自然エネルギー財団
RENEWABLE ENERGY INSTITUTE

自然エネルギーによる脱炭素化のための送電網のあり方

（はじめに／第 1 章）

公益財団法人自然エネルギー財団

2023 年 4 月

目次

はじめに.....1

第1章：自然エネルギーの導入を加速する送電網強化に関する議論の状況.....4

第 1 節：世界の動き 4

第 2 節：2050 年カーボンニュートラルに向けた送電網マスタープラン 6

第 2 章：自然エネルギーによる脱炭素化のための送電網および柔軟な需要..... 11

第 1 節：OCCTO マスタープラン再現シナリオの分析.....11

第 2 節：自然エネルギー100%シナリオにおける分析 34

第 3 節：カーボンニュートラルを見据えた送電網増強と柔軟な需要の将来像.....61

第 3 章：送電線投資スキームの検討..... 63

第 1 節：洋上風力発電開発における送電線整備スキーム 63

第 2 節：洋上風力発電と国際連系線を組み合わせる動き 66

第 3 節：日本における洋上風力開発と地域間連系線の同時整備の可能性.....72

おわりに..... 78

参考文献一覧..... 80

補足資料 1　「OCCTO マスタープラン再現シナリオ」における分析結果.....85

補足資料 2　「自然エネルギー100%シナリオ」における分析結果 115

Supported by:

Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action

on the basis of a decision by the German Bundestag

このレポートの作成にあたっては、
ドイツ連邦経済・気候保護省の支援
を得ました。

はじめに

自然エネルギーによる脱炭素化のための送電網研究会（以下、送電網研究会）は、公益財団法人自然エネルギー財団（以下、自然エネルギー財団）が事務局を務め、2016 年 7 月より活動してきたアジア国際送電網研究会の発展改組した研究会である。

前身のアジア国際送電網研究会は、これまで日本における国際連系線実現を目指した研究活動を進め、過去に 3 つの報告書を発表してきた。その中では、欧州、米国、北東アジア各国における国際送電網の事例調査や、日本を含む国際送電網構築に向けた候補ルートの選定、投資評価手法や費用便益分析の検討、エネルギー安全保障の論点整理などを行った。

日本では、2020 年 10 月に菅首相（当時）が表明した 2050 年カーボンニュートラル宣言以降、自然エネルギー導入に向けた機運は益々高まっている。2020 年 12 月には、カーボンニュートラル実現のための「グリーン成長戦略」が発表され、2021 年 10 月には、第 6 次エネルギー基本計画が定められた。その中で、自然エネルギー導入拡大のための送配電ネットワーク増強を目的とした「マスタープラン」の検討も開始された。自然エネルギー財団では、こうした政策的な動きを背景に、送電網についての研究テーマとして、国際送電線に加えて国内送電線に議論を広げた研究会を設置することとした。送電網研究会では、2050 年に自然エネルギーによって脱炭素社会を実現するために必要な送電網のありかた、それを実現する投資スキームに加え、変動型自然エネルギーに合わせた需要側対策とそれを実現するインフラについても検討した。本報告書は、送電網研究会の議論を踏まえ、自然エネルギーにより脱炭素化を進めるにあたっての送電網のあり方について自然エネルギー財団がとりまとめたものである。

第 1 章では、国内外の送電線強化に向けた動きを整理する。2021 年の英国グラスゴーで行われた COP26 以降、英国やインドを中心として自然エネルギーの活用拡大に向けた送電網建設に向けた政策議論が活発化している。さらにウクライナ危機以降、欧州を中心としたエネルギー確保手段としての送電網増強に関する動きが出てきた。日本国内では、洋上風力発電を中心とした自然エネルギーポテンシャルの多くが北海道・東北・九州などの地域に賦存するため、それら自然エネルギーによって発電された電力を需要地である関東・中部・関西へ運ぶために必要な送電線増強の議論が、電力広域的運営推進機関（以下、広域機関もしくは OCCTO）を中心に行われている。2023 年 3 月には広域機関のマスタープランが公表されており、マスタープランの結論は本研究会の結論と重複する部分も多い。一方、OCCTO マスタープランでは、最も自然エネルギーによる電力供給比率が多いシナリオでも、自然エネルギーが電源構成に占める割合は 49% にとどまり、自然エネルギー比率をそれ以上に高めるには、系統増強以外の対策が必要とされた。すなわち、自然エネルギーによる電力供給を高めるための手段として、送電網増強以外の手段である「柔軟な需要」や蓄電池に関し、議論を深める余地があり、この章でこうした状況について述べる。

