
「エネルギー消費の効率化等に資する我が国技術 の国際実証事業／直流送電システム向け自励式変 換器の実証事業（イタリア）」（事後評価）

（2016年度～2017年度 2年間）

実証テーマ概要（公開）

東芝エネルギーシステムズ株式会社
NEDO（省エネルギー部・国際部）

2018年10月16日

目次

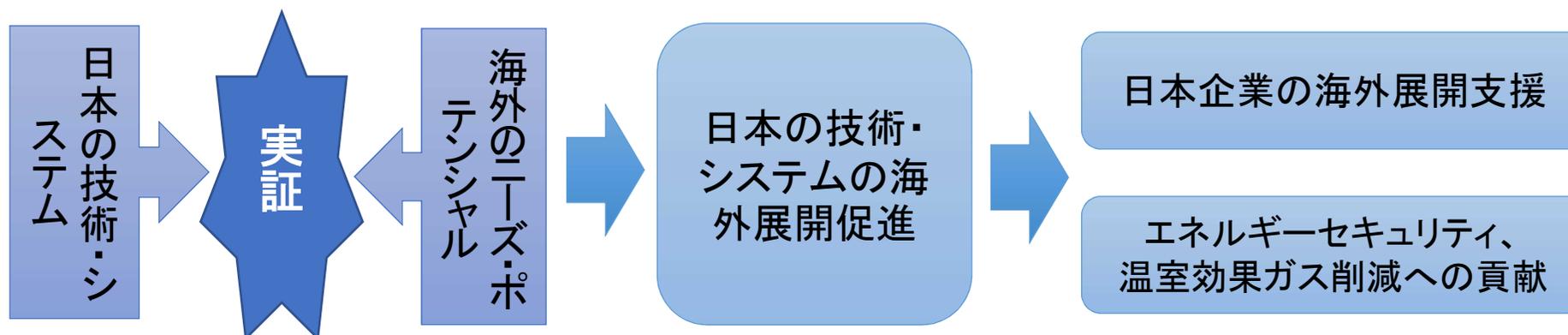
1. 事業の位置付け・必要性
 - 1-1-1. 目的
 - 1-1-2. 事業の意義
 - 1-2-1. 政策的必要性
 - 1-3-1. NEDO関与の必要性
2. 実証事業マネジメント
 - 2-1-1. 相手国との関係構築
 - 2-2-1. 実証体制
 - 2-2-2. 役割分担
 - 2-3-1. 事業内容・計画
3. 実証事業成果
 - 3-1-1. 事業の成果・達成状況
4. 事業成果の普及可能性
 - 4-1-1. 成果の競争力
 - 4-2-1. 普及体制
 - 4-3-1. ビジネスモデル
 - 4-4-1. 政策形成・支援措置
 - 4-5-1. 市場規模、省エネ・CO₂削減効果

1. 事業の位置付け・必要性(1-1. 意義)

◆ 1-1-1. 目的(基本計画から抜粋)

- 我が国が強みを有するエネルギー技術・システムを対象に、相手国政府・公的機関等との協力の下、海外の環境下において技術・システムの有効性を実証し、民間企業による普及につなげる。
- これにより、海外のエネルギー消費の抑制を通じた我が国のエネルギー安全保障の確保に資するとともに、温室効果ガスの排出削減を通じた地球温暖化問題の解決に寄与する。

国際エネルギー実証のイメージ

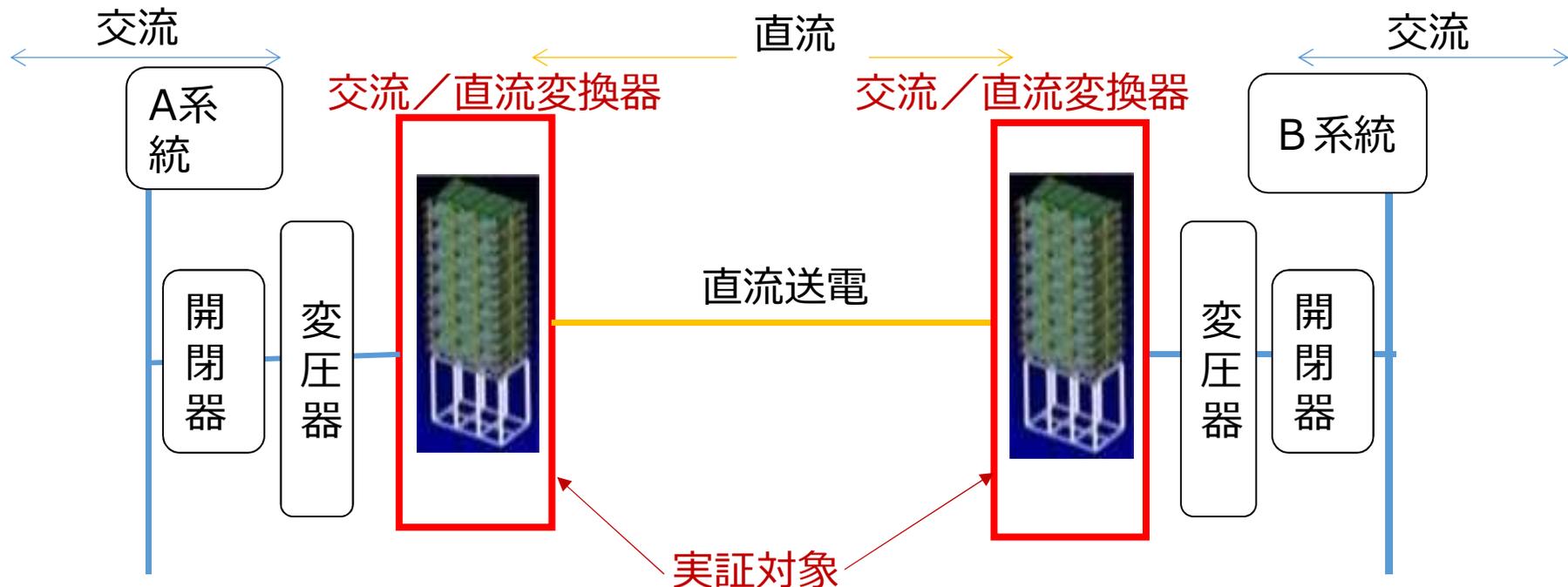


1. 事業の位置付け・必要性(1-1. 意義)

