

# 「次世代洋上直流送電システム開発事業」

## 事後評価報告書（案）概要

### 目 次

分科会委員名簿 .....	1
評価概要（案） .....	2
評点結果 .....	5

## はじめに

本書は、NEDO技術委員・技術委員会等規程第32条に基づき研究評価委員会において設置された「次世代洋上直流送電システム開発事業」(事後評価)の研究評価委員会分科会(2020年9月3日)において策定した評価報告書(案)の概要であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第33条の規定に基づき、第63回研究評価委員会(2021年1月8日)にて、その評価結果について報告するものである。

2021年1月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会「次世代洋上直流送電システム開発事業」  
分科会  
(事後評価)

分科会長 石亀 篤司

「次世代洋上直流送電システム開発事業」

(事後評価)

分科会委員名簿

(2020年9月現在)

	氏名	所属、役職
分科 会長	いしがめ あつし 石亀 篤司	大阪府立大学 大学院 工学研究科 電気・情報系専攻 電気情報システム工学分野 教授
分科 会長 代理	ふくだ ひさし 福田 寿	株式会社エナリス ビジネス推進本部 需給マネジメント部 部長
委員	いとう たけし 伊藤 健	株式会社ユーラスエナジーホールディングス 国内ユニット担当役員補佐／洋上事業開発部長
	なかにし ようすけ 中西 要祐	早稲田大学 大学院 環境・エネルギー研究科 教授
	はすみ ともひろ 蓮見 知弘	みずほ情報総研株式会社 グローバルイノベーション&エネルギー部 エネルギービジネスチーム シニアコンサルタント
	はら りょういち 原 亮一	北海道大学 大学院 情報科学研究院 准教授
	ひらせ ゆうこ 平瀬 祐子	東洋大学 理工学部 電気電子情報工学科 准教授

敬称略、五十音順

# 「次世代洋上直流送電システム開発事業」(事後評価)

## 評価概要(案)

### 1. 総合評価

洋上風力の開発ポテンシャルは陸上風力と比べて大きく、水深が深い立地での直流送電システムの事業化が世界的にも期待されている。

反面、事業リスクが大きくコスト削減への要求が大きい中、コスト削減に絞った研究開発目標に対して、大学、公的研究機関、民間企業といった適切な実施者と適切な計画・マネジメントの下で、全てにおいて最終目標が達成され、特に直流遮断器やケーブルなどの要素技術の開発においては、世界最高水準の新たな技術の開発が成されたことから、費用対効果の高い研究開発事業であったと考える。

また、将来の事業展開を見据えてマルチベンダー化を志向した体制で実施されているなど、定量的にも定性的にも、非常に良好に推進されたと評価できる。

今後も、世界市場をにらんだ仕様標準化への取組や、成果を広く社会に周知する情報発信などを積極的に推進することが期待され、海外で事業を獲得するためにも、本事業の研究開発成果を実用化・事業化する取組をさらに加速することが望まれる。

また、技術的な信頼性を高めていくためには、まだ検討の余地がある部分も洗い出されてきており、各項目で信頼性を裏付けるデータの取得が求められる。後継事業の場において実機シミュレーションを通して、さらに拡張性のある技術開発を進めていただきたい。

### 2. 各論

#### 2. 1 事業の位置付け・必要性について

我が国のエネルギー基本計画の政策で謳われている、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り、洋上直流送電システムの開発は、資源の少ない我が国において、必要不可欠な技術であると共に、再生可能エネルギーの系統連系促進や災害激甚化に対応する送電設備技術としても、将来の日本に不可欠な技術といえる。

また、世界的にも技術開発が競争的に実施されているところであり、本事業開始後に制定された第5次エネルギー基本計画ならびに海域利用促進法の方針とも一致した事業であることから、先見的に実施できたことは意義深いと考える。

さらに、洋上風力発電の実証が立ちあがっていく段階において、当該技術の重要性に着目し、欧州等の研究開発事業の動向も見ながら、本事業の必要性を見極め、立ち上げた点も評価に値する。

今回の事業を通して、将来のコストの低減や国際競争力の観点から、高度なマネジメントが要求されるマルチベンダー化の取組を推進し、完遂したことも合わせて評価をしたい。

## 2. 2 研究開発マネジメントについて

実施体制はシステムを構築するメーカー各社、ユーザーである一般送配電事業者、学術的な見地から大学・研究所が参画しており、役割分担を含めて機能的に構成されており、妥当と評価できる。特にマルチベンダーでの取り組みに向けて、情報の公開と秘匿を適切に実施できる体制をとられたことは高く評価できる。

また、コスト削減割合 20%という明確で挑戦的な研究開発目標が、システム開発、要素技術開発の双方において実現・達成されていることは高く評価でき、特に 29%のコスト削減となる洋上ウインドファームの集電系統と送電モデルを構築できたことは、妥当なスケジュールと研究開発費で実施したマネジメント計画と進捗管理の大きな成果であると考えられる。

さらには、メーカー各社の研究成果の取扱い方法としてのオープン・クローズ戦略への対応や、IEC への働きかけなど、国内はもとより、海外メーカーとの競争に打ち勝つための基盤を研究開発と同時に推進してきた点も高い成果であると評価できる。

今後は、時間の経過とともに技術動向や欧州等の取り組み動向も変化することが想定されるため、変化を確認しつつ、国際競争力を確保する研究開発や知財開発を更に強化していくこと、また、実際の発電事業を推進する事業者からの意見も取り入れることができるような実施体制の構築についても検討いただきたい。

さらに、現実的かつ具体的なルートを想定した費用対効果や技術の実現可能性など、出口戦略を意識した継続した議論も期待したい。

## 2. 3 研究開発成果について

要素技術開発について、個々の要素において低コスト・高信頼性に資する新技術を開発しただけではなく、特に直流遮断器やケーブル、洋上プラットフォーム基礎設計ではコストや性能において、世界最高水準の新たな技術の開発が成されており、投入された研究開発費に見合った成果が得られ、海外の競合技術と比較して大きな優位性を持つと考えられる。システム開発についても、最終目標のコスト削減率を大きく上回る結果を達成しており、大いに評価される。

また、対外的な発表や特許取得に関する取り組みも、積極的かつ適切に行われていると評価できる。

さらには、異メーカー間での接続が可能となる「多端子 HVDC の制御・保護の標準仕様書」の作成ならびに IEC TC115 と調整を開始し、国際標準化への一歩を踏み出しており、研究成果が将来における市場の拡大や創造に大いに貢献すると期待できる。

