を志向する核融合炉概念の検討

Innovative Fusion Reactor Concepts Aiming at Further Expansion of Social Acceptance

(1) 世界のエネルギーシナリオにおける核融合エネルギー開発目標の分析

(1) Assessment of Fusion Development Targets under Global Energy Scenarios

*魏 啓為¹, 佐野 史典¹, 秋元 圭吾¹, 原型炉設計合同特別チーム²

¹地球環境産業技術研究機構, ²原型炉設計合同特別チーム

1. はじめに

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、各国が提出する約束草案および低炭素発展戦略と、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、持続可能な開発目標においても極めて重要である。日本政府は、エネルギー・環境イノベーション戦略 (2016年4月閣議決定)、エネルギー基本計画 (2014年4月閣議決定)、科学技術基本計画 (2016年1月閣議決定)、科学技術イノベーション総合戦略 2017 (2017年6月閣議決定)、地球温暖化対策計画 (2016年5月閣議決定) などにより、エネルギー科学技術の研究開発および展開を推進している。

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2015年6月に原型炉設計合同特別チームが設置され、2020年頃の間中チェック&レビューに向けて原型炉設計活動が展開され始めた。また、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が取りまとめられており、量子科学技術研究開発機構、核融合科学研究所、産業界、大学等のオールジャパン体制で、原型炉に向けた研究開発が進められようとしている。一方で、原型炉に向けた重要なマイルストーンとなる 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込みである (増額のうち日本負担分は約560億円) [3]。日本の核融合研究開発の歴史は60年近くにのぼり、その開発の性質上、大型プロジェクトにならざるをえず、莫大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。

弊所では、原型炉設計の延長線上にある具体的な技術・システムを考慮した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、2°C目標や2100年正味温室効果ガス排出ゼロ (ゼロエミッション) の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ポテンシャル評価を進めている。本講演では、核融合開発シナリオに対する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°C目標に相当する低炭素開発シナリオの下で、複数の社会経済シナリオに基づき、核融合エネルギー開発シナリオを条件としたエネルギーシステム分析を紹介する。

2. 世界エネルギーシナリオ分析の概要

2-1. 世界エネルギーシステムモデル DNE21+ とシナリオ設定

世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+ (Dynamic New Earth 21+) 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[4]。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。本分析では、将来の社会経済における不確実性、2°C目標の CO₂ 排出経路における不確実性、核融合エネルギー開発における不確実性の組み合わせにおいて、世界全体で限界削減費用均等化の下で、世界および日本のエネルギーシステムの分析を行った。

2-2. 社会経済シナリオ

近年、気候変動研究コミュニティでは、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共有社会経済シナリオ（Shared Socio-economic Pathways, SSPs）が開発された[5]。SSP は、叙述的ストーリーライン、定性的シナリオ、そして統合評価モデルによる定量的シナリオから構成される。本分析では、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。SSP における定性的なシナリオおよび DNE21+への定量化は、文献[6]を参照されたい。

2-3. CO₂ 排出経路

パリ協定における 2°C 目標は、産業革命前からの全球平均気温上昇を 2°C 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な不確実性として、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 次評価報告書ではそれは 1.5~4.5°C の範囲と指摘されたが、最良推定値は専門家により合意されなかった[7]。ゆえに、気候感度に不確実性の幅が大きいと、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。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 CO₂ 排出経路を、2°C 目標相当の CO₂ 排出経路における不確実性として設定した[6]。

2-4. 核融合開発シナリオ

本研究では、現状 R&D と強化 R&D の 2 つのケースを設定した。核融合発電炉の導入可能時期は、ITER 計画の参画地域では 2050 年、その他地域のうち DNE21+において核分裂炉が利用可能な設定である地域（核不拡散などを考慮）では 2070 年とし、耐用年数は 40 年、設備利用率は 90% と設定した。設備費は、現状 R&D ケースでは 8.5\$/W、強化 R&D ケースでは 6.6\$/W とし、燃料・バックエンド費は 2.0\$/MWh と想定した。また核融合発電炉の拡大制約（DNE21+の 77 地域区分において各地域最大 2GW/yr）を設定した。

3. 分析結果

2°C 目標の達成には抜本的な脱炭素化とエネルギーシステムの転換が必要であり、その対策コストは、理想的な場合においても世界全体で GDP 比数%~10 数%が必要となる。日本の CO₂ 排出経路は、早い場合で 2070 年からネットゼロエミッションとなる。現状 R&D ケースでは、主に日本において核融合発電が導入され、21 世紀後半に CO₂ 排出量を急減する排出経路の場合にその導入量が多い。強化 R&D ケースでは、日本や韓国のみならず、EU28、インド、中国などにおいても導入されるが、米国やロシアでは導入されない。SSP1 を除き、2100 年における日本での核融合発電炉の導入量は CO₂ 排出経路によらず、新設拡大制約の限界に当たる 90GW のポテンシャルをもつ。

