

「次世代洋上直流送電システム開発事業
システム開発／要素技術開発」

事業原簿【公開】

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 スマートコミュニティ部
-----	--

概 要

プロジェクト用語集

1. 事業の位置付け・必要性について	1-1
1. 事業の背景・目的・位置づけ	1-1
1.1 背景	1-1
1.2 目的・位置づけ	1-5
1.3 目的の妥当性	1-6
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	1-18
2.1 NEDO が関与することの意義	1-18
2.2 実施の効果	1-18
2. 研究開発マネジメントについて	2-1
1. 事業の目標	2-1
2. 事業の計画内容	2-2
2.1 研究開発の内容	2-2
2.2 研究開発の実施体制	2-15
2.3 研究開発の運営管理	2-16
2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	2-18
3. 情勢変化への対応	2-19
4. 評価に関する事項	2-19
3. 研究開発成果について	3-1
1. 事業全体の成果	3-1
2. 研究開発テーマの成果と達成度及び最終目標に向けた今後の課題、課題解決の見通し ...	3-2
4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	4-1
1. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	4-1

(添付資料)

添付資料 1 プロジェクト基本計画

添付資料 2 事前評価関連資料 (事前評価書、パブリックコメント募集の結果)

添付資料 3 特許論文等リスト

概要

		最終更新日	2017年9月25日	
事業名	次世代洋上直流送電システム開発事業／システム開発／要素技術開発	プロジェクト番号	P15002	
担当推進部/ 担当者	スマートコミュニティ部（2017年9月現在） スマートコミュニティ部 吉川 信明（2016年4月～現在） スマートコミュニティ部 日向野 誠（2016年4月～現在） スマートコミュニティ部 東 太郎（2017年4月～現在） スマートコミュニティ部 近藤 あさ美（2016年7月～現在） スマートコミュニティ部 臼田 浩幸（2016年4月～2016年7月） 新エネルギー部 吉川 信明（2015年6月～2016年3月） 新エネルギー部 日向野 誠（2015年6月～2016年3月） 新エネルギー部 松本 未生（2015年7月～2016年3月）			
0. 事業の概要	本事業では、高い信頼性を備え、かつ低コストで実現する世界トップクラスの送電容量（電圧±500kV、容量1GW）を有する多端子直流送電システムと必要な要素技術を開発し、今後の大規模洋上風力の連系拡大・導入拡大・加速に向けた基盤技術を確認することを目的として、多端子直流送電システムと実用化に新たに必要となる要素技術を開発する、「システム開発」と「要素技術開発」の2つの研究開発項目を一体的に推進する。			
1. 事業の位置付け・必要性について	<p>我が国は、エネルギー源の中心となっている化石燃料に乏しく、エネルギーの安定的な確保は安全保障にとって不可欠なものであり、長期的、総合的かつ計画的な視点に立ってエネルギー政策を遂行していくことが必要である。エネルギー政策の着実な遂行を確保することを目的として、2002年6月に「エネルギー政策基本法」が制定され、同基本法に基づき策定された、「第四次エネルギー基本計画」（2014年4月閣議決定）は、中長期のエネルギー需給構造を視野に入れ、今後取り組むべき政策課題と、長期的、総合的かつ計画的なエネルギー政策の方針をまとめている。エネルギー政策の中で、再生可能エネルギーは、エネルギー安全保障に寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギーと位置づけ積極的に推進していく方針を掲げている。そして、同計画に基づいて2015年7月に決定した「長期エネルギー需給見通し」においては、2030年度の一次エネルギー供給における再生可能エネルギーの割合を13～14%程度とすることを目標とし、2030年度の電源構成の中に占める再生可能エネルギーの割合は22～24%程度としている。</p> <p>また、世界的な平均気温上昇による気候変動に対する取り組みとして、温室効果ガス排出削減等のための新たな国際枠組み「パリ協定」が2015年12月にCOP21において採択された。本協定における枠組みのもと、我が国の温室効果ガスの削減目標を2030年度に温室効果ガスを2013年度に比べて26%減とすることを盛り込んだ約束草案を2015年7月に取りまとめ、国際気候変動枠組条約事務局へ提出した。こうした流れを踏まえ、2016年5月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」では、長期的な目標として2050年までに80%の温室効果ガス排出削減を目指すとの方向性が盛り込まれており、具体的な施策の一つに温室効果ガスを排出しない再生可能エネルギーの導入拡大が掲げられ、各電源の個性に応じた最大限の導入拡大と国民負担の抑制の両立を実現するとしている。</p> <p>再生可能エネルギーの一つである風力は、大規模に開発できれば経済性を確保できる可能性があるエネルギーであり、世界における風力発電の導入量は2016年末には累計48,700万kWとなっており、2016年1年間の導入量で見ると5,500万kWと大規模に導入が進んでいる。一方、我が国の風力発電の導入状況は、日本風力発電協会（JWPA）の報告によると殆どが陸上風力であり、2016年末時点で323万kWである。これは、2030年度のエネルギー需給見通しの風力発電分（1.7%程度）を設備容量に換算した約1,000万kWに対して3割に満たない。このうち、洋上風力発電の導入量は「固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト」によると認定容量で1.9万kW（2016年11月末時点）であり全体の導入量の1%に満たない。現在は、港湾区域などの近海で洋上風力発電の導入に向けた取組が進められているところであり、同時に、将来に向けた大規模洋上WFの導入を促進するための対策を進める必要がある。</p> <p>我が国の洋上風力の導入ポテンシャルは、環境省が毎年度発行している「再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書」において整理されている。平成26年8月に発行された平成25年度と同報告書では、自然条件による開発不可条件を控除した条件付き導入ポテンシャルは約1,380百万kWと推計され、導入ポテンシャル（設備容量）の内訳は、28%（386百万kW）を北海道エリア、次いで九州エリアが26%（359百万kW）、東北エリアが16%（221百万kW）となっており、3つのエリアで全体の約70%を占めている。我が国の洋上風力の導入ポテンシャルは、①沿岸に帯状に分布していること、②北海道エリア、東北エリア、九州エリアの一部にポテンシャルが集中していることが特徴であり、①については、我が国の海域が離岸すると水深が急に深くなるのが要因として挙げられる。</p>			

一方、我が国では固定価格買取制度の導入により急速に太陽光発電が導入され、現在、太陽光や風力発電の適地とされている、北海道、東北、九州において系統の空き容量不足および周波数変動の課題が顕在化しており、系統の送電容量の増加、発電事業者側の出力制御や調整力の確保が求められている。洋上風力もこれらの地域が適地であり、電力大需要地から物理的な距離が離れているため、大規模洋上 WF を設置する場合、大規模洋上 WF が複数導入されている欧州のように遠浅な海域に面的に、かつ遠方に洋上 WF が拡大する形態ではなく、沿岸に沿って帯状に洋上 WF が順次導入されていくと想定される。一方、導入規模と設置場所によっては送電系統の空き容量不足により、洋上 WF と近くの陸上系統を 1 対 1 で接続することが難しく、さらに新規に陸上に送電系統を構築することは制約がある。従って、複数の洋上 WF と既存の比較的大きな電力系統や需要地とを多端子で接続し、効率的に送電することが可能な多端子洋上直流送電システムが大規模洋上 WF の導入拡大に必要である。

今後、我が国において、再生可能エネルギーを導入拡大するためには、洋上風力を大規模に設置する必要があるが、大規模な洋上 WF を設置する場合、沿岸部の送電網の整備状況等によっては、海中ケーブルによる長距離送電を行うことで、比較的大きな接続可能量を持つ上位の送電系統に、あるいは需要地に直接接続する必要がある。新規に地上に送電系統を構築する事の制約などから、洋上と陸上の複数のポイントを相互に接続する多端子の直流送電システムが有効である。

本事業では、高い信頼性を備え、かつ低コストで実現する世界トップクラスの送電容量（電圧±500kV、容量 1GW）を有する多端子直流送電システムと必要な要素技術を開発し、今後の大規模洋上風力の連系拡大・導入拡大・加速に向けた基盤技術を確立することを目的として以下の 2 つの研究開発項目を設定した。

1 つ目の研究開発項目は、「システム開発」である。システム開発では、日本海域の洋上風力適地へ大規模洋上 WF を複数地点導入することを仮定し、経済性を考慮した洋上 WF の集電系統と送電系統の計画・設計を行う。また、多端子直流送電システムの解析モデルを開発し、様々なケーススタディを通じて自励式交直変換器の制御・保護方式への要求仕様を検証するとともに、自励式変換器間での情報の取り合いや上位や下位の制御方法を整理し、異メーカ連系接続を可能とするシステム標準化に向けた検討を行う。なお、研究開発成果は、国内の電力会社やメーカなどの想定ユーザーへ向けて広く発信することで我が国への案件形成につなげることを狙いとしている。

2 つ目の研究開発項目は、「要素技術開発」である。要素技術開発では、低コストで高信頼性を兼ね備えた多端子洋上直流送電システムを実現する上で必要となる直流遮断器、そして、従来の自励式直流送電システムよりコスト低減が見込めるケーブルジョイントや洋上 PF 基礎などを開発する。なお、本事業で開発する要素技術はシステムの高信頼化と低コスト化に貢献するだけでなく、既存技術と合わせて海外の直流送電の市場へ参入し、我が国の関連分野に対する国際競争力の維持・向上に資することを狙いとしている。

システム開発で行うモデルケースの検討およびモデル解析は、要素技術開発からフィードバックされるコスト削減効果や特性値などを盛り込んで実施するほか、システム開発のモデル解析により得られる耐電圧レベルや通信方式といった機器仕様などの情報は要素技術開発へフィードバックして設計仕様へ反映する。このように、システム開発と要素技術開発は互いに協調して事業目標の達成に向けて一体的に推進している。

2. 研究開発マネジメントについて

事業の目標	<p>(I) システム開発</p> <p>【最終目標】（2019 年度末（平成 31 年度末））</p> <p>多端子洋上直流送電システムのモデルケースから、導入を想定した 1~3 ケースを選択・システム設計し、また、要素技術開発されたコンポーネントのプロトタイプにおいて試験された信頼性データと、それらコンポーネントを選択したモデルケース向けに設計した特性を用いて、既存の交流送電システムに対して、平均稼働率（信頼性）等を含めたコスト削減割合 20%以上の導入モデルケースを完成する。</p> <p>【中間目標】（2017 年度末（平成 29 年度末））</p> <p>システム開発として多端子洋上直流送電システムの設計・調達・建設（EPC）と運転・保守（O&M）等を検討した結果を使い、また、多端子洋上直流送電システム向けに要素技術開発するコンポーネントの特性を使い、モデルケースの可能性検討を行い、既存の交流送電システムに対して、コスト削減割合 20%を得る。</p> <p>(II) 要素技術開発</p> <p>【最終目標】（2019 年度末（平成 31 年度末））</p> <p>要素技術開発されたコンポーネントのプロトタイプの信頼性試験を行い、また、選択されたモデルケースに向けた設計と特性検討、あるいは、設計と試作、性能試験を行い、それらコンポーネントの仕様を完成する。あわせて、既存の交流送電システムに対して、そのモデルケースの平均稼働率（信頼性）等を含めたコスト削減割合 20%以上へ貢献する。</p>
-------	--

	<p>【中間目標】（2017年度末（平成29年度末）） 多端子洋上直流送電システム向けに新たに必要となるコンポーネントのプロトタイプ設計と試作、性能試験を行い、モデルケースから要求される特性を得る。あわせて、既存の交流送電システムに対して、モデルケースのコスト削減割合20%へ貢献する。</p>						
事業の計画内容	主な実施事項	H27fy	H28fy	H29fy	H30fy	H31fy	
	研究開発項目① システム開発						→
	研究開発項目② 要素技術開発						→
開発予算 (単位:百万円) ※()数字は見込	会計・勘定	H27fy	H28fy	H29fy	H30fy	H31fy	総額
	一般会計						
	特別会計 (需給)	1,041	1,482	(942)	-	-	-
	開発成果促進財源	-	-	-	-	-	-
	総予算額	1,041	1,482	(942)	-	-	-
	(委託)	1,041	1,482	(942)	(800)	(500)	(4,765)
開発体制	経産省担当原課	資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー課					
	委託先	(I)システム開発 ※代表機関 東京電力ホールディングス(株)※、東京電力パワーグリッド(株)※、住友電気工業(株)、(一財)電力中央研究所、東京大学、(株)日立製作所 再委託先：東京都市大学、日新電機(株)、東京工業大学 (II)要素技術開発 大阪工業大学、(株)大林組、住友電気工業(株)、東京電機大学、(株)東芝、(株)日立製作所、古河電気工業(株) 再委託先：大阪電気通信大学、福井工業大学、東北大学、日立 ABB HVDC テクノロジーズ(株)					
情勢変化への対応	将来の我が国への大規模洋上風力の導入拡大に貢献する多端子洋上直流送電システムを開発する本事業は、その位置づけより近々の社会・経済の情勢変化に対し、直ちに事業方針や計画を変更するほどの影響を受けるものではない。しかしながら、「1章 1.3.2 各国の風力発電の政策・動向」や「1.3.5 多端子直流送電システムの実用化に向けた海外の取組」において述べた通り、風力発電の導入が進んでいる国々の情勢や具体的な取組を把握している。加えて、中長期的な視点で我が国の広域系統方針を検討している広域機関の情勢も情報収集しており、これらを踏まえて本事業の方向性と照し合せながら推進している。						
評価に関する事項	事前評価	平成26年度 事前評価実施 担当部 新エネルギー部					
	中間評価	平成29年度 中間評価実施 担当部 スマートコミュニティ部					
	事後評価	平成32年度 事後評価実施予定					
3. 研究開発成果について	1. 事業全体の成果 1.1 システム開発 洋上 WF 地点を3か所仮設定し、既存技術を用いた交流送電と直流送電の多端子送電システムの計画、設計、経済性評価を試算した結果、交流送電システムがコスト的に優位との結果となった。今後、洋上 PF 数や送電ルートなどの最適化設計、そして要素技術からのコスト削減効果を盛り込んで経済性評価を行い、コスト削減割合20%のモデルを得る見込み。 1.2 要素技術開発 直流遮断器は、原理検証器を開発し、低損失で高速遮断を実現する主回路方式を確立した。現在は、数十kV器の開発を進めている。他の要素技術開発は、試作を完了し、評価試験を行った。今後、要素技術のコスト情報、および評価試験等により得られた特性値をシステム開発へフィードバックする。 2. 研究開発テーマの成果 2.1 研究開発項目 I 「システム開発」						

2. 1. 1 国内への洋上 WF 導入における前提条件の整理

洋上風力ポテンシャルの調査のために風況データ等の収集・整備を行い、絞り込み条件を満たすポテンシャルの高い地域を抽出した。

2. 1. 2 洋上集電系統/500kV 直流系統の計画・設計

本研究では、洋上系統の計画・設計に先立ち、供給信頼度の異なる 4 通りの考え方を設定した。また、風況や陸上の交流系統の状況を鑑み、洋上 WF の位置、陸上の連系エリア及び海底ケーブルのルートを具体化した。そして、交流連系と直流連系の場合について、モデル系統を設計し経済性を評価した。今後は、本事業における洋上設備の建設コストの推定方法を検討するとともに、洋上集電系統の具体化を進め、多端子直流送電システムが既存の交流連系システムと比較して、経済性の面などから優位となる条件の整理を進める。

複数の洋上 WF を陸上系統へ連系する送電ネットワークの接続方法導出を数理最適化技術を用いて実施する最適化手法の開発を進め、直流送電システムと交流送電システムのそれぞれについてコスト最小となるシステム構成の評価を可能とし、更には送電距離に対して直流送電システムと交流送電システムとのコスト優位性が逆転する損益分岐点の評価を可能とした。

2. 1. 3 多端子直流送電システムの制御・保護方式の開発、設備の要求仕様の検討

自励式交直変換器の制御・保護方式への要求仕様の作成については、検証に必要なシミュレーション解析モデルを決定し、異社間接続を念頭に置いた標準仕様書案を作成した。検証ツールとして PSCAD/EMTDC および RTDS を採用し、東京電力ホールディングス、東芝、日立製作所での相互検証が可能となる環境整備を行った。それらのツールを用いて、多端子の最小単位である 3 端子系統モデルを作成し、多様な検証を行った。

500 kV 多端子直流送電システムの設備に要求される仕様（耐電圧レベルや避雷器のエネルギー処理責務など）を明らかとするため、電力系統瞬時値解析プログラム XTAP を用いて想定する各種過電圧および異常現象の解析を行う。具体的には、ベースとなる解析ケースの仕様策定と XTAP 上での実際のケース作成、そして、4 種類の過電圧および異常現象の解析を行う。本項目は、2017 年度 1 年間で実施するものであり、現状ではベース解析ケースの仕様策定と XTAP 上での実際のケース作成を完了しており、順調に進捗している。

2. 2 研究開発項目 II 「要素技術開発」

2. 2. 1 直流遮断器の開発

機械遮断器の開発では、断路部および遮断部を高速に駆動するための電磁反発操作機構を開発し、所定の断路性能・遮断性能を達成した。半導体遮断器の開発では、機械遮断部に電流ゼロ点を生成する転流回路部のアルゴリズムを開発するとともに、半導体遮断部の遮断性能の向上（遮断電流 8kA 以上）を実現した。さらに、機械遮断部と半導体遮断部と転流回路部を組み合わせたハイブリッド構成による原理検証試験を実施した。試験にあたって、遮断試験方法を立案するとともに、試験では、原理通りに動作すること、ならびに遮断電流の目標値である 8kA 以上の遮断を確認した。

2. 2. 2 海底ケーブル関連技術開発

海底ケーブル関連技術のコスト削減を目指し 5 つの開発を行っている。1 つ目として、ダイナミックレイティング (DR) 技術を用いた海底ケーブル最適化技術の開発では、ケーブルの温度測定技術の開発、許容電流・導体温度の推定アルゴリズムを開発した。更に検証の為にフィールド試験を予定通り開始した。2 つ目として異径のケーブル導体の接続技術の開発では、導体や絶縁体などの個別部材の接続の要素技術の開発を完了し初期性能試験に着手した。予定通り長期信頼性試験を実施する準備を行っている。3 つ目として、ダイバーレスの低コスト工法である海外の CPS (ケーブル防護材) の導入と評価試験を実施し、その有用性を確認、国内での実事業導入の目処付けを行った。4 つ目として、海底ケーブル敷設コスト低減のためには海底ケーブルのバンドル敷設工法が有望であることを示した。海底ケーブルの船上防護管取付工法を実現するための船上設備を 3D プリンターモデルにて作製し、実機防護管の設計を実施し試作を完了した。最後に、異社間分岐ジョイントを可能とする直流 525kV 級 EB-G を試作し基本的な性能の確認を実施した。

2. 2. 3 洋上 PF 新形式基礎の基盤技術開発

日本沿岸域での地質条件および地震・波浪条件などから、水平抵抗性に優れ、施工の容易なサクシオン基礎が、モノパイルなどの従来基礎形式に比べコストダウンできる可能性が大きいことがわかった。このサクシオン基礎の支持力性能を評価するために、遠心力模型水平載荷実験を行った結果、地震や波浪など載荷速度が速い荷重が作用した場合には、スカート内に負圧が発生することにより静的な水平抵抗の 2~5 割増の抵抗力を発揮することが明らかになった。さらにこの模型実験の再現解析を実施し、解析手法の妥当性を検証した。また想定適用地域において、サクシオン基礎の概略設計を実施し、既往基礎とのコスト比較のための基礎資料を作成した。

	<p>2.2.4 洋上 PF 小型化の検討 次世代の技術として洋上設備の低コスト化への貢献が期待できる、高周波変圧器を用いた自励式変換モジュールの小型軽量化の基盤技術開発、洋上風力発電の直列接続方式の開発などを行っている。</p> <p>①洋上風車の直列接続方式の開発 国内外の文献調査より直列接続方式の適用により洋上 PF が不要となることを確認した。また、直列接続方式のシミュレーション結果等を基に 2 台の永久磁石発電機よりなる模擬試験装置を開発し、種々な実験を実施した。その結果、本方式の有用性を確認できた。</p> <p>②Solid State Transformer 技術を応用した HVDC 変換設備の基礎技術開発 高周波変圧器と高周波発生用変換器を含めた装置を開発して実験を行い、小型化が可能なデータを取得した。FPGA 制御系導入の効果をシミュレーションで確認しキャパシタ・リアクトルの小型化の可能性を高めた。小型化に伴う温度上昇抑制のため冷却系の熱流解析の結果、最適冷却方式の選定で可能であると確認した。リアルタイムシミュレータモデルを構築し、高周波運転時の応答再現を可能とした。</p> <p>③高周波変圧器の開発 高周波変圧器の漏れ磁束を低減する 1 層毎交互巻を検討し、5kVA、500kVA 試作器を用いた実験と解析で巻線損失の低減効果（500kVA 試作器で損失約 30%低減）を実証し、実規模の 500kVA 試作器にて製作可能なことを示した。シミュレーションにより、提案する 1 層毎交互巻高周波変圧器を搭載した DC-DC 変換器の動作を確認した。</p> <p>④ガス絶縁変圧器の洋上変電所への適用検討 現行の直流送電システム用油入変圧器（OIT）の絶縁構成でも、変圧器に印加される電圧が交流のみであればガス化できると推測される。直流電圧が印加される場合には、絶縁設計の観点からガス絶縁変圧器（GIT）の新規開発が必要となる。また変換器用変圧器に GIT を適用する場合、OIT に対して寸法・重量・コストの増加が懸念されることが明らかになった。</p>	
	投稿論文	「査読付き」7 件、「その他」12 件
	特 許	「出願済」11 件（うち国際出願 3 件）
	その他の外部発表（プレス発表等）	「プレスリリース」5 件
4. 実用化・事業化の見通しについて	<p>研究開発項目（Ⅰ）システム開発 本事業の成果が、大規模洋上 WF の計画に活用されるためには、日本において、大規模洋上 WF が複数計画されることが必要となる。案件化に向けて、我が国の広域連系システムの長期方針や整備計画の策定などに携わる広域機関等に対して広く成果を発信し、再生可能エネルギー導入拡大における多端子直流送電システムの重要性・有効性の認知へつなげる。さらに、ユーザーとなりうる電力会社（送配電事業者）に対しても広く成果を発信することで、再生可能エネルギーの導入拡大のための多端子直流送電システムの導入について、案件化に向けた働きかけを行う。また、メーカーやユーザーが参加するシンポジウムなどを開催して成果を広く発し、国内での案件形成の一助とする。なお、多端子直流送電システムの計画・設計、システム制御技術などの設計・解析手法は事業終了と同時に技術確立する見込みである。</p> <p>研究開発項目（Ⅱ）要素技術開発 各実施者とも、本事業終了後 3 年を目途に事業化する計画としている。要素技術開発により事業化計画は異なるが、製品化に向けた作りこみを継続して実施し、必要な設備投資をしたうえで海外案件への参入を含めた活動を開始する計画である。</p> <p>また、それぞれの要素技術開発はそれぞれに市場があるため、早期の参入により知見・経験を積んで、実際に我が国の案件が生じた場合においても、海外企業に対してより競争力を持つと期待される。なお、要素技術開発では、開発を通してシステム開発へ提供するコスト情報、特性値を得るだけでなく、事業期間において実用化に向けた基盤技術を確認する計画である。</p>	
5. 基本計画に関する事項	作成時期	平成 27 年 3 月 制定
	変更履歴	—

用語集

用語	説明
1次(2次)巻線	変圧器における1次(2次)側の巻線のこと。理論的には1次巻線と2次巻線の巻数比が電圧比となる
AVR	自動電圧調整器。Automatic Voltage Regulator
AWEA	米国風力協会。American Wind Energy Association
CPS	ケーブル防護材。Cable Protection System
DCAVR制御	交直変換器の直流側電圧を一定に保つ制御
DC-DC変換器 (DC-DCコンバータ)	直流系統において電圧の昇降圧において用いられ、様々な形式があるが、本対象は交直変換器と変圧器からなる
DCPF	直流プラットフォーム。Direct Current Plat Form
DROOP制御	複数の機器の制御対象変数を目標値付近に保ちたいときに、あるパラメータに対してその制御対象変数の特性を目標付近を通る僅かな傾きを有する直線とすることで、機器間の制御干渉を避ける方法
DTS	分布型温度測定器。Distributed Temperature Sensor
EB-G	SF6ガス中終端接続箱。遮断器などSF6ガスが加圧充填された機器に接続するためにSF6ガス中で使用する接続部。End Box-Gas
ENTSO-E	欧州送電系統運用者ネットワーク。European Network of Transmission System Operators for Electricity
FEM解析	有限要素法(Finite Element Method)を用いた数値解析手法
FIRフィルタ	デジタルフィルタの一つ。有限インパルス応答(Finite Impulse Response)フィルタ
FIT	固定価格買取制度。Feed in Tariff
FPGA	製造後に購入者や設計者が構成を設定できる集積回路。Field Programmable Gate Array
GIS	地理情報システム。Geographic Information System
GIS	ガス絶縁開閉装置。Gas Insulated Switchgear
GTO	直流回路でもゲートに負の電流を流すとオンからオフ状態になる自己消弧型サイリスタ。Gate Turn Off Thyristor
GWEC	世界風力会議。Global Wind Energy Council
Hブリッジ	H型にトランジスタを構成した回路
HVAC	高圧交流送電。High Voltage Alternating Current transmission
HVDC	高圧直流送電。High Voltage Direct Current transmission
IEGT	電子注入促進型絶縁ゲートトランジスタ。Injection Enhanced Gate Transistor
IGBT	絶縁ゲートバイポーラトランジスタ。Insulated Gate Bipolar Transistor
JWPA	日本風力発電協会。Japan Wind Power Association
LCC	相整流変換器。Line Commutated Converters
MMC	モジュラーマルチレベル変換器。自励式変換器の一つで、小さなモジュラー変換器を多数直列に接続し、正弦波に近い交流電圧を出力することが可能。Modular Multilevel Converter
N原則	設備健全時における計画・設計・運用の考え方

N-1 原則	システム内のいずれかの 1 台の機器が単独で故障しても供給支障が生じないように設備の計画・設計・運用を行う考え方。例えば、送電線 1 ルート 2 回線の場合における 1 回線事故(N-1)時には、残りの健全回線で全量を送電できるようにする
OFTO 制度	Offshore Transmission Owner 制度。イギリスにおける洋上送電事業者を定義する事業制度
OWF	洋上ウインドファーム。Offshore Wind Farm
PSCAD/EMTDC	Manitoba 社製シミュレーションソフト。電力系統やパワーエレクトロニクス制御の設計、分析、最適化、検証が可能
RTDS	RTDS テクノロジーズ社製のリアルタイム(実時間)でシミュレーション計算する全デジタルの電力系統解析用シミュレータ。Real Time Digital Simulator
SF6 ガス	6 フッ化硫黄ガス。絶縁媒体や消弧媒体として広く用いられている
SiC	シリコンカーバイド。シリコン(Si)と炭素(C)で構成される化合物半導体材料。高耐圧パワーデバイスとしての特徴を有する素材
SST	ソリッドステートトランスフォーマー(Solid State Transformer)。高周波変圧器を利用して絶縁と変圧を行い、変圧器の体積・重量を商用周波数変圧器から大幅に減少させることが可能
STATCOM	自励式無効電力補償装置。IGBT 等によって無効電力を制御する装置。Static synchronous Compensator
Symmetric Monopole (対称単極)	帰線無し の 2 条直流送電方式 2 条の送電線それぞれに正極性、負極性の直流電圧が印加される
TSO	送電系統運用事業者。Transmission System Operator
VSC	電圧型コンバータ。Voltage Sourced Converter
WF	ウインドファーム。複数の風力発電を集中的に設置した風力発電所。Wind Farm
XTAP	電力中央研究所が開発した、電力系統瞬時値解析プログラム。eXpandable Transient Analysis Program
アモルファス	アモルファス合金。電気特性に優れている
遺伝的アルゴリズム	自然界の生物の進化過程を模擬した最適化アルゴリズムであり、確率的探索手法の一つ
インバーター	直流及び交流から周波数の異なる交流を発生させる(逆変換する)電源回路、またはその回路を持つ装置のこと。逆変換回路や逆変換装置とも言う
インピーダンス	交流回路における電圧と電流の比。単位: Ω
永久磁石同期発電機	回転磁極に永久磁石を用いた同期発電機
エネルギーミックス	「長期エネルギー需給見通し」における電源構成のこと
遠心力模型 水平載荷実験	遠心加速度を付与できる実験装置に 1/N の小型模型を搭載し、Ng の遠心加速度を作用させた場で模型実験を行う手法
押出モールド (EMJ) 方式	あらかじめ工場で作成したエポキシユニットとプレモールド絶縁体を組み合わせて主絶縁を形成する方式。Extrusion Molded Joint
環境アセスメント	環境影響評価
帰線	電気回路を構成する導線のうち、アースに帰る線
艀装装置	敷設船におけるケーブル施工のための装備や設備

供給信頼度	電力供給の信頼度。設備の充足度を表すアデカシーと、系統攪乱への耐性を表すセキュリティの2点で評価される
近接効果	平行導体の導体に流れた電流により発生する磁場により、導体内の電流分布に偏りができること。見かけ上の抵抗値が上昇する
グリッド	送電網。配電網
経済性評価	建設コスト、設備年間経費、送変電や発電機会の損失コストなどから、経済性について評価する手法
系統空き容量	系統運用容量の内、余裕容量。運用容量は、熱容量、系統安定度、電圧安定性、周波数維持面から定まる系統運用上の各限度値のうち、最小の値
高周波変圧器	1~3kHzの高周波における変圧器。高周波化することで変圧器の小型軽量化が可能となる
交直変換器 (コンバーター)	交流電力と直流電力の間の交換を行う変換装置 (converter)
降伏モーメント	降伏状態となる時の曲げモーメント
固定価格買取制度	再生可能エネルギーで発電した電力を長期に固定価格で買取ることを保証する制度
混合整数計画問題	連続変数と整数変数が混在する最適化問題
サージ性過電圧	地絡、短絡、遮断器操作、雷などにより、系統内に瞬間的に発生する高電圧。一般的には絶縁上の問題となる
再生可能 エネルギー	「エネルギー源として永続的に利用することができる」と認められるものとして、太陽光、風力、水力、地熱、太陽熱、大気中の熱その他の自然界に存する熱、バイオマスが規定されている
サイリスタ	電流遮断能力をもたないオン制御デバイス (英語: Thyristor)
サクシオン基礎	基礎部がサクシオン (バケット) 基礎となっている構造形式。バケットと上部のジャケットを一体で設置する
シーケンス	予め定められた順序または手続きに従って制御の各段階を逐次進めていく制御
シース	絶縁体、遮へい層の外傷からの防護、水分や有害物質からの隔離のために用いる層
ジャケット基礎	あらかじめ支持層まで打設した杭に、工場製作したトラス形式のジャケットを設置する構造形式
遮断部	電流を遮断するためのもの。消弧機能をもつ
シャローコスト	洋上風力設備を導入する際に、送電系統運用事業者が基本的に費用負担を行う
充電容量	ケーブル等から発生する容量性リアクタンス
重力式基礎	海底の堅固な地盤に直接基礎を設置し、下部構造および基礎重力により安定を兼ねる形式
自励式	動作や起動をする際に、外部から電力供給を必要としない方式
自励式交直変換器	IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) などを用いた自己転流可能な交直変換器。ブラックスタートや無効電力供給が可能で、系統安定化対策を別に設ける必要がなく、HVDC システムの全体構成を簡略化しやすい
自励式同期発電機	発電機自らが発電した起電力を用いて励磁する同期発電機
数理最適化技術	数式で問題記述し、数理的な計算手法で最適解を求める技術

スナバ回路	電気回路中においてスイッチの遮断時に生じる過渡的な高電圧を吸収する保護回路のこと。
絶縁紙	変圧器などに用いられる電気絶縁紙
絶縁耐力	絶縁破壊を起こさずに印加できる最大の電場
双極	直流送電のうち、本線が+極、-極の2極で構成される方式
損益分岐点	送電距離に対して直流送電システムと交流送電システムとのコスト優位性が逆転する点
ターンオン	オフの状態からオン状態へ切り替えること
ダイオード整流器	ダイオードにより整流(電流を一方向にのみ流す)する装置
体積抵抗率	単位体積当たりの抵抗
ダイナミック レイティング(DR)	送電容量などについて、機器の状態や気象情報などをもとに動的に評価する手法。 Dynamic Rating
多巻線	変圧器の一次側あるいは二次側の巻線が複数で構成されているもの
他励式	動作や起動する際に、外部から電力供給が必要である方式
単一設備故障	系統における一設備が故障すること
単極	直流送電のうち、本線が+極または-極のみで構成される方式
ダンパ巻線	制動巻線
単巻線	変圧器の一次側あるいは二次側の巻線が一つで構成されているもの
断路部	回復電圧に対して絶縁状態を維持するためのもの。消弧機能はない
地域間連系線	電力管内を繋ぐ連系線のこと
着床式洋上 風力発電	海底に基礎を立て風車を設置する方式の風力発電。本文では着床式と略している場合もある
調相設備	無効電力を制御し電圧を一定に保つ設備。電力用コンデンサ、分路リアクトル、静止形無効電力補償装置、調相機などがある
潮流制御	電力の流れ(潮流)の制御。自励式交直変換器であれば、逆潮流(風力等の分散電源から電力系統へ向かう流れ)を含めて、きめ細やかに制御可能
直流遮断器	直流電流を遮断する設備。事故区間の切離しや系統保護のために高速遮断が要求される
地絡	本来絶縁されている電気回路が、絶縁を失い大地と電氣的に接続される状態
抵抗モーメント	基礎が外力に対して抵抗できる曲げモーメント
テープ巻モールド (TMJ)方式	絶縁体と同じ素材のテープを接続部に巻きつけモールドすることで主絶縁を形成する方式。Tape Molded Joint
鉄心	変圧器における磁気回路を構成する部材。素材はケイ素鋼板やアモルファスなど様々な種類があり、動作周波数により選択される
電磁反発操作機構	電磁反発力を用いた操作機構
転流	電流の経路が切り替わること
電流遮断	本文では半導体遮断部による電流遮断を「裁断」と称した
電流ゼロ点	電流がゼロとなる点

電力広域的 運営推進機関	電気事業法に定められた、電気事業の遂行に当たっての広域的運営を推進することを目的とした団体。Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators, JAPAN (OCCTO)
銅損	変圧器などのコイルにおける、巻線の抵抗による損失
熱流体解析	流体の流れおよび熱について、基礎方程式をもとに解析する手法
バスバ	機器内部の回路接続に使用する銅板
バンドル敷設工法	海底ケーブルを敷設する際、多条数を同時に敷設する工法
歪み率	基本波と全高調波の実効値の比
比誘電率	ある物質の誘電率と真空の誘電率との比
表皮効果	導体に通電した高周波電流が誘起させる磁束により、うず電流が発生し導体中心部の電流を打ち消し、導体表面にのみ電流が流れること。見かけ上の抵抗値が上昇する
避雷器	雷撃などによる異常高電圧を大地にバイパスすることで、電気回路を保護する機器。アレスタ(arrester)ともいう
浮体式洋上 風力発電	水深の深い場所にも設置可能な洋上に浮体を浮かべて風車を設置する方式(フローティング方式)。本文では浮体式と略している場合もある
ブラックスタート	外部からの電力供給無しに、自己起動できる機能
プレスボード	植物由来の化学的に高純度なパルプから、すき合わせ板紙抄紙機によって作るボード。電気絶縁紙として用いられる
変換所	直流を交流、または交流を直流へ変換する設備
防護管	海底ケーブルを外傷から保護するために取付ける保護具のこと
巻線損失	変圧器の発生損失のうち巻線により発生する損失のこと。抵抗損と渦電流損がある
マルチベンダ	複数の電力供給事業者。Multi Vendor
無効電力	交流電力のうち、電源と負荷を往復する負荷が消費しない電力。電圧維持のため無効電力を制御する必要がある(無効電力供給や補償など)
メタヒューリスティクス	難解な最適化問題のより良い解を求めるための発見的手法の総称。その手法は生物の問題解決能力を模擬することで生まれた
モノパイル基礎	上部構造が1本杭に支持された構造形式であり、基礎としての杭が下部構造を兼ねる形式
漏れ磁束	変圧器の磁束の内、変圧作用に寄与しない磁束
有限要素法	対象を複数の有限個の要素(メッシュ)に分割し、微分方程式を近似的に解く数値解析手法
洋上プラットフォーム (PF)	洋上における変換所、変電所、調相設備用などのプラットフォーム
洋上風力発電	陸上より風況がよい海上へ設置するのでスケールメリットを最大限生かすことができる風力発電方式。着床式と浮体式の二つがある
リアクトル	電力システムに使用されるインダクタンス形機器。系統への接続・利用方法によって分路リアクトル、直列リアクトル、中性点リアクトル、消弧リアクトル等がある
励磁	コイルに電流を流して磁束を発生させること
レベニューキャップ規制	事業者が得る収益(revenue)に上限を設ける規制

1. 事業の位置付け・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置づけ

1.1 背景

1.1.1 我が国の再生可能エネルギーを取り巻く状況

我が国は、エネルギー源の中心となっている化石燃料に乏しく、その大部分を海外からの輸入に頼るという根本的な脆弱性を抱えており、エネルギーを巡る国内外の状況の変化に大きな影響を受けやすい構造を有している。エネルギーの安定的な確保は、国の安全保障にとって不可欠なものであり、我が国にとって常に大きな課題であり続けている。さらに、国際的な地政学的構造の大きな変化に直面する中で、我が国のエネルギー安全保障を巡る環境は厳しさを増している。このような状況に対応するためには、長期的、総合的かつ計画的な視点に立って、エネルギー政策を遂行していくことが必要である。エネルギー政策の着実な遂行を確保することを目的として、2002年6月に「エネルギー政策基本法」が制定され、同基本法に基づき、2003年10月に「第一次エネルギー基本計画」が策定され、2007年、2010年に第二次、第三次基本計画が策定された。現在の「第四次エネルギー基本計画」（2014年4月閣議決定）は、東日本大震災及び東京電力福島第一原子力発電所事故を始めとして、国内外の大きなエネルギーを巡る環境の大きな変化に対応すべく、中長期のエネルギー需給構造を視野に入れ、今後取り組むべき政策課題と、長期的、総合的かつ計画的なエネルギー政策の方針をまとめている。エネルギー政策の中で、再生可能エネルギーは、エネルギー安全保障に寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギーと位置づけ積極的に推進していく方針を掲げている。そして、同計画に基づいて2015年7月に決定した「長期エネルギー需給見通し」においては、2030年度の一次エネルギー供給における再生可能エネルギーの割合を13～14%程度とすることを目標とし、2030年度の電源構成の中に占める再生可能エネルギーの割合は22～24%程度としている（図1-1）。

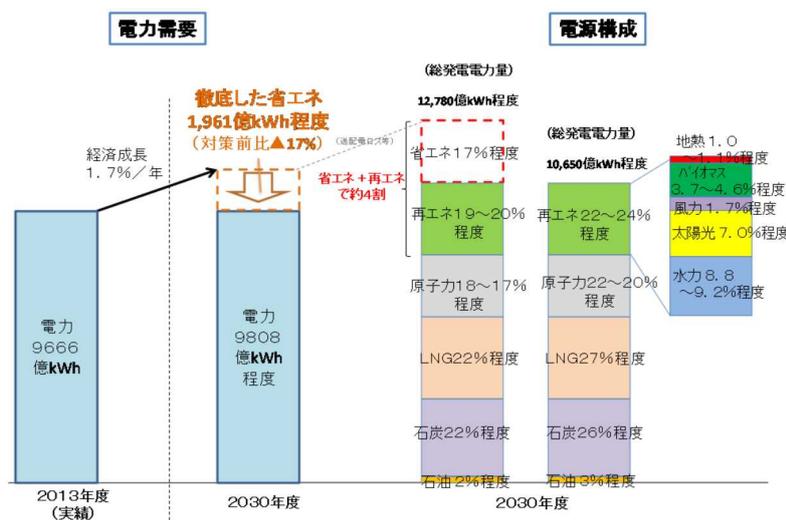


図 1-1 2030 年度の電力の需給構造

また、世界的な平均気温上昇による気候変動に対する取り組みとして、温室効果ガス排出削減等のための新たな国際枠組み「パリ協定」が2015年12月にCOP21において採択された。本協定における枠組みのもと、我が国の温室効果ガスの削減目標を2030年度に温室効果ガスを2013年

度に比べて 26%減とすることを盛り込んだ約束草案を 2015 年 7 月に取りまとめ、国際気候変動枠組条約事務局へ提出した。こうした流れを踏まえ、2016 年 5 月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」では、長期的な目標として 2050 年までに 80%の温室効果ガス排出削減を目指すとの方向性が盛り込まれており、具体的な施策の一つに温室効果ガスを排出しない再生可能エネルギーの導入拡大が掲げられ、各電源の個性に応じた最大限の導入拡大と国民負担の抑制の両立を実現するとしている。

1.1.2 我が国の風力発電の導入方針

再生可能エネルギーの一つである風力は、大規模に開発できれば経済性を確保できる可能性があるエネルギーであり、世界における風力発電の導入量は 2016 年末には累計 48,700 万 kW となっており、2016 年 1 年間の導入量でみると 5,500 万 kW と大規模に導入が進んでいる。一方、我が国の風力発電の導入状況は、日本風力発電協会（JWPA）の報告によると殆どが陸上風力であり、2016 年末時点で 323 万 kW である。これは、2030 年度のエネルギー需給見通しの風力発電分（1.7%程度）を設備容量に換算した約 1,000 万 kW に対して 3 割に満たない（図 1-2）。このうち、洋上風力発電の導入量は「固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト」によると認定容量で 1.9 万 kW（2016 年 11 月末時点）であり全体の導入量の 1%に満たない。現在は、港湾区域などの近海で洋上風力発電の導入に向けた取組が進められているところであり、同時に、将来に向けた大規模洋上 WF の導入を促進するための取り組みを進める必要がある。

洋上風力発電は陸上より風況がよい海上へ設置するのでスケールメリットを最大限生かすことができ、中長期的には陸上風力の導入適地が限定的となることが想定されることから、「第四次エネルギー基本計画」、「地球温暖化対策計画」において洋上風力発電の導入拡大は不可欠であり、港湾区域等における着床式洋上風力の導入を促進するとともに、浮体式洋上風力発電についても、事業化に向けた実証研究等の取組を進めると方針が示されている。さらには、2013 年 4 月に閣議決定された「海洋基本計画」においても、洋上風力発電の実用化と導入拡大のため、インフラ整備を含めた基盤整備を推進する旨が示されている。

なお、風力発電はエネルギー密度が低いため、まとまった電力を送電するためには複数の風力発電を集中的に設置したウィンドファーム（以下、WF）構成とすることが効果的であり、洋上風力発電に関しても同様であることから、今後は洋上風力の導入ポテンシャルのある地域に大規模な洋上 WF を設置し、持続可能な社会の実現や地球温暖化対策の推進に貢献していくことが期待される。



図 1-2 2016 年末の風力発電の導入実績

1.1.3 洋上風力発電の導入ポテンシャル

我が国の洋上風力の導入ポテンシャルは、環境省が毎年度発行している「再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書」において整理されている。平成26年8月に発行された平成25年度の同報告書では、自然条件による開発不可条件（表1-1）を控除した条件付き導入ポテンシャルは約1,380百万kWと推計され、導入ポテンシャル（設備容量）の内訳は、28%（386百万kW）を北海道エリア、次いで九州エリアが26%（359百万kW）、東北エリアが16%（221百万kW）となっており、3つのエリアで全体の約70%を占めている（図1-3）。我が国の洋上風力の導入ポテンシャルは、①沿岸に帯状に分布していること、②北海道エリア、東北エリア、九州エリアの一部にポテンシャルが集中していることが特徴であり、①については、我が国の海域が離岸すると水深が急に深くなることが要因として挙げられる。

表 1-1 洋上風力の導入ポテンシャル推計に係る開発不可条件

区分	項目	開発不可条件
自然条件	風速区分	6.5m/s 未満
	離岸距離	陸地から 30km 以上
	水深	200m 以上

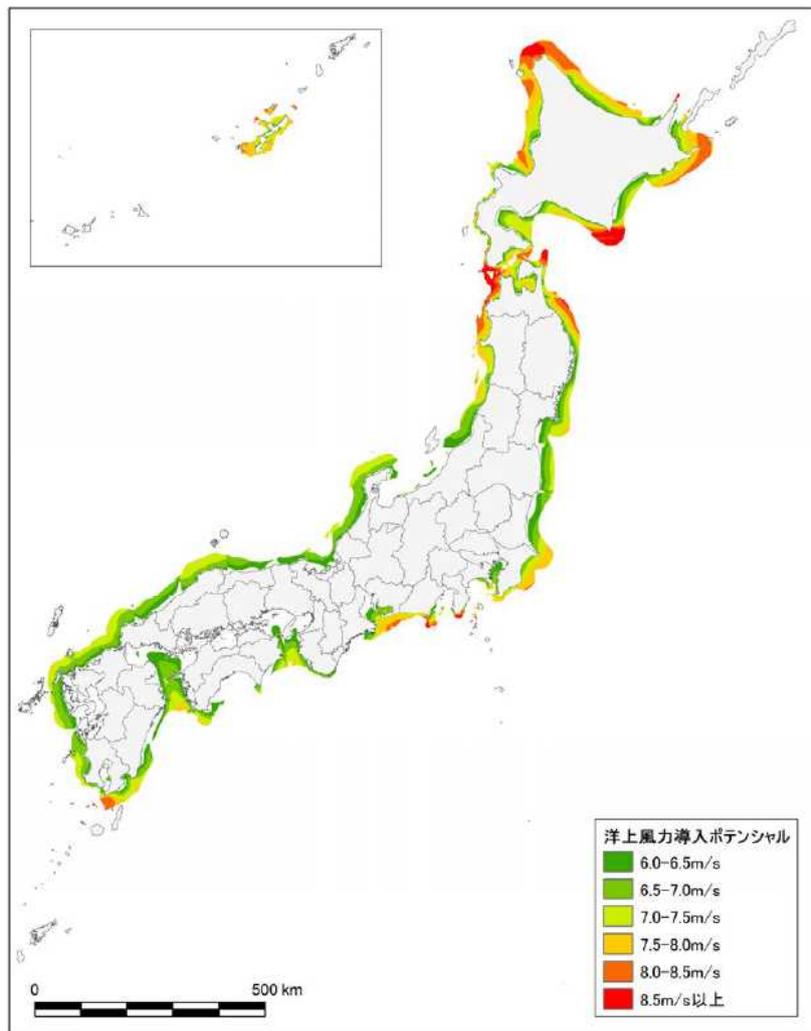


図 1-3 洋上風力の条件付き導入ポテンシャルの分布図

1.1.4 多端子直流送電システムの必要性

我が国では固定価格買取制度の導入により急速に太陽光発電が導入され、2016年11月末時点で導入量3,652万kWを到達しており、既にエネルギーミックスでの導入見込量(約6,400万kW)を大きく超える8,089万kWが認定されている。同時に陸上風力も導入が進んでいる中で、現在、太陽光や風力発電の適地とされている、北海道、東北、九州において系統の空き容量不足および周波数変動の課題が顕在化しており、系統の送電容量の増加、発電事業者側の出力制御や調整力の確保などが求められている。洋上風力もこれらの地域が適地であり、電力大需要地から物理的な距離が離れており、かつ、沖合の水深が急激に大きくなるため、大規模洋上WFを設置する場合、大規模洋上WFが複数導入されている現在の欧州のように遠浅な海域に面的に、かつ遠方に洋上WFが拡大する形態ではなく、沿岸に帯状に洋上WFが順次導入されていくと想定される。

一方、前述の通り、導入規模と設置場所によっては送電系統の空き容量不足などにより、洋上WFと近くの陸上系統を1対1で接続することは難しい。一方で、新規に陸上に送電系統を構築することは制約があることから、複数の洋上WFと既存の比較的大きな電力系統や需要地とを多端子で接続し、効率的に送電することが可能な多端子洋上直流送電システムが大規模洋上WFの導入拡大に必要である(図1-4)⁽¹⁾。

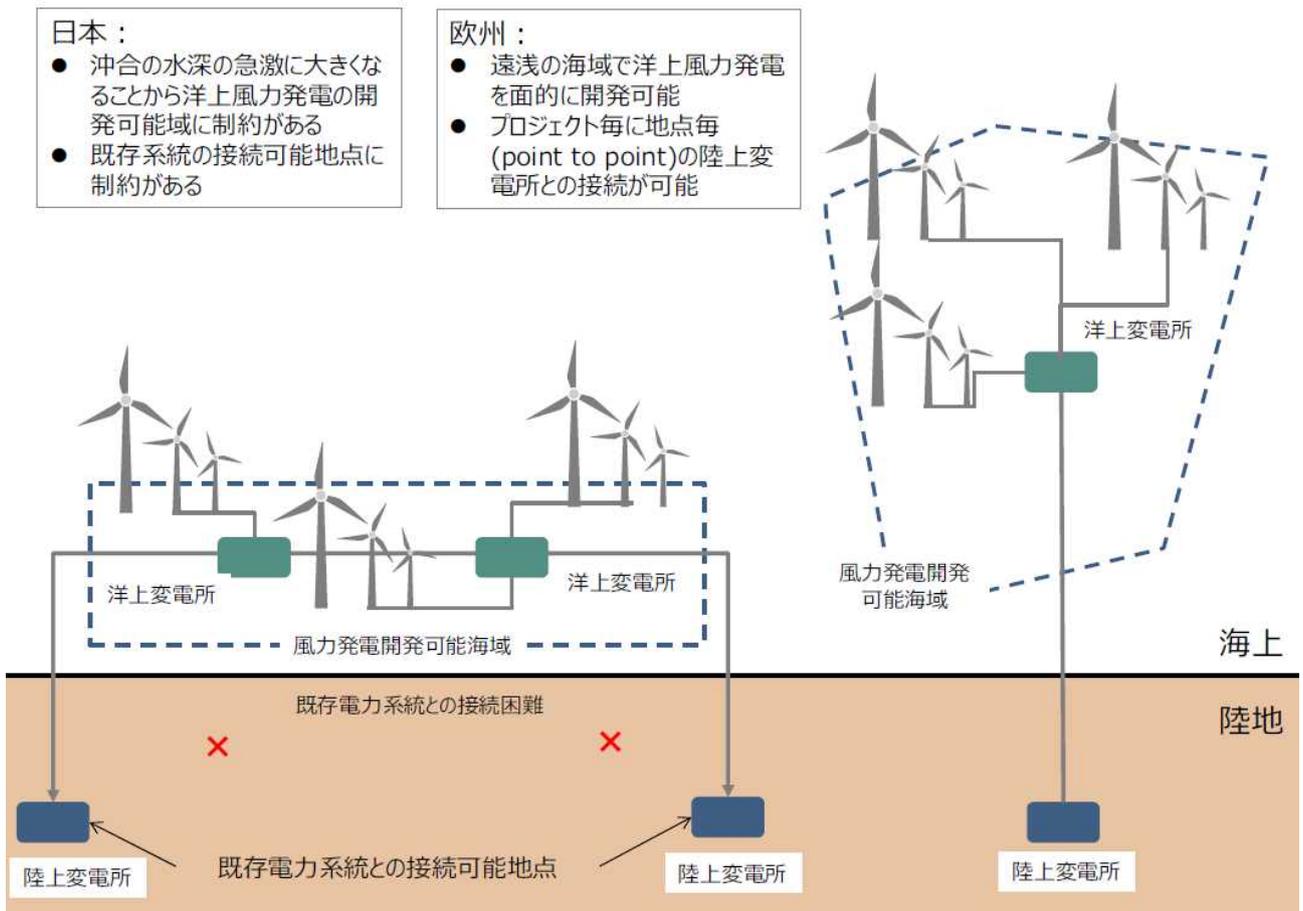


図1-4 欧州と日本の風力発電用送電設備形成イメージ⁽¹⁾

現在、欧州の洋上WFの容量は数百MWのものが主流で、将来的にはGWクラスの実現すると予想されており、複数のWFの電力を送電する多端子直流送電システムもGWクラスの送電容量が要求されるが、現時点ではGWクラスが多端子直流送電システムは実用化されていない。

一方、近年の自励式のパワー半導体デバイスの技術向上による大容量化により自励式直流送電システムの導入事例が増えてきている。自励式直流送電は従来の他励式直流送電と比較して、非常に制御性が高いことから、多端子化が容易であり、低損失な電力変換技術の確立と変換器の大容量化に伴い実用化に向けた動きが世界で加速している。

なお、事業化に向けてコスト低減は重要な要素であり、従来の構成要素の設計方法、建設方法からより低損失化・効率化を図るための技術開発も必要である。

1.2 目的・位置づけ

今後、我が国において、再生可能エネルギーを導入拡大するためには、洋上風力を大規模に設置する必要があるが、大規模な洋上 WF を設置する場合、沿岸部の送電網の整備状況等によっては、海中ケーブルによる長距離送電を行うことで、比較的大きな接続可能量を持つ上位の送電系統に、あるいは需要地に直接接続する必要がある。新規に地上に送電系統を構築する事の制約などから、洋上と陸上の複数のポイントを相互に接続する多端子の直流送電システムが有効である。

本事業では、高い信頼性を備え、かつ低コストで実現する世界トップクラスの送電容量（電圧±500kV、容量1GW）を有する多端子直流送電システムと必要な要素技術を開発し、今後の大規模洋上風力の連系拡大・導入拡大・加速に向けた基盤技術を確立することを目的として以下の2つの研究開発項目を設定した。

1つ目の研究開発項目は、「システム開発」である。システム開発では、日本海域の洋上風力適地へ大規模洋上 WF を複数地点導入することを仮定し、経済性を考慮した洋上 WF の集電系統と送電系統の計画・設計を行う。また、多端子直流送電システムの解析モデルを開発し、様々なケーススタディを通じて自励式交直変換器の制御・保護方式への要求仕様を検証するとともに、マルチベンダ化に向けて、自励式変換器間での情報の取り合いや上位や下位の制御方法を整理し、異メーカー連系接続を可能とするシステム標準化に向けた検討を行う。なお、研究開発成果は、国内の電力会社やメーカーなどの想定ユーザーへ向けて広く発信することで我が国への案件形成につなげることを狙いとしている。

2つ目の研究開発項目は、「要素技術開発」である。要素技術開発では、低コストで高信頼性を兼ね備えた多端子洋上直流送電システムを実現する上で必要となる直流遮断器、そして、従来の自励式直流送電システムよりコスト低減が見込めるケーブルジョイントや洋上 PF 基礎などを開発する。なお、本事業で開発する要素技術はシステムの高信頼化と低コスト化に貢献するだけでなく、既存技術と合わせて海外の直流送電の市場へ参入し、我が国の関連分野に対する国際競争力の維持・向上に資することを狙いとしている。

システム開発で行うモデルケースの検討およびモデル解析は、要素技術開発からフィードバックされるコスト削減効果や特性値などを盛り込んで実施するほか、システム開発のモデル解析により得られる耐電圧レベルや通信方式といった機器仕様などの情報は要素技術開発へフィードバックして設計仕様へ反映する。このように、システム開発と要素技術開発は互いに協調して事業目標の達成に向けて一体的に推進している。

1.3 目的の妥当性

1.3.1 関連する上位政策

前述の通り、大規模洋上 WF の導入拡大には大容量を長距離送電出来る多端子洋上直流送電システムが極めて有効な技術であり、さらに、浮体式洋上発電の事業化においても本事業の果たす意義は大きい。従って、以下の上位政策の下線部の目標達成に本事業は大きく寄与するといえる。

(1) エネルギー基本計画(第四次計画)

第3節 再生可能エネルギーの導入加速～中長期的な自立化を目指して～

1. 風力・地熱の導入加速に向けた取組の強化

(1) 風力

風力発電設備の導入には、地元との調整や、環境アセスメントのほか、立地のための各種規制・制約への対応が必要となり、固定価格買取制度の下でも、これらの対応の必要性が小さい太陽光発電設備の導入と比べて導入に時間がかかることから、太陽光発電の導入増加のような動きとはなっていない。また、先行して導入が進む太陽光発電の供給のために現在の送電網の容量が利用され、接続余地が狭くなっていくという問題や、風車の落下事故の発生等、導入拡大に向けた課題も存在する。

このため、風力発電設備の導入をより短期間で、かつ円滑に実現できるようにするため、環境アセスメントの迅速化や電気事業法上の安全規制の合理化等の取組を引き続き進める。

加えて、再生可能エネルギーを受け入れるための地域内送電線や地域間連系線が必要となることから、まず、風力発電事業者からの送電線利用料による地域内送電線整備に係る投資回収を目指す特別目的会社の育成を図っていく。また、出力変動のある再生可能エネルギーの導入拡大に対応するため、電力システム改革において新たに広域的運営推進機関を設置し、周波数変動を広域で調整する仕組みを導入するとともに、同機関が中心となって地域間連系線の整備等に取り組む。あわせて、再生可能エネルギーの変動を吸収するための大型蓄電池や水素の活用も促す。大型蓄電池については、変電所等への導入実証や国際標準化とともに、38 現在普及の壁となっているコストの問題について、低コスト化に向けた技術開発等を実施することで、2020年までに現在の半分程度までコストを低減する。

～中略～

②洋上風力

中長期的には、陸上風力の導入可能な適地が限定的な我が国において、洋上風力発電の導入拡大は不可欠である。

着床式洋上風力については、2012年より銚子沖と北九州沖に実機を設置し、設置工法、気象条件、発電量など事業化に向けた必要なデータの取得を進めつつある。これらのデータや海外における実用化の事例等を踏まえ、2014年度から固定価格買取制度における新たな価格区分の設定がなされたところであり、引き続き取組を強化する。

また、浮体式洋上風力についても、世界初の本格的な事業化を目指し、福島沖や長崎沖で実施している実証研究を進め、2018年頃までにできるだけ早く商業化を目指しつつ、技術開発や安全性・信頼性・経済性の評価、環境アセスメント手法の確立を行う。

(2) 地球温暖化対策計画

第2節 地球温暖化対策・施策

1. 温室効果ガスの排出削減、吸収等に関する対策・施策

(1) 温室効果ガスの排出削減対策・施策

① エネルギー起源二酸化炭素

E. エネルギー転換部門の取組

(b) 再生可能エネルギーの最大限の導入

・ 風力発電

大規模に開発できれば経済性を確保できる可能性があり、発電設備の高効率化・低コスト化に向けた技術開発を進める。また、環境や地元配慮しつつ、風力発電設備の導入をより短期間で、かつ円滑に実現できるよう、環境アセスメントについて、迅速化などの取組を引き続き進めるとともに、国と地方公共団体が協力し、環境保全に配慮しつつ事業の不確実性を減らすよう導入促進に向けたエリアの設定についても検討を行う。

また、北海道や東北北部の風力適地では、必ずしも十分な系統調整力がないことから、地域間連系線などの系統整備や系統運用の高度化等に向けた技術開発に取り組む。

中長期的には、陸上風力の導入可能な適地が限定的な我が国において、洋上風力発電の導入拡大は不可欠であり、港湾区域等において着床式洋上風力の導入を促進するとともに、浮体式洋上風力発電についても、世界初の本格的な事業化に向けた実証研究などの取組を進める。

(3) 海洋基本計画

7 海洋科学技術に関する研究開発の推進等

(1) 国として取り組むべき重要課題に対する研究開発の推進

エ 海洋再生可能エネルギーの開発に関する研究開発

○洋上風力発電の実用化と導入拡大のため、技術開発及び実証を推進する。また、専用船等のインフラや、基盤情報など、洋上風力発電の普及のための基盤整備を推進する。

1.3.2 各国の風力発電の政策・動向

(1) 欧州

欧州レベルの政策としては、再生可能エネルギー政策の1つのマイルストーンは2001年に発行した「再生可能資源からのエネルギーの利用促進に関する指令(2001/77/EC)」(通称「RES指令」)となる。RES指令は2001年に発行された後、2009年に改正され、特に2001年時点では指示的目標(努力目標)であった各国導入目標が2009年改正時には義務的目標に代わり、さらに強い拘束力を持つようになっている。RES指令では2020年の欧州のエネルギー消費に対する再エネ比率を20%以上にするを掲げているが、各国に義務付けられた目標を達成するための手段は各国の裁量に委ねられている。そのため、FIT(Feed in Tariff、全量買取制度)、RO(Renewable Obligation、再生可能エネルギー義務)、RPS(Renewable Portfolio Standard、再生可能エネルギー利用割合基準)、TGC(Tradable Green Certificate、取引可能な再生可能エネルギー証書)など各国様々な支援政策が講じられた。⁽³⁾ なお、2030年の欧州のエネルギー消費に対する再生可

能エネルギーの比率を27%以上にすることを目標に掲げた「改定 RES 指令」の制定に向けたプロポーザルが2016年11月に発行された。

「RES 指令」により設定された再生可能エネルギーの導入目標を達成するための重要な政策である、2020年の風力発電の導入目標がNREAPs (National Renewable Energy Action Plans) において掲げられている。これによると、欧州の2020年時点の風力の導入目標は、陸上170GW、洋上37GWの計207GWとしている。GWECによると、欧州の2016年の導入量は14GW、全体で161GWである。

(2) 中国

中国国家発展改革委員会は2017年1月17日、2016～2020年のエネルギー政策の基本方針を示す「エネルギー発展第13次5カ年計画」を発表した。これと前後して電力全般や石炭、天然ガス、風力、太陽光などに関する各論の5カ年計画も順次発表されている。第13次5カ年計画では、一次エネルギー消費の増加率を5年間で年平均3%以内に抑えた上で、2020年の一次エネルギー消費に占める石炭比率を58%以内(2015年は64%)に抑制する方針である。一方、非化石エネルギー比率を15%(同12%)、天然ガス比率を10%(同5.9%)に引き上げる方針である。2020年時点での総発電装置容量を20億kWとしており、年平均の増加率は5.5%を見込んでいる。その内、風力発電は2.1億kW(同1.29億kW)まで増強し、年平均増加率は9.9%を見込んでいる。

「エネルギー発展第13次5カ年計画」に基づく風力発電の導入計画によると、2020年までに年9.9%の増加の想定のもと、全体で210GWの導入目標を掲げており、うち、5GWを洋上風力としている。GWECによると2016年の風力発電の導入量は23GWであった。全体では169GWを達成しており、うち、洋上風力発電は1.6GWである。

(3) 米国

環境保護局(EPA)が2014年6月2日に発表した、発電所からのCO₂排出量を2030年までに2005年に比べて30%削減することを目標とした規制案「クリーン・パワー・プラン Clean Power Plan」では、CO₂排出削減の目標達成の方法として、石炭火力から天然ガス火力へのシフト、既存発電技術の効率向上、省エネ技術の導入による促進などとともに、再生可能エネルギーや原子力発電などの低炭素電源を開発していくことが重要施策として盛り込まれている。再生可能エネルギーの促進支援策として、州ごとにさまざまな支援策があるが、連邦レベルでは投資税額控除(ITC: Investment Tax Credit)や風力発電を対象とした発電税額控除(PTC: Federal Production Tax Credit)が実施されている。

米国エネルギー省(DOE)が2015年3月に発行したWIND Visionによると、電力需要に対する風力発電からの供給の比率を2020年までに10%(113GW)、2030年までに20%(224GW)、2050年までに35%(404GW)とする目標を掲げている。さらに、洋上風力発電については、2020年までにマーケットとサプライチェーンの構築、2030年までに電力需要に対して2%(22GW)、2050年までに7%(86GW)の導入目標を掲げている。AWEAによると2016年には、全電力量に占める風力発電の割合が5.5%(2015年は4.7%)となったと発表している。導入量では、GWECによると2016年の風力発電の導入量は9.4GWであった。全体では97.6GWを達成している。洋上風力に関しては2016年12月に東海岸ロードアイランド州ブロック島に米国初の「Block Island Wind Farm」が運転を開始した。設備容量は30MW(6MWの洋上風車を5基)である。

主要3地域における風力発電の導入計画、および2016年の導入実績から、各地域とも導入目標の達成に向けて、今後ますます導入拡大に向けた政策を講じ、洋上風力については、先行する欧州に続き北米や中国も導入に向けて加速していくものと考えられる。