一方、今回の成果は、限定されたシステム構成での検討に限られていることから、今後は、将来の拡張にも対応が可能となるシステム開発、要素技術開発を目指すとともに、複数のモデルケースでの検討を期待したい。

また、成果の普及に関しても、これまで以上に幅広い事業者に向けた情報発信を積極的、継続的に行うことによって普及拡大を効率的に進める活動をお願いしたい。

## 2. 4 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

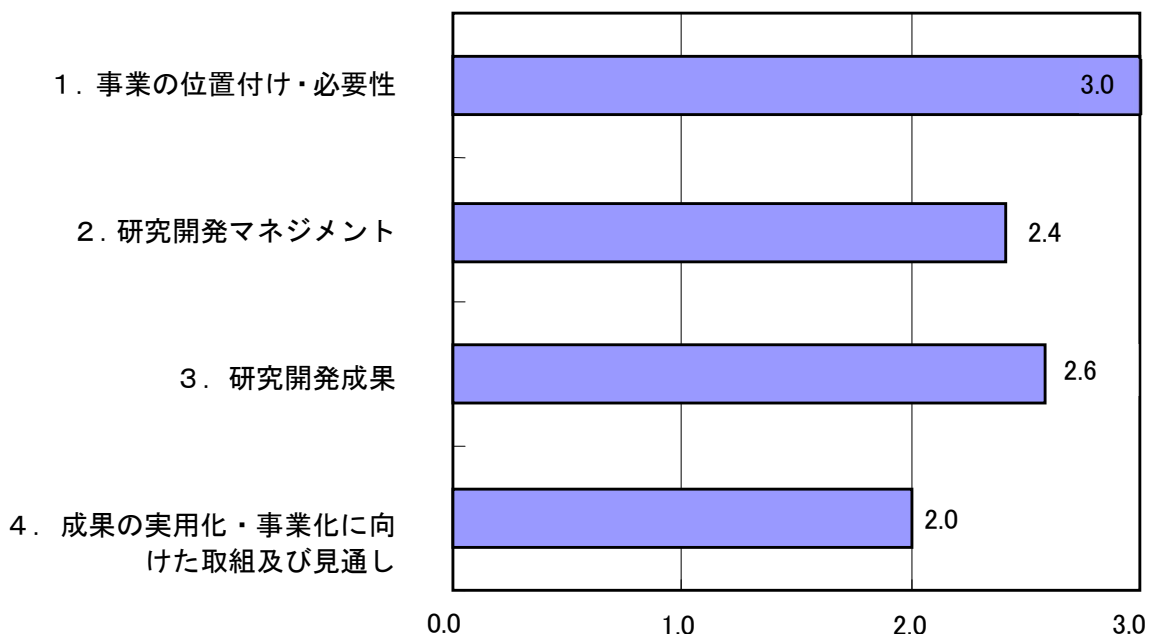
多端子直流送電は世界の各国が開発を競い合っている重要なテーマであり、本事業で得られた要素技術は既に実用化段階に来ていることから、諸外国の技術と比較しても十分な優位性を持つと思われる。

システム制御技術の IEC 国際標準化に向けた取り組みや、要素技術での高度な遮断器・ケーブル・洋上プラットフォーム基礎設計技術の成果が市場での優位性を確保できる見通しであり、また、実用化に向けたシナリオにおいては積極的に導入に向けたマイルストーンが引かれており、業界および企業活動に大きく貢献することが期待される。

今後に向けて、本事業で研究開発を行う HVDC はそれ単体で使用するものではないため、陸上 AC 系統と海洋 DC 系統の協調安定性を事前検討されることを期待する。

また、本事業の成果は、大規模化された場合に特に効果を持つてくると予想されるため、海外での事業展開とともに、国内での事業展開が大規模に図れるように、国や自治体、ユーザーに対してさらにスピード感を持って積極的に働きかける戦略を練っていくことが望まれる。

評点結果〔プロジェクト全体〕



評価項目	平均値	素点 (注)						
		A	A	A	A	A	A	A
1. 事業の位置付け・必要性	3.0	A	A	A	A	A	A	A
2. 研究開発マネジメント	2.4	B	A	A	B	B	A	B
3. 研究開発成果	2.6	A	A	B	B	A	A	B
4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し	2.0	B	B	B	B	A	B	C

(注) 素点：各委員の評価。平均値は A=3、B=2、C=1、D=0 とし事務局が数値に換算し算出。

〈判定基準〉

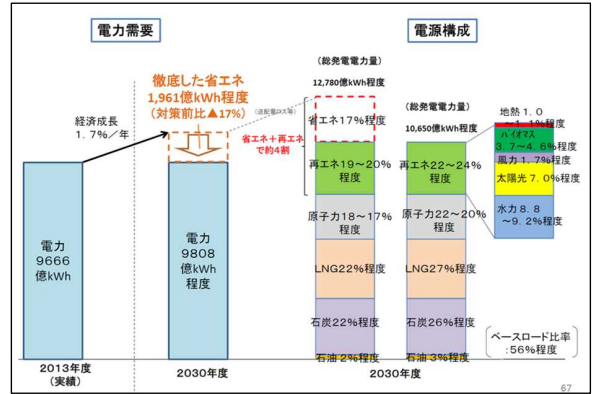
- |                    |                              |
|--------------------|------------------------------|
| 1. 事業の位置付け・必要性について | 3. 研究開発成果について                |
| ・非常に重要 →A          | ・非常によい →A                    |
| ・重要 →B             | ・よい →B                       |
| ・概ね妥当 →C           | ・概ね妥当 →C                     |
| ・妥当性がない、又は失われた →D  | ・妥当とはいえない →D                 |
| 2. 研究開発マネジメントについて  | 4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて |
| ・非常によい →A          | ・明確 →A                       |
| ・よい →B             | ・妥当 →B                       |
| ・概ね適切 →C           | ・概ね妥当 →C                     |
| ・適切とはいえない →D       | ・見通しが不明 →D                   |