◆ 1-1-2. 事業の意義

<背景 高圧直流送電(HVDC)システムの特徴 >

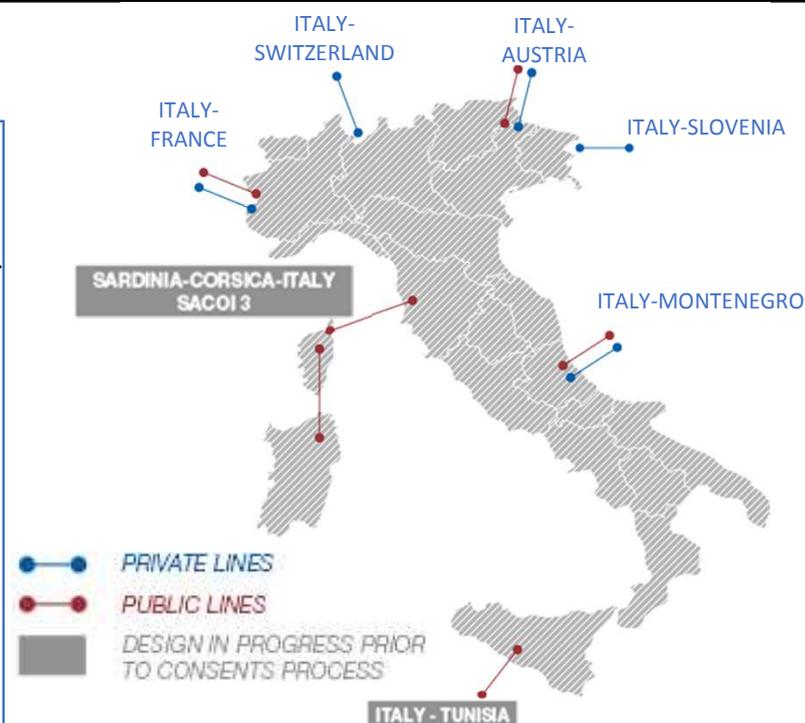
- 高圧直流送電 (HVDC) システムは、高圧交流送電システムと比較し、送電ロスが大きい海底ケーブル送電を含む長距離送電に適している。
- 交流/直流変換器 (以下、変換器) はHVDCシステムを支える技術要素の一つ。大別し他励式と自励式があり、自励式には従来型の2レベル型と新型のモジュラーマルチレベル型 (以下、MMC) がある。
- MMC自励式変換器は、出力変動が大きい再生可能エネルギー電源かつ高圧に対し有効であり、欧州を中心として導入拡大が見込まれている。



1. 事業の位置付け・必要性(1-1. 意義)

◆ 1-1-2. 事業の意義

- 世界規模のCO₂削減に向けて、政府間の協力が重要であり、その一環としてNEDO実証事業を通じ、新しい技術導入のきっかけを作ることが重要。
- 欧州を含め世界的に既設の変換器は他励式変換器がメインであり、MMC自励式変換器の導入実績が少ないのが現状である。
- イタリアはエネルギーの8割以上を輸入に依存しているため、電力の安定供給及び再生可能エネルギー拡大に向け、MMC自励式変換器を用いたプロジェクトが複数検討されており、関心が高い。



イタリアの国際直流連系^[1]

本実証事業の意義

- HVDCシステムへの関心が高いイタリアにおいて、MMC自励式変換器の適用性を検証し、実証事業の実績を作り、それを足がかりにイタリアを含む欧州諸国への技術普及を図る。
- 技術普及により省エネルギー効果、CO₂排出削減効果、再生可能エネルギーの普及に貢献する。

[1] International energy context , Terna S.p.A, <https://www.terna.it/en-gb/chi-siamo/contestoenergeticointernazionale.aspx>

1. 事業の位置付け・必要性(1-2. 政策的必要性)

◆ 1-2-1. 政策的必要性

<欧州における政策>

■ 「エネルギーロードマップ2050」 (欧州委員会)

- ◆ 2050年までに温室効果ガス排出量
1990年比80%削減の政策目標。
- ◆ エネルギー改革として、
 - 2030年に再生可能エネルギー源の割合
約30%を目標。
 - 2050年までに再生可能エネルギー源が
最大比率の供給技術となることを目標。

上記の欧州政策の動きを受け、自励式変換器技術の適用可能性が拡大しつつある。

<日本における政策>

- 「設計、製造から維持・管理まで含めた総合的な「システム」の海外展開・輸出推進政策」により、積極的な海外展開を支援。

<イタリアにおける政策>

■ 「トリプル20」の達成目標 「国家エネルギー戦略」においてEU「トリプル20」目標超過の達成を掲げている。

- ◆ 2020年温室効果ガス排出を1999年比で
20%削減。
- ◆ 最終エネルギー消費に占める再エネの
割合を20%まで引き上げる。
- ◆ エネルギー消費量を20%削減。

■ 国際間連系の加速

上記のイタリア政策の動きを受け、自励式変換器技術の適用可能性が拡大しつつある。

MMC自励式変換器の導入は欧州およびイタリアにおける政策目標の達成に貢献できる。

1. 事業の位置付け・必要性(1-3. NEDO関与の必要性)

◆ 1-3-1. NEDO関与の必要性

<管轄省庁との連携>

- 電力事業は安定供給及び安全保障の面から、政府主導による事業推進が必要とされる。
- MOU※を締結することにより、相手国の管轄官庁から必要な協力を得ながら実証事業を推進することが必要。

※MOU:NEDOと相手国政府又は公的機関が締結する実証内容、事業スケジュール、業務分担等を定める実施協定書

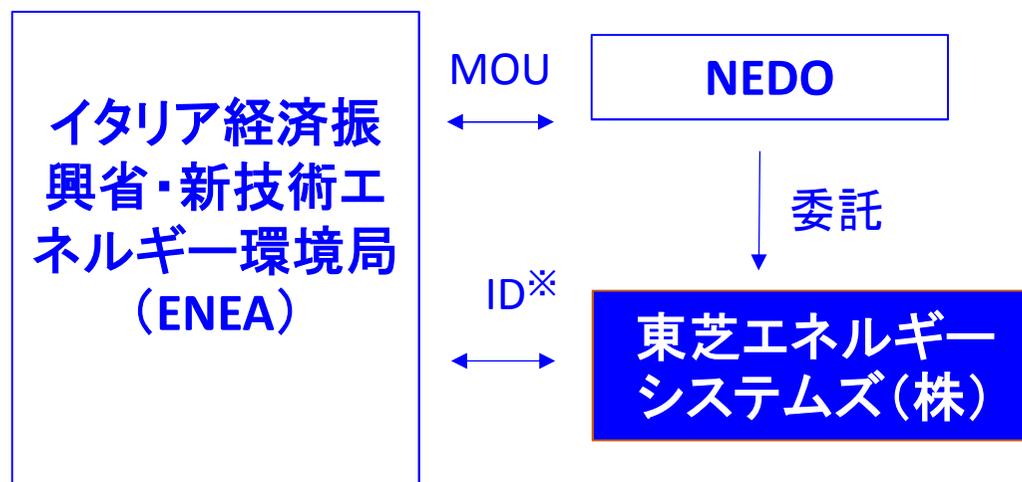
2. 実証事業マネジメント(2-1. 相手との関係構築／2実施体制)