1.3.3 欧州の洋上風力発電の導入に向けた取組

Wind EUROPEの報告では、欧州地域が2016年時点で12,631MW(1,263万kW)と世界の90%近くを導入しており洋上風力市場を先導している。また、The European offshore wind industryによると、2020年までに24.6GW(2,460万kW)の洋上風力発電の導入を見込んでおり、今後も積極的な導入が計画されている。また、洋上WFの大容量化と離岸距離の長距離化、大水深化が進んでおり、WIND EUROPEの2016年の報告書によると今後の洋上WFの離岸距離は100km超、水深も40mを超える地点での導入計画が増えてきている(図1-5(a))。加えて、洋上WFの容量も1GW超の洋上WFが計画されている(図1-5(b))。

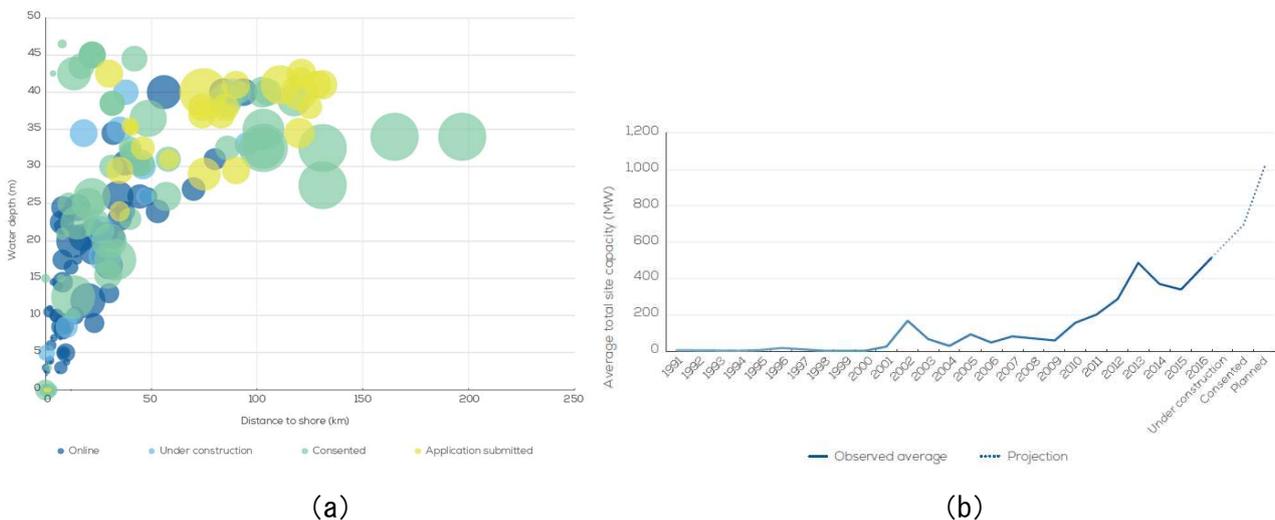


図1-5 欧州における洋上WFの規模と離岸距離と深さの推移(a)、洋上WF容量の推移(b)

ドイツを例に挙げると、2016年時点の洋上風力発電の導入量は4.1GWで英国に次いで世界第2位である。また、洋上風力発電向けの送電設備に直流送電システムが導入されている唯一の国でもある。ドイツとオランダの送電系統運用事業者(TSO)であるTenneTは、北海およびバルト海に面する海域に洋上風力発電設備を導入しているが、洋上WFの設置海域が陸上から離れていることから、洋上変換所を建設しての直流送電システムを多く採用している(表1-3)。

洋上風力の大規模プロジェクトの一つであるDoWin3プロジェクトの構成は、発電機の電力を交流で集約および昇圧した後に、交直変換設備を用いて直流に変換する。そして直流で陸上まで送電を行い、陸上の交直変換所で再び交流に変換して交流系統へ送電する(図1-6)。

表 1-3 ドイツの直流送電を採用した洋上風力プロジェクト

Project	Capacity	Cable distance	Commissioning	Grid Connection
BorWin1	400 MW	200 km	2010	HVDC
BorWin2	800 MW	200 km	2015	HVDC
DolWin1	800 MW	165 km	2015	HVDC
HelWin1	576 MW	130 km	2015	HVDC
HelWin2	690 MW	130 km	2015	HVDC
SylWin1	864 MW	204 km	2015	HVDC
DolWin2	916 MW	135 km	2016	HVDC
DolWin3	900 MW	162 km	2018	HVDC
BorWin3	900 MW	160 km	2019	HVDC

(※ TenneT ホームページより作成)

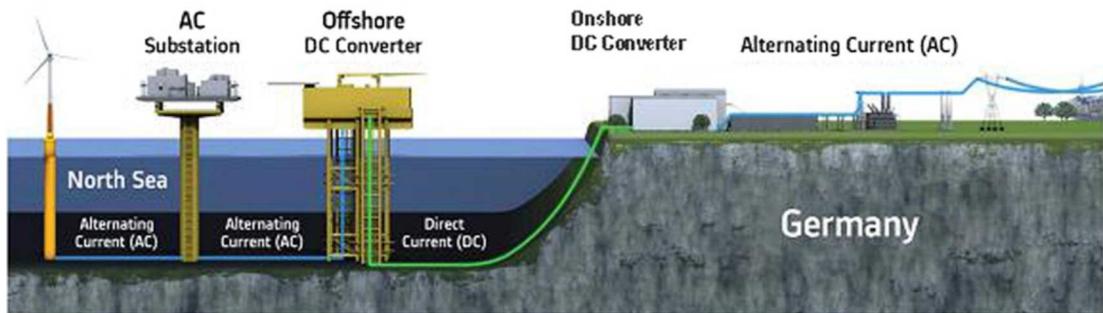


図 1-6 DolWin3 の構成⁽⁴⁾

1.3.4 直流送電システムについて

(1) 直流送電と交流送電

長距離送電になると交流送電より直流送電が選択される理由の一つとして、送電距離に対する導入コストが挙げられる。海底や地中送電線で用いられるケーブル送電の場合、送電距離 50～100km を超えると直流送電が有利になるとされている。これは、直流送電システムには交直変換設備が必要なため短距離であれば交流送電システムの方が安価となるが、長距離になると交流送電システムは無効電力損失が多く発生することから調相設備や多数のケーブルが必要となり導入コストが高くなる。一方、直流送電システムの場合、長距離送電になっても無効電力損失が発生せず調相設備も不要であることから、交流送電より低コストとなる（図 1-7）⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

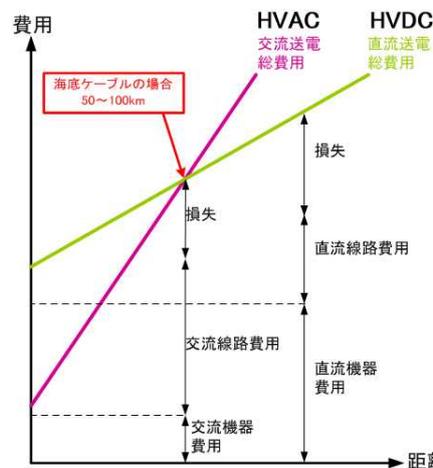


図 1-7 交流送電と直流送電の費用比較

(2) 自励式直流送電システムの有効性

直流送電方式には、実績が豊富な他励式と近年注目され導入実績が増えている自励式がある。他励式はサイリスタ等の電流遮断能力をもたないオン制御デバイスで構成されており、転流動作に系統電圧を必要とする。自励式は、GTO や IGBT 等の電流遮断能力を有するオンオフ制御デバイスで構成されており、自励式変換器自体で転流動作が可能である。また、自励式は他励式と比べて制御性が非常に高く柔軟な潮流制御が可能であるほか、ブラックスタートや無効電力供給も可能で、離島や洋上風力といった弱い系統への接続、系統安定化のためのきめ細やかな潮流制御が必要とされる用途に適している。また、多端子化も容易で、本事業で実用化を目指す多端子直流送電システムも自励式の採用を前提としている（表 1-4）。

表 1-4 他励式変換器と自励式変換器の比較⁽²⁾

項目	他励式(LCC)	自励式(VSC)
転流方式	交流電圧で転流	自己転流
素子	サイリスタ	IGBTなど
無効電力供給	不可	可能
有効電力と無効電力の個別制御	不可	可能
ブラックスタート	不可	可能
連系交流系統の制限	連系点は系統が強い必要がある	連系点の系統が弱くとも連携可能
変換器損失	小	他励より大
フィルタ設備	大規模のものが必要	不要か小規模で可
多端子化	構築・運用が複雑	簡単に構築可

1.3.5 多端子直流送電システムの実用化に向けた海外の取組

欧州では再生可能エネルギー利用が順調に拡大を続けるが、出力変動の激しい風力や太陽光発電の拡大は電力系統の不安定化という課題を引き起こす。これを解決するため各国は新たなエネルギーシステムの構築を目指しており、送電線を隣国とつなぎ電力を融通し合う国際連系の拡大を進めている。従って、今後も洋上風力発電を導入していく欧州にとって、洋上WFの連系と国際連系線の協調は経済性を確保するためにも重要な課題となっていくと考えられ、そのソリューションの一つが多端子直流送電システムとなりうる。以下に、多端子直流送電システムの実用化に向けた取組について説明する。

(1) 多端子直流送電システムの適用可能性

① 洋上送電系統への適用可能性

現状の洋上WFからの電力の送電には、交流も直流も1つの発電設備と1つの陸上変電所（変換所）を送電ケーブルで接続する構成、およびそれを複数並列接続したマルチインフィード構成がとられている。将来的には、広範囲に亘って複数の洋上風力発電設備の導入が行われることも想定されることから、多地点の発電設備を結ぶように洋上送電系統を構成することが検討されている（図 1-8）。バックボーン型は沿岸部に長距離に亘って発電所が配置されるような場合に適しており、送電線の有効活用と供給信頼度の向上が期待できる。本事業でイメージしている多端子洋上直流送電システムの国内への導入ケースに最も近く、沿岸部に直流送電線を配置し、複数の洋上WFと複数の陸上変換所を接続する構想である。この構成では、直流系統内で発生する事故がシステム全体に波及するため、系統規模が大きい場合には直流遮断器を用いた保護と併用する必要がある。また、直流遮断器には、事故発生時に数msオーダーでの確実な遮断と低コスト化、そして、

交直変換器などの他設備との協調が要求されることから、開発には高い技術が必要で、世界的にも大容量の直流遮断器ははまだ実用化されていない。

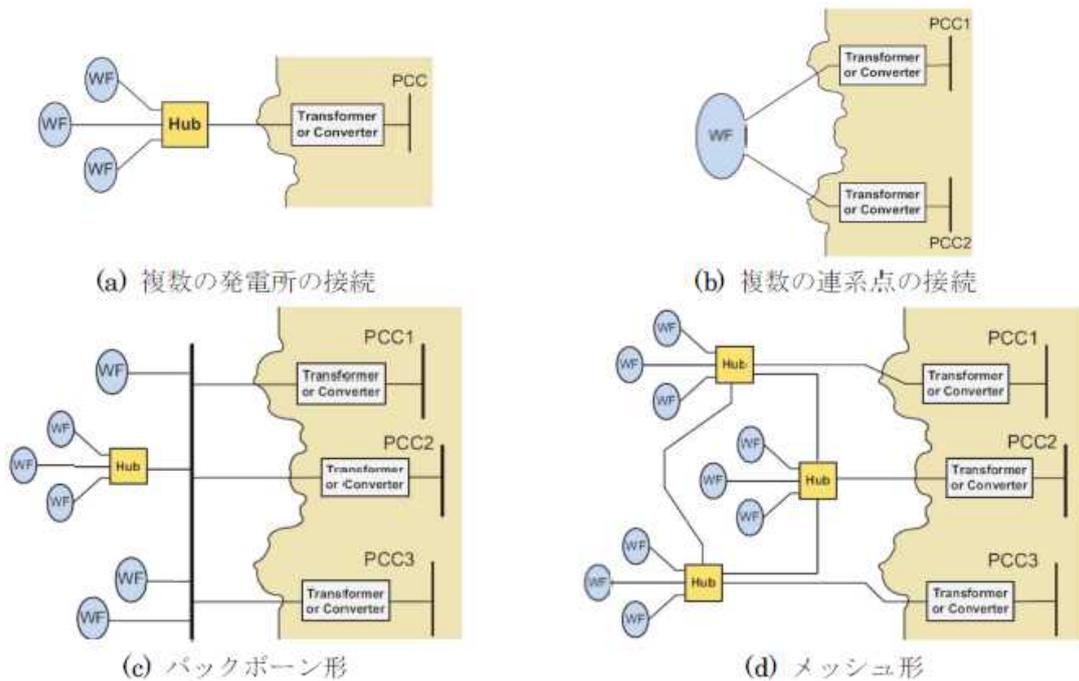


図 1-8 多端子接続を含む洋上送電システムの構成⁽⁸⁾

② 国際連系線への適用

複数の国際連系線により電力システムの域内統一化を進める欧州では、今後の 10 年間の送電ネットワーク開発計画 (TYNDP : Ten-Year Network Development Plan) を、各国の系統運用者 (TSO) をとりまとめる機関である欧州送電系統運用者ネットワーク (ENTSO-e) が策定している。TYNDP は 2010 年に最初のものが策定され、その後、2 年おきに発表されている。最新のものは、TYNDP2016 が 2016 年 12 月に発表された。TYNDP は、加盟国の送電網 10 年開発計画を 6 つの領域グループレベルでまとめた RIP (Regional Investment Plan) を、欧州レベルへと積み上げるボトムアップで策定される。

2015 年 10 月に策定された 6 つの RIP のうち、北海とバルト海域の RIP にデンマークを中心として、ポーランド、ドイツ、オランダ、ノルウェー間の国際連系線を導入する場合の送電方式による費用対効果を評価している。欧州では、CO2 削減のために火力発電の廃炉を進め、さらには原子力発電の比率を下げ、水力や風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーの比率を益々高める方針を掲げている。これを実現するためには、国際連系線を増強して電力流通をより活性化していく必要があるとしている。そこで、1 対 1 の直流送電システムを導入した場合、多端子直流送電システムを導入した場合について評価を行っている。通常、既存の適当な交流 400kV の変電所に、1 対 1 の直流送電システムを追加で接続するが、その場合、国内の送電系統が過負荷になってしまう。既に N 原則で多くの送電線の過負荷が発生する状況では、N-1 原則ではさらなる過負荷と過酷さが増すことになる。これらの課題は、国内の系統を増強することで対策出来るが多大の費用が必要になると評価している (図 1-9 (a))。

一方、多端子直流送電システムを導入すると前述の課題が発生せず、既存の交流 400kV への影響を減らし、交直変換設備を 6 つから 4 つに削減することが可能となり、交直変換設備を削減したことによる AC/DC 変換ロスが削減できると結論付けている。なお、1 対 1 の直流送電システムを

導入した場合と比較して 151.5M€～261.7M€（242 億～418 億 @160 円/€）のコスト削減が見込めると試算している（図 1-9（b））⁽⁹⁾ ⁽¹⁰⁾。

さらに、多端子直流送電システムには直流遮断器の導入が前提とされており、事故発生時に事故区間を速やかに切り離すことが可能な大容量の直流遮断器の早期実用化が求められているところである。

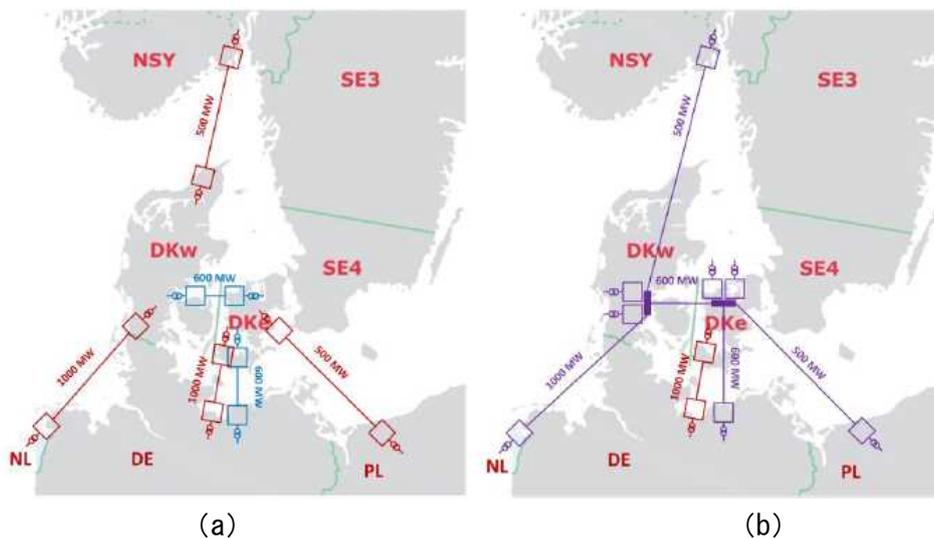


図 1-9 西デンマークの直流送電プロジェクトの検討例⁽⁹⁾
 （（a）1 対 1 構成、（b）多端子構成（紫部））

（2）実用化に向けた欧州の動向

以上より、多端子直流送電システムは、今後の再生可能エネルギーの導入拡大、系統安定化を両立するための有効な手段であることが評価されており、現在、欧州では実用化に向けた以下のプロジェクトが進行中である。

① Best Paths⁽¹¹⁾

再生可能エネルギー接続に向けた革新的送電システムの統合・運用ソリューションを大規模に検証するもので、複数の送電会社が 1 つのプロジェクトへ異なる提案で参加している。実証は DEMO1 から DEMO5 の 5 つ存在し、DEMO1 が洋上風力発電を多端子直流送電システムで接続するためのシステム検討、DEMO2 が自励式変換器の相互連系（異メーカー連系）の検証、DEMO3 が AC グリッド間における多端子直流送電システム接続へのアップグレードに関する検討と、本事業との関連性が強い開発内容となっている（図 1-10 の赤枠部）。

LARGE SCALE DEMONSTRATIONS

1. HVDC in offshore wind farms and offshore interconnections
2. HVDC-VSC multivendor interoperability
3. Upgrading multiterminal HVDC links
4. Innovative repowering of AC corridors
5. DC Superconducting cable

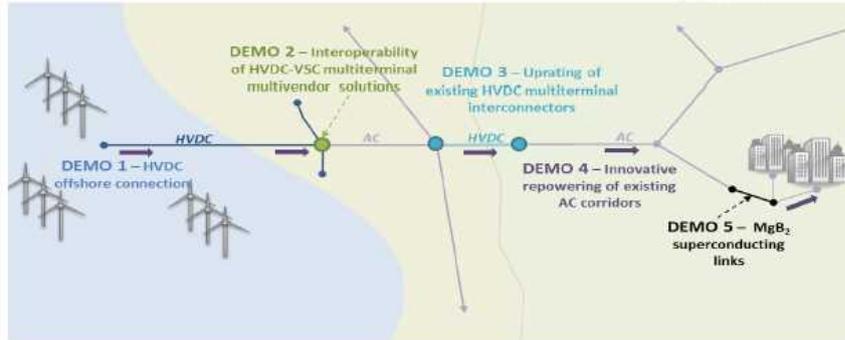


図 1-10 プロジェクト構成

②PROMOTioN⁽¹²⁾

欧州の全ての洋上風力のポテンシャルを開発するために、国家間で洋上 WF と陸上系統を連系するための系統整備は緊急の要求事項である。しかし、直流送電技術は認識されているものの、メッシュ化した洋上直流送電システムは高価な電力変換技術、保護方式の経験不足、国際的な規制といった様々な課題がある。そこで、PROMOTioN ではそれらの課題を解決すべく、大きく 3 つの鍵となる技術を開発する。1 つは、洋上 WF の電力送電に特化した低コストなダイオード変換設備の開発、2 つ目は異メーカー間での連系が可能な多端子直流送電システムの保護方式の開発、最後の 3 つ目は、直流遮断器の開発である。本プロジェクトも「Best Paths」と同様、本事業と関連性が強く、2020 年からの実用化に向けた技術開発を行っている（図 1-11）。

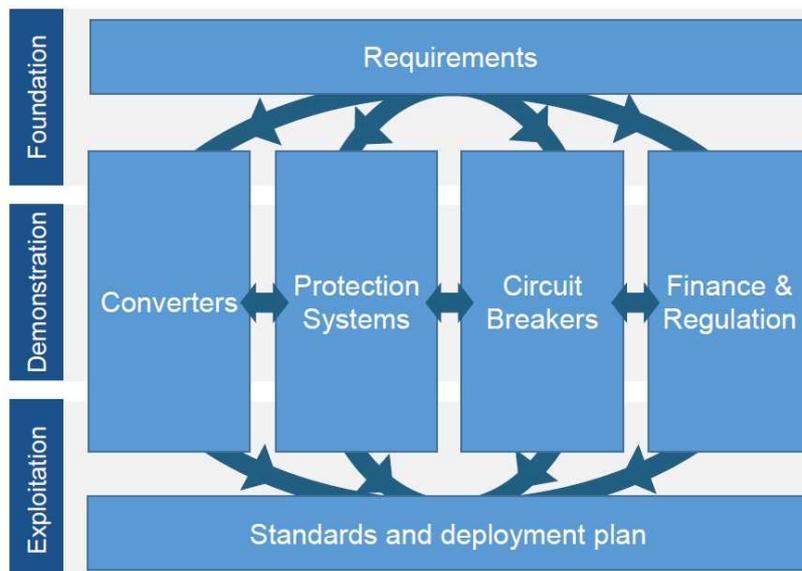


図 1-11 プロジェクト構成

以上の2件のプロジェクトは本事業と同軸で進行しており、多端子直流送電システムの実用化に向けた技術開発が行われている（表1-5）。従って、我が国の直流送電技術の国際的な競争力を確保していくためにも今から産学官が連携し、オールジャパン体制で技術開発を推進していくことが重要である。

表 1-5 多端子直流送電システムの開発動向

	プロジェクト名	2014 (H26)	2015 (H27)	2016 (H28)	2017 (H29)	2018 (H30)	2019 (H31)	2020 (H32)
EU	Best Paths 予算総額:62.8M€=約74億							
EU	PROMOTION 予算総額:51.7M€=約61億							
日本	次世代洋上直流送電システム 開発事業							

さらに、各事業の特徴を以下に整理する（表1-6）。欧州のプロジェクトと本事業の共通事項としては、例えばシステム制御・保護方式の確立、異メーカー連系の確立、直流遮断器の開発が挙げられる。これらは多端子直流送電システムの実用化に必須の開発要素であり、本事業はこれらの重要要素をおさえつつ、さらに国内への導入に必要な設備仕様の検討、大水深に対応可能な洋上基礎などの新たな要素技術、そして低コスト化に向けた様々な要素技術の開発を行っている。従って、国際的な技術的優位性を確保しつつ、海外メーカーが国内へ参入する際の障壁もクリアすることで、国内外市場への参入を優位に進められると考えている。

表 1-6 各事業の開発内容の整理

事業名	開発内容
次世代洋上直流送電システム開発事業	<ul style="list-style-type: none"> ・多端子洋上直流システムの計画、設計、経済性評価、事業性評価手法の開発、国内の洋上WF導入に向けた制度・ルールの整理 ・マルチベンダを適用した、システム制御手法、保護方式の開発、事故検出方法の検討 ・マルチベンダ化に向けた自動式交直変換器のインターフェイス仕様など開発。 ・直流遮断器の実用化に向けた開発 ・DC525kVに対応した海底ケーブル、及び中間ジョイント、異径ジョイント、異社間連系分岐ジョイントの開発 ・海底ケーブル敷設工法の高速度化開発 ・大水深に適用可能な洋上PF基礎（スカートサクシオン工法）の開発
Best Paths	<ul style="list-style-type: none"> ・洋上WF接続したマルチベンダ、多端子HVDCシステムにおける潮流制御などを、アナログモデルを用いて検討。4端子DC gridを60kVAのMMC-VSC実機で構築して試験 ・マルチベンダHVDC-VSCシステムにおける相互運用に向けた取組。ABB, siemens, GE (ALSTOM) が参加。モデル解析（リアルタイム解析含む）を通して、自動式HVDCシステムのインターフェイス仕様を開発（標準化） ・イタリアのSACOI: 3端子HVDC（LCC3端子）からVSC-MMCへのアップグレードを見越した実証。再エネの拡大、系統安定化に貢献
PROMOTiON	<ul style="list-style-type: none"> ・メッシュ洋上系統のシステム要求事項の検討 ・DR (Diode Rectifiers) とVSC及び洋上風車との相互運用の検証 ・直流系統の保護手法の開発（異メーカー連系、直流遮断器含む） ・直流遮断器、試験方法の開発 ・国際連系、洋上送電系統 ・HVDCシステム、HVDCシステムが接続された洋上風力発電設備の標準化 ・将来の欧州の洋上系統の配備計画の立案

(3) 特許戦略

直流送電システムに関する特許出願傾向は、2013年より特許件数が大きく伸長している。これは、近年の洋上風力やメガソーラ連系や広域連系などが多く建設された結果、これに関連する特許出願が増加したものと考えられる。また、2010年以降には中国メーカーや大学などの提案が増えていることも特徴的である（図1-12）⁽¹³⁾。次に、特許出願の技術分野の傾向は、各社とも事故対策、直流送電の直流電圧、電流、潮流制御に関する出願が多い。さらに最近では、多端子直流送電システムが今後建設されることを想定し、特にABB、AlstomなどはDC-DC電圧変換器の構成に関する出願が増加傾向（図1-13の「その他」に分類）にある（図1-13）⁽¹³⁾。

我が国としては、本事業を通して技術的にハイレベルな多端子直流送電システムの技術開発を行い、他国に先駆けて重要特許を取得することで、国際競争力においても優位な立場を確保していくことが必要である。以上の考えに先立ち、本事業での開発成果を事業化戦略に則って特許を積極的に取得していくことは、当該技術分野の世界市場を獲得していくために重要である。

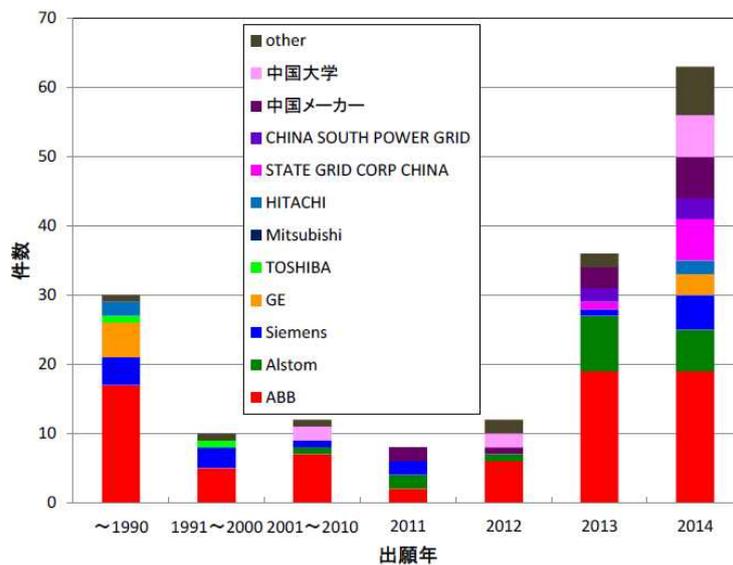


図1-12 直流送電に関する特許出願件数推移

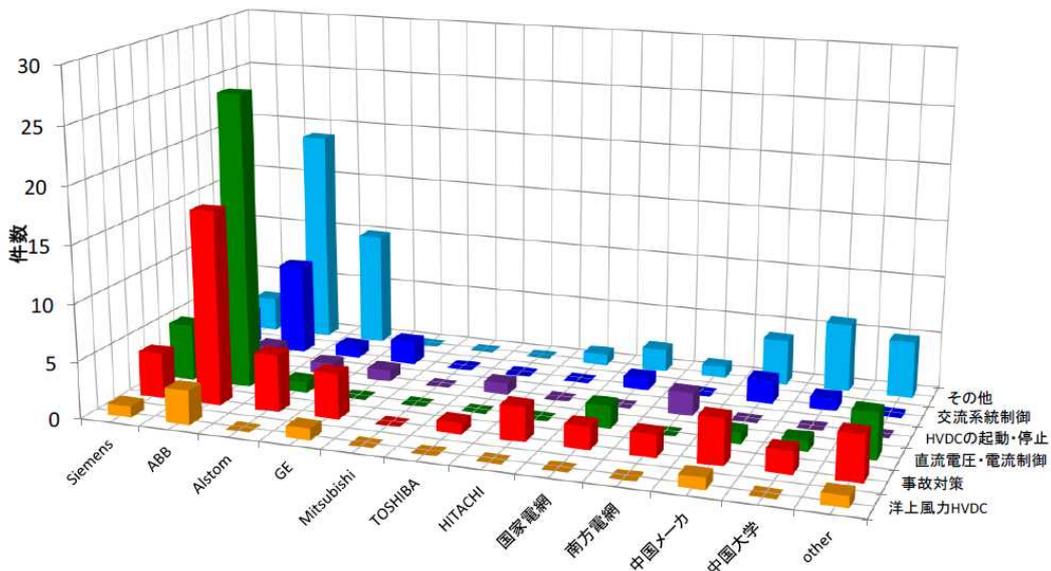


図1-13 直流送電技術分野の主要出願先と技術分野の傾向

1.3.6 市場予測

2016年に報告された海外調査会社の市場予測によると、直流送電の市場規模は2016年から2022年まで年8.4%の成長率で2022年には約1.2兆円になるとしている。また、容量ベースでは、年9.8%の成長率で2022年までに85.79GWになると予測している。このように、本事業で開発している多端子直流送電システムを含む直流送電の市場は今後も拡大する傾向にある。

1.3.7 目的の妥当性

我が国の化石燃料に依存する電源構想を解消することは、エネルギー安全保障および温室効果ガス削減の観点から極めて重要であり、現在は、純国産エネルギーの一つである再生可能エネルギーの導入拡大に向けた様々な取り組みが進められている。このような状況の中、国産エネルギーの確保と温室効果ガス削減を同時に実現するためには、エネルギーミックスの早期実現だけでなく、2030年以降も持続的に再生可能エネルギーを導入していく必要がある。しかし、先行する太陽光発電、陸上風力発電においては今後、導入適地が限定的となることが想定される。従って、洋上の優良なポテンシャルを有効活用した大規模洋上WFの導入を推進していくことが重要であり、その発電した電力を有効活用するためには、高い信頼性と低コストを兼ね備えた多端子直流送電システムにより、遠方の複数の大需要地へ効率的に送電することが必要となる。

さらに、多端子直流送電システムは我が国では地域間連系線として、海外では国家間連系線としての活用も可能であり、海外でも多端子直流送電システムの実用化に向けた国家プロジェクトの推進、および特許出願が積極的に行われている状況にある。我が国の再生可能エネルギーの持続的な導入と、当該分野に対する国際競争力の向上に向けては、本事業を通してオールジャパン体制で早期実用化に向けた技術開発を推進することが必要である。

出典：

- (1) NEDO 成果報告書，再生可能エネルギー導入に係る電力系統対策動向調査（実施者：三菱総合研究所），2/2015
- (2) 電気学会技術報告書，パワーエレクトロニクス機器の制御技術，1084号，(2007)
- (3) 安田陽：「風力発電の導入率と各国政策の比較研究」，日本風力エネルギー学会誌，2013
- (4) Colin C Davidson：“The Use of High-Voltage Direct Current Transmission for Offshore Wind Projects”，ISSN，2014
- (5) Chan-Ki Kim 他著，“HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems”，John Wiley & Sons，2008
- (6) Dr. Yanny Fu, KEMA Consulting, “Long distance bulk transmission”，Dutch Association for Engineers and Engineering Students，2010
- (7) Vahan Gevorgian, NREL 他，“Submarine Power Transmission”，Energy Development in Island Nations，2010
- (8) “National Offshore Wind Energy Grid Interconnection Study Final Technical Report”，U.S DEPARTMENT OF ENERGY，2014
- (9) “Regional Investment Plan 2015 North Sea region”，ENTSO-E，10/2015
- (10) “Regional Investment Plan 2015 Baltic Sea region”，ENTSO-E，10/2015
- (11) Best Paths ホームページ，<http://www.bestpaths-project.eu/>
- (12) PROMOTioN ホームページ，<https://www.promotion-offshore.net/>
- (13) NEDO 成果報告書，洋上風力向け直流送電システムの基礎検討（実施者：東芝），9/2015

2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

2.1 NEDO が関与することの意義

未だ世界においても実用化されていない世界トップレベルの送電容量（±500kV、1GW）となる多端子洋上直流送電システムの実用化には、モデル解析を通じたシステム制御・保護方式の開発、システム全体のコスト低減に大きく貢献するケーブル接続技術や洋上プラットフォーム基礎、事故発生時に事故区間を遮断して設備を保護する直流遮断器などの新たな要素技術の開発が必要である。また、多端子洋上直流送電システムは、その規模により順次拡張しながら導入すると想定され、変換所や直流送電線等のシステム構築に複数のメーカーが参入し各メーカーがシステムの一部を分担してシステム全体を構築する可能性が高く、マルチベンダ化に向けた取組も必要となる。これらの開発にはシステム開発と要素技術開発が協調して推進することが重要であることから、当該分野を専門とする民間企業や大学・研究機関が集結し、知見やノウハウを融合して取り組み、かつ、マルチベンダ化に向けた標準仕様の検討には競合企業の参画が必要となる。さらに、本事業は再生可能エネルギーの持続的な導入推進のためには重要な位置づけであるが、民間のみで推進することは難しいことから国家主導での開発体制が必要である。

NEDO は、日本最大級の公的研究開発マネジメント機関として、エネルギー・地球環境問題の解決と産業競争力の強化に取り組み、経済産業行政の一翼を担っている。エネルギー使用合理化のための技術に関しては、民間の能力を活用して行うことにより、産業技術の向上及びその実用化の促進を図り、エネルギーの安定的・効率的な供給確保、経済・産業の発展に資することを目的として、様々な事業を推進している。

以上より、本事業においても NEDO が国プロとして課題解決に向けて事業をマネジメントすることが必要である。

2.2 実施の効果

国産エネルギーの確保と温室効果ガス削減の課題を解決していくためには、2030 年以降も持続的に再生可能エネルギーを導入していく必要がある。洋上風力のポテンシャルは、自然条件による開発不可条件（表 1-1）を考慮しても 1,380 百万 kW が推計されており、大規模に開発することで、これらの課題解決に大きく貢献する。一方、洋上風力発電の導入適地である北海道、東北、九州は電力大消費地より遠方であり、これまでの陸上風力と太陽光の導入により系統の空き容量不足が顕在化し導入が限定的となっていることから、本事業で開発する多端子洋上直流送電システムがこれらの課題を解決し、大規模洋上 WF の導入促進へ貢献できる。

本事業終了後には、国内において洋上風力向けに 3 案件前後の 1GW クラスの需要が見込まれるほか、欧州や米国においては、同規模の案件 1、2 件が見込まれる。さらに、洋上風力だけでなく、陸上を含めて、直流送電の観点から広義の送電技術における波及効果も期待できる。また、本事業は直流送電技術に関するオールジャパンの体制で様々な研究者・技術者が課題解決に向けて取り組んでおり、長く停滞していた本技術の底上げ、および国際競争力の確保につながると共に、将来のこれらの分野を担う若手研究者・技術者の育成の促進にも貢献する。

2. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

本事業は、研究開発項目ごとの中間・最終目標を基本計画に以下の通り定めており、さらに詳細な開発目標については実施計画書に定めている。

研究開発項目Ⅰ. システム開発

【中間目標】

システム開発として多端子洋上直流送電システムの設計・調達・建設（EPC）と運転・保守（O&M）等を検討した結果を使い、また、多端子洋上直流送電システム向けに要素技術開発するコンポーネントの特性を使い、モデルケースの可能性検討を行い、既存の交流送電システムに対して、コスト削減割合 20%を得る。

【最終目標】

多端子洋上直流送電システムのモデルケースから、導入を想定した1~3 ケースを選択・システム設計し、また、要素技術開発されたコンポーネントのプロトタイプにおいて試験された信頼性データと、それらコンポーネントを選択したモデルケース向けに設計した特性を用いて、既存の交流送電システムに対して、平均稼働率（信頼性）等を含めたコスト削減割合 20%以上の導入モデルケースを完成する。

研究開発項目Ⅱ. 要素技術開発

【中間目標】

多端子洋上直流送電システム向けに新たに必要となるコンポーネントのプロトタイプ設計と試作、性能試験を行い、モデルケースから要求される特性を得る。あわせて、既存の交流送電システムに対して、モデルケースのコスト削減割合 20%へ貢献する。

【最終目標】

要素技術開発されたコンポーネントのプロトタイプの信頼性試験を行い、また、選択されたモデルケースに向けた設計と特性検討、あるいは、設計と試作、性能試験を行い、それらコンポーネントの仕様を完成する。あわせて、既存の交流送電システムに対して、そのモデルケースの平均稼働率（信頼性）等を含めたコスト削減割合 20%以上へ貢献する。

本事業の最終目標である「既存の交流送電システムに対して、平均稼働率（信頼性）等を含めたコスト削減割合 20%以上の導入モデルケースを完成する。」を達成することで、多端子洋上直流送電システムのメリットが、技術面だけではなくコスト面でも具体的になり、洋上 WF 導入の案件形成時に多端子洋上直流送電システムを送電方式の候補とした具体的な検討（系統計画・設計、事業性評価）がなされると考えている。

また、経済性のある多端子洋上直流送電システムのモデルケースの完成には、各要素技術開発のコスト削減効果が大きく寄与することから、技術開発のみならず要素技術開発を導入することによるコスト削減効果を試算し、システム開発へフィードバックすることを念頭に置いた目標を設定している。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

2.1.1 事業全体

本事業で実用化を目指す多端子直流送電システムは複数の大規模洋上 WF の電力を送電するために大容量で高い信頼性が必要となる。例えば、短絡・地絡事故の発生や変換所が事故などで停止した際には、速やかに事故区間を切り離し、他の健全な変換所が協調して運転形態を切り替えて運転を継続し、健全区間を用いてシステム全体を停止させずに送電を継続することが求められる。このため、多端子直流送電システムの実用化に向けては、システムの制御・保護方式の確立、そして事故区間を安全に遮断するための直流遮断器の開発が必要となる（図 2-1）。また、多端子洋上直流送電システムは、その規模により順次拡張しながら導入すると想定され、変換所や直流送電線等のシステム構築に複数のメーカーが参入し各メーカーが、自励式交直変換器といったシステムの一部を分担してシステム全体を構築する可能性が高く、マルチベンダ化の実現に向けた取組が必要となる。さらに、高い信頼性ととも重要となるシステム全体の低コスト化には、ケーブル関連のコスト削減、建設の短工期化などを実現する新たな要素技術開発が必要となる。

本事業では多端子洋上直流送電システムの実現に必要なこれらの技術課題に対して、包括的に取り組むこととし、システム開発と要素技術開発の 2 つの研究開発項目を設定し、一体的に推進している。

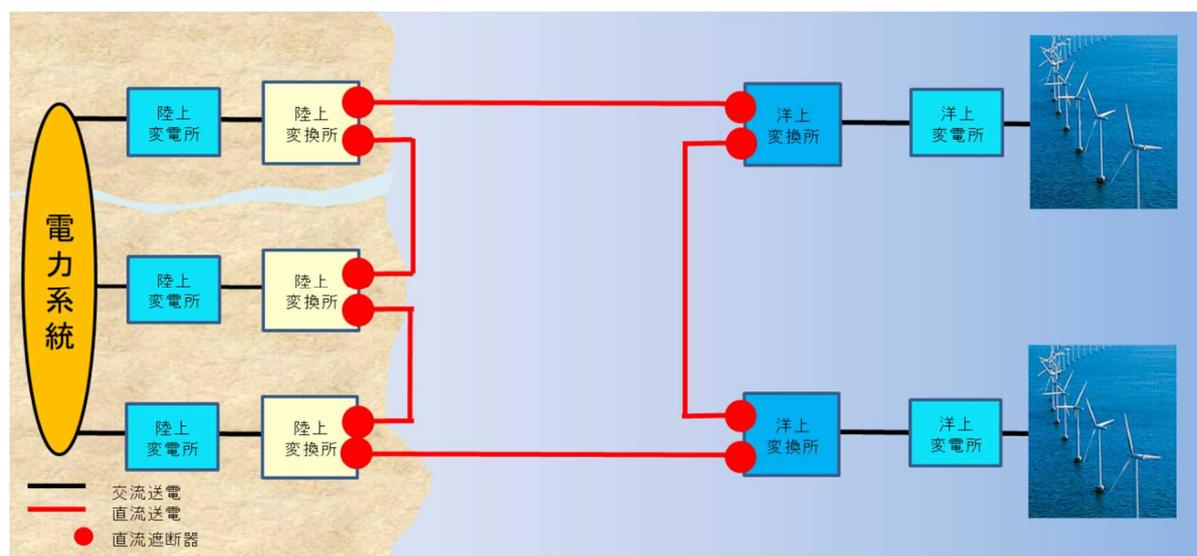


図 2-1 多端子洋上直流送電システムイメージ

2.1.2 研究開発項目

事業全体の開発内容は、先の「2.1.1 事業全体」にて述べた通りであるが、以下に研究開発項目について具体的に述べる。

(1) 研究開発項目 I. システム開発

システム開発では、日本海域の洋上風力適地へ大規模洋上 WF を複数地点導入することを仮定し、経済性を考慮した洋上 WF の集電系統と送電系統の計画・設計を行う。また、多端子直流送電システムの解析モデルを開発し、自励式直流送電システムの制御・保護方式の確立に向けたモデル解析を行う。さらに、マルチベンダ化に向けては、多端子直流送電システムの制御において特

に重要となる、自励式交直変換器の異メーカーでの相互連携を可能とする標準仕様書の検討を行う。なお、システム開発は、以下の3つの開発テーマに分けて推進している。

①国内への洋上 WF 導入における前提条件の整理

我が国の大規模洋上 WF 導入適地を検討する場合、風速分布だけではなく、様々な自然条件や社会条件、電気設備の設置状況などを考慮したポテンシャル分布から検討することが必要となる。本開発により風況に加えて、水深や落雷、海底地質などの自然条件、港湾、漁港、海上インフラなどの社会条件、法制度、海底ケーブルや変電所などの既設電気設備関連の情報を包括的に調査し、それらを考慮した洋上風力ポテンシャルを整理する。

②洋上集電系統/洋上送電系統の計画・設計

①で整理した洋上風力ポテンシャルをもとに、2~3 地点に大規模洋上 WF を設置することを想定し、洋上風力発電の効率的な集電方法の検討、接続可能な既存の陸上変電所の位置を考慮しつつコスト最小となる洋上変電所の数・位置、送電ルート、送電ロスなどを包括的に検討し、経済性のある集電系統/送電系統を計画・設計する。

③多端子直流送電システムの制御・保護方式の開発、設備の要求仕様の検討

本開発では、洋上風力、多端子直流送電システム、想定交流系統を含む多端子直流送電システムの解析モデルを開発し、様々なケーススタディを通じて自励式交直変換器の制御・保護方式への要求仕様を検証するとともに、自励式変換器間での情報の取り合いや上位や下位の制御方法を整理し、異メーカー連系接続を可能とする標準仕様書を完成させる。さらに、我が国への導入を前提とした自励式変換器などの設備に要求される耐電圧、電流レベルなどの機器仕様をモデル解析により明らかにする。

(2) 研究開発項目Ⅱ. 要素技術開発

要素技術開発では、低コストで高信頼性を兼ね備えた多端子洋上直流送電システムを実現する上で必要となる直流遮断器、そして、従来の自励式直流送電システムよりコスト低減が見込めるケーブルジョイントや洋上 PF 基礎などを開発する。なお、要素技術開発は、以下の4つの開発テーマに分けて推進している。

④直流遮断器の開発

多端子直流送電システムでは、事故などが発生した後にシステムを停止せず運転を継続することが必要であり、系統電圧の低下拡大を防ぐために数 ms で事故区間を遮断可能な直流遮断器が必要となる。本開発では、低損失化と高速遮断を兼ね備えた、機械遮断部と半導体遮断部を組合せたハイブリッド直流遮断器を開発する。

⑤海底ケーブル関連技術開発

ケーブルの敷設や船上でのケーブル接続や防護管取付、洋上 WF の拡張時の集電ケーブルの洋上設備への接続などの工事を、従来の手作業が多く人員と工期のかかる工法から自動化、簡素化することにより工期短縮・コスト削減を実現することが出来る。また、従来までの最大潮流に合わせたケーブル設計ではなく、陸上や海中といった周囲温度や通電時のケーブルの温度変化を考慮した最適設計を行うことでケーブルコスト削減が可能となる。本開発では、海底ケーブル敷設・防護管取付けの自動化・高速化の開発、拡張時のケーブル接続を容易にするなどの特長をもつケーブルジョイントや接続工法、ダイナミックレイティング技術を用いたケーブル設計技術を開発する。

⑥洋上 PF 新形式基礎の基盤技術開発

我が国の海底地質に適し、短工期と低コスト化および撤去の容易さを兼ね備えた新型の洋上プラットフォーム（PF）基礎として有力なサクション工法について、模擬試験や構造解析などを通して洋上 PF 向けのサクション基礎の設計仕様を確立する。

⑦洋上 PF 小型化の検討

洋上 PF 上の設備を小型軽量化することは、建設コスト減、工期短縮など直接コスト削減に寄与する。そこで、次世代の技術として洋上設備の低コスト化への貢献が期待できる、高周波変圧器を用いた自励式変換モジュールの小型軽量化の基盤技術開発、洋上風力発電の直列接続方式の開発などを行う。

2.1.3 開発テーマ

◆研究開発項目 I. システム開発

(1) 国内への洋上 WF 導入における前提条件の整理（日立製作所）

本開発では、過年度に実施された類似事業の条件を整理すると共に、自然条件や社会条件などの洋上 WF 設置における絞り込み条件を設定し、洋上風力のポテンシャルの高い地域を整理する。

<具体的な実施内容>

既存風況データ等を基に洋上風力発電のポテンシャルが高い地域を抽出し、海底地質、船舶航路等の情報を加味した上で、直流送電線実証事業の実施に適した領域の選定及び洋上ウィンドファームの位置設定、ならびに本事業の成果の適用が期待される海域情報の整備を実施する。

①風況データ等の収集・整備

洋上風力のポテンシャルが高い海域を抽出する上で必要となる風況等の既存データを収集し、GIS 解析用のデータとして整備する。

②絞り込み条件の設定

洋上風力のポテンシャルが高い地域を抽出するための絞り込み条件を設定する。使用する風況データは NEDO、経済産業省および環境省で整備されたものを比較検討した上で選定することとし、単機出力 5MW、7MW の風車を想定し地上高 100m の高度補正を行う。

③洋上風況マップの作成

設定した条件を基に洋上風況マップ（全国）を作成する。

④ウィンドファーム検討海域の抽出

上記②で抽出したポテンシャルが高い地域から、水深、離岸距離、変電所・港湾からの距離等を基に対象候補地域を抽出する。なお、ポテンシャルについては県別海域境界データを用いて集計を行う。

(2) 洋上集電系統/洋上送電系統の計画・設計（東京電力パワーグリッド、東京大学、住友電気工業）

本開発では、複数の大規模洋上 WF からの電力を効率的に集電し、需要地へ送電するための、経済性を考慮した我が国への導入ケースを具体的に検討することを目的としており、洋上 WF と陸上連系を効率的に結ぶ送電ルートを導く系統最適化手法の開発や、我が国の海域へ大規模洋上 WF を複数導入した場合の洋上集電系統や洋上送電系統の計画と設計を行う。

<具体的な実施内容>

①洋上集電システムの計画・設計（東京電力パワーグリッド、東京大学）

洋上集電システムの計画において、最も重要な要素は洋上 PF の設定である。洋上 PF の数を増やすと、洋上 PF から各風車までの平均距離が短くなり、洋上集電システムの計画は容易になる一方、500kV 直流系統の設備量、特に変換器の台数が多くなり、大幅なコストアップにつながる可能性がある。一般的には、洋上集電システムの系統セキュリティ上、問題ない範囲で、洋上 PF の数を限定することが合理的な設計となることから、本研究では、洋上集電システムの各種セキュリティ評価とコスト評価に基づき、最適な洋上集電システムを計画・設計する。さらに、洋上集電システムの電圧は、33kV 前後が選択されることが一般的であるが、洋上集電システムの電圧はセキュリティ評価の結果に影響を与えることから、コストや機器選定上の制約も考慮した上で、適切な電圧の選定についても検討する。電圧の選定以外にも、洋上集電システムのコストに影響を与える項目は、変圧器台数、遮断器数、ケーブル長、無効電力補償とその制御、送電損失など多岐にわたっており、これらに対する総合的な検討も行う。

想定された洋上 WF は、将来においてその規模が拡大される可能性がある。従って、集電システムの計画にあたっては、コスト面での合理性を失わない範囲で将来の拡張性も考慮するものとする。

②洋上送電システムの計画・設計（東京電力パワーグリッド、東京大学）

500kV 直流系統の計画において、まず重要な要素は、前項で設定した洋上 PF の位置と陸上の連系点である。陸上の連系点は、東京電力管内の系統をモデルとして簡略化を行った上で、適切な位置を検討する。想定する洋上 WF の規模を考えると、500kV 直流系統の事故時においては、陸上の基幹系統へ大きな影響を与える可能性が高いことから、コスト面での評価に加え、系統セキュリティ評価を行い、信頼度面からも問題のない 500kV 直流系統を設計する。なお、500kV 直流系統のコストに影響を与える項目は、洋上集電システムと同様に多岐にわたっている。特に、500kV 直流系統は、複数の陸上連系点がある場合、ウィンドファームの連系線としてだけでなく、陸上の基幹系統の一部として使うことも可能になることから、想定される用途に応じて、その便益についても評価できる可能性がある。欧州における DC スーパーグリッドの検討内容なども参考に、コストと便益の考え方について調査・整理した上で、500kV 直流系統のコストを評価する。

③系統最適化手法の開発（住友電気工業）

詳細な系統計画・設計に入る前に洋上 WF、連系点といった初期条件に対して、最適な送電ネットワークを導き出し、系統計画・設計の効率化、および初期段階における事業化判断にも有効に活用することを目的として、陸上変電所、洋上 WF の位置など、いくつかの初期条件に対して送電方式の選択も含めた送電ネットワークの接続方法を導き出す系統最適化手法の開発を行う。

(3) 多端子直流送電システムの制御保護方式の開発、設備の要求仕様の検討（東京電力ホールディングス、東芝、日立製作所、電力中央研究所）

洋上風力と交流系統とを結ぶ多端子直流送電システムにおいて、異メーカーの自励式交直変換器の相互連系を可能にする自励式交直変換器の制御保護方式への要求仕様を、シミュレーション解析計算およびデジタル系統シミュレータ試験によって検証する。さらに、我が国への導入を前提とした設備に要求される耐電圧、電流レベルなどの仕様を明らかにする。

<具体的な実施内容>

①自励式交直変換器の制御・保護方式への要求仕様の作成（東京電力ホールディングス、東芝、日立製作所）

まず、洋上風力、多端子直流送電システム、想定交流系統を含む電力系統について、自励式交直変換器の制御・保護方式への要求仕様を作成する。

(a) 自励式交直変換器の制御保護方式の要求仕様を検討するにあたり、自励式交直変換器の主回路および制御・保護系、風力発電模擬の変動電源、直流ケーブル、想定される交流系統等のシミュレーション解析モデルを構築する。

(b) 上記で構築したシミュレーション解析モデルを対象として、異社間接続が可能な洋上多端子直流送電の開発・検証という目的を念頭に置き、定常運転状態、上位制御（共通制御）機能、起動停止、事故保護、端子脱落復帰等を検討項目として、要求仕様を「多端子標準仕様書案」としてまとめる。また、多端子直流送電システムに対する変換器間での情報の取り合いや上位や下位の制御方法を整理する。

(c) また、風力発電の出力変動による交流系統への影響（周波数変動等）についてもシミュレーション解析計算で検証する。

(d) (a)～(b)で机上検討した「多端子標準仕様書案」について、洋上風力、多端子直流送電システム、想定交流系統を含む以下のデジタル系統シミュレータ試験での検証を通じて、自励式交直変換器の制御・保護方式への要求仕様を検討する。

(i) 自励式交直変換器の主回路および制御・保護系を除いた、風力発電模擬の変動電源、直流ケーブル、想定される交流系統のデジタルモデルを構築する。

(ii) 異メーカーの主回路方式および制御・保護方式の相違が反映された自励式交直変換器のデジタルモデルを構築し、先行して構築した他のデジタルモデルと組み合わせる。異メーカー製の自励式交直変換器が組み合わせられた場合の共通制御・保護方式の仕様について、デジタル系統シミュレータ試験により検証する。

(iii) 交流系統または直流ケーブルでの事故時の自励式交直変換器の応動をデジタル系統シミュレータ試験により検証する。風力発電の出力変動による交流系統への影響（周波数変動等）についてもデジタル系統シミュレータ試験により検証する。

以上のとおり、洋上風力、多端子直流送電システム、想定交流系統を含むシミュレーション解析計算およびデジタル系統シミュレータ試験を完了させることにより、研究成果として自励式交直変換器の制御・保護方式への要求仕様が詳細に明らかとなる。

②異メーカーの自励式交直変換器の相互連系を可能にする標準仕様の検証（東京電力ホールディングス、東芝、日立製作所）

多端子直流送電システムは、端子を構成する交直変換所や直流送電線等のシステム構築に、複数のメーカーが参入し各メーカーがシステムの一部を分担してシステム全体を構築する可能性が高い。複数のメーカーで多端子直流送電システムを構築する場合は、システムの発注者や運用者の要望・仕様を複数メーカーで共有した上で連携し、システムを設計、製作しなければならない、システム構築に多大な時間を必要とする。

この課題を解決するために上記で作成した「多端子標準仕様書案」の検証を行う。標準仕様検証のため、以下の項目を実施する。

(a) 1 端子変換器モデルの構築

瞬時値解析プログラム (PSCAD/EMTDC) で、1 メーカーでの 2 端子直流送電システムモデルを構築し、意図した動作であることを確認する。その後、1 端子の変換器と、この変換器につながる交流系統と直流回路、制御回路、保護回路、起動停止シーケンスを切り出した 1 端子変換器モデルを構築する (図 2-3)。

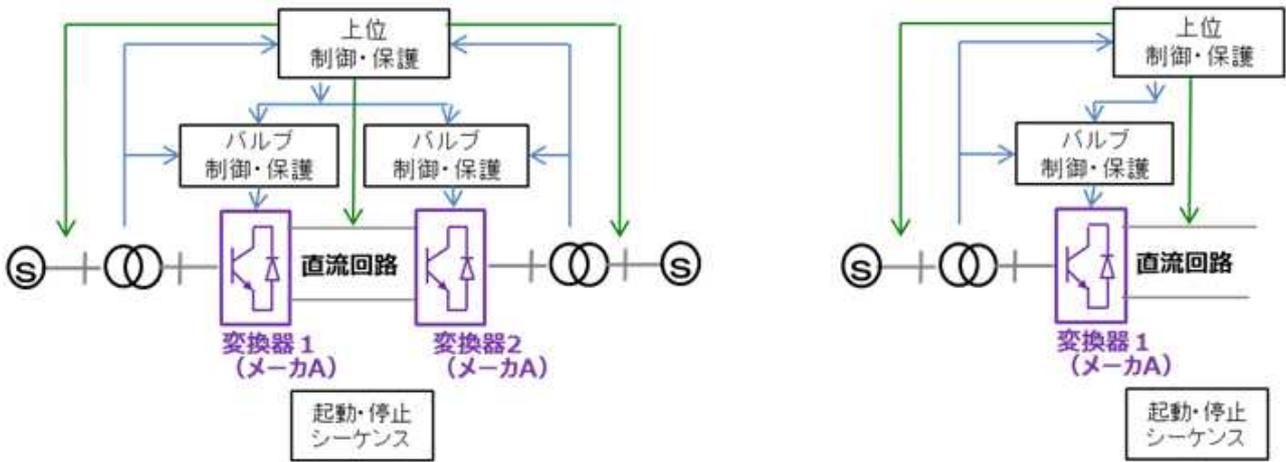


図 2-3 2 端子直流送電システムの解析モデルから 1 端子変換器モデルの作成イメージ

(b) 異メーカー 2 端子直流送電システムモデルの起動・停止シーケンスと上位制御・保護システムの開発

異メーカーの 1 端子変換器モデルを結合した異メーカー 2 端子モデルにて動作を確認する。必要に応じて性能改善を図ることで、異メーカー 2 端子直流送電モデルの起動・停止シーケンスと上位制御・保護システムを開発する。

(c) 異メーカー多端子直流送電システムの保護協調の検討

前記異メーカー 2 端子直流送電モデルを、3 端子以上の多端子直流送電モデルに拡張し、各端子の起動・停止シーケンスと上位制御・保護システムの応答を確認し、必要に応じて起動・停止シーケンスと上位制御・保護システムを改善する。また上位制御・保護システムに直流遮断器を組み込み、変換器の保護システムとの保護協調を解析検討する。

検証は、まず、標準仕様の検証に必要な範囲での変換器および系統に合わせ、MMC (Modular Multilevel Converter) 変換器リアルタイムシミュレータの仕様を検討する。次に、リアルタイムシミュレータに実装する回路モデル、制御アルゴリズムを開発し、最後に標準仕様に準じた検証を行う。

③設備の要求仕様の検討 (電力中央研究所)

500 kV 多端子直流送電システムの設備に要求される仕様 (耐電圧レベルや避雷器のエネルギー処理責務など) を明らかとするため、電力系統瞬時値解析プログラム XTAP を用いて想定する各種過電圧および異常現象の解析を行う。

◆研究開発項目Ⅱ. 要素技術開発

(4) 直流遮断器の開発（東芝）

本開発では、洋上風力向けに適用する多端子直流送電システムにおいて必要と考えられる直流遮断器の設計仕様を明らかにする。また、本開発で提案するハイブリッド方式の原理検証器（半導体遮断部と機械遮断部で構成）を製作し検証するとともに、機械遮断部および半導体遮断部モジュールのスケールモデルの製作を行う。

<具体的な実施内容>

①半導体遮断部

ハイブリッド直流遮断器の半導体部においては、電流遮断の初期段階で機械遮断部に電流ゼロ点を生成する転流回路部と、最終段階で避雷器に電流を転流する半導体部遮断部が必要である。転流回路部は適切なタイミングで動作させるためのアルゴリズムの開発、半導体遮断部は構成される自励式半導体素子の遮断性能の向上を目的とし、(a)、(b)の開発を行う。

(a) 目標性能のハイブリッド方式の直流遮断器を実現可能な半導体遮断器部の開発

(b) 機械接点の電流を転流して機械接点に電流ゼロ点を生成する転流回路部の開発

②機械遮断部

ハイブリッド直流遮断器の機械遮断部（遮断部と断路部で構成）においては、数msで動作する操作機構とそれに対応した遮断技術および絶縁技術が必要となる。さらに、直流遮断器の試験方法が確立されていないため、以下の(a)～(d)の開発を行う。

(a) 真空バルブの遮断技術

(b) 直流絶縁技術

(c) 接点部の高速駆動技術

(d) 直流遮断器のスケールモデル製作と試験法開発

(5) 海底ケーブル関連技術開発（住友電気工業、古河電気工業）

従来までの海底ケーブルを用いた送電システムを構築する場合、ケーブルの送電容量はケーブルの許容温度によって決まることから、全長に渡って温度環境のもっとも厳しい環境となる部分において十分送電可能となる導体断面積の選定がされている。これを周囲環境温度に合わせたケーブル断面積を選定し、かつ、ケーブル温度の全長に渡る温度分布をダイナミックに測定し、ケーブルの温度状況に応じた潮流制御を行うダイナミックレイティング（DR）を適用することで、ケーブル設計の最適化を行う事ができるのでケーブルコストの削減に寄与する。本テーマでは、異径のケーブルを接続可能な接続技術の開発と、変動電源である洋上WFの送電システムへDR技術を適用した場合のシステム開発を行うとともに、DRシステムの導入を前提とした最適なケーブル設計手法を開発する。

さらに、海底ケーブル敷設に係る工期短縮とコスト削減を実現する新たな工法を開発することを目的として、ケーブル敷設については、従来の1条ずつの敷設に対して複数条同時の敷設を可能とする工法の検討、および敷設船の設備モデルなどを開発する。また、従来のダイバーの手作業による防護管取付けについても、防護管を自動搬送、取付けする船上設備の検討とそれに対応した防護管の開発を行う。また、多端子直流送電システムと大規模洋上WFは、いくつかのフェーズを経て拡張しながら拡大していくものと想定され、その際、洋上WFを洋上PFへ接続する際の接続コスト低減を実現する新たな工法として、集電したケーブルの接続を容易にし、異メーカーのケーブルの接続を可能とする分岐ジョイントの開発を行う。

<具体的な実施内容>

①異径接続部の開発（古河電気工業）

ケーブルシステムは、熱的な制約を受けやすい部分と制約を受けにくい海中部の導体サイズを変えた場合に必要となる、径の異なるケーブルを接続して一連長にするための、異径ケーブルの接続技術の設計を行う。また、ダイナミックレイティングと合わせ、ケーブル設置部位ごとに全体最適化されたダウンサイジングによるコストダウン効果の可能性を検討する。

また、要素技術としては、海底ケーブルの工場接続技術であり、同径では無く異径の場合の接続技術が必要となる。三心交流海底ケーブルにおいて $300\text{mm}^2\text{--}400\text{mm}^2$ といった小サイズ導体の異径接続実績は保有しているものの、大サイズ分割導体の単心ケーブルは実績が無い。従って、分割導体接続や補強絶縁設計といった異径ケーブル接続のための要素技術確立を行うとともに、開発した要素技術を用いて、直流 500kV ケーブルの異径接続部の試作を行い、初期性能評価および検証、長期信頼性試験を開始し長期性能評価を行う。

②DR システム技術を用いたケーブル設計技術の開発（古河電気工業）

送電ケーブルの時々刻々の電流容量を決定する DR システムについて検討する。ケーブルの電流容量は許容される導体の最大温度で決定される。電流、ケーブルの構成要素の寸法、熱的特性、ケーブル周囲の熱的環境を考慮し、時々刻々の電流容量を送電元にフィードバックするシステムの構築を検討する。

本システム設計はシステム要素の各部の仕様決定を行うと共に、対象とする布設環境（地上埋設部、洋上プラットフォームへの引き揚げ部など）を分類分けし熱的に最も弱いと考えられる環境に対して、許容電流を算定する方法を開発する。その為にはケーブルや周囲環境の温度計測、その他環境計測が重要であり、直流ケーブルに適した計測方法を開発する。また、模擬ケーブルを作成し温度・環境計測の問題点を洗い出し、計測誤差の最適化を行う。以上の技術を実スケールの海底ケーブルに適用した際の導体温度推定モデルの構築及び許容電流推定モデルの構築を行う。洋上風力の特徴であるランダムな発電量と許容電流の比較から送電効率を最適化するようにケーブル構造を決定する。

上記検討を踏まえて、実スケール実験を行う。実スケール実験では、設計した実スケールの直流ケーブルを実際に試作する。上記ダイナミックレイティングシステム設計で得られた布設環境を模擬し電流通電と温度計測を行う。ここで得られたデータと上記ダイナミックレイティングシステム設計での設計値とを比較しシステムの有効性を評価する。

③洋上風力に最適化された工事工法の開発（住友電気工業）

(a) 洋上ウィンドファーム集電系統構築における最適な工法開発

風車タワー建設作業の効率化を目的とし、ケーブルジョイントを風車基礎部に設置するあるいは、基礎部にケーブル収納機構をもたせるなどし、基礎上にケーブル余尺を仮置きしない工法や、風車基礎部の設計と一体で、波浪からのケーブル防護を兼ねた風車へのケーブル立上げ工法等について検討する。必要な場合には実際のジョイントを試作し、施工作业性の検討及び実用性確認のための実証試験を実施する。さらに、ケーブルの荷捌き方法や各種船舶の最適な運用方法といった工法／設備の最適化検討を実施する。

(b) 500kV 直流海底ケーブルの最適な敷設工法、設備の開発

高効率で信頼性の高い 500kV 直流海底ケーブル敷設工事を実現する工法／設備モデルの検討、ならびにその効果検証のための実験を実施する。また、本実験で使用する直流ケーブルの設計、試作を実施する。