第２章では、自然エネルギーによって脱炭素化を行うにあたり、どの程度の送電線容量が必要か、また自然エネルギー比率の増加に対して「柔軟な需要」がどの程度有効かを定量的に議論する。具体的には、2022 年 9 月時点で入手可能な情報をもとに、OCCTO マスタープランのベースシナリオを模擬した「OCCTO マスタープラン再現シナリオ」と、自然エネルギー財団、ドイツのシンクタンクであるアゴラ・エナギーヴェンデ、およびフィンランドのラッペンランタ工科大学が 2021 年に発表した共同研究「Renewable Pathways to climate-neutral Japan」の結果をベースに設定した「自然エネルギー100%シナリオ」の２つについて、需要の柔軟性をシミュレーションモデルが許す範囲で最大限設定し、分析を行う。シミュレーションソフトは、広域機関がマスタープランの検討において使用されているものと同じソフトを採用する。なお、「Renewable Pathways to climate-neutral Japan」における電力需給に関する分析では、ラッペンランタ工科大学が開発したシミュレーションモデルを用いたが、同じ需給条件を今回使用するシミュレーションソフトに外生的に与えた場合、結果について一定の整合性があることが事前に確認できており、今回の分析は、「柔軟な需要」や蓄電池などの運用を内生的に演算することで、より実運用に近い条件で分析することを目指す。これらシミュレーション分析の結果をもとに、系統増強規模とそれによる効果、OCCTO マスタープランにおいて「系統増強以外の施策」として示された部分の議論を深掘りする。

第３章では、日本において自然エネルギーの大量導入時代に即した送電線投資のあり方を議論する。現在、日本で検討が進められている送電網増強の議論は、主に、北海道・東北・九州エリアの洋上風力発電の電力を需要地に送るためのものであり、あわせて 50Hz/60Hz の周波数変換所の増強なども議論されている。一方、欧州など洋上風力発電の導入が先行する地域では、洋上風力発電によって生み出された電力を陸地まで送る海底送電線と、陸地から大需要地まで送る大容量送電線のいずれをも送電事業者がイニシアティブをとり整備する場合もある。これら取り組みは洋上風力発電の導入加速と自然エネルギー電源の変動性を補う両面に有効であると考えられる。一例として、デンマーク・ドイツ間では、両国の送電事業者が協力し、洋上風力発電所を国際連系線で接続するプロジェクトを実現した。ほかにも、オランダやベルギーなどでも洋上風力発電所と国際連系線を組み合わせるアイデアが検討されている。日本はまさに洋上風力発電の開発がこれから本格化する段階であり、洋上風力発電から陸地までの送電線およびその電力を大需要地に送るための送電線整備が検討されている状況にある。従い、洋上風力発電の特性を踏まえたうえで、早期運転開始を考慮した電源線、送電線整備の仕組みが重要であると考えられることから、投資スキームについて提案する。

送電網研究会は、以上のとおり、自然エネルギーによる脱炭素化を目指し、送電網増強をスピードを加速して取り組むと共に、投資をより有効にするための方策として「柔軟な需要」や水素パイプラインの活用なども含めて議論を行ってきた。今後、日本において自然エネルギーによる脱炭素化を実現する議論の題材として頂ければ幸いである。

自然エネルギーによる脱炭素化のための送電網研究会

座長

高橋 洋	都留文科大学　地域社会学科　教授 （2023 年 4 月より　法政大学 社会学部社会政策科学科 教授）

委員

加藤 仁	日本風力発電協会　代表理事
橘川 武郎	国際大学大学院　国際経営学研究科　教授
辻　隆男	横浜国立大学大学院　工学研究院　准教授
松村 敏弘	東京大学　社会科学研究所　教授
分山 達也	東京工業大学 環境・社会理工学院　准教授
大林 ミカ	自然エネルギー財団　事業局長