1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

◆ 事業実施の背景と事業の目的



2030年度の電力の需給構造



出典：「長期エネルギー需給見通し」、経済産業省、2015年7月

- エネルギーの安定的な確保と温室効果ガス削減に向けて、再生可能エネルギーの導入拡大は重要
- 長期エネルギー需給見通しの早期実現のみならず、2030年以降も再エネを導入し続けることが重要
- 風力発電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では導入が加速
- 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**

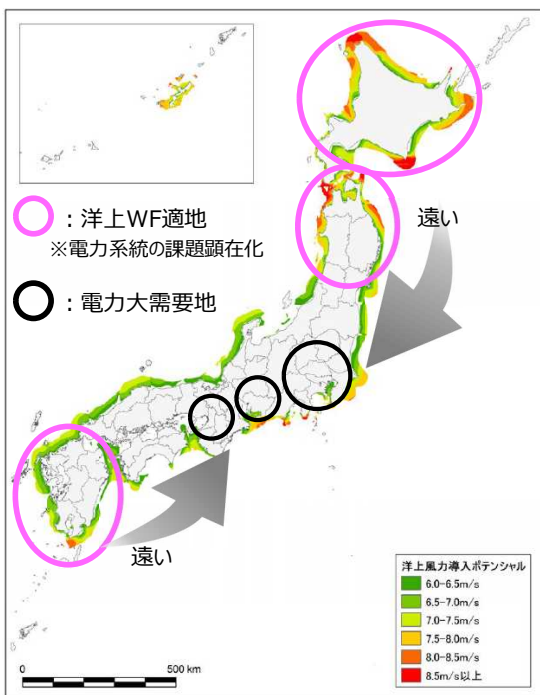
洋上風力発電の優良なポテンシャルを有効活用した  
大規模な洋上ウインドファーム (WF) 導入が必要

公開

1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

◆ 事業実施の背景と事業の目的

➤ 洋上風力発電の導入ポテンシャル



- 開発不可条件を控除した洋上風力のポテンシャルは **約1,380百万kW**と推計
- 離岸距離が大きくなると水深が大きくなるため沿岸に带状に分布
- 電力大需要地から遠方に多くのポテンシャルが存在 (北海道・東北・九州で全体の70%)

ポテンシャル推計における開発不可条件

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

出典：「平成25年度 再生可能エネルギーに関するソーニング基礎情報整備報告書」(環境省、2014年8月)にNEDO追記

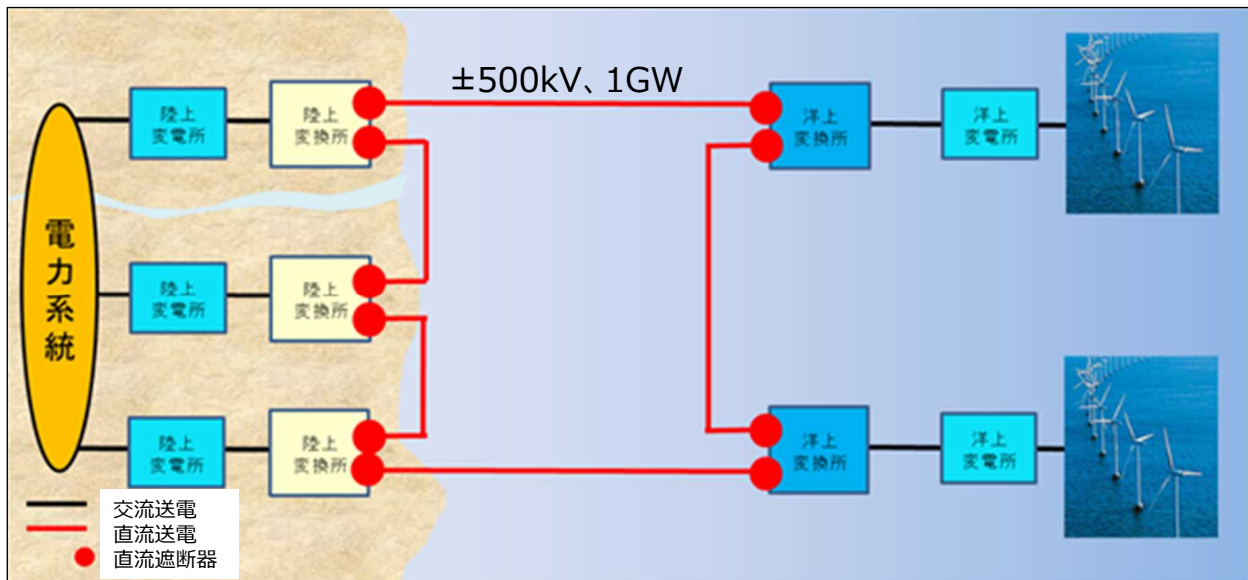


## 1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

## ◆ 事業実施の背景と事業の目的

## ➤ 事業の目的

- 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）を有し、**マルチベンダ化にも対応した多端子直流送電システムと必要な要素技術**を開発
- 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の確立が目的



## 1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

## ◆ 政策的位置付け

**第5次エネルギー基本計画**（'18年7月3日に閣議決定）

- ・2030年度の総発電電力量のうち再生可能エネルギーの割合は22～24%程度、風力発電の導入目標は10GW（うち、洋上風力約1GW）
- ・導入目標である10GWの風力発電量を達成するためには、陸上に加え、制約の多い洋上風力発電の導入拡大は不可欠
- ・欧州の洋上風力発電に関する取組も参考にしつつ、地域との共生を図る海域利用のルール整備や**系統制約**、基地港湾への対応、関連手続きの迅速化と価格入札も組み合わせた**洋上風力発電の導入促進策**を講じていく。

上記、同様の内容が、「再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 中間整理（第3次）（2019年1月）」及び、「第3期海洋基本計画（2018年7月）」にも記載されている。

**海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律**

（'18年11月に成立 '19年4月施行）

- ・上記基本計画の目標達成のため、利用ルールを整備し、海洋再生可能エネルギーを円滑に導入できる環境を整備することで、再生可能エネルギーの最大限の導入拡大を図る。（再エネ海域利用法）

⇒各地で急速に洋上風力発電の計画が立ち上がることが見込まれる。

## 1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

## ◆政策的位置付け

- 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**
- 洋上風力発電の導入拡大に向けての技術開発、インフラ整備などの推進が必要
- 大容量を長距離送電可能な送電システムを開発する本事業の果たす意義大