④ 拡張性を考慮したケーブル接続部の要素技術開発（住友電気工業）

要素技術として、接続部の基本構造を同一とした中間ジョイントを設計、試作し、その実用性評価を実施する。実用化においては、Y 分岐のジョイントとなるが本開発においては、同等の構造である 500kV 級に対応可能なプレハブジョイントを試作し、基本性能を評価する。

(6) 洋上プラットフォーム新形式基礎の基盤技術開発（大林組）

洋上風力発電の導入が盛んな欧州では、洋上 PF の基礎形式はモノパイルやジャケット、重力式が一般的であるが、我が国特有の急峻な海底地形、地質および地震や海流などの条件に適し、かつ、従来よりも施工が容易な基礎を開発することで工期短縮とコスト削減に寄与することが出来る。本開発では、我が国の海象地象に適した洋上 PF 向けの新たな基礎形式を開発することを目的として、我が国の海底地質、地形などの自然環境を調査し、そのうえで、最適となる基礎形式の検討、および模型を用いた性能評価を行う。得られた結果をもとに、新基礎形式の設計、施工法の検討を行い、国内導入に有効となる基礎形式に要求される仕様を策定する。

<具体的な実施内容>

① 海外事例調査と既往及び新形式基礎の検討

洋上架台・基礎形式としては、既往形式であるモノパイル、ジャケット、重力式基礎や新形式基礎であるスカート・サクシオン基礎などが考えられる。まず海外事例の収集を行って、それぞれの基礎形式の基数、規模、設置海域条件などを整理し、既往および新形式基礎の適用条件を検討する。

② 日本沿岸域の特性調査及び基礎形式の比較

日本は有数の地震国であるため、架台・基礎の設計においては、地震の影響が重要な設計条件となる。日本沿岸域での適用検討に必要な日本の海象条件および地象条件について調査し、日本での海象地象条件での各種架台・基礎形式の適用性を比較する。

③ 新形式基礎の性能照査

架台・基礎形式のうち最も新しい形式であり、洋上風力発電の基礎としても注目されているサクシオン基礎を活用した新形式基礎について水平抵抗性能の把握を行う。洋上架台から荷重が作用した際の新形式基礎の挙動解明および設計法提案を目的に、基礎と上部架台をモデル化した試験体を用いた性能照査実験を実施する。

④ 新形式基礎の設計・施工法の検討

海外での研究事例および③で実施した模型実験をもとに、新形式基礎の設計法の提案を行うとともに施工法の検討を行う。

⑤ 新基礎形式の抽出

②で調査した日本での海象地象条件に基づき、国内での適用地域を想定した新形式基礎を用いた洋上架台・基礎の概略設計を行って、国内導入に有効となる基礎形式に要求される仕様を策定する。（図 2-4）

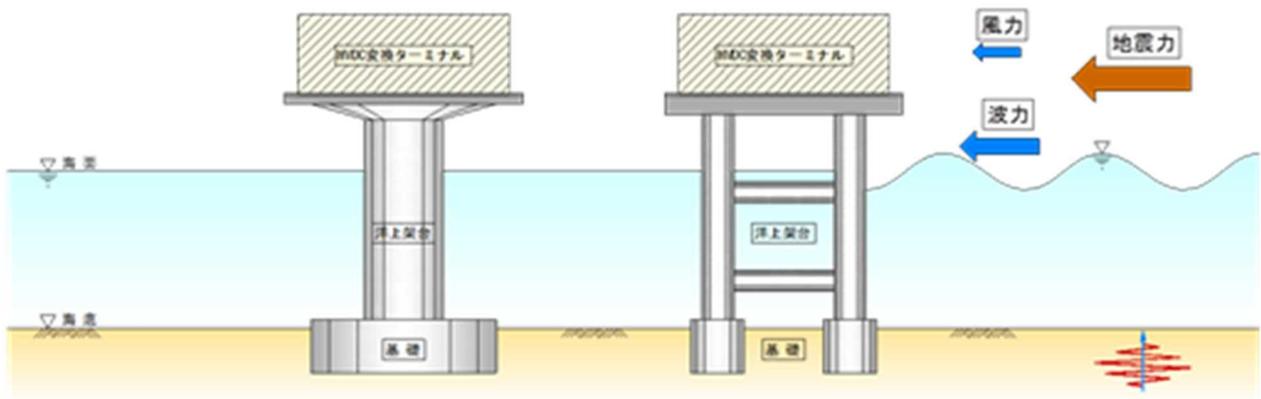


図 2-4 新形式基礎を用いた洋上架台・基礎例

(7) 洋上 PF 小型化の検討

本開発では、将来に向けた技術開発として、中小規模の洋上 WF 向けおよび洋上 PF の小型化に有効となるコンポーネントの基礎技術開発を目的として以下を実施する。

①洋上風力発電の直列接続方式の開発（東京電機大学）

中小規模の洋上 WF を従来の並列接続して洋上 PF で集電する方式ではなく、洋上風車を一筆書きに直列に接続して集電することで洋上 PF が不要となる洋上風車の直列接続方式の基礎技術開発を行う。具体的には、風力発電機を模擬した直列接続方式の模擬試験装置を開発して実験を行う（図 2-5）。まず、基礎的な実験として風力タービンが一定風速で駆動されているときに、システム出力にインピーダンス一定の負荷装置が接続されている場合を対象に、風車の出力に対するインバータの出力特性などを検証する。次に、風車の出力の変動性を考慮した入力に対する出力特性を検証し、風力発電システムの出力を系統に接続して、負荷装置が接続された場合と同様な実験的検討を行う。以上の実験結果を用いて、直列接続風力発電システムの解析モデルによるシミュレーション結果を評価することより、モデルの妥当性を確認するとともに、より高精度なシミュレーションモデルを開発し、様々なケーススタディを実施することで、システム各部のパラメータの動作特性に及ぼす影響などを明らかにする。

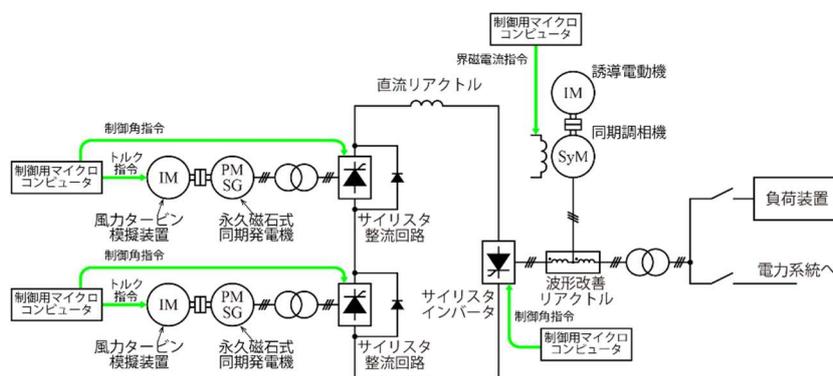


図 2-5 永久磁石式同期発電機を用いた直列接続風力発電模擬システム

②高周波変圧器を適用した交直変換設備の小型化の検討（大阪工業大学、日立製作所）

従来の変圧器と比較して、大幅に体積と重量が削減可能な高周波変圧器の開発、及びそれを電力変換設備に組み込み、制御方式や冷却系の小型最適化を含む、電力変換設備の小型化に向けた技術開発を行う。具体的には、以下の開発を実施する。

<具体的な実施内容>

(a) 高周波変圧器を用いた電力変換システムの基盤技術開発（大阪工業大学）

モジュラーマルチレベル変換器(MMC)およびイミタンス変換リンク付き変換器技術と高周波変圧器を含む Solid State Transformer (SSTR)の技術の高周波運転のシミュレーションを行い、制御性・回路構成・パラメータの最適化に必要なデータを取得する。シミュレーション結果に基づき、制御性・回路構成・パラメータの最適化を行い、数kVAの小容量変換システムを設計し、性能試験を行う。50/60Hzでの性能試験も併せて実施し、小型軽量化に対する比較検討を行う。さらに、通常時および系統事故時のいくつかのシナリオを想定して、構築したイミタンス変換リンク付きモジュラーマルチレベル変換器(MMC)シミュレーション用モデルを構築し検証を行う。高周波変圧器、MMCおよびイミタンス変換リンク付き変換器の検討結果を反映させた改良モデルを作成し、リアルタイムシミュレータ・モデルの設計手法を確立する。

また、電磁界解析ソフトおよび熱流体解析ソフトによるシミュレーションを行い、変換器冷却系のモデリング手法と逆解析法を用いた設計に必要なデータを取得し、新たな知見の元で変換器冷却系を設計し、性能試験を行う。従来の冷却系の性能試験も併せて実施し、小型軽量化に対する比較検討を行う。

(b) 高周波変圧器の開発（日立製作所）

集電昇圧機構の小型化が期待できる高周波変圧器について、5KVAの小規模試作器による通常巻と漏れ磁束を低減する一層毎交互巻構造の比較検証をする。また、500KVA試作器を作成し評価することで実規模での巻線構造の違いによる評価と開発課題を抽出する。

③変換器用ガス絶縁変圧器の適用検討（東芝）

直流系統へ接続するガス絶縁変圧器を洋上設備へ適用することによる、事故発生時の絶縁油漏えい事故対策の簡略化による洋上PF小型化の可能性を考慮し、従来の油絶縁変圧器とガス絶縁変圧器に対して電界解析を実施し、以下の開発を通して適用可能性について評価する。

<具体的な実施内容>

(a) 洋上風力向け直流送電システムに必要な変換器用変圧器のガス絶縁化の基礎検討、変換器用変圧器のガス絶縁化による寸法および重量を評価する。

(b) 洋上風力向け直流送電システムにおいて、ガス絶縁変換器用変圧器の導入によるメリットを整理する。

(c) 変換器用変圧器に求められる仕様を検討し、仕様に対してガス絶縁化に向けた絶縁性能・冷却性能を評価する。さらに、変換器用変圧器の寸法・重量の諸元を算出する。

2.1.4 システム開発と要素技術開発の関連性

「2.1.2 研究開発項目」「2.1.3 開発テーマ」において2つの研究開発項目と7つの開発テーマの開発内容について具体的に述べた。ここではさらに、事業目標である「既存の交流送電システムに対して、平均稼働率（信頼性）等を含めたコスト削減割合 20%以上の導入モデルケースを完成する。」を達成するための開発フローについて述べる（図 2-2）。

モデルケースの検討にあたり、実際に国内の海域に大規模洋上 WF を 2~3 地点設置した場合を想定して洋上 WF の集電方式、および送電システムの計画・設計を行う。具体的な洋上 WF の設置位置は、「洋上ポテンシャルの整備結果」を考慮して行う。系統設計は「交流送電」と「自励式直流送電」の2つの送電方式について行い、得られたモデルに対してそれぞれ経済性を評価し、結果を比較検証する。この時、「交流送電」は豊富な知見と経験に基づき評価に必要なコスト情報、送変電損失などは比較的容易に試算できる。一方、「自励式直流送電」は国内の導入事例が無いため、まず、欧州の2端子の自励式直流送電システムに関する複数の文献を参考にして導入コストを試算し、これをベースケースとする。そのうえで、我が国の自然条件（特に水深）によるコスト増分、および要素技術開発にて得られるコスト情報（洋上 PF 基礎、直流遮断器、海底ケーブルなどの導入コストおよび従来技術に対するコスト削減効果）をベースケースに適用した経済性評価を行い、最終的に事業目標を達成したモデルケースの完成を目指す。また、系統設計からの経済性評価において、コスト削減目標の達成が困難である場合、課題を整理したうえで、必要に応じて要素技術開発に対する要求仕様の一つとしてコスト削減情報をフィードバックし、要素技術開発ではこれを踏まえた機器仕様を検討する。

多端子直流送電システムの解析モデルには、直流遮断器の運転シーケンスやケーブル定数などのパラメータを含むが、これらは要素技術開発で得られた結果を用いる。なお、開発した解析モデルを用いて、モデルケースの電力品質を評価して妥当性を確認する。

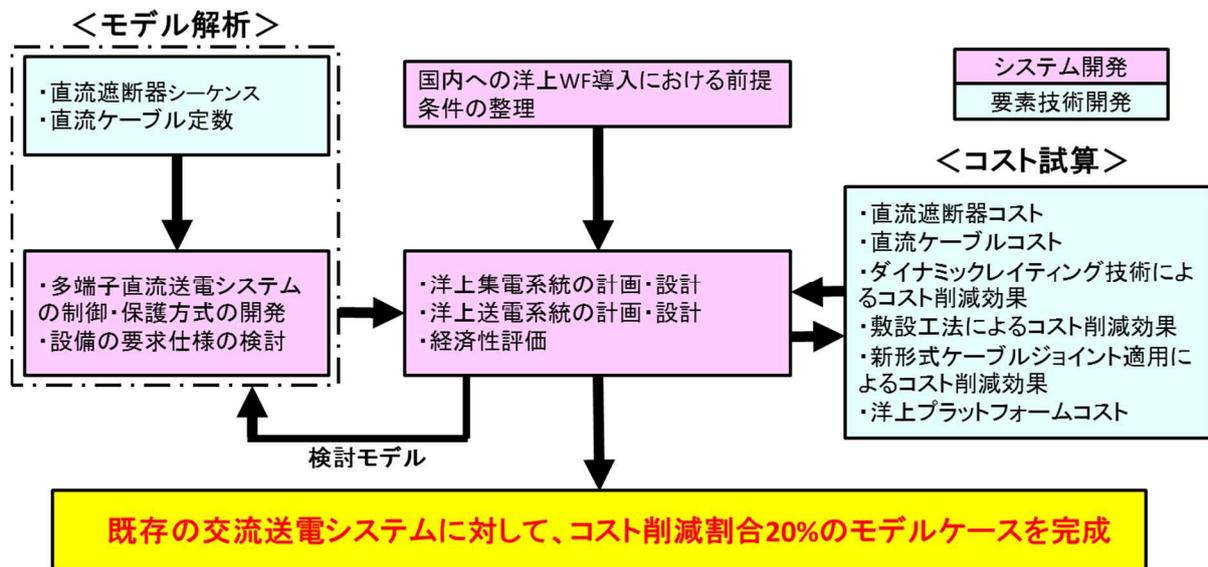


図 2-2 目標達成までの開発フローイメージ

2.1.5 事業の全体計画と予算

2018年度以降については、2017年度の中間評価の結果を踏まえて、NEDOとして継続の可否判断をし、その後、最長2年間の研究開発を行う予定である。「2.1.4 システム開発と要素技術開発の関連性」において、システム開発と要素技術開発の関係性について述べたが、ここでは各研究開発項目の開発計画について述べる（表2-1）。

システム開発では、4年目までに洋上風車の集電システムの計画と設計、複数の洋上WFの送電システムの計画と設計と経済性評価を行う。ここで、多端子洋上直流送電システムの経済性評価については要素技術開発からフィードバックされるコスト削減効果を盛り込む。また、多端子洋上直流送電システムの制御・保護方式および異メーカ連系を可能とする自動式変換器の標準仕様を検討する。4年目以降は、要素技術開発からフィードバックされる信頼性試験結果などの情報を盛り込み、設備稼働率も盛り込んだ経済性評価を行うことで事業目標である経済性のあるモデルケースの完成を目指す。また、モデル解析や系統計画・設計などのシステム開発を通して機器仕様を検討し、結果は要素技術開発へフィードバックして設計仕様へ反映する。要素技術開発では、最初の3年で直流遮断器以外の要素技術開発の試作・評価試験を完了し、4年目以降は長期信頼性試験や設計仕様の検討を行う。これまで述べたように、システム開発と要素技術開発は互いに協調して事業目標の達成に向けて一体的に推進している。

表2-1 事業全体の計画概要と事業予算

項目	FY2015 (H27年度)	FY2016 (H28年度)	FY2017 (H29年度)	FY2018 (H30年度)	FY2019 (H31年度)
I. システム開発	多端子直流送電システムのシミュレーションモデルの開発		ケーススタディ、標準仕様の検討 自動式変換器の異社間連系技術の確立		
	洋上WFのポテンシャル整理等	系統計画・設計、モデルケースの検討、電力品質の評価など			
		特性・コスト		要求仕様	
II. 要素技術開発 直流遮断器	遮断原理検証器の開発	遮断原理検証試験			ハイブリッド遮断器製作と遮断試験、システム検証
		機械遮断部 半導体遮断部 試作機設計	試作、遮断性能試験・改修 (機械遮断部、半導体遮断部個別実施) コスト・外形試算		
II. 要素技術開発 送電ケーブル関連技術開発	異径ケーブルジョイントの試作、試験 ダイナミックレイティング試験環境構築、試験、アルゴリズム開発			長期信頼性試験、設計仕様の検討	
	敷設工法に係る模擬モデルを製作しての評価 ケーブル試作、引張り試験、防護管の試作・評価				
II. 要素技術開発 洋上PF新形式基礎の 基礎技術開発	基礎形式選定、模擬試験、構造解析			基礎設置工法の検討 PF据付工法の検討	
II. 要素技術開発 洋上PF小型化の検討	模擬試験装置の開発、試験・評価 シミュレーションモデルの構築				設計仕様の検討
予算(百万)	1,041	1,482	(942)	(800)	(500)

※ () 内数字は予定

2.2 研究開発の実施体制

本事業で実用化を目指す多端子洋上直流送電システムは、システム開発と要素技術開発が協調して推進していくことが必要であるため、専門的で深い知識と経験を持つ企業（パワエレ、ケーブル、建設など）や大学などの研究機関（系統工学、パワエレ、洋上風力など）、およびマルチベンダ化に向けた競合企業の参画が必要となる。以上のことを踏まえて、NEDOは公募により、複数の企業、大学等の研究機関から研究開発実施者を選定し、2015年度（平成27年度）より委託事業として実施している。

なお、我が国の系統計画・設計は電力会社が担っていることから、多端子洋上直流送電システムのユーザも電力会社を想定しており、ユーザ目線での開発を重視するために東京電力を代表機関とした実施体制としている（図2-6）。

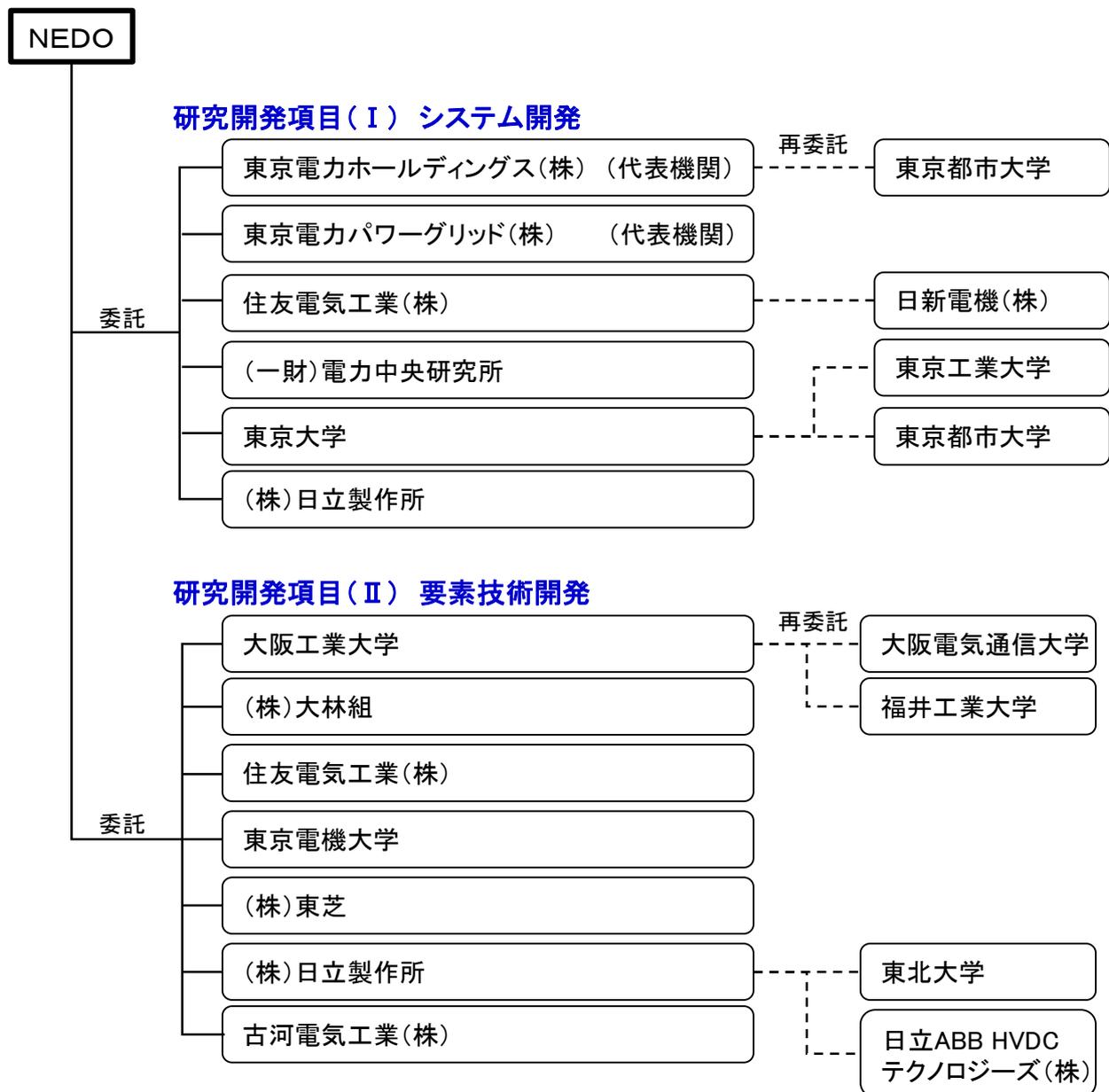


図 2-6 本事業の実施体制

2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO は、本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施している。具体的には、実施者と協議して統合推進委員会、システム開発ワーキング（WG）、要素技術開発 WG を設置し、統合推進委員長、および WG の研究統括を選定し、運営している。ここでは、進捗の確認のみならず外部有識者からの技術的指導を頂く場として活用するとともに、今後の事業の方向性について周知する場としている。また、統合推進委員長、研究統括、関係者を交えた代表者会議を実施し、事業者間の連携や開発計画の変更に関する事項について迅速な意思決定を行い、その決定事項は必要に応じて統合推進委員会や WG にて周知するなど、きめ細やかなマネジメントを実施している。以降に具体的な取り組みを述べる。

2.3.1 統合推進委員会

事業全体の実施者間での進捗および事業の方向性の確認、NEDO からの事業方針に関する周知、実施者間および NEDO との活発な議論の場とすることを目的として設置した。委員長には電力システムおよび直流送電技術に精通し、送変電に関する世界的な技術課題を討議する CIGRE の国内委員会 JNC の委員長である東京大学の横山教授を選任し、技術的な視点で成果に対する今後の開発の方向性や課題解決に向けた今後の取り組みなどについて包括的に指導頂いている（表 2-3）。さらに、外部有識者として、電力系統とパワエレ技術を専門とする福井大学の田岡教授、徳島大学の北條教授、パワエレ技術および風力発電を専門とする大阪大学の舟木教授を選任し、それぞれの視点で技術指導を頂いている。

統合推進委員会は原則として年 2 回（6 月、3 月）行い、2017 年 7 月末時点で 5 回実施している。統合推進委員会では全ての委託先が出席し、システム開発と要素技術開発の進捗を共有すると共に、各研究開発項目での協調が必要となるシミュレーションの前提条件や試験結果、コスト削減効果などについてその妥当性や課題解決に向けた今後の計画などについて、委員長、外部有識者の指導を頂きつつ活発な議論を行っている。NEDO は、事業方針の変更に関する周知、事業全体の方向性の把握と事業目標に沿った開発の方向性を合わせるための指導を実施者に対して行っている。

2.3.2 直流送電システム WG、直流送電システム要素技術開発 WG

各研究開発項目で取り組む実施者間での進捗や成果・課題の共有、および NEDO からの事業方針の変更に関する周知、今後の開発の方向性を確認することを目的として設置した。

直流送電システムシステム WG（システム WG）では、異なるメーカーのモデルを統合した解析や具体的な海域でのモデルケースの検討などを行う。WG の研究統括としては、中立な立場でシステム全体を包括的に指導頂くため、系統工学やパワエレ技術などの専門分野の深い知見を持つ東京大学 馬場准教授を選任した（表 2-3）。直流送電システム要素技術開発 WG においては、ユーザ目線での要素技術開発の仕様や方向性に関する指導が必要であることから、東京電力パワーグリッドの萩元氏を研究統括に選任した（表 2-3）。

各 WG は年 3～4 回実施し、2017 年 7 月末時点で計 16 回実施した。各 WG では、研究統括が中心となって、進捗状況、課題解決策、今後の開発の方向性を確認し、研究統括より技術的指導を頂いている。NEDO は事業全体の方向性を把握したうえで、各開発テーマの実施計画をきめ細やかに調整し、「システム開発」と「要素技術開発」が円滑に遅滞なく協調して推進出来るようマネジメントしている。

表 2-3 主要な研究者

氏名	所属・役職	主な役割
横山 明彦	東京大学 教授	統合推進委員長 事業全体の技術開発面での包括的な指導
馬場 旬平	東京大学 准教授	システム開発研究統括 システム開発の進捗管理、技術面の指導
萩元 信彦	東京電力パワーグリッド グループマネージャー	要素技術開発研究統括 要素技術開発の進捗管理、実用化・技術面の指導

2.3.3 個別のマネジメント

外部情勢の変化に対応した開発計画・方針の変更の必要性が発生した場合や、毎年度始めに提出を求める発注時期や試験開始時期を含む予算執行計画の進捗状況を確認していく中で、事業全体の開発計画に対して影響が出るような開発の遅れや課題などが発生した場合には、NEDO は委員長、研究統括、必要に応じて関係実施者も参加した代表者会議を実施し、事業全体への影響を考慮しつつ速やかな意思決定を行っている。また、代表者会議での決定事項は統合推進委員会や各WGで全実施者に向けて周知するとともに、必要に応じて個別実施者との打合せにより周知徹底を図るなど、円滑な事業推進に努めている。なお、実施者からの試験内容の変更といった計画変更の申し出についても、必要に応じて研究統括を交えた検討会を速やかに開催して議論し、NEDO は事業全体の方向性と研究統括の意見を踏まえて総合的に意思決定している。このように、NEDO は中立的な立場から、速やかな意思決定を行うとともに、委員会やWGなどにより事業全体の方向性を把握しつつ円滑な事業推進に向けた取組を行っている（表 2-4）。また、多端子直流送電システムは、海外でも実用化に向けた取組がされており、海外の動向（論文、海外プロジェクト資料など）や現地調査で得られた情報などは、実施者間で速やかに共有することが技術開発を戦略的に進めるためには重要となる。従って、本事業では技術開発の効率化、実施者間の連携強化を目的としてグループウェアを導入し、情報共有、スケジュール管理などに活用している。

表 2-4 NEDO の個別のマネジメント実績（2017 年 7 月時点）

項目	実施回数	主な内容
統合推進新委員会	5 回	事業方針の周知、事業全体の方向性確認
各 WG	16 回	事業方針の周知、事業全体の方向性確認
委員長、研究統括との代表者会議	17 回	事業方針または実施計画変更の必要性が生じた場合の議論と意思決定
実施者との検討会	28 回	事業方針、計画等の周知徹底、事業者からの個別の開発計画の変更や今後の進め方などに関する意思決定
現地調査（実施者）	6 回	試作、試験の状況確認など

2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

2.4.1 プロジェクト運営マネジメント

「2.3 研究開発の運営管理」で述べた通り、NEDOは統合推進委員会、各WG、などを活用し、迅速なマネジメントにつながる取り組みを実施している。また、事業方針や実施者からの計画変更の申請などに対しては代表者会議や検討会を開催し、事業全体へ及ぼす効果を的確に判断して効率的で手戻りのない意思決定を行ってきた。さらに、参画する実施者が多いことから、委員会やWGに留まらず、個別実施者と打合せを積極的に実施し、正確な状況の把握と変更事項の確実な周知を徹底している。

2.4.2 知的財産・標準化に係るマネジメント

知財は、事業実施後の実用化に向けた出口戦略を構築・実現するに当たり鍵を握ると共に、戦略的な取組を関係者の合意の下で進める必要がある。その実現に向けた的確なマネジメントの実施が不可欠であり、国全体のイノベーションシステムを俯瞰した、プロジェクトの結果として生み出された成果のうち未利用であるものについて、活用を希望するユーザとのマッチングを積極的に行う事により、その有効活用を図ることを重要視している。これらの考え方から、NEDOはプロジェクトを支える効果的な知財マネジメントの実施と未利用成果等の有効活用への取り組みを強力に推進することを目的として「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」（以下、「NEDO知財方針」）を定めている。本事業では、「NEDO知財方針」に基づき、再委託先を含む全実施者間において、「次世代洋上直流送電システム開発事業に係る知財合意書」（以下「知財合意書」）を取り交わし、出願による権利化、特許を受ける権利の帰属、知的財産権の実施許諾などについて規定している。さらに、知財運営委員会を立ち上げ、知財合意書の規定に基づき、知財運営委員会の構成、運営等に関し必要な事項を定めている。具体的には、東京大学 馬場准教授（直流送電システム開発WG研究統括）を知財運営委員会の委員長として選任し、審議案件ごとに、その内容に応じて、プロジェクト参加者に属する者から知財運営委員会の委員を2名以上指定し知財運営委員会を立ち上げて審議を行っている（表2-8）。これまでに、特許申請に対して6回の知財運営委員会を実施し、速やかな合意形成を行っている。

また、主に要素技術開発が対象となるが、市場でのシェア獲得に向けて、特許とすべきものは特許化し、特許化が得策でないものはノウハウとする等、戦略的に出願するよう、各実施者の事業化に向けた戦略を尊重しつつ、指導を行っている。

表 2-8 知財運営委員会 委員リスト（2017年7月時点）

氏名	所属・役職	主な役割
馬場 旬平	東京大学 准教授	委員長
萩元 信彦	東京電力パワーグリッド グループマネージャー	委員
大野 照男	東京電力ホールディングス 副室長	委員
中島 達人	東京都市大学 教授	委員

3. 情勢変化への対応

将来の我が国への大規模洋上風力の導入拡大に貢献する多端子洋上直流送電システムを開発する本事業は、その位置づけより近々の社会・経済の情勢変化に対し、直ちに事業方針や計画を変更するほどの影響を受けるものではない。しかしながら、「1章 1.3.2 各国の風力発電の政策・動向」や「1.3.5 多端子直流送電システムの実用化に向けた海外の取組」において述べた通り、風力発電の導入が進んでいる国々の情勢や具体的な取組を把握している。加えて、中長期的な視点で我が国の広域系統方針を検討している広域機関の情勢も情報収集しており、これらを踏まえて、本事業の方向性と照し合せながら推進している。

4. 評価に関する事項

2015年2月のNEDO事前評価において、次世代洋上直流送電システム開発事業をNEDOが主導して実施することの妥当性について評価され、本事業の位置付けは妥当であり、必要性も十分であると判断された。

なお、技術的及び政策的視点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を2017年度に、事後評価を2019年度に実施する。

3. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

1.1 成果の達成状況

2017年7月時点での成果の達成状況を示す。

以下に、研究開発項目ごとの中間目標、成果と達成度を示す。

なお、達成度は◎、○、△、×の4段階で記載し、それぞれ以下の分類で評価した。

- ・2017年7月末時点で中間/最終目標を達成した場合を「◎大幅達成」
- ・2018年3月末時点で中間/最終目標を達成する見込みの場合を「○達成」
- ・2018年3月末時点で中間/最終目標が一部未達の見込みの場合を「△一部未達」
- ・2018年3月末時点で中間目標の達成が見込めない場合を「×未達」

表 3-1 開発成果と達成状況

システム開発		
中間目標	成果	達成度
システム開発として多端子洋上直流送電システムの設計・調達・建設（EPC）と運転・保守（O&M）等を検討した結果を使い、また、多端子洋上直流送電システム向けに要素技術開発するコンポーネントの特性を使い、モデルケースの可能性検討を行い、既存の交流送電システムに対して、コスト削減割合 20%を得る。	<ul style="list-style-type: none"> ・洋上 WF 地点を 3 か所仮設定し、既存技術を用いた交流送電と直流送電の多端子送電システムの計画、設計、経済性評価を試算した結果、交流送電システムがコスト的に優位との結果となった ・今後、洋上 PF 数や送電ルートなどの最適化設計、そして要素技術からのコスト削減効果を盛り込んで経済性評価を行い、コスト削減割合 20%のモデルを得る見込み 	○
要素技術開発		
中間目標	成果	達成度
多端子洋上直流送電システム向けに新たに必要となるコンポーネントのプロトタイプ設計と試作、性能試験を行い、モデルケースから要求される特性を得る。あわせて、既存の交流送電システムに対して、モデルケースのコスト削減割合 20%へ貢献する。	<ul style="list-style-type: none"> ・直流遮断器は、原理検証器を開発し、低損失で高速遮断を実現する主回路方式を確立した。現在は、数十 kV 器の開発を進めている ・他の要素技術開発は、試作を完了し、評価試験を行った。今後、要素技術のコスト情報、および評価試験等により得られた特性値をシステム開発へフィードバックする 	○

◎大幅達成、○達成、△一部未達、×未達

1.2 最終目標達成に向けた今後の課題、課題解決の見通し

研究開発項目ごとの最終目標と目標達成に向けた今後の課題、課題解決に向けた見通しを以下に示す。

表 3-2 課題と課題解決の見通し

システム開発		
最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
多端子洋上直流送電システムのモデルケースから、導入を想定した1~3 ケースを選択・システム設計し、また、要素技術開発されたコンポーネントのプロトタイプにおいて試験された信頼性データと、それらコンポーネントを選択したモデルケース向けに設計した特性を用いて、既存の交流送電システムに対して、平均稼働率（信頼性）等を含めたコスト削減割合 20%以上の導入モデルケースを完成する。	平均稼働率（信頼性）等を含めた多端子洋上直流送電システムのモデルケースを完成すること	要素技術開発からの評価試験や長期信頼性試験から得られる設備の信頼性等をモデルケースへ反映することで達成出来る見通しである
要素技術開発		
最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
要素技術開発されたコンポーネントのプロトタイプの信頼性試験を行い、また、選択されたモデルケースに向けた設計と特性検討、あるいは、設計と試作、性能試験を行い、それらコンポーネントの仕様を完成する。あわせて、既存の交流送電システムに対して、そのモデルケースの平均稼働率（信頼性）等を含めたコスト削減割合 20%以上へ貢献する。	<ul style="list-style-type: none"> ・試作・試験より得られた結果をもとに、機器仕様を完成すること。設計指針を策定すること ・試作、試験より得られた特性値、信頼性データをシステム開発へフィードバックする 	<ul style="list-style-type: none"> ・現行の実実施計画を着実に実行すれば目標は達成可能である ・進捗管理とシステム開発との密な連携を行うつつ開発を推進していく

2. 研究開発テーマの成果と達成度及び最終目標に向けた今後の課題、課題解決の見通し

2017 年 7 月時点における研究開発テーマに対する（1）研究開発の目的、（2）成果の達成状況、（3）具体的な実施状況、（4）最終目標達成に向けた今後の課題、課題解決の見通し、の順で述べる。なお、成果の達成状況については、2017 年度に終了予定の開発テーマについては、目標を最終目標として記載した。

- 2.1 研究開発項目 I 「システム開発」
 - 2.1.1 国内への洋上 WF 導入における前提条件の整理
 - 2.1.2 洋上集電系統/洋上送電系統の計画・設計
 - 2.1.3 多端子直流送電システムの制御保護方式の開発、標準化
- 2.2 研究開発項目 II 「要素技術開発」
 - 2.2.1 直流遮断器の開発
 - 2.2.2 海底ケーブル関連技術開発
 - 2.2.3 洋上 PF 新形式基礎の基盤技術開発
 - 2.2.4 洋上 PF 小型化の検討

2.1 研究開発項目 I 「システム開発」

2.1.1 国内への洋上 WF 導入における前提条件の整理（日立製作所）

(1) 研究開発の目的・内容

我が国へ大規模洋上 WF を具体的に検討する場合、様々な自然条件や社会条件、電気設備の設置状況などを整理し、包括的に検討する必要がある。本事業で想定している洋上 WF は数百 MW クラスを超えるものであり、洋上風車の設置数は数十基に及ぶため設置海域は広範囲に渡ることが想定される。本開発では、過年度に実施された類似事業の条件を整理すると共に、自然条件や社会条件などの洋上 WF 設置における絞り込み条件を設定し、洋上風力のポテンシャルの高い地域を整理する。

(2) 成果の達成状況

(要約)

洋上風力ポテンシャルの調査のために風況データ等の収集・整備を行い、絞り込み条件を満たすポテンシャルの高い地域を抽出した。

以下に中間目標、成果と達成度を示す。

表 3-1-1 開発成果と達成度

洋上風力ポテンシャルの調査・海域情報の整備			
主な内容	最終目標	成果	達成度
我が国の洋上風力ポテンシャルの整理	自然条件や社会条件などの洋上 WF 設置における絞り込み条件を設定し、洋上風力のポテンシャルの高い地域を整理した	各種集計データを整備し、絞り込み条件を満たすポテンシャルの高い地域を抽出した	○

◎大幅達成、○達成、△一部未達、×未達

(3) 具体的な実施状況について

洋上風力ポテンシャルの調査を図 3-1-1 の検討フローで行った。

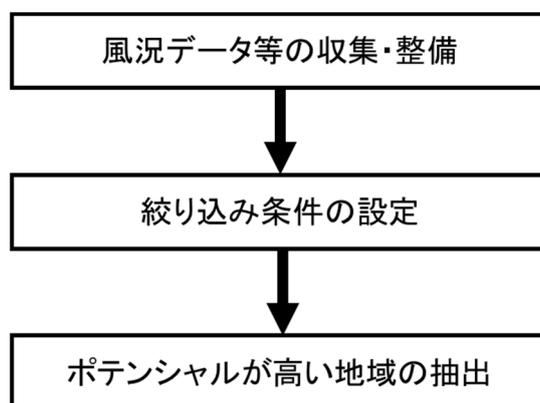


図 3-1-1 洋上風力ポテンシャル抽出の検討フロー

①風況データ等の収集・整備

表 3-1-2 に記載の各種データを収集しポテンシャル調査を行った。

表 3-1-2 整備データ一覧

No	カテゴリ	情報名	出典
1	①風況	NEDO 局所風況マップ	NEDO 作成の風況マップ
2		環境省風況マップ	平成 25 年度再生可能エネルギー導入拡大に向けた系統整備等調査事業委託業務成果
3	②自然環境	水深（500mメッシュ）	J-EGG500 水深データ（日本海洋データセンター）
4	③社会条件	離岸距離	国土数値情報海岸線
5	④法制度等	自然公園地域	国土数値情報 H23、生物多様性センター（国立公園）H27
6		自然環境保全地域	国土数値情報 H23
7	⑤電気設備関連	発電所	平成 25 年度再生可能エネルギー導入拡大に向けた系統整備等調査事業委託業務成果
8		変電所	
9		開閉所	
10	⑥その他	県別海域境界	本業務で作成

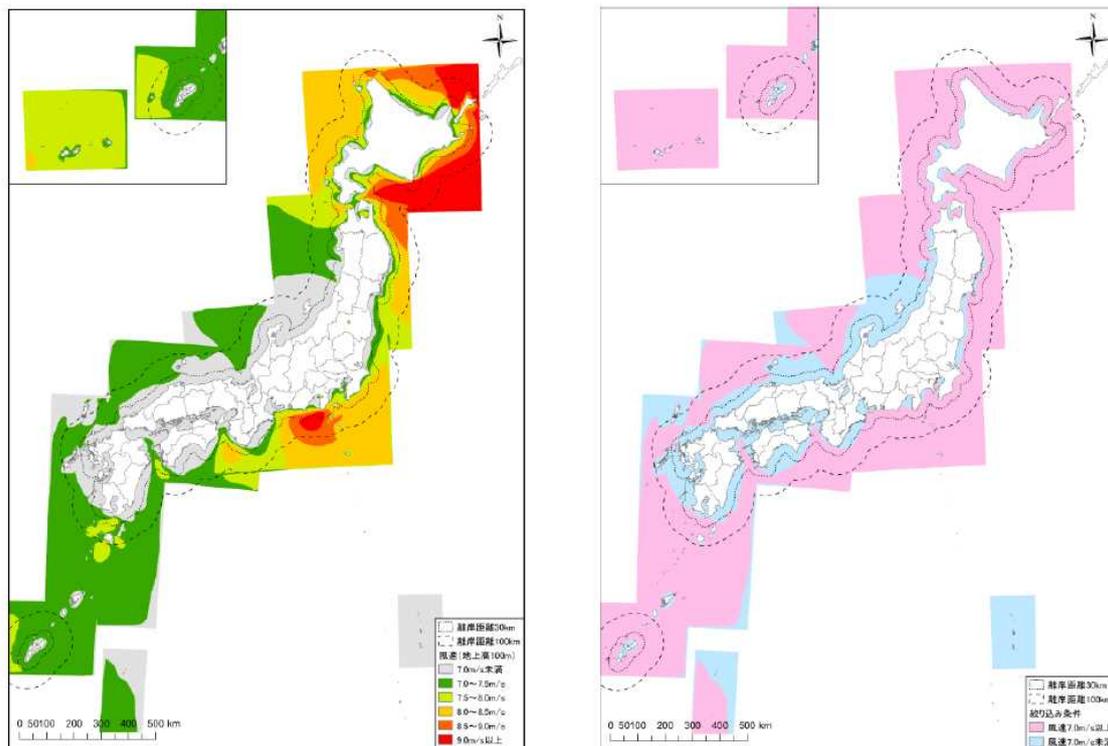
②絞り込み条件の設定

次に、過年度に実施された類似事業の条件を整理した。また、直流送電システムの設置を前提とし島嶼部や海岸線から遠い WF で発生した電力を送ることが可能になる事を考慮して本事業における絞り込み条件を設定した（表 3-1-3）。

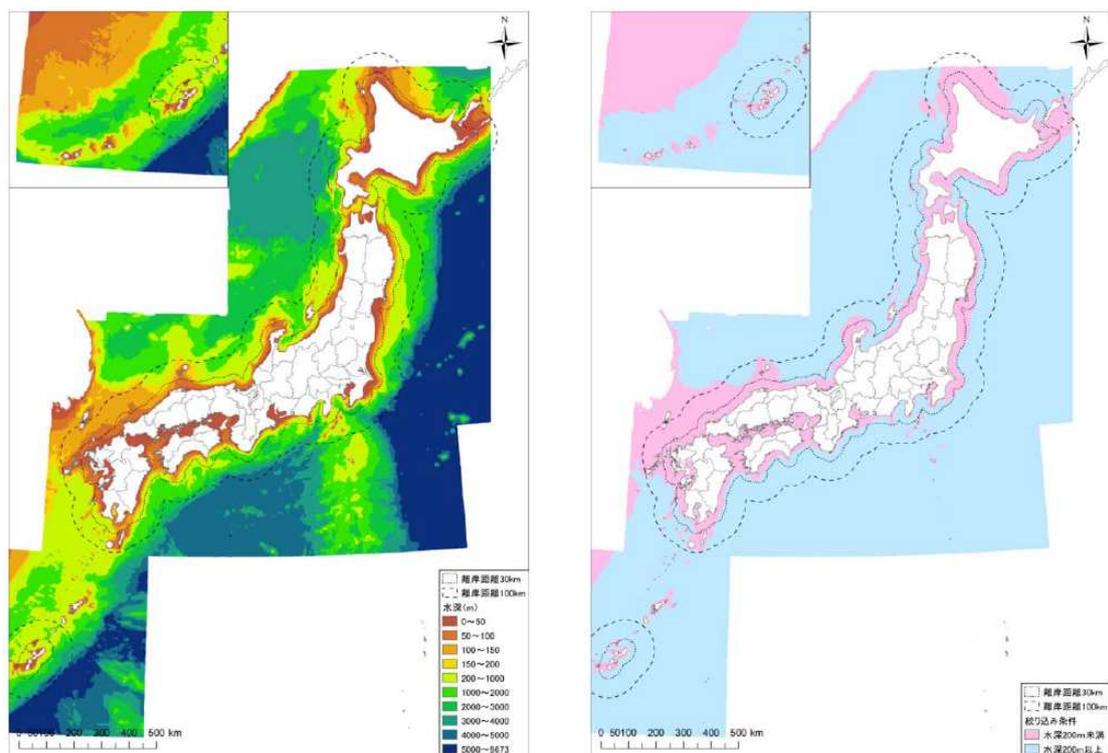
表 3-1-3 絞り込み条件

区分	項目	絞り込み条件
自然条件	速度区分	着床式：7.0m/s 以上 浮体式：7.5m/s 以上
	離岸距離	考慮しない
	水深	200m 未満
社会条件	法規制区分	国立・国定公園（海域公園）以外
その他	島嶼部の扱い	含める

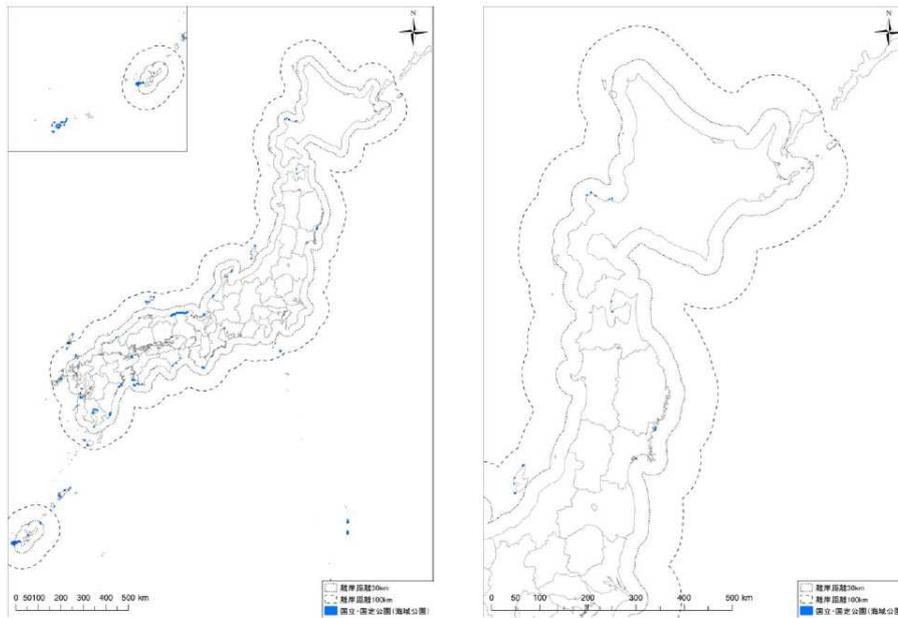
絞り込み条件に係る調査データおよび絞り込み結果を図 3-1-2～図 3-1-4 に示す。



(a) 地上高 100m に変換した洋上風況マップ (b) 絞り込み条件で区分した風況マップ
 図 3-1-2 絞り込み結果 (1)



(a) 水深 (b) 絞り込み条件で区分した水深
 図 3-1-3 絞り込み結果 (2)



(a) 国立・国定公園（海域公園区域） (b) 国立・国定公園拡大図（北海道～東北）

図 3-1-4 絞り込み結果 (3)

③洋上風力ポテンシャルが高い地域の抽出

各絞り込み条件の重ね合わせにより、洋上風力のポテンシャルの高い地域を抽出した（図 3-1-5）。北海道周辺に風況 8.5～9.0m/s や 9.0m/s 以上といった地域が抽出されており、本州でも青森～岩手県、千葉の九十九里、伊豆大島周辺、静岡～愛知県に風況 8.0m/s 以上の地域が抽出された。他にも、和歌山県～徳島県、愛媛県と大分県、中国～九州地方の日本海側、鹿児島県の南、沖縄県周辺に風況 7.0～8.0m/s の海域が抽出された。抽出したポテンシャルの高い地域を都道府県別に集計した。集計に際し、1km² 当りの風力発電設備の設置可能容量は 1 万 kW とした（図 3-1-6）。

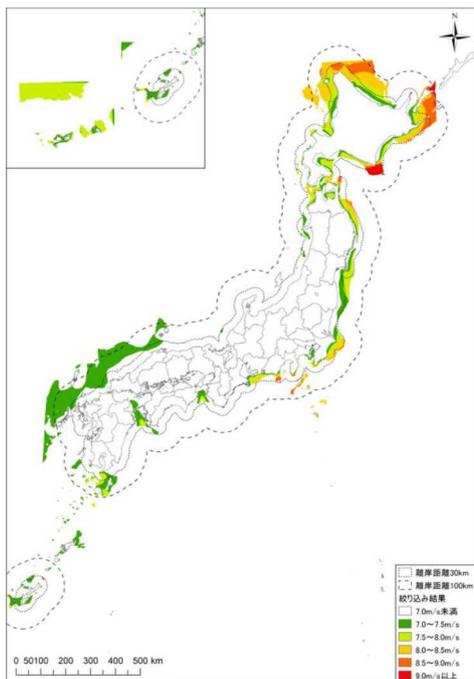


図 3-1-5 ポテンシャルの高い地域の抽出結果

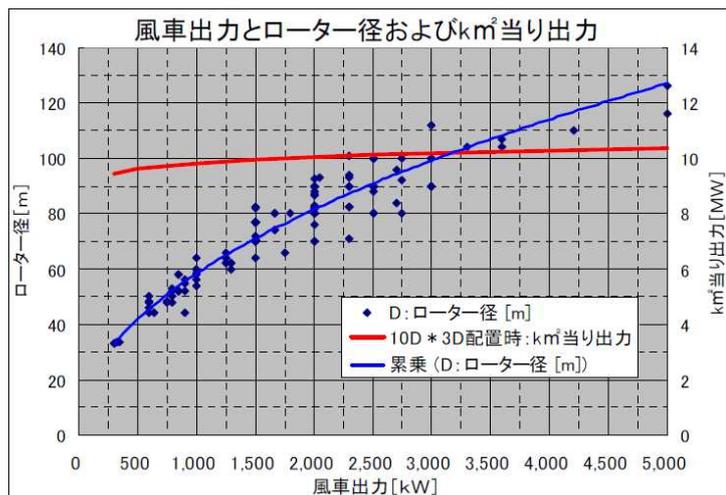


図 3-1-6 風車出力とローター系および 100×3D 配置時の 1km² 当たり出力値

出典：一般社団法人日本風力発電協会ロードマップ検討WG、「風力発電の賦存量とポテンシャルおよびこれに基づく長期導入目標とロードマップの算定」

なお、大部分の海域の都道府県別境界は定まっていないことから、都道府県境界に位置する漁業権に沿った延長線を海域境界線データとして仮定した。都道府県別の集計結果を表 3-1-4 に示す。洋上風力発電ポテンシャルの設備容量は全国で 1,670.7 百万 kW であった。都道府県別で最もポテンシャルが大きかったのは北海道の 631.9 百万 kW である。本州では青森県、岩手県、宮城県、福島沖など東北地方と山口県沖がポテンシャルの高い地域であることが分かった。

表 3-1-4 都道府県別ポテンシャル集計結果

区分 ^{※5}	風速 (m/s)	全国	北海道	青森県	岩手県	宮城県	秋田県	山形県	福島県	茨城県	栃木県
全体	7.0以上	1670.7	631.9	59.5	28.4	32.7	10.4	2.9	42.2	19.2	-
着床式	7.0以上	242.8	143.0	15.7	1.3	5.2	0.0	0.0	4.8	4.3	-
浮体式	7.5以上	224.3	150.0	15.2	3.4	2.6	0	0	0.8	0.9	-

区分 ^{※5}	風速 (m/s)	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	新潟県	富山県	石川県	福井県	山梨県
全体	7.0以上	-	-	43.4	0.01	4.6	0	0	0.1	1.2	-
着床式	7.0以上	-	-	17.7	0	2.0	0	0	0	0	-
浮体式	7.5以上	-	-	8.5	0	0.5	0	0	0	0	-

区分 ^{※5}	風速 (m/s)	長野県	岐阜県	静岡県	愛知県	三重県	滋賀県	京都府	大阪府	兵庫県	奈良県
全体	7.0以上	-	-	34.1	10.6	7.0	0	0.05	0	0	-
着床式	7.0以上	-	-	5.6	4.9	3.6	0	0	0	0	-
浮体式	7.5以上	-	-	8.4	2.5	1.0	0	0	0	0	-

区分 ^{※5}	風速 (m/s)	和歌山県	鳥取県	島根県	岡山県	広島県	山口県	徳島県	香川県	愛媛県	高知県
全体	7.0以上	3.8	0.1	56.4	0	0	95.5	7.1	0	12.4	7.0
着床式	7.0以上	0.2	0	0.1	0	0	0.1	2.1	0	0.4	0.03
浮体式	7.5以上	0.1	0	0	0	0	0	0.9	0	0.9	0.01

区分 ^{※5}	風速 (m/s)	福岡県	佐賀県	長崎県	熊本県	大分県	宮崎県	鹿児島県	沖縄県
全体	7.0以上	0	0.03	173.4	0	15.0	0.02	90.7	281.1
着床式	7.0以上	0	0.03	1.6	0	2.0	0.02	9.1	18.9
浮体式	7.5以上	0.002	0	0.02	0	0.6	0	4.6	23.5

※5 ・区分「全体」は、風速 7.0 m/s 以上で、且つ水深 200m未満の海域のポテンシャルの集計。

・区分「着床式」は、このうち水深 0~50mの海域のポテンシャルの内訳を集計。

・区分「浮体式」は、更に風況の良い風速 7.5 m/s 以上で、且つ水深 50~100mに絞った海域のポテンシャルを集計。

・「全体」≠「着床式」+「浮体式」であるため注意。

2.1.2 洋上集電系統/洋上送電系統の計画・設計（東京電力パワーグリッド、東京電力ホールディングス、東京大学、住友電気工業）

（1）研究開発の目的・内容

複数の大規模洋上 WF からの電力を効率的に集電し、需要地へ送電するための、我が国への導入ケースを具体的に検討することを目的として、①効率的な集電方式の計画、設計、②送電系統の計画、設計を行う。本開発では、洋上集電系統／送電系統の計画、設計にあたり、数百 MW の複数の洋上 WF を設定したうえで、それらの電力を効率的に集電するための洋上変電所の設備構成、および陸上への送電システムとして、多端子の交流送電システムと自励式直流送電システムを計画、設計し、経済性評価を行う。また、複数の洋上 WF を陸上系統へ連系する送電ネットワークの送電ルート選定を含む最適化手法を開発する。

（2）成果の達成状況

（要約）

（洋上送電系統の計画と設計）

本研究では、洋上系統の計画・設計に先立ち、供給信頼度の異なる 4 通りの考え方を設定した。また、風況や陸上の交流系統の状況を鑑み、洋上 WF の位置、陸上の連系エリア及び海底ケーブルのルートを具体化した。そして、交流連系と直流連系の場合について、モデル系統を設計し、経済性評価のための指標を定めた。以上を条件に、欧州における事業性評価手法の調査と、同評価で用いられるコスト情報の収集を実施するとともに、事業性評価を行うためのコスト試算方法を検討し、その結果を用いて建設コストを試算し、経済性を評価した。なお、試算した建設コストは水深数十メートルの実績から想定したものであり、本事業で想定される水深 150~200[m] 領域への適用には課題がある。これを踏まえ、今後は、本事業における洋上設備の建設コストの推定方法を検討するとともに、洋上集電系統の具体化を進め、それぞれの連系方式の経済性を再度評価し、コスト削減の着眼点を抽出する予定である。また、多端子直流送電システムが既存の交流連系システムと比較して、経済性の面などから優位となる条件の整理を進める。

（系統最適化手法）

複数の洋上 WF を陸上系統へ連系する送電ネットワークの接続方法導出を、数理最適化技術を用いて実施する最適化手法の開発を進めている。開発の初期段階として、洋上 WF1 地点と陸上連系点 1 地点とを連系するモデルを対象とし、最適化手法の基本的な部分の開発を実施した。その結果、直流送電システムと交流送電システムのそれぞれについてコスト最小となるシステム構成の評価を可能とし、更には送電距離に対して直流送電システムと交流送電システムとのコスト優位性が逆転する損益分岐点の評価を可能とした。

以下に中間目標、成果と達成度を示す。

表 3-2-1 開発成果と達成度

洋上送電システムの計画と設計（東京電力パワーグリッド、東京大学）			
主な内容	中間目標	成果	達成度
<ul style="list-style-type: none"> ・信頼度と経済性の評価に基づく洋上送電システムの計画と設計 ・本事業で開発を行う洋上送電システムの主要構成要素に関わるコスト試算を行うために必要となる各種前提条件や、先行事例におけるコスト試算の方法論について調査検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・洋上系統のコスト要因を抽出し、モデルシステムを設計する ・洋上系統の経済性評価指標を選定する ・洋上送電システムの事業性評価を行うためのフレームを構築する ・さらに、同フレームに基づく洋上送電システムの事業性を確保可能となるコスト水準などについても試算可能なコスト情報を収集し、モデルシステムの経済性評価を行う 	<ul style="list-style-type: none"> ・先行事例調査を通じ、コスト要因を把握するとともに、陸上交流系統の状況を鑑み、陸上連系エリアを具体化し、モデルシステムを設計した ・文献調査等から、モデルシステムの経済性評価の指標を選定した ・先行して洋上送電システムの開発が進む欧州における事業性評価手法の調査と、同評価で用いられるコスト情報の収集を実施するとともに、事業性評価を行うためのコスト試算方法を検討し、モデルシステムの経済性評価を行った 	○
国内導入における社会受容性・制度・ルール検討（東京電力パワーグリッド、東京電力ホールディングス）			
主な内容	中間目標	成果	達成度
①社会受容性 洋上風力発電を含む洋上送電システムが確保しておくべき社会受容性に関して、先行事例調査などを通じて多面的に検証し、洋上送電設備が獲得すべき社会受容性の整理	洋上送電システムの社会受容性に関わる検討フレームワークを構築するために必要となる先行して洋上送電システムが設置される国における環境アセスメント等のフレームワークを整理する	先行して洋上送電システムの開発が進む欧州（主にイギリス及びドイツ）における社会受容性を評価するフレームワークについてその内容を明らかにするとともに、わが国における現状との差異についても検討を行った	◎
②制度・ルール検討 我が国において整備しておく必要のある制度・ルールのあり方に関わる参考とするために、先行して洋上風力発電の開発が進む欧米諸国における、洋上送電設備に関連する制度・ルールの先行事例調査	先行して洋上送電システムの開発が進む欧米諸国における制度・ルールの調査を通じて得られた知見に基づき、日本国内における洋上送電システムの整備・運用に関わる、制度・ルールのあり方を策定のための基礎情報収集する	先行して洋上送電システムの開発が進む欧州（主にイギリス及びドイツ）における洋上送電に関わる制度・ルール（投資回収の方法論を含む）について整理を行った	◎
系統最適化手法の開発（住友電気工業）			
主な内容	中間目標	成果	達成度
直流/交流システム構成のコスト最小となる評価の実現	洋上 WF と陸上連系点とを連系する送電ネットワークの接続方法を導き出す系統最適化手法を開発する	洋上 WF1 地点と陸上連系点 1 地点とを連系するモデルに対して、直流送電システムと交流送電システムとのそれぞれについてコスト最小となるシステム構成の評価を可能とした	○

◎大幅達成、○達成、△一部未達、×未達

(3) 具体的な実施状況について

①洋上集電系統/洋上送電系統の計画・設計

(a) 洋上のモデル系統設計における基本的な考え方

洋上 WF の場合、稼働率は 20~50%程度と考えられ、単一設備故障により発電抑制が伴った場合も、発電抑制量[kWh]は、陸上の大容量電源の場合と比較して低いことが想定される。従って、周波数維持の確保を前提とすれば、洋上 WF と洋上系統を同時に保有する事業者の立場から考えると、発電抑制に伴う機会損失[円]と流通設備の建設コストを評価し、単一設備故障時の発電抑制を許容する洋上系統が経済的になる可能性がある。そこで、モデル系統設計にあたっては、流通設備の単一設備故障時の洋上 WF 全容量の送電可能は必須事項としないこととした。

以上を踏まえ、モデル系統は、以下の前提条件を満たす系統構成、設備容量とする。

条件①：単一設備事故時の電源遮断量は 1500MW 以下(周波数維持条件と想定)

条件②：全設備健全時は、発電を抑制しない

○系統構成は次の 2 通りとした。

系統構成①：ループ系統

・陸上連系エリアに送電制約が生じた場合に、他の陸上連系エリアに送電できる可能性

系統構成②：放射状系統

・陸上連系エリアに送電制約が生じた場合に、発電抑制または停止が必要になる可能性

○流通設備容量は次の 2 通りとした。

設備容量①：単一設備故障時に発電抑制を許容する容量

設備容量②：単一設備故障時も洋上 WF 全量送電可能な容量

系統構成と流通設備容量の組合せにより合計 4 通りのモデル系統を設計し、経済性を評価する。

(b) 洋上系統の具体化

「2.1.1 国内への洋上 WF 導入における前提条件の整理」の成果を参考に、洋上 WF の設置箇所は、福島沖・千葉沖・伊豆沖を想定し、風況や周波数セキュリティの観点から 1 カ所あたりの容量は 1500[MW]とした(図 3-2-1)。なお、出力-累積時間特性は図 3-2-2 を想定した(平均出力約 45%、停止時間約 1000 [hr])。陸上連系エリアは、陸上の交流系統の状況を鑑み、福島方面と神奈川方面を想定した。海底ケーブルルートは、最短ルートを選択すると水深が 2500m 以上となるルートが存在するため、本ルートは水深 150m 以下を選択し、敷設船の艀装装置の低減、ケーブル費用低減を図っている(要素技術開発の検討結果)。



図 3-2-1 洋上系統の概念図

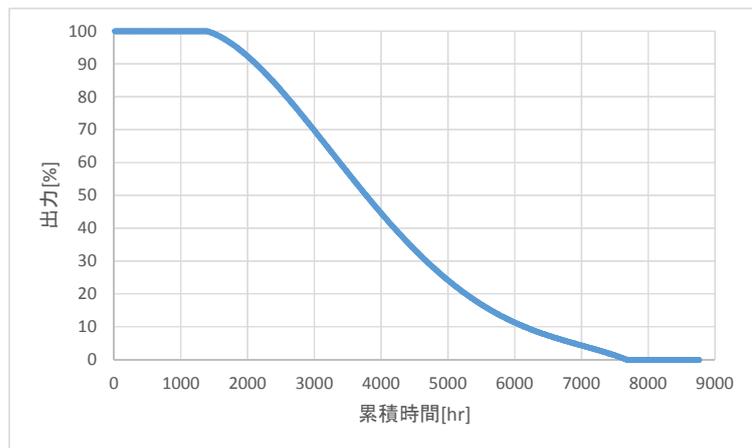


図 3-2-2 洋上 WF の想定出力-累積時間特性

(c) モデル系統の設計

(i) 設計の方針

まず、知見が多い交流連系にてモデル系統の設計を行い、洋上送電系統の設計の概要を把握した。その後、直流連系は交流連系と系統構成や流通設備容量の考え方が同等となるよう設計した。

(ii) 交流連系によるモデル系統の設計

モデル系統と設備構成を図 3-2-3、表 3-2-2 に示す。洋上 WF 容量から電圧階級は 500kV、交流海底ケーブルの長距離区間は、径間途中に充電容量を補償するための分路リアクトルを設置する目的で洋上 PF の建設を想定した。