オブザーバー

岡本 浩	東京電力パワーグリッド株式会社　取締役副社長
三輪 茂基	ソフトバンクグループ株式会社　CEO プロジェクト室室長 SB エナジー株式会社　代表取締役社長

第1章：自然エネルギーの導入を加速する送電網強化に関する議論の状況

第 1 節：世界の動き

2020 年 10 月の国連気候変動ラウンドテーブル会議で、当時のジョンソン英首相は「英国を風力発電のサウジアラビアにする」と宣言した。英国は 1990 年代後半から北海油田の生産量が低下し、それに伴いエネルギー自給率が低下し続けてきたが、近年、洋上風力発電の増加に伴いエネルギー自給率が上昇している状況にある。ジョンソン首相の宣言は、洋上風力発電による発電量を飛躍的に増加させて英国のエネルギーを賄うというビジョンであり、そのためにも、英国は、他国と連系する国際送電網を積極的に拡大している。また、2021 年に英国が主催した COP26 では、2030 年までにすべての国がエネルギー需要を満たすためには大規模な自然エネルギーの導入が必要で、柔軟性確保のための国際電力網の構築を主要各国で促すためとして、Green Grid Initiative（以下、GGI）が提唱された。

一方、インドでは 2018 年頃からモディ首相が One Sun One World One Grid（以下、OSOWOG）構想を提唱し、自然エネルギーを面的に広く活用するための国境を越えた電力網を構築する取り組みを提案していた。COP26 では、これら OSOWOG と GGI について英国政府とインド政府が協調して取り組むことが「The One Sun Declaration」として宣言された（GGI-OSOWOG, 2022）。現在、OSOWOG と GGI は両政府が中心となり、アフリカ、南アジア、東南アジアなどを中心に、自然エネルギー導入強化に向けた議論を開始している状況にある。

図 1. Green Grids Initiative、OSOWOG ウェブサイト

出所：GGI-OSOWOG ウェブサイト

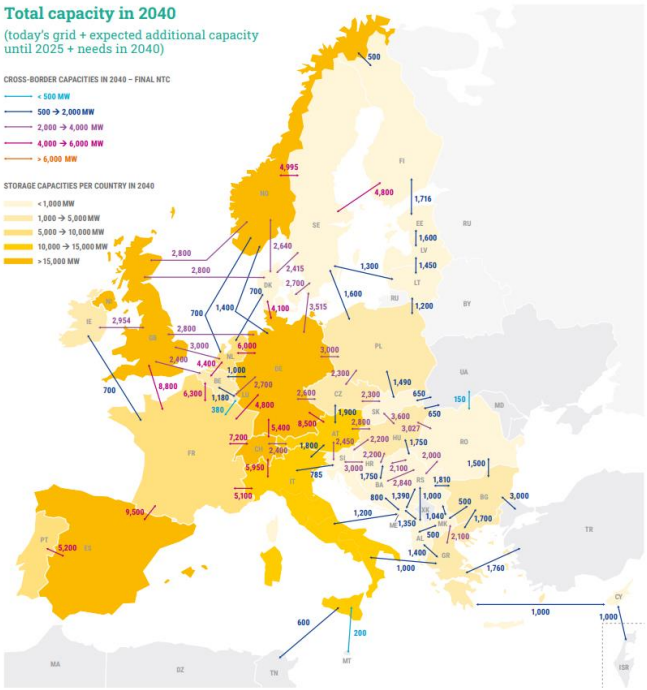
また、欧州大陸では、2022 年 2 月のロシアのウクライナ侵攻後、天然ガスを中心にエネルギー供給元の分散化やロシア産からの脱依存を実行するため、エネルギー安全保障を高める自然エネルギー拡大が一層加速しており、送電網の増強にも関心が寄せられている。2022 年 5 月 18 日に採択された欧州のエネルギー戦略「REPowerEU Plan」では、2021 年 7 月に欧州委員会が発表した脱炭素化のための政策パッケージ「Fit for 55 Plan」において検討された送電線投資をさらに 5%上積みし、今後 10 年で 5838 億ユーロ（82 兆円：1 ユーロ 140 円換算）を行うと発表した（EC, 2022b）。