電源構成に占める核融合発電は、世界全体で見るとわずか（最大で 4%程度）であるが、日本では 2100 年に最大で半分近くとなる。2°C シナリオでは、2100 年にはゼロエミッションとなるため、発電部門でのゼロエミ電源への転換に加えて、最終エネルギー利用においても化石燃料から電気もしくは水素への燃料転換が大きく行われ、日本では特に 21 世紀後半に水素利用が著しく拡大する。開発シナリオで想定した核融合発電炉は他の電源に比べて相対的に高価であるため、核融合の導入はコスト競争力が低いゼロエミ電源（水素、利用ポテンシャルの低い太陽光・風力・水力・地熱、軽水炉）と CCS（Carbon Capture and Storage,

二酸化炭素回収・貯留)付き火力の一部を代替し、CCSの量を低減し、21世紀後半における天然ガスと水素の輸入量の削減(水電気分解による国内製造にシフト)に大きく貢献する。

本分析では、世界全体での最適な2°C目標達成を想定しており、特に現状R&Dケースでは相対的に高価な設備費を見込んでいるため、必ずしも日本で温暖化対策コストが低下するわけではない。現状R&Dケースでは、温暖化対策コストが21世紀後半において世界全体で-30(-103~+18)億\$/yr、日本で+14(-88~+143)億\$/yrとなる。強化R&Dケースでは、温暖化対策コストが21世紀後半において世界全体で-161(-355~-23)億\$/yr、日本で-56(-197~+86)億\$/yrとなる。日本において対策コストが増加するCO₂排出経路の場合では、核融合の導入により最大20%程度のCO₂排出量が追加的に削減される。

2°Cシナリオでは化石燃料の使用が大幅に減少するため、核融合オプションがない場合でも21世紀後半に日本のエネルギー自給率が最大で40%近くに上昇する一方、21世紀中庸から後半にかけてのエネルギーシステムコスト、とりわけエネルギー輸入コストが急増する。核融合発電が導入可能となれば、21世紀末に日本のエネルギー自給率を最大で70%近くまで改善できる可能性があり、核融合オプションがない場合と比べて、21世紀後半のエネルギー輸入コストを-176(-330~-11)億\$/yr削減できる。21世紀後半には、2015年の2~3倍の電力価格となるが、核融合発電の導入により-10(-22~-0.3)%のコスト低下が見込まれる。

4. おわりに

本研究では、世界エネルギーシステムモデルDNE21+を用いて、将来の社会経済の不確実性、パリ協定2°C目標に相当するCO₂排出経路の不確実性、核融合エネルギー開発の不確実性の下で、2100年までの世界全体および日本のエネルギーシステムを分析した。2°C目標を達成するためには、2100年には世界全体でネガティブエミッションが必要となり、抜本的な脱炭素化とエネルギーシステムの転換が必要不可欠である。今回想定した核融合発電炉の設備費は他の電源と比べると相対的に高価であるが、日本においてはゼロエミッションを達成する方策が限られているため、核融合発電炉は21世紀後半に最大限に導入されうる。世界全体では、日本および韓国に加えて、強化R&DケースでEU28、インド、中国においても大きく導入されるが、米国やロシアでは導入されない。21世紀後半にCO₂排出量を急減する排出経路の場合に、その導入量は大きくなる。日本では、核融合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、温暖化対策によって高騰する電力価格の低下に貢献することが分かった。核融合炉では高エネルギーをブランケット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。今後の課題として、核融合発電炉および他の電源の想定における感度解析、それを考慮した上での核融合エネルギーの導入条件の評価、エネルギー安全保障やマクロ経済影響といった多様な開発目標の観点からの分析、が挙げられる。

参考文献

- [1] UNFCCC, "Adoption of the Paris Agreement" (2015). <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09.pdf>
- [2] UN, Sustainable Development Goals (2015), <http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
- [3] 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)
- [4] RITE, RITE GHG Mitigation Assessment Model DNE21+ (2015). http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/sysken/about-global-warming/download-data/RITE_GHGMitigationAssessmentModel_20150130.pdf
- [5] D.P. van Vuuren et al., "The Shared Socio-economic Pathways: Trajectories for human development and global environmental change", *Global Environmental Change* 42 (2017) 148-152
- [6] 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)
- [7] IPCC WG1, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press (2013)

*Keii Gi¹, Fuminori Sano¹, Keigo Akimoto¹ and Joint Special Design Team for Fusion DEMO²

¹Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE), ²Joint Special Design Team for Fusion DEMO