◆ 2-1-1. 相手国との関係構築／実証体制の妥当性

■ イタリア経済振興省の傘下であり、エネルギー関連技術等の研究機関である新技術エネルギー環境局（ENEА）とMOU及びIDを締結。

◆ 2013年7月に東芝電力流通システム欧州社がENEАと共同普及活動等に関する協業の合意書を締結。

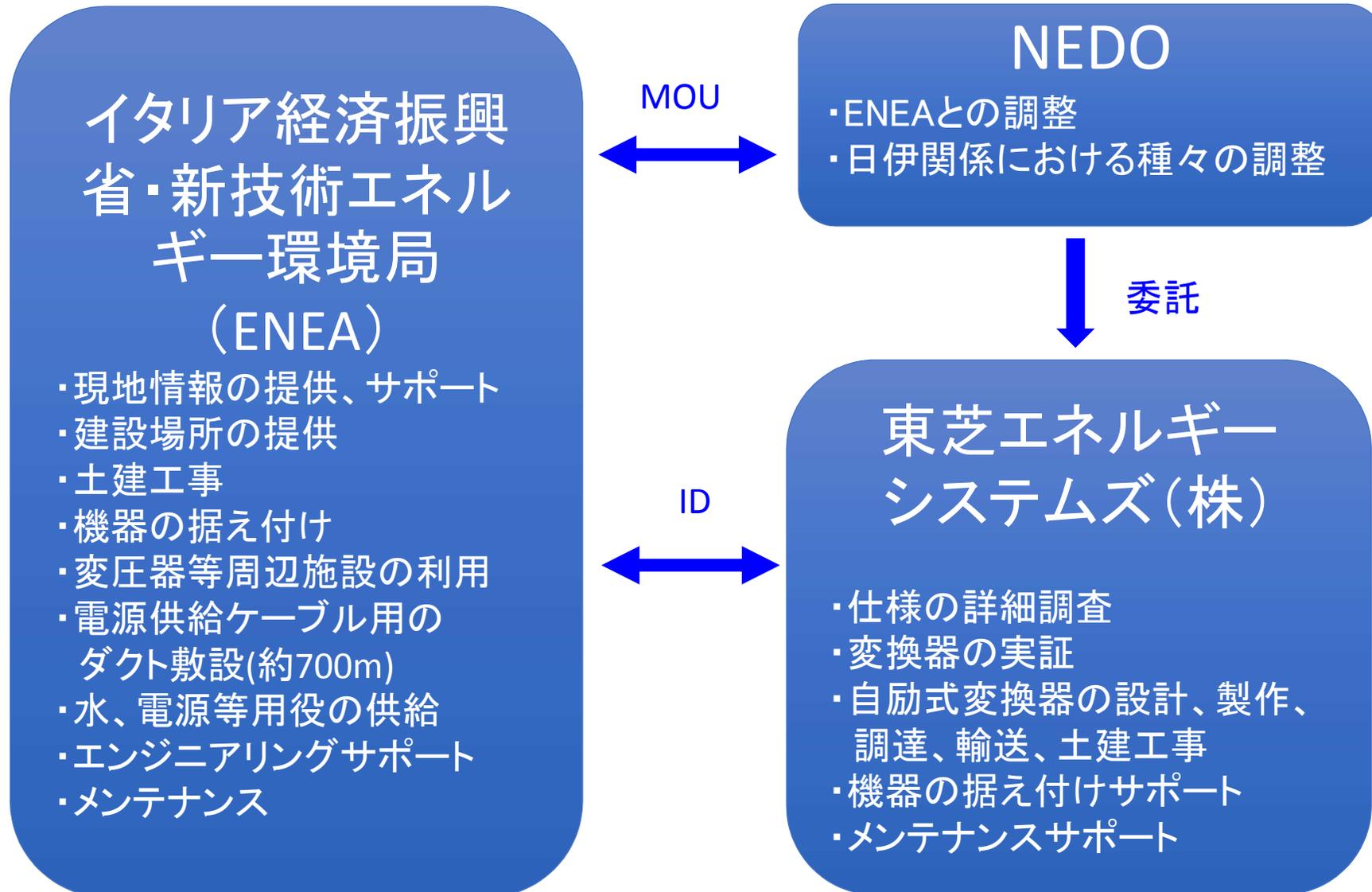
◆ ENEАの研究施設（Casaccia研究所）にて、実証に必要な設備である変圧器を活用。



※ID: 委託先である日本企業と現地サイトが締結する実証事業の細則を定める協定付属書

2. 実証事業マネジメント(2-2. 実施体制の妥当性)

◆ 2-2-2. 役割分担



2. 実証事業マネジメント(2-3. 事業内容・計画の妥当性)

◆ 2-3-1. 事業内容・計画

年度	27FY	28FY	29FY
計画			
実行			
費用	6百万円	570百万円	312百万円

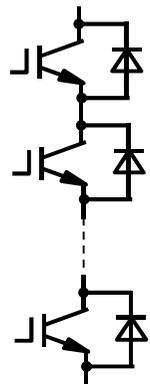
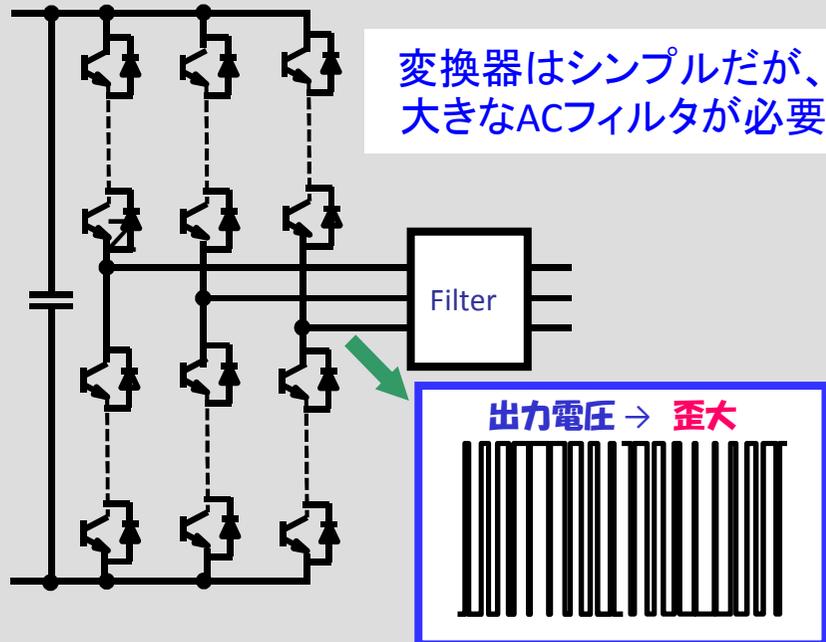
※付加価値税(VAT)の免除への対応および費用等負担の協議が長期化したため、ENEAと東芝とのID締結が遅延。NEDOと東芝は2016年11月にENEAを訪問し12月までに締結協力の約束を取り付けた。

※事業期間内に本事業を完結させるべく、工程をレビューし、上記のとおり計画変更を行った。

3. 実証事業成果(3-1. 事業内容・計画の達成状況と成果の意義)

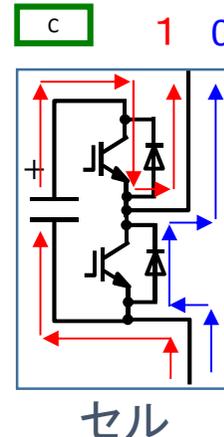
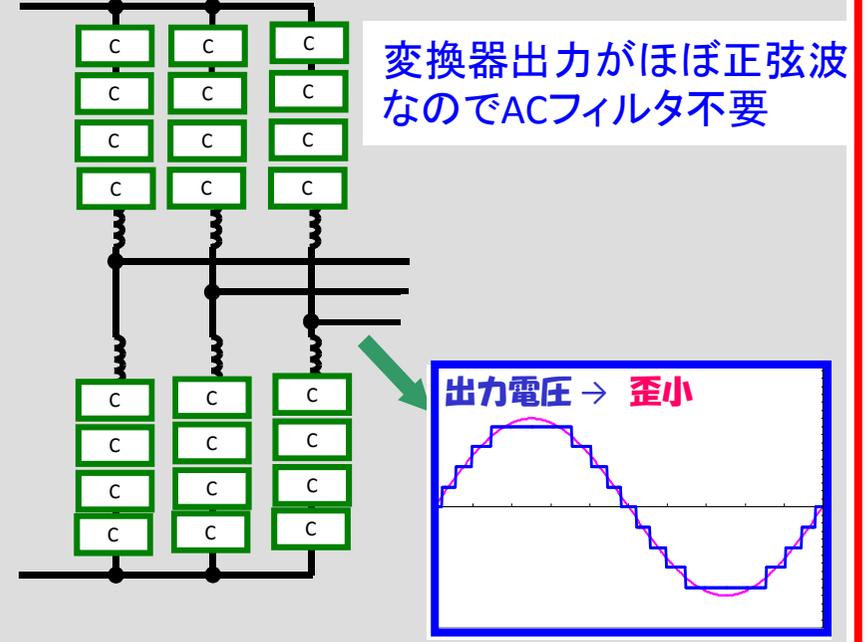
2レベル変換器(従来回路)とMMC変換器