これを受け、2023 年 1 月、欧州の送電会社（Transmission System Operator、以下 TSO）の集まりである European Network of Transmission System Operators for Electricity（以下、ENTSO-E)は、欧州連合エネルギー規制機関間協力庁（Agency for the Cooperation of Energy Regulators、以下 ACER）に対し、送電線投資についての規模などを分析したレポートを提出した（ENTSO-E, 2023)。それによると、2025 年から 2030 年の 5 年間に 50 以上の国境における 64GW の送電線増強（2025 年比で 55%増）について経済合理性があり、さらに、2040 年に向けては 65 以上の国境で 88GW の送電線増強（2025 年比 75%増）に可能性があると報告された（図 2)。

ENTSO-E の考えるシナリオでは、エネルギー供給の安定化と脱炭素を両立させる手段は主に風力発電と太陽光発電であり、それらに加えて、水素発電や水電解による水素製造、蓄電池などを用いるシナリオが描かれた。なお、ベースシナリオとなっている「National Trend Scenario」では、2040 年の最終電力需要 3,072TWh に対し、52%が風力、20%が太陽光で供給されるとされた。

COP26 での GGI-OSOWOG の共同宣言など、ここ数年、世界的にも脱炭素のための送電線整備の議論が活発化している。そして、2022 年に発生したロシアのウクライナ侵攻による化石燃料危機は、こうした議論に、根本的なエネルギー自立・脱化石燃料の要素を加えた。すなわち、今の世界の状況は、安定的に確保できる安価なエネルギー資源として自然エネルギーが有力視され、その拡大のために必要な送電線増強の議論が活発に行われていると言えよう。

図 2. ENTSO-E によって分析された 2040 年の欧州における国際送電線

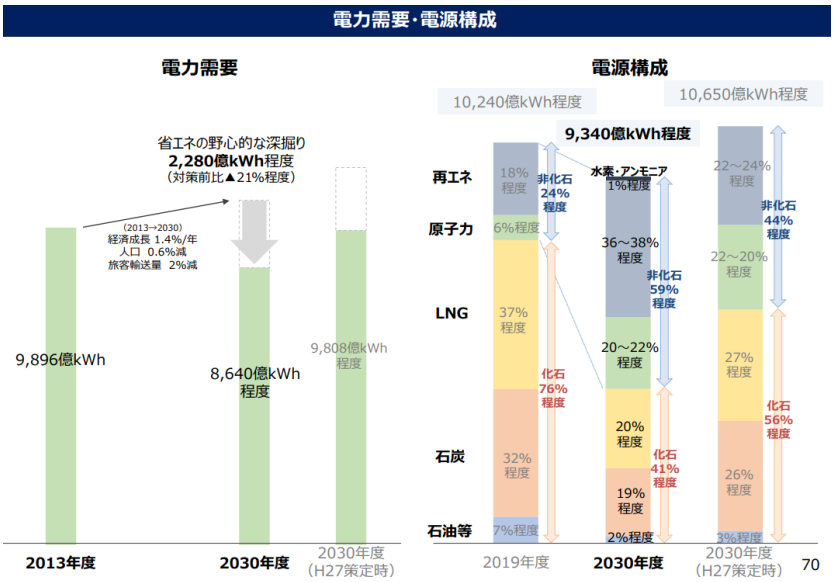


出所：ENTSO-E (2023) Figure 1.4

第 2 節：2050 年カーボンニュートラルに向けた送電網マスタープラン

日本では、2020 年に菅首相（当時）が表明したカーボンニュートラル宣言以降、エネルギーの脱炭素化に向けた議論が加速している。2020 年 12 月には、「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が公表され、参考値として、2050 年に自然エネルギーが 50～60%の電力を供給することが示された。そして、2021 年に策定された第 6 次エネルギー基本計画では、2030 年に向けたエネルギー需給構造や電源構成などが定められた。具体的には一次エネルギー供給の 30%、電力供給量の 59%を 2030 年度までに脱炭素化するとし、電力部門においては自然エネルギーが占める割合を 36～38%とすることが明記された。