## エネルギー基本計画(2014年4月)

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。

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。

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。

## 地球温暖化対策計画(2016年5月)

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。

## 1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

## ◆政策的位置付け

## 海洋基本計画(2013年4月)

第2部 海洋に関する施策に関し、政府が総合的かつ計画的に講ずべき施策

## 1 海洋資源の開発及び利用の推進

## (2) 海洋再生可能エネルギーの利用促進

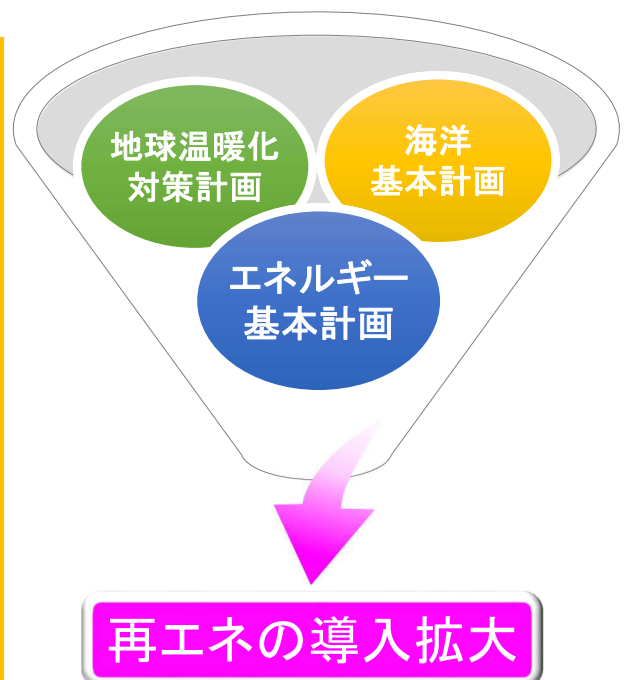
- 銚子沖及び北九州沖で着床式洋上風力発電システムの実証研究を実施
- 長崎県沖で浮体式洋上風力発電システムの実証研究を実施
- 福島県沖で浮体式洋上ウインドファームの実証研究を実施
- 浮体式洋上風力発電施設について、平成25年までに安全ガイドラインを策定するとともに国際標準化策定を主導

## 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。



エネルギー基本計画を始めとした上位政策の  
目標達成に本事業は大きく寄与

1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

◆技術戦略上の位置付け

- 洋上風力発電の導入拡大にあたり、効率的に送電できる高圧直流送電（HVDC）が重要である。
- また、経済性及び信頼性を確保する要素技術の開発が必要となる。
- 我が国の周辺環境・電力システムに適した送電システムを開発する必要がある。

<p>NEDO再生可能エネルギー技術白書（第2版）</p>	<p>2014年 2月</p>	<p>3章 風力発電 3.4.3 洋上風車にかかる技術開発動向 (3)系統連系に係る技術開発動向 洋上風力の系統連系に当たっては、海底ケーブルに加え、洋上変電所や、高圧直流送電（HVDC）の導入が重要となる。 洋上風力のコスト構造の中で、ケーブルおよび敷設に掛かるコストの割合は大きく、量産化による海底ケーブル自体の低コスト化や、低コスト敷設技術が必要とされている。また、洋上ウインドファームの不具合の原因は海底ケーブルの損傷などに起因するものが多いため、海底ケーブルの保護も含め、適切な敷設工事を実施する必要がある。</p>
<p>再生可能エネルギー導入に係る電力系統対策動向調査（NEDO成果報告書 委託先：MRI）</p>	<p>2015年 2月</p>	<p>2.直流送電技術の技術開発動向 2.2技術開発要素の抽出  2.1で整理した技術開発動向から、今後日本における洋上風力発電の導入に際して、今後必要とされる技術開発要素として図に示すような技術開発要素が抽出される。</p> <div data-bbox="845 638 1430 1048"> <p>既存系統との接続 - システム化技術開発 -</p> <p>欧州を中心に進められている洋上風力発電用送電技術としての直流送電の各種要素技術が進められているが、これらの技術を日本の電力系統に適用するには以下のような点に留意して、既存電力系統との接続に関わる開発が必要となる</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 洋上風力の適地の選定と、同地域から接続可能な既存電力系統に接続するための洋上送電系統の設計（Topology）</li> <li>✓ 日本の海洋環境に適した洋上風力発電開発に関するプラットフォーム</li> <li>✓ 異なるメーカー方式による技術の相互連携を可能とする機器・技術間のインターオペラビリティ</li> </ul> <p>- 要素技術開発 -</p> <p><b>自動式交直変換装置</b> 自動式変換器のさらなる大容量化と低損失化を行うため、モジュールマルチレベル変換器（MMC, Modular Multilevel Converter）と呼ばれる新たな自動式変換回路が提案され開発が進められている</p> <p><b>直流集電</b> 各発電機の出力を直列接続するなどして高電圧化しながら集約する方式（高圧直流による集電方式）と、各発電機の出力を低電圧で集約してから送電電圧まで昇圧する方式（低圧直流による集電方式）の開発が進められている</p> <p><b>直流遮断器</b> 自動式直流送電において、直流系統の事故は運転の継続が困難になる過剰な事故の1つであり、事故区間を切り離すための要素技術として、直流遮断器の開発が進められている</p> <p><b>多端子送電システム</b> 多地点の洋上風力発電を、電圧形の自動式変換器を用いて連系する場合には、複数の交直変換器を直列で接続した多端子直流送電システムを構成し、制御するための開発が進められている</p> </div>

1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

◆他事業との関係

- NEDOでは、洋上風力発電の実用化に向けた様々な技術開発を行っており、着床式洋上風力発電については実証事業を実施
- 並行して洋上風力の大規模導入に向けた我が国へ適用可能な最適な送電技術を開発することも必要であり本事業がその位置づけ

年度	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
調査	FS調査											
実証研究		洋上風況観測システム実証研究（銚子・北九州）										
		洋上風力発電システム実証研究（銚子・北九州）										
研究開発		風車大型化						次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究（～2022年度）				
		超大型風力発電システム技術研究開発						洋上風況観測システム実証研究（洋上風況マップ）				
導入支援		洋上ウインドファームFS						洋上風況観測技術研究開発			洋上風力発電低コスト施工技術開発（～2022年度）	
								着床式洋上ウインドファーム開発支援事業（～2022年度）			地域共存型洋上ウインドファーム基礎調査	
系統技術							次世代洋上直流送電システム開発事業					