2レベル変換器



IGBT素子多直列
同時スイッチングが必要
⇒高耐圧化困難

モジュラーマルチレベル変換器(MMC)

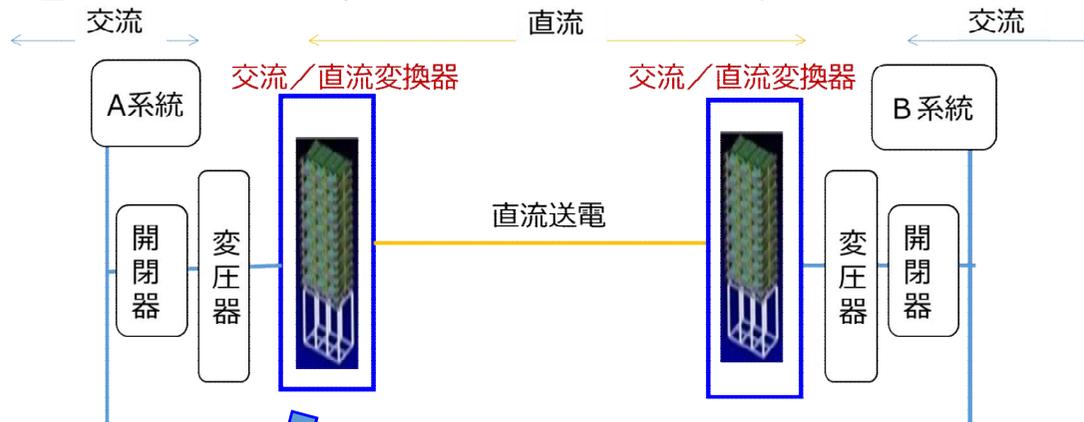


1と0の2値が出せる
チョッパセルの直列多重

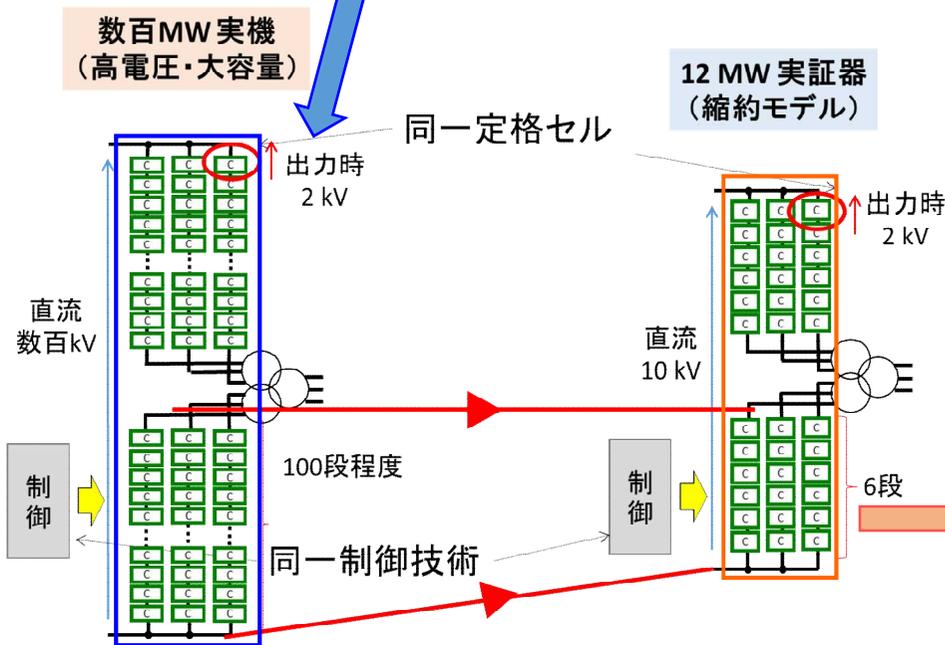
各セルの出力を1⇔0切替
タイミングをずらすことで階段状
のマルチレベルを合成
⇒同時スイッチング不要
⇒ACフィルタ不要

3. 実証事業成果(3-1. 事業内容・計画の達成状況と成果の意義)

直流送電システム(実器)の構成概要

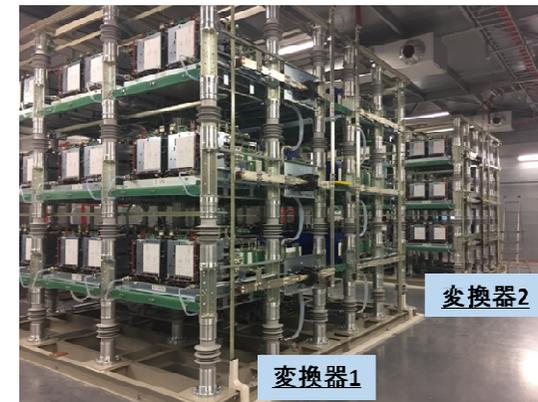


実証器構成



実証器の特徴

- ✓ 実器と同じセルを使用
- ✓ 実器と同じ制御を使用



実器の実証は高コストとなることから1/25縮約モデルで検証

MMC変換器 実証器

3. 実証事業成果(3-1. 事業内容・計画の達成状況と成果の意義)