図 3. 第 6 次エネルギー基本計画において定められた 2030 年度の電力供給イメージ

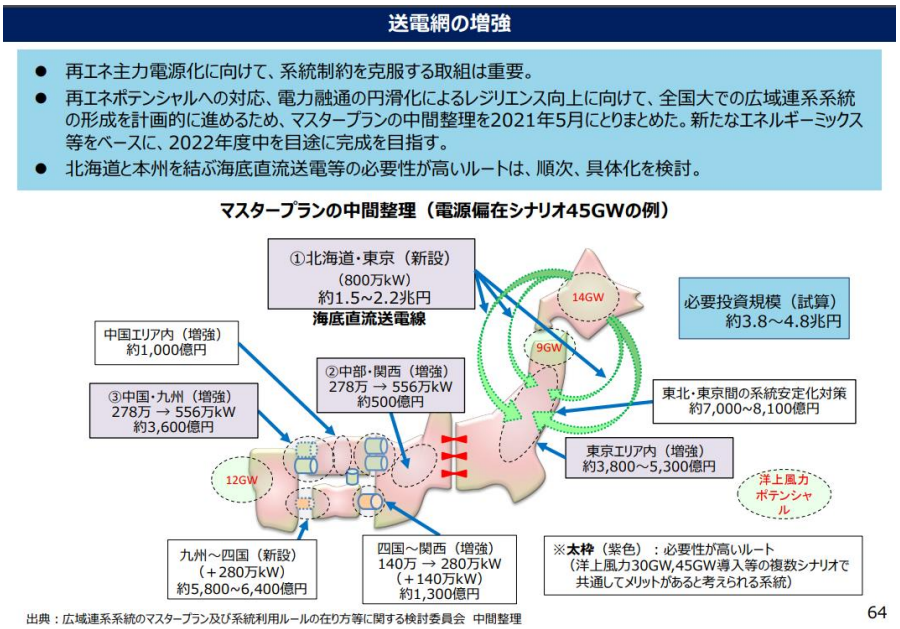


出所：資源エネルギー庁（2021b）p.70

さて、「グリーン成長戦略」で政府が示した 2050 年の電力供給構造は、あくまで参考値であるものの、電源構成における電力量（kWh）ベースで自然エネルギー発電約 50～60%、水素・アンモニア発電 10%程度、原子力・CCS 付き火力発電 30～40%程度と設定されている（日本政府、2020）。そして、それを実現するためには送電網を増強することが必要不可欠であり、2020 年 8 月に広域機関に設置された「広域連系系統のマスタープラン及び系統利用ルールの在り方等に関する検討委員会」（以下、マスタープラン検討委員会）でも、こうした政府のエネルギー政策の策定議論に合わせた検討が行われている。日本では自然エネルギーポテンシャルは、北海道、東北、九州などの一般送配電事業者エリアに多く賦存し、その一方、需要は東京、中部、関西の各エリアに多い傾向がある。すなわち、自然エネルギーによる電力供給を増やそうとする場合、自然エネルギーポテンシャルの多いエリアから需要の多いエリアに向けた送電線整備が必要不可欠となる。

マスタープラン検討委員会は 2021 年 5 月に中間整理（案）を公表し（マスタープラン検討委員会事務局, 2021）、その議論の一部は第 6 次エネルギー基本計画においても記載がみられる（図 4）。そして、2050 年に向け、北海道、東北、九州の各エリアに賦存する洋上風力ポテンシャル（設備容量ベース：30～45GW）を需要地に送るべく送電線整備を行うことを想定した費用便益分析も行われた。例えば、北海道～東京間に 8GW の海底直流送電線に対して 1.5～2.2 兆円が投資され、それに対し、化石燃料の焚き減らしによる燃料費および CO_2 対策費の削減は長期間にわたる運用によって十分回収可能と結論づけられた。