## 1. 事業の位置付け・必要性 (2) NEDOの事業としての妥当性

## ◆NEDOが関与する意義



- 世界で実用化されていない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システム開発と要素技術開発を協調して取り組むことが必要
- マルチベンダ化に向けた取組みには競合企業の参画が必要
- 再生可能エネルギーの持続的な導入推進のためには、国家主導で競合企業も含めた産学連携での開発体制が必要

**NEDOが持つマネジメント実績を活かして、産学官体制で推進すべき事業**

## 2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

## ◆事業の目標

**研究開発項目Ⅰ.システム開発**

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**

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。

2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

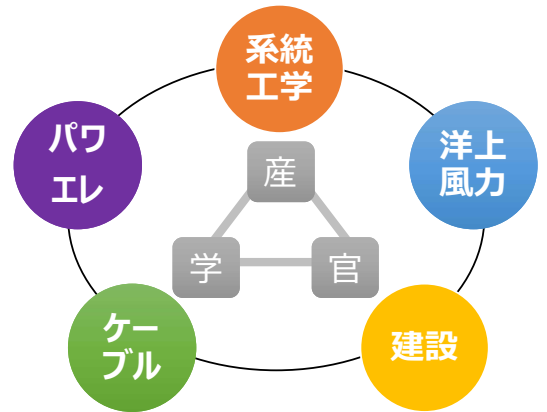
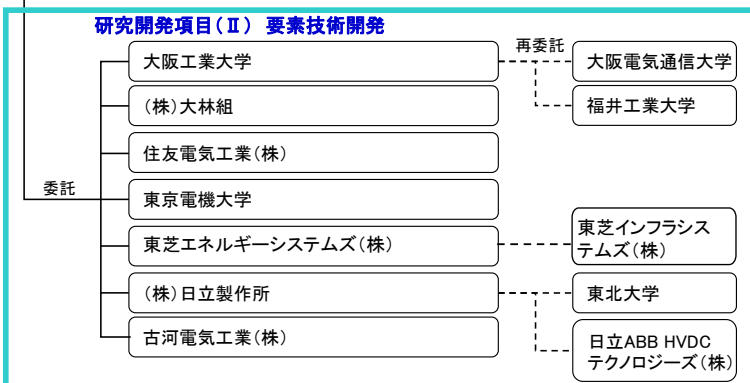
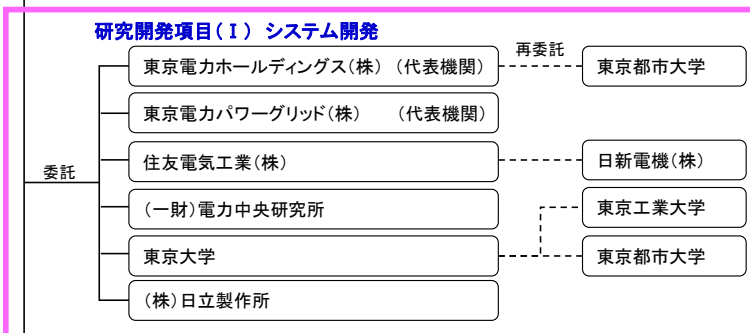
◆研究開発目標と根拠

研究開発項目	研究開発目標	根拠
I.システム開発	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 <b>コスト削減割合20%以上</b> の導入モデルケースを完成する。	日本において、大規模な洋上風力発電が導入された場合、信頼性が高く、安価な多端子洋上直流送電システムが必要である。事前の調査及び有識者へのヒヤリングにより、技術的な観点から直流送電システムは既存の交流送電システムに対して、最大で20%程度のコスト低減の可能性が示されたこと及び経営的な観点から新しいシステムを採用するには、最小で20%程度のコストメリットが必要と示されたことから、左記目標を設定した。
II.要素技術開発	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 <b>コスト削減割合20%以上</b> へ貢献する。	信頼性が高く、安価な多端子洋上直流送電システムを実現するためには、システムを構成する様々な要素技術を新たに開発する必要がある。 本項目は、非常に高い目標（システムとしてのコスト削減割合20%）を達成するために必要な様々な要素技術について、稼働率（信頼性）等を含めたコスト試算が可能なように、設計、試作、性能試験を行うものである。 直流遮断器、ケーブル、洋上架台等、様々な特性を持つ要素技術を組み合わせてシステムを構築するため、システム開発への貢献に絞り込んで、目標を設定した。

2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性

◆研究開発の実施体制

NEDO



- 関連分野に精通した、競合企業を含む事業者が参加し、システム開発 と 要素技術開発が協調して開発を推進
- 多端子洋上直流送電システムの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に選任

## 2. 研究開発マネジメント (2) 研究開発計画の妥当性

## ◆プロジェクト費用

- 5年間の総予算額は約47億円

## 研究開発項目ごとの費用

単位：百万円

年度	2015 (H27)	2016 (H28)	2017 (H29)	2018 (H30)	2019 (H31)
研究開発項目 (I) システム開発	449	253	102	158	109
研究開発項目 (II) 要素技術開発	592	1,229	847 (309)	655	304
※ ( ) はうち、開発促進財 源 (加速予算)					
合計	1,041	1,482	949	813	413