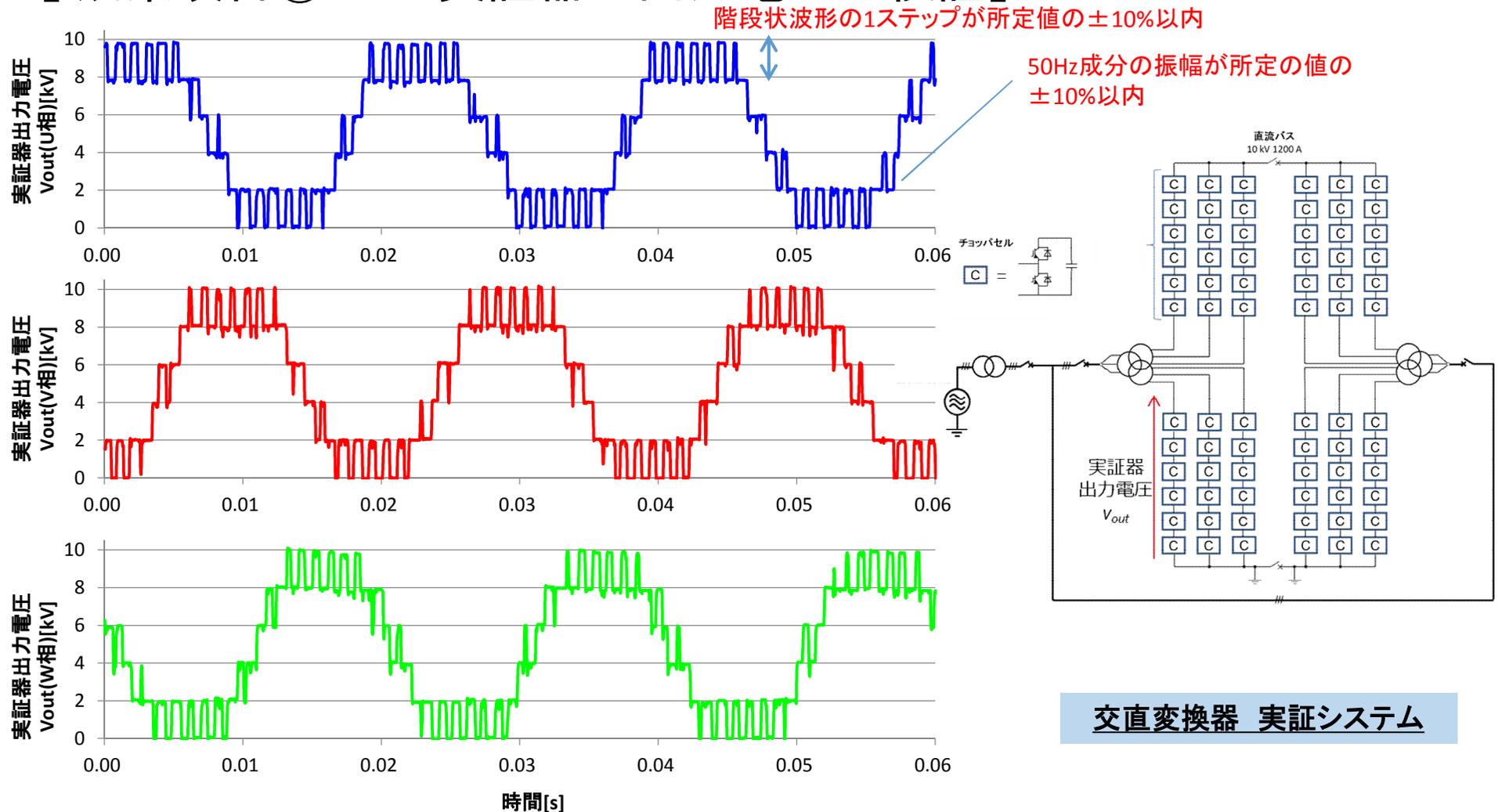
◆ 3-1-1. 事業の成果・達成状況

目標と成果			
項目	目標	成果	達成度
①MMC実証器の出力電圧の検証	MMC実証器の出力電圧が管理値内(所定の値から誤差10%以内)となることを確認する。	MMC実証器の出力電圧において、階段状波形のステップ電圧幅および50Hz成分の振幅が管理値内に収まっていることが確認できた。	○
②MMC実証器の低損失動作の検証	MMC実証器が、損失を低減可能な低いスイッチング周波数(従来比1/6)で動作可能であることを確認する。	目標通りの低いスイッチング周波数で実証できた。同等の高調波を出力する2レベル変換器と比較して約1/3のスイッチング損失となった。	○
③省エネ効果の検証	将来実システムに適用した場合における省エネ効果を検証する。	仮にイタリアSACOI*の更新に本技術を適用して現状の直流電圧±200kVから±320kVまで高電圧化を実現すると、送電損失を約46.8%削減できるという試算結果となった。	○

*イタリアーコルシカ島ーサルデニア島直流連系(SACOI)

3. 実証事業成果(3-1. 事業内容・計画の達成状況と成果の意義)

【成果項目①MMC実証器の出力電圧の検証】



交直変換器実証器 出力電圧波形(実証器運転状態)

理論通りのマルチレベル電圧波形を出力することができた

3. 実証事業成果(3-1. 事業内容・計画の達成状況と成果の意義)

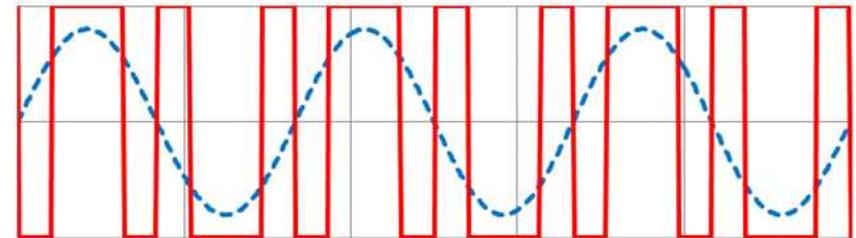
【成果項目②MMC実証器の低損失動作の検証】

位相シフト制御による高調波低減効果例
(1アーム当たり2セルの場合)

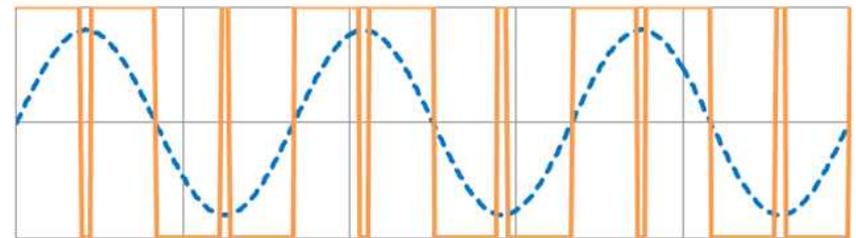
MMCはアーム内でセルのスイッチングの
タイミングをずらす位相シフト制御で、
N倍(*)の周波数で動作させる2レベル変換器
と同程度の高調波出力となる

※Nは1アームあたりのセル数

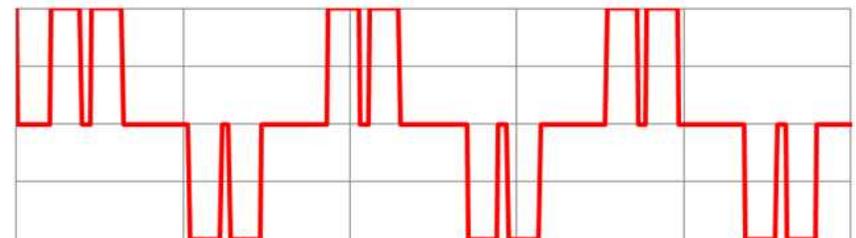
--- 出力電圧指令値 --- セル出力電圧1



--- 出力電圧指令値 --- セル出力電圧2



— セル1, 2合計電圧



↓
実証器と同等の高調波出力の
2レベル変換器と比較して
スイッチング周波数は約1/6

↓
スイッチング周波数, 素子数に比例する
スイッチング損失は約1/3

※MMCは素子数が約2倍のため

低いスイッチング周波数で動作させることで損失を低減できた

3. 実証事業成果(3-1. 事業内容・計画の達成状況と成果の意義)

【成果項目③省エネ効果の検証】

省エネ・CO₂削減効果試算条件

2レベル変換器とMMCで同じ600MWを送電する

送電損失は電圧の2乗に反比例

➡ MMCは高電圧化による送電損失が低減

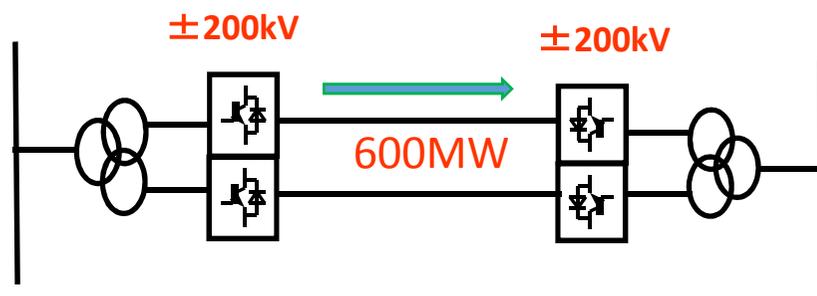
$$\text{送電線損失 } P_{loss} = \frac{RP^2}{V^2}$$