図 4．第 6 次エネルギー基本計画において示された送電網の増強に関する議論の一例



出所：資源エネルギー庁（2021a）p.64

しかしながら、マスタープラン中間整理（案）では、主なシナリオにおける電源構成の自然エネルギー比率は 30～40%と想定され、それ以上に自然エネルギー比率を高めた「再エネ 5～6 割シナリオ」は参考扱いであった。なお、「再エネ 5～6 割シナリオ」における主な自然エネルギー電源は、太陽光 304GW、洋上風力 45GW、陸上風力 44GW として、各エリアには既存の発電設備導入比率に従って配分がおこなわれた。その場合の出力制御率は広域系統整備が行われない場合 42%になり、広域系統整備によって出力制御率を 39%に低下できるとされた。また、マスタープラン中間整理（案）では、電気自動車（以下、EV）の充電タイミングや水素製造、ヒートポンプ式給湯器の蓄熱運転を、太陽光や風力発電などの発電時に合わせる運用などは考慮されず、また、将来的な電化推進による電力需要量の増加なども十分見込まれていない。そこで、2021 年夏ごろより、マスタープラン検討委員会はあらためて広域系統整備のための検討を開始した。そして、2023 年 3 月 10 日に OCCTO マスタープランの最終版がマスタープラン検討委員会において示されたところである（広域機関, 2023a）。

OCCTO マスタープラン最終版は、自然エネルギーの導入量を 50%とする目標を設定した上で、ウクライナ危機以降の世界的な燃料費高騰の影響や、アデカシーを含めた便益、送電ロスによる経済的損失についても評価が行われている（表 1）。費用便益分析を用いた系統整備に関する議論は、欧州では 2009 年頃から ENTSO-E が費用便益分析などの手法を使い議論していたが、OCCTO マスタープラン以前の日本の送電網整備にかかる議論において費用と便益を網羅的にとらえ、それらを定量評価した上で、計画として落とし込もうとした取り組みはこれまで行われていなかった。その意味でも、今回の試みは、カーボンニュートラルに向かうために必要な自然エネルギーの導入を加速するための取り組みとして評価できる。なお、OCCTO マスタープラン最終版は北海道エリアや東北エリアと東京エリアをつなぐ 6～8GW の連系線増強がベースシナリオに盛り込まれ、さらに、水素製造や DACCS などの電力需要を供給地近傍へ立地することが難しい場合、北海道=東北間を 8GW 増設、東北＝東京間を 10GW 増設が必要とされている。

しかしながら、マスタープランは、送電網増強についての議論であり、そこを主眼として分析することから、それ以外の想定については一定範囲にとどまっている。具体的には、「柔軟な需要」についての議論は、当初期待されていたほどには深められていないように思われる。マスタープラン検討委員会では当初、熱需要、水素製造需要、EV 充電需要をどのように設定するか議論され、様々な手法が検討されたが、最終的には需要カーブの設定として落とし込まれ、その量もカーボンニュートラルにおいて想定される需要量の一部にとどまった。

例えば、熱需要は家庭向け給湯用ヒートポンプのみが想定されたにすぎず、水素製造は 2050 年に国の掲げる水素必要量の 14%（280 万トン）のみを国内で製造する想定である。また、EV については乗用車 6,204 万台のみが想定され、それ以外のトラックやバスなどの自動車については考慮されていない。さらに、「柔軟な需要」の有力候補である蓄電池は、系統用蓄電池として 9.3GW が想定されたが、変動型自然エネルギー導入量（太陽光発電 260GW、陸上・洋上風力発電 86GW）に対してはわずかであると言える。同時に、家庭用蓄電池など、電力需要家が蓄電池を導入することや、ディマンドレスポンス（DR）なども想定されていない。

マスタープランは、日本のエネルギー政策に沿った系統増強規模を明確にすることが主目的であるため、それを検討するシナリオや条件設定としては十分との評価もあり得るものの、本質的な意味でのカーボンニュートラルに向けて、自然エネルギー比率を高めるための系統増強以外の施策については検討の余地が残されている。