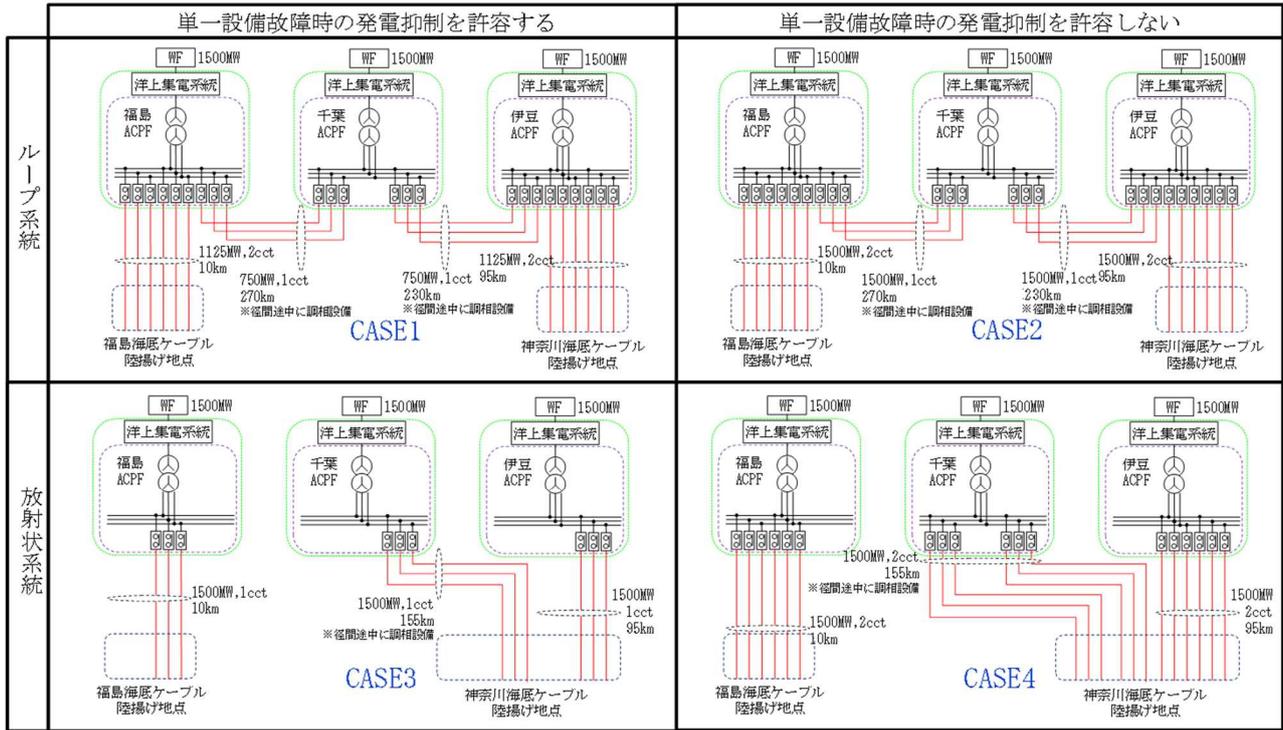


図 3-2-3 交流連系のモデル系統

表 3-2-2 交流連系のモデル系統における設備構成

		Case1	Case2	Case3	Case4	単位
洋上設備（調相設備設置用洋上PF除く）		3	3	3	3	台
調相設備設置用洋上PF		2	6	2	2	
海底ケーブル	福島沖 A C P F ~ 福島陸上変換所	6	6	3	6	本数
	福島沖 A C P F ~ 千葉沖 A C P F	3	3	0	0	
	千葉沖 A C P F ~ 伊豆沖 A C P F	3	3	0	0	
	伊豆沖 A C P F ~ 神奈川方面陸上変換所	6	6	3	6	
	千葉沖 A C P F ~ 神奈川方面陸上変換所	0	0	3	6	

※ACPF：交流プラットフォーム

(iii) 直流連系によるモデル系統の設計

モデル系統と設備構成を図3-2-4、表3-2-3に示す。交流連系と異なり、海底ケーブルの陸揚げ箇所に、直流を交流に変換する陸上変換所が必要となる。また、充電容量の補償が不要なため、径間途中に洋上PFを設置する必要がない。

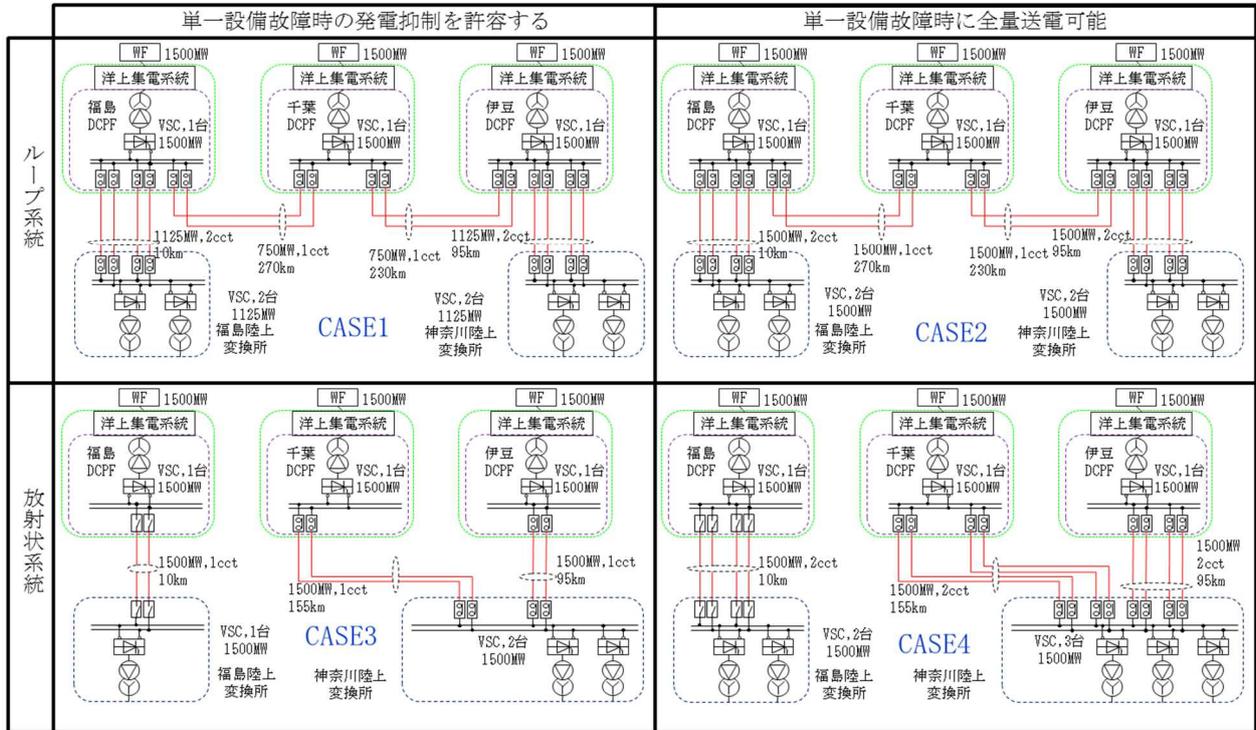


図3-2-4 直流連系のモデル系統

表3-2-3 直流連系のモデル系統における設備構成

		Case1	Case2	Case3	Case4	単位
洋上設備（直流遮断器除く）		3	3	3	3	台
洋上直流遮断器		16	16	4	8	
海底ケーブル	福島沖DCPF～福島陸上変換所	4	4	2	4	本数
	福島沖DCPF～千葉沖DCPF	2	2	0	0	
	千葉沖DCPF～伊豆沖DCPF	2	2	0	0	
	伊豆沖DCPF～神奈川方面陸上変換所	4	4	2	4	
	千葉沖DCPF～神奈川方面陸上変換所	0	0	2	4	
陸上変換器		4	4	3	5	台
陸上直流遮断器		8	8	4	8	

※DCPF：直流プラットフォーム

(d) モデル系統の経済性評価方法

(i) 基本的な考え方

洋上系統の経済性は、設備の運転・存続に係る年間経費として表し、設備年間経費、送変電損失、発電機会損失の合計を年間経費として評価することとした。

$$\text{年間経費[円/年]} = \text{設備年間経費[円/年]} + \text{送電損失[円/年]} + \text{発電機会損失[円/年]} \cdots \text{(式 3-1)}$$

(ii) 設備年間経費

減価償却費、税金、修繕費などを含めた経費であり、建設コストに設備経費率[%]/100 を乗じて算定した。

$$\text{建設コスト[円]} \times \text{設備経費率[％]}/100 \cdots \text{(式 3-2)}$$

(iii) 送変電損失

送変電損失は、洋上系統に生じる電力損失[kWh/年]を経費換算した費用であり、次式で算定した。

$$\text{電力損失[kWh/年]} \times \text{単価[円/kWh]} \cdots \text{(式 3-3)}$$

洋上 WF が停止する期間は、洋上系統の電力損失を他電源より補填する必要があるため、単価は電力購入単価とし、運転期間中は風力発電単価とした。

(iv) 発電機会損失

洋上流通設備の停止等により、洋上 WF の発電電力が流通設備の送電可能容量を超過する場合、発電抑制が必要となる。発電機会損失は、この発電抑制量[kWh]を経費換算した費用であり、次式で算定した。

$$\text{風力発電抑制量[kWh/年]} \times \text{風力発電単価[円/kWh]} \cdots \text{(式 3-4)}$$

風力発電抑制量は、洋上 WF の発電電力が流通設備の送電可能容量を超過する余剰電力[kW]とその時間[hr]の乗算を累積し、期待値として算定する。例えば、図 3-2-5 の洋上 WF の出力-累積時間曲線に対し、送電可能容量が 750[MW]に限定される場合、年間の発電抑制量の期待値は同図の緑の面積で表現できる。

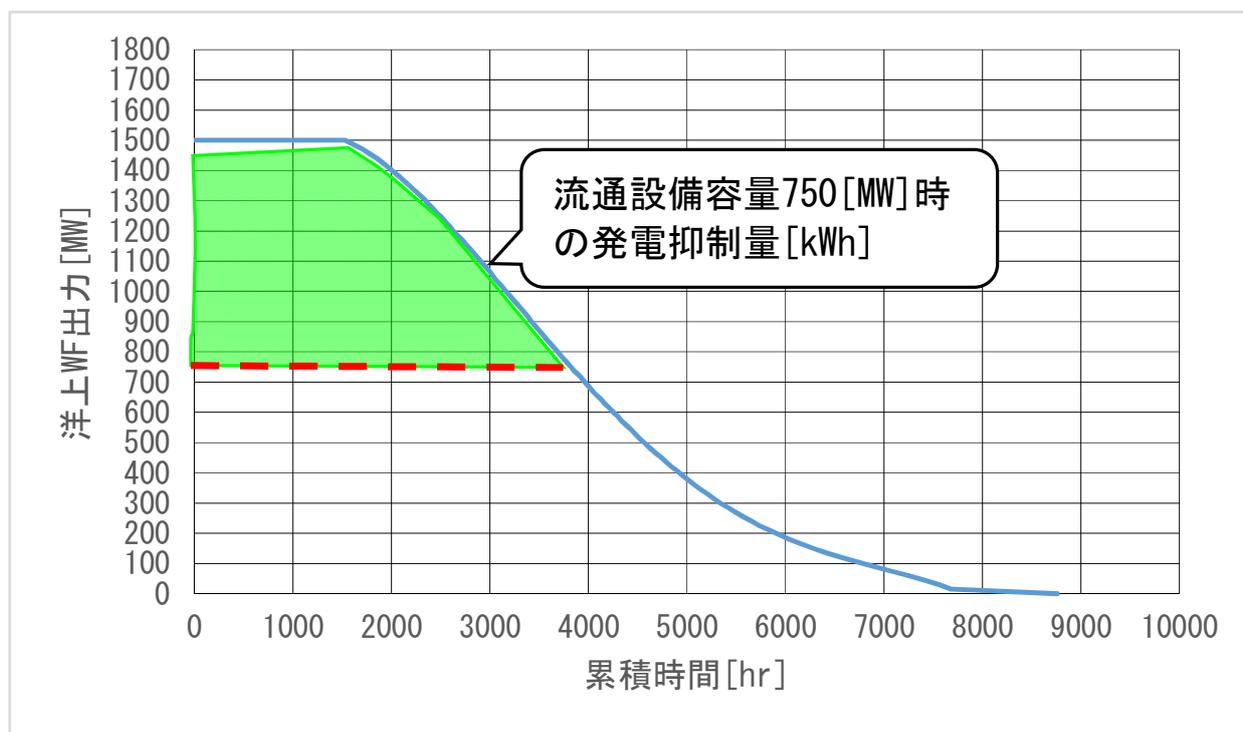


図 3-2-5 洋上 WF の出力-累積時間曲線と発電抑制量

発電電力に対して流通設備容量が不足する時間は、流通設備の稼働率・停止率を考慮し、期待値として算定する。

例えば、図 3-2-6 の p は各設備の稼働率を表しており、系統の設備の状態が「ケーブル停止」かつ「他設備が運転」となる 1 年あたりの時間の期待値は、それぞれの稼働率とケーブルの停止率(1-稼働率)に 8760[hr]を乗算し求めることができる。

$$p1 \times (1-p2) \times p3 \times p4 \times p5 \times p6 \times p7 \times 8760[\text{hr}] \cdots \text{(式 3-5)}$$

同図において、洋上 WF が合計 3000[MW] を発電可能に対し、流通設備容量が 1500[MW] となる時間は約 360[hr/年]と評価できる。

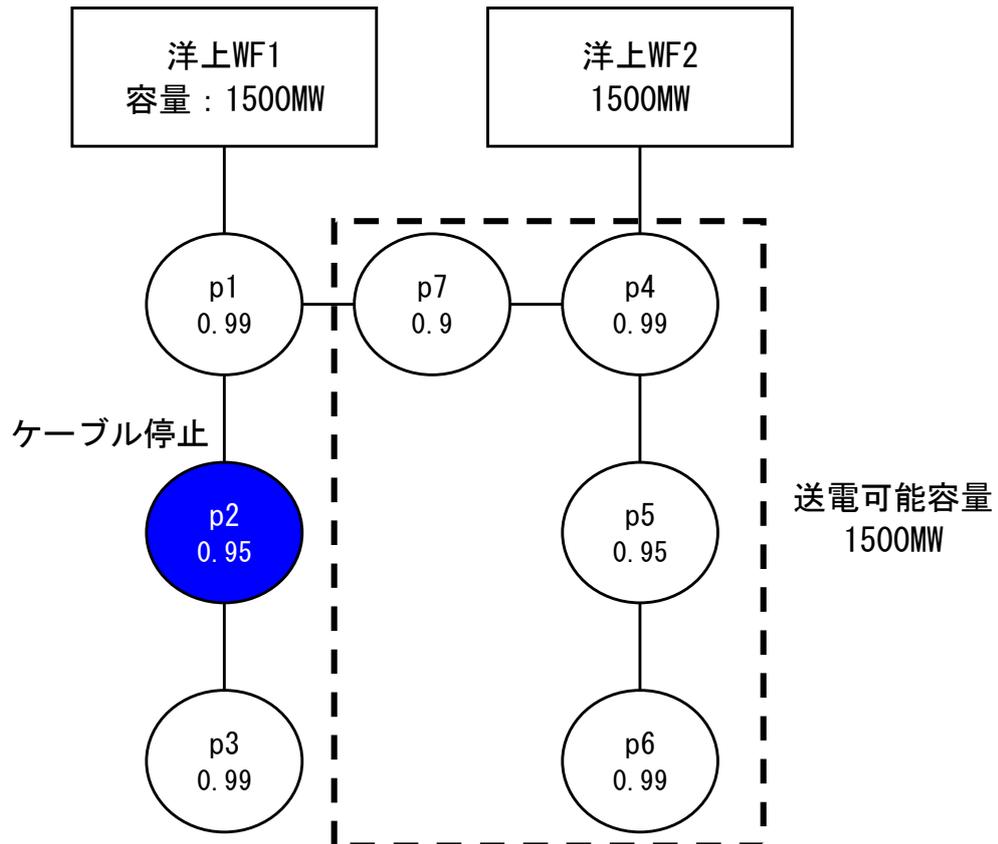


図 3-2-6 洋上設備の結合図例

(e) モデル系統の経済性評価(暫定)

(i) 経済性評価における前提条件

経済性を評価するためには、損失を換算するための単価、設備経費率、建設コストを定める必要がある。

風力発電単価は、将来の目標単価を参考に 9[円/kWh]、または、現在の FIT 価格 36[円/kWh] を適用した。また、設備経費率は 8[%]と 12[%]とした。12[%]は、先行事例調査の結果、陸上設備と比較し、洋上設備の運営コストが高額になる傾向を反映した想定である。

(ii) 建設コストの推定とその課題

多端子交流送電（HVAC）システムと多端子直流送電（HVDC）システムのコスト比較に必要となる各種コスト情報の収集を実施する。また、多端子直流送電システムにおいて、本事業開発要素（直流遮断器、高電圧ケーブル等）によるコスト優位性についても検証することを想定したコスト情報についても収集を実施した。

コスト評価は、イニシャルコストを対象に実施し、ランニングコストについては、多端子 HVDC を用いることによる各種ベネフィットを整理していく中で、可能なものについて定量評価を行うための情報収集を行った。

さらに、我が国の特殊事情（水深、用船等）がコストに与える影響についても整理を行った。

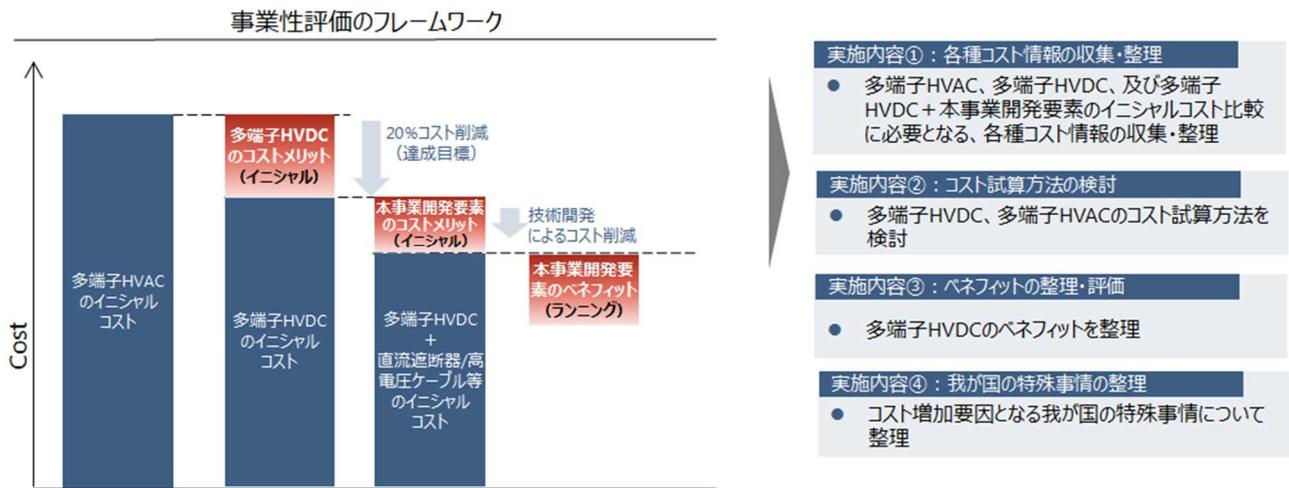


図 3-2-7 今年度調査の全体像

A) 各種コスト情報の収集

本事業では、検討に必要なコスト情報の収集を中心に、HVDC とその比較対象となる HVAC のシステムに関連する図 3-2-8 に示すイニシャルコスト情報の収集を行った。

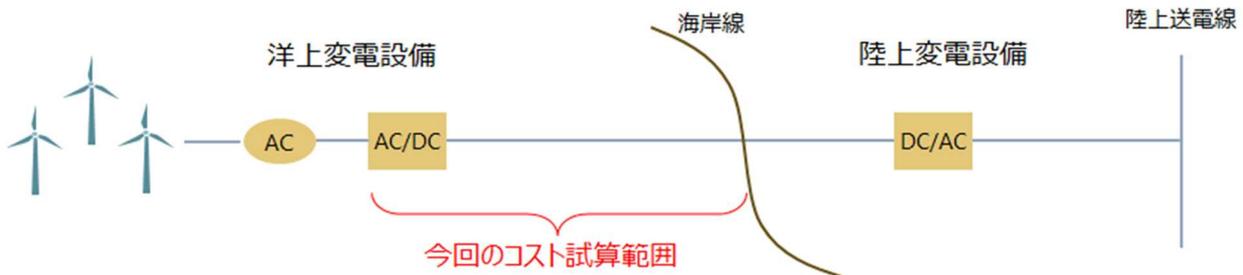


図 3-2-8 コスト情報収集範囲

文献調査の結果、表 3-2-3 の 5 文献から、コスト評価に利用可能な粒度の原単位データを得られた。うち、文献 No.1 (National Grid) が最も発行年が新しく、かつ詳細な原単位データを掲載している。

各文献の情報源を確認すると、文献 No. 7 は、文献 No. 1 の発行者である National Grid（英国の送電系統運用事業者）が 2010 年に発行したレポートを参照している。また、文献 No. 18、No. 21 についても、National Grid が 2011 年に発行したレポートを参照している。

上記を踏まえ、文献 No. 1（National Grid）の原単位データを用いることとした。

表 3-2-3 コスト情報収集一覧

No	文献名	発行者	発行年月	国・地域	概要	コストに関する情報源
1	Electricity Ten Year Statement 2015	National Grid	2015	U.K.	英国 National Grid 発行。送電網を構成する各種機器について、機能、使用方法、コスト、及び技術開発の見込みなどに関する情報を記載した文献。	サプライヤより収集（プロジェクト実績）
2	Offshore Wind Assessment For Norway Final Report	Research Council of Norway	2010.3	Norway	洋上風力発電の導入コストや市場分析、洋上風力発電導入のフィジビリティについて、ノルウェイの The Research Council of Norway（RCN）がまとめた文献。	プロジェクト実績
7	A Comparison of AC and HVDC Options for the Connection of Offshore Wind Generation in Great Britain	D. Elliott 他	2015	U.K.	洋上風力発電所から送電系統への接続技術である AC 及び HVDC に関し、法的要件、各種機能、コスト等の比較を行った文献。	National Grid の文献（2010）を参照
18	Offshore Transmission Technology	ENTSOE	2011.11	EU	ENTSO-E（欧州電力送電系統運用者ネットワーク）が発行した、洋上送電技術、特に HVDC システム及び VSC 技術についての報告書。	National Grid の文献（2011）を参照
21	Study of the Benefits of a Meshed Offshore Grid in Northern Seas Region	European Commission	2012.12	U.K.	European Commission が発行したメッシュ型洋上風力送電網の可能性に関するレポート。	文献 No. 18（ENTSOE）及び Ecofys のコストデータベースより収集

B) コスト試算方法の検討

HVDC/HVAC システムのコスト試算の方法としては、既存のプロジェクトコストをベースに、想定するシステムの条件に合わせて補正を行っていく方法（トップダウン方式）と、システムを構成する各要素のコスト原単位を積上げる方法（ボトムアップ方式）の 2 通りが想定される。

トップダウン方式のメリットとしては、プロジェクトコストの実績をベースとするため、全体的なオーダーから大きく逸脱することなく、想定するシステムのコストを推計できる点が挙げられる。一方でデメリットとしては、既存プロジェクトとシステム構成が大きく異なる場合のコスト再現性に課題があること、想定するシステム条件に合わせて補正するための基礎データが不足しており補正方法の精度が課題となる点が挙げられる。

ボトムアップ方式のメリットとしては、想定するシステムの構成要素の特徴（容量、数量等）に合わせたコスト試算が可能である点が挙げられる。一方でデメリットとしては、原単位がない要素についてはコスト再現に課題があること、原単位の精度によっては、試算結果と実コストの乖離が大きくなる点が挙げられる。

上記のメリット・デメリットを鑑み、トップダウン方式とボトムアップ方式の両方について分析を行い、最適なコスト試算方法について検討した。

表 3-2-4 コスト試算方法のアプローチとメリット・デメリット

コスト試算方法	メリット	デメリット
トップダウン方式 (既存のプロジェクトコストから推計)	<ul style="list-style-type: none"> 全体的なオーダーから大きく逸脱することなく、想定するシステムのコストを推計できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 既存プロジェクトとシステム構成が大きく異なる場合のコスト再現性に課題がある 想定するシステム条件に合わせて補正するための基礎データが不足しており、補正方法の精度が課題。
ボトムアップ方式 (各システム構成要素のコスト原単位を積上げて推計)	<ul style="list-style-type: none"> 想定するシステムの構成要素の特徴(容量、数量等)に合わせたコスト試算が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 原単位がない要素についてはコストを再現できない。 原単位の精度によっては、試算結果と実コストの乖離が大きくなる。

● トップダウン方式

HVDC、HVAC とともに、プラットフォーム容量とシステムコストに相関が見られたため、コスト試算に活用可能である。

ただし、HVDC は、Symmetric Monopole のシステム前提である点に留意する必要がある、HVAC は、プロジェクトコストに対する比率データ (9%) で補完している点に留意する必要がある。

● ボトムアップ方式

HVDC、HVAC とともに、誤差率が大きく (HVDC : -48.2%~4.4%/HVAC : -32.3%~-16.5%)、再現性に課題があると考えられる。

特に、海底ケーブルについては、誤差率が-49.7%~-11.5%の範囲にあり、再現性に課題があると考えられる。

● トップダウン方式×ボトムアップ方式

トップダウン式とボトムアップ方式の特性を踏まえ、プラットフォームについてはトップダウン方式、変電設備 (VSC 等) についてはボトムアップ方式により、コスト試算を行った。

HVDC についてはシステム容量・離岸距離の相関に関する近似式を用いて算出した。

HVAC についてはシステム容量・離岸距離・プラットフォーム水深の相関に関する近似式を用いて算出した。

上記の結果、HVDC については、誤差率は -21.9% ~ 9.3%となり、ボトムアップ方式と比較して、マイナス方向の誤差率は小さくなった。

HVAC については、誤差率は -21.8% ~ -4.8%となり、ボトムアップ方式と比較して、誤差率が小さくなった。

モデルシステムの経済性評価では、交流連系・直流連系いずれもトップダウン方式で建設コストを推定することとした。

C) ベネフィットの整理・評価

コスト削減に係る各ベネフィットを、事業性評価のフレームワーク上で整理すると図 3-2-9 のとおり。これらのベネフィットについては、具体的な開発域、システムのスペック等が具体化した段階で、可能なものについて定量評価の実施・検証を行うことが重要と考えられる。

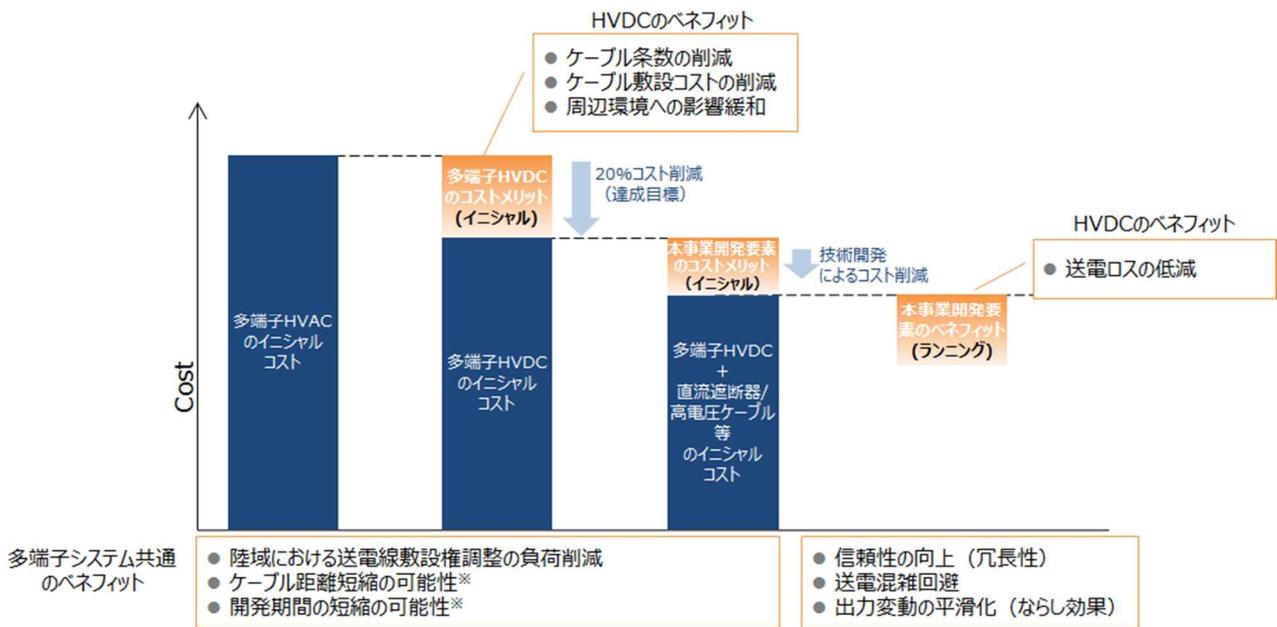


図 3-2-9 事業性評価のフレームワークと各ベネフィットの関係

D) 我が国の特殊事情の検討

今年度の検討で、構成機器やケーブル長等の、物量をベースとするコスト試算方法は整理できた。一方、水深や海底地形等に大きく影響を受ける工事コストについては、分析に使用できるデータが存在しないことや、建設地により状況が大きく異なるため、定量的なコスト試算方法を確立することは難しい。

したがって、本検討で確立した方法を用いて基礎的なコストデータを整理しつつ、今後は下記に挙げるようなコスト増加要因（我が国の特殊事情）について、実際の建設地の状況を踏まえた詳細調査を実施した上で、精査する必要がある。

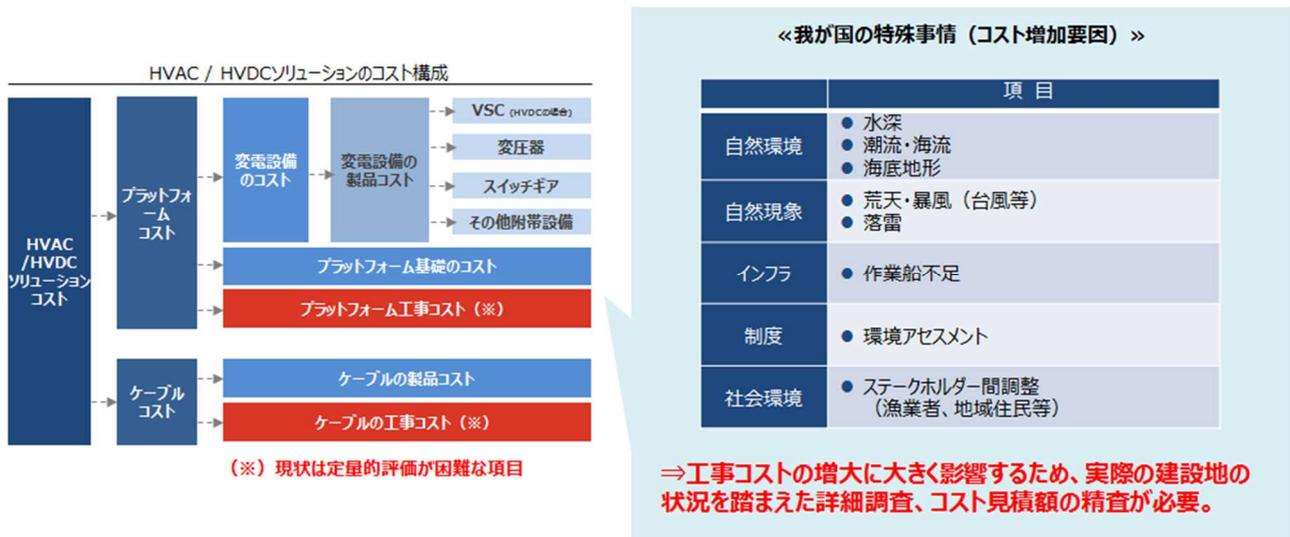


図 3-2-10 我が国の特殊事情

(iii) 交流連系の経済性評価

交流連系による経済性は、図 3-2-11 の「経済性評価の範囲」に対して行った。また、経済性の評価結果である年間経費(暫定)を図 3-2-12 に示す。

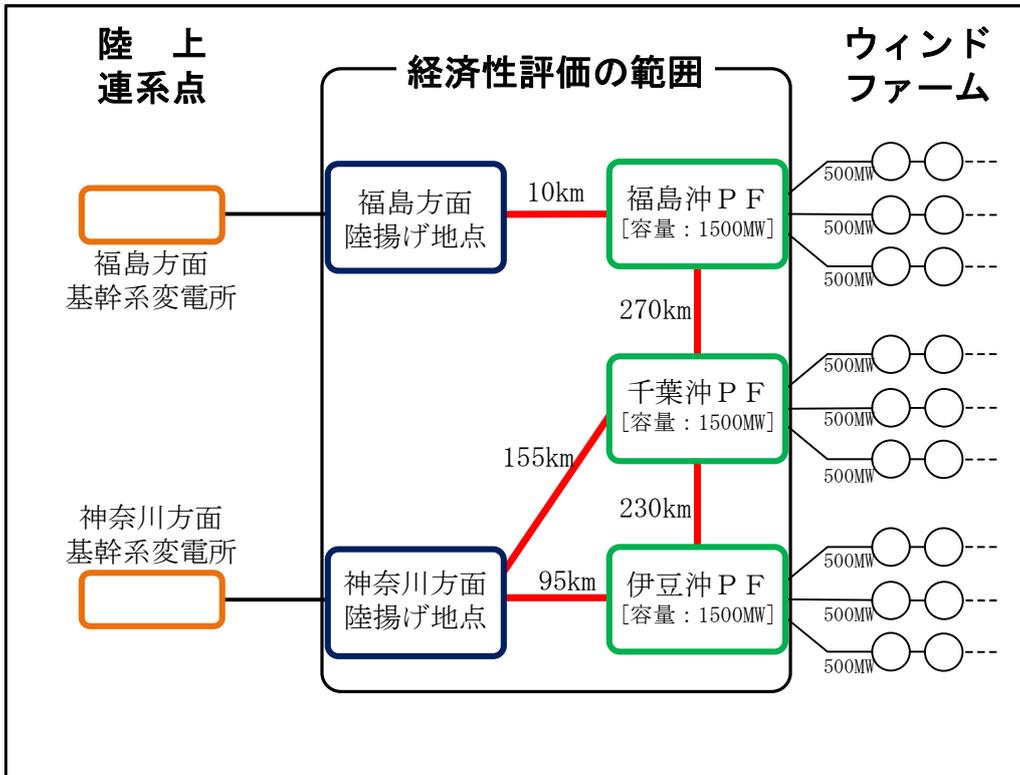


図 3-2-11 交流連系の経済性評価の範囲

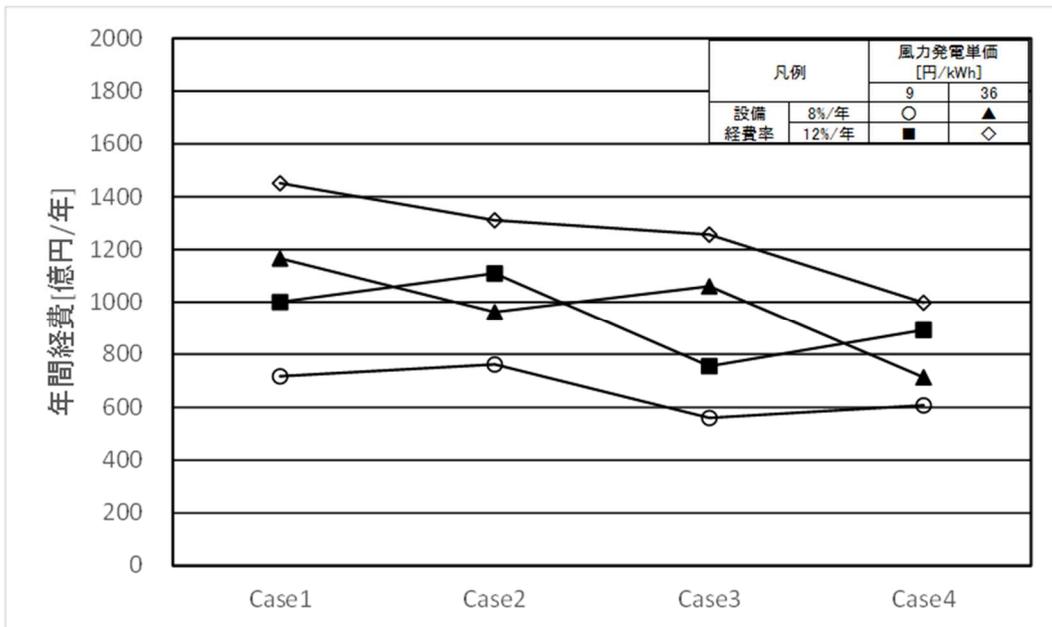


図 3-2-12 交流連系の年間経費(暫定)

(iv) 直流連系の経済性評価

直流連系による経済性は、図 3-2-13 の「経済性評価の範囲」に対して行った(交流連系と同等範囲)。また、経済性の評価結果である年間経費(暫定)を図 3-2-14 に示す。

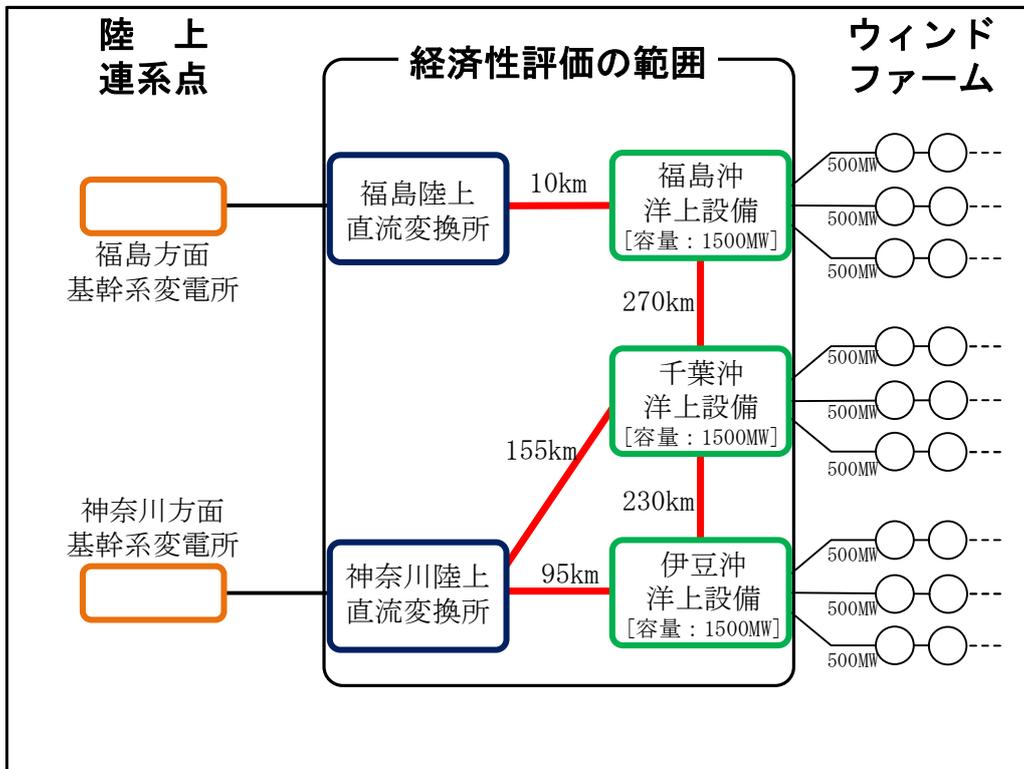


図 3-2-13 直流連系の経済性評価の範囲

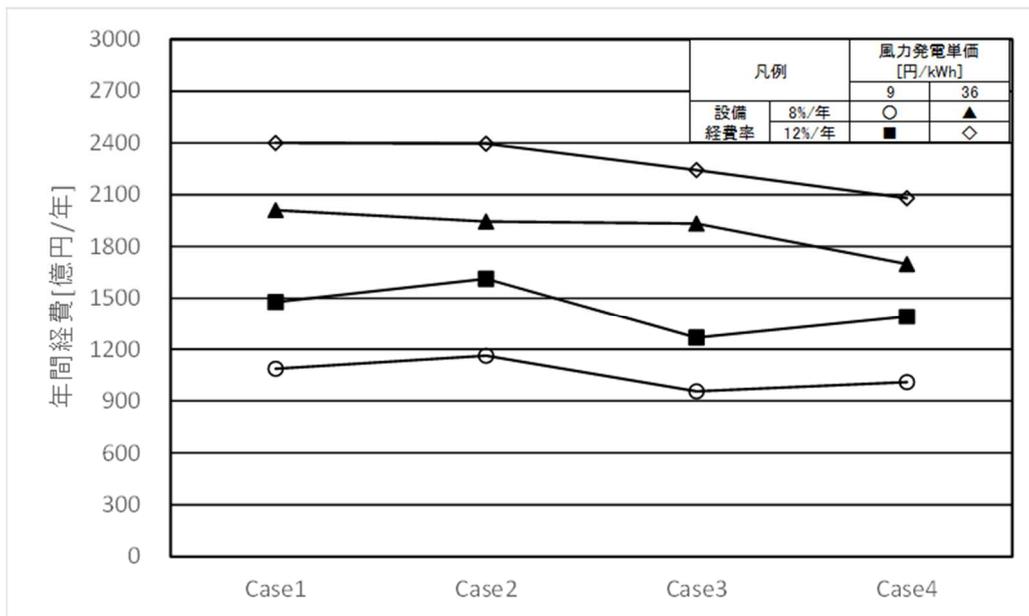


図 3-2-14 直流連系の年間経費(暫定)

なお、先行事例がない直流遮断器のコストは要素技術開発 WG から提供された概算値を参考に推定した。

(v) 経済性評価結果の比較

A) 建設コスト

表 3-2-5 に直流連系の設備構成を再掲する。

表 3-2-5 直流連系のモデル系統における設備構成（再掲）

		Case1	Case2	Case3	Case4	単位
洋上設備（直流遮断器除く）		3	3	3	3	台
洋上直流遮断器		16	16	4	8	
海底ケーブル	福島沖DCPF～福島陸上変換所	4	4	2	4	本数
	福島沖DCPF～千葉沖DCPF	2	2	0	0	
	千葉沖DCPF～伊豆沖DCPF	2	2	0	0	
	伊豆沖DCPF～神奈川方面陸上変換所	4	4	2	4	
	千葉沖DCPF～神奈川方面陸上変換所	0	0	2	4	
陸上変換器		4	4	3	5	台
陸上直流遮断器		8	8	4	8	

図 3-2-15 に建設コストの比較を示す。直流連系は交流連系と比較し、以下の傾向がある。

- ✓ 海底ケーブルコストが半分程度低い
- ✓ 洋上設備コストがおおよそ3倍程度高い
- ✓ 陸上側設備により10%コスト増

コスト削減に向けた着眼点として、①洋上設備のコスト低減と②陸上付近の洋上設備は陸上へ配置、などが考えられる。

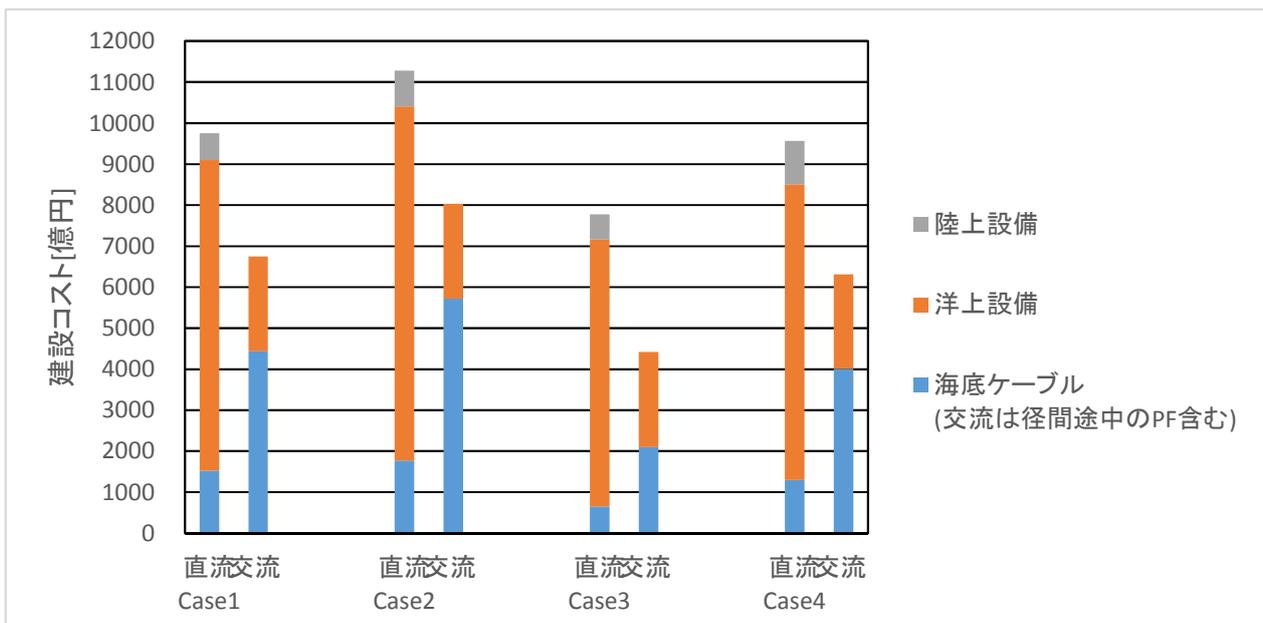


図 3-2-15 直流連系と交流連系の設備経費の比較（暫定）

B) 送変電損失

図 3-2-16 に送変電損失の比較を示す。直流連系は交流連系と比較し、以下の傾向がある。なお、交流連系時、充電容量補償のための分路リアクトルのロス、今後算定し、考慮する予定。

- ✓ 海底ケーブルロスが低い
- ✓ 洋上設備の損失が 5 倍程度高い
- ✓ 陸上変換所も損失が生じる

コスト削減に向けた着眼点として、変換器台数・損率の低減、などが考えられる。

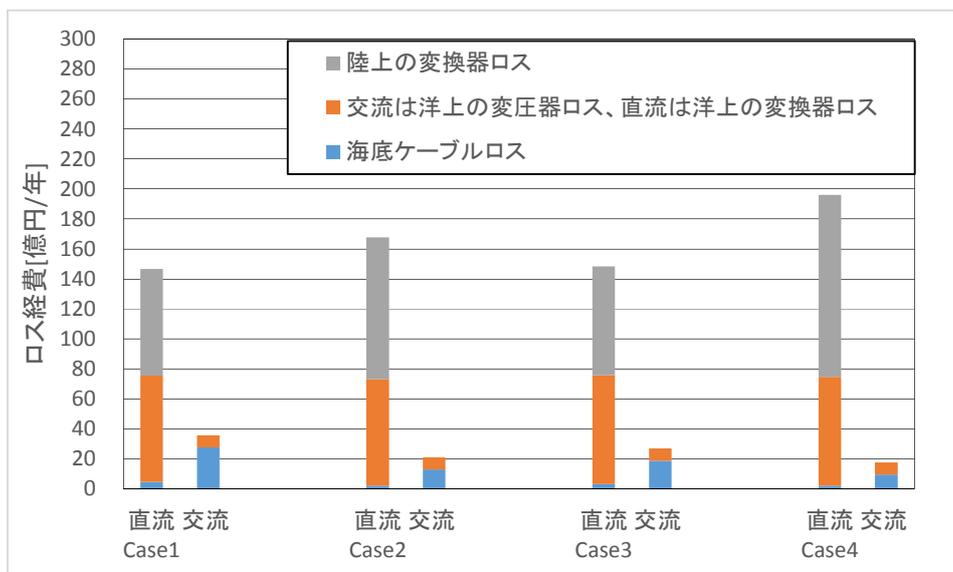


図 3-2-16 直流連系と交流連系の送変電損失の比較 (暫定)

C) 発電機会損失

図 3-2-17 に発電機会損失の比較を示す。直流連系は交流連系と比較し、以下の傾向がある。

- ✓ 変換器の年間停止時間が長く、全体的に発電機会損失が高い

コスト削減に向けた着眼点として、変換器の点検合理化や事故率低減、などが考えられる。

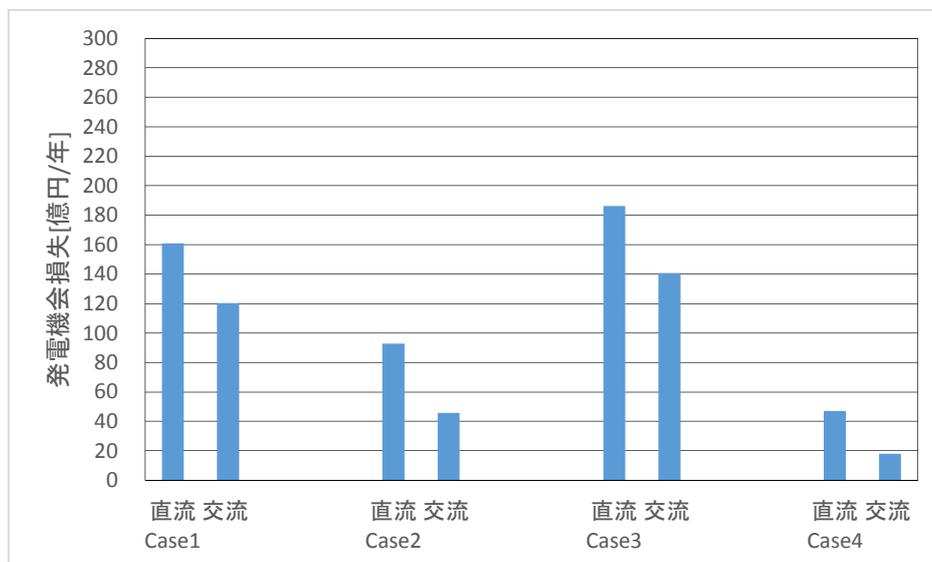


図 3-2-17 直流連系と交流連系の発電機会損失の比較 (暫定)

(d) 課題と今後の予定

(i) 課題

本事業において、洋上設備の配置を想定する海域の水深は、先行事例と比較して数十 m 以上深い場合もある。先行事例調査の結果、水深や洋上 PF の積載物の重量、容積が洋上 PF の建設コストに大きく影響を与えることがわかった。

洋上 PF の基礎コストを例にとる。図 3-2-18 は、(文献 3-1) (文献 3-2) の基礎コスト(先行事例相当)と要素技術 WG にて試算した基礎コストを示す。

水深 200[m]に着目すると、試算値は、先行事例に基づく推定値のおよそ 4 倍となっており、先行事例のデータの回帰式に基づくコスト推定は、実態と乖離が大きくなる可能性が高いと想定される。

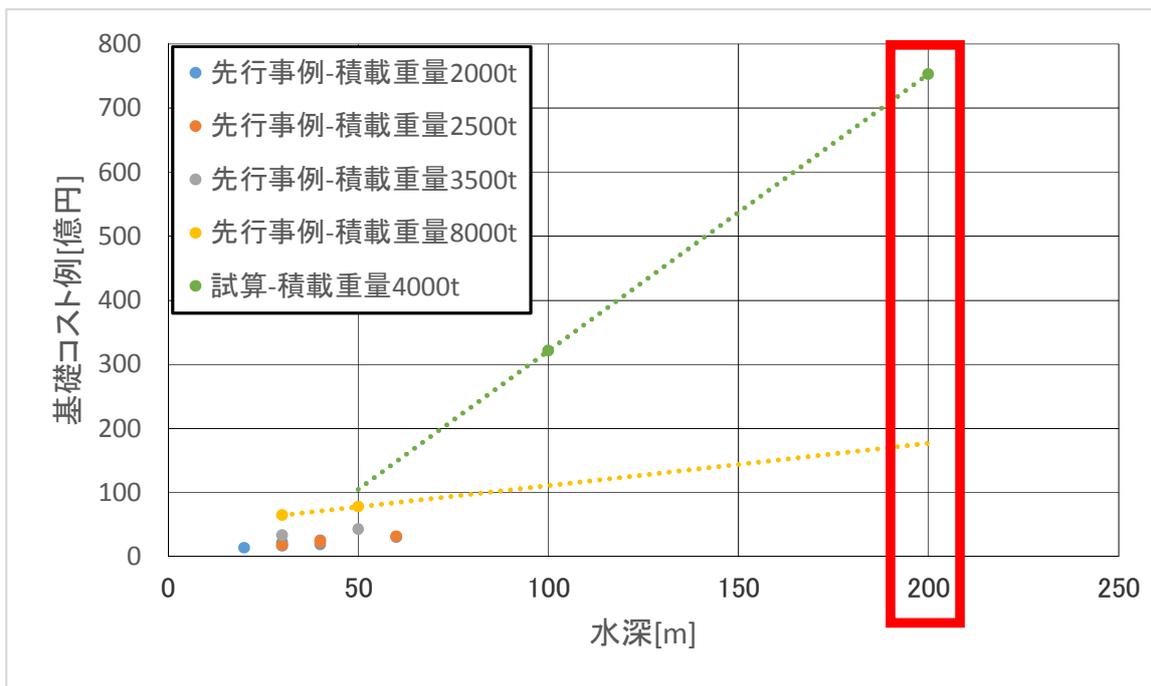


図 3-2-18 洋上 PF の基礎コストの先行事例データと本事業の試算値比較

(ii) 今後の予定

以上を踏まえ、本事業における洋上設備の建設コストの推定方法を検討するとともに、洋上集電系統の具体化を進め、それぞれの連系方式の経済性を再度評価し、コスト削減の着眼点を抽出する。また、多端子直流送電システムが既存の交流連系システムと比較し、経済性の面などから優位となる条件を整理する。

②国内導入における社会受容性・制度・ルール of 検討

(a) 社会受容性

洋上送電設備を形成する際に考慮すべき環境影響に関しては、洋上風力発電の導入が進む欧州諸国では戦略的環境アセスメントの手法などを導入して、設備形成が円滑に進むような制度の枠組みを用意している。

(i) 英国の社会受容性調査

イギリスは周りを海に囲まれ、豊富なポテンシャルを有することから、海洋再生エネルギーを国の一大産業に発展させることを目指している。そのための取組みとして2000年より複数ラウンドに分けてイギリス海域のリースを開始している。ラウンド3における開発許認可を取得するまでのプロセスと、同プロセスに関連する関連機関・法令をまとめる(図3-2-19、図3-2-20)。



図3-2-19 イギリスにおける洋上風力発電の許認可取得プロセス

政府系機関	エネルギー・気候変動省 (Department of Energy and Climate Change, DECC)	安全・安心なエネルギーの供給と気候変動への国際的対応を目的とする機関。2009年に英国海域において戦略的環境アセスメントを実施。現在のビジネス・エネルギー・産業戦略省。
	海洋管理庁 (Marine Management Organization, MMO)	Marine Licenseの付与するための審査を行う。
	環境計画調査局 (Planning Inspectorate, PINS)	国家重要インフラプロジェクトの開発承認書を付与するための審査を行う。
	Crown Estate	英国領海の海底をほぼ全域について所有し、大陸棚の天然資源(石油、ガス、石炭等)を調査、利用する権限も有している。洋上風力発電所開発事業者を決めるための競争入札を実施。
法令	エネルギー法(2004年)	海底を利用する際にCrown Estateからのリースが必要であることが定められている。
	海洋・沿岸アクセス法(2009年)	Marine Licenseの所轄機関や適用対象を定めている。
	電気法(1989)	1-100MWのプロジェクトにおいて取得する必要のある発電事業に係る承認を定めている。
	計画法(2008)	国家重要インフラプロジェクトに該当するプロジェクトの範囲や開発承認書の所轄機関を定めている。
	電気工事(環境影響評価)(イングランド・ウェールズ)規則(2000年)	環境影響評価の基準を定めている。
	電気(オフショア発電所)(承認申請)規則(2006年)	電気法36条に基づいて作成された申請書を提出する際に課される申請料金を定めている。
	生息域規則	Crown Estate からリースを受けるための法的承認を得るために遵守する必要がある規則。

図3-2-20 イギリスにおける洋上風力発電開発に関連する機関及び法令

(ii) ドイツの社会受容性調査

排他的経済水域における洋上 WF プロジェクトの建設及び運転に関しては、海洋施設規則 (Marine Facilities Ordinance) に基づく、連邦海上水路庁の承認を受ける必要がある。連邦海上水路庁はプロジェクト申請の窓口となっており、以下の手順で承認手続きを行う。

このプロセスを踏まえて、連邦海上水路庁や関連省庁が航路の安全性と効率性を妨害しないか、海洋環境に悪影響をもたらさないかについて審査をする。前者の航路の安全性と効率性の審査においては、地方自治体の船舶水路部の承認が必要となり、後者に関しては環境影響評価の実施が義務付けられている。承認の有効期間は 25 年間であり、申請者は承認通知を受けてから 2.5 年以内に建設に着手する必要がある。ドイツでは事業者入札制度はなく、申請は先着順で連邦海上水路庁に受理される。連邦海上水路庁が同じサイトにおける申請を複数受領した場合には、全ての許可要件を満たすものの中で順番が最も早い申請に決定する。

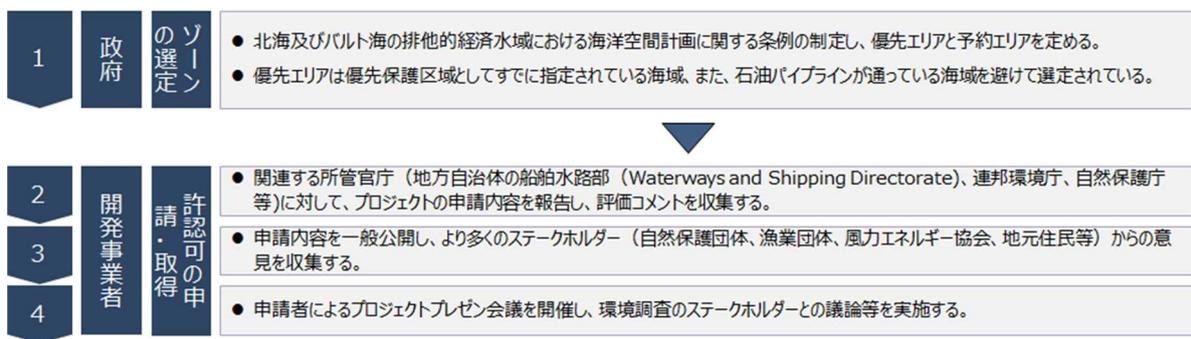


図 3-2-21 ドイツにおける洋上風力発電の開発許認可プロセス

政府系機関	連邦海上水路庁 (Federal Maritime and Hydrographic Agency, BSH)	北海及びバルト海の排他的経済水域内における洋上風力発電開発の許認可機関。
	地方自治体の船舶水路部 (Waterways and Shipping Directorate)	領海内の洋上風力発電施設や海底ケーブルの敷設の際の許認可を行う機関。
	連邦環境庁	
	自然保護庁	
法令	北海及びバルト海の排他的経済水域における海洋空間計画に関する条例 (2009)	海洋利用用途のための優先エリア (Priority Area) と予約エリア (Reservation Area) を定めている。
	海洋施設規則 (the Marine Facilities Ordinance)	排他的経済水域における洋上風力発電施設の建設及び運転のための必要な手続きを定めている。
	海底環境の影響調査に関する基準 (Standard for Investigation of the Impacts of Offshore Wind Turbines on the Marine Environment)	環境影響評価の最低限の要件を定めている。
	地質工学的調査に関する基準 (Standard for Ground Investigations for Offshore Wind Farms)	
	洋上風力タービンのデザインに関する基準 (Standard for the Design of Offshore Wind Turbines)	

図 3-2-22 ドイツにおける洋上風力発電開発に関連する機関及び法令

(iii) 日本の社会受容性調査

イギリス、ドイツと比較して導入事例は必ずしも多くはないが、日本における洋上風力発電事業開発のプロセスは図 3-2-23 に示すような手続きを行う必要がある。



図 3-2-23 日本における洋上風力発電の開発許認可プロセス

上記の各プロセスに関連する法令などの整理を行うとともに、洋上風力発電の開発プロセスにおいて留意する事項について表に示すステークホルダへのインタビュー調査を実施し、以下のような事項が把握された。

(iv) 法律に基づく環境アセスメント

環境アセスメントはあくまで手続であり、規制ではないことが事業リスクを増大させている。つまり、「○○を下回れば許可される」、「△△をすれば問題ない」という、明確な基準が存在しない。事業実施地域により、評価項目そのものや項目毎の重要性も変わる。例えば、野生生物が生息する地域では生態系に与える影響が、観光資源が豊富な地域では景観に与える影響が、住宅集中地域に近接する場合は騒音等がそれぞれ重視される。地域住民と十分なコミュニケーションが取れていない案件では、意見募集の際に大量の意見が住民から出されることもあり、プロセスの長期化をもたらす。事業実施地域住民の理解を得ることが極めて重要である。現在、3~4年程度とされている環境アセスメントにかかる期間を半減する検討をしている。海底ケーブルの敷設は現時点で法アセスの対象外。ただし、洋上風力発電の扱いについては現時点で検討中であり、海底ケーブルの扱いも含め、基本的な考えがまとまったところで公表する予定。

(v) 自治体・地域住民とのコミュニケーション

自治体独自に条例において環境アセスメントを定めているケースもある。法アセスより対象事業の範囲が広いことも多い。環境アセスメントや港湾に関連する法律等、各種許認可手続きそのものが大きな障害となるケースは少ない。一方、事業地域で反対運動が盛り上がっている等、住民とのコミュニケーションが十分でない場合は自治体としてサポートできない。事業実施によって当該地域にどのようなメリット（雇用等）を生むかを自治体に対して説明することが必要である。自治体の理解を得られると、住民説明会への同席等のサポートが受けられることもある。事業者のみで説明会を実施しても、思ったようなコミュニケーションが取れないことも多い。

イギリス、ドイツ及び日本における調査を通じて、各国の洋上風力発電に関わる比較整理を行った（表 3-2-6）。

表 3-2-6 洋上風力発電開発に関わる比較・検討

	洋上風力開発計画の概要	政府の関与	海域利用に係るルール
英国	<p><導入目標> 2020年までの導入目標：18GW</p> <p><開発計画> 2000年より、複数ラウンドに分けて英国海域における商用リースを開始し、計約54GWを開発予定</p>	<p><海域指定> ラウンド3では以下の手順により海域を指定 ① DECCが戦略的環境アセスメントを実施 ② Crown Estateが自然保護区域等に該当しない9つのエリアを指定</p> <p><事業者入札> Crown Estateによる競争入札</p>	<p><許認可機関> ・1~100MW：MMO ・100MW以上：PINS</p> <p><主な許認可プロセス> ・1~100MW：MMOによるMarine License（期望平均満潮面以下、あるいは感潮河川内で行われる活動に係る許認可）と発電事業に係る許認可 ・100MW以上：PINSによる国家重要インフラプロジェクトの開発に係る許認可 ・陸域活動に係る許認可</p>
ドイツ	<p><導入目標> 2030年までの導入目標：25GW</p> <p><開発計画> 75以上のプロジェクト申請があり、2030年までに約30のプロジェクトで稼働予定</p>	<p><海域指定> 連邦政府が環境保護区域等に該当しないエリアを指定（※環境アセスメントは実施しない）</p> <p><事業者入札> 入札制度はなし（先着順で申請が受理される）</p>	<p><許認可機関> BSH（※領海（12海里内）は沿岸州当局）</p> <p><必要となる主な許認可> ・洋上風力発電の建設許可 ・送電ケーブルの建設許可</p>
日本	<p><導入目標> 2030年までの導入目標：9.6GW（風発協） ※2030年までの導入見込：0.8GW（長期エネルギー需給見直し）</p> <p><開発計画> 港湾区域で0.78GW、一般海域で0.61GWが計画中であり、2025年までには運転開始予定</p>	<p><海域指定> 政府による指定海域はなく、事業者自身で、風況調査や環境アセス、ステークホルダーとの調整を実施</p>	<p><許認可機関> ・環境省 ・経済産業省</p> <p><主な関連する法律> ・自然環境保全法 ・港湾法 ・港則法</p>

(b) 制度・ルール検討

わが国に洋上風力送電システムの開発を行うに際し、整備しておく必要のある制度・ルールのあり方について、OFTO（Offshore Transmission Owner）制度と呼ばれる独特の洋上送電事業者を定義する事業制度を持つイギリスと、洋上送電システムの開発が進むドイツを対象にその制度・ルールの調査を行った。