R: 送電線抵抗

P: 送電電力

V: 直流電圧

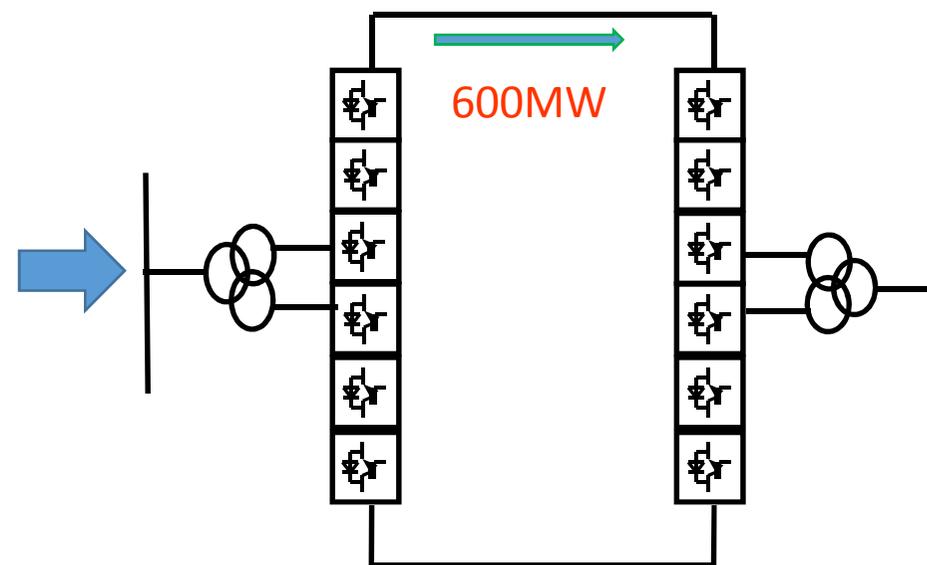
2レベル変換器



MMC自励式変換器

±320kV

±320kV

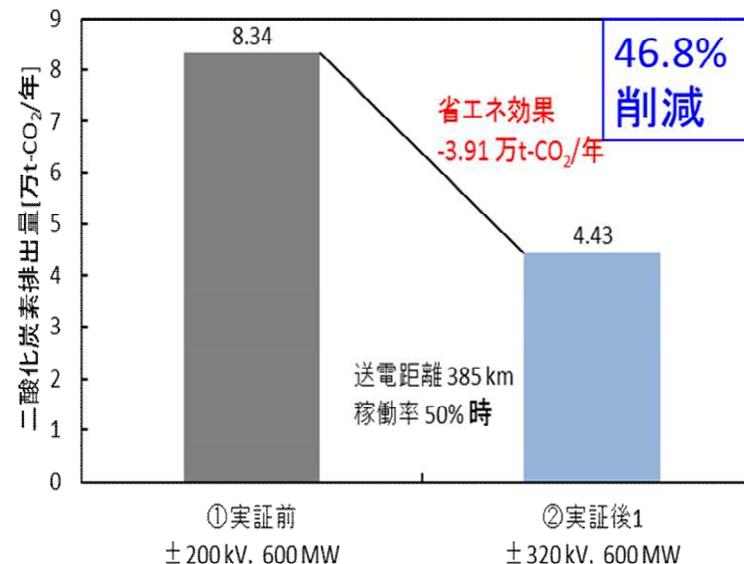
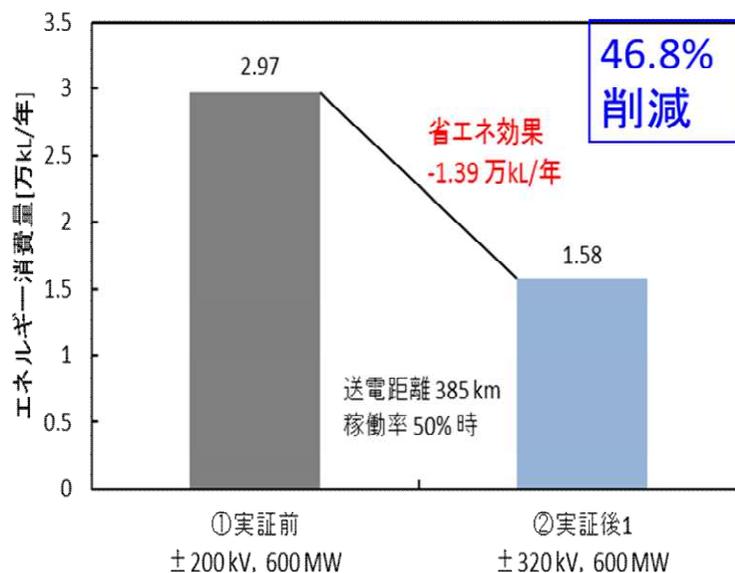


3. 実証事業成果(3-1. 事業内容・計画の達成状況と成果の意義)

【成果項目③省エネ効果の検証】

省エネ・CO₂削減効果試算結果(イタリアSACOIへの適用を想定)

項目	試算条件
送電電力	双極600 MW
稼働率	50%
線路抵抗	$0.01 \Omega/\text{km} \times 385\text{km} \times 2 = 7.7 \Omega$
変換器損失	1.5%(2レベル変換器), 1.0%(MMC変換器)
二酸化炭素排出原単位	0.539kg- CO ₂ /kWh
エネルギー消費量原油換算原単位	0.0192万kL/GWh



2レベル変換器とMMC変換器における変換器, 送電線エネルギー消費量(石油換算)

MMC変換器適用により46.8%の省エネ化を実現

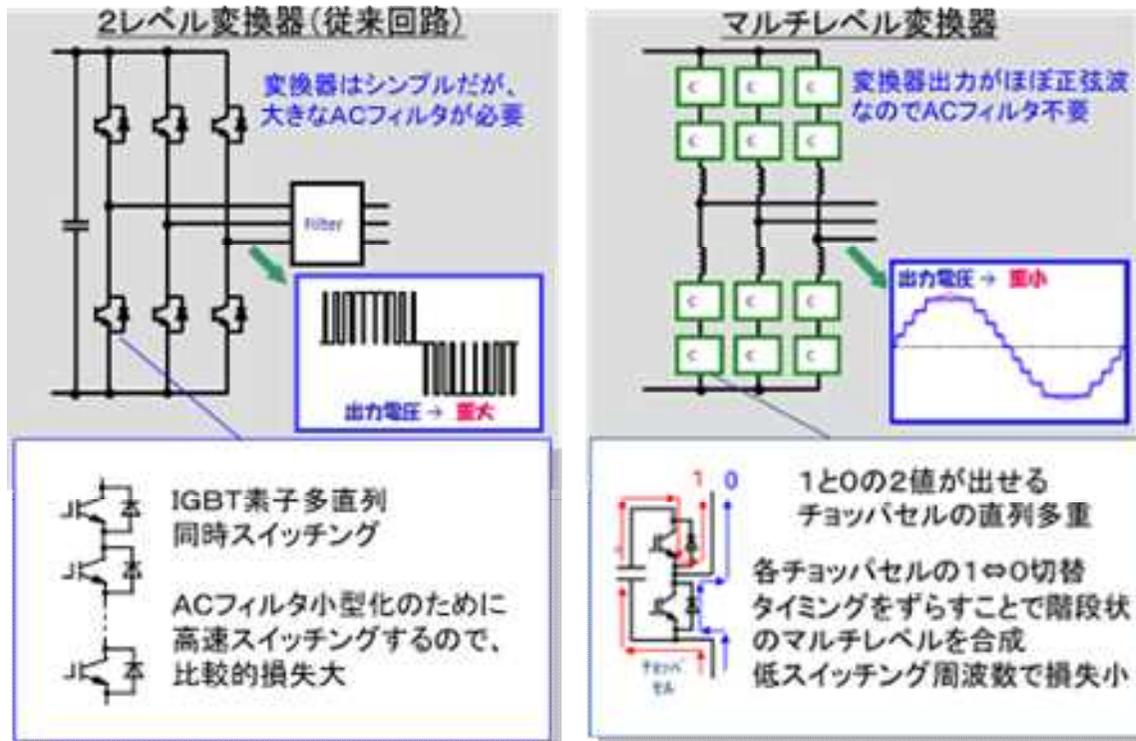
4. 事業成果の普及可能性(4-1. 事業成果の競争力)