一方で、自然エネルギー財団は、ドイツのシンクタンク：アゴラ・エナギーヴェンデとフィンランドのラッペンランタ工科大学と共に、2021 年に発表した共同研究「Renewable pathways to climate-neutral Japan」（Renewable Energy Institute et al., 2021）において、自然エネルギーがエネルギーのほぼ全てを供給する場合を想定した電力およびエネルギー全体の需給シミュレーションを実施した。その分析では、系統増強に加え、変動型自然エネルギー電源の供給に合わせた「柔軟な需要」を大規模に活用することで、自然エネルギー比率を高められるとの結論を得ている。すなわち、自然エネルギーをより活用するための施策として、系統増強と合わせてそれ以

外の方策を含めた考察は、自然エネルギーによる脱炭素化を進める上で必要不可欠な議論と言える。そこで本研究会では系統増強に加え、「柔軟な需要」についても比較評価を進めてきた。以下、第 2 章において、具体的な検討を行う。

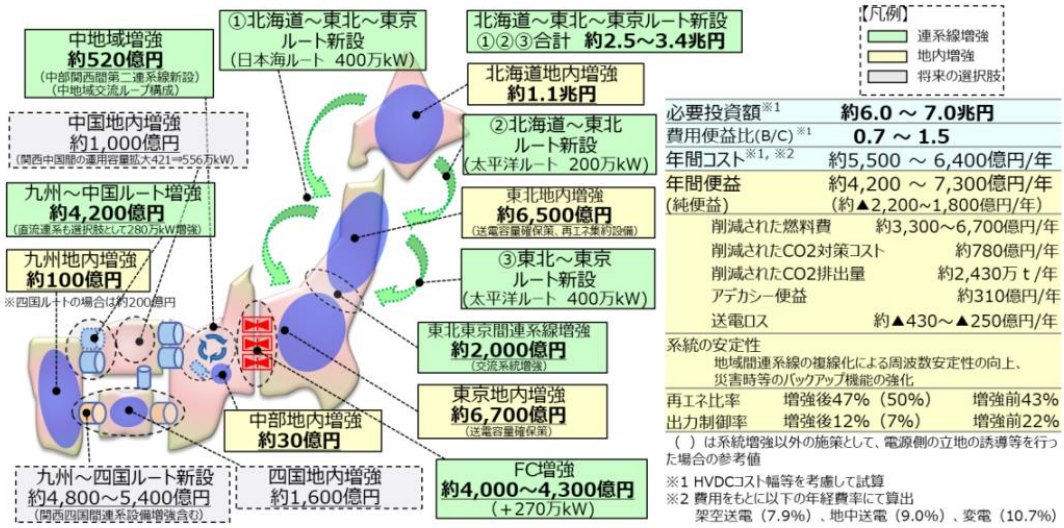
表 1. OCCTO マスタープラン（案）で示された広域系統増強シナリオとその評価結果

分析項目＼シナリオ	需要立地誘導シナリオ	ベースシナリオ	需要立地自然体シナリオ
系統増強の投資額※1 （NW増強コスト※2）	**約6.0～6.9兆円** （約0.55～0.64兆円/年）	**約6.0～7.0兆円** （約0.55～0.64兆円/年）	**約6.7～7.9兆円** （約0.62～0.73兆円/年）
費用便益比（B/C）	**0.6 ～ 1.2**	**0.7 ～ 1.5**	**0.7 ～ 1.5**
年間便益 （純便益（B−C））	約3,200 ～ 5,800億円/年 （約▲3,200~300億円/年）	約4,200 ～ 7,300億円/年 （約▲2,200~1,800億円/年）	約4,600 ～ 8,200億円/年 （約▲2,700~2,000億円/年）
燃料費・CO2コスト削減	約3,200 ～ 6,100億円/年	約4,100 ～ 7,400億円/年	約4,600 ～ 8,300億円/年
送電ロス	約▲590～▲350億円/年	約▲430～▲250億円/年	約▲410～▲240億円/年
アデカシー便益※3	約330億円/年	約310億円/年	約310億円/年
CO2削減量	約870万t/年	約2,430万t/年	約2,830万t/年
再エネ比率※4	49%（50%）	47%（50%）	47%
再エネ出力制御率※4 （増強後、太陽光・風力）	10%（7%）	12%（7%）	13%