(i) 英国 OFTO 制度

OFTO 制度における入札からコスト評価までのプロセスは図 3-2-24 のように整理され、これらのプロセス毎の各ステークホルダの役割についても整理を行った。

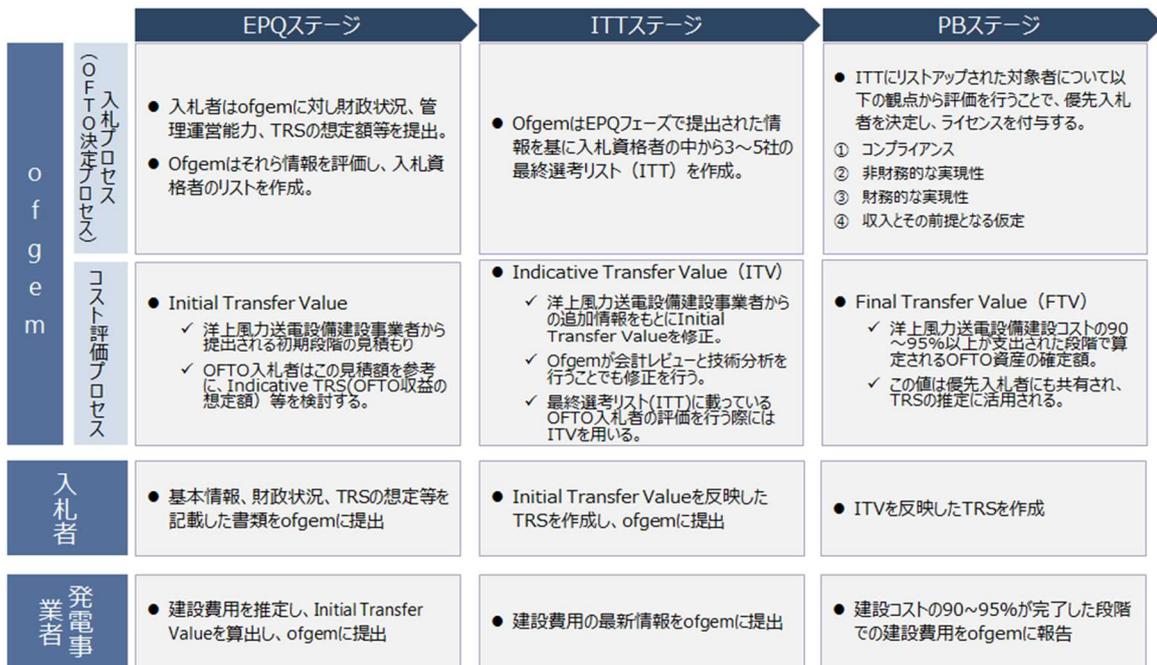


図 3-2-24 OFTO 制度のプロセス

同制度下において想定される事業リスクとその割当を整理した。

表 3-2-7 OFTO 事業におけるリスクとその割当

リスク項目	説明	概要
建設リスク	コスト高騰、工期延長に関するリスク	<ul style="list-style-type: none"> ● このリスクは建設事業者（Round 2までは洋上風力発電事業者、Round3以降は建設段階からOFTO事業者が参加可能）が負う。
需要リスク	想定発電量からの乖離	<ul style="list-style-type: none"> ● OFTO事業者送電可能な状態を維持している限り、収入を得る資格がある（風力発電所の発電実績に関するリスクには晒されない）。もしもOFTOの収入期間が終わる前に風力発電所がシャットダウンしても、送電サービスに対する収入は払われ続ける。 ● OFTO事業者は、より高い送電需要を満たすために追加で設備投資をすることもでき、設備投資分はインセンティブとして回収可能である。
運用リスク	想定された稼働率を維持できないリスク	<ul style="list-style-type: none"> ● 想定された稼働率（98%）を維持できない場合、OFTO事業者はその程度に応じてペナルティを負う。ただし、OFTO事業者は保守契約や保険によってこのリスクを軽減することができる。 ● 獲得前のデューデリジェンスによってOFTO事業者はOFTO資産のリスクを評価できる。 ● OFTO事業者が対応することが困難な例外的な事象については、救済措置が取られる(Exceptional Events Mechanism)。
	物価上昇リスク	<ul style="list-style-type: none"> ● 物価上昇によるメンテナンスコスト上昇等のリスクはOFTO事業者が負うが、中期（5～10年）O&M契約によってこのリスクを軽減することができる。 ● TRSはインフレ率によって調整されるため、物価上昇リスクを軽減する効果がある。
不可抗力リスク	産業法の変更等、“不可抗力”の事態が生じるリスク	<ul style="list-style-type: none"> ● OFTOのライセンスは、“不可抗力”に対する収入調整条項（Incoming Adjusting Event）が設けられ、当該リスクに対して保護される。 ● “不可抗力”には、産業法（STC、Grid Code、SQSS等）の変更等が含まれる。
契約先リスク	収入の不払いリスク	<ul style="list-style-type: none"> ● OFTO事業者の収入はOFGEMから規制を受けているNETSO,National Gridから提供を受けるため、不払いリスクは小さい。
物価変動リスク	予想以下のインフレはインタレスト・カバレッジ・レシオを低下させる	<ul style="list-style-type: none"> ● OFTOの収入はインフレ率によって調整されるため、大幅なデフレが生じた場合はそれにとまって収入額は減少する。そのことにより、債務返済に問題が生じうる。 ● このリスクを軽減する手法として、資金調達段階において、借入金の金利をインフレ率に連動させる契約を結ぶことなどが考えられる。
資金調達コスト	プロジェクト全期間にわたる、OFTOによる支払利息の変化	<ul style="list-style-type: none"> ● OFTO事業者は資金調達コストの変化のリスクを負う。 ● 低金利による再資金調達は、OFTOに利得をもたらす。 ● 資金調達コスト増大による損失を回避するために、調達先を分散することが考えられる。
税リスク	プロジェクト全期間にわたる、想定された税の支払額の変化	<ul style="list-style-type: none"> ● OFTOがリスクを負担する。 ● OFTO収入を算定する式には税制改正を反映するような項目が存在しないため、仮にOFTO事業者にとって不利な改正が合った場合は不利益に働く。
法改正リスク	不可抗力（前項参照）とみなされない法の改正リスク	<ul style="list-style-type: none"> ● 不可抗力と定義されていない一般的な法改正によるコスト増分は原則としてOFTOが負担する。 ● ただし、廃棄費用等、一部法改正による負担増をTRSに反映させられるケースもある。
政府の方針の転換	洋上風力はもはや優先度が高くないと政府が判断する。	<ul style="list-style-type: none"> ● ライセンスにおいて20年間の収入が約束されているため、OFTOはこのリスクから守られている。

(ii) ドイツにおける送電設備形成に関わる制度

ドイツにおける洋上風力発電の送電システムのコスト負担はシャローコストの構造となっており、直流送電システムは基本的に TSO の負担となっている。TSO が個別プロジェクトの事業性をどのように評価しているのかは公開資料から得ることが難しい。本調査では、洋上送電システムの設備形成に当たって、TSO が受ける規制等の事業環境を整理することで、事業性に対する示唆を得るアプローチを出発点としている

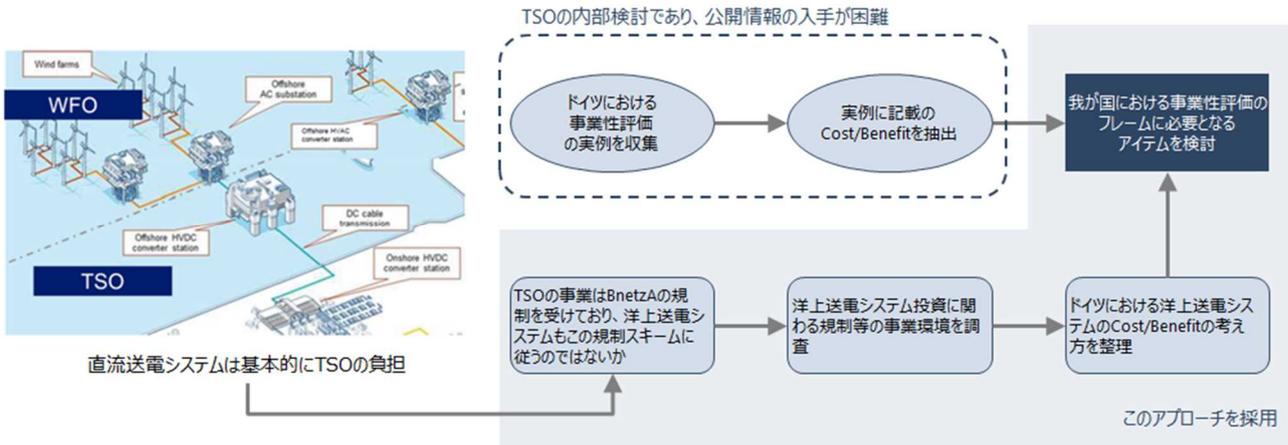


図 3-2-24 ドイツにおける洋上送電設備のコスト負担の考え方と調査アプローチ

ドイツにおける送電事業は、レベニューキャップ規制を受けており、年々のコスト削減（効率化）を強いられているが、必然性のある新規設備投資（洋上設備も対象）については、この効率の対象外となっている。

新規設備投資が BnetzA（規制機関）に承認されれば、TSO は新たにレベニューキャップを計算し直す。年々縮小するレベニューの底上げができることが、投資インセンティブとして働いていると考えられる。

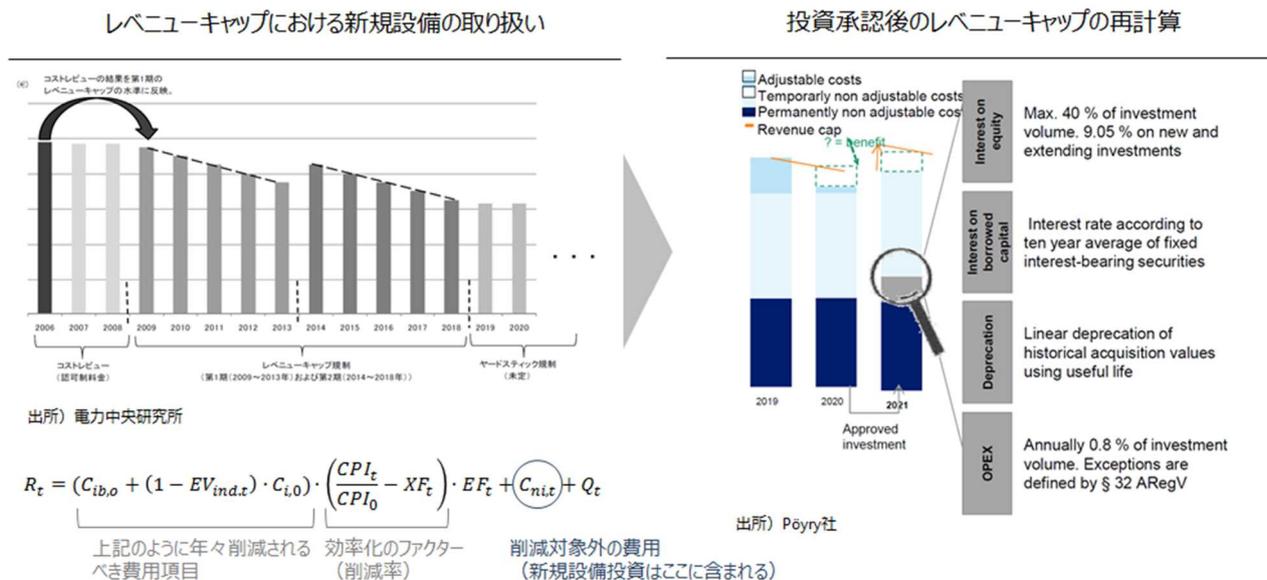


図 3-2-25 ドイツの送電設備コスト回収のメカニズム

③系統最適化手法の開発

洋上 WF と陸上連系点とを連系する送電ネットワーク設計に関して文献調査を実施したところ、ノルウェーの研究機関である SINTEF において洋上系統最適化ツール (Net-Op) を開発していることがわかった。Net-Op の有効性を詳細に確認するために仮想 WF を対象とし、実際に Net-Op を用いての最適化検討を実施した。その結果、Net-Op のアウトプットは直線的なグリッド構成であり、ケーブルルートを考えていないものであることが判明した。特に、日本近海の水深の深い海域においては、水深を考慮したケーブルルートの設計が不可欠である。そこで、本開発の最終目標を達成できる独自の最適化手法の開発が必要であると考え、その検討に着手した。

本開発の最終目標は、複数の洋上 WF と複数の陸上連系点とを連系する送電ネットワークにおいて、最適なケーブルルートを考えて送電ネットワーク構成の経済性を含めた評価手法を開発することである。本目的を達成するために、数理最適化技術を用いた最適化手法を用いることとした。最適化問題としてのアプローチとしては、「混合整数計画問題として定式化しソルバーを用いて解く方法」と「組合せ最適化問題として定式化しメタヒューリスティクスを用いて解く方法」の二つが考えられる。前者は Net-Op に適用されている手法である。本開発の最終目的を達成する上で後者の方法を採用することとした。メタヒューリスティクスを用いる大きな利点としては以下の 4 点が挙げられる。

(a) 現実の機器特性を反映した最適化が可能 (線形関数で近似する必要が無い)、(b) 制約条件等の追加が容易、(c) 線形以外の関係 (非線形、離散など) も考慮可能、(d) If-then ルール等も考慮可能。メタヒューリスティクス手法としては、遺伝的アルゴリズムを用いることとした。

開発の初期段階において、3 地点の洋上 WF を対象としたモデル (以下、WF3 地点モデル) について、最適化のためのパラメータ (各種変数と制約条件) の検討を進めた。その結果、WF3 地点モデルでは数多くのパラメータを設定する必要があり、また、従属・相互作用するパラメータが多いため非常に複雑なモデル構造となることが判明した。また、モデルが複雑であるために開発しようとする最適化手法のイメージが掴みにくい状況となった。そこで、後述の開発ステップを設定し段階的に開発を実施するものとした。まず、「開発ステップ (i) WF1 地点モデル」と称して、WF1 地点と陸上連系点 1 地点とを連系する、最も基本的な送電モデルに対して経済性評価検討を進める。その後、「開発ステップ (ii) 多端子モデル」と称し、WF3 地点と陸上連系点 3 地点とを連系する多端子送電システムの最適ケーブルルート検討を進める。開発ステップ (ii) においては、開発ステップ (i) の検討結果を導入し、最適なケーブルルート設計を考慮した送電システムの検討を実施する。なお、前述したメタヒューリスティクス手法を用いることで WF1 地点モデルから複数の洋上 WF を扱う複雑なモデルへの展開が容易であると考えられる。

開発ステップ (i) において、1 つの大容量洋上 WF を陸上系統 1 地点へ連系する場合の交直損益分岐点 (図 3-2-26) を定量的に評価する手法を検討した。本検討では洋上 WF の発電容量を 1000MW とした。洋上 WF から陸上連系点までの距離は、10、50、100、150km の場合について検討した。

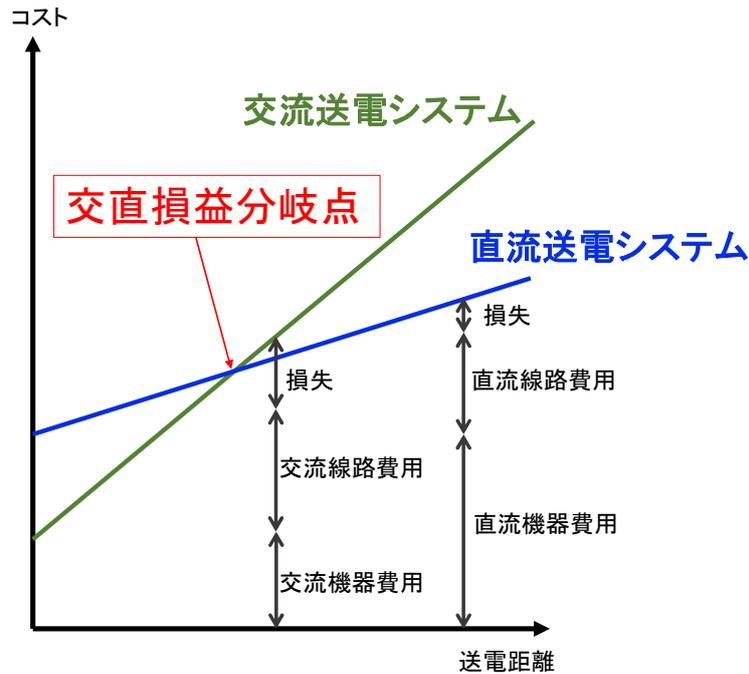


図 3-2-26 交直損益分岐点のイメージ図

洋上 WF と陸上系統とを交流送電システムにより連系する場合は、定格電圧を AC275kV と AC154kV の 2 ケースとした。交流ケーブルの導体サイズは 800、1200、1600、2000、2500mm² とした。単心海底交流ケーブルを 1 回線につき 3 条敷設することとし、交流ケーブルで発生する充電電流の影響を考慮し 1000MW を送電するために必要な回線数を評価した。交流送電の場合は、交流ケーブルで発生する無効電力 Q_c を補償するための調相設備が必要となる。本検討では $Q_c/2$ の容量の分路リアクトルを洋上側に、STATCOM (Static synchronous Compensator) を陸上側に設置することとした。

直流送電システムにより連系する場合は、定格電圧を DC525kV、DC320kV、DC250kV とした。直流ケーブルの導体サイズは 800、1200、1600、2000、2500mm² とした。単心海底直流ケーブルを 1 回線につき 2 条敷設することとし、1000MW を送電するために必要な回線数を評価した。交直変換器は VSC (Voltage Sourced Converter)、送電方式は Symmetric monopole を適用することとした。

送電システムの設備導入費とケーブルで発生する送電ロスを年経費として評価し、年経費が最小となる送電システムを最適化問題として評価した。ケーブルコストは、各電圧階級と各導体サイズにおける材料費と加工費の合計とした。本検討では、ケーブルの構造は、単心海底ケーブル、鉛被、2 重鉄線構造とし、交流ケーブルの場合のみ充電電流の鉛被への影響を低減するための外部導体を施した構造とした。それぞれの電圧階級と導体サイズにおいて 1000MW を送電するのに必要な回線数を制約条件とした。ケーブル敷設コストは、ケーブルを 1 条毎敷設することとし、ケーブル種類に依らず 68 百万円/km とし、送電距離に比例する値とした。交流送電システムの洋上側に配置する分路リアクトルのコストは、3.6 百万円/MVA とした。また、陸上側に配置する STATCOM のコストは、19 百万円/MVA とした。直流送電システムに洋上側と陸上側の両方に配置する VSC のコストは、洋上 WF 発電電力 1000MW に対して 16,146 百万円とした。コスト数値は海外のコスト情報を纏めた文献⁽¹⁾を参考に決定した。1 年間に渡りケーブルで発生する送電ロスを損失額として評価した。なお、洋上 WF の出力は季節変動をとまなうため洋上 WF の設備利用率を考慮する必要がある。簡略的な方法ではあるが、本検討では洋上 WF の平均出力を 100%、並びに 20%とした場合

の送電ロスを1年分積算することとした。なお、送電ロスの金額換算には、FIT 価格 36 円/kWh を用いた場合と、2030 年までの目標風力発電コスト 9 円/kWh⁽²⁾ を用いた場合の 2 ケースについて評価した。また、本検討では年経費率は 8% とした。

表 3-2-8 に送電ロス金額換算を 2030 年までの風力発電目標コスト 9 円/kWh として実施した場合の最適化結果を示す。交流、直流どちらの場合でも同じ送電距離に対して洋上 WF 平均出力が 100% (1000MW) と 20% (200MW) の場合で、選定される導体サイズが変わる結果となった。これは、導体サイズが大きくなることによるケーブルコスト増加と送電ロス減少とのトレードオフの結果である。交流と直流のそれぞれにおいて最適と評価された送電システムについて、横軸を送電距離、縦軸を総コストとしてプロットした結果を図 3-2-27 に示す。図 3-2-27 は送電ロス金額換算を 9 円/kWh として実施した場合の洋上 WF 平均出力 100% (1000MW) と 20% (200MW) の場合について併記した。図 3-2-27 から、洋上 WF の平均出力を 100% として評価した場合の交直損益分岐点は 34km、同様に 20% として評価した場合は 48km となり、洋上 WF 平均出力を小さくすると交直損益分岐点が長く評価された。これは、洋上 WF の平均出力が小さい場合は交流ケーブルで発生する充電電流が小さくなり、送電ロスが小さく見積もられたためである。なお、FIT 価格 36 円/kWh を用いて評価した場合は、損益分岐点は交流、直流ともに短い距離側に評価された。これは送電ロス金額換算を高く設定した場合は送電ロスの影響が大きく見積もられるためである。以上述べたように、数理最適化技術を用いて交流送電システムと直流送電システムのそれぞれについてコスト最小となるシステム構成の評価を可能とし、更には送電距離に対して交流送電システムと直流送電システムとのコスト優位性が逆転する損益分岐点の評価が可能であることを示した。

次に、実際の洋上 WF の設備利用率 (WF 出力の出力-時間特性) を考慮し、図 3-2-28 に最適化結果を示す。その結果、設備利用率を考慮しない場合は送電ロスを過剰に評価していたのに対して、WF 出力の時間変化に応じた送電ロスを考慮することが可能となり、結果としては交直損益分岐点が遠距離にシフトすることを示した。

洋上 WF の定格出力 (最大出力) よりも送電設備の設備容量を小さくし設備費を低減させる場合について検討を実施した。この場合、WF 発電電力が送電設備容量を超える場合は、その超過分を機会損失として考慮することとした。この結果、特に交流送電システムで長距離送電を実施する場合に設備費低減の効果が大きくなることを示した。

以上述べたように、WF1 地点モデルを対象に交流送電システムと直流送電システムのそれぞれについてコスト最小となるシステム構成の評価を可能とする最適化手法の基本部分を確立した。

表 3-2-8 最適化結果の例

OWF平均出力(MW)		1000				200				1000				200			
電圧種類		交流								直流							
送電距離(km)		10	50	100	150	10	50	100	150	10	50	100	150	10	50	100	150
最適化 結果	定格電圧(kV)	275	275	275	275	275	275	275	275	525	525	525	525	525	525	525	525
	導体サイズ(mm ²)	1600	1600	1600	1600	800	800	1200	1200	1200	1200	1200	1200	800	800	800	800
	必要回線数	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
総コスト(百万円)		990	4,990	10,233	15,986	660	3,351	7,538	11,973	2,811	3,724	4,865	6,007	2,767	3,503	4,423	5,343

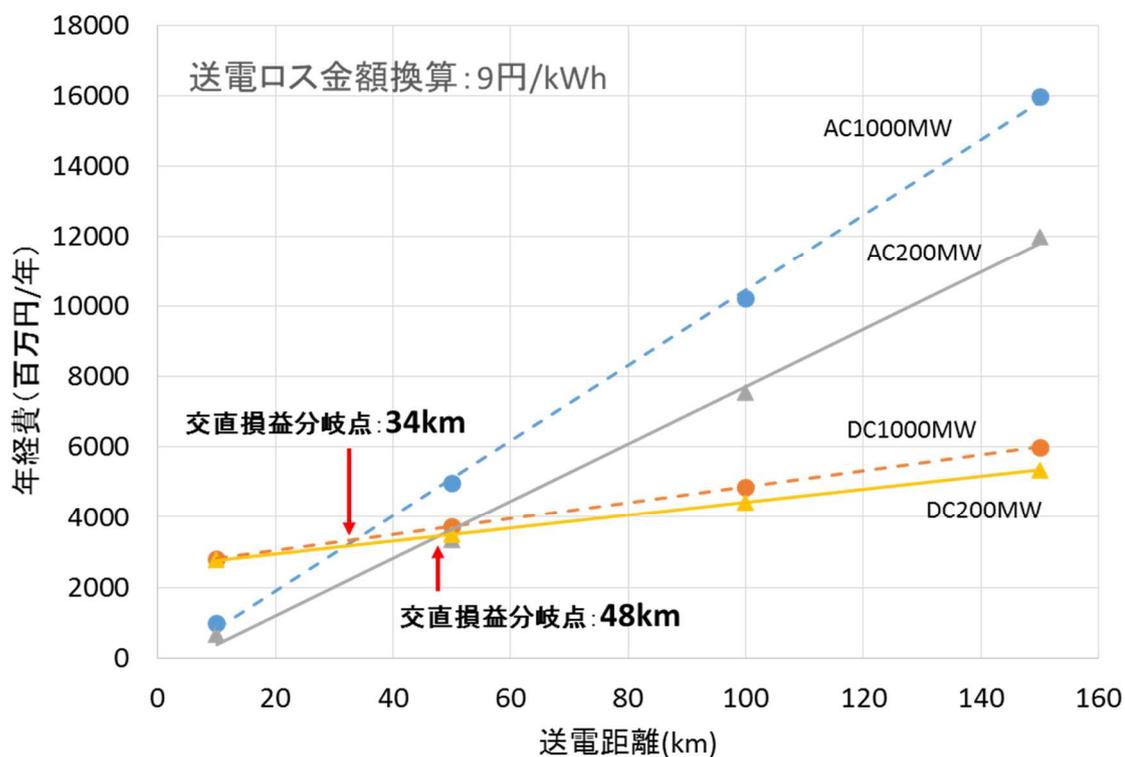


図 3-2-27 年経費（総コスト）と送電距離の関係（WF 出力を一定と仮定した場合）

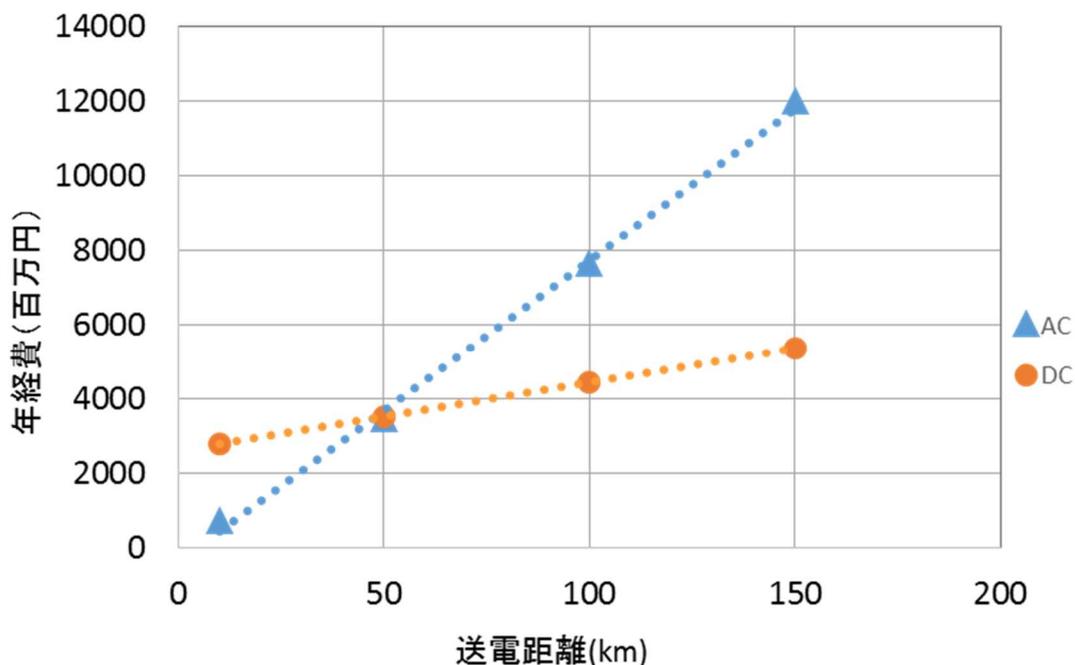


図 3-2-28 年経費（総コスト）と送電距離の関係（洋上 WF の設備利用率を考慮した場合）

○参考文献

- (1) National Grid, “Electricity Ten Year Statement 2015 - Appendix E” (2015)
- (2) 資源エネルギー庁：「FIT 法改正を踏まえた調達価格の算定について」， 調達価格等算定委員会， 第 23 回会合， 資料 1 (2016)

(4) 目標達成に向けた今後の課題、課題解決の見通し

事業終了までに達成すべき最終目標と目標達成に向けた今後の課題、課題解決に向けた見通しを以下に示す。

表 3-2-9 課題と課題解決の見通し

洋上集電系統/洋上送電系統の計画と設計			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
<ul style="list-style-type: none"> ・信頼度と経済性の評価に基づく洋上集電系統の計画と設計 ・信頼度と経済性の評価に基づく 500kV 直流系統の計画と設計 ・欧州と異なる開発環境（水深等）におけるコスト情報の収集 	多端子直流送電システムのモデル系統が既存の交流連系システムと比較して、経済性が 20% 以上優位となる条件を整理する	<ul style="list-style-type: none"> ・本事業における洋上設備の建設コストの推定を改善する ・洋上集電系統を具体化する ・多端子直流送電システムのコストを削減したモデルを完成させる 	<ul style="list-style-type: none"> ・洋上設備の概念設計を欧州のメーカーに委託し、コスト推定精度を高め、また、コスト感度分析を通じ、安価な洋上系統の設計が可能になると見込んでいる ・モデル系統の経済性を評価、コスト削減に向けた着眼点を抽出することで目標達成が可能と見込んでいる
系統最適化手法の開発			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
系統最適化手法の開発	複数の洋上 WF と複数の陸上連系点とを連系する送電ネットワークの接続方法を導出する最適化手法を開発する	洋上 WF1 地点と陸上連系点 1 地点とを連系するモデルを開発した手法を、複数の洋上 WF と複数の陸上連系点とを連系するモデルに拡大適用する	数理最適化技術のひとつであるメタヒューリスティクス手法を用いることで、適用拡大が可能であり、目標達成が出来ると見込んでいる

2.1.3 多端子直流送電システムの制御・保護方式の開発、設備の要求仕様の検討（東京電力ホールディングス、東芝、日立製作所、電力中央研究所）

(1) 研究開発の目的・内容

実際に複数の洋上 WF と多端子直流送電システムを導入する場合、一度に設備形成されず、徐々に拡張して建設されていくことが想定され、事業によっては交直変換器などの設備が複数メーカーによる連系となることが考えられるが、異メーカー間の連系を可能にする標準の仕様は現時点では整理されていない状況である。従って、本開発では、異メーカー間の連系を前提とした制御・保護方式、標準仕様を検討することを目的とし、洋上 WF と交流系統とを結ぶ多端子直流送電システムにおいて、自励式交直変換器の制御・保護方式および標準仕様を明らかにする。具体的には、東芝製、日立製作所製の多端子接続に対応した交直変換器モデルを組込んだ多端子直流送電システムのシミュレーションモデルを開発し、シミュレーション解析計算およびデジタル系統シミュレータ試験によるケーススタディを実施する。さらに、我が国への導入を前提とした設備が有すべき耐電圧、電流レベルなどの仕様を明らかにする。

(2) 成果の達成状況

(要約)

(多端子直流送電システムの制御・保護方式の開発)

自励式交直変換器の制御・保護方式への要求仕様の作成については、検証に必要なシミュレーション解析モデルを決定し、異社間接続を念頭に置いた標準仕様書案を作成した。検証ツールとして PSCAD/EMTDC および RTDS を採用し、東京電力ホールディングス（以下、東電 HD）、東芝、日立製作所（以下、日立）での相互検証が可能となる環境整備を行った。それらのツールを用いて、多端子の最小単位である 3 端子系統モデルを作成し、多様な検証を行った。

(設備の要求仕様の検討)

500 kV 多端子直流送電システムの設備に要求される仕様（耐電圧レベルや避雷器のエネルギー処理責務など）を明らかとするため、電力系統瞬時値解析プログラム XTAP を用いて想定する各種過電圧および異常現象の解析を行う。具体的には、ベースとなる解析ケースの仕様策定と XTAP 上での実際のケース作成、そして、4 種類の過電圧および異常現象の解析を行う。本項目は、2017 年度 1 年間で実施するものであり、現状ではベース解析ケースの仕様策定と XTAP 上での実際のケース作成を完了しており、順調に進捗している。

以下に中間目標、成果と達成度を示す。

表 3-3-1 開発成果と達成度

自励式交直変換器の制御・保護方式への要求仕様の作成（東電 HD、日立、東芝）			
主な内容	中間目標	成果	達成度
異社間接続が可能な洋上多端子直流送電システムの標準仕様書案の作成	洋上 2 端子、陸上 3 端子の洋上多端子直流送電システムにおける標準仕様書案を作成する	定常状態と運転シーケンスの整理、各種想定事故の洗い出しとその時の構成要素の応動様相を整理した、異社間接続を可能にする標準仕様書案を作成した	○
異メーカーの自励式交直変換器の相互連系を可能にする標準仕様の検証（東電 HD、日立、東芝）			
主な内容	中間目標	成果	達成度
異メーカー間で構築された洋上多端子直流送電システムの標準仕様の解析検証	多端子の最小単位である 3 端子系統での異メーカー接続モデルを作成する	2 端子系統でのモデル作成を行った後、3 端子系統での組み合わせ検証が可能となった	○
設備の要求仕様の検討（電力中央研究所）			
主な内容	中間目標	成果	達成度
直流送電システム関連仕様開発（500 kV MMC 型多端子直流送電設備の仕様検討）	想定する各種過電圧および異常現象の解析を行い、500 kV 多端子直流送電システムの設備に要求される耐電圧レベルなどの仕様を明らかとする	ベースとなる解析ケースの仕様策定と電力系統瞬時値解析プログラム XTAP 上での実際のケース作成を完了した。本項目は、2017 年度 1 年間で実施するものであり、また、この種の解析では、解析そのものよりもベース解析ケースの作成に時間を要することを考えると順調に進捗している	○

◎大幅達成、○達成、△一部未達、×未達

(3) 具体的な実施状況について

①自励式交直変換器の制御・保護方式への要求仕様の作成

洋上風力、多端子直流送電システム、想定交流系統を含む電力系統について、自励式交直変換器の制御・保護方式への要求仕様を作成する。

(a) 要求仕様作成にあたり、シミュレーション解析計算およびデジタル系統シミュレータ試験での検証が必要となり、そのためのシミュレーション解析モデルを検討した。仮に想定した系統モデルを表3-3-2と図3-3-1に示す。変換器の種類はMMC (Modular Multilevel Converter、モジュラーマルチレベルコンバータ)方式の自励式変換器とした。端子数は、洋上2端子、陸上3端子を基本とし、設備形成時の拡張を考慮し、端子数が異なるケースも検討することとした。直流送電線は各端子間距離を100km以上とし、双極1回線とした。また、WFは、風力発電機の機械系や発電機は模擬せず、電流源での簡略模擬とした。交流系統は、周波数変動の影響を模擬可能な電気学会標準系統モデルEAST10用いた多地点連系可能なモデルとした。

表 3-3-2 仮設定した系統モデルの仕様

項目	仕様 (仮想定)
送電方式	自励式多端子直流送電
送電容量	1000MW
直流電圧	±DC500kV
端子数	洋上2端子、陸上3端子を基本とする 端子数の異なるケースも検討
変換器種類	MMC (モジュラーマルチレベル式) 自励式変換器
直流送電線	500kV直流ケーブル (海底、海岸～陸上変換所間七) 双極1回線、導体帰路 (+本線、-本線、帰路線)
送電距離	各端子間距離を100km以上とする

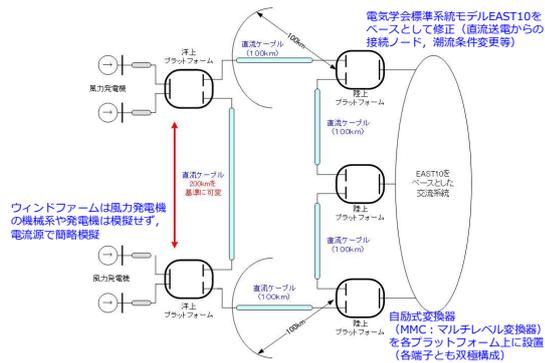


図 3-3-1 仮設定した系統モデル

(b) (a) で構築した系統モデルを対象として、異社間接続が可能な洋上多端子直流送電の開発・検証という目的を念頭に置き、東電HD、東芝、日立で協議を行い、定常運転状態、上位制御（共通制御）機能、起動停止、事故保護、端子脱落復帰等を検討項目として、要求仕様を「多端子標準仕様書案」としてまとめた。図3-3-2に「多端子標準仕様書案」の目次を示す。また、図3-3-3に「多端子標準仕様書案」の中で表形式にまとめた多端子直流送電システムにおける想定事故と構成機器の事故時応動についての一例を示す。

多端子HVDCの制御・保護の標準仕様書(案)

目次

- 1 目的
- 2 多端子HVDCシステムの構成要素と主な機能
 - 2.1 システム全体
 - 2.2 洋上ウインドファーム、洋上変電所、集電系統
 - 2.3 変換所(端子)
 - 2.4 交直変換器(極)
 - 2.5 上位制御系
- 3 定常状態における制御の案
 - 3.1 多端子HVDCシステムの制御の基本的な考え方
 - 3.2 MMCの制御ブロック線の概略
 - 3.3 直流系統側のローカル制御特性(PDC-VDC特性)
 - 3.4 各変換所の協調
 - 3.5 上位制御系
- 4 多端子HVDCシステムの運転状態とシーケンス
 - 4.1 回線休止状態
 - 4.2 停止状態
 - 4.3 陸上変換所・直流系統立ち上げ状態
 - 4.4 洋上変換所・洋上ウインドファーム立ち上げ状態
 - 4.5 通常運転状態
 - 4.6 洋上変換所・洋上ウインドファーム立ち下げ状態
 - 4.7 陸上変換所・直流系統立ち下げ状態
 - 4.8 運転中故障状態
 - 4.9 起動停止中故障状態
 - 4.10 縮退運転状態
 - 4.11 縮退運転状態の具体例(5端子HVDCシステム)
 - 4.12 再連系
- 5 多端子HVDCシステムにおける想定事故と構成機器の事故時応動

図 3-3-2 多端子標準仕様書案の目次

想定事故種類	陸上系統事故
概念図	
事故発生直後の応動	当該系統に連系する陸上変換所は、極力ゲートブロックすることなく運転を継続する(FRT)。ただし、過電流、過電圧を検出した場合には一時的にゲートブロックしてもよいものとする。また、陸上系統で事故が発生したことを上位制御に通知する。 当該陸上変換所がAVR端であり、かつ、事故直前にインバーク運転していた場合には、ブレーキングチャックを動作させる。 当該陸上変換所がAPR端である場合は、電力指令を絞り込む。
事故除去の方法	陸上系統の保護リレーシステムと遮断器によって事故点が切り離される。一定時間後、事故点を含む送電線は再開路される。
事故除去後の応動	事故がAVR端近傍で発生した場合、事故中にブレーキングチャックを動作させた場合にはこれを停止する。また、事故中にゲートブロックした場合はゲートブロックして運転を再開する。事故がAPR端近傍で発生した場合、事故中に絞り込んだ電力指令をランプ状に復帰させる。
陸上変換所	通常運転を継続する。
洋上変換所	通常運転を継続する。
陸上系統	陸上系統の保護リレーシステムと遮断器に依る。
洋上WF	通常運転を継続する。

図 3-3-3 多端子標準仕様書案の一例 (事故時応動)

まず、定常状態と運転シーケンスとして、①多端子直流送電システムの構成要素、②定常状態における制御機能、③運転シーケンス、④一部の端子が停止時に取りうる運転モード（縮退運転）を整理した。次に洋上集電系統、交直変換器、直流送電線、交流系統などを事故点とした時の各種想定事故を洗い出し、変換器、直流遮断器、ブレーキングチョッパ等の構成要素の応動様相を整理した。一方、変換器の制御ブロック、制御定数などの事項は、メーカーの設計に委ねることとしたため、三社で十分なすり合わせを行い、上位制御と各メーカー変換器間等の信号授受のインターフェースの項目を統一することとし、三社で協議し、表 3-3-3 にまとめた。

表 3-3-3 上位制御と変換器等とのインターフェース（案）

上位制御→変換器			変換器→上位制御		
制御	制御切替	端子制御方法	計測用	変換器状態	
出力指令値	有効電力指令値			BC状態	
	無効電力指令値			各アーム電圧	
	直流電圧指令値			有効電力	
	交流電圧指令値			無効電力	
	周波数指令値			交流側相電圧	
	ドループ指令値	ドループ特性の傾き		交流電流	
	変換器出力上限値	ドループリミッタ		直流母線電圧	
シーケンス	起動/停止			直流線路電流	
				直流電力	
上位制御→windファーム			windファーム→上位制御		
指令	転送遮断		計測用	WF状態	
			直流遮断器→上位制御		
			計測用	DC-CB状態	

(c) 上記の要求仕様をまとめた「多端子標準仕様書案」を検証するために必要な検証ツールとして、メーカー作成モデルの授受やブラックボックス化が必要であることから、詳細計算用のシミュレーション解析計算には、系統解析ソフトウェア PSCAD/EMTDC を、長時間解析用のデジタル系統シミュレータとしては、RTDS テクノロジー社製リアルタイムシミュレータ RTDS を採用した。東電 HD では、東芝、日立が作成したモデルを結合した系統での検証と図 3-3-1 に示す系統モデルを詳細に模擬するために、図 3-3-4 に示す仕様の RTDS を購入し、環境整備を行った。図 3-3-5 は、平成 28 年度までに整備した RTDS である。

主な購入物品	H27年度購入	H28年度購入
フルサイズキュービクル	4ラック	1ラック
プロセッサ基板(PBS)	24枚	6枚
入出力基板	一式	
アナログ出力(AO)	2枚	
アナログ入力(AI)	2枚	
デジタル出力(DO)	2枚	
デジタル入力(DI)	2枚	
ソフトウェア (RSCAD)	一式	
ミッドサイズキュービクル	3面	2面
MMCサポートユニット	30台	20台

図 3-3-4 RTDS 購入物品（東電 HD 分）



図 3-3-5 東電 HD 設置の RTDS

(d) 多端子化の検討として、まず、図 3-3-6 に示す非対称単極 3 端子（陸上 2 端子、洋上 1 端子 直流送電線 Δ 構成）の系統モデルから開始することとした。3 端子システムでは、定常時や事故時等の過渡時の運用のあり方の整理や異社間接続のインターオペラビリティの課題が重なり合っ て複雑になるため、これらの整理を進めている。

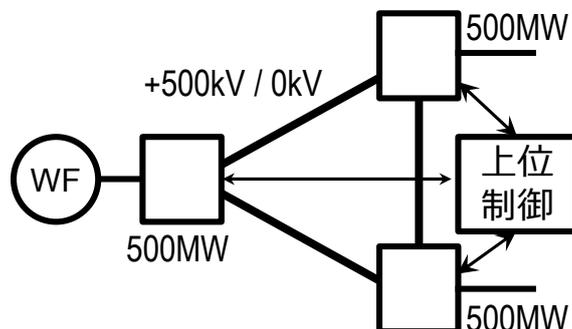


図 3-3-6 非対称単極 3 端子系統

②異メーカーの自励式交直変換器の相互連系を可能にする標準仕様の検証

(a) PSCAD による検証

多端子直流送電システムは、上記の「多端子標準仕様書案」を満足するシステムを複数のメーカーで協調して構築する必要がある。そこで、各メーカー作成の解析モデルを東電 HD に提出し、それを東電 HD で組み合わせ検証を行うこととした。各メーカー作成の解析モデルは、三社で予め定めたテストケースによる制御検証を各メーカーにて済ませた後、メーカーのノウハウ部分をブラックボックス化し、事前に決定した解析モデルのインターフェースに合わせて、東芝、日立製作所それぞれが作成した。

各社での RTDS 解析環境の整備完了を平成 28 年度に行うため、平成 27 年度からは、PSCAD / EMTDC での解析を先行して開始した。関係者での討議の結果、多端子双極システムに直接に取り組むことは難度が高いため、単極 2 端子のメーカー自社解析モデルの作成から着手した。図 3-3-7 と図 3-3-8 にそれぞれ、東芝および日立的作成した単極 2 端子直流送電システムの PSCAD モデルを示す。

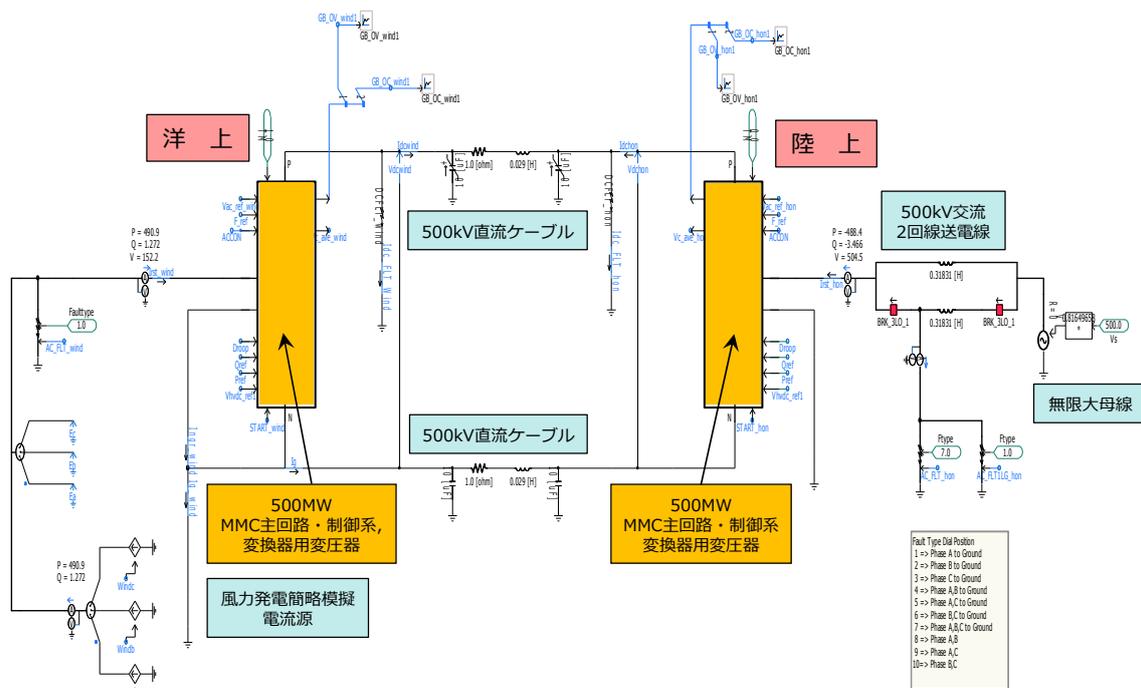


図 3-3-7 東芝製単極 2 端子直流送電システム (PSCAD モデル)

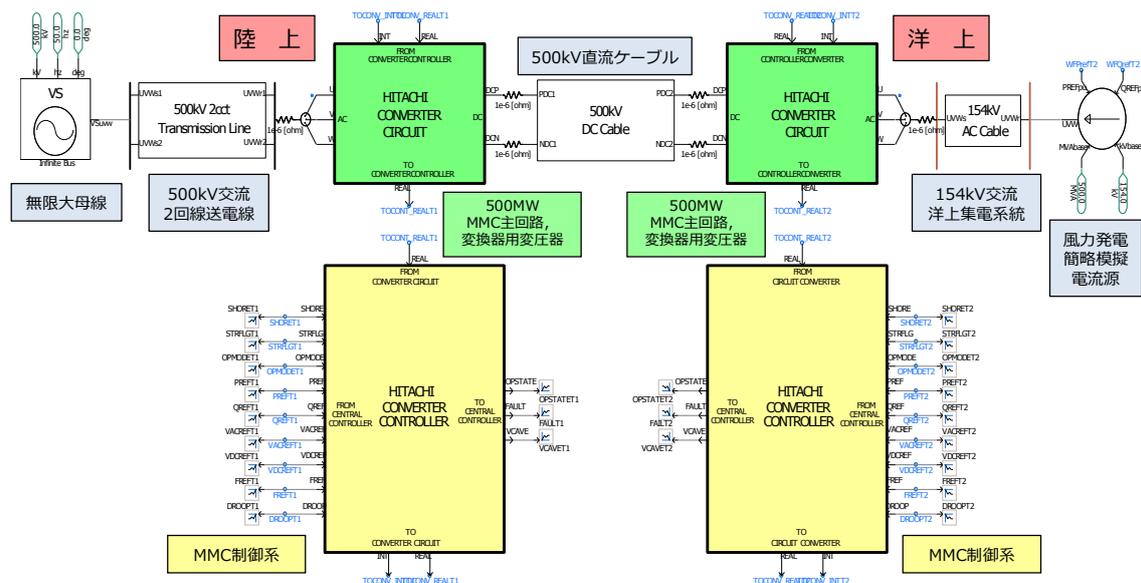


図 3-3-8 日立製単極 2 端子直流送電システム (PSCAD モデル)

各メーカー内での基本動作確認（起動／停止、設定値変更、交流系統事故、直流送電線事故）後、東電 HD では、各メーカーの PSCAD データを受領した。データ授受時のメーカーのノウハウの流出に対しては、PSCAD/EMTDC のブラックボックス化機能を用いて、その流出を防止している。東電 HD では、各メーカーの PSCAD データから単極 1 端子を切り出して組み合わせ、異メーカー単極 2 端子直流送電システムの PSCAD データを作成し（図 3-3-9）、異メーカー組み合わせの基本動作ケーススタディとシステム挙動や課題の考察を進めた。図 3-3-10 に解析結果の一例を示す。

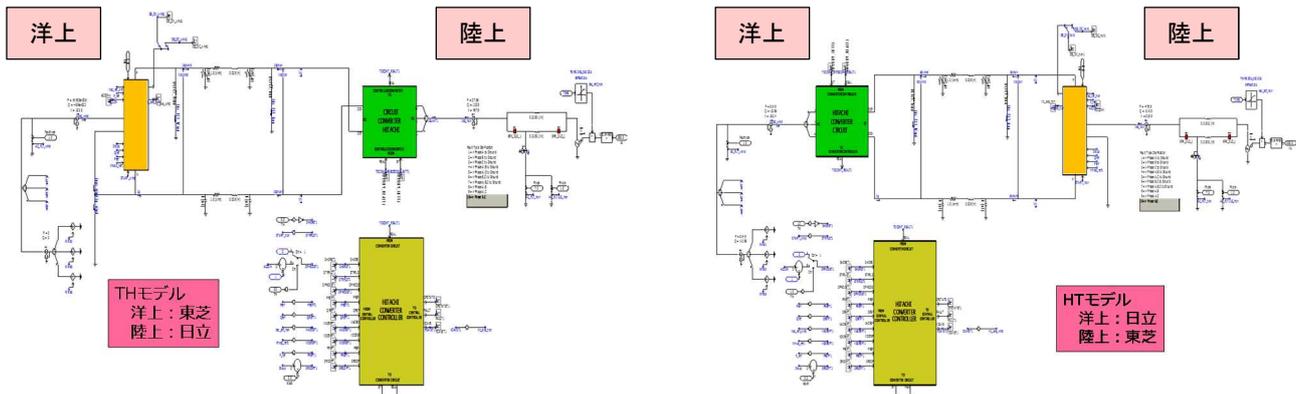


図 3-3-9 異メーカー組み合わせの単極 2 端子直流送電システム (PSCAD モデル)

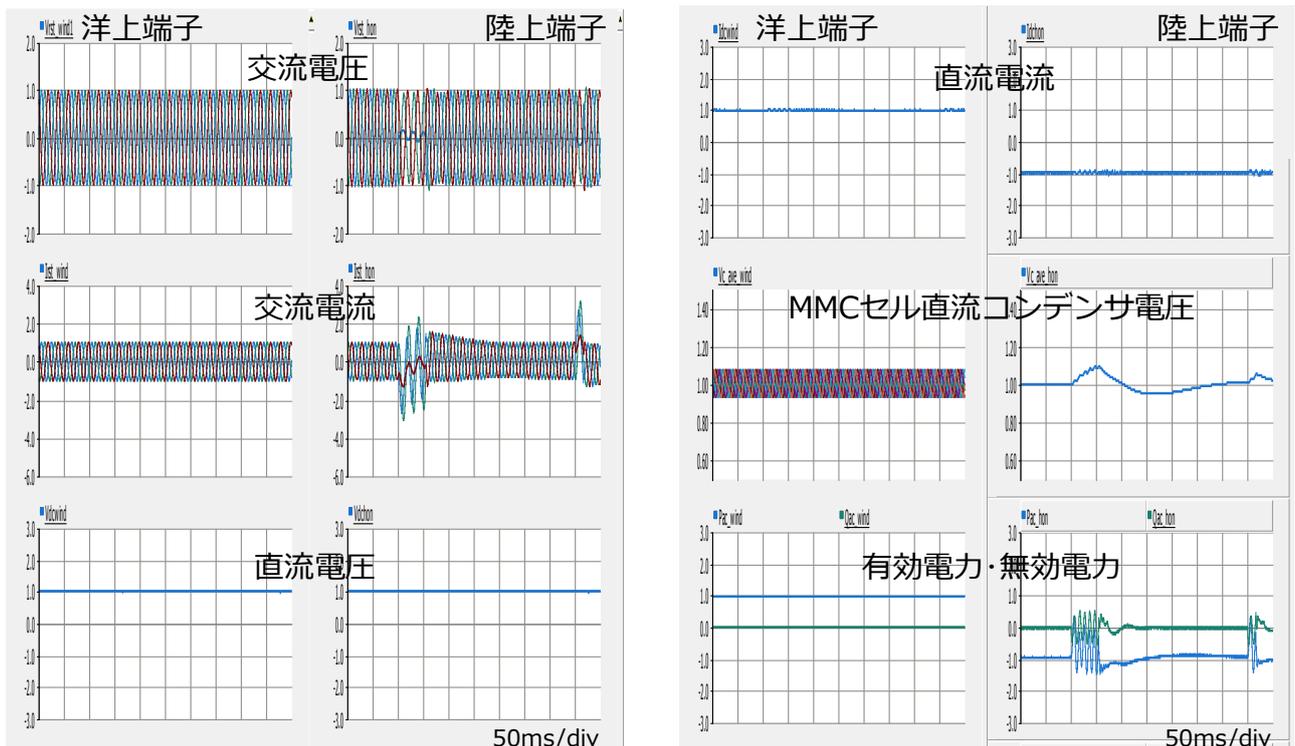


図 3-3-10 異メーカー組み合わせの単極 2 端子直流送電システム (PSCAD モデル) の解析結果一例 (定格電力送電中の陸上側交流系統での不平衡事故)

基本動作のケーススタディの結果、モデル各部波形に異常はみられず、東芝、日立が提出した PSCAD モデルのブラックボックス内部までさかのぼって、各社の制御保護方式を修正する必要はなかったが、各社の作成したモデルによる波形の違いや回路モデルによる修正を行った。最終的に、東電 HD、東芝、日立間で、標準仕様書案の修正をしながら、洋上 WF と 2 端子直流送電システムの定常運転状態および過渡運転状態の想定をすり合わせ、最小限必要な制御信号のインターフェースを統一することによって、単極 2 端子という最小規模では、異メーカー組み合わせが可能であることを確認した。

ただし、現実の直流システムでは想定しにくい過電流や過電圧は発生させないようにして、システムの挙動を適正に把握するには、洋上系統の事故時の運転継続を模擬した FRT (fault ride-through) 特性と陸上系統事故時の余剰電力消費のためのブレーキングチョッパの追加が必要となることが分かった。そのため、各メーカーで、自社モデルの改良を行い、再度、改良版として東電

HD にモデル提出が行われ、改良部分に関連する解析ケースのみ動作検証を行い、問題なく終了した（図 3-3-11）。

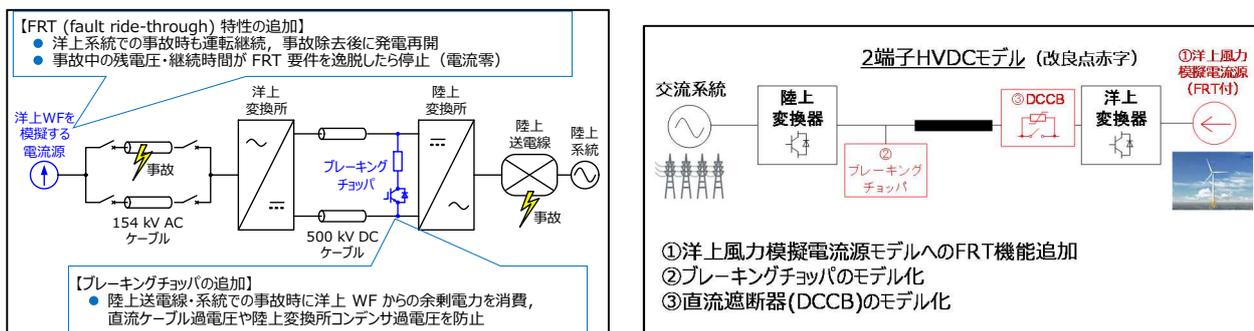


図 3-3-11 各メーカーの単極 2 端子直流送電システム（PSCAD モデル）の改良
（左側：日立 右側：東芝）

(b) RTDS による検証

平成 28 年度の各メーカーでの RTDS 解析環境の整備完了、自社モデル作成に先立ち、東電 HD では、平成 27 年度から RTDS での検証を始めた。各メーカーの自社モデル受領前の予行解析として、RTDS の例題で提供されている MMC 型自励式 2 端子直流送電システムの CIGRE モデルを用いた動作確認を実施し、良好な結果を得た。図 3-3-12 に RTDS を動作させる RSCAD の画面を図 3-3-13 に解析例を示す。また、次年度以降の交流系統への周波数変動の影響を解析するために必要な交流系統モデルとして、電気学会電力系統標準モデル EAST10 の構築を行った。図 3-3-14 は RSCAD の画面を、図 3-3-15 は解析例を示す。交流送電線事故ケースを行い、電中研 Y 法との相違ないことを確認した。

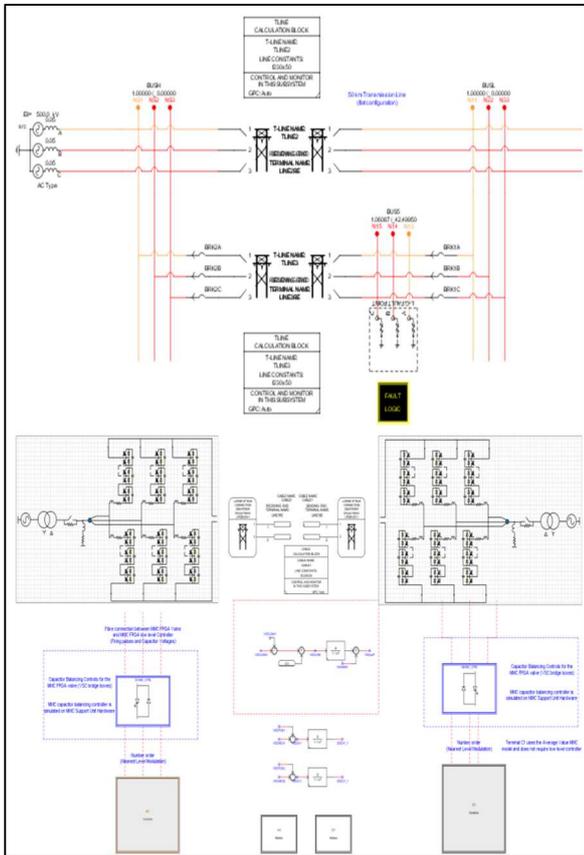


図 3-3-12 CIGRE モデル (RSCAD)
(上部：主回路 下部：主回路詳細、制御)

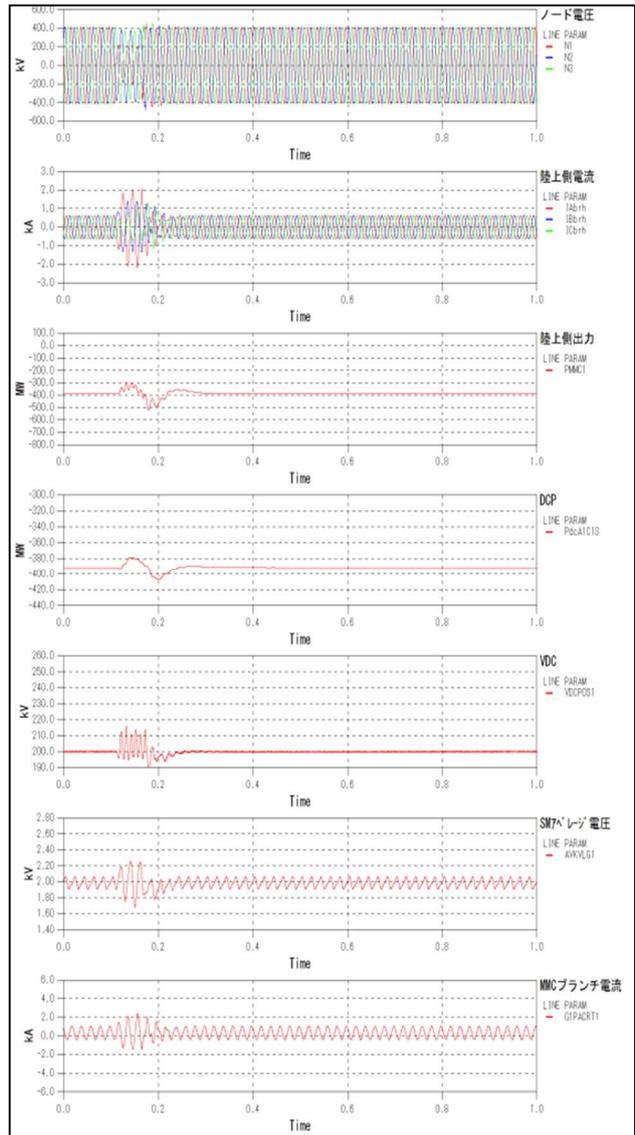


図 3-3-13 RTDS (CIGRE モデル) の解析例
(陸上系統での不平衡事故)

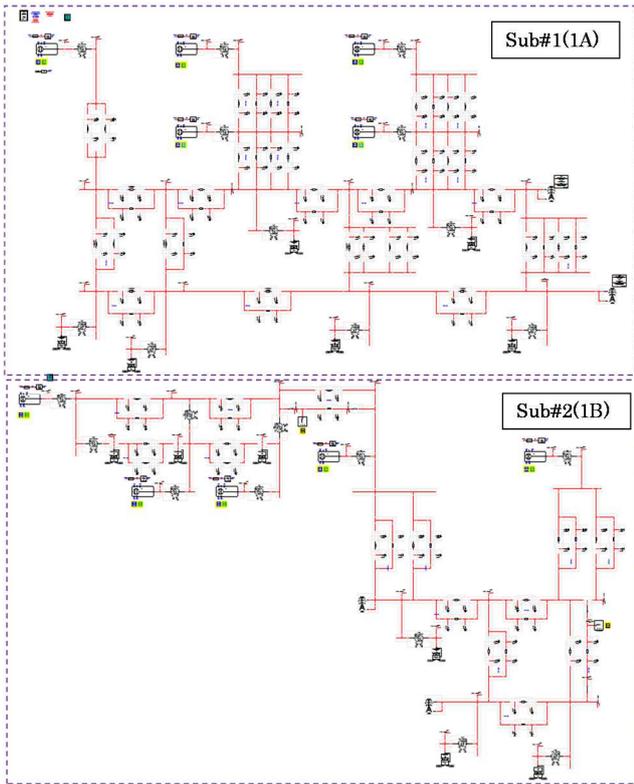


図 3-3-14 電気学会 EAST10 系統モデル (RSCAD)
(上部：主回路 下部：主回路詳細、制御)

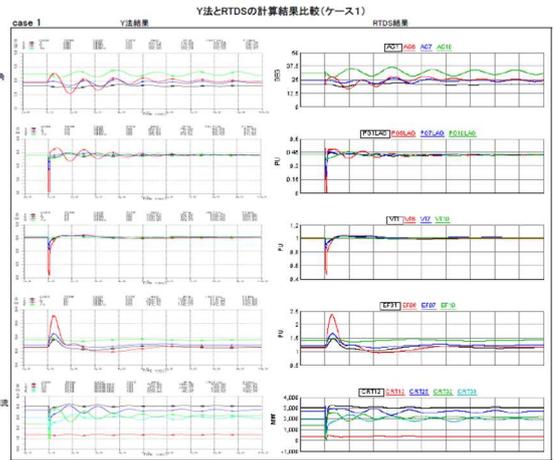


図 3-3-15 RTDS (EAST10 系統) の解析例
(交流送電線事故)

各メーカーで RTDS の整備を行ったのち、平成 28 年度に PSCAD/EMTDC と同様の単極 2 端子の RTDS モデルのメーカー自社解析モデルの作成を行った。図 3-3-16 と図 3-3-17 にそれぞれ、東芝および日立の作成した単極 2 端子直流送電システムの RTDS モデルと解析結果例を示す。