◆ 4-1-1. 成果の競争力

実証技術(MMC変換器)の競争力

技術競争力 -フィルタレスのシステムを提供-

- 当社MMC(マルチレベル変換器)では高調波の発生を抑制し、基本的にフィルタレスのシステムとすることが可能 ⇒ 省スペース、低コスト化
- 2レベル変換器やCTL(Cascaded two level)方式*1に対し、高調波発生量の低減に有利



*1: CTL(MMC)方式:
素子直列化により段数を減らしたMMC
チョップセルの数が少なくなるため、
階段状の波形が粗くなる。

4. 事業成果の普及可能性(4-1. 事業成果の競争力)

◆ 4-1-1. 成果の競争力

東芝製MMC変換器の競争力

技術競争力 -運転継続性に優れた圧接形IEGTの採用-

当社は半導体素子であるIEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)を独自開発し、圧接型のIEGTをMMC変換器に適用

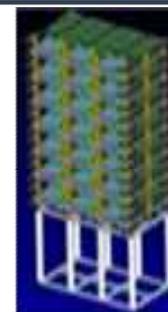
- 素子故障時に短絡するため健全素子にて運転継続可能
- 低いオン電圧(低ロス)の実現
- 回路構成をシンプル化し故障率の低減を図る
- 電力・鉄道インフラ向けで多数の実績があり



素子：東芝独自のIEGT



モジュール：東芝独自回路方式



ハルブ：自励式変換器

東芝独自の自励式変換器

4. 事業成果の普及可能性(4-1. 事業成果の競争力)

◆ 4-1-1. 成果の競争力

東芝製MMC変換器の競争力

技術競争力 -システムの高い品質-

当社納入変換器システム(下表赤線部)

System	Year Commissioned	Maximum Continuous Capacity MW	Energy Availability percent		Energy Utilization percent (1)		Forced Energy Unavailability percent (2)		Scheduled Energy Unavailability percent	
			2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Skagerrak 1 & 2	1976/77	550	98.2	97.4	49.0	54.6	0.02	0.25	1.77	2.34
Skagerrak 3	1993	500	97.8	97.1	65.0	68.1	0.56	1.13	1.61	1.78
Vancouver Island Pole 2	1977/79	476	89.0	-	37.4	-	0.70	-	10.3	-
Square Butte	1977	550	95.6	74.8	77.9	59.0	0.65	6.21	3.71	18.0
Shin-Shinano 1	1977	300	88.8	97.7	2.2	0.8	0.00	0.00	11.2	2.34
Shin-Shinano 2	1992	300	98.2	98.0	35.6	38.9	0.00	0.00	1.83	1.99
Nelson River BP1	1973/04	1855	97.7	95.2	75.5	72.2	0.59	1.16	1.70	3.63
Nelson River BP2	1978/83	2000	97.2	94.7	75.5	74.1	0.67	2.08	2.12	3.26
Hokkaido-Honshu	1979/93	600	97.0	97.3	14.2	20.1	0.07	0.19	2.89	2.46
Gotland 2 & 3	1983/87	320	99.4	99.7	25.0	25.2	0.00	0.04	0.57	0.30
Itaipu BP1	1985/86	3150	90.9	96.9	72.4	77.6	1.85	0.78	7.21	2.33
Itaipu BP2	1985/86	3150	95.4	97.5	72.4	77.6	0.33	0.02	4.22	2.46
Highgate	1985	200	96.6	97.6	89.0	84.5	0.15	0.10	3.23	2.34
Virginia Smith	1988	200	86.2	96.8	33.9	38.1	1.47	1.28	12.4	1.87
Kontli Skau 1	2005	250	-	12.5	-	6.3	-	87.5	-	0.00
Vindhyachal	1989	500	98.7	99.3	40.6	45.6	0.08	0.03	1.22	0.66
McNeill	1989	150	96.0	86.6	51.1	28.0	0.18	0.96	3.80	12.4
Fennoskan	1990	500	88.6	96.0	57.5	69.4	0.44	1.71	11.0	2.24
Rihand-Dadri	1991	1650	97.2	96.3	79.2	67.7	0.06	0.97	2.73	2.67
SACOI (4)	1992	300/300/50	90.0	76.1	46.6	68.3	0.28	0.13	7.52	7.23
New Zealand Pole 2	1992	500	97.1	97.9	69.1	46.7	0.78	0.06	1.71	1.98
Sakuma	1965/93	300	97.0	97.2	0.0	0.4	0.00	0.00	2.99	2.80
Kontek	1998	600	91.0	91.1	58.5	64.6	0.20	0.14	8.85	8.76
Chandrapur	1998	1000	96.2	97.0	39.3	65.5	1.90	1.46	1.90	1.51
Minami-Fukumitsu	1999	300	96.7	94.9	88.5	90.0	0.00	0.00	3.25	5.06
SwePol	2000	600	97.0	93.6	31.4	23.9	0.49	4.11	2.50	2.30
Vizag I East-South	2000	500	99.6	99.8	42.4	32.3	0.04	0.00	0.37	0.19
Vizag II East-South	2005	500	99.7	99.8	36.1	20.2	0.01	0.00	0.32	0.17
Kii Channel	2000	1400	94.5	95.0	42.7	73.7	0.00	0.00	5.47	4.98
Grita	2001	500	84.1	71.7	72.2	54.3	8.44	1.47	7.43	26.7
Talcher-Kolar	2003	2000	98.4	99.6	62.1	87.6	0.33	0.20	1.08	0.17
Sasaram	2003	500	99.4	100.0	2.9	3.7	0.00	0.00	0.56	0.00
Higashi-Shimizu	2006	300	94.5	99.9	1.2	4.1	0.00	0.00	5.46	0.14
Basslink	2006	500	98.8	97.1	63.1	58.4	0.04	2.71	1.18	0.21
NorNed	2008	700	93.0	74.6	65.7	58.5	1.05	0.74	0.73	1.59
Storebaelt	2010	600	-	99.7	-	87.9	-	0.00	-	0.33

(1) Based on maximum continuous capacity

(2) Converter station outages only

(3) Three terminal monopole system

東芝納入変換器システム

➡ 故障率: 0%~0.2%

■ 海外メーカーに比べて故障率は低く信頼性が高い。

■ 変換器の設計・製作ノウハウと、多数の実績をもち、高い品質管理による安定的な品質を確保できているため、MMC変換器においても、低故障率が見込める。

(出典: CIGRE 2012 「A Survey of the Reliability of HVDC System throughout the World During 2009-2010」)

4. 事業成果の普及可能性(4-2. 普及体制)

◆ 4-2-1. 普及体制

欧州イタリアでは当社現地法人 東芝電力流通システム欧州社(TTDE)を拠点として展開。当社海外初HVDC案件としてイタリアとモンテネグロの国家間を連系するHVDC(他励式変換器を適用)を受注しており、現在プロジェクト進行中。