※1 偏在する電源等を大消費地に送電するための連系線等の広域連系系統の増強コストのみを記載しており、再エネ増加に伴う、調整力確保及び慣性力・同期化力低下等の対策コストは含んでいない。
また、HVDC 送電コストは、2050 年頃におけるスケールメリットや技術革新のコスト低減を先取りした単価を採用、海底ケーブル工事は占用料等を含まず、水深等を考慮したルート変更によるコスト増の可能性あり。
※2 系統増強を行うことで毎年発生する費用（減価償却費、運転維持費など）
※3 系統増強による供給力確保量の節減効果
※4（ ）は系統増強以外の施策として、電源側の立地の最適化等を行った場合の参考値[30]
なお、電源については、再エネを最優先の原則の下で最大限の導入に取り組むという国の政策的議論を踏まえて、各シナリオにおいて同じ条件としていることに留意が必要

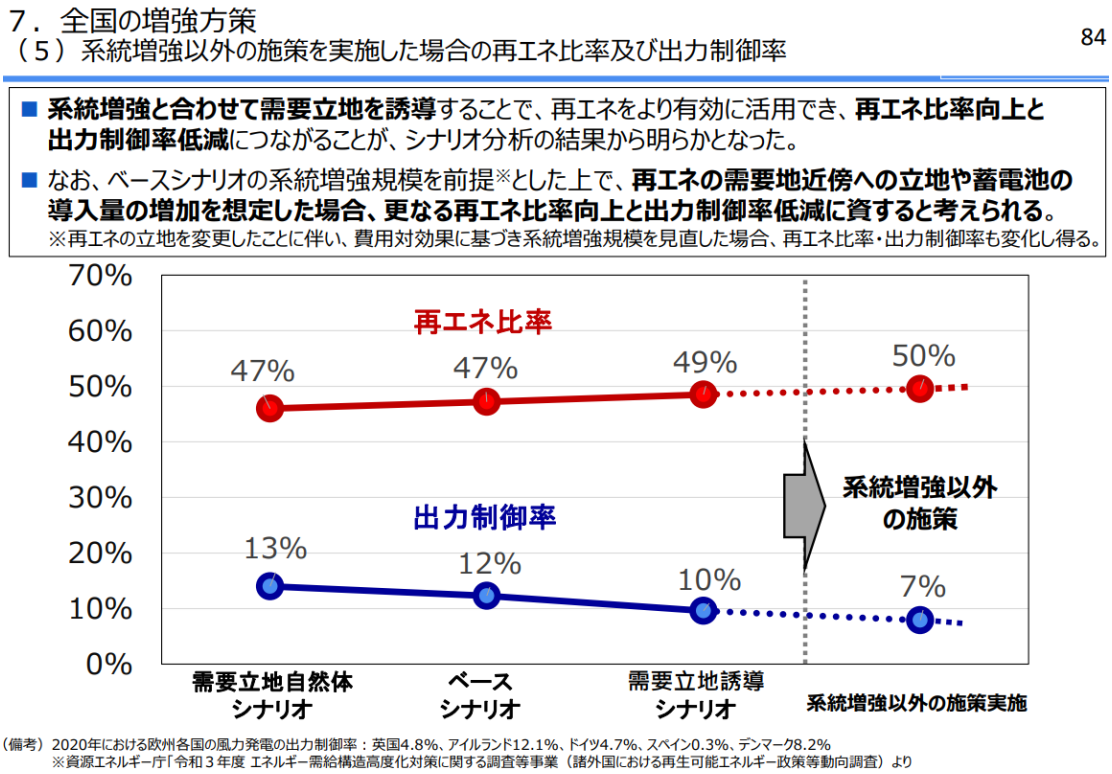
出所：広域機関（2023a）表 4

図 5. OCCTO マスタープラン（案）のベースシナリオにおける増強方策



出所：広域機関（2023a）図 14

図 6．OCCTO マスタープラン（案）のシナリオ毎の自然エネルギー比率と出力制御率の関係



出所：広域機関（2023b）p.84

自然エネルギーによる脱炭素化のための送電網のあり方

2023 年 4 月 初版

公益財団法人 自然エネルギー財団
〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-10-5 KDX 虎ノ門 1 丁目ビル 11F
TEL：03-6866-1020
E-mail: info@renewable-ei.org