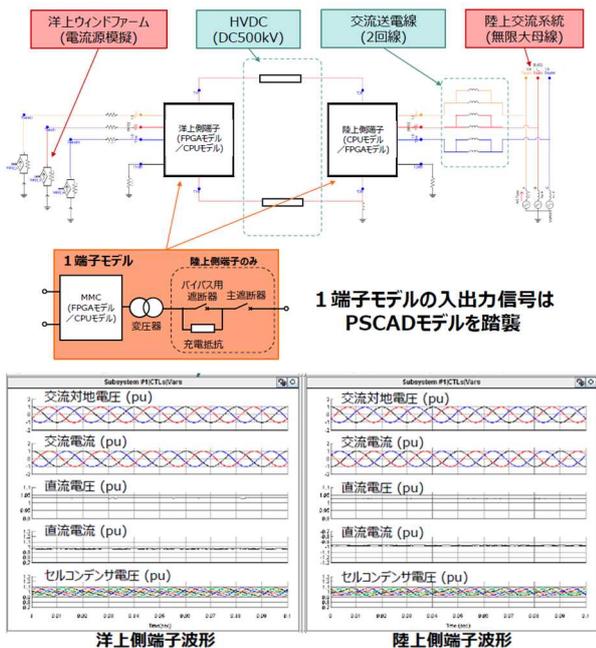


図 3-3-16 東芝製 2 端子系統モデル (RTDS)
(上部：主回路 下部：定常運転結果)

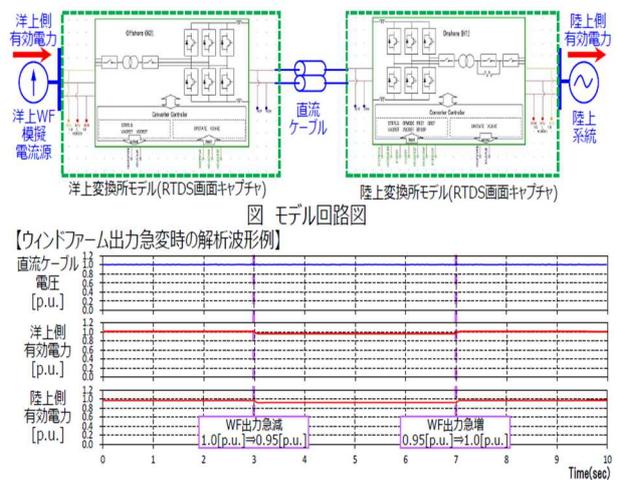


図 3-3-17 日立製 2 端子系統モデル (RTDS)
(ウインドファーム急変時)

PSCAD モデル作成時と同様に、各メーカー内での基本動作確認後、東電 HD では、各メーカーの RTDS データを受領した。データ授受時のメーカーのノウハウの流出に対しては、PSCAD モデルの受領時と同様に RSCAD のブラックボックス化機能を用いて、その流出を防止している。東電 HD では、各メーカーの RSCAD データから単極 1 端子を切り出して組み合わせ、異メーカー単極 2 端子直流送電システムの RSCAD データを作成し（図 3-3-18）、異メーカー組み合わせの基本動作ケーススタディとシステム挙動や課題の考察を進めた。図 3-3-19 に解析結果の一例を示す。この結果、PSCAD と同様に、RTDS においても、単極 2 端子という最小規模では、異メーカー組み合わせが可能であることを確認した。

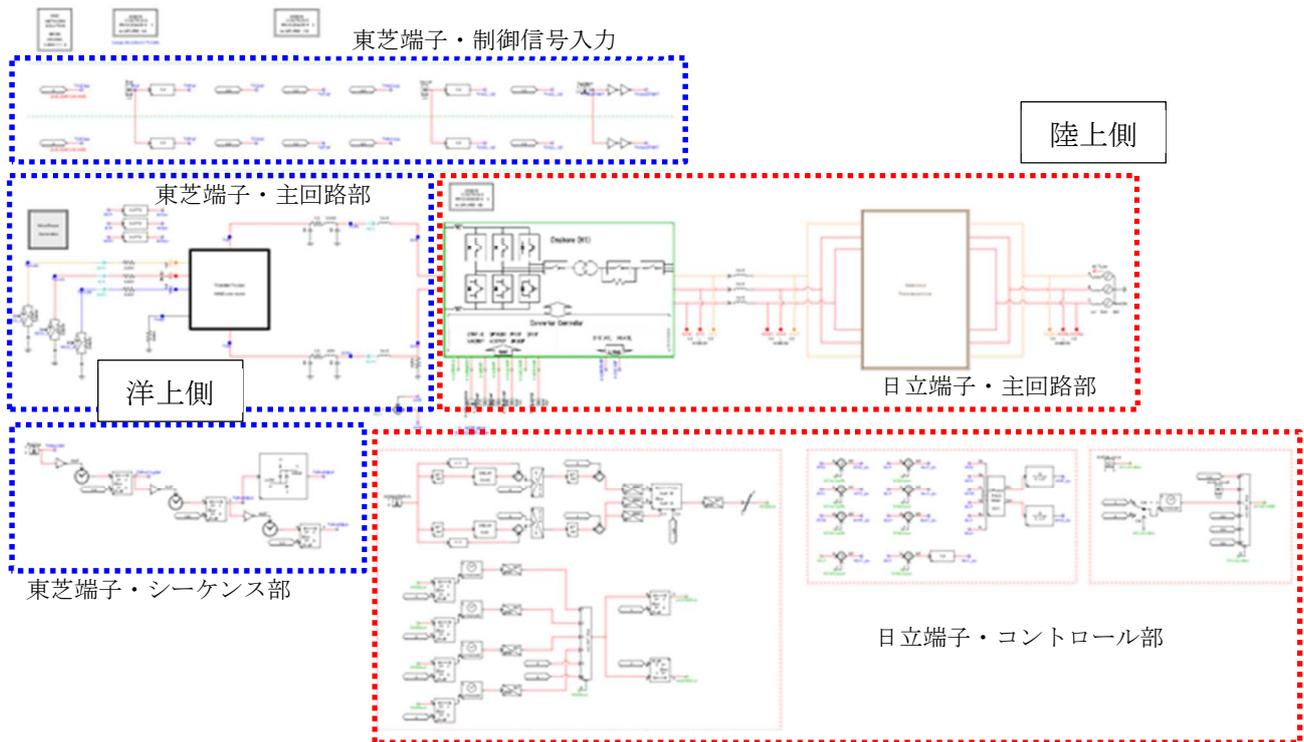


図 3-3-18 異メーカー組み合わせの単極 2 端子直流送電システム (RTDS モデル)
洋上側：東芝製 陸上側：日立製

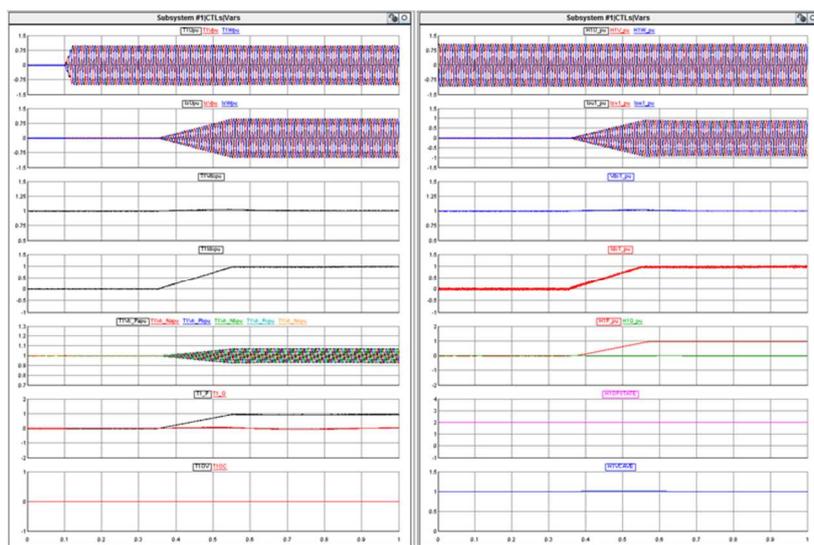


図 3-3-19 異メーカー組み合わせの RTDS 解析結果 (洋上側変換器起動)

さらに、改良前の 2 端子メーカ作成のモデルを用いた異メーカ組み合わせ 3 端子系統モデルを作成し、起動停止、指令値変更、WF 出力変更などの解析を実施した。

(c) PSCAD および RTDS による検証結果と現在の進捗

標準仕様書案を練り上げ、上位制御と変換器間のインターフェースも十分詰めて統一した。解析モデルのブラックボックス化機能を活用することにより、メーカ間のノウハウ流出を気にすることなく、円滑に単極 2 端子構成での異社間連系の解析検証を完了させた。洋上端子と陸上端子にいずれのメーカの変換器が接続されるかによって、応答波形に差異はみられたが、直流送電システムの動作に支障は及ばず、緩やかな仕様標準化とインターフェース統一が効果を挙げている。現在、上位制御を含めた多端子での検討を行う前段階として、PSCAD/EMTDC、RTDS の両解析ツールでは、2 端子のメーカ作成モデルを 3 端子化した系統モデルで進めた解析結果を反映したメーカ作成の 3 端子モデルの作成を行っている。

③設備の要求仕様の検討

<実施計画>

500 kV 多端子直流送電システムの設備に要求される仕様（耐電圧レベルや避雷器のエネルギー処理責務など）を明らかとするため、電力系統瞬時値解析プログラム XTAP を用いて以下に示す各種過電圧および異常現象の解析を行う。

- ・ 直流送電線地絡時に生じるサージ性過電圧
- ・ 直流遮断器投入時に生じるサージ性過電圧と振動性過電圧
- ・ 交流側から移行するサージ性過電圧
- ・ 直流送電線地絡時に交流側に回り込む電流

また、実施行程の計画は以下の通り。なお、本項目は 2017 年度 1 年間で実施するものである。

2017 年度 第 1 四半期

- ・ ベースとなる解析ケースの仕様策定と XTAP 上での実際のケース作成

2017 年度 第 2 四半期

- ・ 直流送電線地絡時に生じるサージ性過電圧
- ・ 直流遮断器投入時に生じるサージ性過電圧と振動性過電圧

2017 年度 第 3 四半期

- ・ 交流側から移行するサージ性過電圧
- ・ 直流送電線地絡時に交流側に回り込む電流

2017 年度 第 4 四半期

- ・ 検討および総括

<研究成果>

項目①で検討した「標準仕様書」に基づき、本項目で実施する各種過電圧および異常現象の解析に適した解析ケースとして、(図 3-3-20)に示す、ベースとなる解析ケースの仕様を策定した。その仕様の概要を以下に示しておく。

- ・ 洋上 WF
定格容量：1 箇所あたり 1000 MW を想定（トータル 2000 MW）
- ・ 海底ケーブル
定格電圧：± 500 kV、ケーブル線種：CV 1200 sq.

送電形態：(1) 帰線あり双極、(2) 対称単極（帰線なし）の2ケース

線路モデル：周波数依存線路モデル、大地固有抵抗率：0.21 Ωm

- 4 端子 MMC (Modular Multi-Level Converter) 型変換器

モデルの種類：(1) 詳細模擬 10 段モデル、(2) 平均値モデル（高速解析用）

洋上変換所の制御：CVCF（自立運転）、陸上変換所の制御：DCAVR + DROOP 制御

XTAP 上に作成した帰線あり双極のケースを（図 3-3-21）に示す。

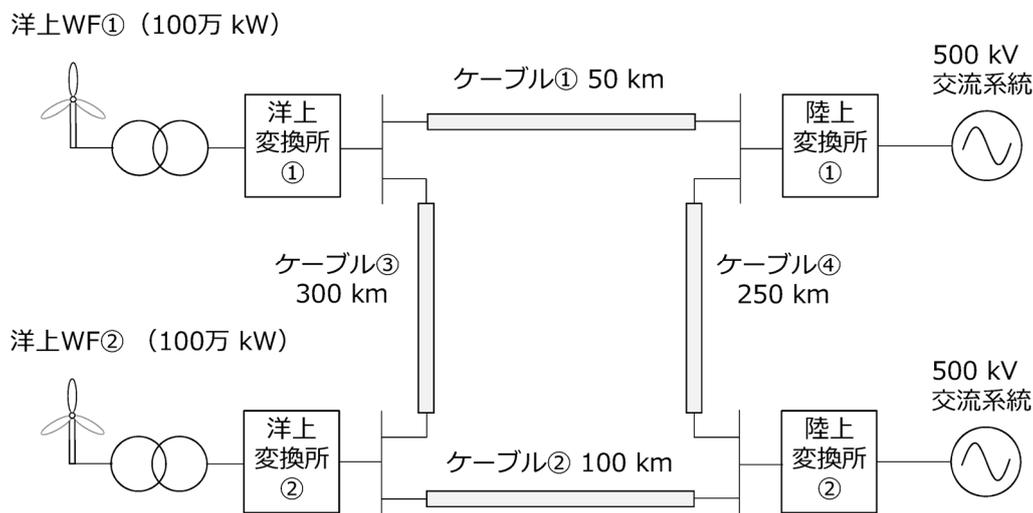


図 3-3-20 ベースとなる解析ケース

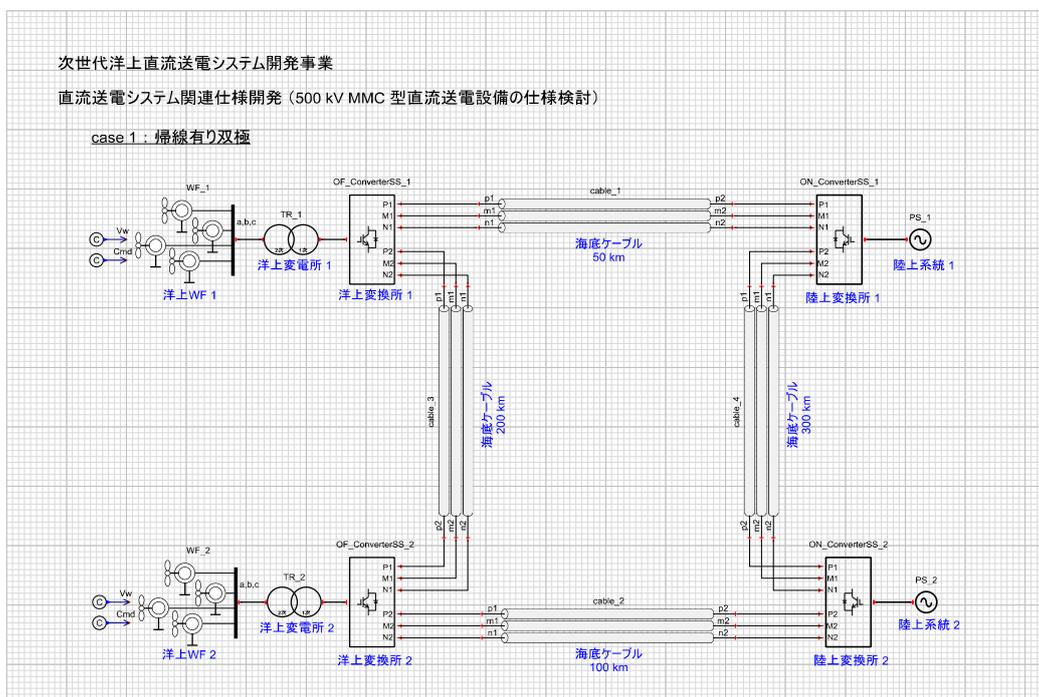


図 3-3-21 XTAP 上に作成した帰線あり双極のケース

(4) 目標達成に向けた今後の課題、課題解決の見通し

事業終了までに達成すべき最終目標と目標達成に向けた今後の課題、課題解決に向けた見通しを以下に示す。

表 3-3-4 課題と課題解決の見通し

自励式交直変換器の制御・保護方式への要求仕様の作成			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
異社間接続が可能な洋上多端子直流送電システムの標準仕様書案の作成	異メーカーの方式相違によらない洋上多端子直流送電システムの解析に裏打ちされた標準仕様書を完成する	3端子以上の多端子系統の検証では、定常時および過渡時の運用のあり方を反映した上位制御を組み込む必要がある	運用のあり方の整理とそれを反映した上位制御の検証を相互に連携することで課題の解決は可能である
異メーカーの自励式交直変換器の相互連系を可能にする標準仕様の検証			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
異メーカー間で構築された洋上多端子直流送電システムの標準仕様の解析検証	異メーカーの洋上多端子直流送電システムの解析技術を確立し、多端子標準仕様書案の最終検証を行う	多端子化での検証を進めるためのツールの使い分けの検討が必要である	検証項目の整理と並行し、ツールの特性を考慮しながら検証案を作成することで、課題の達成は可能である
設備の要求仕様の検討			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
直流送電システム関連仕様開発 (500 kV MMC型多端子直流送電設備の仕様検討)	想定する各種過電圧および異常現象に加えて、近年、先行する欧州等から報告されている異常現象の解析を行い、500 kV多端子直流送電システムの設備に要求される耐電圧レベルなどの仕様を明らかとする。	先行する欧州等の洋上直流送電システムについて調査を行い、開発する500 kV多端子直流送電システムに生じうる各種異常現象を整理し、解析を行う	学会調査や現地調査を着実にを行い、各種異常現象を整理、解析することで可能と考える

2.2 研究開発項目Ⅱ「要素技術開発」

2.2.1 直流遮断器の開発（東芝）

(1) 研究開発の目的・内容

多端子直流送電システムを低コスト、高信頼性で実現するために必要となる、直流遮断器の実用化に向けた基盤技術を確立することを目的として、本テーマでは、洋上風力向けに適用する多端子直流送電システムにおいて必要と考えられる直流遮断器の設計仕様を明らかにするとともに、大容量直流遮断器の実現に向けた実機のスケールモデルの設計と試作、性能試験検証を行う。また既存の交流送電システムに対し、直流送電システムにおいて直流遮断器を導入した場合の経済性評価を行う。直流遮断器は、通電時の損失が低く高速遮断を可能とした、機械遮断部と半導体遮断部と転流回路部を組合せたハイブリッド遮断器を開発する。

(2) 成果の達成状況

(要約)

機械遮断部の実験では、断流部および遮断部を高速に駆動するための電磁反発操作機構を開発し、所定の断流性能・遮断性能を達成した。半導体遮断部の実験では、機械遮断部に電流ゼロ点を生成する転流回路部のアルゴリズムを開発するとともに、半導体遮断部の遮断性能の向上（遮断電流 8kA 以上）を実現した。さらに、機械遮断部と半導体遮断部と転流回路部を組み合わせたハイブリッド構成による原理検証試験を実施した。試験にあたって、遮断試験方法を立案するとともに、試験では、原理通りに動作すること、ならびに遮断電流の目標値である 8kA 以上の遮断を確認した。

以下に中間目標、成果と達成度を示す。

表 3-4-1 開発成果と達成度

機械遮断部（断流部）の開発			
主な内容	中間目標	成果	達成度
高速駆動機構と断流部接点の開発	数 ms で所定の変位を達成する操作機構の開発と所定の断流性能を満足する接点を開発する	<ul style="list-style-type: none"> 電磁反発操作機構を開発した アーク消弧後の絶縁ガスの耐電圧特性を取得し、ガス接点を開発し、所定の断流性能を達成した 真空バルブを適用した断流部の実験も実施し、所定の断流性能を達成した 	○
機械遮断部（遮断部）の開発			
主な内容	中間目標	成果	達成度
高速駆動機構と真空バルブの開発	数 ms で所定の変位を達成する操作機構の開発と所定の遮断性能を満足する真空バルブを開発する	<ul style="list-style-type: none"> 電磁反発操作機構を開発した 転流用に適した真空バルブを開発し、所定の遮断性能を達成した 	○
半導体遮断部の実験			
主な内容	中間目標	成果	達成度
半導体遮断部の遮断性能向上の実験	半導体遮断部 10kV モデルによる 8kA 遮断実験を行う	半導体遮断部が 8kA 以上の遮断性能を有することを実証した	○

ハイブリッド遮断器の開発			
主な内容	中間目標	成果	達成度
ハイブリッド遮断器（機械遮断部＋半導体遮断部＋転流回路部）の制御アルゴリズムの開発	ハイブリッド遮断器（10kV モデル）における制御アルゴリズムの実証を行う	ハイブリッド遮断器の原理検証器（10kV モデル）を試作し、本器による試験において 10kV-8kA の遮断に成功し、制御アルゴリズムが正しく動作することを確認した	○
500kV 器対応検討とコスト試算	500kV 器に向けた仕様検討とコスト試算を行う	DC500kV への適用を想定した各遮断部の開発を行い、高電圧への対応（多重化接続）を実現するためのコンポーネント設計を進めるとともに、コストを試算した	○
遮断試験方法の開発			
主な内容	中間目標	成果	達成度
直流遮断器の遮断試験方法の開発	<ul style="list-style-type: none"> 遮断試験での条件を調査し、遮断試験方法を開発する その後、原理検証モデルで試験方法の評価試験を実施する 	<ul style="list-style-type: none"> ハイブリッド直流遮断器の遮断シーケンスのシミュレーション結果をもとに、電流電圧の条件を設定した 電流と電圧の供給源を分けた試験方法を開発し、原理検証モデルを用いて試験を実施した 開発した試験方法の妥当性を評価した 	○

◎大幅達成、○達成、△一部未達、×未達

(3) 具体的な実施状況について

開発するハイブリッド直流遮断器の開発仕様を説明する。平成 26 年度（2014 年度）NEDO 事業「洋上風力向け直流送電システムの基礎検討」⁽¹⁾⁽²⁾において、海外の洋上風力を主とする直流送電システムの実績を調査した結果、直流電圧は DC±150kV～±320kV、送電電流はおよそ DC1kA～1.5kA で設計していることが分かった。そこで、多端子直流送電システムとして、将来的に直流電圧 500kV、電流 1500A の送電を想定し、本委託事業で開発するハイブリッド直流遮断器の開発仕様を設定した。表 3-4-2 に開発仕様を示す。

表 3-4-2 開発仕様

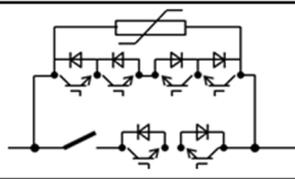
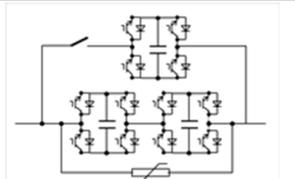
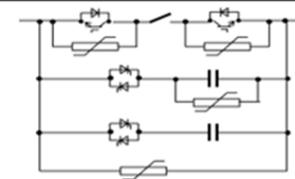
項目	定格値	備考
直流電圧	数 10kV	将来的に 500kV 送電に向けた適用も視野
直流電流	1500A	海外洋上風力直流送電システムの実績調査から設定
遮断電流	8kA	直流遮断器の設置にかかわる損失から設定
遮断時間	10ms（5ms 目標）	直流事故後、多端子直流送電システムの直流電圧を 80%以上に維持する時間として設定（遮断時間＝リレー時間・裁断時間）

海外メーカーが発表した遮断性能と回路構成の特徴を表 3-4-3 に示す。いずれの方式も常時通電回路に機械動作部と半導体遮断回路が設置されていることが特徴となっており、通電時に半導体遮断回路で損失が発生する。

提案するハイブリッド直流遮断器（図 3-4-1）は、高速遮断を実現する機械遮断部（遮断部と断路部で構成）と、電流遮断の初期段階で機械遮断部に電流ゼロ点を生成する転流回路部、最終段

階で避雷器に電流を転流する半導体遮断部で構成される。図 3-4-1 に示すように、このハイブリッド直流遮断器は、機械遮断部（遮断部と断路部）と半導体遮断部を並列に構成しており、通常は機械部に通電するため、ほとんど損失がないことが特徴である。

表 3-4-3 海外におけるハイブリッド遮断器の開発状況

メーカー	遮断性能	回路構成の特徴
欧州A社 (3)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 500kV-16kA ・ 遮断時間3ms以下 	
中国B社 (4)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 500kV-25kA ・ 遮断時間3ms以下 	回路構成は未公開
中国C社 (5)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 200kV-15kA ・ 遮断時間3ms 	
欧州D社 (6)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 120kV-7.5kA ・ 遮断時間5.3msec 	

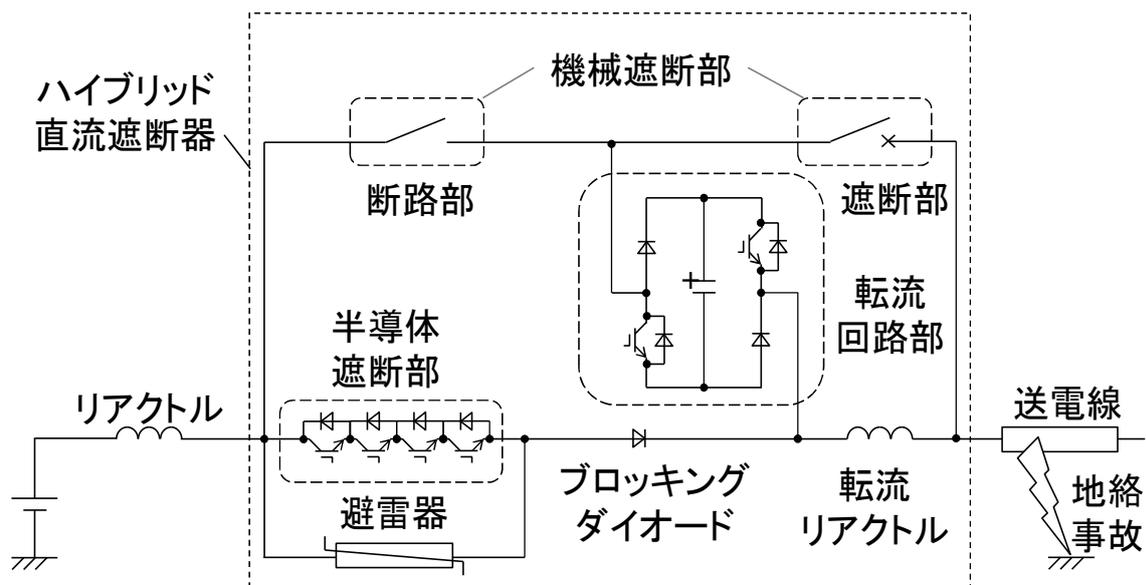


図 3-4-1 ハイブリッド直流遮断器の構成

機械遮断部については、断路部の接点性能検証器を製作し（図 3-4-2）、高速駆動と接点部の耐電圧性能を検証するとともに、遮断部の遮断性能検証器を製作し（図 3-4-3）、高速駆動と接点部の遮断性能を検証した。

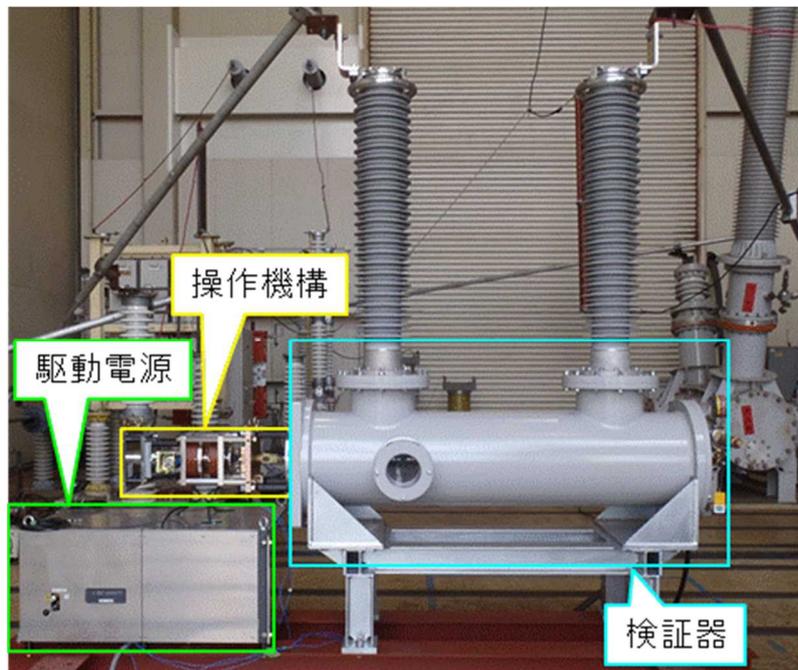


図 3-4-2 断路部性能検証

半導体遮断部については、転流回路部を適切なタイミングで動作させるためのアルゴリズムの開発を行った。アルゴリズムでは系統故障電流を検出して電流ゼロ点を生成する時間を予測する。本アルゴリズムを 10kV モデルによる試験に適用し、所望のタイミングで機械遮断部に電流ゼロ点が生成され、良好に直流電流が遮断できることを確認した。

半導体遮断部は構成される自励式半導体素子の遮断性能の向上が必要となる。スナバ回路を適用したことで遮断性能の向上を図り、組み合わせ試験において 8kA 以上の遮断性能を実証した（図 3-4-4）。



図 3-4-3 遮断部検証器

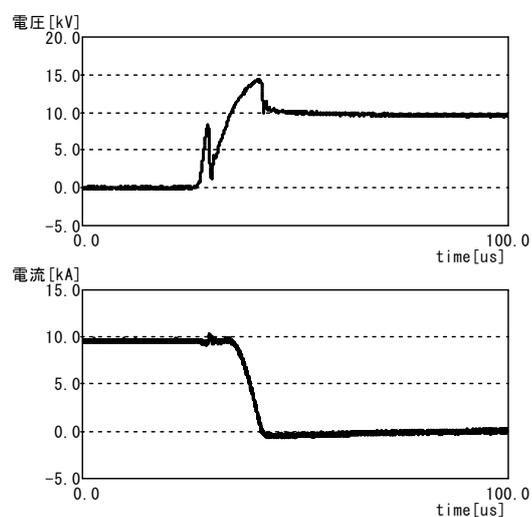


図 3-4-4 半導体遮断部 遮断波形

ハイブリッド直流遮断器による検討では、10kV 原理検証用モデル（10kV モデル）を製作し（図 3-4-5）、試験方案の立案と原理検証を実施した。試験方案の立案では、遮断シーケンスのシミュレーション結果をもとに試験条件を設定し、これらの電流、電圧の供給が可能な試験方法として図 3-4-6 に示す試験回路による合成試験法を開発した。スケールモデルの原理検証では、機械遮断部・半導体遮断部・転流回路部がシステムとして正しく動作し、遮断電流の目標値とする 8kA の遮断と遮断時間 5ms の目標を実証した（図 3-4-7）。今後、高電圧化の開発を行い、この遮断性能を実現していくことが課題である。

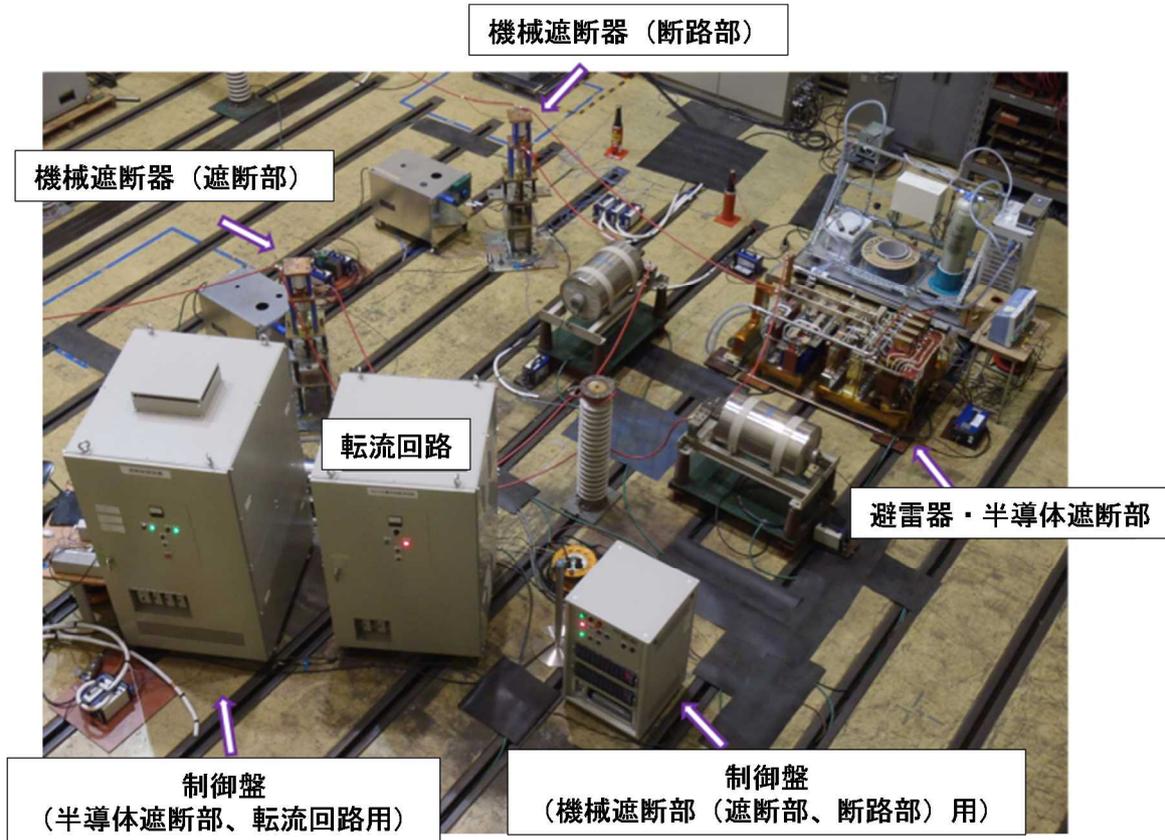


図 3-4-5 実験装置と試験風景

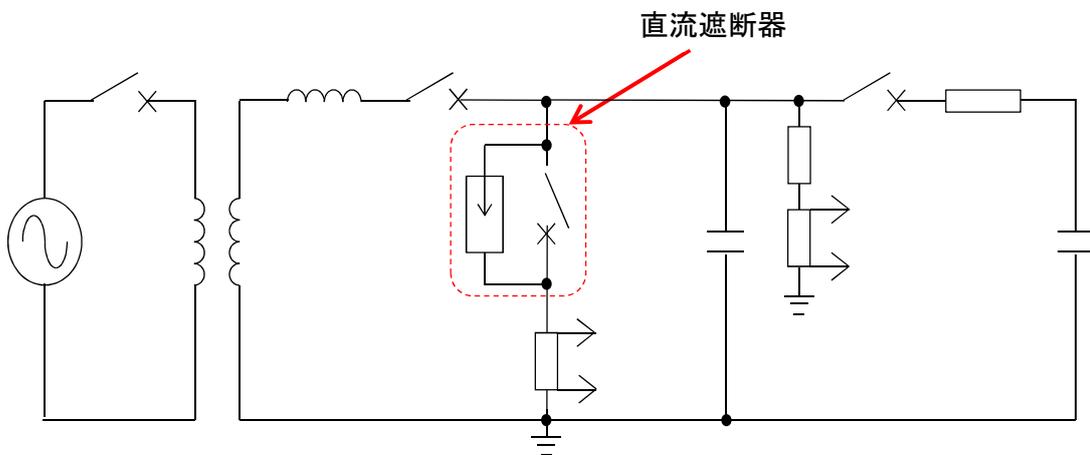


図 3-4-6 試験回路

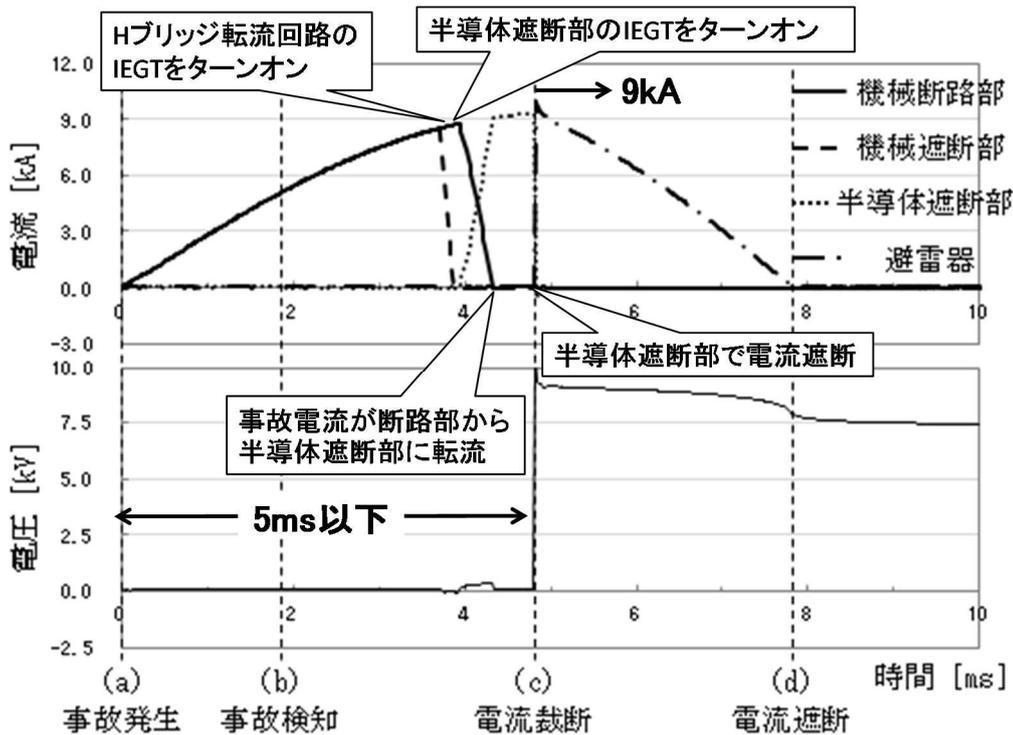


図 3-4-7 遮断試験結果波形

(4) 目標達成に向けた今後の課題、課題解決の見通し

事業終了までに達成すべき最終目標と目標達成に向けた今後の課題、課題解決に向けた見通しを以下に示す。

表 3-4-4 課題と課題解決の見通し

機械遮断部（断路部）の開発			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
<ul style="list-style-type: none"> ・ 機械的・電氣的信頼性の検証 ・ 高電圧化への対応 	長期信頼性の高い断路部を開発する 数百 kV に対応できる基礎技術を開発する	機器の耐久性、特性変化および電氣的劣化を評価する	連続開閉試験、長期課電試験を実施して機器の信頼性を向上させる
機械遮断部（遮断部）の開発			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
<ul style="list-style-type: none"> ・ 機械的・電氣的信頼性の検証 ・ 高電圧化への対応 	長期信頼性の高い断路部を開発する 数百 kV に対応できる基礎技術を開発する	機器の耐久性、特性変化および電氣的劣化を評価する	連続開閉試験、長期課電試験を実施して機器の信頼性を向上させる
半導体遮断部の開発			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
半導体遮断部と転流回路部による遮断性能向上に向けた開発	半導体遮断部と転流回路部（数 10kV モデル）による遮断実証を行う	半導体遮断部と転流回路部の高電圧化、および適用するスナバ回路の最適化と半導体遮断部の駆動電源の供給方法を開発する	避雷器を含めた高電圧検討と、半導体遮断部と転流回路部の定数検討により達成可能である

ハイブリッド直流遮断器の開発			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
数 10kV ハイブリッド遮断器の製作・試験検証と高電圧化対応	数 10kV ハイブリッド遮断器による開発仕様の達成と、500kV 対応器を試設計する	数 10kV 組合せシステムにおける遮断性能を達成する	機械遮断部および半導体遮断部における課題達成にて対応する
遮断試験方法の開発			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
直流遮断器の遮断試験方法の開発	数 10kV ハイブリッド直流遮断器の遮断試験を実施し、試験方法を確立する	スケールモデルでの試験より得られた結果をもとに、数 10kV での試験回路へ反映すること	スケールモデルでの試験方法の妥当性は確認しているため、現状の方法をベースにすれば目標は達成可能と見込んでいる

2.2.2 海底ケーブル関連技術開発（住友電気工業、古河電気工業）

(1) 研究開発の目的・内容

従来までの海底ケーブルを用いた送電システムを構築する場合、ケーブルの送電容量はケーブルの許容温度によって決まることから、全長に渡って温度環境のもっとも厳しい部分において十分送電可能となる導体断面積の選定がされている。これを周囲環境温度に合わせたケーブル断面積とし、ケーブル温度状況に応じた潮流制御を行うダイナミックレイティング（DR）を洋上風力発電のような変動電源へ適用すると大幅なコストダウンが期待できる。本テーマでは、異径のケーブルを接続可能なケーブルジョイントの開発と、変動電源である洋上 WF の送電システムへ DR 技術を適用した場合のシステム開発を行う。また、DR システムの導入を前提とした最適なケーブル設計手法を開発する。

海底ケーブル敷設に係る工期短縮とコスト削減を実現する新たな工法を開発することを目的として、ケーブル敷設については、従来の 1 条ずつの敷設に対して複数条同時の敷設を可能とする工法の検討、および敷設船の設備モデルなどを開発する。また、従来のダイバーの手作業による防護管取付けについても、防護管を自動搬送、取付けする船上設備の検討とそれに対応した防護管の開発を行う。また、多端子直流送電システムと大規模洋上 WF は、いくつかのフェーズを経て拡張しながら拡大していくものと想定され、その際、洋上 WF を洋上 PF へ接続する際の接続コスト低減を実現する新たな工法として、集電したケーブルの接続を容易にし、異メーカー製のケーブルの接続を可能とする分岐ジョイントの開発を行う。

(2) 成果の達成状況

(要約)

DC500kV 海底ケーブルのコスト 20%削減を目指し 2 つの開発を行っている。まず、DR 技術を用いた海底ケーブル最適化技術の開発では、ケーブルの温度測定技術の開発、許容電流・導体温度の推定アルゴリズムを開発した。更に検証の為にフィールド試験を予定通り開始した。2 つ目として異径のケーブル導体の接続技術の開発では、導体や絶縁体などの個別部材の接続の要素技術開発を完了して初期性能試験に着手した。予定通り長期信頼性試験を実施する準備を行っている。

ダイバーレスの低コスト工法である海外の CPS（ケーブル防護材）の導入と評価試験を実施し、その有用性を確認、国内での実事業導入の目処付けを行った。海底ケーブル敷設コスト低減のためには海底ケーブルのバンドル敷設工法が有望であることを示した。海底ケーブルの船上防護管

取付工法を実現するための船上設備を3Dプリンターモデルにて作製し、実機防護管の設計を実施し試作を完了した。異社間分岐ジョイントを可能とする直流525kV級EB-Gを試作し基本的な性能の確認を実施した。

以下に中間目標、成果と達成度を示す。なお、平成28年度に終了予定のテーマについては、目標を最終目標として記載した。

表 3-5-1 開発成果と達成度

ダイナミックレイティング技術を用いた海底ケーブル最適化設計技術の開発（古河電気工業）			
主な内容	中間目標	成果	達成度
ダイナミックレイティングアルゴリズム開発と検証	コスト削減 20%のシミュレーションベースでの検証と実現に向けた課題を整理する（異径ケーブル接続を含む）	<ul style="list-style-type: none"> ・ダイナミックレイティングの導入により、ケーブルの導体断面積を削減し、そのコストを20%削減できることを示した ・また、その断面積で所定の電力を送電できることを示した 	○
異径ケーブル接続部の開発（古河電気工業）			
主な内容	中間目標	成果	達成度
導体断面積の異なるケーブルの接続技術の確立	導体断面積 2000mm ² と 1800mm ² のケーブル接続の要素技術を確立し、長期信頼性試験を開始する	<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブルを構成する各材料の接続方法を決定し、要素技術を確立した ・本年度内に予定通り長期信頼性試験を開始する 	○
最適工法およびコスト削減を目指したケーブルジョイントと工法の開発（住友電気工業）			
主な内容	最終目標	成果	達成度
異社間分岐ジョイントの開発	<ul style="list-style-type: none"> ・直流525kV級EB-Gの試作、並びに性能評価を行う ・従来技術に対するコスト削減効果の評価する 	<ul style="list-style-type: none"> ・直流525kV級EB-Gを試作し、CIGRE TB 496に準拠した型式試験を実施した。その結果、十分な基本性能を有していることを確認した ・今後、従来工法に対するコスト削減効果を試算する 	○
525kV 海底ケーブル向け工場ジョイント工法（テープ巻モールド方式）の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・直流525kV級工場ジョイントの試作、性能評価を行う ・従来技術に対するコスト削減効果の評価する 	<ul style="list-style-type: none"> ・直流525kV級工場ジョイント（テープ巻モールド方式）の試作を完了した。今後、基本性能評価を行い、2017年度中に完了予定である ・今後、従来工法に対するコスト削減効果を試算する 	○
洋上風力用に最適化された工事工法と設備の開発（住友電気工業）			
主な内容	最終目標	成果	達成度
洋上風車向けケーブル引き込み工法の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ダイバーレス工法を可能とするケーブル防護材の検討と施工性を確認する ・従来技術に対するコスト削減効果の評価する 	<ul style="list-style-type: none"> ・ダイバーレス工法を可能とするケーブル防護材（CPS）を調査・選定した。また、実際のCPSを入手しその施工性を確認した結果、風車引込作業に問題はないことを確認した ・コストを試算した結果、従来工法よりコスト削減出来る見込みとなった 	○

バンドル敷設工法の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・バンドル敷設工法の敷設船艙装要領の提案、並びに技術課題を検討する ・従来技術に対するコスト削減効果を評価する 	<ul style="list-style-type: none"> ・敷設船上で海底ケーブル2~3条をバンドルし同時敷設する工法について検討し、敷設船艙装要領を提案した。また、敷設時に海底ケーブル加わる側圧が技術課題であることを示した ・今後、側圧試験を実施し、本工法適用の場合のケーブルへの影響評価を行い、結果を反映したケーブル設計仕様を完成させる ・従来工法に対するコスト削減効果を試算する 	○
防護管の自動取付工法の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・船上防護管取付工法の検討、並びに実機防護管の設計・試作を行う ・従来技術に対するコスト削減効果を評価する 	<ul style="list-style-type: none"> ・船上での高速防護管取付を可能とする船上設備について1/10モデル(3Dプリンタ模型)を作製し自動供給性などを確認した。また、実機防護管を設計・試作した ・今後、防護管の性能評価試験を行い、その結果を防護管の設計仕様および工法へ反映する ・従来工法に対するコスト削減効果を試算する 	○

◎大幅達成、○達成、△一部未達、×未達

(3) 具体的な実施状況について

①ダイナミックレイティング技術を用いた海底ケーブル最適化設計技術の開発

(a) ダイナミックレイティング (DR) システム設計

洋上 PF、陸上 PF 間を結ぶ多端子洋上直流送電システムのうち、DR に関連する構成図を図 3-5-1 に示す。各 PF 内にはケーブルの長手温度分布を計測する DTS (Distributed Temperature Sensor; 分布型温度測定器) と DTS データからケーブルの許容電流を推定するサブシステム、そのデータを電力網の制御システムへ伝達するサブシステムが配置される。その内、本事業では図 3-5-2 に示した対向する PF 間のシステムの開発を行った。これらの設計のため以下 3 項目の開発を行った。

(i) ケーブル設計

本事業で想定される発電容量 1GW、電圧 DC500kV、PF 間送電距離 200km を基に海底ケーブルを設計した。従来の日本電線工業会の規格に則りケーブル設計を行い、そこから 20%のコストダウンに必要な導体断面積を削減したケーブルの構造を検討した。その結果、図 3-5-3 の様に DR 及び②(a)の導体断面積の異なるケーブルの接続技術を確立すれば 20%コストダウンが可能である事を示した。

(ii) 温度計測系の構築

周囲の温度環境に合わせて時々刻々とケーブルの許容電流を更新するためには、ケーブルの温度の計測が必要である。ケーブルの長手方向の温度分布を計測するために、光ファイバ型の温度センサを開発した。これが図 3-5-2 の DTS に相当する。

(iii) 導体温度・許容電流推定アルゴリズム

ケーブルの許容電流は導体に接する絶縁体の許容温度以下であるよう定められる。DTS から得られた温度情報からケーブルの導体温度を推定し、許容電流を算出するアルゴリズムを作成している。ケーブルの内部及び外部の熱伝導率・熱容量などをシミュレーションにより決定した。これら熱パラメータを電流による導体内の発熱量に対する伝達関数に変換し、デジタルフィルタの一

種である FIR (Finite Impulse Response) フィルタに変換を行った。これにより電流時系列から導体の長手方向の温度時系列を算出できる。

実際に風車電流を FIR フィルタに入力し、ケーブルの導体温度の計算を行った。その結果を図 3-5-4 の黒線に示した。比較評価対象として導体温度の真値を FIR とは独立した有限要素法により計算した結果が図中の赤線である。FIR の結果と有限要素法の結果は非常によく一致し、今回開発した時系列電流の算定方法が正しい事を示している。

今後はケーブルの熱パラメータを (b) の実スケール試験により同定し、その結果を FIR に反映させ、実環境での導体温度推定を実施する予定である。

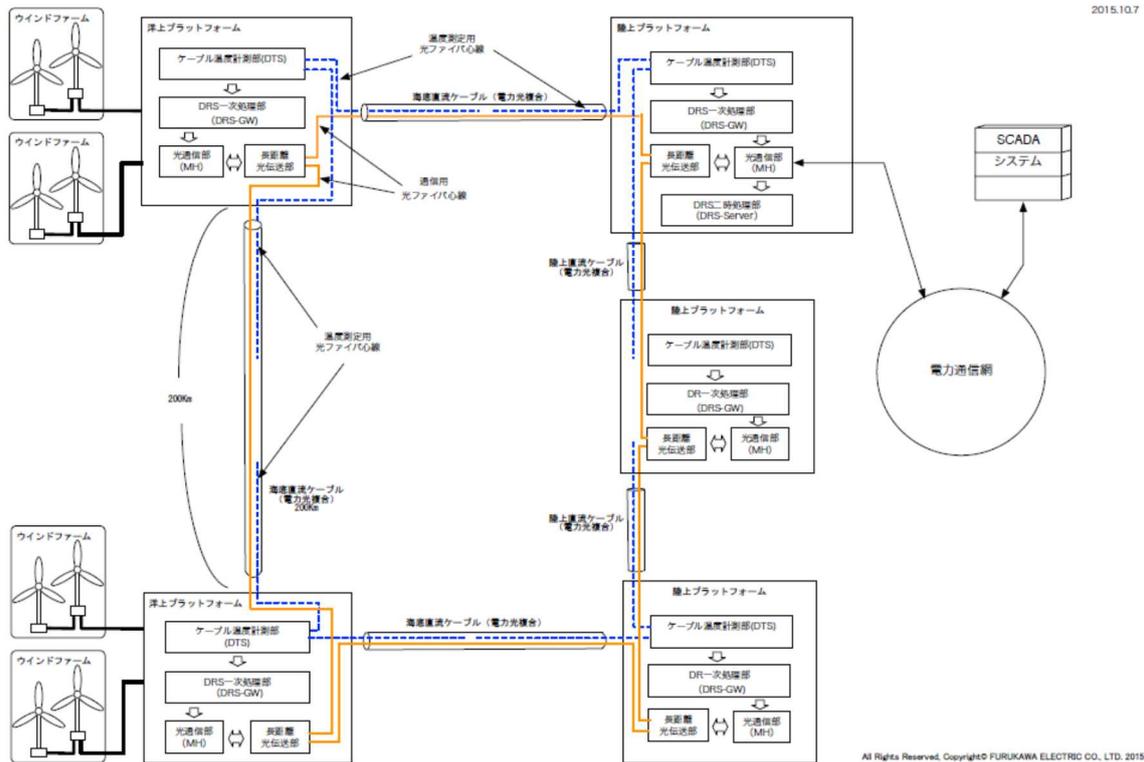


図 3-5-1 ダイナミックレイティングに関連する想定した洋上直流送電システム

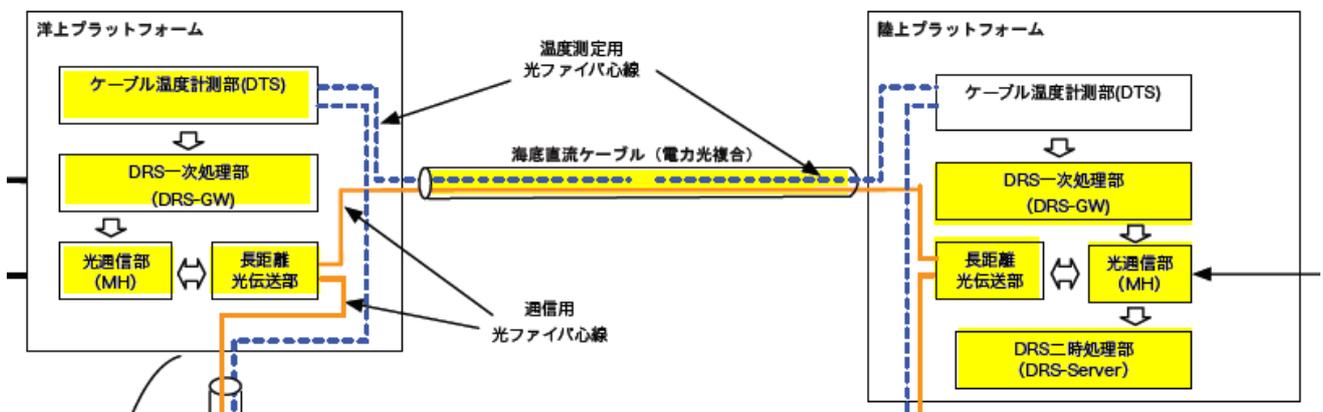


図 3-5-2 今回開発を行った PF 間のダイナミックレイティングシステム

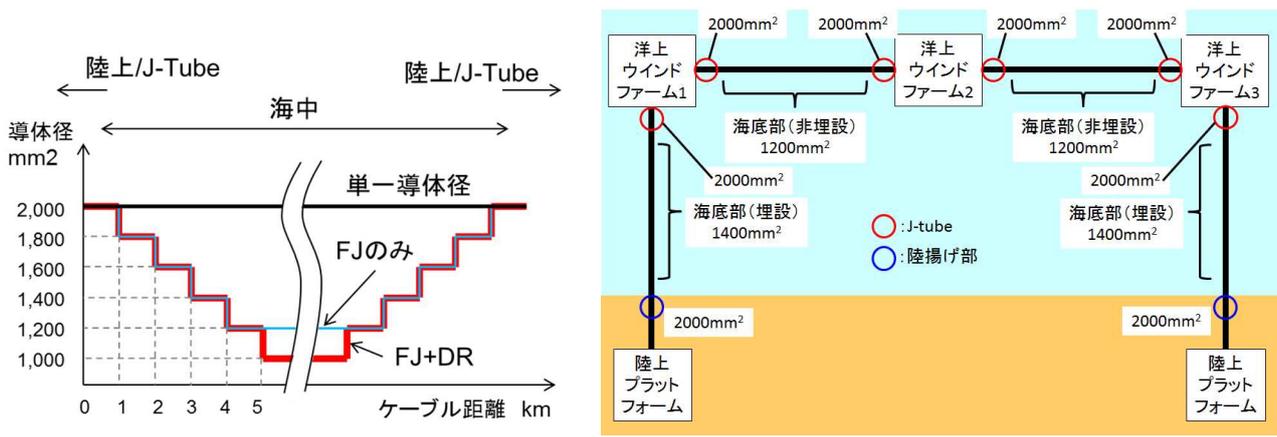


図 3-5-3 異なる導体断面積のケーブルで構成する洋上直流送電システムの一例

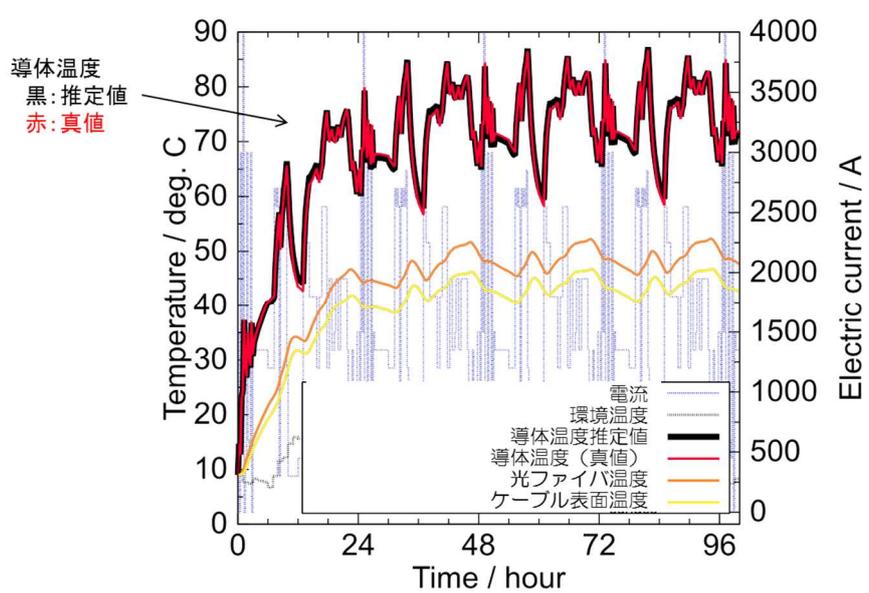
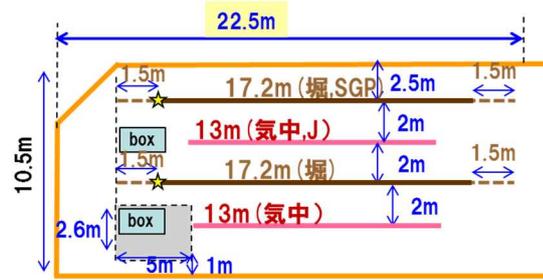
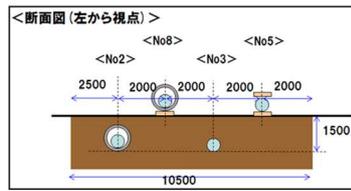


図 3-5-4 開発した導体温度推定アルゴリズムの結果の一例

(b) 実スケール試験

(a)で設計した DR システムの検証を行うため、ケーブルが布設される環境を模したフィールドを作成し、実験を開始している。フィールドの構成は図 3-5-5 の通りであり、図 3-5-6 に示した導体断面積 1000 mm^2 の DC500kV ケーブルを作成し、図 3-5-7 のようにケーブル布設工事を完了した。今後はこの系を用いて様々なパターンでの電流を流し、導体温度の推定アルゴリズムの精度を高めてゆく予定である。

<エリア内配置図>



<埋設部断面>

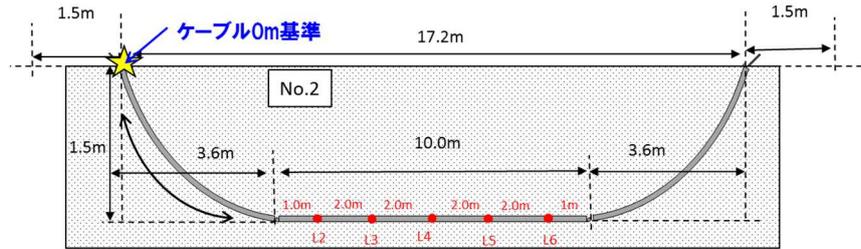


図 3-5-5 実スケールのケーブルを布設するフィールドの図面

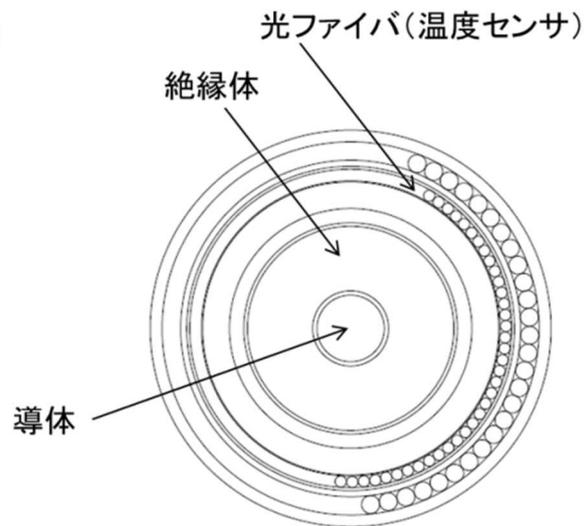


図 3-5-6 ダイナミックレイティングの検証の為に作成した DC500kV ケーブル



図 3-5-7 ケーブルを布設したフィールド

②異径ケーブル接続部の開発

(a) 異径ケーブル接続部の開発

① (i) で設計したケーブルシステムでは図 3-5-3 のように異なる導体断面積のケーブルが連なる。本事業では 500kV 級の超高圧直流ケーブルで未開発の異径導体ケーブルの接続技術を開発している。ケーブルの温度設計上、陸上部などは導体断面積 2000mm² 程度を想定しているが海中部は 1000-1200mm² 程度まで削減が可能である。しかし 2000mm² と 1000mm² といった断面積差の大きな接続を直接行う事は技術的困難が伴う割に適用頻度が限られるため、断面積を 200mm² ずつ削減して異なる導体径のケーブルを工場で接続する方法 (FJ; Factory Joint) を今回採用することとした。

(i) 異径接続要素技術開発

ケーブル接続部の構造を図 3-5-8 に示した。接続に必要な要素技術は、導体の接続のみならず絶縁を確保するための絶縁体の接続なども含まれる。

導体は溶接工法にて接続を行った。その為の溶接条件を導出し良好な施工性を確認した。異径導体単体での溶接試料を作成し引張曲げ試験を行い良好な機械強度を有することを確認した。

中心導体より外側の絶縁体やシースに至る各部材の接続についても施工条件を導出し良好な施工性を確認した。絶縁体の接続には絶縁テープ巻き加熱モールド工法を採用した。また、図 3-5-9 に示す接続部試料を作成し通電温度特性評価を実施し遜色無い結果が得られた。

(ii) 評価試験用ケーブル製造

完成した技術を用いた接続部分は最終的に長期信頼性試験に供せられる。その為に必要なケーブル (導体断面積 2000mm² 及び 1800mm² の 2 種類) を設計し製造した。長期信頼性試験の前にそれらのケーブルを異径接続し、機械試験 (引張曲げ試験)、初期電気試験も実施する。

(iii) 異径接続部長期信頼性試験

平成 29 年度に開始する異径接続部の長期信頼性試験を実施するため、試験機材の設計を完了し、調達、組立を実施している。

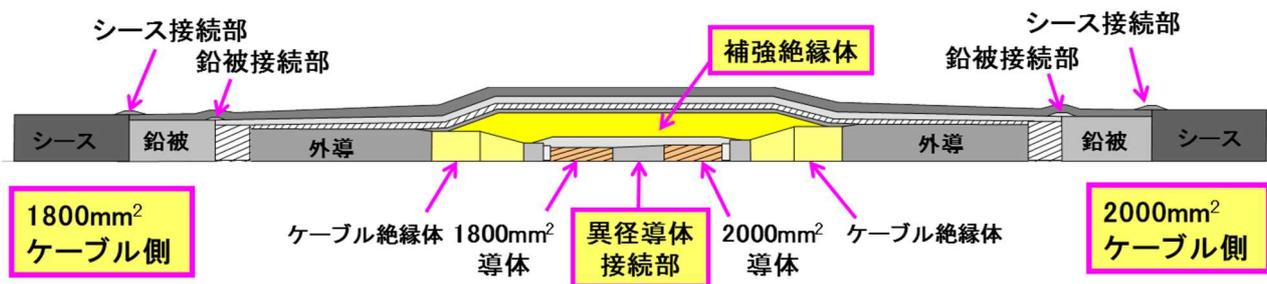


図 3-5-8 異径ケーブルの工場接続部断面図



図 3-5-9 通電温度特性評価用試料

③最適工法およびコスト削減を目指したケーブルジョイントと工法の開発

(a) 異社間分岐ジョイントの開発

複数の洋上 WF を直流多端子で接続するシステムにおいて、洋上 WF を追加増設する場合に、その増設コストを低減する方法を検討した。（ただし、本検討では、初めの洋上 WF を建設する時点から WF 増設が計画されている場合を対象とした。）洋上 PF 上において送電ケーブルを予め分岐ジョイントで接続しておき、WF 増設前には増設 WF 用接続部に絶縁栓を施しておく。WF 増設時には、この絶縁栓を取り外し、分岐用ケーブルを挿入し増設 WF と連系する。本手法により、気中終端接続箱（EB-A）を 2 つ用いて分岐するよりも小スペースでの分岐が可能となり洋上 PF の縮小化が可能である。また、WF 増設時における既設 PF 上での分岐用接続部の据付時間短縮の可能性も考えられる。さらに、WF 増設時において、既設ケーブルとは異なる製造社ケーブルを用いることを可能とすれば、マルチベンダ化に繋がり有益である。本開発では、製造社ケーブルの異なるケーブルを接続可能な異社間分岐ジョイントの開発を進めることとした。