## 2. 研究開発マネジメント (4) 研究開発の進捗管理の妥当性

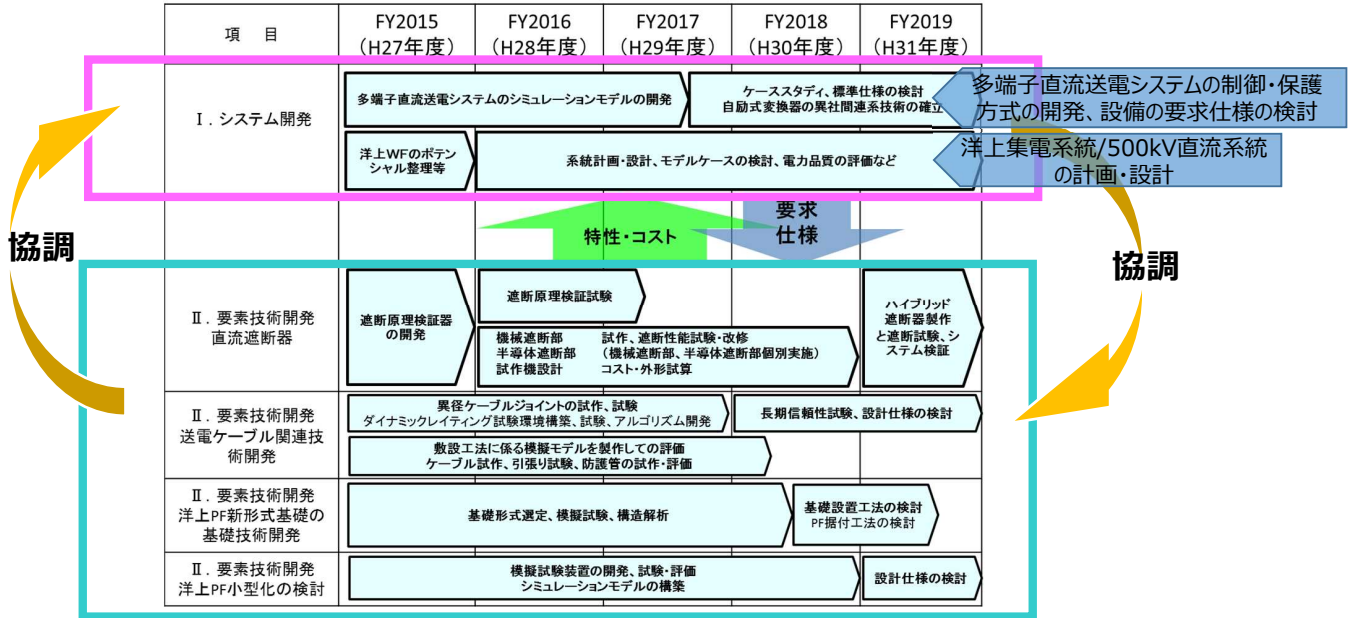
## ◆開発促進財源投入実績

件名	年度 (年度)	金額 (百万円)	目的	成果
ハイブリッド直 流遮断器 (半 導体遮断部及 び機械遮断 部) 40kVス ケールモデル試 作及び評価	2016~ 2017	309	2015年度までに、世界に先駆けて、半 導体を用いた高速遮断と通電時の低損 失性を実現する原理検証に成功した。 本技術は、海外勢と比較してより低損 失かつ高速遮断が可能なDCCBの実現 につながる成果である。基礎技術の部分 で先行したものの、海外の追い上げも激 しいことから、スケールモデルの開発を行い、 早期実用化を目指す。	本追加予算により実機に近い40kVスケ ールモデルの試作及び評価を実施できた。ス ケールモデルを開発したことにより、シミュ レーションでは確認できないメカニカルな高 速動作やハイブリッド直流遮断器としての 大電流遮断の評価を行い、早期実用化 の目処を立てることができた。

2. 研究開発マネジメント (2) 研究開発計画の妥当性

◆研究開発のスケジュール

- システム開発は、4年目までに多端子洋上直流送電システムのモデルケース（プロトタイプ）を構築し、要素技術開発の直流遮断器、ケーブル、洋上PF等のデータを得て改良し、5年目に完成した。また、システム制御・保護技術の確立、システム標準仕様書を作成した。
- 要素技術開発では、直流遮断器、ケーブル、洋上PF等について、3年目までに試作・評価試験を完了した。4年目以降は個別に改良するとともに、それぞれシステム開発にデータを提供し、コスト20%以上低減したモデルケース構築に貢献した。



3. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

◆研究開発項目毎の目標と達成状況

開発成果と達成度			
主な内容	最終目標	成果	達成度
システム開発	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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本海域の洋上風力適地から大規模洋上ウインドファームの想定地を選定。交流設備での設計に比べて、目標を大幅に上回る29%のコスト減となる洋上ウインドファームの集電系統と送電系統モデルを構築した。</li> <li>異メーカー同士での自励式多端子直流送電システムの制御・保護方式などの確立に向けたモデル解析を実施し、標準仕様書を作成するとともに、2019年度中にNEDOウェブサイトで公開した。</li> <li>標準仕様書案の英訳を作成し、IEC TC115と調整を開始した。</li> </ul>	◎
要素技術開発	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"> <li>①ハイブリッド型直流遮断器の試作、②ケーブルの異径ジョイント・ダイナミックレイティング技術、③バンドル敷設工法、④サクションスカートによる洋上プラットフォーム基礎設計などの低コスト・高信頼に資する新技術を開発した。</li> <li>特に、①ハイブリッド型直流遮断器及び④洋上プラットフォーム基礎設計は目標を大幅に上回る成果を達成。</li> </ul>	◎

◎ 大きく上回って達成、○ 達成、△ 一部達成、× 未達

## 3. 研究開発成果 (3) 知的財産権等の確保に向けた取組

## ◆知的財産権の確保に向けた取組

## 戦略に沿った具体的取組

特許出願については、実用化・事業化を想定し、戦略的に特許化が必要と判断したものは出願するとともに、国内出願、海外出願についても、市場動向や費用対効果等を踏まえつつ選択。

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	計
特許出願（うち外国出願）	－	9 (2)	8 (2)	8 (2)	19 (10)	44 (16)

※2020年7月30日現在

## 3. 研究開発成果 (2) 成果の普及

## ◆成果の普及

学会発表等については、特許の想定や機密性の高い情報の取り扱い等を考慮しつつ、成果普及の観点から情報発信を実施。

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	計
学会発表、論文 (査読付)	1 (1)	14 (3)	17 (3)	20 (0)	31 (3)	83 (10)
講演、その他	5	1	2	5	5	18

※2020年7月30日現在



概 要

		最終更新日	2020年7月30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 (2020年5月現在) スマートコミュニティ部 飯原 瑛梨 (2020年4月～現在) スマートコミュニティ部 横溝 拓也 (2019年4月～現在) スマートコミュニティ部 加藤 寛 (2018年7月～現在) スマートコミュニティ部 廣瀬 圭一 (2018年7月～現在) スマートコミュニティ部 前野 武史 (2017年10月～現在) スマートコミュニティ部 小沼 貴紀 (2017年12月～2020年3月) スマートコミュニティ部 吉川 信明 (2016年4月～2018年6月) スマートコミュニティ部 日向野 誠 (2016年4月～2017年11月) スマートコミュニティ部 東 太郎 (2017年4月～2019年3月) スマートコミュニティ部 近藤 あさ美 (2016年7月～2019年1月) 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立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</p>			