海外EPC経験とネットワークを生かした現地体制を構築し、普及を進める。

- 現地法人の販売ネットワークの活用
- 東芝グループ内での製造・技術・販売の連携
- 電力会社との共同技術検討を推進
 - ➡ イタリア送電会社と欧州BEST PATHSプロジェクトに共同参画
- 学会等におけるプロモーション活動

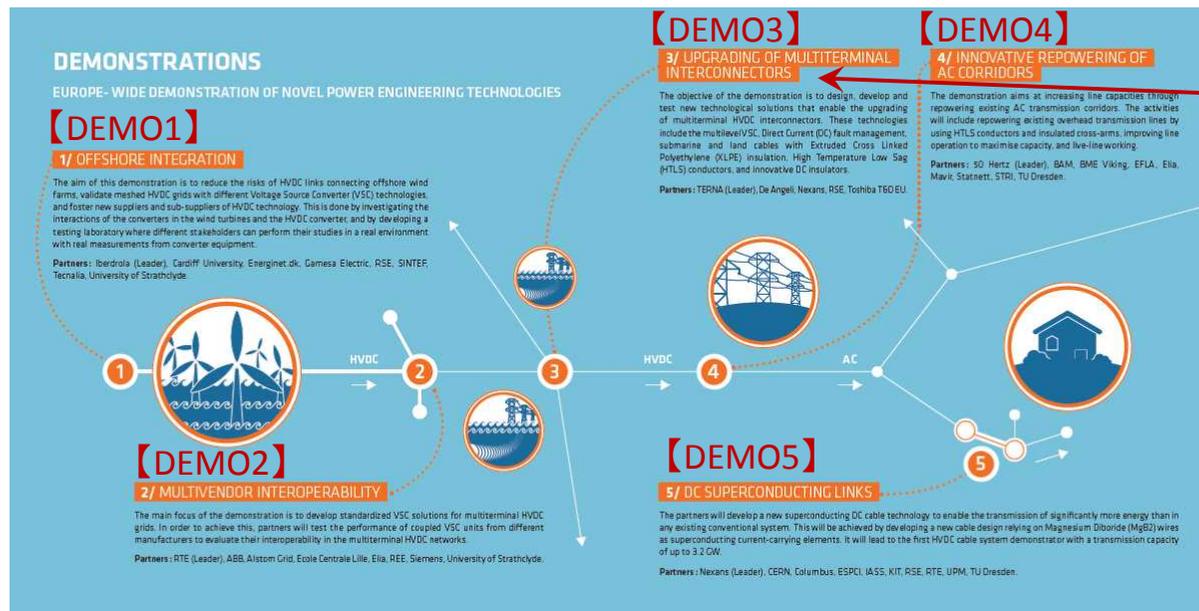
4. 事業成果の普及可能性(4-2. 普及体制)

◆ 4-2-1. 普及体制

【BEST PATHSプロジェクト】

欧州の電力分野全般にかかる各主要企業、研究機関等約40機関が5つのDEMOパックに分かれ大規模なDEMOを行う。

洋上風力発電等の有益性・実現性を評価し欧州の電力問題解決に寄与する。



【DEMO3】

TTDEを含めた5社が参加
(リーダー: イタリア送電会社TERNA)

BEST PATHSプロジェクトでは
系統連系試験等による直流送電
システム評価を実施。
TERNAからポジティブな評価を受けた。

BEST PATHSの5つのDEMOパック^[2]

[2] Best Paths Brochure, <http://www.bestpaths-project.eu/en/publications>, 2015

4. 事業成果の普及可能性(4-3. ビジネスモデル)

◆ ビジネスプラン

本実証事業の実績をもとに、欧州を中心とした直流連系設備や洋上・多端子直流送電システム等の各計画の要求仕様・スケジュール等を明らかにし、個別案件に向けた展開を図る。

【ビジネスプラン】

2017年度	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025～
実証事業								
	技術提案活動			<ul style="list-style-type: none"> ・電力会社・機関等にアプローチ ・学会・展示会によるコンタクト 				
		受注に向けた営業活動			<ul style="list-style-type: none"> ・案件スペック調査 ・客先ニーズ把握と課題解決検討 ・システムの客先提案 ・将来の増設・新規計画を収集し顧客ターゲットを絞る 			
			<ul style="list-style-type: none"> ・事前資格審査 ・入札 ・受注 ・契約 	個別案件への展開(欧州案件、国内案件)				

4. 事業成果の普及可能性(4-3. ビジネスモデル)

◆ 4-3-1. ビジネスプラン

【直近の技術PR活動】

PR場所	期間	概要
電気学会D部門大会	2018年8月29日	イタリア実証器について発表(2件)
CIGRE 2018 パリ大会	2018年8月28日~31日	イタリアVSC実証概要 パネル紹介



CIGRE2018 パリ大会
東芝展示ブース



CIGRE2018 パリ大会
イタリアVSC実証概要紹介

参考資料:エネルギー消費量・二酸化炭素排出量 算出根拠

実証前と実証後のエネルギー消費量・二酸化炭素排出量

【実証前条件による試算】

- 実証前：定格600 MW，直流電圧±200 kV，稼働率50%を想定
- 送電電力量 2.47 TWh/年
$$= (600 \text{ MW} - 600 \text{ MW} \times 0.015 \times 2 - 7.7 \Omega \times (600 \text{ MW}/400 \text{ kV})^2) \times 24 \text{時間} \times 365 \text{日} \times 0.50 \times 10^{-6}$$
- エネルギー消費量 2.97 万kL/年
$$= (600 \text{ MW} \times 0.015 \times 2 + 7.7 \Omega \times (600 \text{ MW}/400 \text{ kV})^2) \times 24 \text{時間} \times 365 \text{日} \times 0.50 \times 0.0192 \text{ 万kL/GWh} \times 10^{-3}$$
- 二酸化炭素排出量 8.34 万t-CO₂/年
$$= (600 \text{ MW} \times 0.015 \times 2 + 7.7 \Omega \times (600 \text{ MW}/400 \text{ kV})^2) \times 24 \text{時間} \times 365 \text{日} \times 0.50 \times 0.539 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh} \times 10^{-4}$$

【実証後条件による試算】

電力損失は電圧の2乗に反比例する。MMC方式自励式変換器は高電圧化による送電損失が低減するため、省エネ効果が見込める。また、本実証により適用するMMC方式自励式変換器の損失は1%程度まで低減できると仮定し、簡単のため、送電側MMCと受電側MMCで等しく定格電力600 MWの1%の損失が発生するものとして計算する。

- 実証後1：定格600 MW，直流電圧±320 kV，稼働率50%を想定
- 送電電力量 2.55 TWh/年
$$= (600 \text{ MW} - 600 \text{ MW} \times 0.01 \times 2 - 7.7 \Omega \times (600 \text{ MW}/640 \text{ kV})^2) \times 24 \text{時間} \times 365 \text{日} \times 0.50 \times 10^{-6}$$
- エネルギー消費量 1.58 万kL/年
$$= (600 \text{ MW} \times 0.01 \times 2 + 7.7 \Omega \times (600 \text{ MW}/640 \text{ kV})^2) \times 24 \text{時間} \times 365 \text{日} \times 0.50 \times 0.0192 \text{ 万kL/GWh} \times 10^{-3}$$
- 二酸化炭素排出量 4.43 万t-CO₂/年
$$= (600 \text{ MW} \times 0.01 \times 2 + 7.7 \Omega \times (600 \text{ MW}/640 \text{ kV})^2) \times 24 \text{時間} \times 365 \text{日} \times 0.50 \times 0.539 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh} \times 10^{-4}$$