異社間分岐ジョイントを可能とするケーブル接続技術として、ガス終端接続箱（EB-G）が挙げられる。EB-G の概略構造を図 3-5-10 に示す。直流 525kV 級ケーブル用の EB-G を試作し、その基本性能を CIGRE TB 496 に推奨されている型式試験）に供試して評価した。試験の状況を図 3-5-11 に示す。また、試験内容および結果を表 3-5-2 に示す。

(b) 直流 525kV 海底ケーブル向け工場ジョイント（テープ巻モールド方式）の開発

これまでに実線路適用を完了している北海道-本州間直流幹線向けの直流 250kV 級ケーブルでは、工場ジョイントの絶縁補強層成形技術としてテープ巻モールド（TMJ）方式を適用している。一方、過去の直流 500kV 級ケーブル開発においては、工場ジョイントの絶縁補強層成形技術として押出しモールド（EMJ）方式を適用していた。TMJ 方式では EMJ 方式に比べ、ジョイント組立時間の短縮が可能であり、海底ケーブル製造コストの低減が可能である。従い、本開発の目標である低コストな直流 525kV 級直流システム開発のためには、TMJ 方式による工場ジョイント開発が必要である。なお、これまでに、400kV 級直流ケーブル向けに TMJ 方式による工場ジョイント開発を完了しており、本技術を発展させることで 525kV 級開発が可能であると考えられる。

直流 525kV 級ケーブルと TMJ 方式による工場ジョイントの試作を完了した。試作した工場ジョイントの外観を図 3-5-12 に示す。本工場ジョイントの基本性能を今後確認予定である。

表 3-5-2 EB-G 性能評価試験

No.	試験内容	試験日数	結果
1	負極性 DC972kV・24h ヒートサイクル試験 8 時間 ON/16 時間 OFF (8 サイクル)	8 日	良
2	正極性 DC972kV・24h ヒートサイクル試験 8 時間 ON/16 時間 OFF (8 サイクル)	8 日	良
3	極性反転 DC762kV・24h ヒートサイクル試験 8 時間 ON/16 時間 OFF (8 サイクル)	8 日	良
4	正極性 DC972kV・48h ヒートサイクル試験 24 時間 ON/24 時間 OFF (3 サイクル)	6 日	良
5	直流重畳雷インパルス試験	—	良
6	直流重畳開閉インパルス試験	—	良

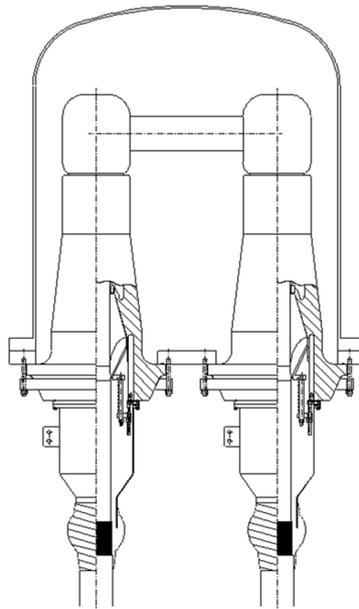


図 3-5-10 ガス終端接続箱 (EB-G) の概略図



(a) 試験回路外観



(b) EB-G 外観



(c) ケーブル外観

図 3-5-11 EB-G 評価試験状況



図 3-5-12 工場ジョイント外観

④洋上風力用に最適化された工事工法と設備の開発

(a) 洋上風車向けケーブル引き込み工法の開発

風車へ引き込み接続する風車立上ケーブルの防護工法としては、従来は鑄鉄管等をケーブル引き込み後にダイバー作業により施工する方法が採用されていた。この防護管取付をダイバーレス作業で実施可能となれば、多数の風車へのケーブル引込作業の時間短縮に繋がり低コスト化が可能となる。そこで、ダイバーレス取付作業を可能とするケーブル防護システム（CPS）について調査を実施した。調査の結果、海外メーカーにて CPS を販売しており、その主な特徴は、次のとおりである。(1) 船上において引込ケーブル端部に CPS を予め装着し、(2) ケーブルと一緒に船上から風車へ引込み、(3) CPS が風車引込部の所定の位置に固定された後にケーブル先端が CPS から分離され、(4) 以後は、ケーブルが CPS の中を通りながら風車上部まで引き上げられる。調査した海外メーカーの中から欧州での施工実績を多数有する 3 社を選定し、実際に CPS を購入（またはレンタル）し、その施工作业性確認試験を実施し、風車引込作業に問題はないことを確認した。施工作业性確認試験状況の一例を図 3-5-13 に示す。試験は CPS 立上げ速度約 4m/分、CPS 切離し張力約 7t で実施し、問題なく立上げ可能であることを確認した。



図 3-5-13 風車へのケーブル引込作業施工性確認試験状況

(b) バンドル敷設工法の開発

長距離での海底ケーブル敷設では、送電ケーブルを1条毎に敷設する工法に比べ、2～3条を同時に敷設する工法の方が敷設コストを低減することができる。2～3条を同時に敷設する工法としては、バンドルマシンを使用し複数条をバンドで固定することにより1回の敷設作業で複数条を同時敷設する工法と、相間保持装置を使用し1定の相間を保持しながら1回の敷設作業で2～3条を同時敷設する工法が考えられる。両者のうち、2～3条バンドル敷設工法は、ケーブルの後埋設処理が1回で可能となりコスト面では有利と考えられる。次に、2～3条バンドル敷設工法における技術的な課題を検討した。1条毎にケーブルを敷設する場合に比べ、2～3条バンドル敷設工法ではケーブルに高い側圧が加わる可能性が挙げられる。今後、高側圧を考慮した本工法の適用可能性について検討を実施する。

(c) 防護管の自動取付工法の開発

岩盤部に敷設する海底ケーブルを防御する方法として、半割の鋳鉄防護管を取付ける方法がある。この防護管のケーブルへの取付方法として、従来は潜水士により取付ける工法を採用していたが、最近では船上で防護管をケーブルに装着し、そのまま海底に敷設する工法が実用化されている（船上防護管取付工法）。本開発では、船上での防護管取付方法を改良し、より高速でケーブル敷設を可能とする工法の検討を実施した。3Dプリンタ模型による1/10モデルを作製し、船上のフリーローラー上で自動的に防護管を供給する方法と連続的に嵌合する方法を検討した。図3-5-14に作製した1/10モデルの外観を示す。

更に、実規模大の防護管について強度検討を実施し、防護管の設計を実施した。また、実規模防護管の試作を実施した。今後、本工法に適用する際の機械強度について検討を進める。



図3-5-14 高速船上防護管取付工法パスラインの1/10モデル

(4) 目標達成に向けた今後の課題、課題解決の見通し

事業終了までに達成すべき最終目標と目標達成に向けた今後の課題、課題解決に向けた見通しを以下に示す。

表 3-5-3 課題と課題解決の見通し

ダイナミックレイティング技術を用いた海底ケーブル最適化設計技術の開発			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
ダイナミックレイティングアルゴリズム開発と検証	ケーブルコスト削減 20%を実験的に示す (異径ケーブル接続を含む)	・気温など周囲環境に依存した技術となるため年間を通した検証が必要である ・周囲環境の異なる状態に対して、ケーブル温度の推定を行い、その誤差が大きかった場合、根本的なパラメータの変更である可能性があり、その要否を見極める	シミュレーション上は実現できる見通しである。また、左記の根本的なパラメータの変更が不要であれば予定より早く結論付けられると考えている
異径ケーブル接続部の開発			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
導体断面積の異なるケーブルの接続技術の確立	接続部の認証試験を終了し、長期的な信頼性を確認する	長期課通電試験を継続し、不具合(課通電時の地絡、接続部での温度、電圧上昇など)がないことを検証し、残存寿命を評価し、解体試験により不具合材料がないか確認する	本年度に実施する初期試験に不具合が無ければ、これまでの経験上問題ないと考えている

2.2.3 洋上 PF 新形式基礎の基盤技術開発 (大林組)

(1) 研究開発の目的

洋上風力発電の導入が盛んな欧州では、洋上 PF の基礎形式はモノパイルやジャケット、重力式が一般的であるが、我が国特有の急峻な海底地形、地質および地震や海流などの条件に適し、かつ、従来よりも施工が容易な基礎を開発することで工期短縮とコスト削減に寄与することが出来る。

本開発では、我が国の海象地象に適した洋上 PF 向けの新たな基礎形式を開発することを目的として、我が国の海底地質、地形などの自然環境を調査する。調査結果を基に、最適となる基礎形式の検討、および模型を用いた性能評価を行う。得られた結果をもとに、新基礎形式の設計、施工法の検討を行い、国内導入に有効となる基礎形式に要求される仕様を策定する。

(2) 成果の達成状況

(要約)

日本沿岸域での地質条件および地震・波浪条件などから、水平抵抗性に優れ、施工の容易なサクシオン基礎が、モノパイルなどの従来基礎形式に比べコストダウンできる可能性が大きいことがわかった。このサクシオン基礎の支持力性能を評価するために、遠心力模型水平載荷実験を行った結果、地震や波浪など載荷速度が速い荷重が作用した場合には、スカート内に負圧が発生することにより静的な水平抵抗の 2~5 割増の抵抗力を発揮することが明らかになった。

さらにこの模型実験の再現解析を実施し、解析手法の妥当性を検証した。また想定適用地域において、サクシオン基礎の概略設計を実施し、既往基礎とのコスト比較のための基礎資料を作成した。

以下に中間目標、成果と達成度を示す。なお、平成 28 年度に終了予定のテーマについては、目標を最終目標として記載した。

表 3-6-1 開発成果と達成度

海外事例調査と国内海域の特性調査を踏まえた新基礎形式の検討			
主な内容	最終目標	成果	達成度
海外事例および日本の海象・地象条件調査と各種基礎形式の適用条件の比較検討	我が国の海底地質、地形などの自然環境に最適でかつコストダウン可能な基礎形式を調査する	日本沿岸域では、砂地盤が主体であること、地震による水平荷重が卓越することより、サクシヨン基礎がモノパイルなどの従来基礎形式に比べコストダウンの可能性があることが分かった	◎
新形式基礎の性能評価			
主な内容	中間目標	成果	達成度
遠心力模型実験によるサクシヨン基礎の水平載荷実験	サクシヨン基礎の水平支持性能において、外力の載荷速度に依存する受働サクシヨン効果の影響を把握する	実験の結果、地震や波浪など載荷速度が速い荷重が作用した場合に、スカート内にサクシヨンが発生することにより静的な水平抵抗の 2~5 割増の抵抗力を発揮することが分かった	◎
新形式基礎の設計・施工法の検討および適用事例の検討			
主な内容	中間目標	成果	達成度
土/水連成 3 次元弾塑性 FEM 解析による模型実験のシミュレーション	模型実験の再現解析を実施することにより、解析手法の妥当性を評価し、設計手法を確立する	解析によって模型実験をシミュレーションしたところ、入力定数を適切に設定することで、実験結果を再現でき、解析手法の妥当性を検証できた	○
試設計および既往基礎形式との概略コスト比較	サクシヨン基礎および既往基礎の概略設計を実施し、コスト比較を行う	想定適用地域において、サクシヨン基礎の概略設計を実施し、概略コスト比較のための基礎資料を作成した	○

◎大幅達成、○達成、△一部未達、×未達

(3) 具体的な実施状況について

①海外事例調査と国内海域の特性調査を踏まえた新基礎形式の検討

海外における洋上 PF 事例の調査を行い、海外で実績のある基礎形式（モノパイル、重力式、ジャケット式、サクシヨン基礎）について、その適用条件について整理・検討した。その結果、モノパイルは 2009 年以前および設置水深が浅い場合に設置事例が多いこと、ジャケットは 2010 年代に主流となっており、水深・重量とも適用範囲が広いこと、新形式基礎であるサクシヨン基礎は、近年設置件数が見られることがあきらかになった。

日本沿岸域の海象条件および地象条件について調査を行った結果、日本周辺海域の底質分布は、どの水深においても砂質地盤が 53~77%と最も多くついで泥質、岩質の順となっていること、日本周辺では 140~300gal の地震加速度を加味した設計をしなければならず、暴風時の波力に加え地震時慣性力に伴う水平荷重が卓越するという特徴があることがわかった。

表 3-6-2 に、各種基礎形式の構造、施工法、水平力に対する抵抗性の比較を示す。新形式のサクシヨン基礎は、水平力に対して受働サクシヨン効果を見込むことで、基礎寸法を小さくでき基礎架台に関わる物量を減らせること、また海上作業を短くできるという施工上のメリットなどから、日本周辺海域で適用する上で従来の基礎形式に比べコストダウンとなる可能性が大きいことがわかった。

表 3-6-2 洋上 PF 基礎形式の特徴および適用性の比較

形式	現地施工性	外力（主に水平）抵抗性	適用水深
モノパイ ル	打設用の大型ハンマが必要となり、振動・騒音が発生	水平荷重に対して、杭の剛性と地盤反力によって抵抗。大きな水平荷重に対しては、杭径・杭長を大きくすることで対応 杭の製作・運搬・打設上の限界あり	20(30)m 以浅
重力式	海底地盤の整地・マウンドが必要	水平荷重に対して基礎底面の摩擦によって抵抗。大きな水平荷重に対して、底面積の拡大、もしくは、重量増加により対応可能 基礎の重量によって現地までの運搬方法が変化	20(30)m 以浅
ジャケッ ト(杭)	構造が複雑であり 施工期間が比較的 長い	ジャケットから杭に荷重が伝わり、杭の押込み・引抜支持力と水平地盤反力により抵抗。大きな荷重に対しては杭を太く、長くすることで対応	10(20)m 以深
ジャケッ ト (サクシ ョン 基礎)	海底整地が不要で あり、水圧差を利用 して貫入させる ので無振動無騒音	架台からスカートに荷重が伝わり、スカート根入れ部および周面の地盤反力で抵抗。特に引抜が作用した場合、受働サクシジョン効果が発生し、大きな引抜抵抗を見込むことが可能 この受働サクシジョン効果は、ある一定の荷重・地盤条件を満たす必要があり、日本で主体となる砂地盤において、その効果は検証必要	20(30)m 以深

②新形式基礎の性能評価

サクシジョン基礎の支持力性能を評価するために、遠心力模型水平載荷実験を行った。図 3-6-1、図 3-6-2 に用いた遠心力模型実験装置および実験模型を示す。実験のパラメータはスカートの数（単独型、分離型）と載荷速度（ $v=0.1, 1.0, 10\text{mm/sec}$ ）である。図 3-6-3 に載荷速度と降伏モーメントおよびスカート内のサクシジョン圧の関係を示す。載荷速度が速いほどスカート内に大きなサクシジョンが発生し、水平抵抗の大きさを示す降伏モーメントは静的な場合より 2~5 割増加した。またサクシジョンの影響による抵抗モーメント増加は一体型より分離型の方が顕著であった。

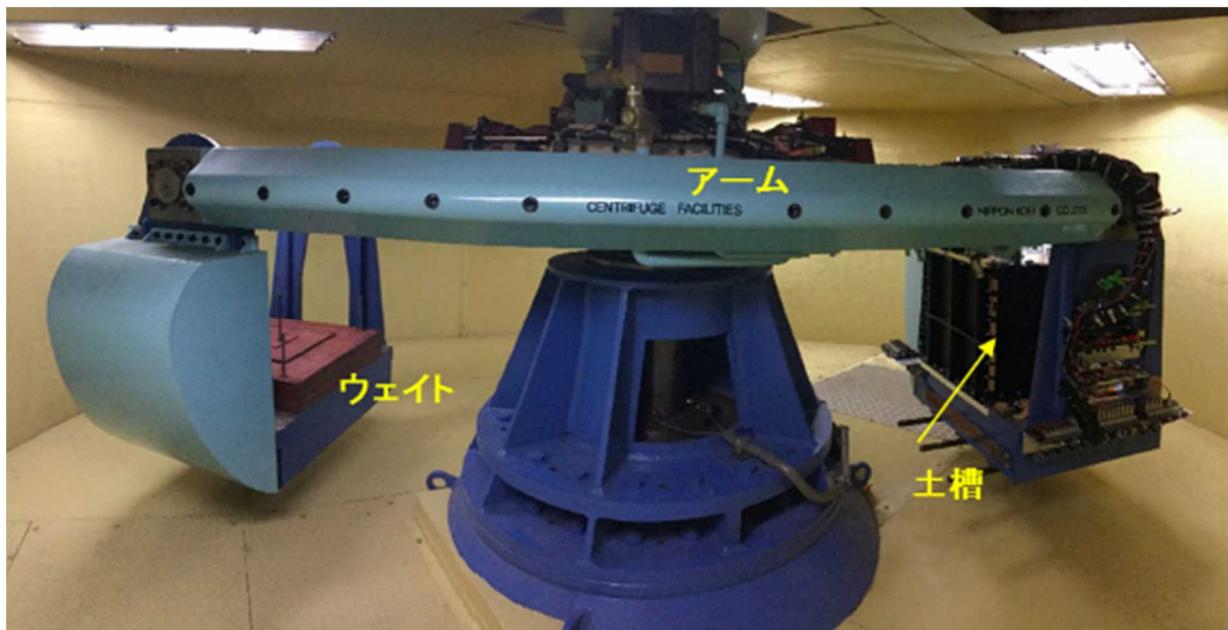


図 3-6-1 遠心力模型実験装置

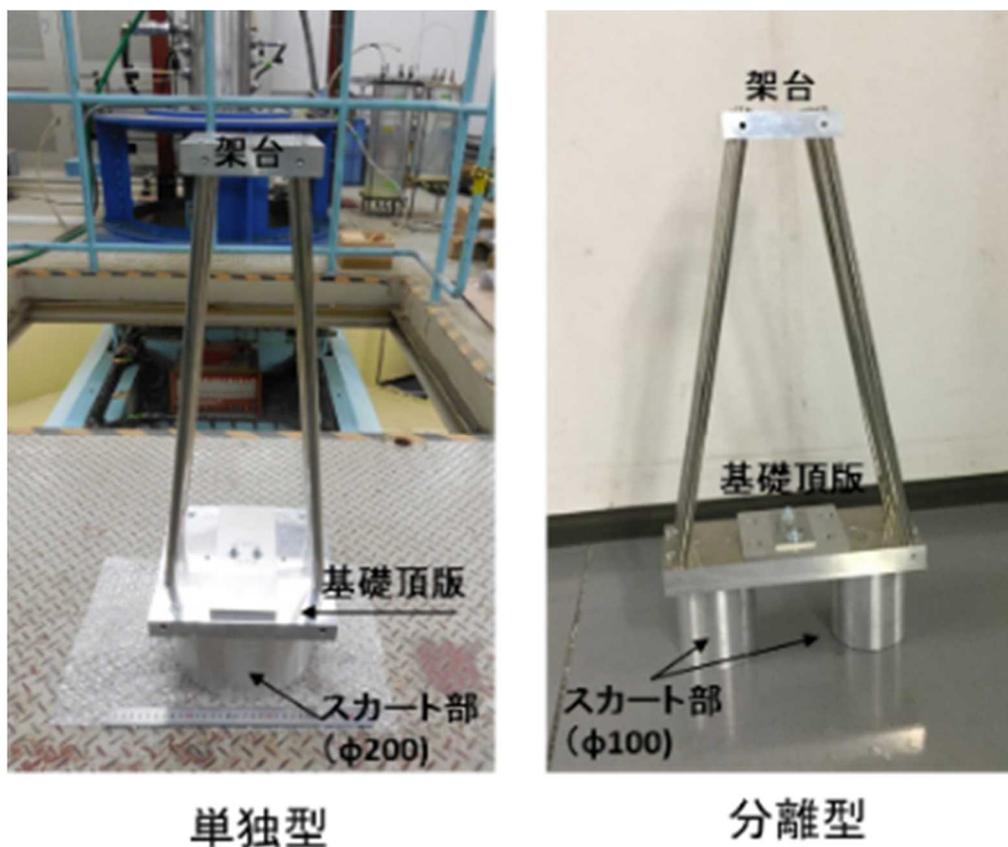


図 3-6-2 実験模型

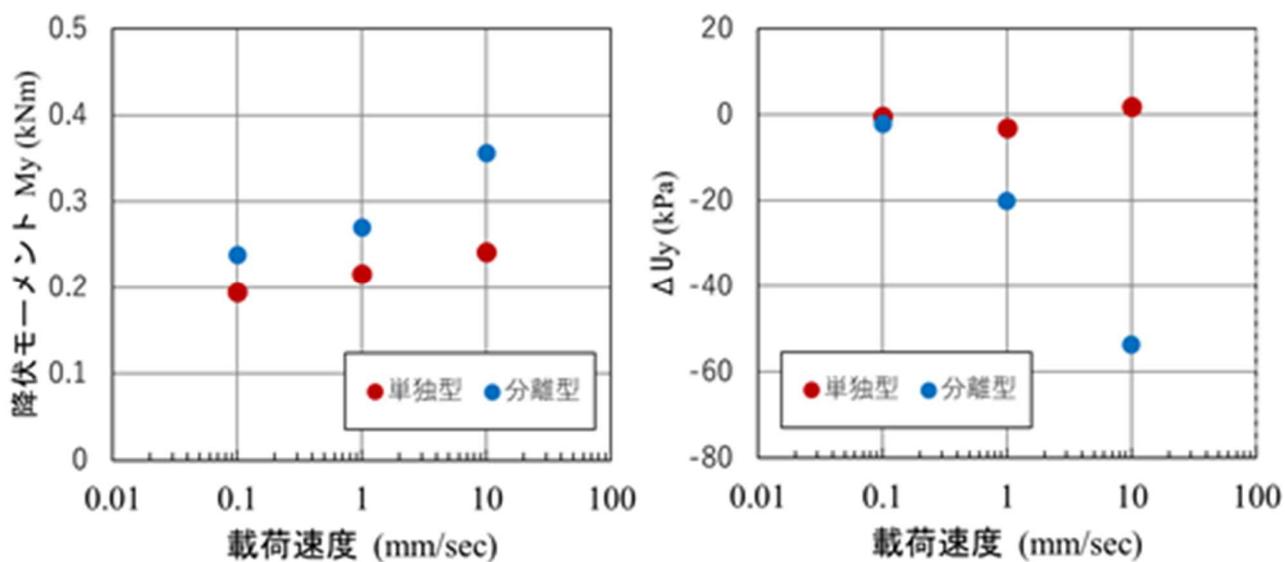


図 3-6-3 载荷速度-降伏モーメント、サクシヨン圧

③新形式基礎の設計・施工法の検討および適用事例の検討

土/水連成 3次元弾塑性 FEM 解析（解析コード：PLAXIS 3D）を用いて、模型実験のシミュレーション解析を実施した。図 3-6-4 に実験結果と解析結果の比較を示し、図 3-6-5 に変形図およびサクシヨン圧コンターを示す。解析結果はおおむね実験結果とよい対応を示しており、解析手法の妥当性を検証できた。

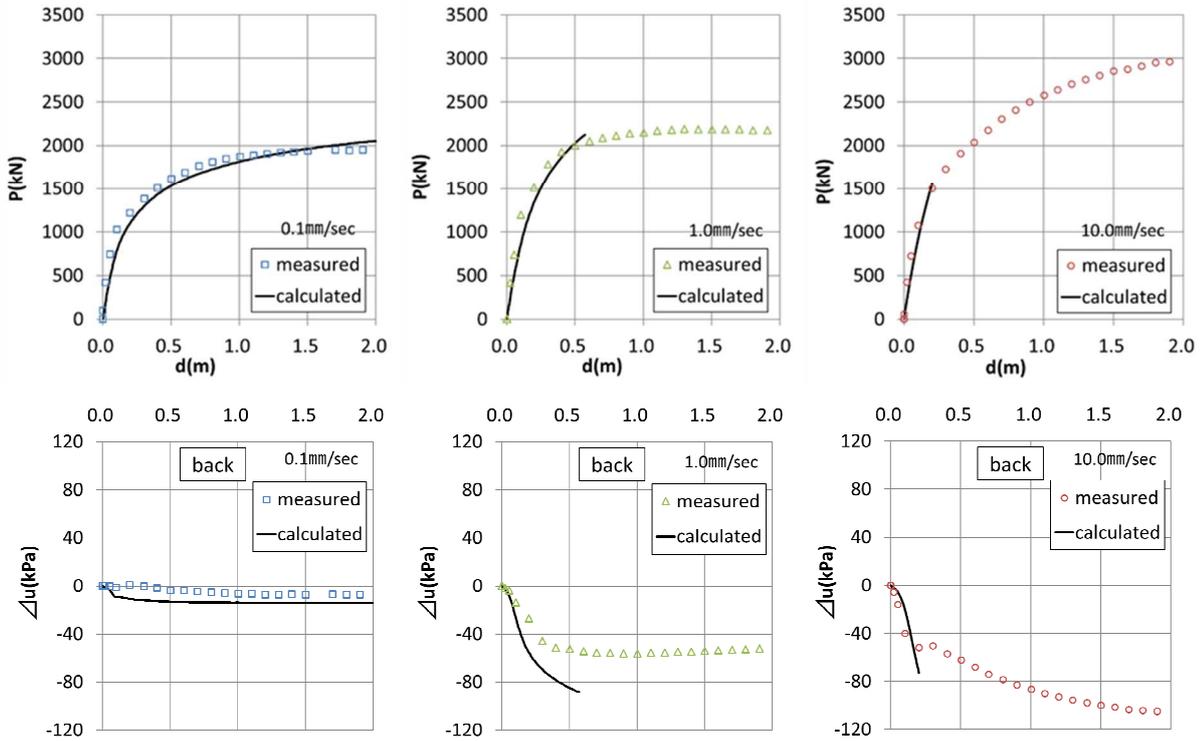


図 3-6-4 実験結果と解析結果の比較

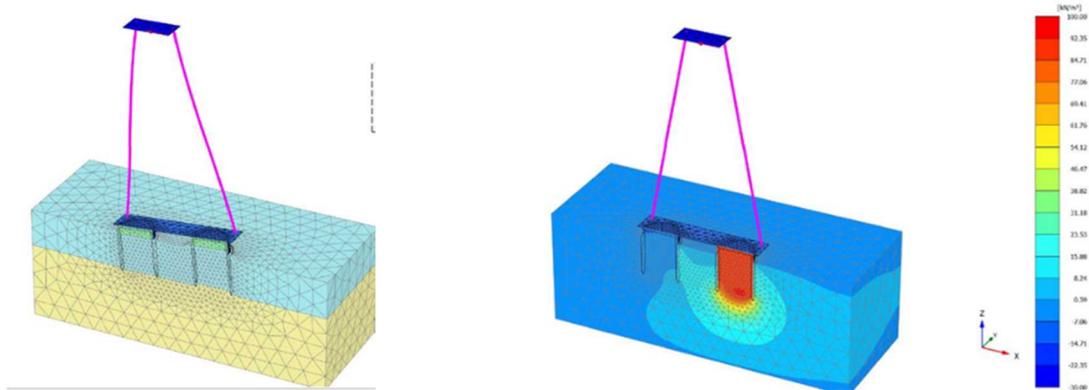


図 3-6-5 変形図およびサクシヨン圧コンター

図 3-6-6 および表 3-6-3 に想定適用地域におけるサクシヨン基礎の概略設計の結果と設計条件を示す。これらの結果をもとに今後既往基礎とのコスト比較を実施する。

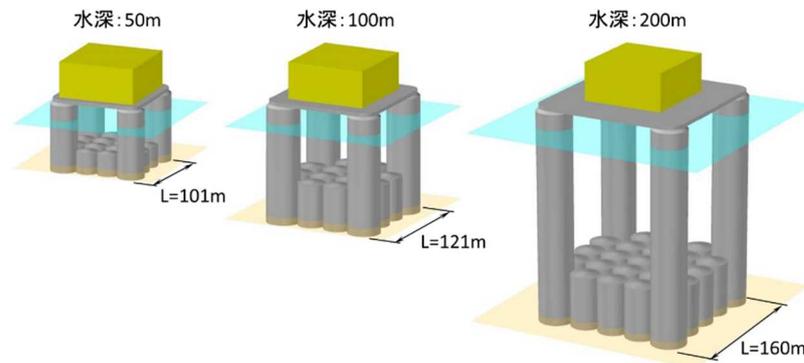


図 3-6-6 概略設計結果

表 3-6-3 設計条件

PF 条件 (直流)	重量	24,000ton
	容積	W85m×D85m×H40m
供用期間		50～100年
地盤条件		砂質土 (φ=35°)
外力条件	地震	K _r =0.2 (L1)、0.4 (L2)
	波浪	H _{max} =23m、T _{max} =14sec
	風	V=50m/sec

(4) 目標達成に向けた今後の課題、課題解決の見通し

事業終了までに達成すべき最終目標と目標達成に向けた今後の課題、課題解決に向けた見通しを以下に示す。

表 3-6-4 課題と課題解決の見通し

新形式基礎の性能評価			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
遠心力模型実験による繰返し力に対するサクシオン基礎の性能評価	繰返し波浪や地震時の液状化の影響、それらが受働サクシオンに及ぼす影響を把握して実現に向けた詳細な設計法を確立する	限られた実験ケースで、目標とする繰返し力の影響把握を確実にすること	想定地域における波浪条件、地震条件、地盤条件を調査し、適切な実験条件を設定することで、目標達成は可能と見込まれる
新形式基礎の設計・施工法の検討および適用事例の検討			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
サクシオン基礎の施工法の検討	基礎構造の構築、現地運搬、海中設置から撤去までの施工プロセスを詳細に検討し、施工法を確立する	<ul style="list-style-type: none"> ・コストミニマムとなる構造・材料を検討すること ・施工船、基地港、現地海域気象条件など施工条件を詳細に設定すること 	いくつか不確実な条件はあるものの、現段階でのベストな施工法を選択できると思われ、目標の達成は可能と見込まれる
想定適用事例における既往基礎形式とサクシオン基礎の詳細コスト比較	既往基礎形式と比較して、コスト削減割合20%となる新形式基礎の仕様を策定する	<ul style="list-style-type: none"> ・既往基礎の設計法および施工法と同レベルの詳細な検討を実施してコスト比較を行うこと ・削減割合目標に達しない場合に、基礎の軽量化などのコストダウン策の検討を行うこと 	<ul style="list-style-type: none"> ・上記2つの課題がクリアできれば既往基礎と同レベルの比較検討は可能と見込まれる ・コストダウン策については設計施工の両面から具体的なアイデアを抽出し、仕様策定を行う

2.2.4 洋上 PF 小型化の検討（大阪工業大学、東京電機大学、東芝、日立製作所）

（1）研究開発の目的

本開発では、次世代の技術として洋上設備の低コスト化への貢献が期待できる、高周波変圧器を用いた自励式変換モジュールの小型軽量化の基盤技術開発、洋上風力発電の直列接続方式の開発などを行う。

具体的には、中小規模の洋上 WF を従来の並列接続して洋上 PF で集電する方式ではなく、洋上風車を一筆書きに直列に接続して集電することで洋上 PF が不要となる洋上風車の直列接続方式の開発研究を行う。また、従来の変圧器と比較して、大幅に体積と重量が削減可能な高周波変圧器の開発、及びそれを電力変換設備に組み込み、制御方式や冷却系の小型最適化を含む、電力変換設備の小型化に向けた技術開発を行う。併せて装置全体のリアルタイムシミュレータモデルを開発し、直流システムへ本変換設備を適用した場合の評価を行う。最後に、直流系統へ接続するガス絶縁変圧器を洋上設備へ適用することによる、事故発生時の絶縁油漏えい事故対策設備の簡略化による洋上 PF 小型化の可能性を考慮し、従来の油絶縁変圧器とガス絶縁変圧器に対して電界解析を実施し、適用可能性について評価する。

（2）成果の達成状況

（要約）

（洋上風車の直列接続方式の開発）

国内外の文献調査より直列接続方式の適用により洋上 PF が不要となることを確認した。また、直列接続方式のシミュレーション結果等を基に 2 台の永久磁石発電機よりなる模擬試験装置を開発し、種々な実験を実施した。その結果、本方式の有用性を確認できた。

（Solid State Transformer 技術を応用した HVDC 変換設備の基礎技術開発）

高周波 (1~3kHz) 変圧器と高周波発生用変換器を含めた装置の実験を行い、高周波動作確認、コア損失の測定により 1/10 小型化が可能なデータを取得。FPGA 制御系導入の効果をシミュレーションで確認しキャパシタ・リアクトルの小型化の可能性を高めた。小型化に伴う温度上昇抑制のため冷却系の熱流解析の結果、最適冷却方式の選定で可能であると確認した。リアルタイムシミュレータモデルを構築し、高周波運転時の応答再現を可能とした。

（高周波変圧器の開発）

高周波変圧器の漏れ磁束を低減する 1 層毎交互巻を検討し、5kVA、500kVA 試作器を用いた実験と解析で巻線損失の低減効果 (500kVA 試作器で損失約 30%低減) を実証し、実規模の 500kVA 試作器にて製作可能なことを示した。シミュレーションにより、提案する 1 層毎交互巻高周波変圧器を搭載した DC-DC 変換器の動作を確認した。

（ガス絶縁変圧器の洋上変電所への適用検討）

現行の直流送電システム用油入変圧器 (OIT) の絶縁構成でも、変圧器に印加される電圧が交流のみであればガス化できると推測される。直流電圧が印加される場合には、絶縁設計の観点からガス絶縁変圧器 (GIT) の新規開発が必要となる。また変換器用変圧器に GIT を適用する場合、OIT に対して寸法・重量・コストの増加が懸念されることが明らかになった。これらをふまえ、環境面などを含め、多方面から GIT の適用によるメリットを評価する必要がある。

以下に中間目標、成果と達成度を示す。なお、平成 28 年度に終了予定のテーマについては、目標を最終目標として記載した。

表 3-7-1 開発成果と達成度

洋上風車の直列接続方式の開発（東京電機大学）			
主な内容	中間目標	成果	達成度
風力発電の集電システムの国内外の動向調査	洋上風力発電の集電システムの国内外の適用事例を調査し、風力発電の直列接続方式の適用による有効性を確認する	特許・実用新案、論文等について文献調査を実施し、洋上 PF の不要となる直列接続方式が並列接続方式と共に有望視されていることを確認した	◎
風力発電の直列接続方式の実現可能性の検討	風力発電の直列接続の簡易的なモデルを用いてシミュレーションを行い、本方式を実現可能な方法を検討する	<ul style="list-style-type: none"> ・風車（同期発電機、5MW）を 50 台直列接続した洋上 WF のシミュレーションモデルを構築し、システムの基本特性を検討するとともに、他励式サイリスタインバータ-HVDC システム全体の基本的な動作特性を検討した ・簡易モデルを用いたシミュレーションにより本方式が実現可能であることを確認した 	○
永久磁石式同期発電機を用いた直列接続風力発電模擬試験装置の開発と模擬実験の実施	<ul style="list-style-type: none"> ・風力発電機を模擬した直列接続方式の試験装置を開発する ・種々の実験を実施し、装置各部の電圧電流波形並びに入出力特性などを計測して本方式の有用性を検証する 	<ul style="list-style-type: none"> ・2 台の風力発電機を模擬した直列接続方式の試験装置（永久磁石式、装置出力 4kW、3 相、200V、50Hz）を開発した ・本装置を用いて、系統連系運転並びに単独負荷運転それぞれの場合に対する実験を実施し、本研究の直列接続システムが実用可能であることを明らかにした 	○
Solid State Transformer 技術を応用した HVDC 変換設備の基礎技術開発（大阪工業大学）			
主な内容	中間目標	成果	達成度
高周波変圧器の小型軽量化の指針取得	高周波変圧器による従来型変圧器からの大幅な小型化を実現する	高周波での安定運転を確認、制御性能向上で変圧器・リアクトル・キャパシタを小型化可能なことを検証した	○
リアルタイムシミュレータモデル構築	系統相互作用を検証できるモデルを構築する	1kHz でのゲート信号発生を行い、外付け変換器での正常動作を検証した	○
冷却系の最適化による小型軽量化	小型化による温度上昇を抑制する冷却系の設計手法を確立する	基本実験と逆解析により、熱流解析による最適冷却系の選定可能なことを確認した	○
高周波変圧器の開発（日立製作所）			
主な内容	最終目標	成果	達成度
高周波変圧器の仕様検討、および試作・評価	高周波変圧器の小規模試作を通じて、集電昇圧用変換器の小型化に関する設計・製造の課題を抽出する	<ul style="list-style-type: none"> ・高周波変圧器の漏れ磁束を低減する 1 層毎交互巻を検討し、5kVA、500kVA 試作器を用いた実験と解析で巻線損失の低減効果（500kVA 試作器で損失約 30%低減）を実証した。また、実規模の 500kVA 試作器にて製作可能なことを示した ・シミュレーションにより、提案する 1 層毎交互巻高周波変圧器を搭載した DC-DC 変換器の動作を確認した 	○

ガス絶縁変圧器の洋上変電所への適用検討（東芝）			
主な内容	最終目標	成果	達成度
電界解析による検討	変換用変圧器のガス絶縁化の基礎検討を行う	<ul style="list-style-type: none"> 基本仕様に基づく概略寸法・重量を評価するとともに、電界解析を実施した この結果をもとに、ガス絶縁変圧器（GIT）を洋上変電所に適用する場合の仕様条件と課題を明確にした 	○

◎大幅達成、○達成、△一部未達、×未達

(3) 具体的な実施状況について

①洋上風車の直列接続方式の開発

<検討過程>

現在適用されている風力発電の集電システムの国内外の動向調査を実施することにより、現行システムの課題の抽出を行い、風力発電の直列接続方式適用による優位性並びに課題について検討を行なった。また、風力発電システムの直列接続の検討に必要な基本モデルを開発し、これを用いて風速等種々な条件に対するシミュレーション等を行い、本方式の実現可能な方法を検討した。さらに、直列接続風力発電システムの有用性を検証するため、風力発電機として、永久磁石式同期発電機を対象に、2台の風力タービン模擬装置／発電機よりなる直列接続方式の模擬試験装置を開発し、種々な条件下における模擬実験を実施した。

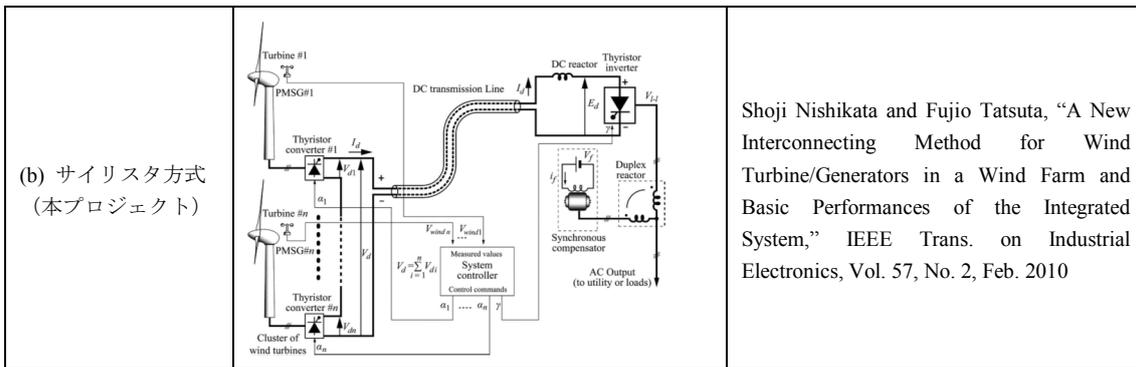
<成果の詳細>

(a) 風力発電の集電システムの国内外の動向調査

これまでに発表された、特許、実用新案、国内外で発表された論文等について文献調査を実施した。その結果、現在の風力発電の集電システムは並列接続方式が主流であるが、今後は、洋上プラットフォームの不要な、直列接続方式（表 3-7-2 に代表例を示す）も有望視されていることが明らかとなった。同表（a）の方式は、PWM 制御（電流形）を採用しているが、自己消弧型素子を使用するため大容量化が困難と思われる。同表（b）の方式は本プロジェクトのサイリスタインバータを用いた方式で、1) 構成が簡単である、2) サイリスタを使用しているため信頼性が高く、かつ大容量化が容易である、3) 交流出力側フィルタが不要である などの長所を有する。

表 3-7-2 IEEE Transaction に発表された直列接続方式風力発電システムの例

	システム構成	出典
(a) PWM-CSC 方式		<p>Miteshkumar Popat, Bin Wu* and Navid R. Zargari, "A Novel Decoupled Interconnecting Method for Current-source Converter-Based Offshore Wind Farms," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 27, No. 10, Oct. 2012</p>



(b) 風力発電の直列接続方式の実現可能性の検討

本方式のシステムは、風力発電機と直流回路との間の絶縁を確保するため、発電機出力端と整流回路入力端との間に変圧器を挿入する。そこで、例えば 4MW クラスの風車を想定し、一般の電力用変圧器を用いるとすると、最大 4MW×25 基（単極方式の場合）が実現可能と考えられる。

また、本方式のシステムでは風力発電機として同期発電機（Type D）を適用できるので、直列接続システムの検討に必要な基本モデルとして、ダイオード整流回路の利用可能な自励式同期発電機を採用する場合のモデルを開発し、特性に及ぼすダンパ巻線の影響を検討した。その結果、同巻線の設置により、システムの動作領域が拡大することが判明した。

一方、永久磁石同期発電機を採用した風力発電システムのシミュレーションモデルを構築し、表 3-7-3 に示す 5MW×50 基の直列接続ウィンドファームを対象に風速などの諸条件が異なる場合に対するシステム出力、システム各部の電圧・電流の瞬時波形、サイリスタ整流回路の制御角、重なり角、発電機出力電流、DC リンクの出力電圧瞬時値特性などを明らかにした。

さらに、実際の風車を想定し、慣性モーメントの異なる場合に対する実験装置の調整法を開発した。

以上の成果を基に、表 3-7-3 の洋上 WF を想定した、他励式サイリスタインバータ-HVDC システム全体の基本的な動作特性を検討して、直列接続風力発電システムの実現は基本的に可能であることを明らかにした。

表 3-7-3 ウィンドファームの主要諸元

システム出力	
直列接続風車数	50
システム出力	250MW (=5MW×50)
直流電圧、電流（定格）	500kV, 500A
風力発電機（PMSG）定格	
定格出力	5MVA
定格電圧	3kV
定格周波数	50Hz
回転速度	100min ⁻¹
極数	60
増速ギア比	7.4
発電機出力変圧器昇圧比	2.47
風車定格	

定格出力	5MW
定格風速	11.5m/s
Cut-in 風速	4m/s
Cut-out 風速	25m/s
ブレード半径	65m
出力係数最大値 C_{pmax}	0.4044
周速比最適値 λ_{op} (C_{pmax} を得る λ)	8
空気密度	1.225kg/m ³

(c) 永久磁石式同期発電機を用いた直列接続風力発電模擬試験装置の開発と模擬実験の実施

次いで、風力発電機として永久磁石式同期発電機を対象に、2台の風力タービン模擬装置／発電機よりなる直列接続方式の模擬試験装置（図 3-7-1、装置出力 4kW、3相、200V、50Hz）を開発した。また、本模擬試験装置を用いて、系統連系運転並びに単独負荷運転それぞれの場合に対する実験を実施した。表 3-7-4 に実験条件を示す。

まず、模擬装置出力を系統に接続して表に示す条件で動作しているときに、システムが安定に動作することを確認するとともに、システムに特別なフィルタを設置しなくても図 3-7-1 に示すように歪み率 3.7% の出力電流波形が得られることが判明した。

次いで、システム出力にインピーダンス一定の負荷装置が接続されている場合について、表に示す条件で動作しているときに、歪み率 1.3% 以下の出力波形を達成できることが判明した。

なお、現時点では系統連系運転並びに単独負荷運転の双方について力率 1 の負荷条件で本方式は有効であることが確認された。

以上より、永久磁石式同期発電機並びにインバータの電圧・電流の波形歪みは図 3-7-1 に例示するように大きいものの、単独負荷運転並びに系統連系運転のいずれの場合でも表 3-7-4 に示すように装置出力端から低歪みの出力電流が得られており、直列接続システムは基本的に有用であることを明らかにした。

表 3-7-4 実験条件

case	風力発電機	出力 [kW]	回転速度 [min ⁻¹]	周波数 [Hz]	風速 [%]	整流器出力電圧 [V]	直流電圧 [V]	直流電流 [A]	システム出力 [kW]	基本波力率 [%]	出力電流 THD [%]	備考
系統連系運転	1号機	2.15	1500	100	100	260	390	7.7	2.70	100	3.7	風力発電機2の出力は風力発電機1の約半分を想定し、風速および回転速度は $0.5^{1/3} \times 100 = 79.4\%$ とした。
	2号機	1.09	1191	79.4	79.4	130						
単独負荷運転 1	1号機	2.21	1500	100	100	260	390	7.8	3.07	100	1.3	風力発電機2の運転条件は上欄と同様。システム出力が直流電力をやや上回っているのは、調相機が有効電力を補っているため。
	2号機	1.16	1191	79.4	79.4	130						
単独負荷運転 2	1号機	2.24	1500	100	100	260	520	7.8	3.98	100	1.1	
	2号機	2.24	1500	100	100	260						

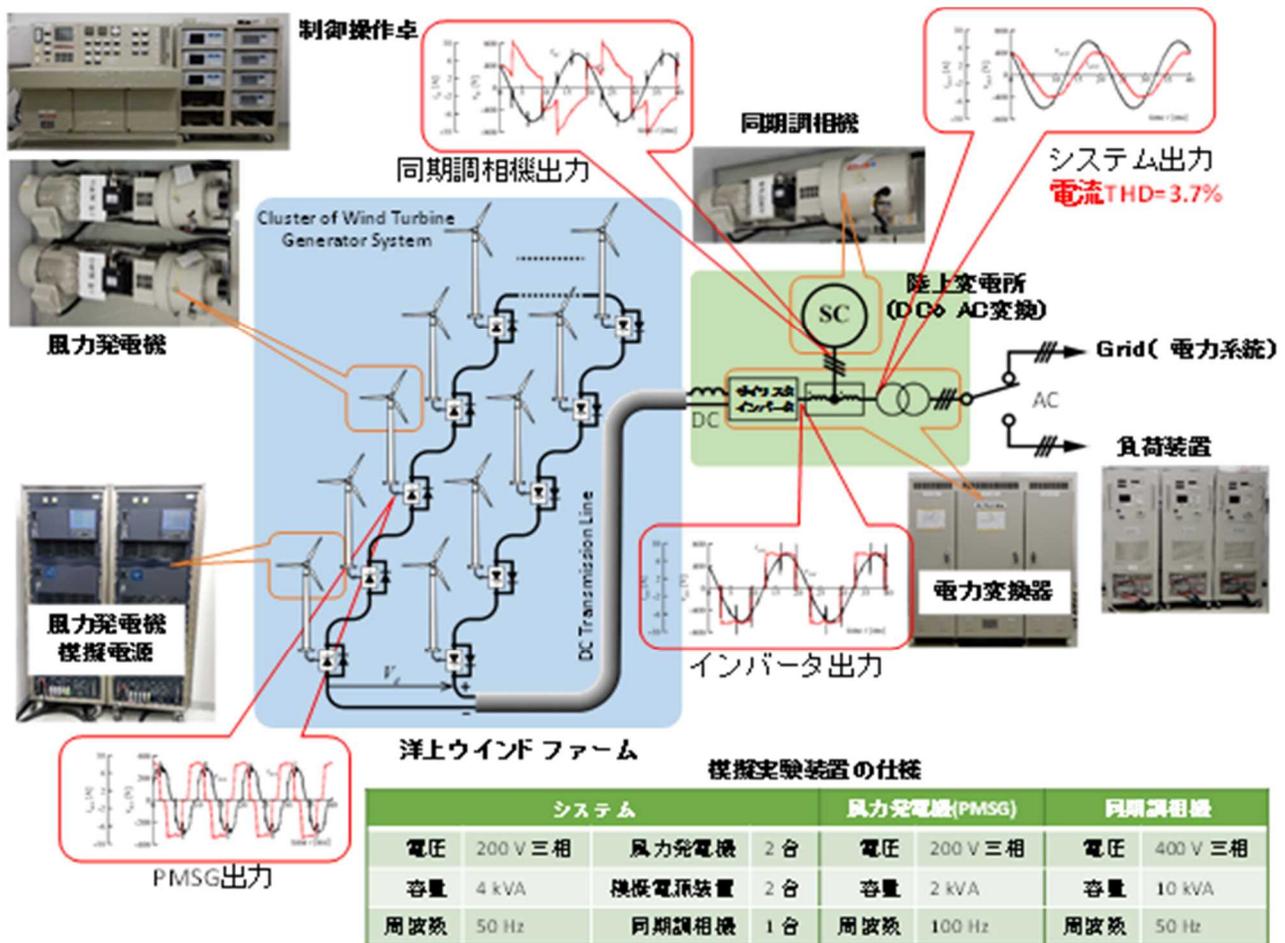


図 3-7-1 直列接続方式風力発電システムの構成と模擬実験装置
(実験結果は系統連系運転出力 2.7kW 時の電流 (Red)、電圧 (Black) の波形例)

②Solid State Transformer 技術を応用した HVDC 変換設備の基礎技術開発

(a) 開発の方向性

図 3-7-2 に本基礎技術開発における各要素技術の関連性を示す。モジュラーマルチレベル変換器(MMC)およびイミタンス変換リンク付き変換器技術と高周波変圧器を含む Solid State Transformer (SSTR) の技術の高周波運転のシミュレーションを行い、制御性・回路構成・パラメータの最適化に必要なデータを取得する。シミュレーション結果に基づき、制御性・回路構成・パラメータの最適化を行い、数 kVA の小容量変換システムを設計し、性能試験を行うと共に、50/60Hz での性能試験も実施し、小型軽量化に対する比較検討を行う。さらに、通常時および系統事故時のいくつかのシナリオを想定して、構築したイミタンス変換リンク付きモジュラーマルチレベル変換器(MMC)シミュレーション用モデルを構築し検証を行う。高周波変圧器、MMC およびイミタンス変換リンク付き変換器の検討結果を反映させた改良モデルを作成し、リアルタイムシミュレータ・モデルの設計手法を確立する。

また、電磁界解析ソフトおよび熱流体解析ソフトによるシミュレーションを行い、変換器冷却系のモデリング手法と逆解析法を用いた設計に必要なデータを取得し、新たな知見の元で変換器冷却系を設計し、性能試験を行う。従来の冷却系の性能試験も併せて実施し、小型軽量化に対する比較検討を行う。

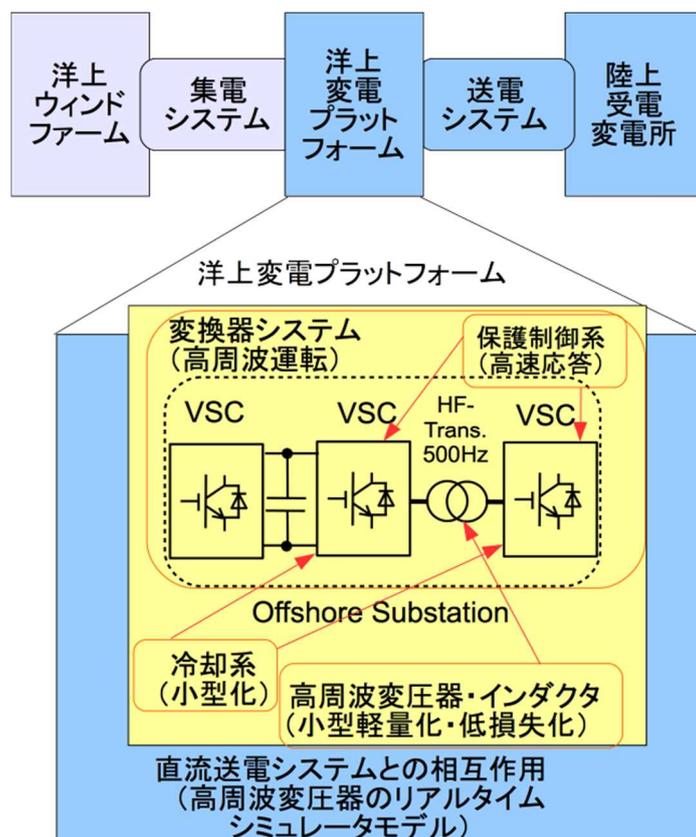


図 3-7-2 Solid State Transformer 技術を応用した HVDC 変換設備の開発要素

(b) 高周波変圧器を適用した電力変換設備のシステム技術開発

(i) 変換器システム模擬試験装置の開発、試験

図 3-7-3 に示す変換器システムを構築し、高周波での安定運転動作を確認した(図 3-7-4)。その結果、変換器の直流側電圧を安定に保ちつつ電力が容易に制御できること、ハイパスフィルタのみで十分な高調波抑制が可能なが判明し、高周波での絶縁 DC-DC リンクの安定な運用の可能性が検証できたことで、変圧器、リアクトル、キャパシタの小型化が可能であると確認できる。特に制御応答の即応性を向上させると、キャパシタは周波数に反比例して容量を低減できる。従って、変圧器および LC 受動素子は、周波数が 50Hz の 20 倍となる 1kHz での運転において体積は現状の 50Hz 変換器に比して 1/20 程度になることが期待できる。その一方で半導体スイッチング素子および変圧器巻線では損失が増大するため冷却を適切に行う必要がある。

(ii) コア材料による周波数に対する損失特性の検証

数種のコア材料を用いて、5kVA の変圧器を試作し、損失特性を測定した(図 3-7-5)。その結果、ファインメット、アモルファス、スーパーコア、ケイ素鋼板の順で鉄損が増加していることが分かった。コアは周波数が高くなると損失が増大するため、特性の良いコアを用いることで、損失の増加を抑制可能であることが示された。

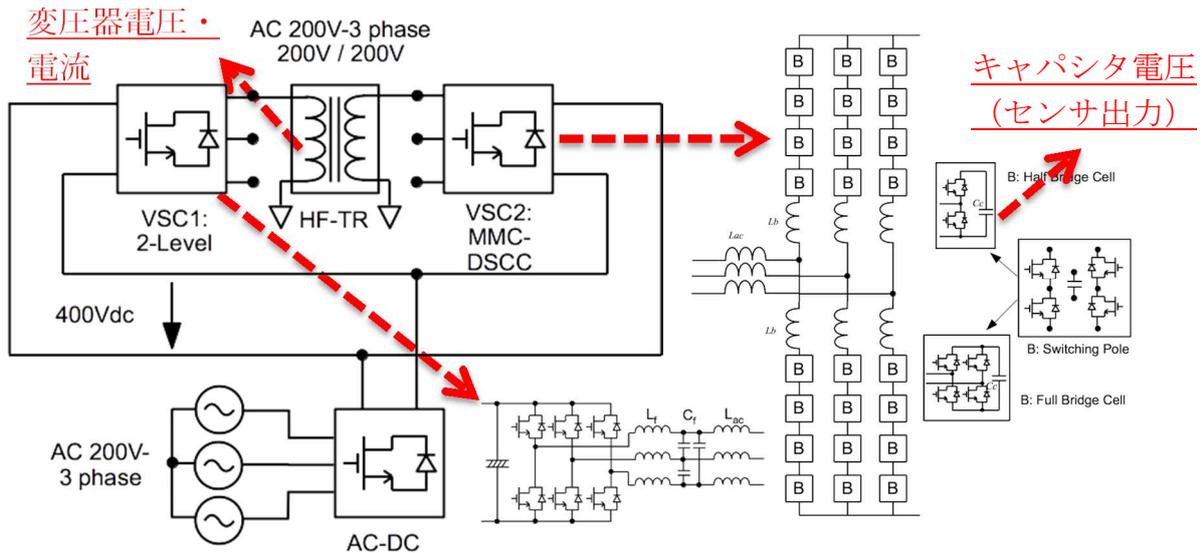


図 3-7-3 実験システム構成 (VSC1, VSC2 の構成)

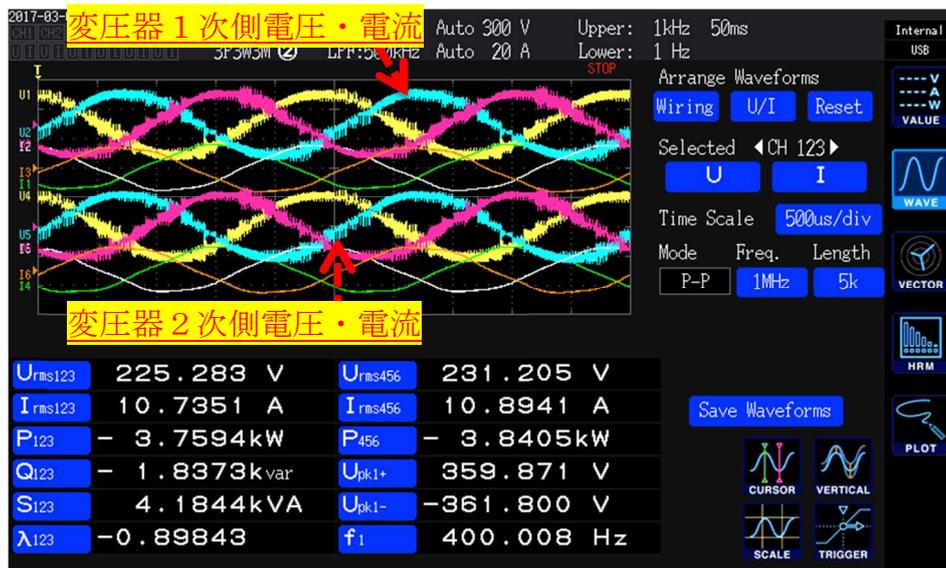


図 3-7-4 高周波変換器・実験結果 (400Hz)

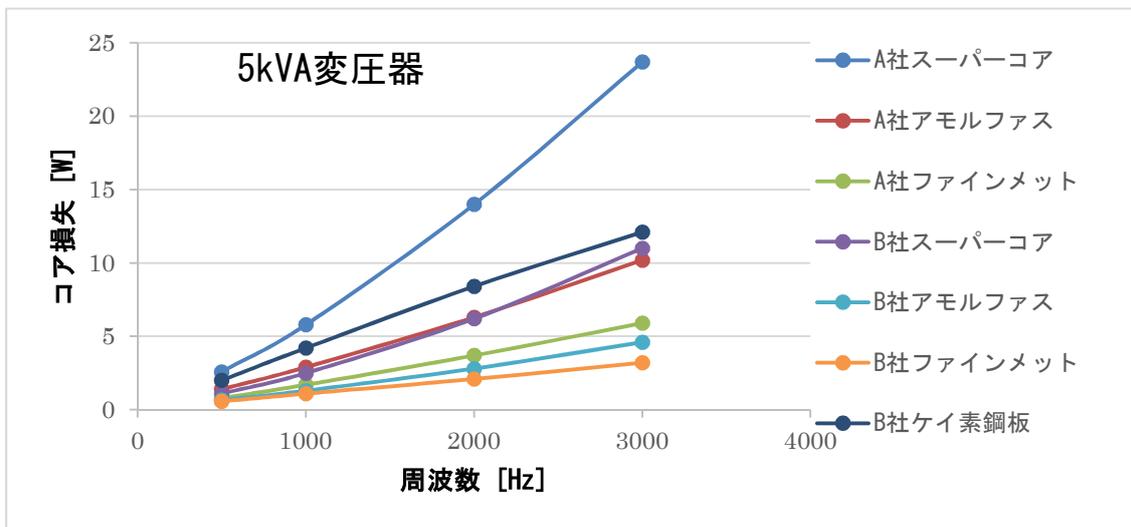


図 3-7-5 高周波変圧器・励磁コア損失測定結果 (500Hz~3kHz)

(c) 直流送電システムとの相互作用の検証

ゲート信号発生を含むリアルタイムシミュレータモデルを構築することを目標として、MMC 制御を可能とするために 24 個の制御信号で外部にあるアンプによる変換器模擬を可能とするシステムを構築した(図 3-7-6)。リアルタイムシミュレータでは、システムとの相互作用による不安定性の有無を検証するために高周波域において変換装置と同等の動作をすることが求められる。そのためのモデリングを行い、実験装置と同じレベルでのゲート信号発生とそれを用いた外部電源での、実験装置と同等な波形発生を確認した(図 3-7-7)。その結果、制御保護系の設計に利用可能とする知見を獲得できた。

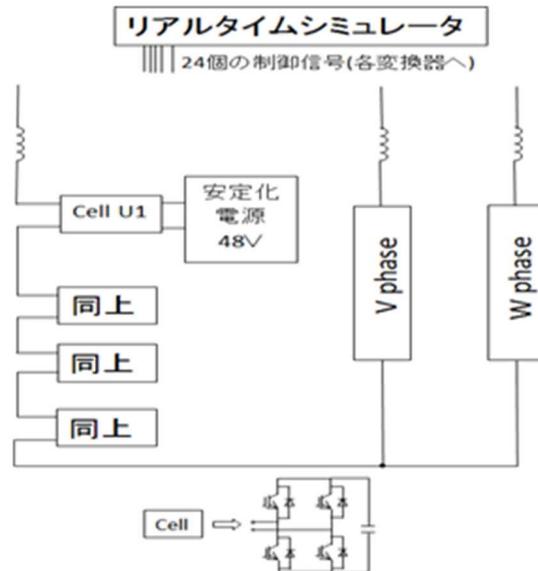


図 3-7-6 リアルタイムシミュレーションのシステム構成

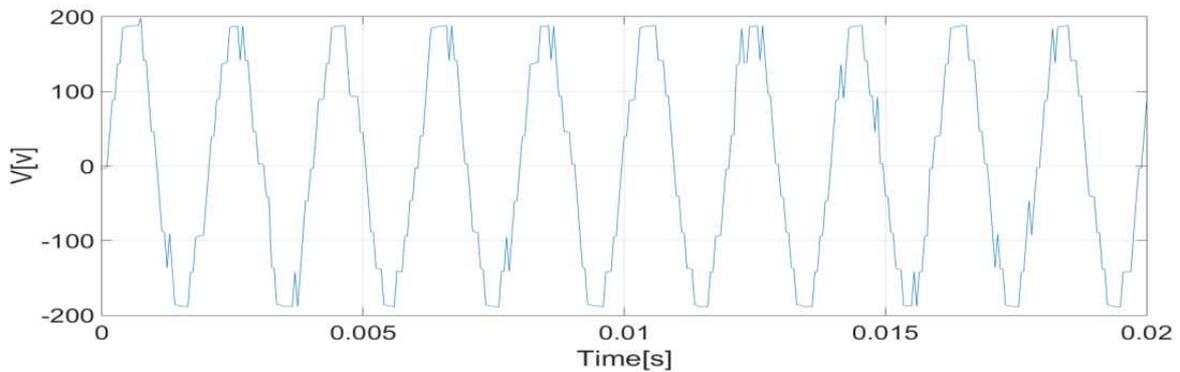


図 3-7-7 リアルタイムシミュレータ変換器 2 (MMC) 出力電圧測定結果

(d) 高周波変圧器の最適冷却法の開発

(i) 水冷高周波変圧器の損失同定方法の提案と冷却構造の提示

小型化・軽量化に向けた水冷高周波変圧器を対象とした逆解析、測温抵抗体使用による高精度な損失同定方法の提案と電磁界解析・熱連成解析による冷却の最適化のためのデータ取得を行った(図 3-7-8)。損失同定に関しては、光ファイバーにて取得されたコア、1次、2次巻線の表面温度をもとに逆解析を試みた。また、高精度な測温抵抗体による各部の冷却水の温度上昇測定から銅損(1次、2次巻線)およびコア鉄損を測定した。これらの開発により、銅フィン埋め込みヒー

トシンクが放熱特性が良いという事が分かった。今後、60Hz から 3kHz で周波数を可変させ逆解析と測温抵抗体による測定値の比較と水冷高周波変圧器の冷却構造の最適化を行う。

(ii) 水冷ヒートシンクの熱流動特性把握による小型ヒートシンク提案

変換器の水冷ヒートシンクを実験および熱流体解析により評価し、アルミベースに高熱伝導性銅フィンを挿入したヒートシンクにて現行比約 30%小型化可能であることが分かった (図 3-7-9)。