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ことが要因として挙げられる。

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、異メーカー間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はなく、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、当初の計画と目標を達成した。

2. 研究開発マネジメントについて

事業の目標	<p><b>(I) システム開発</b></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&amp;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</p>
-------	--

	<p>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><b>(Ⅱ)要素技術開発</b>  <b>【最終目標】</b> (2019 年度末 (平成 31 年度末))  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。  <b>【中間目標】</b> (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	2015	2016	2017	2018	2019	
	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	2015	2016	2017	2018	2019	総額
	一般会計						
	特別会計 (需給)	1,041	1,482	640	813	413	4,389
	開発成果促進財源	—	—	309	—	—	309
	総予算額	1,041	1,482	949	813	413	4,698
	(委託)	1,041	1,482	949	813	413	4,698
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					
	プロジェクトリーダー	—					
	プロジェクトマネージャー	スマートコミュニティ部 加藤 寛 (2018 年 7 月～現在) スマートコミュニティ部 吉川 信明 (2016 年 4 月～2018 年 6 月) 新エネルギー部 吉川 信明 (2015 年 6 月～2016 年 3 月)					
	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、東芝エネルギーシステムズ(株)、(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、その中期的な位置づけから近々の社会・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た。						
中間評価結果への対応	平成 29 年度の間評の際に、下記、4 点の指摘を受けそれぞれ対応する箇所の見直しを行った。 <b>【1】</b> システム開発と要素技術開発の連携が現時点では弱いと感じられるため、より緊密な連携や相互の成果のフィードバックを望む。 ⇒これまでもシステム開発と要素技術開発を統合する委員会を年 2 回開催し、システム開発 WG と要素技術開発 WG (それぞれ年 4 回開催) に他方の WG メンバーも参加する						

	<p>等して情報共有するとともに、必要に応じて、事業者間の打ち合わせを実施。さらなる連携強化のため、NEDO が主体となって事業者間で直接議論する場を設け、事業目標の達成に向けて、より緊密な関係を構築し、相互の成果のフィードバックを行う。</p> <p>【2】システム開発での経済性評価については、直流連系より交流連系が経済的に優位といった結果となっており、コスト高の要因分析やコスト計算データの見直しを含めた再検討が必要である。</p> <p>⇒分科会時点（平成 29 年 10 月）までに得られた情報で試算した経済性評価では、詳細な設備構成や送電ロスについてまだ考慮していない部分があり、要素技術開発の成果によるコスト削減効果も反映していない暫定の計算結果であったため、直流連系より交流連系が経済的に優位であったが、コスト高の要因分析やコスト削減に向けた着眼点の整理はできていた。引き続き、当初の計画通り、要素技術開発により得られるコスト削減効果と着眼点を具体化した結果をモデル系統にフィードバックすることで、既存の交流送電システムに対して、コスト削減割合 20% が得られる見込み。また、経済性評価を精緻化するため、既存のコスト計算データについても精査を行う。</p> <p>【3】要素技術開発の達成度にはばらつきが見られるので、最終目標達成に向けて、進捗の度合いにより研究を加速させるなど戦略的に推進することを望む。</p> <p>⇒分科会時点（平成 29 年 10 月）までに中間目標を達成済み（◎）と今年度中に中間目標を達成見込み（○）のものがあった。進捗確認をより密に行い、その度合いによっては加速することも含めた対応をする。</p> <p>【4】直流送電システム導入モデルのコスト面に関しては、交流送電システムに対する優位性を見通しを早期に立てることが重要である。</p> <p>⇒【2】に同じ</p>	
評価に関する事項	事前評価	2014 年度 事前評価実施 担当部 新エネルギー部
	中間評価	2017 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	2020 年度 事後評価実施 担当部 スマートコミュニティ部
3. 研究開発成果について	<p>1. 事業全体の成果</p> <p>1.1 システム開発</p> <p>【事業終了時点】</p> <p>中間評価後の研究開発により、想定されたモデル系統下における設備年間経費、発電機会損失、送変電損失の比較にて、既存の交流システムに対して 29% のコスト削減可能な直流送電システムのモデルを構築し、目標を達成した。また、本研究開発を通じて開発した技術をもとに、「多端子 HVDC の制御・保護の標準仕様書」を作成し、2019 年度中に NEDO ウェブサイトで公開した。また、標準仕様書案を英訳し、国際標準化を目指して関連する国際機関 IEC との議論を開始した。</p> <p>【中間評価時点】</p> <p>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系統の計画、設計、経済性評価を概算した結果、交流送電系統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。</p> <p>1.2 要素技術開発</p> <p>【事業終了時点】</p> <p>中間評価後の研究開発により、直流遮断機においては、10kV 原理検証モデルを製作し、想定した通り実現できることを検証した。さらに、NEDO の加速予算を活用し、40kV スケールモデルを製作して遮断実証を行った。海底ケーブルや洋上基礎等の他の要素技術開発においても、目標を達成している。詳細は、2. 研究開発テーマの成果に記載する。</p> <p>【中間評価時点】</p> <p>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。</p> <p>2. 研究開発テーマの成果</p> <p>2.1 研究開発項目 I 「システム開発」</p> <p>2.1.1 国内への洋上 WF 導入における前提条件の整理</p>	

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

### 【事業終了時点】

中間評価時の成果に加え、下記成果を得た。

洋上系統の計画・設計に先立ち、基本的な考え方や経済性評価方法を整理した。送電系統については4つのモデルケースを策定、集電系統については効率的な設備構成を設計した。

また、①直流/交流送電システムのコスト比較手法の開発、及び、②海洋環境を考慮した海底ケーブルルートのコスト最小化設計手法の開発を行い、それぞれの評価手法を確立した。更に、風車集電ケーブル最適配策設計手法を開発した。

多端子システムの実用化を目指し、海外先行事例をもとにコスト試算方法を整理。さらに、各要素技術開発によるコスト試算結果を反映し、経済性評価を実施した。その成果として、ループ系統を想定した2ケースで、20%コスト削減を達成した。

### 【中間評価時点】

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

### 【事業終了時点】

中間評価時の成果に加え、下記成果を得た。

洋上WF用の多端子(3端子と5端子)の直流送電システムを設計・提案し、多端子で運転・制御可能な上位制御を定め、諸条件を考慮した各端子および関係する計画値を算出する上位制御系の電力配分機能のフローチャートを定めた。

さらに、上記の直流送電システムの制御・保護機能を明確化し取りまとめた標準仕様書を作成し、同標準仕様書に基づき、PSCADの3端子モデル及びRTDSの5端子モデルを作成し、想定される運転や事故に対するシミュレーション検証を実施した。異社間接続可能な多端子直流送電システムの制御方式を構築した。

変換器交流側に発生する高調波の削減手法について、MMC型変換器で変調方式がPWMおよび各セルへの搬送波の与え方がphase shift変調の場合に、等価スイッチング周波数近傍に発生する高調波を、上アームと下アームで同じ搬送波を与えることで高調波を交流側電圧に発生させることや、逆位相の搬送波を与えることで高調波を直流側電圧に発生させるなど、高調波を交流側や直流側へ選択的に発生させることが可能となることがわかった。

直流送電線地絡時に交流側に回り込む電流については、従来の手法よりも簡便な解析手法を提案し、これを用いて解析した結果を示した。

なお、交流側から移行するサージ性過電圧については、本事業での検討対象がMMC型の交直変換器であり、変換器が有する1アームあたりのキャパシタンスが数十 $\mu$ Fオーダとなることから、数nFオーダとなる変換用変圧器の巻線間キャパシタンスとの静電容量分圧では、有意な過電圧が発生しないことを確認した。

### 【中間評価時点】

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、東芝エネルギーシステムズ、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端子システムモデルを作成し、多様な検証を行った。

500kV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

#### 【事業終了時点】

中間評価時の成果に加え、下記成果を得た。

開発した、ハイブリッド直流遮断器のアルゴリズムを用い、シミュレーションと10kV原理検証器、及び40kVスケールモデルを製作して試験を行い、動作原理を確認した。

制作した10kVハイブリッド直流遮断器で行った原理検証試験では、機械遮断部の高速電流遮断、機械断路部の耐アーク性、短い時間での絶縁回復、機械部を流れる主電流の半導体部への転流、半導体部による電流遮断と直流遮断器としての遮断耐電圧が、想定した通り実現できた。40kVスケールモデルでの試験では、検証試験の結果、初期の目標の遮断電流8kA以上、遮断時間5msを達成した。

今回の開発により提案するハイブリッド直流遮断器の直流電流遮断の動作原理が実証された。スケール試験は40kVであったが、半導体素子の多直列化と、機械断路部の多直列化による高電圧化により、直流電圧500kVに対応するハイブリッド直流遮断器の設計が可能になった。ハイブリッド直流遮断器は半導体を多く必要とするため、耐圧確保のための装置規模が大きくなる傾向があるが、半導体遮断部の部品点数を低減し、低コスト化を実現する多端子ハイブリッド直流遮断器を提案した。多端子ハイブリッド直流遮断器を本事業の5端子モデル系統（洋上3端子+陸上2端子）に適用すると、ハイブリッド方式に対し、約30%の機器コスト削減が見込まれることが明らかになった。

#### 【中間評価時点】

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

#### 【事業終了時点】

中間評価時の成果に加え、下記成果を得た。

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合わせ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した。

500kV級の超高压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た。接続の要素技術開発、ケーブルの製造、長期信頼性試験を実施した。その結果、長期信頼性試験後もケーブルに損傷はなく、有効な異径ケーブルの接続を実現した。別途実施のダイナミックレイティングの開発と合わせケーブルコストを20%削減が可能となった。

#### 【中間評価時点】

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

#### 【事業終了時点】

中間評価時の成果に加え、下記成果を得た。

サクシヨン基礎と従来形式の概略コスト比較することを目的に、サクシヨン基礎の建設コストを算出し設置水深、上部施設重量との関係について調査した。建設コストは上部構造重量や大きさにはあまり依存せず、設置水深に大きく依存することが明らかになった。また上部荷重を24000tと仮定したときの架台コストを比較したところ、新形式のサクシヨン基礎は従来形式のジャケット基礎の21%減となった。

サクシヨン基礎の繰返し波浪や地震力に対する長期安定性を評価することを目的に、繰返し波浪載荷実験を行った。その結果、繰返しによる地盤への影響は、いったん弱化するものの途中で繰返しによって地盤が締め固められ強くなる傾向がみられ、繰返し波浪に対する設計資料を得ることができた。また地震時液状化実験および再現解析から、地盤は液状化するが、スカート内は非排水状態を保ち地盤と同様に沈下する一方で、残留傾斜角は十分小さいことが明らかになった。

想定される洋上PF架台基礎におけるサクシヨン基礎と従来形式のコスト比較することを目的に、それぞれの基礎形式の設計および施工法検討し、コストを算出した。直流変電施設（施設重量10576t）の架台基礎において、着床式架台（水深50m）と浮体式架台（200m）のコスト比較において、着床式架台（水深50m）では、新形式（サクシヨン基礎）は従来形式（ジャケット基礎）の27%コスト減となり、浮体式架台（200m）では新形式（サクシヨンアンカー）は従来形式（重力式アンカー）の10%コスト減となった。

【中間評価時点】

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できる可能性が大きいことがわかった。このサクシヨ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、サクシヨ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。

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動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。

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。

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。

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。

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。

投稿論文	83件（うち査読付き 10件）
特許	「出願済み」 44件（うち外国出願 16件）
その他の外部発表 （プレス発表等）	18件

<p>4. 実用化・事業化の見通しについて</p>	<p>研究開発項目（Ⅰ）システム開発</p> <p>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。</p> <p>本事業の成果として、多端子HVDCの制御・保護の標準仕様書を作成し、また、想定モデルケースにおいては交流システムよりも、開発した直流システムの方がコスト面での優位性が示された。尚、本事業ではRTDSシミュレーションにより、5端子直流送電システムの制御・保護必要な要件を確認し、一定の成果を上げたが、実機を交えた検証までは到達していないなど課題も残る。本事業で明らかになった課題（下記①～③の3点）は、後継事業である、「多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発（2020-2023年）」にて、引き続き解決のための研究開発を行う。</p> <p>研究開発項目（Ⅱ）要素技術開発</p> <p>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。</p> <p>各事業者ごとに今後の課題とスケジュールを明記した。</p>	
<p>5. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>平成 27 年 3 月 制定</p>
	<p>変更履歴</p>	<p>—</p>