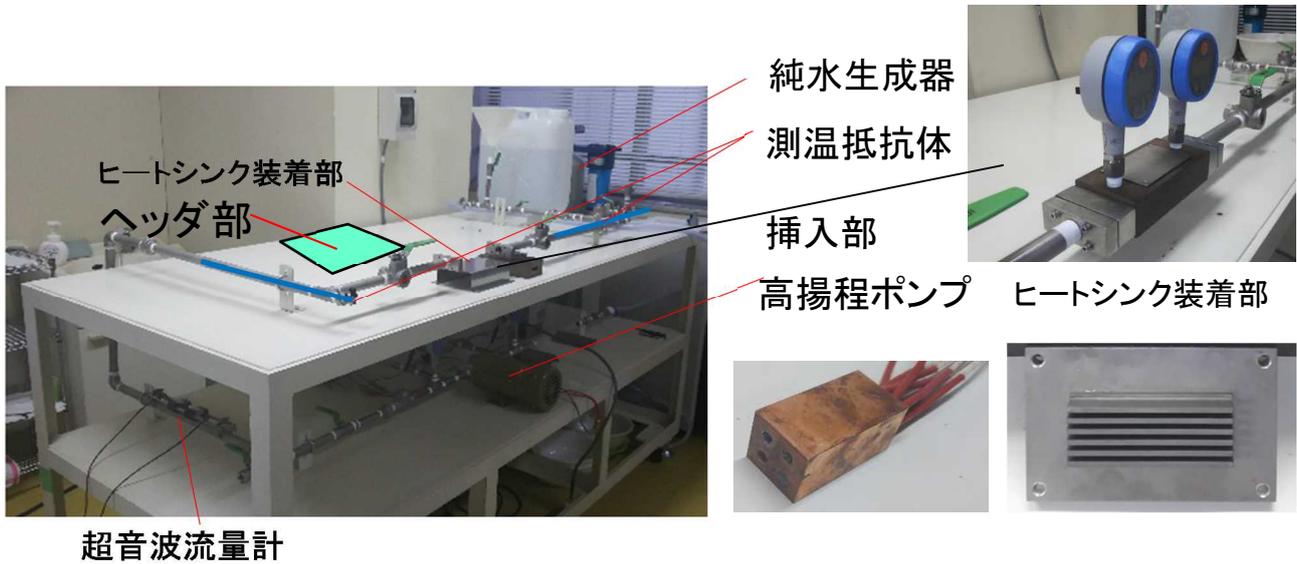


図 3-7-8 純水循環装置とヒータブロック及び楕形ヒートシンク

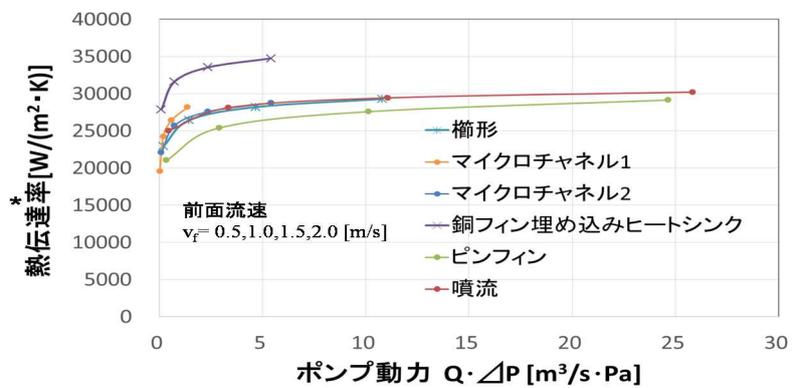


図 3-7-9 水冷高周波変圧器と熱流解析結果 (ポンプ動力 vs. 熱伝達率)

③高周波変圧器の開発

直流連系方式の洋上 WF では、従来、各風力発電装置は交流集電系統に連系しており、昇圧変圧器と交直変換器を用いて数 100 kV 級の直流電圧に変換した上で陸上変電所に送電していた。また、集電昇圧機構を搭載する洋上 PF が必要であった。これに対して、直流で集電し、昇圧用 DC-DC 変換器を用いることで、集電昇圧機構の小形化によるコスト低減が期待できる。また、DC-DC 変換器を各風車に搭載できれば、洋上 PF を省略できる可能性もある。

昇圧用 DC-DC 変換器の構成部品である高周波変圧器は高周波で駆動するほど小型になるが、表皮効果、近接効果に伴う巻線損失の増大が更なる小型化を阻害している。先行研究によって、高

周波化に伴う巻線損失増大の主な要因は近接効果であることが明らかになっている。そこで、近接効果を抑制するために、1次巻線と2次巻線を1層毎に交互に配置した構成（以下、1層毎交互巻）を検討することとした。

図 3-7-10 に考察に用いた 5kVA 高周波変圧器の形状・寸法を示す。図 3-7-11 は試作した 5kVA 高周波変圧器の外観写真である。はじめに、有限要素法を用いて巻線構成を 1 層毎交互巻とした場合の巻線抵抗を計算した。図 3-7-12 に、比較例の一般的な変圧器の巻線配置（以降、単純重ね巻と称す）と 1 層毎交互巻の巻線配置を示す。巻線は平角線であり、高さ 3.9mm、幅 4.1mm とほぼ真四角に近い形状を有する。図 3-7-13 に、周波数対巻線抵抗特性の計算値を示す。この図を見ると、1 相毎交互巻にすることで高周波化に伴う巻線抵抗の増加が抑制されていることがわかる。これは 1 次巻線と 2 次巻線を交互に巻いたことで、互いの漏れ磁束が打ち消され、近接効果が抑制されたためである。

次いで、巻線形状による効果についても検討を行った。上記の 3.9 mm x 4.1 mm 角線に対してより扁平な 16 mm x 1 mm の断面を有する角線について、有限要素法を用いて巻線抵抗を計算した。その結果を図 5 に示す。図 3-7-13 と図 3-7-14 を比較し、1 層毎交互巻において扁平な 16 mm x 1 mm の角線の方がより巻線抵抗の増加を抑制できることが明らかになった。

上記の結果に基づき、試作した 5kVA 高周波変圧器を用いて実証実験を行った。試作変圧器に対し、ファンクションジェネレータとリニアアンプを組み合わせ、高周波正弦波電圧を印加した。実験の結果を図 3-7-15 に示す。単純重ね巻は周波数が高くなるに従って巻線抵抗が急増していることが了解される。これに対して、1 層毎交互巻の場合は、有限要素法の結果と同様に高周波化に伴う巻線抵抗の増加を抑制されている。このことから、単純重ね巻に対する 1 層毎交互巻の有用性が実証された。

さらに、DC-DC コンバータの実使用状態に近い方形波電圧で励磁した場合の抑制効果について検討を加えた。高周波の方形波電圧は、ファンクションジェネレータとリニアアンプの組み合わせでは生成が難しいことから、SiC インバータを用いることにした。なお、出力電圧はダイオード整流器を通して直流に変換した後、電子負荷装置に入力する。実験の結果、方形波電圧で励磁した場合についても、正弦波電圧の場合とほぼ同様に、高周波化に伴う巻線抵抗の増加を抑制できることを確認した。

次いで、2 次巻線を単巻線から多巻線に変えた場合について検討を行った。これは実使用の DC-DC コンバータを想定した場合、高周波変圧器により昇圧する必要があるためである。巻線配置については、2 次巻線が複数あるため、様々な配置が考えられるが、ここでは 2 つの 2 次巻線を上下に一列に並べ、これを 1 次巻線と 1 層ずつ交互に並べる配置を採用した。図 3-7-16 に試作した 5kVA 高周波変圧器の外観を示す。有限要素法を用いて計算した巻線抵抗および実験結果と、それに対応する漏れ磁束コンター図をそれぞれ図 3-7-17、図 3-7-18 に示す。1 層毎交互巻の巻線配置により、単巻線の場合と同様に、高周波化に伴う巻線抵抗の増加を抑制できている。また、図 3-7-17 から明らかのように、有限要素法による計算結果と実験結果は良好に一致している。

5kVA 高周波変圧器の試作検証を通して得られた知見は次のようにまとめられる。

- 1 次巻線と 2 次巻線を 1 層毎交互に巻いた巻線配置が高周波化に伴う銅損増加の抑制に有効であること
- 巻線形状を扁平にすることで、抑制効果がさらに増すこと
- 励磁電圧は正弦波であっても、実際の DC-DC 変換器で想定される方形波であっても同様の抑制効果が得られること

- 昇圧のため、2次巻線を多巻線にした場合でも、複数の2次巻線を上下に並べ、これを1次巻線と交互に配置することで、単巻線と同様の抑制効果が得られること

続いて、同様の効果を実規模相当でも実証するため、500kVAの高周波変圧器を試作した。図3-7-19(a)、(b)はそれぞれ巻線構成を単純重ね巻、1層毎交互巻とした500kVA試作器の外観である。鉄心の両脚に構成された1次巻線同士、2次巻線同士はそれぞれバスバにより接続されている。表3-7-5は500kVA試作器の主要諸元である。単純重ね巻、1層毎交互巻ともに設計駆動周波数を3kHzに設定した。鉄心にはこの周波数域での損失特性に優れるアモルファス薄帯の巻鉄心を用いた。

図3-7-20に1次巻線損失の測定結果を示す。単純重ね巻の場合、近接効果の影響により周波数を高くするに従って1次巻線損失は急激に増加した。これに対して1層毎交互巻の場合、単純重ね巻と同様に1次巻線損失の増加は認められるものの、その増加分は抑制されている。設計駆動周波数の3kHzでは、単純重ね巻と比べて1層毎交互巻の1次巻線損失は61%低減した。

図3-7-21に定格電力における単純重ね巻、1層毎交互巻の高周波変圧器の損失比較を示す。巻線構成を単純重ね巻とした場合と比べ、1層毎交互巻とした場合は高周波変圧器全体の損失が約30%低減することを確認した。

以上の試作検証により、実規模相当の500kVAにおいても、巻線構成を1層毎交互巻とした高周波変圧器は単純重ね巻と比べて低損失であることを実証した。このことは、駆動周波数を更に高められることを示唆しており、昇圧用DC-DC変換器、および洋上PFの小型化に寄与できる可能性を示した。

最後に、1層毎交互巻高周波変圧器を搭載したDC-DC変換器の動作を確認するため、シミュレーション解析を実施した。上述の500kVA試作器の実験から必要なパラメータを導出し、DC-DC変換器シミュレーションモデルに適用した。図3-7-22はDC-DC変換器を搭載した風車の構成図を示している。風車の発電が500kW相当となるように電流源の値を調整した。DC-DC変換器に入力電圧制御を実装し、入力電力を1 p.u. から0.5 p.u. にステップ状に変化したとき入力電圧波形、出力電力波形を解析した。その結果を図3-7-23に示す。入力電圧は良好に制御されていることが確認できる。このことから、1層毎交互巻の高周波変圧器を搭載したDC-DC変換器の動作をシミュレーションで検証できる見通しを得た。

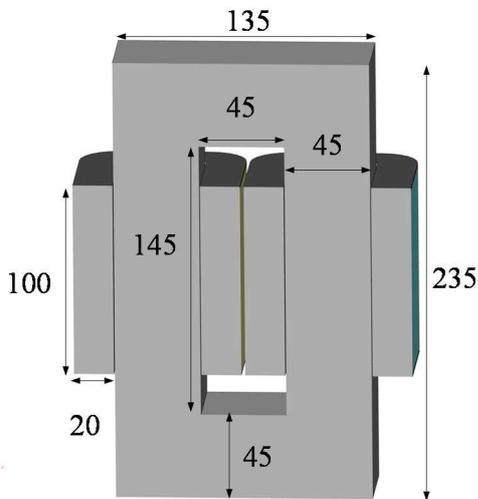


図3-7-10 考察に用いた5kVA高周波変圧器の形状・寸法

図3-7-11 5kVA高周波変圧器の外観

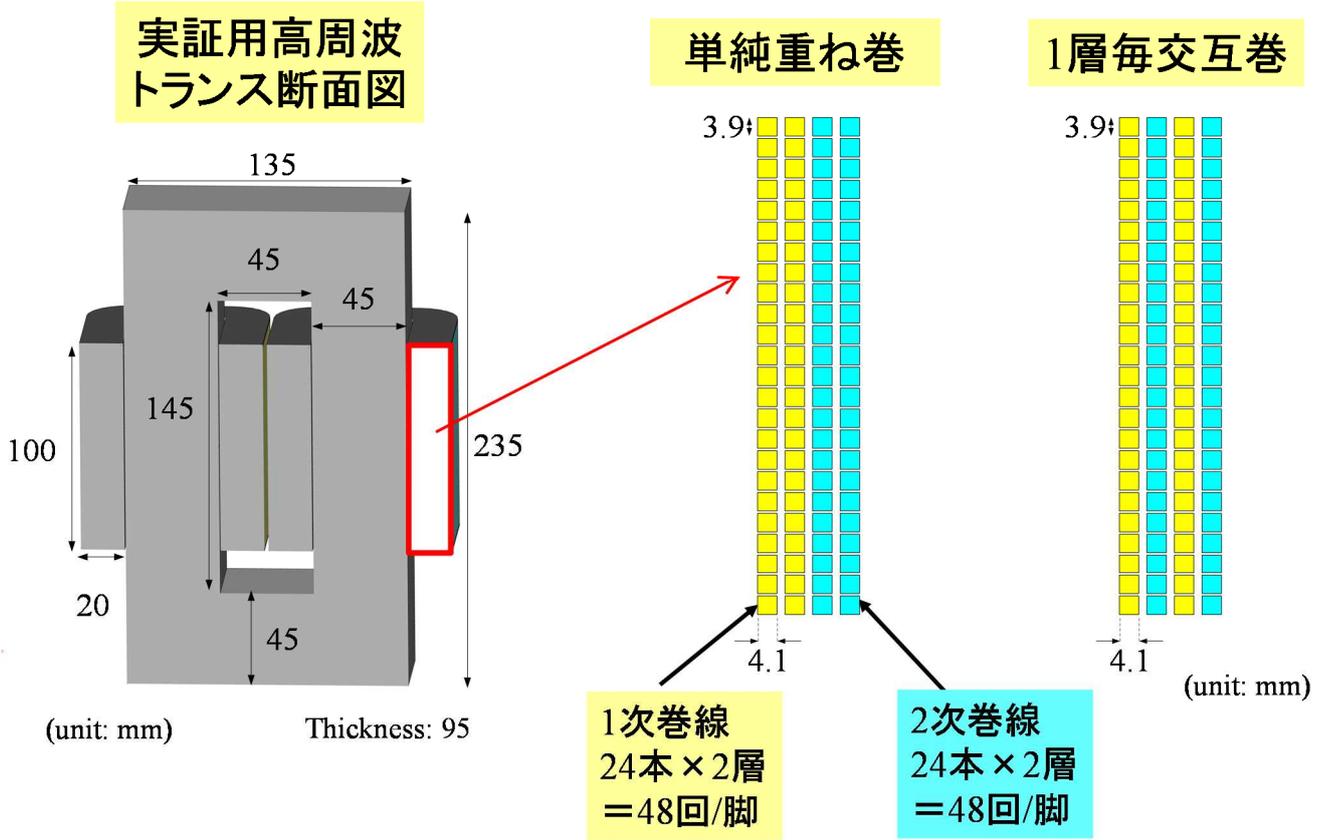


図 3-7-12 単純重ね巻と1相毎交互巻の巻線配置

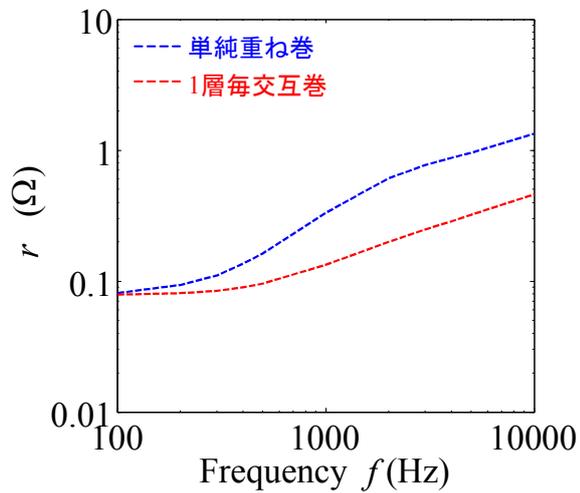


図 3-7-13 周波数対巻線抵抗特性の計算値
(巻線形状 3.9mm×4.1mm)

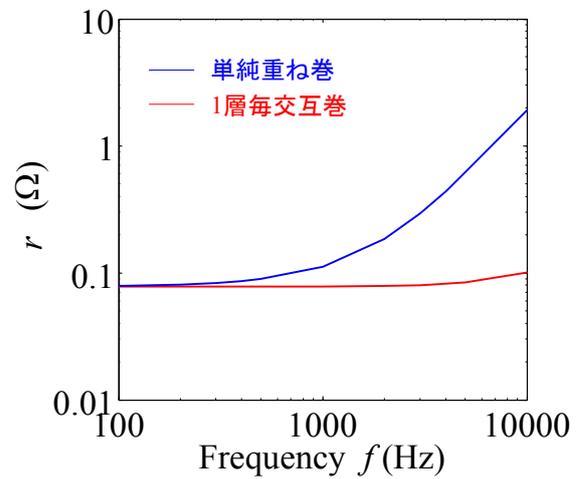


図 3-7-14 周波数対巻線抵抗特性の計算値
(巻線形状 16mm×1mm)

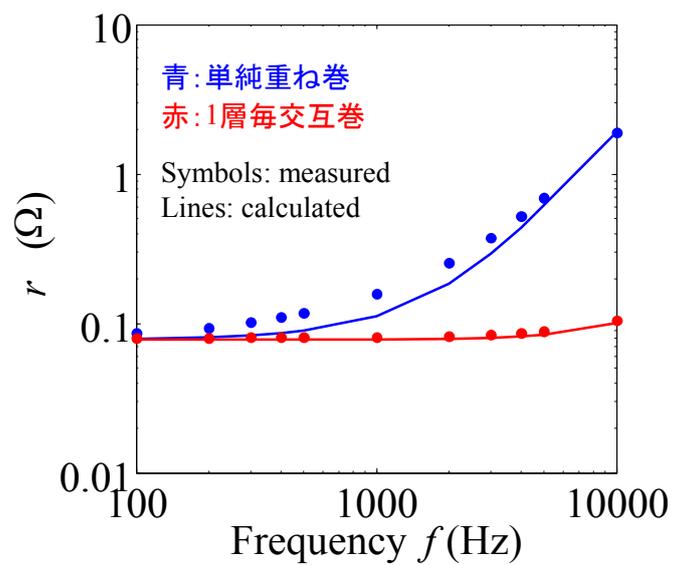
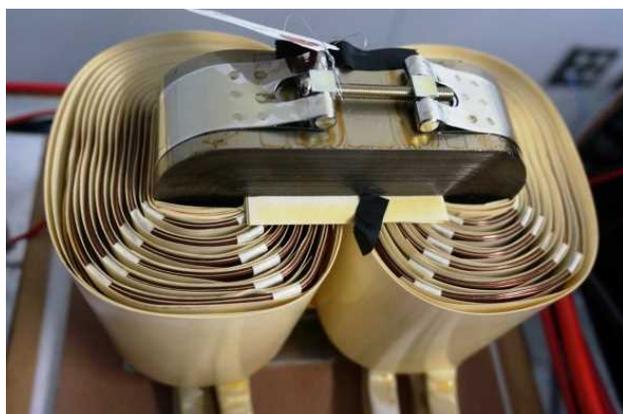


図 3-7-15 周波数対巻線抵抗特性の実験結果 (巻線形状 16mm×1mm)



(a) 単純重ね巻



(b) 1層毎交互巻

図 3-7-16 5kVA、2巻線試作器の外観

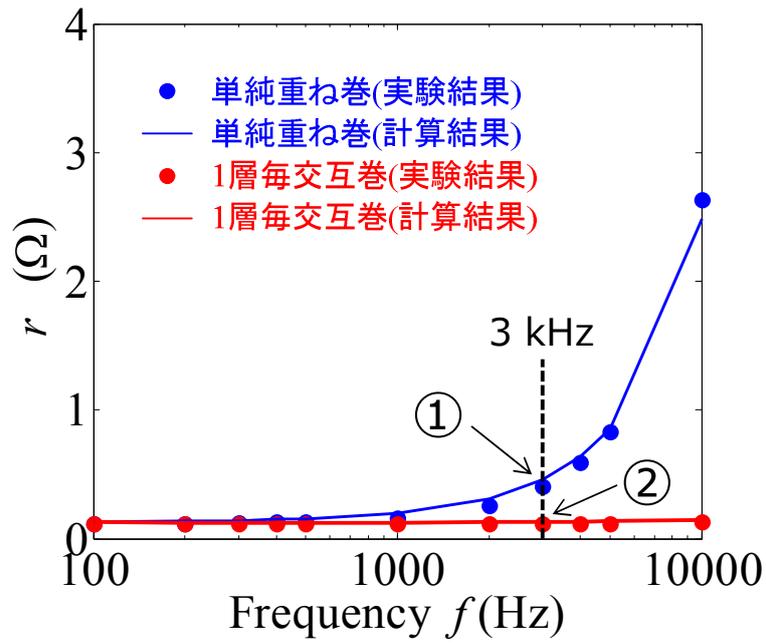


図 3-7-17 5kVA、2 巻線試作器の巻線抵抗

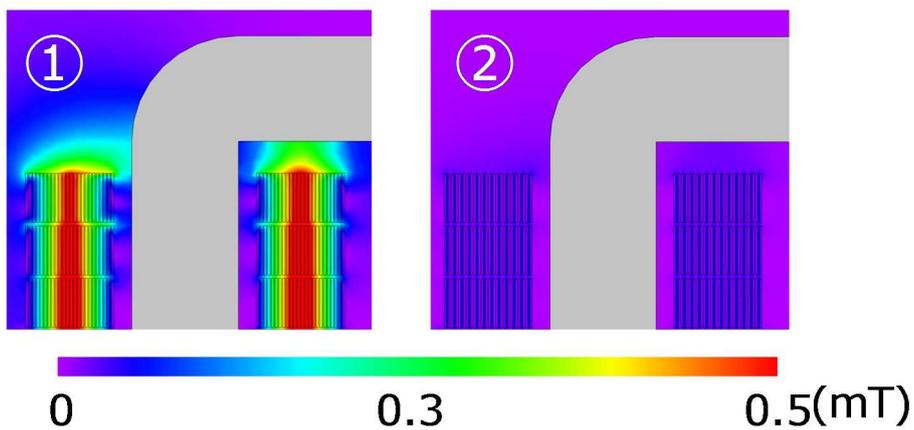


図 3-7-18 5kVA、2 巻線試作器の巻線抵抗 (図 3-7-15 中の①、②と対応)



(a) 単純重ね巻



(b) 1 層毎交互巻

図 3-7-19 500kVA 試作器の外観

表 3-7-5 500kVA 試作器の主要諸元

定格電力	500 kVA
設計駆動周波数	3 kHz (矩形波)
1次巻線 電圧／電流	2.4 kV / 208 A
2次巻線 電圧／電流	4.8 kV / 104 A
1次巻線／2次巻線 巻数	30 / 60
鉄心	2605HB1M (アモルファス)

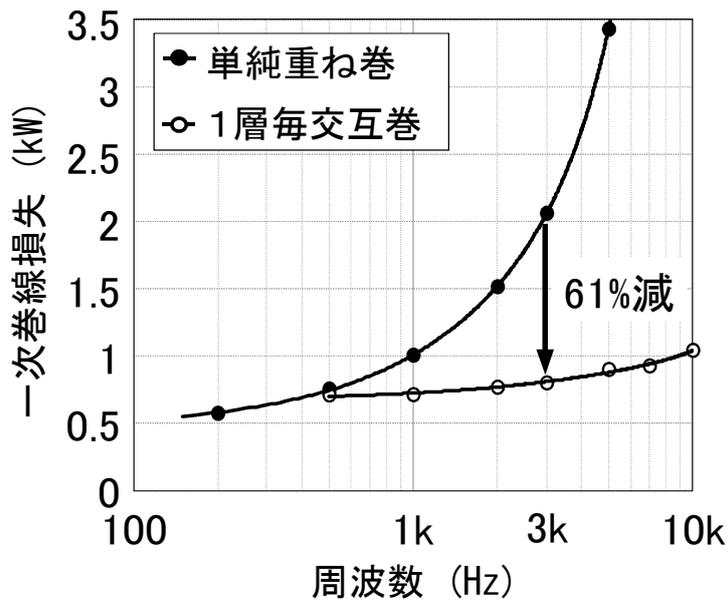


図 3-7-20 500kVA 高周波変圧器における1次巻線損失の周波数特性

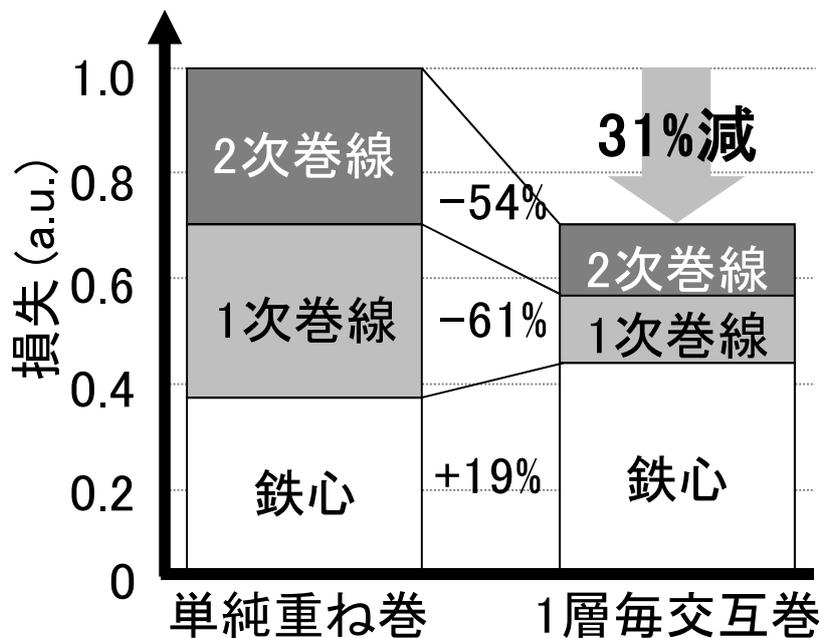


図 3-7-21 500kVA 高周波変圧器における損失比較

表 3-7-6 解析条件 (GIT の場合)

	ガス	絶縁紙	プレスボード
体積抵抗率の比 (DCの場合に支配的)	1000	1	1
比誘電率 (ACの場合に支配的)	1	1.85	3.4

表 3-7-7 解析条件 (OIT の場合)

	油	絶縁紙	プレスボード
体積抵抗率の比 (DCの場合に支配的)	1	30	30
比誘電率 (ACの場合に支配的)	2.2	3.3	4.4

(c) 電界解析結果

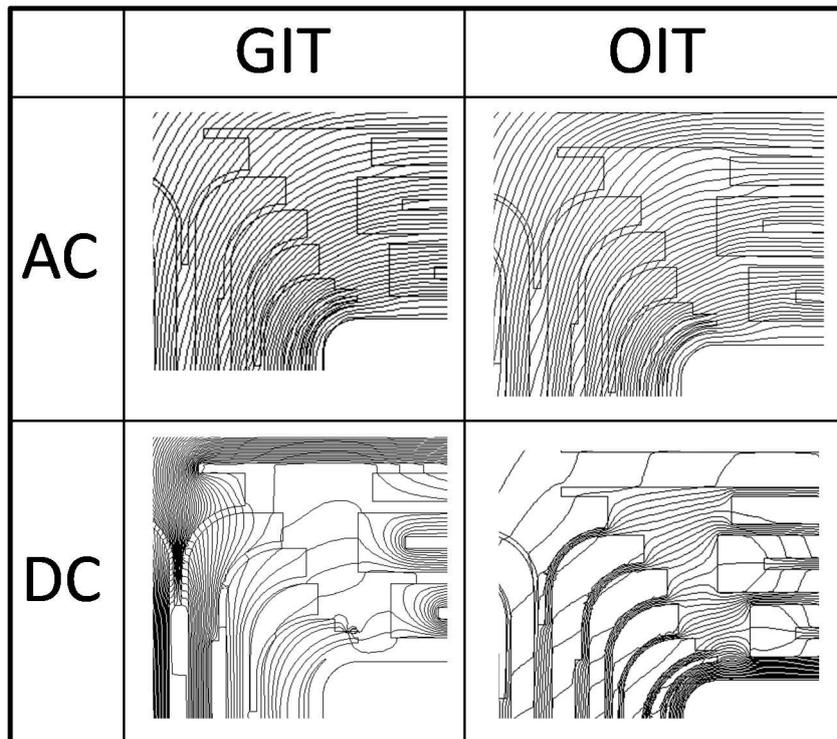
■ 交流の場合

比誘電率の違いから、“油に分担する電圧” < “ガスに分担する電圧” となるが、等電位線の分布に大きな相違は見られなかった。

■ 直流の場合

直流では、抵抗率の高い絶縁媒体に電圧が多く分担する。このため、OIT では絶縁紙・プレスボードに、GIT では SF₆ ガスに電圧が多く分担する分布となった。絶縁耐力は固体絶縁物である絶縁紙・プレスボードに比べ、SF₆ ガスの方が低いことから、高い直流電界下における絶縁設計は OIT よりも GIT の方が厳しくなると考えられる。

表 3-7-8 等電位線図の比較



以上より、GITでOITと同程度の絶縁裕度を確保する場合、変圧器寸法・重量がOITに対して増大し、変圧器コストの増加が懸念される。

(d) まとめ

現行の直流送電用のOITの絶縁構成でも、変圧器に印加される電圧が交流のみであればガス化できると推測される。直流電圧が印加される場合には、絶縁設計の観点からGITの新規開発が必要となる。変換器用変圧器にGITを適用する場合、OITに対して寸法・重量・コストの増加が懸念される。これらをふまえ、環境面などを含め、多方面からGITの適用によるメリットを評価する必要がある。

(4) 目標達成に向けた今後の課題、課題解決の見通し

事業終了までに達成すべき最終目標と目標達成に向けた今後の課題、課題解決に向けた見通しを以下に示す。

表 3-7-9 課題と課題解決の見通し

洋上風車の直列接続方式の開発			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
模擬実験システムを利用した各種実験の実施	直列接続方式の実用性を検証するとともに、システムの設計指針を明らかにする	<ul style="list-style-type: none"> ・風速が大幅に変動する場合等を含めた実験的検討を実施する ・システムの要求する有効電力、無効電力をある範囲で自在に送出可能なシステムを開発し、その有用性を実験的に検証する 	模擬実験システムの改良と試験、および試験結果とシミュレーションの高度化により達成の見通し
Solid State Transformer 技術を応用した HVDC 変換設備の基礎技術開発			
主な内容	最終目標	今後の課題	課題達成の見通し
フィルタを含めインダクタ・キャパシタの最小化	高速制御を用いて、従来のフィルタ LC の値を半分以下とする	FPGA を用いて制御系の最適化を行う	現在の DSP 制御系が安定に動作する範囲を超えるが、原理的には十分可能である
高周波変圧器のコア材質の選定と周波数の選定に資するデータの蓄積	コア材の選定に資するデータを蓄積する	コアデータを効率・コスト・体積・重量の点から選定できるデータを蓄積する	パッシブ素子の値を変えてデータを蓄積する必要があるが、1年程度の実験期間があれば達成可能である
冷却系の熱流解析を拡張して温度分布を均一化する熱流構造の構築	大容量化した場合にも適用できる高周波変圧器の冷却系の設計データを蓄積する	3次元構造における熱流の測定方法と同定のための解析技術を確立する	逆解析手法による同定に一定の成果が出ており、測定方法が順調に確立できれば、1年程度で達成可能である
・試験結果などを集約し、変換器システムについて従来比 1/20 を実現するための指針の完成	・高周波変圧器を適用した変換器システムにおいて、体積比で従来比 1/20 を実現する設計法を確立する	変換器システムの高周波運転、高周波変圧器の材質と構造の最適化、冷却系の最適化の成果を用いて、シミュ	それぞれの開発は順調に推移しており、今後行うデータ集約、設計手法の確立、シミュレーショ

<ul style="list-style-type: none"> ・変換器においては周波数の選定、共振(イミタンス変換)利用の得失明確化 ・受動素子の材質と構造の比較 ・冷却系の温度分布推定方法を精密化し冷却系の最適化手法の確立 ・これらの成果を設計データとして集約 	<ul style="list-style-type: none"> ・制御性能の向上で半導体素子を除く受動素子の小型化を行い変換器自体の小型化手法を確立する ・構造的に密度を増大させるために冷却系の最適化手法を確立する 	レーションや試作などにより各構成要素の小型化比率を試算し、それを元に変換器システムの小型化設計を行う	ンによる確認手法とも計画上は問題ないため目標達成出来る見込みである
---	--	--	-----------------------------------

3. 知的財産等の取得、成果の普及

各実施者の特許出願件数、論文等の対外発表の実績を以下に示す。

特許については、報告書を NEDO に提出することを実施者に義務付け、本事業の出願・登録の動向を把握している。平成 29 年 9 月末時点での本プロジェクト全体の特許出願件数は国内 8 件、国際 3 件となっている。また、NEDO は各実施者に対し、本事業の成果を技術情報の流出に配慮しつつ、実用化、事業化につながる等、有効的なものは適切に成果を発表・公表するように指導している。現在、本事業全体の情報発信件数は、学会発表、論文が 19 件となっている。

表 3-8 特許出願件数、論文等の実績

	FY2015 (27 年度)	FY2016 (28 年度)	FY2017 (29 年度)	計
特許出願 (海外)	—	9 (2)	2 (1)	11 (3)
学会発表、論文 (査読付)	1 (1)	13 (3)	5 (3)	19 (7)
講演、その他	5	—	—	5

4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

1. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

1.1 システム開発

1.1.1 実用化・事業化の定義

本事業で開発された、多端子直流送電システムの計画・設計、システム制御技術などの設計・解析手法の一般化を行い、広く利用可能な技術として確立させること。

1.1.2 成果の狙い

本研究開発は、今後、多端子直流送電システムを導入する際に不可欠となる技術のうち、特に、系統計画・設計や制御・保護等の設計・解析手法を確立することを目的としている。今後、多端子直流送電システムを導入する際、得られた成果を活用することで、多端子直流送電システムの導入が進みやすくなるとともに、多端子直流送電システムの設備が効率的な構成・設計となり社会コストが低減されることを狙いとしている。また、接続する大規模洋上 WF の設備が効率的な構成・設計となり、風力事業者の事業性が向上することも期待できる。

1.1.3 成果の実用化・事業化可能性

多端子直流送電システムの計画・設計、システム制御技術などの設計・解析手法は事業終了と同時に技術確立の見込みである。そして事業終了後1年で、我が国への事業性評価のための手法として、成果報告書やシステム標準仕様書などとして一般化する。

日本の周辺における太平洋や日本海の水深を考慮すると、着床式の大規模洋上 WF は、海岸線に沿う形で計画される可能性が考えられる。このような形で分布した大規模 WF を、一定の信頼度を維持しつつ、陸上の連系可能点まで接続することを考えると、陸上の送電系統の一部を代替する洋上直流送電システムに、複数の地点において、多端子で分岐する形で WF が接続することが最も経済的となる可能性が高い。従って、我が国では、事業終了後、大規模洋上 WF の計画に合わせて多端子直流送電システムが計画され、そこへ「システム開発」で確立した技術が活用される。

また、欧州においても、北海の直流グリッドを構築することや、直流グリッドに洋上 WF を接続することを目的として、多端子直流送電システムに関する技術開発が行われている。日本の事業者やメーカーが、欧州や北米のプロジェクトへ参画する際にも、本事業で確立された技術を活用することができる。

1.1.4 成果の展開に向けたシナリオ

本事業の成果が、大規模洋上 WF の計画に活用されるためには、日本において、大規模洋上 WF が複数計画されることが必要となる。案件化に向けて、我が国の広域連系系統の長期方針や整備計画の策定などに携わる広域機関等に対して広く成果を発信し、再生可能エネルギー導入拡大における多端子直流送電システムの重要性・有効性の認知へつなげる。さらに、ユーザーとなりうる電力会社（送配電事業者）に対しても広く成果を発信することで、再生可能エネルギーの導入拡大のための多端子直流送電システムの導入について、案件化に向けた働きかけを行う。また、メーカーやユーザーが参加するシンポジウムなどを開催して成果を広く発し、国内での案件形成の一助とする（表 4-1）。

1.2 要素技術開発

1.2.1 実用化・事業化の定義

本事業で開発された多端子 HVDC システムの実現に必要な新規コンポーネントが、関連する業界や企業等で活用される、または企業活動（売上等）に貢献すること。

1.2.2 成果の狙い

本研究開発は我が国の今後の洋上風力発電の大規模導入に不可欠となる、多端子洋上直流送電システムの実用化に必要な新規要素技術を開発することを目的としている。得られた成果は国際競争を優位に進め、実用化後の国際市場への参入を可能にしつつ、将来、我が国で実案件化した際には低コストで高信頼性を有するオールジャパンのシステムの導入へ繋がることを狙いとしている。

1.2.3 成果の実用化可能性

要素技術開発では、開発を通してシステム開発へ提供するコスト情報、特性値を得るだけでなく、事業期間において実用化に向けた基盤技術を確立する計画である。このため、各要素技術において、試作、評価試験を行い、一部開発テーマにおいては、長期信頼性試験を実施する。長期信頼性試験を実施しない要素技術についても、規格に則った試験環境、基準において型式試験を実施したり、模擬試験を通して設計指針を決めたりするため、実用化へ向けた準備を事業期間で完了する。従って、事業終了後の実用化は十分可能であると言える。

1.2.4 事業化までのシナリオ

各実施者とも、本事業終了後3年を目途に事業化する計画としている。要素技術開発により事業化計画は異なるが、製品化に向けた作りこみを継続して実施し、必要な設備投資をしたうえで海外案件への参入を含めた活動を開始する計画である。

また、それぞれの要素技術開発はそれぞれに市場があるため、早期の参入により知見・経験を積んで、実際に我が国の案件が生じた場合においても、海外企業に対してより競争力を持つと期待される（表4-1）。

表 4-1 成果の展開・事業化スケジュール

事業終了

項目	FY2019 (H31)	FY2020 (H32)	FY2021 (H33)	FY2022 (H34)	FY2023 (H35)
研究開発項目Ⅰ システム開発	技術確立 ☆	技術の一般化 成果の周知 シンポジウムの開催		導入可能性評価 (事業性、系統解析) 案件化に向けた 関係者との協議	
研究開発項目Ⅱ 要素技術開発	実用化		製品化 設備投資 受注活動	生産開始	

プロジェクト基本計画

「次世代洋上直流送電システム開発事業」基本計画

スマートコミュニティ部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

① 政策的な重要性

今後のエネルギー政策として、再生可能エネルギーの最大限の導入を進め、できる限り原子力発電の依存度を低減させることが政府の目標として掲げられている。

また、平成 26 年 4 月 11 日に閣議決定された「エネルギー基本計画」にも、洋上風力発電の導入を最大限加速させるとともに、系統強化、規制の合理化、低コスト化等の研究開発を着実に進めることが記載されている。更に、平成 24 年 4 月に報告された総合資源エネルギー調査会総合部会 電力システム改革専門委員会地域間連系線等の強化に関するマスタープラン研究会の中間報告でも、直流送電線が検証すべき課題としても記載されている。

② 我が国の状況

我が国は、再生可能エネルギーをエネルギー安全保障に寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギーと位置づけ積極的に推進していく方針を掲げている。再生可能エネルギーの 1 つである風力発電は、大規模に開発できれば経済性が確保できる可能性のあるエネルギーであり、陸上風力に加えて、陸上風力の導入可能な適地が限定的な我が国において中長期的には洋上風力発電の導入拡大も不可欠である。近年、着床式洋上風力および浮体式洋上風力の事業化に向けた発電プラントの実証研究が進められているが、洋上風力活用のためには発電部分だけでなく、安定的かつ効率的に送電可能な送電システム技術の検討が必要である。

③ 世界の取組状況

洋上風力発電の導入が進んでいる海外では、既に洋上風力発電の直流送電システムが計画されている。

例えば、アメリカでは、「Atlantic Wind Connection」プロジェクトと呼ばれる洋上風力の長距離送電システムが現在、計画されているところである。このプロジェクトは従来の 2 端子直流送電システムを適用したプロジェクトである。欧州でも直流送電システムの洋上風力発電プロジェクトが進んでいるが、同様に、

2端子での直流送電を適用しているものである。

④ 本事業のねらい

今後、日本において、再生可能エネルギーを導入拡大するには、洋上風力を大規模に設置する必要があるが、大規模な洋上風力ウインドファームを設置する場合、沿岸部の送電網の整備状況等によっては、海中ケーブルによる長距離送電を行うことで、比較的大きな接続可能量を持つ上位の送電系統に、あるいは需要地に直接接続する必要がある。新規に地上に送電系統を構築する事の制約などから、洋上と陸上間の複数のポイントで相互に接続する多端子の直流送電システムが想定される。

本事業では、高い信頼性を備え、かつ低コストで実現する多端子直流送電システムと必要なコンポーネントを開発し、今後の大規模洋上風力の連系拡大・導入拡大・加速に向けた基盤技術を確立することを目的とする。

(2) 研究開発の目標

① アウトプット目標（平成31年度末）

・研究開発項目(I)「システム開発」

【最終目標】

多端子洋上直流送電システムのモデルケースから、導入を想定した1～3ケースを選択・システム設計し、また、要素技術開発されたコンポーネントのプロトタイプにおいて試験された信頼性データと、それらコンポーネントを選択したモデルケース向けに設計した特性を用いて、既存の交流送電システムに対して、平均稼働率（信頼性）等を含めたコスト削減割合20%以上の導入モデルケースを完成する。

【中間目標】

システム開発として多端子洋上直流送電システムの設計・調達・建設（EPC）と運転・保守（O&M）等を検討した結果を使い、また、多端子洋上直流送電システム向けに要素技術開発するコンポーネントの特性を使い、モデルケースの可能性検討を行い、既存の交流送電システムに対して、コスト削減割合20%を得る。

・研究開発項目(II)「要素技術開発」

【最終目標】

要素技術開発されたコンポーネントのプロトタイプの信頼性試験を行い、また、選択されたモデルケースに向けた設計と特性検討、あるいは、設計と試作、性能試験を行い、それらコンポーネントの仕様を完成する。あわせて、既存の交流送

電システムに対して、そのモデルケースの平均稼働率（信頼性）等を含めたコスト削減割合20%以上へ貢献する。

【中間目標】

多端子洋上直流送電システム向けに新たに必要となるコンポーネントのプロトタイプ設計と試作、性能試験を行い、モデルケースから要求される特性を得る。あわせて、既存の交流送電システムに対して、モデルケースのコスト削減割合20%へ貢献する。

② アウトカム目標

本事業終了後、日本において、5年間程度を目処に3案件前後×1GWクラスの需要が見込まれる。欧州や米国においては、同規模の案件1、2件が見込まれる。さらに、洋上風力向けだけでなく、陸上を含めて、直流送電の観点から広義の送電技術における波及効果も期待される。例えば、日本だけでも長距離地域間連系線（F C周波数変換設備(50Hz/60Hz)、北本連系設備、その他の地域間連系線）などへの波及効果が期待できる。全案件に多端子直流系統が適用されれば、全体で2,400億円～4,000億円の経済効果が見込まれる。

③ アウトカム目標達成にむけての取り組み

洋上風力発電の導入拡大に向けた本事業成果の普及に向け、直流送電システムの実用化に向けた取り組みを実施する。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

【委託事業】

- ・研究開発項目(I) 「システム開発」
- ・研究開発項目(II) 「要素技術開発」

本研究開発は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する研究開発であり、委託事業として実施する。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDOが、単独ないし複数の企業、大学等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業等の特別な研究開発能力、

研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない) から公募によって研究開発実施者を選定し実施する。

なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、必要に応じて、NEDO は第三者である外部専門家をアドバイザーとして選定し、各実施者は客観的立場からの技術的助言を受けそれぞれの研究テーマについて研究開発を実施する。

(2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO は、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて外部有識者による技術検討委員会等を設置し、開発内容について審議し、その意見を運営管理に反映させる。

① 研究開発の進捗把握・管理

NEDO は、研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術検討会を組織し、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

② 技術分野における動向の把握・分析

NEDO は、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査等を効率的に実施する観点から委託事業として実施する。

3. 研究開発の実施期間

平成 27 年度から平成 31 年度までの 5 年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDO は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。評価の時期は中間評価を平成 29 年度、事後評価を平成 32 年度とし、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じ研究開発の加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。

5. その他重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 成果の普及

本研究開発で得られた研究成果については NEDO、委託先とも普及に努めるもの

とする。

② 知的基盤整備事業又は標準化施策等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備又は標準化等との連携を図るためデータベースへのデータ提供、標準案の提案等を積極的に行う。

③ 知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法」第15条第1号イに基づき実施する。

6. 改訂履歴

(1) 平成27年3月、基本計画制定。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目 (I) 「システム開発」

1. 研究開発の必要性

今後、大規模な洋上風力ウィンドファームを設置する場合には、沿岸部の送電網の整備状況等によっては、海中ケーブルによる長距離送電を行うことで、比較的大きな接続可能量を持つ上位の送電系統に、あるいは需要地に直接接続する必要がある。新規に地上に送電系統を構築する事の制約などから、洋上と陸上間の複数のポイントで相互に接続する多端子の直流送電システムの開発を推進する必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

本技術開発では、我が国における洋上風力発電システムの直流送電システムへの適用を想定し、モデルケースの可能性検討、系統計画、集電系の設計、コスト試算、社会受容性調査や必要に応じて制度・ルールの提言等を行う。モデルケースについては、システム検討を行い、5項目の性能(システム損失の低減、システム信頼性の向上、電力フロー制御性の向上、送電容量の増大、環境負荷の低減)を評価する。

3. 達成目標

【中間目標】

システム開発として多端子洋上直流送電システムの設計・調達・建設(EPC)と運転・保守(O&M)等を検討した結果を使い、また、多端子洋上直流送電システム向けに要素技術開発するコンポーネントの特性を使い、モデルケースの可能性検討を行い、既存の交流送電システムに対して、コスト削減割合20%を得る。

【最終目標】

多端子洋上直流送電システムのモデルケースから、導入を想定した1~3ケースを選択・システム設計し、また、要素技術開発されたコンポーネントのプロトタイプにおいて試験された信頼性データと、それらコンポーネントを選択したモデルケース向けに設計した特性を用いて、既存の交流送電システムに対して、平均稼働率(信頼性)等を含めたコスト削減割合20%以上の導入モデルケースを完成する。

研究開発項目（Ⅱ）「要素技術開発」

1. 研究開発の必要性

大規模な洋上風力発電電力を、比較的大きな接続可能量を持つ上位の送電系統等まで輸送する事を可能とする長距離送電網を実現するためには、信頼性が高く、また低廉性を有する長距離送電システムの開発が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

長距離送電に適した直流型送電システムの開発・実用化に必要な高信頼化・低コスト化のための要素技術やコンポーネントを開発する。

3. 達成目標

【中間目標】

多端子洋上直流送電システム向け新たに必要となるコンポーネントのプロトタイプ設計と試作、性能試験を行い、モデルケースから要求される特性を得る。あわせて、既存の交流送電システムに対して、モデルケースのコスト削減割合20%へ貢献する。

【最終目標】

要素技術開発されたコンポーネントのプロトタイプの信頼性試験を行い、また、選択されたモデルケースに向けた設計と特性検討、あるいは、設計と試作、性能試験を行い、それらコンポーネントの仕様を完成する。あわせて、既存の交流送電システムに対して、そのモデルケースの平均稼働率（信頼性）等を含めたコスト削減割合20%以上へ貢献する。

事前評価関連資料

(事前評価書、パブリックコメント募集の結果)

事前評価書

	作成日	平成27年2月2日
1. プロジェクト名	次世代洋上直流送電システム開発事業	
2. 推進部署名	新エネルギー部	
3. プロジェクト概要（予定）		
(1) 概要		
1) 背景		
<p>我が国は、再生可能エネルギーをエネルギー安全保障に寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギーと位置づけ積極的に推進していく方針を掲げている。再生可能エネルギーの一つである風力発電は、大規模に開発できれば経済性が確保できる可能性のあるエネルギーであり、陸上風力に加え、陸上風力の導入可能な適地が限定的な我が国において中長期的には洋上風力発電の導入拡大も不可欠である。近年、着床式洋上風力および浮体式洋上風力の事業化に向けた発電プラントの実証研究が進められているが、洋上風力活用のためには発電部分だけでなく、安定的かつ効率的に送電可能な送電システム技術の検討が必要である。</p> <p>風力発電はエネルギー密度が低いため、まとまった電力を送電するためには複数の風力発電を集約してウィンドファーム構成とし需要地に供給を行うことになる。この送電にあたり、従来の交流送電では送電ロスが多く発生し長距離送電ができないため、発電電力を効率的に送電する直流送電システムの適用が必要である。</p> <p>風力発電は、太陽光発電と異なり、いわゆるスケールメリットが働きやすい発電形態であり、特に風況の良い洋上風力発電による導入拡大が期待されるが、大規模洋上風力ウィンドファームの計画は、前例が無く、再生可能エネルギーの導入拡大に伴う問題点解決の実証を立案できない課題がある。今後、大規模な洋上風力ウィンドファームを設置する場合、沿岸部の送電網の整備状況等によっては、海中ケーブルによる長距離送電を行うことで、比較的大きな接続可能量を持つ上位の送電系統に、あるいは需要地に直接接続する必要がある。新規に地上に送電系統を構築する事の制約などから、洋上と陸上間の複数のポイントで相互に接続する多端子の直流送電システムが想定される。</p>		
2) 目的		
<p>日本において、再生可能エネルギーの導入を拡大するには洋上風力を大規模に設置する必要がある。その設置には電力消費地への長距離送電が課題となる。そのため、高い信頼性を備えかつ低コストで実現する多端子直流送電シ</p>		

システムを開発し、今後の大規模洋上風力の連系拡大・導入拡大・加速に向けた基盤技術を確立する。

本事業では、洋上風力向け多端子直流送電システムと必要なコンポーネントを開発するとともに、大規模洋上風力開発のモデルケースについて可能性検討を行うことを目的とする。

3) 実施内容

上記目的のため、大規模洋上風力発電電力を電力需要地へ送電するため、高信頼性・低廉性を有する多端子直流送電システムの実用化に向けたシステムと要素技術の開発を行う。

研究開発項目① システム開発

大規模洋上風力開発のモデルケースについて、コストや運搬性、メンテナンス性等の効果に基づきシステム検討を行い、システム損失の低減や信頼性の向上等の性能について評価する。

研究開発項目② 要素技術開発

大規模洋上風力向け多端子直流送電システムを構築する場合に新たに必要となるコンポーネントを開発する。

(2) 規模 総事業費（需給）45.1 億円（委託）

(3) 期間 平成 27 年度～31 年度（5 年間）

4. 評価内容

(1) 研究開発の目的・目標・内容

1) 研究開発の目的

① 国内外の周辺動向（規制・政策動向、エネルギー需給動向、社会・経済動向、産業構造、市場動向等）を踏まえているか。また、政策課題や中期目標に掲げる NEDO のミッションに合致しているか。更に、民間活動のみでは改善できない又は公共性や緊急性が高いプロジェクトであるか。

② 本事業を実施しない場合、日本の政策上、産業競争力上又はエネルギー・環境上のリスクは何か。

① 平成26年4月11日に閣議決定されエネルギー基本計画の中で、「再生可能エネルギーを受け入れるための地域内送電線や地域間連系線が必要となることから、まず、風力発電事業者からの送電線利用料による地域内送電線整備に係る投資回収を目指す特別目的会社の育成を図っていく。」と記載があり、平成24年4月の総合資源エネルギー調査会総合部会 電力システム改革専門委員会地域間連系線等の強化に関するマスタープラン研究会 - 中間報告にて直流送電のおける十分な検証を行うべきとの記載がある。

再生可能エネルギーの導入拡大のためには、洋上風力発電の推進が必

要不可欠で、そのためには洋上直流送電システムの開発が必要となる。本事業は、エネルギー自給率の向上、エネルギー源の多様化及び地球温暖化対策の観点から重要であり優先度が高いプロジェクトであるとともに、民間企業単独では実施困難なことから、国家の関与が必要と考えられる。また、我が国の再生可能エネルギー拡大の鍵となる大規模洋上風力の設置に必要な技術であり、プロジェクトを実施する優先度・緊急性は高いと判断出来る。

本事業は、民間企業にとって投資リスクが大きく革新的な技術開発や標準化に向けた取組については政策実施機関かつ中立的な立場であるNEDOが本事業に取り組むことは妥当と考えられる。

- ② 日本での大規模洋上風力発電技術に必要な多端子直流送電技術の発達が遅れることにより、洋上風力市場規模拡大の効果が減少し、建設・運用コストが高くなることから、産業界等の負担が増加する恐れがある。更には、欧米市場における国産技術のビジネス機会を喪失する恐れがある。

また、1GWクラスの洋上風力再生可能エネルギーの導入拡大は、現状の技術制約や経済的な制約により実現が難しく、実際には100～200MWクラスの規模に限定される。また、系統連系の接続保留などの課題から、導入量（導入案件）も、1地域に1案件レベルに限定される。その為、次世代に必要な多端子直流送電技術を適用した大規模風力発電システムの導入が遅れる恐れがある。

2) 研究開発の目標

① アウトプット目標

国内外の競合技術のポジショニング状況を踏まえ、戦略的かつ具体的（定量的）な成果目標の設定がなされているか。また、想定する成果（アウトプット）は、十分に意義があり、市場競争力（コスト、クオリティー、バリュー等）が見込めるものか。

② アウトカム目標

目的の達成による効果予測（アウトカム）は、投じる予算との比較において想定される市場規模または産業インフラ育成の観点から十分であるか。

① アウトプット目標：

1GWクラスの50/60Hz陸上域間連系向け100km長距離直流送電システムのコストは約1000億円/案件である。従い、陸上交直変換所の場合だが、1案件あたり20%のコスト削減により約200億円のコスト削減効果がある。従い、複数の洋上風力発電を接続した大規模電力を洋上で長距離送電することで、比較的大きな接続可能量を持つ上位の送

電系統に直接接続することを可能とするシステムの実証案件にて、陸上送電設備投資費用に比して20%以上の投資額削減を可能とする。

② アウトカム目標：

本事業終了後、日本において、5年間程度を目処に3案件前後×1GWクラスの需要が見込まれる。欧州や米国においては、同規模の案件1、2件が見込まれる。さらに、洋上風力向けだけでなく、陸上を含めて、直流送電の観点から広義の送電技術における波及効果も期待される。例えば、日本だけでも長距離地域間連系線（周波数変換設備(50Hz/60Hz)、北本連系設備、その他の地域間連系線）などへの波及効果が期待できる。全案件に多端子直流系統が適用されれば、全体で2,400億円～4,000億円の経済効果が見込まれる。

3) 研究開発の内容と設定根拠

プロジェクトの全体目標からみて、研究開発項目と内容が論理的に設定されているか。

大規模な洋上風力発電電力を、比較的大きな接続可能量を持つ上位の送電系統まで輸送する事を可能とする長距離送電網を実現するためには、信頼性が高く、また低廉性を有する長距離送電システムの開発が必要である。そのため、長距離送電に適した直流送電システムの開発・実用化に向けた要素技術や小型軽量、メンテナンス頻度が低い次世代型の洋上変電設備の開発・実証を行うことで、今後の大規模洋上風力発電に向けた基盤技術を確立する。

研究開発項目① システム開発

モデルケースの可能性検討、系統計画、集電系設計、洋上風力ポテンシャルの検討、コスト試算、社会受容性調査、制度・ルールの提言を行う。

研究開発項目② 要素技術開発

直流遮断器など、各コンポーネントの開発と試作。発電機、変換装置、海底ケーブル・そのジョイントなどの最適設計・構成手法（含む、ダイナミックラインレーティング、敷設・運搬）の開発を行うと共に、直流の新方式など集電系の開発、風車タワー内昇圧機構、次世代方式の変換器、変圧器、冷却系、制御系の開発を行う。

設定根拠として、洋上風力発電ガイドと欧米の洋上風力プロジェクトの計画・建設・運開・メンテナンスの費用から優先する開発項目を設定した。また、外部意見を集約して、大小開発項目、課題、性能・効果、提案・解決方法の一覧表から、性能・効果の関連性、順序、優先順位付け、調達可能な技術と不可能な技術について検討し、開発項目を設定した。実証試験の具

体的準備としてモデルケースの可能性検討を開発項目に設定したが、プロジェクト全体目標からみて、研究開発項目と内容が理論的に設定されていると考えられる。

(1) 研究開発の目的・目標・内容についての総合的評価

再生可能エネルギーの導入にあたり、本事業で洋上風力発電直流送電技術を確立することにより、太陽光発電と比べ導入量が圧倒的に小さい風力発電の拡大が図れること、風力発電の導入ポテンシャルに対する現状の風力発電接続可能量とのギャップを埋める事に寄与することから、本事業の目的・目標・内容については妥当と考えられる。

(2) 研究開発の実施方式について

1) 研究開発の実施体制・運営方式

成果目標を効果的・効率的に達成するうえで、適切な実施体制の想定はあるか。また、外部有識者による委員会やステージゲート方式等を検討しているか。

電力系統（直流送電）分野と直流送電機器に関して日本を代表する大学、企業、電力会社の参加が想定され、産学が一体となり、また、その要素技術開発とシステム開発が一体となった体制が想定される。

また、要素技術開発とシステム開発とを相互フィードバックして一体開発するためステアリング委員会を設置する計画である。あわせて、モデルケースの可能性検討のためには、電力会社と風力発電事業者から助言頂く計画としている。

(2) 研究開発の実施方式についての総合的評価

本事業の実施体制、運営マネジメント方式は、本事業を実施する背景を十分反映していると考えられる。

特許、論文、外部発表等リスト

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	(株)日立製作所	P2016-089701	国内	2016/4/27	出願	多端子送電システム	吉原徹、他
2	(株)日立製作所	P2019-098515	国内	2016/5/17	出願	電力変換装置、発電装置、及び発電システム	川添裕成、他
3	(株)日立製作所	P2016-143415	国内	2016/7/21	出願	DC-DC コンバータ及びその運転方法	川添裕成、他
4	(株)日立製作所	P2016-143427	国内	2016/7/21	出願	多端子送電システム	吉原徹、他
5	(株)東芝	P2016-244414	国内	2016/12/16	出願	ガス絶縁開閉装置	網田芳明他
6	(株)東芝	JP2016/087587	国際	2016/12/16	出願	ガス絶縁開閉装置	金谷和長他
7	(株)東芝	JP2016/087348	国際	2016/12/16	出願	直流遮断器の遮断試験方法	橋本優平他
8	(株)日立製作所	P2016-254775	国内	2016/12/28	出願	電力変換器、および、これを用いた風力発電システム	畠山智行、他
9	(株)日立製作所	P2016-254778	国内	2016/12/28	出願	直流送電システム、および、その制御装置	吉原徹、他
10	(株)日立製作所	P2017-089511	国内	2017/4/28	出願	変圧器および電力変換システム	畠山智行、他
11	(株)東芝	JP2017/022322	国際	2017/6/16	出願	直流電流遮断装置	金谷和長他

(※Patent Cooperation Treaty: 特許協力条約)

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	N. Kimura, , Hong Kong	大阪工業大学	"Offshore wind energy with HVDC transmission: Recent development in Japan"	Proceedings of 10th International Conference on Advances in Power System Control, Operation & Management (APSCOM 2015), 2015, pp. 1-5. doi: 10.1049/ic.2015.0232	有	2015/11/11
2	Ken-ichiro Yamashita, Shoji Nishikata	東京電機大学	A Simulation Model of a Self-Excited Three-Phase Synchronous	The 23rd International Symposium on Power Electronics, Electrical	有	2016/6/24

			Generator for Wind Turbine Generators	Drives, Automation and Motion (SPEEDAM) 1365-1370		
3	Shoji Nishikata, Fujio Tatsuta	東京電機大学	Basic Characteristics of Synchronous-Compensator-Commutated Inverter (SCI) / HVDC System for Wind Power Plants with Series-Connected Wind Turbine Generators	The 15th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants, 707-711	有	2016/11/15
4	F. Tatsuta, B. Liu and S. Nishikata	東京電機大学	A Simulation Method for Dynamic Performances of MW class Wind Turbine/Generator Using Laboratory-Size Simulator	The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2016) 1-6	有	2016/11/16
5	F. Tatsuta, and S. Nishikata	東京電機大学	Studies on Characteristics of PMSGs Used for Current-Source Type Wind Farm Composed of Series-connected Wind Generators	The 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2017) 1-6 (pdf)	有	2017/8/13
6	Ken-ichiro Yamashita, Shoji Nishikata	東京電機大学	Steady-State Characteristics of Self-Excited Synchronous Generators with Damper Windings for Current-Source Type Wind Farm	The 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2017) 1-6 (pdf)	有	2017/8/13
7	Akira Daibo, Yoshimitsu Niwa, Naoki Asari, Wataru Sakaguchi, Kazuyasu Takimoto, Kazuhisa Kanaya and Takahiro Ishiguro	(株)東芝	High-Speed Current Interruption Performance of Hybrid DCCB for HVDC Transmission System	4th International Conference on Electric Power equipment-Switching technology	有	2017/10/22

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Hideo Tanaka	古河電気工業(株)	Next Generation Offshore HVDC System R&D Project IN JAPAN	Cigre SC B1 Discussion Group Meeting	2016/8/25
2	栗田 直幸	(株)日立製作所	絶縁型 DC-DC コンバータ用 500 kVA アモルファス高周波変圧器の試作と損失特性	電気学会 A 部門 マグネティックス研究会	2017/2/23
3	村田 義直	住友電気工業(株)	大容量洋上ウィンドファームの最適な系統接続方法の定量的評価手法の検討	平成 29 年電気学会全国大会	2017/3/15
4	島山 智行	(株)日立製作所	絶縁型 DC-DC コンバータ用 500 kVA アモルファス高周波変圧器の巻線構成に起因する特性比較	平成 29 年電気学会全国大会	2017/3/15
5	長谷川 隆太	(株)東芝	直流送電向けハイブリッド直流遮断器の原理検証	平成 29 年電気学会全国大会	2017/3/15
6	瀧本 和靖	(株)東芝	直流送電向けハイブリッド直流遮断器の半導体遮断性能向上検討	平成 29 年電気学会全国大会	2017/3/15
7	丹羽 芳充	(株)東芝	直流送電向けハイブリッド直流遮断器の真空遮断部の電流遮断性能	平成 29 年電気学会全国大会	2017/3/15
8	橋本 優平	(株)東芝	直流送電向けハイブリッド直流遮断器の遮断試験法の開発	平成 29 年電気学会全国大会	2017/3/15
9	西方 正司	東京電機大学	洋上ウィンドファームの新しい構成法-直列接続方式風力発電システムの提案-	平成 29 年電気学会全国大会	2017/3/16
10	吉原 徹	(株)日立製作所	洋上風力連系直流送電システムの系統事故時運転の基礎検討	平成 29 年電気学会全国大会	2017/3/17
11	伊藤 政人	(株)大林組	スカートサクシヨン基礎の水平支持特性におけるサクシヨンの影響	第 52 回地盤工学研究発表会	2017/7/14
12	吉原 徹	(株)日立製作所	洋上直流送電におけるブレーキングチョッパ制御の基礎検討	電気学会 B 部門大会	2017/9/6

(b) 新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	(株)日立製作所	「次世代洋上直流送電システム開発事業」への参画について	(株)日立製作所ニュースリリース	2015/6/30
2	東京電力(株)	「次世代洋上直流送電システム開発事業」への参画について	東京電力(株)プレスリリース	2015/6/30
3	東京電機大学	西方教授らの研究プロジェクトが「次世代洋上直流送電システム開発事業」に採択	東京電機大学プレスリリース	2015/6/30
4	(株)東芝	「次世代洋上直流送電システム」の共同開発事業を開始	(株)東芝プレスリリース	2015/6/30
5	古河電気工業(株)	次世代の洋上直流送電システム開発事業に参画 ~洋上発電電力を効率的に送電~	古河電気工業(株)プレスリリース	2015/7/2